

# I.알루미늄 재료기술



## 1.개요

### 1.1.알루미늄 원광석(原鑛石,ore)

지각 구성원소 중 알루미늄은 8.2%로 산소 49.5% 규소 24.5%에 이어 세번째로 많으며, 대부분의 암석에는 반드시 알루미늄이 함유되어 있다. 그러나 대부분은 장석(長石), 운모(雲母), 빙정석(氷晶石)·반토(礬土)·도토(陶土) 등이 있으며 산화물로는 루비(홍옥)·사파이어(청옥)·강옥(鋼玉:코런덤) 등 보석도 많다. 은백색의 부드러운 금속으로 전성(展性)·연성(延性)이 커서 박(箔)이나 철사로 만들 수 있다. 성질은 순도에 따라 다르며 전기의 양도체이며 비저항은 구리의 약 1.6배이다. 비중으로 보아 전형적인 경금속이다. 공기 중에 방치하면 산화물의 박막(薄膜)을 생성하여 광택을 잃지만 내부까지 침식되지는 않는다. 공기 중에서 녹는점 가까이 가열하면 흰 빛을 내며 연소하여 산화알루미늄이 된다. 이때 높은 온도가 되므로 분말을 써서 금속의 야금(冶金)이나 용접을 한다. 질소·황·탄소 등과 직접 화합하여 질소화물·황화물·탄화물이 되며, 할로겐과도 작용하여 염화물·브롬화물 등을 만든다. 알루미늄 제조용 원료로 이용되고 있는 것은 알루미늄이 함유(含水) 알루미늄의 형태로 존재하는 보크사이트이다. 보크사이트는 1821년 프랑스 Les Baux 지방에서 최초로 발견되어 그 이름을 그 산지(產地)명을 따서 보크사이트(Bauxite)라고 명명되었다. 보크사이트의 주성분은  $Al_2O_3$ (46~59%),  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ 이다. 알루미늄(alumina) :  $Al_2O_3$  를 주성분으로 하는 광물의 일종으로서 연마제나 내화물 등에 널리 사용되고 있다. 보크사이트를 알칼리용액에 용해하여 알루미늄을 추출, 분리한다. 알루미늄에 함유된 불순물은 개략적으로  $Fe_2O_3$ (0.02%),  $SiO_2$ (0.02%),  $TiO_2$ (0.004%),  $CaO$ (0.04%),  $Na_2O$ (0.05%), 기타 함유 알루미늄 존재 : 암석 중 지하수가 침투하기 쉬운 곳, 지형의 기복이 적은 구릉지, 해저화산의 열과 해수의 작용에 의해 암석의 변질과정에서 생긴다.

### 1.2.전세계 보크사이트 생산량과 매장량(2012년 기준)

(단위:1,000톤)

국가	호주	기니	중국	자메이카	브라질	인도
생산량	69,977	17,695	36,000	10,188	32,028	13,000
매장량	6,200,000	7,400,000	830,000	2,000,000	3,600,000	900,000

### 1.3.알루미늄 역사

알루미늄은 비교적 큰 산화성 때문에 다른 금속에 비해 늦게 분리되었다. 고대에는 산화알루미늄 등의 산화물 형태로 알려져 있다가 전기분해로 정제기술이 개발되면서 18세기 때 처음으로 순수하게 분리되었다. 1825년 덴마크 화학자인 한스 크리스티안 외른스테드에 의해 발견되었으며 알루미늄(Al)은 라틴어인 alumen(alum)에서 유래하였다.

### 1.4.제조법

알루미늄을 생산하는 원료는 산화알루미늄이 함유된 보크사이트를 사용하며, 보크사이트에서 산화알루미늄의 분리는 베이어 처리(Bayer process)를 이용한다. 정제된 산화알루미늄은 홀-헤럴트 처리에 의해서 전기분해 되어 순수한 알루미늄(Al)으로 정제된다.

### 1.5.용도

전성과 연성이 뛰어나고 전기 전도성이 좋아 고압 전선의 재료로 쓰인다. 산소와 쉽게 반응하지만 산화 피막(산화 알루미늄) 형성 후 피막이 산소 접촉 차단제 역할을 하므로 녹이 잘 슬지 않아 창틀의 재료와 같은 광택이 오래 지속될 수 있는 부분에 많이 쓰인다. 가볍고 녹이 잘 슬지 않아 알루미늄 캔을 제조할 때 쓰인다. 열 전도성이 커서 주방 용기 등의 재료로 쓰인다. 가볍지만 강도가 약한 알루미늄의 단점을 보완하고자 강도를 강화시켜 합금을 만들어 사용한다(예: 두랄루민). 알루미늄 포일을 만드는 데 사용되며 가볍고 내구성이 큰 특성을 이용해 항공기, 선박, 차량의 주요 재료로 쓰인다.

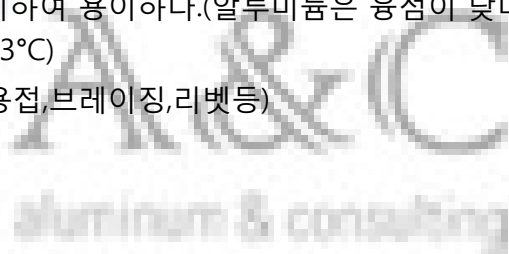
## 2. 알루미늄의 기본특성

- (1) 가볍다. ( 알루미늄 비중 2.7) Cu(8.9) Fe(7.9)의 약1/3이다. : 항공기, 선박, 차량, 건축의 경량화
- (2) 강도조절을 다양하게 할 수 있다 (같은 재질이라도 열처리에 따라서 강도조절가능),첨가원소(Zn, Cu, Mg, Si등), 열처리 및 가공( 단조, 인발, 압연 등)
- (3) 내식성(부식저항)이 좋다.대기중에서 산소와 결합하여 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )을 생성하여 부식을 방지.
- (4) 성형 가공이 용이하다 ( 압출, 압연, 인발, 단조 등). 연성이 풍부하여 판재, 봉재, 선, 관, 형재등의 다양한 복잡형상의 생산가능.
- (5) 전기 전도성이 좋다.(Cu의 약60%) (도전율,%)

1060	2011	2024	3003	5056	6061	6063	7075
62	45	30	50	29	43	55	33

표1 . 알루미늄의 일반적인 도전율

- (6) 자기 영향이 없다 ( 비 자성체)
- (7) 열 전도성이 좋다.알루미늄의 열 전도성은 철(Fe)의 약3배로서 주방용품, 피스톤등에 많이 사용 됨.
- (8) 빛이나 열을 반사한다.알루미늄 표면의 빛은 열, 전파를 반사하고 반사율은 75~80%이다.
- (9) 독성이 없다.무해, 무취, 위생적으로 식품공업에 많이 적용되고 있다.
- (10) 외관이 미려하다.(가공성 및 표면처리성이 용이하여 장식재로 적합)무해, 무취, 위생적으로 식품공업에 많이 적용되고 있다.
- (11) 저온 취성이 없다.저온에서 기계적 성질을 잃지 않고 오히려 그이상을 나타낸다.
- (12) Scrap의 재생이 타 금속에 비하여 용이하다.(알루미늄은 용점이 낮다) Al(659°C), Fe(1,539°C), Cu(1,083°C), Cr(1,903°C), Ni(1,453°C)
- (13) 고신뢰의 접합이 가능하다(용접,브레이징,리벳등)



### 3.알루미늄 합금계의 종류 및 특성

#### 3.1.알루미늄합금의 질별기호 표시방법

3.1.1.알루미늄 전신재의 질별기호는 A와 4개의 숫자로 표시한다.

1위	2위	3위	4위	5위
A	x	x	x	x

1위 : A는 알루미늄 및 알루미늄합금을 표시한다.

2위 : 숫자 1은 순도99.0%이상의 알루미늄 및 알루미늄합금을 표시하고, 2부터 9까지는 주요한 첨가원소를 나타낸다.

구분	합금
1	순 알루미늄
2	Al - Cu - Mg계 합금
3	Al - Mn계 합금
4	Al - Si계 합금
5	Al - Mg계 합금
6	Al - Mg - Si계 합금
7	Al - Zn - Mg계 합금
8	상기 이외 계통의 합금
9	예비

3위 : 숫자는 0~9를 사용하고 0은 기본합금을 나타내고, 1~9는 합금의 계량을 표시한다.

4위 및 5위 : 순 알루미늄에 대하여는 소수점이하 2자리의 숫자는 순도를 나타내고 합금에 대하여는 개량된 합금에서 파생된 합금을 나타낸다.

#### 3.1.2.알루미늄 주조재의 질별기호 표시방법

예) AC2B : Aluminum CAST 2종B ( Al - Si - Cu계)

A	C	2	B
---	---	---	---

A : Aluminum 표시

B : Cast

2 : 성분 종류 표시 ( 1~ 12 )

B : 제조방법 ( 같은 합금 내에서 종류표시 )

※ C : 사형/ 금형주물, DC : 다이캐스팅 , J : 축수용

### 3.2 전신재(展伸材)

#### 3.2.1.순알루미늄 (1000계열: 순도99%이상,비열처리합금)

(1) 성형가공성, 내식성, 표면처리성 등이 뛰어나

(2) 강도 및 경도가 낮기 때문에 구조용으로는 부적합.

(3) 전기 및 열의 전도도가 매우좋다.

(4) 순 알루미늄에 포함된 주요한 불순물은 Fe, Si이고, 그 이외에 Cu, Zn, Ti, Mn, V등이 있다. 이러한 불순물들은 내식성을 저하시키는 역할을 한다. 불순물이 적을수록 내식성이 향상되어 양극산화처리를 하면 표면상태가 좋아진다.

(5) 불순물 중에서도 Cr, Mn, V, Zr, Ti등은 미량의 함유에 의해서 전기 전도도를 매우 저하 시킨다.

(6) 알루미늄은 알루미늄보다 전위가 높은 Fe, Cu등과 접촉하면 알루미늄이 현저하게 부식하는 접촉 부식이 생긴다.

(7) 용 도

강도를 요하지 않는 가정용품, 일용품, 전기기구(송배전용재료), 방열재료등이며, 특히 표면처리성이 좋아 화학, 식품, 공업용탱크, 장식품, 명판, 반사판 등으로 사용된다.

순알루미늄 화학성분

Alloy No	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
1030	99.35min	0.1	0.6	0.05	0.05	0.35	0.03	0.1
1040	99.4min	0.1	0.5	0.05	0.05	0.3	0.03	0.1
1050	99.5min	0.05	0.4	0.05	0.05	0.25	0.03	0.05
1060	99.6min	0.05	0.35	0.03	0.03	0.25	0.03	0.05
1070	99.7min	0.04	0.25	0.3	0.3	0.2	0.03	0.4
1080	99.8min	0.03	0.15	0.2	0.2	0.15		
1090	99.9min	0.02	0.07	0.1	0.1	0.7	0.01	0.3
1110	99.1min	0.04	0.8	0.25	0.01	0.3	0.03	
1120	99.2min	0.05-0.35	0.4	0.2	0.01	0.1	0.02	0.05
1150	99.5min	0.05-0.20	0.45	0.05	0.05	0.45	0.03	0.05
1180	99.8min	0.01	0.09	0.02	0.02	0.09	0.02	0.03
1190	99.9min	0.01	0.7	0.01	0.01	0.05	0.01	0.02
1200	99min	0.05	0.1		0.05	1	0.05	0.1
1230	99.3%min	0.01		0.05	0.05	0.7	0.03	0.1
1260	99.6min	0.04	0.4	0.03	0.01	0.04	0.03	0.05
1350	99.5min	0.05	0.01		0.01	0.01	0.02	0.05

### 3.2.2. Al-Cu-Mg 계 (2000계열: 열처리합금)

- (1) 두랄루민(Duralumin), 초(超)두랄루민(Super Duralumin)이라는 명칭으로 알려져 있는 2017, 2024가 있으며, 대표적이 고력 알루미늄 합금이다.
- (2) 강도는 강하지만 비교적 많은 동(Cu)을 함유하고 있기 때문에 내식성이 떨어지고 부식 환경에 노출된 경우에는 방청처리를 충분히 해 줄 필요가 있다.
- (3) 2014는 고강도 단조재로서 광범위한 용도에 쓰여진다.
- (4) 절삭성은 양호하고, 특히 Pb, Bi를 첨가한 2011은 뛰어난 절삭효과를 나타낸다.
- (5) 용 도  
강도, 절삭성, 내마모성등이 요구되는 항공기의 재료, 방산재료, 광학기용품, 자동차부품, 실린더 헤드, 리벳용재, 유압부품 등

Al-Cu-Mg 계 화학성분

Alloy No	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	etc
2011	91.2-94.6			0.7			0.4		pb=0.2-0.6, Bi=0.2-0.6
2014	90.4-95	0.1	3.9-5.0	0.7	0.2-0.8	0.4-1.2	0.5-1.2	0.15	
2017	91.5-95.5	0.1	3.5-4.5	0.7	0.4-0.8	0.4-1.0	0.2-0.8	0.15	
2018	89.7-94.4	0.1	3.5-4.5	1	0.45-0.9	0.2	0.9		
2021	91.2-93.8		5.8-6.8	0.3	0.02	0.2-0.4	0.2	0.02-0.1	Cd=0.05-0.2, Zn+Ti=0.05-0.15
2024	90.7-94.7	0.1	3.8-4.9	0.5	1.2-1.8	0.3-0.9		0.15	
2026	92.6-95.1		3.6-4.3	0.07	1.0-1.6	0.3-0.8	0.05	0.06	
2030	88.8-95.2	0.1	3.3-4.5	0.7	0.5-1.3	0.2-1.0	0.8	0.2	Bi=0.2, Pb=0.8-1.5
2031	91-95.9		1.8-2.8	0.6-1.2	0.6-1.2	0.5	0.5-1.3	0.2	
2034	91-93.6	0.05	4.2-4.8	0.12	1.3-1.9	0.8-1.3	0.1	0.15	
2036	94.3-97.4	0.1	2.2-3.0	0.5	0.3-0.6	0.1-0.4	0.5	0.15	
2037	94.9-98.2	0.1	1.4-2.2	0.5	0.3-0.8	0.1-0.4	0.5	0.15	V=0.05
2038	93.8-98.2	0.2	0.8-1.8	0.6	0.4-1.0	0.1-0.4	0.5-1.3	0.15	Ga=0.05, V=0.05
2039	91.6-94.8		4.5-5.5	0.3	0.4-0.8	0.2-0.5	0.2	0.15	
2048	92.9-95.8		2.8-3.8	0.2	1.2-1.8	0.2-0.6	0.15	0.1	
2080	92.1-95.1		3.3-4.1	0.2	1.5-2.2	0.25	0.1		Be=0.005
2090	93.2-95.6	0.05	2.4-3.0	0.12	0.25	0.05	0.1	0.15	Li=1.9-2.6
2124	91.2-94.7	0.1	3.8-4.9	0.3	1.2-1.8	0.3-0.9	0.2	0.15	
2195	91.9-94.9		3.7-4.3	0.15	0.8-1.2	0.25-0.8	0.12	0.1	Li=0.8-1.2
2197	93.7-96		2.5-3.1	0.1	0.25	0.1-0.5	0.1	0.12	Li=1.3-1.7
2214	90.8-95	0.1	3.9-5.0	0.3	0.2-0.8	0.4-1.2	0.05-1.2	0.15	
2218	88.8-93.6	0.1	3.5-4.5	1	1.2-1.8	0.2	0.9		
2219	91.5-93.8		5.8-6.8	0.3	0.02	0.2-0.4	0.12	0.02-0.1	V=0.05-0.15
2224	91.9-94.7	0.1	3.8-4.4	0.15	1.2-1.8	0.3-0.9	0.12	0.15	
2297	93.7-96.2		2.5-3.1	0.1	0.25	0.1-0.5	0.1	0.12	Li=1.1-1.7
2319	91.4-93.8		5.8-6.8	0.3	0.02	0.2-0.4	0.2	0.1-0.2	Be=0.008, V=0.05-0.15
2324	92-94.7	0.1	3.8-4.4	0.12	1.2-1.8	0.3-0.9	0.1	0.15	
2419	91.7-93.8		5.8-6.8	0.18	0.02	0.2-0.4	0.15	0.02-0.1	V=0.05-0.15
2424	92.7-94.7		3.8-4.4	0.12	1.2-1.6	0.3-0.3	0.1	0.1	
2519	91-94.4		5.3-6.4	0.3	0.05-0.4	0.1-0.5	0.25	0.02-0.1	Si+Fe=0.4, V=0.05-0.15
2524	92.5-94.4	0.05	4.0-4.5	0.12	1.2-1.6	0.45-0.7	0.06	0.1	
2618	92.4-94.9		1.9-2.7	0.9-1.3	1.3-1.8		0.1-0.25	0.04-0.1	

### 3.2.3. Al-Mn 계 (3000계열: 비열처리합금)

- (1) Mn의 첨가에 의해서 순수알루미늄의 가공성, 내식성이 저하됨이 없어 강도를 증가시킨것이다.
- (2) 3003은 1100보다 강도가 약 10%높고, 가공성과 내식성은 거의 비슷하다.
- (3) 3004는 3003보다 강도가 높고, 소성가공성이 우수하며 내식성도 양호하다.
- (4) 용도

3003은 3000계열의 대표적인 합금으로서 자동차용 냉매튜브, TV안테나, opc drum, 열교환기, 가정용품등에 사용된다.

3004는 Mg을 약1%정도 첨가하여 강도를 한층 증가시켰으며, 알루미늄 캔, 전구마개, 실내장식 재료로 많이 사용된다.

Al-Mn 계열 화학성분

Alloy No	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn
3002	99.00	0.15	0.10	0.05-0.20	0.05-0.25	0.08	0.05
3003	96.7-99	0.05-0.20	0.70		1.0-1.5	0.60	0.10
3004	95-98.4	0.25	0.70		0.80-1.5	0.40	0.25
3005	95.7-98.8	0.30	0.70	0.20-0.60	1.0-1.5	0.60	0.25
3006	96.2-99	0.10-0.30	0.70	0.30-0.60	0.50-0.80	0.50	0.15-0.40
3007	96.20	0.05-0.30	0.70	0.60	0.30-0.80	0.50	0.40
3009	95-97.8	0.10	0.70	0.10	1.2-1.8	1.0-1.8	0.10
3010	98.10	0.03	0.20		0.20-0.90	0.10	0.05
3011	96.4-99	0.05-0.20	0.70		0.80-1.2	0.40	0.10
3012	96.80	0.10	0.70	0.10	0.50-1.1	0.60	0.10
3013	94.7-98.4	0.50	1.00	0.20-0.60	0.90-1.4	0.60	0.50-1.0
3014	95-98.5	0.50	1.00	0.10	1.0-1.5	0.60	0.50-1.0
3015	96.10	0.30	0.80	0.20-0.70	0.50-0.90	0.60	0.25
3016	96-99	0.30	0.80	0.50-0.80	0.50-0.90	0.60	0.25
3017	97.1-98.7	0.25-0.40	0.25-0.45	0.10	0.80-1.2	0.25	0.10
3019	94.50	0.90	0.70	0.20-0.90	0.30-0.90	0.60	0.20-0.90
3020	96.30	0.10	0.60	0.20	0.60-1.2	0.50	0.50
3025	95.6-98.9	0.30	0.50-0.90	0.20-0.80	0.40-1.0	0.60	0.05-0.25
3030	97.60	0.1	0.35	0.05	0.10-0.70	0.15	0.05-0.50
3102	97.80	0.1	0.7		0.05-0.40	0.40	0.3
3103	96.30	0.1	0.7	0.3	0.90-1.5	0.50	0.2
3104	95-98.4	0.05-0.25	0.8	0.80-1.3	0.80-1.4	0.60	0.25
3105	96.10	0.3	0.7	0.20-0.80	0.30-0.80	0.60	0.25
3107	97.20	0.05-0.15	0.7		0.40-0.90	0.60	0.2
3203	96.9-99	0.05	0.7		1.0-1.5	0.60	0.1
3204	95.3-98.3	0.10-0.25	0.7	0.80-1.5	0.80-1.5	0.30	0.25
3207	98.00	0.1	0.45	0.1	0.40-0.80	0.30	0.1
3307	96.20	0.3	0.8	0.3	0.50-0.90	0.60	0.4

### 3.2.4.Al - Si 계 (4000계열: 비열처리합금)

(1) Al-Si계 합금에는 단조용 합금과 용접, 납땜 등의 접합용 합금, 건축 외장재용 합금이 있다.

(2) Si은 용탕의 유동성, 주형의 충전성 등이 다른 합금에 비하여 우수하고, 주조결함이 거의 없으며, 다른 원소를 첨가하여 강도를 높일 수 있고 낮은 열팽창율과 내마모성이 우수하기때문에 주물 및 다이캐스팅 제품의 90%이상이 Al-Si계를 기본으로 한 합금이다.

(3) 용도

4032는 Si을 첨가함으로서 열팽창율을 억제하고 내마모성을 개선한것으로 미량의 Cu, Ni, Mg등을 더 첨가하면 내열성을 향상시켜 피스톤단조 재료로 사용된다.항공기용 피스톤, 콤프레샤용 피스톤, 일반소형(농기구, 모터보드 등 ) 피스톤, VTR 실린더등

4043은 용접 와이어, brazing 납재로 사용된다. 자동차 에어컨의 콘덴서, 라디에터, 히터 등의 접합에 많이 사용되고 있다.

Al-Si 계열 화학성분

Alloy No	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Ni	Si	Zn
4004	86-90		0.25	0.8	1.0-2.0	0.1		9.0-10.5	0.2
4006	97.4-98.7	0.2	0.1	0.5-0.8	0.01	0.05		0.8-1.2	0.05
4007	94-97.6	0.05-0.25	0.2	0.04-1.0	0.2	0.8-1.5	0.15-0.7	1.0-1.7	0.1
4008	91.5-93.5		0.05	0.09	0.3-0.45	0.05		6.5-7.5	0.05
4008	91.6-94.1		1.0-1.5	0.2	0.45-0.6	0.1		4.5-5.5	0.1
4010	91.1-93.2		0.2	0.2	0.3-0.45	0.1		6.5-7.5	0.1
4011	90.7-93		0.2	0.2	0.45-0.7	0.1		6.5-7.5	0.1
4013	92.9-95.8		0.05-0.2	0.35	0.05-0.2	0.3		3.5-4.5	0.05
4014	95.4-98.3		0.2	0.7	0.3-0.8	0.35		1.4-2.2	0.2
4015	94.8-97.9		0.2	0.7	0.1-0.5	0.6-1.2		1.4-2.2	0.2
4016	94.1-97.5		0.2	0.7	0.1	0.6-1.2		1.4-2.2	0.5-1.3
4017	95.1-98.6		0.1-0.5	0.7	0.1-0.5	0.6-1.2		0.6-1.6	0.2
4018	90.9-93		0.05	0.2	0.5-0.8	0.1		6.5-7.5	0.1
4019	70.7-75.1			4.6-5.4			1.8-2.2	18.5-21.5	
4032	81.1-87.2	0.1	0.5-1.3	1	0.8-1.3		0.5-1.3	11-13.5	0.25
4043	92.3-95.5		0.3	0.8	0.05	0.05		4.5-6.0	0.1
4044	89.3-92.2		0.25	0.8		0.1		7.8-9.2	0.2
4045	87.3-91		0.3	0.8	0.05	0.05		9.0-11	0.1
4046	87.1-90.8		0.3	0.5	0.2-0.5	0.4		9.0-11	0.1
4047	85.3-89		0.3	0.8	0.1	0.15		11.0-13	0.2
4048	72.7-78.1	0.07	3.3-4.7	0.8	0.07	0.07		9.3-10.7	9.3-10.7
4014	85.8-90		0.25	0.8	1.0-2.0	0.1		9.0-10.5	0.2
4145	83-87.4	0.15	3.3-4.7	0.8	0.15	0.15		9.3-10.7	
4147	85-88.9		0.25	0.8	0.1-0.5	0.1		11.0-13	0.2
4343	90.3-93.2		0.25	0.8		0.1		6.8-8.2	0.2
4643	93.7-96.3		0.1	0.8	0.1-0.3	0.05		3.4-4.6	0.1



### 3.2.5.Al - Mg 계 (5000계열: 비열처리합금)

- (1) 우수한 강도를 가지고 있으며 성형성, 내식성, 용접성이 우수한 합금이다.
- (2) 해수 및 공업지대의 오염대기에 강하므로 외관을 문제시 하지 않는다면 방식처리를 할 필요성은 비교적 적다.
- (3) Mg은 산소와의 반응성이 크고, 용해, 주조 시, 산화소모, 산화물(MgO)을 생성하기 쉽다.
- (4) 용 도

Mg 첨가량이 적은 합금으로는 장식용재, 차량용 내장 천정재, 건축용 외장재, 선박의 내장재로 사용되는 5005등이 있다.중간 정도의 Mg을 함유한 합금은 5052.5454등이 있는데 선박, 자동차, 광학기기, 자동차용 휠 등 많은용도로 활용되고 있다.

Mg이 많은 합금으로서는 5083이 대표적인데 비열처리형 합금으로서 가장 우수한 강도를 가지고 있으며 용접성도 양호하다. 이때문에 용접 구조재로 선박, 차량,저온용 탱크, 압력용기 등에 사용되고 있다.

Al-Mg 계열 화학성분

Alloy No	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn
5005	97	0.1	0.2	0.7	0.5-1.1	0.2	0.3		0.25
5042	94.2-96.8	0.1	0.15	0.35	3.0-4.0	0.2-0.5	0.2	0.1	0.25
5050	96.3-98.9	0.1	0.2	0.7	1.1-1.8	0.1	0.4		0.25
5052	95.7-97.7	0.15-0.3	0.1	0.4	2.2-2.8	0.1	0.25		0.1
5056	92.9-95.4	0.05-0.2	0.1	0.4	4.5-5.6	0.05-0.2	0.3		0.1
5082	93.5-96	0.15	0.15	0.35	4.0-5.0	0.15	0.2	0.1	0.25
5083	92.4-95.6	0.05-0.25	0.1	0.4	4.0-4.9	0.4-4.9	0.4	0.15	0.25
5086	93-96.3	0.05-0.25	0.1	0.5	3.5-4.5	0.2-0.7	0.4	0.15	0.25
5154	94.3-96.8	0.15-0.35	0.1	0.4	3.1-3.9	0.1	0.25	0.2	0.2
5182	93.2-95.8	0.1	0.15	0.35	4.0-5.0	0.2-0.5	0.2	0.1	0.25
5251	95.4-98.2	0.15	0.15	0.5	1.7-2.4	0.1-0.5	0.4	0.15	0.15
5252	96.6-97.8		0.1	0.1	2.2-2.8	0.1	0.08		0.05
5254	94.8-96.8	0.15-0.35	0.05		3.1-3.9	0.01		0.05	0.2
5383	91.9-95.3	0.25	0.2	0.25	4.0-5.2	0.7-1.0	0.25	0.15	0.4
5454	94.4-97.1	0.05-0.2	0.1	0.4	2.4-3.0	0.5-1.0	0.25	0.2	0.25
5456	91.9-94.8	0.05-0.2	0.1	0.4	4.7-5.5	0.5-1.0	0.25	0.2	0.25
5457	97.7		0.2	0.1	0.8-1.2	0.15-0.45	0.08		0.05
5652	96.1-97.7	0.15-0.35	0.04		2.2-2.8	0.01			0.1
5654	94.7-96.7	0.15-0.35	0.05		3.1-3.9	0.01		0.05-0.15	0.2
5657	98.5		0.1	0.1	0.6-1.0	0.03	0.08		
5954	94.4-96.7	0.1	0.1	0.4	3.3-4.1	0.1	0.25	0.2	0.2
5754	93.6-97.3	0.3	0.1	0.4	2.6-3.6	0.5	0.4	0.15	0.2

### 3.2.6. Al - Mg -Si 계 (6000계열: 열처리합금)

- (1) 중간정도의 강도를 가지고 있으며, 내식성과 용접성이 양호해 대표적인 구조재로 알려져 있다.
- (2) 6063은 압출성 및 표면처리성이 좋아 건축용 새시로 가장 많이 이용되고 있다.
- (3) 압출 가공면에서는 뛰어난 압출가공성(복잡한 형태와 좋은 생산성)과 press quenching(압출시 강제 공랭)이 가능하다.
- (4) 충분한 기계적 성질, 양호한 가공성(벤딩, 펀칭, 소성가공 등)과 양호한 내식성을 가지고 있어 가장 보편적합금.
- (5) 용 도

여러가지의 용도로 가장 많이 사용되는 합금이다.차량, 선박, 건축, 전기, 전자, 기계, 육상구조물등.

Al-Mg-Si 계열 화학성분

Alloy No	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	etc
6005	97.5-99	0.10	0.10	0.35	0.40-0.60	0.10	0.60-0.90	0.10	0.10	
6008	96.5	0.30	0.30	0.35	0.04-0.70	0.30	0.5-0.9	0.10	0.20	V=0.05-0.20
6009	95.7-98.7	0.10	0.15-0.60	0.50	0.40-0.80	0.20-0.80	0.60-1.0	0.10	0.25	
6010	95.3-98.3	0.10	0.15-0.60	0.50	0.60-1.0	0.20-0.80	0.80-1.2	0.10	0.25	
6011	92.5-98.4	0.30	0.40-0.90	0.10	0.60-1.2	0.80	0.60-1.2	0.20	1.50	
6012	92.1-98	0.30	0.10	0.50	0.40-2.0	0.40-1.0	0.60-1.4	0.20	0.30	Bi=0.7
6013	94.8-97.8	0.10	0.60-1.1	0.50	0.80-1.2	0.20-0.80	0.60-1.0	0.10	0.25	
6014	97	0.20	0.25	0.35	0.40-0.80	0.05-0.20	0.30-0.60	0.10	0.10	V=0.05-0.2
6020	93.9-97.8	0.15	0.30-0.90	0.50	0.60-1.2	0.35	0.40-0.90	0.15	0.20	
6053	97.5-98.8	0.15-0.35	0.10	0.35	1.1-1.4				0.10	
6061	95.8-98.6	0.04-0.35	0.15-0.40	0.70	0.80-1.2	0.15	0.40-0.80	0.15	0.25	
6063	97.5	0.10	0.10	0.35	0.45-0.90	0.10	0.20-0.60	0.10	0.10	
6066	93-97	0.4	0.70-1.2	0.50	0.80-1.4	0.60-1.1	0.90-1.8	0.20	0.25	Pb=0.8-1.4
6069	94.8-97.5	0.05-0.30	0.55-1.0	0.40	1.2-1.6	0.05	0.6-1.2	0.10	0.05	V=0.1-0.3
6070	94.5-98	0.10	0.15-0.40	0.50	0.50-1.2	0.40-1.0	1.0-1.7	0.15	0.25	
6082	95.2-98.3	0.25	0.10	0.50	0.60-1.2	0.40-1.0	0.70-1.3	0.10	0.20	
6101	97.6	0.03	0.10	0.50	0.35-0.80	0.03	0.30-0.70		0.10	B=0.06
6105	97.1-99	0.10	0.10	0.35	0.45-0.80	0.15	0.60-1.0	0.10	0.10	
6151	95.5-98.8	0.15-0.35	0.35	1.00	0.45-0.80	0.20	0.60-1.2	0.25	0.25	
6201	97.3-98.9	0.03	0.10	0.50	0.60-0.90	0.03	0.50-0.90		0.10	B=0.6
6205	96.6-98.9	0.05-0.15	0.20	0.70	0.40-0.60	0.05-0.15	0.60-0.90	0.15	0.25	
6262	94.6-97.8	0.04-0.14	0.15-0.40	0.70	0.80-1.2	0.15	0.40-0.80	0.15	0.25	Bi=0.4-0.7, Pb=0.4-0.7
6351	95.9-98.5		0.10	0.50	0.40-0.80	0.40-0.80	0.70-1.3	0.20	0.20	Pb=0.003
6463	97.9		0.20	0.15	0.45-0.90	0.05	0.20-0.60		0.05	
6951	97		0.15-0.40	0.8	0.40-0.80	0.1	0.20-0.50		0.20	

### 3.2.7.Al - Zn - Mg계 (7000계열: 열처리합금)

(1) 알루미늄합금 가운데 가장 높은 강도를 가지고 있지만, 부식 내구성이 떨어지는 것이 단점.

(2) 용 도

항공기, 방산소재, 스포츠 용품류에 많이 사용되고 있으며, 고강도 용접구조재(7003 등)의 개발로 차량(철도, 자동차, 이륜차, 농기계 등)구조재에 많이 이용되고 있다.

Al-Zn-Mg 계열 화학성분

Alloy No	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Zr	etc
7001	87	0.18-0.35	1.6-2.6	0.40	2.6-3.4	0.20	0.35	0.20	6.8-8.0		
7003	90.1-94.2	0.20	0.20	0.35	0.50-0.10	0.30	0.30	0.20	5.0-6.5	0.05-0.25	
7005	91-94.7	0.06-0.20	0.10	0.40	1.0-1.8	0.20-0.70	0.35	0.01-0.06	4.0-5.0	0.08-0.20	
7016	92.1-94.8		0.45-0.1	0.12	0.08-1.4	0.03	0.10	0.03	4.0-5.0		V=0.05
7020	91.2-94.7	0.1-0.35	0.20	0.40	1.0-1.4	0.05-0.50	0.35		4.0-5.0	0.08-0.20	Zr+Ti=0.08-0.25
7029	91.4-94		0.5-0.9	0.12	1.3-2.0	0.03	0.1	0.05	4.2-5.2		V=0.05
7039	90.5-94		0.1	0.4	2.3-3.3	0.1-0.4	0.3	0.1	3.5-4.5		
7049	85.7-89.5	0.1-0.22	1.2-1.9	0.35	2.0-2.9	0.2	0.25	0.1	7.2-8.2		
7050	87.3-90.3	0.04	2.0-2.6	0.15	1.9-2.6	0.1	0.12	0.06	5.7-6.7	0.08-0.15	
7068	85.48-	0.05	1.6-2.4	0.15	2.2-3.0	0.1	0.12	0.1	7.3-8.3	0.05-0.15	
7072	97.5		0.10		0.1	0.1			0.08-1.3		Si+Fe=0.7
7075	87.1-91.4	0.18-0.28	1.2-2.0	0.5	2.1-2.9	0.3	0.4	0.2	5.1-6.1		
7076	86.8-91.2		0.30-1.0	0.6	1.2-2.0	0.3-0.8	0.4	0.2	7.0-8.0		
7175	88-91.4	0.18-0.28	1.2-2.0	0.2	2.1-2.9	0.1	0.15	0.1	5.1-6.1		
7475	88.5-91.5	0.18-0.25	1.2-1.9	0.12	1.9-2.6	0.06	0.1	0.06	5.2-6.2		

### 3.3.주조재(鑄造材)

#### 3.3.1.일반주조 종류 및 기호

종 류	순도구분	기호	참 고	
			합금계	KS D 6008
1종 A	1	ACIA.1	Al-Cu계	AC1A
	2	ACIA.2		
1종 B	1	ACIB.1	Al-Cu계	AC1B
	2	ACIB.2		
2종 A	1	AC2A.1	AlCu-Si계	AC2A
	2	AC2A.2		
2종 B	1	AC2B.1	Al-Cu-Si계	AC2B
	2	AC2B.2		
3종 A	1	AC3A.1	Al-Si계	AC3A
	2	AC3A.2		
4종 A	1	AC4A.1	Al-Si-Mg계	AC4A
	2	AC4A.2		
4종 B	1	AC4B.1	Al-Si-Cu계	AC4B
	2	AC4B.2		
4종 C	1	AC4C.1	Al-Si-Mg계	AC4C
	2	AC4C.2		
4종 CH	1	AC4CH.1	Al-Si-Mg계	AC4CH
	2	AC4CH.2		
4종 D	1	AC4D.1	Al-Si-Cu-Mg계	AC4D
	2	AC4D.2		
5종 A	1	AC5A.1	Al-Si-Mg계	AC5A
	2	AC5A.2		
7종 A	1	AC7A.1	Al-Mg계	AC7A
	2	AC7A.2		
8종 A	1	AC8A.1	Al-Si-Cu-Ni-Mg계	AC8A
	2	AC8A.2		
8종 B	1	AC8B.1	Al-Si-Cu-Mg계	AC8B
	2	AC8B.2		
8종 C	1	AC8C.1	Al-Si-Cu-Mg계	AC8C
	2	AC8C.2		
9종 A	1	AC9A.1	Al-Si-Cu-Ni-Mg계	AC9A
	2	AC9A.2		
9종 B	1	AC9B.1	Al-Si-Cu-Ni-Mg계	AC9B
	2	AC9B.2		
특수합금	Al-Cu4Ti	Al-Cu-Ti계	Al-Si12Cu	Al-Si-Cu계
	Al-Si5	Al-Si계	Al-Mg3	Al-Mg계
	Al-Si5Mg	Al-Si-Mg계	Al-Mg3Si2	Al-Mg-Si계
	Al-Si5Cu3	Al-Si-Cu-Mn계	Al-Mg5Si1	Al-Mg-Si계
	Al-Si6Cu4	Al-Si-Cu-Mn계	Al-Mg6	Al-Mg계
	Al-Si10Mg	Al-Si-Mn계	Al-Mg10	Al-Mg계
	Al-Si12	Al-Si계	Al-Zn5Mg	Al-Zn-Mg-Cr-Ti계

3.3.2.일반주조 화학성분 1

종 류	순도구분	기호	화 학 성 분											
			Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
1종 A	1	ACIA.1	4.0-5.0	1.2	0.2	0.3	0.4	0.3	0.05	0.25	0.05	0.05	0.05	Rem
	2	ACIA.2	4.0-5.0	1.2	0.2	0.03	0.3	0.03	0.03	0.25	0.03	0.03	0.03	Rem
1종 B	1	ACIB.1	4.2-5.0	0.2	0.20-0.35	0.1	0.3	0.1	0.05	0.05-0.3	0.05	0.05	0.05	Rem
	2	ACIB.2	4.2-5.0	0.2	0.20-0.35	0.03	0.2	0.55	0.03	0.05-0.3	0.03	0.03	0.03	Rem
2종 A	1	AC2A.1	3.0-4.5	4.0-6.0	0.25	0.55	0.7	0.03	0.3	0.2	0.15	0.05	0.15	Rem
	2	AC2A.2	3.0-4.5	4.0-6.0	0.25	0.03	0.3	0.5	0.03	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
2종 B	1	AC2B.1	2.0-4.0	5.0-7.0	0.5	1	0.8	0.03	0.35	0.2	0.2	0.1	0.2	Rem
	2	AC2B.2	2.0-4.0	5.0-7.0	0.5	0.03	0.3	0.35	0.03	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
3종 A	1	AC3A.1	0.25	10.0-13.0	0.15	0.3	0.7	0.03	0.1	0.2	0.1	0.1	0.15	Rem
	2	AC3A.2	0.05	10.0-13.0	0.03	0.03	0.3	0.3-0.6	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem
4종 A	1	AC4A.1	0.25	8.0-10.0	0.35-0.6	0.25	0.4	0.3-0.6	0.1	0.2	0.1	0.05	0.15	Rem
	2	AC4A.2	0.05	8.0-10.0	0.35-0.6	0.03	0.3	0.5	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem
4종 B	1	AC4B.1	2.0-4.0	7.0-10.0	0.5	1	0.8	0.5	0.35	0.2	0.2	0.1	0.2	Rem
	2	AC4B.2	2.0-4.0	7.0-10.0	0.5	0.03	0.3	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem
4종 C	1	AC4C.1	0.25	6.5-7.5	0.25-0.45	0.35	0.4	0.35	0.1	0.2	0.1	0.05	0.1	Rem
	2	AC4C.2	0.05	6.5-7.5	0.25-0.45	0.03	0.3	0.03	0.03	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
4종 CH	1	AC4CH.1	0.2	6.5-7.5	0.30-0.45	0.1	0.17	0.1	0.05	0.2	0.05	0.05	0.05	Rem
	2	AC4CH.2	0.05	6.5-7.5	0.30-0.45	0.03	0.15	0.03	0.03	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
4종 D	1	AC4D.1	1.0-1.5	4.5-5.5	0.45-0.6	0.3	0.5	0.5	0.2	0.2	0.1	0.05	0.15	Rem
	2	AC4D.2	1.0-1.5	4.5-5.5	0.45-0.6	0.03	0.3	0.03	0.03	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
5종 A	1	AC5A.1	3.5-4.5	0.6	1.3-1.8	0.15	0.7	0.35	1.7-2.3	0.2	0.05	0.05	0.15	Rem
	2	AC5A.2	3.5-4.5	0.4	1.3-1.8	0.03	0.4	0.03	1.7-2.3	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
7종 A	1	AC7A.1	0.1	0.2	3.6-5.5	0.15	0.25	0.6	0.05	0.2	0.05	0.05	0.15	Rem
	2	AC7A.2	0.05	0.2	3.6-5.5	0.03	0.2	0.6	0.03	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
8종 A	1	AC8A.1	0.8-1.3	11.0-13.0	0.8-1.3	0.15	0.7	0.15	0.8-1.5	0.2	0.05	0.05	0.1	Rem
	2	AC8A.2	0.8-1.3	11.0-13.0	0.8-1.3	0.03	0.4	0.03	0.9-1.5	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
8종 B	1	AC8B.1	2.0-4.0	8.5-10.5	0.6-1.5	0.5	0.8	0.5	0.1-1.0	0.2	0.1	0.1	0.1	Rem
	2	AC8B.2	2.0-4.0	8.5-10.5	0.6-1.5	0.03	0.4	0.03	0.1-1.0	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem

3.3.2.일반주조 화학성분 2

종 류	순도구분	기호	화 학 성 분											
			Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
8종 C	1	AC8C.1	2.0-4.0	8.5-10.5	0.6-1.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.2	0.1	0.1	0.1	Rem
	2	AC8C.2	2.0-4.0	8.5-10.5	0.6-1.5	0.03	0.4	0.03	0.03	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
9종 A	1	AC9C.1	0.50-1.5	22-24	0.6-1.5	0.2	0.7	0.5	0.5-1.5	0.2	0.1	0.1	0.1	Rem
	2	AC9C.2	0.50-1.5	22-24	0.6-1.5	0.03	0.4	0.03	0.5-1.5	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
9종 B	1	AC9B.1	0.50-1.5	22-24	0.6-1.5	0.2	0.7	0.5	0.5-1.5	0.2	0.1	0.1	0.1	Rem
	2	AC9B.2	0.50-1.5	22-24	0.6-1.5	0.03	0.4	0.03	0.5-1.5	0.2	0.03	0.03	0.03	Rem
특수합금		Al-Cu4Ti	4.0-5.0	0.25	0.05	0.2	0.25	0.1	0.1	0.05-0.3	0.05	0.05		Rem
		Al-Si5	0.1	4.5-6.0	0.1	0.1	0.8	0.5	0.1	0.2	0.1	0.1		Rem
		Al-Si5Mg	0.1	3.5-6.0	0.5-0.9	0.1	0.6	0.6	0.1	0.2	0.1	0.05		Rem
		Al-Si5Cu3	2.0-4.0	4.0-6.0	0.15	0.5	0.8	0.2-0.6	0.3	0.2	0.2	0.05		Rem
		Al-Si6Cu4	3.0-5.0	5.0-7.0	0.3	2	1	0.2-0.6	0.3	0.2	0.05	0.1		Rem
		Al-Si10Mg	0.1	9.0-11.0	0.15-0.4	0.1	0.6	0.6	0.05	0.2	0.1	0.05		Rem
		Al-Si12	0.1	11.0-13.5	0.1	0.1	0.7	0.5	0.1	0.2	0.2	0.05		Rem
		Al-Si12Cu	1.2	11.0-13.5	0.3	0.5	0.9	0.5	0.3	0.2	0.05	0.1		Rem
		Al-Mg3	0.1	0.5	2.5-4.5	0.2	0.5	0.6	0.05	0.2	0.05	0.05	0.1	Rem
		Al-Mg3Si2	0.1	0.9-2.2	2.5-4.5	0.2	0.5	0.6	0.05	0.2	0.05	0.05	0.4	Rem
		Al-Mg5Si1	0.1	0.5-1.5	4.0-6.0	0.2	0.5	0.5	0.05	0.2	0.05	0.05		Rem
		Al-Mg6	0.1	0.5	4.5-7.0	0.2	0.5	0.6	0.05	0.2	0.05	0.05	0.5	Rem
		Al-Mg10	0.1	0.3	9.5-11	0.1	0.3	0.15	0.1	0.15	0.05	0.05		Rem
	Al-Zn5Mg	0.35	0.3	0.5-0.7	4.5-6.0	0.8	0.4	0.05	0.1-0.3	0.05	0.05	0.15-0.6	Rem	

### 3.3.3.다이캐스팅 종류 및 기호

종 류	순도구분	기호	참 고	
			합금계	KS D 6008
1종	1	AC1A.1	Al-Cu계	AC1A
	2	AC1A.2		
3종	1	AC1B.1	Al-Cu계	AC1B
	2	AC2B.2		
5종	1	AC2A.1	AlCu-Si계	AC2A
	2	AC2A.2		
6종	1	AC2B.1	Al-Cu-Si계	AC2B
	2	AC2B.2		
10종	1	AC3A.1	Al-Si계	AC3A
	2	AC3A.2		
10종 Z	1	AC4A.1	Al-Si-Mg계	AC4A
	2	AC4A.2		
12종	1	AC4B.1	Al-Si-Cu계	AC4B
	2	AC4B.2		
12종 Z	1	AC4C.1	Al-Si-Mg계	AC4C
	2	AC4C.2		
14종	1	AC4CH.1	Al-Si-Mg계	AC4CH
	2	AC4CH.2		
Si 9 종		AlSi9	Al-Si 계	AlSi9
Si 12 Fe 종		AlSi12(Fe)	Al-Si 계	AlSi12(Fe)
Si 10 Mg Fe 종		AlSi10Mg(Fe)	Al-Si-Mg계	AlSi10Mg(Fe)
Si 8 Cu 3 종		AlSi8Cu3	Al-Si-Cu계	AlSi8Cu3
Si 9 Cu 2 Fe 종		AlSi9Cu3(Fe)	Al-Si-Cu계	AlSi9Cu3(Fe)
Si 9 Cu 3 Fe Zn 종		AlSi9Cu3(Fe)(Zn)	Al-Si-Cu계	AlSi9Cu3(Fe)(Zn)
Si 11 Cu 2 Fe 종		AlSi11Cu2(Fe)	Al-Si-Cu계	AlSi11Cu2(Fe)
Si 11 Cu 3 Fe 종		AlSi11Cu3(Fe)	Al-Si-Cu계	AlSi11Cu3(Fe)
Si 12 Cu 1 Fe 종		AlSi11Cu1(Fe)	Al-Si-Cu계	AlSi11Cu1(Fe)
Si 17 Cu 4 Mg 종		AlSi17Cu4Mg	Al-Si-Cu-Mg계	AlSi17Cu4Mg
Mg 9 종		AlMg9	Al-Mg계	AlMg9

3.3.4.다이캐스팅 화학성분

종 류	순도구분	기호	화 학 성 분											
			Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
1종	1	ALDC1.1	1	11.0-13.0	0.3	0.5	0.6-1.0	0.3	0.5	0.3	0.2	0.1	Rem	
	2	ALDC1.2	0.05	11.0-13.0	0.03	0.03	0.6	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem	
3종	1	ALDC3.1	0.6	9.0-11.0	0.45-0.64	0.5	0.6-1.0	0.3	0.5	0.3	0.15	0.1	Rem	
	2	ALDC3.2	0.05	9.0-11.0	0.45-0.64	0.03	0.6	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem	
5종	1	ALDC5.1	0.2	0.3	4.1-8.5	0.1	1.1	0.3	0.1	0.2	0.1	0.1	Rem	
	2	ALDC5.2	0.05	0.3	4.1-8.5	0.03	0.6	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem	
6종	1	ALDC6.1	0.1	1	2.64.0	0.4	0.6	0.4-0.6	0.1	0.2	0.1	0.1	Rem	
	2	ACDC6.2	0.05	1	2.6-4.0	0.03	0.6	0.4-0.6	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem	
10종	1	ALDC10.1	2.0-4.0	7.5-9.5	0.3	1	0.6-1.0	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	Rem	
	2	ALDC10.2	2.0-4.0	7.5-9.5	0.03	0.03	0.6	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem	
10종 Z	1	ALDC10Z.1	2.0-4.0	7.5-9.5	0.3	3	0.6-1.0	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	Rem	
12종	1	ALDC12.1	1.5-3.5	9.6-12	0.3	1	0.6-1.0	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	Rem	
	2	ALDC12.2	1.5-3.5	9.6-12	0.03	0.03	0.6	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem	
12종 Z	1	ALDC12Z.1	1.5-3.5	9.6-12	0.3	3	0.6-1.0	0.5	0.5	0.3	0.2	0.2	Rem	
14종	1	ALDC14.1	4.0-5.0	16.0-18.0	0.50-0.65	1.5	0.6-1.0	0.5	0.3	0.3	0.2	0.3	Rem	
	2	ALDC14.2	4.0-5.0	16.0-18.0	0.50-0.65	0.03	0.6	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	Rem	
AlSi9			0.1	9.0-11.0	0.1	0.15	0.55	0.5	0.05	0.15	0.05	0.05	Rem	
AlSi12(Fe)			0.1	10.5-13.5		0.15	0.6-0.9	0.55		0.15			Rem	
AlSi10Mg(Fe)			0.1	9.0-11.0	0.25-0.50	0.15	0.6-0.9	0.55	0.15	0.2	0.15	0.05	Rem	
AlSi8Cu3			2.0-3.5	7.5-9.5	0.10-0.55	1.2	0.7	0.15-0.65	0.35	0.25	0.25	0.15	Rem	
AlSi9Cu3(Fe)			2.0-4.0	8.0-11.0	0.10-0.55	1.2	0.6-1.0	0.55	0.55	0.25	0.35	0.25	0.15	Rem
AlSi9Cu3(Fe)(Zn)			2.0-4.0	8.0-11.0	0.10-0.55	3	0.6-1.0	0.55	0.55	0.25	0.35	0.25	0.15	Rem
AlSi11Cu2(Fe)			1.5-2.5	10.0-12.0	0.3	1.7	0.6-1.0	0.55	0.45	0.25	0.25	0.25	0.15	Rem
AlSi11Cu3(Fe)			1.5-3.5	10.5-13.5	0.35	1.7	0.6-1.0	0.6	0.45	0.25	0.25	0.25	Rem	
AlSi11Cu1(Fe)			0.7-1.2	9.6-12.0	0.35	0.55	0.6-1.0	0.55	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	Rem
AlSi17Cu4Mg			4.0-5.0	16.0-18.0	0.50-0.65	1.5	0.6-1.0	0.5	0.3			0.3	Rem	
AlMg9			0.1	2.5	8.1-10.5	0.25	0.6-0.9	0.55	0.1	0.2	0.1	0.1	Rem	



### 3.4.기타합금

#### 3.4.1.Al - Li 계

(1)미국 알코아사 등에서 개발하고 있는 항공기용 구조재의 하나. 알루미늄 합금에 리튬을 첨가하면 가벼워지고 기계적 특성도 강화되며, 소성 가공에도 뛰어난 성능을 보이게 된다.

(2)금속원소 중에서 가장 적은 밀도(0.53g/cm<sup>3</sup>)를 갖는 Li를 Al에 합금화하면, 1% Li 당 약 3% 정도 가벼워지고, 동시에 탄성률과 강도가 향상되므로 항공기용 고강도 Al 합금으로서 최적이다. 또 비저항이 높아서 유도전류가 감소하고, 방사화 후의 방사능의 감속이 빠르게 되므로 핵융합로벽 재료로서도 주목되고 있다. 1.5~2.5% Li를 함유한 합금이 이용되며, 강도의 향상은 이 합금이 550~580°C에서 급랭하여 180~200°C에서 시효처리하면 중간상 δ'(Al<sub>3</sub>Li)이 석출경화시킨 것이다. 시효시간과 함께 δ'상은 안정한 화합물 δ상(AlLi)으로 이행한다. 표에 현재 실용화되어 있는 합금을 나타내었으며, 고력 Al 합금에 Li를 함유하지 않은 2024합금(두랄루민)과 7075합금(초두랄루민)도 같이 썼다. 그러나 Li은 화학적으로 매우 활성이어서 증기압도 높고, 수소도 흡수하기 쉽다. 그러므로 합금의 용해, 주조, 열처리는 Ar 등의 불활성 가스 중에서 행하여 탈 Li에 주의를 요하고, 또 미세 조직화하여 인성의 개선을 도모하고 있다. 더구나 급랭 응고분말 분말야금법에서 Al-Li 합금을 만드는 기술이 발전되고 있다.

Al - Li 계열 합금성분

Alloy No	Al	Li	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Zr	Ag
2090	93.2-95.6	1.9-2.6	0.05	2.4-3.0	0.12	0.25	0.05	0.1	0.15			
2091	91.9-95.4	1.7-2.3	0.1	1.8-2.5	0.3	1.1-1.9	0.1	0.2	0.1			
2094	90.8-94.4	0.7-1.4		4.4-5.2	0.15	0.25-0.8	0.25	0.12	0.1			0.2-0.6
2095	91.3-94.9	0.7-1.5		3.9-4.6	0.15	0.25-0.8	0.25	0.12	0.1			0.2-0.6
2096	92.5-95.9	1.3-1.9		2.3-3.0	0.15	0.28-0.8	0.25	0.12	0.1			0.25-0.6
2098	92.1-95.5	0.8-1.3		3.2-3.8	0.15	0.25-0.8	0.35	0.12	0.1			0.25-0.6
2195	91.9-94.9	0.8-1.2		3.7-4.3	0.15	0.8-1.2	0.25-0.8	0.12	0.1			0.25-0.6
2197	93.7-96	1.3-1.7		2.5-3.1	0.1	0.25	0.1-0.5	0.1	0.12			
2297	93.7-96.2	1.1-1.7		2.5-3.1	0.1	0.25	0.1-0.5	0.1	0.12			
8090	93-96.2	2.2-2.7	1.0-1.6	0.3	0.3	0.6-1.3	0.1	0.2	0.1	0.25	0.04-0.16	
8091	92.1-95.4	2.4-2.8	1.6-2.2	0.5	0.5	0.5-1.2	0.1	0.3	0.1	0.25	0.08-0.16	
8093	93.1-96.2	1.9-2.6	1.0-1.6	0.1	0.1	0.9-1.6	0.1	0.1	0.1	0.25	0.04-0.14	

### 3.4.2. Al- 천이금속계 합금(내열성 알루미늄합금)

일반적으로 전신재용 알루미늄합금에는 천이금속 원소를 미량 첨가하는 경우가 많지만 주요첨가원소로 첨가하는 경우가 있다.이 경우 천이금속 원소로 Fe,Ti,Zr등이 주요첨가원소로 들어가며 내열성의 개선을 주요 목표로 하고 있다. Al-천이금속합금은 Fe,Cr,Ti 원소를 사용하고 있으며 제3원소를 미량 첨가하는 삼원계이상의 합금이고 분말야금으로 통상 제조를한다.주된 이합금의 종류로는 Al-Fe계,Al-Cr계,Al-Ti계,Al-Zr계로 나눈다.

(1) Al-Fe계(삼원계합금) : Al-Fe-Ce , Al-Fe-Mo-V , Al-Fe-Zr-V

(2) Al-Cr계(삼원계합금) : Al-Cr-Fe , Al-Cr-Zr-Mn

(3) Al-Ti 계(이원계합금)

(4) Al-Zr 계(이원계합금)

(5) 네오프랄(neopral)

지금까지 개발된 초소성합금의 대부분은 2상등축조직을 갖는 공정이나 공석합금이고, 실용 전신용 합금의 조성과는 다른 조성을 가지며, 제조도 쉽지 않고, 기계적 성질도 충분하지 못했다. 네오프랄은 초소성을 갖는 Al-Mg-Cu계 단상합금이며, Mn, Cr 등의 천(전)이원소를 함유한 입자분산의 균일 미세 분산에 의해서 결정립의 열적 안정화를 기하게 되었다. 그래서 통상의 DC법으로 대형 슬라브를 제조할 때, 열간, 냉간압연도 가능하며, 대량 생산에 알맞는다. 종래의 초소성 Al합금에 비교하여 아주 빠른 변형 속도에서도 800% 이상 높은 신장을 보이고, 비교적 넓은 온도 범위에서도 700% 이상의 연신율을 가지며 압연 방향과 직각의 방향에서도 크로스 압연으로 약 600% 이상의 높은 연신율을 보인다. 인장강도도 다른 초소성재의 2배 정도 높고, 내식성도 Al-Mg 합금계에 가깝다. 그래서 현재 건재패널, 조명기구 등 각종 장식용에 주목되어 있으며, 종래 재료에서는 불가능한 deep drawing이나 복잡한 형상으로 성형이 가능하다.

### 3.4.3. Al-저융점금속계 합금

Al-저융점금속계 합금은 알루미늄에 저융점금속인 Pb , Sn , Bi , Cd , In , Ga 등을 첨가하여 기계적, 화학적 성질을 개선하는데 이용 되었다.대표적합금으로 2011,6262등이 있으며 이들 과석알루미늄합금은 기계절삭시 가공칩(chip)들이 미세하게 분단하여 표면을 미려하게하고 표면절삭성이 뛰어나도록 한다.

### 3.4.4. 알루미늄 복합재료

(1) 현지에서 바로 생산이 가능한 알루미늄 입자강화복합재료를 합성하는데 있어 연소합성(CS),기계적 합성(MS)에 대한 연구가 활발하며,여기에 오산화바나듐(aluminothermic-고온에서 환원제에서 알루미늄을 이용하여 발열화학반응을 일으키는) 환원반응으로 연소합성과 기계적합성을 결합시킨 기계적-열적 활성화기술은 최근 첨단기술로 각광을 받고있다.

(2) 항공기,자동차엔진 등의 경량화와 연비절감을 위하여 소립자에의한 분산경화형 복합재료의 연구 개발에 성과를 보이고있으며 지금까지의 합성의 대상으로 고분자의 나노복합체,고분자와클러스터의 복합체등이 주로 이용 되어왔다,특히(Al + CeO2)첨가한 기술개발,Fe-Ti합성기술,5산바나듐 합성기술 등이 급상할것으로 사료된다.

### 3.5. 알루미늄(Aluminum)합금의 물리적 성질

합금		비중 (g/cm <sup>3</sup> )	전기전도도 (IACS,%)	용융온도 범위(°C)	알곤용접성	가공성	내식성
종류	질별						
1100	0	2.71	59	643-657	A	E	A
2011	T3	2.82	39	535-643	D	A	D
2014	T4	2.80	34	507-638	B	B	D
2017	T4	2.79	34	513-641	B	B	D
2024	T4	2.77	30	502-638	B	B	D
2117	T4	2.74	40	510-649	B	B	D
2218	T72	2.81	40	504-635	C	B	D
3003	H14	2.73	41	643-654	A	D	A
3004	H34	2.72	42	629-654	A	C	A
4032	T6	2.69	35	532-571	B	B	C
4043	0	2.69	42	574-632	B	D	C
5005	H38	2.70	52	632-654	A	D	A
5052	H38	2.68	35	593-649	A	D	A
5056	H38	2.64	27	568-638	A	C	A
5083	0	2.66	29	579-641	A	D	A
5086	0	2.66	31	585-640	A	D	A
6005	T5	2.70	49	607-654	A	C	A
6061	T6	2.70	43	582-652	A	C	B
6N01	T5	2.70	46	615-652	A	C	B
6063	T5	2.70	55	616-654	A	C	A
6151	T6	2.70	45	552-649	A	C	B
6262	T9	2.72	44	582-651	B	B	B
7001	T6	2.84	31	477-627	C	B	C
7003	T5	2.80	37	615-650	A	C	C
7N01	T6	2.78	36	615-650	A	C	C
7075	T6	2.80	33	476-638	C	B	C

※ 양호한 순으로 A~ D(절삭성은 A~E)로 구분했다.

A와 B는 실용적으로 거의 문제가 없지만, C,D및E는 어떤 대책이 필요한지 제약조건에 주의가 요망되며, 성형성, 용접성이 D의 경우는 일반적으로 시공하지 않는 쪽이 좋다.

### 3.6. 알루미늄 합금에 첨가되는 원소

구 분	Al	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Ni	Zr	Sn	pb	Bi	V	Li	Ga	Be	Ag	Co	Cd	B	In	Ce	Ge	P	Sr	Sb	
1000계열	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○																			
2000계열	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○	○	○		○								
3000계열	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○		○														
4000계열	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○		○				○			○								
5000계열	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○		○				○												
6000계열	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○								○	○					
7000계열	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○					○	○								
8000계열	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○	○					○		○		○	○			
casting	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○		○	○	○							○	○	○

### 3.7. 알루미늄 합금에 첨가되는 원소특징

원소기호	한글명	영문명	비중(g/cm <sup>3</sup> )	용점(°C)	선팽창계수	열전도율
Al	알루미늄	Aluminum	2.71	659	23.90	0.530
Cr	크롬	Chromium	7.18	1,903	6.20	0.160
Cu	동	Copper(Cuprum)	8.94	1,083	16.50	0.940
Fe	철	Iron(Ferrum)	7.87	1,539	11.70	0.180
Mg	마그네슘	Magnesium	1.74	650	26.00	0.380
Mn	망간	Manganese	7.74	1,244	26.00	0.380
Si	규소	Silicon	2.33	1,414		
Ti	티타늄	Titanium	4.60	1,680	8.50	
Zn	아연	Zinc	7.13	420	39.70	0.270
Ni	니켈	Nickel	8.90	1,453	13.30	0.220
Zr	지르코늄	Zirconium	6.50	1,857		
Sn	주석	Tin(Stannum)	7.29	232	23.00	0.160
Pb	납	Lead(Plumbum)	11.34	327	29.30	0.083
Bi	비스무드	Bismuth	9.80	271	13.30	0.200
V	바나듐	Vanadium	6.10	1,847	7.80	
Li	리튬	Lithium	0.53	181		
Ga	갈륨	Gallium	5.94	30		
Be	베릴륨	Berylium	1.85	1,285	12.40	0.380
Ag	은	Silver(Argentum)	10.50	961	19.70	1.000
Co	코발트	Cobalt	8.90	1,495		
Cd	카드뮴	Cadmium	8.65	321	29.80	0.220
B	붕소	Boron	1.73	2,500		
In	인듐	Indium	7.31	157		
Cs	세슘	Cesium	1.90	29	97.00	
Ge	게르마늄	Germanium	5.33	958		
P	인(검은)	Phosphorus	2.69	588		
Sr	스트론튬	Strontium	2.64	770		
Sb	안티몬	Antimony(Stibium)	6.29	631	8.5~10.8	0.050
Na	나트륨	Natrium	0.97	98		
Ca	칼슘	Caicium	1.54	851		
Se	셀레늄	Selenium	5.32	936		
Mo	몰리브덴	Molybdenum	10.22	2,610		
Ba	바륨	Barium	3.50	710		
W	텅스텐	Tungsten(Wolfram)	19.30	3,380		
Ir	이리듐	Iridium	22.40	2,443		
Au	금	Gold(Aurum)	19.30	1,063		
Ra	라듐	Radium	5.00	700		
U	우란	Uranium	19.10	1,133		

### 3.8. 알루미늄 합금에 첨가되는 원소의 영향

대부분의 금속 원소는 알루미늄과 쉽게 합금화 되지만, 특히 몇몇 합금원소들이 상업적인 Al-based 합금에 중요한 합금 성분으로 사용된다. 이와 더불어 합금의 성능과 특성을 개선하기 위해 다양한 합금 원소가 쓰인다. 알루미늄 합금에서 합금화 원소의 주기율표에서 상대적인 위치에 기인하여 알루미늄과 다양한 합금 원소들간의 이원계 형태에 대한 분류를 행할 수 있다. Be, Si, Zn, Ga, Ge, Sn, 그리고 Hg 등은 알루미늄과 단순공정(simple eutectic-type) 계를 형성한다. Be를 제외하면 이들은 주로 Iib, IIIa, Iva 족에 속한다. 위 족에 속하는 Cd, In, Te, 그리고 Pb; Va 족의 Bi; Ia 족의 Na 와 K (Cs와 Fr도 가능함)등은 Al 원자와의 반발력으로 인해 고상에의 고용도가 매우 작으며, 액상에서도 잘 섞이지 않아 높은 온도에서도 액상의 분리가 일어난다. 그러므로 그들은 알루미늄과 단순 편정반응 (simple monotectic reaction-type) 합금계를 형성한다. 이원계 결합에서 알루미늄은 이런 원소들과 알려지지 않은 금속간화합물과 혼합물을 형성한다. 유용한 데이터를 통해 이러한 라틴족원소(lanthanide)과 악티늄족원소(actinide) series를 포함하는 남겨진 금속 원소가 액상에서 혼합되며 더욱 복잡한, 한 개 이상의 금속간 화합물을 포함한 이원계 시스템을 형성한다는 것을 알 수 있다. 이러한 계에서 공정 반응은 액상을 포함한 aluminum terminal solid solution과 Al-rich의 금속간화합물에서 발생한다. 그러나 고용체(固溶體)는 액상과 Ti, V, Cr, Zr, Nb, Mo, Hf 그리고 Ta, W(4, 5, 6 주기의 IVa, Va, Via)을 포함하는 알루미늄 rich의 금속간 화합물사이의 포정반응에 의해 극단적인 알루미늄 rich 부분에서 형성된다. 다양한 금속 원소와 알루미늄의 반응에 의해 형성되는 많은 이원계 금속간화합물 가운데 몇개만이 조성적 변화 없이 상합변태(congruent transformation)로 된다. 그러나 대다수의 경우 미리 존재하는 고상과 남아있는 고갈된 액상 용액과의 반응(포정 반응)을 통해 냉각 중에 고상의 조직성질을 갖는 액상을 형성한다. 이러한 유사성에도 불구하고 알루미늄 금속간화합물의 수나 형태와 주기 그룹의 원소 사이에 명확한 관계를 찾는 것은 매우 힘들다. 다음은 알루미늄에 첨가되는 대표적인 합금원소의 영향 및 상태도를 나타낸다.

#### (1) Cr (크롬,Chromium)

소량 투입시 조직 미세화 역할을 하나 용체화처리후 냉각속도가 느리거나 고온에서 장시간 유지할 경우 Cr입자가 성장할 뿐만 아니라 Cu와 화합물을 형성하여 Cu량을 감소 시키므로 강도를 저하시킨다. Cr은 열처리형 합금에 있어서 열간가공 및 열처리 중에 재결정 및 결정립 성장을 억제하는 역할을 한다. 또한 발달된 섬유조직은 응력부식에 대한 민감성을 감소 시키고 인성을 개량한다. Cr은 양극산화에 피막에 노란색을 띄게 된다.

#### (2) Cu (구리,Copper,Cuprum)

Cu는 Zn,Mg과 함께 고온 (용체화처리 온도) 에서 고용(固溶) 되며 저온에서 석출상(析出相)을 형성하여 강도를 높여 준다.

#### (3) Fe (철,Iron,Ferrum)

Fe는 알루미늄에서 발견되는 가장 일반적인 불순물이다. 용융Al에 높은 고용도를 가지고 있어 용융 상태에서 쉽게 용해 되어진다. Al내에 존재하는 Fe의 대부분은 Al이나 다른 요소와의 화합물인 제2상으로 나타난다. Fe는 기계적 성질을 해치므로 적당량을 투입하기도 한다. 소량 투입시 Grain Size를 감소시켜 약간의 강도증가와 온도의 증가에 따른 더 좋은 크리이프(creep,재료에 일정한 응력을 장시간 가해 두었을 때, 시간 경과와 함께 변형되고, 변형도가 증가해 가는 현상) 성질을 제공한다.

#### (4) Mg (마그네슘,Magnesium)

Cu와 거의 비슷한 효과를 가지고 있다. 상온에서도 어느정도 고용도가 있어 5000계열에서와 같이 고용경화의 효과를 준다. Mg는 비중(1.74)이 낮고 용점(650°C)도 낮아 산화되기 쉽다.

### (5) Mn (망간, Manganese)

Mn의 효과는 재결정온도를 증가시키고, 열간 가공에서 섬유조직의 형성을 촉진시키므로 결정립 성장을 억제시킨다. 균질온도가 높을수록, 어닐링시의 가열속도가 빠를수록 재결정립은 미세해진다. 그러나 고온에서 장시간 열처리를 할 경우 Mn은 입자가 성장하게 되고 분산상태도 나빠진다. 1%이상 투입시 3000계열 에서와 같이 강도를 증가시키고 성형성을 좋게하는 역할을 한다. 첨가원소, 주조온도에 따라서 조대한 초정 금속간 화합물이 형성되기도 하는데 이러한 화합물은 불순물로서 가공시 균열과 Pin Hole의 원인이 되기도 한다. Mn은 보통 순수알루미늄 에서는 불순물로 작용한다. 열처리형 합금에 있어서 Mn, Cr, Zr, Fe 등의 천이원소(재결정 방해원소)는 Si 및 Al과 화합물을 형성하여 기지조직 중의 Si량을 감소시키기 때문에 시효경화 속도를 늦추고 최대 경도를 저하 시킨다.

### (6) Si (규소, Silicon)

합금원소로 존재할때 다량의 Si 함량은 주조성을 좋게 하고, 소량일 경우(6xxx계)에서와 같이 강도(Mg과 화합하여 Mg<sub>2</sub>Si를 형성)를 높이는 역할을 한다. 보통 Si량이 증가함에 따라 용탕의 유동성이 좋아지고, 강도가 증가하게 되는데 공정점(12.6%)에서 최대로 된다. 그 이상에서는 판상의 초정 Si의 석출로 강도가 급격히 떨어지게 된다.

### (7) Ti (티타늄, Titanium)

Ti는 결정립 미세화제 (Grain Refiner)로써 사용된다. 결정립 미세화 효과를 극대화 시키기 위해서는 Ti 단독 첨가가 아닌 Ti+B를 첨가해야 한다. Ti는 알루미늄의 전기전도도를 감소 시키지만 B첨가에 의해서 생성되는 TiB<sub>2</sub>에 의해 감소되는 범위를 줄일 수 있다.

### (8) Zn (아연, Zinc)

단독으로 쓰이지 않고 보통 Mg과 같이 사용하며 이때는 열처리에 매우 민감하게 되어 알루미늄 합금 중에서 가장 큰 강도를 가지게 된다.

### (9) Zr (지르코늄, Zirconium)

전기전도도를 현저하게 저하시킴. 소량첨가에 의해 재결정온도가 높아진다. Al-Mg계 합금의 응력부식균열을 억제할때 Cu-Zr의 동시첨가등이 유효하다. Al-Li계 합금에 Zr을 첨가하면 재결정이 억제되어 결정립과 아결정립(sub grain)이 미세화되고, 응력집중의 분산, 입계에서의 변형 및 슬립의 편재화(偏在化, localization)방지를 통해 인선의 개선에 매우 유효하다.

### (10) Sn (주석, Tin, Stannum)

Sn은 Pb, Bi 등과 같이 기계가공성(절삭성)을 향상 시킨다. Al-Cu 합금에 Sn을 0.05%정도 첨가하면 용체화 열처리 및 인공시효 열처리 특성이 개선되어, 강도증가 및 부식저항이 향상에 영향을 준다. 하지만 적은량의 Mg가 존재 한다면 Mg와 Sn이 부정합 2차상의 화합물을 형성하여 인공시효 특성을 크게 감소시킨다.

### (11) Pb (납, Lead, Plumbum)

Pb는 Bi와 함께 저용점 금속으로서 기계가공성(절삭성)을 향상시킨다. Pb는 비중이 무겁기 때문에 용해 및 주조 중에 편석이 발생할 우려가 많다. Al-Cu-Mg합금에서 Pb는 열간균열을 일으키기 쉽고 독성이 있다.

### (12) Bi (비스무스, Bismuth)

Bi는 Pb, Sn, Cd와 같은 저용점 금속으로서 절삭성 합금에 첨가된다. Al-Mg합금 에서는 Na에 의한 열간 균열을 방지하기 위해서 0.002~0.02% 를 첨가 하는 경우가 많다.

### (13) V (바나듐, Vanadium)

Vanadium은 전도성을 감소시키나, 알루미늄 합금에서는 금속간 화합물로 석출 하여 전도성을 향상 시키는 역할을 하므로 전도체 합금에 이용된다. 합금의 재결정 온도를 상승시키고 결정립을 미세화 하는데 도움을 주며 강도를 높이면서 열팽창 계수를 감소시킨다.



#### (14) Li (리튬,Lithium)

Li은 Al중에서 석출경화의 원소이다.리튬을 첨가한 알루미늄 합금은 저밀도,고비강조,고비강성등을 얻을수있다.알루미늄에 리튬을 첨가할경우 장점및특징으로 탄성률의향상,석출경화 및 고온강도의 개선,Zr 첨가에의한 미세결정립 초소성(超塑性,super plasticity)등을 글 수 있다.단점으로는 인성의저하,용해시 산화,열처리중 리튬 소실등 제조상의 위험 및 곤란함과 리튬의가격,합금제조 가격에의한 제품가격의 상승,내식성저하등을 들 수 있다.

#### (15) Be (베릴륨,Beryllium)

Mg를 함유하고 있는 합금에서는 0.001~0.005%의 Be를 첨가 함으로서 산화와 제품의 탈색을 크게 감소시킨다. Al-Mg-Si합금에서는 0.01~0.05%의 첨가량에 의해서 용탕의 유동성과 주조성 그리고 제품에 대해서는 연성을 증가 시킨다. Be는 열간균열을 방지하는데 기여함으로 주조 시 Crack이 발생하기 쉬운 합금에 대해서는 0.001~0.01%의 Be를 첨가하는 경우도 있다. Be는 알루미늄의 부식저항에 영향을 주지 않는다. Be의 약점은 노출시에 강도와 내구성과 관련해서 특히 민감하며 Be을 포함하는 화합물, 먼지의 흡입은 심각한 독성을 일으킬 수 있다. 따라서 용접 할 때는 Be의 함량을 제한하고 있으며,음식이나 음료의 용기로는 사용할 수 없다.

#### (16) Co(코발트,Cobalt)

일반적으로 알루미늄 합금에는 Co를 첨가하지 않는다. Al-Si-Fe합금에 있어서 Co를 첨가하면 침상의  $\beta$ 상을 구형상으로 만들어 강도 및 신율에 기여한다.

#### (17) Cd (카드뮴,Cadmium)

알루미늄에서는 저용점 원소로서 제한적으로 사용되고 있다. Al-Zn-Mg에 있어서 Cd는 기계가공성(절삭성)을 향상시킨다. Pb와 Bi보다 용점이 높기 때문에 Pb와 Bi보다 쾌삭성이 우수하다. 또한 시효시간을 단축 시키는 역할도 한다. Cd화합물은 독성을 일으키기 쉽다.

#### (18) B (붕소,Boron)

Boron은 입자 미세화와 전기 전도도를 좋게 한다. 즉 Al내에 있는 V,Ti,Cr,Mo 와 같은 불순물이 전기 전도도에 미치는 유해한 영향을 개량하기 위해 첨가한다. Boron은 0.005~0.1%의 수준으로 첨가되며 응고 시 미세화 원소로 작용된다. Ti를 B보다 많은량을 같이 첨가하면 결정립 미세화 효과는 크다.

#### (18) In(인듐,Indium)

저용점 원소로서 쾌삭성 합금에 사용되고 있다. In은 Cd처럼 상온시효를 감소 시키지만 인공시효는 증가시킨다. In이 첨가된 합금에 Mg를 첨가하면 In의 효과는 감소된다.

#### (19) P(인,Phosphorus)

과공정(過共晶,hyper-eutectic) Al-Si합금 (14~25%Si)에서 Si의 개량화 및 미세화 역할을 한다. 아공정(亞共晶,hypo-eutectic) Al-Si합금 (5~9%Si)에서 P는 존재하는양 만큼 개량화처리를 방해 한다.

#### (20) Sr (스트론튬,Strontium)

Al-Si합금에서 Sr은 Na 와 함께 개량처리제로 사용된다.

#### (21) Sb (안티몬,Antimony,Stibium)

Al-Mg합금에 있어서 열간균열 방지용으로 첨가되는 Bi대신 사용하기도 한다.

Al-Si합금에서 Si의 개량화 및 공정 Si의 미세화 역할을 한다.

Sb는 독성 문제 때문에 사용이 제한되고 있다.

#### (22) Na (나트륨,Natrium)

Al-Si합금에서 Na은 Sr와 함께 개량처리제로 사용된다.

#### (23) Ca (칼슘,Calcium)

Al-Si합금에서 Si의 개량 처리제로 사용되고 있다. 강도는 감소하고 연신율은 증가되는 특성을 가지고 있다. 용탕중의 수소가스를 제거하는 효과가 있다.

#### (24) Mo (몰리브덴 ,Molybdenum)

Al에 Mo는 0.1~1.0 ppm(0.00001~0.0001%)만큼 분산물로써 함유하고 있다. Mo는 결정립 미세화 역할을 하나 현재는 사용하지 않는다.



## 4.알루미늄 기초이론

### 4.1. 열역학(熱力學)과 상평형(相平衡)

재료과학의 중요한 분야인 상전이(相轉移)에서 주어진 계(system) 즉, 하나 또는 그 이상의 상이 혼합되어 있는 합금에서의 상의 변화와 관련된 열역학 및 동역학을 다룬다. 상(phase)은 계의 다른 부분과 물리적으로 구분되는 것으로서 성질, 구조 및 조성이 균일한 계의 한 부분으로 정의되고, 주어진 상이나 계의 조성은 각 성분의 상대적 양에 의해 결정된다. 상전이(相轉移)가 일어나는 이유는 물이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르는 것과 같이 그 계의 자유에너지를 낮추어 좀더 안정된 평형상태(平衡狀態)에 도달하기 위한 것이다. 여기에서는 상태도와 상전이를 이해하는 데 필요한 열역학적 개념을 설명하고, 알루미늄에 첨가되는 주요 합금원소의 영향 및 상태도에 대해 알아 보기로 한다.

#### 4.1.1. 평형 (平衡,Equilibrium)

실제로 금속은 평형상태에 있지 않은 경우가 대부분이다. 그러나 반응은 항상 평형상태를 향하여 일어나게 되므로 평형상태를 이해하는 것은 매우 중요하다. 평형상태를 정의하는 깁스자유에너지(Gibb's free energy)는 다음과 같이 정의된다.

$$G = H - TS \quad (1.1)$$

여기서 H는 엔탈피(enthalpy), T는 절대온도, S는 엔트로피(entropy)를 나타낸다. 엔탈피는 다음과 같이 정의된다.

$$H = E + PV \quad (1.2)$$

이때 E는 계의 내부에너지이고, P는 압력, V는 부피이다. 내부에너지는 계의 내부에 존재하는 원자의 총 운동에너지와 위치에너지를 나타낸다. 운동에너지는 고체 또는 액체 내에서의 원자 진동과 액체나 기체 내에서의 원자와 분자들의 병진운동 및 회전운동 에너지에 의해 발생된다. 반면 위치에너지는 계의 내부에 있는 원자들 사이의 상호작용 즉 결합에 의해 발생된다. 변태 또는 반응이 일어날 때 흡수되거나 방출된 열은 계의 내부에너지를 변화시킨다. 응축상 즉, 고체나 액체의 경우 PV 항은 E에 비하여 매우 작으므로  $H \approx E$ 가 되며 이런 근사치가 자주 상용될 것이다. 깁스 자유에너지와 관련된 또 다른 함수는 계의 무질서도를 나타내는 엔트로피(S)이다.

계가 가장 안정한 상태로 존재할 때를 평형상태 라고 부른다. 계에는 열린 계(open system)와 닫힌 계(closed system)가 있으며, 열린 계는 반응이 일어나는 동안 주위와의 물질교환이 일어나 양이나 조성의 변화가 일어나는 계를 나타내며, 닫힌 계는 주위와의 물질교환이 일어나지 않아 반응시 계의 질량과 조성이 변화하지 않는다. 고전 열역학에 의하면, 닫힌계의 경우 일정한 온도와 압력에서 그 계가 가장 안정한 평형상태에 도달은 조건은 깁스 자유에너지가 가장 낮은 상태에 도달하는 것이다. 따라서 평형상태에서는

$$dG = 0 \quad (1.3)$$

<식 (1.1)>에서의 G의 정의로부터 가장 안정한 상태는 낮은 엔탈피와 높은 엔트로피가 잘 조화된 상태에서 나타날 것이다. 이와 같이 낮은 온도에서는 강한 원자결합으로 인해 내부에너지(엔탈피)가 최소가 되므로 고상이 가장 안정하게 되지만, 높은 온도에서는 -TS항이 지배적으로 작용함으로 원자의 이동이 용이한 액체와 기체가 안정하게 된다. 압력의 변화를 고려한다면 <식 (1.2)>로 부터 알 수 있듯이 작은 부피를 갖는 상이 높은 압력에서 더 안정할 것이다. 식 <(1.3)>으로 주어진 평형의 정의는 다음과 같이 도식적으로 설명될 수 있다. 만약 가능한 모든배열에 대한 계의 자유에너지를 계산할 수 있다면 가장 안정한 평형배열은 계의 자유에너지가 최소가 될 때 될 것이다. 이것을 <그림2-1>에서 설명 하였다 이때 여러가지 원자 배열상태는 가로축으로 표시하였다. 배열 A는 안정한 평형상태로, 원자배열이 약간 변화되더라도 G가 변화되지 않는다. 즉, <식(1.3)>이 적용될 수 있다. 그러나 B 점의 경우처럼 자유에너지가 국부적 최소값을 갖는 반면, <식(1.3)>은 계속 만족되나, 이 자유에너지가 최소값은 아니다. 이런 배경을 안정한 평형상태와 구별하여 준안정(metastable) 평형 상태라 한다.  $dG \neq 0$ 인 중간상태는 불안정하므로 계속 존재하기 힘들고 순간적으로만 존재하게 된다. 그러므로 열적 요동에 의해 원자배열이 중간상태가 되더라도 원자들은 자유에너지가 최소값을 갖는 안정상태로 급히 재배열된다. 예를들어 온도와 <그림2-1>

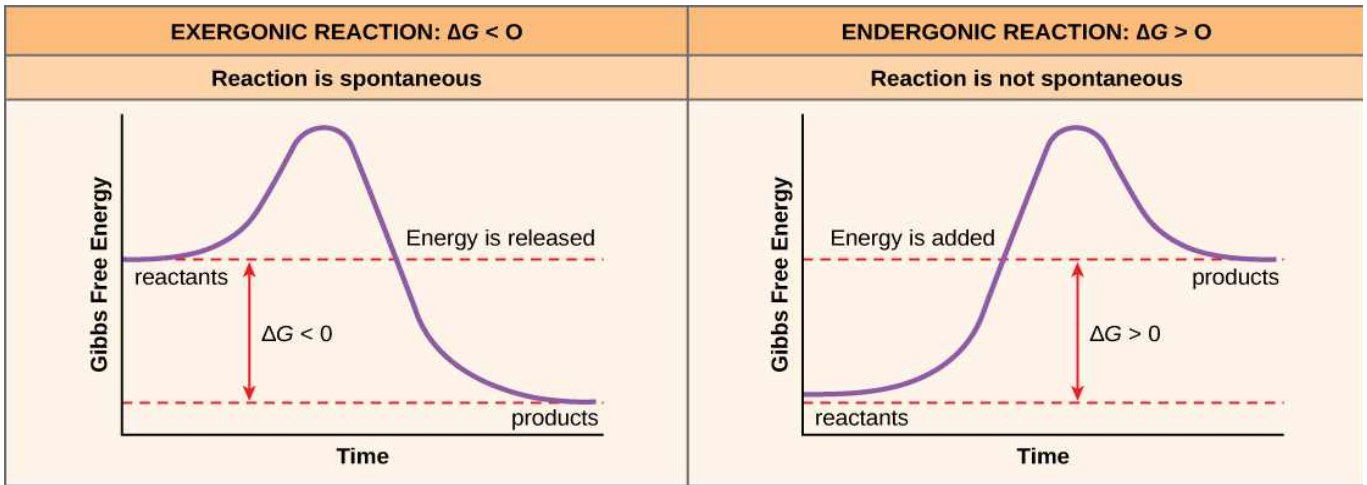


그림 2-1

여기서 A상태의 원자배열은 최소의 자유에너지를 갖는 것으로 평형상태를 나타내며 B상태에는 A상태로 천이할 수 있는 준안정상태를 나타낸다. 압력을 변화시켜 계를 안정상태에서 준안정 상태로 이동시키더라도 시간이 흐르면 계는 새로운 안정한 평형상태로 재배열할 것이다. 어떤 변태시 깁스 자유에너지가 감소된다면, 그변태는 가능하게 된다. 따라서 상변태가 일어나는가에 대한 기준은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\Delta G = G_2 - G_1 < 0 \quad (1.4)$$

여기서  $G_1$ 과  $G_2$ 는 각각 초기상태와 최종상태의 자유에너지이다. 변태가 일어나는 과정은 직접 안정한 상태로 되는 경우도 있지만 중간의 준안정상태를 통하여 안정상태로 되는 경우도 있다. 냉각되는 동안에는 반응이 시작되기 전에 어느 정도의 과냉각(undercooling)이 존재해야 하며, 또는 가열되는 동안에는 실제온도가 어느 정도 과열되어 있어야 한다. 즉 모상(母象)으로부터 상변화를 일으키며 새로운 상이 생성되는 경우 상간의 계면이 생성되기 때문에 계면에너지에 의한 에너지 증가가 상변화 시 에너지 장벽이 존재하기 때문이다.

과냉각이 임계 과냉각보다 작은 경우 신상생성에 의한 자유에너지 감소가 새로운 계면의 생성에 의한 에너지 증가 효과를 극복하지 못하기 때문에 과냉각 상태로 유지되더라도 새로운 상(相)의 생성과 성장에 의한 상변이가 일어나지 못한다. 따라서 새로운 상이 핵생성(核生成)되어 성장 하기 위해서는 모상(母象)은 임계과냉각 이상으로 과냉각 되어 상변화에 필요한 충분한 구동력을 제공할 수 있어야 한다.

#### 4.1.2. 평형상태도(平衡狀態圖, equilibrium diagram)

어떤 상태가 평형상태라 하는 것은 그 계에서 열평형(thermal equilibrium), 기계적평형(mechanical equilibrium) 및 화학평형(chemical equilibrium) 모두가 만족되는 상태를 나타낸다. 합금에서와 같이 일정한 압력하에서 온도와 조성에 따른 평형상의 분포 및 경계를 표시한 것을 평형상태도(平衡狀態圖)라 한다. 여기서 평형은 화학평형(chemical equilibrium)이 만족되는 조건으로서 다른 열평형이나 기계적인 평형은 유지된다고 가정한 것이다. <그림 2-2>는 이원 합금계에서의 가상적 평형상태도를 나타낸다.

이 상태도  $\alpha$ 와  $\delta$ 의 두 가지 고용체 뿐만 아니라,  $\beta$ 와  $r$ 의 두 가지 금속간 화합물이 존재하는 경우를 설명하기 위한 것이다. 여기서 온도와 조성에 따라 존재하는 각상을 설명한다. 일반적으로 단일상 영역은 두 상의 공존 영역에 의하여 분리된다. 어떤 합금에서는 가열과 냉각시 나타나는 상 변화는 상태도에서 그 조성선을 따라 알아볼 수 있다. 예로서 합금①<그림 2-2>는  $T_1$ 온도 이상에서는 액상 상태이며,  $T_1$ 과  $T_2$  사이에서는 고용체로 결정화됨으로 액상과 고상이 공존하고  $T_2$  이하에서는 고용체의 단일상으로 존재한다. 한편 합금⑤는 냉각하면 액상상태를 통과하여 고상  $\beta$ 와 액상의 공존영역을 지나  $\beta$ 화합물이 된다. 그러나  $T_3$ 에서 이 혼합물은 사라지고 합금은 다시  $\alpha$ 고용체와  $r$ 화합물의 혼합물로 된다. 두 상이 공존하는 영역에서 존재하는 각상의 평형조성은 경계선에 의해 주어진다. 예를 들면, 온도  $T_4$ 에서 합금⑤는  $x$  조성의  $\alpha$ 상과  $z$  조성의  $r$ 이 공존하며, 두 상의 상대적 비율(무게)은 단순한 지렛대 법칙 (lever rule)에 의하여 얻을 수 있다. 즉  $\alpha$ 량 :  $r$ 량의 비는  $yz : yx$  와 같다. 상의 상태가 변화될 때마다 즉, 평형상태도에서 가열과 냉각되는 동안 합금의 조성이 경계선과 교차 <그림2-2>의 상태도는 석출(precipitation), 공정(eutectic), 포정(peritectic), 공식(eutectoid) 반응과 같은 중요한 반응이 포함된 것으로서 합금 ①~⑥의 경우 이들 반응이 일어나고 있음을 알 수 있다. 실제 합금의 경우에는 비평형상태로 유지되는 경우가 있기 때문에 존재하는 상의 수 및 조성은 평형상태도의 경우와 다르게 나타날 수 있다는 것에 유의해야 한다.

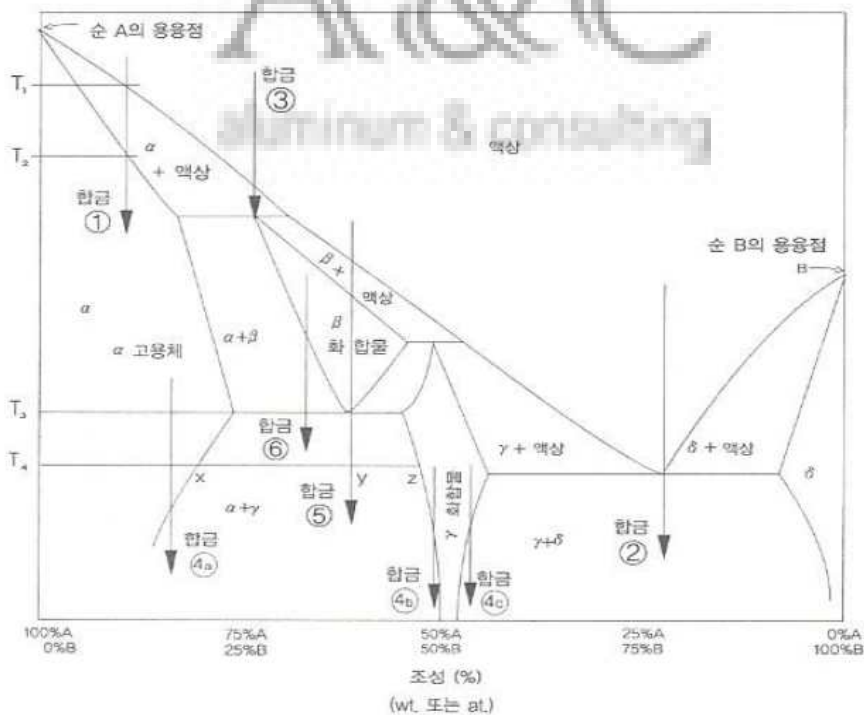


그림 2-2 가상적 2원계 평형상태도

## 4.2. 응고(凝固, solidification)

응고는 용융된 액상이 고상으로 상변화하는 과정을 나타내며, 제조된 합금의 결정입도(結晶粒度), 수지상조직(樹枝狀組織)간격, 용질원자(溶質原子)의 분포 등과 같은 1차조직(응고조직) 과 응고시의 부피수축과 열응력(熱應力) 등에 의해 생성된 응고결함(凝固缺陷)은 그 합금의 최종 기계적성질에 큰 영향을 미치기 때문에 응고과정을 잘 이해하고 이들을 제어하는 것은 공업적으로 매우 중요하다. 본 장에서는 핵생성 및 고상의 성장과 평형, 비평형 응고와 같은 응고의 기본 현상에 대해서 알아보고 주요 시계 합금의 응고조직을 알아보기로 한다.

### 4.2.1. 핵생성(核生成, nucleation) 과 성장(成長, growth)

온도가 올라가면 고상이나 액상의 자유에너지는 떨어지며 액상은 고상보다 더 큰 엔트로피를 갖기 때문에 자유에너지가 더 빠른속도로 감소한다. 따라서 고온에서는 액상의 자유에너지가 고상보다 낮아 안정하며 저온에서는 반대로 고상이 더 안정하다. 그리고 고상 과 액상의 자유에너지가 같은 온도를 평형용융온도  $T_m$ 이라 한다. 한편 합금의 경우에는 고상 과 액상이 공존할때 자유도가 1이상이므로 어떤 온도구간에 걸쳐서 고상+액상의 공존영역이 존재하며 그상하의 온도를 각각 액상성온도  $T_L$  와 고상선 온도  $T_S$ 라 한다. 액상이 용융온도  $T_m$ 이나 액상성온도  $T_L$  이하로 냉각되면 액상은 고상으로 변화하려는 구동력을 가진다. 이 구동력은 액상 과 고상의 자유에너지 차이로서, 즉 단위체적당의 응고구동력은  $\Delta G_V = G_L - G_S$ 으로  $G_L, G_S$ 는 각각 액상과 고상의 단위체적당 자유에너지이다. 이 구동력은 액상의 과냉각이 증가할수록 증가한다. 한편 액상으로부터 고상이 생성되는 경우에는 고상과 액상사이의 계면이 생성되게 된다. 이계면에서의 원자구조와 조성은 고상이나 액상에서의 원자구조나 조성과 다르기 때문에 계면에 있는 원자는 과잉의 에너지를 갖으며 이 과잉의 에너지를 고/액 계면에너지라 한다. 즉 액상에서 고상이 생성되는 경우 고상의 생성으로 인한 에너지 감소 뿐만 아니라 새로이 고/액계면이 생성되기 때문에 계의 에너지는 증가할 수 있다. 따라서 온도가 그 계의 평형온도 이하로 낮아져도 액상이 저절로 고상으로 상변 화하지 않고 액상은 용융온도 이하에서도 과냉각된 액상으로 오랜 시간 유지할 수 있다. 이것은 액상이 고상으로 응고할 때 상전이를 위해서는 극복해야하는 에너지 장벽이 존재한다는 것을 나타내며, 이와 같이 핵생성 및 성장의 과정을 거쳐서 일어나는 상변태를 1차 상전이(1st phase transition)라 한다. 응고시 이 계면에너지의 영향은 고상의 크기가 작으면 작을수록 그 역할이 증대되기 때문에 액상에서 고상의 핵이 생성될 때 매우 중요한 역할을 한다. 과냉각된 액상내에서 고상핵이 생성되는 과정은 다음과 같이 두가지로 나누어 생각할 수 있다. 즉 액상에서 다른 물질의 도움 없이 원자의 요동에 의해서 고상핵이 생성되는 균일핵생성 과 주형벽이나 산화물 등 다른 물질의 표면에서 이물질의 도움을 받으며 생성되는 불균일핵생성을 들 수 있다.

#### 4.2.1.1. 균일핵생성(均一核生成)

핵생성에 이용되는 자유에너지가 모상의 각 머무른 부피(retention volume)에 있어서 같으면, 핵이 생성될 확률도 모든 머무른 부피에서 같다. 이러한 조건하에서 일어나는 핵생성을 균일핵생성(homogeneous nucleation)이라 한다. 용융온도  $T_m$ 보다  $\Delta T$  만큼 과냉각된 액상내의 원자들은 계속하여 요동(fluctuation)치고 있으며, 어느 순간 국부적으로 액상의 원자구조가 고상의 구조와 같아지게 되면 고상의 입자가 생성된다. 요동하다가 어느 순간 반경  $r$ 을 갖는 고상입자가 생겼다고 하자, 이 때 이 고상의 생성으로 인한 자유에너지 변화는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta G_{\text{hom}} = -\frac{3}{4}\pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \quad (2.1)$$

우변의 처음 항은 고상 생성시 감소하는 체적 자유에너지 항으로  $r^3$ 에 비례하며 ,

두 번째 항은 고/액 계면의 생성으로 인해 증가하는 계면에너지 항으로서  $r^2$ 에 비례한다. 반경  $r$ 에 따른 자유에너지 변화를<그림 2-5>에 나타내었다. 반경  $r$ 이 작을 때에는 계면에너지에 의한 자유에너지 증가가 고상 생성으로 인한 체적자유에너지 감소보다 우세하기 때문에 총 자유에너지는 점점 증가하여 반경이 임계 반경  $r=r^*$ 에 도달하면 그 증가량이 최대가 된다. 그러나  $r$ 이 임계반경  $r^*$ 보다 더 증가하면 체적자유에너지 감소가 더 우세하여 자유에너지 증가량은 감소하게 된다. 따라서 원자의 요동에 의해서 생성된 고상 입자들 중 임계반경보다 큰 고상입자의 경우에는 액상 원자가 고상으로 이동되어  $r$ 이 증가하면 증가할수록 자유에너지가 낮아지기 때문에 고상은 점점 더 크게 자라 성장한다. 이와 같이 임계크기 보다 커서 과냉각된 액상에서 스스로 성장하는 고상입자를 핵 (nucleus) 이라 한다. 그러나 액상에서 원자의 요동에 의해 생성된 고상입자가 임계 크기보다 작은 경우에는 액상으로부터 원자가 이동되면 될수록 자유에너지가 증가하기 때문에 그 고상표면의 원자는 액상으로 더 빨리 이동되며, 결국 그 입자는 소멸된다. 이와 같이 생성과 소멸을 반복하는 임계 그리고 임계크기를 갖는 고상입자는 주위의 액상과 불안정한 평형상태를 유지하며, 원자의 이동방향에 따라 핵 또는 배아(胚芽,embryo)로 변한다. 따라서 액상에서 고상핵이 생성되어 스스로 성장하기 위해서는 자유 에너지의 최대 증가량  $\Delta G^*_{\text{hom}o}$  을 넘어서야 하며 이것을 균일핵생성시의 에너지 장벽(energy barrier)이라 한다. 고상의 핵생성이 원자의 요동에 의해 일어난다는 것을 생각하면 핵생성시 극복해야 할 에너지 장벽이 작아야 핵생성이 잘 일어날 수 있다는 것을 예측할 수 있다. <식 (2.1)>로부터 얻은 핵의 임계반경  $r^*$ 와 균일 핵생성시 극복해야 할 에너지 장벽  $\Delta G^*_{\text{hom}o}$  은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\Gamma^* = \frac{2\gamma SL}{\Delta G_V} \quad \Delta G^*_{\text{hom}o} = \frac{16\pi r^3 SL}{3(\Delta G_V)^2} \quad (2.2) \quad (2.3)$$

따라서 핵의 임계반경은 계면에너지  $rSL$ 에 비례하고  $\Delta G_V$  구동력에 반비례함을 알 수 있다. 그리고 에너지 장벽은  $r^3 SL$ 에 비례하고 구동력의 제곱에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 고/액 계면에너지가 작을수록 그리고 응고의 구동력이 증가할수록 핵생성이 용이하게 일어남을 알 수 있다.

한편 순금속의 경우 액상이  $\Delta T$  만큼 냉각되었을 때 응고 구동력은 다음과 같이 근사식으로 표시할 수 있다.

$$\Gamma^* = \frac{2\gamma SL T_m}{\Delta H_m} \frac{1}{\Delta T} \quad \Delta G^*_{\text{hom}o} = \frac{16\pi r^3 SL T_m^2}{3\Delta H_m^2} \frac{1}{(\Delta T)^2} \quad (2.4) \quad (2.5)$$

즉 평형용융온도에서는 임계핵의 반경이로서 액상으로부터 고상핵이 생성될 수 없음을 알 수 있으며, 고상의 핵이 생성되기 위해서는 그 액상은 과냉각되어야 함을 알 수 있다.



#### 4.2.1.2. 불균일핵생성(不均一核生成)

일반적으로 응고시 균일핵생성은 관찰되지 않는다. 이것은 액상이 과 냉각되면 액상 내의 이물질 표면 또는 주형벽이 핵생성 자리로 작용하여 낮은 과냉각에서 핵이 생성되어 성장하기 때문이다. <그림 2-3>과 같이 잘린 구형의 핵이 주형표면에서 생성되는 경우를 생각하자. 이때 고상, 액상 및 주형의 3상이 만나는 삼중점에서의 접촉각을  $\theta$ 라 하면 힘의 평형 조건으로부터 계면에너지 사이에는 다음의 관계가 만족된다.

$$\gamma_{ML} = \gamma_{SM} + \gamma_{SL} \cos\theta \quad (2.6)$$

여기서,  $\gamma_{ML}$ ,  $\gamma_{SM}$ ,  $\gamma_{SL}$ 는 각각 주형/액상, 고상/주형 및 고/액 계면에너지를 나타낸다.

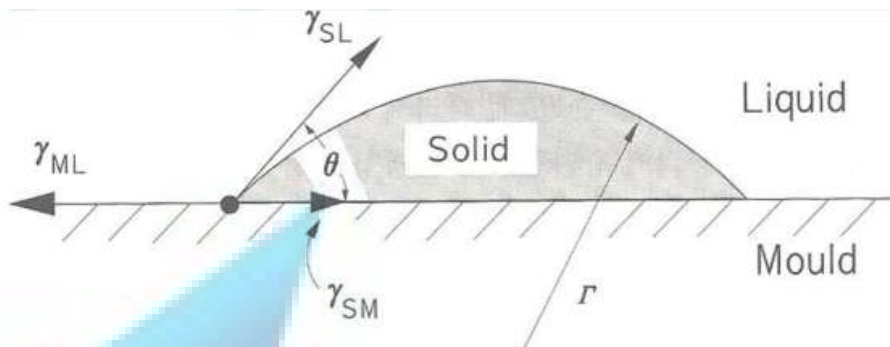


그림 2-3. 주형벽에서 접촉각  $\theta$ 를 이루며 고상이 생성되는 불균일핵생성 모델  
그림과 같은 불균일핵생성이 일어날 때 계의 자유에너지 변화는 다음과 같다.

$$\Delta G_{het} = -V_S \Delta G_V + A_{SL} \gamma_{SL} + A_{SM} \gamma_{SM} - A_{SM} \gamma_{ML} \quad (2.7)$$

여기서  $V_S$ 는 생성된 고상의 체적이며,  $A_{SL}$ ,  $A_{SM}$ 은 각각 고/액 계면 및 고상/주형 계면의 면적이다. 마지막의 음의 값을 갖는 항은 주형벽에 고상핵이 생성됨으로서 감소한 액상/주형 계면에너지이다. 그림과 같이 반경  $r$ 을 갖는 잘린 구형태의 고상이 생성되는 경우 <식(2.7)>은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Delta G_{het} = \left( -\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_V + 4\pi r^2 \gamma_{SL} \right) f(\theta) = \Delta G_{hom} f(\theta) \quad (2.8)$$

여기서  $f(\theta) = (2 + \cos\theta)(1 - \cos\theta)^2 / 4$  으로  $\theta = 0$  인 경우 0으로부터  $\theta = \pi$ 인 경우 1로 단조증가(單調增加)하는 함수이다. 그리고 이 식은 핵의 모양을 결정하는 접촉각  $\theta$ 의 함수인을 제외하고는 균일핵생성시의 에너지 변화와 동일함을 알 수 있다. 따라서 불균일 핵생성시의 결정핵(結晶核) 크기 및 핵생성시의 극 복해야할 에너지장벽은 다음과 같다.

$$\Gamma_{het}^* = \frac{2\gamma_{SL}}{\Delta G_V} = \Gamma_{hom}^* \quad (2.9)$$

$$\Delta G_{het}^* = \frac{16\pi r^3 \gamma_{SL}}{3(\Delta G_V)^2} = \Delta G_{hom}^* f(\theta) \quad (2.10)$$

〈그림 2-4〉는 균일 핵 생성시와 불균일 핵생성시 반경  $r$ 인 고상입자가 생성될때의 자유에너지 변화를 나타내는 것으로서, 불균일 핵생성시의 에너지장벽은 균일핵생성시의 에너지장벽보다 작지만, 임계 핵의 반경은 두 경우 동일함을 알 수 있다. 한편 핵생성이 용이하게 일어나기 위해서는 핵생성에 필요한 에너지 장벽이 작아야 하며, 이 에너지 장벽은 접촉각  $\theta$ 가 작을수록 감소한다. 접촉각이  $180^\circ$ 인 경우에는 균일 핵생성시의 경우와 동일하며, 접촉각(接觸角)이  $90^\circ$ 인 경우에는 불균일 핵생성시의 에너지 장벽의 크기는 균일핵생성시의 1/2 이며, 접촉각이  $0^\circ$ 인 경우에는 에너지장벽이 없다. 접촉각  $\theta$ 는  $r_{ML} - r_{SM}$  이 클수록 감소하므로 생성 되는 고상과 주형사이의 계면에너지가 작거나, 주형과 액상사이의 계면 에너지가 크면 접촉각이 감소하며, 이때 주형은〈그림 2-4〉균일 핵생성 및 불균일 핵생성시의 효과적으로 고상을 핵생성시키다.

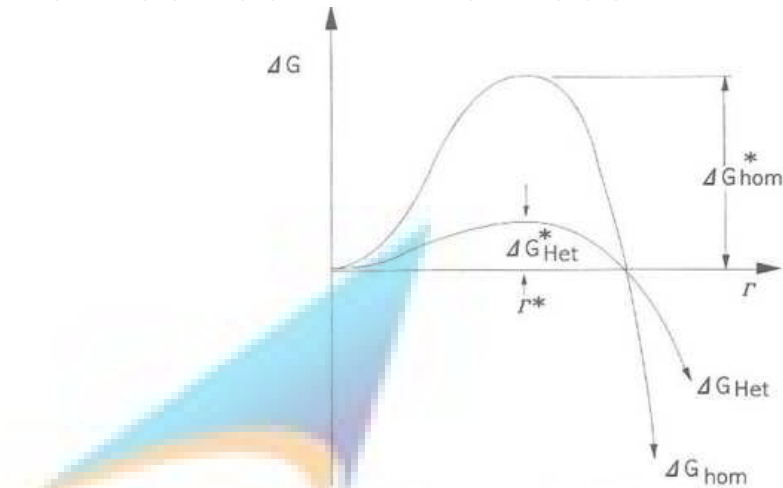


그림 2-4 고상입자크기  $r$ 에 따른 자유에너지 변화

#### 4.2.1.3. 핵성장

고/액 계면은〈그림2-5〉과 같이 원자스케일로 볼 때 계면이 평활한 평활계면과 요철이 많이 있는 확산계면으로 분류할 수 있다. 확산계면의 경우에는 고상으로부터 액상으로의 천이는 여러 개의 원자층을 거쳐 점진적으로 일어나며, 평활계면의 경우에는 고상으로부터 액상으로의 천이가 단원자층을 경계로 하여 급격히 일어난다. 실제로는 좀더 복잡하여 응고시 관찰되는 평활계면은 약 2~3개의 원자 층의 두께를 갖고 있는 것으로 알려져 있다. Jackson의 단원자층 모델에 의하면 일반적으로 용융엔트로피  $\Delta H_m / T_m$ 이  $4R$ ( $R$ 은 기체상수)보다 큰 경우에는 평활계면이 에너지 측면에서 더 안정하다. 그러나 대부분의 금속의 경우에는  $\Delta H_m / T_m \approx R$ 이므로 고/액 계면은 확산계면을 이룬다. 확산계면의 경우 고상으로부터 액상으로 이동함에 따라 원자의 배열 정도는 결정의 규칙적인 배열로부터 액상에서의 임의의 배열로 점진적으로 원자의 배열의 규칙도가 저하한다. 즉 계면 내에 있는 원자의 특성이 고상으로부터 액상으로 점진적으로 변화한다는 것이다. 일반적으로 금속이나 합금에서 고/액 계면은 확산계면이므로 여기서는 확산계면의 성장에 대해 알아본다.과냉각된 액상에서 고상이 성장할 때 액상의 원자는 고/액 계면을 통과 하여 고상으로 이동하고 이 원자는 고상표면의 적당한 위치에 자리를 취해야한다. 따라서 확산계면의 경우에는 평활계면의 경우보다 매우 용이하게 원자가 액상으로부터 고상으로 이동될 수 있다. 확산계면의 경우 계면과 접한 액상내의 원자는 고상표면의 임의의 격자점으로 이동될 수 있다.

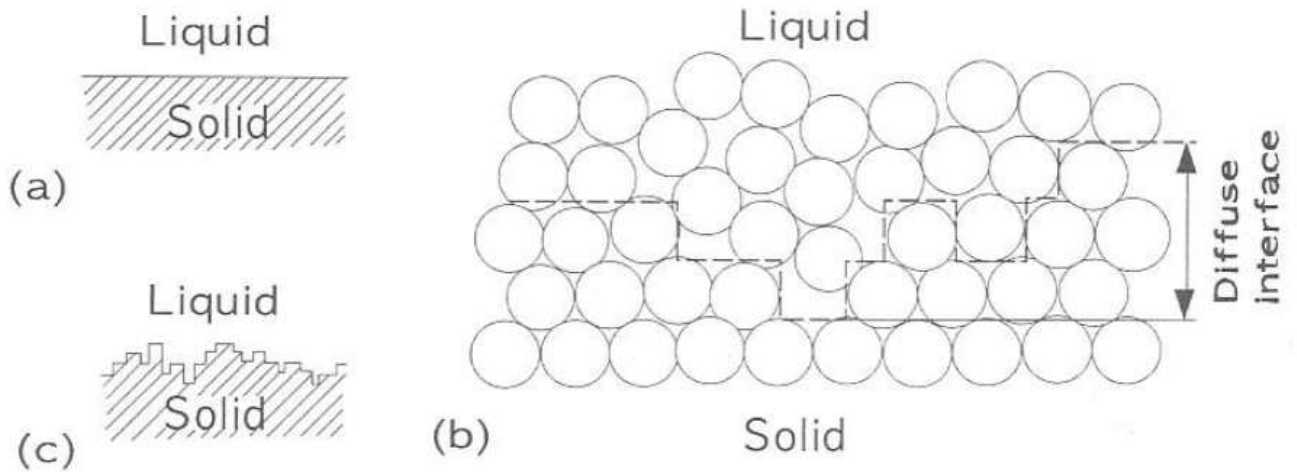


그림2-55 고/액 계면의 구조 (a)평활계면,(b) and (c)확산계면

따라서 액상 내의 원자가 고상으로 이동될 때 계면의 모든 부분은 같은 속도로 계면에 수직인 방향으로 이동될 것이다. 이와 같은 성장을 연속성장(continuous growth)이라 한다. 계면의 온도가 평형용융 온도라면 계면을 경계로 하여 단위시간당 액상에서 고상으로 이동하는 원자의 수나 고상에서 액상으로 도약하는 원자의 수가 같아 계면은 이동하지 않고 평형상태를 유지할 것이다. 고상이 성장하기 위해서는 단위시간당 액상으로부터 고상으로 이동하는 원자수가 고상으로부터 액상으로 이동되는 원자수보다 더 커야 한다. 화학에서의 반응속도론을 이용하면 계면에서 액상으로부터 고상으로의 원자이동의 구동력이 일 때 계면이동속도  $V$ 는 다음과 같다.

$$V = f V_0 \left( 1 - \exp\left(-\frac{\Delta G}{RT}\right) \right) \quad (2.11)$$

여기서  $f$ 는 고상표면에 도달한 원자가 고상에서 제자리를 찾아 고상에 부착되는 확률을 나타내는 인자(因子)로 금속과 같은 확산계면의 경우에는 약 1이다. 그리고  $V_0$ 는 소리의 속도에 해당하는 속도로 계면이 이동할 수 있는 최대 한계속도를 나타낸다. 실제 응고시 계면의 이동속도  $V$ 는  $V_0$ 에 비해 매우 작기 때문에 위의 식으로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{V}{V_0} = \frac{\Delta G}{RT} \quad (2.12)$$

한편 계면에서 액상이 고상으로 응고할 때의 구동력은 계면의 온도가 평형온도로부터 벗어난 정도인 과냉각에 비례하기 때문에 일반적으로 응고속도는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V = \mu \Delta T_k \quad (2.13)$$

여기서  $\mu \approx \frac{\Delta H_m V_0}{RT_m^2} \approx \frac{\Delta S_m V_0}{RT_m}$  는 계면동력학계수(interface kinetics coefficient)이며,  $\Delta T_k$ 는 계면에서의

동적과냉각(kinetic undercooling)이다. 순금속의 경우 일반적으로 계면동력학계수  $\mu$ 는 약 1m/sK 정도의 값을 갖으며 통상 0.01cm/s 정도의 속도로 응고하는 주조의 경우 계면의 동적과냉각은 약 0.001K 이하로 매우 작아 무시할 수 있다. 철강과 같은 일반 합금의 응고시에도 이 동적과냉각은 매우 작아 무시될 수 있으며, 고/액 계면에서는 국부평형이 유지된다. 즉 합금의 응고시 평면의 고/액 계면에서의 고상과 액상의 조성은 그 온도에서의 상태도상의 고상선과 액상선의 조성을 유지하며 계면이 이동한다.



#### 4.2.1.4. 수지상 결정(樹枝狀結晶, dendrite)의 성장기구

과냉각된 액상이나 합금응고시 생성된 핵이 성장하여 응고가 일어난다. 응고시 고/액 계면의 전방에 있는 액상의 과냉각에 의해 평면계면은 더 이상 안정하지 못하고 불안정하여져 불규칙한 계면으로 천이한다. 이때 고/액 계면에너지 또는 계면동력학계수의 이방성(異方性)에 의해 고상은 수지상으로 성장한다.<그림 2-6>은 주형 표면에서 핵생성된 고상의 성장시 초기 모습을 보여 주는 것으로서 표면으로부터 여러 개의 1차 수지상결정이 생성되어 내부로 성장한다. 이들 수지상 결정은 서로 경쟁적으로 앞으로 성장하려 하며 주위의 액상에 용질을 농축시킨다. 따라서 뒤쳐진 1차 수지상결정은 더 이상 성장하지 못하고 성장을 멈추게 된다. 일반적으로 수지상 결정은 그 계면에너지의 이방성에 의하여 어떤 특정한 결정학적 방향으로 우선적으로 성장한다.A1과 같은 FCC 금속에서 수지상 축은 [100] 방향으로 수지상 선단은

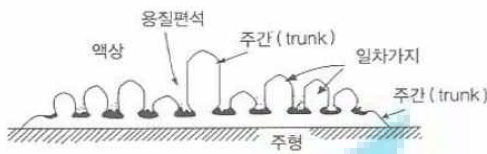


그림 2-6. 응고의 초기단계에서 주형벽 성장하는 수지상

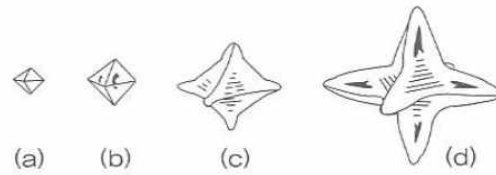


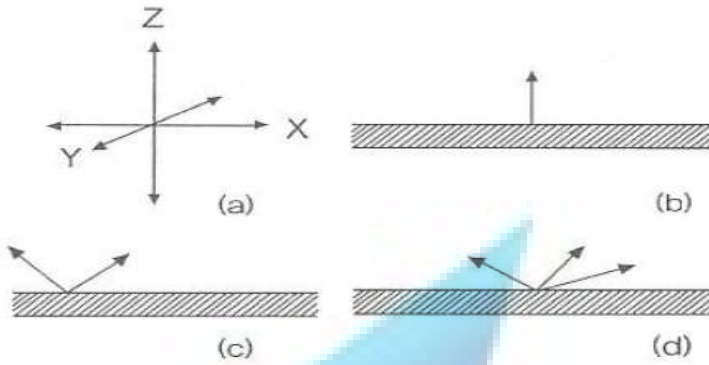
그림 2-7. 팔면체 형상 결정으로부터 수지상 주축의 생성과정

4개의 조밀 충전된 {111}면으로 둘러싸인 형태를 갖는다. 예를 들면 A1의 작은 자유결정이 액상에서 팔면체형으로 성장할 때<그림 2-7>(a)에 나타난 것과 같이 된다.<그림 2-7>(b)는 응고시 용질(溶質)의 분배에 의하여 결정의 표면으로 방출된 용질은 전방으로만 확산되어야 하기 때문에 성장 속도는 낮다. 한편 6개의 피라미드의 코너에서는 고상으로부터 방출된 용질이 주위의 액상으로 확산되기 쉽기 때문에 고/액계면 전방에서 용질 편석이 가장 작게 되어 성장이 빠르기 때문에<그림 2-7> (c) 및 (d)와 같이 수지상(樹枝狀)의 주축을 형성하면서 돌출하기 시작한다. 성장하는 수지상의 대칭성은 계면에너지의 이방성에 의해 결정되며 주요 금속에서 관찰되는 수지상의 성장 방향을<표 2-1>에 나타낸다.

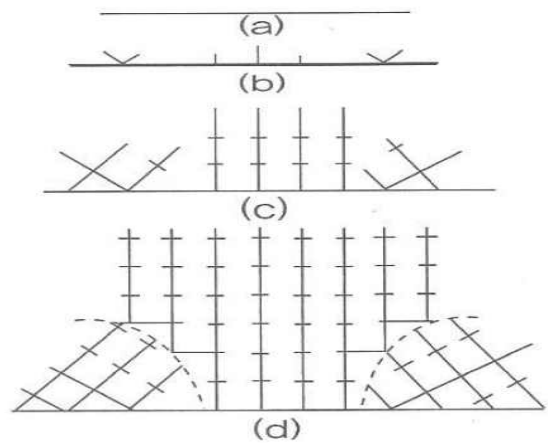
표 2-1 수지상정 성장 방향

구분	조직	선택범위
Fe, Si $\beta$ -Brass	body-centered cubic	<100>
Al, Cu, Ag, Au, Pb	face-centered cubic	<100>
Cd, Zn	close-packed hexagonal	<1010>
$\beta$ -Sn	tetragonal	<100>

알루미늄의 결정이 과냉각된 액상에서 성장한다면, <그림 2-8>(a) 와 같이 3개의 주축이 같은 속도로 성장할 것이다. 이들의 계속된 줄기, 1차 가지는 주축으로부터 성장 하며, 2차가지는 1차 가지로부터 형성된다. 그러나 주형벽 상에서 핵생성이 일어난다면 주축과 수지 상의 가지는 모든 방향으로 동등하게 성장하지 않는다.액상에서 과냉은 주형벽에서 최대가 되므로 주형표면을 따라 성장하는 두 주축은<그림 2-8>(b)에 나타낸 것과 같이 주형표면에 수직인 주축보다 더 빠르게 성장한다.<그림 2-8>(c)는 주형벽을 따라 하나의 주축만 성장하는 결정의 성장을 나타내며, <그림 2-8>(d)는 주형벽과 한 점에서 이들 모두가 교차되는 주축의 성장을 나타낸 것이다. 주형벽에서 성장하는 결정은 어떤 경우에서 주형표면에 가장 인접한 주축이 항상 가장 빠르게 성장한다, 주형 표면상에서 동시에 모두가 결정화 될 때 수지상의 성장을 고려해 보자<그림 2-9>(a).



<그림 2-8> 주형표면과 수지상정 주축의 성장방향



<그림 2-9> 주형벽에서의 결정성장

수지상정(樹枝狀晶)의 성장 속도는 액상에서 과냉도에 따라 좌우되며 과냉은 주형표면에서 최대이므로 수지상정이 주형표면을 따라 먼저 성장될 것이다<그림 2-9>(b).이와 같이 얇은 고체피막이 주형 벽에 형성되므로 하나의 수지상정이 인접한 수지상정과 접촉하게 된다. 열흐름에 평행한 수지상정 축과 가지가 더 빠르게 성장하며, 주축이 주형 벽에 수직이 아닌 수지상정의 성장은 인접결정에 의하여 방해받는다. 1차 수지상 결정(樹枝狀結晶)은 선택적으로 성장하여 2차 수지상 결정(樹枝狀結晶)을 형성한다.<그림 2-9>(d)에 나타낸 것과 같이 수지상 결정 인접한 수지상정과 접촉하게 되면 수지상 결정의 성장방향이 변화되어 1차 수지상 결정의 원래 성장 방향에 평행하게 성장하게 된다. 일반적으로 성장방향이 평행하게 성장하는 수지상 결정을 1차 수지상 결정라 하나 실제적으로는 주축, 1차 수지상 결정, 2차 수지상 결정 및 모두 같은 방향으로 성장하는 3차 수지상 결정 등으로 되어 있다. 모든 일반적인 응고 과정은 비평형응고를 어느 정도 포함하고 있다. 비록 평형응고는 실제로 관찰하기는 힘들지만, 몇몇 제한적인 조건에서 매우 흥미로운 결과를 제시한다. 특히, 응고과정에서 평형 상태에서 벗어난 정도가 실제로 관찰되는 미세조직에 커다란 영향을 미친다.

#### 4.2.2. 평형/비평형 응고

모든 일반적인 응고과정은 비평형응고를 어느정도 포함하고 있다.비록 평형응고는 실제로 관찰하기는 힘들지만 몇몇 제한적인 조건에서 매우 흥미로운 결과를 제시한다.특히 응고과정에서 평형 상태에서 벗어난 정도가 실제로 관찰되는 미세조직에 커다란 영향을 미친다.

#### 4.2.2.1. 평형응고

<그림 2-10>에서 알 수 있는 바와 같이, 평형 응고는  $L^2 \ll D_s t$  관계가 만족하는 경우 근사된다. 이 때  $L$ 은 응고된 길이,  $D_s$ 는 고상 내 용질의 확산속도,  $t$ 는 시간이다. 전체 조성이  $C_0$ 인 합금은  $T_1$ 에서 응고하기 시작해서  $T_s$ 에서 완료된다. 응고하는 초기의 고상의 조성은  $kC_0$ 로 주어지고, 이때  $k$ 는 표면과 액체의 용질 농도의 비율인 평형 분배계수( $C^*_S / C^*_L$ )이다. 고상 내에서의 확산이 완전하다고 가정하면, 고상내에서 용질의 농도 ( $C_s$ )는 고상선 상의 표면 고상 용질 농도( $C^*_L$ )와 같다. 액상에서의 확산 역시 완전하다고 가정하면, 응고 후에  $C_0$ 의 용질 농도를 갖는 균일한 단일상의 금속이 얻어진다.

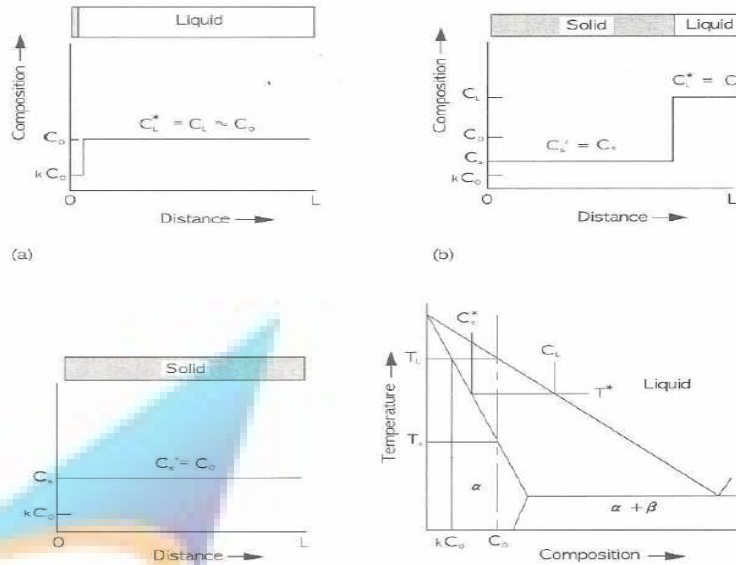


그림 2-11. 고상확산이 없고, 액상에서 완전 확산이 일어난다는 가정하에서 (a) 응고 개시; (b)  $T=T^*$ ; (c) 응고 완료후 용질재분배를 도시한 그림, (d) 응고 동안 온도에 따른 조성 변화를 나타내주는 상태도

#### 4.2.2.2. 국부 평형응고

상용응고 공정의 경우 냉각속도는  $0.1 \sim 100^\circ\text{C/s}$  혹은  $0.18 \sim 180^\circ\text{F/s}$  정도이다. 이러한 냉각속도로 응고할 때에는 시편 전체에서 평형은 유지되지 않지만 고/액 계면에서는 평형이 유지된다. 이와 같이 계면에서만 평형을 유지하며 응고하는 것을 국부평형응고라 한다. 이 경우의 응고거동은 고상에서의 확산을 무시하고, 액상에서는 완전한 혼합이 이루어진다고 가정하고 해석할 수 있다. 즉  $D_S \approx 0$  계면에서 국부적으로 평형이 유지됨 ( $k=C^*_S / C^*_L$ ), 그리고  $D_L \approx \infty$  이라는 가정하에서 이해될 수 있다. 이러한 조건하에서 응고는 <그림 2-11>에 나타내어진다.  $T_1$  온도에서 응고 개시된 고상은  $kC_0$ 의 농도를 가지고 있으며, 액상선 아래 온도에서 응고계면에서 고상의 형성은 용질농도가 응고 이전보다 높다. 용질의 균형을 유지하기 위해서 잉여 용질이 액상에서 핵심(coring)의 결과로 나타난다. 이러한 현상은 응고 마지막에 수지상정(樹枝狀晶) 사이의 구간에서 비평형 공정 조직을 형성한다. 형성된 공정량은 <식 (2.14)>으로 계산할 수 있다.

$$f_E = \left( \frac{C_E}{C_0} \right) \quad (2.14)$$

여기서  $f_E$ 는 공정(共晶)의 조직의 체적분률이고,  $C_E$ 는 공정의 농도이다. 실제 관찰되는 공정량은 전형적인 주괴 주조 공정 영역에서의 냉각속도 범위에서는 <식 (2.14)>에 의해서 예측 가능하다. 이 비평형 공정의 용해(溶解, dissolution)는 주괴의 균질화처리시 주위 고상으로의 용질원자의 확산을 통해 얻어진다.

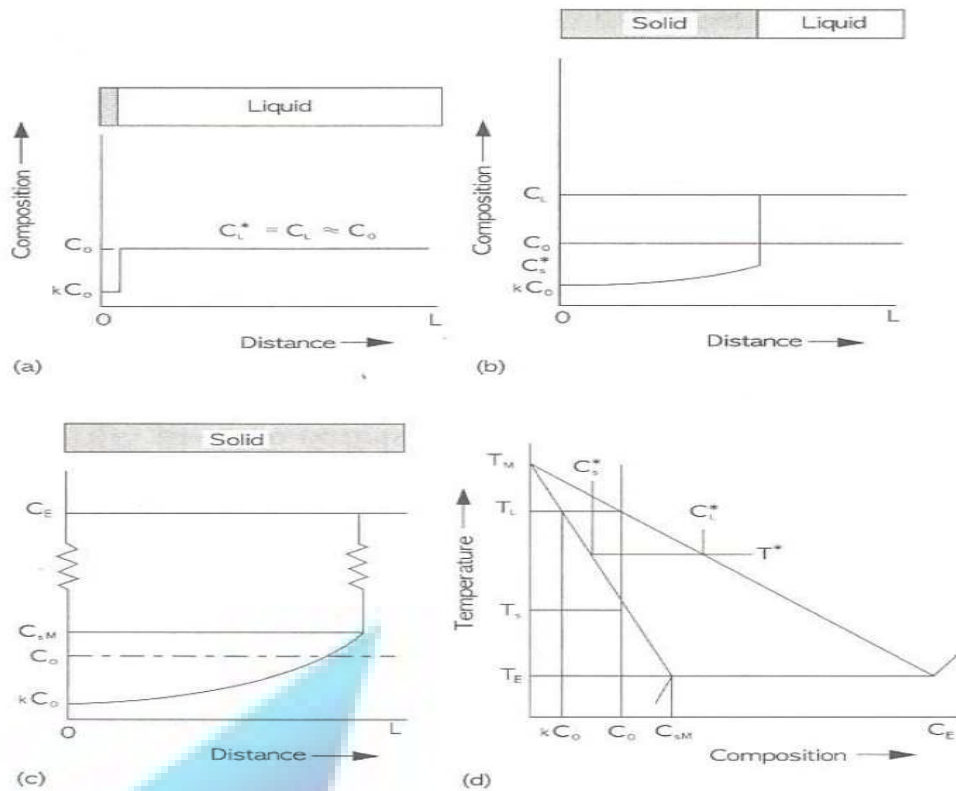


그림 2-11. 고상 확산이 없고, 액상에서 완전 확산이 일어난다는 가정하에서 (a) 응고 개시 ; (b)  $T=T^*$  ; (c) 응고 완료후 용질재분배를 도시한 그림, (d) 응고 동안 온도에 따른 조성 변화를 나타내주는 상태도

### 4.2.3. 1차조직(응고조직, solidification structure)

#### 4.2.3.1. 알루미늄 합금에서 상(相, phase) 규명

알루미늄 합금에서 상 규명은 현 5000계열에는  $Mg_2Al_3$ ,  $Mg_2Si$  입자와 Cr과 Mn의 금속간 상이 포함될 수 있다. 열처리가 가능한 단련 및 주조합금은 비평형응고에 의해 생성되는 금속간화합물 등의 상이 포함된다. 이들은 후처리인 균질화처리시 용해되어 용질이 수지상정으로 확산되어 고용되기 때문에 용해성 상(溶解性 相)이라 할 수 있다. 따라서 이들은 열적 크리프(thermal creep) 즉 비평형 정도에 따라 조직에 존재하는 그 양과 위치가 달라진다. 2000 계열의 단련 합금에는  $CuAl_2$  또는  $CuMgAl_2$ 의 용해성 상이 존재하며 6000계열 합금에서 가장 일반적인 금속간 상은  $Mg_2Si$ 이고 과잉 Si입자도 존재할 수도 있다. 7000계열 합금에서는  $MgZn_2$ 가 주 용해성 상이나 다른 상들도 존재할 수 있다. 이들 합금에 생성된 석출물은 대개 극히 미세하며 7000계열 합금에서는 Cr이 함-유된 상 또는  $Mg_2Si$  입자를 역시 볼 수 있다( $Mg_2Si$ 는 과잉 Mg가 존재하면 불용성임). 대부분의 상용 알루미늄 주조 합금은 아공정(亞共晶)으로, 응고시 알루미늄 고용체가 초정(primary crystal)으로 생성되어 수지상으로 성장하며, 응고 후반 용질이 농축된 수지상 사이의 액상이 공정온도 이하에서 공정반응을 일으키며 응고를 마친다. 따라서 Al수지상 사이에는 공정 혼합물로 채워진다. 알루미늄 합금 주물에서 공정은 가끔 층상조직(層狀組織) 대신 수지상간에 분리된 형태로 분포하기도 하며 합금에 따라 금속간 상 또는 Si와 같은 합금 원소가 될 수 있다. 공정 Si 입자는 용탕의 개량처리(改良處理, modification) (대개 Na) 의하여 백점(白點, flake) 형태의 크고 각진 형상 대신 미세하고 둥근 형상으로 변화 될 수 있다. 알루미늄 합금에 나타나는 상들은 합금 원소 자체(Si, Pb 또는 Bi), 알루미늄 함유가 필요없는 화합물인  $Mg_2Si$  또는  $MgZn$ 과 Al을 함유하는 2원계 또는 3원계 합금원소로 된 화합물 등이다. 상의 차별화를 나타내는 기본 특성은 결정구조와 원자배열이다. <표 2-2>는 알루미늄 합금의 분류와 열처리(temper) 기호를 나타낸 것이다.

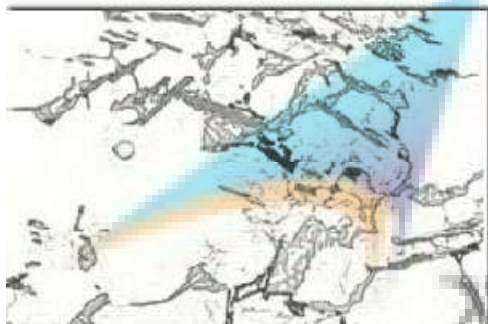
표2-2 알루미늄 합금과 템퍼기호



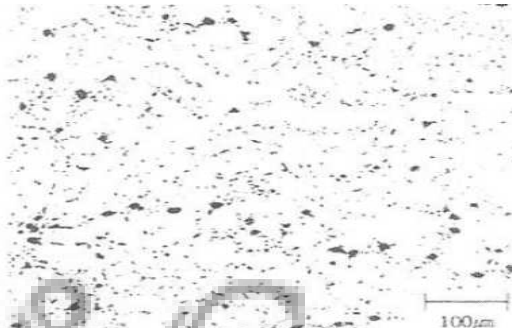


#### 4.2.3.2. 대표적인 알루미늄 합금의 1차조직(응고조직, solidification structure)

일반적으로 알루미늄 합금은 주조 또는 단조합금으로 분류될 수 있다. 공업적으로 사용되는 알루미늄 및 그 합금에는 주물, 다이캐스트용 합금과 가공용 합금이 있으며, 비열처리 합금과 열처리 합금으로 구분된다. 여기서 말하는 열처리란 시효에 의한 석출경화를 말하며, 주괴의 균질화, 소둔(燒鈍) 등의 열처리는 모든 합금에 공통이다. 비열처리 합금의 주조재에서는 주로 고용경화 및 결정립 미세화((結晶粒微細化))와 제2상의 분산(分散)에 의해서 어느 정도의 강도를 얻는다. 주조용 알루미늄 합금에서는 금형, 사형, 셀형 등의 주물용 합금과 다이캐스트용 합금이 있다. 주물용 합금 성분은 주형 및 주조법의 종류에 따른 차이는 없다. 다이캐스트는 고압주조이기 때문에 용융합금과 주형의 달균 때문에 이형성을 개선하는 목적으로 개발된 다이캐스트용 합금에는 사형, 금형 주물에 있어서 가장 유해한 불순물이라고 하는 Fe를 많이 함유한다. 따라서 다이캐스트용 합금은 주물용 합금과는 구별 된다. 한편 가공재는 주로 압연, 인발 등의 냉간가공에 의한 가공경화(加工硬化)에 의해서 약간의 강도를 얻는다. 가공재는 가공경화의 상태에 따라서, 경질(硬質) 및 적당한 온도로 어닐링 처리한 연질이 있다. 또한 열처리 합금은 주로 시효 석출에 의해서 경도를 향상 시킬 수 있는 합금으로서 표에 나타난 바와 같이 원하는 특성을 얻기 위하여 T1, T2 ... T6 등 여러 종류의 열처리 법이 이용되고 있다. 다음은 대표적인 주조용 알루미늄 합금 조직과 단련 알루미늄 합금 조직이다.



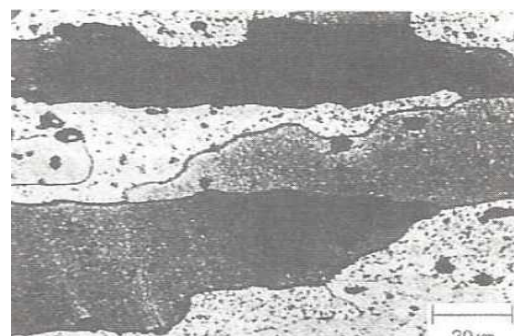
조직 1 > 0.45%HF, 242-T571 합금 영구(permanent) 주형에 주조하고 인공 시효 처리, 조직은 중간회색의  $Cu_3NiAl_6$  조각에 칼날 같은  $NiAl_3$  (dark gray)를 포함하고  $CuAl_2$ 입자(light)와 조갈 같은  $Mg_2Si$ (black)도 역시 존재한다.



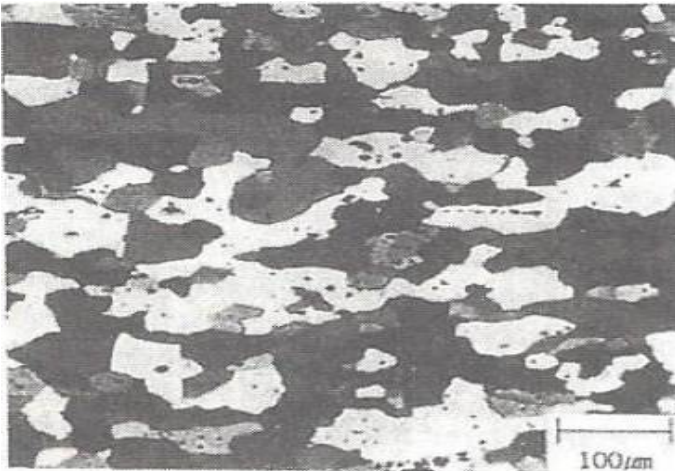
조직 2 > 0.5%HF, 356-T6 합금 영구 주형주조, 용체화처리하고 인공시효, 수소기공(black)



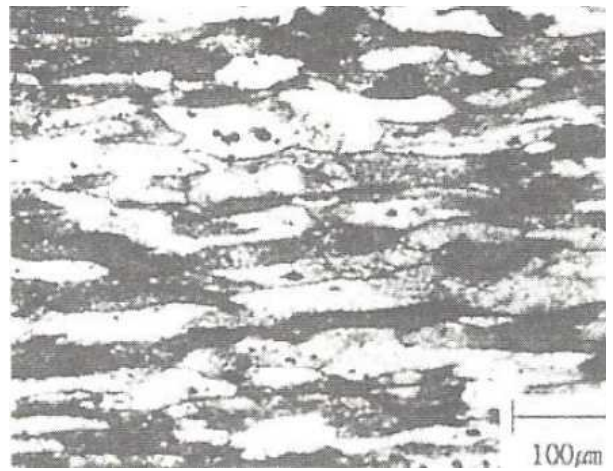
조직 3 > 0.5%HF, 1100-0판재, 냉간 압연하고 Annealing, 재결정되고 등축립자와  $FeAl_3$ (black)의 불용성 입자(particle), 가공된 조직에  $FeAl_3$ 의 크기와 분포는 annealing에 의하여 영향을 받지 않는다.



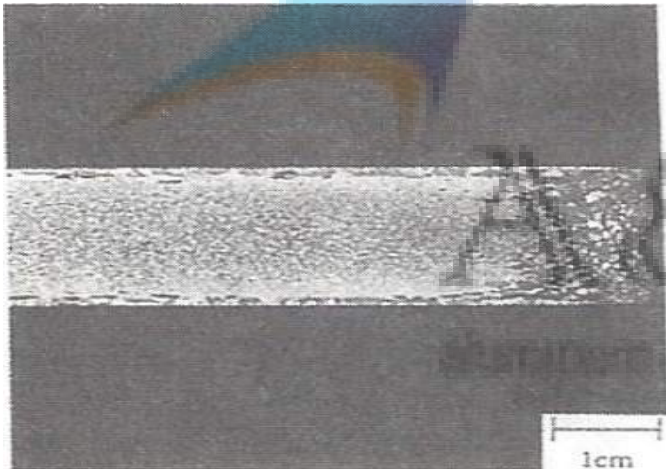
조직 4 > Keller부식액, 2024-T3판재, 495°C에서 용체화처리하고 차가운 물에 quenching, 종단면, 어두운 입자는  $CuMgAl_2$ ,  $Cu_2MnAl_{20}$  및  $Cu_2FeAl_7$ 등이다.



조직 5> barker 부식액, 3003-0 판재, 조직 annealing 상태, 종당면은 재결정된 입자이며, 입자연신은 압연방향을 나타내나, 각입자 내에 결정학적 방향은 아니다.



조직 6> barker 부식액, 5457-0후판 (10mm), 345°C에서 annealing, 편광, 입자는 등축이다.



조직 7> Tucker 부식액, 6063-T5 압출, 횡당면, 실제크기, 압출표면에 입자는 더 많은 가공과 가열 때문에 재결정 되었음, 압출 내부에 입자는 재결정 되지 않았음.



조직 8> NaOH, NaF부식, 7079-T6 단조, 40%압하, 용체화처리하고 인공시효함, Al-Cr-Mn상(조직에서 더 어두운 영역)은 균질화하는 동안 일어나며 수지상 유핵조직의 징후가있음

### 4.3. 경화기구(硬化機構)

일반적으로 합금의 강도가 커질수록 연성은 감소한다. 높은 강도와 적절한 연성(延性) 및 인성(靱性)을 갖는 합금을 설계해야 한다. 알루미늄 합금에 있어서 합금 원소를 이용한 경화기구는 (1)고용경화(固溶硬化), (2)석출경화(析出硬化), (3)분산경화(分散硬化) 등으로 분류 될 수 있다.

material	UTS (psi)	YS (psi)	Elongation (%)	YS(alloy)/YS(pure)
Pure annealed Al (99.9999 % Al)	6,500	2,500	60	1.0
Commercial pure Al (annealed, 99 % Al)	13,000	5,000	45	2.0
Solid solution strengthened (1.2 % Mn)	16,000	6,000	35	2.4
Dispersion strengthened (5 % Mg)	42,000	22,000	15	8.8
Precipitation strengthened (5.6 % Zn 2.5 % Mg)	83,000	73,000	11	29.2

알루미늄 및 알루미늄 합금의 강화기구에 따른 기계적 특성

#### 4.3.1 고용경화(固溶硬化, solid solution hardening)

고용경화(固溶硬化)는 간단히 말하자면, 어떤 금속에 용해된 다른 금속의 작용이다. 용질 원자와 전위(轉位)의 움직임과의 상호작용의 결과로서 용질 원자의 첨가는 결정질 재료의 항복강도(降伏強度)를 증가시킨다. 이러한 상호 작용은 용질 원자들이 미끄럼(slip)면에 가깝게 위치할수록 증가하므로, 전위와 상호 작용 하는 용질 원자는 경계면(境界面)에 위치하거나 경계면의 위나 아래에 위치하여야 한다. 고용체에는 두 가지가 있다. 용매 원자와 용질 원자의 크기가 같은 경우, 용질 원자는 결정격자(結晶格子)의 격자점(格子點)을 점유하며, 이것을 치환형 고용체(置換型固溶體) (substitutional solid solution)라 한다 <그림 2-12>. 용매원자와 용질원자의 다른 크기 때문에, 결정격자의 규칙도를 흐트리며, 전위는 이렇게 왜곡된 격자를 쉽게 지나갈 수 없다. 전위가 다시 움직이기 위해서는 더 높은 응력이나 온도가 필요하게 된다. 또한 용질원자가 용매원자보다 훨씬 작은 경우에는 용질원자는 용매격자의 격자간 위치를 점유하고 있으며, 이것을 침입형 고용체(interstitial solid solution)라고 한다.<그림2-14>. 합금원소(침입형 원자)가 전위의 이동을 방해하며, 전위가 이동하려면, 더욱 큰 응력과 열적 에너지가 필요하게 된다. 일반적으로 침입형 고용체의 경우, 치환형 고용체보다 경화효과가 더욱 크다.

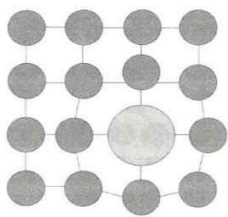


그림 2-12. 치환형 고용체

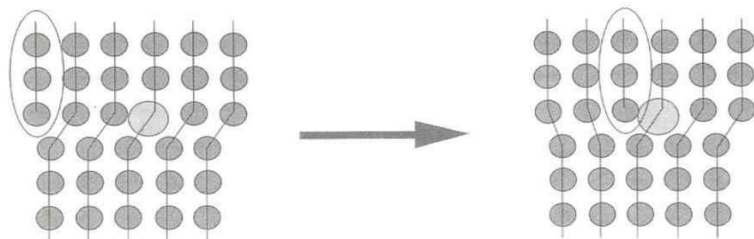


그림 2-13. 치환형 원자에 의해서 멈춰진 전위

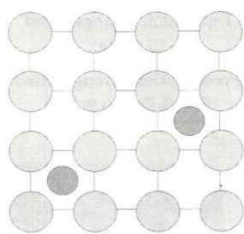


그림 2-14. 침입형 고용체

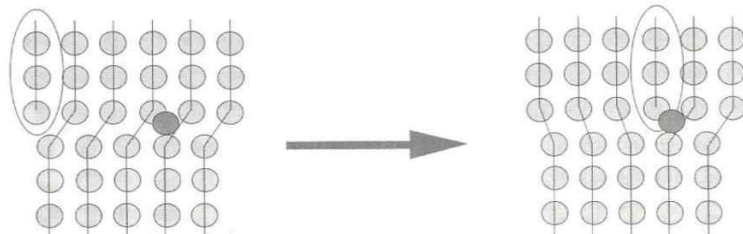


그림 2-15. 침입형 원자에 의해서 멈춰진 전위



합금원소에 의한 경화 정도는 용질원과 용매원자의 상태적인 크기 차이에 의존한다.<그림 2-16>는 크기에 있어서 큰 차이가 결정격자의 큰 왜곡을 가져온다는 것을 보여주고 있다. 이러한 결정격자의 큰 왜곡이 전위의 진행을 더욱 방해하므로 결국 높은 강도를 갖게 된다. 일반적으로 알루미늄 합금은 크게 열처리를 수행하는 합금(heat treatable alloy)과 열처리를 수행하지 않는 합금(non-heat treatable alloy)의 두 종류로 나눌 수 있다. 2000, 6000 그리고 7000 계열의 합금들은 열처리에 의해서 경화되는 합금이고, 1000, 3000 그리고 5000 계열의 합금들은 망간과 마그네슘 등의 고용경화 효과에 의해서 그 강도가 주어지고, 냉간 가공을 통한 가공 경화 기구에 의해서 더욱 높은 강도를 갖게 된다. Al-Mg계 합금(5000 계열)의 경우, 그 강도가 다른 고용경화 알루미늄 합금보다 강도가 크므로 압력 용기용으로 많이 사용된다.<그림 2-17>은 Al-Mg 이원계 상태도를 나타내고 있다.<그림 2-17>에 나타낸 것과 같이 5.5wt% Mg의 조성을 가지는 합금을 생각할 때, <그림 2-18>에서 보이는 TTT diagram (Time-Temperature-Transformation diagram)에서 결정화 선을 지나지 않게 어느 정도 급랭을 하게 되면, 과포화된 초정알루미늄만으로 된 미세조직을 갖는 합금을 얻을 수 있다. <그림 2-19>은 마그네슘의 첨가에 따른 상용 알루미늄 합금의 항복강도 및 연신율의 변화를 보여주고 있다. 마그네슘의 첨가량이 많을수록 항복강도는 증가하는데 반하여 연신율은 감소한다. 또한<그림 2-20>는 상용 알루미늄 합금의 항복강도 및 연신율 구간을 보여주고 있다.

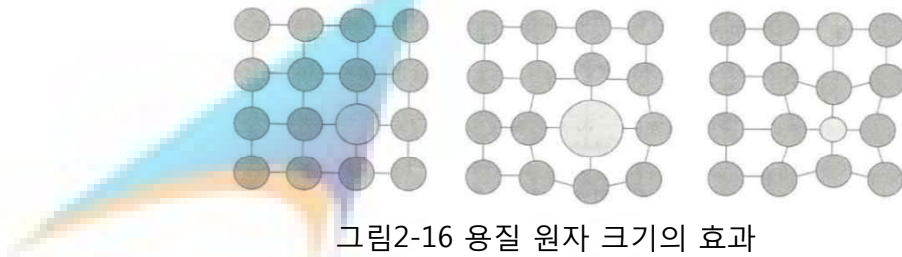


그림2-16 용질 원자 크기의 효과

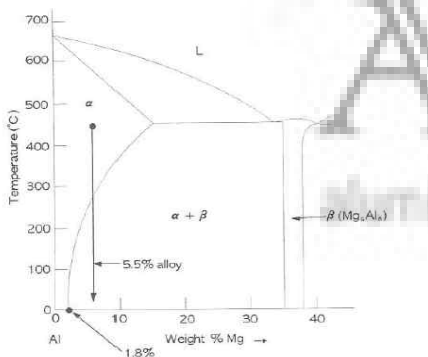


그림 2-17. Al-Mg 이원계 상태도

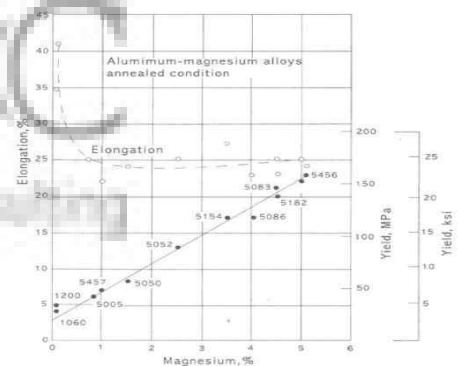


그림 2-19. 상용 알루미늄 합금에서 연신율, 항복 강도 및 마그네슘의 첨가량 사이의 관

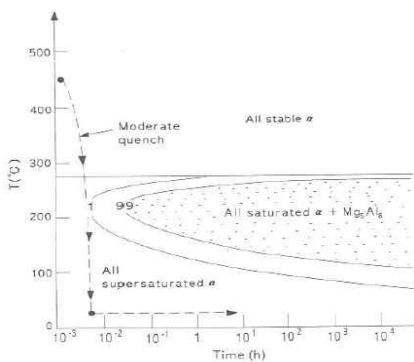


그림 2-18. Al-5.5 wt% Mg합금에서 Mg<sub>2</sub>Al<sub>3</sub>상의 석출을 보여주는 계략적인 TTT diagram

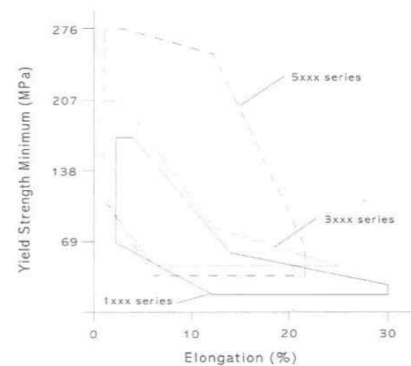


그림 2-20. 상용 알루미늄 합금의 항복 강도 및 연신율 구간

### 4.3.2. 석출경화(析出硬化,precipitation hardening)

석출경화에 의하여 합금이 강화되기 위해서는 먼저 용체화처리(solid solution treatment)를 행하여야 한다. 합금 원소들이 기지 내로 녹아 들어갈 수 있는 온도까지 합금을 가열한 후 어느 일정 시간을 유지시킨 뒤, 합금원소들이 과포화(過飽和) 상태로 있을 수 있는 낮은 온도까지 급랭을 하는 것이 용체화처리이다. 이러한 고용체는 낮은 온도에서 준안정하다. 석출경화 과정의 두 번째 부분은 시효경화(時效硬化,age-hardening)이다. 이 시효 과정 중에 석출상이 생성된다. 합금을 강화시키는 석출상이 상온에서 생성되면 자연 시효라 하는데, 일반적으로 상온보다 높은 온도에서 석출상(相)이 생성된다. 석출경화는 제2상이 고온에서 고용화 된 것을 저온에서 급랭과 시효에 의해 석출상을 형성하는 합금에서 얻을 수 있다.<그림 2-21>은 Al-Cu 이원계 상태도를 나타내고 있다.

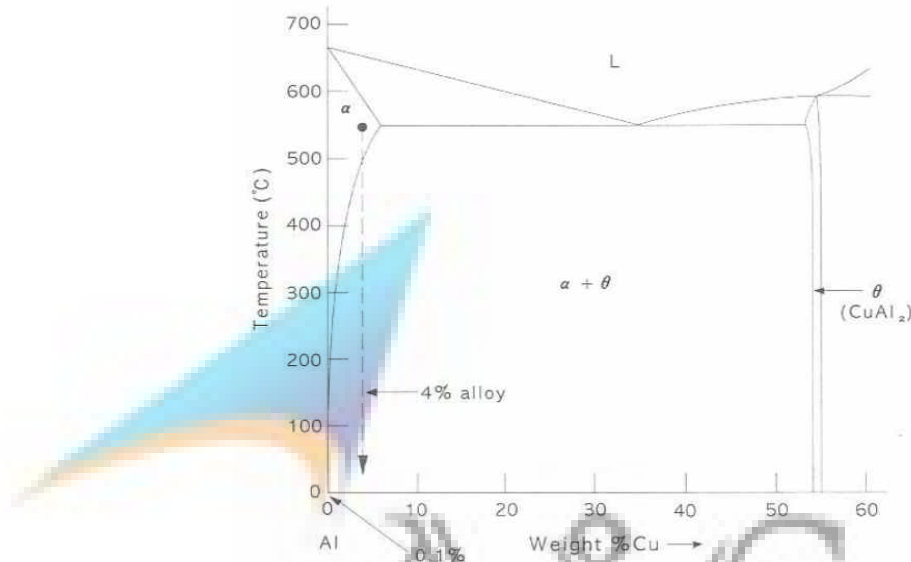


그림 2-21. Al-Cu 이원계 상태도

<그림 2-22>에 나타낸 것과 같이 4wt% Cu의 조성을 가지는 합금을 냉각할 때, 냉각 속도에 따라서 <그림 2-22>(b)에 나타낸 바와 같이 석출상의 크기와 분포가 달라진다.

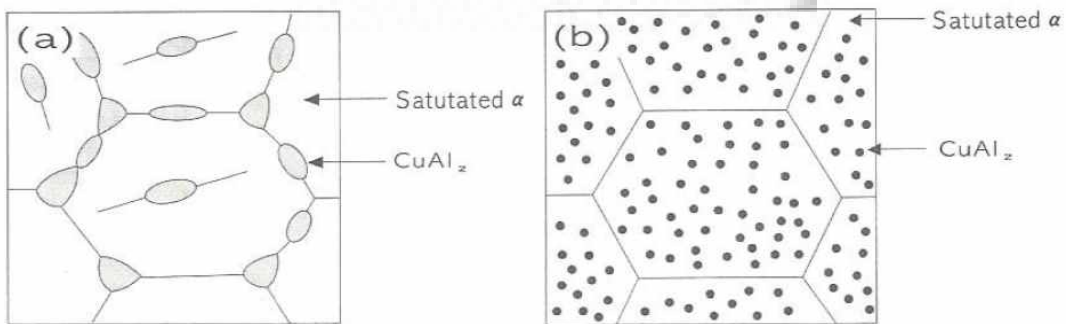


그림 2-22. 냉각 속도에 따른 Al-4 wt% Cu 고용체의 미세 조직

냉각 속도가 아주 느리면, <그림 2-22>(a)와 같이 넓은 간격을 가지는 조대한 석출상( $\text{Al}_2\text{Cu}$ )이 형성되며, 적절한 냉각 속도에서는 <그림 2-22>(b)와 같이 좁은 간격의 미세한 석출상이 형성된다. 아주 빠른 냉각속도에서는 과포화된 초정알루미늄만이 존재하게 된다.<그림 2-23>은 Al-4wt% Cu 합금의 TTT diagram을 보여주고 있다. 그림에서 점선의 경로를 따라 용체화처리 후 급랭하여 상온에서 과포화 고용체를 만든 후 일정 온도로 가열하여 유지시키면 석출상이 생성된다. 이때 미세 조직의 변화는 <그림 2-24>에 나타내었다.

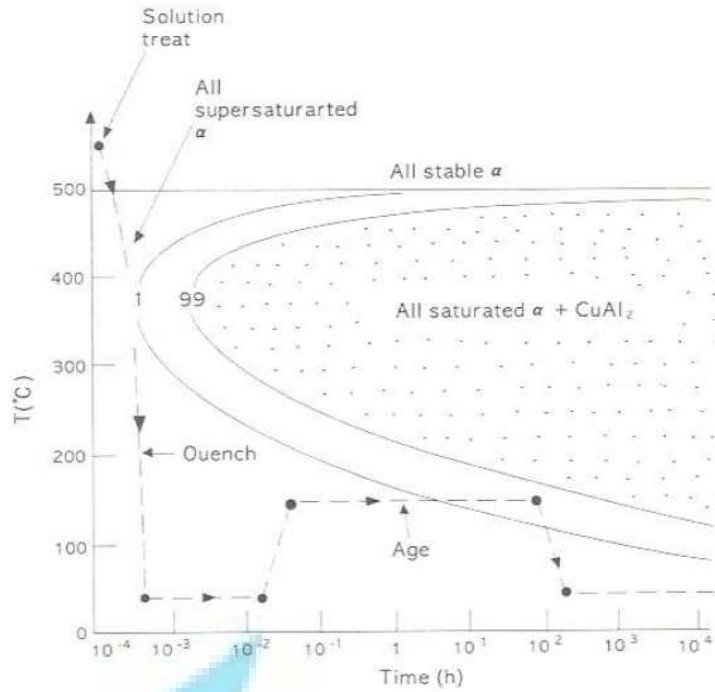


그림 2-23. Al-4 wt% Cu합금에서 CuAl<sub>2</sub>상의 석출을 보여주는 계략적인 TTT diagram  
 일정 온도로 가열하여 유지시키면 석출상이 생성된다. 이때 미세 조직의 변화는<그림 2-24>에 나타  
 내었다.

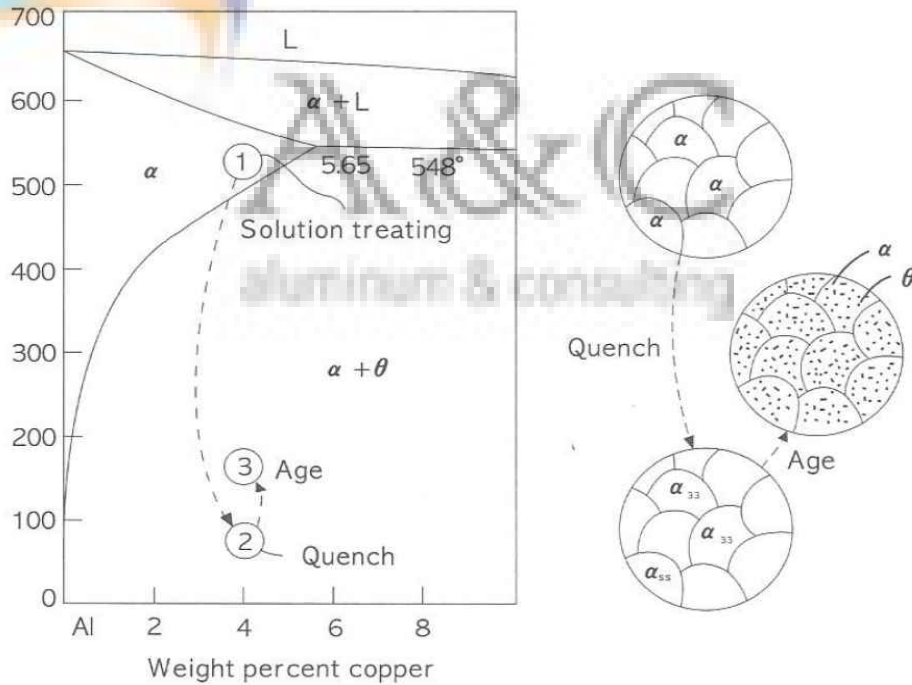


그림 2-24 용체화 처리후 시효처리시 미세조직의 변화

Al-Cu와 같은 석출경화계에서 정합 석출 상의 형성은 여러 단계로 일어난다. 고용체<그림2-25>(a)로부터 급랭을 하면, 합금은 용질편석과 클러스터(cluster)의 영역이 생긴다. Guiner와 Preston이 이러한 국부적인 클러스터를 특수한 X-선 기술로써 최초로 확인하였기 때문에, 이 구조를 GP대 구역 <그림2-25>(b)라고 한다. 집합체는 국부적인 변형을 일으키므로 GP(1)의 경도는 고용체보다 높다. 시효가 진행됨에 따라 Cu 원자들이 기지의 {100}면에 점점 규칙 배열을 하여 경도는 더욱 증가하게 된다.

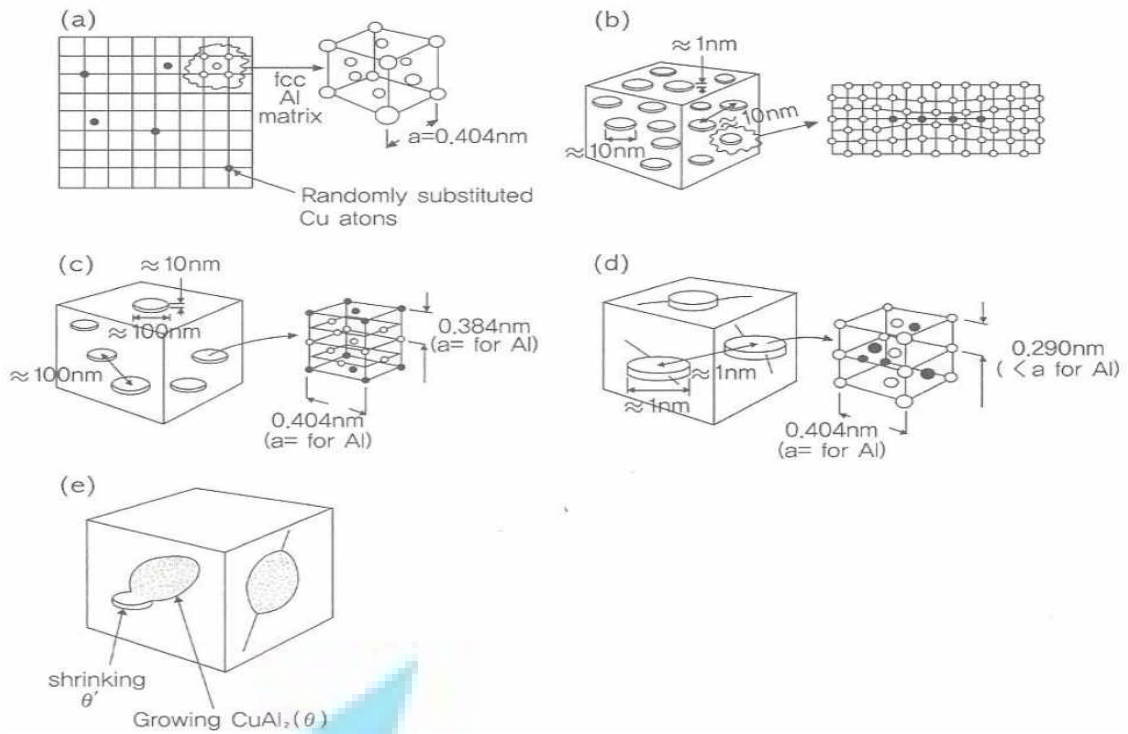


그림 2-25. 시효 단계에 따라 석출상이 형성되는 과정: (a) 과포화 고용체, (b) GP zone, (c)  $\theta'$ , (d)  $\theta$ , (e)  $\theta$

이러한 구조를 GP(2) 또는  $\theta'$  <그림 2-25>(c)라고 한다. 그 다음 단계에서는 행렬(行列) 과 정합(整合)을 이루는  $\text{CuAl}_2$  또는  $\theta$ 의 명확한 판 상의 석출 상 <그림 2-25>(d)가 행렬의 {100}면에서 생성된다. 정합 석출상이기 때문에 행렬에 더 큰 변형장(變形場)이 생겨서 경도는 더욱 증가한다. 시효가 더욱 더 진행됨에 따라 천이 석출 상  $\theta'$ 로부터 평형 상  $\text{CuAl}_2$  또는  $\theta$  <그림 2-25>(e)가 형성된다. 이러한 입자는 행렬 과 정합을 이루지 못하므로, 경도는  $\theta'$ 가 존재할 때보다 낮아진다. 이 단계 이상으로 시효를 계속시키면 입자 성장이 일어나 경도는 더욱 감소하게 된다. <그림 2-26>은 시효 시간에 따른 강도의 변화를 나타낸다.

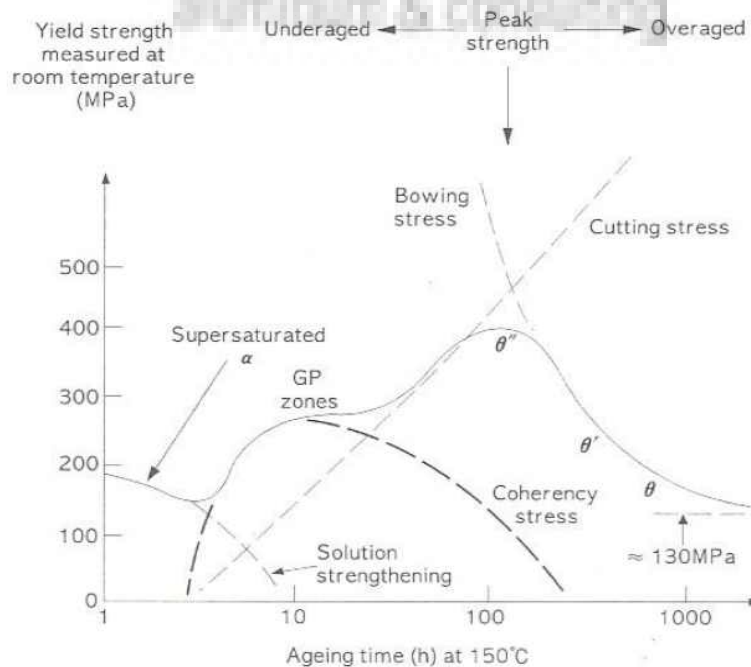


그림 2-26. 시효시간에 따른 항복 응력의 변화

#### 4.3.2.1. Al-Cu 합금과 Al-Cu-Mg 합금 (2000 계 열)

위에 언급되었듯이, Al-Cu 합금에서 석출 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

**과포화 고용체 → 집합체 → GP대 구역 →  $\theta''$  →  $\theta'$  →  $\theta$**

GP대 구역과  $\theta''$ 는 기지와 정합 관계에 있고,  $\theta'$ 와  $\theta$ 는 기지와 부정합 관계에 있다. 중요한 경화효과는  $\theta''$ 의 석출 상이 생성되는 시효 과정의 초기 단계에서 일어난다. 거의 모든 합금에서의 시효 과정은 다음과 같다.

**GP대 구역 → 중간 석출상 → 평형 석출상**

GP대 구역은 행렬과 정합 관계에 있으므로 부가적인 경화 효과가 나타난다. 그러나 정합 관계가 있는 석출 상에서 부정합 관계가 있는 평형 석출상의 형성은 재료의 연화 현상을 가져온다. Al-Cu-Mg 합금에서는  $Al_2CuMg$ 상 또는 S상이 석출경화 효과에 중요한 역할을 한다.  $Al_2CuMg$ 상으로 변태 과정은  $CuAl_2$ 상의 변태 과정과 비슷하며 다음과 같다.

**GP대 구역(Mg와 Cu) → 정합관계의 S' → 평형 S**

마그네슘 양이 많은 Al-Cu-Mg합금에서는 S상이 중요한 역할을 하지만, 마그네슘 양이 적은 Al-Cu-Mg합금에서는  $\theta$ 상이 중요한 역할을 한다.

#### 4.3.2.2. Al-Mg-Si 합금 (6000 계 열)

Al-Mg-Si 합금에서 경화 효과를 나타내는 석출 상은 약 1~2%의  $Mg_2Si$ 상이다. 공정 온도에서 알루미늄 행렬 내에  $Mg_2Si$ 상의 고용도는 1.85 %이며, 온도에 따라 감소하다가 상온에서는 약 0.1 %이다.  $Mg_2Si$ 상의 석출 기구는 아직 완전히 이해되지 않았지만, 작은 선 모양의 석출 상에서 나중에는 작은 판 상으로 성장한다고 알려져 있다. 높은 강도를 얻기 위해 Al-Mg-Si 합금을 용체화 처리 온도에서 급속히 냉각을 시켜야 한다. 이러한 합금은 상온에서의 시간에 따른 강도의 변화가 작기 때문에 자연시효(natural aging) 방법을 이용하지 않고 짧은 기간에 일정한 강도를 얻기 위해서 고온시효(artificial aging) 방법을 이용한다. 또한 낮은 온도에서 장시간 시효하는 것이 높은 온도에서 짧은 시간 시효 하는 것보다 더욱 강도 증가에 효과적이다.

#### 4.3.2.3. Al-Zn-Mg-Cu 합금 (7000 계 열)

Al-Zn-Mg 합금계에서 강화 효과를 보이는 석출 상은  $Al_2Mg_3Zn_2$ 상과  $MgZn_2$ 상이다. 아연이 마그네슘의 양보다 많을 경우,  $MgZn_2$ 상의 강화 효과가 탁월하다. Al-Zn-Mg합금에서 석출 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

**GP대 구역 → 중간상(transition phase) →  $MgZn_2$**

$CuAl_2$ 상 및  $Al_2CuMg$ 상의 형성을 위해서 Al-Zn-Mg합금에 구리를 첨가하지만, 기본적인 석출경화 상은 여전히  $MgZn_2$ 상이다.

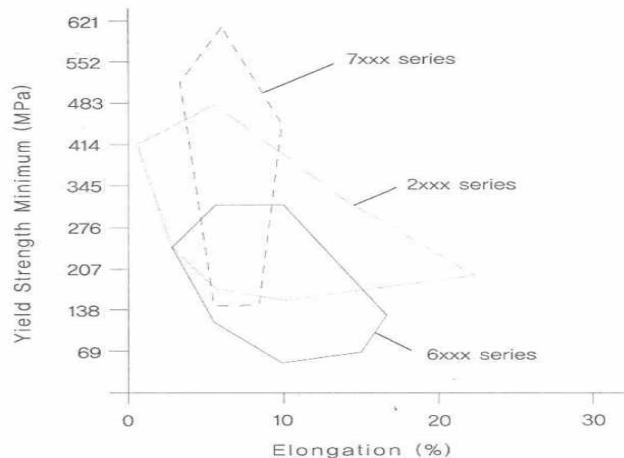


그림 2-27 상용 알루미늄 합금의 항복강도 및 연신율 구간



#### 4.3.2.4. 주조용 합금에서의 석출경화

주조용 알루미늄 합금의 설계는 주조성 및 기계적 특성에 초점을 맞추고 있다. 주조용 알루미늄 합금에서 강화 효과에 기여하는 석출상은 가공용 알루미늄 합금에서의 석출상과 같으며, 일반적인 주조용 알루미늄 합금에서 중요한 석출상은 <표 2-4>에 나타내었다.

합금계	석출상
aluminum - copper	$CuAl_2$
aluminum - copper - silicon	$CuAl_2$
aluminum - magnesium - silicon	$Mg_2Si$
aluminum - zinc - magnesium	$MgZn_2$
aluminum - magnesium	$Mg_2Al_3$

#### 4.3.3 분산경화(分散硬化, dispersion hardening)

연한 행렬에서 미세하게 분산된 2차조직 입자는 일반적으로 합금경화의 근원이다. 많은 합금계는 2차조직 형성으로 인해서 강화될 수 있다. 석출경화에서는 흔히 행렬과 석출상 격자 사이에 정합성이 존재한다. 그러나 분산경화에 의한 복합재료에서는 행렬과 2차조직 입자 사이에 일반적으로 정합성이 없다. 온도 강하에 따라 고용도가 감소해야 한다는 조건 때문에 유용한 석출경화 합금계의 숫자는 제한되지만, 분산경화 합금계는 미세한 금속 분말과 2차조직 입자를 섞어 분말 야금학적으로 제조하기 때문에 최소한 이론적으로 거의 무한한 종류의 합금계가 가능하다. 이러한 방법의 장점은 매우 고온에서도 열적으로 안정한 분산경화 복합재료를 얻을 수 있다는 점이다. 미세하게 분산된 2차조직 입자 때문에 이 합금은 단상 합금보다 결정립 성장과 재결정에 대해 보다 큰 저항성을 갖는다. 행렬에 대한 2차조직의 매우 작은 고용도 때문에 분산 입자들은 석출경화 합금계의 2차조직 입자보다 결정립성장(結晶粒成長)이나 과시효(過效處)를 저지하는데 훨씬 효과적이다.

현대의 산업 기술은 여러 가지 특성을 동시에 갖는 재료를 요구하는데, 이것은 전통적인 금속 합금, 세라믹, 고분자화합물(高分子化合物) 등 한 가지 유형의 재료에 의해서 만족되기가 어렵다. 이와 같은 복합 기능을 요구하는 현상은 특히 우주 항공, 수송 및 수송 기기 등의 용도에서 두드러진다. 예를 들면, 우주 항공 기술자들은 밀도가 낮으면서 강하고 강성도(剛性度)가 높으며, 마모 및 충격 저항이 있고, 내식성이 있는 재료를 요구하고 있다. 그러나 이러한 성질을 조합하여 가진 재료를 발견하는 일은 그리 쉬운 일이 아니다. 일반적으로 강한 재료는 밀도가 높고, 강도 또는 강성도가 높으면 충격저항(衝擊抵抗)이 감소하는 것이 일반적이다. 이러한 많은 성질을 조합하여 그 특성 범위가 넓은 재료는 분산 강화를 응용한 복합재료의 개발에 의해 확대되고 있다. 일반적으로 복합재는 여러 가지 상으로 구성된 재질로서, 각 구성 재료의 개개 성질보다 향상된 성질이 복합되어 나타난다. 복합 작용원리(principle of combined action)에 의하면, 두 개 이상의 서로 다른 재료를 적절하게 조합함으로써 향상된 성질을 얻을 수 있다고 한다. 많은 복합재에서는 일부 특성이 개개의 성질보다 저하되기도 한다. 알루미늄 기지의 복합재는 알루미늄의 낮은 밀도와 연성과 강화재의 강도 및 강성도를 이용하는데, 그 종류로는 탄소섬유강화 알루미늄 복합재(carbon fiber reinforced aluminum composite), 강섬유강화 알루미늄 복합재(steel fiber reinforced aluminum composite) 및 탄화규소입자강화 알루미늄 복합재(silicon carbide particulate reinforced aluminum composite) 등이 있다.

#### 4.3.3.1. 탄소섬유강화 알루미늄 복합재 (carbon fiber reinforced aluminum composite)

탄소 섬유는 낮은 밀도를 가지면서도 알루미늄 합금의 강도 및 강성도를 증가시키는 강화재로서 사용된다. 그러나 제조 과정 중에 생성되거나 석출되는 취성이 강한 상( $Al_4C_3$ ) 때문에 기계적 성질에 악영향을 준다. 따라서 이러한 취성이 강한 상( $Al_4C_3$ )을 억제하기 위해 여러 가지 방법이 연구되고 있으며, 그 중 하나가 탄소 섬유 표면을 코팅하는 방법이 있다. M40J 탄소 섬유와 A357 알루미늄 합금의 계면을 <그림 2-28>에 나타내었다. 최근에는 가로/세로 비 (aspect ratio)가 큰 탄소 나노 튜브(CNT)를 이용한 복합재 개발에도 많은 연구가 진행되고 있다.

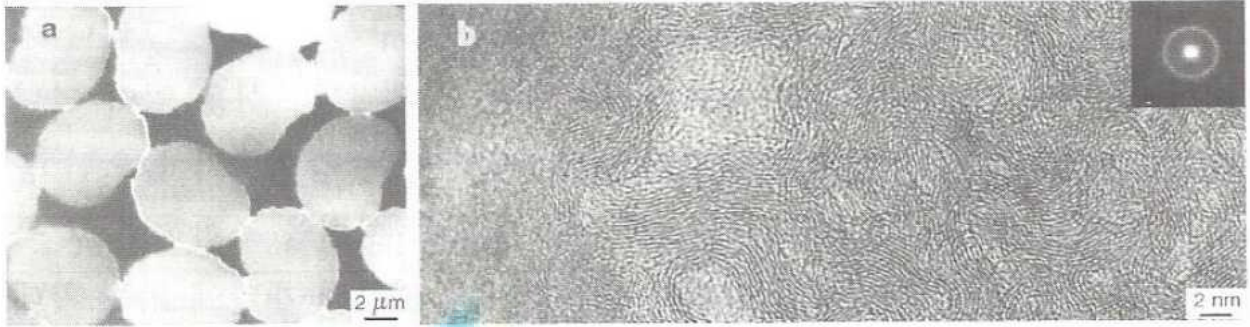


그림 2-28. M40J/A357 복합재 단면의 투과 전자 현미경 사진. (a)알루미늄과 탄소섬유계면의 명시야상 (b) 알루미늄과 탄소 섬유 계면의 HREM 사진

#### 4.3.3.2. 강선강화 알루미늄 복합재 (steel wire reinforced aluminum composite)

고강도 강선 강화 알루미늄 기지 복합재는 하중 지지 구조물로 사용할 수 있을 만큼 좋은 기계적 성질을 가지고 있다. 또한 균열 전파 속도를 줄이기 위한 덧대는 패치(patch)로 사용할 수 있고, 그 효과가 타이타늄 합금의 patch보다 5배나 높다.

#### 4.3.3.3. 탄화규소입자 강화 알루미늄복합재 (silicon carbide particulate reinforced aluminum composite)

불연속적인 입자 강화 알루미늄 기지 복합재는 고강도, 우수한 내마모 성 및 열전도도 그리고 낮은 열팽창 계수(CTE)의 우수한 특성 때문에 주목 받고 있다. 불연속적인 입자 강화 복합재는 일반적으로 액상 야금법(주조법)이나 분말 야금법에 의해서 제조된다. 전자의 경우,액상에서 입자 상을 기계적인 방법으로 분산시켜, 응고시킨 것이며, 후자의 경우, 고상의 분말을 물리적인 방법에 의해 섞은 다음, 소결법 등을 이용하여 제조하는 것이다. 액상 야금법의 경우, 입자상들을 고르게 분포시키는 것이 관건이며, 이를 위해 여러 가지 주조 방법이 연구되고 있다.<그림 2-29>은 주 조법에 의해서 제조된 20wt% SiC를 함유한 A359 알루미늄 복합재의 미세 조직 사진이다.<그림 2-30>는 20vol% SiC를 함유한 A359 알루미늄 복합재로 제조된 공냉식 브레이크 디스크이다.



그림 2-29. 주조법에 의해서 제조된 20wt% SiC를 함유한 A359 알루미늄 복합재의 미세조직 사진

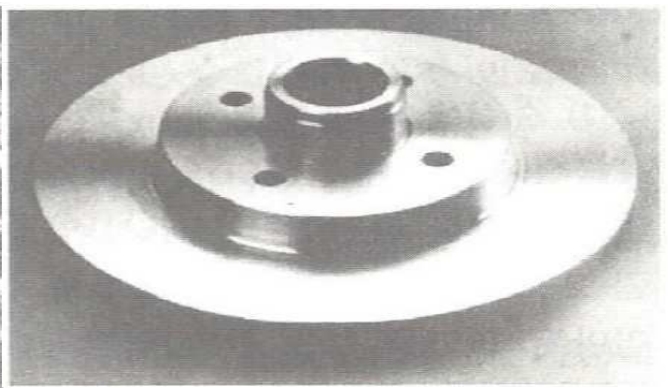


그림 2-30. 20 vol% SiC를 함유한 A359 알루미늄 복합재로 제조된 공냉식 브레이크 디스크

#### 4.4. 소성변형(塑性變形, plastic deformation)

알루미늄과 알루미늄 합금의 변형거동 및 기계적 특성을 설명하는 많은 실험 결과 들이 발표되어 졌으며, 이를 뒷받침하는 수학적 이론들은 대부분 대상 금속이 균일하고 등방성(等方性)이라는 가 정하에 전개하였다. 소성영역에서 이러한 이론들이 실제 이방성(異方性)을 가진 금속의 경우에 비 록 정확하지는 않지만 측정된 소성거동(塑性舉動)을 뒷받침해 줄 수 있다. 특히, 동적 하중이나 충 격 하중의 조건에서는 일반적으로 수학적 이론 보다는 실험적인 데이터에 주로 의존할 수 밖에 없 다. 이 장에서는 알루미늄의 기본적인 소성변형기구 즉, 슬립시스템 과 쌍정(雙晶)에 대해 설명하 며 또한 변형 후의 가공경화 와 집합조직 및 재결정에 대해 기술하였다.

##### 4.4.1. 변형기구(變形機構)

##### 4.4.1.1. 미끄럼(slip)에 의한 변형

금속에서 소성변형의 일반적인 방법은 소위 미끄럼면(slip plane)이라고 하는 특정한 결정면(結晶 面)을 따라서 양쪽 결정이 미끄러지게 하는 것이다.<그림 2-31>은 고전적 미끄럼 모형을 설명하고 있다.<그림 2-31>(a)에서는 연마된 표면을 갖는 금속 입방체(立方體)에 전단응력(剪斷應力)이 가해 지는 상황을 보여주고 있다. 이 전단 응력이 임계치를 초과하게 되면, 미끄럼이 일어난다. 원자 집 단은 미끄럼면을 따라서 원자간 거리의 정수배만큼 이동하게 되며, 따라서 연마된 표면에 계단이 형성된다.<그림 2-31>(b) 이 때 연마된 표면을 위에서 현미경으로 보면, 계단이 선으로 보이게 되는 데 이것을 미끄럼선(slip band)이라 한다. 만일 미끄럼이 일어난 후에 표면을 다시 연마하면, 계단 은 제거되며, 따라서 미끄럼선은 사라지게 된다.<그림 2-31>(c)

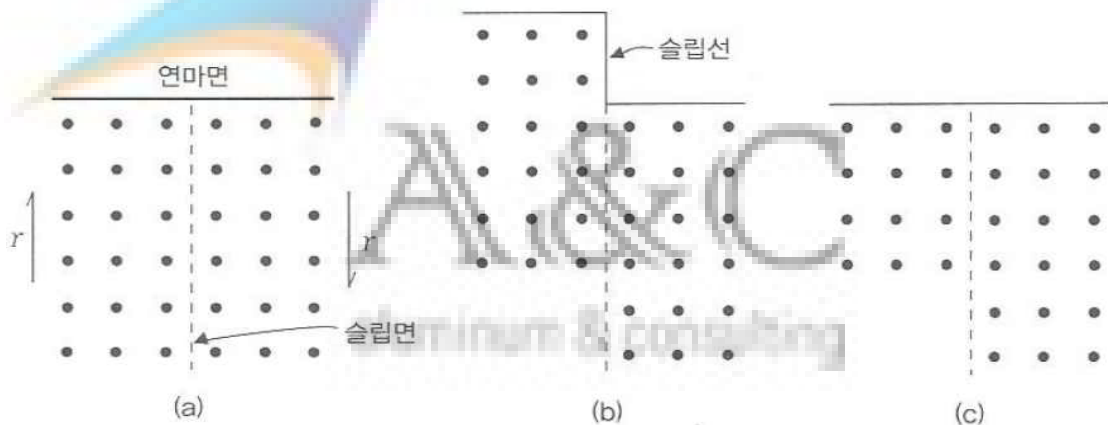


그림 2-31. 슬립의 고전적 관념을 설명하는 그림

변형이 균일하게 일어날지라도 결정 격자의 대칭적 이동 때문에 미끄럼이 일어난 후에도 결정 격 자는 미끄럼이 전과 같이 정상적인 배열 상태로 유지된다. 결정의 미끄럼된 부분의 각 원자는 모두 격자간 거리의 정수배만큼 이동한다. 단결정(單結晶)이 균일한 소성 변형 후에도 단결정으로 남는다는 사실은 소성변형이 일어나는 방법에 제한을 주게 된다. 미끄럼은 어떤 결정면에서 특정한 방 향으로 가장 쉽게 일어난다. 일반적으로, 미끄럼면은 원자 밀도가 가장 큰 면이며, 미끄럼방향은 미끄럼면에 있어서 원자의 밀도가 가장 큰 방향이다. 원자 밀도가 제일 큰 면은 면간 거리가 가장 커서 미끄럼에 대한 저항이 다른 면들보다 작다. 미끄럼방향과 미끄럼면의 조합을 미끄럼계(slip system)라 한다. 알루미늄의 결정 구조는 면심입방구조(面心立方構造)이며 면심입방구조에서는 미끄럼면이 {111}의 팔면체면이고, 미끄럼방향은 <110>방향이다. 면심입방구조 단위 격자당 총 8 개의 {111}면이 있으나, 마주보는 면은 서로 평행하므로 팔면체면은 4개이다. 각 {111}면은 3개의 <110>방향을 포함하고 있다. 따라서 면심입방구조는 12개의 미끄럼계를 갖는다. 이 결정의 변형을 좀더 자세히 살펴보면, 면심입방구조의 결정은 대칭성이 높고 12개의 가능한 미끄럼계를 갖고 있 기 때문에 미끄럼계의 선택의 폭이 넓다.



#### 4.4.1.2. 쌍결정변형(雙結晶變形)

금속의 소성 변형에 있어서 가장 중요한 기구는 미끄럼변형이면, 미끄럼 다음으로 중요한 변형 기구는 쌍결정변형이다. 쌍결정(雙結晶)은 결정의 일부분의 방위가 모결정에 대해서 경상의 관계로 대칭성을 이루고 있는 것인데, 경면에 상당하는 경계면은 쌍결정면(雙結晶面)이라 한다. <그림 2-32>는 쌍결정 현상을 설명해 주는 그림이다. <그림 2-32>(a)는 표면에 수직하고 종이면에 평행한 저지수면을 갖는 단면을 나타낸 것이다. 쌍결정면은 종이면에 수직이다. 만일 <그림 2-32>(a)와 같이 결정이 쌍결정면을 따라서 전단 응력을 받으면, 쌍결정면에서 쌍결정이 형성된다. <그림 2-32>(b) 쌍결정면의 오른쪽 부분은 변형되지 않았다. 쌍결정면의 왼쪽면의 원자들은 쌍결정면에 대하여 오른쪽 면의 원자들과 대칭이 되도록 전단 변형되었다. 이와 같은 단순 격자에서 쌍결정 중의 각 원자는 균일한 전단변형(剪斷變形)에 의해 이동하는데 각 원자의 이동 거리는 쌍결정면으로부터의 거리에 비례한다.

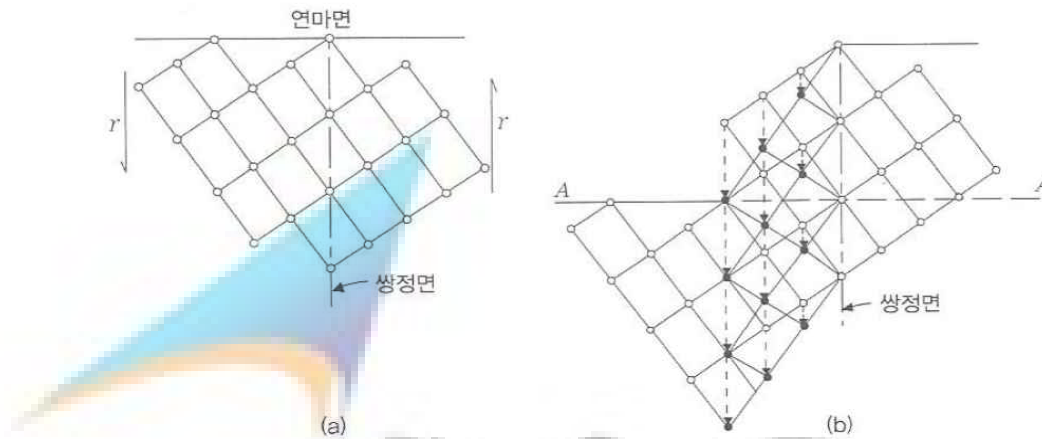


그림 2-32. 쌍결정 모형도

<그림 2-32>(b)에서 흰 원은 이동하지 않은 원자를 나타내고 파선으로 표시한 원은 위치를 바꾼 원자의 원래 위치를 나타내며 검은 원은 쌍결정 중의 변위된 원자 위치를 나타낸다. 쌍결정은 변형에 의해 형성된 표면 높이의 변화와 변형된 부분과 변형되지 않는 부분과의 결정 방위 차이 때문에 연마된 표면에서 관찰될 수 있다. 만일 표면을 AA단면까지 연마할 것 같으면 표면높이의 차이는 없어지겠지만 부식시키면 다시 쌍결정을 볼 수 있다. 이것은 쌍결정과 쌍결정되지 않은 구역간에 연마한 후에도 방위 차이가 존재하기 때문이다. 쌍결정변형은 여러 가지 점에서 미끄럼변형과 다르다. 미끄럼에서는 미끄럼면 상·하의 결정방위가 변형 전·후에 있어서 같지만, 쌍결정변형에서는 쌍결정면 양쪽의 결정 방위가 서로 다르다. 미끄럼은 원자간 거리의 여러 배수의 거리만큼 일어나는 것이 보통이지만 쌍결정변형에서는 원자의 이동 거리가 한 원자간 거리보다 훨씬 짧다. 미끄럼은 비교적 넓은 간격으로 떨어져 있는 미끄럼면에서 일어나지만, 쌍결정변형은 쌍결정중의 모든 원자면이 변형에 참여한다. 쌍결정은 기계적 변형에 의해서 생길 수도 있고, 소성변형 후에 소둔할 때도 생길 수 있다. 전자에 의해서 생긴 것은 기계적 쌍결정(mechanical twin)이라 하고, 후자의 의해 생긴 쌍결정을 소둔쌍결정 (annealing twin)이라 한다. 쌍결정은 결정 구조에 따라 어떤 특정 결정면에서 특정 결정방향으로 변위함에 의해서 형성된다. 면심입방구조의 금속에서 쌍결정면과 쌍결정방향은 (111) 및 (112)로 알려져 있다. 알루미늄은 일반적인 실험 조건하에서는 쌍결정을 관찰하기가 힘들다. 왜냐하면 일반적으로 면심입방 구조금속의 쌍결정은 미끄럼 변형보다 훨씬 높은 응력을 필요로 하고, 면심입방구조 금속에 많은 양의 미끄럼시스템이 존재함으로 미끄럼에 의한 다양한 변형이 유용하기 때문이다. 특히, 쌍결정 방위가 미끄럼방위와 다르기 때문에 일반적인 쌍결정의 변형 기구는 매우 복잡한 형태로 관찰 된다.시뮬레이션한 알루미늄 나노결정의 변형조직이며 쌍결정이 관찰된 경우를 보여주고 있다.

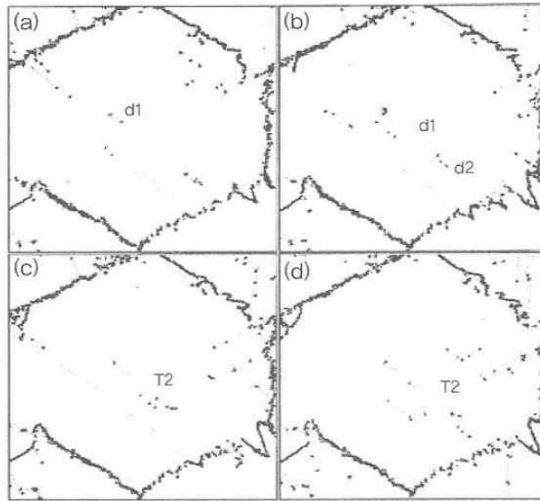


그림 2-33. 시뮬레이션한 알루미늄 나노결정의 변형조직

#### 4.4.1.3. 고온에서의 변형

금속이 고온에서 변형될 때 새로운 미끄럼계가 작동할 수 있다. 알루미늄은 260°C 이상에서는 슬립이 (111)(100)(211) 면에서 일어난다. 그러나 슬립면은 고온에서 변화하더라도 미끄럼 방향을 변하지 않고 항상 일정하다. 고온에서의 미끄럼띠는 실온에서보다 폭이 넓고 이들 사이의 간격도 넓다. 고온이고 낮은 변형 속도하에서는 미끄럼선이 거의 나타나지 않는다. 일정 응력하에서 재료가 점차적으로 변형하는 형상을 크리프(creep)라 하며 <그림 2-34>는 알루미늄의 크리프 변형 기구를 나타낸 것이다. 여기서 변형활주(glide)는 전위들이 미끄럼 평면을 따라 움직이며, 열적 활성화에 의해 장애물을 넘어간다. 크리프변형은 전위들이 공공이나 침입형 원자들의 확산같이 열의 도움을 받는 기구에 의해 장애물을 넘어간다. 확산크리프는 공공과 침입형 원자들이 부과 응력의 영향하에 결정내에서 유동하는 것이다. Nabarro-Herring이나 Coble 크리프가 이 부류에 속한다.

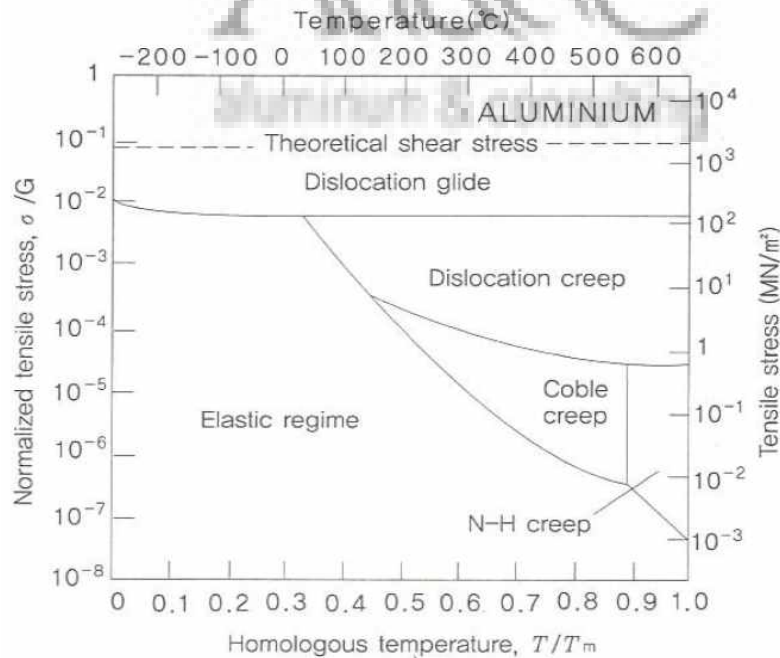


그림 2-34. 알루미늄의 크리프 변형 기구들

#### 4.4.2 가공경화(加工硬化, work hardening)

가공경화 또는 냉간 가공은 열처리로 강도를 높일 수 없고 금속이나 합금에 사용하는 중요한 강화 방법이다. 가공경화 속도는 유동 곡선의 기울기로부터 측정된다. 온도가 상승하면 역시 가공 경화 속도는 낮아진다. 고용경화에 의해 강화된 합금의 가공경화 속도는 순수 금속의 거동과 비교해 볼 때 증가하거나 감소하기도 하다. 그러나 냉간 가공한 고용체의 최종 강도는 대부분 같은 정도로 냉간 가공된 순금속보다 높다.<그림 2-35>은 냉간 가공량이 증가함에 따른 강도와 연성의 전형적인 변화를 나타낸 것이다. 대부분의 냉간 가공과정에서 금속의 한 방향 또는 두 방향의 치수가 감소하면 다른 방향은 팽창하기 때문에, 냉간 가공은 주가공 방향으로 결정립을 연신시킨다. 심한 변형을 행하면 결정립이 재배열을 일으켜 우선 방위(方位)을 나타낸다.<그림 2-35>에서 보여준 인장 성질의 변화 외에도 냉간 가공은 다른 물리적 성질의 변화도 일으킨다. 수십 퍼센트 정도의 밀도가 감소하고, 산란(散亂) 중심의 숫자가 늘기 때 문에 전기 전도도는 많이 감소하며, 그리고 열팽창계수(熱膨脹係數) 약간 증가한다. 냉간 가공된 상태의 내부에너지 증가 때문에 화학 반응성은 증가한다. 화학 반응성의 증가는 일반적으로 부식 저항성을 감소시키며, 경우에 따라서는 응력 부식 균열을 일으킨다. 0.1 퍼센트 정도의 밀도가 감소하고, 산란 중심의 숫자가 늘기 때문에 전기 전도도는 많이 감소하며, 그리고 열팽창계수는 약간 증가한다. 냉간 가공된 상태의 내부에너지 증가 때문에 화학 반응성은 증가한다. 화학 반응성의 증가는 일반적으로 부식 저항성을 감소시키며, 경우에 따라서는 응력부식균열(應力腐蝕龜裂)을 일으킨다.

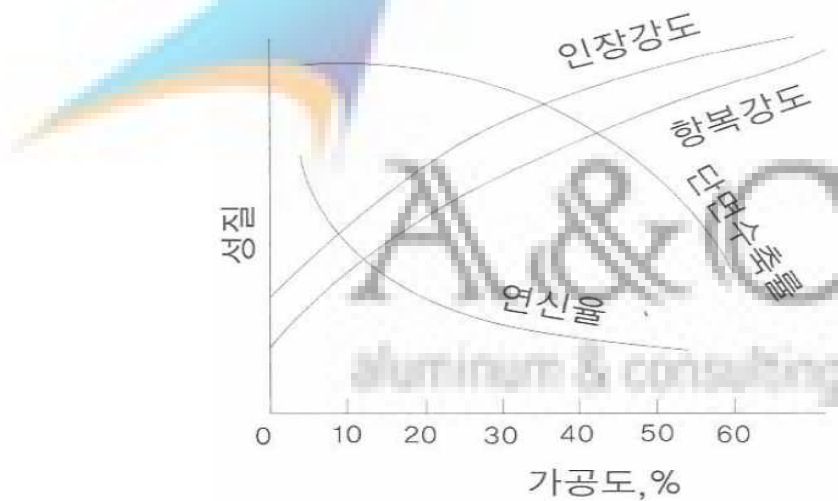


그림 2-35. 냉간 가공도에 따른 인장성질의 변화

높은 가공경화 속도는 전위가 교차하여 전위의 활주를 서로 방해함을 의미한다. 이러한 과정은 (1) 전위응력장의 상호 작용을 통하여 (2)부동전위를 만드는 전위의 상호작용을 통해서 (3)조그(jog) 전위를 형성하는 다른 미끄럼계에 의한 미끄럼계의 교차를 통하여 생긴다. 전위 모델에 기초한 가공 경화 이론을 발전 시키는 많은 노력이 계속되어 왔고 위에서 기술한 세가지 과정에 기초한 이론은 다음의 형태로 나타내어 진다.

$$\sigma_0 = \sigma_i + \alpha Gb\rho^{1/2}$$

순수 알루미늄 합금은 150mJ/m<sup>2</sup> 보다 더 높은 적층결함(積層缺陷) 에너지(SFE) 를 가지며 이것은 다른 합금들 또는 면심입방 격자구조를 가지고 있는 다른 합금들(은, 구리, 금, 납, 백금, 황동, 청동 등)에 비해 높은 수치이다. 냉간가공 후 변형시 사용되는 에너지의 일부(2~10%)가 금속에 저장되며 결함의 밀도와 분포는 알루미늄 합금의 경우 불균일하게 분포하고 세포의 하부구조를 형성한다. 잔류응력(殘留應力)과 전위밀도는 온도, 결정립크기 그리고 변형과 같은 여러 요인들에 의해 의존한다. 세포의 하부구조와 별개로 변형 후 순수알루미늄과 그 합금들은 격자결함(格子缺陷) 분포에서 두드러진 이종(異種)이 존재한다. 이것을 일반적으로 변형대(變形帶)라고 한다. 일반적으로 이들은 재결정 핵 사이트가 되며 결정립계에 인접한 영역은 소성변형시 구별된 거동을 보인다. 인장시험(引張試驗)시 소성변형을 한 영역에서 열처리된 재결정이 다결정(多結晶) 알루미늄 합금의 유동곡선은 Ludwik 식으로 설명 된다.

$$\sigma_0 = \sigma_0 + K \epsilon^n$$

여기서  $\sigma_0$ 은 항복강도, K는 강화상수,  $\epsilon$ 은 진응력(眞應力), n은 변형-경화 지수 이다. 정형적인 알루미늄 합금의 n 값은 0.24에서 0.18 사이에 존재하여 n이 감소하면 또는 증가한다. 고용경화 기구는 알루미늄합금에서 크게 중요하지 않다. 그 주된 이유는 고체 상태에서 많은 양의 다른 원소나 용질들을 용해할 수 없기 때문이다. 그러나, 아연과 마그네슘은 상용 알루미늄 합금들에서 높은 고용도를 가지는 합금원소이다. 두 번째 이유는 순수 알루미늄의 적층결함 에너지 (SFE)가 매우 높고 고용체에서 용질의 존재로 낮아지지 않기 때문이다. 이런 사실에도 불구하고 고용체에서 용질원자들은 전위들과 상호 작용하고 소성변형을 하기 위해 높은 이동전위 밀도를 필요로 하므로 전위들의 이동을 억제하며 높은 잔류응력(殘留應力)을 가지게 한다. (재결정의 구동력)<그림 2-36>는 순수알루미늄과 마그네슘 함량에 따른 변형-경화 곡선을 나타낸다.

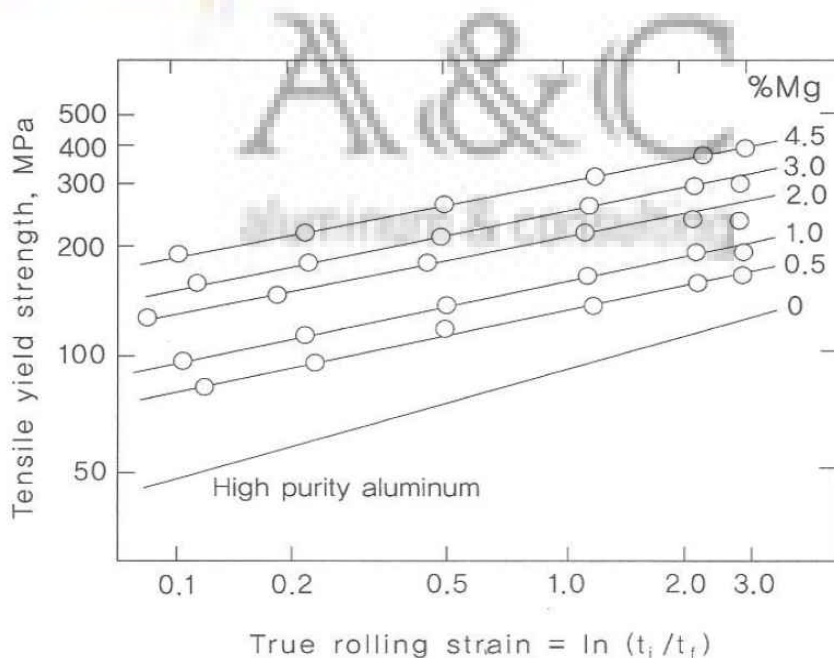


그림 2-36. 냉간압연한 순수 알루미늄과 Al-Mn 합금의 변형-경화도

#### 4.4.3. 집합조직(集合組織)

다결정체에 있는 각 결정립은 보통 그 인접한 결정립의 결정방위와는 다른 방위를 갖는다. 전체로서 생각할 때 모든 결정립의 방위는 어떤 기준에 대하여 무질서하게 배열하고 있거나 또는 어떤 특정한 방위에 정도의 차이는 있지만 한 무리로 배열하려는 경향을 갖고 있다. 후자와 같은 배열을 한 집합체는 방위배열(方位配列) 또는 집합조직을 갖는다고 하는데 이것은 단순히 방위결정이 무질서하지 않는 상태라는 것을 정의한 것이다. 우선방위는 선과 판 등으로 성형된 경우에 잘 나타나며 이러한 제품에서 나타나는 집합조직의 종류는 다음과 같다. 성형공정(신선 또는 판압연) 자체에서 형성된 우선방위를 변형집합조직(deformation texture) 이라고 한다. 이것은 다결정체에 있는 각 결정립이 소성변형 중 회전하려는 경향 때문에 생긴다. 부과된 힘 그리고 인접 결정립의 미끄럼과 회전에 의하여 결정되는 복잡한 방법으로 각 결정립은 미끄럼과 회전이 일어나며 결과적으로 우선방위 즉 무질서하지 않는 방위로 재결정시키면 새로운 결정립의 조직은 또한 냉간가공한 재료의 것과는 보통 다른 우선방위를 갖게 된다.

이것은 재결정집합조직(recrystallization texture) 또는 소둔집합조직(annealing texture)이라고 한다. 이것은 냉간 가공된 소지(所持, detention)의 집합조직이 소지에서 새로운 결정립을 생성하고 성장시키려는 경향이 있기 때문이다. 우선방위는 공업적으로 중요한 것은 그것이 재료의 거시적인 성질에 미치는 대단히 큰 영향 때문이다. 모든 재결정은 이방성이라는 사실 즉 방향에 따라서 성질이 다르다는 사실을 알면 우선 방위를 갖는 집합체는 정도의 차이는 있지만 방향에 따라서 다른 성질을 갖는다는 것도 알 수 있을 것이다. 그러한 성질은 재료의 사용목적에 따라서 바람직한 것이 되기도 하고 바람직하지 못한 성질이 되기도 한다. 예를 들면 소형전기모터의 심으로 사용하는 강판은 자성 때문에 모든 결정립의 {100}면이 판면에 나란하게 배열되어야 한다. 그러나 이러한 집합조직은 딥드로잉(deep drawing)용 철판에는 적합하지 못하다. 그러한 판은 딥드로잉의 심한 변형중 균열이 생기지 않도록 (111)면이 판 표면에 나란한 집합조직을 가져야 한다. 그러나 딥드로잉에 의해 비대칭적인 모양을 한 부품을 만들때는 상당히 다른 또는 전혀 다른 집합조직을 가져야 좋은 결과를 얻게 된다. 변형도 및 어닐링온도와 같은 생산변수를 적당히 선택하면 어느 정도 집합조직의 조절이 가능하다. 그러나 어떤 특정한 금속에서 어떤 요구 되는 집합조직을 생성할 수 있는 정도로 집합조직의 생성기구를 완전히 밝히고 있지는 못하다. 이론적으로 다결정 시료에 특성 X-선을 입사시켜 얻는 핀홀 사진은 언제나 연속적이며 또한 원주에 따라서 강도가 일정한 동심원(Debye환)으로 되어 있다. 그러나 실제로 이런 환은 시료의 개개의 결정이 완전히 모든 방향으로 무질서하게 배향되어 있지 않은 한 얻을 수 없다. 만일 시료가 우선 방위를 하고 있으며 그 정도가 적을 때는 Debye환의 강도는 그 원주에 따라서 불균일하다. 그리고 그 우선방위의 정도가 높으면 실제로는 불연속하게 된다. 후자의 경우 Debye환은 우선 방위를 갖는다는 증거가 된다. 그리고 그 불균일성을 해석하여 우선방압연 등에 의해 제조된 판의 집합조직은 대부분의 결정립이 그 어떤 결정(uvw)은 대략 판 표면에 평행하고 그 면에 있는 어떤 결정방향[uvw]은 대략 판을 압연한 방향에 평행하도록 배향되어 있다. 이러한 집합조직을 간단하게 (hkl)[uvw]라고 기술한다. 이러한 종류의 이상집합조직에서 판에 있는 결정립의 방위는 판에 있는 축에 고정되어 섬유조직이 가졌던 결정립 방위의 회전의 자유도는 없다. (nkl)[uvw]는 이상방위를 규정하여 준다. 어떤 금속과 합금은 판 집합 조직이 대단히 예리하여 판의 결정립이 아주 잘 배향되어 있기 때문에 이상방위로 나타내어도 그 조직을 적절히 잘 표현할 수 있다. 그러나 대부분의 판 집합조직은 여러가지로 흩어져 있으며 여러가지 이상방위와 집합조직의 합에 의해서 상징적으로 접근시키고 있다.



#### 4.4.4. 재결정(再結晶) 및 결정립성장(結晶粒成長)

냉간 가공된 상태는 변형된 상태는 변형되지 않은 금속보다 더 큰 내부에너지를 갖고 있는 상태이다. 냉간 가공된 재료 속의 전위셀 조직이 기계적으로는 안정하지만 열역학적으로는 불안정하다. 온도가 증가함에 따라 냉간 가공된 상태는 더욱 불안정하여져, 결국 금속은 연화되고 변형률이 없는 조건으로 변한다. 이러한 전과정을 소둔이라 한다. 소둔에 의해 심하게 가공 경화된 금속의 연성이 회복되므로 소둔을 반복함으로써 금속의 많은 양을 변형시킬 수 있다. 변형된 재료가 가열될 때, 즉 소둔공정을 거치게 될 때, 변형된 재료 내부의 원자들은 열적으로 활성화 되며, 안정한 상태로의 이행이 가속화 된다. 이러한 원자의 열적 활성화는 재료의 미세조직 변화를<그림 2-37>에 나타낸다. <그림 2-37>에서 나타내었듯이, 회복(recovery)시 점결합들이 제거되고 조직내의 전위구조가 재배열하게 된다. 이러한 미세조직의 변화는 다소 균질하게 일어난다. 그러나 변형 중에 형성된 결정립계는 큰 영향을 받지 않는다. 이와 같은 정적 회복시의 미세 조직 변화는 열간가공 시 발생하는 동적 회복(dynamic recovery)에서도 유사하게 관찰된다. 회복에 의해 전위조직이 재배열한다면, 재결정(recrystallization)에 이르러서는 전위의 밀도가 매우 작은 새로운 결정립들이 변형 기지를 소모시키면서 형성된다. <그림 2-37>(c) 이러한 재결정 현상은 열간가공시 별도의 소둔공정이 없더라도 일어날 수 있으며, 이를 동적재결정(動的再結晶dynamic recrystallization)이라고 한다.

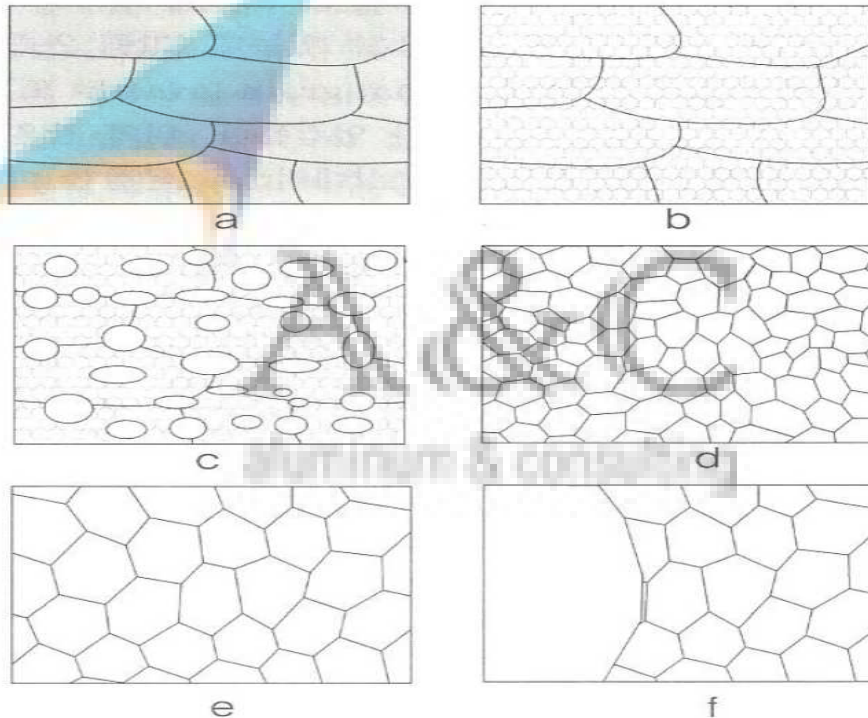


그림 2-37. 주된 어닐링 과정의 개략적인 그림; (a) 변형된 상태, (b) 회복, (c) 부분적인 재결정, (d) 완전 재결정, (e) 결정립 성장, (f) 비정상 결정립 성장

비록 재결정이 전위의 밀도를 상당히 낮추다 하더라도, 재료 내에는 여전히 열역학적으로 불안정한 결정립계가 존재한다. 재결정이 완료된 후 계속되는 어닐링은 이러한 결정립계의 면적을 감소 시킴으로서 계의 에너지를 낮추게 되는데, 이러한 과정에 의해 결정립들의 평균 크기가 증가하는 형상을 결정립 성장이라고 한다. <그림 2-37>(e) 그리고 특수한 상황에서 몇몇 결정립이 선택적으로 성장할 수 있는데<그림 2-37>(f), 이러한 현상을 비정상 결정립 성장(abnormal grain growth) 또는 2차 재결정 (secondary recrystallization) 이라 일컫는다. 위와 같은 소둔 과정들에서, 종종 회복과 결정립 성장은 상대적으로 균질한 미세조직으로 나타난다.

<그림 2-38>는 Al-Mn 합금에서 625°C와 650°C에서의 2차 재결정을 보여준다. 반면, 재결정과 비정상 결정립 성장에 의해서는 그 이전 단계의 미세조직에 비교했을때 매우 상이한 조직이 형성된다. 그런데, 가공된 금속의 어닐링 시 보이는 이와 같은 과정들은 그 단계적 구분이 명확하지 않으며 동시에 일어날 수 있다. 또한 재결정 조직(再結晶組織)이라고 하더라도 균질한 모습으로 일어날 수 있음을 유의 해야 한다.

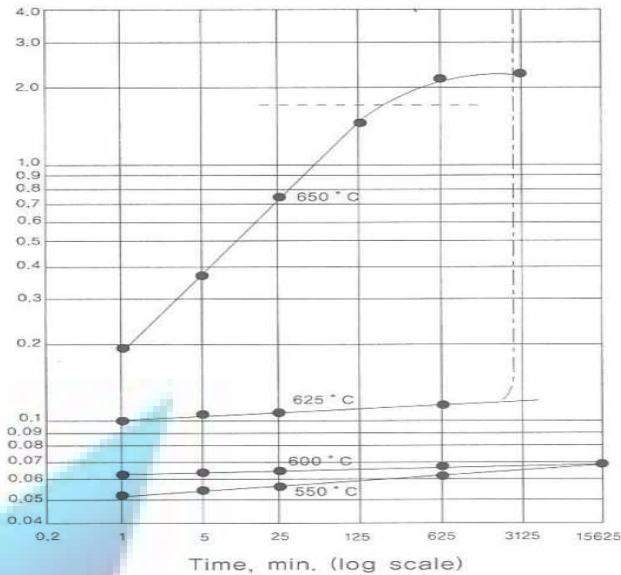


그림 2-38. Al-Mn (1.1 % Mn)합금의 결정립 성장에서 제 2상들의 영향 ;

AL6Mn의 제 2 상의 석출상이 존재하므로 650°C 이하의 온도에서는 결정립 성장이 억제된다. 많은 재료의 기계적 물성을 비롯한 거동 특성들이 전위구조, 결정립의 크기, 그리고 결정립들의 방위, 즉 집합조직에 의해 영향을 받는다. 특히 전위구조는 변형의 방법과 그 이후의 소둔에 의한 재결정 과정에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 이들 전위구조, 결정립 크기, 그리고 집합조직은 소성 변형 및 소둔 시 상호작용을 통하여 서로에 영향을 끼친다.<그림 2-39> 은 소둔 과정인 회복, 재결정, 결정립 성장의 세 단계에 따른 주요한 성질 변화를 보여주고 있다.

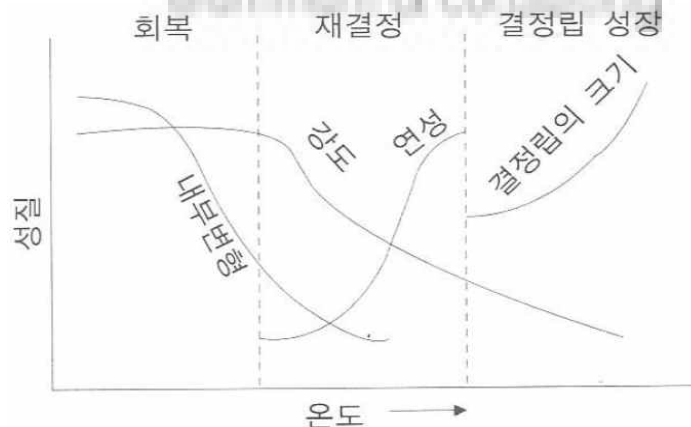


그림 2-39. 회복, 재결정 및 결정립 성장과 각 구역에서의 주요한 성질 변화

알루미늄은 다른 금속에 비해 적층결함 에너지가 높고, 통상 행해지는 상온가공에서는 가공에 의해 도입된 변형이 회복되고, 투입한 에너지의 대부분은 열에너지가 되어 내부변형으로써 축적되기 어렵다. 이 때문에 재결정할 때의 핵생성의 구동력이 적어, 미세결정립은 얻어지기 어렵다. 따라서 재결정에 의해 미세결정립 조직을 얻는 데는 재결정의 구동력이 되는 변형을 축적하고, 재결정핵을 균일하게 다량으로 생성시킴과 동시에 재결정의 성장을 제어하는 결정립성장을 억제하는 것이 중요하다.