

## 알루미늄합금의 열처리기술

김 현 주

부경대학교 공과대학 금속공학과

### Technology of Heat-treatment in Aluminum Alloys

Heon-Joo Kim

Dept. of Metallurgical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739

#### 1. 서 론

알루미늄은 점토성분 중 알루미나( $Al_2O_3$ )를 정제하고 환원시킨 금속으로, 가볍고 강하며 전기 및 열 양도체로 가공이 쉬운 특성을 지녀 일상적인 가정용품에도 널리 사용되는 금속이다.

알루미늄에 Cu, Mg, Si, Zn 등을 합금화시키고 열처리를 행하면 가볍고 강한 합금을 생산할 수 있어 자동차부품과 항공기부품 등에 다방면으로 널리 사용되고 있는 주요 금속이다.

알루미늄은 철(Fe)과 같은 동소변태가 일어나지 않으며, 고온과 저온에서도 결정구조는 면심입방정으로, 2원계 상태도의 알루미늄측에서 알루미늄을 주성분으로 하는 고용체가 존재한다.

알루미늄합금 열처리는 고용체에서 용질원소 용해도차이를 이용한 시효열처리로 알루미늄을 강화시키는 것이다.

본 해설에서는 알루미늄열처리의 과정과 이에 따른 조직변화 및 열처리강화를 간략히 소개하고, 열처리결합에 대한 원인과 대책을 설명한다.

#### 2. 알루미늄합금 상태도와 열처리

그림 1에 대표적인 알루미늄합금, Al-Cu 2원계 합금의 상태도를 나타내었다.

철강(Fe-C 2원계합금)의 경우, 결정구조가 변화하는  $\delta$ -Fe  $\leftrightarrow$   $\gamma$ -Fe  $\leftrightarrow$   $\alpha$ -Fe의 동소변태가 존재하므로 열처리에 의해 다양한 특성을 활용하고 있다.

그러나 알루미늄은 온도변화와 관련없이 면심입방구조를 나타낸다. 따라서, 그림 2와 같이 알루미늄합금의 열

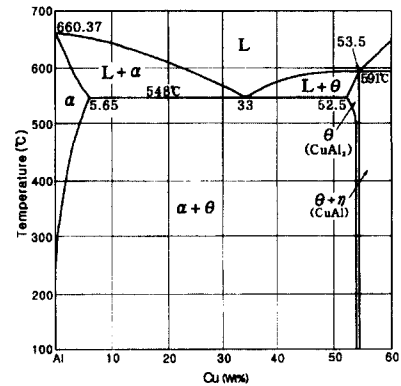


그림 1. Al-Cu 2원계 평형상태도.

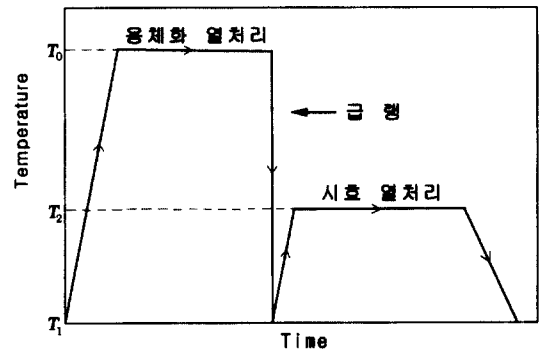


그림 2. 석출경화 열처리의 온도-시간 도표.

처리는 고용체내에서 온도변화에 따른 용질원소의 용해도차이를 이용하여 석출경화를 유도하는 용체화열처리 및 급랭과 시효열처리로 구성되어 있다.

그림 3의 선 MN은 용해도곡선으로, 온도에 따라 A 금속 중에 B금속을 고용하는 한계를 나타낸다. 따라서, 고온에서 A금속(알루미늄) 중에 보다 많은 B금속(용질

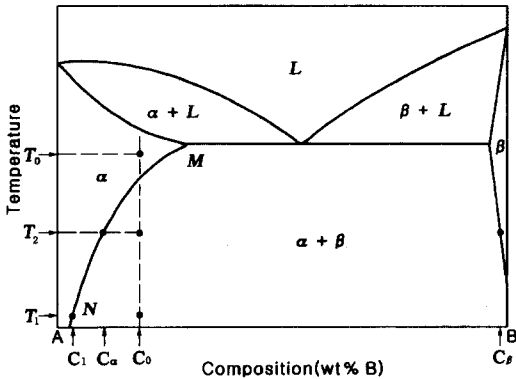


그림 3. 석출경화형 합금의 용해도곡선 변화.

원소)을 고용하고, 상온에서는 고용한도가 매우 적은 합금일수록 열처리강화효과가 크다.

$C_0$  조성 합금의 경우,  $T_0$  온도에서  $\alpha$  고용체로 A금속중에 B금속이  $C_0\%$  고용되어 있다.  $T_2$  온도에서  $\alpha$  고용체 내에 B금속은  $C_\alpha\%$  만큼 고용되므로  $(C_0 - C_\alpha)\%$ 의 B금속이 석출하게 된다. 냉각이 진행되어  $T_1$  온도로 되면,  $\alpha$  고용체로부터 B금속은  $(C_0 - C_1)\%$  만큼 석출되고  $\alpha$  고용체 내에 B금속은  $C_1\%$  고용된다.

그림 3의 상태도에서 M 조성의 합금이  $\alpha$  고용체에 최대의 B금속을 고용하므로, 급랭과 시효에 의해 최고의 시효경화 효과를 나타낼 수 있는 조성이 된다.

가공용 시효합금인 경우 이 조성이 최적이지만, 일반적으로 재료내부의 국부적 편석에 의해 용체화온도에서 부분적으로 용해가 일어날 가능성이 있어  $C_0$  점 부근의 조성을 선호하고 있다.

또한 용체화처리 최고온도도 공정온도보다 약간 낮게 설정한다.

한편, 주조용 시효합금은 공정조성 부근에서 유동성 및 주조성이 우수하기 때문에 일반적으로 공정점 부근의 조성을 가진 합금이다.

$T_0$  온도에서 B금속을  $C_0\%$  함유한  $\alpha$  고용체를 B금속이 석출을 일으키지 않을 정도의 빠른 속도로  $T_1$  온도까지 냉각시키면  $C_0\%$ 의 B금속을 함유한 과포화  $\alpha$  고용체가 상온에서 얻어진다. 과포화된 B금속의 양은  $(C_0 - C_1)\%$ 가 된다. 과포화 고용체는 상온에서 불안정하고, 과포화의 정도가 클수록 더욱 불안정하여 제2상(혹은 B금속)을 석출하고 안정한 상으로 변화하려 한다.

과포화  $\alpha$  고용체를 상온에서 방치하면, 시간이 경과함에 따라 서서히 제2상을 석출한다. 조금 높은 온도에서 가

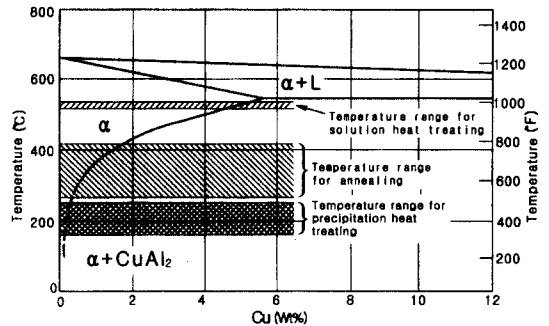


그림 4. Al-Cu계 합금의 열처리 온도 범위.

표 1. 알루미늄합금의 열처리기호 체계.

Temper 종류	상 태
F	제조된 상태 (As fabricated)
O	풀림열처리 상태 (Annealed)
H1	가공경화 상태
H2	가공경화 후, 부분 풀림열처리 상태
H3	가공경화 후, 안정화열처리 상태(저온열처리에 의한 기계적특성 안정화)
T1	고온 성형공정에서 냉각 후, 최종 안정상태로 자연시효된 상태
T2	고온 성형공정에서 냉각, 냉간가공 후, 최종 안정상태로 자연시효된 상태
T3	용체화열처리, 냉간가공 후, 최종 안정상태로 자연시효된 상태
T4	용체화열처리 후, 최종 안정상태로 자연시효된 상태
T5	고온 성형공정에서 냉각 후, 인공시효된 상태
T6	용체화열처리 후, 인공시효된 상태
T7	용체화열처리 후, 안정화
T8	용체화열처리, 냉간가공 후, 인공시효된 상태
T9	용체화열처리, 인공시효 후, 냉간가공된 상태
T10	고온 성형공정에서 냉각, 냉간가공 후, 인공시효된 상태

열하면 과포화  $\alpha$  고용체의 분해는 조장되어 제2상 석출이 빠른 속도로 진행된다. 이와같은 현상을 시효(Aging)라 칭한다. 상온에서 행하는 것을 상온시효 혹은 자연시효라 부르며, 상온보다 높은 온도의 시효를 고온시효 혹은 인공시효라 일컫는다.

그림 4는 Al-Cu계 알루미늄합금의 여러 열처리온도 범위를 상태도에 도식적으로 나타내었다.

표 1은 AA(Aluminum Association)에서 규정한 알

루미늄합금에 대한 열처리기호 분류표이다.

### 3. 용체화열처리

시효성합금은 용체화열처리에서 먼저  $\alpha$ 고용체로 가열하여 가능한 많은 성분을 고용하여 균일한 고용체로 유지하는 것이 기본이다. 이를 위하여 burning이 일어나지 않는 범위내에서 공정온도에 근접한 온도를 선택하여 유지한다. 알루미늄합금의 최적 용체화조건은 공정온도보다 5°C 낮은 온도, 가열온도범위는  $\pm 2.5^\circ\text{C}$ 이다.

가공용 시효합금을 가열하는 경우, 고온으로 될수록 기지금속의 내부산화, 입계산화, 합금원소의 산화 등이 발생하고, 결정립 조대화를 일으켜 시효특성이 저하하고 기계적 성질과 내식성을 저하시키는 원인으로 작용한다.

용체화 가열온도가 낮으면 미고용 합금원소가 많아 시효열처리에서 충분한 시효특성을 얻을 수 없다.

가열온도에서 유지시간은 부피가 큰 가공용 재료와 주방상태의 재료는 균열화 및 편석원소의 고용을 위해 장시간 유지가 필요하나 산화 및 결정립 조대화의 염려가 있다. 유지시간이 짧으면 합금원소가 충분히 고용되지 않아 시효특성이 감소될 수 있다.

다음은 용체화온도에서 일정시간 유지되어 균일하게 고용된 용질원자들이 석출하지 않은 상태로 상온까지 급랭시켜 과포화 고용체와 평형농도 이상의 원자공공을 얻는 용체화 냉각을 행한다.

고온에서 포화된 고용체를 서냉시켜 제2상이 석출하는 반응은 원자의 확산이 필요하다. 반면, 용체화된 고용체에서 원자이동이 발생하지 않을 정도의 속도로 빨리 냉각시키면 과포화 고용체가 얻어진다.

또한, 원자공공의 농도는 가열에 의해 증가하고 서냉

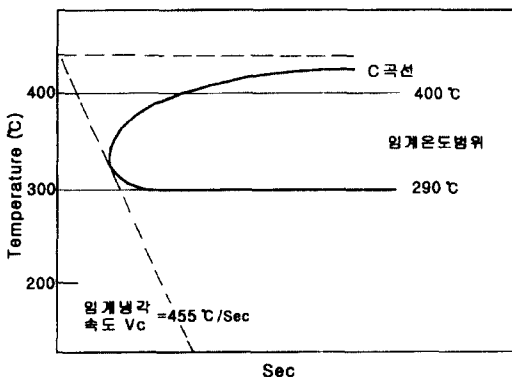


그림 5. 7075알루미늄합금의 C곡선.

에 의해서 감소하며, 일정온도에서 재료내에는 열적 평형농도의 원자공공이 존재한다. 가열에 의해 증가된 원자공공이 감소하지 않을 정도로 급냉하면, 상온에서 과잉의 원자공공이 얻어지고 시효열처리 과정에서 석출을 촉진시키는 역할을 한다.

냉각시에는 실제의 냉각속도가 어느 정도인지 중요하다. 냉각도중에 석출이 일어나지 않는 냉각속도는 각 성분원소에 따라 달라지므로 실험에 의하여 그림5와 같이 C곡선을 작성한다. 7075 알루미늄합금의 경우, C곡선의 코부분 온도범위는 290~400°C로 임계냉각속도는 455°C/sec가 되어 용체화냉각 속도는 이보다 빠른 냉각속도를 유지해야 한다. 부피가 큰 재료일수록 큰 임계 냉각속도를 얻는 것이 곤란하므로 냉각제의 성능과 교반 혹은 분사장치를 검토할 필요가 있다. 냉각제는 일반적으로 물이 사용되며, 냉각 중에 수온이 상승하지 않을 정도의 량이 필요하다.

물 온도는 냉각도에 알맞은 온도를 선정해야하며, 일반적으로 20°C를 많이 사용한다. 급냉에 의해 큰 응력과 변형이 발생하고 균열의 위험이 있는 재료는 70~80°C의 온수를 사용하여 냉각속도를 제한한다.

실제 열처리조업에서 가열설비로부터 재료를 꺼내는 동안에 시간이 지체되어 도중에 냉각이 개시되지 않도록 시간관리에 주의해야 한다.

### 4. 시효열처리

가장 대표적인 시효열처리과정을 나타내는 Al-Cu합금을 대상으로 시효열처리과정에서 일어나는 조직변화를 설명한다. Al에 대한 Cu의 고용도는 548°C에서 최대 5.65 wt%로, 이 이상의 Cu는  $\text{CuAl}_2$ 의 금속간화합물로서 존재한다. 고용도는 온도저하와 함께 급속도로 감소하여 상온에서는 Cu가 Al내로 거의 고용되지 않아 석출경향이 강한 합금이다.

Cu원자는 시효가 진행됨에 따라 석출을 위한 확산이 일어난다. 즉 Al의 격자 내에 Cu원자들이 모인 작은 집단을 만든다. 이것은 최초 발견자들의 이름을 붙여 Guinier-Preston 존이라 칭한다. 시효초기에는 Cu가 1원자 두께로 모이는데 이것을 GP 1존이라 부른다. 시효열처리의 진행과 더불어 Cu원자층이 겹쳐져 규칙성을 갖는 GP 2존이 형성된다.

상온시효에서는 원자의 움직임이 둔화되어 오랜 시간을 필요로 하나, 가열을 행하면 시효가 빨리 진행된다.

Al-4% Cu합금에서 GP 1존은 100°C, 10일간의 시효로 GP 2존으로 진행되나, 150°C로 가열하면 단시간에 GP 2존을 형성시킨다.

Al-Cu계 합금에서 시효는 다음과 같이 진행된다.

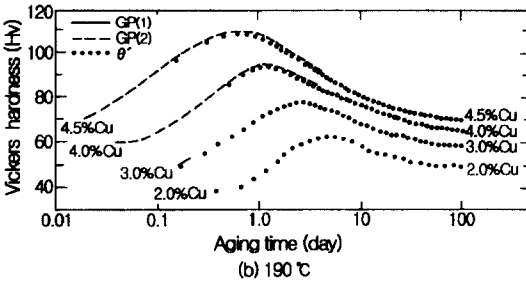
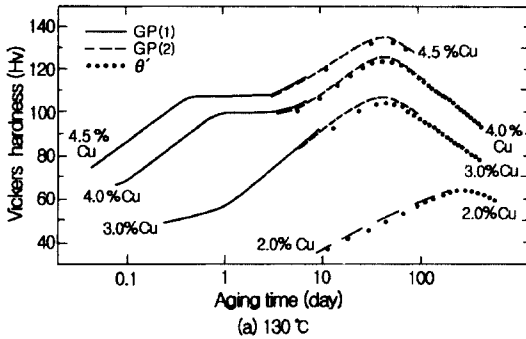
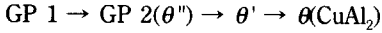


그림 6. Al-Cu 합금의 시효경화 곡선.

$\theta'$ 상은 모상과 연결되어 있는 정합상태(coherent)를 나타내는 중간석출상으로,  $\theta'$ 상과  $\theta'$ 부근에서 합금은 시효열처리에 의해 최대 경도값을 나타낸다. 시효가 계속 진행되면 석출물은 안정상인  $\theta$ (CuAl<sub>2</sub>)상으로 변화된다.  $\theta$ 상은 안정상으로 모상격자와 정합관계가 없는 것(incoherent)으로 과시효의 단계에 나타난다.

그림 6과 그림 7에 시효열처리에 따른 경도의 변화와 미세조직 변화를 나타내었다.

표 2에 알루미늄주조합금에 대한 열처리종류와 기계적 특성값을 참고로 나타내었다.

### 5. 열처리 결함과 대책

시효성 알루미늄합금을 대상으로 열처리와 관련된 결함들의 원인과 대책을 간략히 정리하였다.

#### 1. 제품표면의 경도가 규격값 보다 낮은 경우

- 원인1 및 대책. 용체화온도가 낮을 때: 용체화온도가 낮으면 합금성분의 충분한 고용이 이루어지지 않아 경도가 낮게 된다.

Burning이 일어나지 않는 범위내에서 공정온도에 근접한 용체화온도를 선정한다. 용탕이 다르거나, 편석 등에 의해 부분적으로 용질농도 차이가 있을 때 공정온도가 다를수 있으므로 실험에 의해 가장 효과적인 용체화

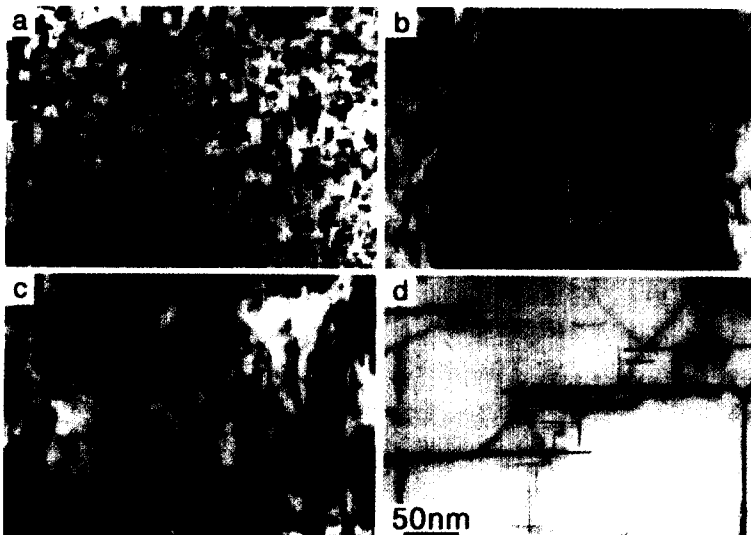


그림 7. Al-4% Cu 합금의 석출상 전자현미경 조직사진 (a) GP(1)존 (150°C, 30 mm), (b) GP(2)존 (150°C, 3.5 h), (c) GP(2)존 +  $\theta'$  (200°C, 2h), (d)  $\theta$ 상 (200°C, 2h)

표 2. 알루미늄주조합금의 열처리종류와 기계적특성.

합금 종류	열처리 기호	용체화처리		시효경화처리		기계적 성질					
		온도 (°C)	시간 (Hr)	온도 (°C)	시간 (Hr)	금 형			사 형		
						인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	경도 (HB)	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	강도 (HB)
AC1A	AC1A - T4	515	10	-	-	-	-	-	-	-	-
	AC1A - T6	515	10	160	6	285	12.3	80	270	4.5	75
AC1B	AC1B - T4	515	10	-	-	400	21.0	110	400	14.0	110
	AC1B - T6	515	10	160	4	420	8.0	125	420	3.0	125
AC2A	AC2A - T6	510	8	160	9	345	1.6	116	310	0.6	88
AC2B	AC2B - T6	500	10	160	5	305	0.9	81	245	0.4	58
AC4A	AC4A - T6	525	10	160	9	300	3.2	94	265	1.6	86
AC4B	AC4B - T6	500	10	160	7	345	1.6	106	260	1.1	79
	AC4C - T5	-	-	225	5	-	-	-	-	-	-
AC4C	AC4C - T6	525	8	160	6	285	7.3	95	230	2.8	81
	AC4C - T61	525	8	170	7	-	-	-	-	-	-
AC4CH	AC4CH - T5	-	-	225	5	-	-	-	-	-	-
	AC4CH - T6	535	8	155	6	260	16.8	70	230	5.2	80
	AC4C H- T61	535	8	170	7	-	-	-	-	-	-
AC4D	AC4D - T5	-	-	225	5	-	-	-	-	-	-
	AC4D - T6	525	10	160	10	320	4.1	98	270	1.9	101
AC5A	AC5A - O	350	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	AC5A - T6	520	7	200	5	356	1.1	119	275	0.8	109
AC8A	AC8A - T5	-	-	200	4	260	1.0	100	-	-	-
	AC8A - T6	510	4	170	10	335	1.0	121	215	0.5	116
AC8B	AC8B - T5	-	-	200	4	260	1.0	107	-	-	-
	AC8B - T6	510	4	170	10	335	1.0	124	280	0.6	124
AC8C	AC8C - T5	-	-	200	4	280	1.0	102	-	-	-
	AC8C - T6	510	4	170	10	390	1.0	128	-	-	-
AC9A	AC9A - T5	-	-	250	4	150	0.2	110	-	-	-
	AC9A - T6	500	4	200	4	-	-	-	-	-	-
	AC9A - T7	500	4	250	4	-	-	-	-	-	-
AC9B	AC9B - T5	-	-	250	4	185	0.5	108	-	-	-
	AC9B - T6	500	4	200	4	-	-	-	-	-	-
	AC9B - T7	500	4	250	4	-	-	-	-	-	-

온도를 구해야 한다.

● 원인2 및 대책. 용체화시간이 짧을 때: 용체화온도가 적정하여도 고용하는데 필요한 시간이 부족하면, 고용량이 적어 적정 시효효과를 나타내기 어렵다.

최적의 용체화온도를 우선 설정하고, 실험적으로 시간을 변화시켜 적정 시효시간을 결정한다.

● 원인3 및 대책. 용체화냉각 개시시간이 지연되었을 때: 가열설비로부터 재료를 꺼내어 냉각제에 냉각시키기까지 지체되는 경우, 냉각개시온도가 낮아져 충분한 시효효과를 얻기 어렵다.

가열로로부터 재료를 꺼내어 냉각제에 투입하기까지의 동작연구를 행하여 일정 시간내에 냉각이 개시되도록 한다.

● 원인4 및 대책. 소입냉각속도가 늦을 때: 냉각제의 냉각능력이 부족하여 냉각도중에 용질원자들이 석출하거나 원자공공이 감소되면 충분한 시효효과를 얻기 어렵다.

충분한 냉각능력을 확보하기 위해서는 냉각제의 온도가 낮고 냉각제의 양이 충분해야 하며, 충분한 교반으로 냉각에 필요한 유속을 얻을 수 있어야 한다.

● 원인5 및 대책. 시효온도, 시효시간이 적정하지 않을

때: 시효온도가 높으면 과시효에 의해 경도가 저하한다. 시효온도가 낮을 경우 장시간 시효에 의해서도 적정 경도가 얻어지지 않는다.

실험과 지속적인 품질관리에 의해 적정한 시효온도와 시효시간의 조합을 도출해야 한다.

- 원인6 및 대책. 재료의 화학성분이 다를 때: 필요한 경도를 얻기 어려울 정도로 화학성분이 규격성분을 만족하지 못할 때 충분한 시효효과를 얻기 어렵다.

성분분석을 통해 적정 함량으로 성분이 유지되는지 확인한다.

## 2. 제품표면에 부풀음에 의한 돌기가 형성되는 경우

- 원인 및 대책1. 용체화온도가 고온일 때: 가열온도가 공정온도를 초과하거나, 편석 등에 의해서 공정온도가 달라지면 부분적으로 공정용해가 일어나고 표면에 부풀음 돌기가 형성된다.

대형이거나 복잡한 형상의 재료일 때, 승온속도가 너무 빠르면 얇은 부분에서는 공정온도가 초과된다. 적정 승온속도를 유지할 필요가 있다.

- 원인2 및 대책. 가열분위기의 수분과 재료성분인 알루미늄이 반응에 의해 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )과 원자 수소가 발생된다. 원자상의 수소는 재료내로 침투하여 약한 부분에서 분자상 수소가 되면서 압력을 증가시켜 기공이나 부풀음을 발생시킨다.

가열분위기로 공급되는 공기에 과잉의 수분이 함유되지 않도록 유의한다.

- 원인3 및 대책. 용해시 불충분한 탈가스: 용해시 분위기로부터 침입한 가스가 충분히 제거되지 못하고 잔류하는 경우, 가열시 부풀음이 발생한다.

용해 최종 단계에서 탈가스제 등을 사용하여 완전히 가스를 제거해야 한다.

- 원인4 및 대책. 가공공정에서 불량: 단조, 압연, 인발 등의 후속 가공공정에서 접합부 불량 등이 용체화가 열시 부풀음의 원인이 된다.

표면에 부착된 이물질 제거를 위하여 성형가공후에 세척을 행하거나, 표면 질삭가공후 가열하는 경우도 있다.

## 3. 내식성이 저하되는 경우

- 원인1 및 대책. 재료에 염화물이 잔류할 때: 염욕에서 가열한 경우, 요철부위 등에 염화물이 잔류하면 부식의 원인으로 작용한다.

가열냉각후, 세척을 행한다.

- 원인2 및 대책. 보관시 물에 접촉될 때: 금속표면에 전해액이 형성되면서 부식반응이 일어난다.

건조한 곳에 재료를 보관한다.

- 원인3 및 대책. 용체화처리가 불충분할 때: 입계부식 및 용력부식균열에 민감한 재료는 가열부족에 의해 균일한 고용화가 일어나지 않았거나, 냉각부족으로 충분한 용체화처리가 되지 않았을 때 부식된다.

가열시 균일한 고용체가 되도록 적절한 온도와 시간을 유지한다. 또한 냉각시에도 충분한 냉각속도가 얻어질 수 있도록 방안을 강구한다. 일반적으로 급냉소입은 조직면에서 볼 때, 용력부식균열에 유효한 방안이나, 급냉에 의해 소입용력의 발생이 클 때 악영향도 있으므로 주의한다.

## 4. 변색

- 원인1 및 대책. 가열시의 변색: 잔류가스, 연소가스, 점점, 질삭유 등이 남아 불완전 연소되면서 착색된다.

로내를 청결하게 유지하고, 재료를 세척한다.

- 원인2 및 대책. 냉각시의 변색: 냉각제를 반복 사용하거나, 경수를 첨가하여 냉각제가 알카리성으로 변하면 재료의 종류에 따라서는 변색이 된다.

냉각수는 PH관리를 행하고, 소입시 재료가 서로 접촉하지 않도록 하여 균일한 냉각이 되도록 한다.

## 5. 소입변형

- 원인1 및 대책. 가공시의 잔류용력이 가열시 제거되면서 변형발생: 용체화처리 후 변형을 교정하거나, 필요시 용력제거 풀림처리를 행한다.

- 원인2 및 대책. 재료를 쌓아 적재시키거나, 하중을 가하면서 가열 시키거나, 접촉, 기대어 놓고 가열하면, 가열에 의해 재료의 탄성계수가 저하되면서 변형한다.

가열중에 하중이 작용하지 않도록 재료를 설치하거나, 변형량을 규정치 내로 유지할 수 있도록 방안을 강구한다.

- 원인3 및 대책. 소입시 재료가 균일 냉각되지 않아 냉각시간차가 있거나, 가열시 열간섭이 일어날 때: 복잡한 형상의 재료는 냉각을 제어하고, 긴 형상의 재료나 판재는 세워 냉각시킨다.

변형이 발생하였을 때는 가능한 빨리 교정한다. 방지하여 자연시효가 일어나면 교정하기 어렵게된다.

## 6. 열처리 균열발생

- 원인1 및 대책. 주조품, 단조품, 시효성이 높은 재

료: 냉각속도가 빨라 균열이 발생되므로 냉각수의 온도를 60~100°C로 유지하여 소입응력을 완화시킨다.

- 원인2 및 대책. 두께변화가 심한 재료: 두께변화가 심한 부위에 냉각시의 수축응력이 집중되어 균열을 발생시키므로, 균일냉각이 일어나는 방안을 강구한다.

- 원인3 및 대책. 표면부근에 구멍이 존재하여 응력집중을 유발할 때: 구멍에 석면 등을 넣어 급격한 냉각으로 인한 응력집중을 완화시킨다.

- 원인4 및 대책. 용체화 가열온도가 높아 부분적으로 공정용해가 발생할 때: 적정 용체화온도 설정과 가열속도 유지로 공정용해부분의 미세균열을 방지한다.

#### 7. 신율부족

- 원인 및 대책. Over-heat, 고온산화, 무리한 교정가공, 부적절한 단조로 인한 금속유동 불량 등에 기인한다.