

## Al-Mg-Si 단조품의 시효 모델

권용남<sup>1</sup>, 이영선<sup>1</sup>, 이정환<sup>1</sup>

### Aging model for Al-Mg-Si forged part

Y.-N. Kwon, Y. S. Lee and J. H. Lee

#### Abstract

Ageing behavior of the Al-Mg-Si alloy was modeled for the use of optimization of Al forging product. Typical precipitates of Al-Mg-Si alloy are a wide variety of metastable phases (e.g. GP zones,  $\beta''$ ,  $\beta'$ ). These rod shaped particles take a role to hinder the dislocation movement. The precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys is quite complex and the strength of precipitate particles differs with the ageing condition. In the present study, the ageing behavior of Al-Mg-Si alloy was investigated by using an industrial grade Al 6061 alloy forged product, which was a perform for an Al impeller for turbo charger. The precipitate hardening models by Esmaeili's approach were used for the analysis of ageing behavior.

**Key Words** : Al-Mg-Si alloy, Ageing model, Forging product, Precipitation

#### 1. 서 론

최근 자동차 산업에 소요되는 부품들의 경량화가 매우 빠른 속도로 진행되고 있으며 이에 따라 알루미늄 합금 부품의 수가 크게 증가하고 있다. 이중 열간 단조품은 주로 2xxx, 7xxx 및 6xxx 계 합금을 이용하여 생산되고 있다. 특히, 자동차 산업에 사용되는 알루미늄 단조품의 대부분은 6xx 계 Al-Mg-Si 합금으로 제조되고 있다. Al-Mg-Si 합금은 rod 형상의  $\beta$ 상 뿐만 아니라 Cu 등의 미소한 합금 성분의 조정에 따라 Q,  $\theta$ , Si 상등이 석출할 수 있는 가능성이 높다[1]. 또한, 이상의 평형상들은 온도 및 시간등의 조건의 변화에 따라 GP zone 에서부터  $\beta''$  및  $\beta'$  등과 같은 비평형상의 출현이 예상되며 실제 강화 효과를 최적화하기 위해서는 합금 성분 및 제조공정에 따른 적절한 열

처리 공정을 설계할 필요가 있다.

일반적으로 Al-Mg-Si 합금 단조품의 제조공정은 소재의 균질화처리 및 가열, 열간 단조, 용체화처리 및 인공 시효 순서로 구성되며 자동차 산업에서는 열처리 시간의 절감을 통한 생산성 향상에 대한 요구가 매우 실정이다. 알루미늄 합금의 대부분의 물성은 시효처리 조건에 의해 결정된다. 즉, 부품이 요구하는 각종 기계 및 성능 특성을 만족시켜줄 수 있는 상태로 시효처리를 제어할 수 있는 정량적인 모델을 제시함으로써 산업에서 요구하는 물성제어와 생산성 향상을 동시에 달성할 수 있다. 비록 Al-Mg-Si 합금계가 발명된지가 50 여년이 지났음에도 불구하고 최근에도 새로운 석출상의 분석 및 다양한 방법으로 열처리 과정을 모델링하려는 시도가 진행되어 오고 있다[2-5].

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터  
# 권용남, E-mail: kyn1740@kmail.kimm.re.kr

본 연구에서는 최근 Esmaceli[3,4]등에 의해 제안된 항복강도 예측 모델을 바탕으로 Al-Mg-Si 합금의 6061 알루미늄 단조품의 시효 거동을 고찰하고자 시도하였다. 대상 단조품은 Turbo charger impeller 예비 성형품으로 고속 회전체에서는 높은 항복강도를 가질수록 작동시 시스템의 정밀도를 높일 수는 장점을 가진다.

## 2. Al 6061 합금 특성

### 2.1 Al 6061 합금 특징

표 1 에 본 연구에서 사용한 상용 Al6061 합금의 조성을 나타내었다. 그림 1 은 열역학 계산 프로그램인 Calphad 를 이용하여 얻은 상태로 Mg<sub>2</sub>Si 석출물인 β상이 시효처리시 생성될 수 있는 입자로 판단된다. 이외에 α상과 Al<sub>13</sub>Cr<sub>4</sub>Si<sub>4</sub> 상은 주조시 발생하며 합금 성분중 과잉 Si 들이 단독상으로 석출함으로 상태를 통해 알 수 있다. 이러한 과잉 Si 는 강도를 높이에 기여하는 것으로 알려져 있다[6].

Table 1 Chemical composition of Al6061 alloy used in this study (wt.%)

Si	Mg	Fe	Cr	Cu	Mn	Al
0.97	0.77	0.2	0.2	0.1	0.33	Bal.

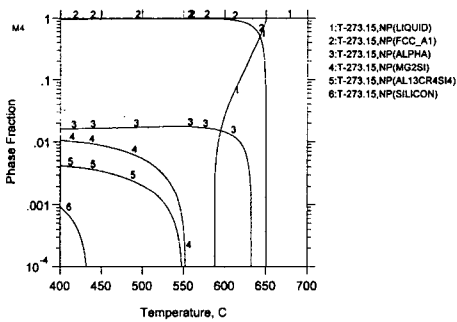


Fig. 1 Phase diagram of the alloy in Table 1.

### 2.2 시효 특성

그림 2 는 본 연구에 사용된 합금을 530°C 에서 3 시간 용체화처리한 후 170~190°C 의 온도범위에서 시간을 변화시키며 시효처리를 실시한 후 경도를 측정된 결과이다. 온도의 증가에 따라 빠른 시효가 진행되고 있음을 확인할 수 있다. 이에

반해 최대 경도는 온도가 낮을수록 높아지는 경향이 관찰되었다. 시효처리 후 미세조직을 나타내는 사진으로 rod 형의 긴 석출물들이 기지내에 석출함을 그림 3 에서 확인할 수 있다. 이상의 결과를 바탕으로 180°C 에서 8 시간 시효처리를 실시한 후 인장시험한 결과 항복강도 302.9MPa, 인장강도 346.9MPa, 연신율 14.7%를 얻을 수 있었다.

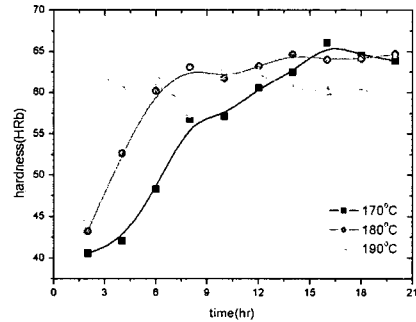


Fig. 2 Ageing response of Al6061 alloy with the variation of temperature and time.

500nm

Fig. 3 Typical aged microstructure of Al-Mg-Si alloy having rod shaped precipitates.

## 3. 시효경화형 알루미늄 합금 강화 모델

### 3.1 알루미늄 합금의 강화 기구

Al-Mg-Si 합금의 강화기구로는 석출강화( $\sigma_{ppt}$ ), 고용강화, 결정립 크기나 분산입자등에 의해 결정되는 알루미늄 기지의 강도( $\sigma_{intrinsic}$ )가 있으며 전체 강도는 각 요소들의 합으로 표현할 수 있다 ( $\sigma_{total} = \sigma_{ppt} + \sigma_{intrinsic}$ ). 알루미늄 기지에 의한 강화효과는 석출강화에 비해 낮은 수준으로 석출상태에 크게 영향을 받지 않기 때문에 일정하다고 가정할 수 있다. 반면 고용강화는 석출물 생성에 따라 낮아지게 된다. 결국 시효모델로 알루미늄

합금의 강화를 표현할 수 있다.

### 3.2 강한 입자 석출 강화 모델[2]

석출물에 의한 강화는 석출물의 크기, 분율 및 이에 따른 석출물 사이의 거리와 석출물과 전위 사이에 작용하는 힘에 의해 결정된다. 특히, 석출물의 형상에 따라 석출물 사이의 거리가 다르게 결정될 수 있다. 또한, 슬립시스템과 석출물의 방위관계에 따라 강화에 참여하는 석출물의 분율이 다르게 계산될 수 있다.

식 (1)은 운동 전위가 석출물과 만났을 때 임계 전단응력을 표현한 것이다.

$$\sigma_{ppt} = \frac{MF}{bL} \quad (1)$$

여기서, M 은 Taylor 계수, b 는 버거스 벡터, L 은 석출물사이의 평균거리, F 는 전위와 석출물간의 힘을 나타내는데 식(2)에 나타낸 것과 같이 입자 크기와 비례하는 관계를 가진다고 알려져 있다.

$$F \propto r^m \quad (2)$$

대부분의 needle 혹은 rod 형 석출물을 가지는 합금에서 m 값은 최대시효전까지는 1 의 값을 가지며 과시효시에는 1 보다 낮은 값을 가지는 것으로 알려져 있다. 과시효가 진행되어 석출물이 더 이상 전단되지 않을 경우 전위운동에는 Orowan 기구가 적용된다. 이상의 시효과정은 식(3)~(5)으로 표현할 수 있다.

$$F = \frac{r}{r_{peak}} F_{peak}, \text{ for } r \leq r_{peak} \quad (3)$$

$$F = \left(\frac{r}{r_{peak}}\right)^m F_{peak}, \text{ for } r_{peak} \leq r \leq r_c \quad (4)$$

$$F = 2\Gamma, \text{ for } r \geq r_c \quad (5)$$

Al-Mg-Si 합금의 대표적인 석출물은 그림 3 에서 알 수 있듯이 rod 형으로 석출물 간격 L 은 식 (6)과 같이 결정될 수 있다.

$$L = \left(\frac{2\pi}{f}\right)^{1/2} r \quad (6)$$

이상의 결과를 모두 종합할 경우 식(1)에 정의된 석출강화,  $\sigma_{ppt}$  는 under-ageing 및 over-ageing 조건에서 각각 아래와 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\sigma_{ppt} = \frac{MF_{peak} f^{1/2}}{br_{peak}(2\pi)^{1/2}} f_r^{1/2} \quad (7)$$

$$\sigma_{ppt} = \frac{MF_{peak} f^{1/2}}{br_{peak}^m (2\pi)^{1/2}} r^{m-1} \quad (8)$$

위의 식에서 석출물의 분율인  $f_r$  혹은  $r$  을 제외한 모든 항은 상수로 처리될 수 있다. 또한, 일반적인 시효처리와 같은 등은 열처리시의 석출물의 분율은 식(9)과 같은 Johnson-Mehl 형태의 변태식으로 표현될 수 있다.

$$X = \frac{f_r}{f_{peak}} = 1 - \exp(-kt^n) \quad (9)$$

여기서,  $f_{peak}$  은 최대 시효시 석출물의 부피분율이며 k 와 n 은 재료 상수이다.

### 3.3 상수 결정

Al-Mg-Si 합금의 시효강화는 under-ageing 에서 peak ageing 까지는 식(7)에 의해서 그 이후 over-ageing 의 경우에는 식(8)에 의해 기술되어질 수 있다. 즉, peak-ageing 조건까지는  $f_r$  에 비례하여 증가하다 이후 under-ageing 조건에서는 석출물의 크기 증가에 따라 강화에 참여하는 석출물 분율이 감소하게 된다. 이외에 나머지 인자들은 모두 일정한 온도범위에서 일정한 값을 가지는 상수로 처리할 수 있다. 아래에서는 이러한 상수값을 결정하는 방법을 간단하게 기술하였다.

1.  $f_{peak}$ , 석출입자의 최대 분율: 그림 1 에서 제시한 열역학적 계산을 통해 얻을 수 있었다. 하지만, 본 연구에서는 평형상인  $\beta$  를 대상으로 계산을 실시하여 결과적으로 석출강화 모델이 실제와 차이를 보이는 원인으로 작용하였다.
2.  $r_{peak}$ , peak ageing 조건에서 입자 반경: 그림 3 에 나타낸 것과 같이 가장 높은 경도 및 강도값을 나타내는 온도 및 시간 조건에서 시효처리한 시편의 미세조직 관찰을 통해 직접 측정하였다.
3.  $F_{peak}$ , peak ageing 조건에서 전위와 입자의 반응력: 용체화처리 직후 인장시험을 통해 시효강화 효과만을 분리한 후 peak ageing 조건에서 강도를 식(7)에 입력하여 결정할 수 있다.
4. 이외에 버거스 벡터와 테일러 상수는 문헌에 보고된 값을 사용하였다.

기존의 보고된 결과와 달리 본 연구에서는 열역학 계산에 기초한 석출입자의 분율을 기준으로 Al-Mg-Si 합금의 시효 거동을 예측하고자 하였다.

즉, 비평형상의 분율은 결국 평형상의 분율과 비례관계를 가질 것으로 예상하였으며 이를 바탕으로 기존에 성공적으로 보고된 시효 모델을 적용하였으나 정확한 예측 결과는 얻을 수 없었다. 이에 따라, 비평형상 분율을 정량적으로 평가할 수 있는 계산을 수행중에 있으며 이와 함께 Si 등과 같은 rod 형 석출물을 제외한 인자의 석출을 함께 고려할 수 있는 모델을 개발중이다.

#### 4. 요약

본 연구에서는 최근 Esmaili[3,4]등에 의해 제안된 항복강도 예측 모델을 이용하여 Impeller 단조품의 시효처리를 예측하고자 시도하였다. 기존 문헌에서 사용한 방법과 달리 열역학적 계산을 통해 석출물 분율을 정량적으로 평가하고 이를 시효 거동 예측에 기초 데이터로 활용하였으나 정량적인 예측 결과를 얻을 수는 없었다. 하지만, 석출물의 종류에 따른 강화 역할을 분리와 비평형상 분율의 계산을 통해 시효거동을 보다 정량적으로 예측할 수 있는 모델을 개발할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업(RTI04-01-03) 지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- [1] C. Ravi and C. Wolverton, 2004, First-principles study of crystal structure and stability of Al-Mg-Si-(Cu) precipitates, *Acta Mater.*, Vol. 52, pp. 4213~4227
- [2] S. Esmaili, et al., 2003, A yield strength model for the Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111, *Acta Mater.*, Vol. 51, pp.2243~2257.
- [3] S. Esmaili, et al., 2003, Modeling of precipitation hardening for the naturally aged Al-Mg-Si-Cu alloy AA6111, *Acta Mater.*, Vol. 51, pp.3467~3481.
- [4] G. Liu, et al., 2003, Modeling the strengthening response to aging process of heat treatable aluminum alloys containing plate/disc- or rod/needle-shaped precipitates, *Mater. Sci. & Eng.*, Vol. A344, pp. 113~124.
- [5] D. H. Bratland, et al., 1997, Modelling of precipitation reactions in industrial processing, *Acta Mater.*, Vol. 45, pp.1~22.
- [6] R. C. Dorward and C. Bouvier, 1998, Rationalization of factors affecting strength, ductility and toughness of AA 6061-type Al-Mg-Si-(Cu) alloys, *Mater. Sci. & Eng.*, Vol. A254, pp.33~44.