

# Al - 5wt%Mg 합금의 고온변형특성과 동적재결정 거동에 관한 연구

황원주\*, 조종래\*\*, 배원병\*\*\*, 강석봉\*\*\*\*

## A Study on the Hot Deformation Behavior and Dynamic Recrystallization of Al-5wt%Mg Alloy

Won Joo Hwang\*, Jong Rae Cho\*\*, Won Byong Bae\*\*\* and Suk Bong Kang\*\*\*\*

### ABSTRACT

A numerical analysis was performed to predict flow curves and dynamic recrystallization behaviors of Al-5wt%Mg alloy on the basis of results of hot compression tests. The hot compression tests were carried out in the ranges of 350~500°C and  $5 \times 10^{-3} \sim 3 \times 10^0$ /sec to obtain the Zener-Hollomon parameter Z. The modelling equation for flow stress was a function of strain, strain rate, temperature. The influence of these variables was quantified using the Zener-Hollomon parameter. In the modelling equation, the effects of strain hardening and dynamic recrystallization were taken into consideration. Therefore, the modelling stress-strain curves of Al-5wt%Mg alloy were in good agreement with experimental results. Finally, the dynamic recrystallization kinetics were illustrated through the inspection of microstructure after deformation.

**Key Words** : Al-Mg alloy(알루미늄-마그네슘 합금), Hot deformation(열간성형), Recrystallization(재결정), Zener-Hollomon Parameter(제너-홀로만 파라미터), Grain size(결정립 크기)

### 1. 서 론

고온에서 금속재료를 가공하면 재료내부의 자유에너지가 높아져 불안정한 상태로 된다. 그러므로 자유에너지를 낮추어 보다 안정한 상태로 변화하기 위해 재료내부에 조직변화가 발생하며 변형이력에 따라 동적연화(dynamic softening)와 정적연화(static softening)과정을 거치게 된다. 여기서 동적연화는 동적회복(dynamic recovery) 또는 동적재결정(dynamic recrystallization)에 의해 진행되며 미세조직의 크기 및 분포에 의한 최종 기계적 성질에 큰 영향을 미치게 된다.<sup>(1)</sup> 회복(recovery)은 미세조직의

현저한 변화없이 물리적 성질이 회복되는 단계로 정의되며 재결정(recrystallization)은 가공에 의해 변형된 조직이 변형없는 새로운 결정립으로 대체되는 것을 말한다. 재결정은 미세조직을 관찰함으로써 쉽게 알 수 있으며, 강도나 경도가 감소하고 연성이 증가한다. 재결정이 일어나면 전위 밀도가 현저히 감소하여 가공 경화의 모든 효과가 소멸된다.

알루미늄합금의 경우 적층결합 에너지가 큰 재료로서 전위의 상승이나 교차슬립이 용이하기 때문에 동적회복만이 일어난다고 알려져 왔으나 최근의 연구에서는 첨가원소에 따라 동적재결정 거동을 나타내기도 하며 특히 마그네슘(Mg)과 아연(Zinc)이 이

\* 부산대학교 대학원

\*\* 한국해양대학교

\*\*\* 부산대학교

\*\*\*\* 한국기계연구원 재료기술연구부

Table 1 Chemical compositions of Al-5wt%Mg alloy.

Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Be	Al
Composition(wt%)	0.08	0.27	0.3	0.366	5.0	0.03	0.002	0.037	0.0007	bal.

러한 효과가 크다는 것이 보고되고 있다.<sup>(2)</sup> 본 연구에서는 강도와 연신율이 우수한 Al-5wt%Mg 합금의 고온변형거동과 미세조직의 변화를 관찰하고 동적재결정 거동을 보이는 응력과 변형율의 관계를 수식적으로 모델링하고자 하였다.

### 2. 실험방법

본 실험에 사용된 소재는 주조후 440℃에서 3시간, 525℃에서 5시간 균질화 처리하여 직경 8mm, 높이 12mm의 원통형 시편으로 가공하였다. 자세한 균질화처리 방법은 Fig.1과 같다. 시편의 화학성분은 Table 1에 나타내었다.

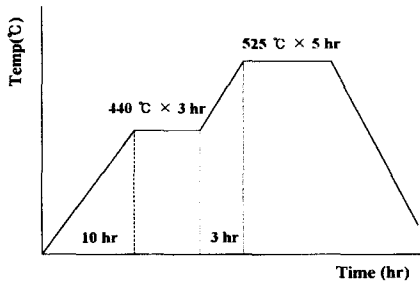


Fig. 1 Diagram of normalizing treatment

Fig.2에 실험장치의 개략도를 나타내었으며 시편은 진공속에서 유도가열방식에 의해 5℃/sec의 속도로 가열한 후 5분간 유지하여 350℃, 400℃, 450℃, 500℃의 온도에서 0.005~3/sec의 변형률속도로 높이감소율 50%까지 압축하였으며 압축완료 후 시편 내부의 동적재결정립을 관찰하기 위해 질소가스를 사용하여 급냉하였다.

고온가공은 열적활성화 과정에 의해 제어되며 이때 실험적 데이터인 변형률속도( $\dot{\epsilon}$ ), 유동응력( $\sigma$ ), 고온변형에 필요한 활성화에너지( $Q$ ) 그리고 온도( $T$ )의 관계는 아래와 같은 Arrhenius식의 형태로 방정식이 표현될 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$\dot{\epsilon} = A \{ \sinh(a\sigma) \}^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

이 구성식은 재료나 실험조건에 따라 달리 적용되

며 동적재결정이 일어나는 재료의 경우 임의의 변형량에서 변형속도와 온도에 따른 유동응력과의 상관관계를 밝히기 위해서는 Zener와 Hollomon에 의해 처음 제시되었던 Z 파라미터로 설명할 수 있는데 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma = f(\dot{\epsilon} \exp(Q/RT)) = f(Z) \quad (2)$$

이와 같은 관계는 실험결과를 간결하게 나타낼 수 있고 실험적인 Z 범위안에서 특정 변형속도 및 온도조건의 응력값을 얻을 수 있으며 활성화에너지를 연화과정의 속도 조절기구와 연관지을 수 있는 잇점이 있다.<sup>(4)</sup>

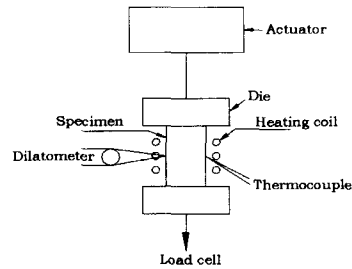


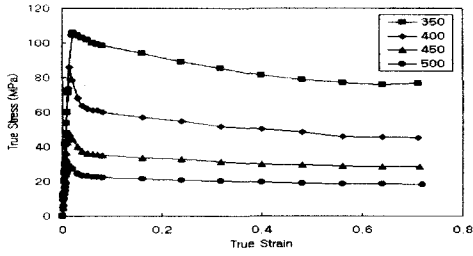
Fig. 2 Testing equipment

### 3. 실험결과 및 고찰

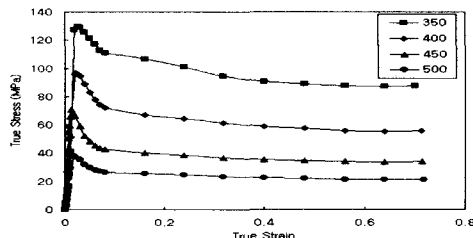
#### 3.1 고온유동곡선

Fig. 3(a), (b), (c), (d)는 변형률속도를 각각 0.005, 0.01, 0.1, 1로 고정된 후 유동응력곡선에 미치는 온도의 영향을 관찰한 응력-변형률 곡선이다. 유동응력은 변형률속도가 0.005/s에서 1/s로 빨라짐에 따라 증가하며 최대응력에 도달하는 변형량 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 변형온도가 낮아짐에 따라서 높아지는 것을 확인할 수 있었다.

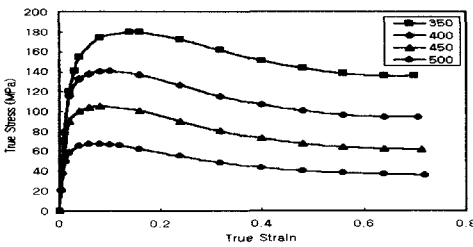
이와 같은 곡선의 형태가 나타나는 것은 고온변형시 연화가 변형으로 인한 축적에너지와 열적 활성화에 의해 조절되기 때문이다. 같은 온도에서 변형속도가 빠르면 축적에너지는 증가하나 계속되는 변형으로 연화가 억제되어 높은 유동응력을 나타내게 된다.



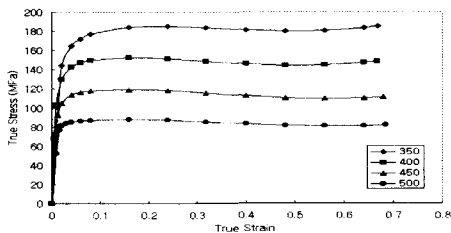
(a)  $\dot{\epsilon} = 0.005 /s$



(b)  $\dot{\epsilon} = 0.01 /s$



(c)  $\dot{\epsilon} = 0.1 /s$



(d)  $\dot{\epsilon} = 1 /s$

Fig. 3 Experimental stress-strain curves for various strain rates

변형률속도 0.005~0.1의 경우 변형초기에는 유동응력이 증가하여 최대응력(peak stress)에 이르고 계속 변형하면 유동응력은 감소하여 일정 변형량 이후에 더 이상의 응력저하 없이 정상상태 응력(steady state stress)에 이르는 동적재결정 거동을 보이며 변형률속도가 1보다 큰 경우에는 응력이 증가하다가 일정값을 유지하는 동적회복현상을 나타내고 있다. 그러나 이러한 유동응력곡선의 형태만으로 동적회복과 동적재결정 두가지 거동을 명확히 구분하기는 곤란하며 실제 미세조직사진 관찰결과 유동곡선은 정상상태를 나타내지만 재결정립의 형성이 없이 동적회복만으로 응력이 감소한 경우를 확인할 수 있었으며, 철강의 경우 유동곡선상에서 응력의 감소가 나타나지 않음에도 불구하고 조직사진 촬영결과 동적재결정립의 형성이 관찰되었음이 보고된 예도 있다.<sup>(5)</sup>

### 3.2 구성식 정량화

위의 그림에서 제시한 실험데이터를 식(1)의 하이퍼볼릭사인법칙에 적용시켰고 그 결과를 Fig.4, 5에 나타내었다.

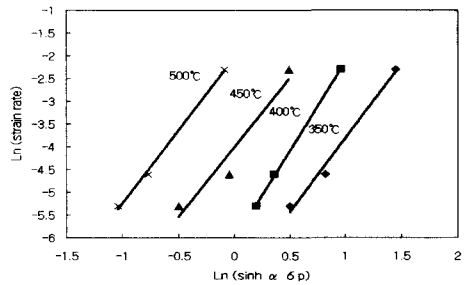


Fig. 4 Peak stress vs strain rate for various temperature by hyperbolic sine law

Al-5wt%Mg합금의 열간 가공시 필요한 활성화 에너지는 일정 변형률속도하에서  $\ln(\sinh \alpha \sigma_p)$ 와  $1/T$ 의 관계에서 구할 수 있다.

$$A(\sinh \alpha \sigma_p)^n = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (3)$$

위 식의 양변에 로그를 취하면,

$$\ln(\sinh \alpha \sigma_p) = 1/n \cdot \ln \dot{\epsilon} + Q/RT - \ln A \quad (4)$$

가 된다. 이 식을 정리하면,

$$\ln(\sinh \alpha \sigma_p) = Q/nRT + C \quad (5)$$

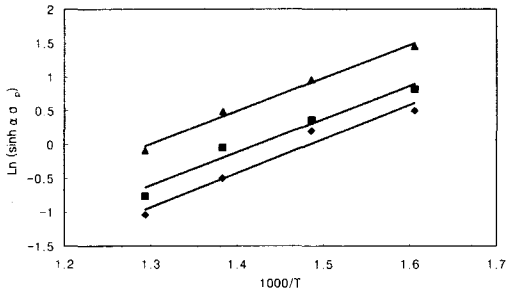


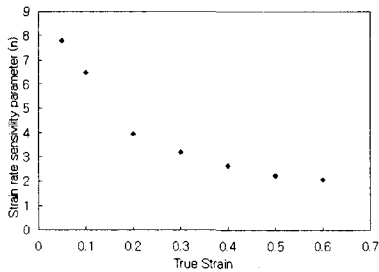
Fig. 5 The determination of apparent activation energy(Q)

여기서,  $C = 1/n \cdot \text{Ln } \dot{\epsilon} - \text{Ln } A$

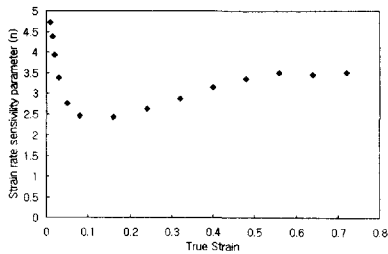
따라서, Fig. 4에서 구한  $n$ 값과 기체상수  $R$ 값을 Fig. 5의 기울기에 곱하여  $Q$ 값을 구할 수 있다.

이에 따라 Al-5wt%Mg합금에서의 유동응력과 변형온도 및 변형률속도와와의 관계는 다음과 같이 정량화할 수 있었다.

$$\dot{\epsilon} = 5.9 \times 10^7 [\sinh(0.012\sigma_p)]^{3.15} \exp(-Q/RT) \quad (6)$$



(a) Dynamic recovery



(b) Dynamic recrystallization

Fig. 6 Strain dependence of strain rate sensitivity(n)

최대응력 상태에서의 활성화에너지값(Q)은 130.2kJ/mol로서 Al내의 Mg 원자의 확산에 대한 활성화에너지 132kJ/mol과 거의 비슷한 값을 보이며 Al-7wt%Mg합금의 139.5kJ/mol보다 상대적으로 작다는 점은 재결정 지연원소로 알려진 Mg함량이 적을수록 활성화 에너지도 낮아진다는 기존의 연구결과<sup>(3),(4)</sup>와도 일치한다. Fig.6은 변형률의 증가에 따른 변형률속도 민감성지수(strain rate sensitivity)의 역수값 n의 변화를 나타내는 것으로 동적회복역(a)과 동적재결정역(b)에서 각각 다른 변화양상을 보이는 것을 볼 수 있다. 동적회복역에서는 가공경화의 진행에 따라 n값이 감소하다가 경화와 연화가 균형을 이루어 정상상태에 들어간다고 볼 수 있으며 동적재결정역(b)에서는 변형초기엔 전위의 증가로 인한 가공경화에 의해 점점 감소하다가 전위의 포화와 소멸에 의한 동적회복현상이 나타나면서 경화속도가 둔화되고 이어서 동적재결정이 시작되면서 가장 낮은 값에 도달하였다가 증가하여 가공경화와 동적재결정이 균형을 이루는 정상상태에 이르는 과정을 보이고 있다고 생각할 수 있다. 이러한 변화양상은 식(1)의 파라미터 Q, n, A에서 모두 똑같이 나타나고 있다. 이 같은 변화는 Rao<sup>(6)</sup>도 탄소강에 대하여 보고한 바 있는데 그의 파라미터값들은 모두 변형률 증가에 따라 감소하였다. 또한 Fernandez<sup>(7)</sup>는 동적재결정의 진행에 따른 파라미터 A값의 변화를 변형률에 따라 제시하였으며 그 결과는 본 연구와 유사하게 나타났다.

### 3.3 유동응력곡선 모델링

재결정 거동을 예측하고 제어하기 위해서는 고온변형시 변형에 따른 변형저항을 정확히 평가하는 것이 필수적이며 특히 고온연화기구가 동적재결정인 재료에서 중요한데, 이는 동적재결정 분율에 따라서 같은 변형조건하에서도 유동응력의 차이가 많이 발생하기 때문이다. 그러나 현재까지 변형저항 예측에 관한 연구는<sup>(7),(8),(9)</sup> 가공경화영역과 동적회복영역에 국한되거나 변형조건에 따른 최대응력과 정상응력을 결정하는 것이 대부분이었고 특히 동적재결정이 빠르게 진행되어 급격한 응력감소를 보이는 소재에 대해서는 변형량에 따른 응력의 변화를 구현하는 것이 미흡하였다.

본 연구에서는 고온변형시 동적재결정에 의한 연화현상이 고려된 유동응력곡선을 구현하기 위해 아래와 같이 모델링하였다.<sup>(10)</sup>

$$\sigma = \sigma_e - \Delta\sigma \quad (7)$$

$$\sigma_e = \sigma_p [1 - \exp(-C\varepsilon)]^m \quad (8)$$

$$\Delta\sigma = (\sigma_p - \sigma_s) \{1 - \exp[-k(\frac{\varepsilon - \alpha\varepsilon_p}{\varepsilon_p})^{m'}]\} \quad (9)$$

위의 식에서 (8)식은 가공경화와 동적회복, (9)식은 동적재결정이 각각 고려된 식이다.

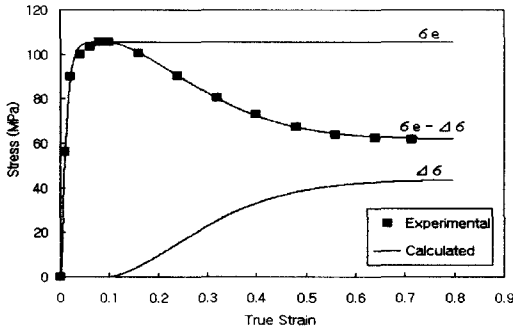


Fig. 7 Stress-strain curves predicted in accordance with the model and experimental data at 450°C and 0.1/s

파라미터  $C$ ,  $m$ ,  $k$ ,  $m'$ 는 비선형최소자승법으로 그 값을 결정할 수 있으며 식에 사용된 모든 파라미터들과 최대응력에 도달하였을 때의 변형률  $\varepsilon_p$  역시 무차원 파라미터  $Z/A$ 의 함수로 표현하였다. 최대변형률  $\varepsilon_p$ 에 도달하기 전에는 동적연화에 의한 응력감소가 나타나지 않도록 식(9)에 아래와 같은 조건을 주었다.

$$\alpha = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \quad \varepsilon \leq \varepsilon_p \quad (10)$$

$$\alpha = 0.95 \quad \varepsilon > \varepsilon_p \quad (11)$$

식에 사용된 각 파라미터들의 함수화중 최대응력의 예를 Fig.8에 나타내었다.

각 파라미터는 다음과 같이 표현된다.

$$\sigma_p = 17.75 \ln(Z/A) + 80.189 \quad (12)$$

$$C = 245.15 \ln(Z/A)^{-0.0491} \quad (13)$$

$$m = 4.263(Z/A)^{0.2882} \quad (14)$$

$$\sigma_s = 42.906(Z/A)^{0.2898} \quad (15)$$

$$k = 0.3081(Z/A)^{-0.1873} \quad (16)$$

$$m' = 0.6789(Z/A)^{0.0972} \quad (17)$$

$$\varepsilon_p = 0.0178(Z/A)^{0.1094} \quad (18)$$

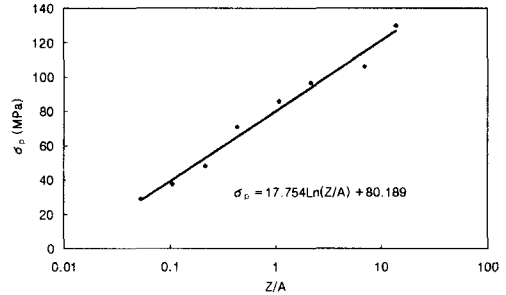


Fig. 8 Peak stress vs dimensionless parameter  $Z/A$

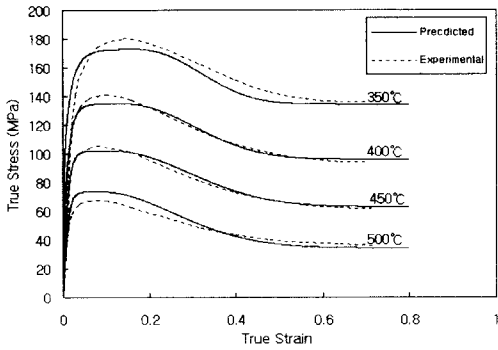
Fig. 9에 위의 함수식을 사용하여 예측한 유동곡선과 실제 실험에서 구한 데이터를 비교하였으며 상당히 근사한 결과를 얻을 수 있었다. 이러한 모델링 결과는 특히 유한요소법으로 소재의 변형양상을 시뮬레이션할 때 변형률의 변화에 따른 응력값이 실제의 값과 잘 일치하도록 입력할 수 있음으로써 시뮬레이션의 정확성을 높이는 데 기여할 수 있을 것이다.

### 3.4 미세조직 관찰

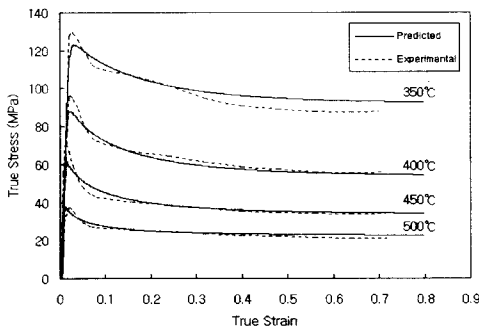
각 실험조건에 대하여 높이감소비 30%, 50%로 압축실험한 시편의 중심부를 광학현미경으로 관찰하였다. 동적재결정된 결정립의 크기 ( $d_{dtx}$ )는  $Z/A$ 가 감소할수록, 즉 변형률속도가 낮고 온도가 높을수록 증가하는 경향이 있었다. 수식으로는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_{dtx}(\mu m) = 14.834 - 9.69 \ln(Z/A) \quad (19)$$

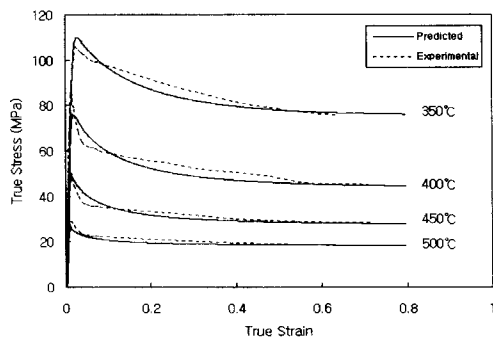
Fig.10은 같은 온도에서 변형률속도의 증가에 따른 미세조직의 변화를 높이감소율 50%에서 관찰한 결과이다. 상대적으로 변형률속도가 빠를 때 ( $\dot{\varepsilon}=1$ )는 재결정조직이 없이 길게 연신된 조직만을 볼 수 있으나 변형률속도가 감소할수록 재결정



(a)  $\dot{\epsilon} = 0.1$



(b)  $\dot{\epsilon} = 0.01$



(c)  $\dot{\epsilon} = 0.005$

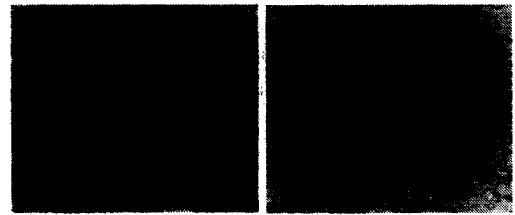
Fig. 9 Exeprimental stress-strain curves for viarious strain rates

이 많이 발생하며 또한 재결정된 결정립의 크기가 증가함을 알 수 있다. 그리고 압축완료후( $\epsilon = 0.7$  유동응력 곡선상으로는 정상상태에 도달하였지만 재결정조직과 길게 연신된 원래의 조직이 혼재해 있음으로 보아 재결정은 계속 진행중이며 재결정이 시작되는 변형률도 철강의 경우와는 달리 최대응력 값을 지나서 어느 정도 변형에너지가 축적된 후 시작됨을 관찰할 수 있었다.



(a) 500°C, 1/s

(b) 500°C, 0.1/s



(C) 500°C, 0.01/s

(d) 500°C, 0.005/s

Fig. 10 Microstructures of 50% compressed specimens

#### 4. 결 론

Al-5wt%Mg합금을 350°C ~ 500°C, 0.005s<sup>-1</sup> ~ 3s<sup>-1</sup>의 변형조건에서 열간압축실험을 하여 얻은 응력-변형률 데이터를 사용하여 유동응력조건을 모델링 하고, 실험에 사용한 소재의 미세조직을 광학현미경으로 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) Al-5wt%Mg합금의 고온변형 공정변수들을 다음과 같이 정량화할 수 있었다.

$$\dot{\epsilon} = 5.9 \times 10^7 [\sinh(0.012\sigma_p)]^{3.15} \exp(-Q/RT)$$

(2) 정량화에 사용된 파라미터 Q, n, Ln(A)값들은 변형률이 증가하면서 감소하다가 최대변형률( $\epsilon_p$ )을 지나서 가장 낮은 값을 보이고 다시 증가

하여 정상상태에 도달하는 것을 알 수 있었으며 이는 고온변형중 시편내부에서 발생하는 물리적 현상과도 일치한다.

- (3) 유동곡선 모델링에 사용된 파라미터들을 무차원 파라미터  $Z/A$ 의 함수로 표현하여 응력과 변형률 관계를 예측할 수 있었으며 실험에서 얻은 유동곡선을 근사하게 표현할 수 있었다.
- (4) 온도가 높고, 변형률속도가 작을수록 동적재결정의 형성이 현저히 나타났으며, 동적재결정된 결정립의 크기는 증가하였다.

### 참고문헌

1. 유연철, 유승선, "알루미늄 합금의 열간 가공성에 관한 연구," 대한금속학회지, 제24권, 제8호, pp. 847~855, 1986.
2. K.J.Gardner and R.Grimes, "Recrystallization during hot deformation of aluminum alloys," Metal Science, pp. 216~222, 1979.
3. 고병철, 김종현, 유연철, "AA5083합금의 고온 변형시 유동응력 및 연신율에 미치는 온도와 변형속도의 영향," 한국소성가공학회지, 제7권, 제2호, pp. 168~176, 1998.
4. 김형욱, 강석봉, "Al-7wt%Mg합금의 고온변형특성," 대한금속학회지, 제35권, 제6호, pp. 698~696, 1998.
5. M.L.Bhatia, "Recrystallization-Some applied aspects," Scripta materialia, Vol. 34, pp. 59~76, 1997.
6. K.P.Rao, E.B.Hawbolt, "Development of Constitutive Relationships Using Compression Testing of a Medium Carbon Steel," ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.114, pp. 116~123, 1992.
7. F.R.Castro-Fernandez, C.M.Sellars, J.A.Whiteman, "Changes of flow stress and microstructure during hot deformation of Al-1Mg-1Mn," Materials Science and Technology, Vol. 6, pp. 453~460, 1990.
8. 조상현, 김유승, 유연철, 임성한, 오수익, "Al 6061합금의 고온변형시 변형저항 예측," 대한금속학회지, 제36권, 제4호, pp. 502~508, 1998.
9. L.Anand, "Constitutive Equations for the Rate - Dependent Deformation of Metals at Elevated Temperatures," ASME Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.104, pp. 12~17, 1982.
10. C.A.Hernandez, S.F.Medina, J.Ruiz, "Modeling Austenite Flow Curves In Low Alloy and Microalloyed Steels," Acta Mater, Vol. 44, No. 1, pp. 155~163, 1996.