

## 주조 후 냉간 압연된 Al-6.5Mg-1.5Zn계 합금의 어닐링 특성

오성준 · 이성희<sup>†</sup>

국립목포대학교 신소재공학과

### Annealing Characteristics of an Al-6.5Mg-1.5Zn Alloy Cold-Rolled After Casting

Sung-Jun Oh and Seong-Hee Lee<sup>†</sup>

Department of Advanced Materials Science and Engineering, Mokpo National University,  
Muan-gun, Jeonnam 58554, Republic of Korea

(Received August 24, 2018 : Revised September 11, 2018 : Accepted September 11, 2018)

**Abstract** The annealing characteristics of a cold rolled Al-6.5Mg-1.5Zn alloy newly designed as an automobile material is investigated in detail. The aluminum alloy in the ingot state is cut to a thickness of 4 mm, a total width of 30 mm and a length of 100 mm and then reduced to a thickness of 1 mm (reduction of 75 %) by multi-pass rolling at room temperature. Annealing after rolling is performed at temperatures ranging from 200 to 400 °C for 1 hour. The tensile strength of the annealed material tends to decrease with the annealing temperature and shows a maximum tensile strength of 482MPa in the material annealed at 200 °C. The tensile elongation of the annealed material increases with the annealing temperature, while the tensile strength does not, and reaches a maximum value of 26 % at the 350 °C annealed material. For the microstructure, recovery and recrystallization actively occur as the annealing temperature increases. The recrystallization begins to occur at 300 °C and is completed at 350 °C, which results in the formation of a fine grained structure. After the rolling, the rolling texture of {112}<111>(Cu-Orientation) develops, but after the annealing a specific texture does not develop.

**Key words** cold rolling, aluminum alloys, mechanical properties, microstructure, annealing.

### 1. 서 론

최근 국내외적으로 에너지 및 환경 문제가 크게 부각되면서 관련 규제가 강화됨에 따라 자동차를 비롯한 수송기기의 재활용 및 연비개선이 크게 요구되고 있으며 그에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>1-15)</sup> 자동차의 공해 방지 및 에너지 절약의 방안으로는 엔진의 효율성 향상, 설계에 따른 주행 중 공기 저항 감소, 차체 경량화 방법 등이 있다. 여기서 가장 효율적인 방법은 자동차의 기본적인 가속력과 제동력을 향상시키는 자동차 경량화이다. 자동차의 경량화의 합리적인 방안 중에 현재 차체 및 자동차 부품에 사용되는 철강 재료를 비강도가 좋으며 철강 대비 비중이 약 1/3에 불과한 알루미늄합금<sup>1-10)</sup>

또는 약 1/4에 불과한 마그네슘합금<sup>11-14)</sup>으로 대체하는 방법이 있다. 그러나 마그네슘 합금은 알루미늄 합금에 비해 단가가 높고, 가공성<sup>12)</sup>과 내부식성<sup>13,14)</sup> 및 상온에서의 소성가공성 등의 기술적 측면에서 적용의 어려움이 있어 유럽을 비롯한 선진국에서는 주로 알루미늄 합금을 철강 대체 재료로 많이 활용하고 있다. 알루미늄 합금은 철강재료에 비해 강도가 약하고 성형성이 다소 부족한 단점이 있지만, 경량화 외에도 높은 열전도, 주조성과 가공성, 재활용이 가능한 점 등의 장점이 있다. 그러나 자동차 재료로 더욱 광범위하게 사용되기 위해서는 재료 특성이 한층 더 개선되어야 할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 강도와 연성이 우수한 자동차용 알루미늄 합금개발을 목표로 Al-6.5Mg-1.5Zn계 합금을 새

<sup>†</sup>Corresponding author

E-Mail : shlee@mokpo.ac.kr (S. H. Lee, Mokpo Nat'l Univ.)

© Materials Research Society of Korea, All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

롭게 합금설계 하였다. 합금설계 시에는 강도와 연성의 균형적인 향상을 위하여 수송기기용 구조재로 많이 사용되는 Al5083에 비해 Mg과 Zn 함량을 높이고 Mn의 양을 낮추는데 주안점을 두고 설계하였다. 또한, 새롭게 합금설계한 Al합금을 주조한 상태에서 열간압연 공정을 거치지 않고 바로 냉간압연한 후 어닐링을 실시하여 어닐링 된 재료의 미세조직 및 기계적 특성을 분석하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 주괴의 냉간압연 및 어닐링

합금설계한 Al-Mg-Zn계 합금의 상세한 화학조성을 Table 1에 나타내었다. Al-Mg-Zn계 합금의 주조를 통하여 잉곳을 만든 후 두께 4 mm, 폭 30 mm, 길이 100 mm의 판상으로 절삭 가공한 후, 450 °C에서 24시간 동안 균질화 처리 후 공냉한 시편을 출발재료로 사용하였다. 압연은 롤 직경 210 mm인 2단 압연기를 사용하여 롤 주속 5rpm, 무윤활, 상온의 조건에서 시편 두께를 0.2 mm씩 줄여나가며 최종두께가 1 mm가 될 때까지 다패스(multi-pass)로 진행 하였다. 따라서 냉간압연에 따른 압하율은 총 75 %였으며, 이는 상당변형율이 1.6에 해당되는 큰 가공률이다. 압연 후 어닐링은 전기로 내에서 200~400 °C의 각 온도에서 1시간 가열 후 공냉하였다.

### 2.2 특성평가

미세조직은 압연된 시편을 판재 중앙부에서 TD면에 평행하게 압연방향으로 자른 후, HClO<sub>4</sub>: CH<sub>3</sub>CH<sub>2</sub>OH = 3 : 17 용액 속에서 액체온도 -5 °C, 전압 20 V의 조건에서 전해 에칭 후 광학현미경(OM) 관찰을 실시하였으며, FE-SEM/EBSD(electron back scattering diffraction) 측정은 Philips XL30s FEG-SEM 내에서 가속전압 20 kV의 조건 하에서 측정하였으며 EBSD 해석에는 Tex SEM Laboratory(TSL)사의 EBSD 해석 프로그램 TSL OIM Date Collection ver.3.5를 이용하였다.

기계적 특성은 상온에서의 경도시험 및 인장시험으로 평가하였다. 경도시험은 Micro-Vickers 경도계를 이용하여 0.05 kfg의 하중으로 압입시간 10초의 조건에서 TD면에 평행하게 압연방향으로 자른 후 시편의 두께방향으로 일정하게 0.05 mm씩 이동하며 경도를 측정하여 평균값을 구하였다. 인장시험은 인장방향이 압연방향과 평행하도록 폭 6 mm, 길이 32 mm로 방전가공기로 가공하여 만능시험기(Shimadzu Ag-IS)를 사용하여 상온에서

10<sup>-3</sup>s<sup>-1</sup>의 일정한 변형률속도로 파단이 일어날 때까지 진행하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 미세조직

Fig. 1은 제조한 Al주괴의 압연 전과 후의 횡단면(TD면)에서의 광학현미경 조직 사진을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 압연 전(a) 주조상태의 합금조직은 전형적인 주조 조직을 나타내었으며 75 % 압하율로 압연 후 (b)에는 결정립이 압연 방향으로 연신된 가공조직을 나타내었다.

Fig. 2는 압연 후 300~400 °C 어닐링에 따른 조직의 변화를 SEM/EBSD 측정 결과로 나타낸 것이다. 300 °C 어닐링재의 경우 주로 가공조직이 관찰되었지만 부분적으로 미세한 결정립들이 관찰되었고 {112}<111> 방위 성

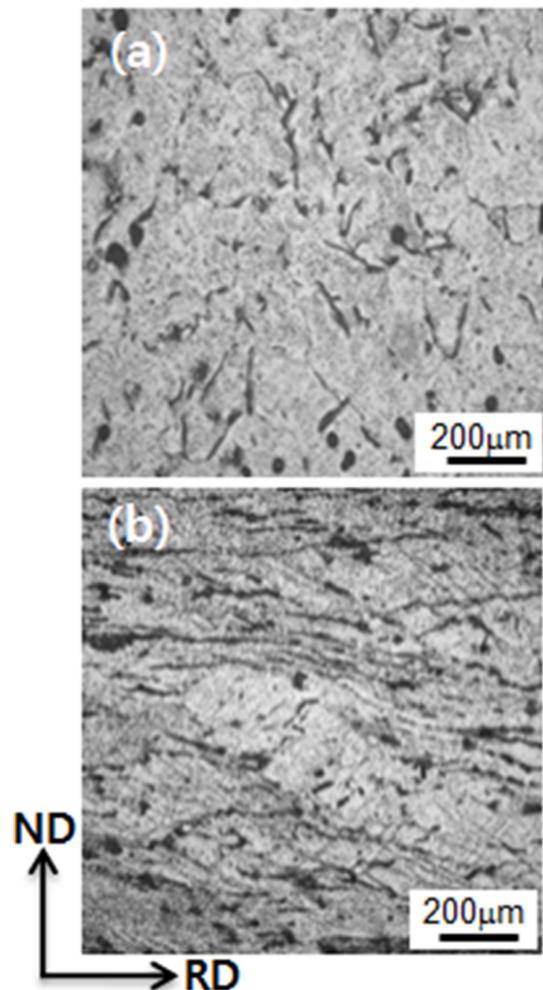


Fig. 1. Optical microstructures of the specimens before (a) and after (b) cold rolling of the Al-6.5Mg-1.5Zn alloy.

Table 1. Chemical composition of aluminum alloys studied (wt.%).

Al	Mg	Zn	Fe	Mn	Si	Ti	Cu	Sr	B
Bal.	6.5	1.5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

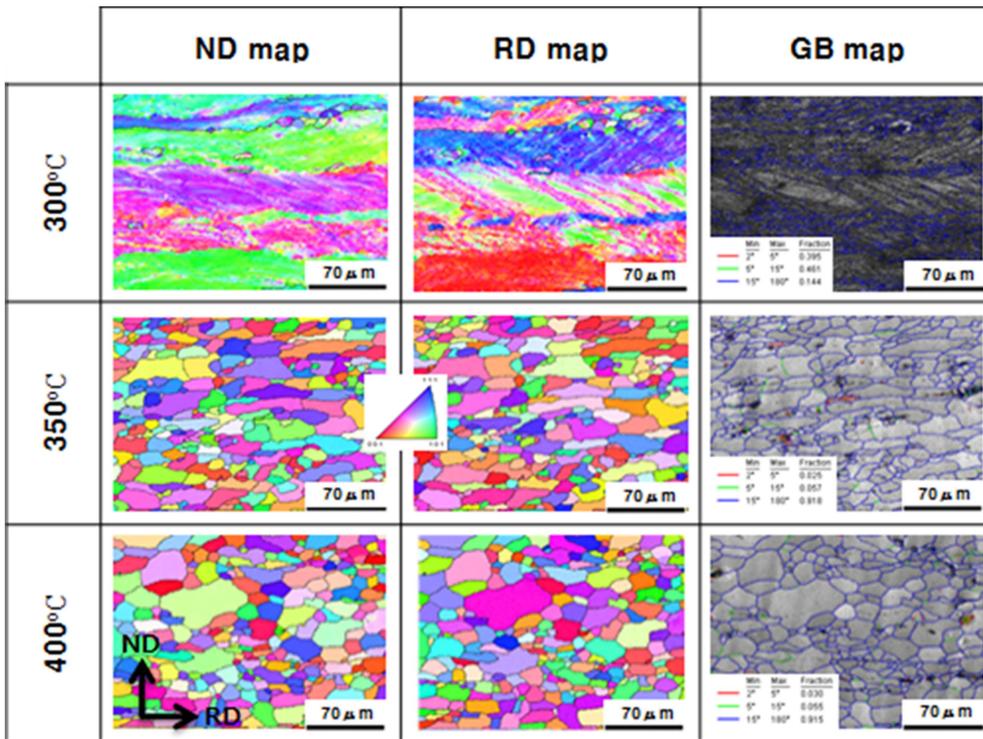


Fig. 2. ND, RD, and GB maps obtained by EBSD measurement of the Al-6.5Mg-1.5Zn alloys annealed at various temperatures.

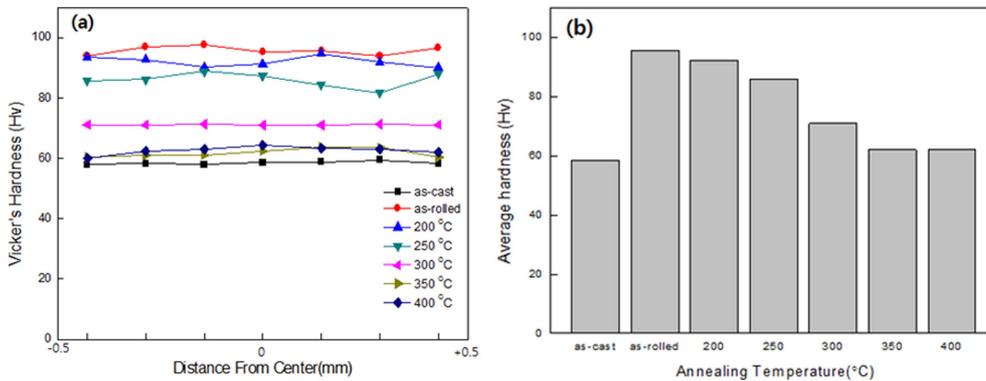


Fig. 3. Vicker's hardness distribution in width direction (a) and the average hardness (b) of the Al-6.5Mg-1.5Zn alloy annealed after cold rolling.

분(Cu-Orientation)의 압연집합조직이 발달하였다. 또한 GB(grain boundary) map에서 나타내었듯이 결정립계 방향각이 15° 이하인 저경각 입계의 분율이 85.6% 이상으로 15° 이상인 고경각 입계보다 월등히 높은 비율을 점유하고 있었다. 350 °C 어닐링재의 경우 300 °C 어닐링재의 경우와는 달리 그림과 같이 완전 재결정 조직을 나타내었으며, 고경각 입계의 분율이 92% 대부분을 차지하고 있었다. 이것은 고온에서의 가열로 인해 내부에 형성되어 있던 전위셀 및 아결정립들이 대부분 소멸되고 새로운 재결정이 활발히 발생한 것에 기인한다.<sup>16)</sup>

400 °C 어닐링재의 경우 비교적 균일한 결정립크기를 가진 350 °C 어닐링재와 달리 부분적으로 결정립 성장이 일어나 다소 불균질한 결정립 크기분포를 나타내었다. 또한 고경각 입계의 분율도 350 °C의 경우와 동일하게 약 92%를 나타내었으나 재결정에 따른 집합조직의 발달은 일어나지 않았다.

### 3.2 기계적 성질

Fig. 3은 합금의 압연 전후 및 어닐링 후의 두께방향으로의 경도분포(a) 및 평균 경도(b)를 나타내었다. 그림

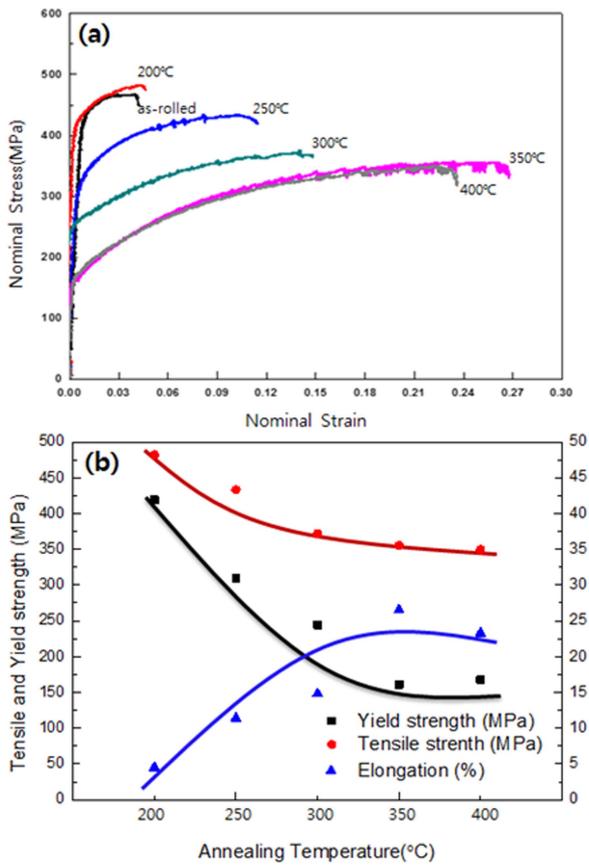


Fig. 4. Changes in nominal stress-strain curves (a) and mechanical properties (b) of the Al-6.5Mg-1.5Zn alloy with annealing temperature.

에서와 같이 모든 어닐링 조건에서 Al합금의 두께 방향으로 비교적 균일한 경도분포를 나타내었다. 압연 후 평균 경도는 95.6Hv로 압연 전의 평균 경도 58.4Hv에 비해 약 64%의 큰 폭의 증가를 보였다. 또한 온도별 어닐링재의 평균경도는 각각 92.3Hv, 86Hv, 71Hv, 62Hv, 62Hv로 어닐링 온도가 증가함에 따라 단계적으로 감소하였다.

Fig. 4는 합금의 압연 후의 인장시험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 4(a)와 같이, 온도가 증가함에 따라 강도는 감소하고 연신율이 증가하는 전형적인 stress-strain 곡선을 나타내었다. As-rolled의 경우, 재료의 연성이 낮아 충분히 연신되지 못하고 파단되어 연신율이 4.1%에 불과하였으나, 인장강도는 467MPa로 비교적 높은 값을 나타내었다. 200 °C 어닐링재의 경우도 as-rolled재와 거의 유사하게 고강도, 저연성 s-s곡선을 나타내었다. 그러나 250 °C 이상 온도에서의 어닐링재는 어닐링 온도 증가와 함께 균일 연신율(uniform elongation)이 크게 증가하였으며, 특히 350 °C 어닐링재의 경우는 26.5%의 큰 균일 연신율을 나타내었다. 또한, Fig. 4(b)에서와 같이 인

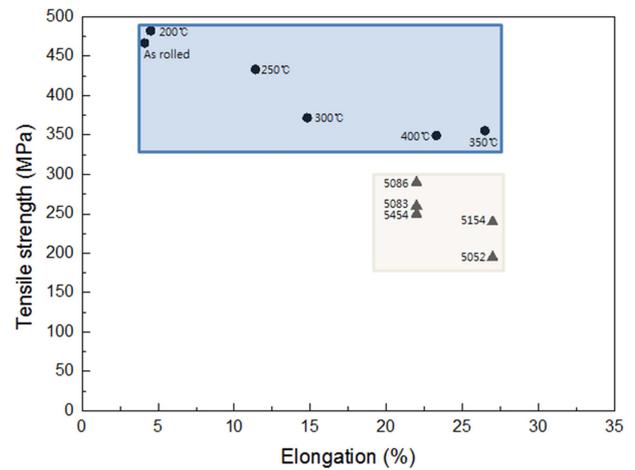


Fig. 5. Comparison of mechanical properties between the Al-6.5Mg-1.5Zn alloy and various Al-Mg 5xxx system alloys.

장 강도 및 항복 강도는 어닐링 온도 증가와 함께 감소하였는데 그 감소폭은 항복강도에서 더 컸다. 이것은 항복강도와 인장강도의 차이 값을 나타내는 가공경화 정도가 어닐링 온도 증가에 따라 증가함을 의미한다.

Fig. 5에 본 연구에서 개발한 Al-6.5Mg-1.5Zn계 합금의 어닐링 온도별 기계적 특성을 기존의 대표적인 Al-Mg계 5xxx계 합금(어닐링재<sup>17</sup>)과 함께 나타내었다. 그림에서와 같이 본 연구에서 개발한 Al합금이 기존의 합금들에 비해 기계적 특성이 우수함을 알 수 있다. 특히, 350 °C 어닐링재 경우 최대인장강도는 355MPa, 연신율은 26.5%로 가장 좋은 기계적 특성을 나타내었다. 이 강도 값은 수송기용 구조부재로 많이 사용되는 Al5083 (290MPa)에 비해 약 22% 높고 Al5052(195MPa)에 비해서는 약 82%나 높은 값이다. 본 합금에서 이와 같이 좋은 기계적 특성을 나타낸 것은 Mg과 Zn 등 원소의 첨가에 의한 고용체강화 효과에 기인한 것이다. 여기서 주목할 점은 본 연구 결과는 일반적으로 행해지는 열간압연 공정을 거치지 않고 주조재를 바로 냉간압연 후 어닐링 처리한 결과라는 점이다. 그러므로 일반적으로 행해지는 열간압연공정을 추가한다면 더 좋은 기계적 특성이 기대된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 새롭게 합금설계하여 주조상태에서 압연을 실시한 후 어닐링한 Al-6.5Mg-1.5Zn계 합금의 미세조직 및 기계적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 미세조직 관찰 결과 압연 전 주조상태의 합금조직은 전형적인 주조 조직을 나타내었으며 75% 압하율로

압연 후에는 결정립이 압연 방향으로 연신된 가공조직을 나타내었다.

2) EBSD측정 결과 300 °C까지의 어닐링재의 경우 여전히 가공조직 위주의 미세조직을 나타내었으며 {112} <111> 방위 성분(Cu-Orientation)의 압연집합조직이 발달하였으나, 재결정이 발생한 350 °C, 400 °C 어닐링재에서는 집합조직이 발달하지 않았다.

3) 어닐링재는 어닐링 온도가 증가함에 따라 강도는 감소하고 연신율이 증가하는 전형적인 stress-strain 곡선을 나타내었으며, 350 °C 어닐링재에서 최대인장강도 355MPa, 연신율 26.5 %의 강도 및 연성의 가장 우수한 조합을 갖는 기계적 특성을 나타내었다.

4) 이상을 종합해 볼 때, 기존의 Al-Mg계 5xxx합금에 비해 본 연구에서 개발한 합금이 기계적 특성 면에서 우수하다고 결론지을 수 있다.

## Acknowledgement

This research was supported by Strategy Core Materials Program of the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea.

## References

1. S. GUO, Y. XU, Y. Han, J. LIU, G. XUE and H. NAGAUMI, Trans. Nonferrous Met. Soc. China, **24**, 2393 (2014).
2. X. Fan, Z. He, W. Zhou and S. Yuan, J. Mater. Process. Technol., **228**, 179 (2016).
3. L. Ding, Y. Weng, S. Wu, R. E. Sanders, Z. Jia and Q. Liu, Mater. Sci. Eng., A, **651**, 991 (2016).
4. M. J. Ahn, H. S. You and S. H. Lee, Korean J. Mater. Res., **26**, 388 (2016).
5. J. H. Yang, and S. H. Lee, Korean J. Mater. Res., **26**, 628 (2016).
6. H. W. Kim, S. B. Kang, H. Kang and K. W. Nam, Korean J. Met. Mater., **37**, 1041 (1999).
7. H. S. Ko, S. B. Kang, H. W. Kim and S. H. Hong, Korean J. Met. Mater., **37**, 650 (1999).
8. H. S. Ko, S. B. Kang and H. W. Kim, Korean J. Met. Mater., **37**, 891 (1999).
9. K. D. Woo, H. S. Na, H. J. Mun and I. O. Hwang, Korean J. Met. Mater., **38**, 766 (2000).
10. K. D. Woo, I. O. Hwang, J. S. Lee, Korean J. Met. Mater., **37**, 1468 (1999).
11. C. W. Park and H. Y. Kim, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, **36**, 1675 (2012).
12. N. J. Park, J. H. Hwang and J. S. Roh, Korean J. Met. Mater., **47**, 1 (2009).
13. C. D. Yim, Y. M. Kim, S. H. Park and B. S. You, Korean J. Met. Mater., **50**, 619 (2012).
14. D. H. Kim, J. M. Choi, D. H. Jo and I. M. Park, Korean J. Met. Mater., **52**, 195 (2014).
15. E. Y. Kim, J. H. Cho, H. W. Kim and S. H. Choi, Korean J. Met. Mater., **51**, 41 (2013).
16. F. J. Humphreys and M. Hatherly, RECRYSTALLIZATION and Related Annealing Phenomena, 2<sup>nd</sup> ed., p.169-172, Elsevier Ltd, UK (2004).
17. Japan Inst. of Light Metals, Microstructure and Properties of Aluminum Alloys, p.451-469, Japan (1991).