

# 알루미늄 카바이드 입자로 미세화된 Mg-Al 주조합금의 진동감쇠능

전 중 환<sup>†</sup>

한국생산기술연구원 신소재본부 경량소재팀

## Damping Capacity of Mg-Al Casting Alloy Refined by Aluminum Carbide Particles

Joong-Hwan Jun<sup>†</sup>

Light Material Team, Advanced Materials Division, Korea Institute of Industrial Technology  
7-47 Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea

**Abstract** Influences of aluminum carbide ( $Al_4C_3$ ) addition on microstructure and damping capacity of Mg-3%Al casting alloy have been investigated based on experimental results of optical micrography, scanning electron microscopy with energy-dispersive spectrometry analysis and damping capacity measurement at RT. The addition of  $Al_4C_3$  particles results in an efficient grain refinement. The damping capacity shows an increasing tendency with an increase in  $Al_4C_3$  content. The damping value associated with  $Al_4C_3$  particles is linearly dependent on the volume fraction of  $Al_4C_3$  particles to the 2/3 power,  $f_{2/3}$ , which corresponds to the total surface area of the particles.

(Received September 11, 2007; accepted October 31, 2007)

**Key words:** aluminum carbide, grain refinement, Mg-Al alloy, damping capacity

### 1. 서 론

결정립 크기는 마그네슘(Mg) 합금의 기계적 특성을 결정하는 매우 중요한 인자들 중 하나이며[1-3], 주조용 Mg 합금의 경우 결정립 미세화는 강화상으로 작용하는 2차상을 균일하게 분포시키고 용질원자들을 미세하게 분산시켜 가공성과 표면특성, 주조성 등을 개선하는 효과도 나타낸다[4]. 잘 알려진 바와 같이 Mg 합금에서 가장 효과적인 결정립 미세화 원소는 지르코늄(Zr)이다[5]. 용탕에 분산된 미세한 지르코늄 입자는 응고 중 Mg 초정의 핵생성처로 작용, 포정반응(Peritectic Reaction)에 의해 결정립을 미세화시킨다. 따라서, Mg-Al계 합금을 제외한 대부분의 상용 주조용 합금에는 Zr이 포함되어 있다. Mg-Al계 합금에서 Zr이 사용되지 않는 이유는 응고 중 Al과 Zr이 금속간 화합물을 만들어 빠져나오므로 결정립 미세화 효과를 기대할 수 없기 때문이다[5]. Mg-Al 주조용 합금의 결정립 미세화를 위해 지금까지 다양한 방법들이 개발되고 검토되었는데[6], 여기

에는 과열법(superheating), 급냉법(rapid cooling),  $FeCl_3$  첨가, 탄소점중법(carbon inoculation), 용탕교반법(melt agitation), 그리고 다양한 합금원소 첨가법 등이 있으며, 이 중에서도 탄소점중법이 Mg-Al 합금에서 상대적으로 효과가 큰 것으로 보고되고 있다[4]. 탄소점중법의 결정립 미세화 기구는 탄소가 용탕 중의 알루미늄(Al)과 결합하여 미세한 알루미늄 카바이드( $Al_4C_3$ )를 생성하고 이들 입자는 Mg 초정의 강력한 핵생성처(기저면에서 Mg와의 격자상수 차이가 4.05%에 불과)로 작용해서 결정립을 미세화시키는 것이다[4]. 최근 Lu 등[4]이 보고한 바에 따르면  $Al_4C_3$  입자를 직접 Mg-Al 용탕에 첨가해도 결정립 미세화 효과가 나타나는 것으로 확인되었다. 본 연구는 Mg-Al 주조용 합금의 결정립을 미세화시키기 위해 첨가된  $Al_4C_3$  입자들이 진동감쇠능에 미치는 영향을 파악하기 위해 수행되었다. 복합재료에 첨가하는 강화상의 경우, 입자와 matrix 계면에서의 미소 소성 변형에 의해 진동감쇠능을 크게 향상시키는 것으로 알려져 있다[7]. 이에 비추어볼 때 Mg 합금 중 진동

<sup>†</sup>E-mail : jhjun@kitech.re.kr

감쇠능이 상대적으로 높지 않은 Mg-Al 합금의 경우 도[8], 첨가된  $Al_4C_3$  입자들이 결정립 미세화와 동시에 진동감쇠능에도 영향을 미칠 것으로 예상된다.

## 2. 실험방법

본 연구에서는 Mg-3%Al 합금을 기본으로 하여 여기에  $Al_4C_3$  입자를 무게비로 0~1%까지 첨가하였다. 99.9%의 Mg과 99.9%의 Al을 소정의 조성으로 평량한 후 전기저항로를 이용하여 대기 중( $SF_6 + CO_2$ ) 보호성 분위기하에서 용해한 다음 평균 직경  $5\mu m$  크기의  $Al_4C_3$  입자를 Al 포일에 싸서  $780^\circ C$ 로 유지된 용탕에 주입하였다. 이후 용탕을 5분간 교반시킨 후 30분을 유지한 다음 금형에 주조하였다. 주조된 잉곳트를 적당한 크기의 각재로 절단하였으며, 이로부터 미세조직 분석과 진동감쇠능 평가 등에 필요한 각종 시편들을 기계적 가공을 통하여 제조하였다.

제조된 Mg-Al- $Al_4C_3$  합금의 미세조직은 광학현미경과 주사전자현미경, EDS를 사용하여 분석하였으며, 미세조직 관찰을 위해서 기계적으로 연마한 시편의 표면을(5 mL 아세트산 + 6 g 피크릭산 + 10 mL 물 + 100 mL 에탄올)의 혼합액으로 에칭하였다. 진동감쇠능은 외팔보형 진동감쇠능 측정장치에서 판상 시편(길이 120 mm, 폭 12 mm, 두께 1.3 mm)의 한쪽을 고정시킨 후 시간에 따른 자유단의 진폭감소를 스트레인 게이지(strain gauge)를 통해 스트레인의 변화로 환산하는 방법으로 측정하였다[9]. 본 연구에서 진동감쇠능을 나타내는 수치로는 대수감쇠율(logarithmic decrement,  $\delta$ )을 사용하였으며, 대수감쇠율의 정의는 이웃하는 두 변형 진폭(strain amplitude)의 비에 자연대수를 취한 것으로 다음 식과 같다[10].

$$\delta = \ln\left(\frac{A_n}{A_{n+1}}\right) \quad (1)$$

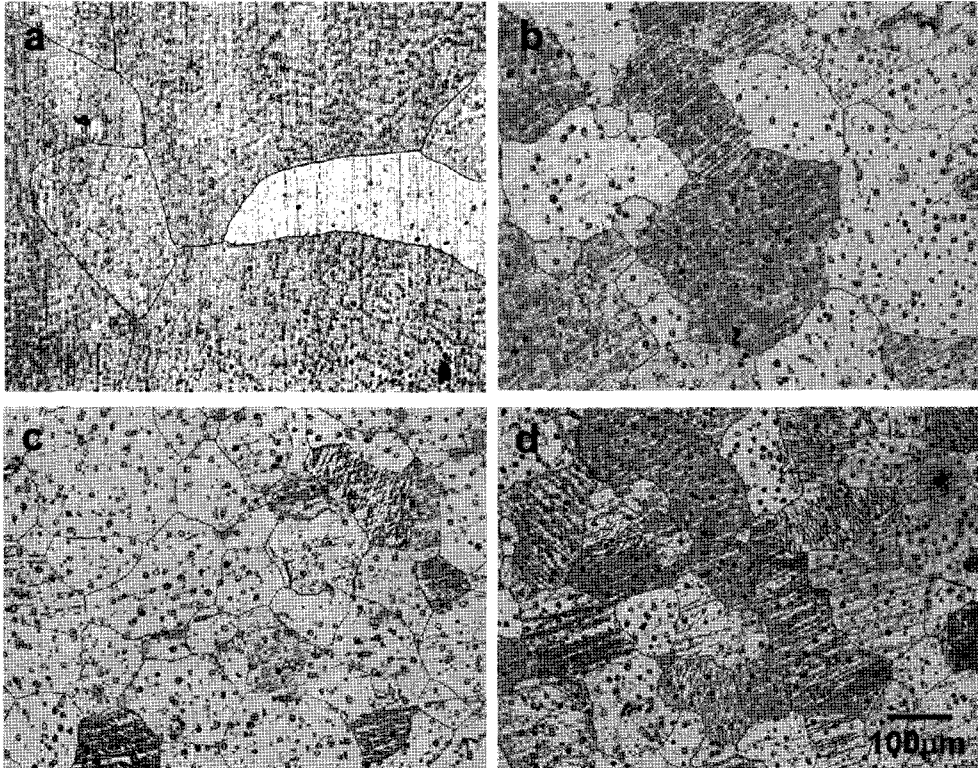


Fig. 1. Optical microstructures of Mg-Al alloys containing  $Al_4C_3$  of (a) 0%, (b) 0.2%, (c) 0.5% and (d) 1.0%, respectively.

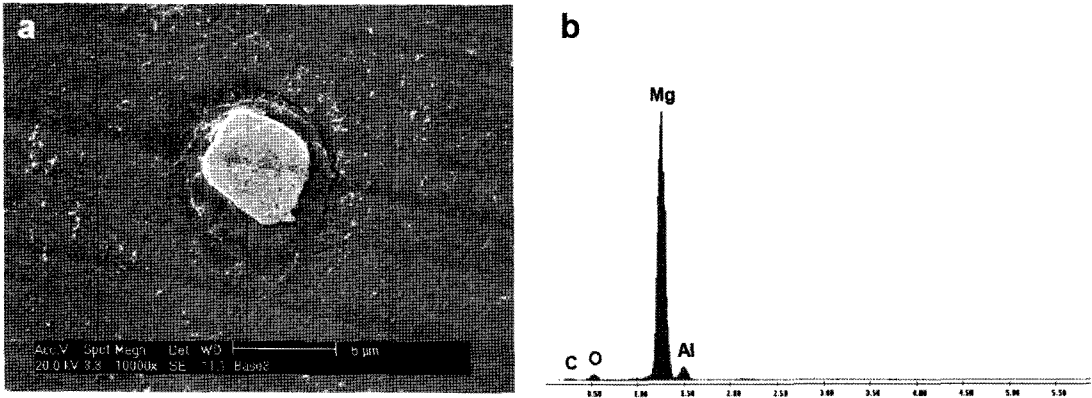


Fig. 2. (a) SEM image and (b) EDS spectrum for  $Al_4C_3$  particle.

여기서,  $A_n$ 과  $A_{n+1}$ 은 각각  $n$ 번째와  $(n+1)$ 번째의 변형진폭을 의미한다.

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은  $Al_4C_3$ 로 미세화된 Mg-Al 합금의 광학현미경 조직사진을 나타낸 것이다.  $Al_4C_3$  함량이 증가할수록 결정립의 크기가 감소하고 있으며, 따라서, 이전 연구자들이 보고한 바와 같이  $Al_4C_3$ 가 Mg-Al 주조용 합금의 결정립 미세화에 효과가 있음을 확인시켜주고 있다. 조직사진으로부터, Mg-Al 합금의 결정립 내부에 많은 수의 기공이 관찰되고 있으며,  $Al_4C_3$  함량이 증가할수록 기공의 밀도가 지속적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. Lu 등[4]은 이전 연구에서 이 기공들이  $Al_4C_3$  입자와 밀접한 관련이 있다고 보고한 바 있다. 즉,  $Al_4C_3$  입자는 다음의 반응식과 같이 물과의 반응성이 매우 높기 때문에 조직관찰을 위한 표면연마 중 물과의 반응으로 인해 제거되고 표면에  $Al_4C_3$  입자가 차지하고 있던 기공이 많이 관찰된다는 것이다.

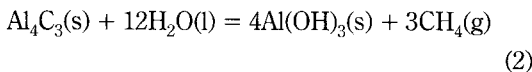


Fig. 2는 결정립 내부에서 관찰되는  $Al_4C_3$  입자에 대한 주사전자현미경 조직사진과 EDS 분석결과를 나타낸 것이다. EDS 분석결과를 보면 입자에서 C, O, Al, Mg 피크가 나타나고 있는데, 높은 Mg 농도는 기지로부터 검출된 것으로 파악되며 따라서 입자

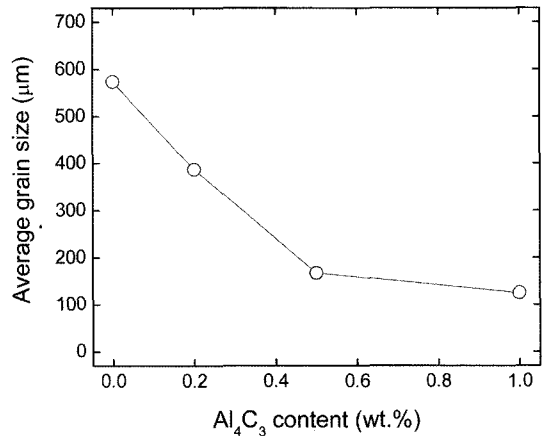


Fig. 3. Change in average size of primary  $\alpha$  grains in Mg-Al- $Al_4C_3$  alloys.

들은 Al, C, O로 구성된 것으로 판단된다. 고온의 Mg 용탕에서는 산소 포텐셜이 낮기 때문에[11], 열역학적으로  $Al_2OC$ 와 같은 Al-C-O 화합물은 생성되기 어려운 것으로 보고되어 있다. 따라서, EDS에서 관찰되는 O는 표면연마 중 물에 의한 반응물에 기인한 것으로 생각된다[4]. Fig. 3은  $Al_4C_3$  함량에 따른 Mg-Al 합금의 결정립 크기 변화를 나타낸 것이다.  $Al_4C_3$ 를 1% 첨가함에 따라 Mg-Al 합금의 결정립 크기가 약 570  $\mu m$ 에서 약 120  $\mu m$ 까지 1/5 수준으로 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는  $Al_4C_3$ 로 미세화된 Mg-Al 합금의 대수감쇠율을 변형진폭의 함수로 나타낸 것이다.  $3 \times 10^{-4}$  이하의 변형진폭에서는 대수감쇠율의 변화가 거의 없지만 그 이상에서는 변형진폭이 증가함에 따라 대

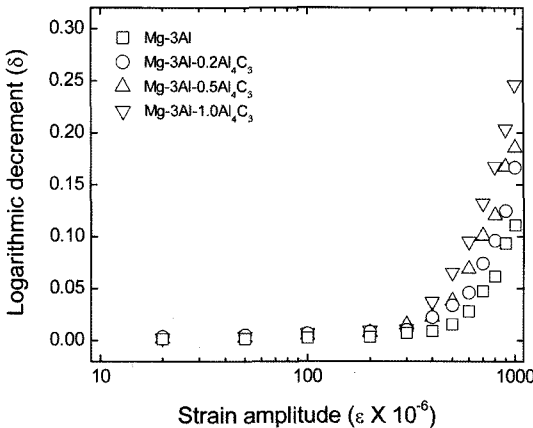


Fig. 4. Logarithmic decrement versus strain amplitude for Mg-Al- $Al_4C_3$  alloys.

수감쇠율이 급격히 증가하는 경향을 나타내어 이 합금의 진동감쇠능이 진폭변형에 의존하는 것을 확인할 수 있다. 이미 잘 알려진 바와 같이 Mg 또는 Mg 합금의 높은 진동감쇠능은 전위형(dislocation) 감쇠기구로 나타나는 것이다[10, 12]. 이러한 전위형 감쇠기구에서는 전위선이 전위를 고정하고 있는 고착점으로부터 외부응력에 의해 이탈하는 순간 에너지 손실에 의해 진동감쇠능이 나타나기 때문에 특정 변형진폭 이상에서만 진동감쇠능이 나타나며 변형진폭이 높을수록 진동감쇠능이 크다. Fig. 4로부터 변형진폭이 낮은 구간에서는( $3 \times 10^{-4}$  이하)  $Al_4C_3$  첨가에 따른 대수감쇠율의 변화가 거의 없지만, 그 이상의 변형진폭에서는  $Al_4C_3$  함량에 비례하여 대수감쇠율이 증가하며, 변형진폭이 높을수록 대수감쇠율의 증가폭도 더욱 커지는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 이미 예상한 바와 같이  $Al_4C_3$  입자들이 Mg-Al 합금의 진동감쇠능을 크게 향상시키는 역할을 하였음을 입증하는 것이다. Fig. 5는  $Al_4C_3$  첨가에 의한 진동감쇠능의 기여정도를 파악하기 위해 각각  $6, 8, 10 \times 10^{-4}$ 의 변형진폭에서 측정된 대수감쇠율을  $Al_4C_3$  함량의 함수로 도시한 것이다. 그림에서 각각의 변형진폭에서 점선으로 나타낸 부분, 즉  $Al_4C_3$ 가 첨가되지 않은 상태의 대수감쇠율이 전위형 기구에 의존하는 대수감쇠율( $\Delta\delta_0$ )이며, 따라서 곡선으로 표현된 실제 측정된 대수감쇠율과 점선과의 차이가  $Al_4C_3$ 에 의한 대수감쇠율 증가량( $\Delta\delta_p$ )이라고 할 수 있다. 그 결과  $Al_4C_3$ 로 미세화된 Mg-Al 합금의 전

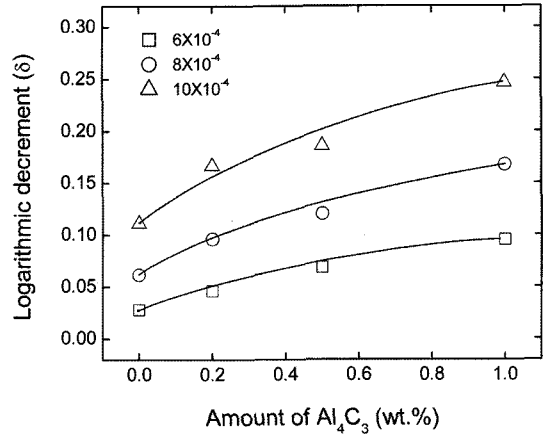


Fig. 5. Logarithmic decrement versus  $Al_4C_3$  content for Mg-Al- $Al_4C_3$  alloys, measured at  $6, 8$  and  $10 \times 10^{-4}$  strain amplitude, respectively.

체 대수감쇠율( $\delta_{total}$ )은 다음과 같이 표현이 가능하다.

$$\delta_{total} = \delta_0 + \Delta\delta_d + \Delta\delta_p \quad (3)$$

여기서  $\delta_0$ 는 재료 자체의 대수감쇠율을 의미한다. Fig. 5로부터, Mg-Al 합금의 대수감쇠율이  $Al_4C_3$  함량이 증가할수록 높아지기는 하지만  $Al_4C_3$  함량에 선형적으로 비례하지는 않는다는 것을 쉽게 관찰할 수 있다. 이미 언급한 바와 같이  $Al_4C_3$  입자와 관련된 진동감쇠능이 matrix와 입자 사이의 계면에서 나타나는 미끌어짐(sliding) 또는 미소 소성변형(plastic flow)에 의한 것임을 감안하면 전체 대수감쇠율에 기여하는 요인 중  $\Delta\delta_p$ 는  $Al_4C_3$ 의 함량보다는 표면적에 선형적으로 비례하는 것이 타당하고 판단된다. 잘 알려진 바와 같이 표면적은 부피분율의 2/3승에 해당하므로, 모든  $Al_4C_3$  입자의 직경을  $5 \mu m$ 로 가정된 상태에서 0, 0.2, 0.5, 1%의 무게비를 각각 부피분율로 환산하고(0, 0.15, 0.38, 0.75%), 이에 대해 2/3승을 한 표면적의 함수로  $\Delta\delta_p$ 를 Fig. 6에 도시하였다. 이 그림에서  $Al_4C_3$ 에 의한 대수감쇠율 증가량( $\Delta\delta_p$ )이 첨가된  $Al_4C_3$ 의 표면적과 선형비례 관계를 나타내고 있는 것으로 보아  $\Delta\delta_p$ 가  $Al_4C_3$ 와 직접적으로 관련있음을 확인할 수 있다.

Fig. 7은  $Al_4C_3$ 로 미세화된 Mg-Al 합금에서 Mg 결정립과  $Al_4C_3$  입자의 계면특성을 파악하기 위해 인장시험을 통해 시편을 파단시키고 그 파단면을 SEM으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 크랙의 전

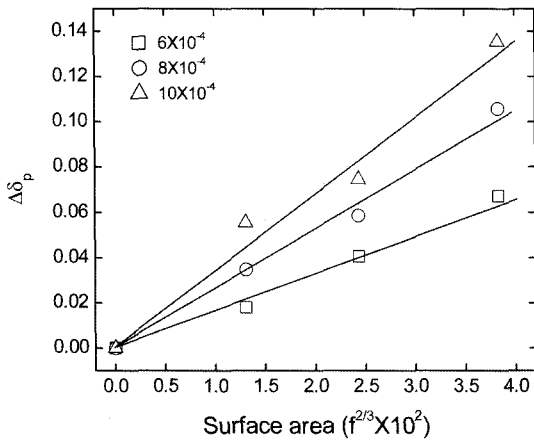


Fig. 6. Relationship between  $\Delta\delta_p$  and  $Al_4C_3$  particle volume fraction to the 2/3 power,  $f^{2/3}$  in Mg-Al- $Al_4C_3$  alloys.

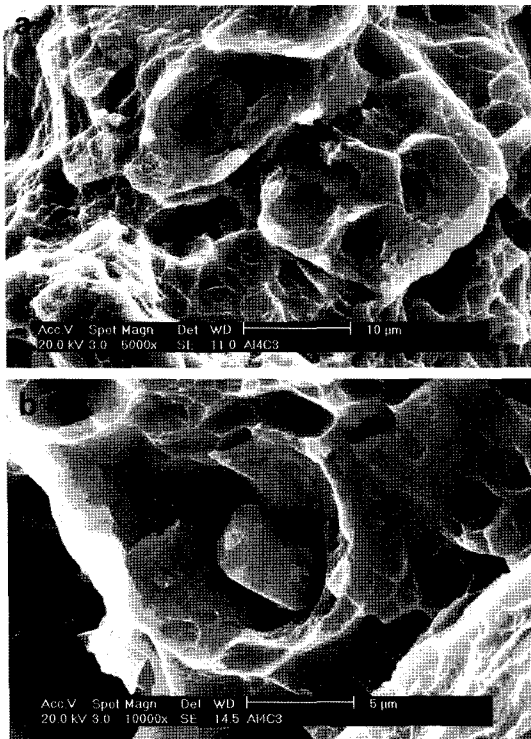


Fig. 7. SEM images of Mg-Al alloy containing 1.0% of  $Al_4C_3$ , showing the (a) tensile fracture surface morphology and (b) particle/matrix interfacial decohesion observed on the fracture surface.

파가 주로  $Al_4C_3$  입자와 matrix의 계면에서 이루어지고 있고, 입자의 표면이 덤플 벽에서 떨어져 있으며, 일부 입자들이 부분적으로만 matrix와 연결되어

있는 것을 알 수 있다. 또한 다수의 덤플 내부에서  $Al_4C_3$  입자들이 관찰되지 않고 있는데 이것은 파단 시 입자들이 matrix로부터 떨어져 나갔음을 의미하며, 따라서 첨가된  $Al_4C_3$  입자와 matrix와의 결합력이 매우 약함을 입증하는 것이다[13, 14].  $Al_4C_3$ 로 미세화된 Mg-Al 합금에서 첨가된  $Al_4C_3$  입자와 matrix와의 결합력이 약하다는 것은 외부 응력에 의해 계면이 더욱 잘 이동함을 의미하므로  $Al_4C_3$  첨가에 의한 Mg-Al 합금의 진동감쇠능 향상을 잘 설명할 수 있다.

#### 4. 결 론

알루미늄 카바이드( $Al_4C_3$ ) 입자의 첨가로 결정립이 미세화된 Mg-3%Al 주조용 합금의 진동감쇠능을 조사하고 이를 미세조직의 변화와 연관지어 분석하였다.  $Al_4C_3$  함량이 증가할수록 결정립 크기가 점차 감소하였으며 진동감쇠능은 증가하는 경향을 나타내었다.  $Al_4C_3$  첨가로 인해 증가된 진동감쇠능( $\Delta\delta_p$ )은  $Al_4C_3$  부피분율의 2/3승에 해당하는 입자 표면적에 선형적으로 비례하여, 진동감쇠능의 증가가 matrix와  $Al_4C_3$  입자 계면의 미끌어짐 또는 미소 소성변형과 밀접한 관련이 있음을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. M. Mabuchi, Y. Chino, H. Iwasaki, T. Aizawa, and K. Higashi : Mater. Trans., **42** (2001) 1182.
2. M. Mabuchi, Y. Chino, and K. Higashi : Mater. Trans., **44** (2003) 490.
3. K. Matsubara, Y. Miyahara, Z. Horita, and T. G. Langdon : Acta Mater., **51** (2003) 3073.
4. L. Lu, A. K. Dahle, and D. H. StJohn : Scripta Mater., **53** (2005) 517.
5. M. M. Avedesian and H. Baker : Magnesium and Magnesium Alloys, ASM Specialty Handbook, ASM International, Materials Park, OH, p. 15.
6. Y. C. Lee, A. K. Dahle, and D. H. StJohn : Metall. Mater. Trans. A, **31A** (2000) 2895.
7. Z. Xiuqing, L. Lihua, M. Naiheng, and W. Haowei : Composites : Part A, **37A** (2006) 2011.
8. Elektron ZA Datasheet No. 462, Magnesium Elektron Ltd.
9. J. H. Jun and C. S. Choi : Mater. Sci. Eng. A, **A252** (1998) 133.

10. I. G. Ritchie and Z. -L. Pan : Metall. Trans. A, **22A** (1991) 607.
11. D. R. Gaskell : Introduction to the Thermodynamics of Materials, Taylor & Francis, Washington DC, p. 370.
12. K. Sugimoto : Mem. Inst. Sci. Indu. Res., Osaka Univ., **35** (1978) 31.
13. L. M. Tham, M. Gupta, and L. Cheng : Acta Mater., **49** (2001) 3243.
14. S. J. Hong, H. M. Kim, D. Huh, C. Suryanarayana, and B. S. Chun : Mater. Sci. Eng. A, **A347** (2003) 198.