

Al6061/흑연 복합재료의 미세조직과 기계적 특성

김홍률 · 김태경 · 이봉상 · 천병선
충남대학교 공과대학 금속공학과

Microstructures and Mechanical Properties of Al 6061/Gr Composites

Hong-Moule Kim, Tae-Kyung Kim, Bong-Sang Lee and Byong-Sun Chun
Department of Metallurgical Engineering, Chungnam National University
Taejon, 305-764, South Korea
(Received January 18, 2000)

Abstract A process has been successfully used to manufacture 6061/Graphite composite material and the Graphite particles are distributed uniformly within the Al alloy matrix. The 6061 powders was mixed with natural Graphite particles in a ball milling blender and cold compacted specimens were extruded into rods 15 mm in diameter at 450°C. The results showed that tensile properties of the composites with Graphite content have been reduced. The emergence of fine microstructures appeared to be related to the Graphite volume. Heat-treated composites were found to possess good mechanical properties as compared with those of non heated composites. A model was used that the tensile strength of the composites would be estimated from the theoretical calculation and experimental data.

1. 서 론

알루미늄으로의 대체 개발이 급속하게 이루어지는 가운데 특히 수송기의 엔진이나 에이전 콤푸레셔 및 브레이크 등의 경량화는 기구수명과 연비의 향상 등에 따른 경제성과 직결되어 있어서, 고강도, 내열, 내마모 특성을 나타내는 특수목적의 기능재료의 개발에 관심이 집중되고 있다. 그 중에서 알루미늄합금에 제2의 강화재를 첨가하므로 기계적 특성을 향상시키는 실험은 많은 연구자들에게 큰 관심을 보였다. 그 중에서도 강도에는 크게 기여하지 않지만 마모특성을 향상시키는 제2상으로 흑연이 중요한 역할을 한다고 보고되고 있다.¹⁻⁵⁾ 오늘날 복합재료가 큰 매력 을 지니고 있음에도 적은 양만 생산되는 것은 재료의 생산비가 크기 때문인데 강화재로서 흑연의 사용은 매우 저가인 재료라는 잇점이 있다. 알루미늄합금의 내마모 특성을 향상시키기 위한 Al-흑연입자 분산 복합재료가 흥미있는 마모특성을 보여주는 것으

로 알려져 있다. 알루미늄합금은 상대재와 마찰마모 시에 마찰면에 응착현상이 심하게 일어나므로 고체 윤활계의 일종인 흑연을 분산시킴으로써, 흑연의 윤활작용으로 심한마모나 응착현상을 방지할 수 있어 내마모특성을 향상시킬 수 있다.⁶⁻⁷⁾ 그러나 알루미늄 합금중에 흑연의 최대고용도는 0.03%이며 서로 비중 차이가 커서 기지재료에 흑연을 분산시키기가 용이 하지 않다. 이러한 제조상의 어려움으로 흑연함량과 입자크기를 원하는대로 조절할 수 없으므로 P.K. Rohatgi^{1,3)} 등에 의한 기존의 연구는 경제적인 주조공정을 이용하여 Al합금 용탕에 흑연을 분산시켜 용탕과 흑연의 젖음성(Wettability)을 향상시키는 관점에서 발전되어 왔으며, 교반기를 사용하여 용탕에 흑연을 도입하거나 연속주조법을 사용하기도 하지만 Al합금 기지에 흑연을 균일하고 미세하게 분포시키는 문제는 해결하지 못하였다.^{1-2,8)} Al-흑연 복합재료는 베어링, 피스톤 그리고 실린더 라이너 등에 사용될 수 있는 것으로 많은 연구자들에 의해 다음과 같은 일반

적인 결른을 얻었다.¹⁸⁾ 단결정 흑연의 basal plane을 따른 탄성계수는 910 GPa이고 basal plane에 수직 방향의 탄성계수는 35 GPa인 반면 Al의 탄성계수는 약 70 GPa정도이다. 응력-변형곡선이나 초음파법에 의해 측정된 복합재료의 탄성계수는 기지상보다 낮으며 흑연의 인장값은 Al의 인장값에 비해 훨씬 낮다. 또한 흑연과 기지와의 결합력은 흑연과 기지에 특별한 처리를 요구할 만큼 좋지 않다. 이러한 사실에 근거하여 이 논문은 분말야금법을 이용하여 Al기 지 중에 흑연을 미세하고 균일하게 분포된 복합재료를 얻기 위하여 분말과 압출공정을 시도하였으며 흑연의 함량에 따른 미세조직의 변화와 기계적 특성에 미치는 영향을 연구하고 이론적으로 계산된 값과 비교하였다.

2. 실험방법

고주파 유도용해로를 이용하여 상용 6061 알루미늄 합금을 용해한 후 가스 급냉분말제조장치를 이용하여 대기중에서 분말을 제조하였다. 용해로의 용탕은 탄디쉬를 통해 오리피스로 주입됨으로 불활성 질소가스에 의하여 분무되도록 하였으며 이때 가스압은 14기압이었고 오리피스 내경은 3 mm로 하였다. 이때 만들어진 분말의 입도는 평균 90 μm 정도가 되도록 하였으며 분말의 회수율은 90% 이상이었다. 사용된 흑연은 75~106 μm 의 입도를 갖는 것으로 밀도가 2.0 g/cm^3 이었다. 입도가 177~90 μm 인 Al6061 분말에 흑연분말을 3~19 vol.%까지 첨가하였다. 분말을 분말 대 강불을 10대1로 90분 동안 RPM 120의 속도로 회전시켜 혼합하였으며 이때 분위기는 대기중에서 하였다. 흑연과 혼합된 분말을 6061 알루미늄 캔에 넣은 후 용량 350 ton 프레스를 이용하여

이른 밀도의 80%가 되도록 냉간압분을 하였다. 탈가스처리한 압분체를 예열로에서 450°C의 온도로 1시간 유지한 후 압분체를 350 ton 압출기를 이용하여 15:1의 압출비로 압출을 하여 직경 15 mm의 봉재로 만들었다. 열간압출된 각 압출재의 조직을 균질화하고 압출시 생성된 석출물을 분해하여 알루미늄 기지 내에 과포화 고용시키기 위하여 530°C에서 30분 동안 대기중에서 용체화처리한 후 170°C에서 8시간 동안 시효처리를 하였다. 흑연의 함량에 따라 경도값의 변화를 조사하고 각 압출재의 열처리에 따른 경도값 차이를 알아보기 위하여 Micro-vickers경도기를 이용하여 측정하였다. 이때의 경도는 5회 측정하여 최대치와 최소치를 제외한 나머지 3회 측정치의 평균값으로 하였다. 압출재의 최대인장강도를 상온에서 측정하였으며 인장시험은 ASTM-subsize 시험편을 가공하였다. 인장시험을 하기 전에 길이 방향으로 시편을 1200 mesh의 샌드페이퍼로 연마하였다. 시험조건은 크로스헤드속도를 0.5 mm/sec, 최대하중을 2.0 톤으로 하였으며 Instron 인장시험기(SHIMADZU-DSS-10t-S)를 이용하였다.

3. 결과 및 관찰

3.1. 미세조직

급속응고한 6061 알루미늄 분말은 입자가 대부분 구형이며 흑연과 혼합 분말한 후에 냉간압분하여 그림 1에 나타내었다. Graphite는 분말에 의해 파쇄되어 우선하여 알루미늄 분말사이로 미끄러져 들어가서 흑연은 전체적으로 균일하게 분포하고 있음을 볼 수 있다. 그림 2는 광학현미경에 의한 미세조직의 관찰로서 흑연이 균일하게 분포되어 있음을 b-f에서 관찰할 수 있다. 흑연을 3, 7, 11, 15 그리고 19 vol.%를 첨가할수록 기지내에 분포되어 있는 흑연의 부피량은 증가하고 Graphite입자의 크기와 두께가 증가함을 알 수 있다. 흑연은 첨가시 평균크기 90 μm 정도의 흑연을 첨가하였으나 압출시에 소성변형되어, 3vol.%의 흑연을 첨가한 복합재료에서는 평균 2~4 μm 정도의 미세한 입자로 분산되었으며 또한 7 vol.%에서는 2~7 μm 정도로 분포되었다. 19 vol.%를 첨가하였을 때는 평균 10 μm 정도의 흑연입자크기와 함께 비교적 균일하게 분산된 조직을 보였다. 이것은 흑연의 양이 많아질수록 분말시 알루미늄에 두껍게 피복되

Table. 1 Types of composite system

System	Elastic modulus	Tensile strength	Example
I(a)	$E_p < E_m$	$\sigma_p < \sigma_m$ $\sigma_c < \sigma_m$	Al-graphite, Al-mica, al-shell char
I(b)	$E_p < E_m$	$\sigma_p > \sigma_m$ $\sigma_c > \sigma_m$	Al-grass
II	$E_p > E_m$	$\sigma_p > \sigma_m$ $\sigma_c > \sigma_m$	Al-Sic, Al-Al ₂ O ₃
III	$E_p \approx E_m$	$\sigma_p > \sigma_m$ $\sigma_c > \sigma_m$	Dual-phase steels, Dual-phase Cu-Al alloys

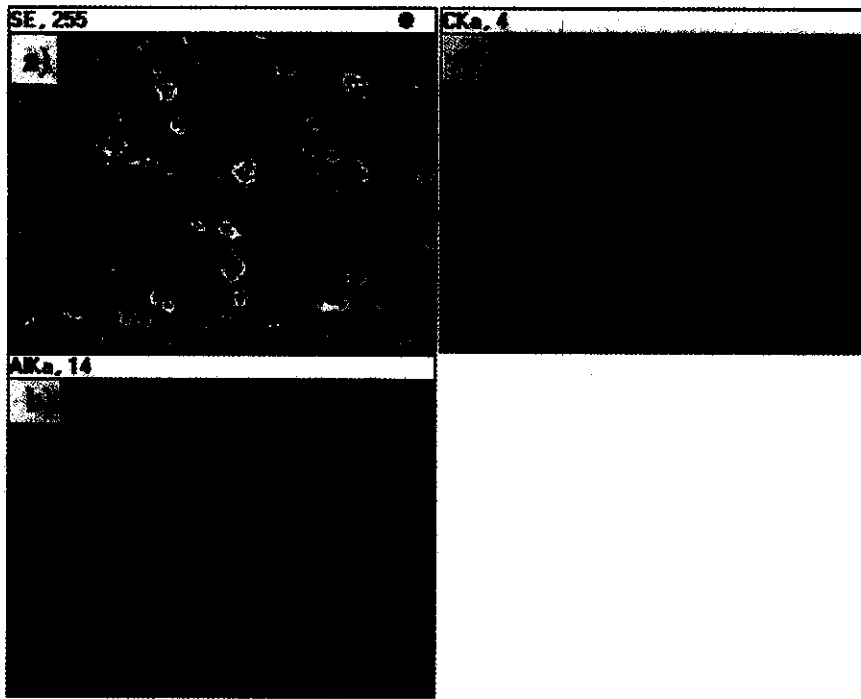


Fig. 1. Scanning electron micrographs of compacted powders and X-ray dot mapping (a) SEM image, (b) aluminum, and (c) carbon.



Fig. 2. Optical micrographs of Al 6061/Graphite composites (a) Al 6061 (b) Al 6061/3 vol.% Gr (c) Al 6061/7 vol.% Gr (d) Al 6061/11 vol.% Gr (e) Al 6061/15 vol.% Gr (f) Al 6061/19 vol.% Gr composites.

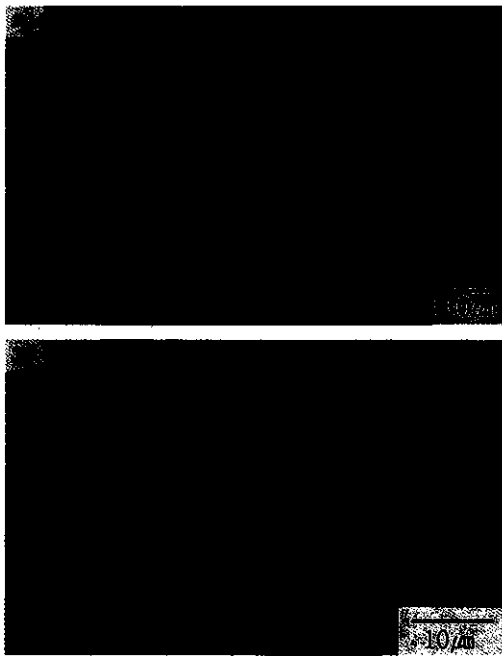


Fig. 3. Optical micrographs of (a) longitudinal section of Al 6061/19 vol.%Gr composite and (b) coarse Graphite within its composite.

어 소성변형되었기 때문으로 생각된다. 따라서 기지 재료로 쓰인 분말의 입자크기가 작을수록 흑연의 함량이 많더라도 흑연의 미세화는 가능할 것으로 사료된다. 또한 흑연을 포함하는 시료의 압출시에 압출비를 변화시켜 더 미세한 흑연입자를 얻는 것도 가능하리라 생각된다. 이러한 미세하고 균일한 분포는 흑연의 기계적 특성 저하를 줄이고 마모특성의 평가에서 윤활층의 형성에 중요하며⁹⁻¹²⁾ 또한 진동 감쇠능에도 중요한 요인으로 작용한다고 사료된다.^{3,13-15)} 그림 3(a)는 19 vol.%의 흑연을 첨가한 미세조직으로 압출방향에 평행하게 조직을 관찰한 결과 흑연이 압출방향으로 크게 변형되어 있음을 알 수 있다. 이때 흑연의 변형길이는 약 70 μm 정도에 이르는 것으로 보이며 압출비가 증가할 수록 변형정도는 증가할 것으로 보인다. 그림 3(b)는 조대한 흑연입자가 압출과정 중에 소성변형 되는 과정을 보여주는 것으로 기지내에 큰 흑연입자가 조금씩 빠져나가는 것을 알 수 있다. 또한 흑연과 혼합된 분말이 압분될 때 알루미늄을 둘러싸고 있던 흑연이 그대로 유지되어 있는 형상도 관찰될 수 있다. 압출공정에 의해 흑연입자가 미세화되는 것을 도식화하면 그림 4와 같이 표현될

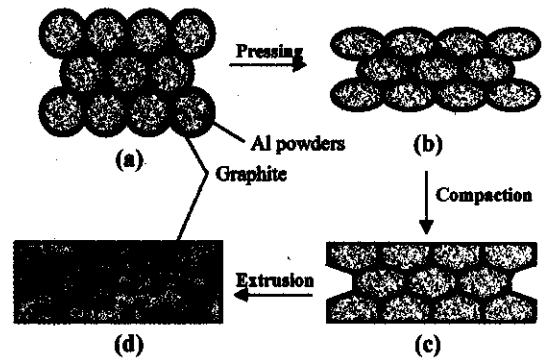


Fig. 4. Schematic diagram of change of graphite shape during compaction and extrusion; (a) Graphite-coated Al powders by ball milling, (b) packed spherical powders, (c) plastically deformed and compacted powders, and (d) extruded composites with fine and homogeneous Graphite distribution.

수 있다. (a)에서 보는 것처럼 Al 6061분말주위에 흑연이 둘러싸고 이것을 압분하면 (b)에서처럼 흑연이 Al분말사이에 분산된 구조를 갖는다. 이것이 압출되면 (c)에서와 같이 단면에서 보면 피상의 흑연으로 분산되는 것으로 압출과정의 소성변형이 크게 작용했음을 의미한다.¹⁶⁻¹⁷⁾

3.2. 기계적 특성

530°C에서 용체화처리하고 수냉하여 170°C에서 시료처리를 하였을 때 열처리에 따른 경도변화를 그림

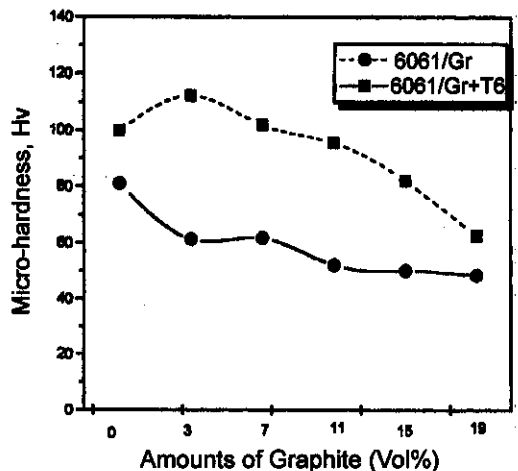


Fig. 5. Micro-Vickers hardness of Al 6061/3 vol.% Gr composites.

5에서 보여주고 있다. 점선으로 나타낸 것은 T6열처리를 한 것이고 실선으로 나타낸 것은 비열처리 재료이다. 압출재의 경도값은 비열처리에 흑연을 첨가하지 않은 기지는 81 Hv이었으며 흑연의 함량이 증가할수록 연속적으로 감소하여 19%를 첨가하였을 때에는 48 Hv를 나타내었다. 그러나 열처리한 시료의 경도값은 기지에서 99 Hv를 나타내었고 3%를 첨가했을 때는 112 Hv로 증가하였다가 흑연의 함량이 7%에서는 기지의 경도값과 비슷하였으며 더 많은 흑연을 첨가하였을 때는 선형적으로 감소하여 감소폭은 흑연함량이 증가할수록 약 10 Hv씩 경도값이 감소하였다. 시편의 상대밀도는 3%에서는 99.4, 19%에서는 98.1을 보이며 흑연함량이 증가할수록 선형적으로 감소하였는데 이것은 기지내의 흑연입자크기가 증가하면서 기지와 결합력을 저하에 의한 기공의 증가 때문인 것으로 사료된다. 그림 6은 각 합금의 인장시험 결과를 나타내었다. 점선으로 표시한 비열처리에 합금에서 흑연의 함량이 증가할수록 인장값은 선형적으로 감소함을 알 수 있었는데 기지재료에서는 170 MPa를 보였지만 열처리를 행한 후에는 240 MPa를 나타내었다. 여기에 3%를 첨가할 때 인장값은 비열처리에 130 MPa로 감소하지만 열처리를 한 시료는 280 MPa로 증가하였고 그 이후로는 계속해서 인장 값이 감소하였다. 이는 3%에서 상대적으로 높은 상대밀도와 기지와 계면에서 Al_4C_3 와 같은 생성물이 균일하게 분포하였기 때문에 인장값

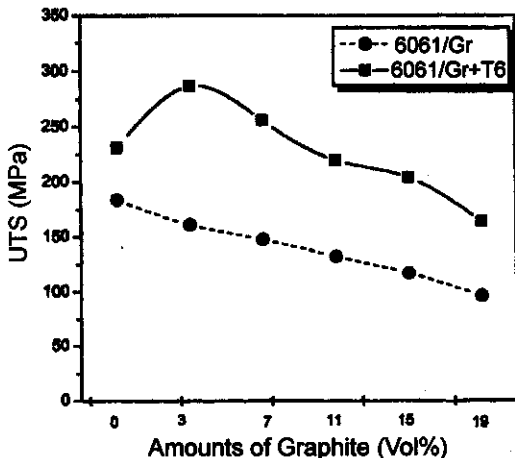


Fig. 6. Variations of tensile strength of Al 6061/3 vol.% Gr composites.

이 증가한 것으로 사료된다.²¹⁾ 흑연의 탄성계수는 기지의 탄성계수보다 낮고 인장강도 또한 기지가 복합재료나 흑연입자보다 높기 때문에 표 1과 같은 관계가 형성된다. 여기서 E_p 와 E_m 은 각각 입자(흑연)와 기지(Al6061)의 탄성계수이며, σ_p , σ_m , 그리고 σ_c 는 각각 입자, 기지 그리고 복합재료의 인장강도를 나타낸다. 흑연의 입자는 인장강도값이 낮고 기지와 결합력이 떨어지기 때문에 기공처럼 거동하고 입자가 균일한 분포를 갖는다는 가정하에 표 1에서 Type 1의 Al/흑연 복합재료에 대해 Majumdar¹⁸⁾ 등은 다음 식을 제안하였다. 흑연이 기공처럼 거동하기 때문에 입자들은 기지에서 임계크랙으로 취급될 수 있고 인장강도는 파괴식으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$K_{IC} = \sigma_{fr}(\pi a)^{1/2} \quad (1)$$

여기서 K_{IC} 는 변형파괴인성, a 는 입자의 지름 그리고 σ_{fr} 은 파괴강도이다. 소성층면을 고려하여 크랙으로 작용하는 입자사이의 작은 규모의 소성변형에 대한 Dugdale-Bilby-Cottrell-Swinden 모델¹⁹⁻²⁰⁾의 가정에 있어서, 소성이 계 전체에 퍼질 때, 크랙팁에서 크랙열림변위 δ 는

$$\delta = \alpha \frac{8\sigma_y}{\pi E} a \ln \left(\sec \left\{ \frac{\pi}{2} \left[1 - \frac{a}{W} \right] \right\} \right) \quad (2)$$

와 같이 표현될 수 있다. 여기서 σ_y 는 기지의 유동응력, E 와 같이 표현될 수 있다. 여기서 σ_y 는 기지의 유동응력, E 기지의 탄성계수, a 는 크랙(입자)의 지름, $2W$ 는 크랙사이의 중심간의 거리이며 $\alpha(a/W=0.6$ 에 대해 약 2.6의 값)는 다른 크랙을 고려한 인자이다. 균일하게 분포된 입자의 경우,

$$\frac{a}{W} = \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{1/3} = 1.24_p^{1/3} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하면

$$\delta = \frac{0.5K^2}{E\sigma_y} \quad (4)$$

기공으로서 거동하는 입자들은 하중을 지탱하지 못하는 성질을 지니므로 강도는 분율결합면적(fractional ligament area)으로부터 결정되어야 한다. a 가 입자의 지름이고 $2W$ 가 입자사이의 중심간의 거리이면 입자에 의해 차지된 분율면적(fractional area)은 a/W 의

제곱에 비례한다. 그러므로 분율결합면적 A_p 는 다음과 같이 주어진다.

$$A_p = 1 - \left(\frac{a}{W}\right)^2 \quad (5)$$

균일한 분포에 대해서는 식 5를 식 3에 대입하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$A_p \approx 1 - 1.5V_p^{2/3} \text{ eqn.} \quad (6)$$

불균일한 분포에 대해서는 식 3에서 $V_p^{2/3}$ 의 계수는 대략 2.2이다. 그러므로 일반적으로 다음 식이 사용된다.

$$A_p = 1 - \beta V_p^{2/3} \quad (7)$$

여기서 β 는 근접상수이다. 복합재료의 파괴응력 σ_c 는

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 1 - \beta V_p^{2/3} \quad (8)$$

여기서 σ_m 은 기지의 인장강도 즉 균일한 분포의 경우,

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 1 - 1.5V_p^{2/3} \quad (9)$$

그러나 실험결과에 의하면 흑연에 의한 인장강도값의 영향은 $\beta=1.5$ 가 아니라 $\beta=1.2$ 에 더 접근하는 것으로 나타났다. 따라서 본 실험에서는 흑연의 함량 변화에 의해

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_m} = 1 - 1.2V_p^{2/3} \quad (10)$$

에 접근하는 것으로 나타났다. 그림 7은 부피분율에 따른 복합재료의 인장강도의 거동을 보이는 것으로 위식을 이용하여 계산된 결과와 실제 인장값을 비교하였다. 비열처리된 복합재료의 인장강도는 흑연 입자의 부피분율이 증가할수록 감소하였는데 흑연 함량이 3이나 7 vol.%에서는 계산된 결과와 잘 일치하지만 흑연의 함량이 11 vol.%이상 증가할수록 흑연은 급격히 인장값을 감소시키는 것으로 나타났다. 그러나 열처리한 시편은 계산된 값보다 훨씬 큰 값을 보이는데 기지강화로 인한 인장값의 증가 및

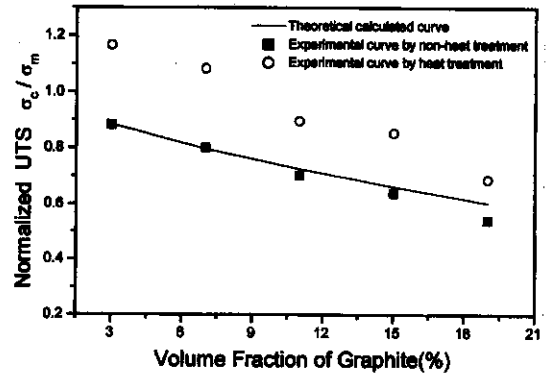


Fig. 7. Comparison of experimental and calculated results, tensile strength behavior with volume fraction of Graphite.

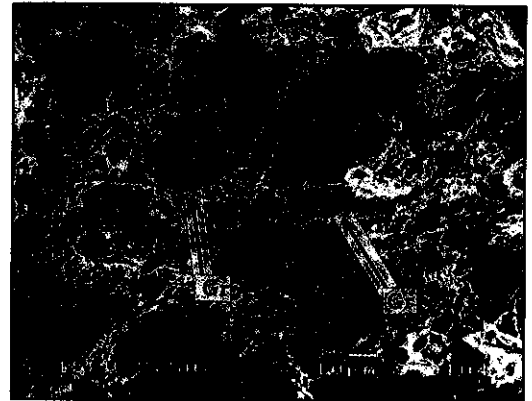


Fig. 8. Scanning electron micrograph of the tensile fracture surface of Al 6061/7Gr composites.

흑연 역시 기공이상의 강화역할을 하는 것으로 사료된다. 그림 8은 6061/19 vol.%Gr 복합재료의 인장시험후에 파단면을 주사전자현미경(SEM)으로 관찰한 것으로 흑연의 분산(화살표로 표시)이 광학현미경에서 마찬가지로 균일하게 분산되어 있음을 알 수 있으며 흑연입자가 뭉쳐있는 형상은 관찰할 수 없었다. 기지는 전체적으로 덩들의 연성파괴의 거동을 보이며 흑연이 표면에 나와있는 것은 흑연과 기지사이의 계면에서 파괴가 먼저 발생하는 핵으로 작용한 것으로 사료되는데 이는 흑연입자와 기지의 결합력이 좋지 못함을 나타내는 것으로 인장시 흑연 입자는 그 주위에 기공을 형성하는 것으로 사료된다. 입자사이의 기지의 소성유동 때문에 최대인장변형에 접근될 때, 미세한 기공들이 핵생성하고 계재물이나 석출상 등에서 성장하며 파괴는 흑연입자와

기지의 계면에서 발생한다. 따라서 흑연의 함량이 증가함에 따라 강도값이 작아지는 것은 바로 흑연과 기지의 계면의 면적이 증가하기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구는 Al 6061합금에 흑연을 첨가하여 함량에 따른 미세조직과 기계적 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Al 6061분말과 흑연의 불밀혼합과 압출공정으로 흑연 입자분포는 균일하고 미세하게 이루어졌으며 흑연입도는 압출전 90 μm 에서 3 vol%일때는 2~4 μm 정도의 크기를 나타내지만 19 vol%일때는 10 μm 의 크기를 보였으며 흑연함량이 증가함에 따라 분포된 흑연의 입도는 증가하였다.

2. 기지재료의 경도값이 81 Hv에서 흑연의 증가에 따라 감소하지만 T6처리에 의해 기지경도값은 99 Hv에서 3 vol%의 흑연첨가에 의해 112 Hv로 증가하였다가 흑연함량이 증가할수록 선형적으로 감소하였다.

3. 인장강도는 흑연함량이 증가함에 따라 선형적으로 감소한 반면 열처리한 시료는 3 vol.%에서 기지강도값보다 증가하였다가 선형적으로 감소하였다. 비열처리한 시편을 계산된 결과의 비교하면 흑연함량이 7 vol.%이하에서는 정확하게 일치하였지만 흑연함량이 계속 증가할 수록 계산치에서 벗어나는 것으로 예측가능하지만 열처리한 시편에서는 계산치보다 모두 크게 나타났다.

4. 파단면을 관찰한 결과 흑연입자와 기지사이의 계면에서 파단이 발생하여 흑연증가에 의한 계면중가로 인장값이 감소하였다.

참고문헌

1. P. K. Rohatgi, Y. Liu and T. L. Barr: Metallurgical Transactions A, **22A** (1991) 1435.
2. B. N. Pramila Bai, E. S. Dwarakadasa and S. K. Biswas: Wear, **76** (1982) 211.
3. P. K. Rohatgi, N. Murali, H. R. Shetty and R. Chandrashekar: Materials Science and Engineering, **26** (1976) 115.
4. B. S. Majumdar, A. H. egnswaran and P. K. Rohatgi: Materials Science and Engineering **68** (1984) 85.
5. P. K. Rohatgi, Y. Liu, M. Yin and T. L. Barr: Materials Science and Engineering, **A123** (1990) 213.
6. S. K. Biswas and B. N. Pramila Bai: Wear **68** (1981) 347.
7. Junji Sugishita and Shonshin Fujiyoshi: Wear **77** (1982) 181.
8. S. Das and S. V. Prasad: Wear **133** (1989) 173.
9. A. K. Jha, S. V. Prasad and G. S. Upadhyaya: Powder Metallurgy **32** (1989) 309.
10. Y. B. Liu, S. C. Lim, S. Ray and P. K. Rohatgi: Wear **159** (1992) 201.
11. B. K. Prasad, T. K. Dan, P. K. Rohatgi: J of Materials Science Letters **6** (1987) 1076.
12. P. K. Rohatgi and B. C. Pai: Wear **59** (1980) 323.
13. Deo Nath: Wear **60** (1980) 61.
14. B. P. Krishnan, N. Raman, K. Narayanaswamy and P. K. Rohatgi: Wear **60** (1980) 205.
15. B. P. Krishnan, N. Raman, K. Narayanaswamy and P. K. Rohatgi: Tribology international **16** (1983) 23.
16. Y. Liu, D. Nath, H. F. Lopez, P. K. Rohatgi: PMI **2** (1990) 22.
17. P. K. Rohatgi, M. K. Surappa: Materials Science and Engineering, **62** (1984) 159.
18. B. S. Majumdar, A. H. Yegneswaran and P. K. Rohatgi: Materials Science and Engineering, **68** (1984) 85.
19. D. S. Dugdale: J. Mech. Phys. Solids, **8** (1960) 100.
20. B.A. Bilby, A. H. Cottrell and K. H. Swinden: Proc. R. Soc. London, Ser. A, **279** (1964) 1.
21. Jangg. G., Kutner. F., Korb. G.: Powder Met. Int., **9** (1977) 24.