

2024Al/SiC_p복합재료의 기계적특성에 미치는 SiC 클러스터의 영향

김홍물 · 천병선*

한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀
*충남대학교 공과대학 금속공학과

Effects of SiC Cluster on Mechanical Properties of the 2024Al/SiC_p Composites

Hong-Moule Kim and Byong-Sun Chun*

Nuclear Materials Technology Development Team,

Korea Atomic Energy Research Institute(KAERI), Taejon, 305-353, South Korea

*Department of Metallurgical Engineering, Chungnam National University, Taejon, 305-764, South Korea

(Received March 5, 2001)

Abstract A centrifugally atomized 2024Al/SiC_p composites were extruded to study effect of clusters on mechanical properties, and a model was proposed that the strength of MMCs would be estimated from the load transfer model approach that taken into consideration of the clusters. This model has been successfully utilized to predict the strength and fracture toughness of MMCs. The experimental and calculated results show coincidence and that the fracture toughness decreases with increasing the volume fraction of particles. On the basis of experimental observations, we suggest that the strength and fracture toughness of particle reinforced MMCs may be calculated from; $\sigma_y = \sigma_m V_m + \sigma_r (V_r - V_c) - \sigma_r V_c$, $K_{IQ} = \sigma_y ((3\pi)(r_r/V_r)(r_c/V_c))^{1/2}$, respectively.

1. 서 론

입자강화 알루미늄복합재료는 Al합금에 비해 높은 비강도와 비강성 등 우수한 기계적 특성을 가지므로 항공기, 자동차 구조재료로서 큰 관심을 모으고 있다. 이 소재는 절삭과 같은 기존의 가공법을 사용할 수 있는 장점은 있으나 구조용 재료로 적용되기 위해 요구되는 파괴변형(fracture strain)과 파괴인성(fracture toughness)이 낮다는 기술적인 문제점이 있다. 따라서 금속기복합재료에 대한 연구의 주요 관심은 강화상이 파괴기구에 미치는 영향에 대한 연구와 파괴인성의 제어방법을 연구하는 것에 있다. 용융금속속 강화상을 첨가하여 제조한 Al/SiC 복합재료의 예상되는 문제점은 Al과 SiC 사이에서 계면약화를 일으키는 Al₄C₃ 등의 생성과 이와 함께 압출방향을 따라 입자들이 배열된 클러스터를 갖는 미세조직의 불균일성이다. 이로 인해 연성과 파괴인성의 감소가 야기되기 때문이다.^{1,2)} 입자강화 복합재료의 인장특

성에 대한 연구는 많이 진행되어 왔지만 금속기복합재료의 파괴인성에 영향을 미치는 강화상의 기구는 아직 명확히 규명되지 않았으며 단지 몇가지 모델이 파괴인성과 미세조직과의 관계를 설명하려고 제시되어 왔을 뿐이다.²⁾ 이 연구의 목적은 입자분포분율 및 SiC입자로 구성된 클러스터와 같은 미세조직적인 인자들이 인장특성과 파괴인성에 미치는 영향을 알아보기 위한 것이며, 또한 복합재료의 미세조직과 기계적 특성의 상호작용에 의한 파단기구를 밝히는데 있다.

2. 실험방법

재료는 2024Al기지에 10 μm크기의 SiC입자를 3, 5, 7, 10 vol.% 첨가하여 강화시킨 복합재료로서, 시료제작에서 2024Al을 용융시키고 예열된 SiC입자를 교반시키면서 용탕에 주입하였다. 이 용탕은 분말로 만들기 위해 원심분무기의 턴더쉬를 통해 주입되었

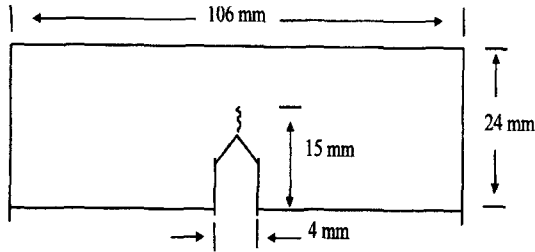


Fig. 1 Dimension of bend specimen.

으며 분무된 분말은 이론밀도의 80%까지 압분되었고 400°C에서 1시간동안 10⁻³Torr의 압력으로 탈가스 되었다. 이 빌렛은 13:1의 압출비로 400°C에서 열간압출하였다. 인장시험은 항복강도 σ_{ys} , 인장강도 σ_{ult} , 그리고 파단변형 ϵ_f 와 같은 기계적 특성을 얻기 위해 만능인장시험기(Instron 4206)를 사용하였고 하중은 5,000 kg 로드셀로 측정하였으며 시편의 변형은 lin.extensometer로 측정하였다. 시편에는 파단될때까지 0.6 mm/min의 일정한 크로스헤드속도로 하중이 가해졌다. 복합재료의 파단인성시험은 만능인장시험기(MTS servohydraulic machine)를 사용하여 3점 굽힘 시험으로 행해졌으며 이 시편의 치수는 Fig. 1에 표시하였다.

K_{IQ} 값은 탄성응력에 기초한 식에 의해 계산되었으며 K_{IQ} 측정의 적합성은 적정크기의 시료에서 날카로운 크랙 상태를 만드는데 달려있으므로 최종단계에서 K_{IQ} 의 60%이하의 응력강도를 갖도록 시료를 예비피로크랙을 가함으로 이루어졌다. 시편은 0.6 mm/min의 크로스헤드속도로 P- Δ curve가 직선에서 벗어날 때까지 하중이 추가되었다. 이 부분내에서 95% 교차선은 K_Q 를 계산하기 위해 그려졌으며, 모든 파단된 인장시편과 3점굽힘시편의 파면을 관찰하기 위하여 주사전자현미경(JSM-6400)을 사용하였다. 또한 시편제조공정중의 SiC의 분포를 관찰하는데 있어서, 클러스터의 분율은 computer image analyzer를 사용하여 압출방향의 수직단면의 단위면적당 10 μ m 이상의 클러스터 면적에 의해 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 인장특성

제조된 복합재료는 압출방향에 따라 형성된 SiC입



Fig. 2. Optical microstructure of Al/SiC composite for a constant particle size.

Table 1. Specification of composites investigated

Materials	Cluster volume fraction(%)	Aspest ratio of cluster (particle)	Particle thickness (μ m)
2024-3%SiC	16	7.0(1.5)	10
2024-5%SiC	12		
2024-7%SiC	20		
2024-10%SiC	32		

자들의 클러스터가 배열되어 있고 SiC의 클러스터 부피분율이 12-32%에 이르는 불균질한 미세구조를 보였는데 Fig. 2는 10%를 첨가한 복합재료의 단면에 나타난 클러스터를 보여준다. 표 1은 압출상태의 클러스터 부피분율과 압출방향에 따른 aspect ratio를 표시한 것으로 평균값으로 나타내었다. 0.2% offset 항복강도 σ_{ys} , 인장강도 σ_{ult} , 그리고 파단변형 ϵ_f 은 응력-변형곡선을 통해 계산되었으며 각 값은 2회측정의 평균값으로 표 2에 나타내었다. 또한 비교를 위해 기지금속의 특성도 평가되었다. 응력-변형곡선으로 본 인장특성은 파괴전에 네킹현상이 발생하지 않으며 연신율이 21%인 2024Al기지에 비해 매우 작게 나타났으며 3.2%에서 7.0%에 이르는 분포를 보였다. 예상대로 항복강도는 SiC 부피분율이 증가할수록 모든 시료에서 두드러지게 향상되었고 이는 SiC입자의 부피분율이 SiC/Al 복합재료의 인장특성에 중요한 영향을 미쳤던 것으로 생각된다. Fig. 3은 입자크기에서 SiC 부피분율에 따른 0.2% offset 항복강도와 최대인장강도를 나타낸 것으로 비슷한 경향을 보였다.

Table 2. Tensile properties and fracture toughness of the composites

Materials	σ_{ys} (Mpa)	σ_{ult} (Mpa)	ϵ_f	Crack Length (MM)	K_{IQ} (MPa-m ^{1/2})
2024-3%SiC	175	264	0.051	14.97	20.16
2024-5%SiC	214	320	0.032	14.75	19.02
2024-7%SiC	221	374	0.070	14.58	18.42
2024-10%SiC	210	308	0.066	15.14	14.67
2024Al	76	186	0.210	---	---

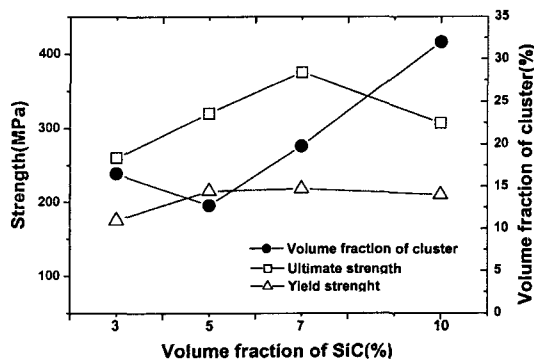


Fig. 3. Strength with volume fraction of SiC and clusters for a constant particle size.

2024Al/SiC 복합재료에서 강화재가 증가함에 따라 강도가 증가하는데 이는 복합재료의 성형과정이 고온에서 행해진 후 상온으로 냉각됨에 따라 기지금속과 SiC 입자 사이의 열팽창계수의 차이에 의한 알루미늄 기지의 전위증식과 인장시 고강도의 SiC 입자가 기지금속의 소성변형을 방해하여 가공경화가 가속화되었기 때문이라고 사료된다. Fig. 3에서 보는 것처럼 인장강도는 모든 시료에서 대체적으로 클러스터 부피분율의 증가에 따라 감소하였다. 즉 SiC 부피분율 7%에서 최고 인장강도 값을 나타내고 있으나 10%에서는 인장강도값이 감소하는데 이것은 SiC 클러스터 내에서 크랙이 발생하여 강도저하의 원인으로 작용한 것으로 보인다. 이러한 인장강도 값에 미치는 클러스터의 영향을 고찰하기 위해 강도예측 모델을 나타내고자 한다.

입자강화 금속기 복합재료의 강도를 예측하는데 있어서, 가장 단순한 하중 유동응력모델은 혼합의 법칙 (the rule of mixture)으로 나타낼 수 있다.

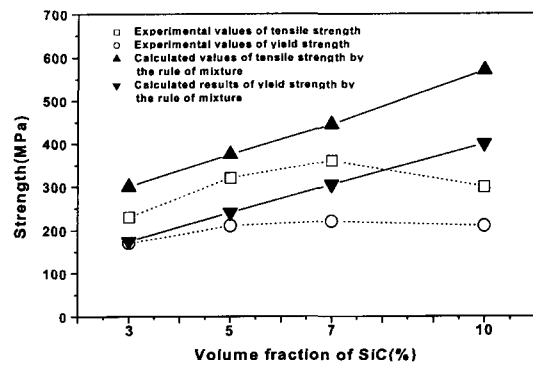


Fig. 4. Comparison of experimental and calculated results with strength and volume fraction of SiC.

$$\sigma_y = \sigma_m V_m + \sigma_r V_r \quad (1)$$

여기서 σ_y 는 항복응력이며, σ_m , σ_r 은 기지와 강화재 각각에 부과된 응력이다. 또한 V_m , V_r 은 각각 기지와 강화재의 부피분율을 나타낸다. 각 성분에 의해 부과된 외부하중의 비는 하중을 평균한 부피로 측정되었고 성분과 기지는 강화재의 첨가에 의해 영향을 받지 않을 때 외부하중은 부피의 합과 같다.^{1,3)} 이 모델은 MMCs의 탄성계수를 예측하는데는 매우 유용하지만 강도를 예측하는데는 적합하지 않다. Y. Wu와 E. J. Lavernia^{6,10)}은 하중전달의 영향과 기지 강화를 연결하여 설명하려고 시도하였다. 그들은 이 모델을 Al-4Si/TiB₂계에 적용하였고 실험결과와 상당히 일치하는 것으로 결론지었다. 그러나 본 연구에서처럼 상당히 큰 입자크기에 대해서는 Orowan-type강화는 완전히 무시되므로 본 연구의 결과를 설명하기 위하여 단순한 하중전달모델을 사용하였다. 항복강도와 인장강도(SiC의 경우 3.5-4.0 GPa)에 하중전달모델을 적용하는 것은 Fig. 4에서 보는 바처럼 실험결과와 상당히 다른 결론을 나타낸다. 계산치는 SiC

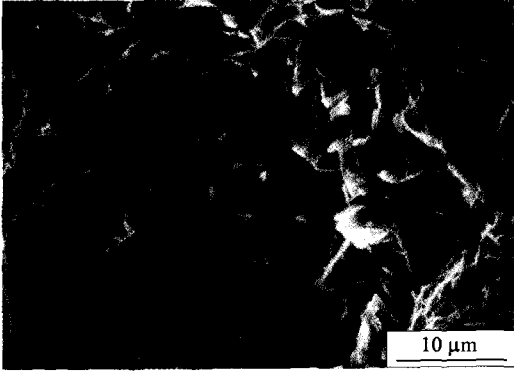


Fig. 5. SEM fractograph showing SiC particle clustering in Al/SiC composite.

부피분율이 증가할수록 강도값이 지속적으로 증가하여야 하지만 실험결과는 10%에서 오히려 감소하였다. 이러한 차이는 SiC의 불균일한 분포가 압축방향으로 배열되어 생성된 클러스터를 고려한 수정된 강화모델을 필요로 한다.^{4,6)} Fig. 5는 인장시험 후 파단면을 관찰한 것으로 기지의 연성파괴에 의한 덩플과 함께 중심부에 SiC 입자들로 구성된 클러스터가 관찰되었는데 이러한 클러스터 입자들은 크랙에 앞서 손상을 발생시키는 것으로 사료되며, 하중방향에 수직으로 파단되는 클러스터 파단이 파괴의 지배적인 모드로 보인다. 클러스터 파단은 인장하중이 가해지는 초기단계에 발생하여 최종파단까지 성장하게 된다.^{6,7)} 미세조직의 관점에서 기지내의 클러스터는 입자강화 MMCs의 강도를 감소시키는 작용을 하기 때문에 $-\sigma_r V_c$ 항을 첨가하여, 실험고찰을 근거로 입자강화 MMCs의 강도는 다음식으로 계산될 수 있다.

$$\sigma_y = \sigma_m V_m + \sigma_r (V_r - V_c) - \sigma_r V_c \quad (2)$$

여기서 V_c 는 클러스터의 부피분율을 나타낸다. 강화재로 작용하는 부피분율에서 클러스터로 작용하는 SiC 부피분율을 빼고, 전체 강도값에서 클러스터분율이 갖는 네거티브 역할을 고려하면 된다. 즉, MMCs의 강도는 클러스터를 고려한 하중전달모델로부터 평가될 수 있고, 달리 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_y = \sigma_m V_m + \sigma_r V_r - 2\sigma_r V_c \quad (3)$$

식 3은 Fig. 6에서 실험결과와 비교되었으며 실험결과와 정확히 일치하였다. 복합재료의 강도를 예측하는데는 강화재의 분균일성을 고려하여 식 3과 같이 나타내야 한다.

3.2. 파괴인성

파괴인성 K_{IQ} 는 다음 관계식에 따라 계산되었다.

$$K_{IQ} = (P_Q/B W^{1/2}) f(a/W) \quad (4)$$

여기서 계산된 K값은 2회값을 평균하였으며 대부분의 경우 K_{IQ} 은 선형탄성 파괴역학의 조건을 만족시킨다. Fig. 7은 본 실험에서 SiC 부피분율에 따라 파괴인성값을 나타낸 것으로 K_{IQ} 값은 SiC의 부피분율이 증가함에 따라 선형적으로 감소하였다. 이것은 SiC 부피분율이 증가함에 따라 증가한 인장특성과 대조적인 거동이다. 인장특성에 대한 비슷한 대조결과를 Lavernia 등에 의한 Al-6Si/Al₂O_{3p} 복합재료에서도 얻었다.⁶⁾

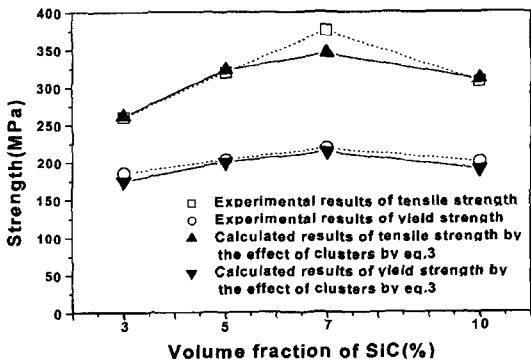


Fig. 6. Comparison of experimental and calculated results of strength with the volume fraction of SiC.

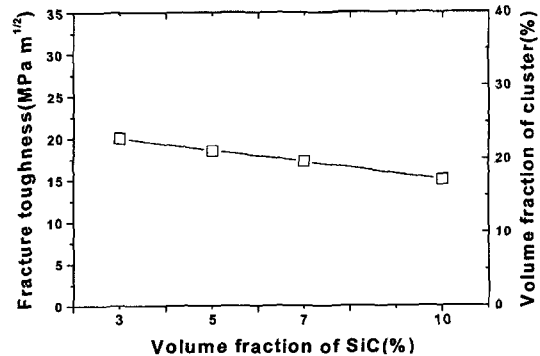


Fig. 7. Fracture toughness with the volume fraction of SiC.

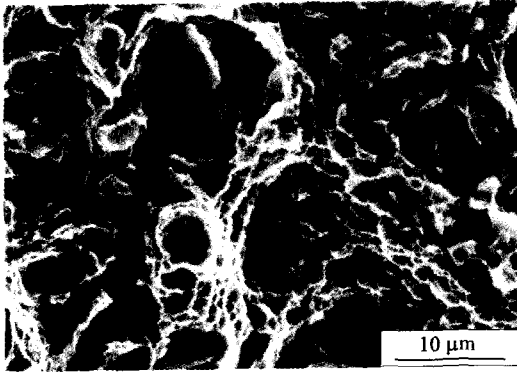


Fig. 8. SEM fractograph showing SiC particles and dimples in Al/SiC composite.

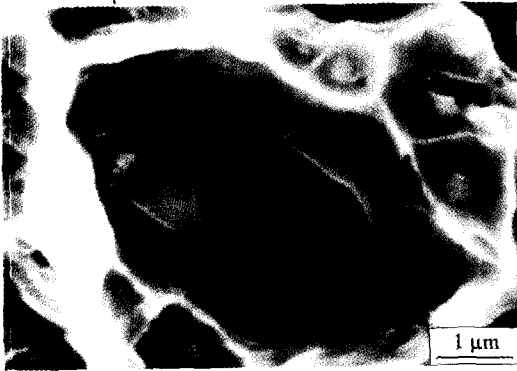


Fig. 9. SEM fractograph showing fractured SiC in Al/SiC composite.

Fig. 8은 복합재료의 전체적인 파단면을 나타내는 것으로 SiC입자와 관계된 조대한 덩플의 분포와 Al 합금기지의 연성파괴에 의한 미세한 덩플로 구성되어 있으며 다른 연구자들의 관찰과도 유사하다.^{4,6)} 대부분 커다란 덩플은 동일한 크기의 SiC입자들을 포함하고 있는 것으로 보아 기지로부터 SiC의 이탈은 계면에서 시작된 것으로 보인다. 또한 SiC입자 주위의 덩플의 끝은 연신되어 있으며 파단면에서 SiC입자의 일부는 크랙이 관찰되었다. 고배율로 관찰한 결과 Fig. 9에서 보는 것처럼 입자의 중심부를 통해서 진행되는 크랙을 선명히 볼 수 있다. 파단면에서의 미세한 덩플은 국부적인 연성기구를 보이며 이것은 응력변형곡선에서 semi-brittle 거동과 일치하였다. 따라서 본 연구의 복합재료의 파단모드는 클러스터파괴, Al/SiC 계면파괴, 그리고 입자파괴로 구분될 수 있는데 그 중에서 클러스터에 의한 파괴가 가장 지

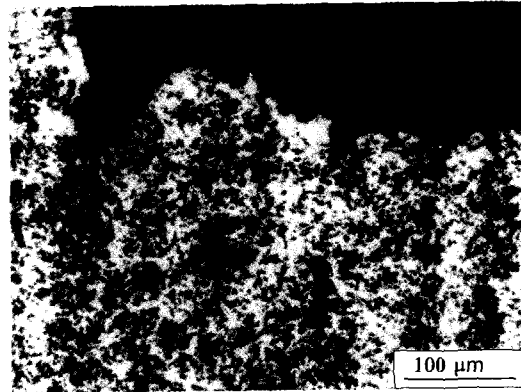


Fig. 10. Fracture surface profile of Al/SiC composite.

배적인 것으로 보인다. Fig. 10은 파단면에서 SiC입자가 클러스터된 영역을 보이는 것으로 크랙에 앞서 손상집적이 더 쉽게 발생하는 경향이 있다. 파단은 기공형성이나 기지크랙과 같은 기지손상으로부터도 발생한다. 파면에서는 연성 덩플과 기공에 위치한 입자가 관찰된다. 앞서 지적한 것처럼 입자강화 MMCs의 지배적인 파괴모드는 하중초기에 작용하는 입자와 클러스터크랙이다. 전체적으로 기지의 연성은 낮기 때문에 클러스터와 입자를 통한 크랙이 파단의 주요기구이다.⁷⁻⁹⁾

소성영역크기는 하중이 증가함에 따라 증가하며 복합재료의 파단은 이웃한 크랙의 소성영역이 합쳐질 때 발생한다. 동시에 응력강도인자 K_I 는 복합재료의 평면변형파괴인성 K_{Ic} 에 이르게 된다. Hahn과 Rosenfield는 커다란 Fe-rich 또는 Si-rich 계재물을 갖는 Al 합금의 파괴인성을 부피분율과 $K_{Ic} \propto V_f^{1/6}$ 항으로 계산하였다.¹¹⁾ 강화재 부피분율 V_f 에 따른 K_{Ic} 값의 경향은 인성이 입자의 부피분율에 의해 한정된다는 것을 의미한다.⁷⁾ 즉,

$$K_{Ic} = \sigma_Y (3\pi (r_f/V_f)^{1/2})^{1/2} \quad (5)$$

여기서 V_f 는 SiC입자의 부피분율이고 r_f 는 SiC입자의 aspect ratio이며 t 는 두께, 그리고 σ_Y 는 기지의 항복강도이다. $\sigma_Y = (\sigma_{ys} + \sigma_{ult})/2$ 은 2024-3%SiC와 2024-7%SiC 이 각각 219, 297 MPa이었다. 이 모델에 근거해서 식 5는 입자부피분율에 따른 파괴인성의 실험결과와 비교해서 Fig. 11에 나타내었다. 실험결과와 계산치는 파괴인성이 입자의 부피분율이

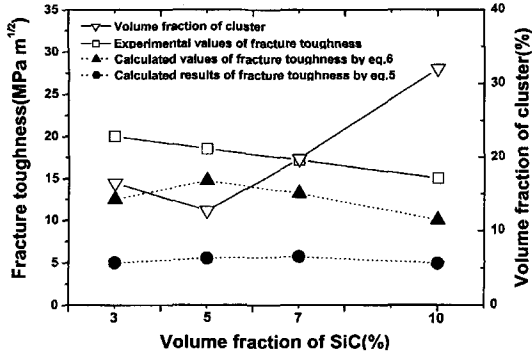


Fig. 11. Comparison of experimental and calculated fracture toughness with the volume fraction of SiC and clusters.

증가함에 따라 모두 선형적으로 감소하고 있음을 보여준다. 파괴기구에 있어서 파괴는 SiC입자로 강화된 Al합금에서 변형이 진행되는 동안 클러스터된 강화재에서 우선 발생한다. 파괴의 미세기구는 클러스터의 양에 의해 크게 영향을 받으므로 실험결과에 근거하여 입자강화복합재료의 파괴인성 K_{I0} 는 클러스터의 부피분율을 첨가함으로써 계산될 수 있다는 것을 제시한다.

$$K_{I0} = \sigma_Y((3\pi t)((r_f/V_f) (r_c/V_c))^{1/2})^{1/2} \quad (6)$$

여기서 V_c 는 SiC 입자클러스터의 부피분율, r 은 aspect ratio, t 는 두께이다. 식 6에 의해 계산된 강도값이 실험치와 항상 일치하지는 않았지만 이 모델은 MMCs의 파괴인성을 예측하는데 성공적으로 이용될 수 있다. 만약 기지의 인성이 결함으로 인해 저하되지 않는다면 기지의 항복강도 증가는 복합재료의 인성을 증가시켜야 한다. 이 연구에서 크랙전파는 전체적으로 임의의 방향을 갖지만 손상집적은 파괴전파의 일부를 따라 클러스터가 높은 영역에서 발생하는 것으로 관찰되었다. 극부적으로 클러스터된 영역에서 손상집적의 파괴전파는 반드시 임의방향이지만 전체 크랙전파를 따라 입자의 부피분율과 방향에 관계한다는 것을 보여주었다. 강화재의 분율이 높은 영역과 낮은 영역이 교차되는 곳이 크랙전파의 방향으로 작용하고 크랙은 진행하기 위해 부피분율이 낮은 영역을 먼저 통과한다. 파단면에 대한 연구만으로는 크랙이 클러스터 입자의 패스를 따라 시작되고 전

파된다는 것을 설명하기에 불충분하다. 파괴특성에 있어서 클러스터 영역과 손상집적 사이의 관계를 규명하기 위해 더 많은 연구가 진행되어야 한다.

5. 결 론

1. Al/SiC 복합재료에 대한 인장시험에서 SiC 부피분율이 증가함에 따라 항복강도와 인장강도는 향상되었지만 파단변형은 감소하였다. 강화재의 부피분율이 증가하면 MMCs의 강도는 증가하지만 증가폭은 12-32 vol.%를 나타내는 클러스터의 부피분율에 크게 영향을 받는 것으로 보인다.

2. MMCs의 강도는 클러스터를 고려한 이중전달모델로 계산될 수 있는데 다음과 같다. $\sigma_y = \sigma_m V_m + \sigma_r V_r - 2\sigma_f V_c$. 이 모델은 MMCs의 강도를 예측하는데 실험값과 완전히 일치하지는 않았지만 성공적으로 사용되었다. 더 균일하게 분포된 미세조직을 갖도록 공정을 개발하는 것은 기계적 특성을 향상시키기 위해 필수적이다.

3. 복합재료의 파단모드는 클러스터파괴, Al/SiC 계면파괴, 그리고 입자파괴로 구분될 수 있는데 그 중에서 클러스터에 의한 파괴가 가장 지배적으로 것으로 보인다

4. 복합재료의 파괴인성 K_{I0} 은 클러스터를 포함한 식으로부터 계산될 수 있는데 다음과 같다. $K_{I0} = \sigma_Y((3\pi t)((r_f/V_f) (r_c/V_c))^{1/2})^{1/2}$. 이 모델은 실험값과 계산한 결과에서 입자의 부피분율이 증가함에 따라 파괴인성은 감소하는 것으로 나타났으며 서로가 잘 일치하였다. 클러스터 부피분율을 낮추기 위해서는 입자의 부피분율을 낮추거나 새로운 공정을 사용해야 한다.

참 고 문 헌

1. M. Taya and R.J. Arsenault, Metal Matrix Composites, Pergamon Press, (1989)
2. C.S. Oh, Y.G. Lee and H.Y. Ra, J. Kor. Inst. Met. & Mater. **37**(2) (1999) 178
3. T.W. Clyne, P.J. Withers, An Introduction To Metal Matrix Composites, Cambridge University Press, Cambridge, UK, (1993)
4. M. Manoharan and J.J. Lewandowski, Mater. Sci. Eng. A **150** (1992) 179
5. H.J. Kim, T. Kobayashi and H.S. Yoon, Mater. Sci. Eng.

- A 154 (1992) 35
6. Y. Wu and E.J. Lavernia, *Scripta Metall.* **27** (1992) 173
7. Dan Zhao and Floyd R. Tuler, *Engineering Fracture Mechanics* **47** (1994) 303
8. P. Williams and S. Cannon, *J. Mater. Sci.* **29** (1994) 4906
9. G.R. Irwin, *J. Applied Mechanics*, **24** (1957) 361
10. M.F. Ashby, *Strengthening Methods in Crystals*, (1971) 137
11. G.T. Hahn and A.R. Rosenfield, *Metallurgical Transactions A*. **6A**, (1975) 653