

컴포캐스팅법에 의해 제조된 알루미늄 금속복합재료의 동과괴 인성치에 관한 연구

김 문 생\*, 이 현 철\*\*

Experimental Investigation of the Dynamic Fracture Toughness for Aluminum Alumina Whisker Metal Matrix Composites

Moon-Saeng Kim\*, Hyeon-Chul Lee\*\*

ABSTRACT

This paper presents experimental study of the static and dynamic fracture toughness behavior of a Al-6061 aluminum alloy reinforced alumina( $\delta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) whiskers with 5%, 10%, 15% volume fraction. The static fracture tests using three-point bending specimen were performed by UTM25T. And drop weight impact tester performing dynamic fracture tests was used to measure dynamic loads applied to a fatigue-precracked specimens. The onset of crack initiation was detected using a strain gage bonded near a crack tip. The value of static fracture toughness K<sub>IC</sub> and dynamic fracture toughness K<sub>ID</sub> were decided on the basis of linear elastic fracture mechanics. The effects of fiber volume fraction and loading on fracture toughness were investigated. The distribution of whiskers, bonding state and fracture interfaces involved in void, fiber pull-out state were investigated by optical microscopy(OM) and scanning electron microscopy(SEM).

**Key Words :** 정적 파괴 인성치(Static fracture toughness), 동적 파괴 인성치(Dynamic fracture toughness), 컴포캐스팅(Compcasting), 금속복합재료(Metal matrix composites)

1. 서 론

기존의 금속에 강화재를 첨가하여 제조되는 첨단 신소재의 하나인 금속복합재료(metal matrix × composite)는 일반적으로 비강도, 비강성, 내마모성, 내열성 등 기계적 성질의 향상과 더불어 기존의 금속과 같이 제조가 용이하기 때문에 공업적으로 제품 생산에 대단한 잇점을 가지고 있어 관심의 대상이 되고 있다. 특히 알루미늄기 금속복합재료는 내부식성과 함께 경량화를

이룰 수 있어 유망한 신소재로 떠오르고 있으며 적용 범위가 점점 확대될 전망이다. 그러나 금속복합재료는 우수한 기계적 성질에도 불구하고 여전히 연성(ductility)과 파괴 인성(fracture toughness)이 기대하는 만큼 도달하지 못하기 때문에 실제로 구조물에 대해 적용하는데는 어려움이 따른다. 그래서 이러한 금속복합재료의 물성을 향상 시키기 위해 파괴 거동의 해석이 요구되어지며 미세조직과 파괴 특성간의 관계를 규명하여야 한다. 따라서 금속복합재료의 파괴 거동에 대한 해

\* 부산대학교 공과대학 기계설계공학과 및 기계기술연구소(정회원)

\*\* 부산대학교 대학원 기계공학과

석은 활발한 연구가 이루어져야 할 분야중의 하나이다.

Skinner<sup>(1)</sup> 등은 Boron/Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 금속복합재료가 고온에서와 열사이클 영향하에서 인성이 현저히 감소함을 보이고 그 이유로 기지재의 약화, 계면 반응물, 강화재 균열 등의 관점에서 규명하였으며, Marchand<sup>(2)</sup> 등은 SiC/Al 금속복합재료에 대하여 동적 변형과 정적 파괴 거동의 실험적인 연구를 통해 축 변형시 보다는 전단인 경우에 재료의 연성값이 높게 나타나고, 파괴 인성값은 하중률에 민감하지만 전단에서의 응력-변형을 값은 거의 변하지 않음을 보였다. Lewandowski<sup>(3)</sup> 등과 Doong<sup>(4)</sup> 등은 각각 미시 역학적 고찰을 통해 기지재와 계면 근처의 파손이 파괴의 주된 원인이며, 또한 미시 균열(microcrack)의 응력 집중에 의한 기지재료의 파괴 진전을 규명하였다. Hirano<sup>(5)</sup> 는 SiC/Al에 대해 세브른 노치굽힘(chevron-notched bend type) 시편을 통해 시편의 방향성과 하중 형태가 인성에 미치는 영향을 조사하였으며, Crowe<sup>(6)</sup> 등과 Hunt<sup>(7)</sup> 등은 노치 선단, 열처리 그리고 강화재의 방향성이 파괴 인성에 미치는 영향과 void의 성장과 합체를 통한 관점에서 파괴를 고찰하였으며, 아울러 복합재료 내에서 강화재의 크기, 분포가 파괴 인성에 미치는 영향을 나타내었다.

그러나 위의 연구 내용들은 주로 하중률이 10<sup>-3</sup>~10 V.Pa√m/s인 정적 파괴를 주 대상으로 하였지만, 동하중에 대한 연구는 거의 찾아볼 수 없다. 그러나 구조물의 응용 범위가 점차 확대됨에 따라 고강도, 고강성의 기계적 성질이 우수한 금속복합재료의 동하중에 대한 연구의 필요성이 강조되고 있다. 최근에 조 등<sup>(8)</sup>이 SiC/Al 금속복합재료의 동하중에 대한 파괴 특성 연구에서 정적 파괴 인성치가 동적 파괴 인성치 보다 낮게 나타났으며, 미시적으로는 보이드(void)와 미시 균열(microcrack)의 생성을 포함한 파괴 과정이 고찰되었다.

본 논문에서는 액상법 제조중의 하나인 콤포캐스팅(compocasting)에 의하여 제조된 알루미늄나뭇스카 강화 알루미늄 금속복합재료 시편을 이용하여 재료의 기계적 성질 중 균열(crack)의 전파를 저지하는 능력으로 표현되는 파괴 인성치를 각 부피분율(volume fraction)에 따라 구하고자 한다.

또한 금속복합재료의 강화재의 부피분율에 따라서 동 파괴 인성치와 하중률과의 관계를 규명하고, 또한 정적인 하중과 동적인 하중에 따라 파괴 인성치를 비교하였

다. 그리고 주사형 전자 현미경(SEM)을 통하여 파면을 고찰하여 미시적으로 파괴에 미치는 요인을 밝힘으로써 파괴 인성의 향상에 필요한 파괴 특성간의 관계를 규명하고자 한다.

## 2. 실험

### 2-1. 실험 재료 및 성형장치

기계적 성질이 우수한 복합재를 얻기 위해서는 연성이 좋은 기지금속과 강도나 탄성계수(elastic modulus)가 우수한 강화재를 일차적으로 선택해야 한다. 본 실험에서 사용한 강화재는 고온에서도 높은 안정성을 갖는 RF등급의 δ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 휘스카이며 이 휘스카에 대한 물성치와 화학적 성분비를 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 기지금속(matrix)으로서는 알루미늄(Al 6061)을 사용하였으며, 그 물성치와 화학적 성분비도 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

Table 1. Properties of δ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> short fiber

Tensile Strength	about 1.5	GPa
Modulus of Elasticity	300	GPa
Density	3.3	g/cm <sup>3</sup>
Melting Temperature	200	°C
Whisker Diameter	3	μm
Whisker Mean Length	70	μm
Aspect Ratio (l/d)	20~	30

Table 2. Chemical Composition of δ-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> short fiber

Composition	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	etc.
Rate (%)	96.1	3.4	0.5

Table 3. Properties of Al-6061 alloy

Tensile Strength	124.1	MPa
Modulus of Elasticity	about 69	GPa
Density	2.70	g/cm <sup>3</sup>
Melting Temperature	582~649	°C

Table 4. Chemical Composition of Al-6061 alloy (wt, %)

Composition	Al	Mg	Si	Cu	Cr
Rate (%)	97.9	1.0	0.6	0.25	0.25

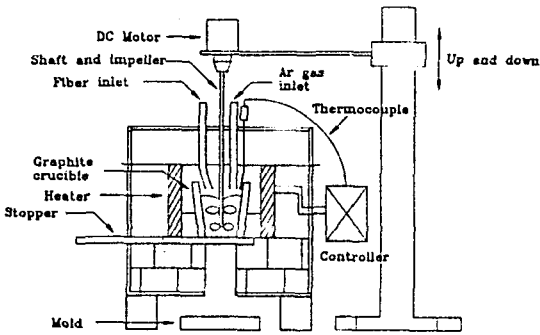


Fig.1 Schematic illustration of compositing apparatus

본 연구에서 시편을 성형하기 위해서 Fig.1과 같이 콤포캐스팅법에 의한 금속복합재료를 성형하였다. 실험 장치는 로 내부의 도가니를 가열시켜 주는 히터와 내부 온도를 측정하는 열전대, 온도를 제어해 주는 콘트롤러, 용융금속과 강화재를 교반시켜 주는 장치인 프로펠러와 축, 변속이 가능한 직류모터, 그리고 프로펠러의 상하운동을 얻기 위한 상하 이송장치로 구성되어 있다. 또한 윗덮개에는 분위기를 위한 아르곤 가스 주입구, 교반시 내부를 볼 수 있는 장치, 강화재를 주입하기 위한 주입구가 장치되어 있다.

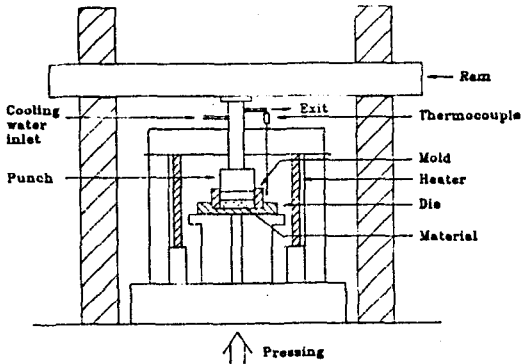


Fig.2 Schematic illustration of hot pressing apparatus

콤포캐스팅방법에 의해 제조된 시편은 Fig.2에 나타나 있는 열갈 가압 장치를 이용하여 재가열 한 후 가압하였다. 가압장치에 사용된 프레스는 200t 유압 프레스이다. 가압된 시편은 가압효과에 의해 Fig.3에서 보는 바와 같이 대체로 2차원 배열을 하게 되는데, 본 연구에서는 Fig.4에서의 같이 C-R형의 3점 굽힘 시편을 채취하였다. Fig.5는 ASTM E399-81의 표준규격에

따라 제작된 3점 굽힘 시편을 나타낸다. 제작된 시편은 T6 열처리를 실시 하였다. Fig.6은 기지재료내의 알루미늄 휘스카의 분포상태를 보여준다. 강화재는 대체로 균일한 분포를 나타내고 있으며, 가압효과로 인하여 강화재는 대체로 2차원 배열로 되어 있음을 알 수 있다. 그러나 제조과정 중에서의 급격한 와류 때문에 휘스카의 파단으로 인한 평균단면비(aspect ratio :  $l/d$ )의 감소(약 10~15), 휘스카가 모이는 현상, 그리고 미소공동들이 관찰되기도 한다.

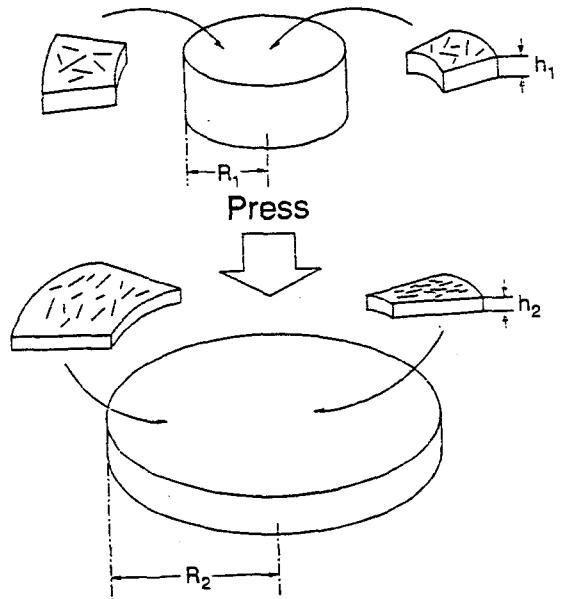


Fig.3 Schematic illustration of changes in principal strains and in fiber orientation distribution during compression of a specimen

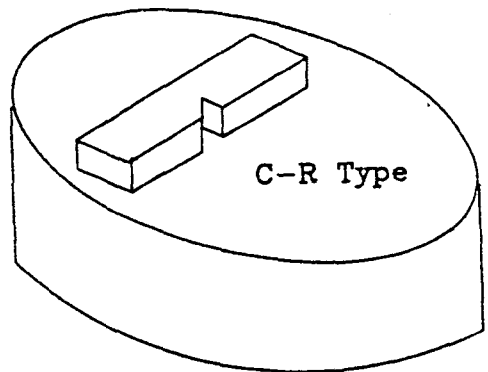


Fig.4 Crack plane orientation code for cylinder

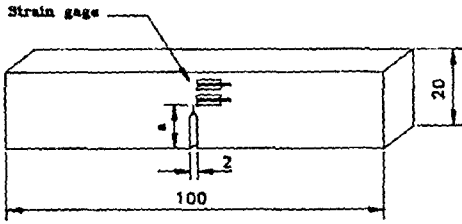


Fig. 5 Shape of three-point bending specimen  
(Unit : mm)



Fig. 6 Optical micrograph of alumina short fibers  
at  $V_f=10\%$ ,  $T=648^\circ$ ,  $P=50\text{MPa}$

## 2-2 실험장치

Fig. 7은 본 연구에서 사용된 충격 파괴 시험 장치(drop weight impact tester)이다. 본 실험은 striker, drop tower, guider로 구성되어 있다. striker는 중량이 5.848kg이고 그 하단부 중앙에 위치한 직경 8mm인 스테인레스(SUS 316) 봉이 충격 하중을 가하도록 제작되어 있다. drop tower는 직경 25mm, 최대 높이 4m이며 중심폭은 250mm이다. guider는 시편에 충격 하중을 가한뒤 떨어지는 striker를 멈추게 하기 위한 것으로서 고무완충 장치가 되어 있다.

장치의 아래쪽 다이(die)는 0.5m 깊이의 콘크리트 위에 두께 30mm, 길이 600mm의 정사각형 강재(S30C)를 앵커볼트로 고정시켰다. 다이(die) 윗쪽에는 시편의 고정대(fixture)를 ASTM E399-81<sup>(9)</sup>의 규격에 따라 제작하여 die와 볼트로 고정시켰는데, 크기는 가로 65mm, 두께 30mm, 높이 100mm인 강재(S45C)로 제작하였다. 그리고 여기에 속도 변환기(velocity transducer)를 고정시켜 시편 파괴시 변형속도를 측정하였다. 속도 변환기의 감도는 19.291 mV/mm/sec이다. 정적 파괴 시험은 만능재료시험기(UTM 25 ton)에

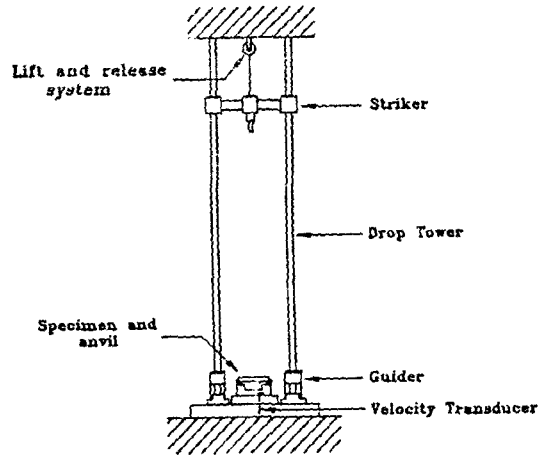


Fig. 7 Schematic illustration of drop weight impact tester

서 수행하였다.

## 2-3 파괴시험

폼포캐스팅법에 의하여 제조된 알루미늄-알루미늄 금속복합재료의 파괴 특성을 조사하기 위하여 다음과 같이 실험을 행하였다.

### 2-3-1 피로 예비균열 시험

파괴 인성 실험을 하기 위해서는 먼저 시편에 피로 예비 균열(fatigue pre-crack)을 도입하여야 한다. 시편에 반복 하중을 줌으로써 만들어지는 피로 예비 균열을 피로 하중에 의해 발생하는 균열 선단에서의 소성 영역의 영향이 무시될 수 있도록 재료의 성질을 크게 변화 시키지 않아야 한다. 본 실험에는 유압 MTS 시험기에서 피로 예비 균열을 주었으며, 피로 하중을 식(1)로 표시되는 극한 하중(limit load)의 64% 이내로 하였다.

$$P_L = \frac{4Bb^2\sigma_{ys}}{3S} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{ys}$ 는 재료의 항복 강도(yield strength)이다. 피로 하중은 시편의 부피분율이 증가함에 따라 취성이 증가하기 때문에 부피분율 증가함에 따라 지지재에서의 극한 하중보다 40%~60% 정도 감소시켰으며, 주파수는 6 Hz~8 Hz의 정현파를 사용하여 발생시켰다. 본 실험에서는 ASTM STP 813-81 규격을 만족시키기 위해 노치 선단에서 약 1mm 앞까지 피로 예비 균열을

발생시켜 균열비를 약 0.55로 하였으며, 피로 균열의 길이는 배율 20배의 이동 현미경(travelling microscope)을 사용하여 관찰하였다.

2-3-2 정적 파괴 시험

본 실험에서의 정적 파괴 시험은 UTM-25T에서 각 부피분율(5%, 10%, 15%)에 따라 상온에서 수행하였다. 본 실험에서 사용된 시편은 Fig. 5에 나타내었으며, 시편에 부착된 스트레인 게이지(strain gage : KYOWA Model KFC-5-C1-23)의 위치는 균열선단으로부터 우측으로 0.3mm, 왼쪽으로 1mm 되는 지점에 1개를 부착하였다. Fig. 8은 정적 파괴 실험선도를 나타내며, 로드 셀(load cell)을 통하여 정하중을 가하여 하중-시간 곡선을 검출한다. 하중 변위는 1mm/min로 하였으며, 정하중을 가할 때 시편에 부착된 스트레인 게이지(strain gage)에서 나오는 신호는 휘스톤 브릿지 상자(wheatstone bridge box)를 통하여 증폭기(strain amplifier)에 전달되고 다시 오실로스코프(oscilloscope : Nicolet 4094)에 변형률-시간 곡선에 대한 신호를 검출하게 된다. 위 두 신호를 이용하여 하중-변형률을 구하였다.

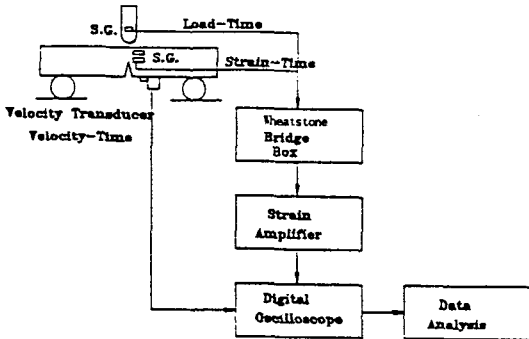


Fig. 8 Static fracture test diagram

하중-변위 곡선으로부터 ASTM-Standards E399-83 (10)에 따른 삼점 굽힘(three-point bending)시편의 응력 확대 계수(stress intensity factor)  $K_Q$ 는 식(2)와 같다.

$$K_Q = \frac{P_Q S}{B W^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2)$$

여기서

$$a, B \geq 2.5 \left( K_Q / \sigma_{ys} \right)^2 \quad (3)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left\{ 1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \right\}}{2 \left\{ 1 + 2\left(\frac{a}{W}\right) \right\}} \frac{\left( 2.15 - 3.93\left(\frac{a}{W}\right) + 2.7\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right)}{\left( 1 - \left(\frac{a}{W}\right) \right)^{3/2}}$$

- $P_Q$  : 하중 (N)
- $B$  : 시편의 두께 (mm)
- $S$  : 시편의 길이 (mm)
- $W$  : 시편의 폭 (mm)
- $a$  : 균열길이 (mm)

여기서 구해진  $K_Q$  값이  $K_{Ic}$ 로서 만족이 되기 위해서는 식(3)과 같은 조건을 만족해야 한다.

여기서  $\sigma_{ys}$ 는 시편의 항복응력(Yield Strength)이다. 재료에 대한 항복응력은 ASTM Standard E8-83에 따라 제작한 인장 시편을 통하여 구하였으며, 파괴 시편과 같은 조건에서 열처리를 하였다. 각각의 값들은 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Yield Strength of Al-6061 metal matrix composite

$V_f$	Al-6061	5%	10%	15%
Value (MPa)	121.4	142	188.3	258.1

2-4-2 동적 파괴 시험

동적 파괴 시험에서와 같은 조건의 시편으로 Fig. 7의 장치를 이용하여 각부피분율(5%, 10%, 15%)에 따라 상온에서 행하였다. Fig. 9는 동적파괴 실험 선도를 나타낸다. 시편에 부착된 스트레인 게이지(strain gage : KYOWA Model KFC-5-C1-23)의 위치는 균열선단으로부터 우측으로 0.3mm, 왼쪽으로 1mm 되는 지점에 1개를 부착하였으며, 왼쪽으로 1mm 되는 지점에 1개를 더 부착하였다. 스트라이커(striker)에 부착된 세방향 스트레인 게이지로부터 하중-시간에 대한 곡선을 검출하고, 시편에 부착된 2개의 스트레인 게이지(strain gage : KYOWA Model KFC-5-C1-23)로부터 동적 파괴시 변형률-시간에 대한 곡선을 검출하였다. 또한 속도 변환기(velocity transducer)를 낙하식 충격시험기(drop weight impact tester) 하부에 설치하여 변형속

도를 측정하도록 한다. 동하중이 가해질 경우에는 동적 응력 확대 계수(dynamic stress intensity factor)  $K_I(t)$ 를 시편의 동적 파괴시의 파괴 시작 시간과 같이 구하여야 한다. 파괴시 균열 선단 부근에 부착된 스트레인 게이지로부터 변형률을 측정하여 최대 변형률에 이르는 시간을 파괴 시작 시간으로 하였으며, 이는 정적인 경우의 응력 확대 계수와 변형률의 관계로부터 파괴 개시 시작점과 그 때의 충격 하중으로서 동파괴 인성치가 구해진다.

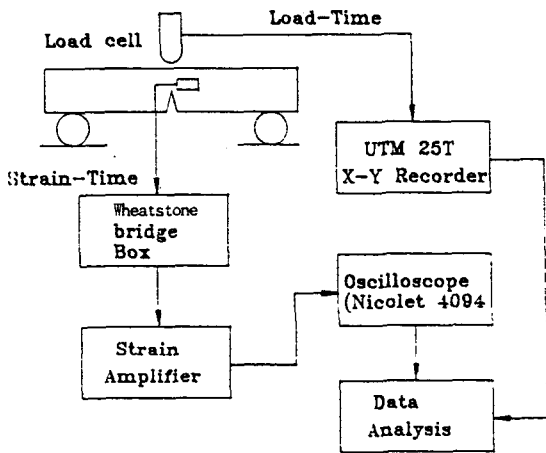


Fig. 9 Dynamic fracture test diagram

### 3. 결과 및 고찰

컴포제스팅법에 의해 제조된 Fig. 5의 3점 굽힘 시편을 사용하여 상온에서 각 부피분율(5%, 10%, 15%)에 따라 정적 및 동적 파괴 시험을 행하였다. 정적 파괴 시험의 하중을 범위는 약  $0.10422 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$  ( $3.17 \times 10^{-4}/\text{s}$ )이다. 실시된 동적 파괴 시험은 Fig. 7의 충격장치를 이용하여 파괴인성을 측정하였다. 이러한 방법으로 응력확대율을  $3 \times 10^3 \text{ MP}\sqrt{\text{m/s}}$  ( $3.17 \times 10^{-4}/\text{s}$ )까지 이르게 하였고, 노치 선단의 파괴 시작 인성치( $K_{Ia}$ )를 부피분율과 하중을 및 낙하 높이에 따라 고찰하였다. 시편은 각 부피분율에 따라 20개씩 제작하여 시험하였으며, 각각의 시험결과를 평균하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

#### 3-1 하중-변형률 곡선

Fig. 10은 정적 파괴 시험은 부피분율에 따른 하중-변형률 곡선을 나타낸다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 하

중-변형률 곡선에서 알루미늄 6061의 경우는 전형적인 연성 재료의 형태를 가지나, 알루미늄 강화 금속복합재료는 거의 탄성적인 영역에서 파괴가 일어났음을 알 수 있다. Fig. 10에서 화살표는 파괴 개시 시작점을 나타낸다. Fig. 11은 부피분율에 따른 정적 파괴 인성치  $K_{Ic}$

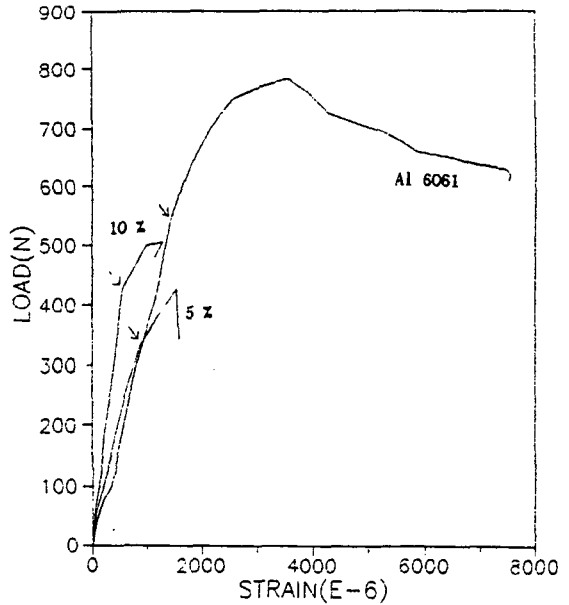


Fig. 10 Load vs. strain curves for static fracture test

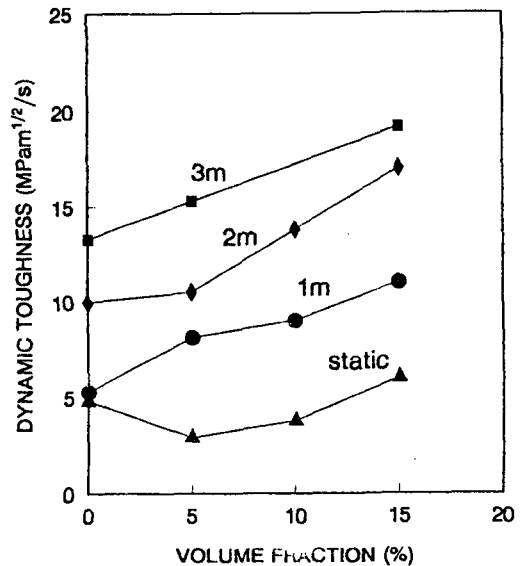


Fig. 11 Dynamic fracture toughness vs. volume fraction

의 값을 나타내었다. 파괴 인성치는 대체로 휘스카의 부피분율이 증가함에 따라 증가하는 경향을 띠고 있으나, 기지재인 알루미늄에 비해서는 급격히 낮은 값을 갖는다. 특히 부피분율이 5%인 경우 그 값이 급격히 떨어지는데, 이는 콤포케스팅법에 의해서 금속복합재료를 성형시 부피분율이 높은 경우( $V_f=10\%$  이상) 보다는 낮은 경우( $V_f=10\%$  이하) 강화제의 균일한 분포를 얻기 어려우며, 휘스카의 모이는 현상(cluster)이 많이 관찰될 뿐만 아니라 미소공동 및 계면에서의 더 많은 결함들이 발생하기 때문인 것으로 시료된다(11). 즉, 콤포케스팅법으로 제조한 경우  $Al_2O_3$  휘스카의 강화가 반드시 파괴 인성치를 증가시키는 효과를 가져 온다고는 볼 수 없으며, 제조과정에서 발생하는 결함들에 의해서 오히려 그 값이 낮아진다는 것을 알 수 있다. 그러나 부피분율이 10% 이상인 경우 파괴 인성치는 증가하는 경향을 띠고 있다.

### 3-2 동적 파괴 시험

동적 파괴 인성 시험결과  $Al_2O_3$  휘스카 강화 금속복합재료는 Fig. 11에 나타나 있는 바와 같이 동적 파괴 인성치가 정적 파괴 인성치 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 12는 각 부피분율에 따라 하중율에 대한 동적 파괴 인성치를 나타내고 있다. Fig. 12에서도 마찬가지로 동적 파괴 인성치가 정적 파괴 인성치 보다

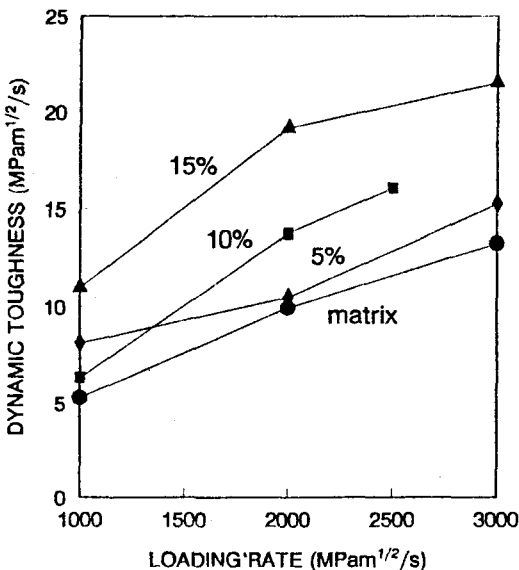


Fig. 12 Dynamic fracture toughness vs. loading rate curve

높은 값을 나타내고 있으며, 부피분율이 증가할수록 높은 값을 나타내고 있다. 또한 하중율이 증가할수록 동적 파괴 인성치도 증가하는 경향을 띠고 있다. 이러한 경향은 최근 Hirano(5) 등이 정적인 경우의  $SiC_w$  강화 금속복합재료의 파괴인성 실험에서 미세 파괴 과정에 의하여 설명된 바 있다. 즉 void의 생성 및 성장은 정적인 경우 이들이 서로 합체되어 파괴에 이르는 데는 상당한 시간이 소요되지만 동적인 경우 파괴과정이 매우 짧은 시간내에서 일어나기 때문에 void의 생성 및 결합에 필요한 변형을 얻기 위해서는 높은 유동응력이 필요하게 되어 파괴 인성치가 증가되는 것으로 사료된다. 즉 하중율이 증가함에 따라 재료내의 유동응력이 증가하기 때문이다. 또한 부피분율이 증가함에 따라 동적 파괴 인성치가 대체로 증가하는 경향을 띠고 있음을 알 수 있는데, 이는 부피분율이 증가함에 따라 파괴시  $Al_2O_3$  휘스카의 유동응력 분담율이 증가하기 때문이라 사료된다. 그러나 부피분율이 10% 이하인 경우 앞에서 설명한 바와 같이 콤포케스팅법에 의해 제조된 시편인 경우 휘스카의 균일한 분포를 얻기 어려울 뿐만 아니라, 미소공동 및 계면에서의 많은 결함으로 인한 강도 저하 때문에 그 값이 변동하는 현상을 볼 수 있다.

### 3-3 파괴 계면 관찰

정적 파괴 시험과 동적 파괴 시험을 행한 후, 주사형 전자현미경(scanning electron microscope)을 이용하여 파괴 실험된 시편의 파면을 관찰하였다. Fig. 13은 부피분율 10% 금속복합재료의 정적 파괴 시험된 파면을

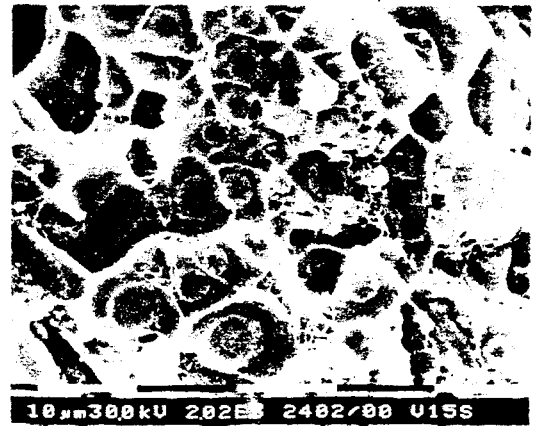


Fig. 13 Scanning electron micrograph of static fracture surface at  $V_f=10\%$

나타낸 것이다. 또한 Fig. 14 (a), (b)는 각각 기지재 (Al 6061)의 동적 파괴면과 부피분율 10%인 금속복합재료의 동적 파괴면을 나타낸 것이고, Fig. 15 (a), (b)는 부피분율 15%인 금속복합재료의 파괴면을 나타낸 것이다. 파괴면들의 주된 파괴 발생 형태는 정적 파괴 시험과 동적 파괴 시험에 관계없이 연성파괴의 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. Fig. 14~Fig. 15에서 관찰할 수 있듯이 pull-out된 휘스카들도 다수 관찰할 수 있다. 이는 정적인 경우에는 기지재가 심하게 소성 변형을 일으킨 것을 볼 수가 있으며, 오랜 시간 동안 기지재와 강화재 사이에 존재하는 보이드(void)들이 생성 및 성장을 거듭하여 계면을 약화시켜 계면을 따라 파괴가 진전되었기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 Fig. 15 (b)에서처럼 강화재가 기지재로부터 빠져 나간 부분은 거의 없이 강화재가 파단된 상태를 잘 보여주고 있다. 이는 동적 파괴 과정에서는 극히 짧은 시간 내에 파괴가 일어나기 때문에 강화재가 하중을 감당한 후 파괴가 일어나기 때문이라 생각된다.



Fig. 14 Scanning electron micrograph of dynamic fracture surface (a) matrix (Al 6061), (b)  $V_f=10\%$

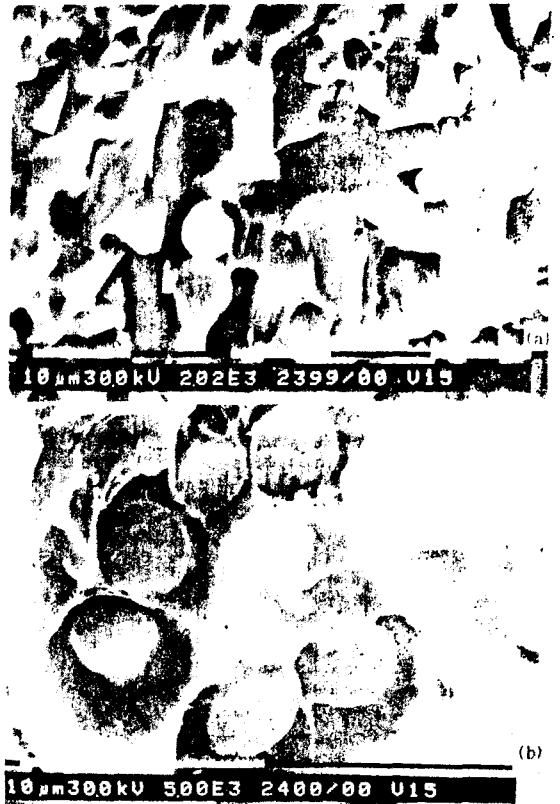


Fig. 15 Scanning electron micrograph of dynamic fracture surface at  $V_f=15\%$

즉, 낮은 변형속도로 파괴가 진전되는 정적 파괴인 경우 보이드(void)의 생성 및 성장에 충분한 시간이 있어 휘스카의 계면에서 void가 생성 및 성장할 수 있지만, 높은 변형속도(high strain rate)에서는 계면에서 void가 생성 및 성장하여 파괴가 진전되기 보다는 순간적인 높은 유동응력으로 인하여 휘스카가 하중을 감당하여 파괴가 진전되기 때문인 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구는 액상 제조법 중의 하나인 콤포캐스팅법을 이용하여 알루미늄 휘스카 강화 알루미늄 금속복합재료를 제조하였으며, 이를 이용하여 제조된 시편의 정적 및 동적 파괴 특성 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콤포캐스팅을 이용하여  $Al_2O_3$  휘스카 강화 금속복합재료를 제조할 때, 부피분율 10% 이상에서는 알루미늄 휘스카의 분산 상태가 양호한 알루미늄 알루미늄



- 나 금속복합재료 시편을 얻을 수 있었으나, 10% 이하에서는 균일한 분산을 얻기 어려웠다.
2. 알루미늄 휘스카 강화 알루미늄 금속복합재료의 동적 파괴 인성치는 강화하지 않은 알루미늄에 비해 더 낮게 나타났으며, 파괴분율의 증가에 따라 파괴 인성치가 증가하였다.
  3. 알루미늄 알루미늄 금속복합재료의 동적 파괴 인성치는 강화하지 않은 알루미늄에 비해 높게 나타났으며, 그리고 파괴분율에 하중률이 증가함에 따라 파괴 인성치는 증가되었다.
  4. 파면들의 주요 파괴 발생 형태는 정적 파괴나 동적 파괴에 관계없이 연성파괴로 나타났으며, pull-out된 휘스카도 다수 발견되었다.
  5. 콤포케스팅법에 의해 제조된 금속복합재료의 경우 파괴분율이 10% 이하에서는  $Al_2O_3$  휘스카 강화가 반드시 정적 및 동적 파괴 인성치의 증가에 효과적이지 아니며, 오히려 파괴 인성치를 감소시킨다.

#### 참고문헌

1. A. Skinner, M. J. Koczak and A. Lawley, "Work of Fracture in Aluminum Metal-Matrix Composites", Metallurgical Transactions A. Vol. 13A, Feb., pp.289~297, 1982.
2. A. Marchand, J. Duffy, T. A. Christmans and S. Suresh, "An experimental study of the dynamic mechanical property of an Al-SiC<sub>w</sub> composite", Engineering Fracture Mechanics. Vol. 30, No. 3, pp.295~315, 1988.
3. J. J. Lewandowski, C. Liu and W. H. Hunt, "Effects of Matrix Microstructure and Particle Distribution on Fracture of an Aluminum Metal Composite", Materials Science and Engineering. A. 107, pp.241~255, 1989.
4. S. H. Doong, T. C. Lee, I. M. Robertson and H. H. K. Birnbaum, "Dynamic studies of the crack initiation and growth mechanisms in Al/SiC<sub>p</sub> composites", Scripta Metallurgica. Vol. 23, pp.1413~1418, 1989.
5. K. Hirano, "Determination of Fracture for Whisker-Reinforced Aluminum Alloy Matrix Composite using Chevron-Notched Specimen", JSME. International Journal Series I. Vol. 34, No. 2, pp.234~239, 1991.
6. C. R. Crowe, R. A. Gray and D. F. Hasson, "Microstructure Controlled Fracture Toughness", ICCM-V, pp.843, 1985.
7. W. H. Hunt Jr., O. Richmond and R. D. Young, "Fracture Initiation in particle hardened materials with high volume fraction", ICCM & ECCM, Vol. 2, pp.2.210~2.223, 1987.
8. 백경호, 이성학, 이두영, 조경목, "SiC 휘스카 보강 Al 복합재료의 동적 파괴 거동에 관한 연구", 한국 복합 재료 학회지, Vol. 2, No. 1, pp.40~52, 1990.
9. Standard Test Method for J<sub>IC</sub>, A measure of Fracture Toughness, in Annual Book of ASTM Standards, E813-81, pp.768~789, 1984.
10. Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, in Annual Book of ASTM Standards, E399-83, pp.522~559, 1984.
11. 김문생, 이현철, "충격하중을 받는 금속복합재료의 동적 변형거동에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 게재중, 1993.