

論文

저속 충격하에서의 금속복합재료의 동적 특성

남현욱* · Gamal A. Aggag*** · K.Takahashi*** · 한경섭**

Dynamic Behaviors of Metal Matrix Composites in Low Velocity Impact

H.W.Nam*, Gamal A. Aggag***, K.Takahashi*** and K.S.Han **

ABSTRACT

This study has observed that the dynamic behavior of Metal Matrix Composites (MMCs) in low velocity impact varies with impact velocity.

MMCs with 15 fiber volume percent were fabricated by using the squeeze casting method. The AC8A was used as the matrix, and the alumina and the carbon were used as reinforcements.

The tensile and vibration tests conducted yielded the tensile stress and elastic modulus of MMCs. The low pass filter and instrumented impact test machine was adopted to study dynamic behaviors of MMCs corresponding to impact velocity. Stable impact signals were obtained by using the low pass filter. Impact energy of unreinforced alloy and MMCs increased as the impact velocity increased. The increase of crack propagation energy was especially prominent, but the dynamic toughness of each material did not change much. To show the relation between crack initiation energy and dynamic fracture toughness, a simple model was proposed by using the strain energy and stress distribution at notch. The model revealed that crack initiation energy is proportional to the square of dynamic fracture toughness and inversely proportional to elastic modulus.

초 록

본 연구에서는 저속 충격하에서 충격 속도에 따른 금속복합재료의 동적 거동을 연구하였다. 시험에 사용된 재료는 모재로 AC8A와 보강재로 알루미늄(Al_2O_3)과 탄소를 사용하였으며 용탕 주조법을 이용하여 금속복합재료를 제조하였다. 금속복합재료에는 15%의 부피분율을 가진 알루미늄 예비성형체와 알루미늄과 탄소를 각각 12%와 3% 사용한 혼합 예비성형체가 사용되었다. 제조된 금속복합재료는 인장 시험과 진동 시험을 통해 인장 강도와 탄성계수를 구하였으며, 저주파 여파기(low pass filter)와 계장화 충격 시험기를 이용하여 충격 속도에 따른 금속복합재료의 충격 거동을 연구하였다.

저주파 여파기를 이용함으로써 충격 속도에 관계없이 안정적인 실험치를 확보할 수 있었다. 충격 속도의 증가에 따라 모재와 금속복합재료의 충격 에너지는 증가하였으나, 동적인성치는 일정한 값을 보였다. 충격 속도가 증가할수록 충격에너지 중 균열전파에너지의 향상이 두드러졌으며, 재료의 변형량이 증가하였다.

충격에너지 중 균열개시에너지와 동적파괴인성치의 관계를 설명하기 위하여 변형을 에너지와 노치에서의 응력 분포를 이용하여 간단한 모델을 제시하였으며, 이로부터 균열개시에너지는 동적파괴인성치의 자승에 비례하고 탄성 계수에 반비례하는 것을 보였다.

*포항공과대학교 기계공학과 대학원

**포항공과대학교 기계공학과

***Research Institute for Applied Mechanics Kyushu University, Kasuga, Japan

1. 서론

금속복합재료는 비강도 및 비강성이 우수하고 내마모성, 우수한 고온 물성등으로 인해 지난 수십년간 많은 연구들이 진행되어 왔으며, 현재는 자동차나 항공기 등의 부품에 사용되고 있다. 그러나 금속복합재료는 취성의 보강재로 인한 파괴인성의 저하 때문에 그 응용 범위가 제한 되고 있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구자들이 금속복합재료의 정적 혹은 동적 파괴 인성에 관한 연구를 수행하였다. 그 중 대부분의 연구들은 정적 상태에서의 연구에 치우쳐 있는데 이것은 동적 파괴 인성치의 측정이 정적파괴인성치에 비해 어렵기 때문이다. 정적파괴인성치에 대한 연구는 주로 보강재의 부피비나 열처리에 따른 기지재의 물성 변화가 금속복합재료의 정적 파괴에 미치는 영향에 대하여 수행되었다[1-4].

일반적으로 동적 파괴 거동은 정적인 경우와 다르며, 금속복합재료의 대부분 동적 상태에서 사용되어지는 것이 대부분이기 때문에 이러한 동적파괴인성치에 관한 연구는 매우 중요하다. 금속복합재료의 동적 거동을 연구하는 방법으로는 계장화된 샤피 충격 시험기를 이용하는 방법과 분할 홉킨슨 바(split hopkinson bar)를 이용하는 방법이 일반적으로 사용된다. 홉킨슨 바에 의한 충격시험은 고속 충격에서의 충격 거동을 연구할 수 있는 방법으로 강의 동적 파괴 거동을 연구하기 위해 사용되었다[5]. 이 방법은 원주 방향으로 피로 균열을 발생시킨 시편의 한쪽 끝에 폭발물을 장착시키고 폭발시킬 때 발생하는 충격파를 시편에 전달시켜 충격 거동을 살펴보는 방법이다. 이러한 방법을 금속복합재료의 고속 충격현상에 이용한 연구 결과도 발표되고 있다[6]. 분할 홉킨슨 바를 이용한 충격 현상 연구는 고속 충격을 연구할 수 있다는 장점이 있으나 시험 장치가 복잡하고 시편의 크기가 커야 한다는 단점이 있다. 이에 비하여 샤피 충격 시험법은 비교적 간단히 시편의 충격 파괴 에너지를 구할 수 있고 계장화 시키면 균열전파에너지와 균열개시에너지를 독립적으로 알 수 있을 뿐 아니라 동적파괴인성치를 구하는 것이 가능하다. 그러나 이 방법은 충격시 관성과 충격파에 의한 노이즈의 영향으로 정확한 충격 거동을 분석하기 어렵다는 단점이 있다. 이러한 관성과 충격파에 의한 노이즈를 제거하고 정확한 충격 거동을 분석하기 위해 많은 방법이 시도되었다. 그 중 하나가 K.Takahashi가 사용한 저주파 여파기를 사용하는 것인데, 그는 이 방법

을 이용하여 계장화 충격시험기에서 나오는 노이즈를 줄이고 충격 신호를 안정적으로 받아내는데 성공하였다[7].

본 연구에서는 이러한 저주파 여파기(low pass filter)와 계장화 충격 시험기를 이용하여 저속 충격에 따른 금속복합재료의 충격 거동을 연구하였다. 충격 속도에 따른 금속복합재료와 기지재의 충격에너지 변화를 균열개시에너지와 균열전파에너지를 중심으로 연구하였으며, 동적파괴인성치를 구하였다. 또 금속복합재료와 기지재의 균열개시에너지 거동을 해석하고 동적 파괴인성치와 충격에너지의 관계를 설명하기 위하여 간단한 모델을 제시하였다.

2. 시험 방법

본 연구에 사용할 금속복합재료의 제조에는 기지재로서 AC8A와 보강재로서 Al₂O₃를 사용하였다. AC8A는 불순물에 의한 물성의 저하가 적으며, 내열성, 내마모성이 우수하고 열팽창계수가 작고 인장 강도가 다른 알루미늄합금보다 높아 자동차 및 디젤기관의 피스톤, 선박용 피스톤으로 사용되고 있다. Table 1에 AC8A의 화학적 성분을 나타내었다. 보강재로는 Al₂O₃ 단섬유와 탄소 섬유를 사용하였으며 Al₂O₃ 단섬유는 ICI사의 "Saffil" RF grade δ결정상으로 길이는 150μm이며 탄소섬유는 PAN계이며 표면이 코팅이 되지 않은 것을 사용하였다. 보강재에 관한 사양 및 기본 성질은 Table 2에 나타내었다. 금속복합재료는 용탕 주조법을 이용하여 이전의 연구에서와 동일한 조건을 이용하여 제조하였다[8]. 제조된 금속복합재료는 광학 현미경을 이용하여 제조상태를 확인하였다.

Table 1. Chemical compositions of Al alloy.

Material	Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Al
AC8A	1.1	12.7	0.9	0.12	0.8	0.1	1.57	0.15	0.04	Rem.

Table 2. Specification of alumina short fiber.

Material	Density (cm ³)	Diameter (μm)	Length (μm)	Aspect ratio(L/D)	T.S (cn)	E (cn)
Al ₂ O ₃	3.3	4	150	38	2.0	310
Carbon	1.85	16	144	9	1.8	276

제조된 시편은 T6열처리 하였다. T6열처리는 용체화 처리(solution treatment) 후 수냉한 다음 인공 시효(artificial aging) 시킨다. T6 열처리시 용체화 처리

는 510℃에서 4시간동안 수행하였으며, 인공 시효처리는 170℃에서 Rockwell경도 시험기를 이용하여 최고의 경도가 나타나는 시간을 기준으로 하였다.

인장시험편은 제조된 잉곳(ingot)으로부터 채취하였으며, 시험편의 형상과 치수는 ASTM E8을 기초로 물림부만 수정하여 제조하였다. 인장시험은 MTS(100kN)을 이용하여 1mm/min의 변위 제어로 수행하였으며, 탄성계수를 구하기 위한 진동 시험은 100×15×3mm시편에 대하여 가격 시험법으로 제 1굽힘모드에 대한 주파수 응답함수(frequency response function)를 10번 평균 처리하여 구하였으며, 여기서 peak임과 동시에 위상의 변화가 급격한 공진 주파수를 구한 다음 Euler-Bernoulli 보 이론(beam theory)을 이용하여 탄성계수를 구하였다.

충격 시험편은 ASTM E23을 기초로 제작하였으며, 충격하중과 변위, 시간, 속도, 가속도의 측정이 가능한 계장화 살피 충격 시험기(instrumented Charpy impact testing system)을 이용하였다. 이 시험기는 낙추와 시편에 Bridge 회로를 구성하여 낙추와 시편에서 나오는 신호를 변형을 증폭기(strain amplifier)와 오실로스코프를 통한 다음 컴퓨터에 저장하였다. 시험에 사용된 저주파 여파기의 차단 파장(cutoff frequency)은 3kHz이며, 시험장치의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다.

시편이 흡수한 충격에너지는 식 (1)에 의해 결정되었다.

$$E = \int P v dt \tag{1}$$

동적 파괴 인성치(K_{Id})의 계산은 최대 하중점(P_{max})으로부터 식 (2)에 의하여 계산된다.

$$K_{Id} = \frac{3SP_m}{2W^2} \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{W}\right) \tag{2}$$

여기서, P_m은 최대하중, S는 스펠거리, a와 W는 노치 길이와 폭을 각각 나타내며, F($\frac{a}{W}$)시험편의 형상비를 의미하는 무차원 다항식이다. 충격 시험은 기지재와 금속복합재료에 대하여 1, 2.8, 5.5, 7%의 충격 속도에서 수행하여 각 속도에서의 충격에너지와 동적 파괴인성치를 구하였다.

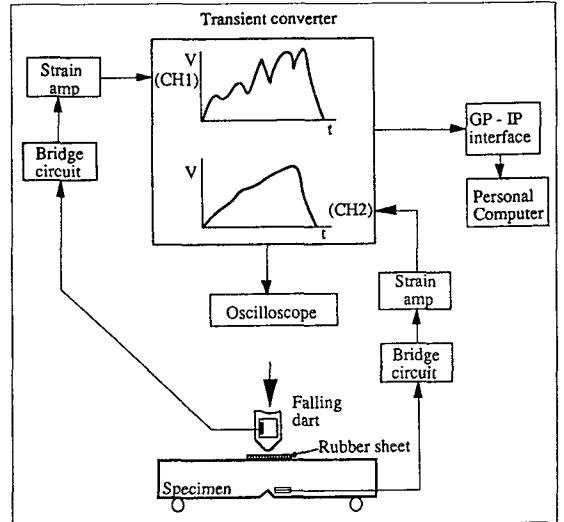


Fig. 1. Schematic diagram of impact test

3. 결과 및 고찰

3.1 미세 구조

본 연구에서 사용한 가압주조법은 액상 주조법이기 때문에 금속복합재료를 제조할 때 기포가 발생하기 쉽고 모재가 단섬유 사이로 완전히 침투되지 않을 수도 있으므로 광학사진을 통해 이를 확인하였다. Fig. 2에 AC8A와 AC8A/Al₂O₃의 광학 사진을 나타내었다. 모재나 금속복합재료 모두 기포는 관찰되지 않았으며, 금속복합재료의 경우 단섬유들이 무질서하면서도 균일하게 분포가 되어 있음을 확인하였고, 보강재와의 결합이 양호하게 되어 있는 것을 볼 수 있었다.

3.2 인장강도 및 탄성 계수

재료의 파괴 인성치나 충격 에너지는 그 재료의 탄

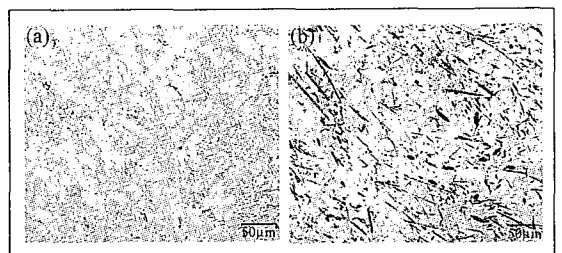


Fig. 2. Typical optical microstructure of (a)AC8A and (b) AC8A/Al₂O₃

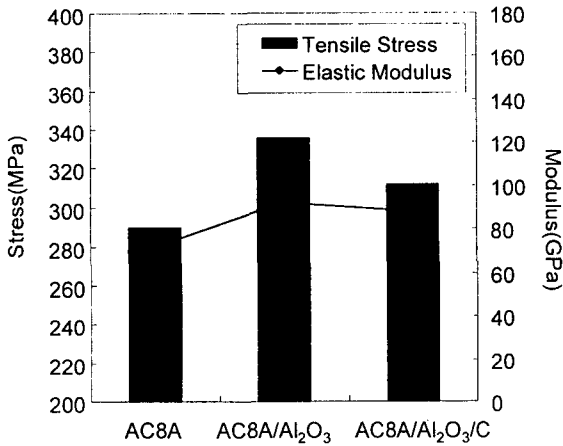


Fig. 3. Comparison of tensile stress and elastic modulus of each material

성계수나 인장강도에 영향을 받으므로 이러한 영향을 고려하기 위하여 탄성계수와 인장강도를 구하였다. 인장강도는 인장시험을 통해 구하였으며, 탄성계수는 진동 시험을 통해 구하였다. Fig. 3에 그 결과를 나타내었다. AC8A기지금속복합재료의 인장 강도와 탄성 계수는 모재에 비하여 증가하였다. 금속복합재료의 탄성 계수의 증가는 높은 탄성계수를 가진 단섬유가 전단 응력을 부담하기 때문이다. 금속복합재료 중 AC8A/Al₂O₃/C의 탄성계수는 AC8A/Al₂O₃의 탄성 계수 보다 감소하였는데, 이것은 다른 문헌[8]에서도 나타나는 결과로서 Al₄C₃의 생성이 그 원인이다.

3.3 충격 에너지

충격 에너지는 균열 개시 에너지와 균열 전파 에너지의 두 가지 나눌 수 있는데, 계장화 충격 시험기는 이러한 에너지를 분리하여 구할 수 있다. 그러나 실제적으로는 충격 시험시 발생하는 노이즈로 인해 정확한 시험치를 구하기 힘들다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구들이 수행되었으며, Takahashi 등은 3kHz 저주파 여파기를 이용하여 시험치를 안정적으로 나타내는데 성공하였다[7]. 본 연구에서도 충격 시험기에 저주파 여파기를 이용하여 충격에너지를 안정적으로 받는데 성공하였다. Fig. 4에 1m/s 와 7m/s의 충격속도에서 각 재료의 충격 속도에 따른 하중과 에너지를 나타내었다. Fig. 4의 하중과 에너지 신호는 시편의 스트레인 게이지로부터 구한 것이며, 재료나 충격 속도에 관계없이 안정적인 값을 나타내었다.

충격 속도에 관계없이 금속복합재료의 충격에너지는

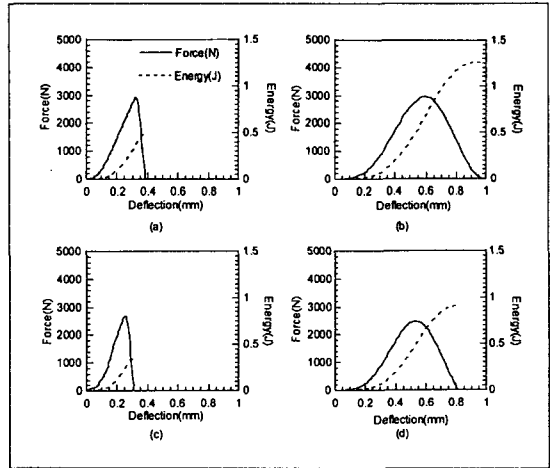


Fig. 4. Time versus energy and force curves of (a) AC8A at 1 m/s, (b) AC8A at 7m/s, (c) AC8A/ Al₂O₃ at 1m/s and (d) AC8A/ Al₂O₃ at 7m/s

모재의 충격 에너지보다 감소되었다. 이것은 C.M.Freind가 연구한 바와 같이 복합 재료의 충격 인성이 단섬유의 파괴 변형률에 의해 지배받기 때문인데, 단섬유의 첨가로 인하여 금속복합재료의 변형 능력이 상당히 저하되었기 때문이라고 사료된다.

Fig. 5에 재료의 충격 속도에 따른 충격 에너지를 나타내었다. 충격 속도의 증가에 따라 재료의 충격 에너지도 증가하였다. 이는 충격 속도 증가에 따른 재료의 항복강도 향상과 더불어 변형 능력 향상 때문이기

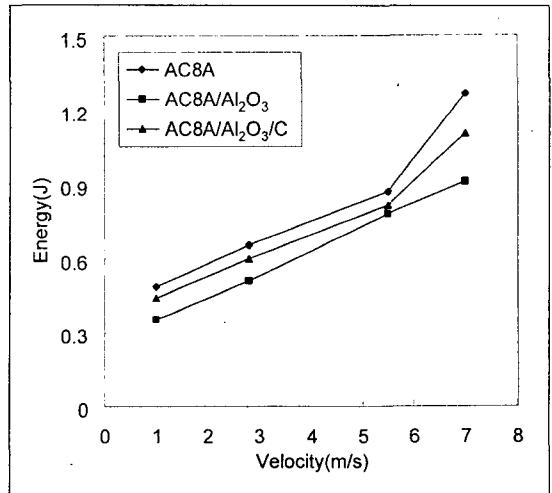


Fig. 5. Effect of impact velocity on impact energy of AC8A Al alloy and composites

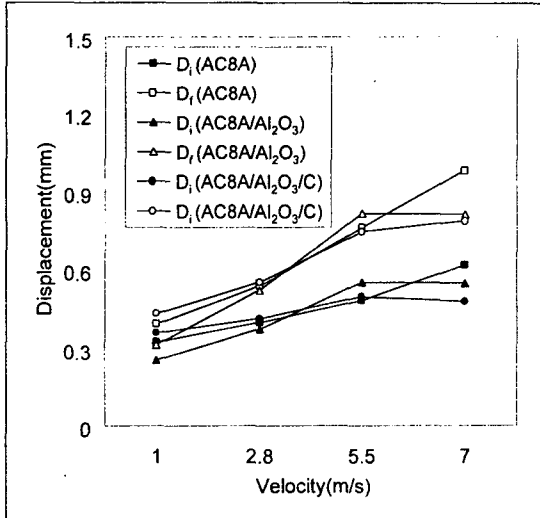


Fig. 6. Effect of impact velocity on displacement of AC8A Al alloy and composites

인한다. C.G.Lee 등은 높은 변형을 속도에서 금속복합 재료의 항복강도가 증가하는 것을 보였으며[10], Nieh 등은 Al/SiC 복합재료에 대한 초소성 시험결과에서 변형을 속도를 증가함에 따라 금속복합재료의 변형율이 증가하는 것을 보였다[11].

Fig. 6에 각 재료의 충격 속도에 따른 변형량을 나타내었다. D_f 로 표기된 재료의 파단 변형량 뿐 아니라 D_i 로 표기된 균열 개시가 시작될 때의 변형량도 충격 속도의 증가에 따라 증가하였다. 이는 충격 속도 증가에 따른 충격 에너지의 향상이 재료의 변형 능력 향상에 기인한다는 것을 나타낸다.

Fig. 7 (a)에 충격 속도에 따른 균열 개시 에너지와 균열 전파 에너지의 변화를 나타내었다. 충격 속도의

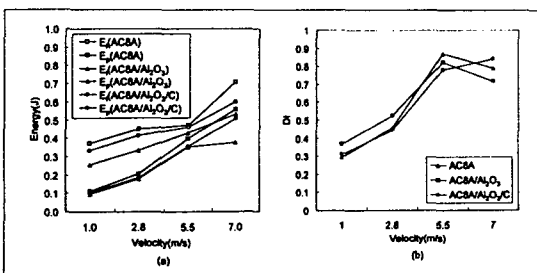


Fig. 7. Effect of impact velocity on (a) impact energy and (b) DI of each material

증가에 따라 균열 개시 에너지와 균열 전파 에너지 모두 증가하였으나, 균열 전파 에너지의 증가가 두드러져 전체 에너지 중 균열 전파 에너지의 비중이 커졌다. 이러한 현상은 모재나 보강재에 상관없이 모든 시험 재료에서 나타났다.

Fig. 7 (b)에 균열전파에너지와 균열개시에너지를 Beaumont 등이 제안한 Ductility Index라는 무차원 변수를 이용하여 나타내었다. DI(ductility index)는 균열 전파에너지와 균열 개시에너지와의 비로 나타내어지며 같은 형상을 가진 재료의 서로 다른 시험 조건에서의 충격특성을 나타낼 때 유용하다. DI가 낮을 경우 그 재료는 균열 개시에너지가 지배적이며, DI가 높을 경우 균열전파에너지가 지배적이라는 것을 나타낸다. 아래에 DI의 정의를 나타내었다.

$$DI = \frac{E_p}{E_i}$$

금속복합재료와 모재의 경우 모두 속도의 증가에 따라 DI값이 증가하는 경향을 뚜렷이 보였다.

3.4 동적 파괴 인성

금속복합재료의 동적 파괴 인성은 주로 분할 흡킨슨 바를 이용하여 구하며, 이 경우 Rice and Johnson이 제안한 연성파괴모델에 McMeeking에 의해 수치해석에 의해 계산된 균열 선단(Crack tip)에서의 응력 분포를 고려한 모델이 사용된다[10]. 그러나 이러한 모델은 본 연구에서와 같이 취성의 모재를 사용한 경우에는 적합하지 않다. 따라서 본 연구에서는 계장화된 충격시험기에서 구한 최대 충격 하중을 이용하여 동적파괴인성치를 구하였다. 일반적으로 계장화 충격 시험기를 이용하여 연성 재료의 동적파괴인성치를 구할 경우 균열선단둔화(Crack tip blunting) 때문에 동적파괴인성치가 변할 수 있으며, 이를 방지하기 위해 시편에 피로 균열을 생성시켜야 한다. 그러나 금속복합재료는 취성의 보강재로 인해 피로 균열을 생성시키는 것이 상당히 어렵다. 송정일 등은 Al6061기지 금속복합재료의 동적 파괴 인성 시험에서 피로 균열이 있는 경우와 없는 경우의 동적파괴인성치를 연구한 결과 피로 균열의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다[13]. 따라서 본 연구에서도 피로 균열없는 노치 시편에 대하여 동적 파괴 인성시험을 하였다. Fig. 8에 충격 속도에 따른 동

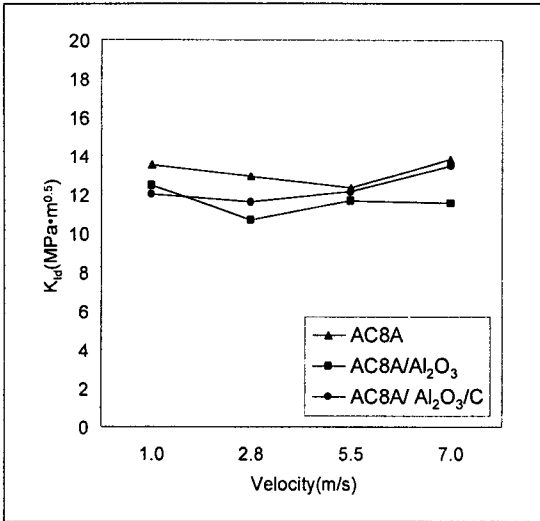


Fig. 8. Effect of impact velocity on dynamic toughness of each material

적 파괴 인성치의 변화를 나타내었다.

모재의 동적파괴인성치가 금속복합재료의 동적파괴인성치 보다는 높게 나타났으나 충격에너지와는 달리 큰 차이를 보이지는 않았으며 보강재의 변화에 따른 차이도 보이지 않았다. 동적파괴인성치의 경우 1~7% 범위의 충격 속도 범위에서는 일정하게 나타났다. 따라서 저속 충격하에서는 충격 속도에 따라 변하는 금속복합재료의 인성을 동적파괴인성치로 설명하는 것은 적합하지 않으며 충격 에너지가 금속복합재료의 인성치로 적합하다. 동적 파괴 인성치는 충격 시험시 발생하는 최대 하중에 의해 결정됨으로 충격 에너지 중 균열 개시 에너지와 상호 관계를 가지며, 이러한 상호 관계를 간단한 모델을 이용하여 제시하였다. 본 모델에서는 시편에 가해진 변형을 에너지가 균열 개시 에너지와 같다는 가정과 균열 개시 전 까지 재료가 탄성 변형을 한다는 가정에 세워졌다.

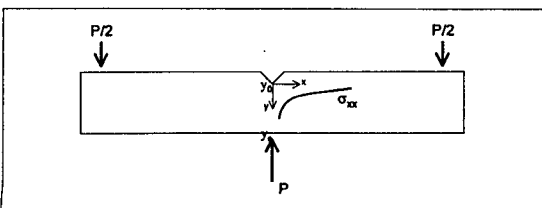


Fig. 9. Stress normal to the notch plane in Mode I

SENB(Single Edge Notched Bend)시편이 모드 (Mode) I방향으로 충격 하중을 받을 때 노치 선단에서의 응력은 Fig. 9와 같이 나타난다. 이 응력은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{xx} = \frac{K_{Ia}}{\sqrt{2\pi y}} \quad (3)$$

여기서 K_{Ia} 는 동적 파괴 인성치이며 충격 시험에서 얻은 최대 하중과 식(2)를 이용하면 얻을 수 있다. 실험에서 구한 K_{Ia} 로부터 노치 선단의 응력분포를 구할 수 있으며 이 응력 분포로부터 시편의 변형을 에너지를 구하면 균열 개시 에너지와의 상호 관계를 나타낼 수 있다. 재료의 변형을 에너지는 체적분을 통해서 구해야 하지만 시편에서 노치 이외 부분의 응력을 일반화하여 나타내기 어렵고 노치에서의 응력이 균열 개시에 지배적이라는 가정하에 노치가 있는 면에서 면적분을 하여 변형을 에너지를 나타내었다. 변형을 에너지는 식 (4)와 같다.

$$U = \frac{1}{2} \int \sigma_{xx} \epsilon_{xx} dzdy = \int \frac{\sigma_x^2}{2E} dzdy \quad (4)$$

식(3)을 이용하면 식(4)는 다음과 같이 나타내어진다.

$$U = \int \frac{1}{2E} \left(\frac{K_{Ia}}{\sqrt{2\pi y}} \right)^2 dzdy = \frac{W}{4\pi} \frac{K_{Ia}^2}{E} \int_{y_0}^{y_c} \frac{1}{y} dy = \frac{W}{4\pi} \frac{K_{Ia}^2}{E} \ln \left(\frac{y_c}{y_0} \right) \quad (5)$$

여기서 W 는 시편의 폭이다. 시편의 형상이 동일한 경우 균열 개시 에너지는 동적인성치의 자승에 비례하고 탄성계수에 반비례하는 것으로 나타났다. 식(5)를 식(6)으로 변환시키면 모재와 금속복합재료의 균열개시 에너지 비를 계산 할 수 있다.

$$\frac{U_c}{U_m} = \left(\frac{K_{Ia,c}}{K_{Ia,m}} \right)^2 \cdot \frac{E_m}{E_c} \quad (6)$$

여기서 $U_c, K_{Ia,c}, E_c, U_m, K_{Ia,m}, E_m$ 는 각각 금속복합재료와 모재의 균열개시에너지, 동적파괴인성치, 탄성계수를 나타낸다. Fig. 10에 충격시험에서 구한 금속복합재료의 균열개시에너지와 식(6)에 의하여 계산된 금

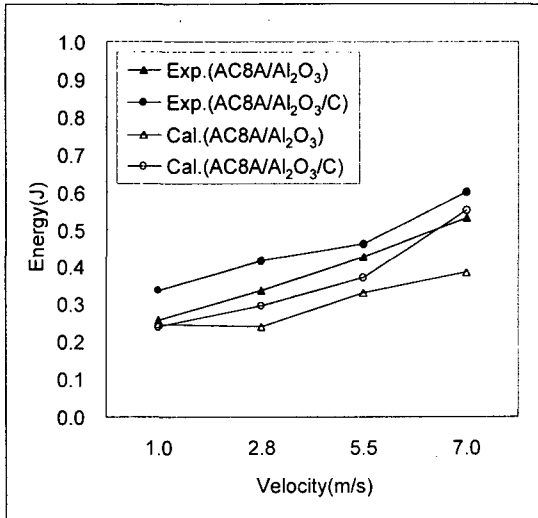


Fig. 10. Calculated and experimented values of impact energy for composites

속복합재료의 균열개시에너지를 나타내었다. 실험치와 계산치는 유사한 경향을 보였으나, 절대값에 있어서는 약간의 차이가 발생하였다. 이것은 제안된 모델이 시편은 균열 개시전까지 탄성 변형한다는 가정하에 유도되어 모재의 소성변형을 고려하지 않았기 때문이라 사료된다.

4. 결론

1. 충격 속도의 증가에 따라 모재와 금속복합재료의 충격 에너지는 증가하였으나, 동적인성치는 일정한 값을 보였다. 따라서 저속 충격에서 재료의 인성의 지표로 동적 인성치보다는 충격 에너지가 적합하다 사료된다.

2. 충격 속도가 증가할수록 충격에너지 중 균열전파 에너지의 향상이 두드러졌으며, 재료의 변형량이 증가하였다. 이로부터 충격에너지의 증가 원인은 충격 속도 증가에 따른 재료의 변형 능력 향상에 기인한다는 결론을 얻었다.

3. 동적파괴인성치와 균열개시에너지의 관계를 설명하기 위하여 간단한 모델을 제시하였으며, 균열개시에너지는 동적파괴 인성치의 자승에 비례하고 탄성계수

에 반비례하는 것을 보였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단에서 지원한 1996년도 하반기 중견과학자 일본연수에 의해 수행된 것이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Flom, Y and Arsenault, R.J., "Effect of particle size on fracture toughness of SiC/Al composites material," *Acta metall.*, Vol.37, 1989, pp. 2413~2423.
2. Downes, T.J. and King, J.E., "The effect of microstructure on the fracture toughness of a metal matrix composite," *Composites*, Vol.24, 1993, pp.276~281.
3. Manoharan, M and Lewandowski, J.J., "Crack initiation and growth toughness of an aluminum metal matrix composite," *Acta metall.*, Vol.38, 1990, pp.489~496.
4. Crowe, C.R., Gray, R.A. and Hassen, D.F., "Microstructure controlled fracture toughness of SiC/Al metal matrix composites," *ICCM 5*, 1985, pp.843~866.
5. Couque, H., Asaro, R.J., Duffy, J., and Lee, S.H., "Correlations of Microstructure with Dynamic and Quasi-Static Fracture in a Plain Carbon Steel," *Metall. Trans.*, Vol.19A, 1987, pp.2179~2208.
6. Lee, C.G., Kwon, D.G and Lee, S.H., "Microfracture Behavior of Al-SiC Composites under Dynamic Loading," *Metall. Trans.*, Vol.28A, 1997, pp.2162~2170.
7. Aggag, G. and Takahashi, K., "Study of Oscillation Signals in Instrumented Charpy Impact Testing," *Polymer Eng. and Sci.*, Vol.36, 1996, pp.2260~2266.
8. Song, J.I. and Han, K.S., "Mechanical Properties and Solid Lubricant Wear Behavior of Al/Al₂O₃/C Hybrid Metal Matrix Composites Fabricated by Squeeze Casting Method," *J.*

Comp. Mater., Vol.31, 1997, pp.316~344.

9. Taya, M. and Arsenault, R.J., Metal Matrix Composite-Thermomechanical Behavior, Pergamon Press, New York, 1989.

10. Cho, K., Lee, S., Chang, Y.W., and Duffy, J., "Dynamic Fracture Behavior of SiC Whisker-Reinforced Aluminum Alloys," Metall. Trans., Vol.22A, 1991, pp.367~375.

11. Nieh, T. and Wadsworth, J., "High-strain-rate

Superplasticity in Aluminum Matrix Composites," Mat. Sci. and Tech., Vol.A147, 1991, pp.129-142.

12. Agarwal, B.D. and Broutman, L.J., Analysis and Performance of Fiber Composites, A Wiley-Interscience Publication, 1980.

13. 송정일, 가압주조법에 의한 단섬유보강 금속복합재료의 파괴인성과 피로균열전파 거동, 박사학위논문, 포항공과대학교, 1996, pp.114.