

SiC_n/6061Al 복합재료의 정적 및 동적파괴인성 평가

안 행 근

전북대학교 공과대학 신소재공학부, 자동차신기술연구소

Static and Dynamic Fracture Toughness Evaluation in SiC_n/6061Al Composite

H. K. Ahn

Faculty of New Materials Engineering, AHTRI, Chonbuk National University, Chonju 561-756

(1998년 3월 14일 받음, 1998년 4월 24일 최종수정본 받음)

초 록 SiC_n/6061Al 복합재료의 파괴인성을 평가하기 위하여 정적파괴인성에 대해서는 복수시험편법을, 동적파괴인성시험에 대해서는 stop block법을 실시하였다. 주균열은 예비균열의 선단에서 시험편두께방향 전역에 걸쳐서 일시에 발생하는 것이 아니고, 균열발생의 초기단계에서 국부적으로 형성된 균열이 시험편두께방향으로의 균열의 확장을 완료한 후 주균열로 이행해 간다. 정적 및 동적시험에서 컴플라이언스변화율법에 의해 검출된 균열발생점은 균열확장의 완료점과 거의 일치하고 있기 때문에 본 재료의 파괴인성 결정에 유효하다. 본 재료에서 동적파괴인성치는 정적파괴인성치보다 크게 나타났다. 이것은 동적충격시 입자파괴에 의한 에너지의 흡수·분산효과와 균열진전경로의 큰 편향에 기인한다고 생각된다.

Abstract In order to evaluate the fracture toughness of SiC_n/6061Al Composite, multiple specimen technique for static fracture toughness test and stop block method for dynamic fracture toughness test were carried out. It is confirmed that a main crack does not initiate along the whole thickness direction from the precrack tip. There is a certain stage at which locally formed cracks connect with each other through the thickness direction at an early state of crack growth. In both fracture toughness tests, the crack initiation points detected by compliance change rate method almost correspond to completion of crack extension in the specimen thickness direction. Therefore, the compliance change rate method is effective for the definition of fracture toughness of this material. In this material, the J value of the dynamic fracture toughness is larger than that of the static fracture toughness. This is the reason that the crack propagation has a high tendency to repeat a large deflection, and the energy absorption and dispersion effect is occurred by the particle cracking in the dynamic fracture toughness test.

1. 서 론

경량, 고강성화의 요구로부터 Al합금을 기지(matrix)로 하는 금속기복합재료(MMC)가 개발되어 자동차나 항공기 등 수송기계산업에 많은 응용이 기대되고 있다. 금속기복합재료의 최대응용분야인 자동차산업에서는 비강도, 내열성, 내마모성 등 금속기복합재료의 우수한 특성을 이용하여 엔진부품에의 용도개발을 진행한 결과, 디젤엔진피트론, 콘벡팅로드 등에 실용화되고 있으며^{1,2)} Al합금을 기지로 하는 금속기복합재료에 관하여 많은 연구·개발이 수행되어 왔다. 그러나 이들 연구는 주로 강도특성 등 기계적성질을 해석하는데 중점을 두고 있고 구조용재료로서 사용하기 위해 필요한 파괴인성평가 및 파괴특성에 관한 연구는 적다³⁾. 더욱이 금속기복합재료는 강화재와 합금기지의 계면박리, 강화재의 파괴 등 복잡한 파괴거동을 나타내기 때문에 파괴인성에 관해 일반적인 정의가 되어 있지 않고 다만 강화재의 체적율, 형상, 크기, 기지와 강화재의 계면상태등에 의해서 지배되는 복합재료특유의 파괴를 일으키는 것으로 알려져 있다. 또 금속기복합재료의 실용화에 관한 기술적과제의 하

나는 재료평가방법의 확립이다. 특히 구조용재료로서 이용하는 경우, 기기 및 구성부재의 설계 혹은 재료선택에 있어서 파괴역학에 기초한 재료특성 즉 파괴인성은 신뢰도 분석을 위해서도 중요한 파라메타가 된다. 그러나 복합재료에 대해서는 파괴인성에 대한 평가방법이 확립되어 있지 않다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 SiC입자강화 6061Al 합금복합재료에 대하여 탄소성파괴역학에 기초한 정적 및 동적파괴인성시험을 실시하고, 연성균열발생점의 검출과 그 물리적의의를 명확히 하기 위하여 복수시험편법(multiple specimen technique)과 stop block법⁹⁾을 실시하여 파괴기구, 파괴인성을 비교·검토함으로써 금속기복합재료의 파괴인성평가법 확립을 위한 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 복합재료는 6061Al합금을 기지, SiC입자를 강화재로 하고, SiC입자의 체적율을 20%로 조절하여 분말야금 및 압출가공에 의해 제조하였다. 사용된 6061Al합금 및 SiC의 조성은 표 1에 나타낸다. SiC입자와 6061Al합금분말을 혼합하고, 98MPa의 압력으로 pre-

Table 1. Chemical compositions of 6061Al alloy and SiC particle(wt%).

6061	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Al
	0.86	0.28	0.24	0.21	0.15	0.13	bal.
SiC ₀	SiC	SiO ₂	C	Al	Fe		
	99.0	0.1	0.3	0.01	0.02		

form을 성형한 다음, 6061Al합금의 반응용온도 570°C에서 2mm/min의 램 속도로 열간압출시켜 제조하였다. 제조된 복합재료는 530°C×2시간 용체화처리, 175°C×8시간 인공시효하는 T6열처리(overaged)를 하였다. 열처리를 마친 두께 12mm, 폭 40mm의 압출재로부터 기계가공에 의해 L-T방향으로 시료를 채취하여 3점굽힘시험편(10×10×55mm)을 제작하였다. 제작한 시험편은 ASTM E813-895)에 의거하여 $a_0/w=0.6$ (a_0 : 초기균열길이, w : 시험편폭)이 되도록 피로예비균열(fatigue precrack)을 추가하였다.

정적파괴인성시험은 ASTM E813-89에 의거해서 Autograph(Shimatzu, 용량1ton)에 의해 cross head 속도 0.3mm/min로 실온(20°C)에서 시험하였다. 균열발생점의 검출에는 컴플라이언스변화율법(compliance change rate method)을 이용하였다. 컴플라이언스변화율법에 의해 검출한 균열발생점의 유효성을 검토하기 위해 복수의 시험편을 이용하여 여러 하중점 변위에서 시험을 중단하고 각 단계에서의 균열진행상황을 관찰하는 복수시험편법⁹⁾을 실시하였다.

동적파괴인성시험은 계장화살피충격시험기(용량 490J)를 이용하여 실온에서 실시하였다. 부하속도는 Server에 의해 제창되고 小林⁷⁾ 등에 의해서 수정된 조건식 $E_0 \geq 3E_1$ (E_0 : 부하에너지, E_1 : 전체흡수에너지)를 만족하는 0.332m/sec로 하였다. 동적파괴인성치는 CAI(Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing)시스템⁸⁾에 의해 산출·평가하였다. 이 시스템은 시험기의 해머 모서리 부분에 변형게이지를 부착, 브리지회로를 구성하여 하중센서로 하며, 해머 회전축에는 포텐쇼메타를 장착해서 회전각 검출에 의한 변위센서로 한다. 균열발생점의 검출에는 컴플라이언스변화율법을, 파괴인성치의 산출은 Rice의 간편식⁶⁾, 식(1)을 적용하고 있다. 또한 각 변위에서의 균열진행상황과 컴플라이언스변화율법에 의해 검출한 균열발생점의 유효성을 검토하기 위해 복수의 시험편으로 stop block법⁹⁾을 실시하였다. Stop block법은 계장화살피충격시험시, 목표변위에 대하여 각각 두께가 다른 block을 바꾸어 장착함으로써 임의의 변위에 대하여 살피충격시험기의 해머를 강제적으로 정지시켜 각 변위에서의 균열진행상황을 추적하는 시험법이다(정적 및 동적시험에서 하중을 강제적으로 정지시키는 시험법을 총칭하여 interrupted test라고 함).

$$J = \frac{2E_1}{B(w-a_0)} \quad (1)$$

E_1 : 균열발생까지의 흡수에너지 w : 시험편 폭

B: 시험편 두께

a_0 : 초기균열길이

Interrupted test후의 시험편은 파단면에 발생한 균열진전량의 표시(marking)를 위해 피로파단시킨 후, ASTM E813-89에 준거하여 예비균열길이(a_0) 및 균열진전길이(Δa)를 측정현미경(Olympus, STM5) 및 주사전자현미경(SEM)에 의해 실측하였다. 특히 시험조건에 따른 균열진행상황을 보다 명확히 검토하기 위하여 시험 후의 파편은 시험편 두께방향의 중앙부분에서 균열진행방향과 나란한 방향으로 절단한 것을 연마하여 SEM에 의해 관찰하였다. 또 이 관찰에 의해 얻은 정보로부터 파편거칠기를 구하기 위해 고해상도영상처리장치(ニレコ製, LUZEX III)를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

미세조직 및 파면

그림 1에 SiC₀/6061Al복합재료의 SEM 조직사진을 나타낸다. SiC입자가 비교적 균일하게 분포되어 있고 20 μ m 이상의 입경을 갖는 SiC입자도 관찰된다. 그리고 기공등의 제조결함은 압출에 의해서 제조하기 때문에 발견되지 않는다. 이 관찰결과로부터 영상처리장치를 이용하여 SiC입자의 체적율(f_v), 평균입경(D_v) 및 평균입자간거리(d_v)를 구한 결과 각각 21.5vol%, 7.2 μ m, 26.3 μ m였고, 이때의 평균입자간거리는 식 $d_v = D_v \cdot (1-f_v)/f_v$ 를 이용하여 산출하였다¹⁰⁾.

그림 2는 정적 및 동적파괴인성시험후 양쪽파단면의 동일부분을 일치시킨 SEM 사진이다. 좌우의 사진이 대칭되어 있고 각각 동일기호의 부분이 서로 대응하고 있다. 정적 및 동적시험에서 거시적인 파면의 형태는 유사하다. 합금기부 부분은 미세한 등축dimple(A,D)이고, SiC입자의 파단(B,E) 및 입자/기지계면의 박리부분(C,F)이 관찰된다. 이로부터 균열은 SiC입자를 파괴 또는 입자/기지계면의 박리를 일으키며 진전해 간다고 생각된다. 파면에서의 dimple의 크기는 기지금속의 소성변형정도 즉 연성과의 관계를 나타내게 되는데, 그림 2에서 미세한 dimple의 존재는 낮은 연성을 의미하며 결국 파괴인성도 낮게 될 것으로 생각한다.

균열발생점

그림 3은 정적 및 동적파괴인성시험에서 구한 하중-변위곡선과 컴플라이언스변화율법에 의한 균열발생점을 나타

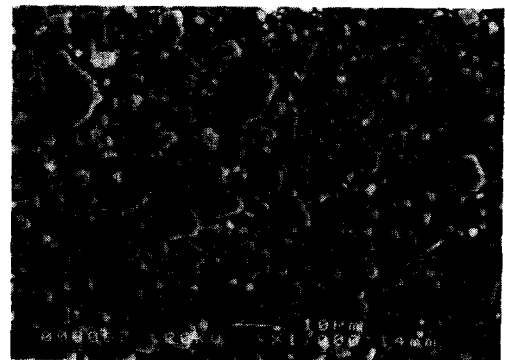


Fig. 1. SEM micrograph of 20vol.% SiC₀/6061Al.

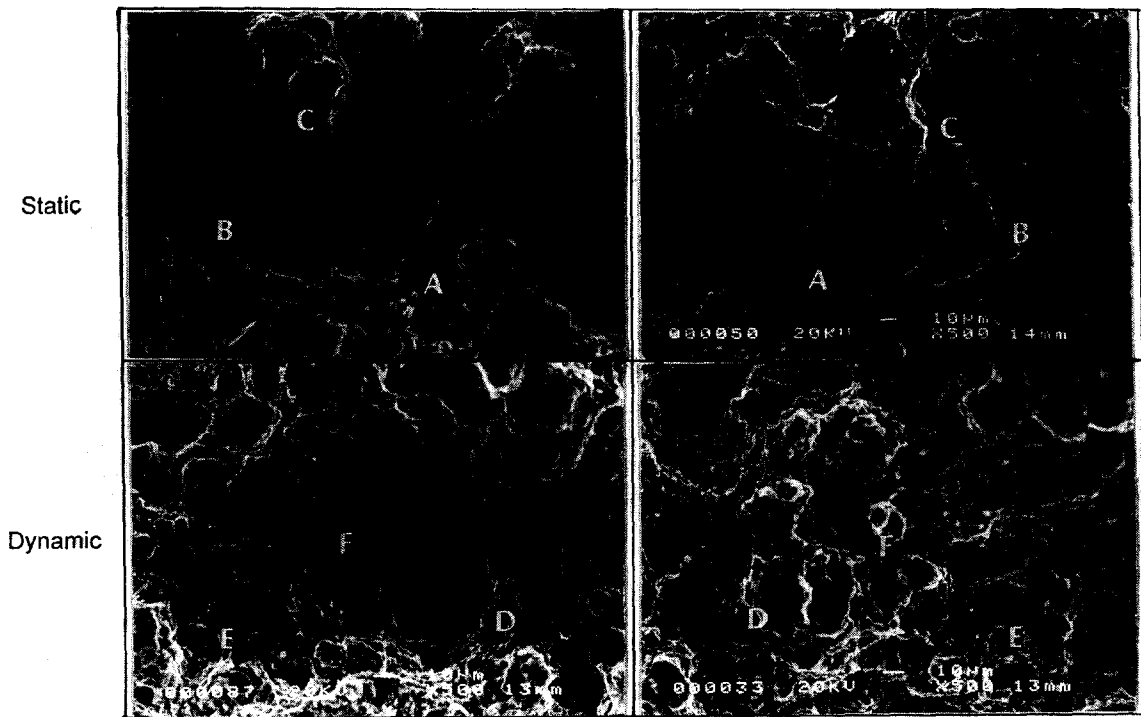


Fig. 2. SEM fractographs matched with fracture surfaces.

낸다. 최대하중점부근의 곡선형태로 보아서 양 시험에서 모두 균열의 안정성장영역의 크기는 대단히 작을 것으로 생각되며, 전체적으로 취성파괴에 가까운 파괴양상을 나타내고 있다. 컴플라이언스변화율법에 의해 검출된 균열발생점은 정적시험에서는 0.102mm, 동적시험에서는 0.134mm로 동적시험쪽이 크다.

본 재료에서는 균열이 발생, 진전하면서 매우 적은 양의 소성변형이 일어나기 때문에 컴플라이언스변화율법에 의한 파괴개시점과 실제의 파괴개시점은 큰 차이없이 잘 일치할 것으로 생각된다. 이것을 검토하기 위하여 정적파괴인성시험에 대해서는 복수시험편법을, 동적파괴인성시험에 대해서는 stop block법을 실시하여 실제의 파괴개시점을 구하고자 하였다. 탄소성파괴역학은 미세균열이 존재하는 재료가 외력을 받을 때 그 외력에 의하여 발생하는 균열개시점

에서의 저항을 파괴인성으로 정의하고 있기 때문에 이 균열개시점이 갖는 물리적의의는 중요하다.

그림 4는 정적복수시험편법 및 동적 stop block법에 의한 시험에서 균열발생단계의 파면을 관찰한 SEM 사진이다. 중앙의 일부분에 파단 또는 박리된 SiC입자가 보이는 부분이 외력에 의해 균열이 발생한 부분이고, 상하부의 미세한 dimple이 뭉개져 있는 것처럼 보이는 부분은 피로하중에 의한 파면이다. 또 균열발생단계에 있어서 균열은 시험편두께방향의 진전에 걸쳐서 일시에 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 균열은 구속조건이 큰 시험편두께 중앙부분으로부터 발생한 후, 시험편 두께방향으로의 진전 즉 균열의 확장이 끝난 후에 주균열방향으로 이행해 가는 것으로 생각된다.

그림 5는 파면의 시험편두께방향에 대해서 시험편표면으로부터 중앙부까지 250µm씩 구획하여 균열진전길이 Δa를

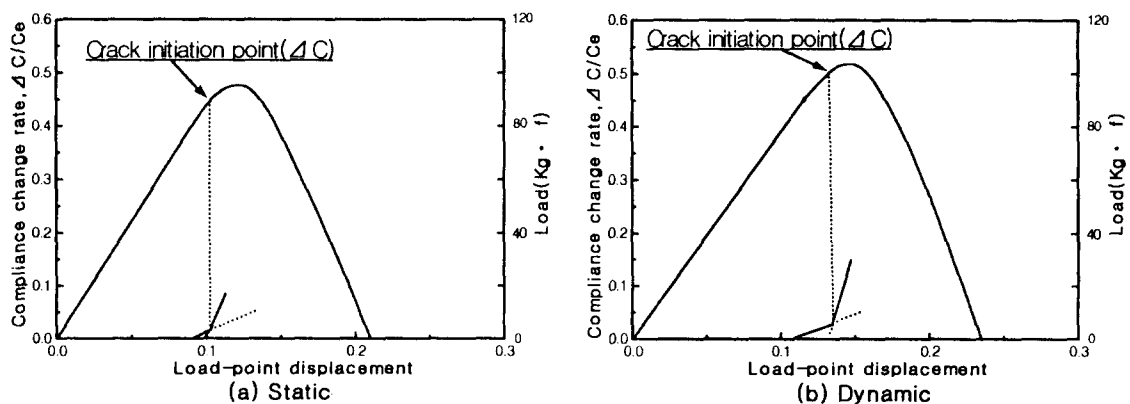


Fig. 3. Load-load point displacement curves and detected crack initiation points.

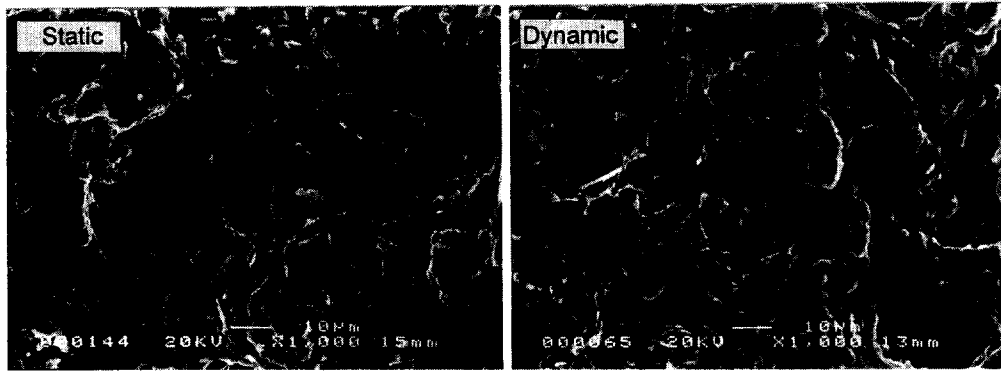


Fig. 4. SEM fractographs of fatigue precrack tip region after the interrupted tests.

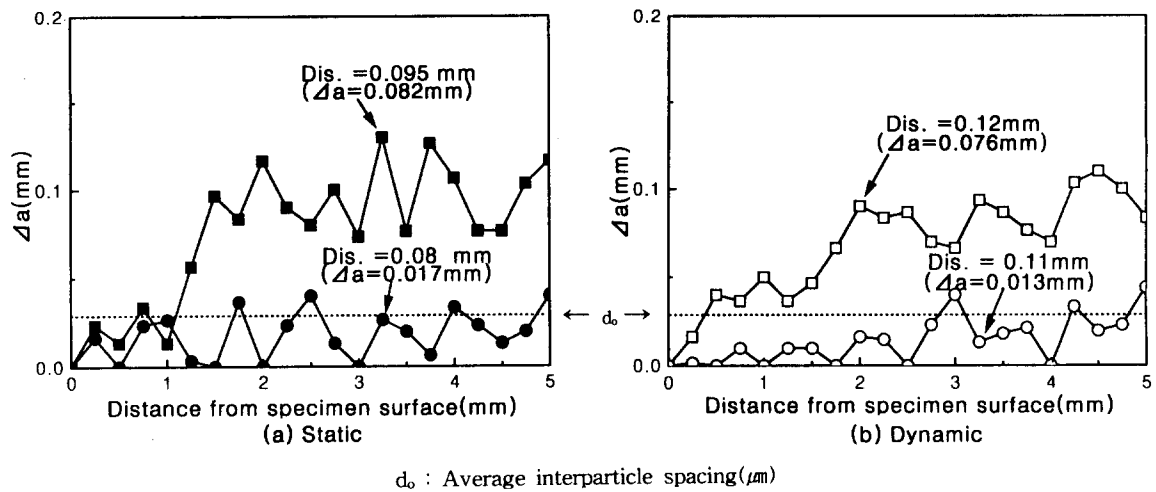


Fig. 5. Distribution of crack lengths perpendicular to the crack growth direction measured by SEM fractographs.

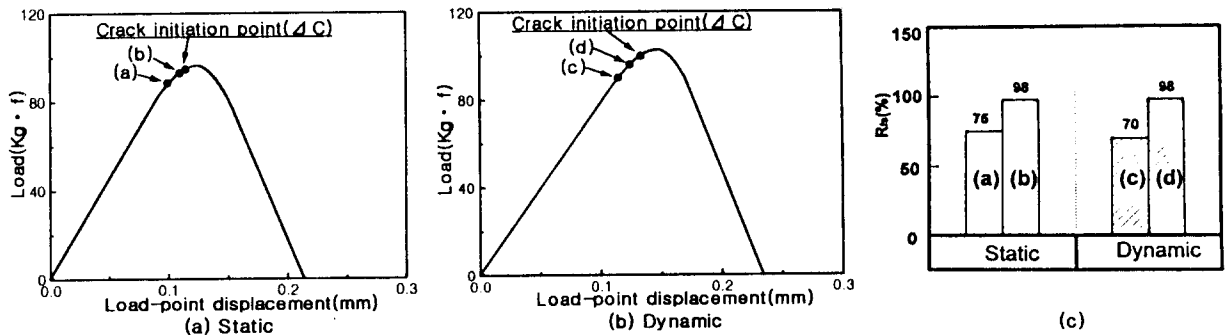


Fig. 6. Extension ratio of fracture surface width, R_s , at various load-point displacement.

측정한 결과이다. 양 시험에서 시험편두께방향의 각 위치에
서의 Δa 의 편차를 확인할 수 있으며, 특히 정적시험에서
그 경향이 현저한 것으로 보아 국부적인 균열진전이 큰 것
을 알 수 있다. 그림중의 점선은 미세조직으로부터 측정한
평균입자간거리를 나타낸 것이다. 예비균열선단의 입자분
포에 의해서 부분적으로 예비균열선단의 최근점입자와 예
비균열사이의 연결이 일어나기 때문에 균열의 확장이 시험
편두께방향 전역에 걸쳐 종료하는데에는 적어도 평균균열
길이가 평균입자간거리이상까지 진전되는 것이 필요하다고
생각된다. 그림 5에서 알 수 있듯이 평균입자간거리이하의
균열길이인 정적시험의 0.08mm의 변위량의 점과 동적시험

의 0.11mm 변위량에서 균열의 확장이 종료하지 않는 것을
알 수 있다. 균열의 확장을 보다 명확히 하기 위하여 시험
편두께방향에 대하여 두께방향으로 확장한 균열폭의 비율로
서 나타내는 파면확장율 (R_s)을 $R_s = \sum S/B$ 식에 의해 산출
하였다. 여기서 B는 시험편두께, S는 시험편두께방향의 균
열폭이며, 각 변위에서의 산출결과를 그림 6에 나타낸다. R_s
는 정적시험의 경우, (a)의 변위 0.08mm에서는 75%, (b)
의 변위 0.095mm에서는 98%이다. 균열길이는 각각 (a)
에서는 평균입자간거리 이하, (b)에서는 평균입자간거리의
약 3배에 해당한다. 동적시험의 경우, (c)의 변위 0.11mm
에서 R_s 는 70%, (b)의 변위 0.12mm에서는 98%이며,

균열길이는 (c)에서는 평균입자간거리이하, (d)에서는 평균입자간거리의 약 3배에 해당한다. 이로부터 양 부하조건 하에서 균열길이 $\Delta a = 0.09\text{mm}$ 부근에서는 균열의 확장이 종료하는 것으로 추측되고, 이 균열길이 0.09mm 는 평균입자간거리의 약 3.5배에 상당한다. 또 그림 6의 (a) ~ (d) 점은 모두 하중-변위곡선상에서는 탄성한부근에 위치하므로 결국 탄성한부근에서 균열의 확장은 종료한다고 생각된다. 컴플라이언스변화율법에 의한 검출점은 균열의 확장이 종료하는 것보다도 다소 지난 단계에서 검출되고 있다. 그러나 균열확장종료단계와의 편차는 매우 작고, 단일시험편 으로부터 파괴인성치를 얻을 수 있다는 간편성의 면에서 본 재료에 적용하는 것은 유효하다고 생각한다.

파괴인성치의 평가

그림 7은 본 연구에서 구한 J- Δa 곡선이다. 동적시험쪽 이 정적시험보다 전체적으로 약 20% 정도 큰 J값을 보이고 있다. 일반구조용재료의 경우 동적파괴인성치는 같은 시험 온도의 정적파괴인성치보다 낮다¹¹⁾는 일반적인 현상과는 상반되는 결과이다. 이것은 두가지 요인이 복합적으로 작용한 것으로 생각된다. 첫째로 동적파괴인성시험시 발생하는 탄성파에 의한 입자파괴의 영향이다. 금속기복합재료에서 강화재의 체적율이 높아지면 입자간 간격이 좁아지므로 입자주위에 형성된 소성영역이 서로 겹쳐서 전체적인 응력상태는 높게 된다. 이 상태에서 동적파괴인성시험시 발생하는 탄성파는 입자를 미세하게 파괴시키게 된다. 입자가 파괴되거나 계면이 분리될 때 에너지가 흡수·분산되므로 동적파괴인성치가 커지게 된다. 두 번째로는 균열진전경로의 편향 정도의 영향에 의한 것이라고 생각되며 이에 대해서는 아래에 언급한다. Cho¹²⁾ 등도 2124A1-SiC_w 복합재료에 대한 파괴인성시험에서 동적파괴인성치가 정적파괴인성치에 비하여 30% 정도 높다고 발표한 바 있으며, 본 연구자가 이미 발표한 SiC_w/AC8B 복합재료의 파괴인성시험 결과³⁾와도 동일한 경향이다.

그림 7에는 여러가지 정의에 의한 J값도 J- Δa 곡선상에 나타냈다. 세로축 부근의 직선은 편의상 $J = 2\sigma_{flow}\Delta a$ 에 근사시킨 둔화직선인데 이 직선과 R곡선의 교점 $J_d(R)$ 및 $J_m(R)$ 은 종래 J_{IC}시험법에서 균열발생점으로 하는 점이다.

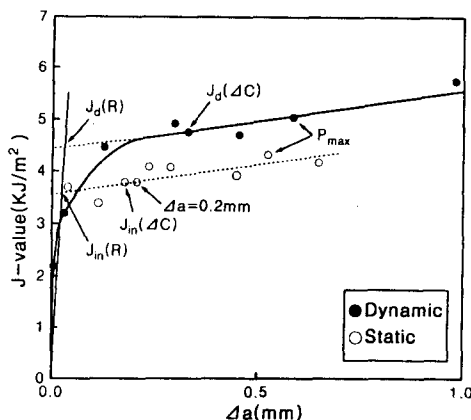


Fig. 7. J- Δa curves and crack initiation points represented by various method on J- Δa curves.

또 P_{max} 는 최endah중점에서의 J값, $\Delta a = 0.2\text{mm}$ 는 개정후의 ASTM 규격의 J_{IC}시험법에서 균열발생점으로 삼는 것으로 균열길이 0.2mm 의 점으로부터 둔화직선에 평행하게 그은 선과 R곡선과의 교점에서의 J값을 나타내고 있다. 앞에서 검토한바와 같이 컴플라이언스변화율법에 의한 검출점, $J_d(\Delta C)$ 및 $J_m(\Delta C)$ 는 실제의 균열발생점보다 다소 뒤의 단계를 검출하는 것으로부터 이보다도 큰 Δa 측에 위치하는 P_{max} , $\Delta a = 0.2\text{mm}$ 의 점은 균열발생단계로 적용하기에는 부적당하다. 또 J(R)은 측정점이 너무 작기 때문에 신뢰성 있는 값이라고는 할 수 없다. 여기서 J(R)값과 J(ΔC)값을 비교하면 정적시험의 경우 $J_m(R)$ 은 $0.9J_m(\Delta C)$, 동적시험의 경우 $J_d(R)$ 은 $0.9J_d(\Delta C)$ 가 된다. 한편, 그림 6에서 검토한 바와 같이 균열발생단계에 있어서 균열의 확장은 양 시험에서 모두 $\Delta a = 0.09\text{mm}$ 부근에서 종료하는 것으로 예측하였다. R곡선상에서 이 값을 J(0.09)로 하고 J(ΔC)와 비교하면, 정적시험의 경우 $J_m(0.09)$ 은 $0.95J_m(\Delta C)$, 동적시험에서는 $J_d(0.09)$ 은 $0.95J_d(\Delta C)$ 가 된다. 따라서 본 재료의 경우, 엄밀한 의미에서 정적파괴인성(J_m)은 $0.9 \sim 0.95J_m(\Delta C)$, 동적파괴인성(J_d)은 $0.9 \sim 0.95J_d(\Delta C)$ 에 균열발생을 의미하는 파괴인성치가 존재한다고 할 수 있다.

파면거칠기를 이용한 파면형태의 비교

앞에서 검토한 바와 같이 본 재료는 정적 및 동적부하조건에 따라서 파괴인성치가 다르다. 따라서 양 부하조건에 있어서 파괴형태를 조사하고, 파괴과정 및 파괴인성치와의 관련에 대하여 검토한다.

그림 8은 파면거칠기를 이용한 파괴형태의 비교를 위하여, 시험후의 파면을 시험편두께방향의 중앙부분에서 균열진전방향과 나란하게 절단하여 파면의 측면을 관찰한 SEM 사진이다. 양 부하조건에서 파면의 거칠기가 다르고 동적시험쪽이 파면의 요철이 더 큰 것을 알 수 있으며, 파단된 입자 또는 입자/기지계면에서 박리된 입자를 관찰할 수 있다. 이들 파면측면의 관찰로부터 거시적인 파면거칠기(R_L)을 구하였다. R_L 은 투사된균열길이(L)에 대한 진균열길이(L_T)의 비, 즉 $R_L = L_T/L$ 로 주어진다¹³⁾.

그림 9에 파면거칠기의 측정방법과 예비균열선단으로부터 $50\mu\text{m}$ 씩 분할하여 산출한 결과를 나타낸다. 동적시험쪽이 전체적으로 R_L 이 크고, 그 편차도 비교적 크다. 균열이 진행해 갈 때 편향의 정도가 크고 편향빈도가 클수록 R_L 은 크게되기 때문에 동적시험쪽에서 이러한 경향이 강하며, 따라서 긴 균열경로를 진전해 가는 것으로 생각된다. 앞에서 검토한 바와 같이 본 연구에서 동적시험의 J값이 정적시험의 J값보다 큰 것은 균열의 편향에 의한 긴 균열경로를 형성하는 것이 큰 요인이라고 생각된다.

4. 결 론

SiC_w/6061Al 복합재료에 있어서 정적 및 동적파괴인성시험을 실시하고 파괴거동과 파괴인성을 평가한 결과 다음의 결론을 얻었다.

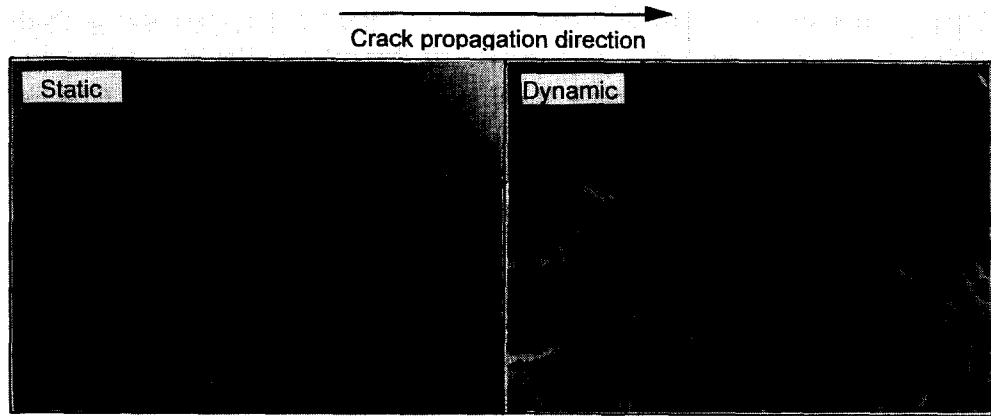


Fig. 8. Crack path morphologies of fracture toughness specimens.

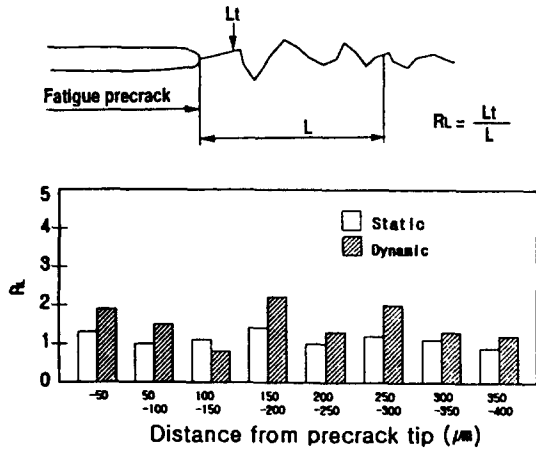


Fig. 9. RL distribution ahead of precrack tip.

1) 파괴시 균열은 입자의 파단 또는 입자/기지 계면의 박리에 의해 진행되며, 기지금속의 소성변형이 작아서 취성 파괴에 가까운 파괴양상을 나타낸다.

2) 정적 및 동적파괴인성시험에서 균열의 확장은 $\Delta a = 0.09\text{mm}$ 부근에서 종료하며, 이 균열길이는 평균입자간거리의 약 3.5배에 해당한다.

3) 컴플라이언스변화율법에 의한 균열발생점은 두 시험 조건에서 모두 균열확장의 종료단계와의 편차가 매우 작기 때문에 본 재료에 적용하는 것은 유효하다.

4) 동적파괴인성치가 정적파괴인성치에 비해서 약 20% 정도 크게 나타났다. 이것은 동적충격시 입자파괴에 의한 에너지 흡수·분산효과와 동적파괴인성시험에서의 균열진전경로의 큰 편향에 기인한다.

감사의 글

본 연구는 전북대학교 자동차신기술연구소의 지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 日本金屬學會會報 第30卷 第4號, 277 (1991)
2. 大藏明光, 鐵と鋼, 74, 413 (1988)
3. H.K.Ahn and T. Kobayashi, Scripta Materialia, Vol. 37, No. 12, 1973 (1997)
4. C.M. Friend, Mater. Sci. and Tech., 5, 1 (1989)
5. ASTM E813-89, "Annual Book of ASTM Standards", ASTM, Phila., 698 (1989)
6. W.L. Server, J. Test. Eval., 29, 29 (1987)
7. T. Kobayashi, I. Yamamoto and M. Niinomi, Eng. Fracture Mech., 83, 26 (1987)
8. J.R. Rice, P.C. Paris and J.G. Merkle, "ASTM STP 536", ASTM, Phila., 231 (1973)
9. T. Kobayashi and M. Niinomi, Nuel. Eng. Design, 27, 111 (1984)
10. J.K. Shang and R.O. Richie, Acta Metall., 37, 2267 (1989)
11. S.T. Rolfe and J.M. Barsom, "Fracture and Fatigue Control in Structures Applications of Fracture Mechanics", Prentice-Hall, New Jersey, p. 107
12. K. Cho, S. Lee, Y.W. Chang and J. Duffy, Metall. Trans. A, 22, 367 (1991)
13. E.E. Underwood and K. Banerji, "Quantitative Fractography", Metals Handbook, Vol. 12, 193 (1987)