

SiC_n/Al합금 복합재료의 파괴거동에 미치는 부하조건 영향

안 행 근

전북대학교 공과대학 신소재공학부, 자동차신기술연구소

Effect of Loading Conditions on the Fracture Behavior in SiC_n/Al Alloy Composite

H. K. Ahn

Faculty of New Materials Engineering, Institute for Automobile High-Technology, Chonbuk National University, Chonju, 561-756

(1997년 7월 28일 받음, 1997년 9월 22일 최종수정본 받음)

초 록 SiC_n/Al합금 복합재료에 있어서 동적 및 정적파괴인성시험을 실시하고 파괴거동에 미치는 부하조건 영향 검토하였다. 동적파괴인성시험은 CAI시스템을 이용하여 1.5m/sec의 부하속도로 실시하였고, 정적파괴인성시험은 만능시험기를 이용하여 0.3 mm/min의 부하속도로 실시하였다. 또한 파괴과정을 명확히 해석하기 위하여 동적부하조건에 대해서는 stop block법을, 정적부하조건에 대해서는 복수시험편법을 이용하였다. 균열의 발생 및 성장은 부하조건에 의해 크게 영향을 받으며, 변위량에 대한 균열의 발생은 정적부하조건에서 더 빨리 일어나고, 균열의 성장은 동적부하조건에서 더 급격하다. 또한 부하조건은 파괴의 형태에도 크게 영향을 미치며, 동적부하조건에서는 정적부하조건에 비하여 균열이 입자부분(입자의 파단 또는 박리)을 통과해 가는 경향이 크고 비교적 많은 편향을 반복해서 진행해 가기 때문에 파괴인성치도 크다.

Abstract Dynamic and static fracture toughness tests were performed in the SiC_n/Al alloy composite and the effect of loading conditions on the fracture behavior was investigated. The dynamic toughness test was carried out at a loading rate of 1.5m/sec using CAI system, and the static toughness test was carried out at a crosshead speed of 0.3mm/min using an universal testing machine. To demonstrate the fracture process, stop block method for dynamic loading condition and multiple specimen technique for static loading condition were also conducted. Crack initiation and growth are strongly influenced by the loading conditions: crack initiation to load point displacement occurs quickly in the static loading condition, while crack growth is more rapidly in the dynamic loading condition. Fracture morphology is also strongly influenced by the loading conditions: the crack has a high tendency to propagate through the particle area and repeats a large deflection in the dynamic loading condition. The result is that the J value of the dynamic loading condition is larger than that of the static loading condition.

1. 서 론

Al합금 복합재료를 주축으로 한 금속기복합재료는 비강도, 내열성, 내마모성 등에서 우수한 특성을 발휘하기 때문에 수송기계산업에 많은 응용이 기대되고 있다. 자동차 산업에서는 경량화에 의한 기본성능의 향상을 목적으로 하여 엔진부품에의 용도개발이 진행된 결과, 피스톤, 콘넥팅 로드 등에 실용화되고 있으며, 우주항공산업에서는 우주구조물의 내우주환경성, 항공기엔진 본체의 내열강도 등에 주목하여 연구·개발되고 있다¹⁾. 그러나 금속기복합재료에 대해서 보고되고 있는 연구의 대부분은 인장특성과 같은 기계적성질을 해석하는데 역점을 두고 있어서, 구조용 재료로 사용하기 위해서 필요한 정적 및 동적파괴인성에 관한 연구는 적다²⁾. 그리고 그 파괴에 대한 연구도 주로 정적부하조건하에서의 파괴현상을 규명하는데 치중되어 있고 동적부하조건하에서의 파괴에 대한 연구는 미흡하다.

한편 금속기복합재료는 그 종류에 따라서 파괴거동이 크게 달라지기 때문에 선형탄성파괴역학 또는 탄소성파괴역학에 기초한 시험법중 어느쪽을 적용하는 것이 타당할 것인가를 결정하는 것조차 곤란한 상황이다. 따라서 합금기지(matrix)와 강화재의 특성, 체적률 및 형상을 고려하여 타당한 시험법을 결정해야 하며, 본 연구에서와 같이 기지가 Al합금인 경우에는 Al합금의 연성을 고려하여 탄소성 파괴역학에 기초한 시험법을 선택하는 것이 필요하다고 생각된다.

이와같은 배경으로부터 본 연구에서는 SiC입자강화 Al합금 복합재료에 대하여 동적 및 정적부하조건하에서 파괴인성시험을 실시하고, 파괴거동을 보다 명확하게 검토하기 위하여 동적부하조건으로서는 stop block법³⁾을, 정적부하조건으로서는 복수시험편법⁴⁾을 실시한 후 파면관찰, 변위량에 대한 균열진전길이 측정, 균열진전경로의 관찰 등을 통하여 균열의 발생 및 성장, 파괴형태 등 파괴거동에 미치는 부하조건 영향 비교·검토하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용한 시료는 Alcan·Aluminum·Ltd에 의해 생산되고 있는 듀랄칸(Duralcan, F3D20S)을 이용했다. 합금기지로서는 AC8B합금을, 강화재에는 평균직

경 12.8μm의 SiC입자를 이용하였으며, SiC_n의 체적율을 20%로 조절하여 액상법에 의해 제조한 시료를 다이캐스트하여 사용하였다. 제조된 시료로부터 3점굽힘시험편(4×8×40mm)을 기계가공에 의해 slit방향이 다이캐스트 방향과 평행이 되도록 제작하였다. 가공한 시험편은 ASTM E813-89⁴⁾에 준거하여 a₀/w=0.55(a₀: 초기균열길이, w: 시험편 폭)이 되도록 피로예비균열(fatigue precrack)을 부가하였다.

동적파괴인성시험은 계장화살피충격시험기(용량 14.7J)를 이용하여 실온(293K)에서 실시하였다. 부하속도는 Server⁵⁾에 의해 제창되고 小林⁶⁾ 등에 의해서 수정된 조건식 E₀≥3E_i(E₀: 부하에너지, E_i: 전체흡수에너지)를 만족하는 1.5m/sec로 하였다. 동적파괴인성치는 CAI(Computer Aided Instrumented Charpy Impact Testing)시스템³⁾에 의해 산출·평가하였다. 이 시스템은 시험기의 해머 모서리 부분에 변형계이지를 부착, 브리지회로를 구성하여 하중센서로 하며, 변위는 해머 회전축에 포텐쇼메타를 장착해서 회전각 검출에 의한 변위센서로 한다. 균열발생점의 검출에는 컴플라이언스변화율법(compliance change rate method)을, 파괴인성치의 산출은 Rice의 간편식⁷⁾, 식(1)을 적용하고 있다. 동적부하조건에서의 파괴거동을 검토하고 컴플라이언스변화율법에 의해 검출한 균열발생점의 유효성을 확인하기 위해 복수의 시험편으로 stop block³⁾법을 실시하였다. Stop block법은 계장화살피충격시험시, 목표 변위에 대하여 각각 두께가 다른 block을 바꾸어 장착함으로써 임의의 변위에 대하여 살피충격시험기의 해머를 강제적으로 정지시켜 각 변위에서의 균열진행상황을 추적하는 시험법이다.

$$J = \frac{2E_i}{B(W-a_0)} \quad (1)$$

E_i: 균열발생까지의 흡수에너지

W: 시험편 폭

B: 시험편두께

a₀: 초기균열길이

정적파괴인성시험은 Instron형 만능시험기(동적시험기 제작 SC-10형, 용량98KN)에 의해 cross head 속도 0.3 mm/min로 실온에서 시험하였다. 균열발생점의 검출에는 컴플라이언스변화율법 및 acoustic emission method(AE법)를 이용하였다. AE법은 변형에 수반하는 전위의 운동, 균열의 전파동 탄성에너지 해방을 AE파(탄성파)로서 검출하여 재료내의 동적구조변화를 해석하는 수법으로, 본 연구에서는 AE계측장치(도진제작소, SAE-1000A)를 이용하여, 시험편으로부터 발생하는 AE파를 시험편에 장치한 AE센서로부터 검출한 후, AE전체에너지, AE총사상수 및 AE진폭을 평가하고 이것으로부터 균열발생점을 결정하였다. 또 정적부하조건에서의 파괴거동을 검토하고 컴플라이언스변화율법에 의해 검출한 균열발생점의 유효성을 확인하기 위해 복수의 시험편을 이용하여 여러 하중점 변위에서

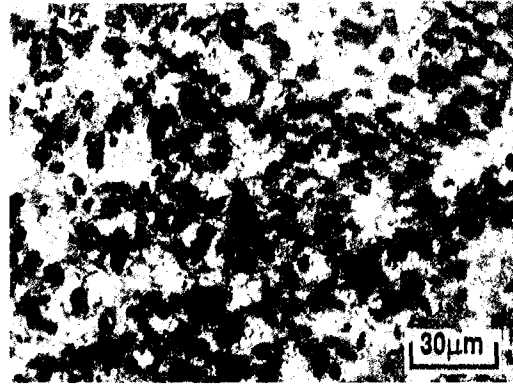


Fig. 1. Optical micrograph of 20vol.% SiC_n/AC8B.

시험을 중단하고 각 단계에서의 균열진행상황을 관찰하는 복수시험편법³⁾을 실시하였다.

미세조직의 관찰은 시료를 연마한 후 광학현미경 및 주사전자현미경(SEM)을 이용하였다. 복수시험편법 및 stop block법 후의 시험편은 파면에 생긴 균열의 표식(marking)을 위해 피로파단시킨 후, ASTM E813-89에 준거하여 예비균열길이 및 균열길이를 측정현미경(measuring microscope, 올림프스계 STM5型)에 의해 측정하였다. 파면 및 파면측면의 균열진행상황은 SEM에 의해 관찰하였다. 특히 부하조건에 따른 균열진행상황을 보다 명확히 검토하기 위하여 시험후의 파면은 Ni도금한 후에 시험편 두께 방향의 중앙부분에서 균열진행방향과 나란한 방향으로 절단한 것을 연마하고 SEM에 의해 관찰하였다. 또 이 관찰로부터 진균열길이(Δa_T)를 고해상도영상처리해석장치(ニレコ製, LUZEX III)를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

미세조직 및 파면

Fig.1은 본 연구에 사용된 복합재료의 광학현미경조직이다. SiC입자가 균일하게 분산되어 있고 합금기지중에는 Si이 석출되어 있는 것을 관찰할 수 있다. SiC입자 부근에 우선적으로 석출되어 있는 Si은 파괴에 악영향을 미치는 요인의 하나라고 생각된다.

Fig.2는 동적 및 정적파괴인성시험 후 파면의 동일부분을 일치(matching)시킨 SEM 사진이다. 좌우의 사진이 대칭되어 있고 각각 동일기호의 부분이 대응하고 있다. 동적 및 정적하중조건에서 거시적인 파면의 형태는 서로 유사하다. 입자 자신의 파단부(A, D)와 입자-기지 계면에서의 박리(B, E)사이가 작은 dimple(C, F)에 의해서 연결되어 있는 것이 관찰된다. 즉 본 복합재료는 입자 자신의 파단부 또는 입자-기지 계면에서의 박리 부분 등의 사이가 연성과 면에 의해 연결된 파면을 형성하고 있다.

균열의 발생 및 성장에 미치는 부하조건 영향

동적 및 정적파괴인성시험에 의해 얻어진 하중-변위 곡선과 검출된 균열발생점을 Fig. 3에 나타낸다. 정적시험에는 AE시험결과도 함께 나타냈다. 최대하중점 부근의 곡선 형태로 보아서 부하속도에 관계 없이 양시험에서 모두 균열

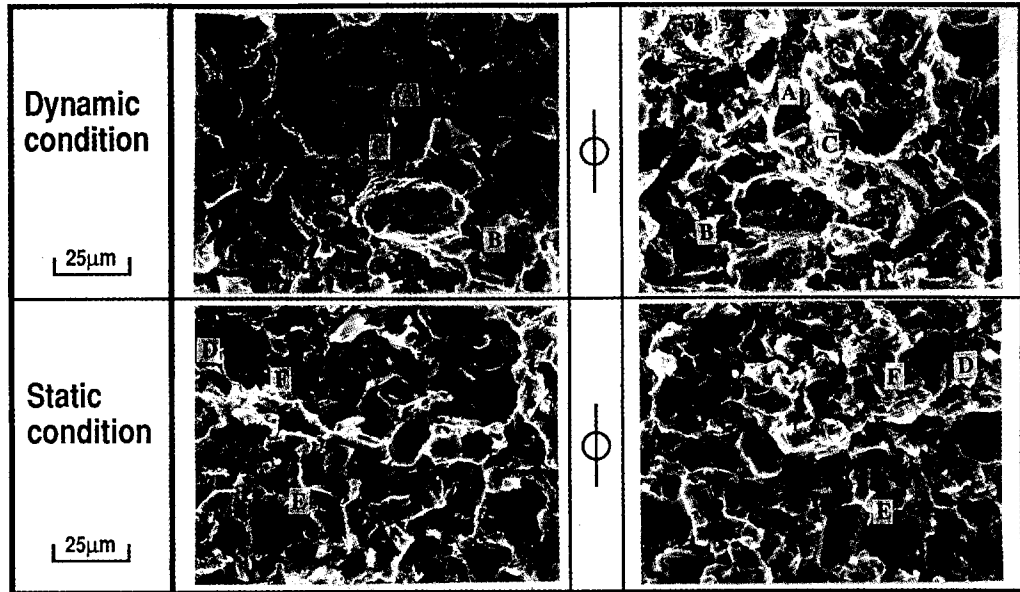


Fig. 2. SEM fractographs matched with fracture surfaces of 20vol.% SiC_n/AC8B.

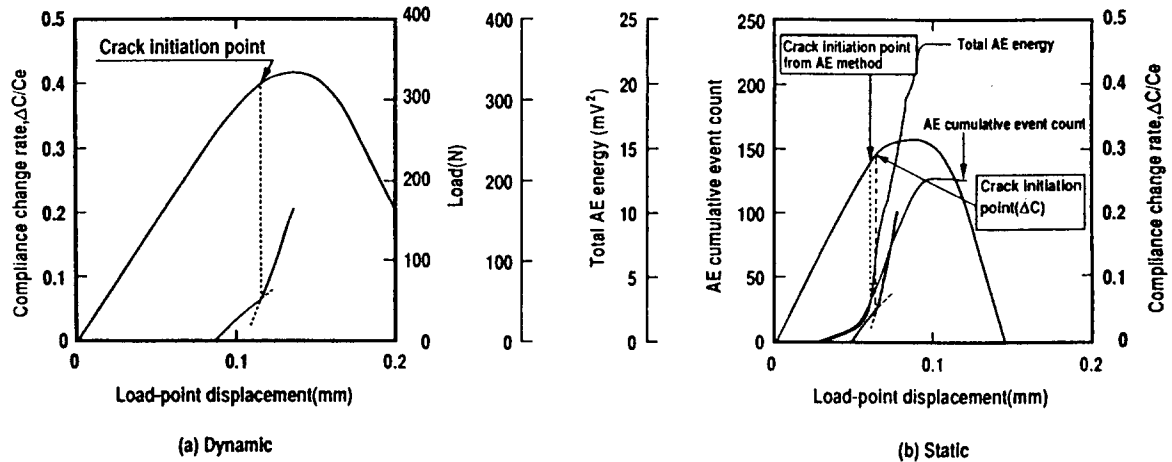


Fig. 3 Load-load point displacement curves and detected crack initiation points.

의 안정성장영역의 존재가 예상되지만 변위량은 대단히 작기 때문에 안정성장영역의 크기는 매우 작다고 생각된다. 또 동적시험쪽이 최대하중이 크고 최대하중점이 고변위측으로 위치하고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 영향으로 컴플라이언스변화율법에 의해 검출된 균열발생점은 동적시험에서는 변위량 0.115mm, 정적시험에서는 0.063mm로 동적시험쪽의 변위량이 크게 나타나고 있다. 정적시험의 AE 시험에 의한 균열발생점은 컴플라이언스변화율법에 의한 검출점과 거의 비슷하다. 일반적으로 AE 시험에 의해 얻어지는 총 AE 事象數는 손상의 발생수를, 총 AE 에너지는 손상의 크기를 나타내는 것으로 생각할 수 있다⁹⁾. 본 재료의 경우, 총 AE 에너지는 최대하중점 이전에서 대진폭 AE에 따른 급증점이 나타나지만, 총 사상수에 있어서는 완만한 상승을 보이고 있다. 이로부터 전구간을 통해서 발생하는 소진폭 AE는 합금기지에서의 공동(void)의 발생 및 성장,

입자 자신의 파단 또는 입자-기지 계면에서의 박리에 의한 것이고, 또 대진폭 AE는 그것들의 연결에 따른 주균열의 진전에 의한 것이라고 생각된다. 본 연구의 정적시험에서는 총 AE 에너지에서만 급증점이 확인되었지만, 균열 발생부근의 하중에서 하중을 제거한 시편(복수시험편법)의 SEM 파면 관찰로부터, 이 급증점 부근에서 균열의 발생이 관찰됨에 따라 이 점을 AE법에 의한 균열발생점으로 결정하였다.

Fig.4에 복수시험편을 사용하여 얻은 변위량과 균열길이(Δa)의 관계를 나타낸다. (a)의 동적시험의 경우 균열은 변위 0.08mm 부근에서 발생한 후, 0.1mm 부근에서 기울기가 급격히 증가하고 있다. 또 (b)의 정적시험의 경우는 균열이 0.05mm 부근에서 발생하여 거의 직선적으로 증가하고 있다. 동적시험의 변위 0.01mm 이후의 기울기와 정적시험의 기울기는 크게 다르고, 변위에 대한 균열의 성장

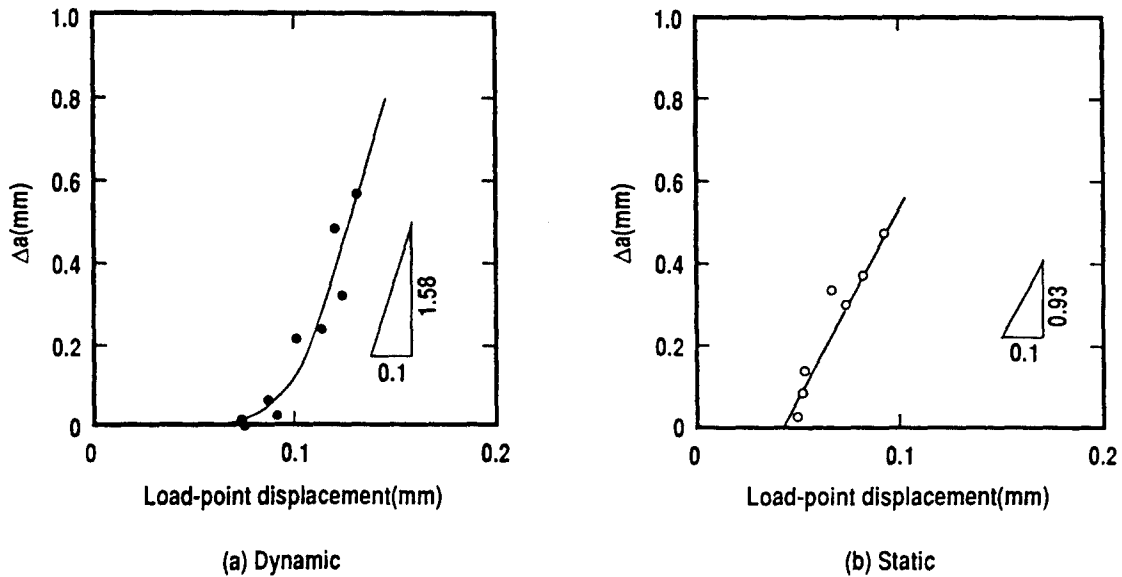


Fig. 4. Relationship between crack length(Δa) and load point displacement obtained by interrupted fracture toughness tests.

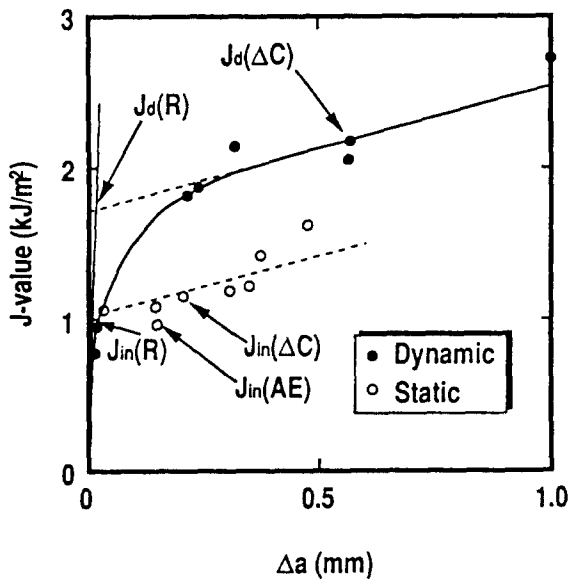


Fig. 5. J- Δa curves and crack initiation points.

에 현저한 차이를 보이고 있다. 즉 동적부하조건에서는 변위량에 대한 균열의 발생은 늦지만 성장속도는 급격하고, 정적부하조건에서는 상대적으로 균열의 발생은 빠르지만 성장속도는 동적부하조건에 비하여 완만하다는 것을 알 수 있다. 균열 발생이 정적부하조건에서 0.03mm 정도 저 변위 측에 나타나고 있는데, 이것은 Fig.3에서도 확인된 바와 같이 변위와 하중의 관계가 부하속도에 따라 크게 다르다는 사실에 기인하고 있다. 그리고 탄성한 부근에서 발생한 균열은 겨우 0.2mm 정도의 미소변위에서 대단히 빠르게 성장해 간다는 것을 알 수 있다.

파괴 인성

Fig.5는 본 재료의 J- Δa 곡선이다. 동적부하조건쪽이 정적부하조건에서보다 전체적으로 80% 정도 큰 J값을 나타내고 있다. 이것은 Fig.3에서 검토한 바와 같이 동적부하

조건에서 변위량에 대한 하중치가 큰 것과도 잘 연관된다. Cho⁽⁹⁾ 등은 2124Al-SiC_w 복합재료에 대하여 파괴인성시험을 실시하고, 동적파괴인성치가 정적파괴인성치에 비하여 30% 정도 높다고 발표한 바 있다.

본 연구의 결과와는 비교치의 차이는 있지만, 동적부하조건에서의 인성치가 정적부하조건에서의 인성치보다 훨씬 크다는 점에서 잘 일치하고 있다. Fig.5에는 본 실험에서 이용한 균열검출법에 따른 J값도 표시하였다. 세로축 부근의 직선은 편의상 $J = 2\sigma_{flow}\Delta a$ 에 근사시킨 등화곡선인데 이 직선과 R곡선의 교점 $J_d(R)$ 및 $J_{in}(R)$ 은 종래 J_{IC} 시험법에서 균열발생점으로 되어 있는 점이다.

그 외에 $J_d(\Delta C)$, $J_{in}(\Delta C)$ 는 각각 동적 및 정적시험에서 컴플라이언스변화율법에 의한 검출점이고 $J_{in}(AE)$ 는 AE법에 의한 J값이다. J(R)은 그 측정점이 너무 작기 때문에 신뢰성이 있는 값이라고는 할 수 없다. 앞에서 검토한 바와 같이 컴플라이언스변화율법에 의한 검출점은 균열발생물 다소 지난 단계를 나타내기 때문에 균열발생단계로 적용하기에는 적합치 않지만, 그 편차는 작으며, 컴플라이언스변화율법은 단일 시험편으로부터 파괴인성치를 얻을 수 있다는 간편성의 면에서 공학적인 유효성은 인정된다. AE법에 의한 검출점은 J(ΔC)보다도 0.05mm 전방부근에 위치하고 있으나 주균열이 상당히 진전을 개시한 단계를 검출하고 있어서 적어도 AE법의 검출점 보다도 전방의 Δa 에서의 점을 균열발생단계로서 취급하는 것이 타당하다고 생각된다. 따라서 본 재료에서는 동적시험의 경우 $J_d(R)$ 과 $J_d(\Delta C)$ 사이에, 정적시험에서는 $J_{in}(R)$ 과 $J_{in}(\Delta C)$ 균열길이 사이에 균열발생단계를 의미하는 파괴인성치가 존재한다고 생각된다.

파괴형태에 미치는 부하조건 영향

앞에서 검토한 바와 같이 본 재료는 부하조건에 따라서 파괴과정 및 파괴인성치가 다르다는 것을 알았다. 그래서 양 부하조건에 따른 파괴형태를 조사하고 파괴과정 및 파괴인성치와의 관련에 대해서 검토하였다.

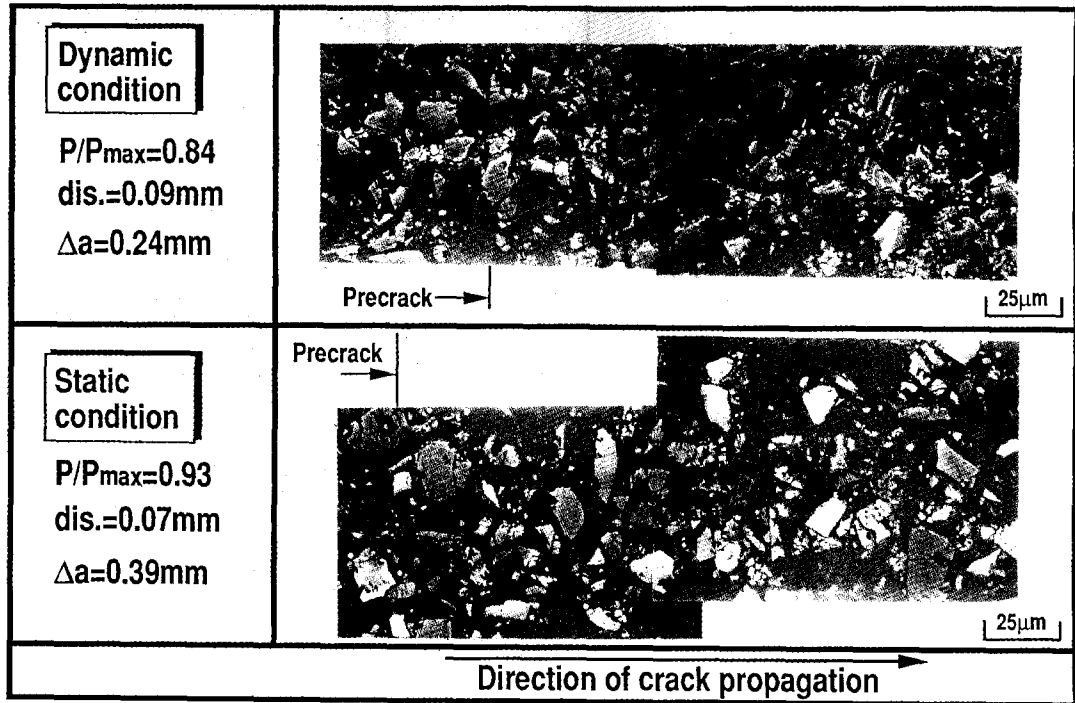


Fig. 6. SEM micrographs at crack tip of 20vol.% SiC_w/AC8B.

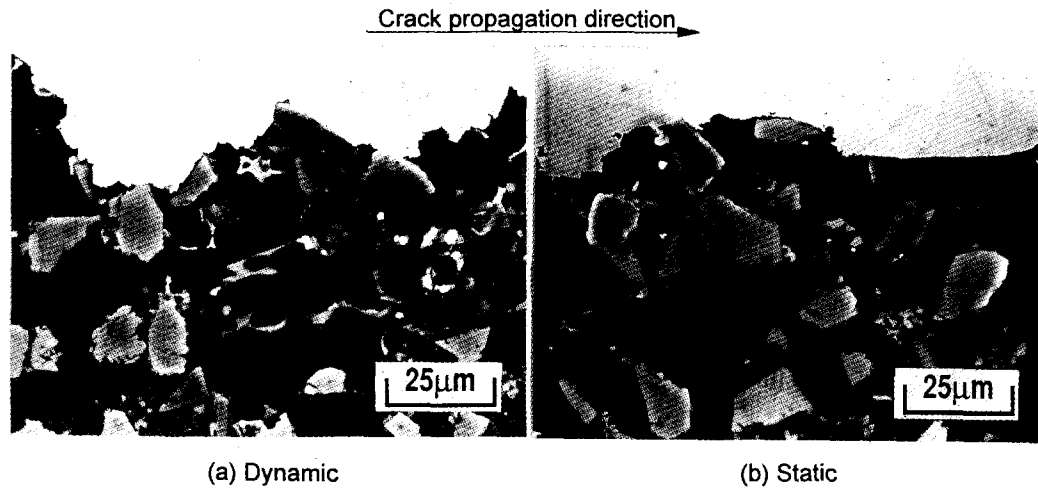


Fig. 7. Crack path morphologies in fracture toughness tests of 20vol.% SiC_w/AC8B.

Fig.6은 균열의 발생 및 전과단계에 있어서 균열진전경로를 조사하기 위하여 균열측면을 SEM 관찰한 것이다. 일반적으로 많은 Al합금의 파괴인성시험후의 파면에서는 예비균열과 균열사이에 예비균열선단의 둔화에 의해 형성되는 stretch zone¹¹⁾이 관찰되는 것으로 알려져 있다. 그러나 본 재료에서는 파면 관찰에서도 stretch zone은 관찰되지 않았고, 균열측면에서도 예비균열선단의 열림은 보이지 않는 것으로부터 둔화과정 없이 예비균열선단으로부터 주균열로移行하고 있다고 생각된다. Fig.6에서 균열진전량은, 동적시험에서는 컴플라이언스변화율법에 의한 검출점(변위 0.115mm) 이전 단계인 변위 0.09mm, 정적시험은 컴플라이언스변화율법에 의한 검출점(변위 0.063mm)의 직후 단계

를 관찰한 것이다. 컴플라이언스변화율법에 의한 균열검출점 이전에 이미 균열의 성장이 인정된다. 양 부하조건에서 모두 균열은 입자를 파단하며 또는 입자-기지의 계면부를 통하여 진행되는 것을 알 수 있다. 또 균열 전방에는 파단 입자 또는 입자-기지계면 부분에서 2차균열이 발생하고 있는 것을 관찰할 수 있다. 즉, 균열선단에 입자가 존재하는 경우, 입자의 파단 또는 박리에 의해 공동(void)이 생성·합체되어 미세균열이 발생되고, 이것이 기지의 공동과 연결되어 주균열로 발전해 간다는 것을 알 수 있다. 균열경로주변에는 분균일하게 석출한 Si이 관찰되는데 Si의 응집부는 SiC입자와 마찬가지로 파괴기점으로 작용할 수 있다고 생

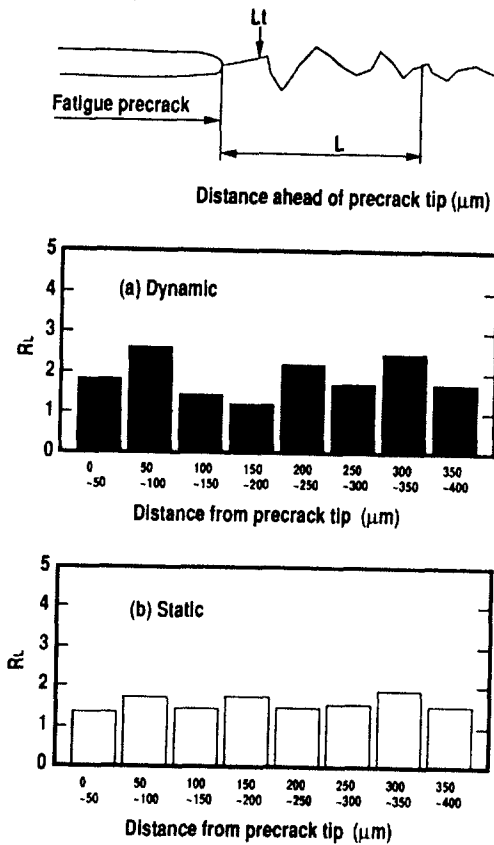


Fig. 8. Definition of fracture surface roughness(R_t) and R_t distributions ahead of precrack tip.

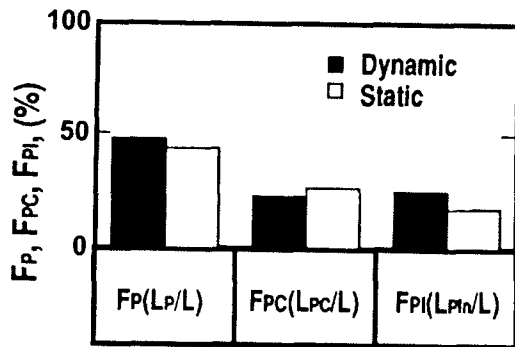


Fig. 9 Occupying ratio of F_{pc} and F_{pi} on the crack path.

각된다.

Fig.7은 파면거칠기를 이용한 파괴형태의 비교를 위하여, 파괴인성시험후의 파면을 시험편 두께 방향의 중앙부분에서 균열진전방향과 나란한 방향으로 절단하여 관찰한 파면측면 SEM사진이다. 양 부하조건에서 파면의 거칠기가 다르고 동적시험쪽이 파면의 요철이 더 큰 것을 알 수 있다. 즉 부하속도의 영향에 의해서 파면형태에 차이가 생기며, 균열진전경로에서의 입자상태(파단 또는 박리)는 그 파면형태의 차이를 잘 표현한다고 생각된다. 그래서 파면측면의 관찰로부터 파괴형태의 비교를 시도하였다.

균열길이와 진균열길이로부터 구해지는 거시적인 파면거

칠기(R_t)는, $R_t = L_t/L$ 로 주어진다¹²⁾. 여기서 L_t 는 진균열길이, L 은 균열길이이다. Fig.8에 파면측면 사진으로부터의 파면거칠기의 측정방법과, 예비균열선단으로부터의 거리를 $50\mu\text{m}$ 씩 분할하여 산출한 결과를 나타낸다. 동적시험쪽이 R_t 의 편차가 크고 전체적으로 R_t 도 크다. 균열의 편향정도가 크고 편향하는 부분이 많을수록 R_t 은 크게 되기 때문에 동적시험쪽이 그 경향이 강하고 긴 균열경로를 진전해 가는 것으로 생각된다. 본 시험에서 동적시험의 J 값이 정적시험의 J 값보다 큰 것은 균열의 편향에 의한 긴 균열경로를 형성하는 것이 특히 영향을 미치고 있다고 생각된다.

한편, 균열진전경로에 있어서 입자의 점유율(F)는, $F = L_p/L_t$ 이다. 여기서 L_p 는 입자가 존재하는 부분에서의 균열 길이이고, 입자의 점유율(F)는 다시 파단된 입자와 계면에서 박리한 입자를 구별하여 그 점유율을 각각 F_{pc} , F_{pi} 라 하여, 이들을 파면측면사진으로부터 산출한 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 양 부하조건을 비교해보면 동적시험쪽이 F_p 와 F_{pi} 가 크고, 정적시험에서는 F_{pc} 가 크게 나타났다. 이것은 동적시험쪽이 균열경로상에서 입자가 차지하는 비율이 크고, 특히 입자-기지 계면의 박리를 일으키며 진행되는 경향이 강하며, 정적시험에서는 입자를 파단하고 진행되는 경향이 상대적으로 강한 것을 나타내고 있다.

4. 결 론

SiC입자강화 Al합금 복합재료에 있어서 동적 및 정적 파괴인성시험을 실시하고 부하조건에 따른 파괴거동을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 양 부하조건에서 균열은 균열발생 초기의 둔화과정 없이, 균열선단의 앞쪽에서 입자의 파단 또는 박리에 의한 미세균열이 발생하고 이것이 주균열과 연결되어 진전해 간다.

2) 부하조건에 따라 균열의 발생 및 성장은 큰 차이를 나타내며, 변위량에 대한 균열의 발생은 동적부하조건보다 정적부하조건에서 더 빨리 일어나고 균열의 성장은 동적부하조건에서 더 급격하게 진행된다.

3) 균열발생을 의미하는 파괴인성치는 동적파괴인성시험에서는 $J_{II}(R)$ 과 $J_{II}(\Delta C)$, 정적파괴인성시험에서는 $J_{II}(R)$ 과 $J_{II}(\Delta C)$ 의 균열길이 사이에 존재하며, 동적부하조건쪽이 정적부하조건보다 약 80% 크다.

4) 동적부하조건에서는 정적부하조건에 비하여 균열이 입자부분(입자파단 또는 박리)을 통과해가는 경향이 크고, 비교적 많은 편향을 반복해서 진행해 가기 때문에 파괴인성치도 크다. 또 균열은 동적부하조건에서는 입자-기지계면의 박리, 정적부하조건에서는 입자를 파단하고 진행되는 비율이 상대적으로 크다.

감사의 글

본 연구의 실험과 해석에 많은 도움을 주신 일본 도요하시 기술과학대학 小林俊郎 교수께 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. 大藏明光, 鐵と鋼, **74**, 413(1988)
2. C.M.Friend, Mater. Sci. and Tech., **5**, 1(1989)
3. T.Kobayashi and M.Niinomi, Nuel. Eng. and Design, **27**, 111(1984)
4. ASTM E813-89, "Annual Book of ASTM Standards", ASTM, Phila., 698(1989)
5. W.L.Server, J. Test. Eval., **29**, 29(1987)
6. T.Kobayashi, I.Yamamoto and M.Niinomi, Eng. Fracture Mech., **83**, 26(1987)
7. J.R.Rice, P.C.Paris and J.G.Merkle, "ASTM STP 536", ASTM, Phila., 231(1973)
8. 岸輝雄, 大野一生, 栗林一彦, 非破壊検査, **30-11**, 911(1981)
9. 高橋秀明, 新妻弘明, 鈴木正彦, 森康彦, 非破壊検査, **30-11**, 890(1981)
10. K.Cho, S.Lee, Y.W.Chang and J. Duffy, Metall. Trans. A, **22**, 367(1991)
11. 日本機械學會基準 JSME S001, "彈塑性破壊靱性 J_{IC} 試驗方法", 64(1981)
12. E.E.Underwood and K.Banerji, "Quantitative Fractography", Metals Handbook, Vol.12, 193(1987)