

혼합모드하중상태에서 전파하는 피로크랙특성에 관한 연구

(Study on the Characteristics of Propagating Fatigue Crack under Mixed-Mode Loading Condition.)

송삼홍(고려대 공대), 최진호(고려대 대학원), 임진학*(고려대 대학원)
S.H. Song(Korea Univ.), J.H. Choi(Korea Univ. Graduate School),
J.H. Lim(Korea Univ. Graduate School)

ABSTRACT : Practical structures are subject not only to tension but also to shear and torsional loading. In this study, the mode I, and mode II stress intensity factors of specimens were calculated by using elastic finite element method. The stress fields at the crack tip subjected to mixed-mode loading were also studied by using elastic finite element method and were compared with theoretical results. The three-point-bending, four-point-bending, and mixed-mode-loading experiment were carried out. And, crack propagation rate da/dN and crack growth direction were examined. Also, the elastic finite element method was applied to calculate the stress intensity factors of branch crack tip and we relate the stress intensity factor range of branch crack tip(the result of FEM) to crack propagation rate(the experimental result). The $\Delta K - da/dN$ relation correlated with that of mode I.

1. 서론

일반적인 경우, 크랙의 진전 등은 모드 I 뿐만 아니라 모드 II·모드 III의 세 가지 모드가 겹쳐서 작용하여 일어난다. 이러한 현상은 경사진 균열, 노치부근에서의 균열, 용접이음부, 비틀림과 굽힘을 받는 봉이나 복합재, 압력용기, 항공기, 지상운송차량 등 수없이 많은 곳에서 일어나는데, 이것은 구조물이 복잡한 기하학적 형상을 가지거나, 또는 하중형태가 단축보다는 다축응력 상태에서 복잡한 양상을 띄고 있기 때문이다. 이와 같이 실제의 많은 상황은 혼합모드 상태인데, 기존의 대부분의 연구가 간단히 해를 얻기 위하여 모드 I으로 가정하거나 혼합모드의 개념을 적용하지 않았다. 이로 인해 데이터에 대한 신뢰성이 떨어짐에 따라 불안전 설계 또는 과안전 설계를 유발할 수도 있다. 그러므로 구조물의 경제성 제고 및 신뢰성 확보를 위해서는 모드 I만이 아니라 혼합모드 크랙특성을 규명할 필요가 있다.

혼합모드 파괴조건 및 크랙전파 방향에 대한 연구로서 Erdogan과 Sih는 크랙전파가 최대인장방향에 수직한 방향에서 일어난다는 최대인장응력조건을 제시하였다. 또 Sih는 미소체적 dV 당의 단의 변형에너지 dW 인 변형에너지밀도가 최소가 되는 방향으로 크랙성장이 일어난다는 최소 변형에너지밀도조건을 제시하였다. Hussain등은 Mapping Function을 사용하여 혼합모드상태에서 에너지해방율을 정의하였고 이 에너지해방율이 최대가 되는 방향으로 크랙이 전파한다는 최대에너지해방율조건을 제시하였다.

혼합모드상태에서 각각의 파괴인성치인 응력확대계수와 J 적분값 등의 결정에 대한 연구로서 Wilson등은 Boundary Collocation method를 사용하여 몇몇 혼합모드시험편의 K_I

과 K_{II} 를 구하였다. Andersson은 Mapping Function을 사용하여 가지크랙선단의 응력확대계수를 구하였다. 그러나 그의 결과는 중대한 결점을 가지고 있어서 그 결과는 믿을만하지 못하지만 가지크랙이 주크랙에 비해서 길이가 작은 경우에는 적용할 수 있다. 또한 Tohgo등은 혼합모드상태의 굽힘시험편에서 크랙개구각과 크랙전단변위를 사용하여 J_I 과 J_{II} 를 결정하는 간단한 방법을 제시하였고 광위치검출소자를 이용하여 크랙개구각과 크랙전단변위를 구하는 방법을 제시하였다.

혼합모드하중을 받는 재료의 응력확대계수결정에 대한 대부분의 연구가 거의 이론적인 부분에만 한정되어 있고 사용에 필요한 변수들의 결정이 매우 어려워 적용하기가 힘들다. 또한 혼합모드상태에서 전파하는 피로크랙의 특성에 대한 연구는 부족한 실정으므로 이에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

이상을 고려하여 본 연구에서는 혼합모드 조절이 용이한 굽힘시험편을 사용하여 혼합모드피로시험을 수행하였다. 실험에 의해 관찰된 피로크랙 전파방향을 기존의 연구결과와 비교하였으며 굽힘시험편에서 유한요소법을 사용하여 모드 I과 모드 II의 응력확대계수를 구하였다. 그리고 혼합모드하중상태에서 전파하는 피로크랙의 응력확대계수를 구하고 이 피로크랙의 특성을 모드 I하중상태에서 전파하는 피로크랙의 특성과 비교하였다.

2. 시험편 및 실험 방법

본 실험에 사용한 재료는 포항제철(주)에서 생산된 용접성과 내마모성이 좋은 고강도강 POSTEN 60 RE로 그 화

학적 성분과 기계적 성질은 Table 2-1과 Table 2-2와 같다.

피로시험에 사용한 시험편은 TPB시험편(Three Point Bending Specimen)이고 모양과 치수는 Fig.2-1과 같다. 혼합모드 시험편의 경우에는 노치길이가 20mm가 되도록 하였고 모드 I시험편의 경우에는 노치길이가 10mm가 되도록 하였다. 시험편은 시험편의 길이방향이 압연방향이 되도록 취했다. 시험편 중앙에 가공한 노치의 폭은 0.5mm이고 노치의 가공은 두께 0.5mm의 휠 커터(Wheel Cutter)를 사용하였다.

본 실험에 사용한 피로시험기는 전기유압식 인장 압축 피로시험기로 모델명은 INSTRON 1331이다.

피로하중은 주파수 10Hz의 sine파형이며 응력비 R은 0.3이다. 크랙길이 측정 간격은 ASTM E647의 규정에 따라 측정가능 길이의 10배인 0.1mm 이상에서부터 시험편 폭의 0.01배인 0.4mm 이하가 되도록 하였다. 또한 피로크랙 전파속도 da/dN의 계산에는 Seven Point Incremental Method를 사용하였다. 실험은 Fig. 2-2에 보인 것처럼 4가지 하중방식에 대하여 행하였다.

Fig. 2-2의 (a)와 (b)는 각각 3점굽힘과 4점굽힘 피로시험의 하중형태를 나타내고 (c)와 (d)는 혼합모드피로시험의 하중형태이다.

Table 2-1. Chemical composition of POSTEN 60 RE

Material	Composition (weight percent %)				
	C	Si	Mn	P	S
POSTEN 60 RE	0.097	0.268	1.479	0.021	0.0054

Table 2-2. Mechanical properties of POSTEN 60 RE

Yield stress (MPa)	542
Ultimate stress (MPa)	638
Young's Modulus(GPa)	7.7
Poisson's Ratio	0.28
Strain Hardening Parameter	90

3. 결과 및 고찰

3-1. 탄성유한요소해석

본 연구에서는 응력확대계수의 결정과 크랙선단 주위의 응력상태를 알아보기 위해 2차원 탄성유한요소해석을 하였다. 본 유한요소 해석에는 2차원 8절점 등매개요소(Two Dimensional Eight Node Isoparametric Element)를 사용하여 굽힘시험편에 대해 응력을 해석하였다. 균열선단요소로는 중간 절점을 균열선단으로부터 변길이의 1/4에 이동시켜 균열선단에서 $1/\sqrt{r}$ 의 응력특성이 나타나도록 하는

특이요소를 사용하였다.

해석에 사용한 프로그램은 Owen과 Fawkes가 개발한 유한요소전산 프로그램을 사용하였다. 그러나 그 프로그램으로는 K_I 만 구할 수 있기 때문에 K_{II} 도 구할 수 있도록 본 연구자가 추가·수정하여 사용하였다. 시험편에 있는 노치는 모두 크랙이라고 가정하였다.

모드 I 시험편 해석에 사용한 모델은 반 모델(Half Model)이다. 4점굽힘모델의 요소의 수는 136개이며 절점의 수는 463개, 그리고 구속절점의 수는 24개이다. 그리고 3점굽힘모델의 요소의 수는 130개이며 절점의 수는 443개, 그리고 구속절점의 수는 26개이다.

혼합모드시험편 해석에 사용한 모델은 전 모델(Full Model)이다. MM 시험편과 M2시험편의 경우 둘 다 요소의 수는 272개이며 절점의 수는 903개, 그리고 구속절점의 수는 3개이다. 4가지 모델 모두 2점 가우스법을 사용하였고 평면응력상태로 해석하였다. 3점굽힘과 4점굽힘의 경우 적용하중을 크랙길이 a가 20mm에서 같은 응력확대계수 K_I 를 가지도록 실험시의 적용하중과는 조금 다르게 결정하였다.

응력확대계수를 구하는 방법에는 여러가지가 있지만 본 연구에서는 변위의삽법(Displacement Extrapolation)을 사용하였다. 크랙선단으로부터 180° 방향의 크랙자유표면상의 절점들에서 다음 식을 이용하여 K_I 과 K_{II} 를 구한 후 외삽법에 의해 $r = 0$ 에서의 응력확대계수를 구하였다.

$$K_I = \frac{2\mu}{x+1} \sqrt{\frac{\pi}{2r}} (v_A - v_B) \quad (3-1)$$

$$K_{II} = \frac{2\mu}{x+1} \sqrt{\frac{\pi}{2r}} (u_A - u_B)$$

여기서

$$x = (3-\nu)/(1+\nu) \quad \text{평면응력상태} \quad (3-2)$$

이고, μ 는 전단계수, ν 는 포와송 비이며, u_A , u_B , v_A , v_B 는 Fig. 3-1에 나타내고 있는 바와 같이 각각 절점 A와 B에서의 U방향 및 V방향의 변위이다. 그리고 크랙선단에서 가장 가까운 요소의 응력확대계수값은 믿을 수가 없으므로 무시하였다. Table 3-1은 본 방법에 의하여 MM모델과 M2모델에서 구한 모드 I과 모드 II의 응력확대계수값을 나타낸다. 여기서 모드 I, MM모델, M2모델순으로 K_{II} / K_I 가 증가함을 알 수 있다. M2모델의 경우 Wang등은 모멘트 M이 0이므로 K_I 도 0이 된다고 하였고 Tohgo등은 그 값은 적지만 K_I 이 0이 아니라고 하였다. 본 연구의 유한요소해석에서는 K_I 이 0.96MPa $m^{1/2}$ 로 0은 아니지만 K_{II} 에 비해 매우 작은 것으로 나타났다.

본 연구에서는 크랙선단 근방에서 θ 의 변화에 따라 응력을 구해보았다.

Fig. 3-2는 모드 I인 3점굽힘과 4점굽힘을 받는 B3모델 및 B4모델의 크랙선단으로부터의 거리 $r = 0.239\text{mm}$ 에서 각도 θ 에 대한 크랙주위의 응력상태를 나타낸다. 그림에서 실선으로 표시된 것은 식 (3-3)에 의해 계산된 응력상태이다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] \quad (3-3)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \sin \theta + K_{II}(3 \cos \theta - 1) \right]$$

그림에서 나타난 것과 같이 유한요소법에 의한 3점굽힘의 응력상태와 4점굽힘의 응력상태, 그리고 식 (3-3)의 이론 값이 서로 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. 이것은 크랙주위의 응력상태가 하중을 주는 방법과는 무관하고 어떠한 모드의 하중을 받느냐 하는 것과 관계가 있다는 것을 보여준다.

Fig. 3-3은 MM모델의 크랙주위의 응력상태를 나타내며 Fig. 3-4는 M2모델의 응력상태를 나타낸다. 여기서도 크랙선단으로부터의 거리 r 은 0.239mm로 하였고 실선은 식 (3-3)에 의한 이론 값을 나타낸다. 모드 I에서는 $\theta = 0^\circ$ 에서 σ_{θ} 가 최대가 되지만 K_I 이 줄어들고 K_{II} 가 증가함에 따라 그 각도가 점점 커졌다. 그리고 이 최대 σ_{θ} 방향과 크랙진전방향이 거의 일치한다는 것을 알 수 있었다.

3-2. 실험결과

본 연구에서는 시험편의 한 변에 U-형상 노치를 가공하여 응력집중에 의해 노치선단에서부터 피로크랙이 발생, 전파하도록 하여 실험하였다.

Fig. 3-5는 MM모델과 M2모델에서 노치로부터의 크랙진전파경로를 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 것과 같이 K_{II} / K_I 이 증가함에 따라 크랙진전각도가 커짐을 알 수 있었다. MM시험편의 초기크랙진전방향 $\theta_c = 54.4^\circ$ 이고 M2시험편의 초기크랙진전방향 $\theta_c = 78.3^\circ$ 이다.

Fig. 3-6은 크랙진전각도를 $\Delta K_{II} / (\Delta K_I + \Delta K_{II})$ 에 대해 나타낸 것이다. 여기에서 실험에서 얻은 크랙진전각도와 혼합모드파괴기준을 비교해 보았는데 실험결과가 최대인 장응력조건, 최대에너지해방율조건, 최소변형률에너지지밀도 조건 등과 잘 일치함을 볼 수 있었다.

3점굽힘과 4점굽힘피로시험을 수행하였을 때에 응력확대계수범위 ΔK 에 대한 크랙진전속도 da/dN 과의 관계를 Fig. 3-7에 나타내었다. 그림에서 나타난 것과 같이 비록 하중을 주는 방법은 다르지만 그래프가 서로 잘 일치하였고 같은 da/dN 에서 같은 ΔK_I 이 관계되는 것을 알 수 있었다. 이것은 da/dN 과 ΔK_I 의 관계가 하중을 주는 방법에는 무관하다는 것을 의미한다. 따라서 같은 재료에서 크랙진전속도 da/dN 을 알면 역으로 그에 관계되는 ΔK_I 을 하중을 주는 방법에 관계없이 거의 정확하게 추정할 수 있다고 생각된다.

3-3. 탄소성유한요소해석

탄소성유한요소해석에는 EMRC(주)에서 제작, 판매하는 프로그램 NISA를 사용하였다. 본 탄소성유한요소해석에는 탄성해석과 마찬가지로 2차원 8절점 등매개요소를 사용하였으며 균열선단요소로는 특이요소를 사용하였다. 적용하중은 탄성해석의 경우와 같게 하였고 평면응력상태로 해석하였고 모드 I 모델 및 혼합모드모델 모두 전모델(Full

Model)로 하였다. M2C 및 MMC모델은 혼합모드실험에 의해 크랙진전파경로를 파악한 후 그 경로대로 모델링하였다. 혼합모드상태에서 전파하는 크랙은 곡선의 모양을 갖지만 크랙증가분의 x성분 $\Delta a_x = 2\text{mm}$ 마다 직선이라고 가정하였다.

Fig. 3-8은 MM, M2모델에 대한 변형모습을 나타낸다. 변형상태를 확실히 나타내도록 하기 위해 모두 5배 과장되게 나타내었다. 여기서 K_{II} / K_I 이 증가함에 따라 변형의 형태가 Opening Mode에서 Shear Mode로 변화함을 알 수 있다. Fig. 3-9는 M2C모델에서 크랙의 x성분인 a_x 가 6mm일 때의 주응력 σ_1 의 분포와 변형모습을 나타낸다. 주응력의 분포에서 알 수 있듯이 혼합모드상태에서 전파하는 크랙의 응력상태는 Mode II가 아닌 Mode I임을 알 수 있다. 혼합모드상태에서 전파하는 크랙이 Shear Mode가 아니고 Opening Mode의 상태인 것은 크랙이 열리는 변형상태로부터 알 수 있다. Fig. 3-10은 MMC모델에서 크랙의 x성분인 a_x 가 6mm일 때의 주응력 σ_1 과 변형모습을 나타낸다. MMC모델의 경우에도 전파하는 크랙이 Shear Mode가 아니고 Opening Mode의 상태라는 것을 응력상태와 변형형태로 알 수 있다.

3-4. 혼합모드상태에서 전파하는 크랙의 응력확대계수 결정

본 연구에서는 혼합모드상태에서 전파하는 크랙에 대한 응력확대계수를 결정하기 위해 2차원 탄성유한요소해석을 수행하였다. 응력확대계수는 M2C모델의 경우 a_x 가 각각 2mm, 4mm, 6mm, 8mm, 10mm에서 구했으며 MMC모델의 경우에는 a_x 가 각각 2mm, 4mm, 6mm, 8mm에서 구했다. 그리고 혼합모드하중상태에서 전파하는 크랙은 거의 모드 I의 형태를 가진다는 위의 결과로부터 K_{II} 는 무시하고 K_I 만 구하였다. 응력확대계수 결정에는 변위삼분법을 사용하였고 응력확대계수결정식은 식 (3-1)을 사용하였다. 전파하는 크랙선단의 변위는 크랙방향과 크랙직각방향으로 나누어 적용하였다. 응력확대계수결정에 적용할 수 있는 절점은 각각 4개인데 그 중에서 크랙선단에서 가장 가까운 절점은 무시하고 나머지 3개의 절점에서부터 외삽법으로 응력확대계수를 구하였다. Fig. 3-11은 혼합모드에서 전파하는 크랙의 응력확대계수 ΔK_I 와 크랙진전속도 da/dN 의 관계와 3점굽힘과 4점굽힘실험결과인 ΔK_I 와 da/dN 관계의 비교를 보여준다. 그림에서 나타난 것과 같이 ΔK_I 이 작을 때에는 서로 비교적 잘 일치하지만 ΔK_I 이 클 때는 약간의 차이를 보인다. 이것은 ΔK_I 이 커짐에 따라 소성효과가 커지며 응력확대계수는 소성효과를 고려하지 않은 선형탄성파괴역학(LEFM : Linear Elastic Fracture Mechanics)의 개념이기 때문인 것으로 생각된다. 선형탄성파괴역학을 적용할 수 있는 낮은 ΔK_I 영역에서는 서로 잘 일치하는데 이것은 ΔK_I 과 da/dN 과의 관계가 하중방식과는 무관하다는 것을 의미하며 크랙진전속도 da/dN 을 알면 역으로 그에 관계되는 ΔK_I 를 거의 정확하게 추정할 수 있다는 3점굽힘과 4점굽힘 피로실험의 결과를 뒷받침한다. 그리고 이것은 혼합모드하중상태에서 전파

하는 크랙의 경우에도 해당된다.

Table 3-1. MM모델과 M2모델에서의 응력확대계수

	K_I	K_{II}
MM	17.55 MPam ^{1/2}	17.05 MPam ^{1/2}
M2	0.96 MPam ^{1/2}	24.98 MPam ^{1/2}

4. 결론

본 연구에서는 혼합모드하중상태에서의 응력확대계수의 결정 및 응력분포를 구하기 위해서 유한요소해석을 수행하였다. 크랙성장방향 및 크랙전파속도를 구하기 위해 3점굽힘실험과 4점굽힘실험 및 혼합모드실험을 행하였다. 그리고 실험결과를 토대로 혼합모드 상태에서 전파하는 크랙의 응력상태 및 변형, 응력확대계수 결정을 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 이를 서로 비교 검토하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 유한요소해석에 의해 혼합모드하중상태에 있는 모델의 응력확대계수를 결정하였다. M2모델의 경우에는 K_{II} 이 0은 아니지만 K_{II} 에 비해 그 값이 매우 작은 것으로 나타났다.
2. 실험에 의해 구한 크랙전파방향을 최대인장응력조건, 최대에너지해방율조건, 최소변형률에너지밀도조건 등 크랙전파방향기준과 비교하였는데 잘 일치함을 볼 수 있었다.
3. 3점굽힘과 4점굽힘 피로시험으로부터 응력확대계수범위 ΔK_I 와 크랙전파속도 da/dN 과의 관계가 서로 잘 일치함을 알 수 있었다. 이것은 $da/dN - \Delta K_I$ 의 관계가 하중방식에는 거의 영향을 받지 않는다는 것을 의미한다.
4. 혼합모드하중상태에서 전파하는 크랙에 대한 탄성유한요소해석을 행하였는데 크랙주위의 응력분포와 크랙의 변형상태로부터 크랙이 모드 I의 형태로 전파한다는 것을 알 수 있었다.
5. 혼합모드상태에서 전파하는 크랙에 대한 탄성유한요소해석을 수행하여 응력확대계수를 구하였다. 그리고 이 결과와 실험에 의해 구한 크랙전파속도로부터 ΔK_I 와 da/dN 과의 관계를 얻을 수 있었고 이 관계는 모드 I의 관계와 비교적 잘 일치하였다. 이것은 소성효과가 크지 않은 영역에서는 하중형태에 관계없이 같은 재료에서는 크랙의 전파속도만 알면 응력확대계수를 추정할 수 있다는 것을 의미한다.

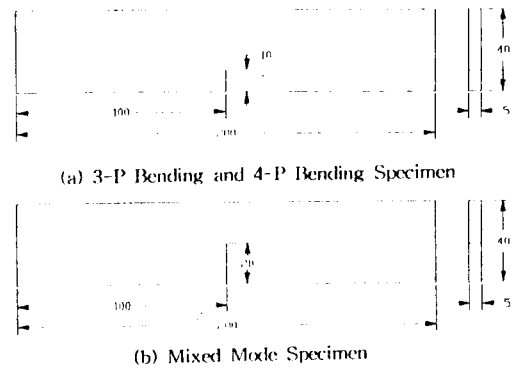


Fig. 2-1 Geometry and Dimension of the Specimen

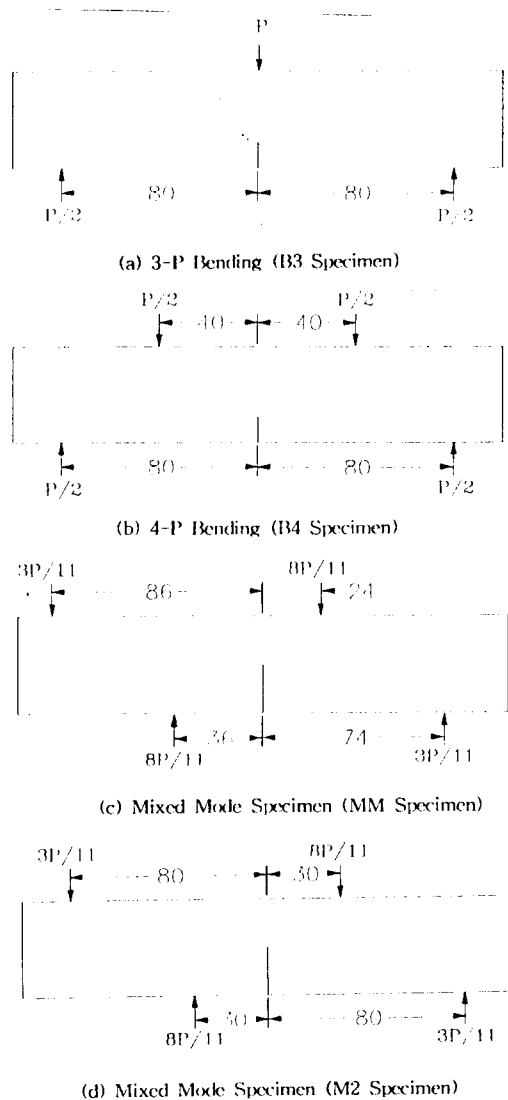


Fig. 2-2 Loading Configurations for Fatigue Tests

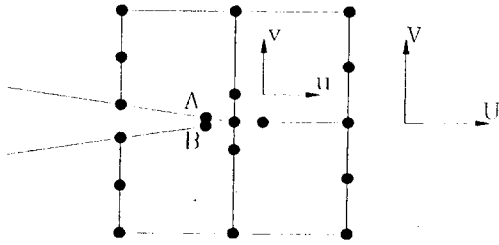


Fig. 3-1 8-node Isoparametric Crack Tip Element

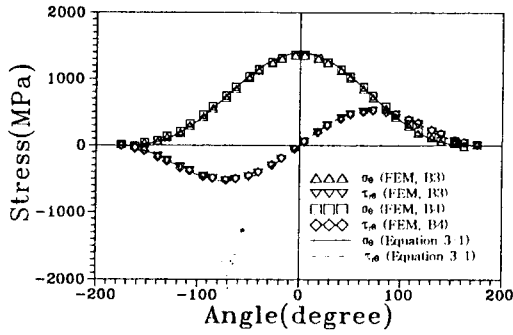


Fig. 3-2 Stress Distributions of B3 and B4 Model

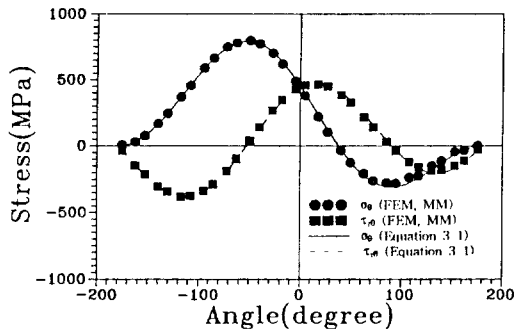


Fig. 3-3 Stress Distribution of MM Model

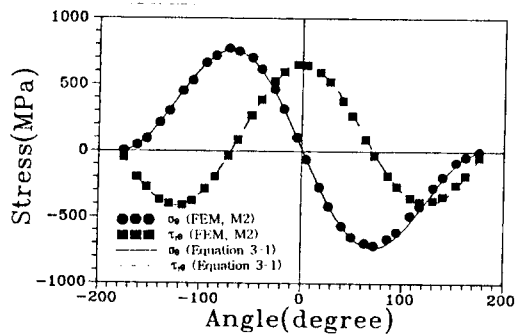


Fig. 3-4 Stress Distribution of M2 Model

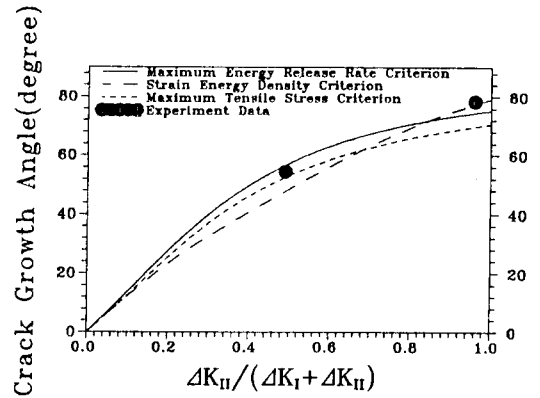


Fig. 3-5 Crack Propagation Contours of Mixed Mode Specimens

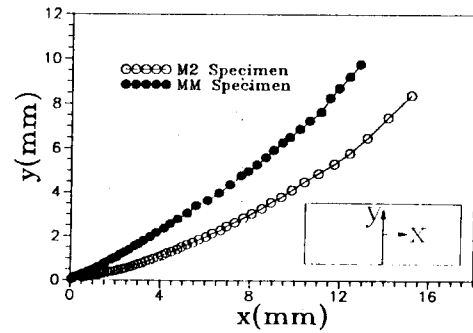


Fig. 3-6 Direction of Crack Growth for Mixed Mode Specimens

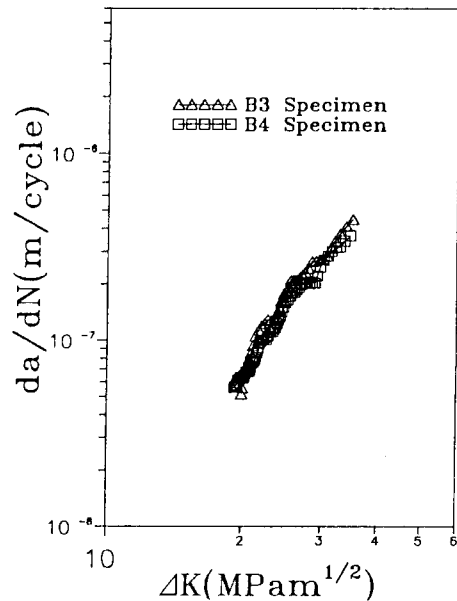
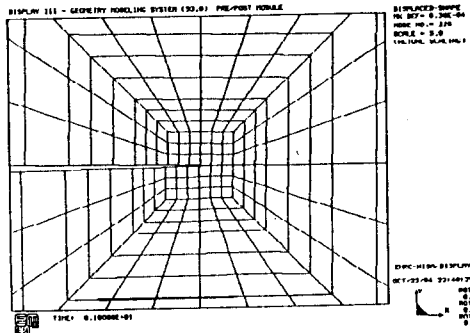
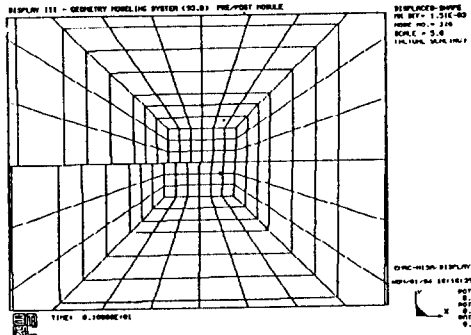


Fig. 3-7 $\Delta K - da/dN$ Relations for B3 and B4 Specimen

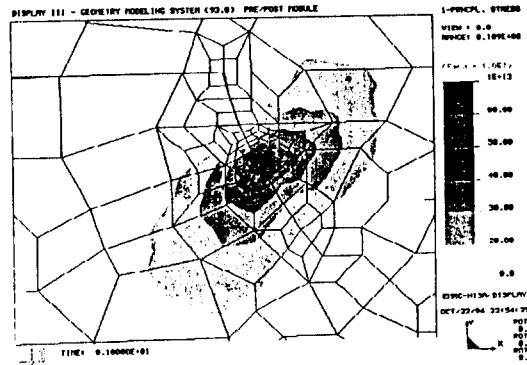


(a) Deformed Shape of MM Model

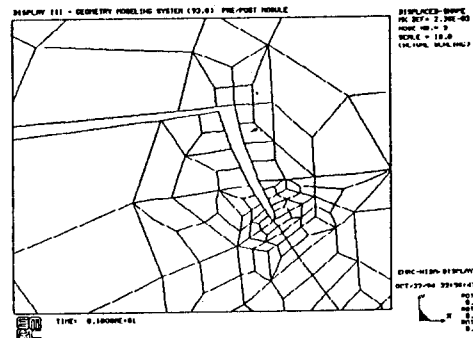


(b) Deformed Shape of M2 Model

Fig. 3-8 Deformed Shapes of MM and M2 Model

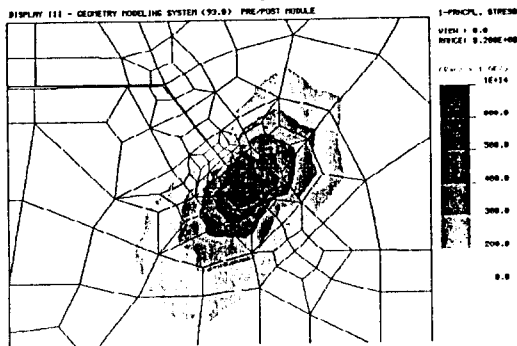


(a) Stress Distribution of M2C Model

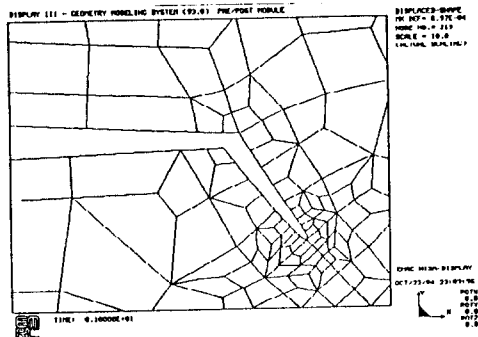


(b) Deformed Shape of M2C Model

Fig. 3-10 Stress Distribution and Deformed Shape of M2C Model ($a_x=6\text{mm}$)



(a) Stress Distribution of MMC Model



(b) Deformed Shape of MMC Model

Fig. 3-9 Stress Distribution and Deformed Shape of MMC Model ($a_x=6\text{mm}$)

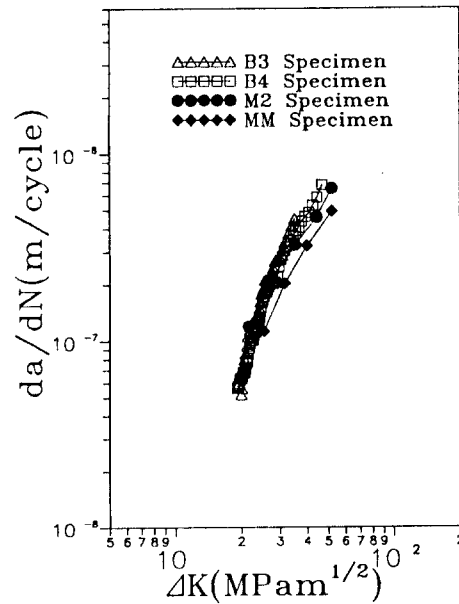


Fig. 3-11 $\Delta K - da/dN$ Relations for B3, B4, MM and M2 Specimen