論文

계면균열의 실험적 해석(II)
- 계면분리 실험과 모우드혼합도의 영향 -

최병선* · 이승재** · 채영석*

Experimental Analysis of Interfacial Crack(II)
- Interfacial Delamination Experiments and Effect of Mode Mixity -

Byoung-Sun Choi*, Seung-Jae Lee** and Young-Suck Chai*

ABSTRACT

Interfacial crack problems between fibers and matrix in composite materials were analyzed experimentally. The selected specimen geometry was an edge-cracked bimaterial strip, which gave rise to independence of crack length from fracture parameters and mode-mixities. Previous work revealed that the mode-mixity range was much wider than the conventional experiments. A biaxial delamination tester, which was capable of controlling applied displacements in two perpendicular directions, was developed. In addition to the usual measurements of loads and displacements, normal crack opening displacements(NCOD) were measured near the crack front using crack opening interferometry. A hybrid approach for extracting stress intensity factors based on the measured NCOD and finite element analyses was then adopted. Interfacial crack initiation experiments were conducted using the biaxial delamination tester by varying mode-mixities. There was good agreement between the numerical and experimental NCOD. From the series of mixed mode crack initiation experiments, it could be seen that there was a large increase in toughness with shear components. Possible cause of the increase in toughness was discussed by considering the effect of hydrostatic tensile stress shead of a crack tip.

초 록

복합재료내 섬유와 기지간의 계면에서 발생하는 계면분리현상에 대하여 실험적으로 살펴보았다. 실험 해석을 위하여 파괴변수가 균열길이와는 무관하고 넓은 영역의 모우드혼합도를 보이는 편측균열 스트립 시험편이 제안되었다. 제안된 시험편을 근거로 하여 이축에 독립적인 변위를 부여할 수 있고 매우 넓은 영역의 모우드혼합도를 발생시킬 수 있는 이축 층간분리시험기와 광학적인 간섭을 이용하여 계면균열 선단 주위에서의 균열수직개구변위(NCOD)를 측정할 수 있는 측정장치를 개발하였다. 실제 실험으로 부터 측정한 NCOD와 유한요소해석에 의한 NCOD를 비교하고 유한

* 영남대학교 기계공학과
** LG 전자

요소해석으로 부터 파괴변수를 구하였다. 실험장치를 이용한 실험 해석을 통해 모우드혼합도가 계면균열의 파괴인성치에 미치는 영향에 관하여 살펴보았다. 실험해석 결과 모우드혼합도 중에서 전단성분이 증가할 수록 파괴인성치가 증가함을 볼 수 있었다. 이 증가현상에 대한 원인을 규명하기 위하여 균열전방의 정수압적 인장응력을 고려하고 그 영향을 살펴보았다.

1. 서 론

복합재료의 파괴강도는 기지재료와 강화재료 사이에 존재하는 계면(interface)에서의 파괴인성치(fracture toughness)와 매우 깊은 관계가 있다. 특히 균열이 계면을 따라서 진행된다면 비록 단일 모우드의 외부 하중이 작용하더라도 균열 주위에서는 혼합 모우드(mixed mode)의 형태로 나타나므로, 균열의 발생과 진전현상에 대한 명확한 기준은 혼합 모우드 전영역에 걸쳐 규명되어야 한다.

이 문제와 관련하여 Williams[1]가 파괴역학 개념에 의하여 계면균열의 해석을 시도한 이래로 많은 학자들의 노력이 있었으나, 균열선단 부근의 특이현상(응력의 진동 및 특이성, 균열 상하면의 간섭 등)에 대하여는 여전히 명확한 규명이 이루어지지 않고 있다. 또한 모우드혼합도(mode mixity)가 계면균열의 파괴인성치에 미치는 영향에 관한 실험적인 연구는 Malyshev와 Salganik[2] 이래로 많은 연구[3~8]가 진행되었고, 대부분의 결과들은 모우드혼합도 중에서도 전단성분이 증가함에 따라 계면균열의 파괴인성치가 매우 증가하는 현상이 발견되었다. 최근 Liechti와 Chai[9,10]는 유리와 에폭시 수지의 조합으로 된 시험편에 이축 하중을 가하여 층간분리 실험을 행하고, 그 결과를 이론적으로 해석한 바 있다. 그들의 결과에서도 역시 전단성분이 증가함에 따라 계면의 파괴인성치가 매우 증가함이 발견되었고, 그러한 증가의 원인을 설명하기 위하여 소성이나 점탄성에 의한 에너지 소산(energy dissipation)과 표면조도(surface asperities) 등의 영향을 정량적으로 계산하였으나 실제 실험치의 약 30~40% 가량 밖에 설명이 되지 못하였다.

따라서 본 논문에서는 앞서의 연구[11]에서의 시험편과 실험장치를 이용하여 계면분리 실험을 행하고 계면균열의 형상, 균열접촉 현상 등 계면균열의 파괴역학적 거동에 대하여 살펴보았다. 또한 이를 바탕으로 다양한 모우드혼합도에 대하여 파괴인성치를 구하고 모우드혼합도가 계면균열의 파괴인성치에 미치는 영향에 관하여 살펴보았다. 실험결과 파괴 모우드 중에서 전단성분이 증가할 수록 파괴인성치가 증가함을 볼 수 있었고 이 현상에 대한 원인을 규명하기 위하여 균열전방의 정수압적 응력을 고려하고 그 영향을 살펴보았다.

이러한 연구는 일반적인 계면분리현상의 이해에 기여할 것이며, 복합재료의 적층 파괴현상이나 접합구조물 등의 구조해석 및 설계에 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 시험편과 실험장치

2-1. 시험편

계면균열의 실험 해석을 위해서는 균열의 길이가 파괴변수나 모우드혼합도에 무관하고 무엇보다도 넓은 영역의 모우드혼합도를 발생시키는 시험편의 형상이 요구된다. 이를 위한 목적으로 대개 모우드혼합도가 서로 다른 여러가지의 시험편을 사용하는 방법과 하나의 시험편에 이축하중을 작용시켜 모우드혼합도를 변화시키는 두가지 방법이 주로 이용되고 있다. 이에 대해 본 연구에서는 모우드혼합도가 매우 넓은 영역($-60° < \psi < 90°$)을 보이는 편측균열 스트립(edge-cracked strip) 시험편에 이축하중을 가하여 계면분리 실험을 행하는 후자의 방법을 택하였다.

여기서 모우드혼합도 ψ는 모우드 I과 모우드 II 응력확대계수의 비로서 다음과 같이 정의하였다.

$$\psi = \tan^{-1} \frac{Im\,[K\hat{r}^{i\varepsilon}]}{Re\,[K\hat{r}^{i\varepsilon}]} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

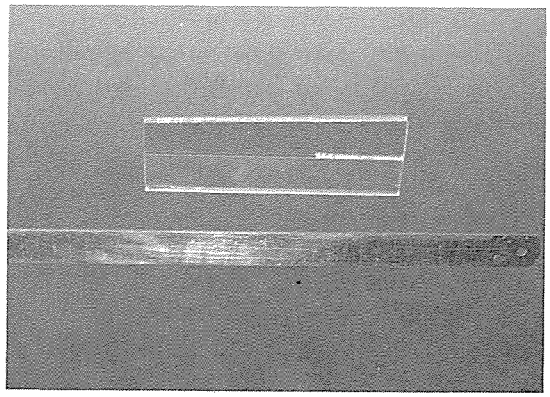
K는 복소 응력확대계수(complex stress intensity factor)로서 $K=K_1+iK_2$ 로 정의하고 $\hat{r}$은 균열선단으로 부터 일정거리를 나타내며 본 연구에서는 Rice[12]가 제안한 바와 같이 $\hat{r}=1\,\mu m$ 로 하였다. 또한 이종재료 상수(bimaterial constant) ε는 다음과 같다.

$$\varepsilon=\frac{1}{2\pi}\ln\left[\frac{\kappa_1\mu_2+\mu_1}{\kappa_2\mu_1+\mu_2}\right] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

μ는 전단탄성계수이고, κ는 평면변형에서는 $(3-4\nu)$로 그리고 평면응력에서는 $(3-\nu)/(1+\nu)$로 정의된다. 첨자 1과 2는 각각 위와 아래의 재료를 가리킨다.

계면에 대하여 법선방향과 전단방향으로 균일분포 외부변위를 독립적으로 부여할 수 있도록 고안된 편측균열 스트립 시험편은 균열길이에 대해서도 컴플라이언스(compliance)가 일정한 것으로 잘 알려져 있다[13]. 이는 실험 후 데이타의 해석시 방대한 양의 실험데이타를 줄일 수 있다는 점에서 또 하나의 커다란 장점이 된다.

그림 1은 유리와 에폭시의 조합으로 이루어진 편측균열 스트립 시험편이다. X_1 좌표축에서 원점을 기준으로 양의 부분은 유리와 에폭시가 접합된 상태이며 음의 부분은 유리와 에폭시가 분리되어 계면균열을 이루고 있다. 시험편의 한쪽 재료인 유리는 두께 $5mm$의 일반유리이며 유리의 두께인 길이방향의 양 측면은 먼저 광원이 투과되고 다시 계면으로 부터 반사된 광원이 되돌아와야 하기 때문에 빛의 산란을 막기 위한 정밀 표면가공이 필요하다. 따라서 시험편은 광학적으로 가공처리 하였으며 가공정도는 평방 센티(cm^2)당 $\lambda/4$ 내의 표면 거칠기를 유지하도록 하였다. 그리고 형태는 한쪽 면이 경사진 테이퍼 형태인데 이것은 균열면에서의 반사 광 이외의 다른 면의 반사광은 다른 방향으로 분산시키기 위해서이다. 또 다른 재료인 에폭시로서는 상온 에폭시를 선택하였다. 상온 에폭시를 사용한 이유는 유리와 접촉하여 상온(약 21℃)에서 서서히 경화(약 1주일)됨으로써 경화시 발생하는 잔류응력을 최소화시켜 실험시, 잔류응력이 계면파괴의 거동에 미치지 않도록 하기 위해



Unit (mm)

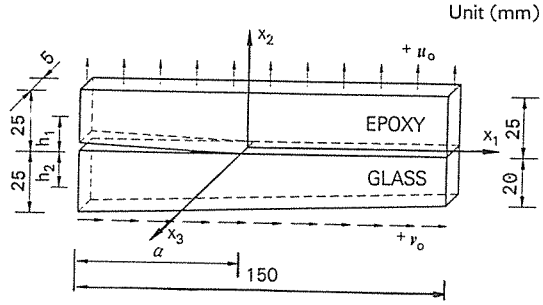


Fig. 1. Bimaterial edge-cracked strip specimen

서이다. 시험편을 제작하여 광탄성 실험장치로 계면부분을 살펴 본 결과 잔류응력이 거의 나타나지 않음을 보았다. 사용된 에폭시는 주재로써 CIBA-GEIGY사의 bisphenol계 LY554이며 경화제는 amido-amin계 77-330이다. 주재와 경화제의 배합비는 (2 : 1) 이며 교반된 에폭시는 진공조(vacuum chamber)에서 공기를 완전히 탈기시켜 사용하였다.

제작된 시험편은 계면으로부터 $\pm h_i\,mm$ 이상의 부분에 steel-epoxy의 성분으로된 접착제를 도포하여 시험기의 그립과 부착하였다.

2-2. 실험장치

제시된 시험편인 편측균열 스트립 시험편에 이축(biaxial) 방향으로 하중(변위)을 제어·해석하기 위하여 이축을 독립적으로 제어할 수 있는 적절한 실험장치와 균열의 거동을 해석할 수 있는 측정장치가 필요하였다. 실험장치는 그림 2와 같이 고정밀 이축 층간분리 시험기(biaxial delamination tester)

와 균열수직개구변위 측정장치(crack opening interferometry)로 구성되어 있다[11].

이축 층간분리 시험기는 기존의 일축시험기에서 할 수 없는 매우 폭넓은 영역의 모우드혼합도를 발생시킬 수 있어 다양한 상황에서 파괴인성 실험을 행할 수 있는 외에 시험편에 가해진 변위 및 하중을 측정할 수 있는 장치가 부착되어 시험편에 대한 많은 정보를 얻을 수 있다. 시험기의 구조는 독립적으로 움직이는 두 축이 직각으로 배치되어 있으며 각축의 변위제어는 고분해능의 스테핑 모터를 사용함으로써 펄스당 0.5 μm의 변위제어가 가능하다. 또한 개인용 컴퓨터와 접속하여 폐회로를 구성하였으며 두축을 구동하기 위한 펄스파의 출력, 그에 따른 하중, 변위의 데이타는 인터페이스 카드를 통해 컴퓨터로 입력되도록 설계되어 있다.

균열수직개구변위 측정장치는 시험편의 계면균열에 나타나는 광학적인 간섭무늬를 포착하여 계면균열 선단 주위의 균열의 형상과 수직변위 등을 측정할 수 있도록 고안되어 있다. 본 연구에서 사용되는 편측균열 스트립 시험편은 한쪽 재료가 유리로써 투명체이며 광원으로부터의 빛은 광분리장치(beam separation unit)와 시험기의 그립부에 부착된 반사 거울을 통해 유리를 측면으로 투과하여 계면에 수직으로 입사한다. 이때 입사된 빛은 계면균열을 이루는 상하 두 면에서 반사되어 균열수직개구변위 만큼의 반사지연으로 인한 빛의 간섭무늬(fringe pattern)를 얻을 수 있는데, 이 간섭

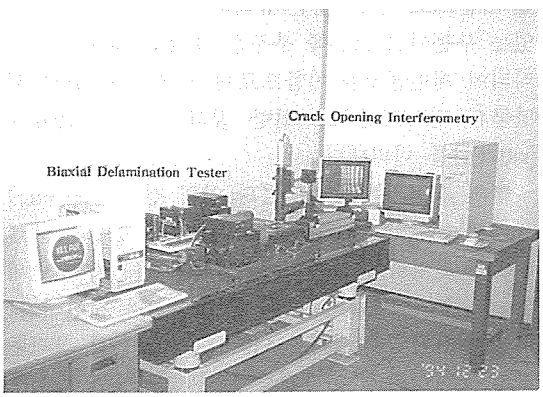


Fig. 2. Experimental equipment ; Biaxial delamination tester and crack opening interferometry

무늬를 수치화하면 계면균열의 형상을 실험적으로 구할 수 있다. 한편 균열의 발생 및 진전되는 전체과정을 CCD 카메라를 통해 타이머가 부착된 고해상도의 VCR에 녹화하여 후에 녹화된 간섭무늬를 재생함으로써 균열수직개구변위(NCOD) 측정뿐만 아니라 균열의 발생과 진전현상, 균열선단 주위의 특이성, 균열접촉 현상 등을 직접 눈으로 확인할 수 있다. 또한 실험해석에서의 결과와 유한요소해석에 의한 결과를 비교, 분석함으로써 시험편에 대한 파괴역학적인 정보를 얻을 수 있다.

3. 계면분리 실험

3-1. 균열 면의 접촉

편측균열 스트립 시험편의 파괴 거동 중에서 흥미로운 점은 균열면의 접촉 현상이다. Comninou [14, 15]는 England[16]에 의해 제기된 계면균열 선단 근방의 상하면이 서로 파고들어가는 물리적으로 이해할 수 없는 현상을 설명하기 위하여 계면균열은 완전히 열리지 않고 균열선단 근방의 면은 마찰이 없는 접촉상태에 있다는 모델을 제시하였다. 특히 중앙계면균열을 갖는 반무한판에서는 인장성분이 작용할 때와는 달리 전단성분이 작용할 때는 매우 큰 접촉영역과 한쪽 균열의 선단이 먼저 닫힘을 보았다.

본 연구에서는 이 현상을 검증하기 위하여 표 1의 유리와 에폭시의 물성조건과 선형 탄성이론에 근거하여 수치해석적으로 살펴보았다. 해석은 물성과 형상에 있어 비선형성을 가지는 계면에 대하여 선형탄성 이론에 의한 균열 면의 상호 침입을 허용한 경우와 균열 면은 상호 침입하지 않고 접촉한다는 관점에서 상호 침입을 제한한 경우에 대하여

Table 1. Material Properties

Material	Young's Modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
Epoxy	1.72	0.40
Glass	68.95	0.20
Bimaterial constant $\varepsilon = 0.048647$		

해석하였다. 해석에는 ANSYS 유한요소 해석 프로그램[17]을 이용하였으며 균열선단 주위의 요소는 8절점 요소로써 최소 크기는 $r/a=1.3\times10^{-4}$로 하였다.

그림 3은 시험편에 양의 전단변위($u_o=+1\,\mu m$)만을 가하였을 때의 계면의 형상을 나타낸 유한요소해석 결과이다. 외부 변위에 대한 균열면의 변위차 Δu_o, Δv_o는 다음식에 의하여 구하였다.

$$\Delta u_o = u_o^{(1)} - u_o^{(2)}$$
$$\Delta v_o = v_o^{(1)} - v_o^{(2)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (3)$$

여기서 첨자 (1)과 (2)는 각각 에폭시와 유리를 나타내며 u_o와 v_o는 각 재료의 변위량을 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 균열선단 부근($r/a<0.002$)에서는 균열 면이 서로 침입하는 현상을 볼 수 있으며 균열선단에서 멀리 떨어진 부분($r/a>0.8$)에서는 접촉이 일어남을 볼 수 있다. 한편 균열면의 상호 침입을 제한하였을 때는 상호 침입을 고려한 경우보다 균열 면의 접촉 영역이 약 1/2 정도 감소함을 볼 수 있는데 이 현상 또한 Comninou [14]가 제시한 결과와 일치한다.

그림 4는 음의 전단변위($u_o=-1\,\mu m$)에 대한 계면의 형상을 나타낸 유한요소해석 결과인데 그림

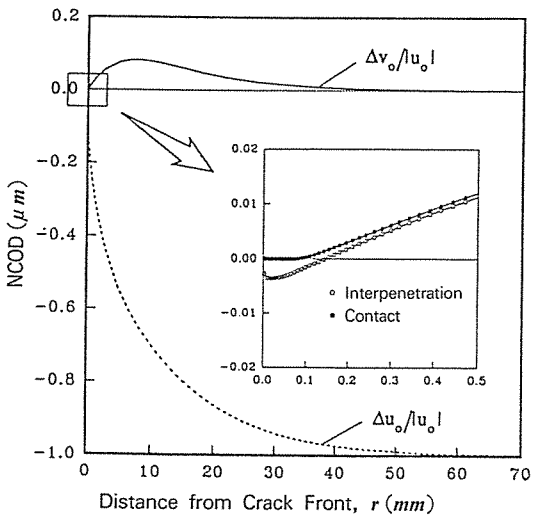


Fig. 3. Crack opening displacements under positivie shear displacements ; ($\alpha=75.0\,mm$)

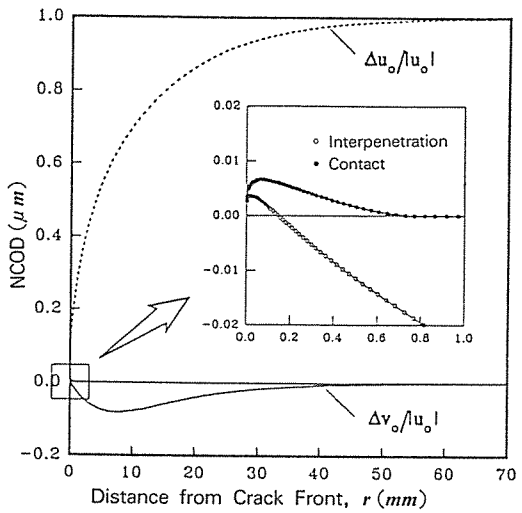


Fig. 4. Crack opening displacements under negative shear displacements ; ($\alpha=75.0\,mm$)

3과는 반대로 균열선단 근방 ($r/a<0.002$)에서는 균열열림 현상을 볼 수 있고 그외의 대부분의 계면은 상호 침입함을 보여주고 있다. 또한 균열의 상호 침입을 제한하였을 때는 균열열림 부분이 선형탄성적인 경우보다 더 크게 나타나며($r/a<0.01$), 양의 전단변위와는 달리 균열선단 근방을 제외한 대부분의 영역이 접촉함을 보여주고 있다.

그림 5와 6은 실제 시험편의 계면균열에서 나타나는 광학적인 간섭무늬를 나타내며 시험편에 외부변위를 가함으로써 계면균열이 진전하는 과정을 보여주는 그림이다. 그림에서 균열선단(crack tip)을 기준으로 왼쪽부분은 유리와 에폭시가 접합되어 있는 부분이고 오른쪽 부분은 유리와 에폭시가 분리되어 계면균열을 이룸으로써 균열수직 개구변위만큼의 반사지연으로 인한 빛의 간섭무늬(fringe pattern)를 나타낸다.

먼저 그림 5는 얼마만큼의 양의 전단변위($+u_o$)를 가한 후 인장변위($+v_o$)를 부여한 경우의 계면균열의 진전과정이다.(실험시 시험편에 가한 변위의 속도는 0.5 μm/sec이다.) 그림 5의 첫번째 그림은 초기균열의 상태를 나타낸다. 두번째 그림은 양의 전단변위를 가하였을 때의 그림이며 간섭무늬의 간격이 첫번째 그림보다 넓어졌음을 보여주고 있는데 이는 계면균열이 양의 전단변위에 대

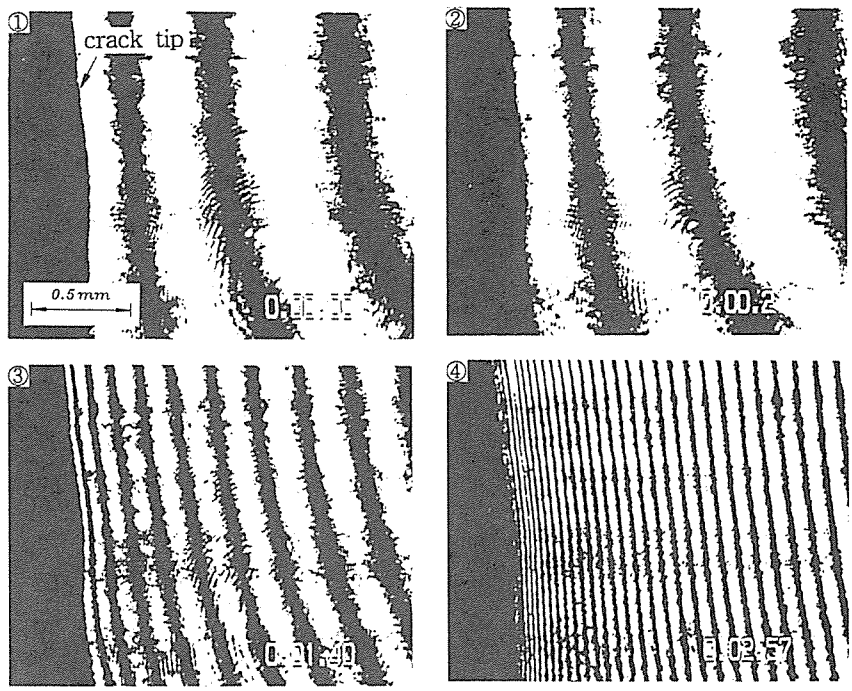


Fig. 5. Crack face contact and extension under a sequential loading ; Positive shear displacements followed by normal displacements

하여 닫히고 있음을 알 수 있다. 한편 균열선단 근방에서의 접촉현상은 초기 인장변위로 인하여 그림상으로는 잘 표현되지 않았으나 균열의 닫힘 현상으로 인하여 미소하게 나타남을 예측할 수 있다. 세번째 그림은 전단변위에 이어 인장변위를 가하였을 때의 그림인데 간섭무늬의 간격이 급격히 좁아진 것으로 보아 계면균열이 빠른 속도로 열리고 있음을 알 수 있다. 이어 네번째 그림은 계면균열에 임계 파괴인성치 이상의 변위를 가하였을 때 계면균열이 진전하는 모습을 나타낸 그림이다.

그림 6은 음의 전단변위($-u_o$)를 가한 후 이어 인장변위를 부여한 경우의 계면균열의 진전과정이다. 첫번째 그림은 초기 균열의 상태를 보여주고 있으며 두번째 그림은 음의 전단변위를 가하였을 경우, 그림 5와 달리 간섭무늬의 간격이 좁아졌음을 나타내는데 이는 계면균열이 열리고 있음을 알 수 있다. 세번째 그림은 전단변위에 이어 양의 인장변위($+v_o$)를 가하였을 때의 그림인데 역시 간섭무늬가 급격히 좁아진 것으로 보아 인장변위에 대하여 균열이 빠른 속도로 열리고 있음을 보여주고 있다. 이어 네번째 그림은 계면균열에 임계 파괴인성치 이상의 변위를 가하였을 때 계면균열이 진전하는 모습을 나타낸 그림이다.

한편 앞의 그림 5와 그림 6의 네번째 그림은 계속적인 외부변위에 대하여 균열이 진전하는 모습인데 두 그림을 비교해 볼 때 조금 차이가 있음을 알 수 있다. 그림 5의 경우, 임계변위 후 변위를 계속 가하였을 때 균열선단 근방의 간섭무늬가 매우 좁은 상태를 보여주고 있는데 이것은 균열의 열림 속도에 비해 균열의 진전속도가 상대적으로 느림을 알 수 있으며 그림 6의 경우는 균열선단 근방의 간섭무늬가 비교적 뚜렷한 형태로 보아 그림 5의 경우보다 균열의 진전속도가 상대적으로 빠름을 알 수 있다. 이것은 양의 전단변위에 대한 균열선단에서의 접촉현상이 균열의 진전속도에 제약을 주며 상대적으로 음의 전단변위에 대한 균열열림 현상이 균열의 진전에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

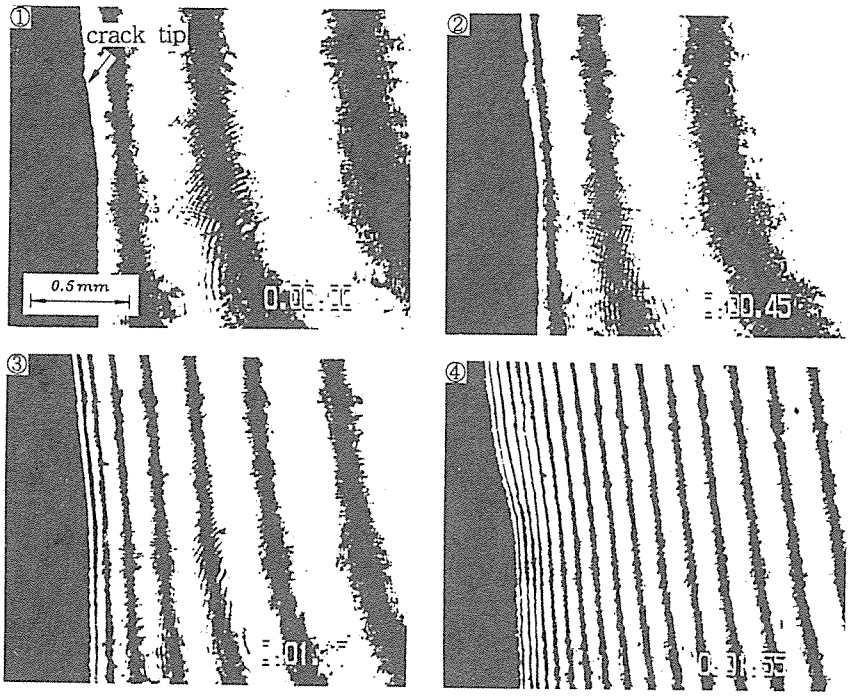


Fig. 6. Crack face contact and extension under a sequential loading ; Negative shear displacements followed by normal displacements

3-2. 실험해와 수치해

시험편의 간섭무늬에서 수평 중앙부분은 평면변형(plane strain) 조건을 만족하는 부분이므로 이 부분의 거동은 2차원 계면균열 문제와 일치한다고 볼 수 있다. 그러나 이러한 간섭무늬로 부터는 균열수직개구변위(NCOD), 균열의 발생과 진전현상, 균열접촉현상 등은 알 수 있으나 이로 부터 바로 파괴역학적인 변수(응력확대계수, 파괴인성치 등)는 얻을 수 없다. 따라서 실험해석에서의 파괴변수를 구하기 위해서는 유한요소해석에 의한 수치해석이 병행되어야 하며, 실험해와 수치해가 일치한다면 실험으로 부터의 파괴변수는 같은 조건에서의 수치해석을 통해 구할 수 있다.

그림 7은 시험편에 순수 인장변위를 가하였을 때의 수치해석에 의한 계면균열의 NCOD와 실제 실험에서의 계면균열의 NCOD를 비교한 그림이다. 그림에서 실선은 수치해석에 의한 NCOD를 나타낸 것이고 불연속점(○, △, □)은 간섭무늬로 부터 측정할 수 있는 실제 계면균열의 NCOD를 나타낸 그림이다. 그림에서 v_o는 시험편에 가한 외부 변위를 나타내고 v_{oc}는 계면균열이 파단을 일으키는 임계

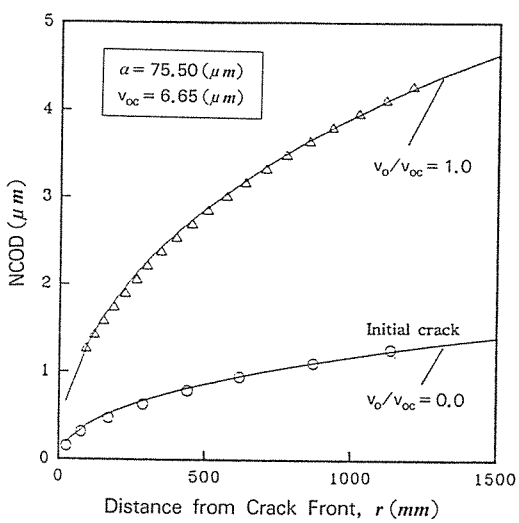


Fig. 7. NCOD measurements and predictions under normal loading

변위를 나타낸다. 그림에서 초기 균열의 NCOD에 상당하는 수치해석시의 초기 외부변위는 단위인장변위($1\,\mu m$)에 대한 NCOD에 적당한 변수를 곱함(예를 들면 그림 5의 경우 $1.9\,\mu m$ 이다)으로써 얻을 수 있다. 이후 임계변위 v_{oc} 에 대한 NCOD와 수치해석상의 NCOD를 비교해 볼 때 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 시험편에 양의 전단변위($+u_o$)를 가한 후 이어 양의 인장변위($+v_o$)를 부여한 경우로써 각 변위에 대한 수치해석 결과와 실제 계면균열의 거동과의 비교 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 양의 전단변위를 변화시킴에 따라 계면균열의 NCOD는 초기 보다 감소하여 균열이 닫힘을 볼 수 있으며 이 현상은 앞서의 수치해석과 실험의 결과와도 일치하고 있음을 알 수 있다. 이때의 균열 접촉 영역은 간섭무늬로 부터는 잘 파악이 되지 않으나 유한요소 해석시 요소의 크기를 최소화 함으로써 영역의 크기를 추정할 수 있다. 그러나 본 해석에서 고려한 요소의 크기($r/a=1.3\times10^{-4}$)에서는 접촉 현상을 볼 수 없었으며 따라서 이 보다 더 미소 영역에서 접촉이 일어남을 예측할 수 있다. 이어 법선방향의 인장변위를 가함으로써 균열 수직변위는 커지고 임계변위 v_{oc} 에 대한 NCOD와 수치해석상의 NCOD를 비교해 볼 때 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그림에서 $\overline{u}_o$ 와 $\overline{v}_o$ 는 법선방향과 전단방향의 무차원 외부변위를 나타내며 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{u}_o = \frac{u_o}{u_{os}}$$

$$\overline{v}_o = \frac{v_o}{v_{oc}} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

여기서 u_o 와 v_o 는 전단방향과 법선방향에 대한 외부 변위이며 u_{os} 와 v_{oc} 는 전단 방향과 법선방향의 최대로 가한 외부변위이다. 특히 v_{oc} 는 계면균열이 진전하는 임계 외부변위를 나타낸다.

그림 9는 음의 전단변위($-u_o$)에 이어 양의 인장변위를 가하였을 경우로써 역시 각 변위에 대한 수치해석 결과와 실제 계면균열의 거동과의 비교 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 음의 전단변위를 변화시킴에 따라 NCOD는 초기 균열의 경우보다 증가하고 있음을 볼 수 있다. 결국 균열선단의 미소 부분이 열림을 알 수 있고 이 결과 또한 수치해석과 실험의 결과와 일치하고 있음을 알 수 있다. 이어 법선방향의 변위를 가함으로써 균열 수직변위는 커지고 있으며 임계변위 v_{oc} 에 대한 NCOD와 수치해석상의 NCOD를 비교해 볼 때 앞서의 경우와

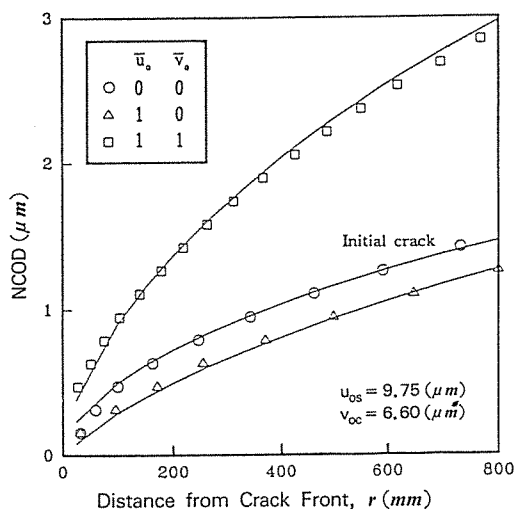


Fig. 8. NCOD measurements and predictions under sequential normal loading ; Positive shear displacements followed by normal displacements

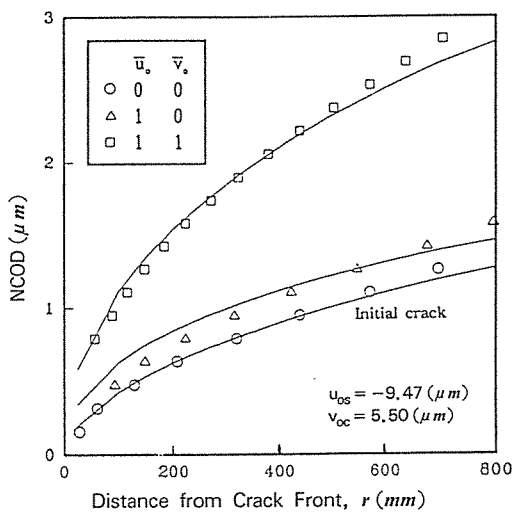


Fig. 9. NCOD measurements and predictions under sequential normal loading ; Negative shear displacements followed by normal displacements

같이 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과로 부터 실험해와 수치해는 서로 일치함을 볼 수 있다. 따라서 실험으로 부터의 파괴변수는 같은 조건에서의 수치해석을 통해 구할 수 있으며 그 결과는 신뢰성을 가질 수 있음을 알 수 있다.

3-3. 모우드혼합도와 계면파괴인성

실험해와 수치해와의 신뢰성을 바탕으로 편측균열 스트립 시험편에 이축변위를 가함으로써 $-80° < \psi < 50°$의 범위에 해당되는 영역의 모우드혼합도를 이끌어내었다. 실험은 4개의 시험편에 대하여 다양한 양과 음의 전단변위를 가하고 이어 인장변위를 균열이 개시, 충분히 진전될 때까지 가하였다.

그림 10은 실험을 통해 얻은 다양한 모우드혼합도에 대하여 계면균열의 파괴인성치 G_c를 나타낸 그림이며 순수 인장변위($\psi = -8.15°$)에 대한 파괴인성치가 4개의 시험편에 대하여 거의 비슷한 점에서 일치하는 것으로 보아 계면의 접합 상태가 비슷한 조건임을 알 수 있다. 그림에서 보면 $-30° < \psi < 30°$에 대하여는 비교적 파괴인성치가 모우드혼합도에 대하여 큰 변화를 보이지 않으나 $-80° < \psi < -30°$와 $30° < \psi < 50°$의 모우드혼합도에 대해서는 전단성분이 증가할 수록 파괴인성치가 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이 결과는 앞서의 연구와도 일치하며, 계면균열의 파괴인성치는 모우드혼합도와 매우 밀접한 관계임을 볼 수 있다.

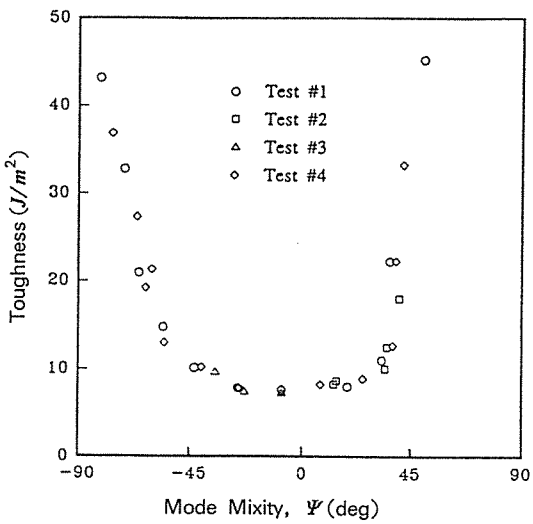


Fig. 10. Variation of interfacial toughness with mode-mixity

또한 그림 10의 결과를 볼 때 순수 인장변위의 경우인 모우드혼합도 $-8.15°$를 기준으로 파괴인성치는 비대칭 양상을 보인다. 특히 파괴인성치의 증가양상은 양의 전단 성분의 경우가 음의 전단성분 경우보다 더 급격히 변함을 보여주고 있다. 이는 균열이 진전하는데 있어 방해정도가 양의 전단변위에 대한 경우가 음의 전단변위에 대한 경우보다 크게 나타남을 알 수 있는데 이것은 양의 전단변위에 대해서는 균열선단 근방에서 접촉현상이 발생하며 음의 전단변위에 대해서는 열림현상이 일어남으로 이때의 균열면에 대한 마찰효과가 파괴인성치에 영향을 미치기 때문이라고 생각된다.

3-4. 계면파괴인성과 정수압적 인장응력

앞서의 실험결과로 부터 계면 파괴인성치는 전단성분이 증가함에 따라 급격히 증가함을 볼 수 있으며, 이 증가 현상에 대하여 Liechti와 Chai[9, 10]는 3가지 요인을 제안한 바가 있다. 본 연구에서는 그외에 또다른 증가요인으로 다음 식과 같이 정수압적 인장응력(hydrostatic tensile stress)의 영향이 있을 것으로 예상하고 계면균열 주위의 정수압적 인장응력의 분포를 살펴보았다.

여기서 정수압적 인장응력의 성분은 다음과 같다.

$$\sigma_h = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

연성파괴(ductile fracture)일 경우, 제조공정에서 발생한 기공(void)은 정수압적 인장응력에 의하여 성장하고 이 기공이 성장하여 근접 기공과 연결되는 과정을 통하여 계면의 균열이 진전되는 것으로 생각된다. 그러므로 균열선단에 작용하는 응력중 기공을 확대시키는 정수압적 인장응력은 계면의 파괴인성치에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

그림 11는 모우드혼합도의 변화에 대하여 균열선단 주위의 정수압적 인장응력 분포를 나타내었다.

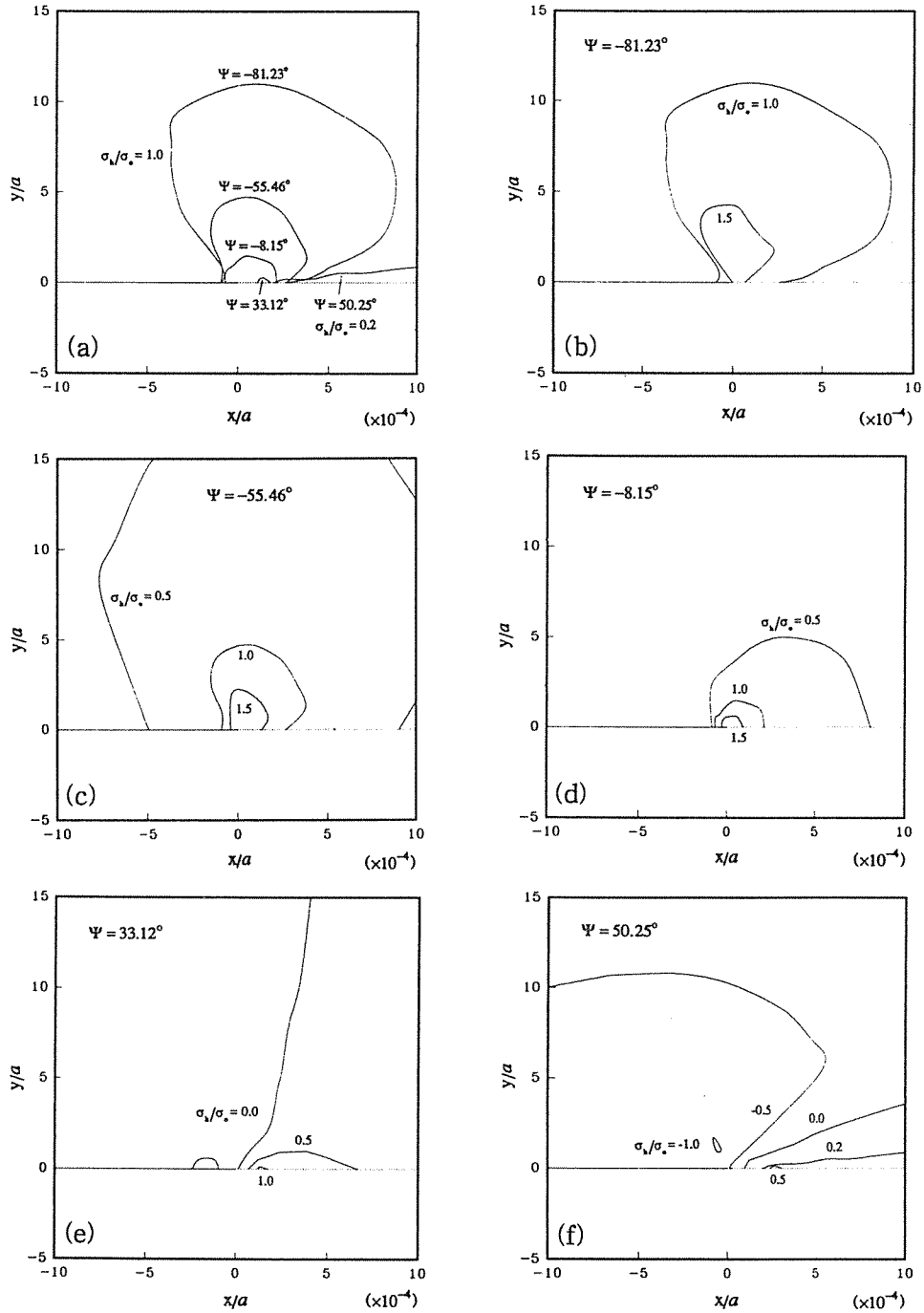


Fig. 11. Variation of hydrostatic tensile stress distribution near crack tip with mode-mixity

먼저 그림 11-(a)는 모우드혼합도의 변화에 대하여 응력의 크기가 $\sigma_h = \sigma_o$ 인 부분을 전체적으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 순수 인장상태($\psi = -8.15°$)를 기준으로 음의 전단성분의 증가에

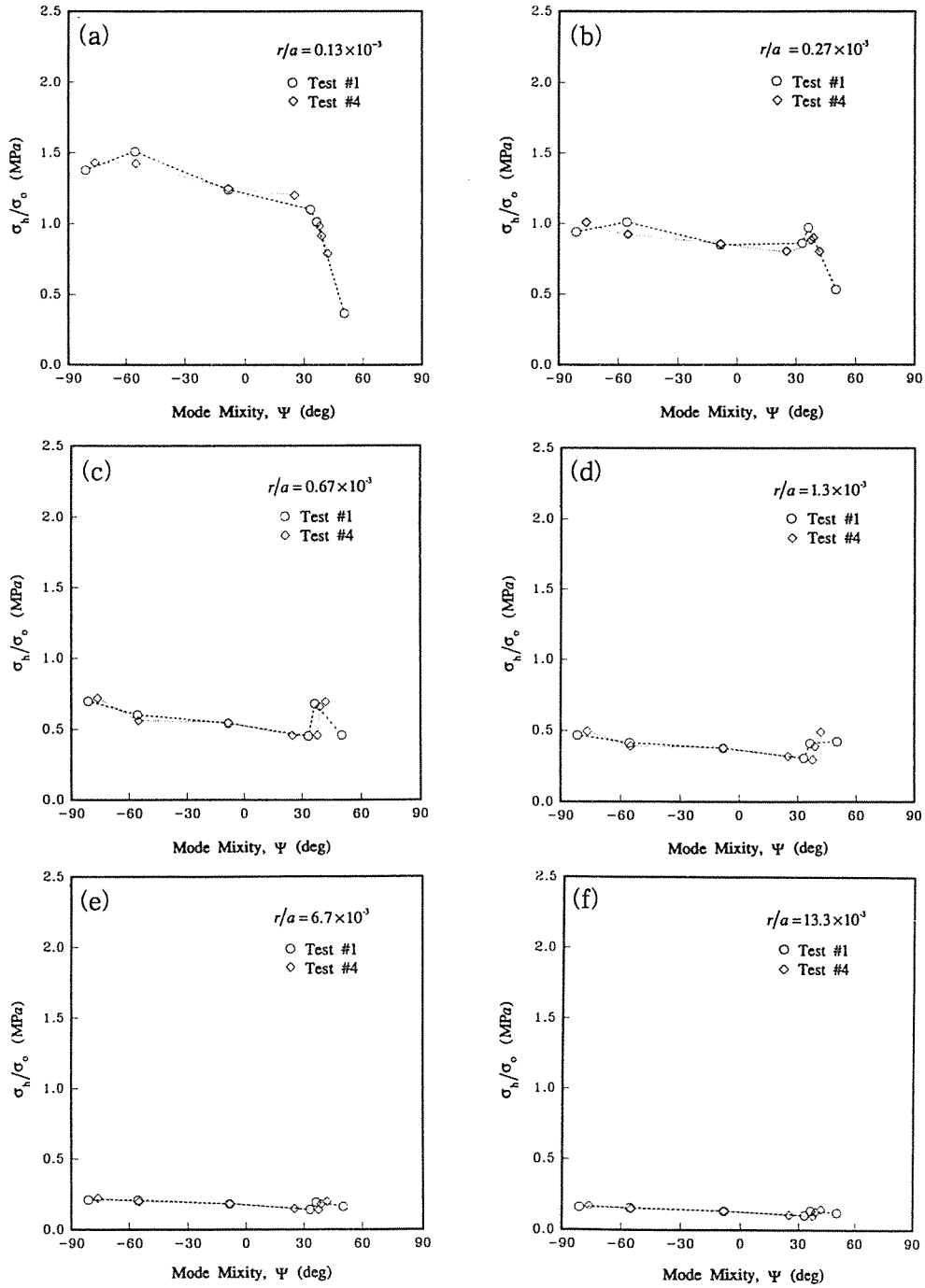


Fig. 12. Variation of hydrostatic tensile stress along interface with mode-mixity

대하여 정수압적 인장응력의 영역이 커짐을 알 수 있고 상대적으로 양의 전단성분에 대하여 영역이 작아짐을 보여준다. 그림 11-(b)~(f)는 각각의 모우드혼합도에 따른 계면균열 선단부근의 정수압

적 인장응력의 세기 분포상태를 나타내었다. 여기서도 순수 인장상태를 기준으로 음의 전단성분이 증가함에 따라 응력의 세기가 커짐을 볼 수 있고 양의 전단성분의 증가에 대하여 응력의 세기가 약화되어 $\psi = 33.12°$ 부터는 균열선단 부근의 응력 세기는 음(−)의 값이 나타남을 볼 수 있다.

그림 12는 모우드혼합도에 대하여, 균열선단으로부터 계면을 따라 일정거리(r/a)에서의 정수압적 인장응력의 세기를 나타내었다. 해석 결과, 균열선단의 최근접 거리($r/a = 1.3\times10^{-4}$)에서는, 모우드혼합도에 대하여 순수 인장상태($\psi = -8.15°$)를 기준으로 음의 전단성분의 증가에 대하여 응력의 세기는 약간의 증가양상을 보여주며 양의 전단성분에 대해서는 응력의 세기가 감소함을 보여주고 있다. 그 중에서도 $30° < \psi < 50°$의 영역에서는 급격히 감소하고 있음을 보여 주는데 이 영역은 앞서의 실험에서 양의 전단성분의 증가에 대한 파괴인성치의 급격한 증가 영역과 일치한다. 한편, 그림 12−(b)~(f)에서와 같이 균열선단으로 부터 거리가 멀어짐에 따라 응력의 세기는 전체적으로 감소하며 특히 모우드혼합도의 변화에 대하여 응력의 세기는 그다지 큰 변화가 없음을 볼 수 있다.

이상의 결과로 부터 양과 음의 전단성분의 증가에 대한 계면 파괴인성치의 증가요인으로, 정수압적 인장응력은 균열선단에서 영향이 있음을 알 수 있다. 특히 양의 전단성분의 증가에 대한 정수압적 인장응력의 감소는 균열선단의 기공성장을 억제하여 균열 진전에 방해요인으로 작용함으로써 이로 인해 파괴인성치의 증가에 기여함을 알 수 있다. 그러나 음의 전단성분에 대해서는 큰 영향을 미치지 않음을 보이며 이는 역시 앞서의 실험결과에서의 파괴인성치의 비대칭 양상과 양의 전단변위에 대한 균열선단 근방에서의 접촉현상, 음의 전단변위에 대한 열림현상을 고려해 볼 때, 음과 양의 전단성분의 증가에 대한 파괴인성치의 증가요인이 다소 차이가 있음을 예측할 수 있다.

4. 결 론

계면균열 문제의 이해를 위해 편측균열 스트립 시험편과 실험장치를 이용하여 계면분리 실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 편측균열 스트립 시험편에 전단변위를 가한 결과, 양의 전단변위에 대하여 균열 선단의 접촉현상을 볼 수 있었고 음의 전단변위에 대해서는 균열선단의 열림현상을 볼 수 있었다. 이는 균열의 개시, 진전현상에 영향을 미치며 계면균열의 파괴인성치와도 관계가 있음을 알 수 있었다.

(2) 계면분리 실험을 통해 $-80° < \psi < 50°$의 범위에 해당되는 영역의 모우드혼합도를 이끌어내었으며 실험 결과 모우드혼합도에 대하여 전단성분이 증가할 수록 계면균열의 파괴인성치는 급격히 증가함을 볼 수 있었다. 따라서 계면균열의 파괴인성치는 모우드혼합도와 매우 밀접한 관계임을 알 수 있었다.

(3) 양과 음의 전단성분의 증가에 대한 계면 파괴인성치의 증가요인으로, 정수압적 인장응력은 균열선단에서 영향이 있음을 알 수 있었고 특히 양의 전단성분의 증가에 대한 정수압적 인장응력의 감소는 균열선단의 기공성장을 억제하여 균열 진전에 방해요인으로 작용함으로써 이로 인해 파괴인성치의 증가에 기여함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

1. M. L. Williams, "The Stresses around a Fault or Crack in Dissimilar Media," *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 49, 1959, pp. 199−204.

2. B. M. Malyshev and R. L. Salganik, "The Strength of Adhesive Joints Using the Theory of Cracks," *Int. J. Fract. Mech.*, Vol. 1, 1965, pp. 114−128.

3. G. Trantina, "Combined Mode Crack Ex-

tension in Adhesive Joints," *J. Comp. Matls.*, Vol.6, 1972, pp.371-385.

4. G. P. Anderson, K. L. DeVries and M. L. Williams, "Mixed Mode Stress Field Effect in Adhesive Fracture," *Int. J. Fract.*, Vol.10, 1974, pp.565-583.

5. D. R. Mulville, D. L. Hunston and P. W. Mast, "Developing Failure Criteria for Adhesive Joints under Complex Loading," *J. Eng. Mat. Tech.*, Vol.100, 1978, pp.25-31.

6. K. M. Liechti and E. C. Hanson, "Nonlinear Effects in Mixed-mode Interfacial Delaminations," *Int. J. Fract.*, Vol.36, 1988, pp.199-217.

7. H. C. Cao and A. G. Evans, "An Experimental Study of the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces," *Mechanics of Materials*, Vol.7, 1989, pp.295-304.

8. J. S. Wang and Z. Suo, "Experimental Determination of Interfacial Toughness using Brazil-Nut-Sandwich," *Acta. Metal.*, Vol.38, 1990, pp.1279-1290.

9. K. M. Liechti and Y. S. Chai, "Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness," *J. Appl. Mech.*, Vol.58, 1991, pp.680-687.

10. K. M. Liechti and Y. S. Chai, "Asymmetric Shielding in Interfacial Fracture Under In-Plane Shear," *J. Appl. Mech.*, Vol.59, 1992, pp.295-304.

11. 채영석, 최병선, "계면균열의 실험적 해석 (I)-시험편의 선정 및 이축 층간분리 시험기의 개발," 한국복합재료학회지, 제8권, 제1호, 1995, pp.1-12.

12. J. R. Rice, "Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks," *J. Appl. Mech.*, Vol.55, 1988, pp.98-103.

13. C. Atkinson, "On Stress Singularities and Interfaces in Linear Elastic Fracture Mechanics," *Int. J. Fract.*, Vol.13, 1977, pp.807-820.

14. M. Comninou, "The Interface Crack," *J. Appl. Mech.*, Vol.44, 1977, pp.631-636.

15. M. Comninou, "The Interface Crack in a Shear Field," *J. Appl. Mech.*, Vol.45, 1978, pp.287-290.

16. A. H. England, "A Crack between Dissimilar Media," *J. Appl. Mech.*, Vol.32, 1965, pp.400-402.

17. *ANSYS User's Manual for Revision* 5.0, Swanson Analysis Systems, Inc., 1992.