

복합재료내의 계면균열의 인성과 균열진전 거동 Toughness and Crack Propagation Behavior of The Interfacial Crack in Composite Materials

최 병 선*
Byung-Sun Choi*

<Abstract>

Interfacial crack problems between fiber and matrix in composite materials are discussed. A series of interfacial crack initiation and propagation experiments are conducted using the biaxial loading device for various mode-mixes. Normal crack opening displacement (NCOD) is measured near crack front by a crack opening interferometry and used for extracting fracture parameters. From mixed mode interfacial crack initiation experiments, large increase in toughness with shear components is observed. Initial velocity of crack propagation is very dependent upon the mode-mixes. It increased with positive mode-mix due to the increase of stress singularities ahead of crack front and decreased with negative mode-mix resulting from the increase of the degree of compressive stress behind the crack front. Crack propagation was less accelerated with positive mode-mix than the negative mode-mix.

Key Words : *Interfacial crack, Mode-mix, Toughness, Crack propagation, Propagation velocity*

1. 서 론

최신 섬유강화 복합재료는 첨단 신소재로서 우주, 항공, 자동차, 방위 산업뿐만 아니라 스포츠, 레저 등 산업분야에서의 응용이 확대되고 있다. 이러한 섬유강화 복합재료의 기계적 거동 및 구조적 신뢰성은 섬유(fiber)와 기지(matrix)의 강도, 강성계수, 종횡 비, 길이 분포, 체적 비, 섬유의 방향 및 분포 등의 많은 인자들에 의해 결정된다. 그 중에서도 기지와 강화섬유(reinforced fiber)간에 존재하는 경

계면(이하 계면)은 가장 취약한 부분이며 복합재료의 전체 강도와 밀접한 관계가 있다. 따라서 섬유강화 복합재료의 계면은 복합재료의 비강도, 비강성을 향상시키기 위한 관심사로서 많이 연구되고 있다.

그러나 계면에 존재하는 계면균열은 균열선단 부근의 특이현상(응력의 진동 및 특이성, 균열 상하면의 간섭 등)을 비롯하여 여전히 명확한 규명이 이루어지지 않고 있으며 특히 모우드 성분 중에서 전단 성분(모우드 2)이 증가함에 따라 계면균열의 인성치(toughness)가 증가하는 현상을 볼 수 있었다^{1)~4)}.

* 정회원, 대구가톨릭대학교 기계자동차공학부
E-mail : cbsun@cateagu.ac.kr

* School of Mechanical and Automotive Engineering
Catholic University of Taegu

이 문제와 관련하여 Liechti와 Chai^(5,6)는 유리와 에폭시의 조합으로 된 시험편에 2축 하중을 가하여 인성치를 구하고, 그 결과를 정량적으로 해석하였다. 그 결과에서도 전단성분이 증가함에 따라 인성치가 급격히 증가함을 볼 수 있었으며, 인성치가 모우드 혼합(mode-mix)의 함수임을 알 수 있었다. 그들은 이러한 증가 원인을 설명하기 위하여 접착 에너지, 소성이나 점탄성에 의한 에너지 소산(dissipation)과 표면조도 등의 영향을 정량적으로 계산하였으나, 실제 실험치의 약 30%~40% 밖에 설명이 되지 못하였다. 또한 Yuuki 등⁽⁷⁾도 알루미늄과 에폭시로 구성된 brazil nut sandwich 시험편을 이용하여 계면균열의 거동을 살펴보았으며 그들의 결과에서도 전단성분이 증가함에 따라 계면의 인성치가 증가함이 발견되었으나 증가원인에 대한 규명은 없었다.

따라서 본 연구는 계면균열에서 전단성분이 증가함에 따라 인성치가 증가하는 원인을 규명하기 위한 연구로써 모우드의 성분 변화에 따른 계면균열의 인성과 균열진전 거동을 규명하고 진전 거동으로부터 인성치의 증가원인을 제시하고자 한다.

이러한 연구는 산업에 적용되는 복합재료의 파괴현상의 이해와 접합구조물의 강도개선 및 설계에 도움을 줄 수 있을 것이다.

2. 실험

2.1 모우드 혼합과 에너지 해방율

계면균열의 응력 분포는 균열선단으로부터 거리 $r(\theta=0)$ 에 대하여 식 (1)과 같다⁽⁸⁾.

$$\sigma_{22} + i\sigma_{12} = \frac{Kr^{i\epsilon}}{\sqrt{2\pi r}} \quad (1)$$

K 는 복소응력확대계수로써 $K = K_1 + iK_2$ 로 정의되며, ϵ 은 이중재료 상수이다.

$$\epsilon = \frac{1}{2\pi} \ln \left[\frac{x_1\mu_2 + \mu_1}{x_2\mu_1 + \mu_2} \right] \quad (2)$$

여기서, μ 는 전단탄성계수이고, χ 는 평면변형(plane strain) 상태에서는 $(3-4\nu)$, 평면응력(plane stress) 상태에서는 $(3-\nu)/(1+\nu)$ 로 정의된다. 첨자 1, 2는 각각의 재료를 나타낸다.

모우드 혼합 ψ 는 모우드 1과 모우드 2 응력확대계수의 비로써 다음 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\psi = \tan^{-1} \frac{K_2}{K_1} \quad (3)$$

평면변형에 대한 에너지 해방율은 복소응력확대계수로 부터 다음과 같이 표현된다.

$$G = \frac{1}{4 \cosh^2 \pi\epsilon} \left[\frac{1-\nu_1}{\mu_1} + \frac{1-\nu_2}{\mu_2} \right] (K_1^2 + K_2^2) \quad (4)$$

2.2 시험편과 실험 장치

계면균열의 실험 해석을 위해서는 균열의 길이가 파괴변수와 모우드 혼합에 무관하고 무엇보다도 넓은 영역의 모우드 혼합을 발생시키는 시험편의 형상이 요구된다. 이에 대해 다양한 영역의 모우드 혼합을 보이는 편측균열스트립(edge-cracked strip) 시험편이 제안되었으며⁽⁹⁾ 이 시험편에 2축(biaxial) 하중을 가하여 계면 분리 실험을 행하였다.

계면에 대하여 수직 방향(X_2)과 전단 방향(X_1)으로 균일분포 외부변위(v_o, u_o)를 독립적으로 부여할 수 있도록 고안된 편측균열스트립 시험편은 균열길이에 대해서도 컴플라이언스가 일정한 것으로 잘 알려져 있다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 편측균열스트립 시험편으로써 유리와 에폭시의 조합으로 이루어져 있으며 재료의 물성은 Table 1과 같다.

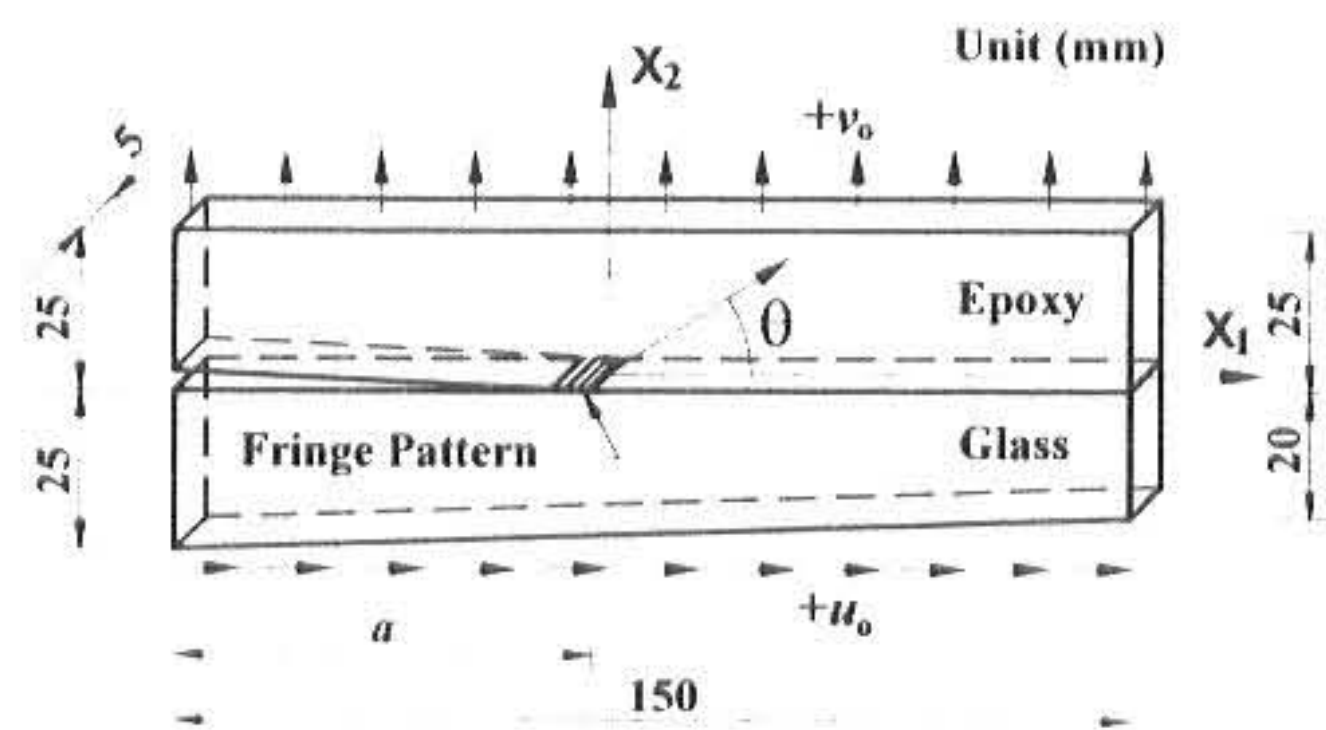


Fig.1 Bimaterial edge-cracked strip specimen

Table 1 Material Properties

Material	Young's Modulus E (GPa)	Poisson's ratio ν
Epoxy	1.97	0.33
Glass	68.95	0.20
Bimaterial constant $\epsilon = 0.07621267$		

한편 본 연구에서는 편측균열스트립 시험편의 계면에 수직 방향과 전단 방향으로 균일분포 외부변위 또는 하중을 독립적으로 부여하고 제어할 수 있는 2축 하중장치와 균열선단의 움직임과 진전을 관찰, 해석할 수 있는 측정장치

가 필요하였다. Fig. 2는 본 연구에 적용한 실험장치로서 고정밀 2축 층간분리 시험기와 균열수직 개구변위 측정장치로 구성되어 있다⁹⁾.

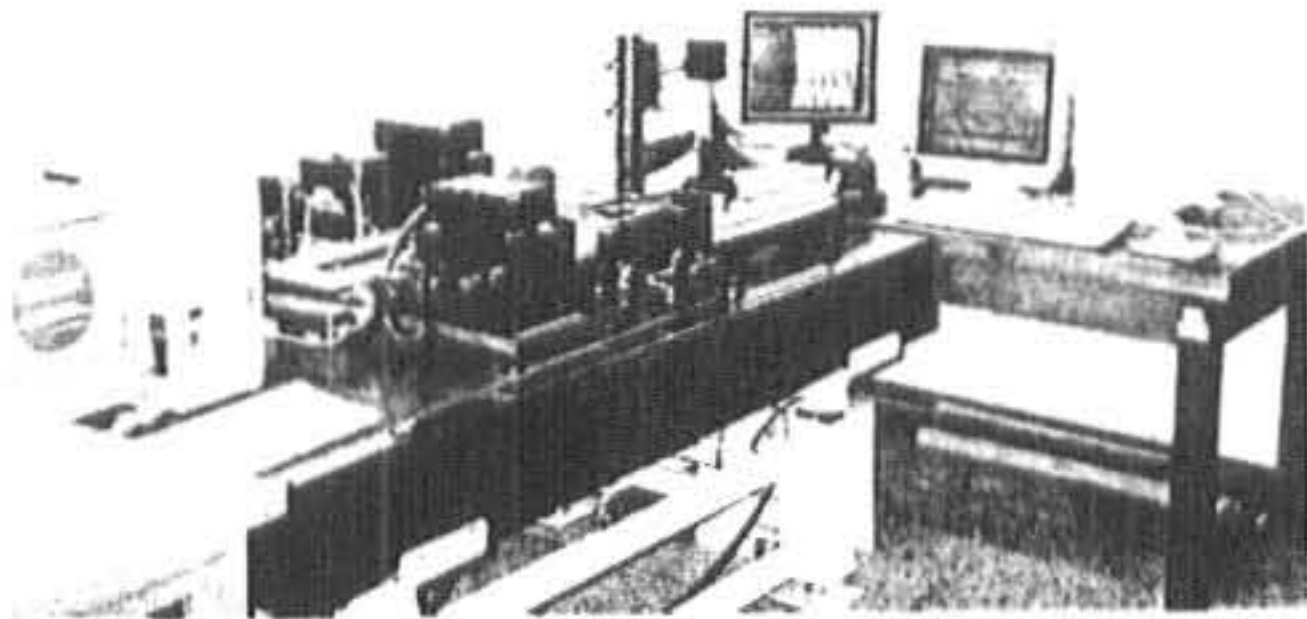


Fig.2 Biaxial delamination tester and crack opening interferometer

2.3 실험 방법

본 실험에서 시험편에 적용되는 하중부여 방식은 변위제어 방식이며 부여 형태는 단순 인장(+ v_0), 양의 전단 후 인장(+ $u_0 \rightarrow +v_0$) 그리고 음의 전단 후 인장(- $u_0 \rightarrow +v_0$)의 세 가지 형태이다.

시험편에 변위를 가함에 따라서 균열의 열림과 닫힘, 그리고 균열의 개시 및 진전 거동은 Fig. 3과 같이 균열선단 근방에 나타나는 간섭무늬의 움직임과 밀도로서 알 수 있다¹⁰⁾. 이러한 간섭무늬는 균열선단 근방에 레이저 빔을 조사함으로써 균열 상하면의 반사 지연현상으로 얻을 수 있다. 결국 임계변위(균열개시 직전까지의 외부변위) 이상에서 균열은 진전이 시작(균열개시)되며 이때의 임계변위는 계면 균열의 인성치를 측정하는데 있어 매우 중요한 인자이다. 또한 계면균열의 진전 거동을 살펴보기 위해서는 균열이 진전하는 과정을 해석해야 하며 이를 위해 균열진전 과정을 VCR로 기록하였다.

빠른 속도의 균열진전에 대한 해석을 위해서는 짧은 시간에 대한 해석이 필요하다. 따라서 계면균열의 임계변위, 정확한 개시시점과 균열진전 과정을 알기 위해 다음과 같이 하였다. 먼저 VCR에 기록된 영상의 정확한 해석을 위하여 초당 30 프레임의 화상을 나타내는 타임코드를 삽입하여 재편집하였다. 다음 재편집된 영상을 디지털 동영상 파일로 만들고 이를 영상편집 프로그램을 이용하여 초당 30 프레임의 모든 정지화상을 개별파일로 만들었다. 그리고 나서 각 정지화상에 대한 균열선단의 위치를

픽셀(pixel)의 수치로써 파악하여 시간에 대한 선도를 얻었다.

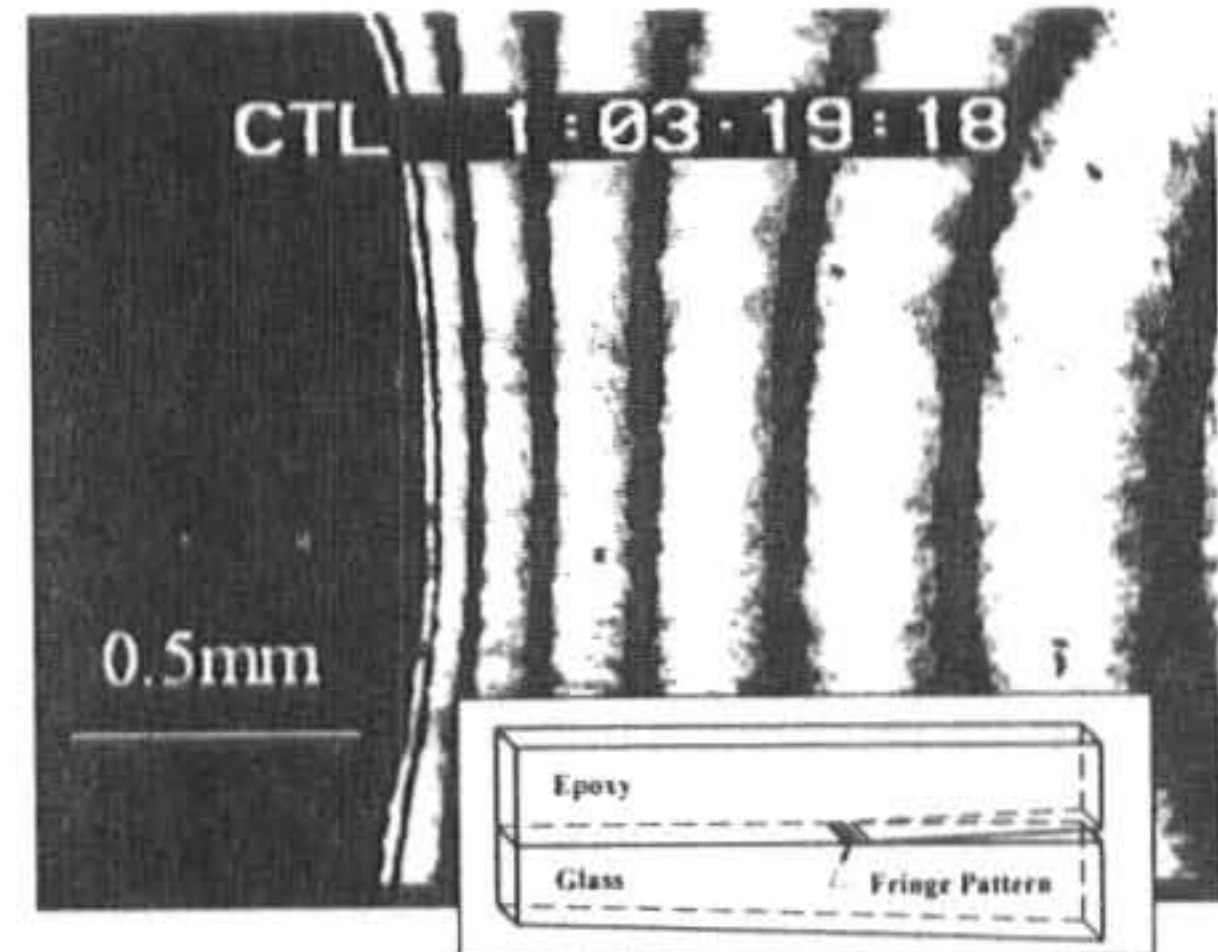


Fig.3 Typical fringe pattern

3. 계면균열의 인성

편측균열스트립 시험편에 직접 2축 변위를 가함으로써 다양한 모드 혼합을 이끌어낼 수 있었다. Fig. 4에서 실선은 이론적으로 구할 수 있는 모드 혼합을 나타내며 $-42^\circ < \Psi < 60^\circ$ 의 범위에 해당되는 불연속점(○, △, □ 등)은 실험으로부터 얻은 경우로서 균열개시 직전의 임계변위에서의 모드 혼합이다. 실험은 6개의 시험편에 대하여 다양한 양과 음의 전단변위를 부여하고 이어 인장변위를 임계변위를 지나 균열이 개시, 충분히 진전될 때

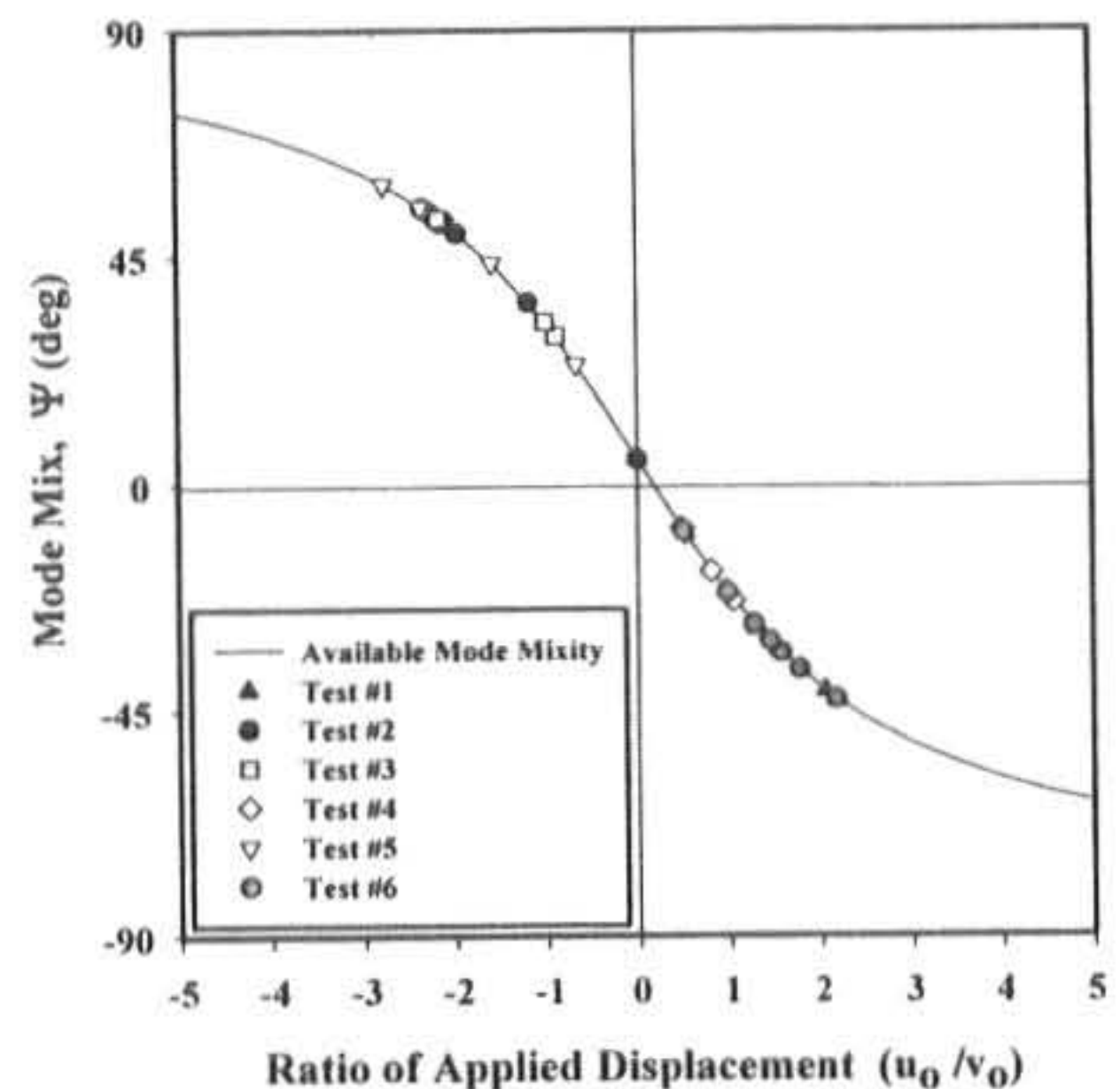


Fig.4 The range of mode-mixes available under ratio of applied displacements

까지 부여하였다.

Fig. 5는 양과 음의 다양한 모드 혼합에 대하여 계면균열의 진전에 지배적인 영향을 미치는 외

부부여 임계 수직 인장변위 성분을 나타낸 그림이다. 전단변위를 부여하지 않은 경우($\Psi=5.08^\circ$)를 기준으로 대칭성은 보이지 않으나 양과 음의 전단성분이 증가함(모우드 혼합의 절대값 증가)에 따라 외부부여 임계 수직 인장변위가 증가함을 볼 수 있으며 이는 인성치의 증가를 예측할 수 있다.

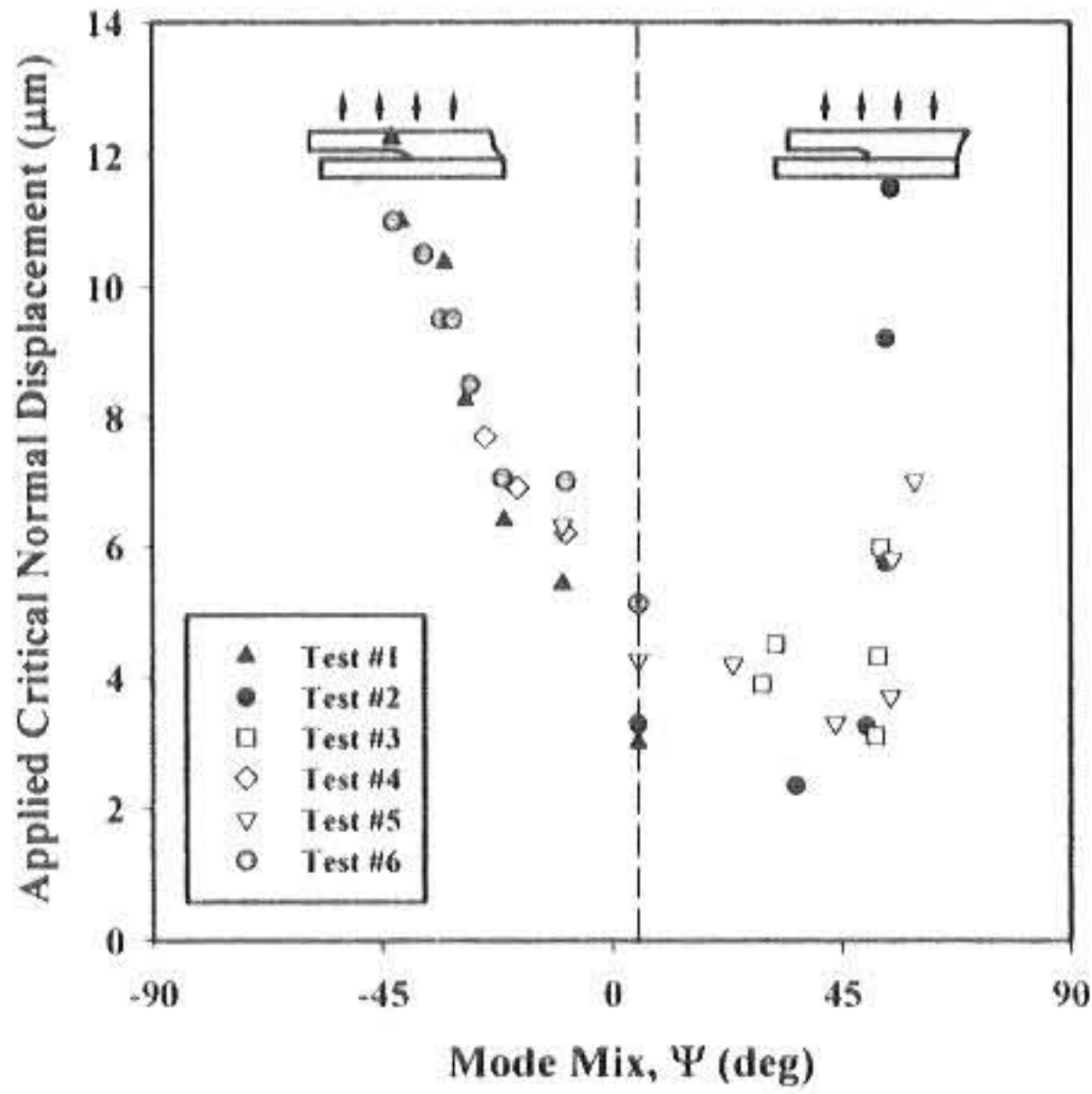


Fig.5 Variation of applied critical normal displacement with mode-mix

Fig. 6은 실험을 통해 얻은 균열개시 직전의 양과 음의 모우드 혼합에 대한 계면균열의 인성치를 나타낸 그림이다. 순수 인장변위($\Psi=5.08^\circ$)에 대한 인성치가 6개의 시험편에 대하여 거의 비슷한 점에서 일치하는 것으로 보아 계면의 접촉 상태가 비슷한 조건임을 알 수 있다. 그림에서 보면 양의 모우드 혼합인 경우 약 45° 까지의 모우드 혼합에 대하여는 비교적 인성치가 모우드 혼합에 대하여 큰 변화를 보이지 않으나 $45^\circ < \Psi < 60^\circ$ 의 경우에 대해서는 모우드 혼합이 증가할 수록 인성치가 매우 급격히 증가함을 볼 수 있다. 또한 음의 모우드 혼합에 대해서는 양의 경우와 달리 전체적으로 모우드 혼합이 증가할수록 인성치가 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이 결과로부터 계면균열의 인성은 모우드 혼합과 매우 밀접한 관계임을 알 수 있다.

한편 Fig. 6의 결과를 볼 때 순수 인장변위($\Psi=5.08^\circ$)를 기준으로 인성치는 역시 비대칭 양상을 보인다. 특히 인성치의 증가양상은 양의 모우드 혼합인 경우가 음의 모우드 혼합 경우보다 더 급격히 변함을 보여주고 있는데 이는 균열의 진전을 억제하는 요소가 음의 경우보다 양의 경우가 크

게 나타남이 예상된다. 그 이유로는 계면균열은 양과 음의 전단변위에 대하여 양의 모우드 혼합에 대해서는 균열선단 근방에서는 열림현상이 일어나지만 균열선단 주위를 제외한 나머지 부분에서는 접촉현상¹⁰⁾이 발생하며 음의 모우드 혼합에 대해서는 균열선단 근방에서 접촉현상이 일어남으로써 이때의 균열 면의 접촉에 대한 효과(마찰효과, 접촉력, 접촉영역, 균열 잠김 등)가 인성치의 증가 요인과 관련이 있다고 예측된다.

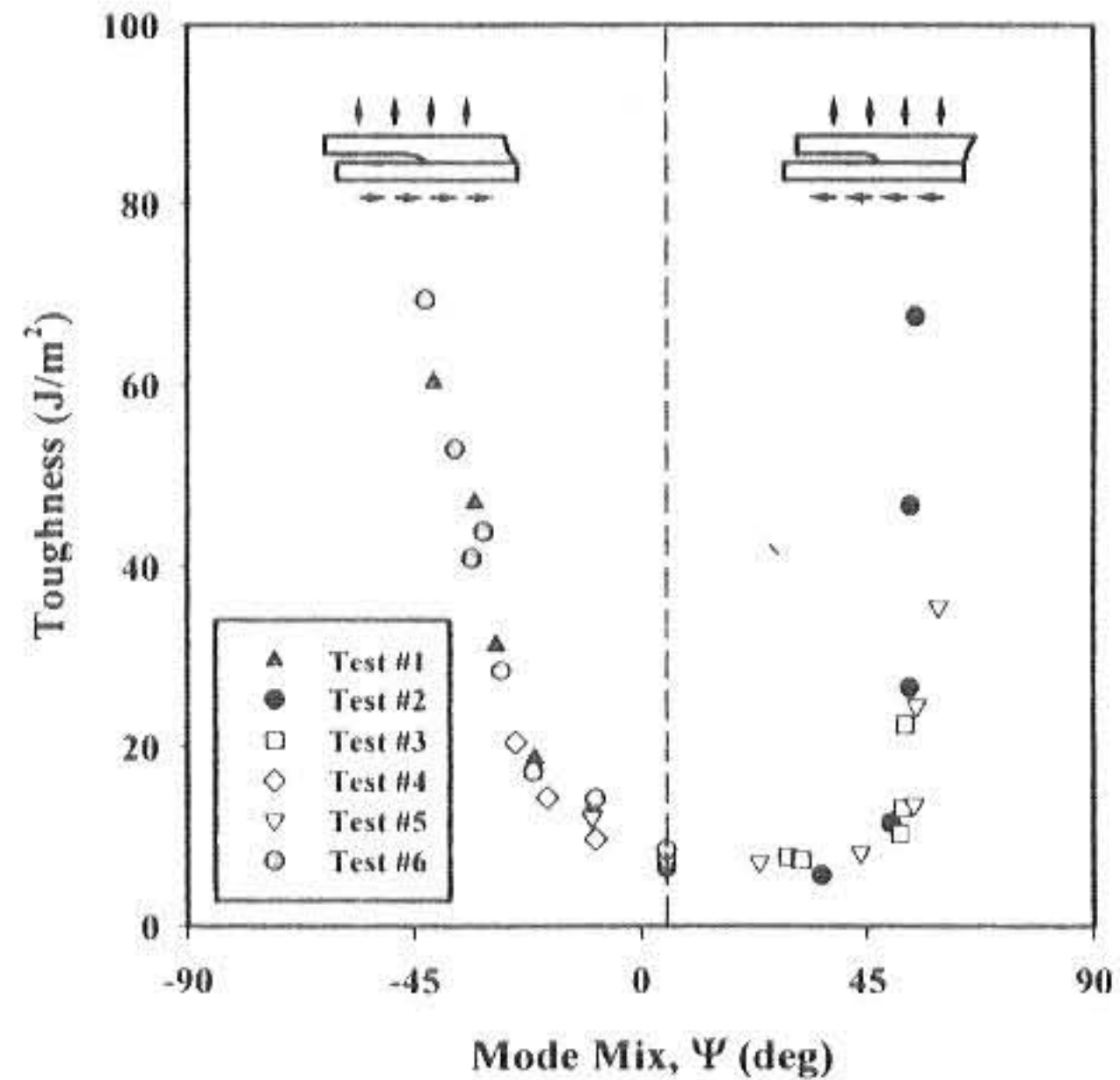


Fig.6 Variation of interfacial toughness with mode-mix

4. 계면균열의 진전 거동

4.1 계면균열의 개시 및 진전

앞서의 실험결과로부터 계면의 인성은 전단성분이 증가함에 따라 급격히 증가함을 볼 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 전단성분이 증가함에 따라 인성치가 증가하는 원인을 좀 더 이해하기 위하여 계면균열의 진전과정을 살펴보았다.

Fig. 7과 Fig. 8은 앞서의 실험에서 충분히 균열진전을 보인 몇 가지 경우에 대하여 균열개시 및 진전 과정을 나타낸 그림이다. 다양한 모우드 혼합에 대하여 표현하였으며 양의 모우드 혼합의 경우는 영문 대문자로 음의 모우드 혼합에 대해서는 소문자로 구분하였다. 시간의 시작(0초)은 전단변위를 부여한 시간은 고려하지 않고 수직 인장변위를 가하는 시간부터 나타내었다. 각 경우에 대하여 균열개시 직전의 모우드 혼합을 나타내었으며 참고로 시간 0초에 해당되는 즉, 전단변위만을 부여하였을

때(초기 인장변위 포함)의 최대 모드 혼합을 팔호 안에 나타내었다.

Fig. 7은 다양한 양의 모드 혼합에 대한 몇 가지 경우의 균열진전과정이다. 실험과정에서 시험편에 가한 변위부여 속도는 $0.5 \mu\text{m}/\text{sec}$ 이다. 그림에서 알 수 있듯이 모드 혼합이 커짐에 따라 균열진전 양상이 조금 다르게 나타남을 알 수 있다. 먼저 순수 인장변위 만을 부여한 A의 경우 ($\Psi=5.08^\circ$)를 보면 인장변위를 가함에 따라 약 23초 후 균열의 진전이 시작되고 계속 인장변위를 부여함에 따라 균열진전이 점점 빠르게 진행됨을 볼 수 있다. B($\Psi=29.20^\circ$)는 A의 경우보다 전단성분이 큰 경우이며 A의 경우와 비교할 때 조금 늦게 균열의 진전이 시작되었으나 선도의 기울기를 비교해 보면 균열진전은 A의 경우보다 좀 더 빠르게 진행됨을 알 수 있다. C의 경우($\Psi=36.03^\circ$)를 보면 역시 초기 균열진전은 늦게 시작되었으나 곧바로 균열진전은 급격히 빠르게 진행되었다. 다음 D의 경우($\Psi=51.62^\circ$)는 A, B, C의 경우와 다르게 초기 균열진전은 갑자기 진행되었으며 균열개시시간은 C의 경우보다 다소 늦게 나타난다. 이러한 양상은 E의 경우($\Psi=52.07^\circ$)도 D와 비슷하였다. 한편 상대적으로 전단성분이 큰 F의 경우($\Psi=54.95^\circ$)를 보면 앞의 A~E의 경우와 다르게 균열개시 시간이 상당히 늦게 나타나며 균열진전 또한 갑자기 시작되는 양상을 보여준다. 이때의 균열진전 모습은 에너지를 충분히 축적하였다가 갑자기 분출하는 듯한 모습이었으며 균열 진전이 시

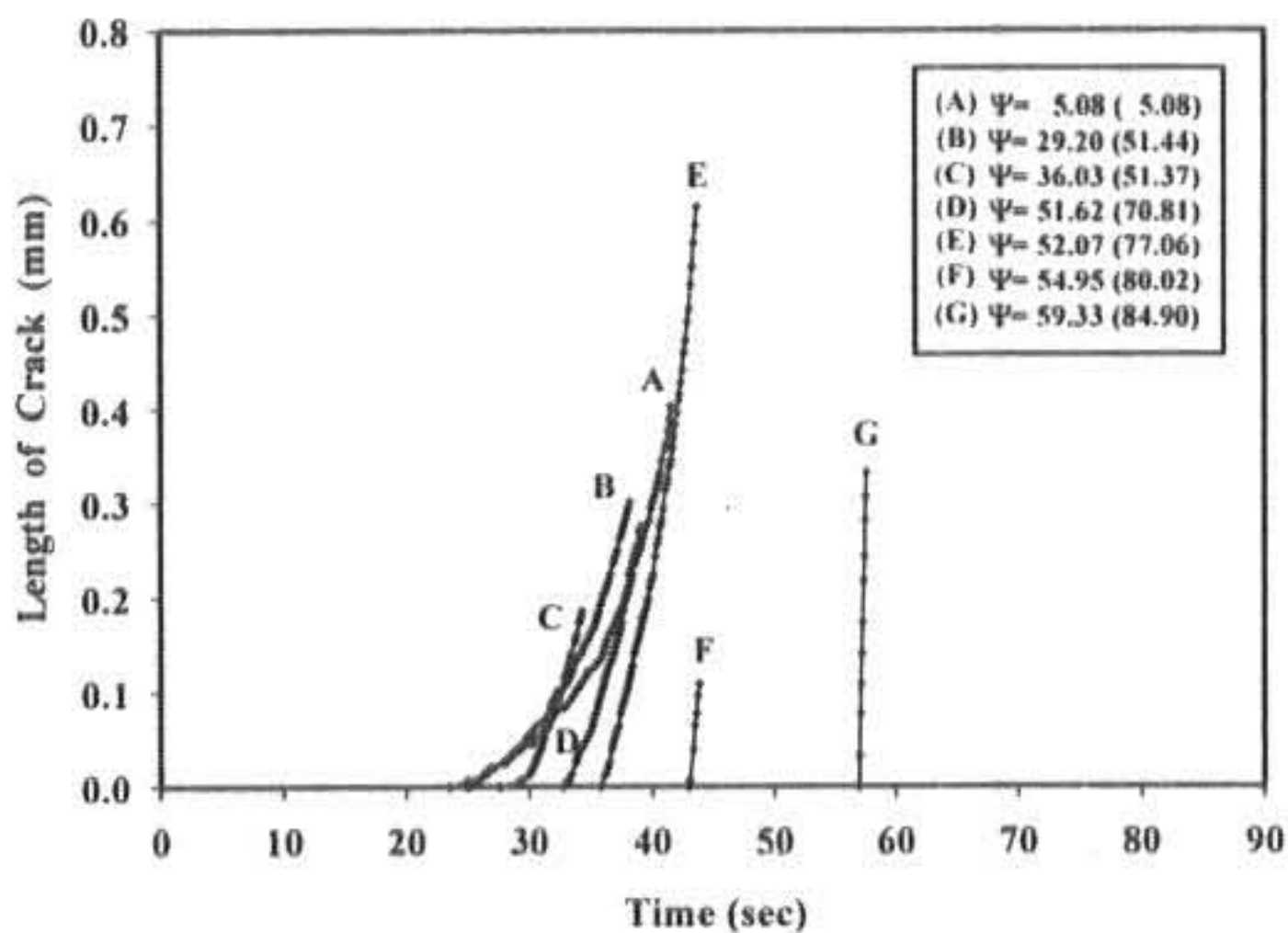


Fig.7 Behavior of whole crack propagation on interface by positive mode-mix

작되기 전까지는 무엇인가에 의해 균열진전을 억제하는 듯 하였다. 이러한 경우는 G의 경우

($\Psi=59.33^\circ$)가 더 확실하게 나타났으며 특히 갑자기 진행되는 균열진전은 대단히 빨랐다.

이상의 결과를 종합해보면 대체로 양의 모드 혼합이 증가함에 따라 균열진전은 급격히 빠르게 진행되고 균열진전 개시시간은 모드 혼합이 커짐에 따라 늦게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 8은 음의 모드 혼합의 변화에 따른 몇 가지 경우의 균열진전과정을 보여주고 있다. 먼저 앞서의 Fig. 7과 비교하기 위해 순수 인장변위 만을 부여한 경우(선도 a)를 기준으로 균열진전 양상을 나타내었다. b의 경우($\Psi=-9.12^\circ$)는 a의 경우보다 전단성분이 증가한 경우로써 a의 경우와 비교할 때 균열개시는 조금 늦게 시작되었고 균열진전 또한 좀 더 느리게 진행됨을 알 수 있다. 다음 c의 경우($\Psi=-18.54^\circ$)도 b의 경우와 비교할 때 역시 균열 개시시간과 균열진전은 더 느리게 시작되었으며 점차 균열진전은 빠르게 나타난다. 한편 d의 경우($\Psi=-24.87^\circ$)를 보면 a, b, c의 경우와 같이 초기 균열진전은 더욱 더 느리게 진행되고 있음을 볼 수 있으나 약 67초부터는 갑자기 상승하는 모습을 보여주고 있다. e의 경우($\Psi=-28.66^\circ$)도 d의 경우와 같이 초기 균열진전은 더욱 더 느리게 진행되는 모습을 보여주고 있으며 균열개시시간은 d의 경우보다 다소 늦게 나타나지만 후반부의 균열진전 모습은 d의 경우와 같이 갑자기 상승하는 모습을 볼 수 있다. 이러한 균열 진전 양상은 마치 무엇인가가 균열진전을 방해하는 듯한 모습이었으며 수직 인장변위를 계속 부여함에 따라 어느 시점부터는 이러한 방해요소가 해소되어 거침없이 균

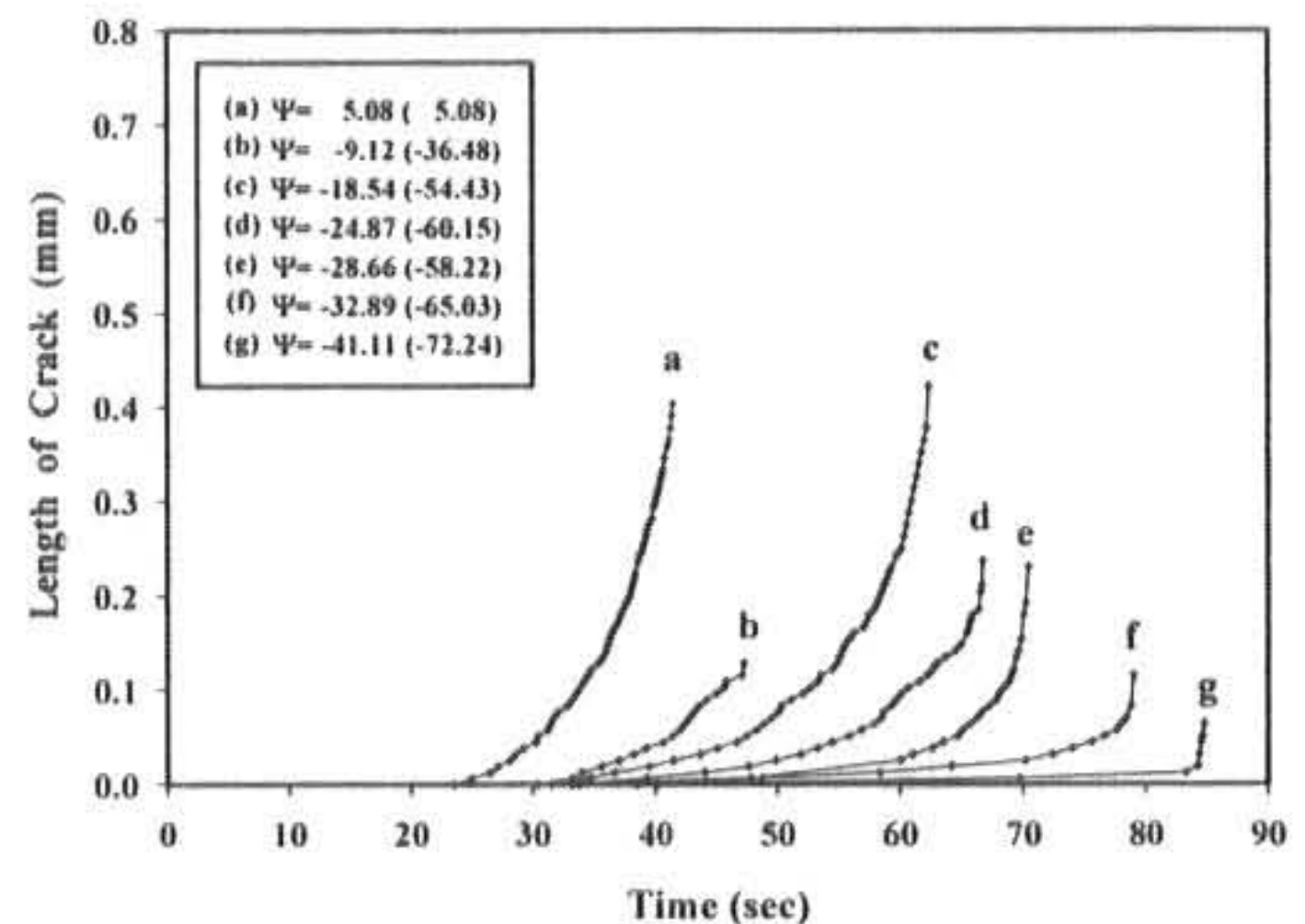


Fig.8 Behavior of whole crack propagation on interface by negative mode-mix

열이 진전하는 듯한 모습이였다. 이러한 양상은 상

대적으로 전단성분이 큰 f ($\Psi = -32.89^\circ$)와 g ($\Psi = -41.11^\circ$)의 경우 더욱 더 뚜렷하게 볼 수 있으며 특히 후반부 균열진전은 너무나 빨라서 시험기에서 제어하지 못할 정도이었다.

이상의 결과를 종합해보면 음의 모우드 혼합에 대한 균열진전 양상은 대체로 모우드 혼합이 증가함에 따라 초기 균열진전은 점점 더 느리게 진행되나 후반부의 균열진전은 매우 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 7과 Fig. 8의 계면균열 진전거동에서 균열진전이 시작되는 시점을 원점으로 이동하여 함께 표현하였다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 균열진전은 양의 모우드 혼합이 증가할 수록 점점 빠르게 진행되며 음의 모우드 혼합이 증가할수록 점점 느리게 진행됨을 알 수 있다. 이를 통해 초기 균열진전의 양상은 모우드 혼합과 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

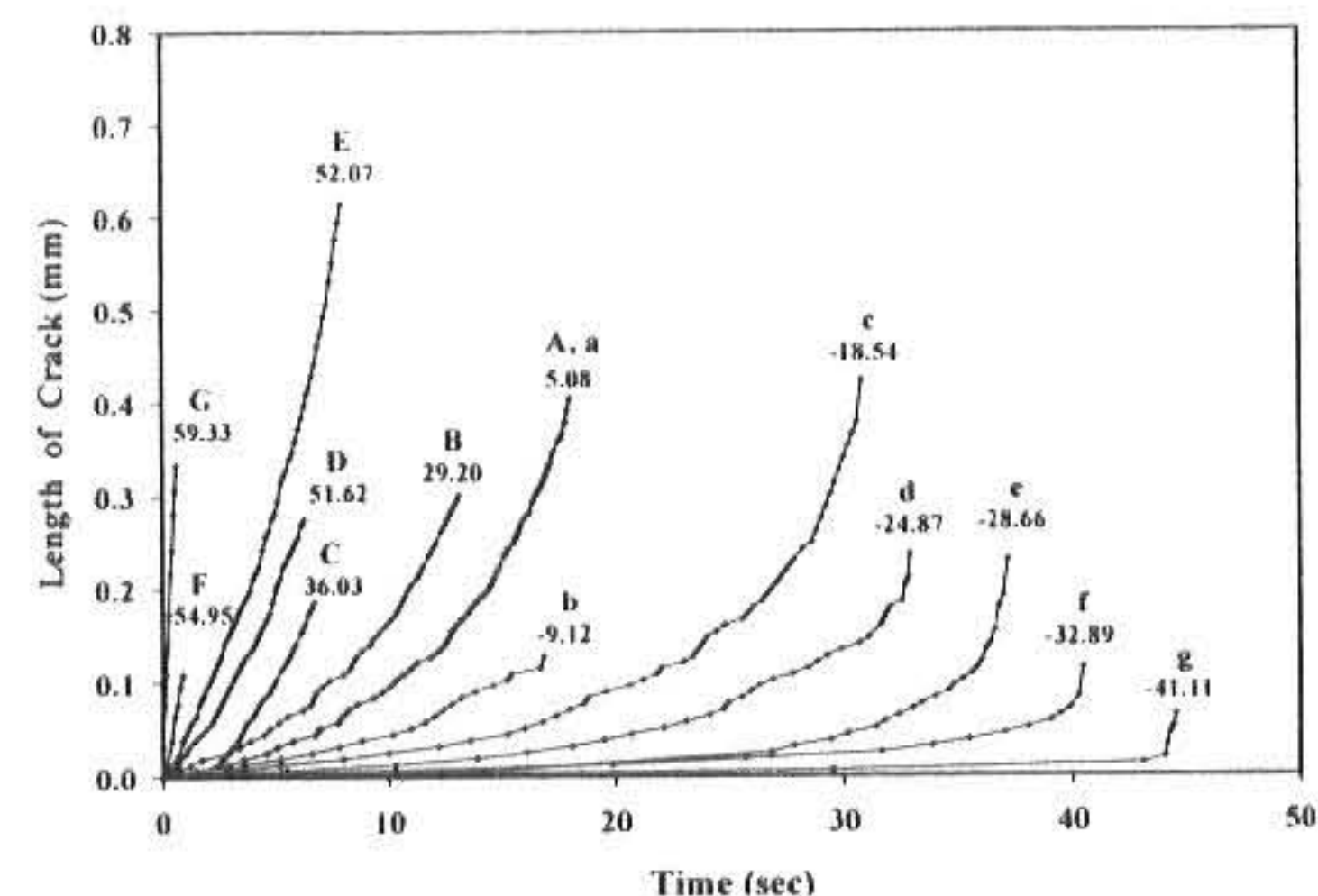


Fig.9 Behavior of crack propagation on interface with mode-mix

4.2 계면균열의 진전 속도

계면균열의 균열 진전 속도를 살펴보았다. 이를 위하여 먼저 앞서 Fig. 9의 결과를 curve fitting 하였다.

Fig. 10은 curve fitting한 결과로써 실험 데이터 (Fig. 9)와 curve fitting 선도와와의 표준편차 오차 (Std Err)는 0.0025~0.0069로써 매우 근사하게 변환되었음을 보여준다.

또한 curve fit의 결과로부터 균열진전 거동은 일정한 식으로써 표현되었으며 선도로부터 얻은 식은 다음 식 (5)와 같다.

$$y = y_0 + a e^{bx} + c e^{dx} \quad (5)$$

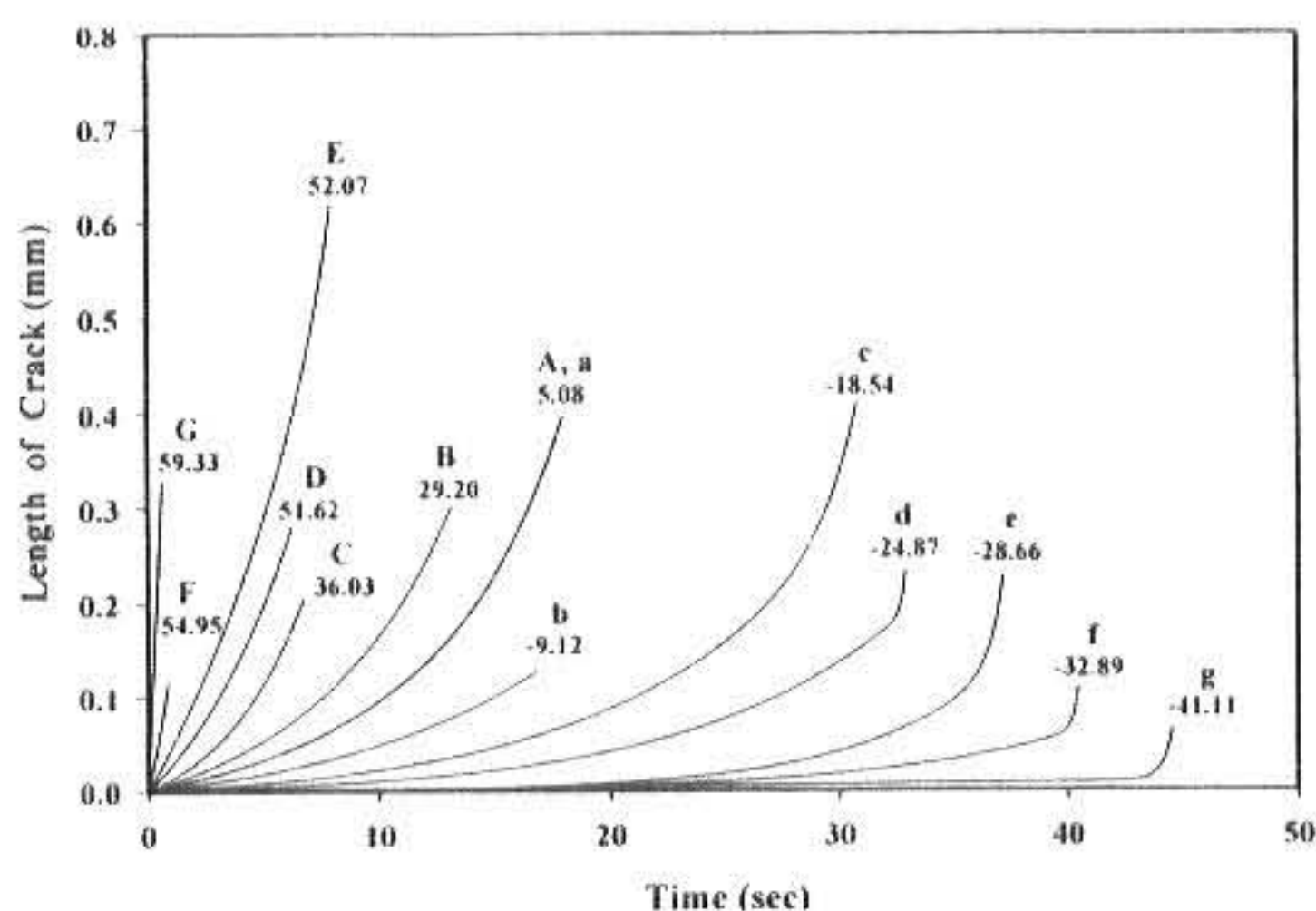


Fig.10 Linearization on behavior of crack propagation

Fig. 11은 Fig. 10에서 구한 식으로부터 미분을 하여 얻은 계면균열 진전 속도선도이다. 이 그림으로부터 계면균열진전 거동을 명확히 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 양의 모우드 혼합이 증가할 수록 균열개시속도는 점점 더 빠르게 시작되며 음의 모우드 혼합이 증가할 수록 균열개시속도는 더욱 더 느리게 시작됨을 알 수 있다. 그러나 초기 진전을 지나 본격적인 균열진전과정을 보면 양의 모우드 혼합인 경우는 점진적인 속도의 변화를 보이고 있으나 음의 모우드 혼합인 경우에는 급격한 속도의 증가양상을 볼 수 있다. 또한 속도의 증가량을 볼 때 양의 모우드 혼합의 F와 G의 경우 균열개시 속도는 매우 빠르나 속도의 증가량은 크지 않으며

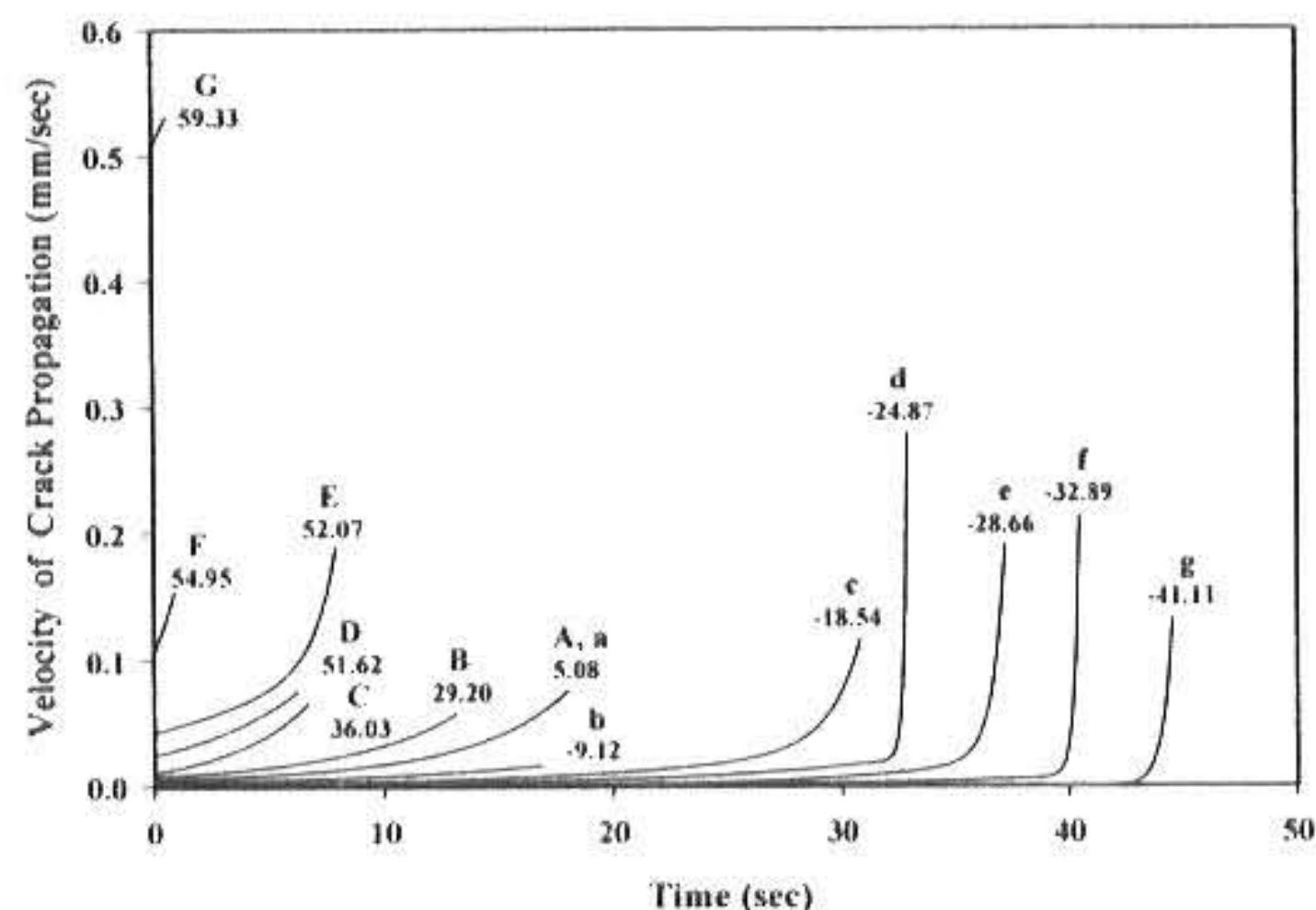


Fig.11 Velocity of crack propagation on interface with mode-mix

반면 음의 모드 혼합의 d~g의 경우는 속도의 증가량이 매우 크게 나타남을 알 수 있다.

4.3 균열선단 주위의 수직응력 성분의 영향

전단성분의 증가에 대한 인성치의 증가, 균열 개시지연과 속도의 변화를 설명하기 위하여 균열선단 주위의 응력상태를 살펴보았다.

Fig. 12는 양의 모드 혼합에 대한 몇 가지 경우의 균열선단 근방의 수직응력 성분을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 양의 모드 성분이 증가할수록 균열 선단 후방에는 특이성분의 인장응력이 증가함을 볼 수 있다. 따라서 재료의 항복응력을 초과하는 균열선단 근방의 인장 특이성분의 증가는 균열의 개시를 촉진하며 또한 균열진전 속도의 주요 증가요인임을 알 수 있다. 그러나 특이 성분의 증가는 계면균열의 인성치 증가요인인 균열개시 지연 효과는 설명할 수 없으며 인성치의 증가요인은 아니라고 생각된다. 그러나 양의 모드 혼합의 균열진전 거동에서는 Stick-slip 현상이 관찰되었으며 이로부터 인성치의 증가요인은 접촉에 의한 마찰효과, 그리고 접촉영역의 증가 등이 주요 요인이라고 생각된다.

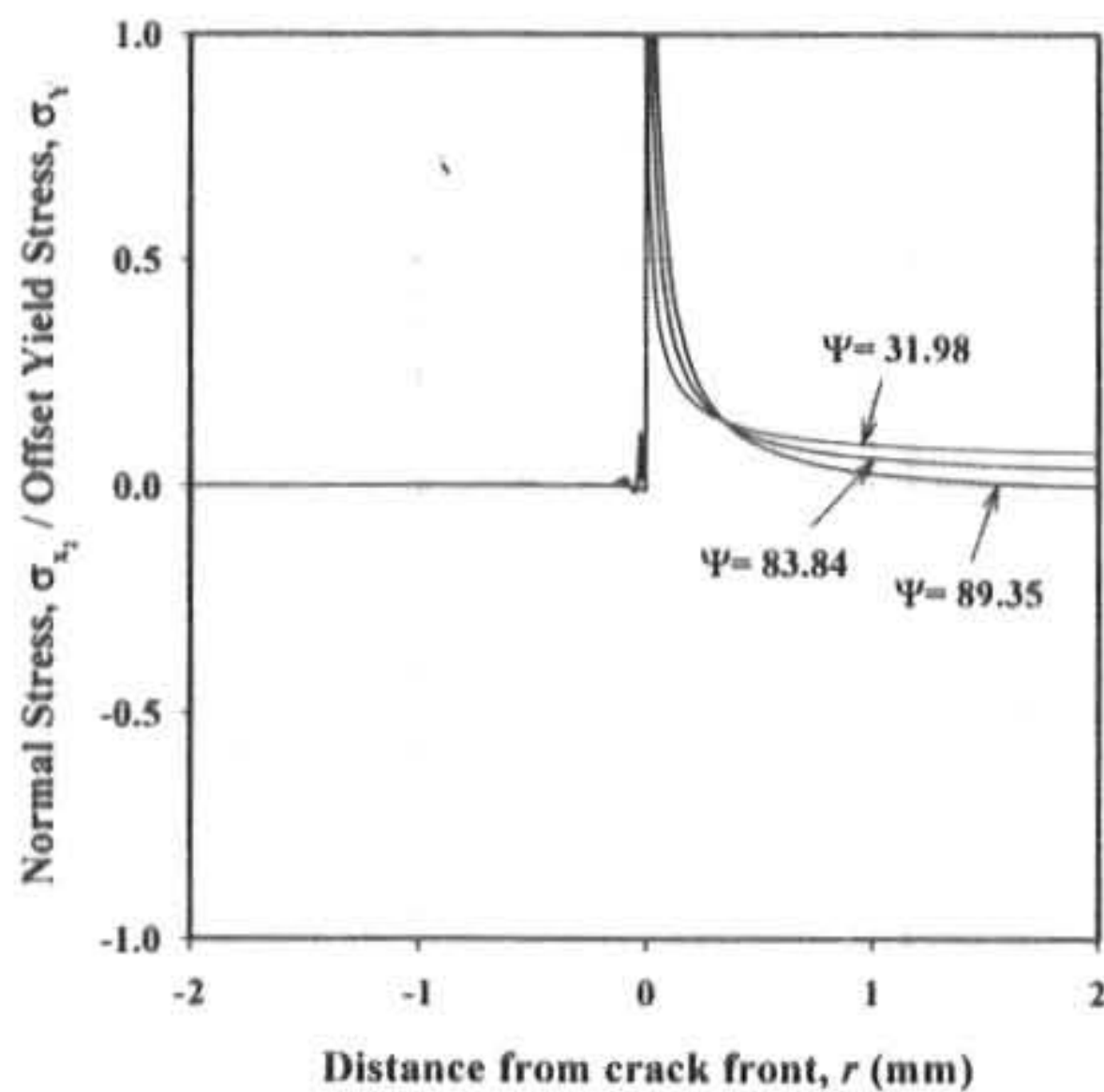


Fig.12 Normal stress distribution under positive mode-mix

Fig. 13은 음의 모드 혼합에 대한 몇 가지 경우의 균열 선단 근방의 수직응력 성분을 나타낸 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 음의 모드 혼합의 경우에는 양의 모드 혼합의 경

우와는 달리 균열 선단 전방에는 재료의 항복응력에 상응하는 양의 압축응력 성분이 존재함을 볼 수 있다. 또한 음의 모드 성분이 증가할수록 균열 선단 전방의 압축응력 성분이 증가하고 균열 선단 후방의 특이성분은 상대적으로 감소함을 볼 수 있다. 따라서 균열선단 전방의 압축성분은 균열개시의 지연에 지배적인 영향을 미친다고 생각되며 또한 균열개시 후에도 균열진전을 억제함으로써 균열진전 속도의 주요 감소 요인임을 알 수 있다. 결국 음의 모드 혼합의 증가에 대한 균열선단 전방의 압축응력 성분은 인성치가 증가하는 주요 요인이라고 생각된다.

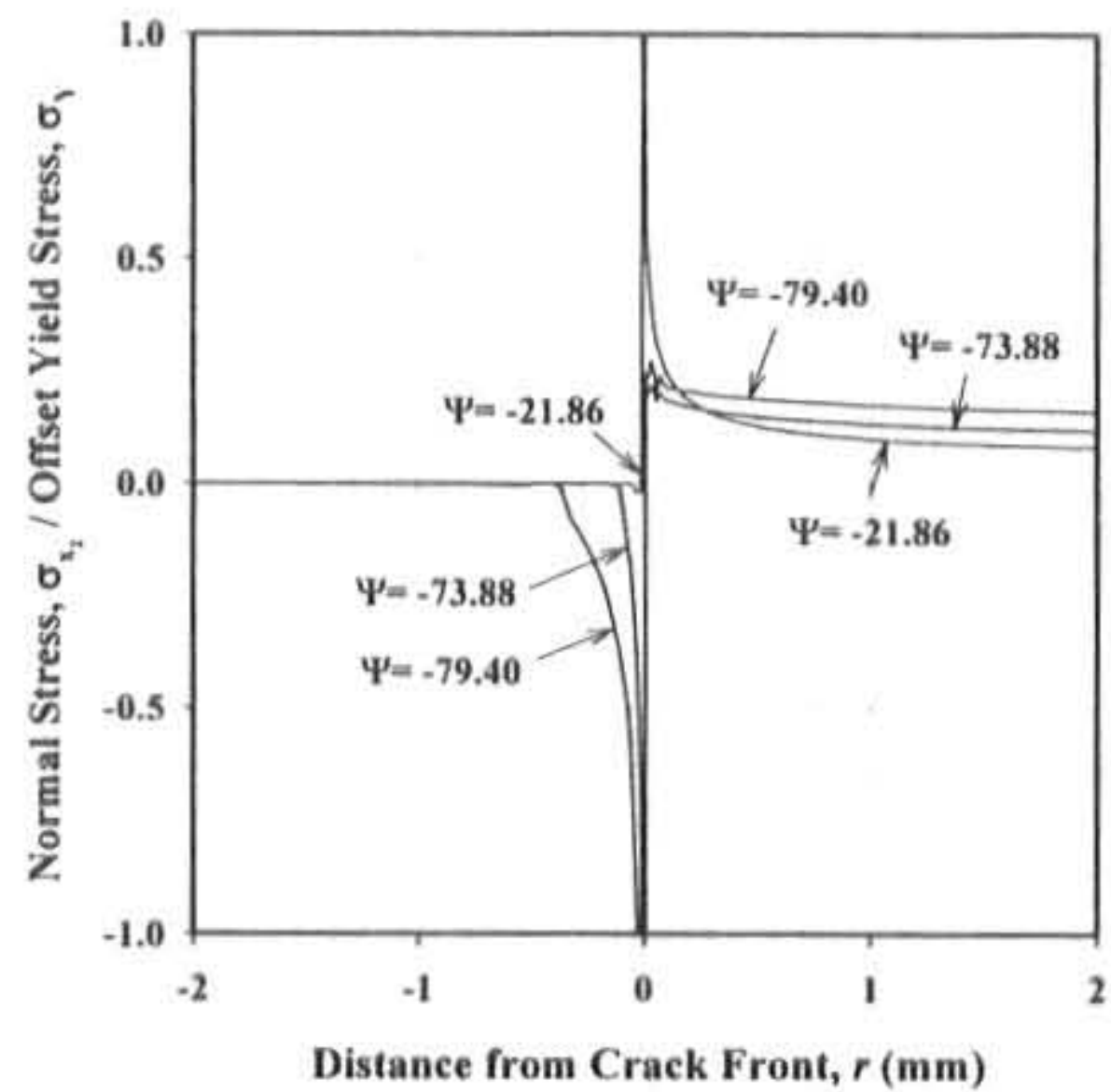


Fig.13 Normal stress distribution under negative mode-mix

5. 결 론

본 연구는 계면균열에서 전단성분이 증가함에 따라 인성치가 증가하는 원인을 규명하기 위한 연구로써 모우드의 성분 변화에 따른 계면균열의 인성과 진전 거동을 살펴 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 계면분리 실험 결과 모우드 혼합에 대하여 전단성분이 증가할 수록 계면균열의 인성치는 급격히 증가함을 볼 수 있었다. 따라서 계면균열의 파괴 인성치는 모우드 혼합과 매우 밀접한 관계임을 알 수 있었다.

(2) 초기 균열진전 양상은 양의 모드 혼합이 증가할 수록 점점 빠르게 진행되며 음의 모드 혼

합이 증가할 수록 점점 더 느리게 진행됨을 알 수 있었고 전체적인 균열진전 거동은 일정한 식으로 표현되었으며 다음과 같다.

$$y = y_0 + a e^{bx} + c e^{dx}$$

(3) 균열개시 속도는 양의 모드 혼합이 증가할 수록 더 빠르게 시작되며 음의 모드 혼합이 증가할 수록 더욱 더 느리게 시작됨을 알 수 있었다. 그러나 전반적인 균열진전 속도는 양의 모드 혼합의 경우는 점진적인 속도의 변화를 보이고 있으나 음의 모드 혼합의 경우에는 급격한 속도의 증가 양상을 볼 수 있었다.

(4) 양의 모드 혼합의 증가에 대한 균열선단 후방의 인장 특이성분의 증가는 균열의 개시를 촉진하며 또한 균열진전 속도의 주요 증가요인임을 알 수 있었다. 그러나 특이 성분의 증가는 계면균열의 인성치 증가요인은 아니라고 생각된다. 그러나 균열진전 거동에서는 Stick-slip 현상이 관찰되었으며 이로부터 인성치의 증가요인은 접촉에 의한 마찰효과, 균열 잠김, 그리고 접촉영역의 증가 등이 주요 요인이라고 생각된다.

(5) 음의 모드 성분이 증가할수록 균열 선단 전방에는 압축응력 성분이 증가하고 균열 선단 후방의 특이성분은 상대적으로 감소함을 볼 수 있었다. 따라서 균열선단 전방의 압축성분은 균열개시의 지연에 지배적인 영향을 미친다고 생각되며 또한 균열개시 후에도 균열진전을 억제함으로써 균열진전 속도의 주요 감소요인임을 알 수 있었다. 결국 음의 모드 혼합의 증가에 대한 균열선단 전방의 압축응력 성분은 인성치가 증가하는 주요 요인이라고 생각된다.

참고문헌

- 1) Malyshev, B. M. and Salganik, R. L., :The Strength of Adhesive Joints Using the Theory of Cracks, *Int. J. Fract. Mech.*, **1**, pp. 114-128, (1965)
- 2) Liechti, K. M. and Hanson, E. C., :Nonlinear Effects in Mixed-mode Interfacial Delaminations, *Int. J. Fract.*, **36**, pp. 199-217, (1988)
- 3) Cao, H. C. and Evans, A. G., :An Experimental Study of the Fracture Resistance of Bimaterial Interfaces, *Mechanics of Materials*, **7**, pp. 295-304, (1989)
- 4) Wang, J. S. and Suo, Z., :Experimental Determination of Interfacial Toughness using Brazil-Nut-Sandwich, *Acta Metal.*, **38**, pp. 1279-1290, (1990)
- 5) Liechti, K. M. and Chai, Y. S., :Biaxial Loading Experiments for Determining Interfacial Fracture Toughness, *J. Appl. Mech.*, **58**, pp. 680-687, (1991)
- 6) Liechti, K. M. and Chai, Y. S., :Asymmetric Shielding in Interfacial Fracture Under In-Plane Shear, *J. Appl. Mech.*, **59**, pp. 295-304, (1992)
- 7) Yuuki, R., Liu, J. Q., Xu, J. Q., Ohira, T. and Ono, T., :Mixed Mode Fracture Criteria for an Interface Crack, *Eng. Fract. Mech.*, **47**, pp. 367-377, (1994)
- 8) Rice, J. R., :Elastic Fracture Mechanics Concepts for Interfacial Cracks, *J. Appl. Mech.*, **55**, pp. 98-103, (1988)
- 9) 채영석, 최병선, :계면균열의 실험적 해석 (I)-시험편의 선정 및 이축충간분리 시험기의 개발, 한국복합재료학회지, Vol. 8, No. 1, pp. 1-12, (1995)
- 10) 최병선, 이승재, 채영석, :계면균열의 실험적 해석(II)-계면분리 실험과 모드혼합도의 영향, 한국복합재료학회지, Vol. 9, pp. 72-84, (1996)

(2003년 5월14일 접수, 2003년 11월20일 채택)