

異種材料 接合材의 片側接合界面龜裂의 應力擴大係數 解析 및
피로균열성장 解析
Anaysis of the Interfacial Stress Intensity Factors and Fatigue
Crack Growth Behaviour for the Edge Interface Crack in the
Dissimilar Materials

이 갑 래* 최 용 식**
K. R. Lee Y. S. Choy

ABSTRACT

In this paper, the interfacial stress intensity factors($K_I=K_1+iK_2$) for the edge interface crack in the dissimilar materials(isotropic-isotropic materials, isotropic-composite materials) were analysed by BEM(Boundary Element Method). The fatigue crack growth behaviour was investigated by load constant fatigue test. From the experimental results, the relationship between da/dN and interfacial stress intensity factor (ΔK_I or ΔK_1) can be expressed by Paris' law for homogeneous materials.

1. 서론

최근 構造物의 경량화를 目的으로 複合材料의 開發이 날로 증가하고 있으며, 또한 세라믹과 같은 신소재 發達과 함께, 새로운 접착, 접합기술의 개발과 더불어 사용빈도가 증가하고 있는 接合構造物이 우주항공, 원자로, 자동차, 전자부품

등에 폭넓게 사용되고 있다. 따라서, 複合材料, 新素材의 강도 평가 및 이를 이용한 구조물의 안전성 평가가 중요한 문제이며, 특히 접합구조물의 강도평가 및 파괴에 대한 안전성 평가는 매우 시급하고, 중요한 문제이다.¹⁻²

材料가 서로 다른 異種材料로 接合된 接合材에서 接合界面(interface)에서 대개 應力의 특이성(singularity)³⁾이 나타나기 때문에 접합계면에서 균열이 발생하여, 이것이 접합구조물 파괴의 중요한 원인이 된다. 그러므로, 접합구조물의 안전성

*正會員 : 동국대학교 산업안전공학과
**正會員 : 성균관대학교 기계공학과

평가를 위해서는 접합계면에서 발생하는 接合界面龜裂(interface crack)의 해석이 이루어져야 한다. 현재까지 異種材料간의 接合界面龜裂에 대한 해석방법이 확립되지 못한 이유는 여러가지 있으나, 接合界面龜裂선단에서의 응력의 振動特異性(oscillatory stress singularity)등으로 해석인자가 명확하지 못하기 때문이다.⁴⁻⁵⁾

그리고, 異種材料 接合構造物의 安全性 평가를 위해서는 접합계면균열의 피로균열성장 거동에 관한 解析이 중요한 문제중 하나이다. 균질재료 내의 균열에 대한 피로균열성장속도(fatigue crack growth rate)를 나타내기 위한 방법으로 Paris' law⁶⁾를 많이 응용하여 사용하고 있으나, 이종재료내의 접합계면균열에 대한 피로균열성장 거동은 實驗上의 어려움뿐만 아니라, 피로균열성장속도를 나타내기 위한 방법이 확립되지 못한 실정이다.

본 논문은 複合材料와 같은 異方性材料(anisotropic material) 또는 直交異方性材料(orthotropic material)와 등방성재료(isotropic material)가 접합된 경우의 접합계면균열의 거동을, 경계요소법(Boundary Element Method)⁷⁾으로 應力擴大係數(stress intensity factor), K_I 를 해석인자로 하여 수치해석하였다. 그리고, 접합계면균열의 疲勞實驗을 통하여 피로균열성장 거동을 고찰하고, 접합계면균열의 피로균열성장속도를 나타낼 수 있는 방법으로 균질재료에 대한 Paris' law($da/dN=C(\Delta K)^m$)를 응용하여 접합계면균열의 피로균열성장속도의 解析 可能性을 살펴보고자 한다.

2. 片側(single edge) 接合界面龜裂에 대한 應力擴大係數 解析

등방성재료간의 접합재에서의 接合界面龜裂에 대한 응력확대계수의 研究는 Williams⁸⁾, Rice³⁾, Wang⁹⁾, Yuuki¹⁰⁾등의 연구결과가 있으나, 複合材料와 같은 異方性材料 또는 直交異方性材料와 등방성재료가 접합된 경우의 접합계면균열의 응력

확대계수의 연구는 그렇게 많지 않은 상태에서 Suo¹¹⁾의 연구결과가 있으며, 본연구자는 경계요소법으로 接合界面龜裂을 응력확대계수, $k=K_I+ik_2$ 로써 해석할 수 있는 외삽식을 구한 바 있다.¹²⁾

본 논문에서는 Fig.1 (a), (b), (c)와 같은 편측 접합계면균열을 경계요소법(BEM)으로 해석하였으며, 경계요소법에 사용한 해석 model은 Fig.2와 같으며, 사용 要素(element)수는 70-80개이다. 각 영역의 물성치는 Table 1과 같이 피로실

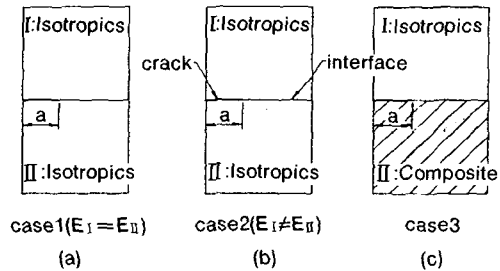


Fig.1 Type of edge interface crack specimens

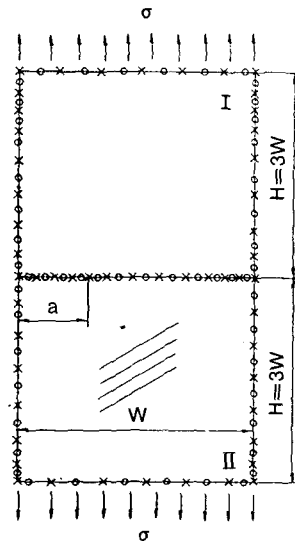


Fig.2 Model of BEM analysis

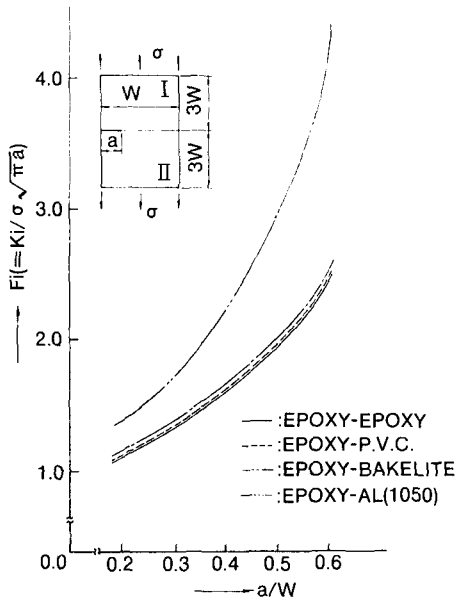


Fig.3 a/W-Fi relations for the isotropic-isotropic adhesive material

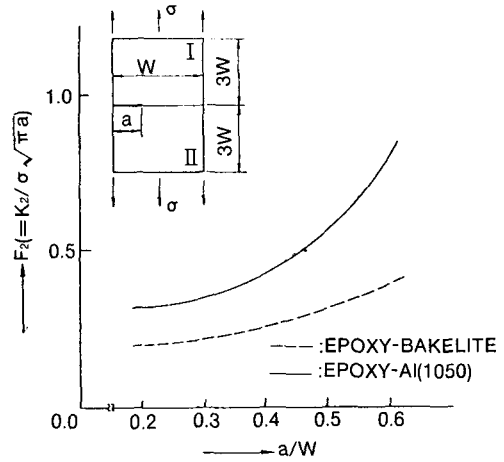


Fig.4 a/W-F2 relations for the isotropic-isotropic adhesive material

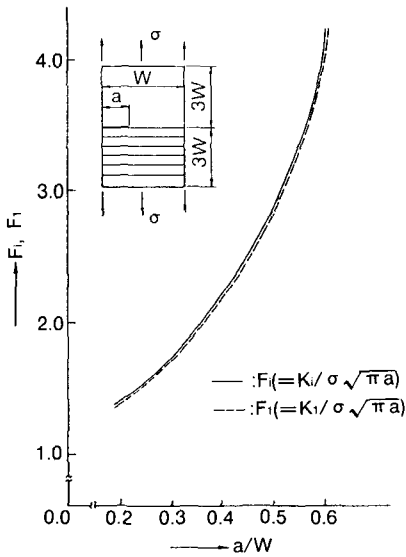


Fig.5(a) a/W-Fi relations for the isotropic-composite adhesive material ($\phi = 0^\circ$)

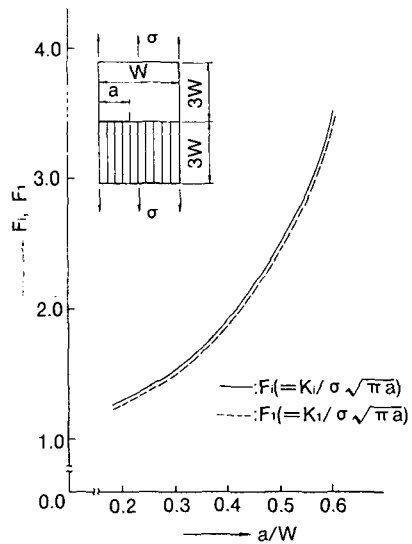


Fig.5(b) a/W-F relations for the isotropic-composite adhesive material ($\phi = 90^\circ$)

험에서 사용할 材料의 物性値를 이용하였다. 해석결과는 Fig.3-Fig.6이며, 무차원응력확대계수 F_1, F_2 는 다음과 같이 정의하였다.

$$F_1 = K_1 / \sigma \sqrt{\pi a}, F_2 = K_2 / \sigma \sqrt{\pi a} \dots \dots \dots (1)$$

여기서 $K_i = K_{1i} + iK_{2i}$

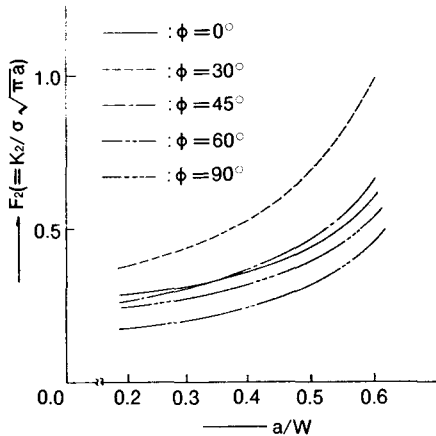


Fig.6 a/W-F₂ relations for the isotropic composite adhesive material

Mode I 상태에서는 F_1 와 F_2 는 거의 같은 값이며, Fig.3, Fig.4에서 각영역의 영율(Young's modulus)의 차이가 클수록 F_1 의 값은 크게 나타나며, F_2 의 경향도 같은 양상이지만 F_1 의 크기에 비해 매우 작은 값이다. Fig.5, Fig.6에서, 複合材料와 接合된 경우, fiber 각도가 하중방향과 일치할 때 F_1 의 값이 가장 작게 나타나며, F_2 의 값은 fiber 각도가 30°-45°일때 가장 크게 나타나지만, F_1 의 값에 비해 매우 작은 값이다.

3. 접합계면균열의 피로실험

3.1 시험편 材料

본 실험에서 사용한 시험편 材料는 EPOXY, P.V.C., BAKELITE, AL(1050) 그리고, 섬유 강화 복합재(GFR)이다. GFR은 한국 화이바(주)에서 제조한 것으로 unidirection 성향이 강한 複合材料이다. 재료의 물성치는 Table 1, Table 2와 같다.

3.2 試驗片 형상

본 실험에서 사용한 試驗片의 형상은 片側接合 界面龜裂(edge interface crack)으로써 다음 3가지

Table 1 Young's modulus and Poisson's ratio of specimen materials

| Material | Young's modulus E(kg/mm ²) | Poisson's ratio |
|----------|--|-----------------|
| EPOXY | 359.457 | 0.4 |
| P.V.C. | 353.441 | 0.4 |
| BAKELITE | 1258.165 | 0.4 |
| AL(1050) | 3590.019 | 0.3 |

Table 2 Young's modulus and Poisson's ratio of Composite material

| Material | E ₁₁ (kg/mm ²) | E ₂₂ (kg/mm ²) | ν ₁₂ | μ ₁₂ (kg/mm ²) |
|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| GFR | 3543.169 | 1383.670 | 0.24 | 387.823 |

種類의 試驗片으로 분류하였다.

- CASE 1: Fig.1(a)와 같이, 領域 I과 領域 II에 같은 等方性 재료가 접합된 경우로써 이때의 각 領域의 材料는 EPOXY판재이다.
- CASE 2: Fig.1(b)와 같이 領域 I과 領域 II의 材料가 서로 다른 等方性재료가 접합된 경우로써, 領域 I은 EPOXY 판재이며 領域 II는 각각 P.V.C., BAKELITE, Al 판재이다.
- CASE 3: Fig.1(c)와 같이 領域 I의 材料는 等方性 材料인 EPOXY 판재이고 領域 II는 GFR 材料인 경우의 試驗片이다.

험편의 각 領域의 재질과 완전히 다른 제3층의 형성을 최대한 방지하기 위하여 EPOXY 판재 및 GFR의 기지(matrix) 材料와 같은 Epoxy/ Polyamide의 접합재를 사용하였다. 그리고, 접착층은 초기균열의 성형과 관련하여 0.1mm 정도의 폭을 가지게 되며, 接着強度는 Epoxy/ Polyamide 접착제로서 접착 한후 12시간 이상 경과한 뒤 인장시험에 의해 구하였으며, 각 試驗片의 接着強度는 Table 3과 같다.

기계 노치(machined notch)에 해당하는 초기균

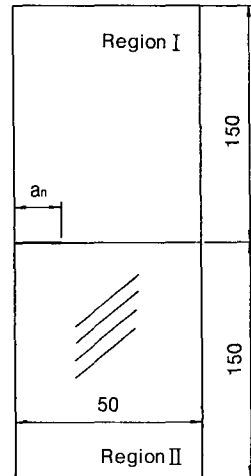
3.3 試驗片 製作

3.3.1 피로 試驗片 형상

본 실험에서 사용된 피로 試驗片 형상은 Fig.7과 같다. Fig.7과 같은 편축 接合界面龜裂 피로 시험편의 각 영역의 材料는 EPOXY, P.V.C., BAKELITE, Al, 그리고 GFR(Glass Fiber Reinforced) 복합재를 조합하여 접착하였다. 試驗片의 기하학적 조건은 ASTM E647-87에 준하여 정하였다.

3.3.2 시험편 接合方法 및 초기균열 성형

본 실험에서 사용한 試驗片의 接合方法은 접착제를 사용하여 접합하였다. 접착제의 선택은 시



(thickness=6, $a_n=10$)

Fig.7 Geometry of fatigue test specimen(unit : mm)

Table 3 Adhesive strength of specimens

| Type of specimen | Adhesive strength(kg/mm ²) |
|------------------|--|
| EPOXY-EPOXY | 1.99 |
| EPOXY-P.V.C. | 0.61 |
| EPOXY-BAKELITE | 0.77 |
| EPOXY-AL(1050) | 0.53 |
| EPOXY-COMPOSITE | 1.62 |

열 a의 성형은, 각 領域의 試片에 粘接劑를 고루 입힌 후, 두께 0.1mm teflon sheet를 초기균열 길이만큼 절단 한 후, 접합부 사이에 끼운 다음, 12 시간 경과후 teflon sheet를 제거하여 초기균열을 생성시켰다.

3.3.4 實驗方法 및 試驗機

본 실험의 방법은 하중 일정 피로 시험으로 ASTM E647-87에 준하여 수행되었으며, 試驗機는 dynamic universal testing machine을 사용하였고, 피로 균열길이 測定은 배율이 X25인 digital 식 이동 현미경을 사용하여 測定하였다.

3.4 疲勞試驗

Table 3의 接着強度를 바탕으로, 각 試驗片에 대해 일정하중비($R=P_{max}/P_{min}$) 0.1을 설정하였고, 하중 조절은 정현파(sine wave), 하중 반복수는 10Hz이었다.

본 실험시의 最大荷重보다 20% 큰 荷重에서 5%씩 감소시키면서, 기계가공 notch에 해당하는 $a_0=10mm$ 로부터 약 1.5mm의 fatigue precrack을 만들었으며, 피로 균열이 0.2~0.3mm 증가할때 마다 시험편의 전, 후면에서 동시에 이동 현미경을 이용하여 측정한 뒤, 그 평균길이를 龜裂길어로 취하였다.

4. 實驗結果 및 考察

4.1 等方性 材料간에 接合된 경우

4.1.1 a-N 곡선

Fig.8 은 均質材料인 EPOXY 판재의 a-N 곡선과 EPOXY-EPOXY, EPOXY-P.V.C., EPOXY-BAKELITE, EPOXY-Al(1050) 試驗片에 대한 a-N 곡선을 나타낸 것으로, 균질재의 EPOXY시

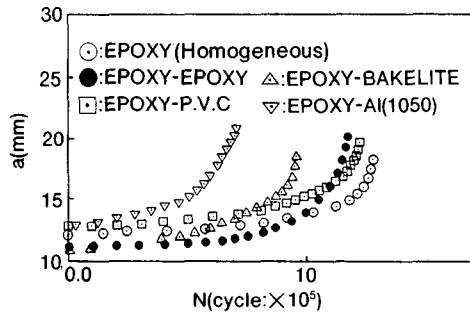


Fig.8 a-N relation for the adhesive specimens

험편인 경우, $a/W \leq 0.25$ 이상에서는 龜裂의 진전이 매우 급속히 진전하며, 다른 경우의 試驗片에서는, $a/W \leq 0.4$ 이상에서 龜裂 진전이 급격히 빨라짐을 볼 수 있었다. 또한 龜裂의 진전은 전 試驗片에서 接合面을 따라 진전하였으며, 시험편의 表面보다 두께 방향으로 中央部의 龜裂이 먼저 진전하는 양상으로 龜裂이 성장하였다. 그리고, 龜裂의 길이는 표면길이와 중앙부의 길이를 측정하여 平均길 이로써 사용하였다.

4.1.2 da/dN-ΔK 관계

아직 接合界面 龜裂에 대한 피로균열 성장법칙이 확립되지 않았기 때문에 본 研究에서는 均質材料에서 사용되고 있는 Paris' law⁹⁾, 즉

$$da/dN = C(\Delta K)^m \dots \dots \dots (2)$$

를 적용하고자 한다. 그러나, 식(2)에서 K대신에 接合界面 龜裂에 대한 應力擴大係數 $K_i (=K_1 + iK_2)$ 를 적용하여, $da/dN-\Delta K_i$ 의 관계를 解析함으로써 K_i 의 영향을 고찰하였다. Fig.9는 균질재료인 EPOXY 판재의 $da/dN-\Delta K_i$ 의 관계를 나타낸 그림이며, Fig.10은 각각 EPOXY-EPOXY, EPOXY-P.V.C., EPOXY-BAKELITE, EPOXY-Al 接合材에 대한 $da/dN-\Delta K_i$ 를 나타낸

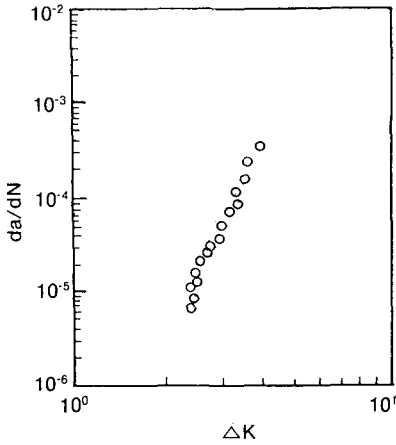


Fig.9 da/dN-ΔK relation for EPOXY plate

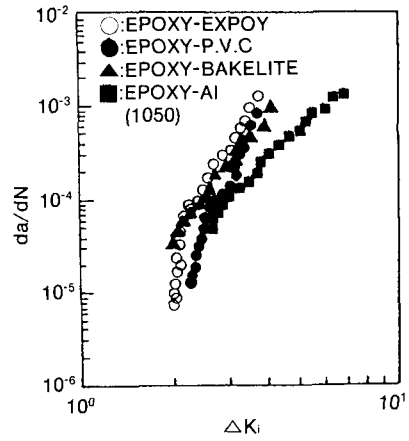


Fig.10 da/dN-ΔK relation for adhesive specimens

Table 4 C₁,m values from da/dN-ΔK relation

| Type of Speciman | m ₁ | C ₁ | m ₂ | C ₂ |
|--------------------|----------------|----------------------|----------------|----------------------|
| Epoxy(Homogeneous) | 9.51 | 1.98×10 ⁹ | . | . |
| Epoxy-P.V.C | 7.47 | 4.63×10 ⁸ | . | . |
| Epoxy-Epoxy | 5.01 | 5.01×10 ⁷ | . | . |
| Epoxy-Bakelite | 4.72 | 1.49×10 ⁶ | 6.19 | 3.53×10 ² |
| Epoxy-AI | 2.53 | 9.46×10 ⁶ | 4.02 | 7.19×10 ⁴ |

$$da/dN = C_1(\Delta K_1)^{m_1} \quad da/dN = C_2(\Delta K_2)^{m_2}$$

그림이다. Paris' law를 응용하여 해석한 결과, 균질재료에서와 같이 접합계면균열에서도 직선적인 안정성장영역이 나타남을 볼 있으며, 안정성장 영역에서의 기울기 m₁를 나타낸 것이 Table 4이다. Table 4에서 m값을 비교하면 각영역의 Young's modulus의 값의 비가 클수록 m₁의 값이 작게 나타남을 볼 수 있다.

4.1.3 da/dN-ΔK₂ 관계

접합계면균열에 대한 응력확대계수는 $K = K_1 + iK_2$ 이다. Mode I의 하중하에서는 $K \cong K_1$ 이지만, 각 영역의 Young's modulus의 차이가 크면

K₂의 영향이 어느정도 존재함으로 EPOXY-BAKELITE, EPOXY-AI에 대한 da/dN-ΔK₂의 관계를 나타낸 것이 Fig.11이다. 이때의 결과는 da/dN-ΔK₂의 영역보다 훨씬 작은 영역에서 나타나며 Table 4에서 m₂의 값은 EPOXY-BAKELITE의 경우가 크게 나타나고 있다.

4.2 等方性材料와 複合材料가 接合된 경우

4.2.1 a-N 곡선

等方性材料인 EPOXY와 複合材料가 接合된 경우에, 複合材料의 fiber 각도가 0°, 30°, 45°,

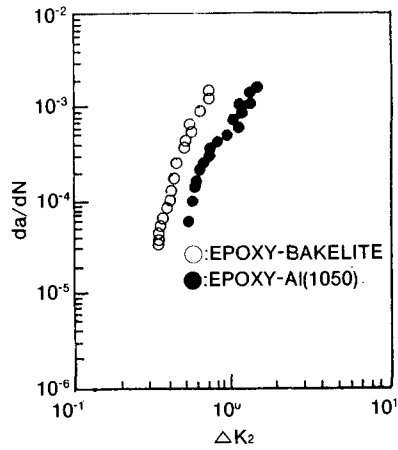


Fig.11 da/dN- ΔK_2 relation for adhesive specimens

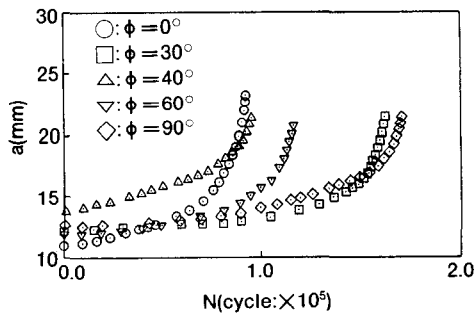


Fig.12 a-N relation for EPOXY-COMPOSITE adhesive specimens

60°, 90°일때의 a-N 곡선을 나타낸 것이 Fig.12이다. 대부분의 경우 $a/W \cong 0.5$ 이상에서 龜裂이 급격히 진전함을 볼 수 있다.

4.2.2 da/dN- ΔK_i 관계

複合材料의 fiber 각도에 따른 da/dN- ΔK_i 의 관계를 나타낸 것이 Fig.13이다. 이 경우에서도 안정성장영역이 나타남을 볼 수 있으며, Table 5의 m_1 와 C_1 값의 비교에서 fiber 각도가 증가할수록 m_1 의 값은 작게 나타나는 경향이며, 이것은 응력확대계수의 감소와도 관련있는 것으로 생각된다.

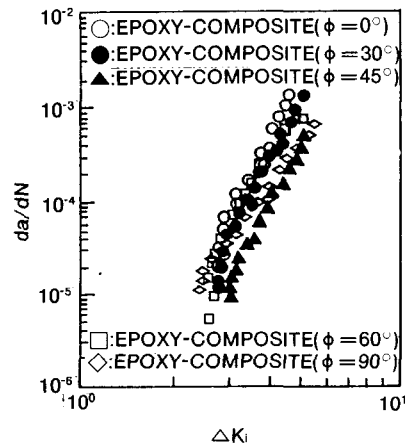


Fig.13 da/dN- ΔK_1 relation for EPOXY-COMPOSITE adhesive specimens

Table 5 C_1, m_1 values from da/dN- ΔK relation

| Type of Composite | m_1 | C_1 | m_2 | C_2 |
|-------------------|-------|--------------------|-------|--------------------|
| 0° | 7.10 | 7.58×10^9 | 6.87 | 3.01×10^4 |
| 30° | 6.79 | 2.31×10^8 | 7.51 | 3.23×10^4 |
| 45° | 5.30 | 6.45×10^8 | 5.82 | 8.7×10^4 |
| 60° | 5.49 | 1.54×10^7 | 5.03 | 2.69×10^2 |
| 90° | 5.09 | 9.77×10^8 | 5.32 | 1.54×10^3 |

$$da/dN = C_1 (\Delta K_1)^{m_1} \quad da/dN = C_2 (\Delta K_2)^{m_2}$$

4.2.3 da/dN- ΔK_2 관계

Mode I 하중하에서의 K_2 에 대한 da/dN- ΔK_2 의 관계를 나타낸 것이 Fig.14이다. ΔK_2 의 영역이 거의 1에 가까운領域에서 안정성장영역이 존재하므로, K_2 의 영향은 K 보다 작으며, Mode I 하중하에서의 접합界面 龜裂 진전에 미치는 지배인자로써의 K_2 는 거의 무시해도 좋을 것이다.

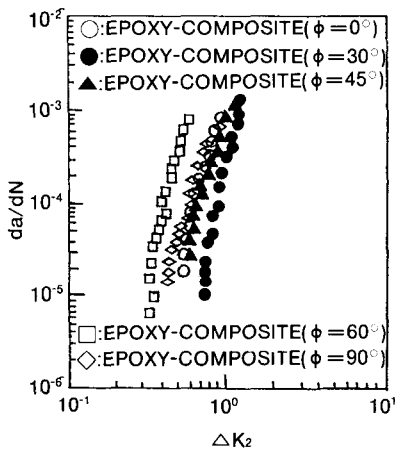


Fig.14 da/dN- ΔK_2 relation for EPOXY-COMPOSITE adhesive specimens

5. 결론

본 논문 研究는 接合界面 龜裂의 피로균열 성장에 대한 實驗的 研究가 많지 않은 실정에서, 앞으로 여러 인자를 고려한 實驗的 研究를 행할 수 있는 기초적인 研究로써의 의의가 있으며, 결론은 다음과 같다.

1) 편축적합계면의 응력확대계수 해석결과, 각 영역의 영률(Young's modulus)의 차이가 클수록 응력확대계수는 크게 나타나며, Mode I 상태에서는 K_2 의 영향은 크지 않았다. 복합재료와 접합된 경우는 하중방향과 fiber 방향이 일치할 때의

응력확대계수 K 가 가장크게 나타나고 있었다.

2) 等方性 材料간의 接合材에서 피로균열성장 속도는, 균질재료(EPOXY)에서의 균열 성장속도보다 느리게 나타나고 있으며, 각領域의 영률의 비가 클수록 느리게 나타나는 경향이며, 等方性 材料와 複合材料의 接合界面 龜裂의 피로균열 성장속도는 fiber의 각도가 증가할수록 느리게 나타나는 경향을 보이고 있다.

3) 接合界面 龜裂에 대한 피로균열 성장거동을 均質材料에 대한 Paris' law를 사용하여 나타낸 결과, 均質材料와 같은 안정성장구역이 나타남으로, 接合界面 龜裂에 대한 피로성장거동을 나타낼 수 있는 方法으로 Paris' law를 사용할수 있을 것으로 사료된다. 그러나, Mode I 하중상태에서의 接合界面 피로균열에 대한 지배인자로써 K 또는 K_1 을 사용할 수 있을 것이며, K_2 는 이들의 값에 비해 상당히 적은 값을 가지므로 接合界面 피로균열에 대한 지배인자로써 K_2 는 거의 무시해도 좋을 것이다.

참고문헌

- (1) M. Imanaka, W. Kishimoto, K. Okita, H. Nakayama, and H. Nagai, "Fatigue life estimation of adhesive shaft joints", Int. J. Fracture 41, pp. 223-228(1989)
- (2) 白鳥 正樹 森 孝男, "金屬-FRP 接着斷手の應力解析と設計への應用(第2報, T形斷手)", 日本機械學會論文集(A編), 54卷 503號, pp. 1404-1409(1988)
- (3) J. R. Rice, "Elastic fracture mechanics concepts for interface crack", Trans. ASME, J. of Applied Mechanics 55, pp. 98-103(1988)
- (4) M. comninou, "The interface crack", Trans. ASME, J. of Applied Mechanics 44, pp. 631-639(1977)
- (5) C. Atkinson, "The interface crack with contact zone (an analytical treatment)", Int. J. Fracture

- 36, pp. 161-177(1982)
- (6) P. C. Paris and F. Erdogan, "A critical analysis of crack propagation law", *J. of Basic Engineering ASME*, Vol. 85, pp. 528-534(1963)
- (7) J.Q.Zhen and C.A.Brebbia, "Boundary element analysis of composite materials", *Computer Aided Design in Composite Material Technology*, Proceeding on the International Conference Southampton Springer-Verlag, pp. 475-499(1988)
- (8) M. L. Williams, "The stress around a fault or crack in dissimilar media", *Bull. Selism. Soc. Am.* 49, pp. 199-204(1959)
- (9) S.Wang and I.Choi, "The interface crack between dissimilar anisotropic composite materials", *Trans. ASME, J. of Applied Mechanics*, Vol.50, pp. 169-178(1983)
- (10) R.Yuuki and S.B.Cho, "Efficiency boundary element analysis of stress intensity factors for interface cracks in dissimilar materials", *Engng Fracture Mech.* 34, pp. 179-188(1989)
- (11) Z.Suo, "Singularity, interface and crack in dissimilar anisotropic media", *Harvard University Report Mech-137*(1989)
- (12) 이갑래, 조상봉, 최용식, "이방성 이종재료 접합재의 접합면균열에 대한 응력확대계수 해석", *대한기계학회 1990년도 춘계학술대회 발표논문집(I)*, pp. 71-74(1990)