

<論 文>

FRP(SMC재)의 균열成長 舉動과 破壞인성 평가에 관한 연구

金 楨 圭*·朴 進 成**

(1989년 1월 31일 접수)

A Study on Fracture Toughness Evaluation and Crack Growth Behavior in FRP (SMC Material)

Jung Kyu Kim and Jin Sung Park

Key Words: Sheet Moulding Compound(SMC材), Ink Staining Method(잉크착색법), Damage Zone(손상영역), R-Curve(R곡선), Stable Crack Growth Point(안정파괴개시점)

Abstract

Using the SMC(sheet moulding compound) composite material consisting of E-glass chopped strand mat and unsaturated polyester resin, three-point bending tests are carried out to evaluate the elasto-plastic fracture toughness by means of *R* curve. The crack extension is experimentally observed with the ink staining method. The point of stable crack growth is discussed in consideration of the load-load point displacement curve, the damage behavior of the notch vicinity, and the *R*-curves. The damage zone of the notch vicinity was composed of the initiation and growth of subcracks as well as those of the main crack. The point of stable crack growth can be defined as the inflection point in the *R* curves and its point also concurs with the proportional limit on the load-load point displacement curve.

1. 序 論

纖維強化 플라스틱 複合材料(이하 FRP라고 함)는 높은 比強性和 比強度 등의 우수한 기계적 성질을 나타내므로 최근 항공기 구조물, 자동차 및 선박 등의 경량화가 요구되는 부분에 그 사용이 증가되고 있다⁽¹⁻³⁾. 이에 따라 機械, 構造物 部材로서의 안정성 및 신뢰성 향상을 위해서는 이의 破壞인성 및 疲勞균열進展舉動 등의 파악이 중요하다. 이들의 연구내용을 분류하여 보면 균열의 安定⁽⁴⁻⁶⁾ 또는 不安定 발생조건⁽⁷⁻⁹⁾에 대한 破壞인성의 평가^(10,11), 疲勞損傷 또는 수명의 평가⁽¹²⁻¹⁴⁾ 및 破壞特性^(15,16) 등에 관한 것으로, 얻어진 연구결과는 반

드시 일치되고 있지 않다.

특히 파괴인성평가에 있어서 파괴개시조건으로서 論한 K_{Ic} , G_c 또는 J_c 등은 균열길이(또는 노치길이)에 거의 의존하지 않는다는 결과가 Wang⁽¹⁷⁾, Yanada⁽⁷⁾ 등에 의해 보고되고 있지만 Agrawal^(5,6) 등은 균열길이의 주어진 특정영역에서만 파괴인성이 이의 영향에 무관함을 밝히고 있다. 또한鈴木⁽¹⁸⁾ 등은 균열길이가 클수록 파괴인성이 작아진다는 결과도 얻고 있다. 한편 Sheet Moulding Compound법에 의하여 제작된 SMC材는 一方向 FRP에 비하여 引張強度는 낮지만 短纖維(short fiber)의 불균일 분포로 인하여 異方性이 현저히 낮으므로 이 재료의 파괴거동을 線形 破壞力學的으로 평가한 경우가 많다^(17,19,20). Wang⁽¹⁷⁾ 등은 각 모우드에 대한 파괴인성 K_{Ic} , K_{IIc} 를 최대하중에 대응하는 값으로 산출하였으며 關根⁽¹⁹⁾ 등은 AE누

*정회원, 한양대학교 공과대학 기계설계학과

**한양대학교 대학원

적에너지로 구한 K_{AE} 와 ASTM E 399⁽²¹⁾에 의해 구한 K_Q 와 일치함을 보고하고 있다. 또한 Gagger⁽²⁰⁾ 등은 ASTM E 399에 따라 인성치를 구하고 노치先端에서 纖維와 母材와의 계면박리가 생기는 하중에 대응하는 K 를 설계관점에서 중요한 값을 주장하고 있다.

그러나 FRP는 不安定破壞에 이르기까지 安定균열成長을 함이 보고되고 있으므로^(4~6,11) K 를 이용한 파괴인성평가에는 한계가 있다.

이와 같이 얻어진 연구결과가 체계화되어 있지 않은 것은 FRP가 금속재료에 비하여 균열진전의 거동이 복잡하며 破壞開始點의 파악이 불명확하기 때문이다.

본 研究에서는 FRP의 파괴인성평가를 위한 기초적인 자료를 얻기 위하여 FRP 중에서도 널리 사용되고 있는 SMC材를 준비하고 3점 굽힘시험을 실시하여 노치先端에서의 損傷舉動 및 균열進展抵抗曲線으로부터 安定破壞開始點을 검토하였다.

2. 實驗方法

2.1 材料 및 試驗片

본 실험에 사용된 SMC材는 纖維길이 25.4mm의 E 유리의 초프 스트랜드 매트(chopped strand mat)에 불포화 폴리에스테르(polyester)를 혼합하여 프레스 압력 약 4MN/m², 성형온도 약 140°C에서 성형시킨 것으로 섬유 함유율은 약 30%이다.

이 재료의 기계적 성질은 만능재료시험기(Shimadzu Autograph, DCS-10T)를 사용하여 ASTM D638M-81⁽²²⁾ 규격에 따라 가공한 5개의 시험편에 대하여 引張試驗으로 평가하였으며 얻어진 결과의 평균값은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 파괴인성시험에 사용된 3점 굽힘시험편의 형상 및 치수이다. SMC材는 다른 FRP에 비하여 異方性이 적지만, 노치방향은 주어진 재료에서 동일하게 가공하였다. 스펀과 시험편의 폭의 비는 4이며 노치깊이 a/w (a : 초기노치깊이, w : 시험편의 폭)는 모두 0.5이다. 초기노치깊이 중 $0.8a$ 는 두께 1.5mm, 그리고 나머지 $0.2a$ 는 두께 0.3mm의 금속 톱(slitting metal saw)으로 각각 가공하였다. 또한 파괴인성은 초기노치先端의 형상에 의존한다는 보고^(16,20)가 있으므로 이점에 유의하여 초기노치선단의 반경은 모두 일정하게 하였다.

파괴인성시험은 25개의 시험편을 준비하여 초기

Table 1 Mechanical properties of SMC material at room temperature

Elastic modulus (GPa)	Yield strength* (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
14.2	93.6	104.7	3.0

*0.2% proof stress

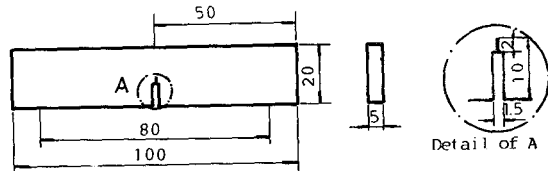


Fig. 1 Configuration of three-point bending test specimen (unit : mm)

노치를 넣은 후, 만능재료시험기를 사용하여 1 mm/min의 一定變位速度로 하였다. 이때 로우드 셀(load cell)로부터 얻어진 荷重신호와 荷重點 變位에 대한 신호를 X-Y 기록계에 입력시켜 하중-하중점 변위곡선(이하, 荷重-變位曲線이라고 함)을 구하였다. 인성시험은 모두 18°C±2°C에서 하였으며 노치선단의 손상영역의 관찰은 금속현미경을 사용하였고, 파면해석은 파면을 금으로 증착한 후 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 안정파괴개시 전후에 대하여 실시하였다.

2.2 균열進展 量의 측정

균열進展 抵抗曲線을 얻기 위한 균열진전량 Δa 의 측정은 금속재료의 경우, ASTM E813⁽²³⁾ 또는 JSME S001⁽²⁴⁾의 규정에 따라 가열착색법 또는 스트레치 존의 폭(stretched zone width) 등에 의하지만 SMC材에서는 이와 같은 방법이 불가능하므로 Suzuki⁽¹⁰⁾ 등에 의하여 제안된 잉크침투법을 사용하였다. 이 방법은 균열진전영역에 잉크를 주입하여 건조한 후 破斷시켜 破面上에 잉크로 착색된 부분으로부터 Δa 를 측정하는 것이다. 이때 균열진전영역은 금속과는 달리 대단히 복잡하기 때문에 잉크로 착색된 파면의 전면적을 광학현미경으로 사진촬영을 행한 후 그 면적을 試驗片의 두께로 나누어 균열進展量 Δa 를 구하였다. 또한 J 값의 계산은 보정한 荷重-變位曲線 아래의 면적 A 로부터 다음 식을 이용하여 구하였다.

$$J = \frac{2A}{Bb}$$

여기에서 B 와 b 는 시험편의 두께 및 리가멘트의 길이이다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 荷重-變位曲線과 균열形成 舉動

Fig. 2는 하중-변위곡선이다. 이 그림에서 최대 하중의 약 46%인 $P_y \approx 0.38\text{kN}$ 에서부터 하중-변위 관계는 非線形을 나타내어 균열의 安定成長이 예상되며 그리고 최대하중인 약 0.8kN에서 하중의 저하와 함께 不安定균열成長이 개시한다고 생각된다. 따라서 균열成長舉動을 명확히 하기 위하여 선형과 비선형 영역에서 노치先端의 균열形狀을 관찰하였다. 이의 대표적인 예가 Fig. 3(a)(b)이다. 선형영역인 낮은 荷重범위에서는 Fig. 3(a)와 같이 노치선

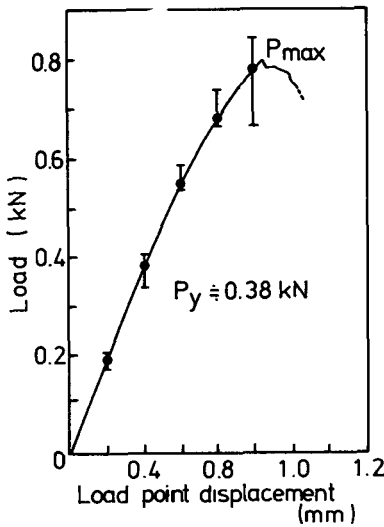


Fig. 2 Load-load point displacement curve

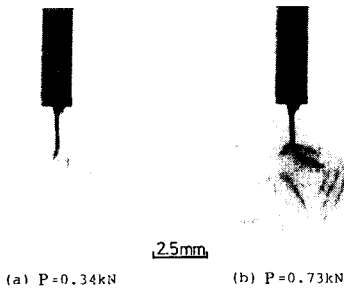


Fig. 3 Damage behavior at the crack vicinity

단에 균열이 하중방향에 거의 수직으로 형성되어 하중의 증가와 함께 연속적으로 성장하지만 비선형영역에서는 Fig. 3(b)에서와 같이 균열선단을 포함한 넓은 영역에서 새로운 균열이 形成, 成長하여 어떠한 형태의 損傷영역⁽²⁵⁻²⁷⁾을 이루면서 진전한다고 할 수 있다. 이러한 복잡한 균열形成 舉動이 安定破壞 開始點의 정량적 파악을 곤란하게 하는 하

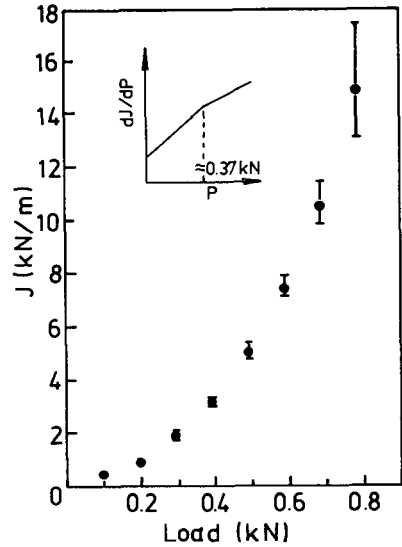


Fig. 4 Variation of J with load (P)

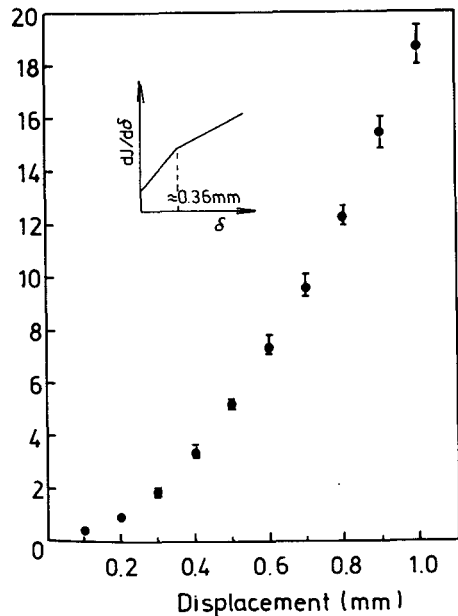


Fig. 5 Variation of J with displacement (δ)

나의 원인이 된다. 한편 Fig. 4 및 Fig. 5는 임의의 荷重과 變位에 대한 J 값을 나타낸 것으로 J 값은 하중과 변위의 증가에 따라 완만한 곡선형상으로 된다. 이들 그림에서 J 값은 하중 또는 변위의 증가와 함께 상당량의 分散현상을 보이고 있으며, 이는 Fig. 3(b)에서와 같이 노치先端의 복잡한 균열形成과 이에 미치는 불균일한 纖維분포와의 관련성에 의한 것으로 생각된다. 또한 Fig. 4 및 Fig. 5에서 하중 및 변위에 대한 J 값의 기울기를 각각 구하여 보면 하중 0.37kN , 변위 $\approx 0.36\text{mm}$ 인 지점에서 변곡이 생기며 이들 값은 荷重-變位曲線上에서 선형에서 비선형으로 천이하는 하중 또는 변위와 일치함을 알 수 있다.

3.2 균열進展 抵抗曲線과 安定破壞 開始點

금속재료의 경우는 소성鈍화에 의해 생긴 限界스트래치 존의 값을 안정 파괴 개시점으로 생각하고 이 점에서의 파괴인성치를 J_{in} 값으로 정의하고 있다^(23,24). 특히 균열선단에서 平面變形率 상태가 만족될 경우, 이 값은 유효한 탄소성 파괴인성치 J_{Ic} 가 된다. 그러나 FRP의 경우에는 이미 설명한 바와 같이 균열先端의 微視破壞 機構가 금속과 다르므로 탄소성 파괴인성평가법은 확립되어 있지 않다. 그래서 먼저 J 에 대한 균열進展量 Δa 에 관하여 검토하였다. Δa 는 균열선단의 前方에 손상영역이 존재하여 균열선단의 판정이 곤란하므로 임의의 荷重에 의해 진전한 균열先端에 잉크를 주입하여 건조한 후, 파단시켜 잉크로 착색된 부분으로부터 구하였다. Fig. 6은 J 값과 Δa 와의 관계를 나타낸 균열進展抵抗의 R 곡선으로 2개의 다른 기울기를 갖는 직선으로 근사함을 알 수 있으며 이러한 경향은 다른 연구결과^(4,10)에서도 보고되고 있다. 먼저 R 곡선의 개시점을 최소자승법에 의해 구한 결과 $J = 0.25\text{kN/m}$ 이며 이 값은 0.07kN 의 하중에 해당하는 J 값이다. 따라서 이 값이 J_{in} 이라고 생각되지만 母材부분에서 우선적으로 균열이 형성한다^(4,10)고 보면 이 값은 모재의 파괴개시점이라고 할 수 있다. 그러나 모재부분에서 균열이 형성되다 하여도 纖維가 상당한 양의 荷重능력을 갖고 있기 때문에^(10,11) 이 J 값을 안정 파괴개시점으로 정의하기에는 과소평가된다고 생각한다. 그래서 2개의 R 곡선이 만나는 점의 J 값에 대하여 주목하였다. 이 교점은 $J = 2.45\text{kN/m}$ 이며 이때의 하중은 0.36kN 으로 荷重-變位曲線상의 선형에서 비선형으로 천이하

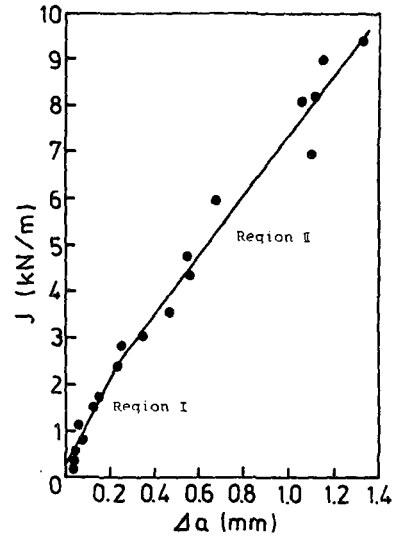


Fig. 6 Relation between J and crack extension (Δa)

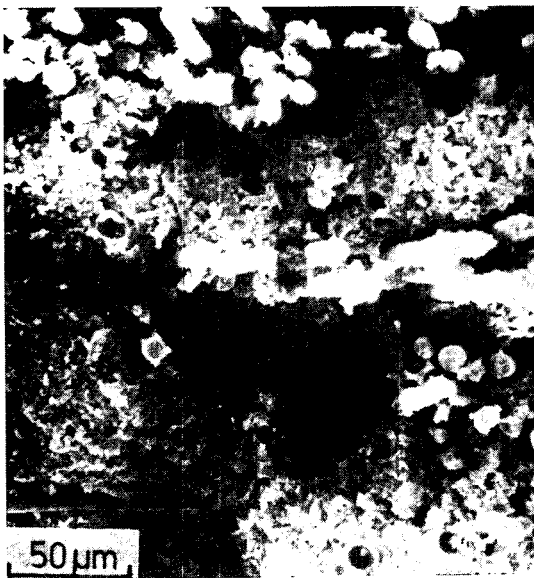
는 하중값과 거의 일치한다. R 곡선은 이 J 값을 경계로 균열진전에 대한 저항이 변화하고 이 값을 넘으면 균열의 성장이 용이하게 된다고 생각되므로 이 R 곡선을 균열진전의 초기단계라고 할 수 있는 I領域과 균열이 안정적으로 成長하는 II領域으로 구분하여 微視破面에 대하여 검토하였다. Fig. 7(a) (b)는 각 영역에서의 파면사진의 대표적인 예로서 I영역에서는 주로 母材부분을 중심으로 균열이 진전함을 알 수 있으나 II영역에서는 섬유인발 등의 대량파단이 관찰된다. 따라서 R 곡선은 I영역에 해당하는 荷重-變位曲線상의 선형거동은 섬유의 파단이 소규모이기 때문이고 II영역의 비선형거동은 모재부분의 파괴와 함께 다량의 섬유가 파단하였기 때문이라고 할 수 있다.

이상의 결과로부터 2개의 R 곡선의 교점인 $J = 2.45\text{kN/m}$ 의 값을 安定破壞開始點으로 생각함이 타당하다고 할 수 있다.

한편 금속재료의 경우는 疲勞豫균열(fatigue precrack)의 先端에서 균열이 발생하여 安定的으로 성장한 후 不安定破壞가 일어나지만 SMC材에서는 Fig. 3에서와 같이 노치선단에 형성한 초기의 균열은 荷重의 증가에 따라 새로이 형성된 균열과 함께 성장하여 복잡한 損傷舉動을 나타낸다. 따라서 잉크착색법에 의하여 평가한 균열進展 抵抗曲線 및 安定破壞 開始點($J = 2.45\text{kN/m}$)의 신뢰성에 검토의 필요성이 있다.



(a) Region I



(b) Region II

Fig. 7 Fracture appearances in region I and II

시험片 表面에서의 손상영역은 이미 언급한 바와 같이 荷重-變位 曲線상의 線形과 非線形 영역에서 서로 다른 양상을 나타내므로 이를 정량적으로 평가하려면 균열의 형성 또는 진전에 대한 저항의 변화를 명확하게 파악할 수 있다고 생각한다. 그래서 각 하중 또는 변위에 대한 표면의 손상영역을 광학

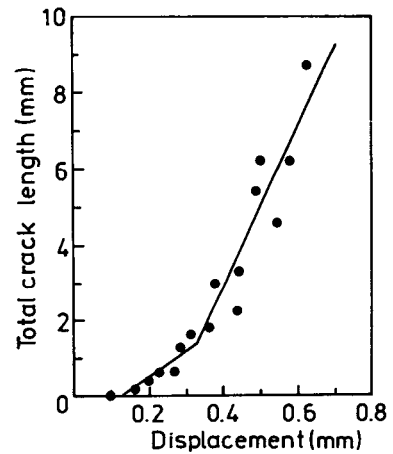
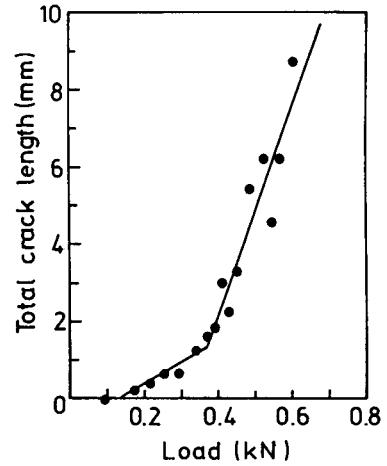


Fig. 8 Variation of total crack length with load and displacement

현미경으로 촬영하여 양 표면에 형성된 균열의 총 길이의 평균값 L 을 구하고 이 값과 J 값과의 관계를 검토하였다. Fig. 8(a)(b)는 荷重과 變位에 대하여 L 을 나타낸 것으로, 2개의 다른 기울기를 갖는 직선으로 나누어지고 그 절점은 각각 0.37kN 및 0.33mm에 해당된다. 한편 Fig. 9는 표면균열의 총 길이의 평균값 L 을 J 값에 대하여 나타낸 것이다. J - L 과의 관계에 의한 균열進展 抵抗曲線은 Fig. 6의 J - Δa 관계와 마찬가지로 2개의 영역으로 나누어지며 이들 영역의 절점에 해당되는 J 값은 2.61 kN/m로서 J - Δa 관계에서 구한 J 값(=2.45kN/m)과 거의 같음을 알 수 있다.

이상의 관점에서 J - Δa 의 관계에서 얻어지는 균열進展 抵抗曲線의 변곡되는 절점의 J 값은 安定破

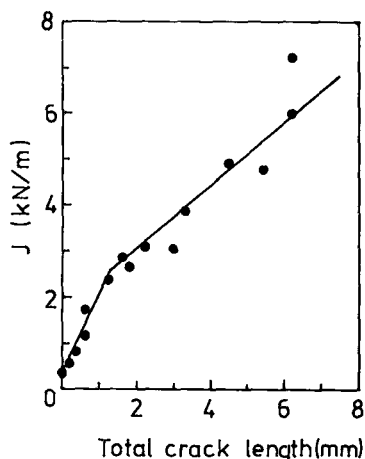


Fig. 9 Relation between J and total crack length(L)

壞 開始點으로서의 파괴인성치 J_c 라고 할 수 있다.

4. 結 論

SMC材의 破壞인성평가를 위하여 노치선단에서의 균열進展量 및 표면에서의 損傷舉動과 함께 J 積分의 개념을 도입하여 安定破壞 開始點을 검토하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 노치선단에서의 손상영역은 주균열의 형성, 성장에만 의존하는 것이 아니고 이 균열과 함께 새로운 균열의 형성, 성장에 의해서 이루어진다.

(2) J 값과 균열진전량 Δa 및 表面의 損傷영역에 형성된 총균열길이의 평균값 L 과의 관계에 의하여 얻어진 균열進展 抵抗의 R 곡선은 각각 $J=2.45$ kN/m 및 2.61kN/m에서 J 에 대한 Δa 및 L 값이 급격히 성장한다.

(3) R 곡선상의 절점의 J 값을 하중-변위곡선에 대응시키면 선형에서 비선형으로 천이하는 지점의 J 값과 거의 일치한다.

후 기

본 研究는 학술진흥재단의 지원에 의하여 이루어진 것으로 재단 관계자에게 감사한다.

참 고 문 헌

(1) Hayashi, T., 1982, "Composite in Japan", Progress in Science and Engineering of Composites, Vol. 1, pp.

- 1~8.
- (2) Peterson, P., 1980, "Advanced Composites: Past Perspective and Fracture Strategy", Advance in Composite Materials, Vol. 1, pp. 3~10.
- (3) 古田, 1984, "FRP 30年の歩み, 宇宙 航空機", 強化プラスチック, Vol. 30. No. 5, pp. 177~182.
- (4) 網島, 松岡, 1986, "平織FRP材の破壊靱性および疲労き裂進展舉動に関する研究", 日本複合材料學會誌, Vol. 12, No. 6, pp. 259~265.
- (5) Agrawal, B.D., Patro B.S. and Kumar, P., 1984, "J-Integral as Fracture Criterion for Short Fibre Composites: An Experimental Approach", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 19, No. 4, pp. 675~684.
- (6) Agrawal, B.D., Kumar P. and Khanna, S.K., 1986, "Determination of Fabric Reinforced Composites by the J-Integral Approach", Composites Science and Technology, Vol. 25, pp. 311~323.
- (7) Yanada, H. and Homma, H., 1983, "Study of Fracture Toughness Evaluation of FRP", Journal of Materials Science, Vol. 18, pp. 133~139.
- (8) Thorat, H.T. and Lakkad, S.C., 1983, "Fracture Toughness of Unidirectional Glass/Carbon Hybrid Composites", Journal Composite Materials, Vol. 17, pp. 2~14.
- (9) 影山, 野中, 1985, "CFRP 面内破壊じん性", 日本機械學會論文集, Vol. 51, No. 471, pp. 2583~2593.
- (10) Suzuki, M., Iwamoto, M., Kirimura K. and Tanaka, N., 1982, "Study on Elastic-Plastic Fracture Toughness of Composite Materials", Progress in Science and Engineering of Composites, Vol. 1, pp. 681~688.
- (11) 川田, 大塚, 梶谷, 林, 1985, "ガラス/エポキシ積層板の破壊じん性に及ぼす板厚, 試験片寸法の影響について", 材料, Vol. 34, No. 377, pp. 164~170.
- (12) Poursartip, A., Ashby, M.F. and Beaumont, P.W.R., 1986, "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon fibre Composites Laminate: I-Development of the Model", Composites Science and Technology, Vol. 25, pp. 193~218.
- (13) Poursartip, A. and Beaumont, P.W.R., 1986, "The fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fiber Composite Laminate: II-Life Prediction", Composite Science and Technology, Vol. 25, pp. 283~299.
- (14) 網島, 谷本, 松岡, 越智, 1985, "実働荷重下におけるFRPの疲労壽命推定に関する研究", 材料, Vol. 34, No. 378, pp. 293~299.
- (15) 윤성호, 홍창선, 1986, "탄소섬유강화 복합재료의 혼합모우드 층간파괴인성치에 대한 연구", 대한기계

- 학회논문집, 제10권, 제2호, pp. 198~207.
- (16) Lagace, P.A., 1986, "Notch Sensitivity of Graphite Epoxy Fabric Laminates", *Composites Science and Technology*, Vol. 26, pp. 95~117.
- (17) Wang, S.S., Chim, E.S.M., Yu T.P. and Goetz, D. P., 1983, "Fracture of Random Short-Fiber SMC Composite", *Journal of Composite Materials*, Vol. 17, pp. 299~315.
- (18) 鈴木, 岩本, 村田, 桐村, 1981, "複合材料における破壊エネルギーの非線形効果", *日本機械學會論文集*, Vol. 47, No. 418, pp. 603~610.
- (19) 關根, 小澤, 藤田, 1986, "SMC 複合材料の破壊靱性と微視的破壊", *材料*, Vol. 35, No. 396, pp. 1016~1022.
- (20) Gagger, S. and Broutman, L.J., 1977, "Fracture Toughness of Random Glass Fiber Epoxy Composites: An Experimental Investigation", *ASTM STP* 631, pp. 310~330.
- (21) ASTM E399-78, 1978, "Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials".
- (22) ASTM D638M-81, 1981, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (Metric)".
- (23) ASTM E813-81, 1981, "Standard Test Method for J_c , A Measure of Fracture Toughness".
- (24) JSME 日本機械學會基準, 1981, "彈塑性破壊 J_{IC} 試験方法 JSME S001".
- (25) Lauke, B. and Pompe, W., 1986, "Fracture Toughness of Short-Fibre Reinforced Thermoplastics", *Composites science and Technology*, Vol. 26, pp. 37~57.
- (26) 鈴木, 中西, 岩本, 橋, 小池, 伊村, 重光, 自念, 1987, "AE法によるグラス A-SMC 疲労破壊機構の考察", *材料*, Vol. 36, No. 411, pp. 1402~1408.
- (27) 關根, 鈴木, 1986, "FRP 複合材料の微視破壊靱性に關する研究", *日本機械學會論文集*, Vol. 52, No. 476, pp. 1027~1033.