

Iosipescu Shear Test를 이용한 고분자 복합재료의 종방향 전단계수 연구 Effective Longitudinal Shear Modulus of Polymeric Composite Using Iosipescu Shear Test

정태현* · 권용수** · 이유태*** · 이동주****

Tae-Heon Jeong · Yong-Su Kwon · You-Tae Lee · Dong-Joo Lee

<abstract>

Effective shear modulus of continuous fiber reinforced polymeric composites is measured using a modified Iosipescu Shear Test(IST) and compared with data obtained by finite element analyses that a concept of unit cell is. It is found that the numerical results of the longitudinal shear modulus give a good agreement with experimental data at lower fiber volume fraction. In this paper, both the distance and stress transfer between the fibers are discussed as the major factors

Keyword : Iosipescu Shear Test, Longitudinal Shear Modulus, Unit Cell, Modulus, Composite

1. 서 론

섬유강화 복합재료의 기계적 특성 평가는 실험적 방법 및 역학적 해석을 통한 이론 및 수치 해석을 이용하여 구조물의 재료 거동을 예측하고 있다. 전형적인 복합재료 물성 해석은 복합재료를 구성하는 기지(matrix) 및 보강재(fiber)의 기계적 특성을 알고 있다는 가정을 통

한 미시역학적 접근 방법을 이용하고 있다. 미시적 해석 방법은 기지와 섬유의 2상(phase)으로 비균질한 재료로 모델링하여 해석하는 방법이다. 최근 이와 같은 미시적 해석법은 단위격자(unit cell) 개념으로 발전하여 많은 연구가 진행되어 왔다. [1,2]

섬유가 보강된 복합재료의 일반적인 모델은 Fig.1에 나타냈다. 탄성계수(elastic modulus) 및

* 정희원, 경북도립 경도대학 차량기계학과 전임강사, 工博
영남대학교 대학원 졸업
Tel : (0584) 650-0284

** 정희원, 경북도립 경도대학 차량기계학과 전임강사, 工博
영남대학교 대학원 졸업
Tel : (0584) 650-0282

*** 정희원, 경북도립 경도대학 차량기계학과 조교수, 工博
영남대학교 대학원 졸업
Tel : (0584) 650-0281

**** 영남대학교 기계공학부 부교수, 工博

* Full-time Lecturer, Dept. of Vehicle Mechanics,
Kyongdo Provincial College, Ph.D
E-mail : thjeong@mail.kyongdo.ac.kr

** Full-time Lecturer, Dept. of Vehicle Mechanics,
Kyongdo Provincial College, Ph.D
E-mail : yskwon@mail.kyongdo.ac.kr

*** Assistant Professor, Dept. of Vehicle Mechanics,
Kyongdo Provincial College, Ph.D
E-mail : ytleee@mail.kyongdo.ac.kr

**** Professor, School of Mechanical Engineering
Yeungnam University, Ph.D

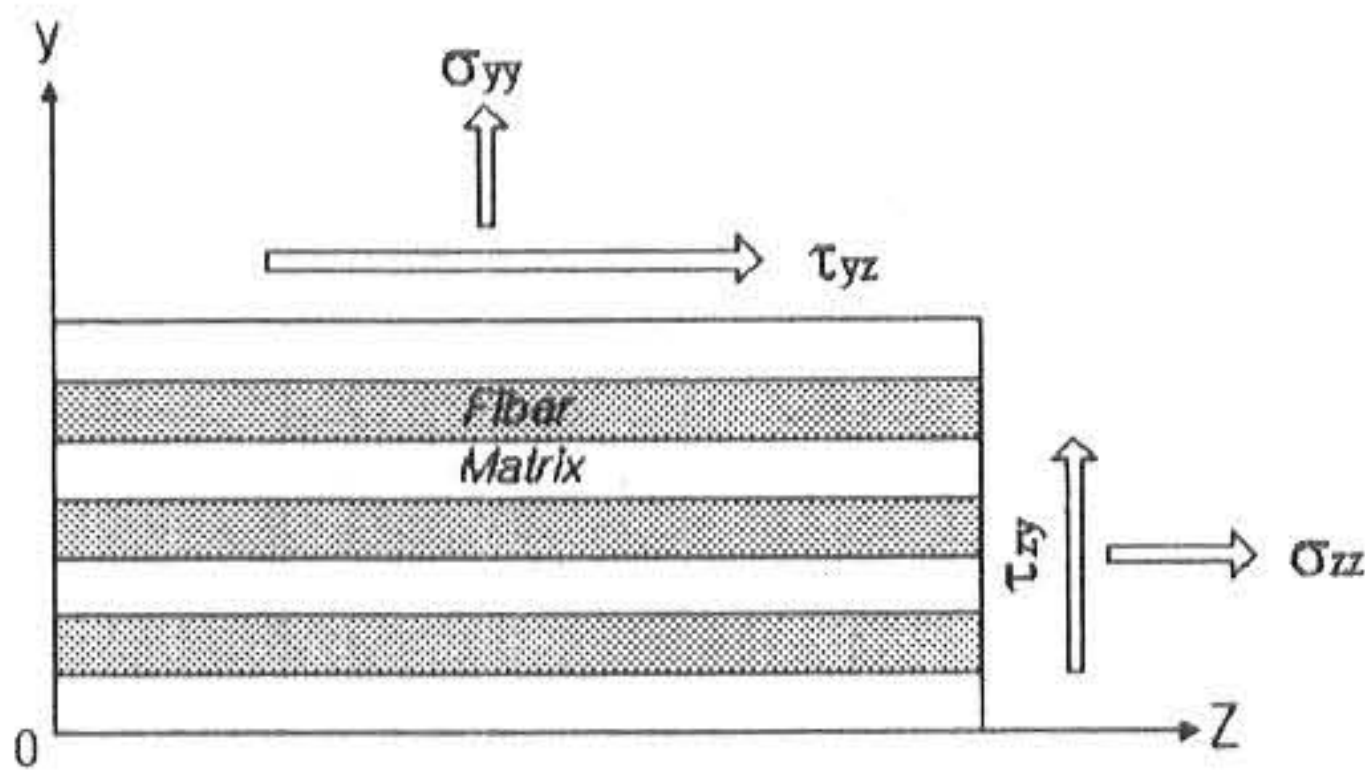


Fig.1 Mechanics of composite model.

전단계수(shear modulus)는 방향성에 의해 종방향(longitudinal)과 횡방향(transverse)으로 구분되며, 횡방향이란 섬유방향에 수직인 방향, 종방향이란 섬유 방향을 나타낸다. 복합재료의 기계적 특성은 사용되는 소재(기지, 섬유)들의 성질, 형상, 배열상태, 그리고 제조과정 등에 의해 결정된다. 특히, 한방향으로 연속섬유의 형태로 보강된 복합재료의 종방향 전단계수는 다른 기계적 특성에 비해 매우 낮다. 즉 종방향 전단계수 결정은 보강되는 섬유의 보강 효과보다는 섬유를 둘러싸는 기지와 섬유의 계면 결합력에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이와 같은 중요성에도 불구하고 복합재료의 종방향 전단계수 연구는 극히 저조한 실정이다.

보강재의 단면이 원형인 경우 육각배열에서 Hashin-Rosen[3]은 복합재료의 종방향 전단계수를 기지와 섬유의 전단계수와 체적비의 함수로 표현하였다. 또한 Adams[5]는 탄성영역에서 수치해석 방법을 이용하여 종방향 전단계수를 구하여 Hashin-Rosen의 결과와 비교하였다. Kondo[4]등은 Glass/epoxy 복합재료를 실험적 방법으로 종방향 전단계수를 구하였다.

실험적 방법으로 복합재료의 전단계수를 구하는 방법은 Thin-wall Tube Specimen, Off-axis Test, Rail-shear Test, Iosipescu Shear Test(IST)등의 방법이 있다.[5,6,7] Thin-wall Tube, Off-axis, Rail-shear 등의 시험법은 기술적으로 시험편 제조 및 시험 방법 등의 어려움이 있으며, 특히 연속섬유의 형태로 배열된 복합재료의 시험에 한계를 나타낸

다.[5,6] 이에 따라 복합재료의 종방향 전단계수 시험법으로 1988년 ASTM에 규정에 의해 Iosipescu Shear Test(IST)를 채택하고 있다.[8,9] IST 시험법은 시험편 제조가 간단하고 강도 및 강성을 동시에 시험할 수 있으며, 편리한 방법으로 시험이 가능하며, 시험결과의 신뢰성이 매우 뛰어나다. 이에 따라 기계적 특성 연구는 IST 시험편을 모델링하여 유한요소 해석을 이용한 많은 연구가 진행되어 왔으며,[10,11] Walrath and Adams는 IST 시험법을 복합재료의 전단시험법으로 체계화하였다.

본 연구는 단위격자(unit cell) 개념을 이용하여 carbon/epoxy 복합재료를 모델링하여 유한요소해석을 수행하였으며, IST 시험편을 제작하여 실험적 방법으로 체적비 변화에 따른 종방향 전단계수를 측정 후 비교 평가하였다.

2. Iosipescu Shear Test

전형적인 IST 시험편은 Fig.2에 나타냈다. 이 시험편은 Iosipescu에 의해 제안되어 Walrath and Adams[8,9] 등이 보완하여 널리 사용된다. 보강된 섬유 방향이 y 방향으로 평행하게 보강된 경우(90° 시험편)와 z 방향으로 평행인(0° 시험편)이 있다. 0° 시험편은 전단하중 방향이 보강재 방향과 수직인 횡방향(transverse) 전단 응력 시험편이며, 90° 시험편은 하중 방향과 섬유 방향이 일치하는 종방향(longitudinal) 전단 응력 시험편이다. 본 연구는 90° carbon/epoxy 시험편을 이용하여 종방향 전단계수를 구하였다.

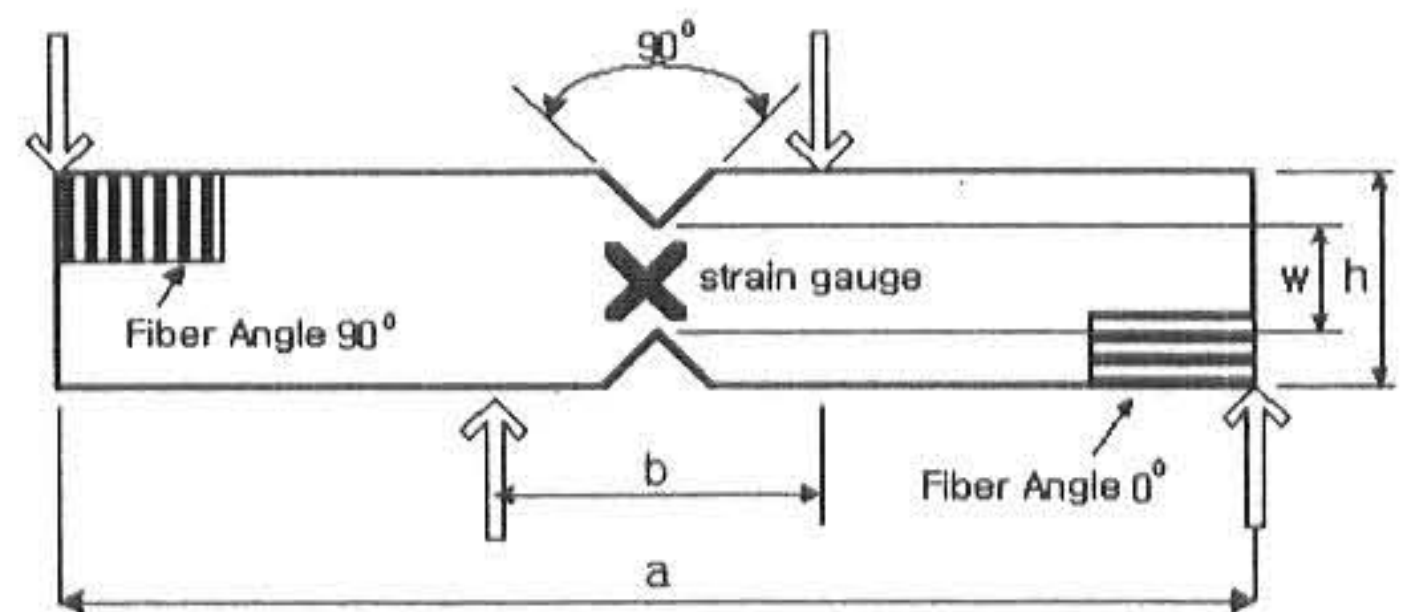


Fig.2 Specimen of Iosipescu Shear Test.

Fig.3은 Walrath and Adams[8]에 의해 수정

된 IST 시험기의 형상을 나타낸다. 본 실험은 직접 IST 시험기를 제작하여 실험하였다. 시험편의 중심과 하중 방향의 중심과 일치시킨 후 전체 하중 P 를 가할 경우, 시험편 중심에서 굽힘 모우멘트가 0(zero)이되고 순수 전단력은 P

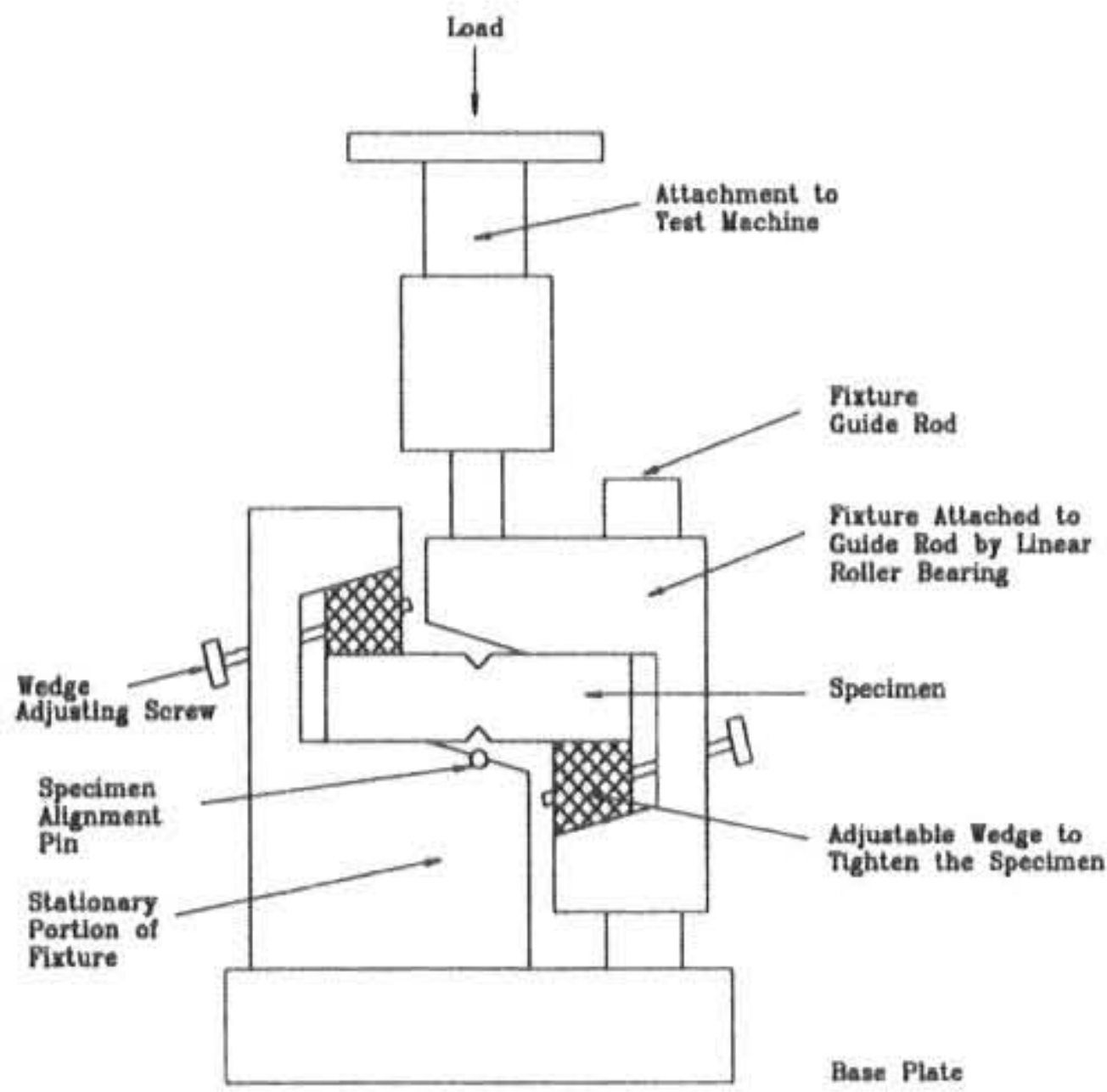


Fig.3 Iosipescu specimen mounted in the modified fixture.

이다. 또한 Fig.4는 IST 시험기에서 하중을 가할 경우 시험편에 발생하는 전단력 선도(shear force diagram) 및 굽힘 모멘트 선도(bending moment diagram)를 나타냈다. 노치가 있는 중심 부분에는 순수 전단응력만 발생한다. 또한 $y=0$ 인 지점에서 $\sigma_y=0$, $\sigma_z=0$, $M_b=0$ 임을 알 수 있다. 순수 전단응력이 발생하는 지점에서 전단변형률을 측정함으로써 종방향 전단계수를 실험적 방법으로 구할 수 있다. Fig.3에서 일정하중 P 를 가할 경우 시험편에 변형이 발생되며, 그 변형은 스트레인 게이지를 통하여 전단 변형률을 측정할 수 있다. Fig.2에서 스트레인 게이지는 $\pm 45^\circ$ 방향으로 부착하여 국부적인 평균 전단 변형률을 측정할 수 있다.

$$\gamma_{yz} = \epsilon_{45} - \epsilon_{-45} \quad (1)$$

또한 전단계수는 응력과 변형률 관계에서 결정할 수 있다.

3. 유한 요소 해석

연속섬유의 형태로 보강된 복합재료의 유한 요소 해석은 크게 2가지의 형태로 구분된다. 첫째

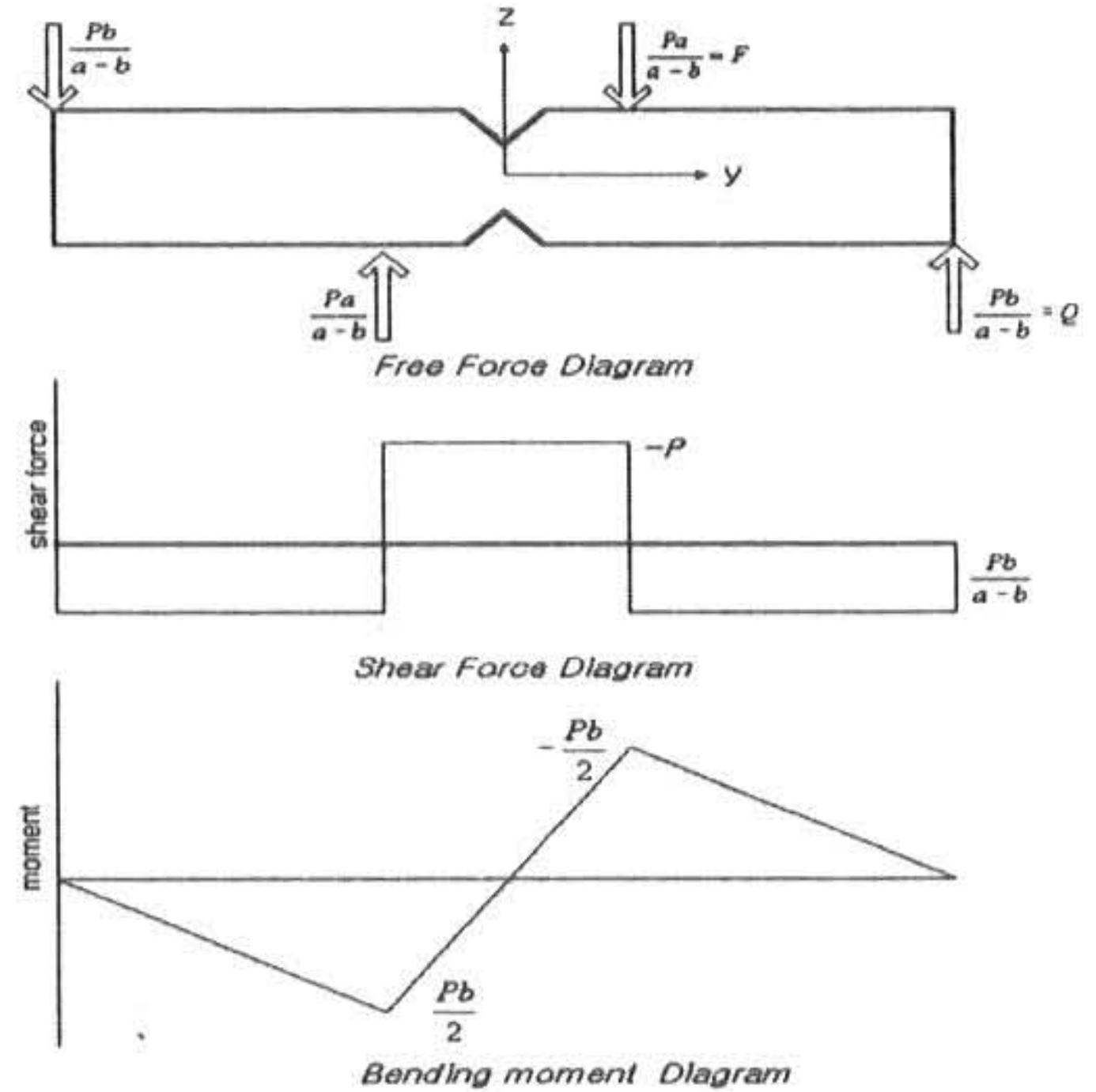


Fig.4 Shear force diagram and bending moment diagram of the Iosipescu specimen.

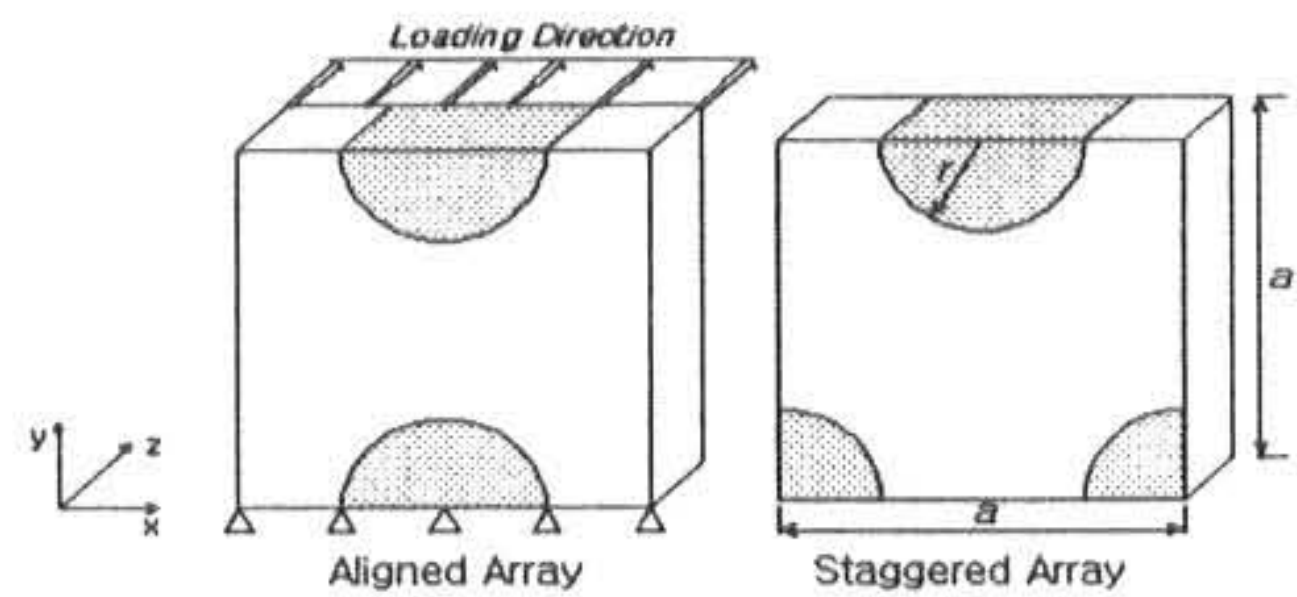


Fig.5 Schematic of FE analysis model for different types of array.

는 기계적 특성이 방향에 따라 균질한 재료 특성을 나타내는 직교 이방성체로 가정하여 해석하는 경우와 복합재료 모델의 단위격자(unit cell) 내에 기지와 섬유 상으로 구분하여 불균질한 재료로 가정하여 해석하는 방법이 있다. 일반적인 단위격자 해석 모델은 보강재의 응력 전달 효과 및 배열 효과 등을 정확하게 예측할 수 있으며, 본 연구는 단위격자 내에 원형 단면의 보강재가 보강된 모델을 이용하였다. 기본 해석 모델은 Fig.5와 같다.

보강된 섬유 배열은 규칙적인 배열(aligned array), 엇갈린 배열(staggered array) 2가지로

해석하였다. FEA 해석은 ANSYS5.0을 이용하였으며 모델의 경계 조건은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} u = v = w = 0 \quad y = 0 \\ u = v = 0, \quad w = w(x, y) \quad y = a \text{인 지점} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 u, v, w 는 x, y, z 방향의 변형량이다. 또한 a 는 모델 한 변의 크기이다.

유한요소해석(FEA)은 변형량(displacement)을 변화시키며 해석하는 변위 구속법을 이용하였으며, 최대 변형률은 1%까지 탄성거동한다고 가정하였다. 또한 보강재의 체적비는 10, 20, 30, 40%로 변화시키며 해석하였다. 해석 결과에서 유효전단계수는(effective shear modulus) 각 절점(node)의 평균값을 취하였다.

$$G_{avg.} = \frac{\sigma_{yz}}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{b} \right]} \quad y = b \text{인 지점} \quad (3)$$

여기서 n 은 절점의 개수, w_i 는 z 방향의 변형량이다. b 는 모델의 y 방향 임의의 지점이다.

4. 실험

연속섬유 강화 고분자 복합재료를 제작하기 위해 사용된 보강재는 태광산업에서 생산된 bundle 형태의 탄소섬유(carbon fiber)를 이용하였으며, 기지는 제작이 용이한 상온 에폭시(정도화성, JEC-880)를 사용하였다. Table 1은 사용된 탄소섬유의 기본 물성을 나타냈다.

인장강도 GPa	탄성계수 GPa	Filament count	Filament diameter
3.4	235	12000	6.8 μ m

Table 1 Material properties of carbon fiber

시험편 제조 방법은 먼저 사각 틀에 탄소섬유를 한방향으로 불규칙적으로 감은 후 유리판 위에 고정을 시킨다. 그리고 그 위에 에폭시와

경화제를 5:1로 배합하여 성형판 위에 붓고 70°C에서 진공 전기로에 1시간 경화를 시킨 후 서냉시킨다. 이와 같은 방법으로 제작된 시험편 중에 기포를 완전히 제거된 것을 사용하였다. 보강된 섬유 체적비는 탄소 섬유의 감는 수를 변화시키는 방법을 이용하였다. 본 시험에 사용된 시험편의 크기는 75×22×6mm($a \times h \times t$)이며, 탄소섬유 체적비는 10%(±1), 20%(±1)이다. 또한 시험편 내부의 기포 발생 및 보강재 사이의 계면 결합력 약화 등으로 보강재의 체적비가 30%이상인 시험편을 실험실 조건에서 제작하는 것은 불가능하였다.

IST 시험 방법은 IST시험 장비를 인장시험기에 부착한 후 분 당 0.1mm의 압축하중을 가하였으며, 동적 스트레인(dynamic strain amp.) 측정 장비를 이용하여 변형률을 측정하였다.

5. 결과 및 토의

연속섬유의 형태로 탄소섬유가 보강된 에폭시 복합재료를 제작한 후 IST 시험을 통하여 종방향 전단계수를 구한 후 유한요소 해석 결과와 비교하였다. 먼저 Fig.6은 IST실험으로 얻어진 전형적인 전단응력과 변형률의 곡선을 나타냈

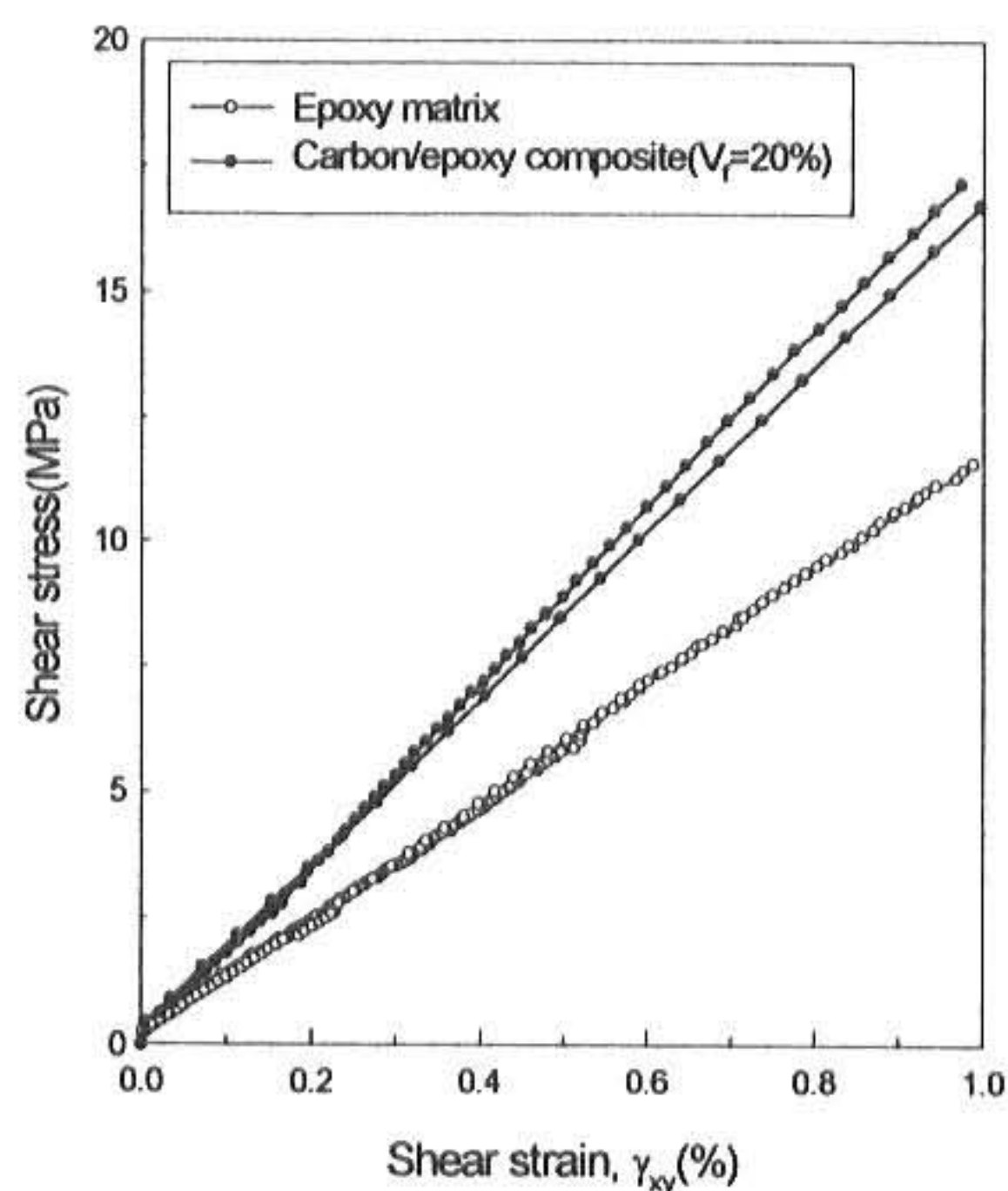


Fig.6 The typical shear stress and strain curve for the tested sample.

다. 이 곡선에서 보강재 체적비에 따른 복합재료의 종방향 전단계수를 구할 수 있다. 먼저 에폭시 기지의 전단계수 $G_m=1.19\text{GPa}$ 이며 복합재료인 경우 1.45GPa 로 20%정도 증가하였다. 또한 전단 변형률이 1%일 때 전단강도(shear strength)를 보면 에폭시 기지만일 때는 평균 11MPa 이며, 보강재 체적비가 20%인 복합재료인 경우 평균 16MPa 로 증가하였으며, 또한 전단계수도 증가함을 알 수 있다. 이것은 보강재의 단순 보강 효과의 영향이며, 섬유 체적비가 증가할수록 보강재와 기지의 계면 접착력이 강화되어 보강 효과가 증가한 것으로 예상된다. 또한 시험편 제조과정에서 보강재의 체적비가 증가할수록 기포제거가 어렵고 균일한 시험편 제작에 어려움을 보였다. 또한 시험편의 노치

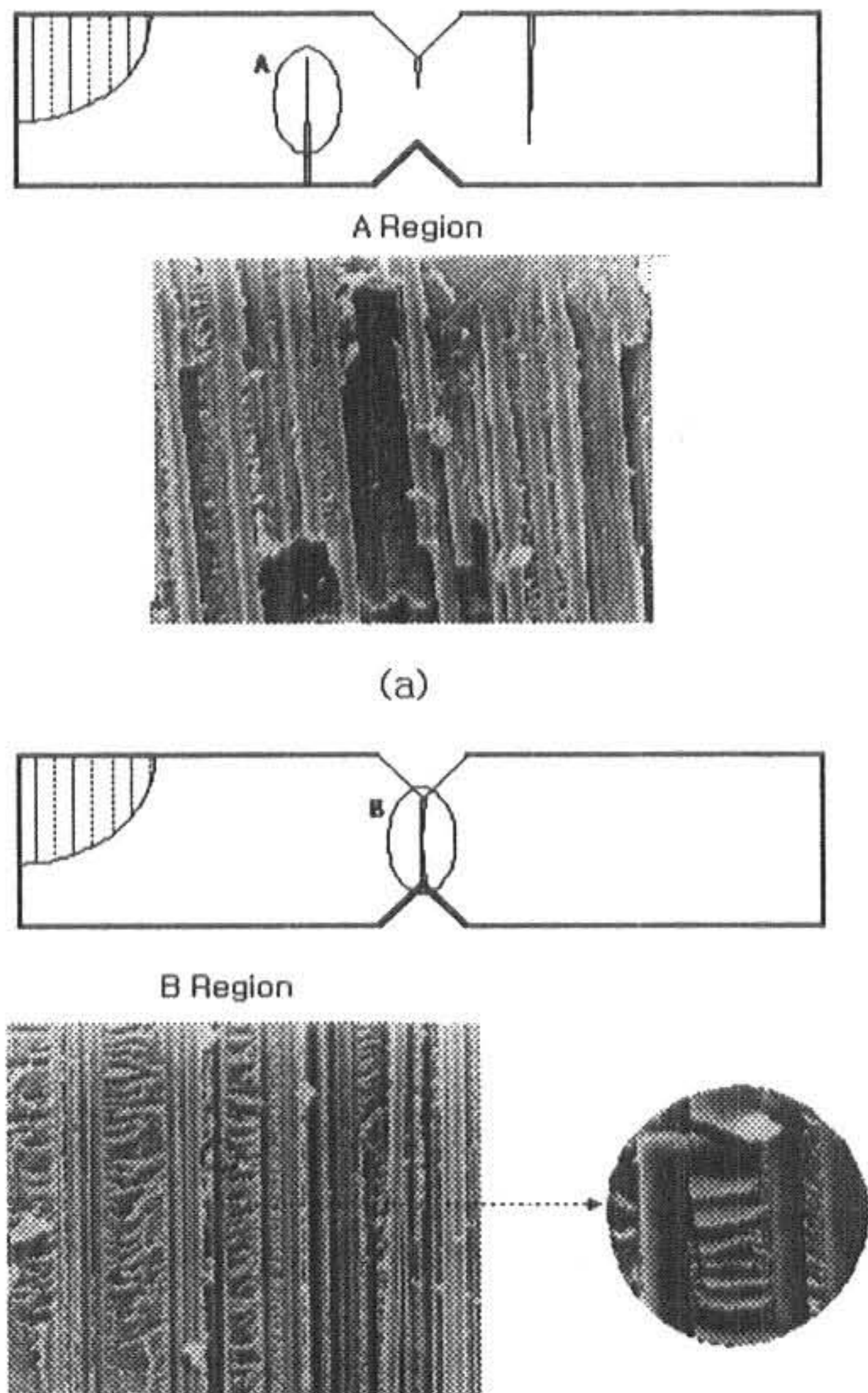


Fig.7 Failure modes and SEM of fracture surface for carbon fiber reinforced composites.(a) unacceptable and (b) acceptable modes.

중심과 IST시험기 중심의 일치에 어려움을 보였다.

Fig.7은 IST 시험편의 파단 형태 및 파단면의 사진을 나타냈다. Fig.7a는 파단이 노치 중심부가 아닌 시험기와 시험편의 접촉이 끝나는 부분에서 발생하는 형태이다. 본 연구에서 이와 같이 파단되는 시험편은 시험결과로 사용하지 않았다. Fig.7a의 원인은 크게 2가지로 구분된다. 첫째는 시험편 접촉부분 선단에서 응력집중의 영향, 시험과정에서 IST 시험기의 중심과 시험편 노치의 중심이 일치하지 않아 굽힘 모멘트(bending moment)가 발생하였기 때문으로 추정되며, 두 번째는 SEM(Scanning Electron Microscope) 사진에서 시험편 내부에 기포의 영향 및 섬유 자체의 파손, 섬유의 pull-out 현상 때문이다. 이것은 전단파괴를 촉진시켜 전단강도 및 기계적 특성을 약화시키는 원인이 되었으며, 보강재 체적비가 증가할수록 Fig.7a와 같은 거동이 증가하였다. Fig.7b는 전형적인 IST의 순수전단력 실험에서 발생하는 거동이다. 굽힘이 발생하지 않았으며, 노치 중심부에 정확하게 파단이 발생하였다. 본 연구에 사용된 실험 결과는 Fig.7b의 거동을 보인 것만 이용하였다. SEM 사진에서 기지와 섬유의 계면 전단

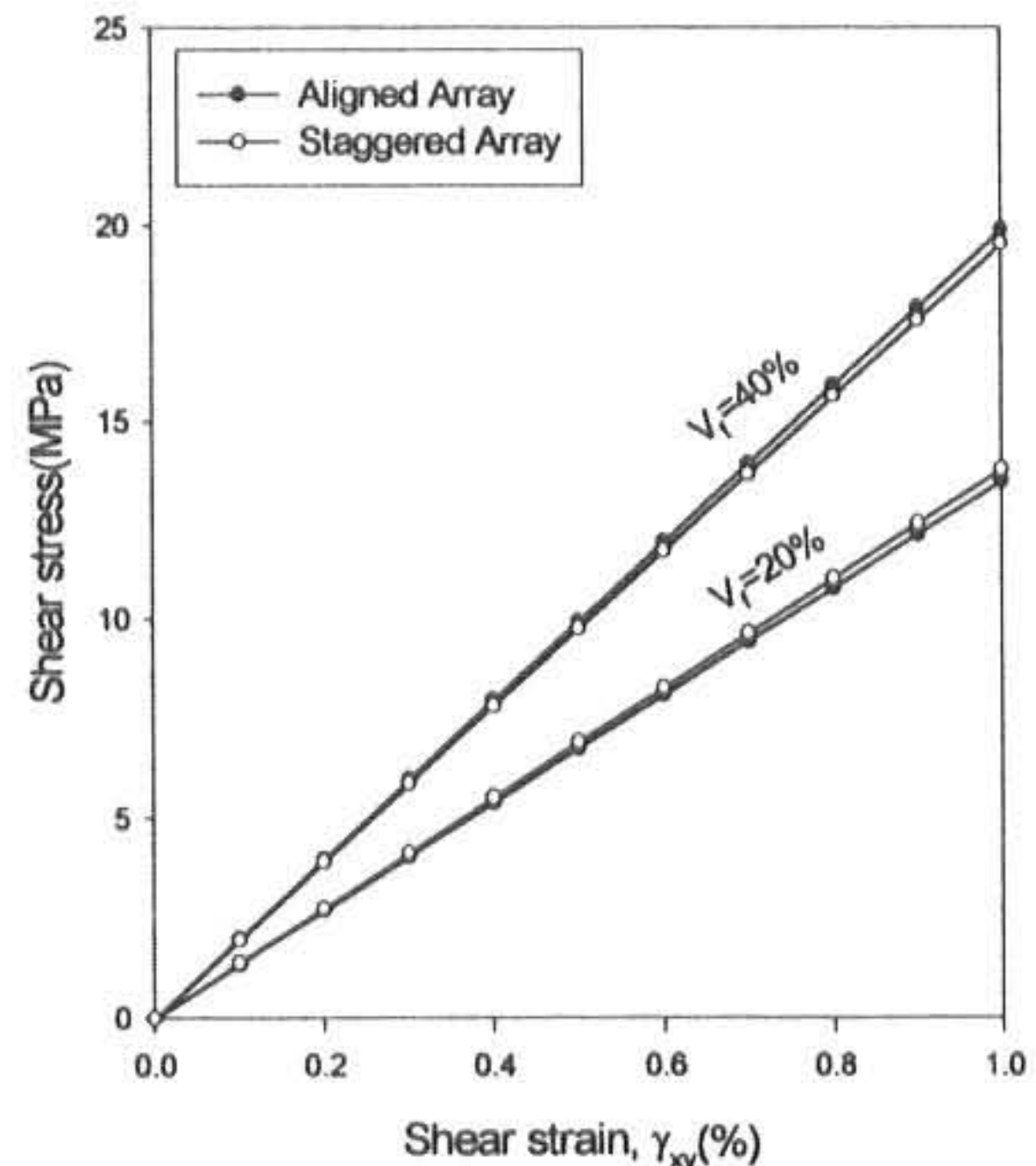


Fig.8 Numerically predicted shear stress-strain curves for unit cell model.

파괴를 보였으며, 전단파괴 거동의 독특한 형태인 기지부분의 물결무늬 형태를 보였다. 이와 같은 결과에서 계면 접착력 증가는 종방향 전단계수 결정에 중요한 영향을 미침을 알 수 있다.

Fig.8은 유한요소 해석에서 보강재의 체적비가 $V_f=20\%$, 40% 일 때 보강 효과 및 섬유 배열 효과 등을 고려한 응력과 변형을 곡선이다. 해석 모델에서 체적비 변화에 따른 보강재 배열의 영향을 보였다. 규칙적인 배열(aligned array)인 것은 수직인 방향(y방향)으로의 보강재와 상호작용을 고려하였으며, 엇갈린 배열(staggered array)은 수직(y방향), 수평방향(x방향)으로 보강재와 상호작용을 고려한 모델이다. 즉 섬유의 체적비가 낮으면 엇갈린 배열이, 체적비가 증가할수록 규칙적인 배열이 보강효과가 증가함을 보였다. 이것은 체적비가 증가할수록 수직인 방향으로 인접한 보강재 사이의 거리가 줄어들어 급격히 기지방향으로 응력전달이 증가하였기 때문이다. 따라서 보강재의 배열에 따른 보강 효과에 대한 연구가 필요하다.

Fig.9는 IST 실험 결과 치와 유한요소 해석 결과를 비교 분석하였다. 먼저 유한요소 결과와 Hashin-Rosen의 식[3]과 비교에서 섬유 체적비

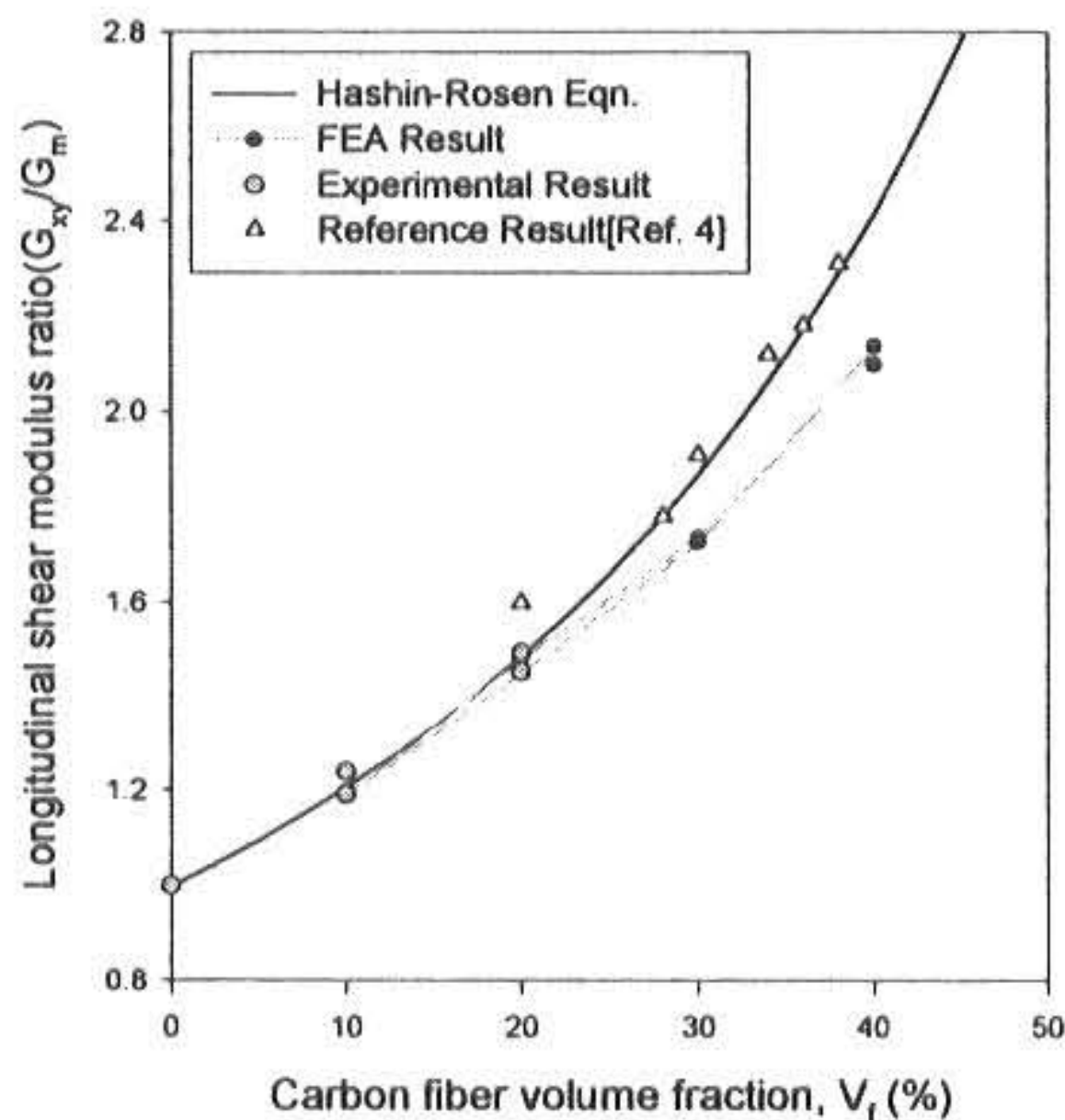


Fig.9 $G_{yz} - V_f$ relation

가 20% 이하일 경우 상당히 잘 일치함을 보였으나, 체적비가 증가할수록 해석 결과가 낮게

나타났다. 이것은 Hashin-Rosen의 식은 식(4)와 같이 섬유와 기지의 전단계수 및 체적비의 함수로만 표시되었으며, 본 유한요소 해석 모델은 보강재의 형상, 배열상태, 응력전달 과정 등을 고려하여 해석하였기 때문에 해석 결과가 낮게 나타났다. 즉, 섬유 체적비가 증가할수록 종방향 전단계수를 결정에 섬유의 형상, 배열 등에 따른 보강재에서 기지로의 응력 전달의 영향이 결정적인 인자임을 알 수 있다.

$$\frac{G_{avg}}{G_m} = \frac{(G_f + G_m) + (G_f - G_m)V_f}{(G_f + G_m) - (G_f - G_m)V_f} \quad (4)$$

여기서, 첨자 f , m 은 보강재와 기지를 나타내며, G 는 전단계수, V 는 체적비를 의미한다.

또한 보강재 체적비가 10%, 20%인 IST실험 결과와 이론 및 유한 해석 결과가 잘 일치됨을 보였으며, 체적비가 증가할수록 실험결과는 Hashin-Rosen의 결과보다 유한요소 해석결과에 근접할 것으로 예상된다.

6. 결론

IST 시험편을 이용하여 연속섬유 보강 고분자 복합재료의 종방향 전단계수를 실험적 방법으로 구하였으며, 보강재의 체적비, 배열 등을 변화에 따른 해석 결과와 비교하였다.

(1) 기지와 보강재의 계면 접착력은 연속섬유 보강 복합재료의 종방향 전단계수 결정에 큰 영향을 미침을 보였으며, IST 시험편 파단은 굽힘모멘트, 기포의 영향으로 2가지 형태로 구분되었다. 계면의 파단면이 물결무늬 형태는 복합재료 종방향 전단파괴의 독특한 현상이다.

(2) 종방향 전단계수를 결정하는 인자는 기지와 섬유의 계면결합력 및 인접한 섬유 사이의 거리, 즉 배열 등이 중요한 영향을 미침을 보였다. 보강재의 배열 상태는 체적비가 증가할수록 배열에 따른 영향이 증가됨을 보였다.

(3) IST 실험결과와 유한요소 해석 결과가 낮

은 보강재 체적비에서 근사됨을 보였다. 보강재의 체적비가 증가할수록 실험치는 이론해석의 결과 보다 유한요소 해석 결과에 근접할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) Lee,D.J. and Jeong,T.H.Effective Longitudinal Shear modulus of Unidirectional Composite. Proceedings of ICCM10, 4,171-178 (1995)
- 2) Chen,C.H. and Cheng,S. Mechanical Properties of Fiber Reinforced Composites. *J. Comp. Mat.*, 1,30-41 (1967)
- 3) Hashin,Z and Rosen,B.W. The Elastic Moduli of Fiber-Reinforced Materials. *J. App. Mech.*, 31E,223 (1964)
- 4) Kondo and Aoki,T. Longitudinal Shear Modulus of Unidirectional Composites. Progress in Sci. and Eng. of Comp., 357-364 (1982)
- 5) Adams,D.F. and Doner,D.R.Longitudinal shear Loading of Unidirectional Composites. *J. Comp. Mat.*, 1,4-17 (1967)
- 6) Wilson,D.W. Evaluation of the V-Notched Beam Shear Test Through an Interlaboratory Study. *J. of Composites Technology & Research*, 12,131-138 (1990)
- 7) Pindera, M.J., Choksi, G. and Hidde,J.S. A Methology for Accurate Shear Characterization of Unidirectional Composite. *J. of Composite Materials*, 21,1164-1183 (1987)
- 8) Walrath,D.E. and Adams,D.F. The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite. *Experi. Mech.*, 105-110 (1983)
- 9) Walrath,D.E. and Adams,D.F. Further Development of the Iosipescu Shear Test Method. *Experi. Mech.*,June,113-119 (1987)
- 10) Pindera ,M.J.,P. Ifju and Post,D. Iosipescu Shear Characterization of Polymeric and Metal Matrix Composites. *Experi. Mech.*, March, 101-108 (1990)
- 11) Morton,J.,Ho,H. and Tsai,M.Y. An Evaluation of the Iosipescu Specimen for Composite Materials Shear Property Measurement. *J. Comp. Mat.*, 26,708-750 (1992)

(1999년 12월22일 접수, 2000년 2월 일 채택)