

碩士學位論文

炭素纖維強化形 複合材料의 機械的
性質에 미치는 水環境影響

濟州大學校 大學院

機關工學科



1991年 12月

炭素纖維強化形 複合材料의 機械的 性質에 미치는 水環境影響

指導教授 金 萬 守

朴 景 錫

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함.

1991年 12月

朴景錫의 工學碩士學位 論文을 認准함.

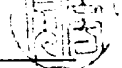
審査委員長

권 기 린



委 員

김 만 수



委 員

金 貴 植



濟州大學校 大學院

1991年 12月

The Influence of Water Environment on the
Mechanical Properties of Carbon/Epoxy
Reinforced Composite Materials

Gyeong-Seog Park

(Supervised by professor Man-Soo Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING



DEPARTMENT OF ENGINE TECHNOLOGY
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

1991. 12

목 차

Summary	1
I. 서 론	
1. 연구배경	3
2. 연구목적	5
II. 이 론	
1. 적층복합재료의 탄성정수	8
2. CFRP의 수분흡수특성	15
III. 재료 및 방법	
1. 실험재료	18
2. 실험방법	19
IV. 결과 및 고찰	
1. 탄성특성	21
2. 흡수특성	23
3. 인장특성	27
4. 피로특성	30
5. 파단특성	32
V. 결 론	37
VI. 참고문헌	39



SUMMARY

This is the study about a strength evaluation method of composite materials under hygrothermal environment. The materials used is two types of Carbon/Epoxy reinforced composite materials i.e., 130°C cure-type composite T-1/347 and 180°C cure-type MM-1/982X, and test condition is the distilled water of 80°C for 2 months. Influences of water absorption on mechanical properties of these materials are investigated with the theories, and the experiments and fractography.

The results obtained are as follows:

(1) The moduli computed by both analytical method of anisotropic materials and laminate parameters are almost same, the results of the experiment on 3 type symmetric laminates with $\langle 0^\circ \rangle$, $\langle \pm 45^\circ \rangle$, $\langle 0^\circ/90^\circ \rangle$ in ply orientation.

(2) The water absorptions of cross-ply laminates under distilled water of 80°C for 2 months are 2.0% in T-1/347, and 0.9% in MM-1/982X. In early times, the rate of water absorption continued to increase rapidly and then decreased gradually.

The absorption content estimated by the Fick's equation is similar to the experiment results.

(3) In the mechanical properties of cross-ply laminates under

distilled water of 80°C, the tensile strength of T-1/347 wet specimens more increased than that of dry ones, but that of MM-1/982X decreased. The fatigue strengths of both T-1/347 and MM-1/982X wet specimen more decreased than those of dry specimens.



I. 서론

1. 연구배경

장래 발전이 기대되고 있는 항공·우주, 극지산업, 해양개발, 신에너지 개발 등의 첨단산업 분야의 확립에는 그 기반이 되는 기초 정보에 대한 연구조사를 적극적으로 추진 할 필요가 있는데, 그 기초정보에 대한 연구중에서도 신소재의 개발이 첨단 산업의 발전에 가장 중요한 관건이 된다고 생각된다. 신소재의 한 종류로서 복합재료는 종래의 금속재료에 비하여 비강도, 비탄성, 비마모성이 크고 내식성이 좋으며, 또 섬유강화재의 적층각 및 적층순서에 따라 적절한 강도와 강성을 갖는 재료를 용도에 맞게 설계·제작할 수 있는 점 등의 장점이 있으므로 국내외적으로 많이 연구 되고 있다.

복합재료(FRP)에 대한 연구는 1940년대에 유리섬유강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic: GFRP)을 중심으로 발전되어 1960년대에 제품화 되어왔다. 그 이후 금속재료에 대치될 수 있는 복합재료의 진출로서, 1970년대 이후 탄소섬유와 아라미드섬유 등으로 강화한 탄소섬유강화 플라스틱(CFRP)과 아라미드섬유강화 플라스틱(AFRP)등의 복합재료가 개발됨을 시점으로 선진복합재료라 불리게 되었으며, 중량의 경량화, 고탄성, 내마모성이 가장 절실히 요구되는 분야와 부식 환경이 문제가 되는 분야등의 항공·우주, 자동차, 해양선박분야 등의 구조용 재료와 부품에 그 이용이 매년 증가하고 있다.

선진 복합재료(ACM)중에서도 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)는 기계·구조물의 강도 부재로서, 특히 강도 특성이 중요한 일차구조 부재로서 이용이 주목되고 있다. CFRP의 강도특성에 대한 연구는 이방성재료 이므로, 일방향 강화 적층판에 대해 섬유방향과 하중방향이 일치할 경우(on-axis)와 섬유방향과 하중방향이 다른경우(off-axis)로 나누어서 인장강도, 피로강도 및 이들 강도에 미치는 환경의 영향 즉, 환경강도의 연구로 대별될 수 있다. 인장강도 등의 정적강도에 대해서는 다수 연구가 되어 있지만, 주로 건조공기 중에서의 연구이다(尾田十八, 1975). 피로파괴에 대한 연구는 현재 금속재료의 피로파괴 해석에 적용되고 있는 파괴역학적 해석수법을 적용하고 있으나 복합재료가 금속재료와는 다른성상 즉, 섬유와 수지간, 적층간의 불연속성 때문에 이들 파괴역학적 수법의 적용은 아직 정립되지 않은 상태이다.

특히, 선진FRP는 기계구조물의 일차구조 部材등에 많이 사용되어 가고 있으므로, 그 사용목적에 따른 여러가지 환경하에서의 강도Data의 축적이 필요하다. 이들 복합재료의 기계적강도 특성과 피로강도 특성은 환경의 영향 즉, 수분 함유율, 온도 조건에 따라 변화가 크므로 이들의 환경강도 특성을 파악 하는 것이 중요하다.

복합재료의 환경강도 특성에 관한 연구는 장치및 측정기술의 어려움 때문에 현재 시작단계에 있다. Komai(1989,1990)등은 CFRP와 AFRP(Kevlar)등의 환경강도특성을 검토하여, 건조공기 내의 피로강도 보다 수분을 함유한 AFRP의 피로강도가 고사이클 영역에서 더욱 강하며 흡수에의해 섬유와 강화재 간의 계면강도가 현저히 저하하여 인장강도와 피로강도가 저하 한다고 보고하고 있다. 또, Springer(1988)등은 Glass섬유 강화 복합재료와 아라

미드섬유 복합재료의 환경강도에 대해, Verbruggen(1985), Yates(1986), Roylance(1983), Wallace(1983) 등은 아라미드섬유에 대해 연구 하여 왔으나 그 파괴기구의 해명에 대해서는 아직 불분명하다.

국내의 연구동향 으로서는 현재 CFRP와 SMC복합재료(CFRP압축성형 재료의 일종)의 공기중의 파괴인성치(金등, 1989), 공기중의 피로수명고찰(황등, 1988), 공기중의 피로균열 진전특성(金등, 1989), AE특성(李등, 1989)에 대하여는 어느정도 연구가 진행 되고 있으나, CFRP의 기계적 강도및 피로파괴 강도등에 미치는 수환경효과에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

2. 연구목적

선진 복합재료(ACM)중에서도 탄소섬유강화 복합재료(CFRP)는 기계·구조물의 강도 부재로서, 특히 강도 특성이 중요한 일차구조 부재로서 이용이 주목 되고 있다. CFRP의 정적강도 특성 및 기계적 성질에 대해서는 종래부터 많은 연구가 되어 왔지만, 비균질 이방성 재료이기 때문에 이론적 해석이 어렵고 매우 복잡한 파괴특성을 가지고 있어서 파괴과정에 대한 역학적 규명이 곤란한 실정이다.

특히, 사용 환경(水환경, 온도등)중의 강도및 기계적 성질에 관한 연구는 비교적 시작단계에 있고, 또 그 사용환경의 영향에 대한 평가도 상세히 검토되어 있지 않다. 기계, 구조용 부재로서의 금속 재료에 있어서 사용환경이 강도에 미치는 영향 즉, 부식피로(Kim et al, 1987, 1988), 응력부식균열(Komai et al, 1985), 고온크리피로(大南正瑛, 1986)등의 환경강도는 공

기중의 강도와는 전혀 상이한 파괴특성을 나타내고, 그 환경중의 강도가 공기중의 강도에 비해 수배~수10배 저하한다. 복합재료는 기계적성질이 서로 다른 섬유와 수지의 조합으로 구성되어 있어서, 그 파괴는 금속재료 처럼 비교적 단순하지가 않고, 섬유와 섬유, 섬유와 수지의 계면, 수지 적층 사이에서 발생하므로 그 파괴기구는 매우 복잡하며, 여기에 환경의 영향이 가미되면 더욱 복잡해진다. 그러므로 종래의 금속재료에 대치해서 기계, 구조용 부재에의 사용이 점차 확대되고 있는 CFRP에 있어서, 재료강도에 미치는 환경의 영향 즉, 수분, 온도등의 영향에 대한 검토및 해석은 CFRP의 기계, 구조물에의 사용시 안전성, 신뢰성의 확립과 설계시의 기초 Data로서의 중요한 요소이므로 CFRP의 환경강도 해석의 확립과 Data축적이 시급하다.

따라서, 본 연구에서는 섬유강도 및 계면강도가 지배적인 $0^{\circ}/90^{\circ}$ 직교적 층구성을 가진 범용의 중온경화형과 항공기용의 고온경화형 2종류의 탄소섬유/에폭시수지 복합재료에 대하여 탄성정수의 이론적 예측, 흡수거동, 탄성정수 및 기계적 성질에 미치는 수환경의 영향에 대하여 검토하였다.

탄성정수의 이론적 예측은 Tsai(1980)등에 의해 도입된 적층재의 면내 탄성정수의 이론적 해석방법과 적층파라메타를 이용하여, 섬유배향각이 다른 대칭 적층판의 공학적 탄성정수를 계산하고, 그 결과를 실험치와 비교 검토하였으며, 적층판의 흡수거동은 이론해석과 실험을 통하여 검토 하였다. 또한, 기계적 성질에 미치는 수환경 영향은 인장강도 특성과 피로강도 특성에 대하여 검토 하였다. 이들은 공기중방치 재료와 수중침적 재료의 각각에 대한 인장시험 및 저사이클피로시험을 행하여 적층판의 기계적 성질에 미치는 흡수거동을 해석 하였으며, 주사형 전자현미경(SEM)을 이용한 파단면 관

찰을 통하여 흡수에 의한 수지의 열화, 계면접착강도 저하 기구를 고찰하
로서, 수분이 CFRP의 기계적성질에 미치는 기구에 대하여 검토 하였다.

본 연구에서 얻어지는 결과들은 CFRP를 이용한 기계 및 구조물의 설계 및
사용중의 안전성, 신뢰성의 확립을 위한 기초 자료로 이용될 것이다.



Ⅱ. 이 론

1. 적층복합재료의 탄성정수

일반적인 직교이방성형태를 나타내는 일방향 적층판의 좌표계와 배향각을 Fig.1에 나타내었다. 여기서, 1-2는 기준축계좌표이고, X-Y는 섬유축계좌표, θ 는 섬유배향각이다. 재료는 면내하중하에서 굽힘이나 비틀림변형이 없는 것으로 하며, 섬유배향각이 $[0^\circ]$, $[\pm 45^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$ 인 대칭적층판을 해석대상으로 하였다. 일반적으로 적층판의 역학적 특성으로서의 면내강성은 적층에 관한 인자로서, 적층소재의 재료특성, 섬유배향각 및 동일배향각을 가진 층군의 체적함유율만을 고려하며, 적층순서에 대해서는 고려하지 않는다.

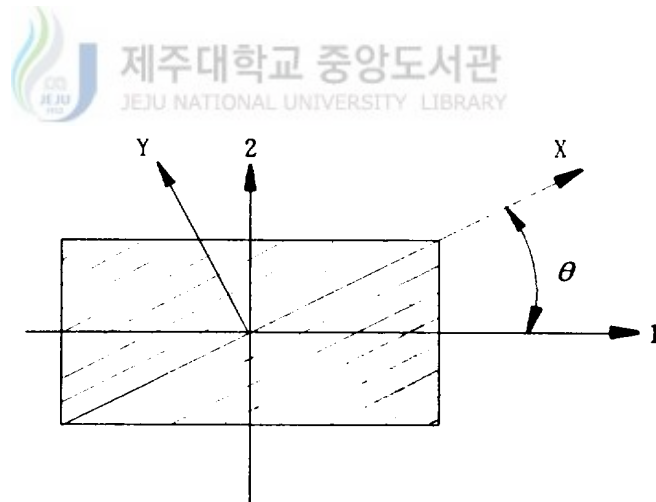


Fig. 1 Generally orthotropic configuration
of a unidirectional composite.

일방향강화 복합재료의 사향축계 킴플라이언스와 탄성정수는 Fig.2에 나타낸 순서에 의해 결정할 수 있으며, 섬유축계의 X-Y계와 주축계의 1-2계의 응력과 변형율은 (1)과 (2)로 표현된다.

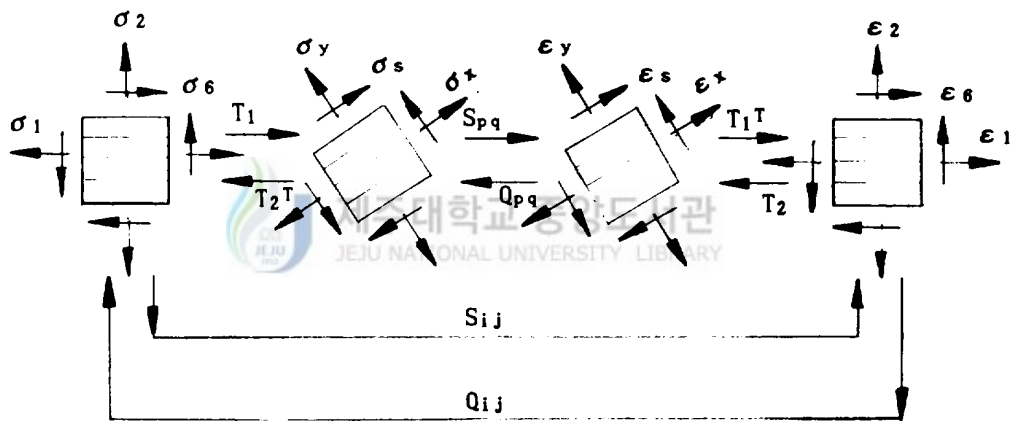
$$\sigma_p = \{ \sigma_x, \sigma_y, \sigma_s \}^T, \quad \sigma_i = \{ \sigma_1, \sigma_2, \sigma_6 \}^T \quad (1)$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_s$: X축의 수직응력, Y축응력, X-Y축에대한 전단응력

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_6$: 1축의 수직응력, 2축응력, 1-2축에대한 전단응력

$$\varepsilon_p = \{ \varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_s \}^T, \quad \varepsilon_i = \{ \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_6 \}^T \quad (2)$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_s$:
 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_6$:] 각 방향의 변형율성분



a) Off-Axis stress b) On-Axis stress c) On-Axis strain d) Off-Axis strain

Fig. 2 Determination of the off-axis modulus and compliance.

각각의 좌표계에 대한 강성메트릭스(stiffness matrix)와 컴플라이언스메트릭스 (compliance matrix)를 Q_{pq} , Q_{ij} , S_{pq} , S_{ij} 라고하면, 탄성정수 및 컴플라이언스에 의한 일방향강화 복합재료의 섬유축 및 사향축계 응력, 변형을 관계식은 식(3), (4)와 같다.

$$\sigma_p = Q_{pq} \epsilon_p \quad \epsilon_p = S_{pq} \sigma_p \quad (3)$$

$$\sigma_i = Q_{ij} \epsilon_i \quad \epsilon_i = S_{ij} \sigma_i \quad (4)$$

식(3)에서 X-Y계의 탄성정수메트릭스 Q_{pq} 는 4개의 독립된 공학적탄성정수 E_x , E_y , E_s , ν_x 에 의해 식(5), (6) 으로 표현된다.

$$Q_{pq} = \begin{bmatrix} Q_{xx} & Q_{xy} & 0 \\ & Q_{yy} & 0 \\ \text{sym.} & & Q_{ss} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{xx} &= m E_x & Q_{yy} &= m E_y & Q_{xy} &= m \nu_x^2 E_y \\ Q_{ss} &= E_s & m &= (1 - \nu_x^2 E_y/E_x)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

여기에서 E_x , E_y , E_s , ν_x 는 각각 X축방향의 탄성정수, Y축방향의 탄성정수, X-Y축방향에 대한 탄성정수, X축방향에 대한 프와송(poisson)의 비 이다. 또, X-Y系에서 1-2系로의 응력성분 및 변형율성분의 변환은, 식(7)의 T_1 , T_2 에 나타낸 좌표변환 매트릭스

$$T_1 = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad T_2 = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & mn \\ n^2 & m^2 & -mn \\ -2mn & 2mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_p = T_1 \sigma_i \quad \epsilon_p = T_2 \epsilon_i \quad (8)$$

$$m = \cos \theta, \quad n = \sin \theta, \quad \theta = \text{섬유배향각}$$

식(7)에서 응력성분과 변형율성분의 좌표변환메트릭스가 다른것은, 본 연구에 사용된 전단변형율성분이 통상 변형율성분의 2배로 정의되었기 때문이다. 또, 식(3)의 관계에 식(8)을 대입하면, $T_1^{-1} = T_2^T$, $T_2^{-1} = T_1^T$ 인 관계가 되므로 식(4)의 1-2계의 Q_{ij} 와 S_{ij} 는 다음식이 된다.

$$Q_{ij} = T_2^T Q_{pq} T_2, \quad S_{ij} = T_1^T S_{pq} T_1 \quad (9)$$

대칭적층판에서는 각층의 섬유배향각 θ 와 탄성정수 Q_{pq} ($p, q = x, y, s$)에 대해 다음의 간단한 가정이 필요하다.

$$\theta(z) = \theta(-z), \quad Q_{pq}(z) = Q_{pq}(-z) \quad (10)$$

여기서, z 는 판두께 방향의 좌표축이다. 또한 적층판의 변형율은 두께방향에 대해 일정하다. 즉,

$$\varepsilon_i(z) = \varepsilon_i^0 \quad (i=1, 2, 6) \quad (11)$$

$\varepsilon_1 \varepsilon_2$: 1축 및 2축방향의 수직변형율

ε_6 : 1, 2축에대한 전단변형율

이때, 적층판의 판두께를 h 라고 하면, 평균응력 $\bar{\sigma}_i$ 은

$$\bar{\sigma}_i = \frac{2}{h} \int_0^{h/2} \sigma_i dz \quad (i=1, 2, 6) \quad (12)$$

이다. 임의의 ply배향각에 대한 응력-변형율 관계식 $\sigma_i = Q_{ij} \varepsilon_j$ 과 식(11)을 식(12)에 대입하면,

$$\begin{bmatrix} \bar{\sigma}_1 \\ \bar{\sigma}_2 \\ \bar{\sigma}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11}/h & A_{12}/h & 0 \\ & A_{22}/h & 0 \\ \text{sym.} & & A_{66}/h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1^0 \\ \varepsilon_2^0 \\ \varepsilon_6^0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서, A_{ij} ($i, j = 1, 2, 6$) : 적층판의 단위폭당의 탄성정수

$$\begin{aligned} A_{11}/h &= Q_{xx}, & A_{22}/h &= Q_{yy} \\ A_{12}/h &= Q_{xy}, & A_{66}/h &= Q_{ss} \end{aligned} \quad (14)$$

이 되고, 정규화된 대칭적층판의 면내탄성정수는 (15)식 으로 되며

$$\begin{bmatrix} A_{11}/h \\ A_{22}/h \\ A_{12}/h \\ A_{66}/h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 & V_1^* & V_2^* \\ U_1 & -V_1^* & V_2^* \\ U_4 & 0 & -V_2^* \\ U_5 & 0 & -V_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

($A_{16}/h = A_{26}/h = 0$)

여기서, $U_i (i=1, 2, 6)$ 는 주어진 복합재료에 대해 일정한, z 와는 무관한 각 소재의 재료정수로서 탄성정수 $Q_{pq} (p, q=x, y, s)$ 와 선형결합으로 된다. 즉,

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3/8 & 3/8 & 1/4 & 1/2 \\ 1/2 & -1/2 & 0 & 0 \\ 1/8 & 1/8 & -1/4 & -1/2 \\ 1/8 & 1/8 & 3/4 & -1/2 \\ 1/8 & 1/8 & -1/4 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{xx} \\ Q_{yy} \\ Q_{xy} \\ Q_{ss} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, 적층파라메타 V^* 는

$$V_1^* = \frac{2}{h} \int_0^{h/2} \cos 2\theta dz, \quad V_2^* = \frac{2}{h} \int_0^{h/2} \cos 4\theta dz \quad (17)$$

이고, 식(17)은 Fig.3으로 부터 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_1^* &= \frac{2}{h} \sum_{i=1}^{m/2} \cos 2\theta_i [Z_i - Z_{i-1}] \\ &= \frac{2}{h} \sum_{i=1}^{m/2} \cos 2\theta_i h_i \end{aligned} \quad (18)$$

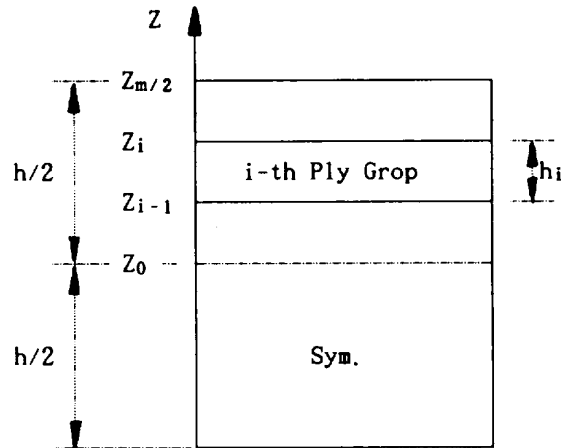


Fig. 3 Definitions of terms in a symmetric laminate.

따라서, θ_i 의 배향각을 가진 ply의 체적함유율은 $v_i = 2h_i/h$ 이므로

$$\begin{aligned}
 V_1^* &= \sum_{i=1}^{m/2} \cos^2 \theta_i v_i \\
 &= v_1 \cos^2 \theta_1 + v_2 \cos^2 \theta_2 + \dots \dots \dots \quad (19)
 \end{aligned}$$

여기서, $v_1 + v_2 + v_3 + \dots = 1$

이 되며, 동일한 방법으로,

$$V_2^* = v_1 \cos^4 \theta_1 + v_2 \cos^4 \theta_2 + \dots \dots \dots \quad (20)$$

또한, 직교적층복합재료에 대해서는 ply배향각이 0° 와 90° 에 한정되므로

식 (19), (20)로부터

$$\left. \begin{aligned}
 V_1^* &= v_0 - v_{90} \\
 V_2^* &= v_0 + v_{90} = 1
 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

1종의 배향각을 가지는 斜交積層板에 대해서는

$$\theta_1 = +\phi, \quad \theta_2 = -\phi \quad \text{라고하면,} \quad v_1 = v_2 = 1/2 \quad \text{이므로}$$

$$\left. \begin{aligned} V_1^* &= 1/2(\cos 2\phi + \cos 2\phi) = \cos 2\phi \\ V_2^* &= \cos 4\phi \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

적층판을 이용한 구조물의 설계에서 강성은 1-2축에 대한 공학적정수인 1축방향의 탄성정수(E_1), 2축방향의 탄성정수(E_2), 1축방향의 프와송의 비(ν_1) 및 1-2축에 대한 탄성정수(E_6)가 필요한데, 이들의 값은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{(A_{11}/h)(A_{22}/h) - (A_{12}/h)^2}{A_{22}/h} \\ E_2 &= \frac{(A_{11}/h)(A_{12}/h) - (A_{12}/h)^2}{A_{11}/h} \\ \nu_1 &= \frac{A_{12}/h}{A_{22}/h}, \quad E_6 = A_{66}/h \end{aligned} \right\} \quad (23)$$



2. CFRP의 수분흡수특성

2.1 흡수시간과 흡수율의 관계

X와 Y방향의 무한대 이고, 양면이 똑같은 수환경을 받는 두께 h의 평판이 Z방향 즉, 두께방향으로 1차원적인 확산이 진행될때, 수분흡수를 확산으로 간주하여 Fick는 다음방정식을 제시하였다. (Springer, 1976)

$$D \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} = \frac{\partial C}{\partial t} \quad (24)$$

D : 확산계수 C : 흡수율 t : 시간 Z : 두께방향

여기에서 초기조건과 경계조건을 다음과 같이 주어

$$\left. \begin{array}{l} t \leq 0 \text{ 일때 } 0 < Z < h \text{에 대해 } C = C_0 \\ t > 0 \text{ 일때 } Z = 0 \text{에 대해 } C = C_\infty \end{array} \right\} \quad (25)$$

h: 적층판의 두께, C_∞ : 포화흡수농도, C_0 : 초기흡수농도

解를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{C - C_0}{C_\infty - C_0} = 1 - \frac{4}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{2j+1} \sin\left(\frac{(2j+1)\pi Z}{h}\right) \exp\left(-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 D t}{h^2}\right) \quad (26)$$

따라서, 식(26)에서 실제의 수분농도 C는 식(27)에 의해 정의된 평균수분농도 \hat{C} 와 같게되므로

$$\hat{C} = \frac{1}{h} \int_0^h C \, dz \quad (27)$$

t=0 일때 $\hat{C}=C_0$, t=∞일때 $\hat{C}=C_\infty$ 로 하여 식(26)에 대입하면

$$\frac{\hat{C} - C_0}{C_{\infty} - C_0} = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{1}{(2j+1)^2} \exp\left(-\frac{(2j+1)^2 \pi^2 Dt}{h^2}\right) \quad (28)$$

이되며, Springer(1976)는 식(28)을 변형하여 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\hat{C} - C_0}{C_{\infty} - C_0} = 1 - \exp\left[-7.3 \left(\frac{Dt}{h^2}\right)^{0.75}\right] \quad (29)$$

또, Crank(1975)는 식(28)으로부터 단기간흡수식을 제안하였다.

$$\frac{\hat{C} - C_0}{C_{\infty} - C_0} = 4 \left(\frac{Dt}{\pi h^2}\right)^{1/2} \quad (30)$$

일반적인 흡수식에서 흡수량은 \sqrt{t} 의 함수로 되며 $M_m = C_{\infty} - C_0$, $M = \hat{C} - C_0$ 라 하면 식(30)은 다음 식이 된다.

$$\frac{M}{M_m} = 4 \left(\frac{Dt}{\pi h^2}\right)^{1/2} \quad (31)$$

식(31)에서 흡수율은 \sqrt{t} 의 함수이므로 흡수실험 데이터를 흡수율($M\%$)과 흡수시간(\sqrt{t})과의 관계로 나타내고, 실험곡선의 선형영역에서 $\sqrt{t_1}$ 과 $\sqrt{t_2}$ 에 대응하는 2개의 수분량 M_1 과 M_2 를 선택하여 식(32)에 대입하면 확산계수 D 를 결정할 수 있다.

$$D = \frac{\pi}{16} \left(\frac{M_2 - M_1}{M_m}\right)^2 \left(\frac{h}{\sqrt{t_2} - \sqrt{t_1}}\right)^2 \quad (32)$$

여기서, Browning과 Whitney(1977)은 복합재료의 이방성을 고려하여 식(31)을 변형하여 다음식을 제안 하였다.

$$M/M_m = 4\sqrt{(t/\pi)}(\sqrt{D_L}/a + \sqrt{D_T}/b + \sqrt{D_T}/h) \quad (33)$$

D_L : 섬유방향 확산계수

D_T : 섬유에 직각방향

a, b, h : 시편의 길이, 폭, 두께

또, 100°C에서의 D_L 과 D_T 에 대하여 Springer(1976)등은 다음식을 제안하였다.

$$D_L/D_T = (1-V_f)/(1-2\sqrt{V_f/\pi}) \quad (34)$$

V_f : 섬유의 체적함유율

2.2 온도와 흡수율의 관계

수분확산계수 D 는 온도 T 의 함수로서 Arrhenius식 으로부터 다음과 같이 표현된다.(Tsai, 1986)

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \quad (35)$$

Q : 활성화에너지(cal/mole)

R : 기체상수(=1.987cal/mole °K)

D_0 : 속도상수

식(36)을 직선식의 로그형태로 쓰면

$$\ln D = \ln D_0 - Q/RT \quad (36)$$

또는 $\log D = \log D_0 - Q/2.303RT$

이 되며, 만일 두 온도에서의 수분확산계수 D 가 결정된다면 Q 및 D_0 값들은 식(36)형태로 표현되는 두개의 방정식을 연립하여 결정 할 수 있으며, 이 Q 와 D_0 값들을 식(35)에 대입 함으로서 임의의 온도와 수분확산계수에 관한 일반식이 만들어 질 수 있다.

Ⅲ. 재료 및 방법

1. 실험재료

본 연구에 사용한 실험재료는 日本 미쓰비시회사 제품인 범용의 중온경화형 CFRP(T-1/347)와 항공기용의 고온경화형 CFRP(MM-1/982X) 두종류의 직교방향강화 복합재이고, 각 재료의 물성치는 Table 1에, 섬유와 수지의 기계적 성질은 Table 2에 나타내었다.

또한, 시험편 형상과 치수는 Fig. 4에 도시한 바와 같다.

Table 1 Materials used in this study.

Name	T-1/347	MM-1/982X
Fiber	Mitsubishi Rayon Co.Ltd. Pyrofil T-1	Mitsubishi Rayon Co.Ltd. Pyrofil MM-1
Materix	828 epoxy	Imide Modified Thermo-resistant epoxy
Curing Condition	90°C×60min ⇒ 130±5° × 60min	183±3°C×120min
Construction	0° / 90°	0° / 90°
Average Thickness	2.350	2.350
Fiber Volume Fraction(V _f)	60.4 %	55.8 %

Table 2 Mechanical properties of fiber and epoxy.

Name	Tensile strength (MPa)	Modulus (GPa)	Elongation at break (GPa)	Density (gr/cm ³)	Poisson's ratio	Diameter at fiber (μm)
T-1/347	3530	235	1.5	1.79	0.3	7
MM-1/982X	3920	275	1.4	1.78	0.3	7
Epoxy	35~100	3~6	1~6	1.1~1.4	0.38~0.40	

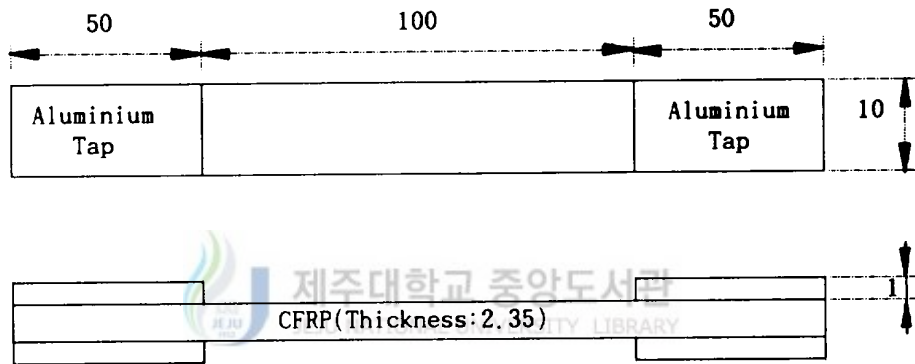


Fig. 4 Configuration of test specimen(unit:mm).

2. 실험방법

흡수시험은 수환경 침지후의 영향을 조사하기 위해, 80°C(±1°C)의 증류수에 2개월간 침지하고, 그 시간한도내의 범위내에서 일정시간 간격으로,

정밀천칭(영국, Oertling R-41)으로 중량을 측정하여 물의 흡수율을 조사·검토하였다. 이때의 흡수율은 다음식에 의해 계산되었다. (ASTM D570)

$$\text{흡수율(M\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (37)$$

W_1 : 나재시편의 중량

W_2 : 흡수후 시편의 중량

인장시험 및 피로시험은 흡수에 의한 기계적성질의 변화를 조사하기 위하여, 시험편을 2종류로 구분하여 실험하였다. 즉, 水환경에 침지하지 않은 공기중방치시험편(이하 : 나재시험편)과 水흡수 시험후의 시험편(이하 : 흡수시험편)을 사용하였다. 이들 시험편은 만능재료시험기(UTM : Instron, 용량 15 Ton)를 이용하여 실험하였으며, 인장속도는 5mm/min로 하였다. 시험편이 시험기에 물리는 부분은 시험기의 그립(Grip)으로부터 시험편을 보호하기 위하여 두께 1mm, 길이 50mm의 알루미늄탭을 에폭시계 접착제로 시험편의 양면에 접착하고, 인장시험은 하중제어 방식을 채택하였다. 또, 표점거리 50mm의 Strain gage extensometer를 시험편 중앙에 설치하여 시험편의 변형량을 측정, X-Y 레코더에 기록한 후, 인장강도와 변형율의 관계를 검토하였으며, 시험후 파단된 시험편은 주사형 전자현미경(SEM:일본전자 JSM-U3)을 이용한 파단면 관찰을 통하여, 그 파괴 기구를 종합적으로 검토 하였다. 피로시험은 응력반복속도 $f = 0.17(\text{Hz})$, 응력비 $R = 0.1$ 의 편진인장하중하에서 실시 하였으며, 응력제어식 피로하중(stress controlled fatigue loading)을 채택 하였다.


IV. 결과 및 고찰

1. 탄성특성

적층판의 기준축 방향의 공학적탄성정수를 계산하기 위한 기초 데이터로는 섬유축 방향의 종방향탄성정수(E_x), 횡방향탄성정수(E_y), 전단탄성정수(E_s) 및 프와송의 비(ν_x)가 필요하다. 이들 기초 데이터는 Table 2의 섬유와 수지 각각의 기계적 성질을 이용하여, 식(38)의 복합則(Tsai, 1980)에 의해 계산하였으며, 그 계산 결과를 Table 3에 나타내었다.

$$\left. \begin{aligned} E_x &= E_f V_f + E_m V_m & E_y &= E_f E_m / (E_f V_m + E_m V_f) \\ E_s &= G_f G_m / (G_f V_m + G_m V_f) & \nu_x &= \nu_f V_f + \nu_m V_m \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

여기서, G 는 전단탄성계수, 첨자 f, m 는 섬유 및 수지, V 는 체적함유율이다.


제주대학교 중앙도서관
 Table 3 Engineering constants of on-axis orientation
 by the rule of mixtures equation.

$V_f(\%)$	Name	$E_x(\text{GPa})$	$E_y(\text{GPa})$	$E_s(\text{GPa})$	ν_x
60.4	T-1/347	143.7	11.1	3.98	0.336
55.8	MM-1/982X	155.4	10.0	3.59	0.340
59.6	T-1/347	141.9	10.8	3.90	0.336
59.0	MM-1/982X	164.1	10.7	3.86	0.337

Table 3의 섬유축 방향의 공학적정수를 이용하여 이론해석을 통하여 구한 적층구성이 0°/90°, 45°, 0°인 대칭적층판의 기준축방향의 공학적정수 즉, 1축방향의 탄성정수(E_1), 2축 방향의 탄성정수(E_2), 1-2축에 대한 전단탄성정수(E_6) 및 1축방향의 프와송의 비(ν_1)와 1축방향의 탄성정수 실험치를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 Engineering constants of off-axis orientation.

Consturction	Name	E ₁ (GPa)		E ₂ (GPa)	E ₆ (GPa)	ν_1
		Calculated	Experiment			
0° / 90°	T-1/347	77.9	75	77.9	4.0	0.048
	MM-1/982X	83.2	90	83.2	3.6	0.041
±45°	T-1/347	14.2	16.7	14.2	36.7	0.824
	MM-1/982X	14.3	18	14.3	42.2	0.845
0°	T-1/347	143.7	131	11.0	4.0	0.336
	MM-1/982X	155.4	151	10.0	3.6	0.340

여기서, ±45° 와 0° 의 실험치는 駒井등(1988,1991)이 실험한 결과이다. Table 4에서 보면, 1축 방향의 공학적 탄성정수의 계산치와 실험치의 오차는 적층구성이 0°/90°와 0°인 경우 10%이내, 45°인 경우 25% 이내로 나타난다. 이정도의 오차는 실험데이터의 편차등을 고려하거나 실제 설계시에는 안전율을 3~4배 고려하여 설계치로 이용하는 것을 감안한다면, Table 4에 나타낸 적층판의 공학적 탄성정수의 계산치와 실험치 사이의 오차는 큰 수치가 아니라고 할 수 있다. 따라서 복합재료의 설계시 섬유와 수지의 기

계적 성질을 알면 복합직과 본 연구에서 제시한 탄성학적 해석에 의해 적층재의 기계적 성질을 추정할 수 있다.

2. 흡수특성

적층구성이 0°/90°인 시험편을 80°C의 증류수에 침적하여 가속흡수 시켰을 때 시간에 따른 흡수율의 변화를 Fig. 5에 나타내었다.

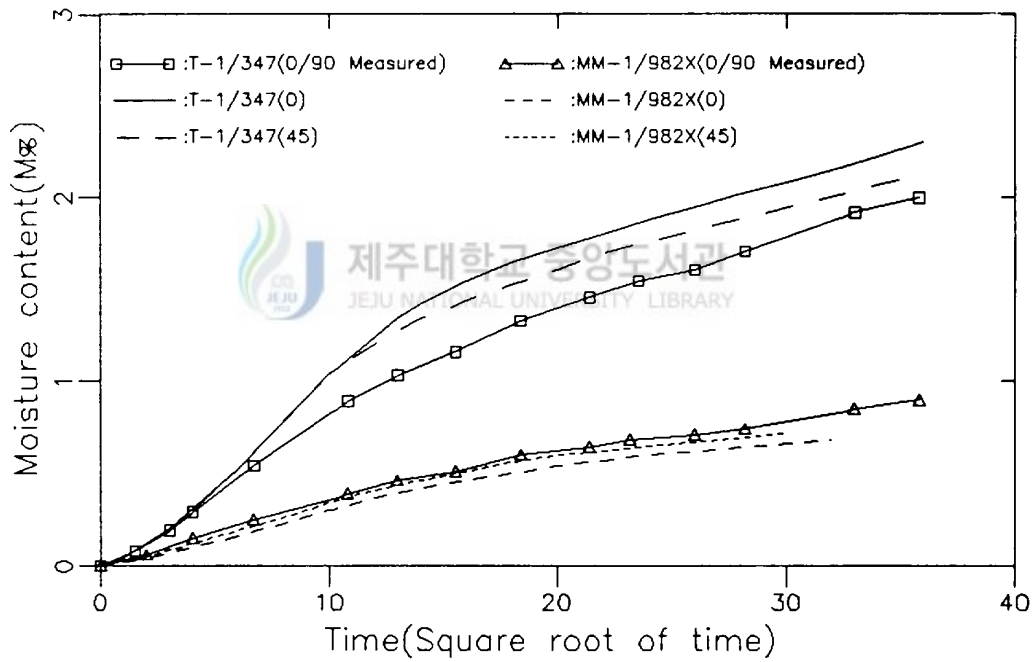


Fig. 5 Changes in moisture contents with times of T-1/347 and MM-1/982X.

Fig. 5에서 0°/90° 적층판의 각 데이터 점(□, △)은 5개 시험편의 평균치이며, 이 결과와 비교하기 위해서 80°C 이온교환수에 약2개월간 침적시킨 ±45° 斜交強化材와 0° 一方向強化材의 결과를 함께 나타낸다. (駒井, 1988, 1991) Fig.5에 나타낸 바와 같이 흡수율은 적층구성과 종류수, 이온교환수에 관계없이 중온경화형CFRP(T-1/347)이 고온경화형CFRP(MM-1/982X)보다 크다. MM-1/982X의 경우 적층구성과 종류수, 이온교환수에 관계없이 거의 같은 흡수율을 보여주고 있지만, T-1/347의 경우는 적층구성에 따라 차이를 보이고 있다. 또한 침지초기의 흡수속도는 빠르게 진행되고, 그 이후 점차 감소하지만 포화흡수율은 확인 할 수 없었다. 실험중 흡수율이 증가하면서 T-1/347과 MM-1/982X의 양표면에 층간박리에 의한 물질모양의 수포가 다수 관찰되었다. 이것은 복합재료의 특성상 하중의 지탱은 주로 섬유(fiber)에 의존하는데 반해, 흡수는 수지(matrix)에 의존 하기때문에, 흡수율의 증가로 인해 수지가 膨潤(swelling) 하는것을 섬유가 구속하므로써 섬유와 섬유사이, 섬유와 수지사이, 적층판사이의 층간박리 혹은 미소한 균열이 발생하기 때문이며 이로인해 흡수율이 계속적으로 증가 된것으로 판단된다.

한편, 임의 시간과 온도에서의 흡수특성을 예측하기 위해서는 Fick의 법칙을 이용 할 수 있으나, 이를 위해서는 포화흡수율이 문제가 된다. 駒井(1988, 1990)등의 보고에 의하면 T-1/347과 MM-1/982X(±45° 斜交強化材, 0° 一方向強化材)를 80°C 이온교환수에 침적시킨 결과, 흡수율은 침적후 약10개월이 경과하여도 포화흡수율에 도달하지 않고 흡수율이 계속 증가한다고 하였다. 따라서 본 연구에서는 시험편의 포화흡수율을 산정하기 위해, 실험중 흡수속도가 완만히 상승 할 때의 시점(시험편을 침적한 후 2개월 전후)을 포화흡수율로 가정하여 Fick의 법칙을 적용하였다.

흡수식(32,33) 및 Fig.5로부터 구한 T-1/347 과 MM-1/982X의 80℃ 와 100℃에서의 수분확산계수 D의 계산 결과는 다음과 같다.

T-1/347의 경우

$$\left. \begin{aligned} D_L &= 3.22 \times 10^{-6} & D_T &= 1.00 \times 10^{-6} \\ D &= 1.58 \times 10^{-6} \text{ (mm}^2/\text{s)} & & : 100^\circ\text{C} \\ D &= 4.53 \times 10^{-7} \text{ (mm}^2/\text{s)} & & : 80^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

MM-1/982X의 경우

$$\left. \begin{aligned} D_L &= 2.81 \times 10^{-6} & D_T &= 1.00 \times 10^{-6} \\ D &= 1.59 \times 10^{-6} \text{ (mm}^2/\text{s)} & & : 100^\circ\text{C} \\ D &= 4.66 \times 10^{-7} \text{ (mm}^2/\text{s)} & & : 80^\circ\text{C} \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

여기서, 기울기는 흡수실험곡선에서 흡수율이 선형으로 나타나는 15hour^{1/2}까지의 실험데이터를 최소자승법에 의해 계산하였다.

식(39), (40)을 이용하여 구한 80℃와 100℃에서의 이론흡수율과 80℃에서의 실험흡수율과의 관계를 Fig.6에 나타내었다.

Fig.6에 나타낸 바와 같이 T-1/347과 MM-1/982X의 80℃에서의 포화흡수율은 이론치와 실험치가 잘 일치하고 있음을 알 수 있으며, 100℃의 흡수율도 예측가능 함을 보이고 있다.

한편, 온도와 흡수율과의 관계를 산정하기 위해 80℃와 100℃의 수분확산계수를 식(35)에 대입하여 온도에 따른 확산계수를 구하면 (41), (42)식으로 되며,

$$\text{T-1/347 : } D = 6027 \exp(-8229/T) \quad (41)$$

$$\text{MM-1/982X : } D = 2836 \exp(-7952/T) \quad (42)$$

(41)과 (42)식에 의해, 본 시험편을 23℃의 증류수에 침적하였을 경우의

흡수율이 포화흡수율의 90%에 도달하는 시간은 T-1/347이 약 7.4년,
MM-1/982X가 약 6.2년이 소요된다.

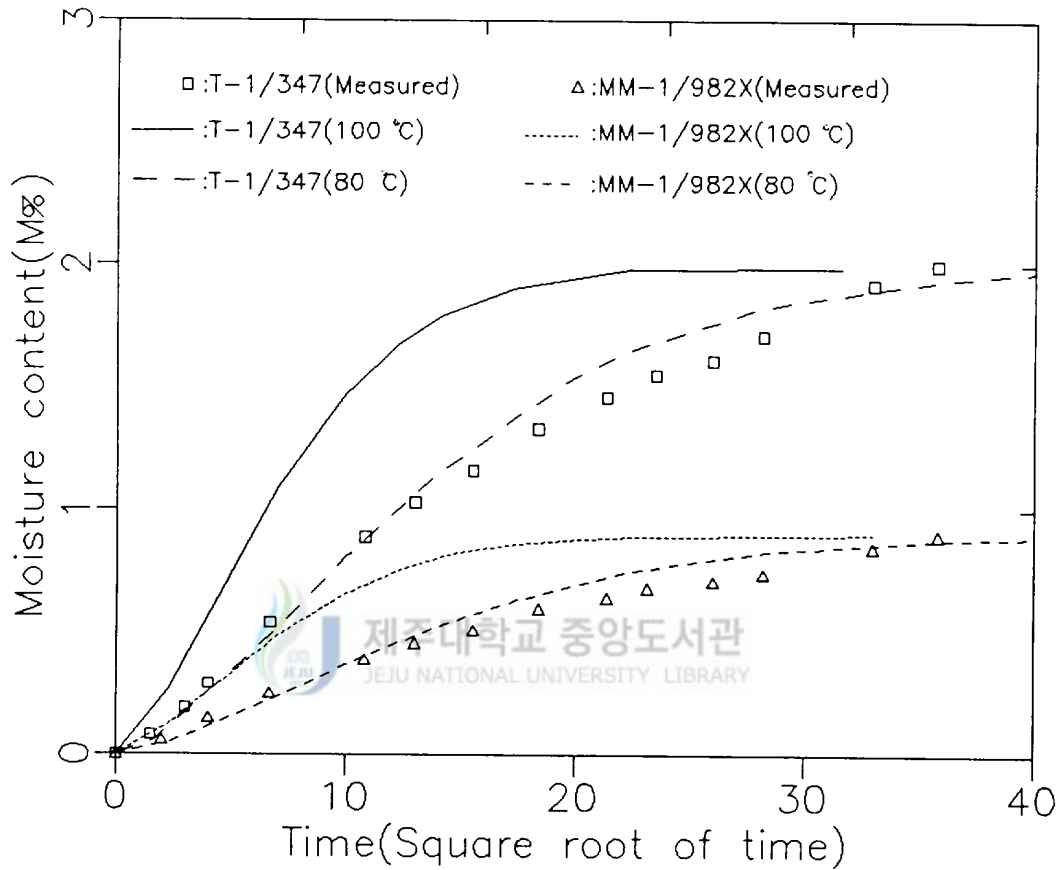


Fig. 6 Comparison of analytical and measured D values.

3. 인장특성

나재시험편 및 흡수시험편의 인장시험의 결과로 얻어진 대표적인 하중-변위곡선을 Fig. 7에, 시험편의 기계적성질을 Table 5.에 나타내었다.

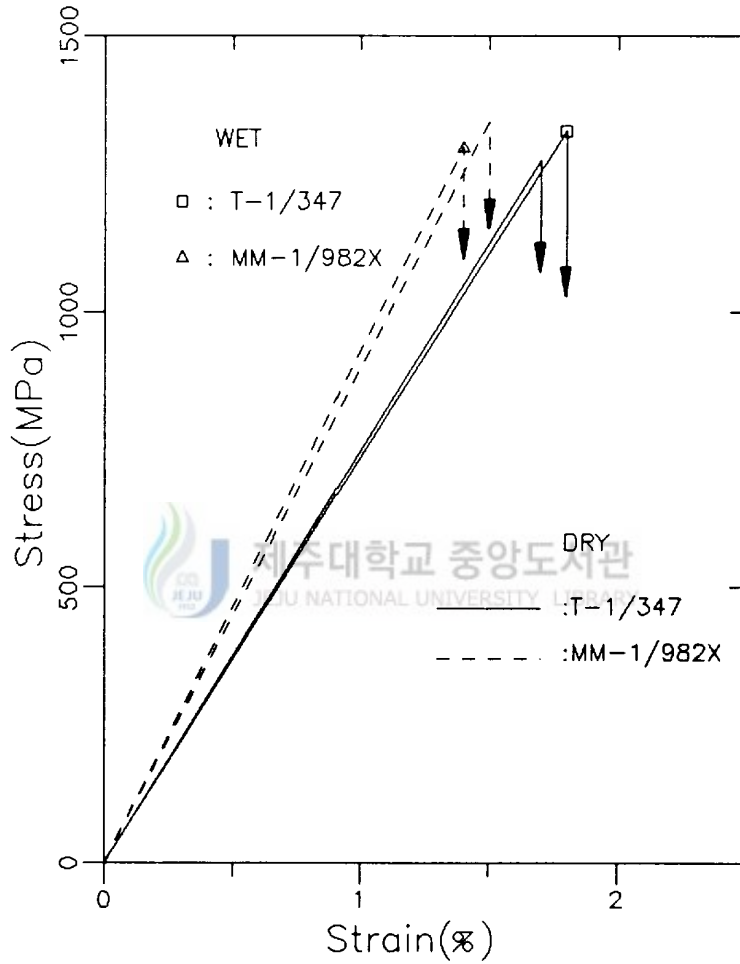


Fig. 7 Typical stress-strain curves for dry and wet specimens.

T-1/347과 MM-1/982X 시험편의 나재 및 흡수시험편의 인장시험결과는 Fig.7와 Table 5에 나타낸 것과 같이 나재시험편의 경우는 MM-1/982X가 T-1/347 보다 인장강도가 크고, 흡수시험편의 경우는 T-1/347이 MM-1/982X 보다 크다. 특히, T-1/347에서는 흡수시험편이 나재시험편 보다 4.2% 증가하고, MM-1/982X에서는 흡수시험편이 3.3% 감소하는 상이한 현상을 보인다.

Table 5 Material properties of wet and dry specimen.

	T-1/347		MM-1/982X	
	DRY	WET	DRY	WET
Tensile strength (MPa)	1274	1327	1343	1299
Modulus (GPa)	75	74	90	91
Elongation at break (%)	1.7	1.8	1.5	1.4

한편, 복합재료의 종류에 따라 나재시험편과 흡수시험편의 강도특성이 상이한 결과는 Komai등(1988, 1990)에 의해서도 보고된 바 있으나, 흡수율이 인장강도에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 흡수율을 달리하여 인장시험을 행한 후, 그 결과를 Fig.8에 나타내었다.

Fig. 8의 인장강도와 흡수율 관계에 나타낸 바와 같이 MM-1/982X의 경우 흡수율이 증가함에 따라 계속적으로 인장강도가 감소한다. 그러나 T-1/347의 경우 흡수율이 약 2.4%까지는 인장강도가 증가하고, 그 이상의 흡수율에서는 감소하였다.

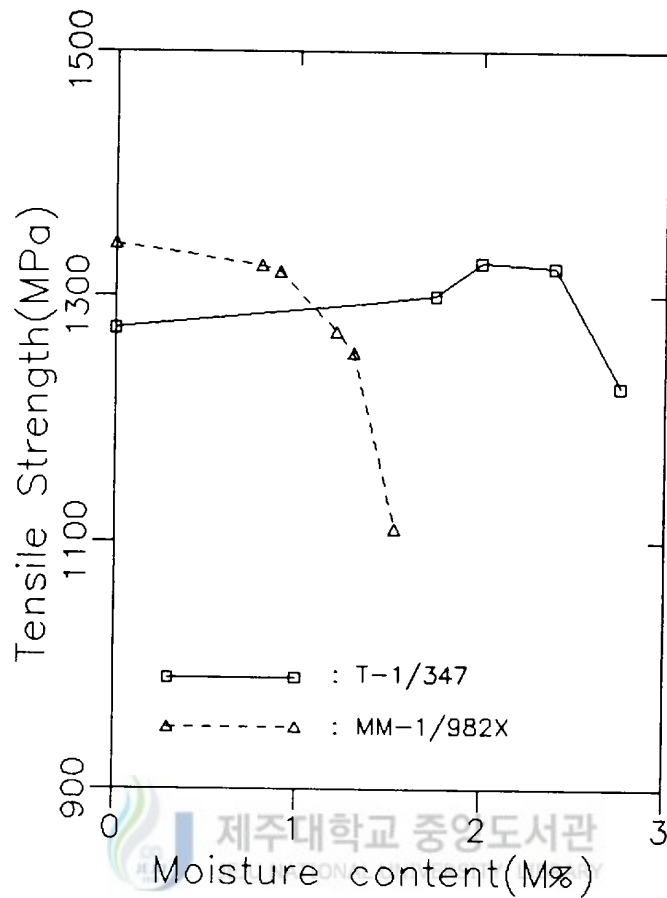


Fig. 8 Ultimate tensile strength of T-1/347 and MM-1/982X as a function of moisture content.

T-1/347의 인장강도가 초기에 증가하는 것은 흡수로 인해 수지가 연성화 되어서 잔류응력이나 결함에 의한 국소응력집중의 완화를 초래하여 파되는 것을 지연시키는 것으로 생각된다. 그리고 약 2.4% 이상의 흡수율에서 인장강도가 감소하는 것은 흡수율이 증가시 수지의 연성화의 증가보다 계면강도의 저하가 크게되어, 인장강도가 감소하는 것으로 생각된다. 한편, MM-1/982X

의 경우 T-1/347의 인장강도 특성과는 달리 흡수율의 증가에 따라 인장강도가 감소하는 것은, 후술하는 파면해석에 나타난 바와 같이 MM-1/982X와 결합한 수지(고온경화형)의 특성이 수분을 흡수시 T-1/347의 수지(중온경화형)와는 다른 특성 즉, 수지의 연성화가 잘 일어나지 않기 때문이라고 생각된다.

4. 피로특성

T-1/347 및 MM-1/982X의 나재시험편과 흡수시험편의 응력진폭과 하중반복수와의 관계(S-N선도)를 Fig.9에 나타내었다. Fig.9에서 T-1/347과 MM-1/982X의 피로강도는 흡수시험편이 나재시험편 보다 저하 하였다. 전술한 바와 같이 인장강도는 T-1/347의 경우 흡수시험편이 수지의 연성화로 인해 나재시험편 보다 크고, 수지의 연성화가 없는 MM-1/982X는 흡수시험편이 나재시험편 보다 작았지만, 피로강도는 흡수에 의한 연성화의 유무에 관계없이 수분을 흡수하면 피로강도가 저하 하였다. 이는 흡수에 의한 수지의 연성화 효과가 반복응력에 의해 무시 되었기 때문이라고 생각된다.

T-1/347과 MM-1/982X의 피로강도를 비교하여 보면, 흡수시험편과 나재시험편의 피로강도는 T-1/347이 MM-1/982X보다 크다. 본 실험재료의 동적 기계적 성질은 정적 기계적 성질과는 반대의 현상을 보였다.

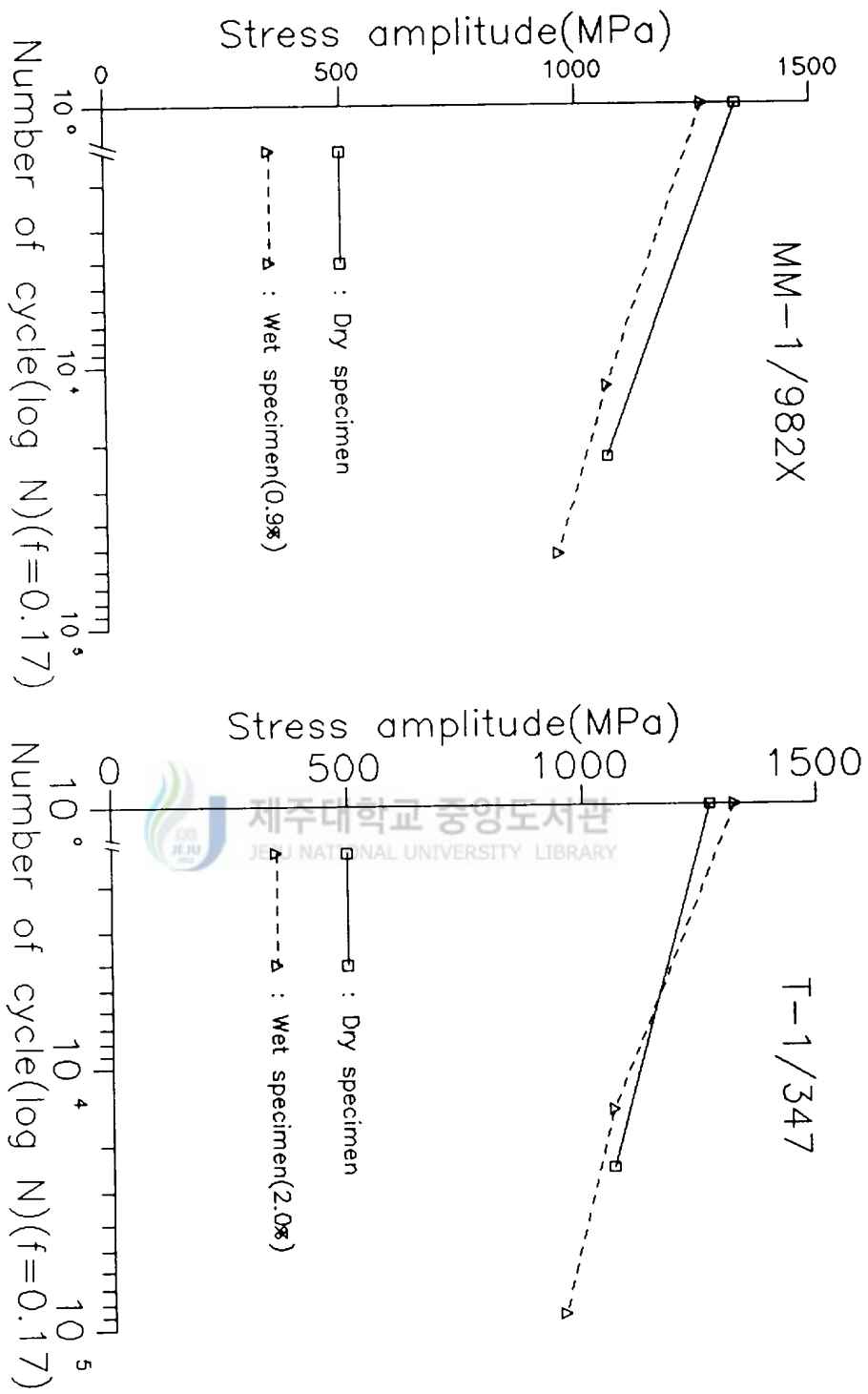


Fig. 9 S-N curves of T-1/347 and MM-1/982X

5. 파단특성

인장시험 결과 파단된 나재시험편과 흡수시험편의 전자현미경 사진을 Fig. 10, 11에 나타 내었다. Fig. 10, 11에서 T-1/347의 나재시험편은 섬유와 수지가 완전분리되어 파단 되었으나, 흡수시험편은 섬유주위에 수지가 붙어 있어서 흡수에 의한 수지의 연성화 현상이 있음을 관찰 할 수 있으며, 이 연성화 현상으로 잔류응력이나 결함에 의한 국소응력집중을 완화 시킴으로서 나재시험편 보다 인장강도가 증가한 것으로 판단 되었다.

MM-1/982X의 경우 나재시험편은 섬유주위에 수지가 남아 있으나 이들 수지는 여러조각으로 흩어져 있어 수지에 균열이 있었음을 알 수 있으며, 흡수시험편은 T-1/347에 나타난 수지의 연성화 현상이 관찰되지 않았다. 따라서, MM-1/982X의 흡수시험편은 흡수에 의한 잔류응력이나 결함에 의한 국소응력집중을 완화 시키지 못하기 때문에 나재시험편 보다 인장강도가 저하한 것으로 판단 되었다.

또한, Fig. 12 와 Fig. 13에는 인장시험과 피로시험 후의 파단된 나재시험편과 흡수시험편의 거시적 파단사진에 나타내었다. Fig. 12에서 나재시험편의 경우 파단형상이 비교적 단순한데 비해 흡수시험편의 파단형상은 매우 복잡하게 나타났다.

흡수시험편이 파단현상이 복잡한 것은 충전박리로 인한 물질모양의 수포, 백화현상 등으로 인한 계면박리에 의해 수지와 섬유간의 계면강도의 현저한 저하, 흡수로 인한 수지의 열화 때문으로 판단되며 또, 시편이 파단시 섬유의 탄성율이 높고 섬유와 수지가 강하게 접촉되어 있기 때문에, 하중이 증가함에 따라 수지에 다중균열이 생겨서 하중이 균일하게 분포되지 못하기

때문이라고 판단된다. 이러한 현상은 MM-1/982X가 T-1/347 보다 더 심하며, 이는 Fig.13에 보이는 피로시험의 사진에서도 볼 수 있다.

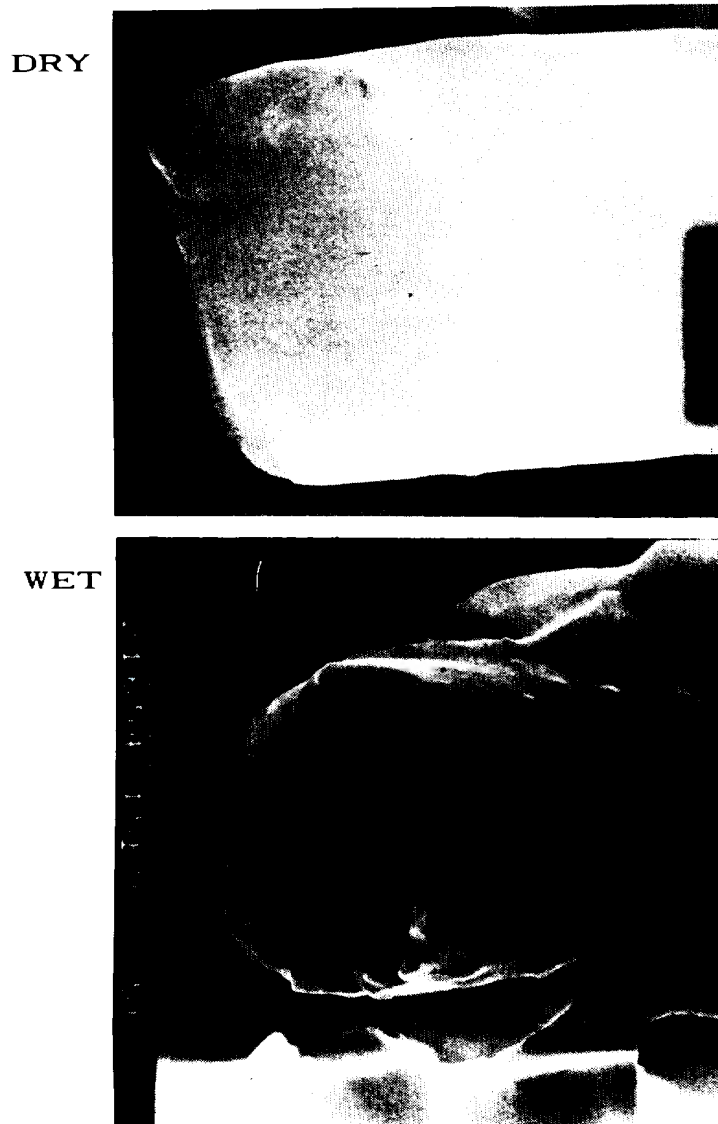


Fig. 10 Fractographs of tensile failure in wet and dry specimen(T-1/347).

DRY



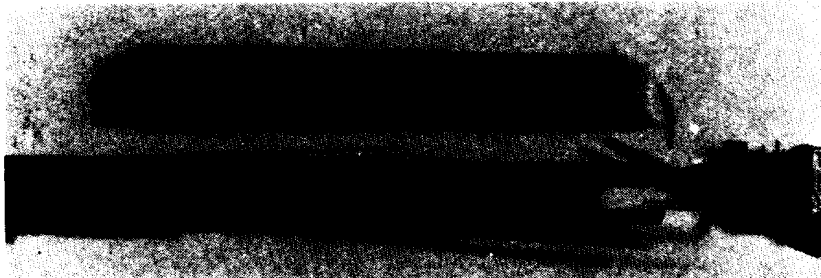
WET



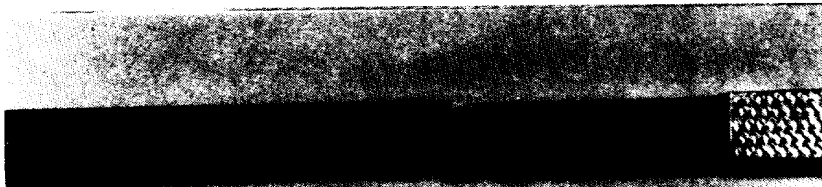
Fig. 11 Fractographs of tensile failure in wet and dry specimen(MM-1/982X).



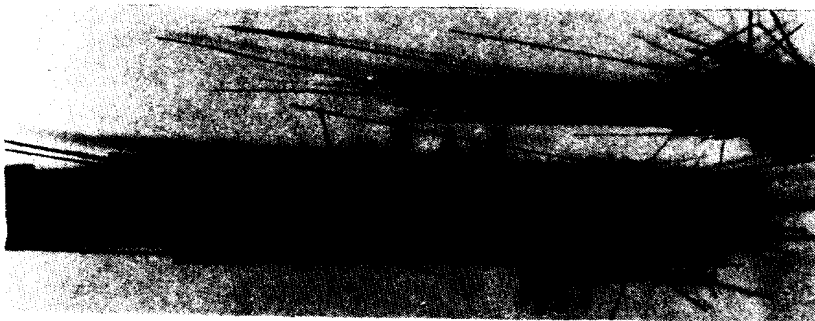
T-1/347 (DRY)



T-1/347 (WET)



MM-1/982X (DRY)

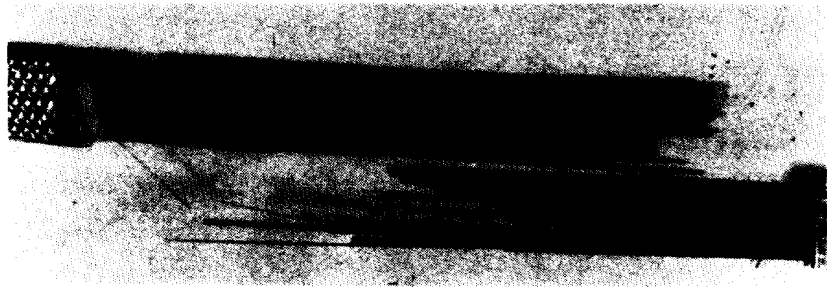


MM-1/982X (WET)

Fig. 12 Macro-fractographs of tensile failure
in wet and dry specimen.



T-1/347 (DRY)



T-1/347 (WET)



MM-1/982X (DRY)



MM-1/982X (WET)

Fig. 13 Macro-fractographs of fatigue failure
in wet and dry specimen

V. 결 론

복합재료를 이용한 기계 및 구조물의 설계시에 기본이되는 강도평가 방법을 확립하기 위해, 두종류의 탄소섬유강화형 복합재료의 탄성정수의 추정 방법과 수흡수관계 및 기계적성질에 미치는 수환경영향에 대해 이론해석과 실험을 통해 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) 이방성복합재료의 탄성정수의 해석적 방법과 적층파라메타를 이용하여 구한 공학적 탄성정수는 섬유배향각이 $[0^\circ]$, $[45^\circ]$, $[0^\circ/90^\circ]$ 인 대칭적층판의 경우 실험치와 거의 일치한다.
- (2) 80°C 증류수중에서 2개월간 침적시킨 직교적층 CFRP $[0^\circ/90^\circ]$ 의 흡수율은 T-1/347이 2.0%, MM-1/982X가 0.9%이고, 포화흡수율을 2.0% 및 0.9%로 가정하여 계산한 수분확산계수 D는 T-1/347이 $4.53 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$, MM-1/982X가 $4.66 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$ 이다.
- (3) 80°C 증류수에서 2개월간 침적시킨 $0^\circ/90^\circ$ 적층 CFRP T-1/347의 인장강도는 수지의 연성화에 의해 건조시험편 보다 크나, 흡수율이 약 2.4%이상이면 흡수에 의한 계면강도의 저하와 수지에 응력이 집중현상으로 인해 인장강도는 현저히 저하 하며, MM-1/982X의 인장강도는 흡수시험편이 흡수율의 분율에 관계없이 건조시험편 보다 저하한다.

(4) T-1/347과 MM-1/982X의 피로강도는 양쪽모두 흡수시험편이 수지의 연성화 효과보다 흡수에 의한 피로강도의 저하가 크기 때문에 나재시험편보다 감소한다. 또한, 양 재료의 피로강도는 정적인장강도 특성과는 달리 흡수율이 적은 MM-1/982X가 T-1/347 보다 크다.

IV. 参考文献

- Allred, R. E. and Roylance, D. k. 1983. Transverse moisture sensitivity of Aramid/Epoxy Composites. Journal of Materials Science, 18. 652-656.
- Atkinson, J. W., Wostenholm, G. H. and Yates, B. 1986. Hygrothermal characteristics of antenna materials. ESTEC, Noordwijk(Holland). ESA-SP-243. 17-24.
- Beckwith, S. W. and Wallace, B. D. 1983. Effects of Aging and Environmental conditions on Kevlar/Epoxy Composites. SAMPE Quarterly, 19. 38-45.
- 北條正樹, 田中啓介, C. G. Gustafson, 林龍一. 1988. 水中での CFRP積層板の層間はく離疲労き裂の傳ば挙動. 日本機械學會論文集(A), 54(499). 455-460.
- Calcote, L. R. 1969. The analysis of laminated composite structures. Van nostrand reinhold company. 1-22.
- Crank, J. 1975. The mathematics of diffusion. Oxford university press.
- Daniel, M., et al. 1988. Hydrothermal and strain rate effects on properties of Graphite/Epoxy composites. Journal of Engineering Materials and Technology, 110-April. 169-173.

- 大南正英外 2人. 1986. クリープ温度域における二軸応力下の低サイクル疲労
(寿命予測法と繰返し構成関係を視野に入れて). 材料, 35(390). 230-
240.
- Fukuda, S., Fujii, T. and K. Osaka. 1987. Stress rate dependence of
the tensile strength of Glass-Mat FRP under temperature envi-
ronments. JSME International Journal(Series I) , 53(490). 1204-
1029.
- 駒井 謙治郎, 箕島弘二. 1985. 高力Al合金の繰返しSCCき裂進に及ぼす 応力
波形・重量微小振動応力の影響. 日本機械學會論文集(A編), 51(462).
432-439.
- 駒井 謙治郎, 箕島弘二, 澁谷豊茂. 1990. 一方向強化炭素繊維/エポキシ樹脂
複合材料の引張破壊特性とAE波解析. 日本機械學會論文集(A), 528(56).
72-78.
- 駒井 謙治郎, 箕島弘二, 澁谷豊茂. 1990. 一方向強化炭素繊維/エポキシ樹脂
複合材料の及ぼす水環境効果. 日本機械學會論文集(A), 525(56).1-8.
- 駒井謙治郎, 箕島弘二, 澁谷豊茂. 1989. 二種類のアラミト/エポキシ複合材
料の引張り と 疲労特性に 及ぼす 水の影響. 日本材料學會, 36(411).
1395-1401.
- 駒井謙治郎, 箕島弘二, 澁谷豊茂. 1989. アラミト/エポキシ斜交積層複合材
料の引張り と 疲労強度に 及ぼす 水の影響. 日本材料學會, 38(434).
1329-1335.
- 駒井謙治郎, 箕島弘二, 澁谷豊茂, 野村勉. 1988. 炭素繊維斜交積層複合材料
の機械的性質と 疲労に及ぼす水環境効果. 日本機械學會論文集(A),
54(505). 1677-1682.

- 關根英樹, 下村慶一. 1987. 水環境下におけるガラス纖維分散強化有機複合材
料の強度低下と劣化機構. 日本機械學會論文集(A), 53(488). 684-
692.
- 황운봉, 황경섭. 1988. 複合材料 疲勞壽命 分布에 관한 考察. 大韓機械學會
論文集. 12(4). 790-805.
- Hull, D. 1982. An introduction to composite materials. Cambridge
university . 27.
- Jones, R. M. 1975. Mechanics of composite materials. Van nostrand
reinhold company. 31-84.
- 中易秀敏. 1990. 纖維強化複合材料積層板の確率材料設計法の研究(面内多軸
荷重を受ける 一方向積層板の確率破損包絡線). 日本機械學會論文集
(A), 56(528). 1087-1816.
- 中易秀敏, 前川 善一郎. 1989. 纖維強化複合材料積層板の信頼性材料設計法
の研究(一方向纖維強化積層板の信頼性評價モデルの定式化). 日本機
械學會論文集(A), 55(513). 1028-1035.
- 김동민, 홍창선. 1988. 층간수직응력을 고려한 두꺼운 복합적층판의 적층방
법. 大韓機械學會論文集, 12(5). 944-951.
- Kim, G. S., et al. 1987. Corrosion fatigue crack initiation behavior
of a 80Kg/mm² High-Tensile strength steel weldment in synthetic
sea water. proceedings of the thirtieth japan congress on mate-
rials reserch. 85-97.
- Kim, G. S., et al. 1988. Corrosion fatigue crack initiation of High-
Tensile strength steels in synthetic seawater. JSME International

- Journal(Series I), 31(3). 606-612.
- 김광수, 김상태. 1989. 非規則性 短纖維強化 SMC複合材料의 疲勞龜裂進展에 관한 研究. 大韓機械學會論文集, 13(1). 87-95.
- 金曠洙, 洪昌善. 1982. 복합적층판의 Delamination 解析. 大韓機械學會論文集, 6(2). 140-146.
- Kellas, S., et al. 1990. The effect of hygrothermal environments upon the tensile and compressive strengths of notched CFRP laminates, Part 1 : Static loading. Composites, 21(1). 41-51.
- Kellas, S., et al. 1990. The effect of hygrothermal environments upon the tensile and compressive strengths of notched CFRP laminates, Part 2 : Fatigue loading. Composites, 21(1). 52-62.
- 李康鏞. 1989. 피로파괴학의 기본개념. 大韓機械學會誌, 29(2). 106-117.
- 이강용, 백충현. 1989. 炭素纖維 複合材料의 AE特性에 관한 研究. 大韓機械學會論文集, 13(1). 105-1142.
- 立石哲也, 木河好司, 島村昭治. 1982. FRP의 衝擊壓縮特性에 關する 研究 (第1報, 水의 影響). 日本機械學會論文集(A), 48(428). 467-475.
- 임태원, 권영두, 황운봉, 한경섭. 1990. 일방향으로 배열된 단섬유보강 복합재료의 탄성률 예측. 大韓機械學會論文集, 14(2). 407-412.
- Moritoki, H., S. Nishimura and K. Kumagia. 1987. On the tensile test for anisotropic sheet materials. JSME International Journal (Series I), 53(491). 1252-1258.
- Neumann, S. and A. Marom. 1985. Prediction of moisture diffusion parameters in composite materials under stress. J. composite materials, 15(12). 1155-1165.

- rials, 26-June. 69-80.
- 尾田十八, 宮本博. 1975. 複合材料の機械的性質の推定法. 機械の研究, 27 (4). 553-538.
- O'Brien, T. K., et al. 1989. Tension fatigue analysis and life prediction for composite laminates. Int. J. fatigue, 6-November. 379-393.
- 平野一美, 古江治美. 1989. 短纖維強化熱可塑性プラスチックの疲労強度特性の評價. 日本機械學會論文集(A), 55(509). 17-21.
- Shen, C. H. and G. S. Springer. 1976. Moisture absorption and desorption of composite materials. J. composite materials, 10. 2-20.
- Shen, C. H. and G. S. Springer. 1976. Moisture absorption Graphite-Epoxy composites immersed in liquids and in humid air. J. composite materials, 13. 131-147.
- 송지호. 1990. 변동하중하의 피로파괴. 大韓機械學會誌, 30(2). 115-130.
- Shen, C. H. and G. S. Springer. 1977. Effect of moisture and temperature on the tensile strength of composite materials. J. composite materials, 11. 2-15.
- Shen, C. H. and G. S. Springer. 1977. Environmental effects on the moduli of composite materials. J. composite materials, 11. 250-263.
- 三木光範. 1982. 面内剛性を基準とする複合材料積層板の圖式設計. 日本機械學會論文集(A編), 48(435). 1407-1414.
- 松井 醇一, 野村 普, 石井 義明. 1986. 炭素纖維と その複合材料の力學的性

- 質の關係 —— 引張り特性. 日本複合材料學會誌, 12(3). 109-115.
- Springer, G. S. 1977. Moisture content of composites under transient conditions. J. composite materials, 11. 107-122.
- Suzuki, M., Nakanishi, H., Iwamoto, M., Jinen, E., Maekawa, Z., Mori, A., and F. Sun. 1987. Studies on fracture mechanisms of CFRP by acoustic emission method. JSME International Journal (Series I) 53(492). 1459-1466.
- Tsai, S. W. and H. T. Hahn. 1980. Introduction to composite materials. Technomic.
- 尹成治, 洪昌善. 1986. 炭素纖維 強化 複合材料의 혼합모우드 層間破壞靱性 値에대한 研究. 大韓機械學會論文集, 10(2). 198-207.
- Verbruggen, M. 1985. Moisture Absorption of ARALL. Report LR-474, Department of Aerospace Engineering, Technical University Delft(Holland).
- Verpost, I. and G. S. Sprenger. 1988. Moisture absorption characteristics of Aramid-Epoxy composite. Journal of reinforced plastics and composites, 7-January. 1-22.

謝 辭

本 論文이 完成되기까지 誠心으로 指導를 하여 주신 金萬守 指導教授님과 金貴植 教授님께 감사를 드리며, 本 論文을 校閱하여 주신 權麒麟 教授님 그리고 항상 關心을 갖고 助言과 激勵을 아끼지 않으신 許鐘哲 教授님과 玄明澤 教授님께도 감사를 드립니다.

또한, 바쁘신 中에도 많은 도움과 激勵을 주신 助教 張宰赫 先輩님과 大 學院 同期生 여러분께도 감사를 드리며, 本 研究를 수행하는데 많은 配慮를 하여주신 濟州地方工業 技術院 院長님과 職員여러분께도 감사의 뜻을 포함합니다.

끝으로 오늘이 있기까지 精誠을 다하여 뒷바라지를 하여주신 父母님과 학 문에만 專念할 수 있도록 物心兩面으로 도와주신 누님과 형님들께 이 작은 結實을 드립니다.



제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY