

## 피로하중을 받는 유리섬유 보강 플라스틱관의 안전성에 관한 연구

### An Experimental Study on the Safety of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes under Fatigue Load

채 원 규\*

Won-Kyu Chai

(1996년 4월 12일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

#### ABSTRACT

In this thesis, a series of loading tests are conducted in order to investigate the fracture safety of GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics) pipes under fatigue load which are widely used in the developed countries because of their natural of anticorrosion and lightweight etc..

Fatigue test is performed by changing number of laminates and loading cycles to examine the flexural strains, the ductility and the fatigue strength for two million repeated loading cycles. From the fatigue test results, it was found that the larger the laminates of GFRP pipes is, the larger the stiffness of GFRP pipes under the fatigue load increases. This phenomenon is true until the fatigue failure.

According to the S-N curve drawn by the regression analysis on the fatigue test results, the fatigue strength of percent of the static ultimate strength increases by increasing the laminates of GFRP pipes. The fatigue strength with two million repeated loading cycles in GFRP pipes with the laminates of GFRP pipes varing 15, 25, 35 shows about 75%, 80%, 84% on the static ultimate strength, respectively.

#### 1. 서 론

유리섬유 보강 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic; GFRP)은 내열, 내수, 내약품성이 풍부한 열경화성 수지에 기계적 성질이 우수한 유리섬유를 보강재로 한 복합재료로서 종래의 합성수지

제품보다 뛰어난 구조재료이다. 이는 GFRP의 매트릭스인 플라스틱이 대부분의 다른 구조재료보다 중량에 대한 강도비가 높으며, 부식에 대한 저항력이 우수할 뿐만 아니라<sup>1,2)</sup>, GFRP속에 내재된 유리섬유의 인장강도가 높기 때문이다<sup>3~6)</sup>.

이러한 유리섬유의 뛰어난 인장강도를 최대한

\* 신구전문대학 토목과

이용하여 고도의 물리적인 성질을 얻을 목적으로 개발된 GFRP 성형법 중의 하나가 FW성형법 (filament winding process)이며, 이는 미국에서 30년 전부터 관, 전기공업재료 등에서 광범위하게 이용되고 있다. FW성형법에 의한 성형은 내식성을 좌우하는 수지와 유리섬유의 함유량을 높여 그 효과를 최대한 발휘하도록 하여 초내식성 관 등을 제작하는데 이용되며, FW성형법으로 제작된 GFRP는 내식성과 보온, 보냉성이 우수하며, 열팽창계수가 작고 단열성이 우수한 특징을 가지고 있다. 특히 FW성형법으로 제작된 GFRP관은 내식성이 우수한 수지를 사용하여 제작되므로 높은 내식성과 내후성을 가지고 있으며, 높은 강도를 보유하고 있어서 안전성이 우수하다. 현재 온천용, 폐수처리용, 석유공업용, 배기 duct용, 식품공업용 등으로 사용되고 있는 GFRP관은 앞으로 대형상, 하수도 관로공사에서 기존 콘크리트관이나 강관의 대체용품으로 사용될 가능성이 높지만, 아직까지 피로하중에 대한 안전성이 명확하게 밝혀져 있지 않은 실정이다<sup>7,8)</sup>.

따라서 본 연구에서는 이에 기초하여 피로하중을 받는 GFRP관의 안전성을 검토하기 위하여, 유리섬유의 적층수를 변수로 한 일련의 GFRP관 시험체들에 대하여 피로실험을 수행하였다. 피로실험시 최대 반복하중 값을 정적 극한하중의 75~95%로 재하하여 각 시험체들의 피로파괴시의 하중 반복회수를 조사하였으며, 이를 결과를 토대로 하중 반복회수 200만회에 대한 GFRP관의 피로강도를 유리섬유의 적층수에 따라 비교, 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 사용재료 및 시험체

본 실험에서는 GFRP관 시험체의 제작시, 폭 1.02mm, 두께 0.24mm의 유리섬유 다발과 아세톤 20%가 함유된 에폭시를 사용하였다. 실험에 사용된 유리섬유의 재료적 성질과 구성 성분의 중량비는 각각 Table 1, Table 2와 같다.

또한 GFRP관 시험체는 직경 300mm, 길이 1200mm로 제작하였으며, 유리섬유의 적층수를 15층, 25층, 35층인 3종류로 분류하였다. GFRP관 시험체에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

Table 1 Material properties of glass fiber

wide [mm]	thickness [mm]	density [kg/m <sup>3</sup> ]	thermal modulus [°C]	tensile strength [GPa]	tensile modulus [GPa]	poisson ratio
1.20	0.24	2627.0	1.6×10 <sup>-6</sup>	1.4~2.0	72.4	0.22

Table 2 Composition of glass fiber

Silica	Calcium Oxide	Alumina	Boron Oxide
53.5~55.5%	21.0~24.0%	14.0%	5.0~8.0%
Alkaline Oxide	Minor Oxides	Calcium Fluoride	Magnesium Oxides
0.5~1.5%	1.0%	0.0~0.8%	0.0~0.8%

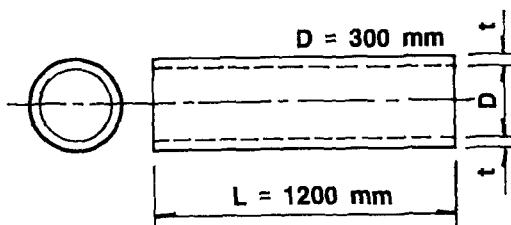


Fig. 1 GFRP pipe specimen

### 2.2 실험방법 및 측정

복합재료의 피로에 대해서는 많은 연구가 진행되고 있지만, 피로에 영향을 미치는 인자가 많고, 더욱이 상호간에 서로 연관성이 있기 때문에, 현재로서는 충분한 자료가 축적되어 있지 않고, 또한 이론적인 체계화도 미흡한 실정이다. 따라서 재료의 피로강도를 평가하는데 가장 많이 이용되고 있는 것은 S-N(응력-하중 반복회수) 선도이며, 이는 어떤 주어진 응력 하에서 반복하중을 주었을 때, 구조체가 어떤 반복하중 수에서 파괴되는지를 나타내는 것이다<sup>9~11)</sup>.

본 연구에서는 GFRP관의 피로강도 및 피로거동을 알아보기 위하여 피로실험을 수행하였다. 피로실험시 최소 반복하중 값을 정적 파괴강도의 50%로 일정하게 하였으며, 적절한 S-N 선도를 작성하기 위하여 최대 반복하중 값을 시험체 별로 다르게 하였다. 또한 하중 재하시 반복회수 10회까지는 정적으로 재하하였으며, 그 이후 반복하중의 최대값과 최소값을 일정하게 유지하면서 3Hz의 속도로 재하하였다. 피로실험은 반복하중 200만회까지 수행하였으며, 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지의 하중변화에 대한 중앙점 하부의 휨변형률 등을 측정하였다. 피로실험의 개략도는 Fig. 2와 같다.

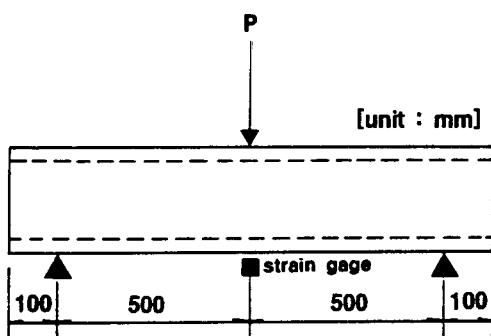


Fig. 2 The general view of fatigue test

### 3. 결과분석 및 고찰

피로실험 이전에 수행된 파괴실험 결과 중 GFRP관의 정적 극한하중은 Fig. 3에 나타나 있듯이 유리섬유 적층수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다<sup>12)</sup>. 본 피로실험에서는 이들 파괴실험 결과를 기초로 하여 최대 반복하중 값의 변화에 따른 파로파괴시 반복회수를 측정하였으며, 이들 결과를 유리섬유 적층수에 따라 비교, 고찰하였다. 피로실험 결과는 Table 3과 같다.

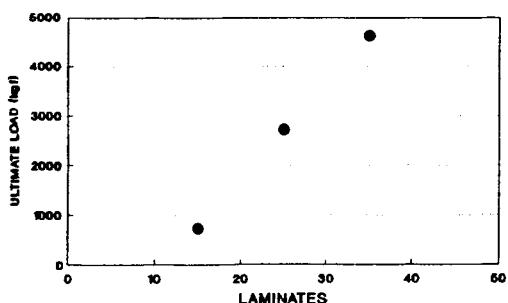


Fig. 3 The relationships between ultimate load and laminates of GFRP pipes

피로실험시 주기적으로 최소하중에서 최대하중 까지 휨 변형률의 변화를 측정하였으며, 이들 결과를 Fig. 4~Fig. 6에 나타내었다. 이들 그림에서 하중 반복회수가 증가함에 따라 휨 변형률이 증가함을 알 수 있었고, 강구조물에서 흔히 나타나는 반복회수 증가에 따른 응력-변형률 선도 구배의 감소현상을 볼 수 있었다.

Fig. 4~Fig. 6에서 정적하중 재하시(하중 반복회수 1회 재하시) 유리섬유 적층수가 15, 25, 35층 일때 휨 변형률은 각각  $1.02 \times 10^{-3}$ ,  $3.15 \times 10^{-4}$ ,

Table 3 Fatigue test results

specimen number	laminates	$P_s$ [kg·f]	$P_{f,max}$ [kg·f]	$P_{f,max}/P_s$ [%]	$N_u$ [cycles]
A1	15	775.0	697.5	90.0	1320
A2			658.8	85.0	17170
A3			620.0	80.0	423340
A4			600.6	77.5	768270
A5			581.3	75.0	1196820
B1	25	2750.0	2612.5	95.0	20290
B2			2543.8	92.5	34140
B3			2475.0	90.0	70120
B4			2337.5	85.0	663120
B5			2200.0	80.0	1182760
C1	35	4637.5	4405.6	95.0	52520
C2			4266.5	92.5	76120
C3			4173.8	90.0	90470
C4			4050.8	87.5	635760
C5			3941.9	85.0	1486820

[Note]  $P_s$  : Static ultimate strength,  
 $P_{f,max}$  : Maximum fatigue strength,  
 $N_u$  : Repeated loading cycles when fatigue fracture is occurred.

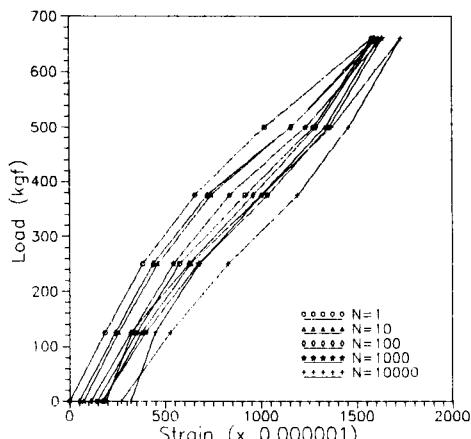


Fig. 4 The relationships between the repeated loading cycles and the flexural strain (laminates=15)

$7.10 \times 10^{-5}$ 으로 유리섬유의 적층수가 많은 시험체 일수록 낮은 변형률을 나타내고 있었으며, 반복하중 재하시 파괴직전의 휨 변형률은 유리섬유의 적층수가 15, 25, 35층 일때 각각  $1.37 \times 10^{-3}$ ,  $9.40 \times 10^{-4}$ ,  $3.80 \times 10^{-4}$ 으로 정적하중 재하시에 비하여 각각 약 1.3배, 3.0배, 5.4배로 증가하였다. 이러한 결과에서 GFRP관의 휨 변형률은 유리섬유 적층수가 클수록 반복하중 재하시 초기의 변형은 작았으나, 피로파괴시까지 꾸준히 증가함을 알 수

있었다.

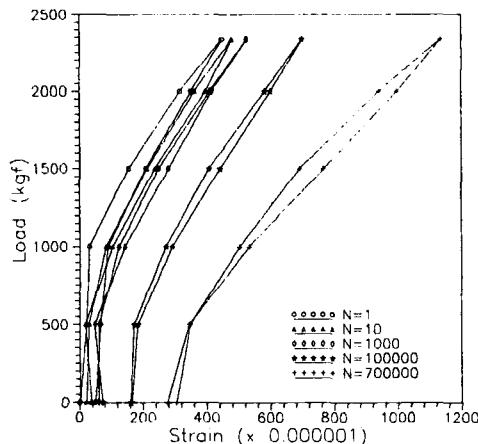


Fig. 5 The relationships between the repeated loading cycles and the flexural strain (laminates=25)

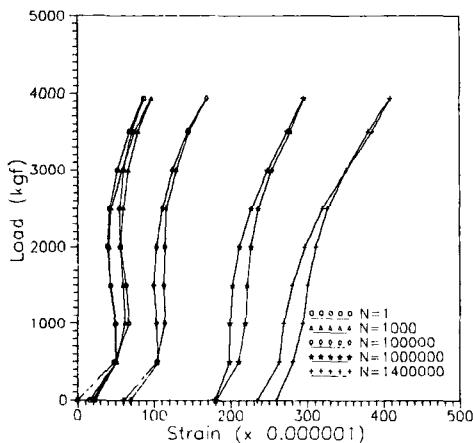


Fig. 6 The relationships between the repeated loading cycles and the flexural strain (laminates=35)

한편, Fig. 4~Fig. 6의 하중-변형률 선도에서 반복회수에 대한 잔류변형률을 유리섬유 적층수 별로 구할 수 있었으며, 이들 결과를 Table 4에 나타내었다.

Table 4에서 파괴적전의 잔류변형률은 유리섬유의 적층수가 15, 25, 35층일 때 각각  $3.20 \times 10^{-4}$ ,  $3.04 \times 10^{-4}$ ,  $2.59 \times 10^{-4}$ 으로 유리섬유의 적층수가 클수록 반복하중을 받는 GFRP관의 잔류변형률이 낮아짐을 알 수 있었다. 마찬가지로 반복회수가 증가함에 따라 잔류변형률의 증가폭도 유리섬유의 적층수가 클수록 작게 나타났다. 이러한 결과에서

Table 4 The relationships between the number of repeated loading cycles and the residual strain

repeated loading cycles	residual strain [ $\times 10^{-4}$ ]		
	laminates 15	laminates 25	laminates 35
1	0	0	0
10	-73	-21	-18
100	-50	-25	-26
1000	-189	-59	-20
10000	-320	-84	-49
50000	-	-162	-80
100000	-	-159	-60
200000	-	-308	-106
300000	-	-245	-107
400000	-	-280	-84
500000	-	-190	-46
600000	-	-230	-213
700000	-	-304	-128
800000	-	-	-148
1000000	-	-	-180
1100000	-	-	-204
1200000	-	-	-215
1300000	-	-	-241
1400000	-	-	-259

GFRP관이 유리섬유의 적층수가 클수록 피로하중 하의 GFRP관의 안전성을 유지하는데 효과적임을 알 수 있었다.

일반적인 피로실험 결과는 S-N 선도로 표시되는데, 이 S-N 선도가 평행한 점근선을 가지게 되면, 이에 대응하는 응력값을 피로한도라고 한다. 대부분의 금속들은 이와 같은 피로한도를 가지고 있지만 GFRP는 금속과는 달리 피로한도가 명확하게 나타나지 않기 때문에 미리 정한 반복회수(200만회)에 대한 피로강도를 사용하고 있다.

본 연구에서는 Table 3의 피로실험 결과에서 피로수명과 피로강도와의 관계식을 다음과 같은 지수형태의 함수로 나타내었다.

$$R = K \cdot e^{(-C \cdot \log N)}$$

여기서, R은 피로강도, N은 피로수명, K와 C는 실험상수이다.

상기 식의 양변에 대수를 취하여 정리하면 다음과 같다.

$$\log R = \log K - C \cdot \log e \cdot \log N$$

그러므로,  $\log R = Y$ ,  $\log K = \alpha$ ,  $C \cdot \log e = \beta$ 로 놓으면 상기 식은 다음과 같은 식으로 치환될 수 있다.

$$Y = \alpha - \beta \cdot \log N$$

본 연구에서는 정적 극한하중에 대한 피로하중 백분률을 피로수명과 비교하여 분석하였으며, Fig. 7~Fig. 9에 이들의 관계를 나타내었다.

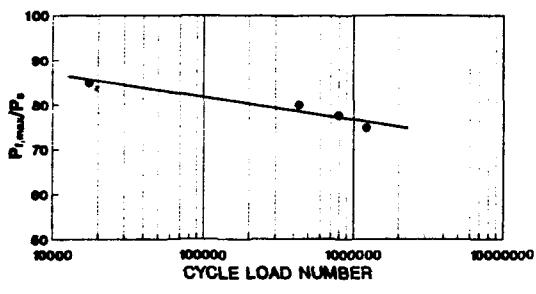


Fig. 7 The S-N curve of GFRP pipe (laminates=15)

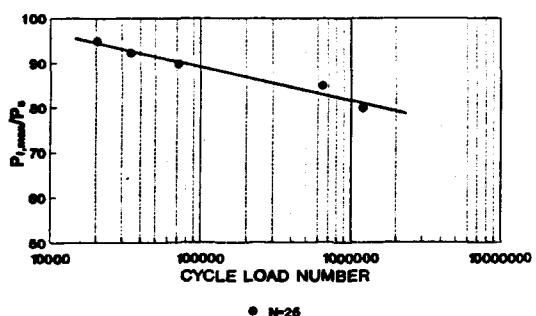


Fig. 8 The S-N curve of GFRP pipe (laminates=25)

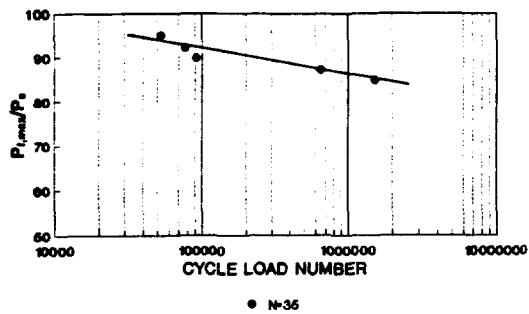


Fig. 9 The S-N curve of GFRP pipe (laminates=35)

아울러 회귀분석에 의해 피로강도와 피로수명의 관계를 다음과 같은 직선식으로 나타낼 수 있다.

- 1) 유리섬유의 적층수가 15일때

$$Y = 106.2 - 4.9 \cdot \log N$$

- 2) 유리섬유의 적층수가 25일때

$$Y = 127.1 - 7.6 \cdot \log N$$

- 3) 유리섬유의 적층수가 35일때

$$Y = 120.9 - 5.8 \cdot \log N$$

상기 직선식으로부터 계산된 반복회수 200만회의 GFRP관의 정적 극한하중 백분률에 대한 GFRP관의 피로강도는 유리섬유의 적층수가 15층, 25층, 35층 일 때 각각 약 75%, 80%, 84%로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 실험한 피로하중을 받는 일련의 GFRP관 시험체에 대한 안전성은 다음과 같다. 반복회수에 대한 하중-변형률 선도로부터 구한 잔류변형률의 비교 결과에서 피로하중하의 GFRP관의 안전성은 유리섬유의 적층수가 클수록 크게 나타났으며, 이러한 현상은 피로파괴 직전까지 나타났다. 이러한 결과에서 GFRP관이 유리섬유의 적층수가 클수록 피로하중하의 GFRP관의 안전성을 유지하는데 효과적임을 알 수 있었다.

아울러 본 피로실험 결과를 회귀분석하여 구한 S-N선도에 의하면 정적 극한강도 백분률에 대한 GFRP관의 피로강도는 GFRP관의 유리섬유 적층수가 증가할수록 증가하였으며, 유리섬유의 적층수가 15, 25, 35층인 GFRP관의 반복회수 200만회에 대한 피로강도는 정적 극한강도에 각각 약 75%, 80%, 84%임을 알 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) N. R. Adist, "Compression testing of graphite/epoxy, in compression testing of homogenous materials and composites," STP 808, American Society for Testing and Materials, pp. 175~186, 1983.
- 2) 植村益次, 山田直樹, "炭素纖維強化プラスチック材의 弾性係數", 材料學會誌, No. 24, p. 156, 1975.
- 3) 植村益次, "FRP의 力學的 特性 試驗法의 問題點과 設計基準(I)", 日本複合材料學會誌, No. 7, p. 32, 1981.
- 4) J. E. Ashton and T. S. Lave, "Shear stability of laminated anisotropic plates, in composite materials : testing and design," STP 460, American Society for Testing and Materials, pp. 352~361, 1969.

- 5) L. L. Clements, and T. T. Chiao, "Engineering design data for an organic fiber/epoxy composites," Composites, Vol. 8, No. 2, pp. 87~92, 1977.
- 6) N.R. Adist and J.P. Waszczak, "Effect of near visual damage on the properties of graphite/epoxy, in fracture mechanics of composites," STP 674, American Society for Testing and Meterials, pp. 163~176, 1979.
- 7) P. Shyprykevich and W. Wolter, "Effects of extreme aircraft storage and flight environments on graphite/epoxy, in composites for extreme environments," STP 768, American Society for Testing and Meterials, pp. 118~124, 1981.
- 8) C.E. Browning, F.L. Abrams, and J.M. Whitney, "A four-point shear test for graphite/epoxy composites, in composites materials : quality assurance and processing," STP 797, American Society for Testing and Meterials, pp. 54~74, 1983.
- 9) FRP入門, (社)強化プラスチック技術協會, p. 27, 1976.
- 10) C. Zweben, W.S. Smith, and M.W. Wardle, "Test methods for fiber tensile strength, composite flexure modulus, and properties of fabric-reinforced laminates, in composites materials : testing and design", STP 674, American Society for Testing and Meterials, pp. 228~262, 1979.
- 11) U. Meier, "Future use of advanced composites in bridge construction engineering", Fibre Reinforced Composites 1986(Proc. 2nd Int. Conf. on Fibre Reinforced Composites 1986, Liverpool), p. 217, 1986.
- 12) 채원규, "유리섬유 보강 플라스틱관의 파괴 안전성에 관한 연구," 한국산업안전학회, 제9권, 제1호, pp. 121~126, 1994.