

## 유리섬유 보강 플라스틱관의 휨 피로 거동에 관한 실험적 연구

장동일 · 고재원

한양대학교 공과대학 토목공학과

### An Experimental Study on the Flexural Fatigue Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes

Dong-Il CHANG, Jae-Won KOH

Department of Civil Engineering, Hanyang University

**초 록** 반복회수에 대한 하중-변형률 선도로부터 구한 잔류변형률의 비교 결과에서 피로하중하의 GFRP관의 강성은 GFRP관의 유리섬유의 적층수가 클수록 크게 나타났으며, 이러한 현상은 피로 파괴 직전까지 나타났다. 아울러 본 피로실험 결과를 회귀분석하여 구한 S-N선도에 의하면 정적극한강도 백분율에 대한 피로강도는 GFRP관의 유리섬유 적층수가 증가할수록 증가하였으며, 유리섬유의 적층수가 15, 25, 35층인 GFRP관의 반복회수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도는 각각 약 75.2%, 79.5%, 84.2%로 나타났다.

**Abstract** In the comparison result of residual strain calculated from the load-strain curve under the repeated loading cycles, it was found that the larger the laminates is, the larger the stiffness of GFRP pipes under fatigue load is. This phenomenon is true until the fatigue failure. According to the S-N curves drawn by the regression analysis on the fatigue test results, the fatigue strength for percentage of the static ultimate strength increases by increasing the laminates of GFRP pipes. The fatigue strength for 2,000,000 repeated loading cycles in GFRP pipes with the laminates varying 15, 25, 35 shows 75.2%, 79.5%, 84.2% on the static ultimate strength, respectively.

## 1. 서 론

유리섬유 보강 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastic ; GFRP)은 내열, 내수, 내약품성이 우수한 열경화성 수지에 기계적 성질이 우수한 유리섬유를 보강재료로 한 복합재료로서 종래의 합성수지 제품보다 뛰어난 구조재료이다. 이는 GFRP의 매트릭스인 플라스틱이 대부분의 다른 구조재료보다 중량에 대한 강도비가 높으며, 부식에 대한 저항력이 우수할뿐만 아니라,<sup>1,2)</sup> GFRP속에 내재된 유리섬유의 인장강도가 높기 때문이다.<sup>3~5)</sup> GFRP의 용도로서는 종래의 육조, 불탱크, 정화조 등 주택기재 및 평판 등 건축재료로 사용되고 있지만 근래에는 내식성, 내약품성, 기계적 강도 등이 우수하여 화학산업, 건설기기,

조선 등에 광범위하게 이용되고 있으며, 앞으로 상, 하수도 등 대형관로공사에 기존 콘크리트관이나 강관의 대체용품으로 사용될 전망이다.

특히 GFRP관은 내식성이 우수한 수지를 사용하여 제작하므로 내식성과 내후성이 우수하며, 강도가 높아 안전성이 뛰어나다. 현재 온천용, 폐수처리용, 석유공업용, 배기 duct용, 식품공업용 등으로 사용되고 있는 GFRP관은 앞으로 대형 상 하수도 관으로 사용될 가능성이 높지만, 아직까지 유리섬유의 적층수에 대한 피로특성이 명확하게 밝혀져 있지 않다.

그러므로 본 연구에서는 이에 기초하여 유리섬유의 적층수를 변수로 한 GFRP관 시험체들에 대하여 피로실험을 수행하였다. 실험시 최대 반복하중값을 정적 극한하중의 75~

95%로 계획하여, 각 시험체들의 피로파괴시의 하중 반복회수를 조사하였으며, 이들 결과를 토대로 하중 반복회수 200만회에 대한 GFRP관의 피로강도를 유리섬유의 적층수에 따라 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 사용재료 및 시험체

본 실험에서 사용된 GFRP관은 폭 1.02mm, 두께 0.24mm의 유리섬유 다발과 아세

톤 20%가 함유된 에폭시를 사용하였으며, 유리섬유의 배향각도를 45°로 하여 FW성형법(Filament Winding Process)으로 제작하였다. FW성형법은 유리섬유의 뛰어난 인장강도를 최대한 이용하여 고도의 물리적인 성질을 얻을 목적으로 개발된 성형법의 일종으로 미국에서는 30년전부터 탱크파이프 시스템, 전기공업재료 등으로 광범위하게 이용되고 있다. 실험에 사용된 유리섬유의 성질과 구성 성분의 중량비는 각각 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1. Material properties of glass fiber.

wide (mm)	thickness (mm)	density (kg/m <sup>3</sup> )	thermal expansion modulus (/°C)	tensile strength (GPa)	tensile modulus (GPa)	poisson's ratio
1.20	0.24	2627	$1.6 \times 10^{-6}$	1.4~2.0	72.4	0.22

Table 2. Composition of glass fiber.

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

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

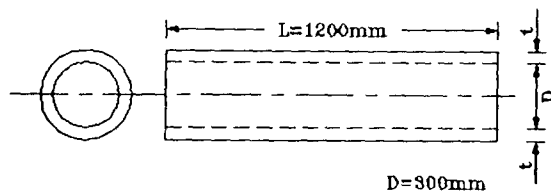


Fig. 1. GFRP pipe specimen

### 2.2 실험방법 및 측정

피로실험의 재하는 25ton 용량의 피로시험기를 사용하였으며, 단진재하로 하였다. 피로실험시 최소 반복하중값은 정적 극한하중의 50%로 하였으며, 적절한 S-N선도를 작성하기 위하여 최대 반복하중값은 시험체별로 다르게 하였다.

실험 초기인 반복회수 10회까지는 정적으로 재하하였으며, 그 이후 반복하중의 최소값과 최대값을 일정하게 유지하면서 3Hz의 속도로 재하하였다. 그리고 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지의 중앙점 수직처짐, 수평처짐 및 하부변형률등을 측정하였다. 시험체가 200만회의 재하를 받은 후에도 파괴되지 않은 경우에는 이를 정적으로 파괴시켰다. 피로실험의 개략도는 Fig. 2와 같다.

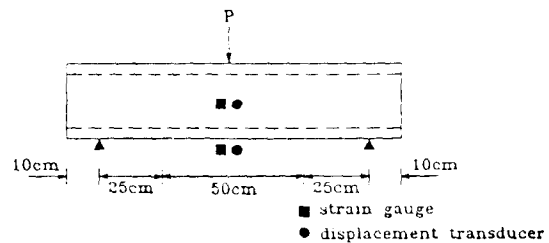


Fig. 2. The General view of Fatigue test.

## 3. 결과분석 및 고찰

피로실험 이전에 수행된 파괴실험 결과중

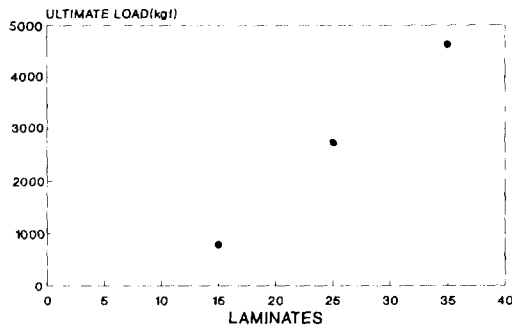


Fig. 3. The Relationships between ultimate load and laminates of GFRP pipes.

GFRP관의 정적 극한하중은 Fig. 3에 나타나 있듯이 유리섬유 적층수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하였다. 본 피로실험에서는 이들 파괴 실험결과를 기초로 하여 최대 반복하중의 변화에 따른 피로파괴시 반복회수를 추정하였으며, 이들 결과를 유리섬유 적층수에 따라 비교 고찰하였다. 피로실험결과는 Table 3과 같다.

본 실험에서는 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지 중앙점의 수직처짐과 수평처짐의 변화를 측정하였으며, 이들 결과를 각각 Fig. 4~Fig. 6과 Fig. 7~Fig. 9에 나타냈다. 이들

Table 3. Fatigue test results.

Spec.	Laminates	$P_{si}$	$P_{f,max}$	$\frac{P_{f,max}}{P_{si}}$	Nu
No.		(kgf)	(kgf)	(%)	(cycle)
A1	15	775.0	697.5	90.0	1,320
A2	15	775.0	658.8	85.0	17,170
A3	15	775.0	620.0	80.0	423,340
A4	15	775.0	600.6	77.5	768,270
A5	15	775.0	581.3	75.0	1,196,820
B1	25	2,750.0	2,612.5	95.0	20,290
B2	25	2,750.0	2,543.8	92.5	34,140
B3	25	2,750.0	2,475.0	90.0	70,120
B4	25	2,750.0	2,337.5	85.0	633,120
B5	25	2,750.0	2,200.0	80.0	1,182,760
C1	35	4,637.5	4,405.6	95.0	52,520
C2	35	4,637.5	4,266.5	92.5	76,120
C3	35	4,637.5	4,173.8	90.0	90,470
C4	35	4,637.5	4,050.8	87.5	635,760
C5	35	4,637.5	3,941.9	85.0	1,486,820

여기서,  $P_u$ 는 정적 극한하중,  $P_{f,max}$ 은 피로하중의 최대값,  $N_u$ 는 피로파괴시의 반복회수이다.

그림에서 알 수 있듯이 반복회수가 증가함에 따라 동일 하중상태하의 중앙처짐이 증가하였다. 이러한 반복회수의 증가에 대한 중앙처짐의 증가는 반복회수가 증가함에 따라 그 증가폭이 현저히 감소하였으며, 최종적으로는 중앙처짐이 어느 한계값에 가깝게 근접하였고, 대부분의 시험체는 이 직후 피로파괴되었다. 유리섬유의 적층수가 큰 시험체일수록 중앙처짐이 한계값에 도달할 때까지의 반복회수가 크게 나타났다. 따라서 이들 결과에서 유리섬유가 GFRP관의 취성과파괴를 방지하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있다.

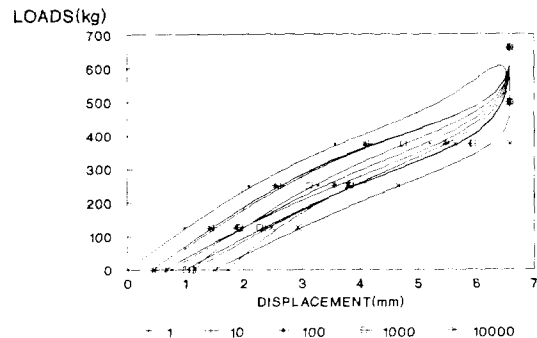


Fig. 4. The relationships between the repeated loading cycles and the mid-span vertical displacement with laminates.(A2)

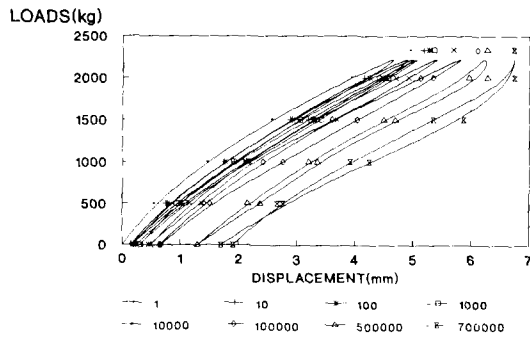


Fig. 5. The relationships between the repeated loading cycles and the mid-span vertical displacement with laminates.(B4)

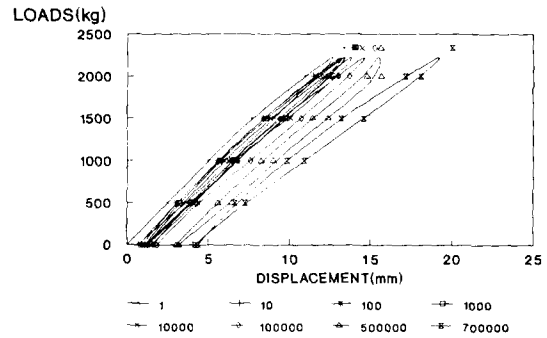


Fig. 8. The relationships between the repeated loading cycles and the mid-span horizontal displacement with laminates.(B4)

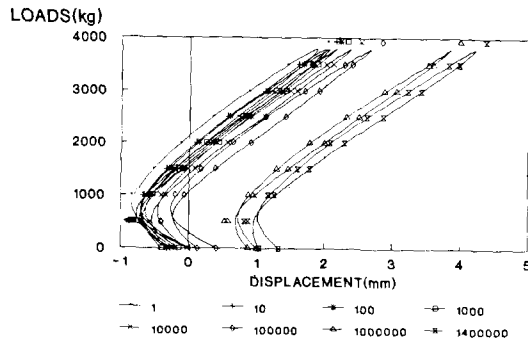


Fig. 6. The relationships between the repeated loading cycles and the mid-span vertical displacement with laminates.(C5)

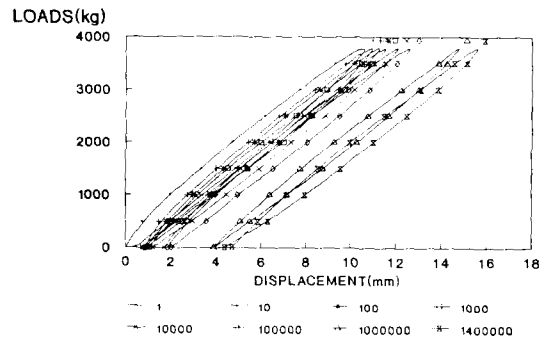


Fig. 9. The relationships between the repeated loading cycles and the mid-span horizontal displacement with laminates.(C5)

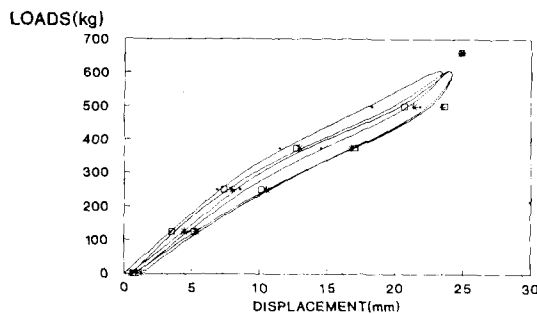


Fig. 7. The relationships between the repeated loading cycles and the mid-span horizontal displacement with laminates.(A2)

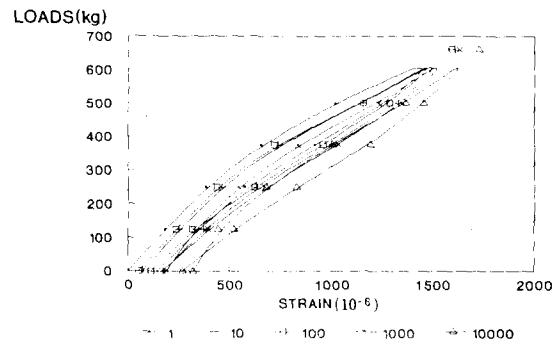


Fig. 10. The relationships between the repeated loading cycles and the strain.(A2)

한편 피로실험시 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지 휨 변형률의 변화를 측정하였으며, 이들 결과를 Fig. 10~Fig. 12에 나타내었다. 이들 그림에서 반복회수가 증가함에 따라

휨 변형률이 증가함을 알 수 있고, 강구조물에서 흔히 나타나는 반복회수 증가에 따라 휨 변형률이 증가함을 알 수 있고, 강구조물에서 흔히 나타나는 반복회수 증가에 따른 응력-

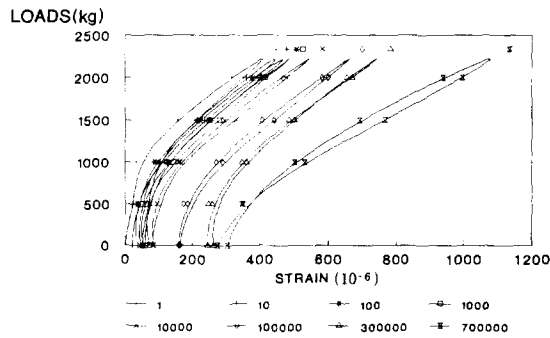


Fig. 11. The relationships between the repeated loading cycles and the strain.(B4)

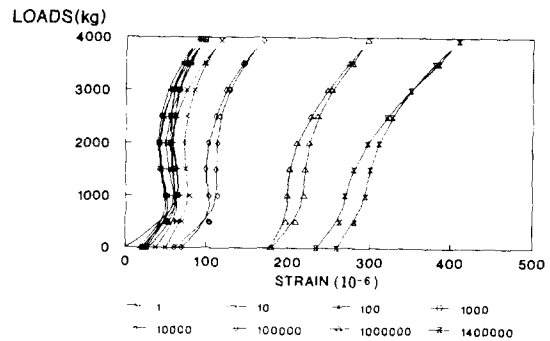


Fig. 12. The relationships between the repeated loading cycles and the strain.(C5)

변형률 선도 구배의 감소현상을 볼 수 있다.

Fig. 10~Fig. 12에서 정적하중 재하시 유리섬유 적층수가 15, 25, 35일때 휨 변형률은 각각  $1.02 \times 10^{-3}$ ,  $3.15 \times 10^{-4}$ ,  $7.10 \times 10^{-5}$ 으로 유리섬유의 적층수가 많은 시험체일수록 낮은 변형을 나타냈다. 반복하중 재하시 파괴직전의 휨 변형률은 유리섬유의 적층수가 15, 25, 35일때 각각  $1.37 \times 10^{-3}$ ,  $9.40 \times 10^{-4}$ ,  $3.80 \times 10^{-4}$ 으로 정적하중 재하시에 비하여 각각 1.34배, 2.98배, 5.35배로 증가하였다. 이러한 결과에서 GFRP관

의 휨 변형률은 유리섬유 적층수가 클수록 반복하중 재하 초기의 변형은 작았으나, 피로파괴시까지 꾸준히 증가함을 알 수 있다. 이는 유리섬유의 적층수가 클수록 GFRP관의 강성이 높아져서 피로하중하의 강성을 유지하는데 효과가 커졌음을 의미한다.

한편, Fig. 10~Fig. 12의 하중-변형률 선도에서 반복회수에 대한 잔류변형을 유리섬유 적층수 별로 구할 수 있었으며, 이들 결과를 Table 4에 나타내었다.

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

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

Table 4에서 파괴직전의 잔류변형은 유리섬유의 적층수가 15, 25, 35층일때 각각  $3.20 \times 10^{-4}$ ,  $3.04 \times 10^{-4}$ ,  $2.59 \times 10^{-4}$ 으로 유리섬유의 적층수가 클수록 반복하중을 받는 GFRP관의 잔류변형이 낮아짐을 알 수 있다. 마찬가지로 반복회수가 증가함에 따라 잔류변형의 증가폭도 유리섬유의 적층수가 클수록 작게 나타났다. 이러한 결과는 GFRP관이 유리섬유의 적층수가 클수록 피로하중하의 GFRP관의 강성을 유지하는데 효과적임을 알 수 있다.

한편 피로수명 예측에 있어서는 피로하중 반복회수에 따른 잔류강도 및 강성등과 같은 재료 특성치의 변화양상을 이용한 연구가 많이 수행되어 왔다. Hahn과 Kim<sup>6)</sup>은 피로하중에 따라 저하된 잔류강도가 최대부하응력과 같아질 때 피로파손이 발생한다는 가정을 이용하여 피로수명분포를 예측하였으며, Poursartip 등<sup>7, 8)</sup>, Ming-haw 등<sup>9)</sup> 및 Hwangem<sup>10)</sup>은 강성감도를 이용한 피로수명 예측식을 제안하였다. 또한 일반적인 피로실험 결과는 Fig. 13과 같은 S-N(응력-하중반복회수)선도로 표시되었는데, 이 S-N선도가 평행한 점근선을 가지고 되면, 이에 대응하는 응력값을 피로한도라고 한다. 대부분의 금속들은 이와 같은 피로한도를 가지고 있지만 GFRP는 금속과는 달리 피로한도가 명확하게 나타나지 않기 때문에 정한 반복회수(200만회)에 대한 피로강도를 사용하고 있다<sup>11)</sup>.

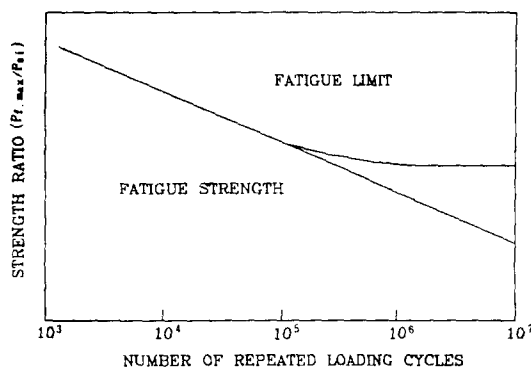


Fig. 13. S-N curve.

Table 3의 피로실험 결과에서 피로수명과 피로강도와의 관계식은 다음과 같은 지수형태

의 함수로 나타낼 수 있다.

$$R = K \cdot \exp(-C \cdot \log N)$$

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 전환될 수 있다.

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

본 연구에서는 정적극한하중에 대한 피로하중 백분율을 피로수명과 비교하여 분석하였으며, Fig. 14~Fig. 16에 이들의 관계를 나타내었다.

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

- 1) 유리섬유의 저거층수가 15일때

$$R = 106.212 - 4.919 \cdot \log N$$

- 2) 유리섬유의 저거층수가 25일때

$$R = 127.123 - 7.556 \cdot \log N$$

- 3) 유리섬유의 저거층수가 35일때

$$R = 120.890 - 5.821 \cdot \log N$$

상기 직선식으로부터 계산된 반복회수 200만회의 GFRP관의 정적 극한하중 백분율에 대한 GFRP관의 피로강도는 유리섬유의 적층수가 15층, 25층, 35층일때 각각 약 75.2%, 79.5%, 84.2%이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서 실험한 일련의 GFRP관 시편에 대한 피로거동은 다음과 같다.

1. 반복회수에 대한 하중-처짐선도로부터 유리섬유의 적층수가 증가할수록 유리섬유가 GFRP관의 취성과파괴를 방지하는데 효과적으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

2. 반복회수에 대한 하중-변형률 선도로부터 구한 잔류변형률의 비교 결과에서 피로하

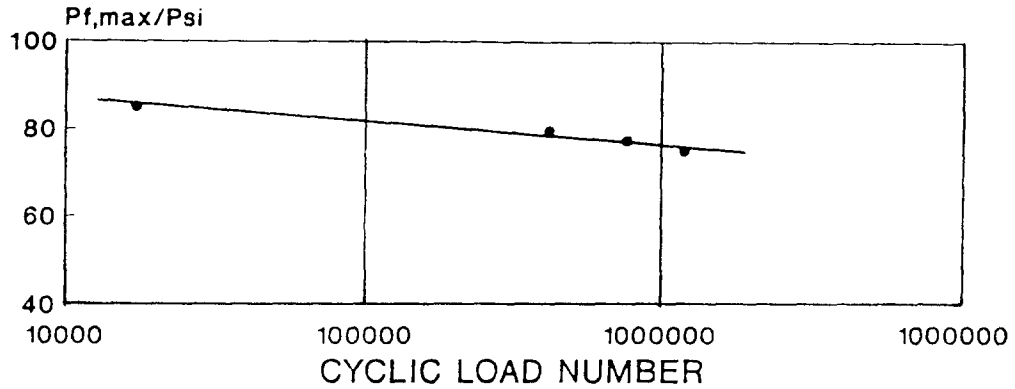


Fig. 14. The S-N curve of GFRP pipe.(N=15)

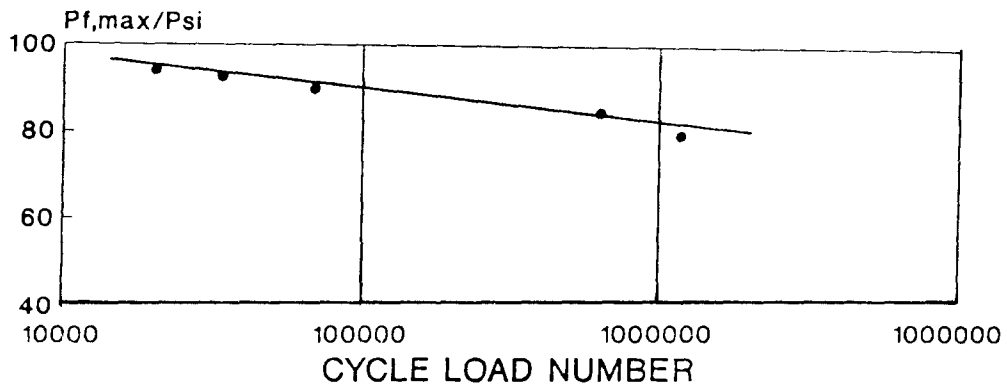


Fig. 15. The S-N curve of GFRP pipe.(N=25)

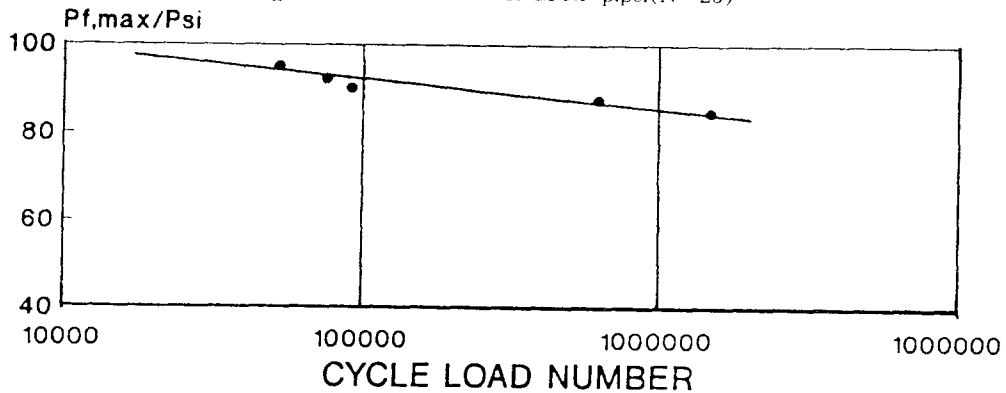


Fig. 16. The S-N curve of GFRP pipe.(N=35)

중하의 GFRP관의 강성은 유리섬유의 적층수가 클수록 크게 나타났으며, 이러한 현상은 피로파괴 직전까지 나타났다.

3. 피로실험 결과를 회귀분석하여 구한 S-N선도에 의하면 정적극한강도 백분율에 대한 GFRP관의 피로강도는 GFRP관의 유리섬유 적층수가 증가할수록 증가하였으며, 유리섬유의 적층수가 15, 25, 35층인 GFRP관의 반복회수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한

강도에 각각 약 75.2%, 79.5%, 84.2%로 나타났다.

#### 참고 문헌

1. Benjamin, B.S., "Plastics as a structural material," The Consulting Engineer Nov., 1965.
2. Ronkka, Y., "The design and performance of acrylic domelights," International

- Conference on Space Structures, London, Proc. published by Blackwell Scientific Publications Ltd., 1967.
3. "The potential used of form plastics for housing in underdeveloped areas," Architectural Research Laboratory, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, March, 1993.
  4. Benjamin, B.S., and Makowski, Z.S., "The analysis of folded-plate structures in plastics," Conference on Plastics in Building Structures, London, Proc. published by Pergamon Press, 1966.
  5. Piano, R. "Experiments and projects with industrialized structures in plastic materials," International Conference on Space Structures, London, Proc. published by Blackwell Scientific Publication Ltd., 1967.
  6. Hahn, H. T. and Kim, R. Y., "Fatigue Behavior of Composite Laminates", Journal of Composite Materials, vol 10, 1976.
  7. Poursartip, A., Ashby, M. F., and Beaumont, P. W. R., "The fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fiber Composite Laminate : I -Development of the Model", Composites Science and Technology, vol. 25, 1986.
  8. Poursartip, A. and Beaumont, P.W. R., "The Fatigue Damage Mechanics of a Carbon Fiber Composite Laminate : II-Life Prediction", Composites Science and Technology, vol. 25, 1986.
  9. Ming-hwa, R. J., Hsu, J. M. and Hwang, D. G., "Fatigue Degradation in Centrally Notched Quasi-Isotropic Laminates", Journal of Composite Materials, vol. 24, 1990.
  10. Hwang, W. and Han, K. S., "Fatigue of Composites-Fatigue Modulus Concept and Life Prediction", Journal of Composite Materials, vol. 20, 1986.
  11. Norby, G. M., "Fatigue of Concrete-A Review Research," Journal of ACI, Proceedings Vol. 57, No. 8, 1958.