

# 유리섬유 강화 플라스틱관의 휨거동에 관한 연구

## Flexural Behavior of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes

장 동 일\*      고 재 원\*\*  
Chang, Dong Il      Koh, Jae Won

### 요 약

본 논문에서는 유리섬유의 적층수, 유리섬유의 배향각도에 대한 유리섬유 강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastics ; GFRP)의 인장거동 변화를 고찰하고, 이들의 상관관계를 규명하기 위하여 일련의 GFRP 시험체에 대하여 인장실험을 수행하였다. 시험체는 폭 12.5mm, 길이 60mm 크기로 일정하게 제작하였으며, 시험체 제작시 유리섬유의 적층수는 14, 22, 30층, 유리섬유의 배향각도는 0°, 30°, 45°로 하였다. 인장실험시 각 시험체의 파괴양상, 극한하중 및 하중변화에 대한 인장변형율을 조사하였고, 이들 결과를 토대로 유리섬유의 적층수와 배향각도에 따른 GFRP의 극한하중, 응력-변형율 선도 및 탄성계수 등을 비교 분석하였다.

한편 본 논문에서는 유리섬유의 적층수, 직경 변화에 따른 GFRP관의 파괴거동을 고찰하기 위하여 4점 재하법에 의한 GFRP관의 휨파괴실험을 수행 하였다. 실험에 사용된 시험체는 길이 1200mm로 하였으며, 유리섬유의 적층수를 30, 35, 40층, 관의 직경을 50, 100, 150mm로 하였다. 파괴실험시 각 시험체의 하중변화에 대한 휨 변형율, 중앙점 처짐량 및 항복하중을 측정하였고, 이들 결과를 토대로 유리섬유의 적층수와 관의 직경에 따른 GFRP관의 항복하중 및 파괴에너지를 비교 분석 하였으며, 항복시 파괴에너지를 추정할 수 있는 제안식을 유도하였다.

### Abstract

In this paper, the tensile test were performed on a series of GFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) specimen to investigate the tensile behavior of GFRP varing with the angles of orientation of glass fiber. In this test, relationships between the loads and the tensile strains, and the ultimate loads were observed. On the bases of the test results, the tensile strength, the stress-strain curve and the tensile modulus with connection to the angles of orientation of GFRP specimens were studied.

And, in this paper, the flexural tests were performed to investigate the flexural fracture behavior of GFRP pipes for the diameter and the laminates. The flexural tests were done under

\* 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 1994년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

\*\* 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

four point loading system. The relationships between loadings, mid-span deflections, and tensile strains of the specimens were observed. On the bases of the test results, the mid-span deflection, the tensile strain, the yield load and the fracture energy with connection to the diameter and the laminates of GFRP pipes were studied. And according to the regression technique, some empirical formulae for predicting the fracture energy of GFRP pipes were also suggested.

**Keywords :** GFRP pipes, diameter, laminates, tensile test, tensile modulus, flexural test, mid-span deflection, flexural fracture behavior, yield load, fracture energy

## 1. 서 론

플라스틱은 중량에 대한 강도비가 다른 구조재료 보다 높은 편이며, 부식에 대한 저항력이 우수하다. 또한 무게가 가볍기 때문에 구조물에 이용할 때 시공경비를 절감할 수 있으며, 반투명이고 색깔의 선택폭이 넓기 때문에 완성된 구조물의 미적감각이 뛰어나다. 이러한 이유 때문에 플라스틱은 강재, 알루미늄, 콘크리트 등의 기존 구조용 재료의 대체용으로 건설산업 분야에서 널리 사용될 가능성이 있다. 그러나 플라스틱의 응력-변형률 선도는 항복될 때까지 항상 선형적이지는 않으며, 어떠한 경우에는 항복이 전혀 없는 경우도 있다<sup>(1)</sup>. 이는 사용되는 플라스틱의 종류에 따라 크게 영향을 받는다. 또한 대부분의 플라스틱은 인장탄성계수와 압축탄성계수가 반드시 일치하지는 않으며, 전체적으로 플라스틱의 탄성계수는 매우 낮기 때문에 플라스틱을 재래의 구조용 부재로 사용할 때는 변형이 구조물의 한계값보다 더 크게 될 수도 있다.<sup>(2)</sup> 이러한 단점을 보완하기 위해서는 보강재를 덧붙이거나 탁월한 인장강도를 가진 유리섬유로 플라스틱의 매트릭스를 보강한 유리섬유 강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Plastics ; GFRP) 으로 만드는 것이 매우 효과적이다.<sup>(3~5)</sup>

한편, GFRP의 성형범중 유리섬유의 뛰어난 인장강도를 최대한 이용하여 고도의 물리적인 성질을 얻을 목적으로 개발된 성형법의 일종이 FW성형법(Filament Winding Process) 으로서 미국에서는 30년 전부터 탱크, 파이프나 절연재료 등으로 광범위하게 이용되고 있다. 이러한 FW성형법은 주로 초내식성 탱크나 파이프 등을 제작하는데

이용된다. FW성형법으로 제작된 GFRP는 내식성 외에 보온, 보냉성이 우수하며, 열팽창계수가 작고 단열성이 우수한 특징을 가지고 있다. 특히 FW성형법으로 제작된 GFRP관은 우수한 내후성과 함께 높은 강도를 가지고 있어 안정성이 좋다. 현재 온천용, 폐수처리용, 석유공업용, 배기관용, 식품공업용 등으로 사용되고 있는 GFRP관은 앞으로 대형 상·하수도 관으로 사용될 가능성이 높지만, 아직까지 관의 직경이나 유리섬유의 적층수에 대한 파괴특성이 명확하게 밝혀져 있지 않은 실정이다.

이에 본 연구에서는 GFRP를 이루고 있는 유리섬유의 층구조와 배향각도의 변화에 따른 GFRP의 인장거동을 고찰하기 위하여 일련의 GFRP 시험체에 대한 인장실험을 수행하였다. 실험 결과로서 토대로 유리섬유의 적층수와 배향각도에 따른 GFRP의 파괴양상, 인장강도, 응력-변형률 선도를 비교 분석하였으며, 유리섬유 적층수와 유리섬유 배향각도의 변화에 대한 GFRP의 탄성계수를 비교 고찰하였다. 또한, 본 연구에서는 GFRP관의 휨 파괴특성을 알아보기 위하여 FW성형법으로 제작된 GFRP관에 대하여 휨 실험을 수행하였다. 실험시 관의 직경과 두께를 변수로 하여 하중의 변화에 대한 중앙처짐, 인장변형을 및 항복하중 등을 측정하였으며, 이들 결과를 토대로 관의 직경 및 유리섬유의 적층수에 대한 항복하중, 하중과 중앙점 처짐의 관계, 하중과 인장변형률의 관계, 그리고 관 직경에 대한 GFRP관의 파괴에너지의 변화등을 고찰하여 GFRP관의 휨 파괴특성을 고찰하였다.

Table 1 Material properties of glass fiber fabrics

Wide (mm)	Thickness (mm)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Thermal expansion modulus	Tensile strength (GPa)	Tensile modulus (GPa)	Poisson's ratio
1.02	0.24	2627	$1.6 \times 10^{-6}$	1.4~2.0	72.4	0.22

## 2. 실험

### 2.1 사용재료

본 실험에서는 GFRP 인장 시험체 및 GFRP 관 시험체 제작시, 폭 1.02mm, 두께 0.24mm인 직조 유리섬유와 아세톤 20%가 함유된 에폭시수지를 사용하였다. 실험에 사용된 유리섬유의 재료적 성질과 구성 성분은 각각 Table 1, Table 2와 같다.

Table 2 Composition of glass fiber fabrics

(Unit : wt.%)

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 Flouride	Magnesium Oxides
0.5~1.5	1.0	0.0~0.8	0.0~0.8

### 2.2 시험체

GFRP 인장 시험체는 KSB 0801규격에 의해 Fig. 1과 같이 제작하였으며, 시험체의 종류는 유리섬유의 적층수(14, 22, 30 3 종류)와 유리섬유의 배향각도(0°, 30°, 45° 3 종류)등에 따라 모두 9가지의 시험체를 제작하였다.

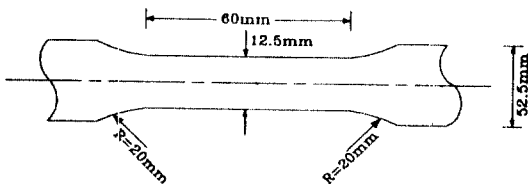


Fig. 1 Tensile test specimen.

한편, GFRP 관의 휨 실험에 사용된 GFRP 관 시험체는 유리섬유의 배향각도가 하중방향과 45°가 되도록 FW성형법에 의하여 제작되었으며, 길이는 120cm로 일정하게 하였다. 시험체의 종류는

직경에 따라(50, 100, 150mm) 3종류로 하였으며, 유리섬유의 적층수는 30~40층으로 변화시켜 모두 7가지의 시험체에 대한 실험을 수행하였다. GFRP 관 시험체에 대한 개략도는 Fig. 2와 같다.

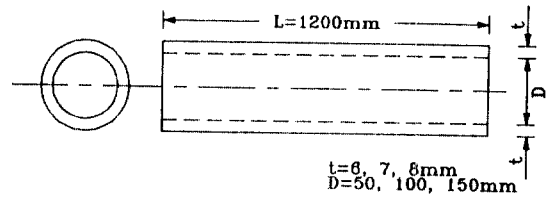


Fig. 2 Flexural test specimen.

### 2.3 실험방법 및 측정

인장실험은 만능시험기를 사용하여 시험체가 파괴될 때까지 하중을 1kgf/sec 속도로 일정하게 재하하였다. 하중이 100kg씩 증가할 때마다 시험체의 중앙에 부착된 스트레인 게이지에 의하여 인장변형율을 측정하였고, 파괴시 시험체의 인장강도도 측정하였다. 인장 시험체의 개략도는 Fig. 3과 같다.

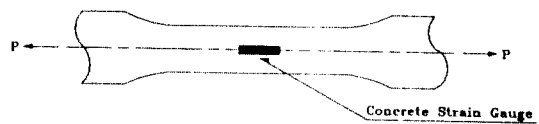


Fig. 3 General view of the tensile test.

한편, GFRP 관에 대한 휨 실험은 4점 재하법으로 하였으며, 시험체가 파괴될 때까지 하중을 1kgf/sec의 속도로 일정하게 재하하였다. 하중이 20kg씩 증가할 때마다 시험체의 하단에 부착한 스트레인 게이지와 중앙하단에 설치한 처짐측정기에 의하여 인장변형율 및 중앙점 처짐량을 측정하였으며, 아울러 시험체의 항복하중도 측정하였다. 휨 실험의 개략도는 Fig. 4와 같다.

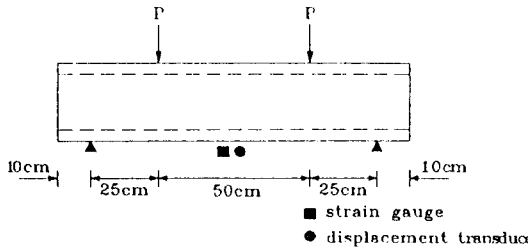


Fig. 4 General view of the flexural test.

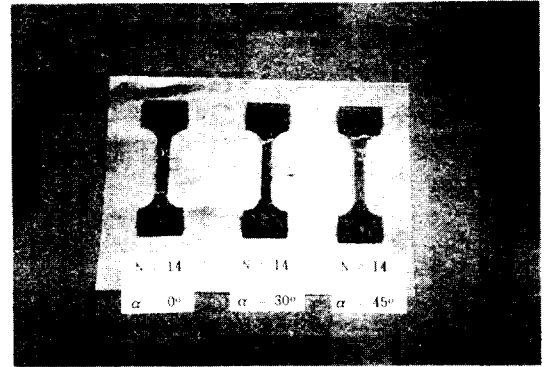
### 3. 결과분석 및 고찰

#### 3.1 GFRP의 인장실험

유리섬유의 적층수와 배향각도에 따른 GFRP 시험체의 인장실험 결과는 Table 3과 같다. Picture 1~Picture 3에 나타나 있듯이 GFRP 인장 시험체의 파괴양상은 유리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 0°인 시험체의 경우 대부분 파단면이 하중방향과 수직이었다. 유리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 30°인 시험체들은 파단면이 하중방향과 대략 60°를 이루며 불규칙한 파단 현상을 나타내었다. 또한 유리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 45°인 시험체의 경우 시험체 전체부분이 골고루 인장력을 받았으며, 파단면은 매우 불규칙 하였다.

Table 3 Tensile test results

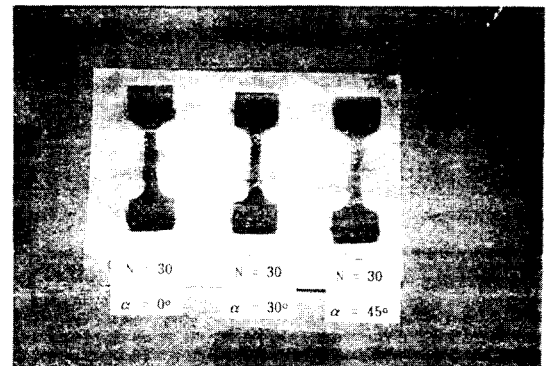
Laminates (개)	Angles of orientation (°)	Fracture load (kg)	Tensile strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Tensile strain	Tensile modulus (10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup> )
14	0	1170	3120.0	0.01634	1.95
14	30	650	1733.3	0.02740	1.06
14	45	705	1880.0	0.07291	0.78
22	0	1660	2351.1	0.01362	1.94
22	30	940	1671.1	-	1.00
22	45	1045	1857.8	-	0.81
30	0	1800	2400.0	0.01094	2.30
30	30	1275	1700.0	0.05875	0.88
30	45	1345	1793.3	-	0.73



Picture 1 Fracture aspect of GFRP specimens.(N=14)



Picture 2 Fracture aspect of GFRP specimens.(N=22)



Picture 3 Fracture aspect of GFRP specimens.(N=30)

Fig. 5는 유리섬유의 배향각도에 따른 극한하중을 유리섬유의 적층수에 따라 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 GFRP의 극한하중은 유리섬유의 적층수에 따라 선형적으로 나타났으며, 유

리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 0°인 경우를 기준으로 할때 30°, 45°인 경우의 극한하중은 각각 평균 61%, 66%로 감소하였다. 반면에 유리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 0°인 경우를 기준으로 할때 30°, 45°인 경우의 파괴시 변형율은 각각 평균 1.7배, 4.5배 증가하였다. 이러한 결과에서 GFRP의 극한하중과 변형율이 GFRP 속에 내재되어 있는 유리섬유의 배향각도에 따라 민감하게 변화함을 알 수 있었다.

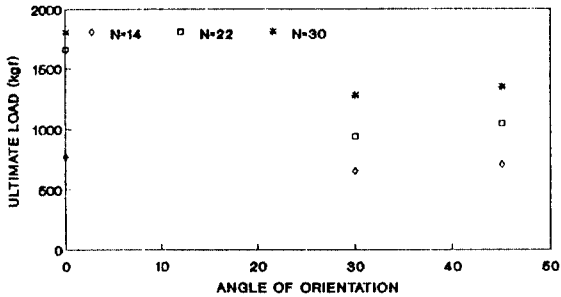


Fig. 5 Relationships between the angle of orientation and the ultimate load of GFRP.

또한 본 연구에서는 유리섬유의 배향각도가 GFRP의 극한응력과 변형율에 미치는 영향을 규명하기 위하여 GFRP의 응력-변형율 선도를 구하여 보았던바 Fig. 6~Fig. 8과 같다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 유리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 0°인 시험체에서는 응력-변형율 선도가 파괴될 때까지 거의 선형을 이루고 있었으며, 낮은 변형율에서 높은 극한응력을 나타내고 있다. 즉 유리섬유의 배향각도가 0°인 GFRP는 항복점과 파단점이 거의 일치하여 일반 구조용 재료에서 흔히 볼 수 있는 항복점은 나타나지 않았다. 또한 유리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 45°에 가까워짐에 따라 응력-변형율 선도는 비선형으로 나타났으며, 높은 변형율에서 낮은 극한응력을 나타내었다.

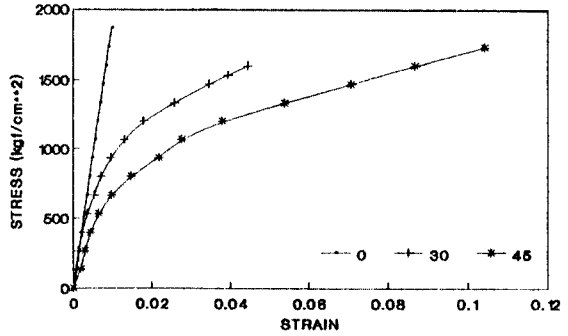


Fig. 6 Stress-strain curves of GFRP.(N = 14)

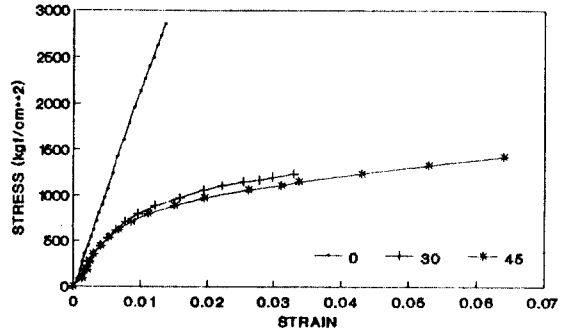


Fig. 7 Stress-strain curves of GFRP.(N=22)

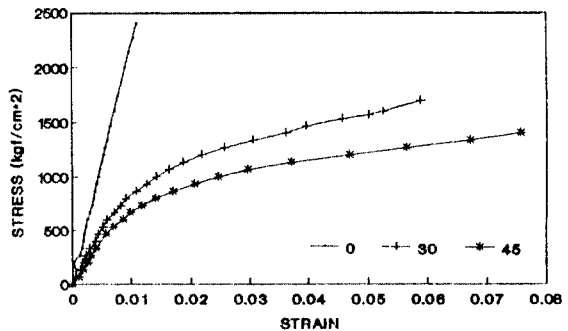


Fig. 8 Stress-strain curves of GFRP.(N=30)

한편 유리섬유의 적층수와 유리섬유의 배향각도에 따른 GFRP의 탄성계수는 GFRP의 응력-변형률 선도에 의하여 구하였으며, 이를 Fig. 9에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있듯이 유리섬유의 배향각도가 하중 방향에 대하여 30°, 45°인 GFRP의 탄성계수는 유리섬유의 배향각도가 0°인 GFRP의 탄성계수에 비하여 각각 평균 48%, 38%로 감소하였다.

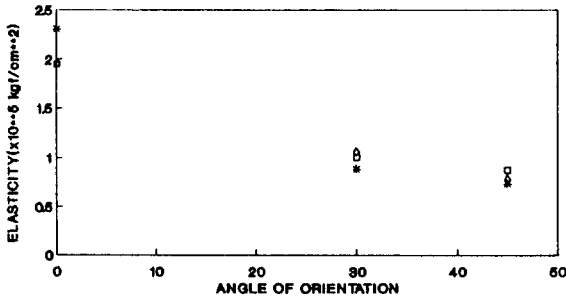


Fig. 9 Relationships between the angle of orientation and the tensile modulus.

### 3.2 GFRP관의 휨 실험

GFRP관 시험체에 대한 휨 실험에서는 하중변화에 따라 인장변형률, 중앙점 처짐량 및 항복하중이 측정되었으며, 이들 결과는 Table 4와 같다. 그리고 Fig. 10에 GFRP관의 유리섬유 적층수와 직경에 따른 항복하중의 변화를 나타내었다. 이들 결과에서 GFRP관의 항복하중은 직경이 증가함

Table 4 Flexural test results

Diameter (mm)	Laminates	Yield load (kgf)	Mid-span deflection at the yield load (mm)	Fracture energy at the yield load (Kgf · mm)
50	30	880	38.95	18,171
50	35	1040	46.98	26,666
100	30	2600	22.28	30,404
100	35	3200	32.48	59,786
150	30	4300	20.50	39,757
150	35	4920	28.57	82,958
150	40	4960	38.34	125,388

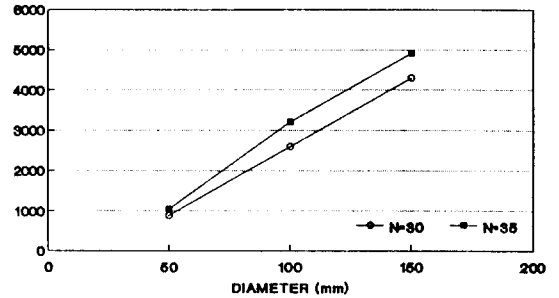


Fig. 10 Relationships between the diameter and the yield load of GFRP pipes.

에 따라 선형에 가깝게 증가하였으며, 직경이 50, 100, 150mm인 GFRP관의 경우 유리섬유의 적층수가 1층 증가함에 따라 각각 약 32kgf, 120kgf, 124kgf씩 항복하중이 증가함을 알 수 있었다. 즉 유리섬유의 적층효과는 GFRP관의 직경이 클수록 크게 나타났다.

파괴에너지는 파괴실험에서 얻은 하중-처짐 관계도의 면적으로부터 구할 수 있으며, 이는 시험체가 파괴될 때까지 소모된 에너지를 나타낸다. 본 연구에서는 GFRP관의 변형이 매우 커서 항복점까지의 하중-처짐 관계도의 면적을 항복점의 파괴에너지로 사용하여 유리섬유의 적층수와 GFRP관의 직경에 따라 비교하였으며, 이들 결과는 Fig. 11~Fig. 14와 같다. Fig. 14에서 알 수 있듯이 GFRP관의 항복시 파괴에너지는 GFRP관의 직경이 증가함에 따라 선형적으로 증가하였으며, 유리섬유의 적층수가 클수록 그 증가폭이 컸

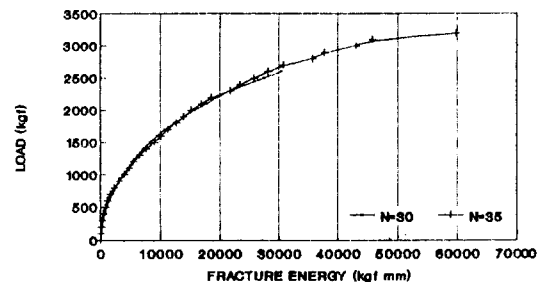


Fig. 11 Relationships between the fracture energy and the laminates of GFRP pipe.(D=50mm)

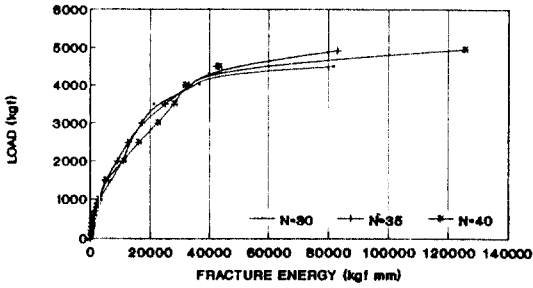


Fig. 12 Relationships between the fracture energy and the laminates of GFRP pipe.(D=100mm)

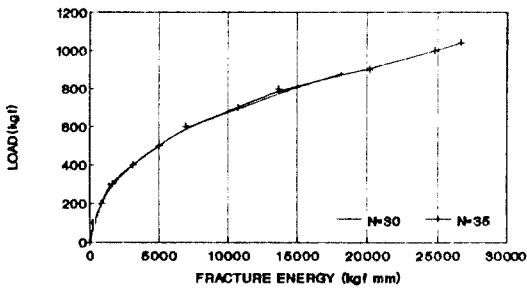


Fig. 13 Relationships between the fracture energy and the laminates of GFRP pipe.(D=150mm)

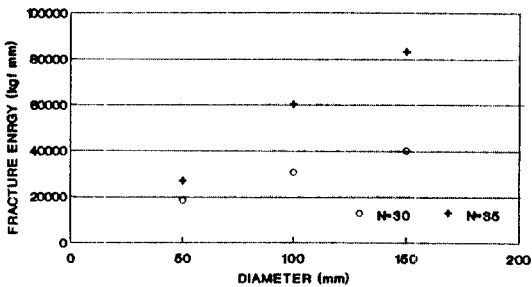


Fig. 14 Relationships between the diameter and the fracture energy of GFRP pipes.

다. 본 연구에서는 이들 결과를 회귀분석하여 다음과 같은 GFRP 관의 항복시 파괴에너지의 특성식을 도출하였다.

N=30 일 때

$$G_f = 0.7858 \times 10^4 + 0.2159 \times 10^3 \times D$$

N=35 일 때

$$G_f = 0.1789 \times 10^3 + 0.5629 \times 10^3 \times D$$

여기서, N은 유리섬유의 적층수, D는 GFRP 관의 직경,  $G_f$ 는 GFRP의 항복시 파괴에너지이다.

한편 본 연구에서는 하중 변화에 따른 GFRP 관의 휨 인장변형의 변화를 알아보기 위하여 중앙부 하단에 스트레인 게이지를 부착하여 GFRP 관의 변형율을 측정 하였다. 이들 결과는 Fig. 15에 유리섬유의 적층수와 인장변형율의 관계로 나타내었다. 이 결과에서 휨을 받는 GFRP 관은 유리섬유의 적층수가 클수록 변형이 작았고 하중이 증가함에 따라 불규칙하게 증가하는 양상을 나타내었는데 이는 매트릭스속에 내재된 고탄성 유리섬유가 GFRP 관의 변형을 주도하기 때문인 것으로 판단된다.

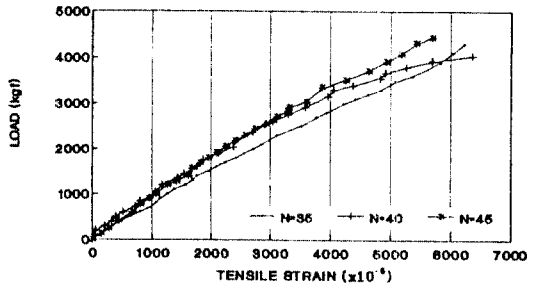


Fig. 15 Relationships between the tensile strain and the load of GFRP pipe.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 유리섬유 강화 플라스틱관의 휨 거동을 알아보기 위하여 GFRP에 따라 인장시험과 GFRP 관에 대한 휨 실험을 수행하였던 바, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 인장을 받는 GFRP 시험체는 유리섬유의 배향각도가 하중방향과 큰 각을 이룸에 따라 시험체의 전체 부분이 골고루 인장력을 받았으며, 파단면은 불규칙하였다.
- 2) GFRP의 극한하중은 유리섬유의 적층수에 따라 거의 선형적으로 증가하였으며, 유리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 30°, 45°

일 때의 GFRP의 극한응력은 유리섬유의 배향각도가 0°일 때에 비하여 약 61%, 66%로 각각 감소하였다.

- 3) 유리섬유의 배향각도가 하중방향에 대하여 0°인 경우에는 파괴될 때 까지 응력-변형을 선도가 선형을 이루고 있었으며, 항복점과 파단점이 거의 일치하였다. 반면 유리섬유의 배향각도가 45°에 가까워짐에 따라 응력-변형을 선도는 비선형으로 되었으며, 높은 변형률에서 낮은 극한응력을 나타내었다.
- 4) 힘을 받는 GFRP 판의 항복하중은 GFRP 판의 직경이 클수록 선형에 가깝게 증가하였다. GFRP 판의 인장변형률은 유리섬유의 적층수가 클수록 작았고, 하중이 증가함에 따라 불규칙하게 증가하는 양상을 나타냄으로써 GFRP의 매트릭스 속에 내재된 고탄성 유리섬유가 GFRP 판의 변형을 주도함을 알 수 있었다.
- 5) 하중-처짐관계도의 면적을 이용하여 계산한 GFRP 판의 파괴에너지는 GFRP 판의 직경이 클수록 선형적으로 증가하였으며, 유리섬유의 적층수가 많을수록 그 증가폭이 커졌다.

#### 감사의 글

본 연구는 1990년~1993년도 한국과학재단 목

적기초 연구비에 의해 이루어진 바, 재단에 심심한 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

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. 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.
4. 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.
5. "The potential used of form plastics for housing in underdeveloped areas," Architectural Research Laboratory, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, March, 1963.

(접수일자 : 1993. 7. 27)