

## 유리섬유 보강 플라스틱관의 파괴 안전성에 관한 연구

### A Study on the Fracture Safety of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes

채 원 규\*  
Won-Kyu Chai

#### ABSTRACT

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

In the fracture test, the mid-span displacement, the strain and the yield load of the GFRP pipes are measured for different number of laminates, and fracture energy is estimated.

From this study, it is known that GFRP pipe could be used as structural materials in underground buried pipes if their ductility and strength are increased by controlling number of laminates. Furthermore, because of their merit of lightweight, they can contribute greatly to reduction of construction cost when they are employed.

#### 1. 서 론

최근 유리섬유, 탄소섬유, 케블라섬유, 보른섬유 등의 신소재 개발로 인한 섬유 보강 복합재료 관이 개발되어 구조용 부재로서 이용이 증대되고 있다. 이중 유리섬유로 된 관은 현재 대량 생산되기 시작하여 새로 개발되고 있는 다른 신소재에 비해 저렴한 가격으로 이용할 수 있다.

건설 관련제품의 GFRP(Glass Fiber Reinforced Plastics)화는 파판(波板)에서 시작되어 의자, 욕조, 정화조, 수조 등 제품의 종류도 다양해져서, 그 시장규모도 현재 GFRP 전체시장의 과반수를 차지하고 있다. 또, 건설용으로는 그 외에 sanitary unit, capsule 주택, 방갈로, 점포 등이 있어, 각각의 특성을 살린 제품화가 행해지고 있다. 이 중에서 GFRP계 수조는 본격적으로 시판되기 시작한 것은 1961~1962년이지만, 1965년경 부터는 시

---

\* 신구전문대학 토목과

장이 확대되었고 신뢰성도 향상되었다. 그 이후 탱크의 형상이 원, 각, 구 등으로 다양하게 되어 일체 성형제품에서 판넬방식, 현장시행 형식으로 다양해졌고, GFRP의 성형성 및 시공성의 특성을 살려서 실용화 되었다<sup>1)</sup>.

이러한 재료로 된 GFRP관은 자체 중량이 가벼워져 운송경비가 절약되고, 설치 및 조립이 간편하여 종래의 파이프 시스템보다 공기를 단축시킬 수 있기 때문에 경제적인 잇점이 있을 뿐 아니라 부식에 대한 저항성, 뛰어난 전기 절연성 및 반영구적인 특징을 가지고 있어서 다른 재료보다 저렴한 가격을 가지고 있다. 또 강관이나 콘크리트관과는 달리 수행중인 파업의 성격과 재하환경에 맞게 재료 및 구조적 특징을 변형시켜 이용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 즉 섬유방향, 매트릭스의 종류 및 섬유의 적층수에 따라 산출 강도를 다르게 하여 수요자의 요구 조건에 맞는 최적화된 관을 가지고 실제 시공에 임할 수 있다.

현재 선진국에서는 GFRP관이 항공산업, 기계산업 등에서 부재로서 이용되고 있을 뿐 아니라, 지하 저장용 압력탱크, 많은 열을 받고 있는 발전소의 파이프 시스템, 부식에 대한 탁월한 저항성을 요구하는 화학공장, 고순도의 증류수를 필요로 하는 원자력 발전소의 Reactor 등에서 광범위하게 이용되고 있으며, 이에 대한 대표적인 연구기관은 A. S. T. M., A. P. I. 등이 있다<sup>2)~7)</sup>.

이에 본 연구에서는 앞에서 언급한 여러가지 장점들을 갖고 있는 GFRP관의 건설 구조용 재료로

서의 적용성과 파괴 안전성을 검토하기 위하여 FW성형법(Filament Winding Process)으로 제작된 일련의 GFRP관에 대하여 파괴실험을 수행하였다. 실험시 유리섬유의 적층수를 변수로 하여 하중의 변화에 따른 중앙처짐, 변형률 및 항복하중 등을 측정하였으며, 이들 결과를 토대로 유리섬유의 적층수에 따른 GFRP관의 항복하중, 하중과 변위의 관계, 하중과 변형률의 관계 및 파괴에너지의 변화 등을 고찰하여 GFRP관의 파괴 안전성을 고찰하였다.

## 2. 실험

파괴실험은 GFRP관에 대하여 3점 휨 하중법으로 수행하였으며, 실험시 하중변화에 따른 중앙처짐량의 변화, 휨 인장변형률의 변화 및 항복하중을 조사하였다. 이들 실험결과를 토대로 유리섬유의 적층수의 변화에 따른 GFRP관의 항복하중과, 하중-처짐 선도를 이용하여 계산된 파괴에너지를 비교, 분석 하였다.

### 2.1 사용재료 및 시험체

본 실험에서는 GFRP관 시험체 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.

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	1.6×10 <sup>-6</sup>	1.4~2.0	72.4	0.22

Table 2 Composition of glass fiber

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

GFRP관 시험체는 유리섬유의 배향각도가 하중 방향에 45°가 되도록 FW성형법에 의하여 제작되었으며, 길이는 120cm로 일정하게 하였다. 시험체

의 직경은 250mm로 일정하게 하였으며, 유리섬유의 적층수는 15층, 25층, 35층으로 변화하여 모두 3개의 시험체에 대하여 실험을 수행하였다. GFRP

관 시험체에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

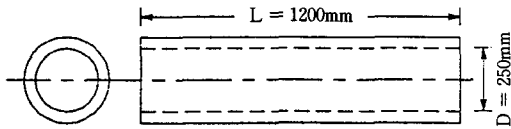


Fig. 1 GFRP pipe specimen

### 2.2 파괴실험

파괴실험시 하중재하는 만능시험기를 사용하여 시험체가 파괴할 때까지 하중을 1kgf/sec속도로 일정하게 재하하였으며, 하중이 20kgf씩 증가할 때마다 시험체의 하단에 부착한 스트레인 게이지와 중앙하단에 설치한 처짐측정기에 의하여 하중변화에 따른 인장변형률 및 중앙처짐량을 조사하였고, 아울러 시험체의 항복하중을 측정하였다. 파괴실험의 개략도는 Fig. 2와 같다.

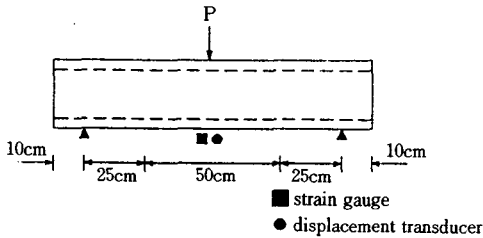


Fig. 2 The general view of fracture test

## 3. 결과 분석 및 고찰

### 3.1 유리섬유 적층수와 항복하중 및 파괴에너지의 관계

본 연구에서는 파괴실험시 GFRP관에 대하여 하중변화에 따른 중앙처짐량의 변화, 인장변형률의 변화 및 항복하중을 측정하였으며, 이들 결과를 Table 3에 정리하였다. Fig. 3은 GFRP관의 유리섬유 적층수에 대한 항복하중의 관계를 나타낸 것으로서, 이 그림에서 GFRP관의 항복하중은 GFRP관의 적층수가 증가함에 따라 선형에 가깝게 증가함을 알 수 있으며, 유리섬유의 적층수가 1층 증가함에 따라 약 200kgf의 항복하중이 증가함을 알 수 있다.

한편 파괴실험에 의해 측정된 GFRP관의 하중-처짐선도를 유리섬유의 적층수에 따라 Fig. 4~

Table 3 Fracture test results

D (mm)	N	Py (kgf)	$\delta y$ (mm)	$\epsilon y$ ( $\times 10^{-6}$ )	Gf (Kgf/cm)
250	15	775.0	12.12	1739	33.406
	25	2750.0	8.06	736	45.570
	35	4637.5	7.18	811	51.093

D = diameter of GFRP pipe; N = laminates of glass fiber; Py = yield load;  $\delta y$  = mid-span displacement at the yield load;  $\epsilon y$  = tensile strain at the yield load; Gf = fracture energy at the yield load

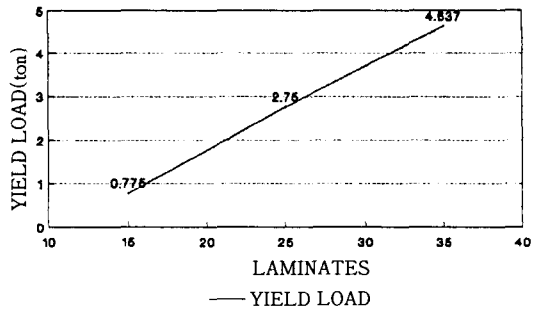


Fig. 3 The relationships between the laminates and the yield load

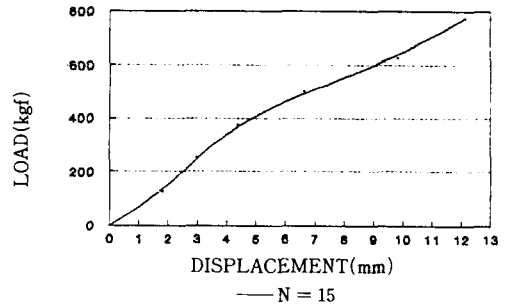


Fig. 4 The relationships between the load and the mid-span displacement (N = 15)

Fig. 6에 나타내었다. 본 연구에서는 Fig. 4~ Fig. 6의 하중-처짐 선도의 면적을 이용하여 산출된 GFRP관의 파괴에너지를 유리섬유의 적층수에 대하여 비교하였다. 파괴에너지의 계산은 다음과 같은 파괴에너지 관계식에 의해 계산하였다<sup>8)</sup>.

$$G_F = \frac{w_0 + w_1}{A}$$

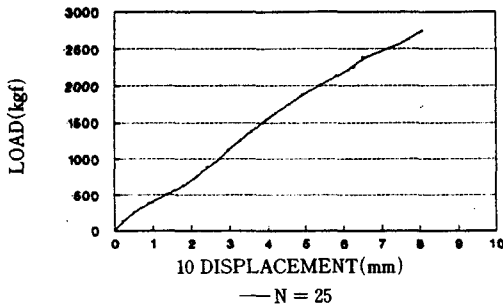


Fig. 5 The relationships between the load and the mid-span displacement(N = 25)

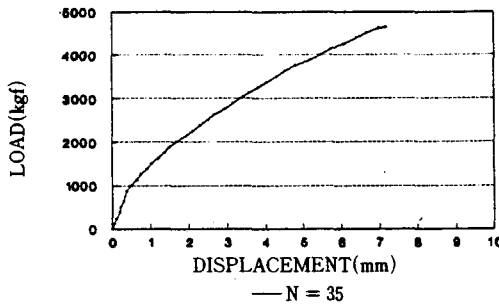


Fig. 6 The relationships between the load and the mid-span displacement(N = 35)

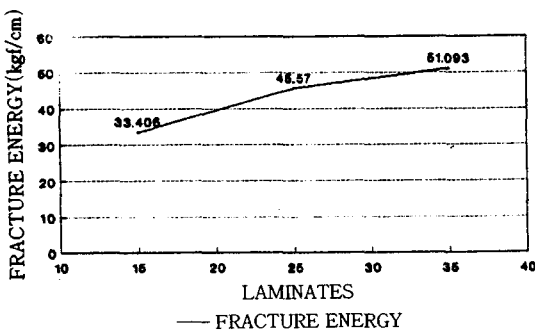


Fig. 7 The relationships between the laminates and the fracture energy of GFRP pipes

여기서 A는 시험체의 면적을 나타내고,  $w_0$ 는 하중-처짐선도의 면적을 나타내며,  $w_1$ 은 GFRP관의 자중에 의한 위치에너지의 변화값으로  $w_1 = mg \delta_0$  ( $m$ 은 GFRP관의 질량,  $g$ 는 중력가속도,  $\delta_0$ 는 자

중에 의한 처짐)이다. 본 실험에서는 GFRP관의 자중이 매우 적은 점을 감안하여 파괴에너지 계산 시  $w_1$ 은 무시하였다.

한편 본 연구에서는 GFRP관 시험체의 변형이 매우 커서 항복시까지의 파괴에너지를 각 시험체에 대하여 계산하였으며, 이들 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 GFRP관의 항복 시 파괴에너지는 GFRP관의 적층수가 증가함에 따라 선형에 가깝게 증가하였다.

### 3.2 유리섬유 적층수와 휨 변형률의 관계

본 연구에서는 하중변화에 따른 GFRP관의 휨 인장변형의 변화를 알아보기 위하여 시험체의 중앙부 하단에 스트레인 게이지를 부착하여 GFRP관의 변형률을 측정하였다. 이들 결과는 Fig. 8~Fig. 10에 유리섬유의 적층수와 인장변형률의 관계로 나타내었다. 이들 그림에서 휨을 받는 GFRP관은 유리섬유의 적층수가 클수록 변형이 작음을 알 수 있는데, 이는 매트릭스속에 내재된 고탄성 유리섬유가 GFRP관의 변형을 주도하기 때문으로 사료된다.

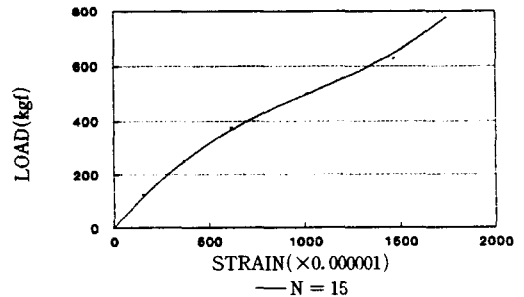


Fig. 8 The relationships between the load and the flexural strain(N = 15)

이상의 실험결과에서 GFRP관의 파괴에너지와 항복하중은 유리섬유의 적층수가 많을수록 증가하나, GFRP관의 항복시 중앙처짐 및 변형량은 유리섬유의 적층수가 많을수록 감소함을 알 수 있다. 한편 GFRP관의 시공시 GFRP관 내에 있는 유리섬유와 매트릭스의 어떤 층도 파손되지 않는다면 GFRP관에 더욱 하중을 증가시킬 수 있으며, 만일 어떤 층이 파손기준에 달하고 있다면 설계하중을

감소시키지 않으면 안될 것이다. 즉 현재 시공상 GFRP관의 안전을 생각해서 5% 정도의 변형을 설계치로 하고 있지만, 수지의 개량에 의해 횡방향의 파단변형을 감소시킬 수 있으면 이로 인해 최약층의 파손을 지연시킬 수 있으므로 우수한 수지의 개발이 필연적이다.

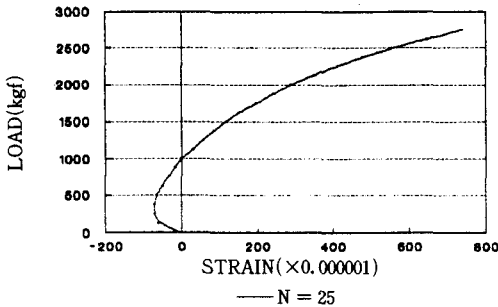


Fig. 9 The relationships between the load and the flexural strain(N = 25)

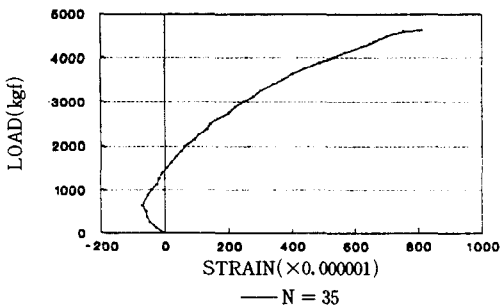


Fig. 10 The relationships between the load and the flexural strain(N = 35)

### 3.3 타 재료관과의 강도비교

지하에 매설된 관은 토압과 노면하중인 운압에 의한 외부하중을 받고 관이 변형되며 관내부에서는 응력이 발생된다. 또한 매설된 관은 재료, 두께별로 하중에 의한 재료별 지지력 강도가 상이하야 관이 변형되는 거동은 서로 다르다. 이 하중 지지력 강도의 크기는 매설된 관이 받는 외부하중의 지지력 강도와 약간의 차이는 있으나 재료별 지지력은 매설관의 변형거동과 같다. 한편 미국의 NEMA TC-10-1973(PVC and ABS Plastic Communications Duct and Fittings for Underground Installation)에서는 매설관의 강성을 관직경의 5% 수직 변형 이내의 강도로 규정하고 있다.

본 연구에서는 GFRP관이 지하 매설관으로서의 적용성과 파괴 안전성을 검토하기 위하여 타 재료관과의 강도를 비교하였다. 본 연구에서 실험한 GFRP관은 모두 관 직경의 5% 변형( $\delta = 12.5\text{mm}$ ) 이내에서 항복되었기 때문에 GFRP관과 타 재료관의 강도비교를 위하여 GFRP관의 2.5% 변형시의 강도를 산출하였으며, 이를 Table 4에 정리하였다. 또한 Table 4에서 산출된 GFRP관의 2.5% 변형시의 강도를 타 재료관의 강도와 비교하여 Table 5에 이들 결과를 정리하였다.

Table 5의 결과에서 GFRP관은 타 재료관인 경질 PVC관, 고밀도 PE관, Nylon관 등에 비해 상대적으로 매우 높은 강도를 가지고 있음을 알 수 있다. 즉 유리섬유 적층수가 35층인 GFRP관의 강도는 각각 경질 PVC관의 1.4배, 고밀도 PE관의 4.6배, Nylon관의 4.8배 큰 값을 가지고 있다. 이들 결과에서 GFRP관의 유리섬유의 적층수를 적절히 조정함으로써 앞으로 GFRP관이 지하 매설용관으

Table 4 Flexural strength of GFRP pipes when the mid-span displacement is 2.5% of the diameter

N	t (cm)	d <sub>1</sub> (cm)	d <sub>2</sub> (cm)	P <sub>y</sub> (kgf)	$\delta y$ (mm)	P <sub>2.5</sub> (kgf)	$\delta_{2.5}$ (mm)	M <sub>2.5</sub> (kg×cm)	$\sigma_{2.5}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
15	0.3	25	25.6	775.0	12.12	480.0	6.25	12000.0	80.5
25	0.5	25	26.0	2750.0	5.53	2848.5	6.25	71212.5	284.4
35	0.7	25	26.4	4637.5	7.18	4318.5	6.25	107962.5	305.3

N = laminates of glass fiber; t = thickness of GFRP pipe; d<sub>1</sub> = inside diameter of GFRP pipe; d<sub>2</sub> = outside diameter of GFRP pipe; P<sub>y</sub> = yield load;  $\delta y$  = mid-span displacement at the yield load; P<sub>2.5</sub> = load when the mid-span displacement is 2.5% of the diameter;  $\delta_{2.5}$  = mid-span displacement when the mid-span displacement is 2.5% of the diameter; M<sub>2.5</sub> = bending moment when the mid-span displacement is 2.5% of the diameter;  $\sigma_{2.5}$  = flexural strength when the mid-span displacement is 2.5% of the diameter.

**Table 5 The flexural strength comparison between GFRP pipes and other pipes**  
 [Unit : kg/cm<sup>2</sup>]

Hard PVC pipe	High density PE pipe	Nylon pipe	GFRP pipe		
			N = 15	N = 25	N = 35
216.3	66.78	63.0	80.5	284.4	305.3

N = laminates of glass fiber

로 사용될때 이들 타재료관보다 높은 파괴 안전성을 가질 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 건설 구조용 재료로서 유리섬유 보강 플라스틱관의 적용성과 파괴 안전성을 검토하기 위해 일련의 파괴 실험을 실시하고, GFRP관이 매립관으로 사용될 때의 강도를 타 재료관과 비교, 검토한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 1) GFRP관에 대한 파괴실험 결과에서 GFRP관의 항복하중은 GFRP관의 직경이 클수록 선형에 가깝게 증가하였으며, GFRP관의 인장변형률은 유리섬유의 적층수가 클수록 적었고, 하중이 증가함에 따라 불규칙하게 증가하는 양상을 나타냄으로써 GFRP의 매트릭스 속에 내재된 고탄성 유리섬유가 GFRP관의 변형을 주도함을 알 수 있었다.
- 2) GFRP관의 하중-처짐선도의 면적을 이용하여 계산한 GFRP관의 파괴에너지는 GFRP관의 직경이 클수록 선형적으로 증가하였으며 유리섬유의 적층수가 클수록 그 증가폭이 컸다.
- 3) GFRP관이 지하 매설관으로 사용될때 경질 PVC관, 고밀도 PE관, NYLON관 등에 비해

상대적으로 높은 파괴 안전성을 가지고 있어서 이들 타 재료관의 대체용으로 사용될 수 있음을 알 수 있었다.

- 4) GFRP관이 다소 큰 변형을 갖고 있는 것이 GFRP관의 설계시 해결 되어야 할 문제점으로 판단되며, 이에 대한 적절한 보강방법이 차후의 연구에서 검토되어야 한다고 사료된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) FRP入門, (社) 強化플라스틱技術協會, p. 27, 1976.
- 2) API-Specification 5LR-reinforced thermosetting resin line pipe.
- 3) API-Specification RP5L4-care and use of reinforced thermosetting resin line pipe.
- 4) ASTM D3517-Specification for reinforced plastic mortar pressure pipe.
- 5) ASTM D3754-Specification for reinforced plastic mortar sewer and industrial pressure pipe.
- 6) ASTM X-23, 11-4-3-Specification for reinforced plastic mortar sewer and industrial pressure pipe.
- 7) ASTM X-23, 14-14-4-Specification for reinforced plastic mortar pipe fittings for nonpressure applications.
- 8) Hillerborg, A., Concrete fracture energy tests performed by 9 laboratories according to a draft RILEM recommendation, Lund institute of technology, Division of building materials, Report TVBM-3015, 1983.