

'09 춘계학술대회 우수 논문

상수도용 유리섬유복합관의 구조적 거동특성 및 안전성 평가

이보베*, 이승식**, 주형중***, 윤순중****

Characteristics of Structural Behavior and Safety Estimation of Water Supply GFRP Pipe

Lee, Bo-Be*, Lee, Seungsik**, Joo, Hyung-Joong***, and Yoon, Soon-Jong****

ABSTRACT

In this paper, we present the results of experimental and analytical investigations on the structural behavior of GFRP pipes used in the water supply pipeline system. Cross-section of the pipe is consisted with two GFRP tubes and polymer mortar between the tubes. Due to the advantages such as light-weight, corrosion resistance, smooth surface, flexibility, etc., use of GFRP pipe in the water supply pipeline system is ever increasing trend. Therefore, more optimized structural design methodology should be developed. In the investigation, we conducted theoretical and analytical studies on the load versus radial deformation characteristics of GFRP pipes. In addition, ring stiffness test is also performed. Test results are compared with theoretical and analytical results and it was found that the results are agreed well within 5% of radial deformation. Finally, it was also found that the GFRP pipes used in the water supply pipeline system are strong enough to satisfy the industrial requirements.

초 록

이 논문에서는 상수도관에 사용되는 GFRP관의 구조적 거동에 대한 실험적, 이론적 연구의 결과를 제시하였으며, 관의 단면은 두개의 GFRP층과 그 층 사이의 폴리머 모르타르 층으로 구성되어 있다. GFRP는 경량성, 부식저항성, 관의 내부 표면 조도 향상, 유연성 등이 뛰어나기 때문에 상수도 계통의 관으로써 사용이 계속적으로 증가되고 있는 추세이다. 그러므로 더욱 최적화된 구조설계법이 개발되어야 한다. 이 연구에서 GFRP관의 하중-원주방향변위에 대한 특성을 이론적, 해석적으로 조사하였으며 추가적으로 원강성시험을 하였다. 시험결과를 이론적, 해석적 연구결과와 비교하였으며, 원주방향의 변위가 5% 이내에서는 결과들이 서로 잘 일치하였다. 결과적으로 상수도 계통에 사용되는 GFRP관은 업계의 요구조건을 충분히 만족함을 알 수 있었다.

Key Words : 유리섬유복합관(GFRP Pipe), 원강성(Ring Stiffness), 안전성 평가(Safety Estimation), 실험(Experiment), 유한 요소해석(FEA)

1. 서 론

유리섬유복합관은 변형복원능력 및 타관과의 호환성 등이 우수하며, 지중에 매설할 경우 하부 지반지지력 부족으로 인한

침하율 감소, 침하에 따른 재료의 파손 위험성을 감소시킬 수 있는 등 다양한 장점을 보유하고 있다. 또한 보강섬유의 배치 및 보강량을 변화시켜 역학적 성질을 설계할 수 있기 때문에 다양한 요구조건을 충족할 수 있는 설계가 가능하여 여러 토

* 홍익대학교 대학원 토목공학과 구조공학전공

**+ 한국해양수산기술진흥원, 교신지자(E-mail: drslee@kimst.re.kr)

*** 홍익대학교 대학원 토목공학과 구조공학전공

**** 홍익대학교 토목공학과 교수

목현장에서 그 사용성이 증대되고 있다. 그러나 기존 콘크리트 관 및 강관에 비해 사용실적이 적고 최근에 개발되어 사용되고 있는 부재로 구조적 안전에 대한 인식이 부족하다. 따라서 안전에 대한 신뢰성을 확보하기 위한 연구가 필요하다.

이 연구에서는 유리섬유복합관을 구성하는 각 재료들에 대한 구조적 거동을 예측하기 위해 역학적 성질을 결정하였고, 관 전체의 유한요소해석과 원강성시험을 통하여 구조적 거동특성을 분석하고 안전성을 평가하여 적절성 여부를 판단하였다. 또한 유리섬유복합관의 접합부 안전성을 검토하기 위해 널링시험, 수밀시험 등을 수행하여 유리섬유복합관의 구조적 안전성 확보 및 설계, 시공을 위한 기초자료를 제안하였다.

2. 유리섬유복합관

2.1 유리섬유복합관의 특징

유리섬유복합관의 단면은 내부와 외부의 유리섬유강화플라스틱(Glass fiber reinforced plastics, GFRP), 폴리머 모르타르로 크게 세부분으로 구성되며 각각 내부 표면 조도 향상, 구조적 기능 강화, 외부 화학적 저항성 향상 등의 역할을 담당하고 있다. 유리섬유복합관의 환경에 따라 구조 및 역학적 성질 변화에 차이를 보이는데, 이 연구에서는 현재 가장 광범위하게 사용되고 있는 $\phi 1,200\text{ mm}$ 의 복합관에 대한 특성을 조사하였다. 유리섬유복합관은 Fig. 1에서 보여주고 있는 바와 같이 연속방법에 의하여 제작되며, 상세한 단면의 구성은 Fig. 2에 나타난 바와 같다. 각 층의 두께는 Table 1에 정리하여 나타내었다.

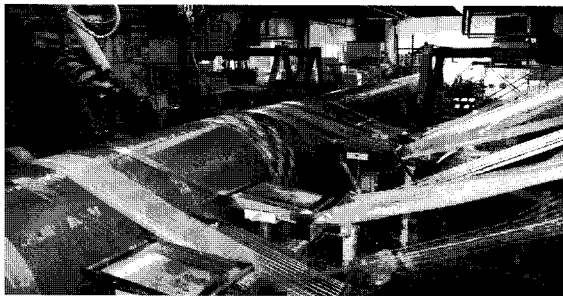


Fig. 1 Manufacturing process of GFRP Pipe(Hankuk Fiber Co.[1]).

Table 1 Thickness of GFRP water supply pipe

Layer	G- $\phi 1,200$	S- $\phi 1,200$
Inner	7.3 mm	12.5 mm
Polymer mortar	10.4 mm	3.1 mm
Outer	6.4 mm	8.7 mm
Total	24.1 mm	24.3 mm

G: waste water supply S: water supply

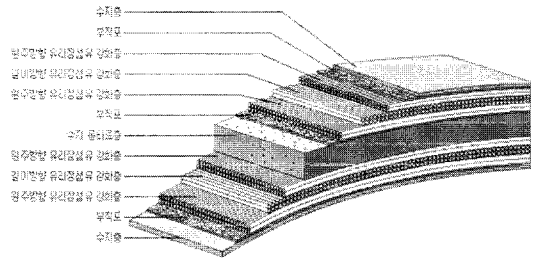


Fig. 2 Cross-section configuration of GFRP pipe(Hankuk Fiber Co.[1]).

2.2 유리섬유복합관 재료의 역학적 성질

유리섬유복합관의 각 층을 구성하고 있는 폴리머 모르타르 및 GFRP의 역학적 성질은 다음과 같이 실험을 통해 조사하였다.

(1) GFRP

유리섬유복합관을 구성하는 원주방향 GFRP 인장강도시험 시편은 폴리머 모르타르 층을 제외하고 일정한 폭을 가지는 링(Ring)형태로 재단하고 이를 삼등분하여 Fig. 3(a)와 같이 호의 형태로 제작하였다. 또한, 축방향 시편은 Fig. 3(b)와 같이 덤벨형태(Dumbbell shape)로 절단하여 제작하였다.



Fig. 3 Tensile test specimens of GFRP pipe.

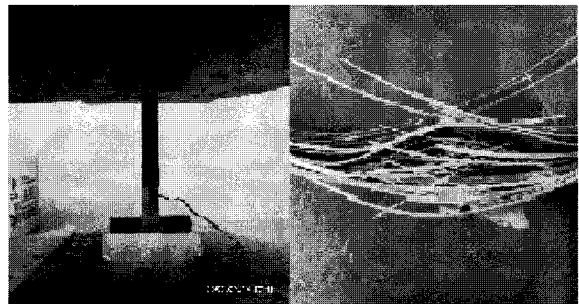


Fig. 4 Tension test and failed specimen.

인장시험은 중앙부에 변형률계지기를 부착한 후, Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 UTM에 시편을 설치하고 5 mm/min 속도로 변위제어방식으로 인장하중을 재하였다. 파괴형태는 Fig. 4(b)에 나타내었으며, 길이방향 및 원주방향에 대한 GFRP의 탄성계수는 측정된 응력-변형률 관계로부터 구했으며 각각 21.93 GPa, 24.9 GPa 이었다.

(2) 폴리머 모르타르 (Polymer mortar)

폴리머 모르타르는 모래, 폴리에스터 수지, 탄산칼슘의 복합체로 유리섬유복합관의 내층을 구성하고 있는 요소로서, 복합관의 강성을 증대시키고 부력에 대한 안정성을 확보한다. 이러한 폴리머 모르타르의 역학적 성질을 추정하기 위한 실험법은 아직 규정된 바가 없기 때문에 이 연구에서는 콘크리트의 압축강도시험 공시체와 유사한 방법 (KS F 2405[2])으로 실험하였다. 실험에 사용된 폴리머 모르타르는 실제 GFRP관 제작에 사용되는 구성성분과 동일한 것으로 제조공정에서 시료를 채취하여 원형공시체 형태로 제작하였다. 실험결과 폴리머 모르타르 공시체의 파괴형태를 Fig. 5에서 보여주고 있으며, 콘크리트 공시체와 비교할 때 비교적 큰 연성을 가지고 있으나 최종 폴리머 모르타르의 파괴강도는 약 95.6 MPa (보통 고강도콘크리트 강도의 2배 이상)로 측정되었으며, 탄성계수는 측정된 응력-변형률 관계로부터 할선탄성계수 (Secant modulus of elasticity)를 구했으며, 10.6 GPa (보통 고강도콘크리트 탄성계수의 약 1/2.5)로 추정되었다.

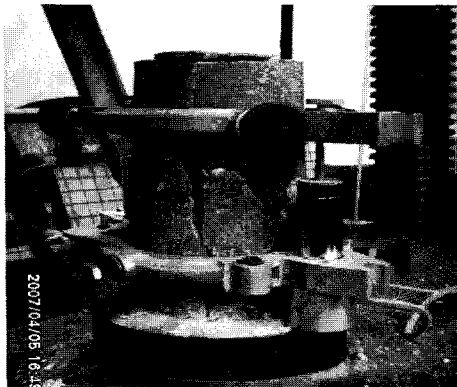


Fig. 5 Compression failure of polymer mortar specimen.

3. 유리섬유복합관의 구조적 거동

3.1 이론적 거동예측

상수도관은 대부분 지중에 매설되므로 토압 및 상재하중 등의 외력에 충분히 안전하도록 설계되어야 한다. 따라서 유리섬유복합관을 상수도관으로 사용할 경우 토압 및 상재하중 등에 대한

설계가 가능하도록 구조적 거동특성에 대한 조사가 필요하며, 이 연구에서는 이론 및 유한요소해석을 통해 거동을 예측하고 실험적 연구결과와 비교하여 예측결과의 타당성을 검증하였다.

유리섬유복합관과 같이 힘을 받는 두께가 일정한 원통관에서 원의 도심을 지나는 축에 대해 양쪽에서 크기가 같은 힘 P가 작용할 경우 하중-모멘트 관계식은 식 (1)과 같이 유도되며, 원주의 임의 점에서 도심방향의 변위는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다 (Moser, 2001[3]).

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} = -\frac{M}{EI} \tag{1}$$

$$\delta_{cd} = \frac{PR^3}{4EI} \left(\pi - \frac{8}{\pi} \right) \tag{2}$$

식 (1)에서 ρ는 하중을 받아 변형된 원통관의 곡률반경이고, R은 하중을 받기전 변형되지 않은 원통관의 곡률반경 즉, 원통관의 공칭반지름이며, 왼쪽 항(1/ρ-1/R)은 하중을 받아 변형된 원통관의 곡률변화를 의미한다. 따라서 식 (2)로부터 외력을 받는 유리섬유복합관의 변형을 예측할 수 있다. 또한 3층 구조 단면의 휨강성(EI)을 결정하기 위해 적층판이론을 적용하였으며, 이때, 탄성계수 (E)는 23.52 GPa 이었다. (이 등, 2007[4]).

3.2 유한요소해석

유리섬유복합관의 구조적 거동특성의 분석을 위해 GTSTRU DL [7]를 사용하여 유한요소해석(Finite element analysis, FEA)을 하였다. 모델링에 사용된 요소는 SBHQ6 (Stretching and bending hybrid quadrilateral)요소로서 각 절점당 6개의 자유도를 가지고 있으며, 절점 3에서의 자유도를 Fig. 6에 나타내었다. 유한요소해석 모델은 내외부 GFRP와 내층 모르타르로 구성된 것과 동일하게 3층으로 모델링하였으며, 역학적 성질은 적층판이론으로 추정된 값을 적용하였다. 또한, 경계조건은 하중과 평행한 방향에서 관의 하부를 고정지점으로 하였으며 하중을 증가시켜가면서 구조적 거동을 조사하였다.

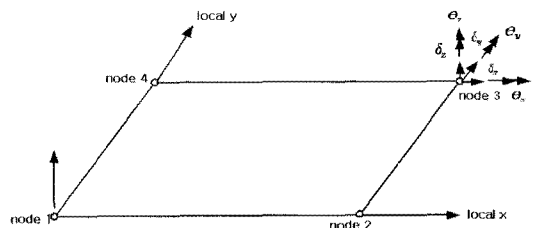


Fig. 6 SBHQ6 element(GTSTRU DL, 2002[7]).

3.3 원강성시험

유리섬유복합관의 구조적 거동을 조사하기 위한 실험적 연구는 ISO-9969 (Thermoplastics pipes-determination of ring stiffness[8])에서 제안하고 있는 원강성시험을 통해 수행되었다.

원강성 측정을 위한 시험체는 $\phi 1,200\text{ mm}$ 유리섬유복합관 1본에서 30 cm의 길이로 상수도관 (S-type)과 하수도관 (G-type) 각각 총 3개씩의 시험편을 채취하였으며, Fig. 7과 같이 원강성시험기를 사용하여 50 mm/min 속도로 하중을 가하였다. 또한, 관의 변형상태를 조사하기 위해 상하부 변위 및 변형률을 측정하였다.

시험결과 모든 시험편에서 Fig. 8과 같이 상하부 내측면에서 GFRP의 전형적인 인장파괴 형태를 보였으며, 폴리머 모르타르 층은 시험편이 파괴될 때 까지 균열을 육안으로 관찰할 수 없었으나 GFRP가 파괴되면서 동시에 파괴되는 현상을 보였다.

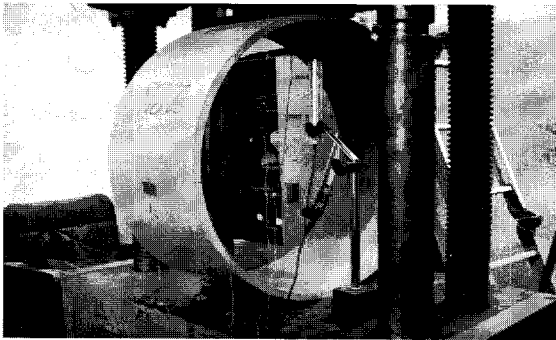


Fig. 7 Ring stiffness test of GFRP pipe.

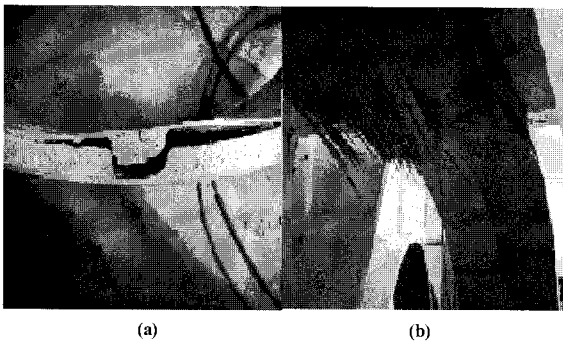


Fig. 8 Failed test specimen.

또한 유리섬유복합관 표면에 부착한 변형률계이지로 측정된 내측면의 변형률은 17,000 ~ 20,000 $\mu\epsilon$ 의 분포로서 GFRP의 파단 변형률과 유사한 값을 나타내었다.

3.4 시험결과 및 분석

계측기로부터 측정된 데이터로부터 유리섬유복합관의 하중-

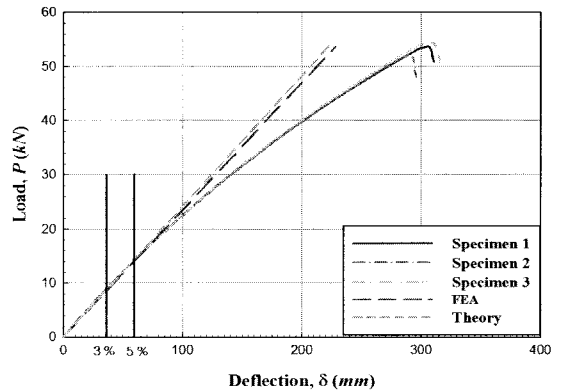


Fig. 9 Load- displacement relation (G- $\phi 1,200\text{ mm}$).

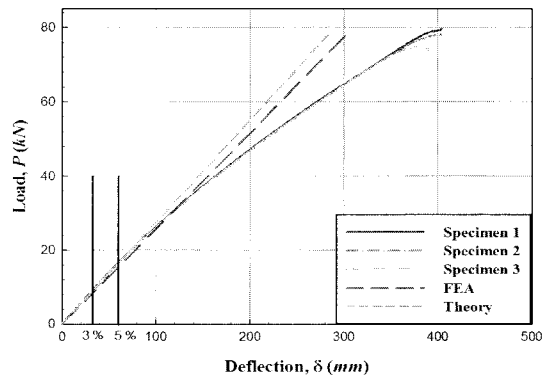


Fig. 10 Load-displacement relation (S- $\phi 1,200\text{ mm}$).

변위 관계와 이론적 예측 결과를 비교하여 Figs. 9, 10에 나타내었으며, Figs. 9, 10에서 유리섬유복합관은 설계 파괴변형률기준 (3%, 5%)[1]까지 선형에 가까운 거동을 보였다.

Figs. 9, 10에 나타낸 유리섬유복합관의 하중에 따른 변위를 비교하면 하중재하 초기단계에서는 유사한 값을 나타내고 있으나 하중이 증가하면 거동의 차이가 발생하였으며, 이는 해석에서 재료 및 기하 비선형성을 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 상수도관은 관체 변형률 (Deformation ratio) 3%를 기준 (한국상수도협회, 2005[9])으로 설계되므로 이 구간까지는 해석결과와 실험결과가 일치하는 경향을 나타내고 있음을 확인하였다. 또한, 유리섬유복합관의 크리프 변형 (creep deformation)과 같은 장기거동을 고려하여 5% 변형으로 최근 한국수자원공사에서 설계기준을 제안한 바 있으며, 이 기준의 용력범위에서는 선형탄성거동을 하고 있음을 확인할 수 있었다.

시험결과 유리섬유복합관의 최종파괴는 지름의 약 22% 변형에서 발생하는 것으로 확인되어 외력에 대해서 충분히 안전한 것으로 확인된다. 시험결과와 이론적 거동 예측으로부터 유리섬유복합관에 3%, 5%의 변위가 발생할 때의 하중을 비교하여 Table 2에 나타내었으며, 이론적, 실험적 결과의 차가 미소함을 알 수 있다.

Table 2 Comparison between experimental and theoretical loads

Type	Displ. (%)	Load (kN)		e'
		① Experiment	② Theory	
G- φ 1,200	3	8.93	8.70	2.57
	5	14.31	14.50	-1.33
S- φ 1,200	3	10.29	9.93	3.50
	5	16.6	16.55	0.30

* $e' = \frac{① - ②}{①} \times 100(\%)$

Table 4 Test criteria for the water pressure (KS M 3370[10])

Description	Test pressure [MPa]			
	Type 1	Type 2	Type 3	
Pipe diameter (mm)	~ 300	2.4	1.5	0.9
	350~600	2.4	1.5	0.9
	700~1000	2.4	1.5	0.9
	1,100~1,200	2.4	1.5	0.9
	1,250~	2.4	1.5	0.9
Pressure maintaining time	Maintain 15 min.			

4. 유리섬유복합관의 안전성 평가

유리섬유복합관은 외력에 대해서는 충분히 안전한 것으로 평가되었으나 상수도관으로 사용할 경우 내부의 수압에 대한 검토도 필요하다. 이 연구에서는 유리섬유복합관의 외압 및 내압에 대한 안전성을 관련 규격을 참고하여 다음과 같이 검토하였다.

4.1 관의 외압 평가

(1) 인장시험

유리섬유복합관의 외압에 대한 안전성은 인장강도시험과 원강성시험을 통해 확인하도록 KS M 3370[10]에서 제안하고 있다. 원강성과 인장강도시험은 이미 앞에서 설명하였으므로 이 절에서는 관련기준과 비교를 통해 안전성 여부를 판단하였다.

유리섬유복합관의 인장강도시험결과 측정된 인장강도는 Table 3의 초기 길이방향 인장비강도 (KS M 3370[10] 참조) 기준 이 상이면 합격으로 규정하고 있으며, 시험결과 φ1,200 mm관을 기준으로 초기 길이방향 인장비강도가 2,051 N/mm로 기준치인 460 N/mm를 초과하여 매우 안전한 것으로 평가되었다.

Table 3 Initial longitudinal specific tensile strength (KS M 3370[10])

Nominal diameter (mm)	Nominal pressure (PN, N/mm)			
	≤4	6	10	16
1200	205	260	380	460

4.2 관의 내압 평가

(1) 수압시험

유리섬유복합관의 내압에 대한 안전성은 Table 4에 나타난 KS M 3370[10]을 적용하여 직접 수압시험을 통해 확인하였다. 일반적으로 하수도관은 중력식이므로 수압 및 수밀에 대한 시험이 필요치 않다. 따라서 상수도관 S-type에 대해서만 수압을 검토하였다.

유리섬유복합관의 수압시험 시편은 완성된 제품의 일부를 절단하여 제작하였으며, 시험은 Fig. 11과 같이 수압시험기에

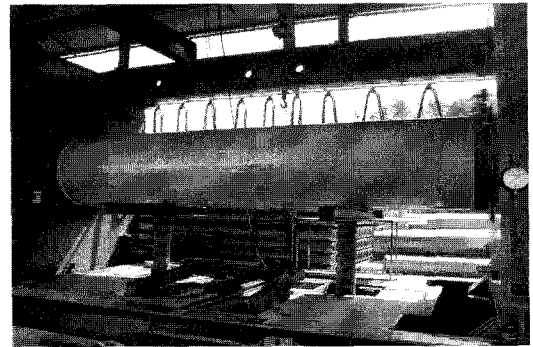


Fig. 11 Water pressure test of GFRP pipe.

관을 설치한 후 양단부에서 유리섬유복합관의 1종의 사용압력인 1.6 MPa의 1.5배인 2.4 MPa로 15분 동안 유지하여 시험하였다. 수압시험결과 15분 후에도 누수가 발생하지 않아 관련기준(KS M 3370[10])을 만족하는 것으로 나타났다.

(2) 내압파괴시험

내압파괴시험 시편은 원강성시험과 유사하게 유리섬유복합관을 일정길이로 절단하여 제작하였으며, KS M 3370[10]에서 제안하고 있는 방법에 따라 내압파괴시험을 하였다. 시험은 (주)한국화이버 한양공장에 설치되어 있는 내압파괴시험기를 사용하였으며, Fig. 12에 나타난 바와 같이 상하부 받침으로 구성되어 있어 이를 작동시키면 유리섬유복합관 시편에 변내인장력을 가하게 되어 내압에 대한 성능을 측정할 수 있다.

시험규격 (KS M 3370[10])을 참고하여 Table 4에 나타난 바와 같은 관종에 대해서 파괴강도가 사용압력의 1.3배 이상 이 될 경우 합격으로 규정하고 있는데, φ1,200 mm 관 (Type 1 관)에 대한 시험결과 파괴강도가 약 4.83 MPa로 측정되었으며, 사용압력인 1.6 MPa (Table 5 Type 1 참조)보다 3.02배 큰 것으로 조사되었으므로 내압에 대해서도 충분히 안전하다는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 12 Failure test of GFRP pipe.

4.3 접합부

(1) 접합부 수밀시험

유리섬유복합관은 관의 운반 및 시공 등의 이유로 일정길이로 절단하여야 하며, 기존 강재와 달리 용접 등의 방법으로는 접합이 불가능하므로 Fig. 13에 나타난 바와 같이 별도의 소켓 등을 사용하여 접합부를 연결·보강하는 방법을 채택하고 있다. Fig. 13에서 좌우측 고무밴드인 EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer)의 부착길이는 각각 80.7 mm, 150 mm이다[1].

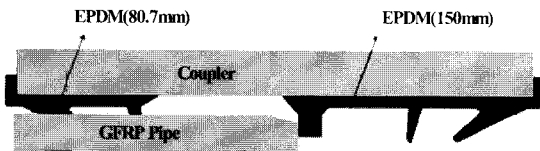


Fig. 13 Components of the joint system.

접합부에 대한 수밀성을 조사하기 위해 Fig. 14에 나타난 바와 같이 접합부를 수압시험장치 중앙에 위치하도록 설치한 후 관련 규정 (KS M 3370[10])을 적용하여 수압시험을 하였다. 관련 규정에서 제안하고 있는 수압은 Table 5에 나타내었으며, 사용압력을 15분 동안 유지시킨 후 누수를 확인한결과 접합부의 누수는 발생하지 않아 우수한 수밀성능 요구조건을 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

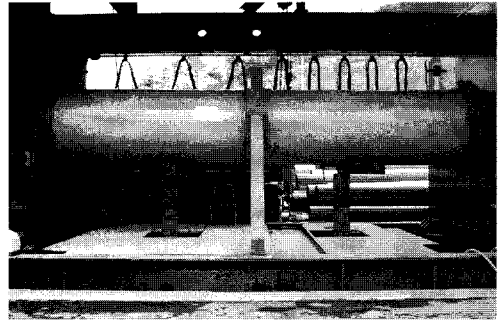


Fig. 14 Watertightness test at the joint.

Table 5 Water pressure at the joint (KS M 3370[10])

Description	GFRP pipe type		
	Type 1	Type 2	Type 3
Pressure (MPa)	1.6	1.0	0.6
Test pressure (MPa)	2.4	1.5	0.9

(2) 접합부 각변형 수밀시험

유리섬유복합관을 매설할 경우 지반조건 및 시공자의 숙련도에 따라 접합부에서 각변형이 발생할 수 있으며, 이에 따른 수밀성능을 조사하기 위해 접합부 각변형 수밀시험을 하였다. 접합부 각변형 수밀시험은 현장시공시 뒀배관을 통한 곡선형관을 부설할 때 적용하도록 관련 규정에서 권장하고 있으나 유리섬유복합관 접합부에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 직전 구간 접합부에 임의의 각변형이 발생하도록 하여 수밀시험을 하였다. 각변형 수밀시험은 접합부 수밀시험과 유사하게 접합부를 수압시험기 중앙에 위치시킨 후 접합부 부근에서 유리섬유복합관의 길이방향에 대한 직각방향으로 편심하중을 재하여 접합부에서 1°의 변형각을 발생시킨 후 수압을 가하였다. 수압은 사용압력의 1.5배인 2.4 MPa, 사용압력의 2.0배인 3.2 MPa의 수압을 각각 15분, 24시간 유지한 결과 누수가 발생하지 않아 접합부는 관련 규정(KS M 3370[10])을 만족하였으며, 수밀성능 요구조건을 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

Table 6 Water pressure at the angularly deflected joint

Description	GFRP pipe type		
	Type 1	Type 2	Type 3
Pressure (MPa)	1.6	1.0	0.6
Pressure (15 min) (MPa)	2.4	1.5	0.9
Pressure (15 hrs) (MPa)	3.2	2.0	1.2

5. 유리섬유복합관의 보강

지중에 매설되는 유리섬유복합관의 경우 현장에 시공된 후에 발생 가능한 여러 가지 문제점에 대해서 국부적인 보강방법이 고려되어야 하며, GFRP의 재료적 특성상 대부분의 보수, 보강은 핸드레이업 방법을 사용하고 있다. 유리섬유복합관의 경우 접합부의 수밀성 및 연약지반 등의 영향으로 발생된 국부적 손상에 대해서는 핸드레이업 방법을 사용하고 있으며, 이 연구에서는 핸드레이업 방법으로 보강한 경우에 대한 안전성을 다음과 같이 검토하였다.

5.1 핸드레이업 보강 방법

핸드레이업은 섬유강화플라스틱 (Fiber Reinforced Polymer, FRP) 생산방법의 하나로써 유리섬유매트나 직물을 이형처리시킨 몰드에 놓은 후 수지를 브리쉬 또는 롤러를 이용하여 바르고 함침시킨 후 적층, 경화시키는 방법이다. 이 방법은 시공이 간단하며 경화제를 사용할 경우 시간을 단축시킬 수 있는 방법으로 GFRP 부재의 보강방법으로 가장 널리 사용되고 있다. Fig. 15는 유리섬유복합관 접합부에 대한 핸드레이업 보강을 예로써 나타낸 것이다.

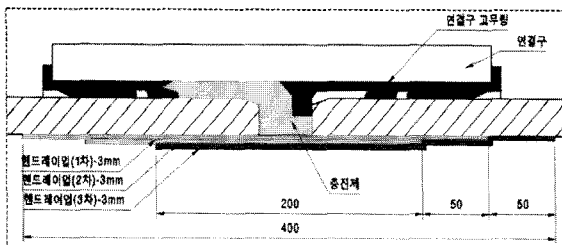


Fig. 15 Reinforcement by hand ray-up layer at the joint[1].

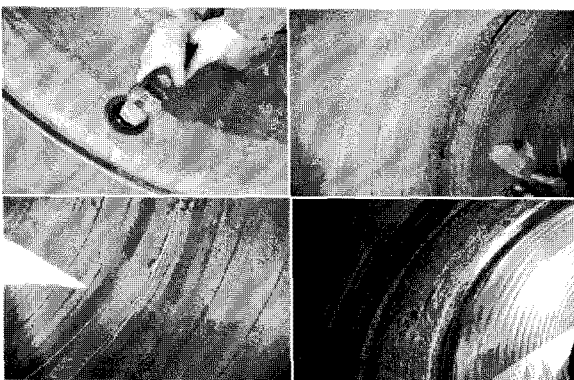


Fig. 16 Reinforcement by hand ray-up.

유리섬유복합관에 대한 핸드레이업 보강은 관의 통수능을 저해하지 않는 범위에서 수행되어야 하므로 두께를 약 1 cm이하로 보강하며, 보강방법은 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에 나타낸 보강순서는 우선 보수보강할 위치를 샌딩하여 표면을 거칠게 하고, 아세톤액으로 세척한 후 핸드레이업으로 보수보강하고 있다.

5.2 원강성시험

핸드레이업으로 보강한 유리섬유복합관의 구조적 거동을 조사하기 위해 원강성시험을 하였다. 원강성시험은 앞에서 설명한 방법과 동일하게 9 mm로 핸드레이업 보강된 1개의 시편에 대해 수행하였으며, 시험결과는 Table 7에 나타내었다. 원강성시험 결과 유리섬유복합관이 파괴될 때 까지 핸드레이업 보강부위에는 어떠한 손상도 관측되지 않았다. 즉, 유리섬유복합관에 변형이 발생하더라도 핸드레이업으로 보강한 FRP는 복합관과 같이 변형되는 것으로 판단된다.

Table 7 Results of the ring stiffness test

Deformation ratio	Failure load (kN)
3%	22.07
16%	98.79

5.3 유한요소해석

핸드레이업 보강 유리섬유복합관의 구조적 거동을 조사하기 위한 구조해석은 ANSYS Ver. 11[11]을 사용하였으며, 해석결과 유리섬유복합관의 변형모양을 Fig. 17에 나타내었다. 또한, 변형률 (Deformation ratio)에 따른 하중을 Table 8에 정리하여 나타내었다.

보강에 사용한 핸드레이업 FRP (9 mm)의 탄성계수는 11.1 GPa, 극한강도는 196.5 MPa이며, 이 수치는 핸드레이업 FRP를 별도로 제작하고, 인장시험을 수행하여 결정된 것이다.

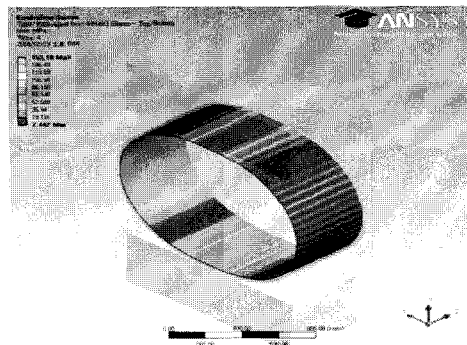


Fig. 17 Deformed shape of GFRP Pipe with hand ray-up reinforcement.

Table 8 FEA result of GFRP Pipe with hand ray-up reinforcement

Deformation ratio	Load (kN)
1%	8.53
3%	25.59
5%	42.64
16%	136.45

5.4 결과의 비교 및 분석

원강성시험 결과와 유한요소해석 (FEA) 결과를 비교하여 Fig. 18에 나타내었다. Fig. 18에서 핸드레이업 보강두께에 따른 관의 변형을 나타낸 것으로 9 mm로 보강한 경우 설계 파괴기준 (5%) 미만에서는 실험값과 해석값이 유사하며, 보강두께가 증가할수록 변형률 (Deformation ratio)이 감소하고 있음을 확인할 수 있다.

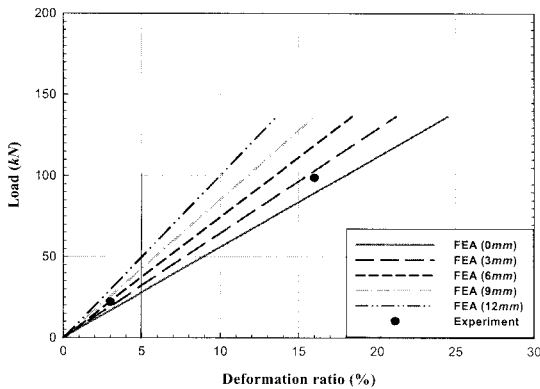


Fig. 18 Comparison of results.

6. 결론

이 연구에서는 유리섬유복합관의 구조적 거동 특성, 안전성 및 수밀성능에 대해 실험과 유한요소해석으로 조사하였다. 유리섬유복합관은 기존 설계파괴변형률 기준인 변형률 3%, 5% 이내에서는 선형탄성거동을 하였으며, 기존 설계기준 파괴변형률은 원강성시험의 파괴시 변형률 (22%)에 비해 매우 낮은 값을 나타내고 있기 때문에 안전성을 확보하고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 다양한 단면치수에 대한 변수를 사용한 실험적 연구를 통해 유리섬유복합관의 구조적 신뢰성, 안전성을 확보한다면 보다 효율적인 단면설계가 가능할 것으로 판단된다.

또한, 핸드레이업 보강방법을 적용한 유리섬유복합관의 구조성능은 보강두께에 따라 원강성이 증가하여 국부적인 손상

에 대해 매우 효율적이었으며, 유리섬유복합관에 대한 수밀성능은 관련 규정을 모두 만족하는 것으로 평가되어 우수한 수밀성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 핸드레이업 보강부 및 접합부의 경우 부착력에 의해 핸드레이업층과 기존 GFRP층이 수압에 저항하고 있기 때문에 핸드레이업 보강 작업과 관련하여 현장상황을 고려한 작업자의 숙련된 정밀시공 능력이 또한 요구된다고 할 수 있다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 특정기초연구지원사업(R01-2008-000-21103-0)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 이 연구 내용의 일부는 한국복합재료학회 2009년도 춘계학술발표대회에서 발표되었으며, 그 내용을 추가적으로 확장, 보완하여 작성되었음을 밝힙니다.

참고문헌

- 1) 한국화이버, 유리섬유복합관 설계 및 시공 지침서, 2004.
- 2) KS F 2405, Method of Test for Compressive Strength of Concrete, Korean Standards Service Network, 2005.
- 3) A.P. Moser, Buried Pipe Design, MacGraw-Hill, New York, 2001.
- 4) 이의중, 남정훈, 윤순중, 김주범, "상하수도용 복합관 (GFRP)의 역학적 특성 및 구조적 거동평가에 관한 연구," 한국복합재료학회 추계논문집, 2007, pp. 38-41.
- 5) 이보배, 주형중, 김주범, 이기범, 윤순중, "유리섬유복합관의 구조거동특성 및 안전성 평가," 한국복합재료학회춘계논문집, 2009, pp. 33-37.
- 6) 이의중, 상하수도용 복합관의 역학적 특성 및 구조적 거동, 홍익대학교, 석사학위 논문, 2008.
- 7) GTSTRUDL, User Reference Manual, Version 29, Latest Revision K, May, GTICS Systems Laboratory, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, 2002.
- 8) ISO-9969, Thermoplastics pipes-Determination of ring stiffness, International Organization for Standardization, 1994.
- 9) 한국상하수도협회, 하수도시설기준, 2005.
- 10) KS M 3370, Plastics piping systems for water supply - Glass reinforced thermosetting plastics (GRP) based on unsaturated polyester (UP) resin - Pressure nad non-pressure piping system, Korean Standards Service Network, 2005.
- 11) ANSYS, User Reference Manual, Version 11.0, ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, 2007.