

유리섬유 강화플라스틱 복합관의 구조적 특성

Structural Behavior of Glass-Fiber Reinforced Plastic Composite Pipes

연규석* 김남길** 조규우** 김동준** 최종윤** 백종만**

Yeon, Kyu Seok Jin NanJi Jo Kyu Woo Kim Dong Jun Choi Jong Yun Back Jong Man

ABSTRACT

This study was performed to evaluate the internal and external factors affecting external strength of the 3-layer polymer composite pipes made of polymer mortar and fiber-glass reinforced plastic. Twenty four sandwich type 3-layer polymer composite pipes were made of polymer mortar and fiber-glass reinforced plastic by centrifugal method.

The objective of this study was to evaluate the effects the of polymer mortar thickness for and core fiber-glass contents per unit area on external strength of 3-layer polymer composite pipes. For the more economical and practical design of 3-layer polymer composite pipe, further study should be done for the various polymer mortar, fiber-glass and different ratio of the inside/outside FRP thickness.

1. 서론

우리나라에서는 1960년대에 흙관(Hume pipe)이라 불리는 원심력다짐 철근보강 콘크리트관에 대한 제조기술이 확립되어 하수관으로서 널리 이용되어 오고 있다. 그러나 오늘날에는 교통량이 증가하고 하수의 오염도가 높아짐에 따라 고강도이며, 내약품성이 강한 하수관이 절실히 요구되고 있다. 그러나 원심력 철근보강 콘크리트관의 강도는 철근비를 증가시켜 관체의 파괴강도는 높일 수 있으나 균열강도를 증가시키기는 어렵다. 또한 진동 및 전압 철근보강 콘크리트관은 내·외압강도와 내구성이 떨어지고 흡수율이 높으며, 산과 염에도 약하다. 그리고 아연도금 강관은 외압에 약하고 부식에 극히 취약한 문제점이 있다. 이밖에 기존의 하수도관으로 PVC관 등도 많이 이용되고 있는데, PVC관은 변형이 쉽게 일어나는 문제점이 있다.

이런 배경에서 GFRP(glass-fiber reinforced plastic)를 폴리머 모르타르에 적층 보강시킨 유리섬유 강화 플라스틱 복합관(glass-fiber reinforced plastic composite pipes)이 개발되었다. 이 관은 큰 응력이 발생하는 파이프의 내·외층에는 경량이면서 고강도이고 내식성도 뛰어난 FRP를 사용하고, 외압에 대해서는 중간층 폴리머 모르타르의 강성으로 견딜 수 있게 하는 매우 경제적인 샌드위치 구조형식을 갖고 있다.

따라서 본 연구에서는 폴리머 모르타르를 코어로 하고 유리섬유를 폴리머 모르타르의 내·외층에 적층보강시킨 3중복합관을 제작하고 내·외층의 유리섬유량과 중간층 폴리머 모르타르 두께에 따른 휨특성을 실험적으로 구명함으로써 폴리머 3중복합관의 구조적특성을 파악하는데 기초적인 자료로 제공코저 한다.

* 정희원, 강원대학교 농업공학부 교수

** 정희원, 강원대학교 농업공학부 대학원

2. 재료 및 방법

2.1 사용재료

결합재로는 스틸렌 모노머가 38% 포함된 불포화 폴리에스터 수지(UP), 충전제로는 옥탄산 코발트 8% mineral turpentine 용액(CoOc), 촉매로는 메틸에틸케톤 프록사이드(MEKPO)가 사용되었다. 충전재로는 중질 탄산칼슘을 사용했으며, 잔골재는 8번체를 통과한 하천모래 및 석탄폐석을 사용하였다. 사용된 유리섬유는 내열성, 단열성, 내약품성, 전기절연성 등에 뛰어난 특징을 가지고 있어 각종 유기재료와 복합적으로 널리 사용되는 것이다.

2.2 시험체 제작

배합비는 소정의 워커빌리티와 강도를 얻을 수 있는 범위내에서 골재와 충전재의 양을 최대하고 결합재인 폴리머의 양을 최소화하는 것이 가장 이상적이다. 폴리머 모르타르의 배합비는 사용목적, 수지의 종류, 골재의 형상 및 입도, 작업조건 등에 따라 달라지며, 그 결정 방법이 시멘트 콘크리트에서와 같이 정립되어 있지 않다. 또한 매우 높은 원심력하에서 모르타르가 투입되기 때문에 재료분리가 생기는 등 문제가 있으므로, 본 연구에서는 반복실험에 의해 배합비를 결정하였다. 결정된 폴리머 모르타르의 배합비는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 1. Mix proportions of polymer mortar (Unit: wt.%)

Binder	Filler	Fine aggregate	
		Coal mine waste	Sand
15	15	10	60

폴리머 3중복합관 제작은 고속으로 회전하는 원심성형기에 유리섬유와 수지 그리고 폴리머 모르타르를 단계별로 일정하게 투입함으로써 제작된다.

코어부분을 폴리머 모르타르로 하고 내·외면이 FRP층으로 구성된 샌드위치 구조에서 모르타르층의 두께와 내·외층의 단위면적당 유리섬유량이 복합관의 구조적 거동에 미치는 영향을 구명하기 위하여 이들을 변수로 하는 24종의 시험체를 제작하였다.

2.3 시험방법

2.3.1 폴리머 모르타르의 강도 시험방법

폴리머 모르타르의 강도특성을 파악하기 위해 압축강도, 휨강도, 쪼갬인장강도 시험을 하였다. 압축강도 및 탄성계수시험은 KS F 2481, 휨강도 시험은 KS F 2482, 쪼갬인장강도 시험은 KS F 2480 에 의해 실시하였다.

2.3.2 폴리머 3중복합관 외압강도 시험방법

폴리머 3중복합관에 대한 외압강도시험은 JIS A 5350 (1991)(강화플라스틱복합관)에 규정된 방법에 따라 수행하였다. 하중은 변위 제어방식을 취하여 최대용량 50ton인 Instron사의 만능시험기를 이용하여 0.5mm/min의 속도로 가력하였고 하중단계별 관체의 수직처짐과 관내·외벽의 변형율을 측정하기 위해 변위측정기(LVDT) 및 스트레인게이지를 부착하였다. 이들 데이터는 10초에 한번씩 기록하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 폴리머 모르타르의 강도특성

폴리머 모르타르의 강도는 시멘트 모르타르와 같이 재료의 품질, 배합방법, 타설방법, 양생조건, 시험방법 등의 영향을 받는다. 특히, 결합재인 폴리에스터 수지량은 폴리머 모르타르의 강도발현에서 가장 중요한 변수로 작용한다.

본 실험에서 사용된 폴리머 모르타르의 강도시험 결과는 Table 2와 같다.

Table 2. Strength test results (Unit: kgf/cm²)

Compressive strength	Elasticity modulus	Splitting tensile strength	Flexural strength
860	2.4×10 ³	135	250

3.2 폴리머 3중복합관의 휨모멘트 분포 특성

지름/두께 비가 큰 관체에 대한 구조해석은 탄성이론에 의한 곡선보의 해석으로 설명할 수 있다. 관체에 연직하중 P가 작용할 때 관체의 대칭성에 의해 Fig. 1과 같은 단부 구속조건을 갖는 곡선보로 모델링 할 수 있다.

이때 관체의 각부분에 걸리는 휨모멘트 M_d 는 곡선보의 엄밀해로 구하면 식(1)과 같이 나타낼수 있다.

$$M_d = \left(\frac{\sin \phi}{2} - \frac{1}{\pi} \right) P r \tag{1}$$

식 (1)로 부터 알 수 있듯이 관체에 수직하중이 작용했을 경우 임의의 점에 걸리는 휨모멘트의 크기는 d점과 하중재하점이 이루는 각도 ϕ 의 싸인값과 1차 함수적인 관계를 가진다. 즉 $\phi=0(\pi), \pi/2(3\pi/2)$ 인 위치에서 각각 최대 정 모멘트와 최대 부모멘트가 생긴다. 연직하중이 작용하는 A-B단면에서 약 0.318Pr 크기의 최대 정모멘트가 작용하는데, C-D단면에서의 부 모멘트 -0.182Pr 크기의 약 1.75배 정도이다.

휨을 받는 부재에 있어서 휨강성은 부재가 외력을 받을 때 일으키는 변형이 얼마나 큰가를 나타내는 계수로서 부재를 구성하고 있는 각 재료의 역학적 특성(각 재료의 탄성계수 E_i)과 부재의 형상, 치수 등 기하학적 특성에 의해 결정되는 단면 2차 모멘트(I_i)의 크기에 정비례한다.

① A-B 및 C-D 단면에서의 변형을

수직하중의 작용에 의해 폴리머 3중복합관은 Fig. 2와 같이 A-B단면에서는 외면 FRP층이 압축변형을 일으키고 내면 FRP층이 인장변형을 일으키는 반면에, C-D단면에서는 외면 FRP층이 인장변형을 일으키고 내면 FRP층이 압축변형을 일으킨다.

실험결과, 지름/두께 비가 상대적으로 큰 ($D/T=25\pm 1$)관체에서 A-B단면과 C-D단면 인장변형율비는 1.75~1.89로 휨모멘트 비 1.75와 비교적 근접한 값을 보인 반면, $D/T=22\pm 1, 17\pm 1, 13\pm 1$ 일 경우에는 각각 1.94~2.01, 2.12~2.20, 2.30~2.45정도로 휨모멘트 비 1.75를 상회하였다. 이는 또한 지름/두께 비가 작을수록(관체의 지름이 일정 할 때 관체의 두께가 클수록)내면 FRP층 응력분담이 증가함을 보여주는 결과이다.

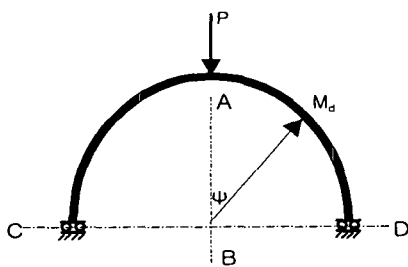


Fig. 1 Equivalence change of circular pipe considered as arch beam

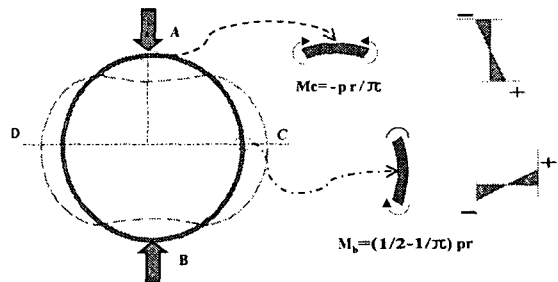


Fig. 2 Stress distribution diagram of a circular pipe

② A-B 단면에서의 휨모멘트-곡률 관계

직선보가 휨모멘트 작용에 의해 변형을 일으킬 때 휨강성($\sum E_i I_i$)은 휨모멘트와 곡률의 비 ($\sum E_i I_i = \frac{M}{\phi}$)로 나타낼 수 있다. 관체처럼 굽은 보의 휨강성을 휨 모멘트와 곡률의 변화 비율로 나타

내면 식(2)와 같다.

$$\sum E_i I_i = \frac{M}{\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r}} \quad (2)$$

여기서,

ρ : 관체 변형후의 곡률반경

r : 관체의 변형전 반경

또 $\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r}$ 는 관체의 압축 및 인장측에 부착한 스트레인게이지의 변형율에 의해 구해지며 이는 식(3)과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{1}{\rho} - \frac{1}{r} = \frac{|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|}{T} \quad (3)$$

여기서;

$|\varepsilon_1|, |\varepsilon_2|$: 관체의 압축 및 인장측의 변형율,

T : 관체의 두께

Table 3은 초기균열 발생시 관체의 A-B단면에서의 휨 모멘트와 곡률의 크기를 나타낸 것이다.

Table 3. Initial cracking moment, and flexural rigidity

Pipe No.	최대Moment (kg · m/m)	Cracking moment (kg · m/m)	Curvature (10 ⁻⁶ /cm)	Flexuralrigidity (10 ⁷ kg · cm ²)	Rate of increase (%)
T8-400	201	160	5868	0.36	-
T8-460	212	170	6030	0.40	-
T8-520	243	195	6084	0.45	-
T8-580	258	210	6260	0.49	-
T8-640	289	235	6200	0.52	-
T8-700	352	289	6530	0.61	-
T10-400	286	234	4620	0.62	72.4
T10-460	307	250	4700	0.65	63.3
T10-520	352	287	4890	0.72	60.0
T10-580	392	317	5010	0.78	60.0
T10-640	423	340	5090	0.83	59.8
T10-700	472	380	5178	0.91	49.4
T13-400	446	360	3960	1.13	214
T13-460	460	370	4013	1.15	187
T13-520	489	398	4072	1.20	167
T13-580	546	438	4157	1.31	168
T13-640	590	475	4208	1.40	169
T13-700	664	535	4263	1.56	155
T17-400	655	536	3423	2.14	490
T17-460	704	568	3482	2.30	475
T17-520	753	605	3622	2.46	447
T17-580	818	659	3711	2.64	439
T17-640	872	702	3720	2.68	415
T17-700	958	770	3835	2.97	390

폴리머 3중복합관의 휨강성은 코어층 폴리머 모르타르의 두께가 8mm에서 17mm로 증가할 때, 유리섬유량이 0.1415g/cm²인 경우에는 0.36×10⁷kg·cm²에서 2.14×10⁷kg·cm²로 약 490% 증가하였고, 0.1627g/cm²인 경우에는 0.40×10⁷kg·cm²에서 2.30×10⁷kg·cm²로 약 475% 증가하였다. 또한 유리섬유량이 0.1839g/cm²인 경우에는 0.45×10⁷kg·cm²에서 2.46×10⁷kg·cm²로 약 447% 증가하였고, 0.2051g/cm²인 경우에는 0.49×10⁷kg·cm²에서 2.64×10⁷kg·cm²로 약 439% 증가하였다. 한편, 유리섬유량 0.2263g/cm²인 경우에는 0.52×10⁷kg·cm²에서 2.68×10⁷kg·cm²로 약 415% 증가하였으며, 0.2475g/cm²인 경우에는 0.61×10⁷kg·cm²에서 2.97×10⁷kg·cm²로 약 390% 증가하였다.

또한 코어층 폴리머 모르타르 두께가 일정할 때, 폴리머 3중복합관의 초기균열 발생시 곡률의 변화는 단위면적당 유리섬유량이 증가할수록 증가하고, 단위면적당 유리섬유량이 일정할 때 코어층 폴리머 모르타르 두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈다.

③ 곡선보의 단면해석

최대모멘트가 발생하는 관정 단면에서 초기균열이 발생하기 전까지 관체는 탄성거동을 하므로 단면의 깊이별 응력분포는 내·외층 FRP를 폴리머 모르타르로 등가변환한 등가단면으로 해석할 수 있다.

식(4)와 식(5)는 탄성거동시 3중구조의 일반화된 중립축길이 C와 단면2차 모멘트를 나타낸 것이다.

$$C = \frac{\frac{1}{2} \frac{E_1}{E} (t-x)^2 + h_1 (\frac{h_1}{2} + t-x) + \frac{E_2}{E} x (h_1 + t - \frac{x}{2})}{\frac{E_1}{E} (t-x) h_1 + \frac{E_2}{E} x} \quad (4)$$

$$I = \frac{1}{12} \frac{E_1}{E} (t-x)^3 + \frac{E_1}{E} (t-x) [C - \frac{(t-x)}{2}]^2 + \frac{1}{12} h_1^3 + h_1 (C - t + x - \frac{h_1}{2})^2 + \frac{1}{12} \frac{E_2}{E} x^3 + \frac{E_2}{E} x (h_1 + t - \frac{x}{2} - C)^2 \quad (5)$$

여기서,

C : 중립축 길이

x : 관 내측 FRP층 두께

(단위면적당 유리섬유량 m와 FRP층 두께 상관관계 $x = 4.68m - 0.23$)

E, E₁, E₂: 폴리머 모르타르, 외, 내 FRP층 탄성계수

t : 내외 FRP층 두께의 합

h₁: 폴리머 모르타르 두께

모멘트 M가 작용하는 관체의 폴리머 모르타르의 인장응력 σ는 식(6)으로 표시할 수 있다.

$$\sigma = \frac{M}{I} (h_1 + t - C - x) \quad (6)$$

④ 내/외 FRP보강층 두께에 따른 단면 응력분포

식 (4), (5), (6)으로부터 알수 있듯이 σ는 내·외층 보강FRP층 두께(t)가 일정할 때 내/외 FRP층의 두께비율에 따라 변함을 알 수 있다.

⑤ 3중복합관 균열하중 산정을 위한 제안식

식 (1)과 식(6)으로부터 관체의 균열하중 P는 식(7)로 표시할 수 있다.

$$P = \frac{\pi \cdot \sigma \cdot I}{(h_1 + t - C - x) \cdot r} \quad \text{-----}(7)$$

식 (8)은 내·외부 FRP층의 폴리머 모르타르에 대한 구조효과를 고려하여 식 (7)을 수정한 것이다.

$$P = \frac{\pi \cdot k\sigma \cdot I}{(h_1 + t - C - x) \cdot r} \quad \text{-----}(8)$$

여기서, k : 1.2 (횡구속에 의한 휨응력의 확대계수)

휨응력의 확대계수 k 는 균열발생시 폴리머 모르타르 인장축 응력/휨응력의 값으로 산출하였다.

4. 결론

본 연구는 폴리머 모르타르와 유리섬유를 불포화 폴리에스터 수지로 침적시킨 FRP를 이용하여 샌드위치 형식의 3중복합관을 제조하고 이에 대한 구조적 실험을 수행하여 폴리머 3중복합관의 구조특성과 단면특성을 이론적, 실험적으로 구명하여 보았던 바, 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 폴리머 3중복합관 제작에 사용된 코어층 폴리머 모르타르의 압축강도는 860kg/cm^2 , 휨강도는 250kg/cm^2 , 할열인장강도는 125kg/cm^2 , 탄성계수는 $2.4 \times 10^5\text{kg/cm}^2$ 로 나타났다.

(2) 연직 집중하중을 재하한 관체의 파괴시험에서, 1, 2차 파괴는 하중방향과 일치하는 관의 상단 혹은 하단에서 내면 FRP층의 인장파괴에 의해 발생되었고, 3, 4차 파괴는 1, 2차 파괴단면과 90° 를 이루는 수평단면에서 외면 FRP층의 인장파괴에 의해 발생되었다.

(3) 지름/두께비가 큰 3중복합관에서는 하중방향과 일치하는 단면의 내면 FRP 층에서의 인장응력은 하중방향과 수직인 단면의 외면 인장응력의 약 1.75배 정도였고, 지름/두께비가 작은 관체에서의 인장응력비는 이 보다 큰 1.94~2.45의 값을 나타냈다.

(4) 폴리머 3중복합관의 휨강성은 코어층 폴리머 모르타르 두께가 일정하고 단위면적당 유리섬유량이 0.1415g/cm^2 에서 0.2475g/cm^2 로 증가할 때 39%에서 86%로 증가하였는데 코어층 폴리머 모르타르의 두께가 증가함에 따라 휨강성의 증가율은 342%에서 490%로 증가하였는데 코어층 폴리머 모르타르의 두께가 증가함에 따라 휨강성의 증가율은 감소하는 경향을 나타냈다.

(5) 초기균열 발생시 관경 단면의 폴리머 모르타르 인장축에 생기는 응력은 휨강도보다 약 20%정도 높은 값을 나타내 내·외 FRP 보강층이 폴리머 모르타르에 상당한 구속효과가 있음을 확인할 수 있었다.

(6) 폴리머 3중복합관의 단면해석에 의해 균열하중에 대한 제안식을 다음과 같이 제안할 수 있었다.

$$P = \frac{\pi \cdot k\sigma \cdot I}{(h_1 + t - C - x) \cdot r} \quad (k=1.2)$$

(7) 내·외 FRP 보강층이 폴리머 모르타르에 대한 구속효과와 효율적인 내·외 FRP 보강두께 비율에 대한 정량적인 분석을 위해서는 FRP의 강도특성에 관한 연구와 내·외 FRP 층 두께, 폴리머 모르타르를 압축강도 및 두께를 변수로 하는 다양한 연구가 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 연규석, "GFRP보강 MMA개질 불포화 폴리에스터 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨 거동", 한국콘크리트 학회 봄 학술발표회, pp. 105-110, 2002.
2. 지경용, "GFRP 보강 폴리머 모르타르 샌드위치 패널의 휨 거동", 강원대학교 석사학위 논문, 2001.
3. Paul, L., "Concrete Design Using Steel Fibers", 한국콘크리트학회지, Vol. 8 No. 4, pp. 56-63, 1996.
4. "ASTM C 1018-89, Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete (Using Beams with Third-Point Loading)", ASTM Standards, Part 04.02, Concrete and Aggregate, 1990.
5. Ohama, Y., and Nishimura, N., "Properties of Steel Fiber Reinforced Polyester Resin Concrete", Proceedings of the Twenty-Second Japan Congress on Materials Research, The Society of Materials Science, Japan, Kyoto, Mar, pp.364-367, 1979.