

지중매설 유리섬유복합관의 관변형에 관한 안전성 평가 A Safety Evaluation on the Ring Deflection of Buried GRP Pipes

박준석 Park, Joon-Seok* · 김선희 Kim, Sun-Hee ** · 김응호 Kim, Eung-Ho***
윤순종 Yoon, Soon-Jong****†

(Received May 5, 2011 ; Revised June 10, 2011 ; Accepted June 15, 2011)

ABSTRACT

Recently, the use of buried glass fiber reinforced plastic (GRP) pipes is widespread and ever increasing trend in the industry. GRP pipes are attractive for use in harsh environments, such as for the collection and transmission of liquids which are abrasive and/or corrosive. The structural behavior of a GRP pipes buried under the ground is different from that of a rigid one made of concrete or clay, for example. A GRP pipe buried under the ground is deflected circumferentially by several percent and the stresses in the pipe are mainly compressive stresses. A GRP pipes has been introduced by a number of manufacturers for selection and used by underground pipeline designers. In all cases, the modified Spangler's equation is recommended by these manufacturers for predicting the ring deflection of these pipes under dead and live loads. In this paper, the ring deflection of buried GRP pipe is evaluated and discussed based on the result of analytical investigation.

요 지

최근 지중매설 유리섬유복합관(GRP관)은 유해한 환경에서 뛰어난 성능을 보유하고 있어 하수관거용으로서 사용이 증가 되고 있다. 또한 지중에 매설되어 있는 조건에서 기존의 콘크리트관 등 강성관에 비해 구조적 성능이 뛰어나다. 지중매설 GRP관은 주로 상부에 작용하는 상부토압과 활하중에 의한 압축응력에 의해 원주방향으로 변형이 일어나게 된다. GRP관의 구조적 거동은 매설도와 주변의 지반의 성질에 따라 다르게 설계되어야 한다. GRP관의 설계는 Spangler의 변형량 계산식을 Watkins에 의해 수정되어 사용되고 있다. 이 연구에서는 Watkins의 관변형 추정식에 GRP관의 재료적 특성을 고려하여 관변형량을 예측하였다.

Key Words: glass fiber reinforced composite(유리섬유강화복합재), buried GRP pipe(지중매설 유리섬유복합관), ring deflection(관변형)

1. 서 론

상하수관에 사용되는 주철관의 경우 시간이 지남에 따라 매립지 환경에 의한 부식은 물론 수송유체로부터의 부식 등에 의해 치명적인 영향을 받게 되어 부분적인 파손의 위험뿐만 아니라 배관의 수명이 단축되어 재시공을 필요로 하는 경우가 빈번하게 발생하고 있어 경제적인 손실은 물론 인재로 이어질 수 있다. 또한, 콘크리트 재질의 관은 취성재료로 지하철 및 상재하중에 의한 진동 등에 의해 균열이 발생할 수 있어 지속적인 유지관리가 필요하며, 콘크리트의 보강재로 사용하고 있는 강재(철근)의 부식 등으로 관의 장기적인 내구성을 확보하기 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 플라스틱 재질로 구성된 하수관의 적용이 활성화되고 있다. 하수관은 소구경을 주로 사용하였으나 관 재질 및 관 제조에 대한 기술의 발달로 대구경까지 다양하

게 사용되고 있다. 이러한 플라스틱 재질의 하수관은 지중매설시 지반과 유기적으로 거동하는 연성관으로 분류되어 제품의 품질과 시공에 대한 신뢰성이 동시에 확보되어야 구조적인 안전성을 기대할 수 있다. 그러나 기술선진국들에 비해 아직까지 제품 및 시공기술 등에 대한 연구가 부족하여 적용성에 한계를 드러내고 있는 실정이다.

특히, 국내 관련 설계기준 및 제품규격 등은 기술선진국들에 의해 개발된 기준 및 규격을 단순히 번역하여 규정된 것으로 개발 배경 및 근거를 구체적으로 제시하고 있지 않기 때문에 국내 현실을 반영하기에는 무리가 있다.

GRP(Glass-fiber Reinforced Plastic)관은 유리섬유를 이용하여 플라스틱의 단점인 강성을 보강하면서 플라스틱의 장점인 경량성, 내구성, 복원성 등을 극대화시킨 복합신소재로 제조된 관으로써 일반적으로 기존의

* 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 박사과정

** 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 석사과정

*** 비회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수

****† 정회원 · 홍익대학교 토목공학과 교수, 교신저자(sjyoon@hongik.ac.kr)

매설관에 비해서 두께가 얇고, 비교적 가벼워 지중에 매설할 경우 뛰어난 재료적 특성으로 인해서 하부 지반의 지지력 부족에 의한 파괴 위험성이 저감되고, 과도한 침하에 의한 재료의 파괴 위험성이 저감되며, 가볍기 때문에 시공속도의 향상을 기대할 수 있다.

특히, 최근의 대단위 택지개발 현상이 주로 연약지반층이 두껍게 존재하는 토질조건이 열악한 지역인 경우가 많으며, 특히 고성토 구간 및 매설깊이가 깊어지는 경향이 있으므로 기존 관로의 대체품으로서 GRP관에 대한 연구가 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 GRP관이 지중에 매설될 경우 지반과 GRP관의 상호 작용에 따라 구조적 성능이 변하게 된다.

현재 국내에서 지중매설 GRP관의 설계는 하수도시 설기준 (2005)에서 제시한 설계방법을 적용하고 있지만 이 설계식은 지반의 반력계수가 고려되지 않고 있어 지반과 GRP관의 상호작용에 의한 구조적 거동을 고려한다고 하기에는 문제가 있다. 하지만 기술 선진국의 연성관의 설계방법은 ASTM, ISO 등의 조건을 고려하여 설계하고 있다. 따라서 이 연구에서는 각 설계방법을 통해 가장 열악한 상황에서 GRP관의 변형을 조사하여 기존의 상하수도관을 대체 가능성 여부를 검토하였으며, GRP관의 종류 및 특징, 관의 제조방법에 대하여 조사하고 GRP관의 국내외 설계기준에서 제시하고 있는 설계법을 조사비교하여 합리적인 설계방법에 대해 GRP관의 재료적 성질을 적용하여 해석적으로 관변형을 예측하고 분석하였다.

2. GRP관의 종류 및 특징

유리섬유복합관을 구성하는 재료는 섬유강화복합재(Fiber Reinforced Polymeric Plastic, FRP)의 한 종류인 유리섬유복합재(Glass Fiber Reinforced Polymeric Plastic, GFRP)와 폴리머모르타르(Polymer Mortar)이다. 이 두 재료가 결합되어 유리섬유복합관의 단면을 구성하며 구조적 거동을 조사하기 위해서는 이 재료들에 대한 이해가 선행되어야 한다. 따라서, 이 연구에서는 유리섬유복합관을 구성하는 재료에 대해 간략히 설명하였다. 또한, 섬유강화복합재는 구성재료 및 제조방법에 따라 역학적 성질이 크게 차이를 나타내기 때문에 제작방법 및 구성재료에 대한 검토가 필수적이다.

2.1 섬유강화복합재

복합재료는 두 가지 또는 그 이상의 재료들을 결합시켜 원래의 각 재료보다 더 우수한 성능을 발휘할 수 있도록 효율적으로 만들어진 재료이다(Fig. 1 참조). FRP는 대표적인 복합신소재로서 주로 하중을 전달하는 보강섬유(Reinforced Fiber)와 보강섬유를 보호하고 하중을 분포시켜주는 기지(Resin or Matrix)로 구성된다. 보강섬유는 일반적으로 FRP의 부피중 많은 부분을 차지하며, 보강섬유의 종류, 보강량, 적층각 등에 따라

FRP의 역학적 성질이 달라지기 때문에 구조물에 적용할 경우 구조적 거동 및 용도 등을 정확히 판단하여야 한다.

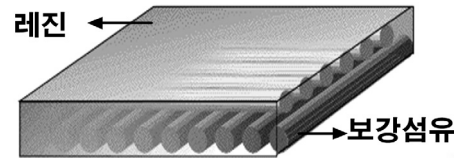


Fig. 1 섬유강화복합재의 구성

2.2 유리섬유복합관의 제작방법

FRP의 역학적 성질은 레진, 보강섬유와 같은 구성재료의 종류와 더불어 보강섬유의 배치방향에 따라 역학적 성질은 큰 차이를 나타낸다. 보강섬유의 배치는 보강섬유의 형태에 따라 차이가 있으나 주로 생산방법에 의해 결정되기 때문에 FRP의 생산방법에 따라 FRP의 종류를 구분하기도 한다. FRP는 고내구성 신소재로서 항공, 군수 산업 등의 첨단산업에 적용되는 여러 가지 제조방법이 있으나 이 연구에서는 관 제작에 사용하고 있는 FRP의 생산방법을 중심으로 소개하였다. 유리섬유복합관의 제조방법은 1960년대 후반에 개발된 전통적인 방식인 필라멘트와인딩(Flament Winding)방법과, 1974년 개발된 원심력에 의한 원심성형(Centrifugal casting)방법이 가장 널리 사용되고 있다(계, 2005).

필라멘트와인딩 공정은 레진이 함침된 연속섬유를 원통관에 감아서 제작하는 방식으로 내면에 맨드렐(Mendel)을 사용하기 때문에 내경이 항상 일정하며, 원주방향으로 연속섬유가 보강되기 때문에 원주방향 강성과 강도가 우수하다. 또한, 연속섬유에 일부 인장력을 도입하여 제작하기 때문에 섬유함유율이 비교적 크다.

필라멘트와인딩 유리섬유복합관은 맨드렐(Mandel)의 크기에 따라 길이가 제한되기 때문에 경제성에서 비효율적인 것으로 인식되었다. 그러나 최근 연속생산방법이 개발되어 이와 같은 문제점을 극복하고 있다. 연속생산방법은 Fig. 2, 3에 나타내었다.

원심력에 의해 제조된 유리섬유원심성형관은 관 내부에서 절단 또는 Mat 형태의 섬유와 레진을 분사하고 몰드(Mold)를 고속회전시켜 관을 제작하는 방식으로 외경이 항상 일정하며, 내경을 일정하게 하기 위해서는 몰드의 회전속도를 절절히 조절하여야 한다. 또한, 보강섬유는 절단된 섬유(Chopped Fiber)를 사용하기 때문에 몰드의 회전속도에 따라 레진이 함침되는 정도가 다르다. 따라서, 역학적 성질에서 차이를 나타낸다. 또한, 회전속도가 저속일 경우 표면이 고르지 않아 내부지름(내경)이 위치에 따라 차이를 나타낼 수 있고, 섬유가 고르게 분사되지 않을 경우 동일한 단면이라도 역학적 성질의 차이가 나타날 수 있어 정밀한 공정관리가 요구된다. 대표적인 원심성형관으로 HOBAS사에

서 제작한 제품이 있으나 구체적인 제조방법 및 제품의 품질 특성 등은 잘 알려져 있지 않다(대한토목학회, 2011).

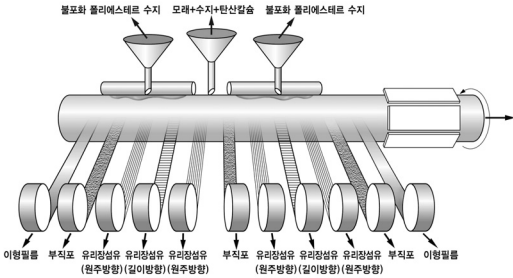


Fig. 2 필라멘트와인딩 연속공정 개요



Fig. 3 필라멘트와인딩 연속공정((주)한국화이버)

3. 연성관의 거동특성

3.1 연성관의 하중전달

강성관과 연성관은 관에 하중이 재하되었을 경우에 관이 매설되어 있는 지반과의 상호작용에 따라 차이가 나타난다. 먼저 연성관의 경우 연성관은 관에 작용하는 모든 하중을 주변의 지반에 전달하여 하중을 지지하게 되므로, 관에 작용하는 하중이 관의 강성을 초과할 경우 그 압력을 주변지반으로 전달하여 관과 지반이 같이 하중을 지지하며, 하중이 사라지면 관의 형상은 원상을 회복하게 된다. 하지만, 지반의 다짐이 불량할 경우 관에 작용하는 하중을 주변의 지반에 전달할 수 없어 소성변형을 초래하게 된다. 연성관의 하중전달 형상은 Fig. 4에 나타내었다. 강성관의 경우에는 매설토와 활하중 등의 관에 가해지는 모든 하중을 관 자체가 지지하게 되며, 관 주변의 흙은 지반지지효과(arching effect) 외에는 관의 강성과 직접적인 관계가 없다. 또한, 관에 작용하는 하중이 관의 강성을 초과할 경우 관이 파괴에 이른다. 강성관의 하중전달 형상은 Fig. 5에 나타내었다(김, 2007).

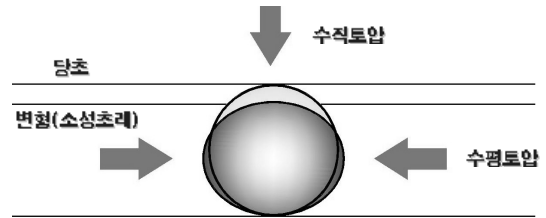


Fig. 4 연성관의 하중전달 형상

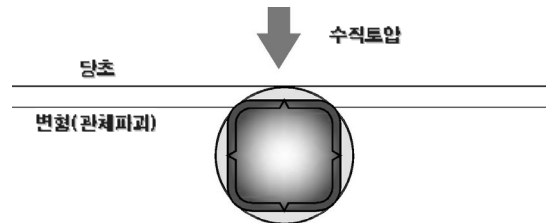


Fig. 5 강성관의 하중전달 형상

3.2 연성관에 작용하는 토압분포

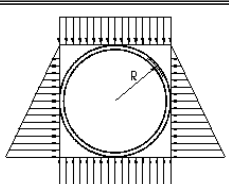
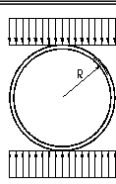
연성관과 강성관에 작용하는 토압분포는 크게 매설토에 의한 수직토압과 활하중에 의한 수직토압으로 나뉜다. 관에 작용하는 매설토에 의한 수직토압은 Marston 이론에 따르면 전체 관폭에 걸쳐 균등하게 분포되며 수직토압 계산식은 일반적으로 Marston 공식을 적용하고 있다. 또한, 수직반력은 관의 상부에 작용하는 수직토압과 거의 같으며, 기초 폭에 걸쳐 균등하게 분포하고, 수평토압은 관의 중간부분을 중심으로 포물선 모양으로 분포하며, 최대응력은 관의 수평단에서 발생하고 뒤채움한 흙의 수동저항계수에 수평 변형량의 1/2을 곱한 값과 동일하다.

활하중에 의한 수직토압 및 연직반력은 상하부 모두 같은 크기로 전체 관폭에 걸쳐 균등하게 분포하고 수평토압은 관의 변형에 의한 반력이 직삼각형의 수평토압으로 좌우에 동일하게 작용한다. Table 1과 Table 2에 매설토와 활하중에 의한 연성관과 강성관의 토압분포 비교를 나타내었다.

Table 1 매설토에 의한 토압분포 비교

연성관	강성관
<ul style="list-style-type: none"> • 수직토압은 강성관과 동일 • 수직하중에 의한 관의 횡방향 변형으로 관 측면의 매설토가 이에 저항하는 수동 토압이 작용 • 관저부 반력은 강성관과 동일 	<ul style="list-style-type: none"> • 관에 작용하는 수직토압은 관저부의 수평면에 균등하게 분포 • 관측면의 수평토압은 없는 것으로 고려 • 관저부 반력은 관저부 받침 각 내에 균등하게 분포

Table 2 활하중에 의한 토압분포 비교

연성관	강성관
	
<ul style="list-style-type: none"> • 수직토압은 강성관과 동일 • 관의 횡방향 변형으로 발생하는 반력이 직삼각형의 수평토압으로 좌우에 작용 • 관저부 반력은 강성관과 동일 	<ul style="list-style-type: none"> • 수직토압은 관의 직경에 균등 분포 • 관 측면의 수평토압은 없는 것으로 고려 • 관저부의 반력은 관의 직경에 균등 분포

4. 연성관의 설계

지중매설된 연성관은 강성관과는 다른 구조적 거동을 나타낸다. 지중에 매설된 상태에서 강성관은 변형을 허용하지 않지만, 연성관의 경우 변형에 의해 수직하중을 수평방향으로 전달하여 수평방향에 수동토압을 발생시켜 하중에 대해 저항하는 구조적 거동을 한다. 따라서, 연성관의 설계에서 변형은 중요한 설계변수라고 할 수 있다.

국내 연성관의 설계는 일반적으로 하수도시설기준(환경부, 2005)과 ASTM D 2412 (2010)에서 제안하고 있는 방법을 적용하고 있다. 각 설계방법에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.

4.1 하수도시설기준(환경부, 2005)

연성관에 작용하는 수직토압은 앞서 설명한 바와 같이 매립토에 의한 토압과 활하중에 의한 토압을 합하여 결정한다.

매립토에 의한 수직토압은 연성관과 연성관 측면에 매립된 토사가 동일하게 거동하는 것으로 가정하여 하중은 연성관의 폭만큼의 토압으로 한다. 따라서, 수직토압(Prism Load)공식을 적용한다.

국내 하수도시설기준(2005)는 지중매설 연성관의 설계에서 관에 발생하는 응력과 변형을 고려할 수 있는 식을 제안하고 있으며, 연성관의 변형에 대해서는 관 변형 5% 이하로 규정하고 있으나 관에 발생하는 응력은 강성관과 같이 비교방안을 제시하지 않고 있다. 즉, 연성관의 종류는 다양하지만 강성관과 같이 철근콘크리트관일 경우 균열모멘트, 도관의 경우 파괴모멘트로 규정하고 있지만 연성관에 대해서는 응력을 검토하는 방법만 제시하고 있을 뿐 연성관의 어떠한 성능과 비교하도록 규정하고 있지 않다. 이것은 연성관의 경우 큰 변형이 발생하여도 재료의 파괴응력에 도달하지 않고 안정성(좌굴)이나 다른 영향(변형 등)에 의해 설계가 지배되기 때문인 것으로 추정할 수 있으며, 연구자료를 부족한 것 또한 그 이유라고 생각된다.

하수도시설기준(환경부, 2005)에서 제안하고 있는 매립토와 활하중에 의한 휨모멘트 및 휨응력은 식 (1), (2)와 같다.

$$M = K_1 q R^2 + K_2 p R^2 \tag{1}$$

$$f = \frac{M}{Z} \tag{2}$$

여기서, M 은 단위길이당 매립토와 활하중에 의한 휨모멘트이며, K_1 과 K_2 는 각각 매립토와 활하중에 의한 휨모멘트계수, q 는 매립토에 의한 수직토압, R 은 관두께 중심반경, p 는 활하중에 의한 수직토압, f 는 매립토와 활하중에 의한 휨응력, Z 는 단위길이당 단면계수($=t^2/6$), t 는 관두께를 나타낸다.

식 (1)에서 매립토 및 활하중에 의한 휨모멘트 계수는 기초부 받침을 3가지 종류로 분류하고 각 기초조건에 따라 Table 3에 나타난 바와 같이 제안하고 있다.

Table 3 활하중에 의한 토압분포 비교

기초조건	시공 받침각(θ)	유효 받침각(2α)	관내 위치	휨모멘트 계수	
				K1	K2
A	90°	60°	관정	0.132	0.079
			관저	0.223	0.011
B	180°	90°	관정	0.120	0.079
			관저	0.160	0.011
C	360°	120°	관정	0.107	0.079
			관저	0.121	0.011

또한, 매립토와 활하중에 의한 수직방향의 관변형(Ring Deflection)을 식 (3), (4)와 같이 제안하고 있다.

$$\delta = K_3 \frac{qR^4}{EI} + K_4 \frac{pR^4}{EI} \tag{3}$$

$$V = \frac{\delta}{2R} \times 100 \tag{4}$$

여기서, δ 는 매립토와 활하중에 의한 관변형을 나타내며, K_3 과 K_4 는 각각 매립토와 활하중에 의한 변형계수, E 는 관의 탄성계수, I 는 단위길이당 관두께에 대한 단면2차모멘트($=t^3/12$), V 는 관변형(%), R 은 관두께 중심반경을 나타낸다. 식 (3)에서 매립토 및 활하중에 의한 변형계수는 기초조건에 따라 Table 4에 나타난 바와 같다.

Table 4 기초조건과 변형계수

기초 조건	시공 받침각(θ)	유효 받침각(2α)	변형계수	
			K3	K4
A	90°	60°	0.102	0.030
B	180°	90°	0.085	
C	360°	120°	0.070	

4.2 ASTM D 2412

ASTM D 2412 (2010)에서 제안하고 있는 지중매설된 연성관에 대한 설계는 연성관에 대한 변형을 식 (5)에 나타낸 바와 같이 계산하고, 이 변형을 5%로 제한하고 있으며, 관에 발생하는 휨모멘트 및 휨응력의 검토에 대해서는 언급하고 있지 않다.

$$\Delta x = \frac{D_c K W_c}{0.149 PS + 0.061 E'} \quad (5)$$

여기서, Δx 는 수평방향 관변형을 나타내며, D_c 는 변형지연계수, K 는 받침각 계수, E' 은 매립토의 지반반력계수, PS 는 관의 강성(pipe stiffness), W_c 는 단위길 이당 연직도압을 나타내고 있다.

지중매설된 연성관의 변형을 예측하는 식 (5)는 Iowa Formula라고 불리기도 하며, 연성관의 강성, 되메움 흙의 지반반력계수, 기초조건 등 지중매설된 상태의 연성관에 대한 하중 및 경계 조건을 대부분 포함하고 있어 지중상태에서 연성관에 대한 거동을 명확히 표현하고 있다. 이 식은 Spangler에 의해 최초로 제안되었고, Watkins에 의해 수정되었으며, 지중매설된 파형강관에 대한 실험결과와 탄성이론에 기초하고 있다. Iowa Formula는 약 5~6%까지 정확한 관변형을 예측하는 것으로 연구, 보고되고 있다(Javanmard, 1993; Smith, et al., 2004). 또한, Iowa Formula는 실제 지중에서 발생한 관의 변형에 비해 관의 변형을 매우 작게 평가한다. 즉, 실험으로부터 관변형이 약 20%에서 파괴가 발생하였음에도 불구하고 이에 안전율 4를 적용하여 관의 변형을 5% 이내로 제한한 것이다. 이것은 장기변형에도 관의 안전성을 확보하기 위한 것이며, 관의 접합부 누수의 영향도 고려된 것이다 (Jeyapalan, et al., 1986).

식 (5)에서 지반반력계수 E' 은 흙의 상태에 따라 구분되며, 기초조건을 고려한 계수 K 는 받침각에 따라 Table 5에 나타내었다(Moser, 2001).

Table 5 유효받침각에 따른 계수, K

각	0°	30°	45°	60°	90°	120°	180°
계수	0.110	0.108	0.105	0.102	0.096	0.090	0.083

4.3 설계방법 비교

국내 하수도시설기준(2005)에서 제안하고 있는 연성관에 대한 설계는 변형과 응력을 검토하도록 제안하고 있다. 하수도시설기준(2005)에서 제안하고 있는 연성관에 대한 변형식 식 (3)은 매립토에 의한 변형과 활하중에 의한 변형을 산술적으로 합하여 구성하고 있으며, 식 (3)의 두 번째 항인 활하중에 의한 변형에 대해 Table 5에서 유효받침각이 120°일 경우 활하중에 대해서는 휨모멘트 계수 K_4 를 0.030으로 제안하고 있다. 이 계수를 적용할 경우 활하중에 의한 변형은 기초조건과 관계없이 동일한 값을 적용하고 있다. 따라서, 연성관이 강성관과 유사하게 거동하는 것으로 가정하고 기초조건에 관계없이 동일한 값을 적용하고 있기 때문에 연성관에 대한 거동을 정확히 예측할 수 없는 것으로 평가된다. 또한, 매립토에 의한 변형 역시 기초조건을 3가지로 분류하고 변형계수를 적용하도록 규정하고 있으나, 이것은 기초조건에 따른 분류로서 연성관의 기초가 강성관의 기초(고정받침)와는 달리 강성체가 아니기 때문에 강성기초에 비해 변형을 증가시켜 변형계수를 제안한 형태이다. 따라서, 지중매설상태에서 주변토사의 영향에 대해서는 적절하게 고려하지 못하는 것으로 평가된다.

연성관은 관의 강성이 비교적 작기 때문에 지반과 유기적으로 거동한다. 이러한 연성관에 대한 거동은 기초, 관 주변 매립토의 상태, 토피고 등 지중상태에 의해 변형이 결정되며, 연성관은 대부분 관에 발생하는 응력이 관을 구성하고 있는 재료의 파괴응력을 초과하여 파괴되는 강도설계 보다는 주로 안정성(Stability), 관의 과도한 변형, 균열, 관접합부의 누수 등 사용성에 의해 설계된다. 이러한 안정성 및 사용성 등을 확보하기 위해 관의 변형에 대한 규정을 두고 있다. ASTM D 2412 (2010)에서는 관의 변형을 지중상태의 여러 변수(기초조건, 관 주변 매립토의 상태, 하중, 관의 강성 등)를 고려할 수 있도록 하고 허용 관변형을 5%로 제한하는 방식의 설계방법을 제안하고 있어 연성관에 대한 거동예측 및 설계는 ASTM D 2412 (2010)에 의해 수행되는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

5. 관변형 예측

5.1 GRP관의 재료적 성질

GRP관의 역학적 특성을 확인하기 위해 Fig 6에 나타낸 각 위치별 시편을 절단하여 인장강도 실험을 수행하였다. 인장강도 실험에 사용한 시편의 절단 및 제작된 시편은 Fig 7에 나타내었다.

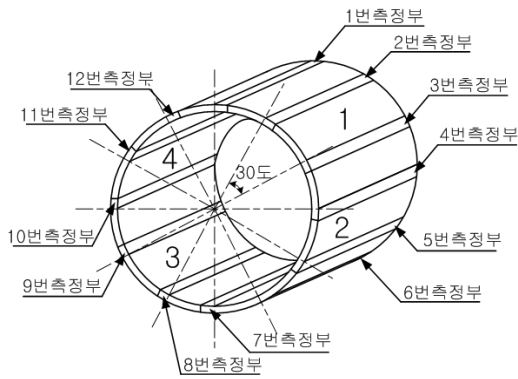


Fig. 6 인장시편 절단계획



Fig. 7 인장시편 제작

Fig 7에 나타난 인장시편에 대한 인장강도 실험은 홍익대학교 과학기술연구소 제3연구부의 98kN 용량의 UTM을 사용하여 수행하였으며, 하중은 변위제어방식으로 3mm/min의 속도로 재하하였고, 변형률계이지를 부착하여 하중재하에 따른 변형률을 Data Acquisition System (TDS-302)을 통해 수집하였다. 인장강도 실험결과 최대 파괴응력은 27.98MPa가 나타났으며 평균 파괴응력은 23.55MPa로 나타났다.

5.2 GRP관의 편평실험

이 연구의 편평실험은 관의 구조적 거동을 조사하기 위한 목적으로 GRP관에 대한 시편의 치수 및 수는 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 단면두께는 실측치와 차이가 있을 수 있기 때문에 제조사에서 제시하고 있는 두께를 표시하였다.

Table 6 GRP관의 편평실험 치수

시편번호	시편길이, L (mm)	관 두께, t (mm)	직경(내경), D (mm)
R-1	400	25	1,000
R-2	400	25	1,000
R-3	400	25	1,000

편평실험은 홍익대학교 부설 과학기술연구소 제 3연

구부에 설치되어 있는 98kN 용량 UTM과 LVDT를 사용하여 하중과 변위를 측정하였다. 각 시편에 대한 실험결과는 Fig. 8에 나타내었다.

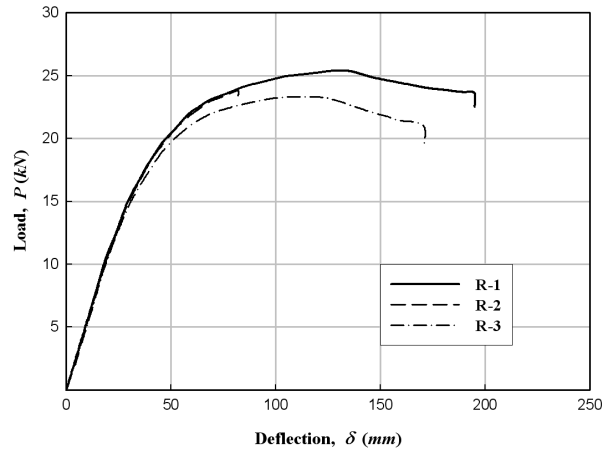


Fig. 8 GRP관의 편평실험 하중-변위 관계

5.3 GRP관의 관변형 예측을 위한 변수설정

GRP관의 관변형 예측에 사용한 흙의 특성은 기존 연구문헌(대한토목학회, 2011)에서 제시하고 있는 결과로 지반반력계수는 2,800kN/m²를 사용하고 단위중량은 16.5kN/m³를 사용하였다.

GRP관의 역학적 성질은 Table 7에 단면치수와 함께 나타내었다. Table 7에서 GRP관의 파이프강성 PS는 Table 8의 기준 휨외압으로부터 결정하였으며, 휨강성 EI는 ASTM D 2412 (2010) 에서 제안하고 있는 방법을 적용하여 파이프강성으로부터 식 (6)을 통해 계산한 값이다.

$$EI = 0.149R^3PS \tag{6}$$

Table 7 GRP관의 단면치수 및 역학적 성질

내경 (mm)	t (mm)	기준 휨외압 (kN/m)	PS (kgf/cm ²)	휨강성, EI (kN·m ² /m)
1,000	25	36.5 ~ 48.8	7.30 ~ 9.76	14.35 ~ 19.19

GRP관은 지중에서 주변의 토사와 유기적으로 거동하는 연성관이므로, 매립토에 의해 작용하는 토압은 수직토압공식을 적용하여 매설관 상부의 매립토의 중량이 모두 GRP관에 작용하는 것으로 가정하였다. 매립토에 의해 GRP관에 작용하는 수직토압과 활하중을 Table 8에 정리하여 나타내었다.

Table 8 매설깊이에 따른 수직토압

매설깊이 H (m)	매립토에 의한 수직토압, W_d (kN/m^2)	활하중에 의한 수직토압 W_r (kN/m^2)	하중조합 P (kN/m^2)
4.0	66.00	10.6	76.64
4.5	74.25	9.11	83.36
5.0	82.50	7.87	90.37
5.5	90.75	6.86	97.61
6.0	99.00	6.01	105.01

※ 매립토의 단위중량: 16.5 kN/m^3
 ※ 활하중은 DB-24 후륜하중: 9.6 kN
 ※ 하중조합 $P = W_d + W_r$

5.4 ASTM D 2412에 의한 관변형 예측

ASTM D 2412 (2010) 규격에서는 시험을 통해 파이프 강성 PS를 추정하는 방법을 규정하고 있으며, 지중매설 연성관에 대한 수평방향 관변형을 Iowa Formula를 통해 예측하도록 제안하고 있다. ASTM D 2412 (2010)에서 제안하고 있는 방법을 통해 결정한 GRP관의 관변형 예측은 Table 9와 Fig. 9에 나타내었다.

ASTM D 2412에서 제안하고 있는 방법을 통해 GRP관의 관변형을 계산한 결과 5m 매설깊이에서 최대 35.31mm (3.5%)의 관변형이 발생하는 것으로 나타났다.

ASTM D 2412에서 제안하고 있는 관변형식은 매립토의 단위중량, 관 주변 흙에 대한 지반반력계수, 기초조건, 관의 강성 등을 포함하고 있어 지중매설상태에 있는 관의 경계조건 및 하중조건을 적절히 고려하고 있다고 볼 수 있다.

Table 9 GRP 관의 관변형 예측

유효받침각 (2α)	매설깊이 (m)									
	4.0		4.5		5.0		5.5		6.0	
	관변형									
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)
60°	29.94	3.0	32.57	3.3	35.31	3.5	38.13	3.8	41.03	4.1
90°	28.18	2.82	30.65	3.1	33.23	3.3	35.89	3.6	38.61	3.9
120°	26.42	2.64	28.73	2.9	31.15	3.1	33.65	3.4	36.20	3.6

※ 허용 관변형: 5%
 ※ $D_e = 1.0$ (When using the Prism load)
 (Moser, 2001; Watkins, 2010)

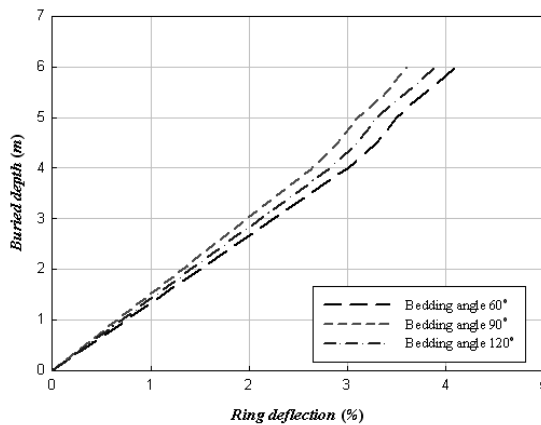


Fig. 9 유효받침각에 따른 관변형

6. 결 론

이 연구에서는 GRP관이 지중에 매설되었을 경우 관 상부의 매설토에 의한 하중과 활하중에 대하여 GRP관의 관변형에 대하여 예측하였다. 먼저 국내외에서 적용하고 있는 연성관의 설계법을 검토하였고, GRP관의 관변형 예측을 위한 효율적인 설계법 (ASTM D 2412)에서 제시하고 있는 Iowa Formula에 GRP관의 재료적 성질과 관의 강성을 적용하여 설계규준에서 제시하고 있는 허용 관변형을 초과유무와 변형 예측을 하였다. 그 결과 연성관에 대한 지중매설설계를 제안하고 있는 하수도시설기준(2005)과 ASTM D 2412 (2010)의 방법을 통해 GRP관의 구조적 안전성을 평가한 결과 매립 깊이가 5m에서는 모두 허용 관변형 이내로 안전한 것으로 평가되었다. 관변형 예측에 사용한 변수는 기존 연구의 현장시험결과를 토대로 결정한 지반반력계수, 매립토의 단위중량이며, 기초의 경우 하수도시설기준에서 제안하고 있는 가장 열악한 상태인 유효반침각(2α) 60°를 적용한 구조검토로서 GRP관의 시공단계에서 관이 품질기준을 만족한다면, 관에 과도한 변형이 발생하지 않을 것이며 검토결과 기존의 상하수도관을 대체할 수 있는 구조적 성능을 만족하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. 계형산 (2005), 폴리에틸렌관의 우수성에 관한 연구 결과, 연구보고서, 한국프라스틱공업협동조합연합회.
2. 김응호 (2007), 유리섬유복합관 시공을 위한 연약지반 보강대책에 관한 연구, 연구보고서, 홍익대학교 부설 과학기술연구소, (주)한국화이바.
3. (사)대한토목학회 (2011), 유리섬유레진관의 재료적 특성 및 구조적 안전성 평가, 연구보고서.
4. 한국상하수도협회 (2005), 하수도시설기준, 환경부.
5. ASTM D 2412 (2010), Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading, American Society for Testing and Materials.
6. Javanmard, M. (1993), Soil-Structural Interaction of Fully and Partially Buried Flexible Pipes, *Ph.D. Thesis*, The University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.
7. Jeyapalan, J. K. and Boldon, B. A. (1986), "Performance and Selection of Rigid and Flexible Pipes," *Journal of Transportation Engineering*, American Society of Civil Engineers, ASCE. Vol. 112, Issue 5, pp. 507-524.
8. Moser, A. P. (2001), *Buried Pipe Design*, 2th Ed., McGraw-Hill, New York.
9. Smith, G. and Watkins. R. (2004), "The Iowa Formula:

Its Use and Misuse When Designing Flexible Pipe," *Proceeding of Pipelines International Conference*, American Society of Civil Engineers, ASCE, pp. 1-7.

10. Watkins. R. and Anderson, L. R. (2000), *Structural Mechanics of Buried Pipe*, CRC Press, New York.