

GRP 연성관의 관강성 예측 Pipe Stiffness Prediction of GRP Flexible Pipe

이영근 Lee, Young-Geun* · 김선희 Kim, Sun-Hee**· 박준석 Park, Joon-Seok*·
윤순중 Yoon, Soon-Jong***†

(Received June 10, 2011 ; Revised July 4, 2011 ; Accepted September 2, 2011)

ABSTRACT

In this paper, we present the load-deflection behavior of GRP pipes. GRP buried pipes are widely used in construction in the advantage of their superior mechanical and physical characteristics such as high chemical resistance, high corrosion resistance, right weight, smooth surface of the pipe, and cost effectiveness from soil-structure interaction. To design flexible pipes to be buried underground, it should be based on the ASTM D2412(2010). When applying ASTM D 2412(2010) to the design, pipe stiffness(PS) must be predetermined by the parallel-plate test which requires tedious and laborious working process. To overcome such problems, the finite element simulations for finding the load-deflection behavior of the GRP flexible pipes is installed at UTM testing machine. In the finite element simulations, basic data, such as the modulus of elasticity of the material and cross-sectional dimension, is used. From the investigation, we found that the difference between experimental result and analytical prediction is less than 15% when the pipe deflected 3% and 5% of its vertical diameter although the pipe material is not uniform across the cross-section.

요 지

이 연구에서 GRP 관의 하중-처짐 거동을 조사, 보고하였다. 지중매설 GRP관은 높은 내화학성, 높은 부식저항성, 경량성, 관표면의 매끄러움, 지반-관의 상호작용 고려에 따른 경제성 등의 탁월한 역학적, 물리적 특성들로 인해 건설 현장에서 광범위하게 사용되고 있다. 지중에 매설되는 연성관을 설계하기 위해서는 ASTM D 2412 (2010)에 따라야 한다. ASTM D 2412 (2010)에 따라 설계할 경우, 관의 원강성 (PS)을 편평시험에 따라 먼저 결정해야 하는데, 이 시험이 귀찮고 노동력을 필요로 한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 UTM에 설치된 형태의 GRP관의 하중-처짐 거동을 유한요소법에 따라 모사하였으며, 유한요소법에 의한 모사에는 재료의 탄성계수와 단면의 기하학적 치수 등 기초적인 자료를 사용하였다. 이와 같은 연구로부터, 관재료가 관의 단면내에서 비교적 일정하지 않음에도 불구하고 수직방향의 관변형이 3%와 5%가 발생할 경우, 편평시험과 수치해석적 연구 결과가 15%이내의 차이로 하중의 예측이 가능함을 알 수 있었다.

Key Words: Flexible pipe(연성관), GRP(유리섬유강화복합관), Pipe deflection(원강성), Finite element analysis(유한요소해석)

1. 서 론

기존의 하수관은 철근콘크리트관이 대부분 사용되었으나, 시간 경과에 따라 노후화가 진행되어 관 부식 및 수밀능력 미확보 등의 문제점에 의해 사용이 급격히 감소하게 된다. 따라서 최근 내부식성이 뛰어나고, 운반이 용이하며, 내구성 및 내염해성이 뛰어난 연성관의 사용이 급증하고 있는 실정이다. 하지만, 연성관은 우수한 특성에도 불구하고 아직 시장에서 신뢰성에 의문을 제기하고 있을 뿐만 아니라 국부적인 파손사례가 빈번하여 이에 대한 대책 마련이 시급한 실정이다(김, 2011).

지중매설 연성관 중 GRP관을 ASTM D 2412 (2010)에 따라 설계한 경우 설계식 (1)의 관의 강성을 편평시험에 의해 구해야 한다. 그러나 일반적으로 실험은 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 역학적 특성과 관의 치수를 정확히 알면 간단한 수치해석적인 방법으로 거동특성을 실험하지 않고도 파악할 수 있고 PS값을 구해서 설계하여 시공했을 경우 안전한지 여부를 판단할 수 있다. 따라서 이 연구에서는 유한요소해석(Finite Element Method, FEM)을 수행하여 직접 실험을 수행하지 않아도 관 강성을 예측할 수 있도록 하였다. 사용된 유한요소해석은 범용 구조해석프로그램인 ANSYS Ver. 11을 사용하였다. 이 프로그램은 AUTO CAD를

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

사용하여 생성된 데이터를 사용하여 보, 평면응력, 3차원 고체해석, 정적해석 및 동적해석 등을 수행할 수 있는 기능을 가지고 있어 AUTO CAD로 3차원(3D) 모델링을 하여 유한요소프로그램인 ANSYS로 전환시켜 유한요소해석을 수행함으로써 이 연구에서 고려하고 있는 연성관의 하중과 변위 관계를 조사하였고 편평실험결과와 비교 검토하여 유한요소해석을 이용한 관 강성을 추정할 수 있도록 하였다.

$$\Delta x = \frac{D_c K W_c}{0.149 PS + 0.061 E'} \quad (1)$$

여기서, $\Delta x (\approx \Delta y)$ 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 단위길이당 연직도압을 나타내고 있다.

지중매설된 연성관의 변형을 예측하는 식 (1)은 Iowa Formula라고 부르기도 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.

2. 연성관의 정의 및 통수단면적 변화

2.1 연성관의 정의

연성관이란 관과 관 주변 지반과의 상호 관계에 의한 작용, 즉, 관과 관 주변의 지반이 함께 외력에 거동하도록 설계되는 관으로 정의하고 폴리에틸렌관(polyethylene pipe, PE 관), 폴리염화비닐관(poly vinyl chloride pipe, PVC 관), 유리섬유복합관(glass fiber reinforced thermosetting plastic pipe, GRP 관)을 이 연구에서 고려하는 연성관으로 정의하였다(김, 2011). 연성관 단면내의 위치별 명칭은 다음 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 연성관의 관변형에 따른 통수단면적 변화

연성관은 관변형에 따라 원의 면적이 타원의 면적으로 Fig. 2와 같이 변한다. 예로써, 지름이 600mm인 관의 면적 변화에 따른 통수단면적의 변화를 계산하기 위해 Mathcad Ver.14 프로그램으로 작성하여 무차원으로 Fig. 3에 나타내었다. 즉, 10% 관변형이 발생할 경우 통수단면적의 변화는 1%정도임을 알 수 있다. 이 결과로 보아 연성관의 구조적 거동에 따른 관내부의 유량은 큰 변화가 없는 것을 알 수 있다.

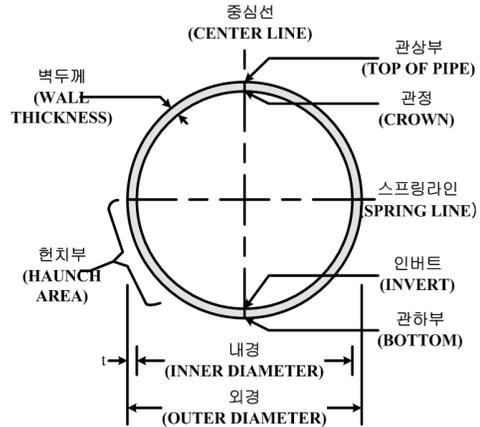


Fig. 1 연성관의 단면내의 위치별 명칭(Watkins, 2000)

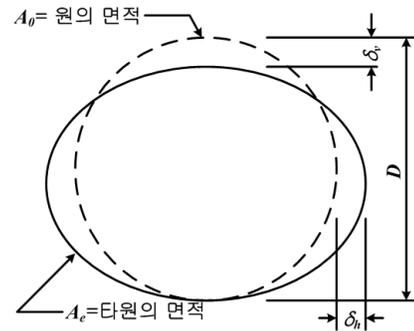


Fig. 2 면적의 비, $A_r = A_e / A_0$

Change of Flow Area Due to Ring Deflection

Diameter of circular pipe	$D := 600\text{mm}$
Area of a circle	$A_0 := \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 2.827 \times 10^5 \cdot \text{mm}^2$
Ring deflection(%)	$d := 0.2\% \dots 20\%$
Radius of a circle	$r := \frac{D}{2} = 0.3\text{m}$
Area of an ellipse	$A_e(d) := \pi \cdot r^2 \cdot (1 - d^2)$
Ratio of areas	$A_r(d) := \frac{A_e(d)}{A_0}$
	$d_y(d) := d \cdot 100$

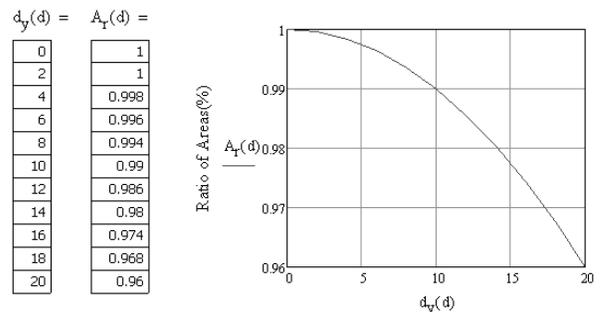


Fig. 3 관변형에 따른 통수단면적의 변화

3. 지중매설 연성관의 설계기준

국내 연성관 시장은 1970년대 PVC 관의 수요로부터 시작하여 1990년대 후반부터 PE, PVC 관의 상하수도 관 수요가 본격적으로 증가되기 시작하였다. 2002년 이후 하수관거 정비사업 원년으로 하여 사업계획을 세워 하수관거 정비사업을 정부 주도로 하여 많은 공사가 완료 또는 진행 중이다. 이 사업에서는 주로 연성관이 많이 사용되었으나 아직도 선진 유럽 및 미주의 사용량에 비해서는 낮은 실정이다(김, 2011).

국내 기준인 하수도시설기준(2011)에서는 연성관에 대한 과다변형 등 부실공사를 방지하기 위해 장기허용관변형은 내경의 5% 이내이어야 한다고 제시하고 있지만 기준에 대한 근거는 명확히 제시하고 있지 않다. 그러나, Spangler는 지중매설된 강재 관이 20%의 변형이 되었을 때 관 상단에서 꺾이는 현상을 확인하였으며, 안전율 4를 적용하여 초기 허용관변형을 5%로 정하였다고 문헌에 제시되어 있다(Watkins, "Structural Mechanics of Buried Pipes").

하수도시설기준(2011)의 경우 변형량 계산식에 지반 반력의 변화를 고려하지 않으며, 관의 휨강성인 EI값이 관 재료의 고유의 성질로 규정하고 있다. 그러나 ASTM D 2412에서는 지반상태를 고려하여 연성관의 변형을 고려하며, 관변형 5%일 때 PS값을 구해서 설계에 사용한다(박, 2011). 아래 Table 1은 연성관의 대표적인 국내외 설계식을 비교하여 나타내었다.

Table 1 연성관의 대표적인 국내외 설계식을 비교

구분	하수도시설기준(2011)				ASTM D 2412		
변형량	$K_3 \frac{W_d R^4}{EI} + K_4 \frac{W_s R^4}{EI}$				$\frac{D_e K W_c}{00.149PS + 0.061E'}$		
연직도압	$\gamma_t \cdot H$				$\gamma_t \cdot H$ (Prism load)		
유효 반침각 계수	30°	도압 (K_3)	0.102	활하중 (K_4)	0.030	K	0.102
	45°		0.085				0.096
	60°		0.070				0.090
관의 강성	EI (E : 탄성계수, I : 단면2차모멘트)				PS (5% 관변형 기준)		
변형 지연계수	-				D_e	1.5 (Marston)	1.0 (Prism)
지반반력	-						ASTM D 2321 참조

4. GRP 관의 원강성시험

4.1 GRP 관의 역학적 성질

이 연구에서 대상으로 한 GRP 관은 (주)한국화이버에서 필라멘트와인딩 공정에 의해 생산된 것으로서, GRP 관은 Fig. 4와 같이 GRP내 폴리에스터 수지 (Polyester resin)를 사용하였으며, 보강섬유는 연속 유리 섬유(Continuous Glass Fiber)를 사용하였다. 중간층에는 모래와 폴리에스터 수지를 주재료로 한 레진모르타르 (resin mortar)가 배치되는 형태이며, 관종과 관경에 따라 각 층의 두께를 달리하는 필라멘트와인딩 공법으로 제작되고, 연속생산을 통해 생산된 제품의 두께방향에 대한 관의 구성은 Fig. 5에 나타내었다. GRP 관에 대한 역학적, 물리적 특성 시험결과를 Table 2에 나타내었다.

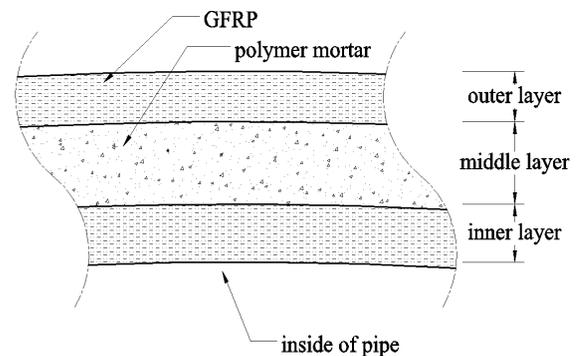


Fig. 4 GRP 관의 단면 일부의 구성((주)한국화이버)

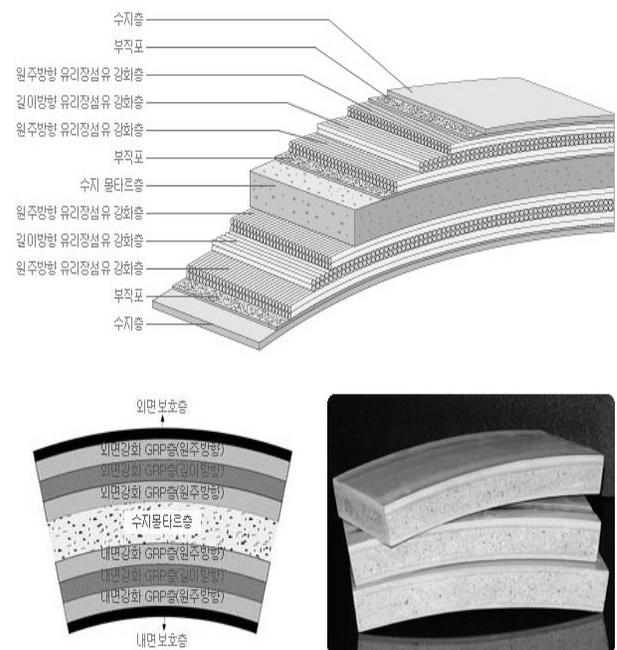


Fig. 5 GRP 관의 구성((주)한국화이버)

Table 2 GRP 관의 특성(하수도시설기준, 2011)

성 질	역학적, 물리적 특성	시험 방법
비 중	1.93	KS M 3305
Mohrs 경도	6.5	KS M 3305
인장탄성계수(GPa)	21.5	KS F 2240
프라이송비	0.12	KS F 2240
충격강도(J/cm)	20.5	ASTM D 256
조도계수	0.010	-
유속계수	150	-

4.2 GRP 관의 원강

임의의 관경을 선택하여 GRP관이 외부하중에 견디는 정도를 측정하기 위해 원강성을 측정하였다. 원강성은 ISO 9969 규정에 따라 편평시험(Parallel-plate test)을 하여 구하게 된다. 이 시험에 사용된 시편의 관경 및 단면치수는 제조사의 자료를 참고하여 Table 3에 나타내었으며, Fig. 6에 실제 사용된 시편의 형태를 나타내었다.

편평시험은 홍익대학교 구조실험실에서 수행하였다. 981N 용량의 UTM을 사용하였고 LVDT를 사용하여 관의 상하부 변위를 측정하였다. 하중재하는 ISO 9969에 따라 변위제어로 $20 \pm 2mm/min$ 의 속도로 재하하였으며, Fig. 7에 편평시험 장면을 보여주고 있다.

Table 3 GRP 관 편평시험 시편의 치수

관종	시편번호	시편길이, L(mm)	관 두께, t(mm)	내경, D(mm)
GRP 관	G-1,2,3	300	12.0	600

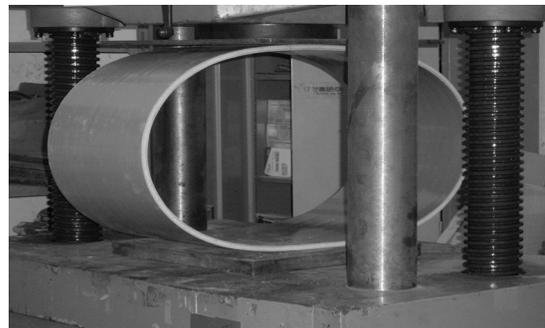


Fig. 6 편평시험 시편



Fig. 7 편평시험

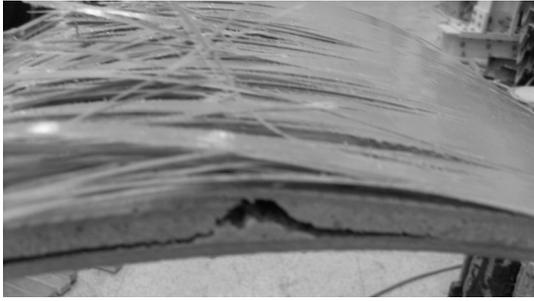
GRP 관의 편평시험 결과 Fig. 8과 같이 인장을 받는 관 상하부 내측면에서 인장파괴 형태가 나타났고, 측면부에서는 외측 FRP 층의 섬유가 인장력에 의해 끊어지는 형태를 보였다. 또한, FRP 층 사이에 있는 폴리머모르타르 층은 시편이 전체적으로 파괴될 때까지 외형적으로는 균열이 관찰되지 않다가 FRP 층이 파괴됨과 동시에 취성파괴되었다. 이는 재료가 고강도이면서도 상대적으로 탄성계수가 작기 때문에 연성거동을 하기 때문이라고 생각된다. Table 4에 설계기준에서 제시한 관변형 5%일 때의 하중값과 관변형 3%일 때의 하중값을 정리하여 나타내었으며, Fig. 9에 GRP 관의 하중과 변위 관계를 그래프로 나타내었다.



(a) 파괴형태 1



(b) 파괴형태 2



(c) 파괴형태 3

Fig. 8 GRP 관의 파괴형태

Table 4 GRP 관 편평시험 결과

시험시편	시편번호	3% 관변형일 때 하중(kN)	5% 관변형일 때 하중(kN)
φ 600	G-D600-1	5.036	7.201
	G-D600-2	5.253	7.083
	G-D600-3	5.902	7.653
	평균	5.397	7.312

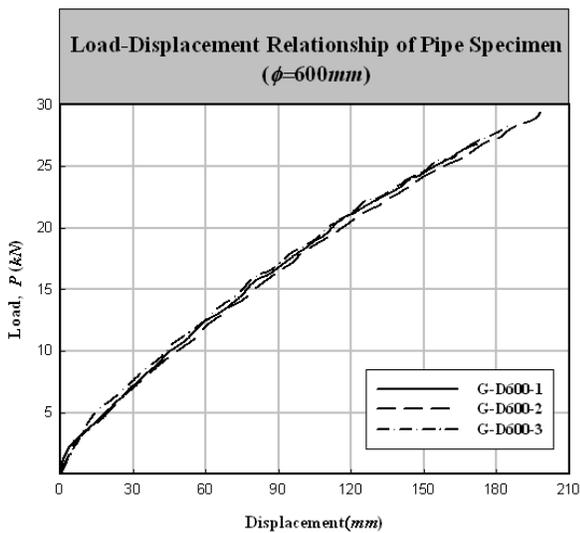


Fig. 9 GRP 관의 하중과 변위 관계 그래프

5. 유한요소해석

5.1 유한요소해석 모델링

앞에서는 재료의 특성 및 편평시험 등에 대해서 설명하였다. 그러나 일반적으로 시험은 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 간단히 역학적 특성과 부재(관)의 치수를 정확히 알면 수치해석적인 방법으로 거동특성을 시험하지 않고도 파악할 수 있고, 이것을 근거로

관을 설계하여 시공했을 경우 안전 여부를 판단할 수 있다. 따라서 유한요소해석과 같은 수치해석적 연구가 필요하다. 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)은 ANSYS Ver. 11을 사용하였으며, 3D 솔리드요소(SAS IP, Inc, 2007)를 사용하였다. 해석모델의 치수는 실험 시편과 동일하게 Table 3에 나타난 치수를 이용하였으며, 재료의 역학적 성질은 Table 2와 동일하게 입력하였다. Fig. 10과 같이 상하에 강재 플레이트를 모델링하여 시험과 동일하게 하중이 재하될 수 있도록 하였다.

경계조건은 아래 쪽의 강재 플레이트의 하단면을 고정지점으로 하였다. 하중조건은 관의 상단 부분의 강재 플레이트 상부 면에 분포하중이 원의 중심방향으로 재하되도록 하였다. 하중은 점차적으로 증가시켜 내경의 3%, 5%의 관변형을 일으켰을 때의 하중을 구했으며, 그 결과를 실제 실험데이터와 비교하였다.

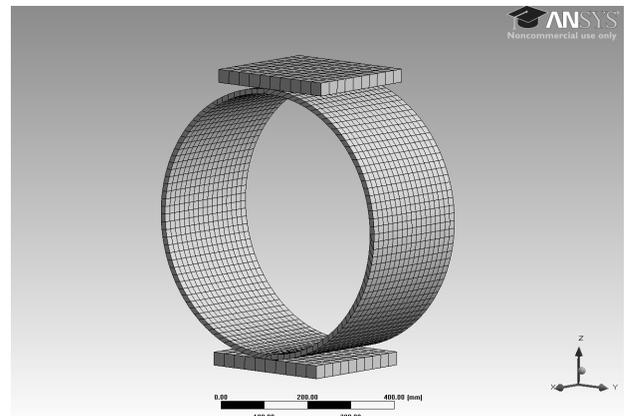


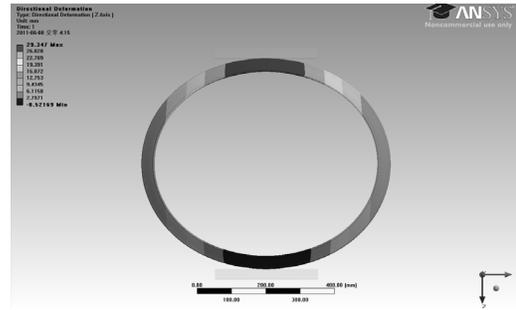
Fig. 10 GRP 관의 유한요소 모델링

5.2 유한요소해석 결과

관경의 3%, 5% 변위가 발생할 때, 유한요소해석에 의해 구한 하중과 편평시험을 통해 구한 하중의 평균 값을 비교하여 Table 5에 정리하였으며, Fig. 11에 유한요소해석 결과를 나타내었다. 해석으로부터 구한 하중과 시험으로부터 구한 하중의 차이는 최대 15% 미만으로 나타났다. 이 차이는 유한요소해석에서는 관이 일정한 역학적 성질을 갖는 것으로 가정하고 있으나 실제 시편은 일정하지 않기 때문일 것으로 생각된다. 시험에 사용한 관의 경우 크게 GFRP와 Resin mortar의 2가지의 재료로 구성되어 변형이 커짐에 따라 두 재료간의 부착 문제나 각 재료간의 강성 차이에 의한 응력 집중 문제에 의해 합성거동을 하지 못할 수 있다. 또한, 복합재의 경우 시편채취 위치에 따라 상당한 역학적 성질의 차이가 있기 때문에 이러한 현상이 발생한 것으로 생각된다.

Table 5 해석결과와 시험결과 비교

관종	변위 (%)	시편 번호	①시험결과 (kN)	②해석결과 (kN)	비고 ②/①
GRP	3	1	5.036	5.105	0.946
		2	5.253		
		3	5.902		
		평균	5.397		
	5	1	7.201	8.508	1.14
2		7.083			
3		7.653			
평균		7.461			



(d) 5% 관변형 - 2

Fig. 11 GRP 관의 유한요소해석 결과

4. 결론

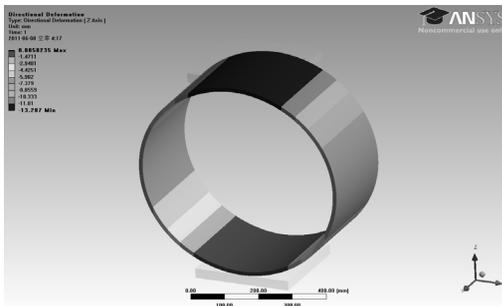
최근 사용이 급증하고 있는 연성관은 내구성, 내염 해석, 내부식성 등이 뛰어난에도 불구하고 GRP 연성관에 대한 실험적, 이론적 연구가 미비한 실정이다. 또한, 국내 연성관 관련 설계기준 및 제품규격 등은 기술선진국에 의해 개발 연구된 기준 및 규격을 단순히 번역하여 규정하고 있는 실정으로, 그 규격이나 기준의 근거 및 배경에 대해 구체적으로 제시하고 있지 않기 때문에 그대로 현실에 반영하기에는 무리가 있다. 이에 관변형에 대한 연구로 관련 기준 및 참고문헌을 조사, 분석하였고, 연성관에 대한 거동을 시험하고 유한요소해석을 통해 거동을 예측하여 그 결과를 비교하여 관변형의 예측까지 하는 일련의 과정을 수행하였다.

1. ϕ 600의 GRP관에 대한 편평시험을 수행하여 연성관의 내경의 3%, 5% 변위를 보일 때 하중을 구하였다. 실험결과 3%와 5%의 변형시의 하중이 각각 5.397kN, 7.461kN로 나타났다.

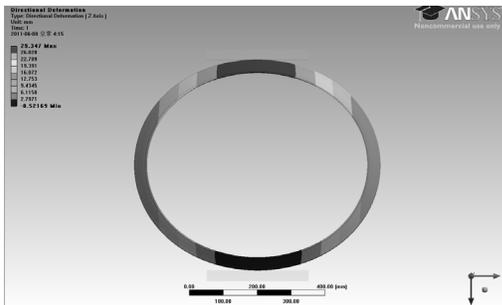
2. 편평시험과 동일한 형태의 유한요소해석을 통하여 연성관의 내경의 3%와 5%의 변위를 보일때의 하중을 구하였으며, 해석결과 3%와 5%의 변형시의 하중이 각각 5.105kN, 8.508kN로 나타났다.

3. 편평시험과 유한요소해석의 하중을 비교한 결과관의 PS값을 15% 내에서 예측이 가능하였다. 따라서, 유한요소해석을 통하여 연성관의 하중-변위 관계를 확인할 수 있으므로 실질적인 거동에 대한 예측이 가능할 것으로 생각된다.

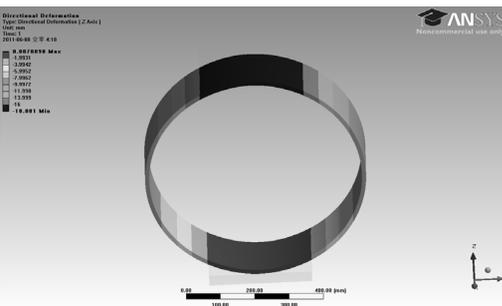
이 연구에서는 GRP 연성관의 편평시험의 결과와 유한요소해석을 비교하였으나, 지중에 매설된 연성관의 거동과는 차이가 있으므로 지중매설 연성관의 모사시험과 유한요소해석을 비교하는 연구가 진행되어야 할 것이며, 초기변형률 기준을 정함에 있어서 단순한 관변형에 따르기보다는 관의 연결부의 누수를 방지하고, 관의 사용성 측면에 대한 검토가 필요할 것으로 예상된다.



(a) 3% 관변형 - 1



(b) 3% 관변형 - 2



(c) 5% 관변형 - 1

감사의 글

이 연구는 환경부, 환경관리공단의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김선희 (2011), 지중매설 연성관의 관변형에 관한 연구, 석사학위논문, 홍익대학교.
2. 박준석, 김선희, 김응호, 윤순중 (2011), 지중매설 유리섬유복합관의 관변형에 관한 안전성 평가, 한국복합신소재구조학회논문집, 제2권, 제2호, 2011, pp.26-33.
3. 이보배 (2009), 유리섬유복합관의 구조적 거동특성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 홍익대학교.
4. 한국상수도협회 (2011), 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. ISO 9969 (2007), *Thermoplastics Pipes-Determination of Ring Stiffness*, International Organization for Standardization.
7. SAS IP, Inc. (2007), *Release 11.0 Documentation for ANSYS Workbench*, SAS IP, Inc, Pennsylvania.
8. Watkins. R. and Anderson, L. R. (2000), *Structural Mechanics of Buried Pipe*, CRC Press, New York.