



지중매설 연성관의 관강성 추정

Pipe Stiffness Prediction of Buried Flexible Pipes

박준석¹ · 김선희 · 김응호

Joonseok Park^{*} · Sunhee Kim · Eungho Kim

¹ 홍익대학교 토목공학과

(2012년 1월 19일 접수; 2012년 2월 1일 수정; 2012년 2월 3일 채택)

Abstract

In this paper, we present the result of an investigation pertaining to the pipe stiffness of buried flexible pipes. Pipe stiffness (PS) formula for the parallel plate loading condition is derived based on the elasticity theory. Vertical and horizontal displacements are also derived. Vertical deflection is always larger than the horizontal deflection because some of energy due to overburden load is stored in the pipe but the difference is negligibly small. In the study, mechanical properties of the flexible pipes produced in the domestic manufacturer are tested and the results are reported in this paper. In addition, pipe stiffness is determined by the parallel plate loading tests and the finite element analysis. The difference between test and analysis is less than 14% although there are significant variations in the mechanical properties of the pipe material. Therefore, it was found that the finite element analysis can be used to predict the pipe stiffness instead of conducting parallel plate loading test.

Key words : Pipe stiffness, Flexible pipe, Parallel plate loading test, Finite element analysis

주제어 : 관강성, 연성관, 편평시험, 유한요소해석

1. 서론

기존 하수관은 강재나 콘크리트 재질의 관이 많이 사용되어 왔으나, 콘크리트 재질의 경우 취성에 약한 관계로 지하철 및 상재하중에 의한 진동 등에 의해 균열이 발생할 수 있고, 하수에 의한 콘크리트 부식 등으로 인해 국부적인 균열이 발생할 수도 있어 중점적인 유지관리가 필요하다. 또 콘크리트 보강재로 사용하고 있는 강재의 부식 등으로

관의 장기적인 내구성 확보에도 어려움이 많았다. 근래 이러한 재질적 문제점을 해결하고 경제성을 제고하기 위해 플라스틱 재질로 구성된 하수관의 사용이 활성화되고 있다.

플라스틱 재질의 국내 하수관은 대부분 소구경을 사용하였으나 관 재질 및 관 제조에 대한 기술의 발달로 근래 대구경까지 다양하게 사용되고 있다. 이러한 플라스틱 재질의 하수관은 지중매설시 지반과

* Corresponding author Tel:+82-2-3141-0774, Fax:+82-2-3141-0774, E-mail: joon0527@hanmail.net

유기적으로 거동하는 연성관으로써 제품의 품질과 시공에 대한 신뢰성이 동시에 확보되어야 구조적인 안전성을 기대할 수 있다. 그러나 기술선진국들에 비해 아직까지 제품 및 시공기술 등에 대한 연구가 부족한 실정이다.

특히, 국내의 관련 설계기준 및 제품규격 등은 기술선진국들에 의해 개발된 기준 및 규격을 단순히 참조하여 규정한 것으로 보이며, 독자적인 개발 배경 및 근거를 구체적으로 제시하고 있지 않고 있다.

현재 국내 하수도분야에서 사용되는 연성관의 설계는 하수도시설기준 (2011)에서 제시한 설계방법을 적용하고 있지만 이 설계식은 지반의 반력계수가 고려되지 않고 있어 지반과 관의 상호작용에 의한 구조적 거동을 고려하지 않고 있는 문제가 있다. 한편 미국, 독일 등 기술 선진국의 연성관 설계방법은 ASTM, ISO 등에서 제시한 지반조건을 고려하여 설계하고 있다. ASTM D 2412 (2010)에서 제안하고 있는 지중매설된 연성관에 대한 설계식을 제시하였다. 또한, ISO에서 규정하고 있는 편평시험(Parallel Plate Loading Test)을 통해 관의 강성(PS)값을 추정하였다. 그러나 일반적으로 실험은 시간과 비용이 많이 소요되기 때문에 간단히 역학적 특성과 관의 치수를 정확히 알면 수치해석적인 방법과 탄성이론에 근거한 이론적인 방법으로 거동 특성을 시험하지 않고도 파악할 수 있고 설계하여 시공했을 경우 안전한지 여부를 판단할 수 있다. 그래서, 이 연구에서는 관의 강성에 대한 이론적인 해석과 유한요소해석(Finite Element Method, FEM)을 수행하고 대표적인 연성관(Polyethylene, PE), (Polyvinyl chloride, PVC), (Glass fiber reinforced polymer plastic, GFRP)에 대하여 역학적 성질 조사와 편평시험을 수행하여 유한요소해석 결과와 비교함으로써, 국내에서도 직접 현장 시험을 수행하지 않아도 관의 강성을 추정할 수 있는지의 여부를 검토하였다.

2. 관강성의 이론

Timoshenko와 Gere(1961)는 관의 강성을 탄성이론(theory of elasticity)에 근거하여 구하였다. 휨이 작용하는 curved bar에서 곡률의 변화와 휨모멘트의 관계를 Fig. 1에 나타내었다.

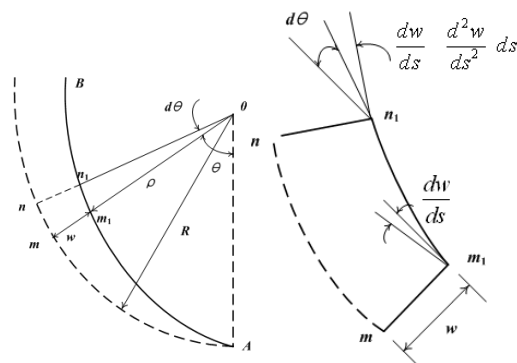


Fig. 1 Bending of a thin curved bar (Timoshenko and Gere, 1961)

Fig. 1에서 R 은 관(pipe \approx curved bar)의 반지름을 나타내며, ρ 는 curved bar의 각 θ 만큼 회전한 곳의 임의의 한 점에서 변형이 일어난 후의 곡률을 나타낸다. Curved bar에서 일어나는 곡률의 변화와 휨모멘트와의 관계를 식으로 표현하면 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{R} \right) = -M \quad (1)$$

식 (1)에서 EI 는 휨강성(flexural rigidity)을 나타내며, 우항의 음수는 곡률이 감소할 때 양수로 변화된다. Curved bar에 휨이 작용하여 곡률이 변할 때 단면의 $d\theta$ 의 각을 이루고 있는 미소요소 m , n 의 변형을 고려한다. 요소의 초기길이와 초기곡률은 식 (2), (3)과 같이 표현되며, 변형후의 곡률의 변화는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ds = R d\theta \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{R} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta + \Delta d\theta}{ds + \Delta ds} \quad (4)$$

식 (4)에서 $d\theta + \Delta d\theta$ 는 변형된 curved bar의 m_1 과 n_1 의 사이의 각을 나타내며, $ds + \Delta ds$ 은 m_1 과 n_1 의 길이를 나타낸다.

얇은 curved bar의 처짐곡선을 구하기 위한 2차 상미분방정식(지배미분방정식)은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2w}{ds^2} + w = -\frac{MR^2}{EI} \quad (5)$$

식 (5)에서 반지름 R 이 무한대로 커지게 되면 straight bar의 처짐곡선 식과 동일하게 된다. 식 (5)를 적용하기 위한 예로서 편평시험과 동일한 조건으로 압축력을 가하면 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

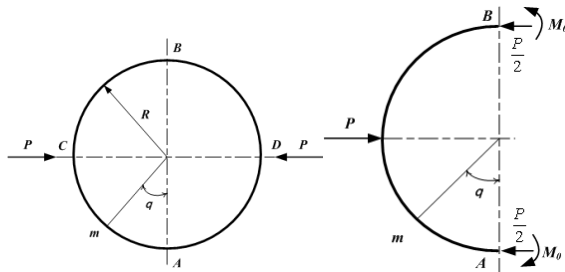


Fig. 2 Ring of radius compressed by two forces action (Timoshenko and Gere, 1961)

Fig. 2에서의 A, B지점에서의 휨모멘트는 식 (6)에 따라 구할 수 있으며 식 (6)을 식(5)에 대입하면 식 (7)과 같이 표현된다.

$$M = M_o + \frac{PR}{2}(1 - \cos \theta) \quad (6)$$

$$\frac{d^2w}{d\theta^2} + w = -\frac{M_o R^2}{EI} - \frac{PR^3}{2EI}(1 - \cos \theta) \quad (7)$$

식 (7)의 일반해(general solution)는 재차해

(homogeneous solution)와 특수해(particular solution)를 합해서 구하며, 식 (8)과 같이 구해진다.

$$w = A_1 \sin \theta + A_2 \cos \theta - \frac{M_o R^2}{EI} - \frac{PR^3}{2EI} + \frac{PR^3}{4EI} \theta \sin \theta \quad (8)$$

휨모멘트 M_o 은 Castigliano의 이론으로부터 구할 수 있으며 변형에너지, U 는 straight bar의 처짐곡선 식을 사용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U = \int_0^{2\pi} \frac{M^2 R d\theta}{2EI} = \frac{2R}{EI} \int_0^{\pi/2} M^2 d\theta \quad (9)$$

식 (6)을 식 (9)에 대입하여 적분하고 경계조건으로 $\theta = 0$, $\theta = \pi/2$ 을 대입하여 정리하면 \overline{AB} , \overline{CD} 의 변화는 다음 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\overline{AB} = \frac{PR^3}{4EI} \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) \quad (10a)$$

$$\overline{CD} = \frac{PR^3}{4EI} \left(\pi - \frac{8}{\pi} \right) \quad (10b)$$

식 (5)는 길이방향으로의 변형이 없는 원형 관에서도 적용이 가능하며 관 단면의 수직방향과 수평방향의 변위는 식 (11)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta y &= 2w_{\theta=\pi/2} = \frac{PR^3}{4EI} \left(\pi - \frac{8}{\pi} \right) \\ &= P \frac{R^3}{EI} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) = 0.149 P \frac{R^3}{EI} \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} \frac{P}{\Delta y} &= \text{Pipe stiffness (PS)} = 6.72 \frac{EI}{R^3} \\ (\because 1/0.149 \approx 6.72) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta x &= 2w_{\theta=0} = \frac{PR^3}{2EI} \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) \\ &= P \frac{R^3}{EI} \frac{1}{2} \left(\frac{4}{\pi} - 1 \right) = 0.137 P \frac{R^3}{EI} \end{aligned} \quad (11b)$$

$$\frac{P}{\Delta x} = 7.32 \frac{EI}{R^3} \text{ So, } (\Delta y > \Delta x \text{ and } \Delta y \neq \Delta x \text{ but } \Delta y \approx \Delta x)$$

식 (11)에서 알 수 있듯이 관 단면의 수직방향과 수평방향의 변위는 같지 않지만, 일반적으로 관을 설계할 때 같은 양으로 가정하여 안전측 설계가 되도록 하고 있다.

ASTM D 2412 (2010)에서는 지중매설된 연성관의 변형식을 식 (12)와 같이 계산하고 이 변형을 5%로 제한하고 있다.

$$\Delta x = \frac{D_e K W_c}{0.149 PS + 0.061 E'} \quad (12)$$

$$PS = \frac{F}{\Delta y} = 6.7 \frac{EI}{R^3} \quad (13)$$

여기서, Δx 는 수평방향 관변형을 나타내며, D_e 는 변형지연계수, K 는 받침각 계수, E' 은 매립토의 지반반력계수, PS 는 관의 강성(Pipe Stiffness, PS), W_c 는 단위길이당 연직토압을 나타내고 있다 (Javanmard, 1993; Smith and Watkins, 2004).

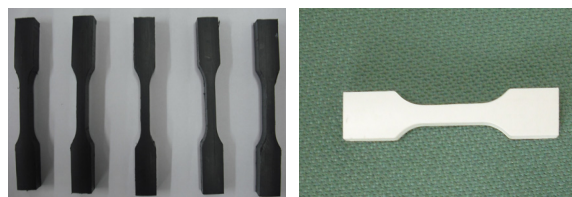
식 (13)에서 관의 강성(PS)은 일반적으로 편평시험(Parallel Plate Loading Test)에 의해 결정된다.

3. 연성관의 역학적 특성

연성관의 역학적 성질을 조사하기 위해 KS M ISO 6259-1 열가소성 플라스틱 관의 인장성 측정 방법에서 제시하고 있는 방법을 참고하여 KS M ISO 6259-2에서 제시하는 방법으로 시편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. 각 시편은 Fig. 3에 나타내었고 제작된 시편의 제원은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

인장시험은 Fig. 4에서 보여주고 있는 바와 같이 제작된 시편을 만능재료시험기(Universal testing machine, UTM)에 설치하여 하중은 변위제어방식으로

로 $5 \pm 0.5 \text{ mm/min}$ 속도로 재하하였고, 모든 시편의 인장시험은 Fig. 4에서 보여주고 있는 바와 같이 제작된 시편의 중앙에 변형률게이지(strain gage)를 부착하여 UTM에 설치하고 하중을 재하하였다. 하중은 변위제어방식으로 5 mm/min 의 속도로 재하하였고, 재하된 하중과 변형률게이지로부터 측정된 관변형은 TDS-302 Data Acquisition System을 통해서 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다.



(a) PE

(b) PVC



(c) GFRP

Fig. 3 인장시험 시편

Table 1 인장강도시험 시편치수

구 분	폭 (cm)	두께 (cm)	단면적 (cm ²)
PE-1	0.540	0.220	0.119
PE-2	0.540	0.235	0.127
PE-3	0.545	0.215	0.117
PE-4	0.531	0.238	0.126
PE-5	0.535	0.241	0.129
PVC-1	0.665	0.335	0.223
PVC-2	0.692	0.355	0.246
PVC-3	0.693	0.353	0.245
PVC-4	0.736	0.365	0.269
PVC-5	0.684	0.364	0.249
GRP-1	2.423	0.597	1.446
GRP-2	2.307	0.583	1.346
GRP-3	2.405	0.603	1.451
GRP-4	2.360	0.593	1.400



Fig. 4 인장시험

모든 시편의 인장시험 결과로부터 PE 및 PVC 관 시험 시편의 응력-변위 관계는 재료가 파괴될 때까지 비선형으로 나타났으며, GFRP 관 시편의 경우에는 선형으로 나타났다.

각 시편별 인장시험 결과를 표로 정리하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2 인장강도시험 결과

구 분	탄성계수 E (GPa)	최대강도 σ_{max} (MPa)
PE-1	3.60	36.91
PE-2	3.28	33.70
PE-3	2.66	24.05
PE-4	2.20	25.57
PE-5	2.92	26.70
평균	2.93 ± 0.5	29.39 ± 5.6
PVC-1	1.64	49.72
PVC-2	4.91	50.00
PVC-3	4.37	50.18
PVC-4	3.18	48.14
PVC-5	3.55	48.92
평균	3.53 ± 1.3	49.39 ± 0.8
GRP-1	24.17	111.6
GRP-2	18.96	108.0
GRP-3	21.89	118.1
GRP-4	20.82	114.5
평균	21.46 ± 2.2	113.05 ± 4.3

4. 편평시험

앞에서 설명한 바와 같이 연성관의 강성을 측정하는 방법에서 편평시험에 의한 방법이 일반적이다. 이 연구에서는 PE, PVC, GFRP 3관종에 대하여 편평시험을 수행하였으며, 편평시험을 통해 관의 강성을 구하였다. 시험은 ASTM D 2412에 따라 관

1본에서 $300 \pm 10mm$ 길이의 시편을 준비하였다. 시험에 사용된 각 편평시험 시편은 Fig. 5에 나타내었고 시편의 치수는 Table 3에 정리하여 나타내었다.

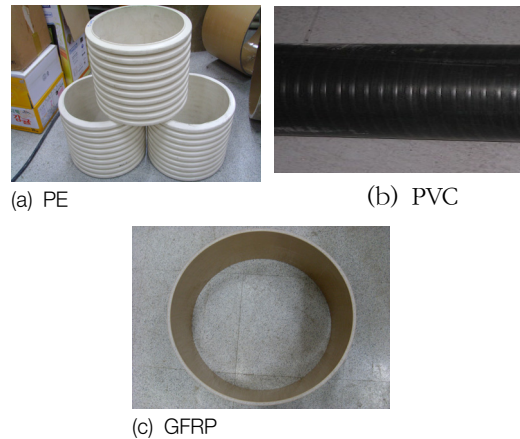


Fig. 5 편평시험 시편

Table 3 편평시험 시편치수

구 분	길이 (mm)	내경 (mm)	두께 (mm)
PE-1	300	300	16
PE-2			16
PE-3			16
PVC-1			14
PVC-2			14
PVC-3			14
GFRP-1			9
GFRP-2			9
GFRP-3			9

편평시험은 Fig. 6과 같이 $1,000kN$ 용량의 UTM에 설치하고 관 내부에 변위를 측정할 수 있는 변위계(Linear variable differential transformer, LVDT)를 설치하여 관의 상하부 변위를 측정하였다. 하중재하속도는 $10mm/min$ 의 속도로 재하하였다. 하중은 관경의 변화가 30%가 될 때까지 재하하였고, 그 결과 관변형 5%일 때 하중과 관변형의 관계는 선형탄성구간이 포함되는 것을 확인하였다.



Fig. 6 편평시험

편평시험 결과 GFRP > PVC > PE의 순으로 강성이 큰 것으로 나타났으며, 이는 사용 관종의 요구 강성을 살펴보면 PVC(16), GRP(10~20), PE(8~12.5)의 범위로 시험 결과가 요구 강성의 순서대로 나타난 것으로 판단된다. 편평시험 결과는 Table 4와 Fig. 7에 정리하여 나타내었다.

Table 4 편평시험 결과

구분	수직 관변형 ΔY (%)	관변형 5%일 때의 하중 (kN)	PS (kN/m ²)	편차
PE-1	5	7.26	484.0	-0.2
PE-2		7.16	477.3	-6.9
PE-3		7.37	491.3	+7.1
평균		7.26	484.2	
PVC-1	5	7.26	484.0	-16.2
PVC-2		7.80	520.0	+19.8
PVC-3		7.45	496.7	-3.5
평균		7.50	500.2	
GFRP-1	5	10.98	732.0	+13.6
GFRP-2		10.75	716.7	-1.7
GFRP-3		10.60	706.7	-11.7
평균		10.78	718.4	

※ +, -는 편차범위

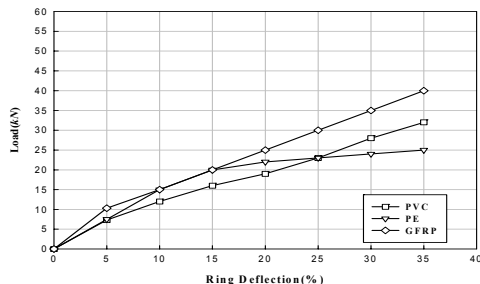


Fig. 7 하중-관변형 관계

5. 관의 강성 예측

이 연구에서는 수치해석적 방법인 유한요소해석 (Finite Element Method, FEM)을 수행하여 직접 시험을 하지 않아도 관강성을 예측할 수 있는지의 여부를 검토하였다.

사용된 유한요소해석은 범용구조해석 프로그램 중의 하나인 ANSYS Ver. 11을 사용하였다. 이 프로그램은 AUTO CAD 기능과 호환하고 보, 평면응력, 3차원 고체해석, 정적해석 및 동적해석 등을 수행할 수 있는 기능을 가지고 있어 AUTO CAD로 3차원(3D) 모델링을 하여 ANSYS로 전환시켜 유한요소해석을 수행함으로써 이 연구에서 고려하고 있는 연성관의 하중과 변위 관계를 조사하였고, 편평시험 결과와 비교 검토하여 유한요소해석 결과의 타당성을 확인하였고, 따라서, 그 결과를 사용하여 관강성을 추정할 수 있는 방법을 제시하였다.

5.1 해석조건 및 가정사항

연성관이 편평시험 조건에 있을 때 이 관에 대한 유한요소해석을 수행하기 위해서 관의 모델링은 AUTO CAD를 사용하였으며, 각 시편의 두께는 평균값을 사용하였고, 역학적 성질은 재료시험에서 얻은 PE 관의 탄성계수 2.93 GPa, PVC 관 3.53 GPa, GFRP 관 21.46 GPa를 적용하였다. Fig. 8과 같이 AUTO CAD를 사용하여 연성관을 길이방향으로 300mm, 관경은 300mm로 실제 시편의 치수와 같도록 모델링하여 Fig. 9와 같이 ANSYS 프로그램으로 변환하였다. 각 시편의 치수 및 재료의 역학적 성질을 Table 5에 정리하여 나타내었다.

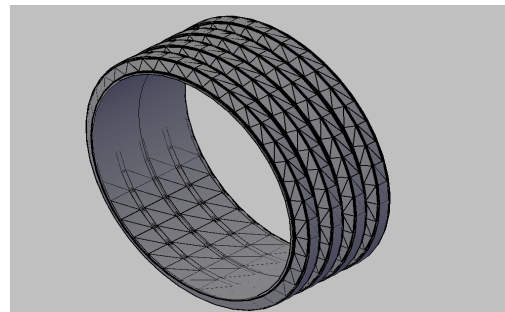


Fig. 8 연성관의 AUTO CAD 모델링

Table 5 관종별 치수 및 역학적 성질

구 분	두께 (mm)	탄성계수 (GPa)	포아송비
PE	16	2.93	0.3
PVC	16	3.53	0.3
GFRP	9	21.46	0.2

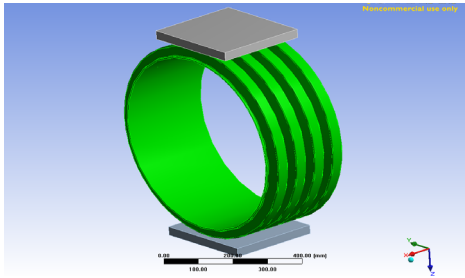


Fig. 9 연성관의 유한요소 모델링

유한요소해석에서 시편의 경계조건은 관의 최하단 부분을 고정지점으로 하고 하중은 관 상단에 위치한 강재관에 관 단면의 수직방향으로 재하하였으며, 하중은 점차적으로 증가시켜 관의 모델에서 내경의 5%의 관변형을 일으켰을 때의 하중을 구하였다.

5.2 유한요소해석 결과

ANSYS Ver. 11에 의한 유한요소해석 결과로부터 5% 관변형이 발생한 형상은 Fig. 10에서 보여주고 있다. 관 내경의 5% 변위가 발생할 때, 유한요소해석에 의해 구한 하중과 편평시험을 통해 구한 평균 하중을 Table 6에 정리하였다. 또한, 유한요소해석으로부터 구한 하중을 편평시험으로부터 구한 하중으로 나누어 그 차이를 나타내었으며, 모든 관에서 그 차이는 최대 14%로 나타났다. 모든 시험결과와 해석결과의 차이는 유한요소해석에서는 관이 일정한 역학적 성질을 갖는 것으로 가정하고 있으나 시험에 사용한 관의 경우 재료의 역학적 성질에서 시편의 채취 위치에 따라 상당한 차이가 있기 때문에 발생한 것으로 생각된다. 그러나 이와 같은

결과로부터 14% 이내로 연성관의 거동 예측이 가능함을 확인하였다. 따라서 유한요소해석을 통해 연성관의 하중과 변위 관계를 예측하는 것이 가능하다고 할 수 있다. 또한, 더 정밀한 관내의 위치별 역학적 성질을 알 수 있다면, 해석과 시험 결과의 차이는 줄일 수 있을 것으로 생각된다.

Table 6 편평시험 Vs. 유한요소해석 결과 비교

구 분	관변형 (%)	① 시험 결과 (kN)	② 해석 결과 (kN)	차 (%) (①-②)/① × 100
PE	5	7.26	7.98	9.1
PVC	5	7.50	8.80	14.0
GFRP	5	10.78	10.90	1.2

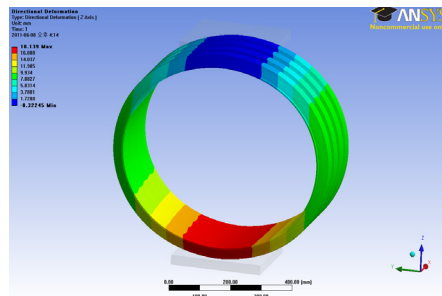
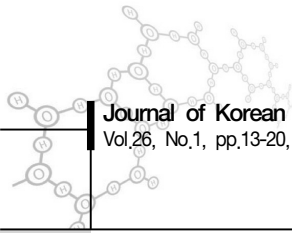


Fig. 10 연성관의 변형

6. 결 론

최근 하수관거정비 사업에서 사용이 급증하고 있는 연성관은 내구성, 내염해성, 내부식성 등이 뛰어난에도 불구하고 연성관에 대한 실험적, 이론적 연구가 아직 부족한 실정이다. 또한, 국내 연성관과 관련된 설계기준 및 제품규격 등은 기술 선진국에 의해 연구 개발된 기준 및 규격을 그대로 참조하여 규정하고 있는 실정으로 국내 연성관의 설계기준에 대한 개발 근거 및 배경에 대해 구체적으로 제시하고 있지 않다. 따라서 이 연구에서는 연성관 설계에서 필수적으로 구해야 하는 관의 강성에 대해 이론적으로 검증하고 ASTM D 2412에서 제시하고 있는 편평시험과 유한요소해석을 수행하여 각종 관의 강성을 구하고 그 결과 값을 비교하였다.



그 결과 편평시험으로 구한 관의 강성값과 유한요소해석으로 예측한 관의 강성 결과치와의 차는 최대 14% 미만으로 나타났으며, 이에 따른 결과를 바탕으로 관변형 5%일 때의 하중을 구해 관강성을 추정하고, 이 강성을 연성관 설계에 사용할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

참고문헌

KS M ISO 6259-1 (2008), 열가소성 플라스틱 관-인장성의 측정-제1부: 일반 시험방법.

KS M ISO 6259-2 (2008), 열가소성 플라스틱 관-인장성의 측정-제2부: 무가소화 폴리염화비닐(PVC-U), 염소화 폴리염화비닐(PVC-C), 내충격성 폴리염화비닐(PVC-HI) 관.

한국상하수도협회 (2011), 하수도시설기준, 환경부.

Smith, G. and Watkins, R. (2004), The Iowa Formula: It's Use and Misuse When Designing Flexible Pipe, Proceeding of Pipelines International Conference, American Society of Civil Engineers, ASCE, pp. 1-7.

Timoshenko, S. P. and Gere, J. M. (1961), Theory of Elastic Stability, 2rd ed., McGraw-Hill, New York.

ANSYS (2008), Release 11.0 Documentation for ANSYS, Pennsylvania.

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.

Javanmard, M. (1993), Soil-Structure Interaction of Fully and Partially Buried Flexible Pipes, Ph.D. Thesis, The University of New Brunswick, New Brunswick, Canada.