



지중매설 경질폴리염화비닐관의 구조적 거동

김선희¹ · 천진욱¹ · 김응호²

홍익대학교 토목공학과 박사과정¹, 홍익대학교 토목공학과 교수²

Characteristics of Structural Behavior of Unplasticized Polyvinyl Chloride (PVC-U) Pipe Buried Underground

Kim, Sun-Hee¹ · Cheon, Jinuk¹ · Kim, Eung-Ho²

¹PhD. Student, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

²Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University, Seoul, Korea

Abstract: The industrialization and urbanization forced to increase the density of pipelines such as water supply, sewers, and gas pipelines. The materials used for the existing pipe lines are mostly composed of concretes and steels, but it is true that the development for more durable and efficient materials has been continued performed to produce long lasting pipe lines. Recently, underground pipes serve in diverse applications such as sewer lines, drain lines, water mains, gas lines, telephone and electrical conduits, culverts, oil lines, etc. In this paper, we present the result of investigation pertaining to the structural behavior of unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U) flexible pipes buried underground. In the investigation of structural behavior such as a ring deflection, pipe stiffness, 4-point bending test, experimental and analytical studies are conducted. In addition, pipe stiffness is determined by the parallel plate loading tests and the finite element analysis. The difference between test and analysis is about 8% although there are significant variations in the mechanical properties of the pipe material. In addition, it was found by the 4-point bending test there is no problem in the connection between the pipes by coupler.

Key Words: unplasticized polyvinyl chloride (PVC-U), pipe stiffness, finite element analysis, 4-point bending test

1. 서론

국내 상하수도관의 대부분은 철근콘크리트관, 주철관, 콘크리트관 등 강성관을 사용하였으나 대부분의 관로들이 노후화되면서 부식, 수밀성의 미확보, 지속적인 유지관리 미비 등의 문제점이 제기되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근에는 합성수지 재질로 구성된 상하수도관의 연구가 활발히 진행되고 있다(Research Report, 2014).

합성수지 재질의 상하수도관은 지중에 매설할 경우 지반과 유기적으로 거동하는 연성관으로 분류된다. 연성관은 제품의 품질과 시공에 대한 신뢰성이 동시에 확보되었을 경우 구조적인 안전성을 기대할 수 있다.

그러나, 국내에서는 기술선진국들에 비해 제품 생산 및 시공 기술 등에 대한 연구가 부족하여 현장 적용성에 한계를 드러내고 있는 실정이다. 연성관으로 분류되는 경질폴리염화비닐관은 기존의 강성관과 달리 지반과 상호작용하여 외부하중에 대해 저항하기 때문에 지중매설 상태에서 관에 미치는 영향을 검토하여야 한다(Research Report, 2014). 이 연구는 상수도관으로 주로 사용되는 경질폴리염화비닐관 재료의 역학적 성질, 국내외 문헌을 통해 관 설계방법을 조사하였으며, 휨실험을 수행하여 관 연결부 이탈여부도 확인하였다. 또한, 지중매설한 상태의 관의 구조적 거동을 유한요소해석을 통해 예측하였다.

주요어: 경질폴리염화비닐관, 관강성, 유한요소해석, 휨강도실험

Corresponding author: Kim, Sun-Hee

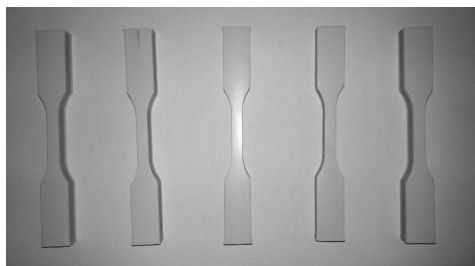
Department of Civil Engineering, Hongik University, 72-1 Sangsu-dong, Mapo-gu, Seoul 172-732, Korea.
 Tel: +82-2-3141-0774, Fax: +82-2-3141-0774, E-mail: sunnys82@hanmail.net

Received October 7, 2015 / Revised October 22, 2015 / Accepted October 30, 2015

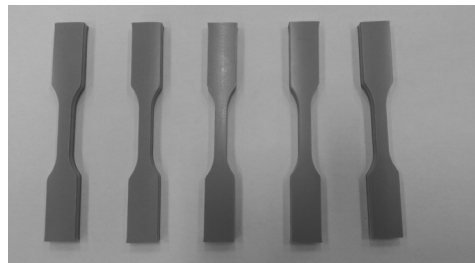
2. 경질폴리염화비닐관의 역학적 성질

2.1 인장강도시험

지중매설 경질폴리염화비닐관의 구조적 거동을 예측하기 위해서 경질폴리염화비닐관을 구성하고 있는 재료의 역학적 성질을 조사하였다. 경질폴리염화비닐관의 역학적 성질은 KS M ISO 6259-1 (열가소성 플라스틱 관의 인장성 측정방법)에서 제시하고 있는 방법으로 인장시험을 수행하여 조사하였다. 인장강도시험 시편은 직관과 연결부 부분을 각각 관 길이방향으로 절단하여 Fig. 1과 같이 채취하였으며, 인장시험편의 제원은 Table 1에 나타내었다.



(a) Pipe Specimen (P-#)

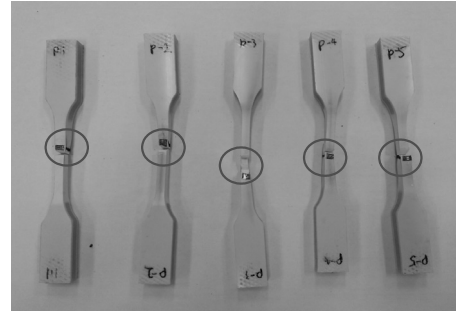


(b) Coupler Specimen (C-#)

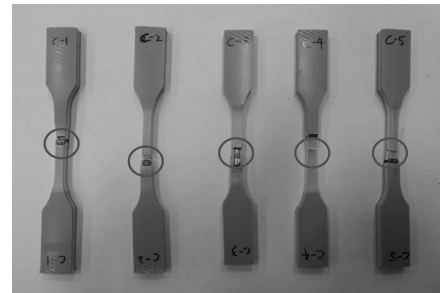
Fig. 1 Tensile Specimen (Research Report, 2014)

Table 1. Dimension of Tensile Test Specimen (Kim, 2014)

Description	Specimen Dimension		
	Width (mm)	Depth (mm)	Area (mm ²)
P-1	11.07	6.15	68.08
P-2	11.61	6.13	71.17
P-3	11.16	6.12	68.30
P-4	11.48	6.12	70.25
P-5	11.60	6.11	70.87
Average	11.38	6.13	69.74
C-1	6.69	6.18	41.34
C-2	6.61	6.15	40.65
C-3	6.72	6.18	41.52
C-4	6.67	6.17	41.15
C-5	6.65	6.15	40.89
Average	6.67	6.17	41.12



(a) Pipe Specimen (P-#)



(b) Coupler Specimen (C-#)

Fig. 2 Failure Mode (Research Report, 2014)

Table 2. Result of Tensile Test

Description	Elasticity (E, GPa)	Yield Tensile Strength (σ_{max} , MPa)	Poisson's Ratio
P-1	3.87	59.91	0.34
P-2	4.27	62.20	0.35
P-3	4.69	59.22	0.34
P-4	5.12	60.29	0.35
P-5	3.93	57.93	0.35
Average	4.30	59.81	0.35
C-1	3.89	63.68	0.37
C-2	3.20	68.70	0.37
C-3	3.45	68.19	0.35
C-4	3.76	66.62	0.38
C-5	3.36	67.65	0.37
Average	3.52	67.49	0.37

제작된 인장시험편 중앙에 계측기(Strain Gage)를 Fig. 3(a)와 같이 부착하여 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 $5 \pm 0.5 \text{ mm/min}$ 의 속도로 하중을 재하하였다. 인장시험 결과 Fig. 2와 같이 중앙부분에서 파단이 일어났으며, Table 2에 정리하였다. Fig. 3에서 인장시험편이 압축을 받는 부분은 A, 인장을 받는 부분은 B이며, 인장시험결과로부터 얻는 하중-변위 관계는 Fig. 3(b), (c)와 같다. 인장시험편의 탄성계수는 Fig. 3의 B구간에서 시험규정에 따

라 응력-변형률 관계가 선형을 나타내는 탄성한계 ($500\mu \sim 2,500\mu$)에서 결정하였다. 또한, KS M 3401에서 요구하고 있는 PVC 항복 인장강도인 $45MPa$ 보다 큰 값으로 직관과 연결부에서 각각 $59.81MPa$, $67.49MPa$ 임을 확인하였다.

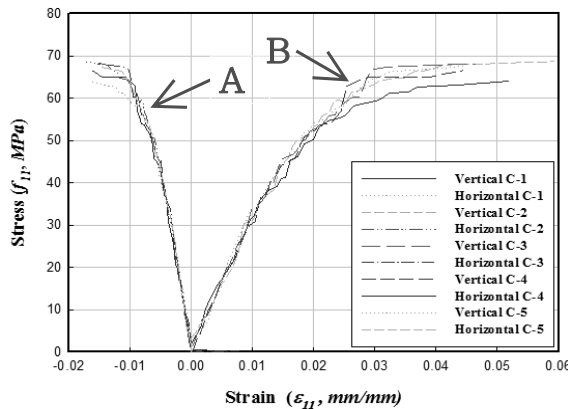
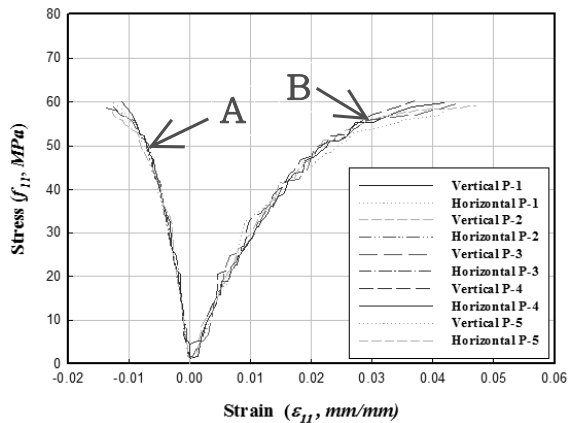
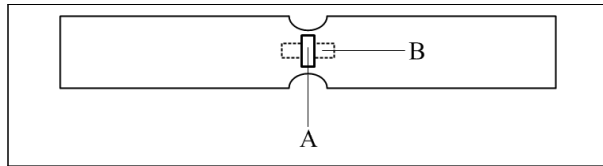


Fig. 3 Stress-Strain Curve of Unplasticized Polyvinyl Chloride (Research Report, 2014)

2.2 편평시험

연성관으로 분류되는 경질폴리염화비닐관은 지중매설시 지반과 상호작용하기 때문에 관의 강성(pipe stiffness, PS)은 설계시 중요한 변수가 된다. 관의 강성은 관의 치수, 역학적 성질에 따른 변수로서 국내외 연성관 관련 설계규준에서는 관의 강성을 편평시험을 통해 결정하도록 제안하고 있다. 편평시험은 관의 강

성을 간접적으로 도출하는 방법으로 관변형 5%일 때의 하중이다(Park, 2012). 편평시험에 사용한 시편의 제원은 Table 3에 나타내었고, 편평시험은 Fig. 4와 같이 $980kN$ 용량의 UTM에 시편을 위치시킨 후 하중을 재하하였으며, 관변형이 관내경의 최소 50%가 될 때까지 수행하였다. 관의 상하부 변위는 Wire gage를 사용하여 측정하였고, 하중은 KS M ISO 9969에서 제시하고 있는 $10\pm 2mm/min$ 의 속도로 재하하였다.

Table 3. Dimension of Parallel Plate Loading Test

Description	No.	Length (L , mm)	Thickness (t , mm)	Diameter (D , mm)
PVC ($\phi 400$)	V-1	298.94	18.04	372.63
	V-2	310.08	18.88	370.70
	V-3	302.69	18.03	372.75
	Average	303.90	18.32	372.03

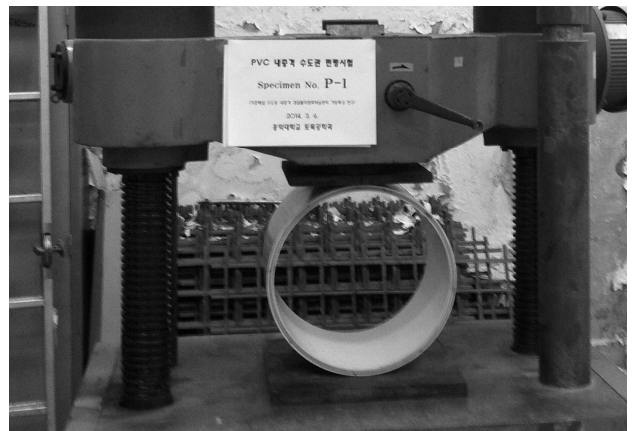


Fig. 4 The Parallel Plate Loading Test (Research Report, 2014)

편평시험결과 경질폴리염화비닐관의 관변형 5%일 때의 평균하중은 $3.30kN$ 임을 확인하였으며 Table 4에 정리하였다. 또한, 하중-변위 관계 그래프를 Fig. 5에 나타내었다.

Table 4. Result of Parallel Plate Loading Test

No.	Load of 5% Ring Deflection (kN)
V-1	2.94
V-2	3.71
V-3	3.25
Average	3.30

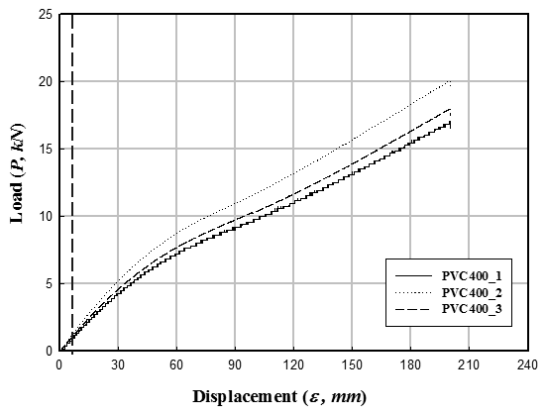


Fig. 5 Load-Deflection Relationship (Research Report, 2014)

2.3 유한요소해석

경질폴리염화비닐관의 편평시험 결과를 검증하기 위해서 실험조건과 동일하게 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 ANSYS Workbench Ver. 11을 사용하였으며, 재료의 물성치와 시편의 제원은 Table 2와 Table 3의 값을 적용하였다. 유한요소해석 모델의 경계조건은 관 최하단부를 고정지점으로 하고 관의 최상단 부분에서 하중을 원의 중심방향으로 재하되도록 하였다. Fig. 6에서 보여주고 있는 바와 같이 실제 시편의 치수와 같도록 모델링한 것이다.

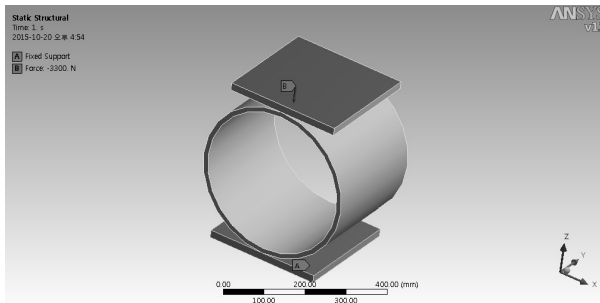


Fig. 6 The Parallel Plate Loading Test Modeling

유한요소해석결과 관변형 5%일 때의 관의 변형과 응력분포 형태는 실제 시험때 관측된 거동과 유사하게 나타났으며, 관변형 5%에 해당하는 하중은 편평시험 결과보다 약 10.4% 크게 나타났다. 5% 관변형이 발생한 유한요소해석 결과 형상은 Fig. 7에 나타내었으며, 편평시험과 유한요소해석의 결과 비교는 Table 5에 정리하였다.

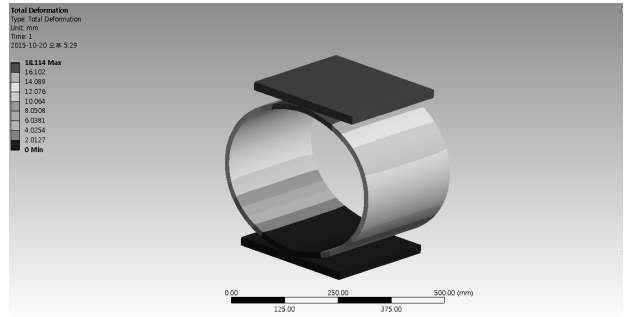


Fig. 7 Result of the FEA

Table 5. Result of the FEA

Description	① Test Result (kN)	② FEA (kN)	②/①
PVC (φ400)	3.300	3.644	1.104

3. 지중매설 경질폴리염화비닐관의 설계

3.1 지중매설관의 구조적 거동 특성

지중매설관의 구조적 거동은 외압에 따라 차이를 나타내며, 외부 하중이 정하중인 경우 지중매설된 관에 작용하는 연직토압은 상부의 하중과 재하되는 면적에 따라 결정된다. 특히 지중매설 연성관은 관상부 토사와 상재하중이 작용하여 Fig. 8과 같이 타원형태로 관변형이 발생하고, 이 관변형으로부터 주변 지반에 하중을 전달한다. 이때 관의 변형은 관 자체의 강성에 비례하여 변형을 일으키고 주변 토사와 유기적으로 거동한다(Chun, 2010).

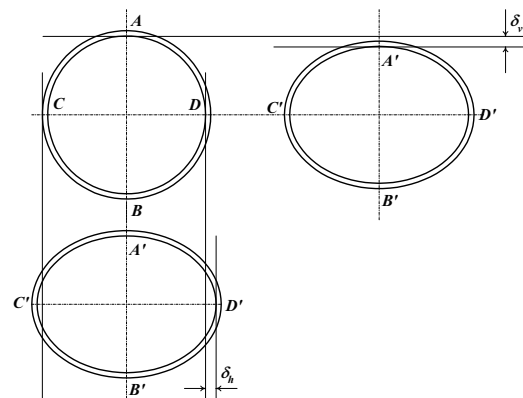


Fig. 8 Pipe Ring Deflection (Research Report, 2014)

수직하중(연직하중)상태에서 관은 수직방향으로 δ_v 만큼 변형이 발생하고, 수평방향으로는 δ_h 만큼 변형이 발생한다. 주변 토사는 관변형에 미치는 영향을 고려

하지 않고 상부에 선하중이 작용할 경우 탄성변형이론에 따라 각 방향에 대한 관변형의 크기는 식 (1), (2)와 같다. w 는 관 상부에 작용하는 선하중 (kgf/cm)이고, r 은 관두께의 중심반경($= (D-t)/2$), t 는 관두께, E 는 관 재료의 탄성계수, I 는 관의 단위 길이당 단면2차모멘트($= t^3/12$)이다(Park, 2012).

$$\delta_v = 0.149 \frac{r^3}{EI} w \quad (1)$$

$$\delta_h = 0.137 \frac{r^3}{EI} w \quad (2)$$

3.2 지중매설관의 관변형

지하 관로나 암거 등 매설관에 작용하는 축압과 연직토압으로 Marston, Jansen, Spangler의 공식을 사용하기 때문에 연성관의 변형에 대해서는 관변형 5% 이하로 두고 설계해야한다(Ministry of Environment, 2010). 지중매설된 연성관의 변형식은 식 (3)과 같으며, ASTM D 2412 (2011)에서 제시하고 있다. 식 (3)은 IOWA Formula라고 하며, 연성관의 강성, 되메움 흙의 지반반력계수, 기초조건 등 지중매설된 상태의 연성관에 대한 하중과 경계조건이 대부분 포함하고 있다(Lee et al., 2011; Watkins, 2000).

$$\Delta x = \frac{D_e K W_c}{0.149 PS + 0.061 E'} \quad (3)$$

Δx 는 수평방향 관변형이고, D_e 는 변형지연계수, K 는 받침각 계수, E' 는 되메움 흙의 지반반력계수, PS 는 관의 강성, W_c 는 단위길이당 수직토압이다. 식 (3)에서 관의 탄성계수(E)와 단면성질(I)을 포함하고 있는 PS 는 관의 강성으로 편평시험으로 결정한다. 식 (4)는 관의 강성을 구하는 식이다(Research Report, 2014).

$$PS = \frac{F}{\Delta y} = 6.7 \frac{EI}{r^3} \quad (4)$$

여기서, Δy 는 관의 수직방향 변위이며, $I (=t^3/12)$ 는 관에 대한 단면2차모멘트로 관중이 결정되면 계산되어 지는 관의 단위길이당 상수이다.

3.3 유한요소해석(지중매설관)

지중매설 경질폴리염화비닐관의 구조적 거동을 파악하기 위해 유한요소해석을 수행하여 지중매설 연성관의 관변형을 예측하였다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 범용구조해석 프로그램인 ANSYS Workbench Ver. 11을 사용하여 구조해석을 하였으며, 재료의 물성치는 실험을 통해 구한 값(Table 2)을 적용하였다. 경계조건은 해석모델의 하부의 면을 고정단으로 하였으며 하중은 모래기초 상단에 재하하였다. Fig. 9은 지중매설 관을 모델링한 것이다.

유한요소해석에 적용한 모래의 기초는 Table 6의 항목 중 중간다짐($E'=2.75MPa$)으로 적용하였으며, 상수관으로 널리 사용되는 관경 300mm인 경질폴리염화비닐관을 AutoCad로 모델링을 하여 ANSYS로 불러들였으며, 재료의 역학적 성질은 Table 2를 적용하였다. 유한요소해석결과 5% 관변형이 발생하였을 때, 경질폴리염화비닐관에 작용하는 하중과 변형률 및 IOWA Formula로부터 구한 하중과 변형률을 Table 7에 정리하였다.

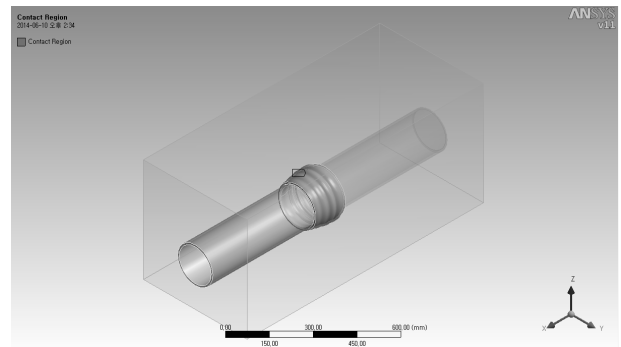


Fig. 9 Modeling

Table 6. Modulus of Soil Reaction Values (Howard, 1977)

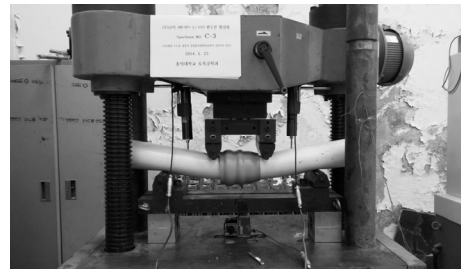
Soil Type-Pipe Bedding Material	E' for Degree of Compaction of Bedding (MPa)			
	Dumped	Slight <85% Proctor <40% Relative Density	Moderate 85-95% Proctor 40-70% Relative Density	High >95% Proctor >70% Relative Density
Fine-Grained Soils (LL<50) Soils with Medium to no Plasticity CL, ML, ML-CL, with less than 25 Percent Coarse-Grained Particles	0.34	1.37	2.75	6.86

Table 7. Result at 5% Ring Deflection

Description	Load at 5% Ring Deflection (kN)		Strain of 5% Ring Deflection (mm/mm)	
	FEA	IOWA Formula	FEA	Strain Formula
Diameter 300mm	4.50	3.86	0.0100	0.0130

4. 경질폴리염화비닐관의 휨강도시험

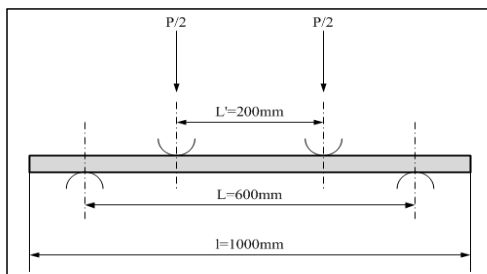
경질폴리염화비닐관의 휨강도를 조사하기 위해 KS M ISO 178을 참고하여 4점 휨시험을 수행하였다. 하중은 변위제어방식으로 5mm/min의 속도로 재하하였다. 휨 시험의 시편은 직관(A-1~A-5), 3중 연결부(B-1~B-5), 6중 연결부(C-1~C-5)를 각각 5개씩 준비하였으며, Fig. 10(a)와 같이 상부 하중재하점 사이의 간격을 20cm로 하여 하중을 재하시켰고, 시편 중앙부분에는 wire gage, 시편의 양쪽부분에는 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다.



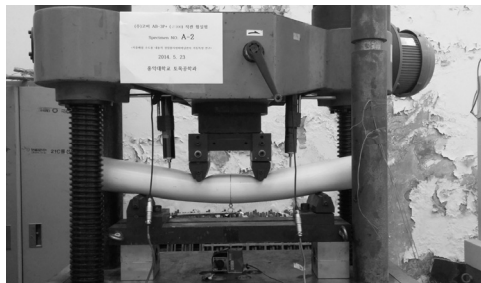
(d) Coupler (6P-φ100)

Fig. 10 4-point Bending Test (Research Report, 2014)

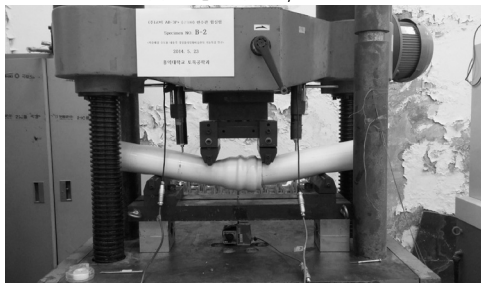
휨강도시험 결과 직관은 Fig. 11(a)에서 보여지듯이 약 20%정도까지 선형거동을 보였고, 연결부(3중, 6중)는 Fig. 11(b), (c)와 같이 약 30%정도 선형거동을 보였다. 또한, 연결부 부분에서 소켓이 이탈되는 현상은 나타나지 않았으며, Fig. 10(d)는 Fig. 10(c)보다 휨강도에 대한 저항이 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 연결부를 보강해서 나타난 결과이며, 보강한 연결부는 설계 외부하중이 발생하여도 충분히 저항할 수 있음을 알 수 있다.



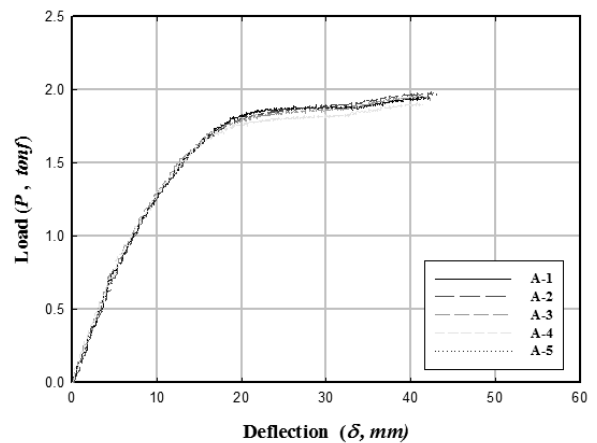
(a) Test Setting



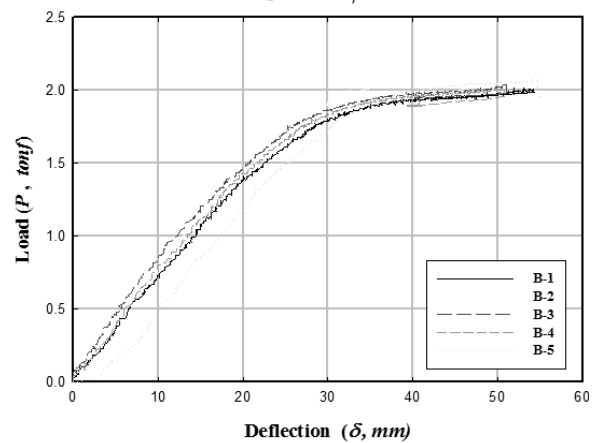
(b) Pipe (3P-φ100)



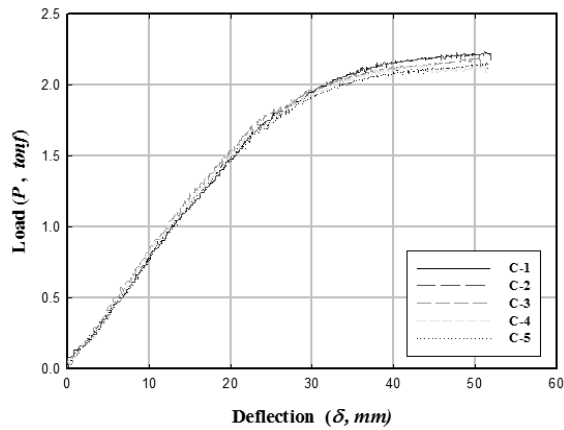
(c) Coupler (3P-φ100)



(a) Pipe (3P-φ100)



(b) Coupler (3P-φ100)

(c) Coupler (6P- ϕ 100)**Fig. 11 Load-Deflection Relationship (Research Report, 2014)**

5. 결론

이 연구에서는 지중매설 연성관의 거동을 예측하기 위해 연성관으로 분류되는 경질폴리염화비닐관의 역학적 성질을 조사하고, 관련 설계방법을 조사하여 국내에서 적용하고 있는 연성관의 관변형 5%이내의 기준에 적정한지의 여부를 유한요소해석과 설계기준을 통해 조사하였다.

지중매설 경질폴리염화비닐관의 구조적 거동을 파악하기 위해 관 재료의 역학적 성질을 파악하기 위해 인장강도시험과 편평시험을 수행한 결과 직관의 탄성계수는 $4.30GPa$, 연결부의 탄성계수는 $3.52GPa$ 이며, 항복인장강도는 직관부에서 $59.81MPa$, 연결부에서는 $67.49MPa$ 가 발생하였다. 이 값은 KS M 3401에서 제시하고 있는 항복인장강도 $45MPa$ 이상의 강도를 갖고 있음을 확인하였다.

관의 강성을 조사하기 위해 편평시험을 수행한 결과, 관변형 5%일 때의 하중이 $3.30kN$ 이 발생하였다. 편평시험 결과와 유한요소해석을 수행한 결과를 비교한 결과 약 10.4%의 차이를 보였다.

관의 휨강도를 조사하기 위해 휨강도 시험을 수행한 결과, 직관에서는 관경의 약 20%, 연결부에서는 관경의 약 30% 까지 선형거동을 보였으며, 연결부에서는 소켓이 이탈되는 현상은 발생하지 않았다.

유한요소해석과 이론식을 이용하여 지중매설관의 관변형을 예측한 결과 해석값과 이론값이 유사하게 나타났다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2014년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

References

- ANSYS (2008), Release 11.0, Documentation for ANSYS, Pennsylvania.
- ASTM D 2412 (2011), Standard Test Method for Determination of External Loading Characteristics of Plastic Pipe by Parallel-Plate Loading, American Society for Testing and Materials.
- Chun et al., (2010), Geotechnical Engineering (Theory and Practice), Third edition, Construction Industry Research Institute, Gumibook.
- Hongik University Research Institute of Science and Technology (2014), A Study on Behavior Characteristics of Underground AB-System for the Earthquake-Resistance Enhanced and High-Impact Pipes Used in Water Supply or Sewer System, *Research Report*.
- Howard, Amster, (1977). Modulus of Soil Reaction Values for Buried Flexible Pipe, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 103, No. GT1.
- Joonseok Park, Young-Geun Lee, Sunhee Kim, Jung-Hwan Park, Eung-Ho Kim (2012). Prediction of Short-Term Behavior of Buried Polyethylene Pipe, *Journal of Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 26, No. 6, pp. 905-912.
- Kim, S. H., Lee, Y. G., Joo, H. J., Jung, N. J., and Yoon, S. J. (2012). Prediction of Ring Deflection GRP Pipe Buried Underground, *Journal of Korean Society Advanced Composite Structures*, Vol. 4, No. 3, pp. 38-44.
- KS M 3401 (2013). "Unplasticized Poly (vinyl chloride) (PVC-U) Pipes for Water Supply," Korean Agency for Technology and Standard (KS), Seoul, Korea.
- KS M ISO 178 (2012). "Plastics - Determination of Flexural Properties", Korean Agency for Technology and Standard (KS), Seoul, Korea.
- KS M ISO 6259-1 (2008). "Thermoplastics pipes - Determination of tensile properties - Part 1 : General test method", Korean Agency for Technology and Standard (KS), Seoul, Korea.
- KS M ISO 9969 (2008). "Thermoplastics Pipes - Determination of Ring Stiffness", Korean Agency for Technology and Standard (KS), Seoul, Korea.
- Lee, Y. G., Kim, S. H., Park, J. S., and Yoon, S. J.

- (2011). Pipe Stiffness Prediction of GRP Flexible Pipe, *Journal of Korean Society Advanced Composite Structures*, Vol. 2, No. 3, pp. 18-24.
- Ministry of Environment, Republic of Korea (2010), Standard for Water Supply System, written in Korean.
- Ministry of Environment, Republic of Korea (2011), Standard for Sewer System, written in Korean.
- Watkins, R. K. and Anderson, L. R. (2000), *Structural Mechanics of Buried Pipes*, CRC Press LLC., New York.