



구조해석을 통한 도시가스 매설배관의 지진 영향 분석

† 조윤호 · 최마리아 · 양주안 · 전상일 · 전지훈

JB주식회사

(2023년 6월 5일 접수, 2023년 11월 20일 수정, 2023년 12월 8일 채택)

Seismic Impact Analysis of Buried Citygas Pipes through Structural Analysis

† Yoon Ho Jo · Maria Choi · Ju An Yang · Sang Il Jeon · Ji Hoon Jeon

JB Corporaion

(Received June 5, 2023; Revised November 20, 2023; Accepted December 8, 2023)

요약

지진은 지하 구조물에 영향을 미치는 가장 중요한 재해 중 하나이다. 도시가스 지하 매설 배관은 지진 발생 시 구조물의 안전성 문제가 발생할 수 있다. 우리나라는 디지털 관측을 시작한 이래로 지진 발생 횟수가 꾸준히 증가하고 있다. 도시가스배관의 내진 설계 기준은 2008년에 KGS GC204 가스배관 내진설계 기준이 제정되었지만 이는 배관 설치 시 기준으로 지진 발생 시 배관의 영향을 추정하기는 어렵다. 본 연구에서는 국내에서 매설배관으로 주로 사용하고 있는 PE(폴리에틸렌관)배관과 PLP(폴리에틸렌 피복강관) 배관을 대상으로 지진 발생 시 환경 및 배관의 변수에 따른 구조해석을 수행하였다. 본 연구는 CAE(Computer Aided Engineering)를 통해 배관을 모델링하고 지반에 변위를 발생시켜 가장 취약한 매설배관의 변수를 찾고자하였다. 이 연구를 통해 토양은 탄성계수가 클 수록, 매설심도는 깊을 수록, 관경은 작을 수록, 압력은 높을 수록, PE 보다 PLP 배관이 더 지진에 영향을 많이 받는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 토대로 매설 도시가스배관의 취약지점을 유추하여 지진발생 시 매설배관의 특별점검에 활용하고자한다.[1]

Abstract - Earthquakes are one of the most important disasters affecting underground structures. Urban gas underground pipes may cause safety problems of structures in the event of an earthquake. Since Korea began digital observation, the number of earthquakes has been steadily increasing. The seismic design standard for urban gas pipes was established in 2008, but it is difficult to estimate the impact of pipes in the event of an earthquake based on the installation of pipes. In this study, structural analysis was performed on PE (polyethylene pipe) pipes and PLP (polyethylene coated steel pipe) pipes, which are mainly used as buried pipes in Korea, according to environmental and pipe variables in the event of an earthquake. This study sought to find the variables of the most vulnerable buried pipe by modeling pipes through Computer Aided Engineering (CAE) and generating displacement on the ground. Through this study, it was confirmed that the larger the elastic modulus of the soil, the deeper the buried depth, the smaller the tube diameter, and the higher the pressure, the more PLP pipes are affected by earthquakes than PE. Based on these results, the vulnerable points of buried urban gas pipes are inferred and used for special inspections of buried pipes in the event of an earthquake.

Key words : buried city gas pipe, yield stress, CAE(Computer aided engineering)

†Corresponding author:uno0102@jbcorporation.com
Copyright © 2023 by The Korean Institute of Gas

I. 서론

2023년 2월 튀르키예에서 발생한 강진의 영향으로 5만명 이상의 인명피해가 발생했으며 약 7,000km 떨어진 한반도에서도 지진현상이 관측되었다. 국내에서도 여러 차례 지진현상이 관측되고 있다. 가장 최근에 발생한 대규모 지진 사례는 2016년 9월 경주에서 발생한 규모 5.8의 지진과 2017년 11월 포항에서 발생한 규모 5.8의 지진으로 막대한 인명피해와 재산피해를 일으켰다.

2016년 일본의 구마모토에서 발생한 규모 7.3의 지진으로 10만 5천호의 가스 공급이 중지되는 피해가 일어났으며(행안안전부, 2017), 1995년 일본의 고베에서 발생한 규모 7.2의 지진은 국내에서 본격적으로 내진설계 기준이 적용되기 시작한 계기가 되었다. 그 영향으로 2003년 내진설계 기준이 마련되었으며, 현재는 2008년에 제정된 KGS G204 도시가스배관 내진설계 기준이 적용되고 있다.[2] 이처럼 국내에는 지진으로 인한 가스시설물의 직접적인 피해는 발생하지 않았으나 일본에서 가스의 공급 중지 및 가스 누출된 사례가 있어 우리나라도 안전지대는 아닐 것으로 판단된다.

매설가스배관의 지진 취약성에 대한 국외의 연구에서는 지진에 의한 산사태로 발생할 수 있는 PE배관의 굽힘 변형 등을 유한요소해석을 실시하였다. 다양한 길이의 PE 배관에 오프셋 하중을 점진적으로 가하여 PE배관의 거동을 실험하였다.(2018)[3]

국내의 연구로는 “매설가스배관의 지진 취약도 해석”(2010년) 이도형 외 3인이 국내에서 많이 사용되는 매설가스배관인 API X65에 대해 15가지 경우의 수를 만들어 배관 해석모델에 대해 다양한 지진파를 0.1g 간격으로 스케일링하여 비선형 시간이력해석을 수행하고, 이 결과로 얻어진 도시가스 매설배관의 최대 변형률을 활용하여 지진취약도 해석을 수행하였다.[4],[5] 하지만 도시가스배관에 주로 사용되는 배관의 재질 특성에 대한 반영 등에 대한 해석의 연구는 아직 미흡한 상황이다. 국내의 도시가스 배관 설치 현황을 바탕으로 한 연구를 진행하여 취약지점을 유추하여 지진발생 시 매설배관의 특별 점검에 활용하고자 한다.

II. 이론 및 배관 특성

2.1 유한요소해석(Finite Element Analysis, FEA)

외력이 가해졌을 때, 위치에 따라서 구조물의 응력이 다르게 나타나는데, 이때 사용하는 방법이 유한요소해석이다. 해석하고자 하는 대상을 유한개의 요소

로 나누고, 각각 요소들의 방정식과 관계를 계산하여 결과를 예측하는 방법이다.[6] 본 연구에서는 유한요소 해석을 기반으로 하는 Ansys 프로그램을 활용하여 지진 발생 시 배관의 거동 및 응력을 예측하고자 한다.

2.2 배관(재료) 특성

2.2.1 응력-변형률 선도

대부분의 금속, 목재, 플라스틱 및 세라믹 등 많은 구조용 재료는 초기에 하중 재하시, 탄성적이면서 선형적으로 거동한다. 따라서 이들의 응력-변형률 곡선은 원점을 통과하며 비례한도까지는 직선으로 시작된다.[7] 마찬가지로 아래의 그림처럼 PE배관과 PLP배관도 항복응력 이하의 응력에서는 선형적 거동을 하는 것을 확인할 수 있다. 이번 실험에서 배관은 항복응력 도달 전의 영향을 분석하기 때문에 재료는 탄성 재료로 가정하였다.

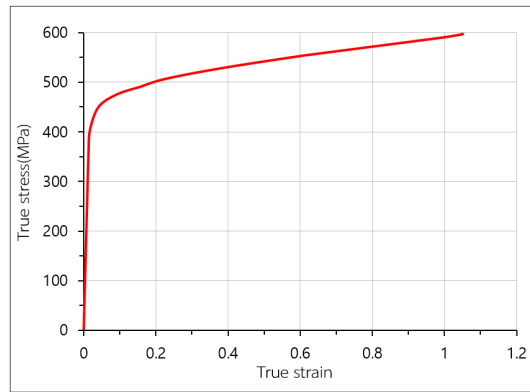


Fig. 1. PLP pipe S-S curve[8]

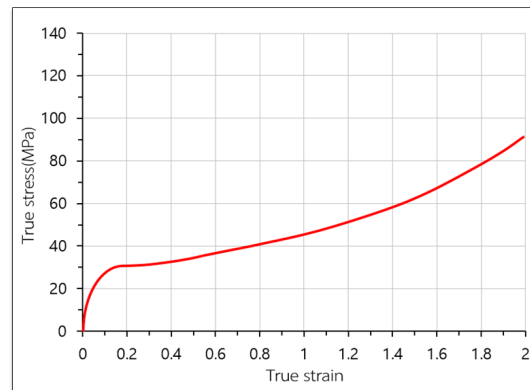


Fig. 2. PE pipe S-S curve[9]

Table 1. Citygas pipe material property

Material	Diameter (A)	External Diameter (mm)	thickness (mm)	Modulus of elasticity (Gpa)	Yield stress (Mpa)	Poisson's ratio
PLP	80	89.1	4.05	200	206	0.3
	150	165.2	4.85			
	300	318.5	7.0			
PE	63	63	5.8	0.35	20	0.4
	160	161	14.6			
	315	316.9	28.6			

2.2.2 Hooke의 법칙

단순인장이나 압축을 받는 봉에 대한 응력과 변형률 사이의 선형적인 관계는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma = E \epsilon \quad (1)$$

여기서 σ 는 축응력, ϵ 는 축변형률, E는 재료의 탄성계수로 알려진 비례상수이다.

PLP 배관은 PE배관 보다 항복응력이 월등히 높지만 탄성계수도 크기 때문에 두 종류 배관의 지진에 대한 영향도는 시뮬레이션을 통한 비교가 필요하다.

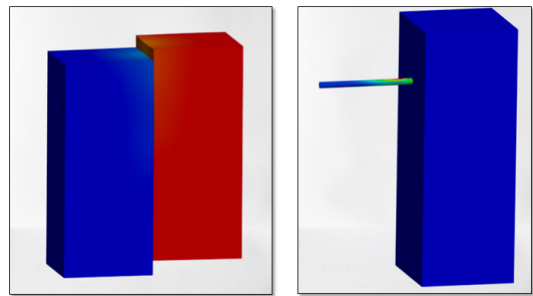


Fig. 3. Soil and pipe modeling

2.2.3 도시가스 배관의 물성치

도시가스사에서 도시가스 매설배관으로 사용하는 대다수의 배관은 PE(폴리에틸렌관)배관과 PLP(폴리에틸렌 피복강관) 두 가지로 나눌 수 있다. 이 중 사용빈도가 높은 관경의 배관을 선정하여 시뮬레이션 data로 활용하였다.

III. 지진 영향 분석을 위한 모델링

3.1 지진에 의한 매립 배관의 피해

매립배관은 내부의 유체와 외부의 토양으로부터 기계적, 화학적 손상을 동시에 받으며, 배관 누설의 발생 원인을 파악하기 어렵다. 지진에 의한 매립 상수도관 파손의 주된 원인은 지진가속도에 의한 관성력 보다 지진으로 인한 지하구조물의 파손 및 지반운동으로 인한 변위지배적인 거동이다.[10] 따라서 이번 실험에서는 지반운동의 변위지배적 거동의 영향을 확립할 수 있도록 매설가스배관의 모델링은 <그림3> 처럼 최대한 단순화한 구조를 사용하였다. 토양을 가로방향으로 두 개의 단층구조로 만들고 그 안에 매설배관을 모델링하였다. 그리고 한쪽 토양에 상방향으로 10mm위치 변위를 주어 배관에 전단응력을 가하였다.

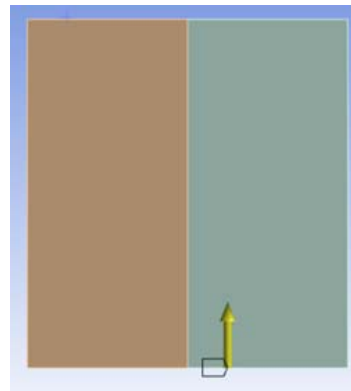


Fig. 4. Deformation of soil

3.2 지진하중을 받는 매설가스배관의 모델링

도시가스 매설배관의 지진 영향분석에는 여러 가지 변수들이 있다. 대표적인 환경적인 변수로는 매설심도와 토질, 압력이 있고 배관의 변수는 관경, 재질이 있다. 어느 조건에서 지진에 의한 응력을 더 많이 받을 지 비교하기 위해 변수별로 3가지의 모델을 만들어 비

교하였다. 단, 변수가 재질일 시 PLP배관과 PE배관의 관경 및 두께가 다르기 때문에 관경과 사용도가 비슷한 배관 관경끼리 세 쌍을 비교하였습니다. 세부적으로 토질은 배관 상하부에 모래를 부설하고 다짐을 하기 때문에 촘촘한 모래로 실험을 진행하였습니다. 단, 다짐이 잘 안되거나 시공상의 오류로 모래 부설이 이루어지지 않았을 수 있기 때문에 중간점토도 변수로 설정하였다. 심도는 관련규정인 KGS 코드 일반도시 가스사업 제조소 및 공급소 밖의 배관의 시설 / 기술 / 검사 / 정밀안전진단 기준 2.5.8.2.1 배관 지하매설 및 2.5.8.2.3 배관 하천구역 매설(공동주택등의 부지 안 : 0.6m, 폭 8m 이상의 도로 : 1.2m, 하천구역 : 4m)을 기준으로 심도를 선정하였다. 이 중 본관과 공급관의 대부분이 도로에 매설되어 1.2m 심도를 대표 변수로 선정하였다. 배관은 사고 시 수용가의 중요도, 후속조치의 복잡성(활판차단, 바이패스 등), 사고 규모(피해범위 및 공급중지 지역) 등 위험도가 더 큰 중압에 주로 사용되는 PLP배관을 대표 변수로 선정하였다.

3.3 배관과 토양의 경계조건

경계 조건은 고정되는 좌측 토양, 상방향으로 위치 변위를 받는 우측 토양 그리고 매설 배관 이렇게 세 슬릿드에 적용하였다. 지반운동으로 인한 변위지배적

인 거동을 관찰하기 위해서 고정되는 좌측 토양은 Fixed support를 적용하였고 매설 배관도 위치이탈을 막아 현실과 비슷한 거동을 재현하기 위해 Fixed support로 가정하였다. 마지막으로 상방향 위치 변위를 받는 우측 토양은 Frictionless support를 적용하여 이상적인 거동을 재현하였다.

3.4 매쉬 조건

매쉬는 배관과 토양 그리고 배관과 통양의 접촉면 세 곳으로 나눠서 요소의 사이즈를 다르게 적용하였

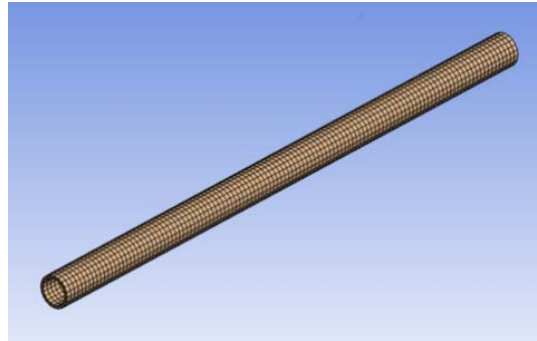


Fig. 5. Pipe mesh

Table 2. Simulation model of Citygas pipe

Variable	Model	Model details
Soil	S1	loose sand, depth : 1.2m, Diameter : 150A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
	S2	dense sand, depth : 1.2m, Diameter : 150A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
	S3	normal clay, depth:1.2m, Diameter:150A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
Depth	D1	dense sand, depth:0.6m, Diameter:150A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
	D2	dense sand, depth:1.2m, Diameter:150A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
	D3	dense sand, depth:4m, Diameter:150A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
Diameter	R1	dense sand, depth:1.2m, Diameter:80A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
	R2	dense sand, depth:1.2m, Diameter:150A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
	R3	dense sand, depth:1.2m, Diameter:300A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
Pressure	P1	dense sand, depth:1.2m, Diameter:150A, pressure : low pressure, marterial : PLP
	P2	dense sand, depth:1.2m, Diameter:150A, pressure : middle pressure, marterial : PLP
	P3	dense sand, depth:1.2m, Diameter:150A, pressure : high pressure, marterial : PLP
Material	M1	dense sand, depth:1.2m, Diameter:80A, pressure : low pressure, marterial : PLP
	M2	dense sand, depth:1.2m, Diameter:63A, pressure : low pressure, marterial : PE
	M3	dense sand, depth:1.2m, Diameter:150A, pressure : low pressure, marterial : PLP
	M4	dense sand, depth:1.2m, Diameter:160A, pressure : low pressure, marterial : PE
	M5	dense sand, depth:1.2m, Diameter:300A, pressure : low pressure, marterial : PLP
	M6	dense sand, depth:1.2m, Diameter:315A, pressure : low pressure, marterial : PE

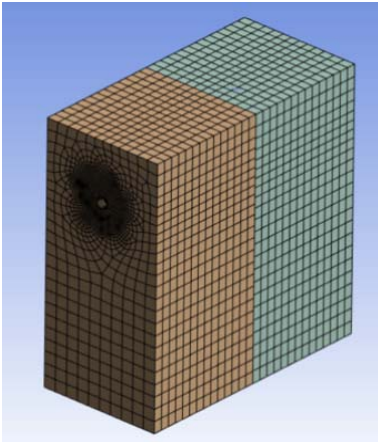


Fig. 6. soil mesh

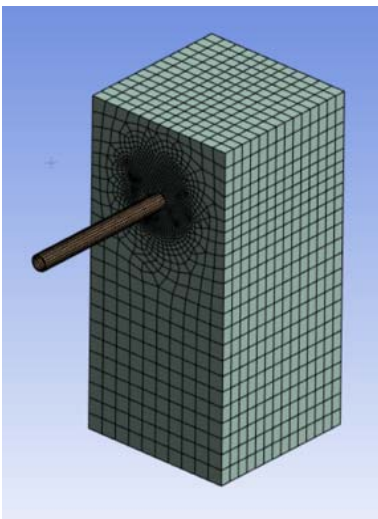


Fig. 7. contact surface mesh

다. 배관의 요소 사이즈는 20mm, 토양의 요소 사이즈는 300mm, 접촉면은 50mm로 설정하였다. 매쉬의 형태는 Program controlled로 설정하였으며 배관과 토양의 대부분은 육각형 형태로 생성되었고 배관과 토양의 접촉부는 해석이 용이한 형태로 생성되었다.

IV. 결과 및 고찰

본 연구에서는 매설가스배관의 지진하중에 대한 stress를 Ansys 프로그램을 활용하여 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 토질

토질은 중간 점토, 느슨한 모래, 촘촘한 모래

한 모래 순서로 배관의 stress가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 토질의 탄성계수가 커질 수록 stress가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

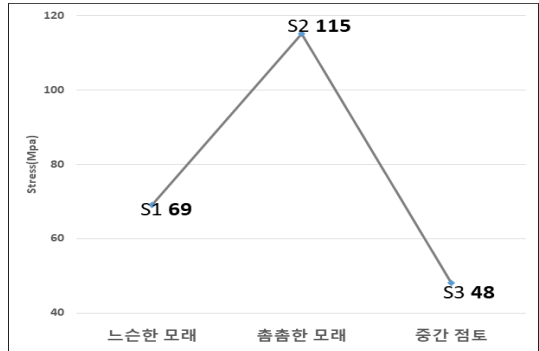


Fig. 8. Pipe stress at different soil



Fig. 8-1. Pipe stress at S1

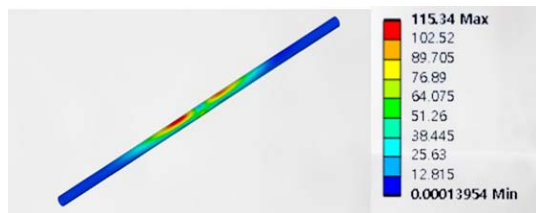


Fig. 8-2. Pipe stress at S2

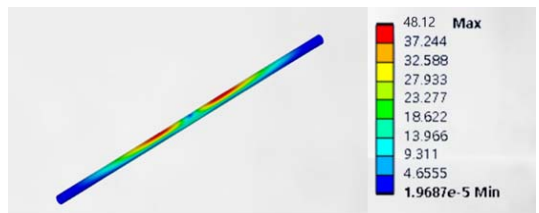


Fig. 8-3. Pipe stress at S3

2. 매설심도

매설심도에 따른 시뮬레이션 결과로 매설심도가 깊을 수록 배관의 stress가 증가하는 것을 알 수 있었다. 매설심도가 깊을 수록 토양의 하중과 상방향으로 작용하는 변위 하중이 합쳐져 배관에 더 큰 stress로 작용하는 것으로 추정된다.

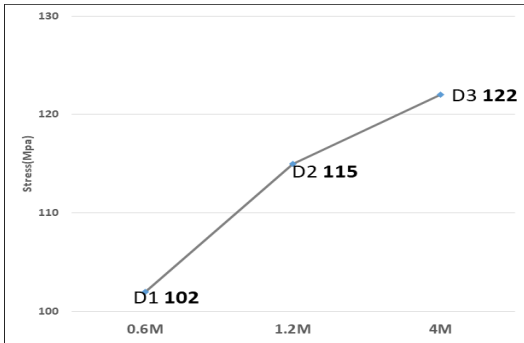


Fig. 9. Pipe stress at different depth

3. 관경

관경은 도시가스사의 본관 및 공급관에서 사용빈도가 높은 배관으로 80A, 150A, 300A를 선정하였다. 배관의 관경이 작아질수록 stress가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

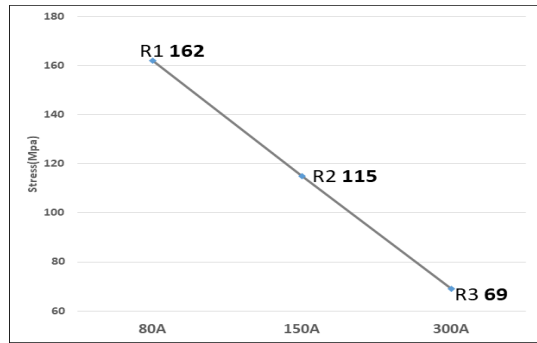


Fig. 10. Pipe stress at different diameter

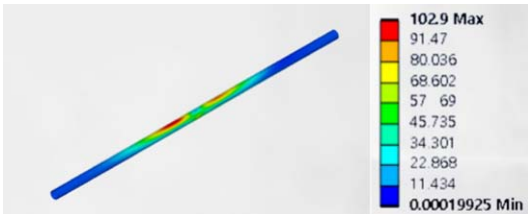


Fig. 9-1. Pipe stress at D1

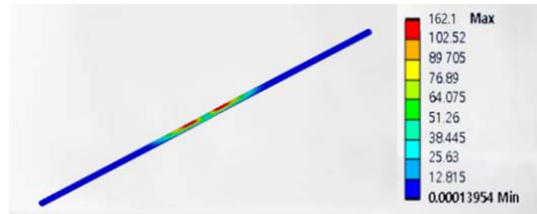


Fig. 10-1. Pipe stress at R1

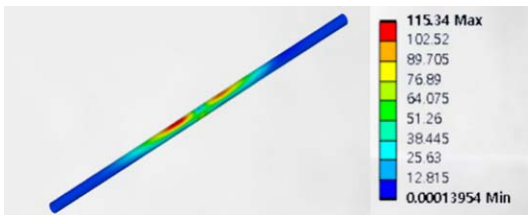


Fig. 9-2. Pipe stress at D2

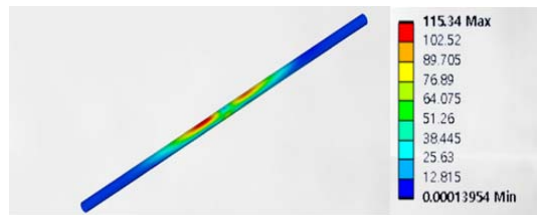


Fig. 10-2. Pipe stress at R2

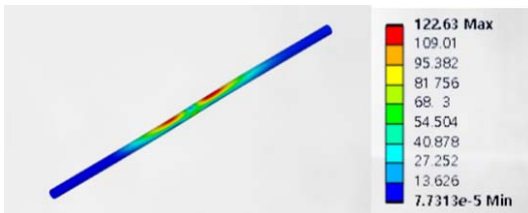


Fig. 9-3. Pipe stress at D3

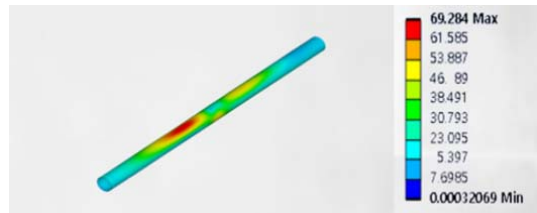


Fig. 10-3. Pipe stress at R3

4. 압력

압력은 저압, 중압, 고압으로 실험을 하였다. 압력이 클 수록 배관의 stress가 증가하는데 도시가스에 의한 압력이 함께 stress로 작용하는 것으로 추정된다.

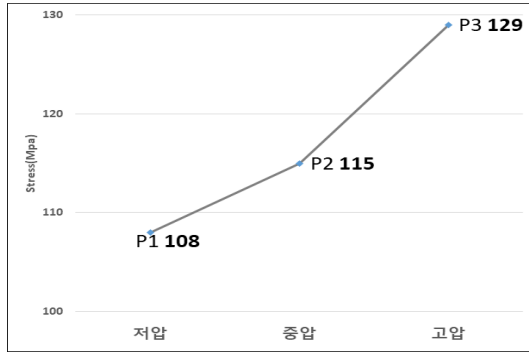


Fig. 11. Pipe stress at different pressure

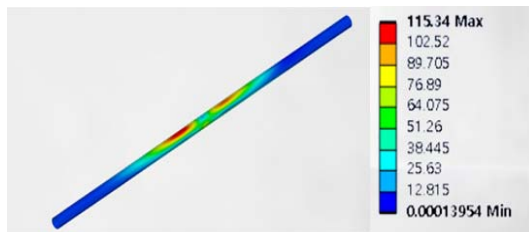


Fig. 11-1. Pipe stress at P1

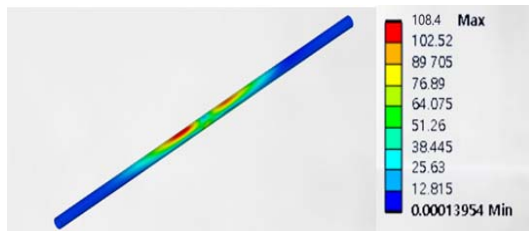


Fig. 11-2. Pipe stress at P2

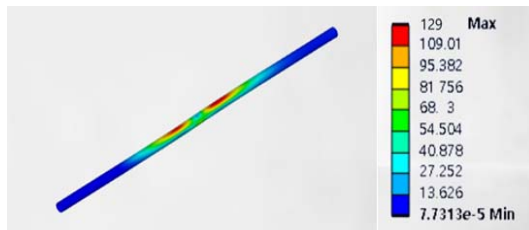


Fig. 11-3. Pipe stress at P3

5. 재질

PLP배관과 PE배관은 내/외경 및 두께, 항복응력 등 같은 배관 스펙의 비교는 어려워 관경이 비슷한 배관 끼리 묶어 항복응력에 도달할 때까지 응력을 주어 어떤 배관의 stress가 먼저 항복응력에 도달하는지를 시험하였다. 총 세쌍의 비교를 한 결과 세 실험 모두 PLP 배관이 먼저 항복응력에 도달하였다. PLP배관은 강성이 크기 때문에 항복응력이 높지만 그만큼 탄성 계수가 커서 배관이 받는 stress 또한 크기 때문에 지진에 의한 변위하중에 더 약한 것으로 추정된다.

Table 3. Pipe stress at M1 and M2 [단위:MPa]

Pipe	Deformation		
	10mm	12.5mm	15mm
PLP 80A	158	198.7	238
PE 63A	9.5	11.9	14

Table 4. Pipe stress at M3 and M4 [단위 : MPa]

Pipe	Deformation		
	10mm	15mm	20mm
PLP 150A	108	169	223
PE 160A	4.4	6	8.8

Table 5. Pipe stress at M5 and M6 [단위 : MPa]

Pipe	Deformation		
	20mm	30mm	40mm
PLP 300A	111	166	222
PE 315A	5	8	11

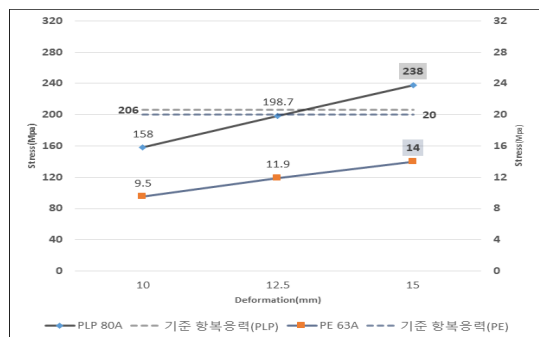


Fig. 12-1. Pipe stress at M1 and M2

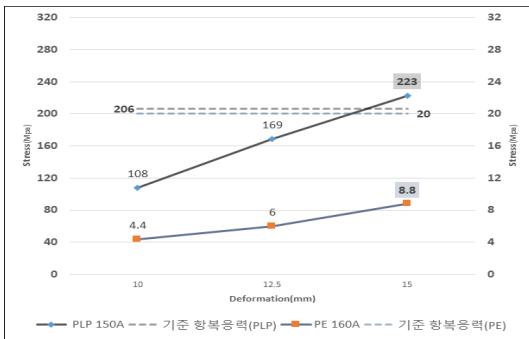


Fig. 12-2. Pipe stress at M3 and M4

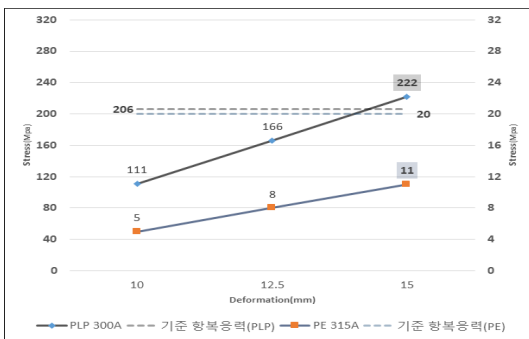


Fig. 12-3. Pipe stress at M5 and M6

V. 결론

본 연구를 통하여 지진에 더 취약한 매설배관의 case를 알 수 있었다. 토양은 느슨한 모래가 가장 배관 stress가 작으므로 배관 매설 시 배관 주위 모래시공을 확실히 하여야 할 것이다. 매설심도는 하천횡단 구간, 압입구간, 지장물 하월구간 등 심도가 깊은 구간이 지진의 영향을 더 많이 받을 것으로 보인다. 관경은 소규모 수용가의 인입 배관 및 내관의 관경이 작으므로 지진 발생 시 더 위험할 것으로 보인다. 압력은 고압배관이 가장 stress를 많이 받으며 압력이 높을 수록 사고 발생 시 피해도가 클 수 있기 때문에 각별한 주의가 필요할 것이다. 마지막으로 재질은 PLP배관이 더 지진에 취약한 것으로 판단되지만 배관의 파손은 충격 발생 시 가장 약한 부분에서 파손이 일어나는데 PE 배관의 용착부위가 PLP배관의 용접 부위 보다 충격에 더 약하기 때문에 이를 반영한다면 PE배관의 항복응

력은 더 낮아질 수 있다.

본 연구 결과를 토대로 지진에 취약한 구간을 선정하여 지진 발생 시 특별점검에 활용한다면 더 효율적인 안전관리를 할 수 있을 것이다.

REFERENCES

- [1] 국민안전처, “9.12 지진 백서”, (2017)
- [2] KGS GC203 2022, “Code for Seismic Design of Gas Facilities and Aboveground Pipes”, (2022)
- [3] Luo, X., Ma, J., Zheng, J., Shi, J., “Finite Element Analysis of Buried Polyethylene Pipe Subjected to Seismic Landslide”, *J. Pressure Vessel Technol.*, 136(3), 031801, (2014)
- [4] Lee, D. H., Jeon, J. M., Oh, J. K., Lee, D. Ho., “Earthquake Fragility Analysis of Buried Gas Pipeline”, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 14(5), 65-76, (2010)
- [5] Lee, D.H., Cho, K. S., Chung, T. Y., Kong, J. S., “Earthquake Response Analysis of Buried Gas Pipeline”, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 11(6), 41-52, (2007)
- [6] Seed Moaveni, *Finite Element Analysis Theory and Application with ANSYS*, PEARSON, (2017)
- [7] Gere, J. M. Timoshenko, S.P., *Mechanics of materials*, PWS, (2004)
- [8] Liu, J., Zhang, H., Wu, S., Zheng, X., Zhang, D., Liu, ., “Ultimate Axial Load Prediction Model for X65 Pipeline with Cracked Welding Joint Based on the Failure Assessment Diagram Method”, *Applied Sciences*, 11(24), 11780, (2021)
- [9] Shan, Y., Shi, G., Hu, Q., Zhang, Y., Wang, F., “Numerical Investigation of the short-Term Mechanical Response of Buried Profiled Thermoplastic Pipes with Different Diametersto External Loads”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 8853959, (2021)
- [10] Jeon, B.G., Chang, S.J., Kim, J.B., Ju, B.S., “Experimental Study for Earthquake and subsidence-resistant Performance Evaluation of iPVC Buried Water Pipe”, *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 24(1), 16-23, (2020)