



건설 현장 항타 하중에 의한 지중 삼중관 진동 거동 II. 매설 심도

유한규 · †원종화* · 최정현 · 김문겸*

한양대학교 건설환경공학과, *연세대학교 토목환경공학과
(2010년 8월 6일 접수, 2011년 6월 30일 수정, 2011년 6월 30일 채택)

Dynamic Response of Underground Three-layered Pipeline Subjected to Pile Driving Loads : II. Cover Depth

Han Kyu Yoo · †Jong Hwa Won* · Joung Hyun Choi · Moon Kyum Kim*

Department of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University, Ansan, 426-791, Korea

*Department of Civil Engineering, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

(Received August 6, 2010; Revised June 30, 2011; Accepted June 30, 2011)

요 약

본 연구는 매설 조건이 불건전한 건설 현장에 매설된 삼중관이 항타 진동에 노출되었을 경우에 발생하는 배관의 거동을 매설 심도에 따라 분석하였다. 매설 배관으로부터 20m의 이격 거리를 갖는 항타 에너지는 7tonf의 램이 1.2m에서 낙하하였을 경우로 선정하였고, 매설 심도는 0.6, 1.4, 2.2, 3.0, 3.8m로 변화하여 연구를 진행하였다. 관의 길이방향 중심에서의 진동 속도와 응력을 확인 하였고, 감쇠비를 고려하여 삼중관의 거동을 분석하였다. 이격거리가 동일한 경우의 진동 속도에 대한 감쇠율은 매설 심도가 증가함에 따라 증가하는 추세를 보이고 있다. 또한, 내관에서 응력 감쇠율도 매설 심도가 증가함에 따라 증가하는 추세를 보이고 있다.

Abstract - This study presents the behavior characteristics of buried three-layered pipeline subjected to pile driving loads corresponding to its cover depth. The analysis considered the driving energy caused by 7 tonf of ram weight and 1.2m of stroke with 20m distance from buried pipeline for all the analysis cases. A cover depth of pipe is varied 0.6m to 3.8m for this research. Vibration Velocity and stress are investigated at the center section in longitudinal direction. With same distance from pile, attenuation ratio of vibration velocity for increment of cover depth has shown an increasing trend. Also, Stress attenuation ratio of inner pipe is increased with cover depth.

Key words : buried pipe, three layered pipeline, cover depth, pile driving, attenuation ratio

I. 서 론

지중 배관에 작용하는 진동은 진동원의 특성 및 지반 조건에 따라 상이하게 나타난다. 진동에 의하여 발생하는 여러 가지 파(波, wave)의 감쇠는 진동원으로 부터의 거리 및 심도 등에 의하여 대상 구조물에 다른 형태로 작용하게 된다. 일반적으로 진동

에너지의 대부분을 차지하는 표면파(rayleigh, love wave)는 진행 거리에 따라 급격한 감쇠 경향을 보이며, 매설 심도에 따른 연직 방향 감쇠 역시 동일한 경향을 나타낸다[1]. 본 연구와 관련하여, 배관의 매설 심도에 따른 열차 하중에 의하여 발생하는 응답은 매설 심도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이는 연구 결과가 있었으나, 이는 배관의 상부에 직접적으로 작용하는 하중으로 하중 재하 특성이 상이한 본 연구에 직접적으로 적용하기에는 무리가 있다

†주저자:exameve@yonsei.ac.kr

[2-3]. 따라서 본 연구에서는 항타 하중 재하점과 매설 배관의 이격 거리를 고려한 ‘건설 현장 항타 하중에 의한 지중 삼중관 진동 거동: I. 이격거리’의 연구에 이어 표면파의 영향에 대한 분석을 위하여 매설 심도에 따른 배관의 거동을 살펴보도록 한다. 본 연구를 통하여 수직 방향의 진동이 지배적인 항타 하중에 의한 지중 배관의 거동에 대한 종합적인 검토가 가능 할 것으로 판단된다. 대상 배관은 국내에서 사용되고 있는 강관 (Steel), 완충재 (Poly Urethane Resin) 및 HDPE 외관으로 이루어진 삼중관을 그 대상으로 한다[4].

II. 수치 해석 조건

지중 배관에 작용하는 항타 하중에 대한 동적 거동을 검토하기 위하여 지반-구조계를 동시에 모델링하여 전체계 동해석을 수행하였다. 수치 해석을 위하여 가로 70m, 세로 17m, 폭 120m의 유한 요소 모델을 구성하였으며 경계에서의 파의 간섭을 방지하기 위하여 점탄성 경계를 구성하였다[5]. ‘경부고속철도 제3공구 교량 기초 말뚝 항타시의 소음 및 진동 영향 평가 연구’에서 실시한 항타 진동값의 측정결과를 이용하여 지반 물성값을 검증하였으며, 항타 에너지는 “Pile Driving by Numerical Cavity Expansion”를 바탕으로 항타 에너지와 시간과의 관계를 이용하여 모형화하였다[6-7]. 최적화된 모델을 선정하여 삼중관의 매설 심도에 따른 parametric study를 수행하였다. 수치 해석 조건은 연계 연구인 “건설 현장 항타 하중에 의한 지중 삼중관 진동 거동: I. 이격거리”와 동일하다. 본 연구를 위하여 지반 전용 상용 유한요소 해석 프로그램인 Midas/GTS ver. 2.02를 사용하였다.

2.1. 항타 하중 모형화

항타 하중은 앞서 언급한 연구에서 제안된 Force

(kN)와 time(sec)의 함수로 이루어진 하중 모형을 이용하였으며 낙하 거리 1.2 m를 갖는 해머 규격 DHK 7의 제원을 고려하여 하중을 산정하였다. DHK 7의 충돌 에너지를 시간에 따른 충돌에너지에 대한 그래프로 환산을 하기 위하여 아래와 같이 식(1)을 적용하였다[8].

$$mv = \int_0^t f(t)dt \tag{1}$$

여기서, m 은 램의 질량, $v = \sqrt{2gh}$ 으로 낙하고 (h)에 관한 함수로 표현되며, g 는 중력 가속도로 9.81cm/sec이다.

2.2. 해석 대상 지반 선정

지반 모델의 크기는 “건설 현장 항타 하중에 의한 지중 삼중관 진동 거동: I. 이격거리”와 동일하게 정하였으며, 현장 실험에 기반하여 최대 진동 속도를 기준으로 지반 물성값을 조정하였다. 해당 연구에서 실시한 지반조사를 이용하여 각 지반 별 깊이를 선정하였으며 충적층 10m, 풍화토 4m, 풍화암 3m로

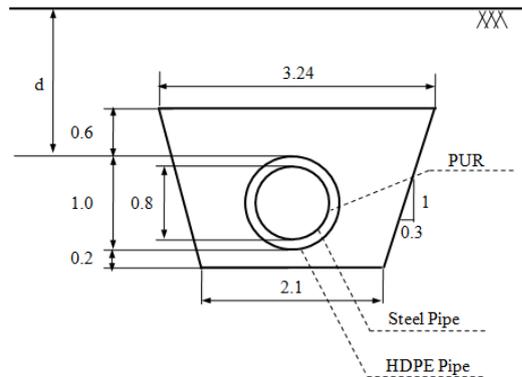


Fig. 1. Standard of Trench[9].

Table 1. Properties of Soils and Pipeline [6,9]

	탄성계수 , E ()	단위중량 , γ ()	포아송비 , ν	마찰각, ϕ (°)	점착력, C ()	두께, t (m)
Outer Pipe (HDPE)	8.16×10^4	0.94	0.4	-	-	0.0176
Inner Pipe (Steel)	2.14×10^7	7.86	0.3	-	-	0.0095
PUR	5.10×10^4	0.03	0.3	-	-	-
Filler (Sand)	3.50×10^3	1.36	0.45	30.75	0.1×10^4	
Alluvial layer	900	1.6	0.3	23	0	
Weathered Soil	6500	1.95	0.35	31	3.5	
Weathered Rock	7500	2.05	0.35	33	5.5	

수치해석 모델을 구성하였다. Trench 규격은 Fig. 1과 같으며 모든 해석에서 이격 거리는 20m로 동일하게 설정하였다[9]. 매설 심도는 본 연구에서 핵심 인자로써 0.6, 1.4, 2.2, 3.0, 3.8m로 변경하며 총 5 Case로 구성하여 해석을 실시하였다. 지반 및 삼중관의 물성값은 Table 1에 정리하였다.

III. 매설 심도에 따른 배관 거동

외부에서 발생하는 항타 진동에 의해 발생하게 되는 진동에 대한 응답으로 외관에서 발생하여 내관으로 전달되는 역학적 특성을 진동 속도, 유효응력을 사용하여 각 배관의 상호작용을 검토하고자 한다. 내·외관에 대하여 Fig. 2와 같이 각 지점을 고려하여 분석하였으며 하중 재하 지점은 배관의 좌측부이다. 또한, 기존의 선행 연구에서 고려한 기준 거리 20m를 본 연구에서 이격 거리로 선정하였다. 매설 심도는 관의 외관 상단부에서부터 지표까지의 거리를 기준으로 하여 0.6, 1.4, 2.2, 3.0, 3.8m로 선정을 하였다.

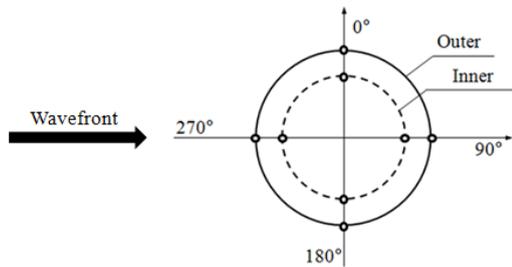


Fig. 2. three-layered Pipe Section

3.1. 삼중관의 진동 속도 분석

수치 해석을 통하여 도출된 각 매설 심도에 따른 내관과 외관의 진동 속도를 Table 2에 정리하였다. 표준 매설 심도(0.6m)일 경우 외관의 0°지점에서 발생하는 각 성분별 진동 속도는 Fig. 3과 같다. 각 성분 최대 진동 속도의 벡터합은 0.689cm/sec이다. 지표에 수직인 z방향 성분이 가장 지배적인 것으로 나타났다. x방향(파의 진행 방향) 성분의 약 2.5배에 해당하는 값이다. 미소하게 나타나는 y방향 성분의 진동은 관의 거동에 미치는 영향이 미미한 것으로 판단된다.

매설 심도 0.6m인 경우 외관의 270°지점에서 0.735 cm/sec의 최대 진동 속도가 나타나며, 0°지점과 6.3%의 차이를 보이며 그 값은 0.735cm/sec이다. 180°지점은 0°지점과의 오차 0.33%로 매우 유사한 값을 보이며, 파의 진행 반대 방향인 90°지점에서 최소 진동 속도를 나타내며 0.654cm/sec로 0°지점과는 5%의 차이를 보인다.

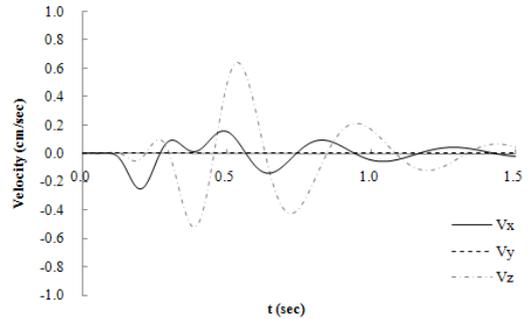


Fig. 3. Vibration Velocity of Outer at 0° (D=20m, d=0.6m, Vsum=0.689 cm/sec)

Table 2. Vibration Velocity of Outer and Inner each Cover Depth (cm/sec)

Cover Depth	Outer				Inner			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
0.6	0.689	0.654	0.691	0.735	0.689	0.659	0.691	0.728
1.4	0.682	0.647	0.673	0.717	0.682	0.651	0.673	0.710
2.2	0.647	0.612	0.641	0.675	0.647	0.616	0.639	0.669
3.0	0.596	0.567	0.602	0.624	0.596	0.570	0.597	0.619
3.8	0.542	0.524	0.552	0.572	0.545	0.526	0.548	0.568

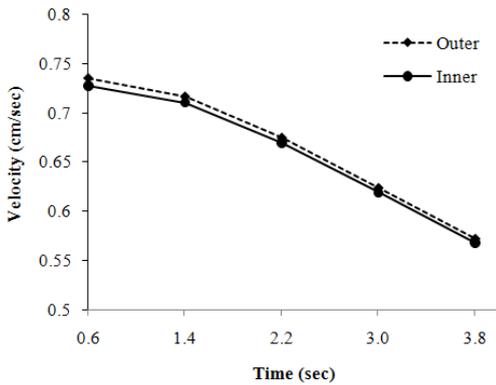


Fig. 4. Maximum Vibration Velocity of Outer and Inner Pipes.

심도 0.6m 외의 모든 해석 경우에서 역시 표준 심도에서와 동일한 진동 발생 분포를 보인다. 매설 심도가 1.4m일 경우, 외관 0°지점에서의 진동 속도는 0.682cm/sec이며 270°지점에서 0.717cm/sec의 최대 진동 속도를 나타낸다. 또한 2.2m의 매설 심도에서 외관 0°지점의 진동 속도는 0.647cm/sec, 270°지점에서 최대 0.674cm/sec의 진동을 보인다. 파의 진행 반대 방향인 90°지점에서 0.612cm/sec로 가장 작은 진동 속도 값을 보였다. 매설 심도가 3.0m일 경우 외관 0°지점의 진동 속도는 0.596cm/sec, 최대진동 속도는 270°지점에서 0.624cm/sec이다. 매설 심도가 가장 깊은 3.8m의 경우가 타 매설 심도에 비하여 진동 속도가 가장 작게 나타났으며 외관 0°지점에서 0.542cm/sec를 보이고 있다. 최대 진동 속도는 270°지점에서 0°지점과 5%의 차이를 보이며 0.572cm/sec의 진동 속도를 보인다. 최소 진동 속도는 파의 진행과 반대방향인 90°지점에서 나타나며 그 값은 0.524cm/sec이다.

Fig. 4에 매설 심도별로 내관과 외관의 최대 진동 속도를 나타내었다. 각 매설 심도별 진동 속도를 최대 진동 속도가 나타나는 270°지점을 기준으로 내·외관의 진동 속도를 비교하였다. 외관은 매설 심도가 가장 작은 0.6m에서 0.735cm/sec로 최대 진동 속도를 나타냈으며 매설 심도가 가장 큰 3.8m일 경우 0.572cm/sec의 진동 속도로 가장 작은 값을 나타내고 있다. 270°지점에서의 내관 진동 속도는 심도가 0.6m일 경우 외관과 비교하여 1.06% 감소한 0.728cm/sec의 값을 나타냈다. 매설 심도가 1.4m일 경우 내관의 진동 속도는 외관과 비교하여 0.87% 감소한 0.710cm/sec의 진동 속도를 나타내고 있다. 2.2m의

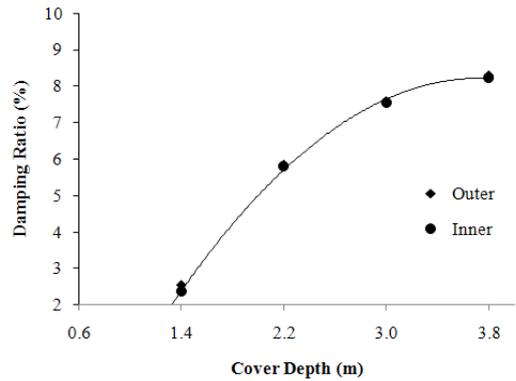


Fig. 5. Vibration Velocity Attenuation of Inner Pipe.

매설 심도에서 내관의 진동 속도는 0.669cm/sec이고 외관과의 차이는 0.81%이다. 매설 심도가 3.0m일 경우에는 내관의 진동 속도는 0.619cm/sec이고 외관과의 차이는 0.75%이다. 매설 심도가 가장 깊은 3.8m에서는 외관과 0.67%의 차이를 보이며 0.568cm/sec의 진동 속도를 나타낸다. Fig. 4에서 확인 할 수 있듯이 매설 심도의 깊이가 커질수록 진동 속도가 감소하며 내관과 외관의 진동 속도 차이가 줄어드는 것을 알 수 있다.

Fig. 5은 매설 심도별 내관과 외관의 감쇠율을 나타낸 그래프이다. 내관과 외관의 감쇠율은 유사하며 내관에 비해 외관의 감쇠율이 0.1~0.2%의 차이를 보이며 크게 나타났다. 매설 심도가 깊어짐에 따라 감쇠율이 증가하였다. 각각의 매설 심도에서 내·외관의 감쇠율은 매설 심도가 1.4m일 경우 2.35% / 2.54%, 매설 심도 2.2m에서 5.79% / 5.85%, 그리고 매설 심도 3.0, 3.8m일 경우에는 약 8%의 감쇠율을 보이며 수렴하는 경향을 나타내었다.

3.2. 삼중관의 응력 분포 분석

관의 응력 분포를 비교하기 위하여 관의 길이 120m 중 중앙부인 60m부분에서 0°(top)에서부터 15° 간격으로 단면에서 발생하는 응력을 확인하였다. 외관의 단면에서 발생하는 응력은 다음 그림 Fig. 6과 같이 불규칙적인 양상을 보인다. 매설 심도가 0.6m일 경우 외관은 60°지점에서 최소 응력 $0.072 \times 10^{-2} MPa$ 를 나타내며 195°지점에서 최대 $0.242 \times 10^{-2} MPa$ 의 값을 나타낸다. 매설 심도가 1.4m일 경우 210°지점에서 $0.319 \times 10^{-2} MPa$ 의 최대값이 발생하며 2.2m의 매설 심도에서는 225°지점에서 최대 $0.387 \times 10^{-2} MPa$ 의 값을 나타낸다. 매설 심도 3.0m 및 3.8m에서는

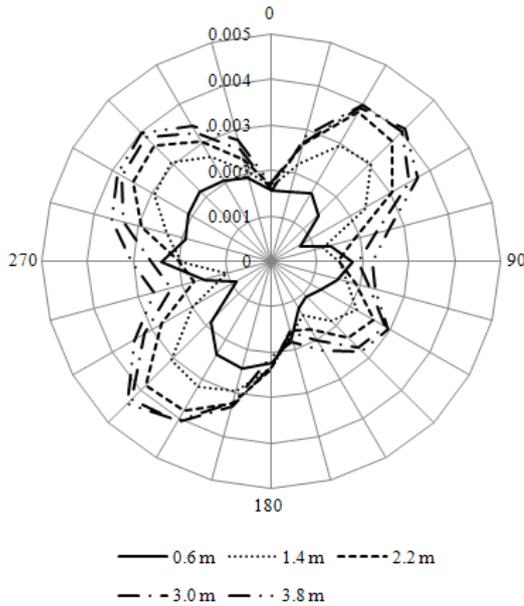


Fig. 6. von-Mises Stress on Outer Pipe (MPa).

각각 $0.431 \times 10^{-2} MPa$ 및 $0.440 \times 10^{-2} MPa$ 의 최대 응력값을 나타내는 것을 확인하였다. 외관의 경우 동 하중이 발생할 때에 다수의 파가 발생하며 구조물에도달하는 경로가 다양하기 때문에 응력 분포가 산발적으로 발생한다. 따라서 외관에서 발생하는 최대·최소 응력의 위치는 거동의 양상에 큰 의미를 갖지 못하는 것으로 판단된다.

Fig. 7은 각 매설 심도별 내관에서 응력분포를 나타낸 그래프이다. 내관의 응력 분포는 외관과 달리 규칙적인 양상을 나타내며 관의 90°지점과 270°지점은 비교적 작은 값을 나타내고 0°지점과 180°지점으로 갈수록 응력값이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이는 배관의 정적 매설 상태에서 발생하는 응력 분포와 매우 유사하며, 외관에서 전달되는 압력은 상대적으로 두껍고 탄성 계수가 작은 완충재(PUR)를 통과하면서 상하 진동이 지배적인 항타 하중의 특성을 보이는 형태로 응력이 발현되는 것으로 판단된다. 외관과 동일하게 매설 심도가 깊어짐에 내관의 응력 역시 감소하는 경향을 띠며, 각 매설 심도에 대하여 0.6m / $40.940 \times 10^{-2} MPa$, 1.4m / $45.589 \times 10^{-2} MPa$, 2.2m / $42.064 \times 10^{-2} MPa$, 3.0m / $45.536 \times 10^{-2} MPa$ 그리고 3.8m의 경우 $40.731 \times 10^{-2} MPa$ 의 최대값을 나타낸다.

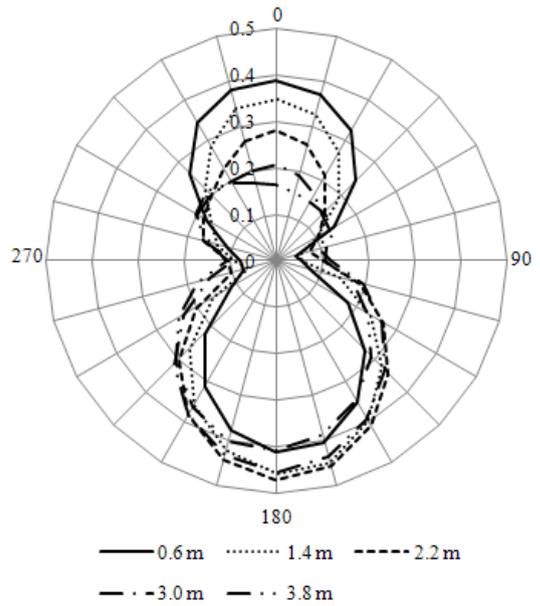


Fig. 7. von-Mises Stress on Inner Pipe (MPa).

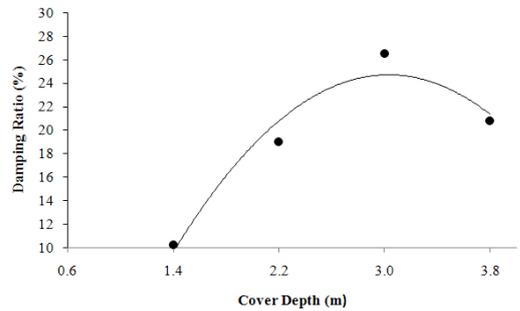


Fig. 8. Attenuation Ratio of von-Mises Stress on Inner Pipe.

Fig. 8은 일반적으로 내관에서 최대 응력이 발생하는 180°지점을 기준으로 내관의 감쇠율을 나타낸 것이며, 매설 심도가 1.4m일 경우 10.23%, 매설 심도 2.2m에서 19.01%의 감쇠율을 나타낸다. 매설 심도가 3.0, 3.8m에서는 각각 26.51%, 20.77%를 나타내고 있다. 매설 심도 3m 이후의 감쇠율 감소는 발생 응력이 수렴에 따라 3m 구간과 3.8m 구간의 응력이 차이가 미미하기 때문에 발생하는 현상이다.

IV. 결 론

본 연구에서는 수치 해석을 통하여 향타 진동 하중이 작용하는 지중 매설관의 매설 심도에 따른 거동 예측 및 분석을 위한 모델을 제시하고 관의 매설 심도를 변수로 수치 해석을 수행하였다. 수치 해석에 대한 결과는 다음과 같다.

1. 지표로부터 매설 심도가 깊어질수록 배관에 발생하는 진동 속도는 감소하는 경향을 나타내며, 이는 자유면에서 높은 에너지를 갖는 진동파가 지표를 따라 진행함에 의해 나타난다. 매설 심도가 깊어질수록 내관과 외관의 오차율은 감소하며 이는 진동의 위상으로 볼 때, 매설 심도가 깊어짐에 따라 배관이 상재하중에 의하여 구속력이 크게 작용하여 내외관의 일체 거동 양상이 발달하는 것으로 설명할 수 있다. 또한 진동의 절대량이 감소함에 따른 경향으로도 파악할 수 있다.

2. 응력 분포가 불규칙하게 발생하는 외관에서는 매설 심도가 깊어짐에 따라 발생 응력이 증가하는 양상을 보인다. 배관에서 발생하는 불규칙한 응력 분포는 동하중이 발생할 때에 다수의 파가 발생하며 구조물에 도달하는 경로가 다양하기 때문에 나타나는 현상으로 해석할 수 있다. 또한 매우 연성의 재료로 구성된 외관은 진동 자체에 의한 효과보다 심도에 따라 증가하는 지반의 구속력에 의한 영향이 크게 작용하여 심도에 따라 증가하는 응력을 나타낸다. 내관의 경우 외관과는 달리 상·하부에서 최대 응력이 발생하는 비교적 균일한 응력 분포를 보이며, 매설 심도와 상관없이 거의 유사한 최대 응력 분포를 보인다. 상·하부에서 발생하는 최대 응력은 향타 진동이 연직 방향의 성분이 지배적이기 때문인 것으로 판단되며, 완충재에 의하여 전달된 파가 내

관에 고르게 작용되는 것을 의미한다. 내관에서의 발생 응력은 외관과 달리 매설 심도가 증가할수록 감소하는 경향을 보이는데 이는 내부 강성 강관에 지표를 따라 진행되는 표면파의 영향이 지배적으로 작용하는 것으로 해석할 수 있다. 매설 심도 1.4m에서 10.23%, 매설 심도 3.8m에서 20.77%의 응력 감소를 보였으며 매설 심도가 3.0m에서 26.51%의 최대 응력 감소를 나타내는 것으로 확인하였다.

참고문헌

- [1] Keiiti Aki and Paul G. Rechar, Quantitative Seismology, Freeman (1980)
- [2] 선진선, “열차하중을 받는 지중 매설 가스 배관의 진동특성에 관한 연구”, 연세대학교 석사학위논문 (2006)
- [3] 원종화, 김문겸, 선진선, 김미승, N. Hai Dang, “열차 이동하중에 의한 지중 매설 가스 배관의 진동 특성”, KIGAS, 13(1), 1-8, (2009)
- [4] 한국지역난방공사, “열배관 기자재 기술편람 [이중보온관 편]”, (2003)
- [5] Lysmer. J. and Kuhlemeyer. R. L, “Finite dynamic model for infinite media”, ASCE, Vol. 95, pp 859-877, (1969)
- [6] 한국건설기술연구원, “경부고속철도 제3공구 교량 기초 말뚝 향타시의 소음 및 진동 영향 평가 연구”, (1995)
- [7] Mounir E.Mabsout, Salah M.Sadek, Toufic E.Smayra, “Pile Driving by Numerical Cavity Expansion”, (1999)
- [8] 유한규, “수치해석기법을 이용한 이중보온관 진동 평가기법 연구”, (2009)
- [9] 한국가스공사, “한국가스공사 표준 주배관 매설 심도 설계기준”, (2003)