

## 지반 물성값에 따른 항타 진동이 지중 삼중관에 미치는 거동 분석 Effect of Pile Driving on Three Layered Pipeline according to Soil Properties Variation

유한규<sup>1)</sup>, Han-Kyu Yoo, 최정현<sup>2)</sup>, Joung-Hyun Choi, 원종화<sup>3)</sup>, Jong-Hwa Won, 김문겸<sup>4)</sup>, Moon-Kyum Kim

<sup>1)</sup> 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>2)</sup> 한양대학교 공학대학 건설환경공학과 석사과정, Master's course, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

<sup>3)</sup> 연세대학교 공학대학 토목공학과 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Yonsei University

<sup>4)</sup> 연세대학교 공학대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

**SYNOPSIS :** In this study, the behavior of underground pipeline subjected to pile driving is examined using the verified finite element model based on the field experiment. Young's modules of surface soil is varied and elastic modulus of the other soil layer is fixed. The pile driving force model proposed by Mounir E. Mabsout in 1999 was used and it was functions of time and of force. The forcing function applied on this study considers the kinetic energy of ram located at 1.2m height with 7 tonf. The 3-layered pipeline is composed of steel(inner) pipe, PUR(Polyurethane Resin, filler) and HDPE(outer) pipe, and the length/diameter of main steel pipe is 20m/0.8m(O.D). It is used for district heating pipes in Korea. The results are expressed in terms of Von Mises stress, displacement, and vibration velocity for each soil condition. From the results of the analyses, PUR which is originally intended as a thermal insulation of inner pipe shows performance as a structural member which distributes external pressure.

**Keywords :** Pile driving, Three layered pipeline, Soil properties

### 1. 서론

지중 매설관은 경우에 따라 수백~수천 km에 이르는 수송 거리를 보이기 때문에 배관의 부식 및 충격에 의한 파손 등에 대한 모니터링이 어려운 실정이다. 이러한 불리한 조건을 극복하기 위하여 대부분의 경우 불량한 매설 조건이 불가피한 구간에 복합관 및 다중관을 설치하고 있으나, 이에 대한 종합적인 연구는 아직 미비하여 이러한 배관의 물리적 특성 등을 제대로 파악하지 못하고 있는 실정이다. 삼중 보온관은 불리한 매설 조건 등에 의한 영향보다 보온 효과를 위하여 삼중관으로 사용되고 있으나, 도시의 팽창 및 도심지 내 공사 등에 의하여 발파 및 건설 공사 하중 등의 진동에 노출되고 있어 본 연구를 통하여 매설 배관의 지중 동적 거동 특성을 분석하고자 한다.

본 연구에서는 항타 진동하중이 지중에 매설되어 있는 삼중관에 미치는 영향에 대하여, 실측 항타 진동값을 통하여 검증된 수치해석 모델을 사용하여 지반 물성값변화에 대한 경향을 분석하였다. 지반 물성값에 대한 영향을 검토하기 위하여 각 경우에 대해 동일한 매설 심도 및 하중 재하점으로부터의 이격 거리를 고려 하였으며, 전체계 동해석을 위한 수치해석 모델의 경계는 점탄성 경계로 구성하였다. 지반

진동은 탄성계수에 많은 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 표층의 탄성계수를 변화시키면서 지반의 물성값에 따른 지중 매설 삼중관의 거동 특성을 분석한다.

## 2. 수치해석

### 2.1 해석 단면

본 연구에서 사용된 배관은 직경이 8500mm인 삼중관을 사용하였다. 해석 대상 지반의 크기는 가로 70m, 세로 17m, 폭 120m로 선정하였고 그림 1 과 2에 본 연구에 사용된 유한요소모델 및 한국지역난방공사의 표준 매설 단면을 나타내었다. 본 해석에 사용된 각 물성값을 표 1에 정리하였다. 향타 지점으로 부터 관이 매설된 이격거리는 20m로 선정하였다.

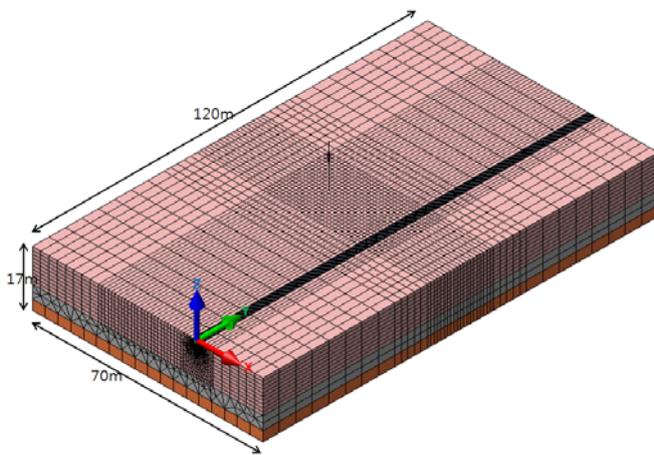


그림 1. 유한요소모델

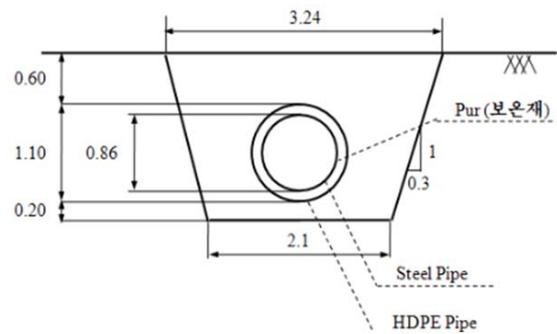


그림 2. 표준 매설 단면

표 1. 뒤채움재 및 삼중관의 물성값

	E (tonf/m <sup>2</sup> )	γ (tonf/m <sup>3</sup> )	ν	Φ (°)	C (tonf/m <sup>2</sup> )	t (m)
외관 (HDPE)	8.16 × 10 <sup>4</sup>	0.94	0.4	-	-	0.0176
내관 (Steel)	2.14 × 10 <sup>7</sup>	7.86	0.3	-	-	0.0095
보온재 (PUR)	5.10 × 10 <sup>4</sup>	0.03	0.3	-	-	-
뒤채움재	3.50 × 10 <sup>3</sup>	1.36	0.45	30.75	0.1 × 10 <sup>-4</sup>	-

### 2.2 향타하중 모형화

향타하중은 Mounir E. Mabsout가 1999년도에 제안한 Forcing Function(kN)과 시간(sec)의 관계를 나타낸 그래프를 이용하여 본 연구에 적용하였다. 향타 직후 0.01초에 최대하중에 도달한 후 바운딩에 의하여 0.03초에 작용하중이 증가한다. 해석에 사용된 해머의 규격은 DHK 7로 램중량은 7tonf이며 램스트로크는 1.2m이고, 최대 충돌에너지는 8400Nm이다. 최대 충돌에너지를 작용하중과 시간과의 관계로 나타내기 위하여 식(1)을 적용하였다.

$$mv = \int_0^t f(t)dt \quad (1)$$

식(1)은 해머가 낙하할 때 발생하는 운동량을 고려하여 시간과 작용하중의 함수로 나타내었으며, 이를 향타 하중 모형(Mounir E. Mabsout, 1999)에 적용하여 본 연구에 사용하도록 하였다. 적용 하중은 다음 그림 3과 같다.

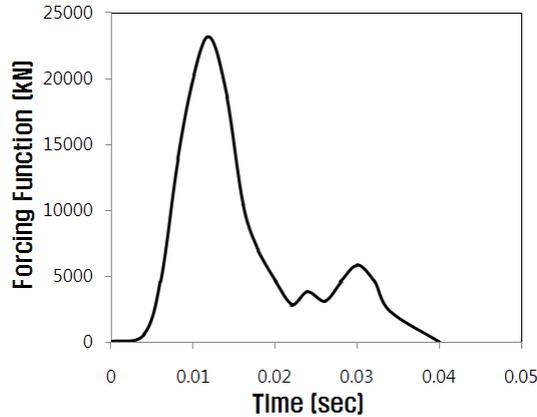


그림 3. 작용하중-시간 관계 그래프

### 2.3 지반 물성치

본 연구에서는 구자갑(2004)의 “국내 다층지반의 지반물성치 및 토압에 관한 고찰”을 바탕으로 퇴적층으로 이루어진 표층, 풍화토, 풍화암 3개의 층으로 구성된 지반을 해석대상 지반으로 선정하였다. 풍화토의 탄성계수는  $3500\text{tonf}/\text{m}^2$ , 풍화암의 탄성계수는  $6500\text{tonf}/\text{m}^2$ 으로 선정되었다. 단위중량, 점착력 등의 지반 물성치는 표 2에 정리되어있다. 퇴적층의 경우 탄성계수를  $330\text{tonf}/\text{m}^2$ ,  $650\text{tonf}/\text{m}^2$ ,  $850\text{tonf}/\text{m}^2$  세 경우에 대하여 해석을 수행하였다.

표 2. 해석 대상 지반의 물성값

	퇴적층 1	퇴적층 2	퇴적층 3	풍화토	풍화암
E ( $\text{tonf}/\text{m}^2$ )	330	650	850	3500	6500
$\gamma$ ( $\text{tonf}/\text{m}^3$ )	1.81	1.81	1.81	1.95	2.05
$\nu$	0.3	0.3	0.3	0.35	0.35
$\Phi$ ( $^\circ$ )	23	23	23	31	33
C ( $\text{tonf}/\text{m}^2$ )	0	0	0	3.5	5.5

### 3. 해석 결과

외부에서 발생하는 향타에 의해 발생하게 되는 진동에 대한 응답으로 외관에서 발생하여 내관으로 전달되는 역학적 특성을 변위, 진동속도, 유효응력을 사용하여 각배관의 상호작용을 검토하고자 한다. 지반의 탄성계수가  $330, 650, 850\text{tonf}/\text{m}^2$ 으로 변화됨에 따라 변위, 진동속도, 유효응력을 검토하였다. 내·외관에 대하여 그림 4와 같이 배관 중앙부의 상부( $0^\circ$ ), 양측부( $90^\circ, 270^\circ$ ) 그리고 하부( $180^\circ$ ) 각 지점

을 고려하여 분석하였으며, 하중 재하 지점은 배관의 좌측부이다.

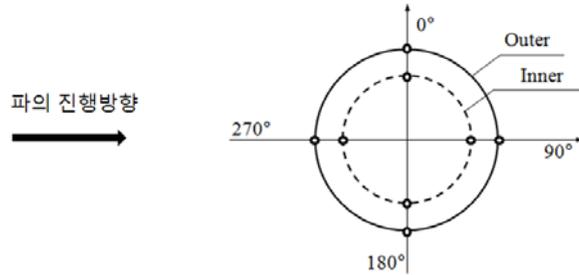


그림 4. 관의 거동 분석 위치

### 3.1 변위와 진동속도

지반의 탄성계수가 330, 650, 850tonf/m<sup>2</sup>로 변화됨에 따라 각 지점에서의 내관과 외관의 변위를 그림 5에 나타내었다. 내관과 외관의 변위는 매우 유사한 경향을 보였다. 파의 진행방향인 270°지점에서 가장 큰 값을 보였다. 0°와 180°지점에서는 유사한 값을 보이며, 90°지점에서 가장 작은 값을 나타내고 있다. 탄성계수에 따라 각 값들을 비교하여 본다면 탄성계수가 330tonf/m<sup>2</sup>일 경우가 가장 크게 나타났고, 탄성계수가 850tonf/m<sup>2</sup>일 경우가 가장 작은 변위를 보이는 것을 알 수 있다.

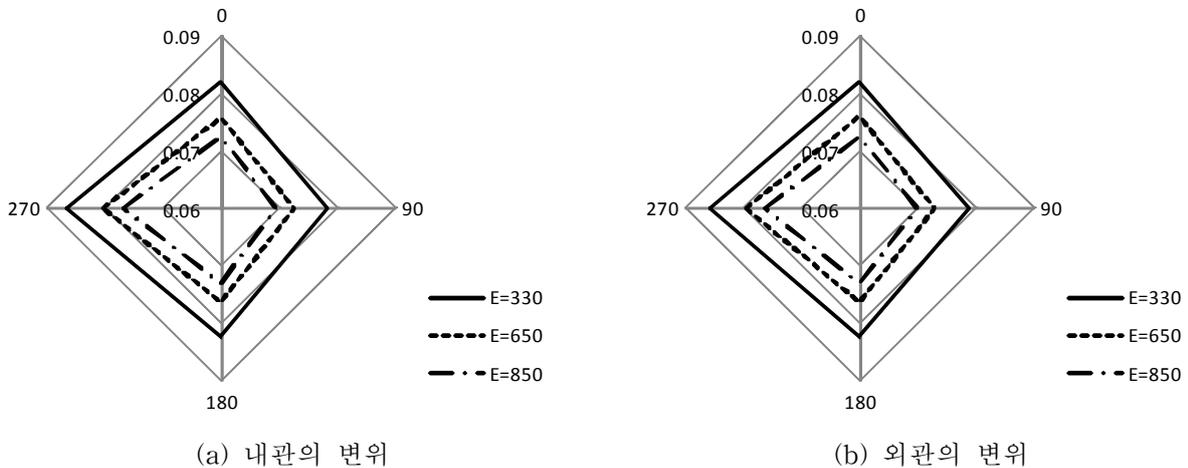
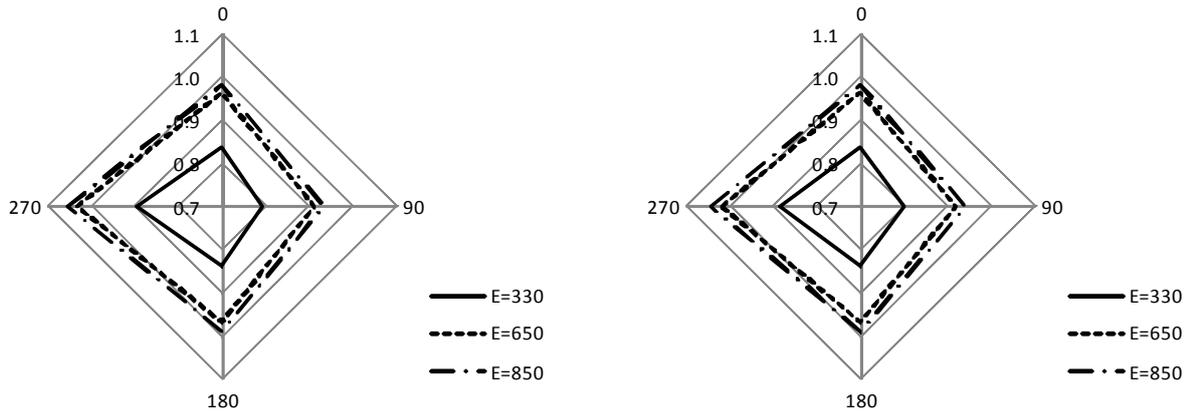


그림 5. 탄성계수에 따른 내관과 외관의 변위 (단위:cm)

그림 6에 지반 탄성계수 변화에 따른 진동속도를 나타내었다. 각 탄성계수별 진동속도 역시 변위와 유사한 패턴으로 파의 진행방향인 270°지점에서 가장 큰 속도를 나타내고 있다. 0°와 180°지점은 유사한 진동값을 나타내고 있으며 90°지점에서 가장 작은 값을 나타내고 있다. 각 탄성계수별로 진동속도를 분석하면, 270°지점을 기준으로 탄성계수가 330tonf/m<sup>2</sup>일 경우는 0.896cm/sec이고, 탄성계수가 650 tonf/m<sup>2</sup>인 지반에서는 1.032cm/sec의 진동속도를 나타내고 있다. 탄성계수가 850tonf/m<sup>2</sup>인 지반에서는 1.054cm/sec의 진동속도를 나타내고 있다.



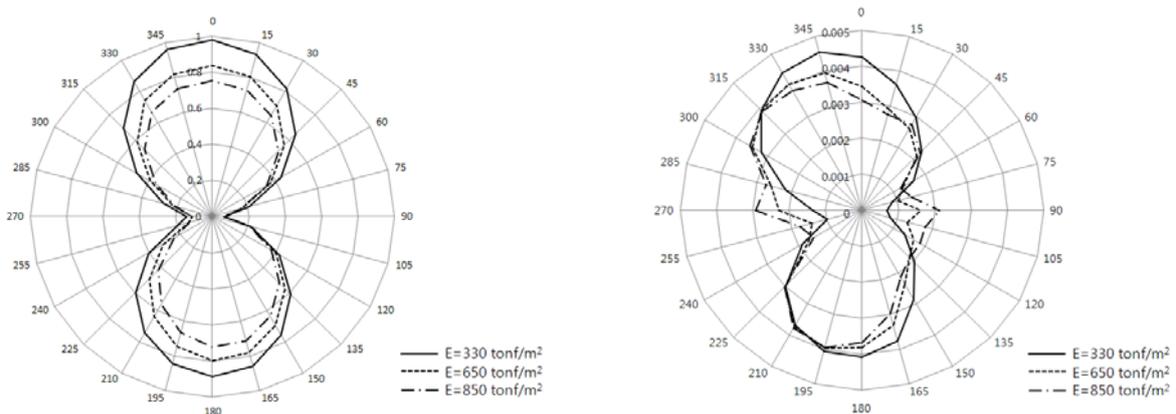
(a) 내관의 진동속도

(b) 외관의 진동속도

그림 6. 탄성계수에 따른 내관과 외관의 진동속도 (단위:cm/sec)

### 3.2 응력분포

관의 응력분포는 길이방향 120m중에서 중간인 60m지점에서의 응력 분포를 분석하였다. 관의 단면을 기준으로 상부를 0°, 하부를 180°로 정하고 항타에 의한 파가 진행되어 오는 방향을 270°로 정하였다. 그림 7은 내관과 외관의 응력분포를 나타낸 것이다. 외관의 응력분포는 불규칙적인 것으로 나타났다. 탄성계수가 330  $tonf/m^2$ 일 경우가 응력이 가장 높은 것으로 나타났다. 탄성계수가 850  $tonf/m^2$ 일 경우가 낮은 응력값을 나타내고 있다. 내관의 응력분포는 규칙적인 형상을 보이고 있다. 0°지점과 180°지점에서 최대값을 갖고, 90°지점과 270°지점에서 최소값을 나타내고 있다. 90°와 270°지점을 기준으로 나누어 보면, 상부와 하부가 매우 유사한 형상을 보이고 있다. 내관의 0°지점을 기준으로 탄성계수가 330  $tonf/m^2$ 일 경우가 0.976MPa로 가장 큰값을 보이고, 탄성계수가 650  $tonf/m^2$ 일 경우 0.836MPa로 0.14MPa의 차이를 보이고 있다. 탄성계수가 850  $tonf/m^2$ 인 경우가 0.753MPa로 가장 작은 값을 나타내고 있다.



(a) 내관의 응력 분포

(b) 외관의 응력 분포

그림 7. 관의 응력 분포 (단위:MPa)

## 4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통하여 항타하중에 대한 지중 매설관의 거동 예측 및 분석을 위한 모델을 제시하고 탄성계수 변화에 따른 지중 매설관의 변위와 응력분포를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 내관과 외관의 변위는 지반의 탄성계수 별로 분석을 하였을 경우 270°지점에서 최대값이 나타났다. 0°지점과 180°지점에서의 변위가 유사한 값을 나타내며, 파의 진행과 반대 방향인 90°지점에서 최소값을 나타냈다. 탄성계수별로 확인하여 본다면 330tonf/m<sup>2</sup>에서 가장 큰 변위값을 나타내며 탄성계수 값이 높아질수록 변위가 줄어든다. 이것은 탄성계수가 증가됨에 따라 강성이 증가하기 때문에 변위가 적게 발생하는 것이다. 진동속도의 경우 역시 변위와 마찬가지로 270°지점에서 가장 큰 값을 나타냈다. 탄성계수별로 진동속도를 확인하여 보면, 탄성계수가 큰 850tonf/m<sup>2</sup>일 경우가 진동속도가 가장 큰 것으로 나타났다. 탄성계수가 850tonf/m<sup>2</sup>에서는 1.05cm/sec의 속도가 나타나며 330tonf/m<sup>2</sup>의 탄성계수에서는 0.90cm/sec의 진동속도가 나타났다.
2. 균일하지 않은 외부 진동 하중에 대하여 외관의 응력분포는 불규칙적이지만 내관의 응력분포는 상대적으로 규칙적으로 나타났다. 이는 외부하중이 외관 및 보온재를 통과하면서 고르게 분산되는 현상에 기인하며, 상대적으로 탄성계수 및 단위중량이 큰 내관의 거동에 진동하중은 정하중과 유사한 형태의 응력을 발생시키는 것으로 나타났다. 내관의 경우, 0°와 180°지점에서는 크게 나타나고 90°지점과 270°지점에서는 작게 나타나는 응력분포를 보였다. 또한, 지반 탄성계수가 증가함에 따라 배관에 발생하는 응력이 감소하는 경향을 확인할 수 있었으며, 이는 항타 진동이 강성이 높은 지반을 통과하면서 상대적으로 빠른 감쇠 특성을 나타내기 때문인 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김재수, 이병윤, 윤해동, 조원희(2000), "Casing 부착 SIP공법에 의해 발생하는 항타소음의 전달 및 감쇠특성에 관한 연구"
2. 김태원, 서상근, 장병순(2001), "항타진동이 인접구조물에 미치는 동적영향 및 대처방안에 대한 연구", Journal of Research Institute of Industrial Technology, 제 50권, pp41-48.
3. 한국가스공사(2003), "한국가스공사 표준 주배관 매설심도 설계기준"
4. 백규호(2001), "모래지반에서 말뚝의 항타에너지가 강관말뚝의 지지력에 미치는 영향", 한국지반공학회, 제17권, 6호, pp99-110.
5. 한국지역난방공사(2003), 열배관 기자재 기술편람 [이중보온관 편], 한국지역난방공사
6. 한국건설기술연구원(2006), 지역난방 열배관의 외부작용력 및 되메움재에 대한 안정성 확보에 관한 연구, 한국지역난방공사
7. 구자갑, 김운학, 최정호, 정양규(2004), 환경대학교 논문집, 제26권 1호, pp.157-171
8. 백규호(2001), "모래지반에서 말뚝의 항타에너지가 강관말뚝의 지지력에 미치는 영향", 한국지반공학회, 제17권, 6호, pp99-110.
9. Mounir E. Mabsout, Salah M. Sadek, and Toufic E. Smayra(1999), "Pile Driving by Numerical Cavity Expansion", International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 23, pp.1121-1140