

외부하중에 의한 지중 매설관의 변형거동 특성에 관한 연구

A Study on the Deformation Behavior of the Underground Pipe under the External Load

유한규¹⁾ · 박언상[†] · 김동률²⁾

Yoo, Hankyu · Park, Eonsang · Kim, Dongryul

ABSTRACT : The underground conduit laid under different environments exhibits various behaviour according to the ground and external load as well as the loading time and conditions, so on. As the environmental conditions are usually different even within the same area, it is very difficult to correctly predict the stress conditions and behaviour of the underground conduit using currently available theoretical analysis. Especially, it is not yet satisfied in Korea for the evaluation of the underground conduit under the influence of the load of vehicles or unexpected loading conditions. Thus, in this study the assessment for the excavation depth and ground disturbance was carried out with a large box model test and numerical analysis. Numerical analysis was also performed for the assessment of dynamic loading conditions like railway load.

Keywords : Underground conduit, Railway load, External load, Large box model test

요 지 : 다양한 환경의 지반 속에 매설되어 있는 지하 매설관은 지반과 외부 하중의 종류 뿐만 아니라 하중 작용시간, 작용조건 등에 따라 다양한 거동특성을 보인다. 또한 같은 지역 내에서도 환경조건이 다르기 때문에 현재의 이론적 해석방법으로는 매설관의 응력상태나 거동상태를 정확히 예측하는 데는 현실적으로 많은 어려움이 따른다. 특히 예측치 않은 하중발생 상황이나 차량 및 열차 하중에 대한 매설관의 영향 평가는 국내의 경우 아직 미진한 상황이다. 이에 본 연구에서는 대형토조실험과 수치해석을 통하여 매설깊이에 대한 영향 평가, 지반 교란의 영향 평가를 실시하였다. 또한 열차하중과 같은 동적하중에 대한 매설관의 영향 평가를 위하여 수치해석을 통해 열차이동하중에 대한 영향 평가를 수행하였다.

주요어 : 지중매설관, 열차하중, 외부하중, 대형토조실험

1. 서 론

최근 지하에 매설되는 매설관의 사용범위가 다양해졌으며, 사용 빈도 역시 높아지고 있는 추세이다. 과거에는 농업용수관, 상하수도관 등이 주류를 이루었으나 근래에 이르러 통신관, 전력관, 가스관, 지하운송수단을 위한 지하매설물 등 그 사용범위가 확대되고 있으며 이를 위한 굴착과 되메움이 수행되고 있다.

지하매설관은 지하구조물의 특성상 시공이 이루어지고 난 후 손상여부를 알기 어려우므로 유지관리에 어려움이 있으며 손상여부를 알게 되더라도 보수·보강이 쉽지 않은 특성을 가지고 있다. 따라서, 이러한 매설관은 주하중인 내압과 외압에 대하여 안전하게 설계가 이루어져야 하며, 이를 위해 외국의 경우 매설관에 발생하는 응력에 영향을 미치는 제반 인자들에 관한 연구와 데이터 축적이 오래 전부터 수행되어 왔으나, 국내의 경우 이러한 연구가 아직

미진한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 대형토조실험을 통하여 지중 매설관 중 주변여건의 특수성으로 인해 유지관리 및 보수보강이 어려우며 특수한 하중상황이 발생하여 매설관의 안전성 확보가 용이하지 않은 매설관에 대한 건전성을 평가하고 강성 매설관에 작용하는 토압에 대한 실험값을 수치해석을 통하여 비교·분석함으로써 매설깊이에 대한 영향 평가, 지반 교란의 영향 평가 등의 영향인자들에 대하여 타당성을 검증하는데 그 목적이 있다.

또한 철도 하부를 통과하는 매설관의 경우, 시공 후 매설관 상부에 공용중 지속적으로 열차가 운행하게 되며 이러한 동적하중이 매설관에 미치는 영향은 열차하중의 동적특성과 배관이 매설된 지반의 진동특성에 의해 지배된다. 이와 더불어, 진동으로 인한 주변지반의 침하나 성토에 의한 지형변화가 발생할 경우 추가적인 응력이 발생할 수 있으며, 기 시공된 배관 상부에 열차를 위한 추가 성토

1) 정희원, 한양대학교 공학대학 토목공학과 부교수

† 정희원, 한양대학교 공학대학 토목공학과 박사과정(E-mail : pes6971@hanmail.net)

2) 비회원, 동부엔지니어링(주) 지반연구실 연구원

가 발생할 경우 이동하중 외에 토피에 의한 추가 하중 및 부등침하 등이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 표준화된 열차하중을 통해 열차 하중별 특성 및 주변 지형 등이 매설관에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 이론적 배경

2.1 Lamé 모델을 이용한 응력해석

배관의 응력관계를 단순 모형화시키면 내부와 외부에서 작용하는 응력으로 나누어 고려할 수 있으며 이는 배관의 설계단계에서 두께를 산정하는데 이용된다. Lamé가 제안한 두꺼운 배관의 응력 해석식을 이용하여 얇은 강관 및 이중관에 작용하는 응력을 유도한다.

2.1.1 내압에 의한 배관 응력해석

일반적인 에너지 수송관에는 내부 유체에 의한 압력이 발생하게 되며 이는 관 벽면 접선에 수직방향으로 작용하게 된다. 일반적으로 배관의 직경(D)과 관 벽의 두께(t)의 비, D/t 가 10보다 큰 상대적으로 얇은 배관의 내압에 대한 강도를 검토하고자 할 때 Lamé가 제안한 두꺼운 배관에 대한 이론을 바탕으로 다음과 같은 식으로 유도할 수 있다. Lamé의 식에 의해 두꺼운 배관에서의 원주방향 응력 및 반지름방향 응력은 다음 식 (1), 식 (2)와 같다.

$$\sigma_t = \frac{P_i a^2 (b^2/r^2 + 1)}{b^2 - a^2} \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{P_i a^2 (b^2/r^2 - 1)}{b^2 - a^2} \quad (2)$$

여기서, σ_t 는 원주방향 응력, σ_r 는 반지름방향 응력, P_i 는 배관에 작용하는 내부압력이며 a 는 배관의 내경, b 는 배관의 외경, r 은 배관의 중심으로부터 응력을 알고자 하는 지점까지의 거리이다. 따라서 얇은 관에 적용하기 위하여 $a \approx b$, $b - a = t$ 임을 가정하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$b^2 - a^2 = (b+a)(b-a) = \bar{D}t \quad (3)$$

$$(b+a)^2 = \bar{D}^2 = b^2 + a^2 + 2ab \quad (4)$$

여기서, \bar{D} 는 평균직경으로서 $a+b$ 로 나타낼 수 있으며 t 는 배관의 두께로서 $b-a$ 로 표현할 수 있다. 관 벽에 발생하게 되는 최대 응력은 식 (1)의 $r=a$ 를 만족할 경우의 발생응력이므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{\max} = (\sigma_t)_{r=a} = \frac{P_i a^2 (b^2/a^2 + 1)}{b^2 - a^2} = \frac{P_i (b^2 + a^2)}{b^2 - a^2} \quad (5)$$

또한 식 (3) 및 식 (4)에 의해 식 (5)는 다음 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\sigma_{\max} = \frac{P_i (\bar{D}^2 - 2ab)}{\bar{D}t} \quad (6)$$

하지만 에너지 수송관과 같이 얇은 배관에 대해서는 식 (7)과 같은 관계식을 도출할 수 있으며 최종적으로 배관에 발생하는 최대 응력은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$b^2 - a^2 = \bar{D}^2 - 2ab \approx \bar{D}^2 - 2r = \bar{D}^2 - \frac{\bar{D}^2}{2} \quad (7)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{P_i (\bar{D}^2 - 2ab)}{\bar{D}t} = \frac{P_i \bar{D}}{2t} = \frac{P_i (D_o - t)}{2t} \quad (8)$$

여기서, D_o 는 배관의 외경이다. 이러한 기본 방정식은 배관의 직경 D 와 벽의 두께 t 의 비, D/t 가 10보다 큰 상대적으로 얇은 배관의 내압에 대한 강도를 설계하고자 할 때 충분한 정확성을 지니며, 일반적으로 내압에 의해 배관이 항복상태에 달하고 직경이 증가하면 관 벽의 두께는 상대적으로 감소하게 되어 파괴가 발생한다.

2.1.2 외압에 의한 배관 응력 해석

내부 압력을 받는 얇은 배관의 해석과 같이 Lamé가 제안한 두꺼운 배관에 대한 이론을 바탕으로 다음과 같은 식으로 유도할 수 있다. Lamé의 식에 의해 두꺼운 배관에서의 원주방향 응력 및 반지름방향 응력은 다음 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$\sigma_t = -\frac{P_o b^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{a^2}{r^2} + 1 \right) \quad (9)$$

$$\sigma_r = \frac{P_o b^2}{b^2 - a^2} \left(\frac{a^2}{r^2} - 1 \right) \quad (10)$$

여기서, σ_t 는 원주방향 응력, σ_r 는 반지름방향 응력, P_i 는 배관에 작용하는 내부압력이며 a 는 배관의 내경, b 는 배관의 외경, r 은 배관의 중심으로부터 응력을 알고자 하는 지점까지의 거리이다. 따라서 얇은 관에 적용하기 위하여 $a \approx b$, $b - a = t$ 임을 가정하며, 식 (3), 식 (4)를 이용하여 $r=b$ 일 때의 최대응력을 식 (11)과 같이 도출한다.

$$\sigma_{\max} = (\sigma_t)_{r=b} = -\frac{P_o b^2 (a^2/b^2 + 1)}{b^2 - a^2} = \frac{P_o (b^2 + a^2)}{b^2 - a^2} \quad (11)$$

따라서 식 (7)을 이용하여 식 (11)을 정리하면 다음 식 (12)를 유도할 수 있다.

$$\sigma_{\max} = \frac{P_o(\bar{D}^2 - 2ab)}{\bar{D}t} = \frac{P_o\bar{D}}{2t} = \frac{P_o(D_o - t)}{2t} \quad (12)$$

여기서, D_o 는 배관의 외경이며 t 는 관 벽의 두께이다.

2.2 열차하중의 동적 특성

본 연구에서 사용한 열차하중은 일정한 주기와 진폭을 가지는 sin파 형태로 모사될 수 있으며, 아래의 식에서 제시하고 있는 4개의 관계식으로부터 계산할 수 있다.

$$S_p = 0.5 \times P_{ST} \times (i - 1) \quad (13)$$

$$i = 1 + 0.3 \frac{V}{100} \quad (14)$$

$$P_W = P_{ST} + S_p \quad (15)$$

$$f = \frac{1}{T} = \frac{V}{d} \quad (16)$$

여기서,

S_p : 표준편차

P_W : 동적 열차하중

P_{ST} : 정적 열차하중

T : 기차통과시간(sec)

i : 충격계수

d : 대차간격

V : 기차속도(km/h)

철도건설규칙(2005)에 따라 일반 열차하중에는 EL-22 표준 활하중 110kN, 열차속도 200km/h, 열차길이 388m, 대차간격 12.5m라 가정하였고, 이를 위의 식에 대입하여 계산한 이론 열차하중은 그림 1과 같다. 이론 열차하중의 최대값은 143kN, 최소값은 0kN, 진동수는 4.4Hz, 지속시

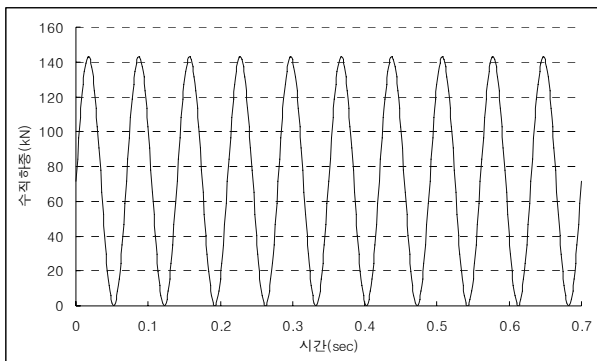


그림 1. 일반열차의 열차하중

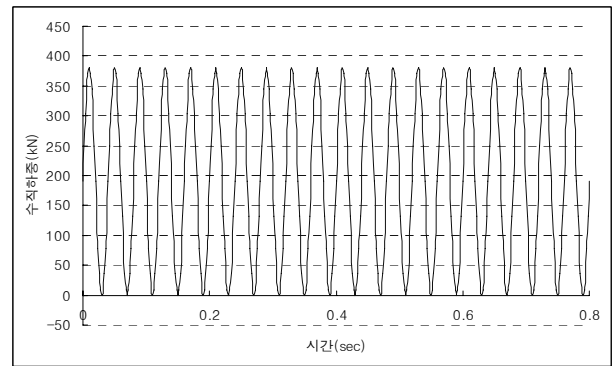


그림 2. 고속열차의 열차하중

간은 7초이다. 보수적 설계를 위해 동적 열차하중의 최소값을 0kN으로 적용하여 진폭을 최대로 산정하였다.

일반열차와 마찬가지로 고속열차에서도 철도건설규칙(2005)에 따라 정적 열차하중에는 HL-25 표준 활하중 250kN, 열차속도 350km/h, 열차길이 388m, 대차간격 12.5m라 가정하였고, 이를 위의 식에 대입하여 계산한 이론 열차하중은 위의 그림 2와 같다. 이론 열차하중의 최대값은 381.25kN, 최소값은 0kN, 진동수는 7.7Hz, 지속시간은 4초이다. 보수적 설계를 위해 동적 열차하중의 최소값을 0kN으로 적용하여 진폭을 최대로 산정하였다.

3. 대형토조실험

3.1 개요

지중 매설관의 모형실험을 수행하기 위해 대형토조를 제작하여 실험을 실시하였다. 매설깊이에 따른 상재하중 변화의 영향 평가를 위해 매설깊이(0.4m, 0.8m, 1.2m)별 실험을 수행하였으며, 지반교란에 따른 영향을 평가하기 위해 다짐도(80%, 90%)를 달리하여 실험을 수행하였다.

3.2 실험장비

대형토조실험시 균질한 지반을 형성하기 위해 주문진 표준사를 사용하였다. 대형토조는 150cm×100cm×200cm (B×L×H) 크기이며, 실험 하중조건 범위에서 변형 및 파손이 발생하지 않도록 제작하였다.

또한, 실험에서 사용한 모형강관은 KS D3631 연료가스 배관용 탄소강관으로 외경 32cm, 내경 30.6cm, 두께 0.7cm로 가공·제작하였으며 하중재하기는 유압잭을 이용한 최대 하중 240kN으로 두께 30mm의 강관으로 모래지반을 가압하여 강성 재하를 할 수 있도록 하였다. 계측장비로는

3개의 토압계와 2축 스트레인게이지 5개를 사용하였으며, 총 8개의 계측장비는 아래 그림 5~그림 6과 같은 위치에 설치하였다.



그림 3. 대형토조실험 장비 전경(1)



그림 4. 대형토조실험 장비 전경(2)

표 1. 주문진 표준사의 공학적 특성

시험항목	비중	함수비	내부마찰각	OMC	최대건조 단위중량
결과	2.58	2%	30°	13.5%	1.68t/m ³

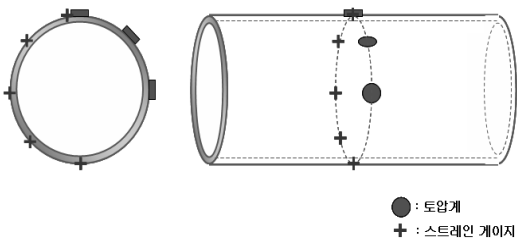


그림 5. 계측위치

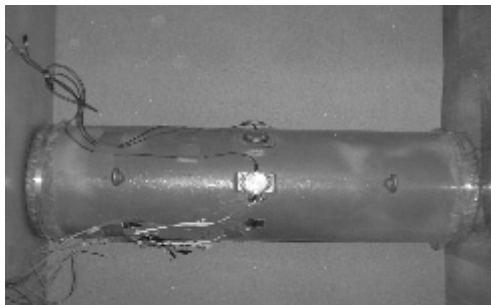


그림 6. 계측장비

3.3 실험 내용 및 방법

3.3.1 매설깊이에 따른 상재 하중 변화의 영향

매설깊이에 따른 영향 평가를 위해 다음과 같은 방법으로 실험을 수행하였다.

- (1) 대형토조 내부에 모형강관을 설치한 후 관의 변형률과 작용응력을 측정하기 위해 그림 7과 같이 토압계 및 스트레인게이지를 설치한 후 표준사를 30cm씩 포설하여 원하는 토피를 형성한다.
- (2) 매설깊이별 응력-변형률 관계를 측정하기 위해 매설깊이 변화(0.4m, 0.8m, 1.2m) 및 가압장치를 이용해 상재 하중(0~100kPa)을 변화시켜가며 실험을 수행한다.

3.3.2 지반교란의 영향 평가

지반교란에 따른 매설관 영향 평가를 위하여 다음과 같은 방법으로 실험을 수행하였다.

- (1) 대형토조 내부에 모형 강관을 설치한 후, 관의 변형률

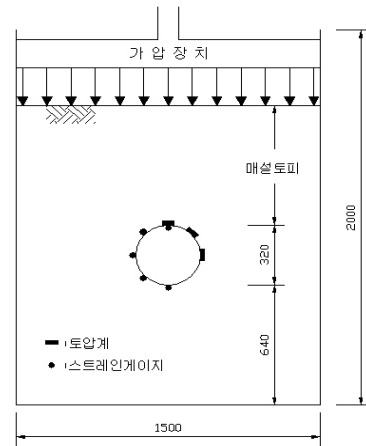


그림 7. 매설깊이 영향 평가 실험 정면도(단위:mm)

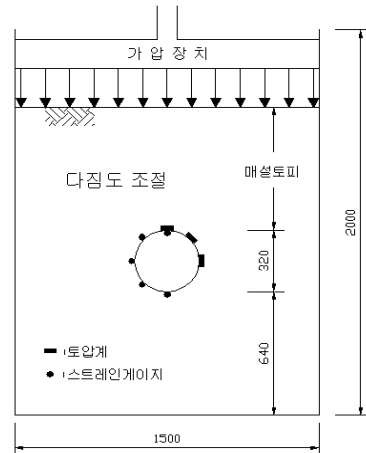


그림 8. 지반교란 영향 평가 실험 정면도(단위:mm)

과 작용응력을 측정하기 위해 그림 8과 같이 스트레인 게이지와 토압계를 설치한다.

- (2) 모래를 30cm씩 포설하여 원하는 토피를 형성한 후 진동다짐기를 이용하여 층다짐을 실시한다.
- (3) 지반교란의 영향을 측정하기 위해 모래의 다짐도(80%, 90%)를 변화시켜가며 실험을 수행하고, 이 때 각 다짐도에 따른 매설깊이별 응력-변형률 관계를 측정한다.

4. 수치해석

본 연구에서는 철도를 통과하는 매설관의 안정성 평가를 위하여 열차하중 재하에 따른 매설관에 작용하는 토압 및 변위에 대한 동적 수치해석을 수행하였다. MIDAS/GTS 프로그램은 지반 및 터널구조물의 해석과 설계를 빠른 시간 내에 완성할 수 있도록 개발되었으며, 본 연구에서는 열차이동하중에 의한 매설관의 응력 해석에 사용하였다. PLAXIS 프로그램은 지반공학 대부분의 영역을 해석함에 있어 사용하기 편리한 유한요소해석 방법으로 개발되었으며, 본 연구에서는 대형토조실험에 대한 수치해석에 사용하였다.

5. 결과 분석 및 고찰

본 연구에서는 지중 매설관의 변형거동을 분석하기 위해 대형토조실험 결과와 수치해석 결과를 비교·분석하였으며, 열차이동하중으로 인한 지중 매설관의 변형거동을 수치해석 결과를 통해 분석하였다.

5.1 대형토조실험과 수치해석 비교

5.1.1 측정 위치에 따른 토압

표 2와 그림 9~10은 매설깊이 0.4m에서의 대형토조실험결과와 수치해석결과를 각각 보여주고 있다.

표 2. 매설깊이 0.4m에서의 측정별 토압 측정

대형토조실험					수치해석				
하중 (kPa)	토압 계수	토압(kPa)			하중 (kPa)	토압 계수	토압(kPa)		
		상부	측상부	측부			상부	측상부	측부
0	0.472	5.30	4.30	2.50	0	0.889	5.96	5.12	5.30
20	0.084	36.05	9.23	3.02	20	0.615	28.36	20.70	17.45
40	0.093	54.94	15.33	5.13	40	0.853	50.77	36.28	29.61
60	0.113	68.46	23.09	7.74	60	0.571	73.18	51.87	41.76
80	0.123	74.83	28.73	9.19	80	0.564	95.58	67.45	53.91
100	0.133	83.86	34.86	11.12	100	0.560	117.99	83.03	66.06

예상되는 바와 같이 각 측정별 토압은 상부, 측상부, 측부의 순으로 작게 나타나고 있으며, 하중 증가에 따른 선형적인 결과를 나타내고 있다. 그러나 토압의 크기를 분석해 보면 대형토조실험과 수치해석 결과의 차이가 크게 나타난다.

상부에서의 토압은 실험치 및 해석치가 다소 비슷한 결과를 보이거나 측상부와 측부에서의 토압은 실험치가 해석치보다 상당히 작은 값을 보이고 있다. 이는 재하시 대형토조의 상부 중앙에서는 하중이 제대로 전달되나 측벽부에서는 벽면마찰로 인해 하중이 제대로 전달되지 않은 결과로 판단된다. 표 2의 토압계수를 분석해 보면 이와 같은

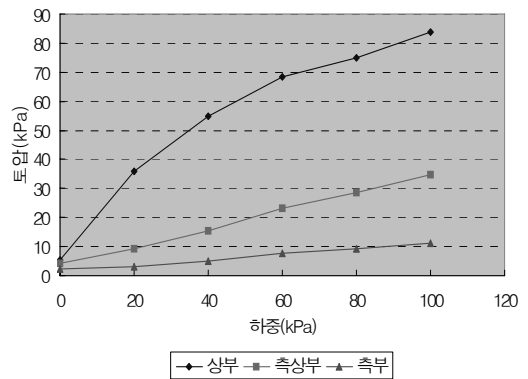


그림 9. 측정별 토압분포(대형토조실험, 매설깊이=0.4m)

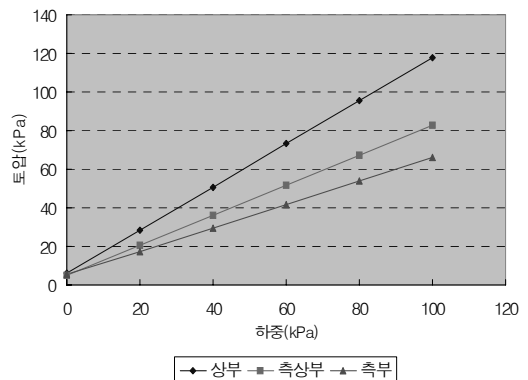


그림 10. 측정별 토압분포(수치해석결과, 매설깊이=0.4m)

원인을 재차 확인할 수 있다. 본 실험에서 사용된 모래의 이론상 정지토압계수는 0.5이다($K_0=1-\sin\phi$). 수치해석 결과는 모든 하중단계에 대해 이론상의 정지토압계수 범위를 근사적으로 나타내고 있다. 그러나 대형토조실험에서는 하중재하 전을 제외하고는 매우 낮은 토압계수를 보여주고 있다. 즉, 재하로 인한 하중이 상부 연직응력을 증가시키거나, 함께 유발되는 수평응력의 증분은 벽면마찰로 인해 매우 작게 나타난다는 것을 알 수 있다. 이러한 벽면마찰로 인한 응력감소 효과는 상당한 것으로 판단되며, 따라서 대형토조실험시 벽면마찰의 영향범위와 그 크기를 사전에 파악하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다.

5.1.2 매설깊이에 따른 토압

그림 11~그림 12는 매설깊이 0.4m, 0.8m, 1.2m에서의 대형토조실험과 수치해석 결과를 각각 보여주고 있다. 측 정치는 매설관 상부지점의 토압이다.

대형토조실험 결과, 매설관에 작용하는 토압은 모든 하중단계에 대해 매설깊이가 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 예상되는 바와 같이 상재하중의 지중응력 감소에 기인하는 것으로 판단된다. 그림 12에서의 수치해석 결과를 분석해 보면 실험결과와는 다소 다른 경향을 발

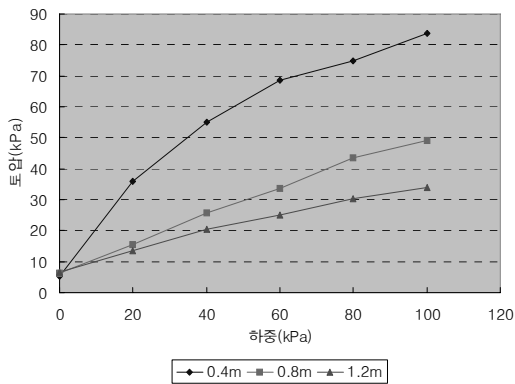


그림 11. 매설깊이에 따른 토압분포(대형토조실험)

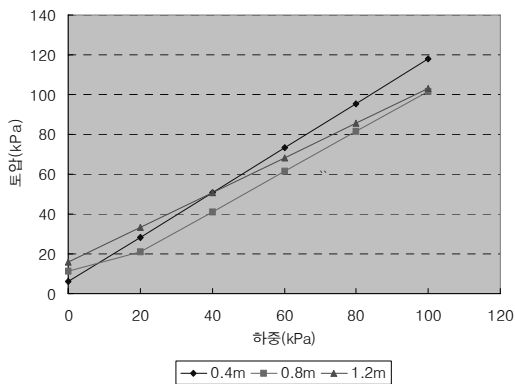


그림 12. 매설깊이에 따른 토압분포(수치해석결과)

견할 수 있다. 즉, 매설깊이가 증가할수록 매설관 상부의 토압이 감소하나 실험결과와 같이 매설깊이에 따른 선형 관계는 아니다. 매설관 상부에 작용하는 토압은 하중재하 전의 연직응력과 하중재하시 지중응력론에 의한 연직응력 증분의 합이다.

따라서 매설깊이에 따른 토압은 선형관계가 아니며 수치해석결과에서 보는 바와 같이 중간에 위치한 0.8m에서의 토압이 가장 작은 값을 보일 수 있다. 따라서 매설관에 작용하는 토압을 경감시키기 위한 적정 매설깊이는 매설관의 직경, 상재하중의 크기, 지반의 단위중량, 토압계수 등을 바탕으로 결정되어야 할 것으로 판단된다. 여기서 그림 11의 대형토조실험결과를 재차 분석해 보면 매설깊이에 따른 토압분포가 선형적이라는 것은 하중재하에 의한 지중응력이 반영되지 못했다는 것을 의미하며 이는 앞서 기술한 벽면마찰에 기인함을 알 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 벽면마찰력의 분포 비율을 정량적으로 분석해 보았다. 그림 13은 각 하중단계에서 수치해석과 대형토조실험결과와의 차이를 수치해석결과를 기준으로 정량화한 벽면마찰력의 분포 비율을 보여주고 있다.

벽면마찰력은 매설깊이가 증가할수록 커지며 마찰계수는 최대 0.67까지 나타나고 있다. 또한, 하중이 증가할수록 마찰계수는 더불어 증가한다. 그러나 매설깊이가 깊어질수록 마찰계수의 증가폭(구배)은 점차 감소함을 알 수 있다. 일반적으로 마찰력의 분포가 균등하거나 포물선 형태인 경우에는 0.5, 마찰력이 삼각형 분포인 경우에는 약 0.67정도의 마찰계수 값을 보이는 것으로 알려져 있다(Das, Principles of Foundation Engineering). 본 연구에서의 벽면마찰력 분포는 그림 13에서 보는 바와 같이 하중단계에 따라 삼각형 분포를 보이며 최대치 또한 상기한 값과 일치함을 알 수 있다.

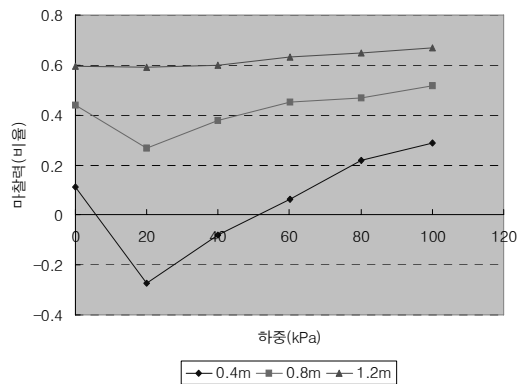


그림 13. 벽면마찰력의 분포비율

5.1.3 지반 교란에 따른 토압

그림 14~그림 15는 다짐도 80%일 때 대형토조실험 및 수치해석에서의 매설관 상부토압 분포 결과를 각각 보여주고 있다. 여기서, 매설깊이는 0.4m이며 하중증분은 각 단계 20kPa이다.

본 실험에서의 하중재하는 전단면 강성재하방식이므로 그림 15의 수치해석 결과와 같이 재하에 의한 하중증분이 일률적으로 지반에 전달되는 것이 타당하다. 즉, 20kPa의 단계별 하중재하로 인해 수치해석상 22.41kPa, 15.58kPa, 12.15kPa의 토압이 상부, 측상부, 측부에 골고루 발생하고 있다. 그림 14에 의하면 대형토조실험에서 매설관 상부 측정점의 경우 20kPa의 동일한 하중증분에 대해 작용하는 토압은 오히려 감소하고 있는데 이는 앞서 분석한 벽면마찰력에 기인하는 결과인 것으로 판단된다. 측상부와 측부로 내려갈수록 이러한 벽면마찰력의 효과는 더욱 커져 하중증분에 따른 토압 변화가 그리 크지 않은 결과를 보이고 있다.

그림 16~그림 17은 다짐도 90%일 때 대형토조실험 및 수치해석에서의 매설관 상부토압 분포 결과를 각각 보여주고 있으며 매설깊이와 하중증분의 조건은 동일하다. 그림 14~그림 17에 의하면 다짐도가 증가됨에 따라 동일한

조건에 대하여 매설관 상부에서의 토압은 증가되고 측상부 및 측부에서의 토압은 감소하는 결과를 볼 수 있다. 다짐도가 변화되면 단위중량, 내부마찰각, 점착력, 탄성계수 등의 지반의 공학적 특성이 변화된다. 즉, 상부에서의 토압증가는 다짐도 증가에 따른 단위중량 증가에 기인하는 것이며, 측상부와 측부에서의 토압감소는 다짐도 증가에 따른 내부마찰각 증가, 즉 토압계수 감소에 기인하는 것으로 판단된다.

5.2 열차이동하중에 의한 지중매설관의 변형 거동

5.2.1 매설깊이 변화에 대한 응력해석

고속열차를 대상으로 매설깊이를 1m, 1.5m, 3m로 변화시켜 가며 수치해석을 수행한 결과를 표 3에 나타내었다. 그림 18은 표 3을 이용하여 작성한 동해석에 대한 원주방향응력, 축방향응력 및 유효응력을 나타낸 그래프이다. 또한 그림 19는 매설깊이에 따른 열차이동하중영향을 나타내고 있다.

표 3에서 보는 바와 같이 자중+내압에 의한 응력 해석 결과는 외부의 추가적인 하중이 없으므로, 자중에 의해 매설깊이가 깊어질수록 증가하는 것을 알 수 있다. 동해석 결

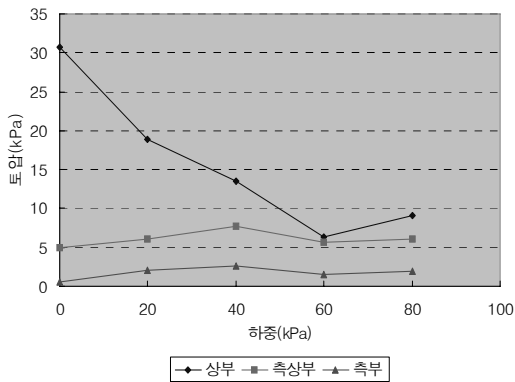


그림 14. 하중증분에 따른 측정별 토압분포(토조실험, 다짐도=80%)

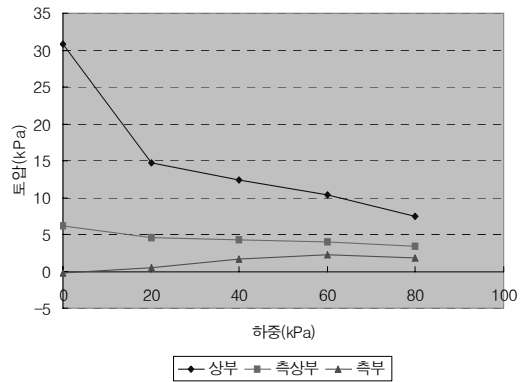


그림 16. 하중증분에 따른 측정별 토압분포(토조실험, 다짐도=90%)

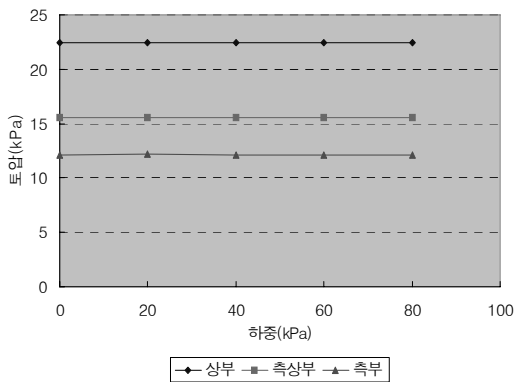


그림 15. 하중증분에 따른 측정별 토압분포(수치해석, 다짐도=80%)

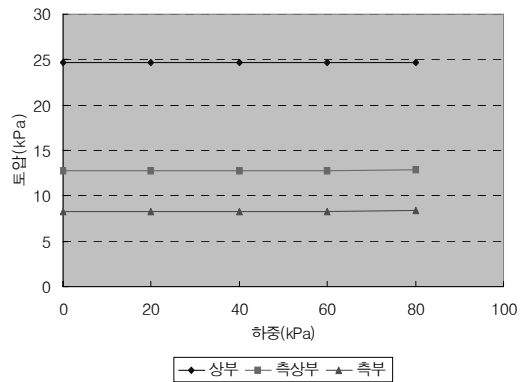


그림 17. 하중증분에 따른 측정별 토압분포(수치해석, 다짐도=90%)

과는 매설깊이가 깊어질수록 다소 감소하는 경향을 보인다. 이는 매설토피의 증가로 자중+내압을 제외한 추가적인 외부하중의 영향이 감소하는 것으로 판단된다. 그림 19에서 나타난 결과와 같이 매설깊이가 증가할수록 열차이동하중의 영향은 현저하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한 열차이동하중에 의한 영향은 최대 55.25MPa, 최소 20.71MPa를 나타내고 있다.

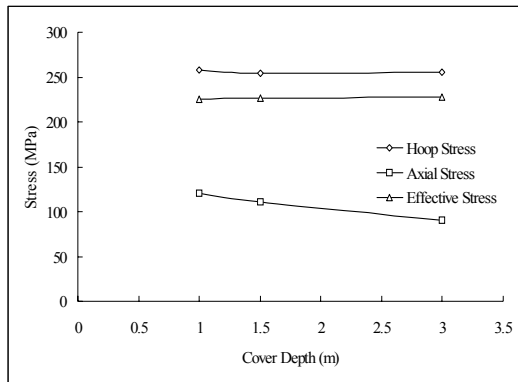


그림 18. 동해석

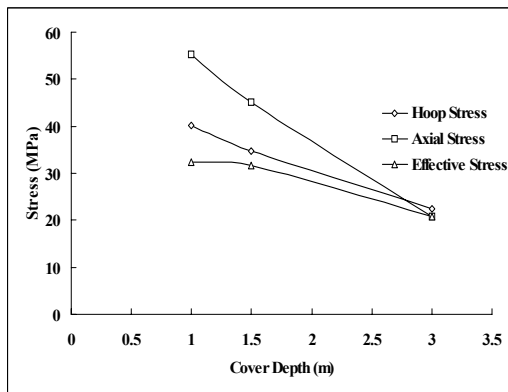


그림 19. 열차이동하중영향

5.2.2 열차 속도 영향에 대한 응력해석

열차 속도 영향에 대한 해석에서는 표 3과 표 4를 이용하여 고속열차와 일반열차에 대한 비교, 분석으로 평가하고자 한다. 전술한 바와 같이 매설깊이는 1m, 1.5m, 3m로 변화시켰으며, 속도는 고속열차 350km/h와 일반열차 200km/h, 배관 방향은 횡방향, 배관 두께 $t=14.3\text{mm}$ 의 나관에 대해서 수행하였다. 고속열차의 경우 최대 257.58MPa, 최소 90.67MPa로 나타났으며, 일반열차의 경우에는 최대 242.93MPa, 최소 79.2MPa로 나타났다.

또한, 열차의 반복하중으로 인한 이동하중의 영향은 고속열차의 경우 최대 55.25MPa, 최소 20.71MPa의 증가분을 나타내었으며, 일반열차의 경우는 최대 32.1MPa, 최소 9.27MPa의 증가분을 나타내었다. 따라서, 열차이동하중에 의한 영향도 고속열차의 경우가 일반열차에 비하여 크다는 것을 알 수 있다.

이러한 고속열차와 일반열차에 발생하는 응력값의 차이를 결정하는 인자들은 여러 가지가 있다. 이 중에서 고속열차와 일반열차를 비교해 보면 배관을 통과하는 열차하중의 주행시간의 차이와 고속열차와 일반열차의 속도에 따라 열차에서 발생하는 하중의 차이가 가장 크게 작용한다. 따라서 고속열차와 일반열차의 응력값을 비교해 보았을 때 고속열차의 응력값이 크게 나타나는 것은 고속열차 350km/h, 일반열차 200km/h의 속도에 의한 하중의 차이가 배관을 통과하는 열차하중의 주행시간의 차이보다 더 지배적이기 때문이다.

6. 결론

- (1) 대형토조실험시 재하로 인한 하중이 매설관 상부의 연직응력을 증가시키나, 함께 유발되는 수평응력의 증분은 벽면마찰로 인해 매우 작게 나타났다. 이러한 벽면

표 3. 고속열차에서 매설깊이에 따른 응력 해석 결과

매설깊이 (m)	자중+내압+열차하중(MPa)			자중+내압+열차이동하중(MPa)			열차이동하중영향(MPa)			자중+내압(MPa)		
	원주	축	유효	원주	축	유효	원주	축	유효	원주	축	유효
1	243.34	92.38	224.35	257.58	120.81	225.66	40.14	55.25	32.47	217.44	65.56	193.19
1.5	239.92	85.47	218.11	254.06	111.25	226.01	34.62	45.03	31.56	219.44	66.22	194.45
3	237.97	76.25	212.64	255.30	90.67	228.16	22.36	20.71	20.79	232.94	69.96	207.37

표 4. 일반열차의 응력 해석 결과

매설깊이 (m)	자중+내압+열차하중(MPa)			자중+내압+열차이동하중(MPa)			열차이동하중영향(MPa)			자중+내압(MPa)		
	원주	축	유효	원주	축	유효	원주	축	유효	원주	축	유효
1	227.71	77.15	204.41	240.74	97.66	210.97	23.3	32.1	17.78	217.44	65.56	193.19
1.5	228.21	74.44	204.81	239.76	90.99	214.39	20.32	24.77	19.94	219.44	66.22	194.45
3	233.29	72.06	207.74	242.93	79.2	216.64	9.99	9.24	9.27	232.94	69.96	207.37

마찰로 인한 응력감소 효과는 상당한 것으로 판단되며, 대형토조실험시 벽면마찰의 영향범위와 그 크기를 사전에 파악하는 것이 매우 중요하다.

- (2) 매설관 상부에 작용하는 토압은 하중재하 전의 연직응력과 하중재하시 연직응력 증분의 합이며, 따라서 매설깊이에 따른 토압은 선형관계가 아니다. 매설관에 작용하는 토압을 경감시키기 위한 적정 매설깊이는 매설관의 직경, 상재하중의 크기, 지반의 단위중량, 토압계수 등을 바탕으로 결정되어야 할 것으로 판단된다.
- (3) 대형토조실험시 벽면마찰력 분포비율을 정량적으로 분석한 결과, 벽면마찰력은 매설깊이가 증가할수록 커지며 마찰계수는 최대 0.67이다. 또한, 하중이 증가할수록 마찰계수는 증가하며 매설깊이가 깊어질수록 마찰계수의 증가폭은 점차 감소하였다.
- (4) 다짐도가 증가됨에 따라 매설관 상부에서의 토압은 증가되고 측상부 및 측부에서의 토압은 감소하였다. 상부에서의 토압증가는 다짐도 증가에 따른 단위중량 증가에 기인하는 것이며, 측상부와 측부에서의 토압감소는 다짐도 증가에 따른 내부마찰각 증가, 즉 토압계수 감소에 기인하는 것으로 판단된다.
- (5) 열차이동하중에 의한 지중매설관의 응력 분포에서는 매설깊이가 증가할수록 응력이 다소 감소한다. 이는 매설토포의 증가로 자중이 증가해서 응력이 증가하지만 열차이동하중이 매설토포의 하중저감효과로 인해

외부하중의 영향이 감소하므로 전체적으로는 감소하는 것으로 나타났다.

- (6) 열차 속도 영향에 대한 응력분포는 열차의 속도가 350km/h의 고속열차의 경우가 200km/h의 일반열차와 비교하여 응력이 크게 나타났으며, 이는 응력값의 차이를 결정하는 인자 중에 배관을 통과하는 열차하중의 주행시간보다 열차속도에 의해 발생하는 하중의 크기 차이가 더 지배적으로 나타나기 때문인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 박준범 외 4명 (1998), 풍화토에 매설된 관의 지표 상재하중으로 인한 변형거동, *한국토목학회논문집*, Vol. 18, No. 3, pp. 391~402.
2. 강병희, 윤여원 (1988), 성토하에 매설된 관의 거동, *대한토목학회지*, Vol. 4, No. 1, pp. 49~56.
3. 이원규, 이상범, 이래철, 김무일 (2004), 다양한 철도하중을 받는 지중 갠리리관의 손상 보강에 관한 연구, *한국철도학회 추계학술대회논문집*, pp. 1~6.
4. 황선근 (2004), 모사 열차하중에 따른 쇄석강화노반의 침하특성, *한국지반공학학회논문집*, Vol. 20, No. 2, pp. 5~13.
5. 건설교통부령 (2005), 철도건설규칙 EL 표준활하중 및 고속선 표준활하중, *건설교통부*, 별표 3~4.
6. Braja. M. Das (1999), *Principles of Foundation Engineering*, 4th edition, Brooks/Cole Publishing Company, p. 615.

(접수일: 2008. 8. 27 심사일: 2008. 9. 2 심사완료일: 2008. 9. 19)