덤프트럭 재하 조건에 따른 지중 삼중관의 실험 및 수치해석적 진동 거동 분석

조석호 · [†]원종화 · 김정재 · 김문겸

연세대학교 토목공학과

(2010년 10월 28일 접수, 2011년 2월 11일 수정, 2011년 2월 11일 채택)

Experimental and Numerical Analysis on Vibration Behavior of Underground Three-layered Pipeline subjected to Dump Truck Loads

Seok Ho Cho · [†]Jong Hwa Won · Jeong Jae Kim · Moon Kyum Kim

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

(Received October 28, 2010; Revised February 11, 2011; Accepted February 11, 2011)

요 약

도심지 내 공사 현장 및 주변 지반에 매설된 지중 배관은 시공하중에 의한 진동에 노출이 되어있는 실정이다. 주기적으로 진동이 발생하는 매설된 배관의 지중 동적 거동 특성을 분석하기 위하여 기존 문헌 분석과 실증 실험의 결과를 토대로 수치해석을 수행하고 그 사용성을 검증하였다. 본 논문은 건설 장비중 하나인 덤프트럭 하중의 매설 심도에 따른 배관의 거동을 분석하여 향후 지중 배관 관리기준 수립을 위한 기초 연구로서 수행되었다. 매설 심도 0.6, 1.2, 1.8m 차량 이동 속도 10km/h에 대하여 해석을 실시하였으며, 그 결과 매설 심도가 깊어질수록 진동속도 및 발생 응력이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Abstract - Pipes buried in around a construction site of urbanized area tend to be affected by the vibration caused by construction loads. The behaviors of buried pipes affected by periodic vibration were analyzed through numerical analyses based on existing study and experimental results. From the results of theses analyses, the serviceability of buried pipes subjected to vibration was verified. This study analyzed the pipe behaviors subjected to dump truck loads with respect to burial depths, and this research was performed as foundation study to establish standards for managing buried pipes. The analyses were performed with burial depth of 0.6, 1.2, 1.8m and vehicle velocity of 10km/h. From theses analyses, the vibration velocity and occurred stress tend to decrease as a burial depth increases.

Key words : underground pipeline, dump truck, cover depth, dynamic

1. 서 론

도심지의 인구 집중 및 최근 다각적인 국토의 개발로 인한 국토 이용률의 증가로 지중 라이프라인(lifeline)

에 대한 수요는 꾸준히 증대되고 있으며, 이에 따라 계속적으로 구조물이 설치되고 있다. 일반적으로 지중 구조물은 설치 위치에서 기인하는 유지보수에 취약한 특성을 지닌다. 특히 주요 지중 매설관은 지표로부터 0.6~3.0m에 이르는 비교적 가까운 곳에 위치하기 때문에 유입되는 유독성 오수 및 차량 등에

[†]주저자:exameve@yonsei.ac.kr

의한 충격에 노출되어있는 실정이다. 또한 거주 및 상업 지구가 확장됨에 따라 기존 배관의 상부에 구조물이 발생하는 경우, 차량 이동 하중 및 건설 장비 등에 의하여 발생하는 진동 하중에 의한 파손이 우려되는 바이다. 이러한 불리한 조건을 극복하기 위하여 대부분의 경우 매설 조건이 불가피한 구간에 복합관 및 다중관을 설치하고 있으나, 이에 대한 종합적인 연구는 미비한 실정이며, 따라서 배관의 효율적인 관리와 대처를 위하여 진동 하중에 대한 역학적 거동 특성 분석은 반드시 필요한 실정이다. 본 논문에서는 건설 장비 중 가장 빈번하게 사용되는 덤프트럭 이동 하중에 대한 거동을 실험 및 해석적인 방법을 통하여 분석, 예측하였다. 신뢰성을 갖춘 수치 해석 모델을 실증 실험 결과에 적용, 그 사용성을 검증하고 수치 해석을 수행하여 매설 관로의 응력 상태를 검토하였다. 수치 해석은 지반 전용 유한요소 해석 프로그램인 Midas GTS ver. 2.0.2를 사용하였다.

II. 연구동향

국내외로 차량의 이동 하중 및 진동 해석 관련 연구는 활발하게 이루어지고 있다. 일반적으로 지표에서 발생하는 이동 하중 및 진동은 교량 및 도로의 진동에 비하여 작기 때문에 터널 및 교량 중심의 연구가 진행되고 있는 실정이다[1]. 김기철 등은 차량의 이동 하중을 판요소 등가 이동 하중으로 치환하여 적용하는 방안을 제시하고, 이를 이용한 바닥판 구조물의 진동 해석을 통하여 바닥판 노면 조도에 따른 진동해석을 수행하였다[2]. 김재민 등은 터널 내 교량의 이동 하중을 유한 요소와 점성 감쇠 장치를 이용하여 모형화하고, DB-24하중을 재하하여 동적 응답을 분석하였다[3]. 박석준은 차량 하중의 이상화에 관한 연구에서 세가지 형태로 이상화된 모형들을 수치 해석하여 그 결과를 실험값과 비교함으로써 차량 하중으로 인한 진동 해석에 가장 적합한 하

중을 도출하였다[4]. 그러나 건설 장비 하중에 대한 국내의 매설 환경과 설계 기준을 고려한 연구는 거의 이루어지지 않았으며, 이에 국내 배관의 안정적인 관리를 위하여 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

III. 해석 모델 도출

본 연구에서는 신뢰성있는 결과 도출을 위하여 현장 실험과 수치해석을 병행하였다. 원지반과 배관 매설 부 뒤채움재의 다짐도의 차이로 진동폭이 상이하게 나타나기 때문에 하중의 효율을 조절하여 유한 요소 모델을 검증하였다.

3.1. 현장실험

실험은 경기도 양주에 위치한 골재 채취용 석산에서 이루어졌으며, 실험에 사용된 삼중관에 장비 하중이 작용할 때의 거동을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 배관을 매설하여 트럭 하중을 재하하였다. 현장 실험에는 15tonf 덤프트럭 H380이 사용되었으며 덤프트럭의 윗거는 전/후륜 각각 2.05m, 후륜 1.83m이다. 차량의 최대 적재량은 15tonf이며 각 차륜에 분산되는 하중을 Fig. 2에 나타내었다. 공차의 중량은 10.97tonf이며 만차의 중량은 25.97tonf이다. 전륜 및 중·후륜은 각각 10% 및 20%의 하중을 분담하고 있다[5]. 실험에 사용된 삼중관과 뒤채움재 및 지반의 물성값은 table 1에 요약하였다.

3.2. 유한 요소 해석

본 연구는 지반에 매설되어 있는 지중 삼중관의 동적 거동을 검토하기 위한 연구로서, 보다 정확한 파의 모사를 위하여 시간 이력 해석을 이용한 전체계 동해석(full dynamic analysis)을 실시하였다. 지반의 각 경계에는 점탄성 경계를 적용하여 반사파에 의한 영향을 최소화하도록 하였다. 동해석에 앞서 고유값 해석을 수행하기 위해 탄성 경계를 사용하여

Table 1. Properties of soil and three-layered pipe (Korea District Heating Corp.)[6]

	E (tonf/m ²)	γ (tonf/m ³)	ν	Φ (°)	C (tonf/m ²)	t (m)
Outer (HDPE)	8.16×10 ⁴	0.94	0.4	-	-	0.0176
Inner (Steel)	2.14×10 ⁷	7.86	0.3	-	-	0.0095
PUR	5.10×10 ⁴	0.03	0.3	-	-	-
Backfill	3.50×10 ³	1.36	0.45	30.75	0.1×10 ⁴	-
Soil	1.1×10 ³	1.15	0.35	20.9	2.3	-

Fig. 1. Field test of buried 3-layered pipe.

지점조건을 정의하였으며, 지반면의 스프링의 탄성 계수는 지반 반력 계수에 따라 산정하였다. 지반 반력 계수는 철도설계기준에 제시된 수직 및 수평 지반 반력 계수를 산정하는 다음 식 (1)을 사용하였다.

$$k_i = k_{i0} (B_i/30)^{-3/4} \quad (1)$$

여기서, $i = v, h, v = \text{vertical}, h = \text{horizontal}$ 을 의미하며, $k_{i0} = \alpha E_0/30$, 그리고 $B_i = \sqrt{A_i}$ 이다. A_i 는 i 방향 지반 경계면의 면적이며, E_0 는 지반의 변형 계수이다. 또한 α 는 지반반력 계수 추정을 위한 계수로서 일반적으로 1.0을 사용한다. 지반과 같은 무한한 매질을 모델링할 경우, 정해석에서는 지반 내 공동 크기(매설 배관의 직경)의 5배 이상의 지반 경계와 구조물 사이 거리를 확보하는 것이 일반적이다[7].

동해석에서는 일반적인 지반 경계를 선정할 경우 파가 반사되는 효과가 생기기 때문에 큰 오차가 유발될 수 있다. 이를 방지하기 위해 본 해석에서는 Lysmer와 Waas가 제안한 점성 경계를 적용하고, 이를

Fig. 2. Loads distribution on each front and rear wheel of 15tonf dump truck load.

Table 2. Loads distribution for loading condition

Wheel	Empty (tonf)	Loaded (tonf)
Front	1.097	2.597
Middle	2.194	5.194
Rear	2.194	5.194

정의하기 위하여 해당 지반 물성 값에 대한 x, y, z 방향의 damper 값을 산정하여 입력하였다. Damper 값을 산정하는 식은 각 P파 및 S파에 대하여 식 (2)와 같다[8].

$$\begin{aligned} C_w &= \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} \\ &= \gamma A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{9.81 W}} = c_w A \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $w = p$ or s wave, 체적 탄성 계수 $\lambda = \nu E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$ 그리고 전단 탄성 계수 $G = E / 2(1 + \nu)$ 이며 ν 는 포아송비, A 는 유한 요소 해석 모델 지반 경계의 단면적(m^2)이다.

차량하중을 적용하기 위한 주행하중모형은 도로면에 발생하는 차량의 중량을 일정한 하중 분포로 가정하는 방법이다. 일반적으로 차량 주행 하중은 삼각파, 하버사인파, 반사인파 하중의 3가지 형태로 이상화할 수 있으며, 삼각파 형태의 차량 하중 모형이 실험과 비교하였을 때 보다 높은 신뢰도를 나타내는 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서는 삼각파 하중을 사용하도록 한다[3]. 차량 하중은 차량의 각 바퀴가 절점을 지나가는 짧은 시간동안 선형으로 가감되는 삼각파 하중 형태로 고려하며 다음 Fig. 3과 같다.

Fig. 3. Symmetrical triangular pulse.

삼각형 하중의 시간 간격은 차량의 주행 속도와 모형화에 사용된 요소의 절점 간격에 따라 결정되며 Fig. 4와 같이 본 연구에 사용된 덤프 트럭 하중은 차량 총 축간 거리 5.85m를 요소간격 0.65m로 나누어 총 9구간의 삼각형 이동하중으로 나타낼 수 있다. 이렇게 이상화시킨 삼각형 하중은 이동속도 10km/h를 m/s 단위로 환산하여 각 구간의 이동 속도로 표현하면, 트럭의 축간 거리를 고려하여 선정한 유한 요소 폭 0.65m를 이동하는데 걸리는 시간은 0.234 sec임을 알 수 있다. 이를 적용할 경우 t_1 과 t_2 값은 다음 식 (3), (4)와 같이 계산된다.

$$t_2 = l/v$$

$$= 0.65m / (100km/h) = 0.234sec \quad (3)$$

$$t_1 = \frac{1}{2} \times t_2 = 0.117sec \quad (4)$$

여기서, t_1 과 t_2 는 삼각형 하중의 시간 간격, l 은 차량 하중이 이동하는 요소의 길이, v 는 차량의 이동 속도이다.

3.2. 실험을 통한 해석 모델의 검증

신뢰성을 확보한 연구 결과의 도출을 위하여 트럭의 하중 효율을 고려한 유한 요소 모델을 구성하였다. 검증된 수치해석 모델을 바탕으로 추후 parametric study를 수행하여 다양한 변수에 대한 지중 삼중관의 거동을 검토하고자 한다.

실험의 편의를 위하여 덤프 트럭에 만차로 실험을 진행한 후, 공차를 사용하여 배관의 거동을 검토하였다. 공차에서 만차인 경우보다 큰 진동 값이 발생하며, 이는 차량의 진동이 전달되는 바퀴와 지반면, 배관 주위의 지반과 배관면에서 차량의 무게가 증가

Fig. 4. Symmetrical triangular pulse of 15tonf dump truck load (fully loaded).

Table 3. FEA model verification

Vibration Velocity - Empty Vehicle				
Field Test (<i>cm/s</i>)		FEA (<i>cm/s</i>)	Error (%)	
Direction				
x	0.216	0.247	0.256	3.5
y	0.082			
z	0.088			
Efficiency		21 %		
Vibration Velocity - Fully Loaded Vehicle				
Field Test (<i>cm/s</i>)		FEA (<i>cm/s</i>)	Error (%)	
Direction				
x	0.209	0.237	0.236	0.4
y	0.071			
z	0.088			
Efficiency		8 %		

함에 따라 구속력이 크게 작용하기 때문에 나타나는 현상이다. 배관에 발생하는 진동은 차량의 하중과 반비례 관계를 보인다. Fig. 4에 만차시 15tonf 덤프 트럭의 전, 후륜 이동 하중을 나타내었으며, 다음 Table 3에 실험 값 및 계측 값을 요약하였다. 검증 시 차량의 진행 방향은 배관의 진행 방향과 수직으로 교차하는 횡방향이며, 만차 트럭 하중의 경우 하중 효율 8%에서 오차 0.4%, 공차 트럭 하중의 경우 하중 효율 21%에서 오차 3.5%를 나타내었다. 만차 경우에서 발생하는 낮은 효율은 배관 상부 뒤편재의 다짐이 완벽하지 않음에 따라 발생하는 slip에 의한 것으로 판단된다. 여기서, 하중효율은 해석 시 차량의 댄핑 및 접촉면에서의 손실을 전혀 고려하지 않은 하중 재하 조건 해석 결과 대비 실험값의 비율이다.

IV. 매설 심도 및 하중에 따른 영향

지표로부터 표준 심도(0.6m), 1.2 및 1.8m에 위치한 배관에 대해서 수치 해석을 수행하며, 하중은 검증 단계에서 도출된 장비의 효율을 고려하여 해석하였다. 하중을 재하하기 위한 지반은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 맨 아래층부터 풍화토 10m, 퇴적층 10m 그리고 2.5m의 매립층 지반을 사용하여 실험 현장과 동일한 조건을 모사하였다. 경계 조건은 앞서 검증 모형과 같이 점탄성 경계로 설정하였으며, 운거 및 덤프 트럭의 각 축에 발생하는 중량을 고려하여 15 tonf 트럭의 공차와 만차로 구분하여 삼각형 이동 하중으로 이상화하여 해석을 수행하였다[9].

4.1. 진동 속도 및 변위

다음 Fig. 6은 매설 심도 0.6m에 위치한 배관에 공차 및 만차의 트럭 하중에 의해 발생하는 내관의 각 성분별 진동 속도이며, Fig. 7은 그에 따른 공차 및 만차의 발생 변위이다[10]. 트럭 하중의 경우 수직 방향으로 직접적으로 하중이 발생하기 때문에 수직 성분의 값이 가장 크게 발생한다. 외관과 내관 모두 파의 진행 방향 속도인 v_z 가 가장 컸으며 공차의 크기는 각각 0.266cm/s , 0.256cm/s 이고 만차의 크기는 0.231cm/s , 0.230cm/s 로 외관이 내관에 비해 0.01cm/s 및 0.001cm/s 만큼 크게 나타났다. 다음으로 수직 속도 성분인 v_x 가 컸고 수평 방향 성분 중 진행 방향과 수직 방향인 v_y 는 거의 나타나지 않았다. 공차의 진동 속도 최대 벡터 합은 외관과 내관 각각 0.258cm/s , 0.259cm/s 이고 만차의 최대 벡터 합은 0.233cm/s , 0.232cm/s 으로 외관이 내관보다 크게 나타났다. 변위도 진동 속도와 같이 벡터합의 경우

Fig. 5. FEA model.

공차는 외관과 내관이 각각 0.036cm , 0.035cm 이고 만차의 경우 0.031cm , 0.032cm 로 외관이 내관보다 컸지만 그 차이는 미미했다.

Fig. 6 및 Fig. 7에서 발생하는 진동 속도 및 변위의 최대값을 매설 심도에 대해서 상대 속도(Fig. 8), 상대 변위(Fig. 9)로 나타내었다. 매설 심도 1.2m에서 발생하는 최대 속도 및 최대 변위를 기준 값으로 설정하여 단위값 '1'로 치환하고, 나머지 매설 심도에 대한 속도 및 변위 값을 상대 값으로 나타내어 매설 심도에 대해서 발생하는 값을 비교하였다. 공차 및 만차 모두 진동 속도와 변위의 최대값은 장비 이동 지점에서 매설 심도가 깊어질수록 작아지는 양상을 보였다. 진동 속도와 변위 모두 수직 방향 성분인 z 방향 성분이 가장 컸으며 다음으로 하중 진행 방향 성분인 x 방향, 매설관과 수평 방향인 y 방향 성분은 거의 0에 가까웠다. 이는 차륜을 통하여 하중을 전달하는 덤프 트럭의 하중 특성으로 인하여 수직 성분인 z 성분이 가장 크게 나타나며 차량이 이동함에 따라 매설관과 수평 방향인 y 방향 성분은 상쇄되고 있음을 의미한다. 외관과 내관의 진동속도 차이와 변위 차이 역시 매설 심도가 깊어질수록 상대적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

(a) Empty

(b) Fully loaded

Fig. 6. Vibration velocity at the top of inner pipe.

덤프트럭 재하 조건에 따른 지중 삼중관의 실험 및 수치해석적 진동 거동 분석

(a) Empty

(b) Fully loaded

Fig. 7. Displacement at the top of inner pipe.

(a) Empty

(b) Fully loaded

Fig. 9. Relative displacement of inner pipe.

(a) Empty

(b) Fully loaded

Fig. 8. Relative velocity of inner pipe.

4.2. 발생 응력

다층으로 이루어진 배관은 내압 및 외압이 작용할 경우 재료의 역할 및 공간 특성에 따라 각 배관의 접촉면에서 발생하는 경계면 압력이 상이하게 발생한다. 덤프트럭 하중에 의해 발생하게 되는 진동에 대한 응답으로 외관(HDPE)에서 발생하여 내관(steel)으로 전달되는 역학적 특성을 유효 응력(von-Mises stress)을 사용하여 각 배관의 상호 작용을 검토하였다[11].

내·외관에 대하여 Fig. 10과 같이 배관 중심부의 상부(0°), 양측부(90, 270°) 그리고 하부(180°), 각 8점을 고려하여 검토하였으며 하중 재하 지점은 배관의 좌측부이다. 매설 심도에 따라 공차 및 만차 트럭 하중에 의하여 발생하는 내·외관의 유효응력을 Table 4에 나타내었다. 외관과 내관의 응력이 만차인 경우보다 공차인 경우가 높게 나타났다. 그러나 본 해석의 경우 진동 효과에 의한 응력 발생을 검토하는 것으로 차량의 자중을 고려하여 해석을 수행할 경우 발생 압력에 의해 만차의 경우에서 응력이 더 크게 작용한다. 매설 심도 0.6m에 대하여 만차인 경우 외관의 최대 발생 응력은 0.014MPa이며, 공차일 경우는 0.015MPa로 공차가 높은 응력을 나타내었다. 외관은 wavefront가 도달하는 270°부근에서 최대 응력이 발

Table 4. von-Mises stresses on each pipe.

Empty		0°		90°		180°		270°	
		Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner
von-Mises Stress (MPa)	d=0.6m	0.004	0.064	0.011	0.210	0.006	1.476	0.015	0.211
	d=1.2m	0.002	0.039	0.013	0.292	0.005	1.287	0.009	0.183
	d=1.8m	0.001	0.026	0.009	0.189	0.003	1.115	0.007	0.186

Fully Loaded		0°		90°		180°		270°	
		Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner	Outer	Inner
von-Mises Stress (MPa)	d=0.6m	0.004	0.058	0.010	0.190	0.005	1.331	0.014	0.190
	d=1.2m	0.002	0.036	0.012	0.154	0.004	1.161	0.008	0.165
	d=1.8m	0.001	0.023	0.008	0.170	0.003	1.006	0.006	0.168

Fig. 10. Section of three-layered pipe with maximum stress.

생하나, 내관은 충격 완화재의 영향으로 하부 180°에서 최대 응력이 발생한다.

앞서 검토한 진동 속도, 변위 및 유효 응력을 종합적으로 Fig. 11에 요약하였다. 내관에서 발생하는 각 요소의 최대값을 공차/만차하중 및 매설 심도에 대하여 나타내었다. 매설 심도에 따라 지반에 의한 하중 분산 및 파의 방사로 세 요소 모두 감소하는 경향을 보인다.

V. 결 론

장비 하중에 따른 지중 매설 배관의 거동을 검토하기 위하여 표준 매설 단면에 대한 현장 실험을 수행하고, 검증된 수치 해석 모형을 이용하여 매설 심도(0.6, 1.2, 1.8m) 및 공차와 만차 하중에 대한 영향을 고찰하였다.

1. 표준 매설 단면을 이용한 현장 실험으로부터 만차와 공차 하중이 작용할 때 발생하는 진동 특성을

(a) Max. velocity

(b) Max. displacement

(c) Max. von-Mises stress

Fig. 11. Variation of maximum values according to burial depth.

검토하였다. 만차일 경우 공차인 경우보다 진동이 작게 나타나며, 이는 차량 진동이 전달되는 과정에서 지반을 구속하는 효과에 의한 것으로 판단된다. 덤프 트럭 하중은 차륜을 통하여 직접적인 하중을 전달하는 하중원으로 전달 범위가 짧으나 수직 방향의 하중으로 인해 파의 진행 방향인 z방향이 가장 크게 나타나는 특성을 보인다.

2. 각 내/외관에서 발생하는 물리값(진동 속도, 변위, 유효 응력)들은 매설 심도가 깊어질수록 감소하였다. 이는 매설 깊이가 깊어짐에 따라 공차 및 만차의 하중 재하 지점과 가까워 직접적으로 전달되기 때문이다. 근거리에서 이들 값의 차이는 더 크게 나타났다으며 매설 심도가 깊어짐에 따라 그 차이는 작아지는 양상을 보였다.

3. 외관은 차량이 접근하는 방향에서 배관의 최대 응력이 발생하나, 내관의 경우 내/외관 사이의 PUR 채움재의 영향으로 하중이 분산되어 배관의 하부에서 가장 큰 응력을 나타낸다. 채움재는 외부에서 점(point) 및 선(line) 하중으로 배관 단면에 작용하는 하중을 배관의 길이 방향으로 전달하는 역할을 한다. 따라서 배관에 주로 발생하게되는 원주 방향 응력에 대한 증분을 축방향 휨 응력으로 변환함에 따라 배관의 운용 폭을 증가시키는 영향을 가져온다. 응력은 진동에 의하여 발생하는 압력에 대한 응답으로 나타나며, 따라서 진동과 응력은 비례 관계가 성립된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김기철, 한덕전, “차량 이동하중을 받는 바닥판 구조물의 효율적인 진동해석” 대한토목학회(2005) 21권 4호(통권 198호)
- [2] 김재민, 이충건, 이익효, 이두화, “터널내 교량의 이동차량하중 작용시 충격계수에 대한 사례연구” 한국암반공학회 (1999) pp. 185-193
- [3] 박석준, 강성후, 박연수, “차량하중의 이상화, 굴착 공사 구간에 노출된 가스관의 차량하중에 대한 진동 응답 평가”, 대한토목학회 논문집, 23(2A), 211-217, (2003)
- [4] 건설교통부, “도로설계기준”, (2003)
- [5] 한국지역난방공사(2003), “열배관 기자재 기술편람[이중보온관편]”, pp 66
- [6] 한국지역난방공사(2010), “외부진동에 의한 지중 매설 이중보온관의 거동에 관한 연구”
- [7] 한국가스공사(2006), “도로, 철도 및 하천 통과배관의 건전성 평가 방안 확립”, 한국가스공사, pp 156-159
- [8] Lysmer, J. and G. Waas, “Shear waves in plane infinite structures”, J. Eng. Mech. Div. ASCE 18, pp85-105
- [9] Mounir E.Mabsout, Salah M.Sadek, Toufic E.Smayra “Pile Driving by Numerical Cavity Expansion”, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 23, pp 1121-1140
- [10] Dohyun Park, et al., (2009), “A Numerical Study on the Screening of Blast-Induced Waves for Reducing Ground Vibration”, Rock Mech Rock Eng, Vol 24, pp449-473
- [11] Lui, Q. and Tidman P., (1995), “Estimation of the Dynamic Pressure around a Fully Loaded Blasthole”, MRL 950104(TR)