



지중 가스 수송 강관의 차량 이동 속도에 따른 응력 분포 특성

†원종화 · 김문겸 · 유한규* · 김미승

연세대학교 토목공학과, *한양대학교 토목공학과
(2007년 11월 6일 접수, 2008년 2월 13일 채택)

Stress Distribution of Buried Gas Transportation Pipeline According to Vehicle Load Velocity

†Jong Hwa Won · Moon Kyum Kim · Han-Kyu Yoo* · Mi Seoung Kim

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

*Department of Civil Engineering, Hanyang University, Kyeonggi-do 425-791, Korea

(Received November 6, 2007, Accepted February 13, 2008)

요 약

주기적으로 진동이 발생하는 도로 하부에 매설되어 있는 가스 배관의 안정성을 검토하고 동특성을 분석하기 위하여 도로 설계 기준 및 가스공사 배관관리 규정에 의거, 현재 매설 실정을 타당하게 모사할 수 있는 유한요소모델을 구성하였으며, DB-24 하중의 진행속도에 따른 배관 발생 응력분포를 검토하였다. 매설 심도 1.5 m, 차량 이동 속도 40~160 km/h에 대하여 해석을 실시하였으며, 그 결과, 80 km/h를 정점으로 응력의 증가 추세가 감소로 돌아서는 것을 확인할 수 있었다. DB-24하중에 의하여 최대 약 10 MPa의 응력이 증가 하였으나 설계압력에서 API 5L Gr. X65 매설 배관은 차량의 진동에 대하여 충분한 안정성을 확보하고 있는 것으로 판단된다.

Abstract – In order to estimate the integrity and identify the dynamic characteristics of buried gas pipelines subjected to vehicle loads, FE analysis is performed based on the ‘Highway and Local Road Design Criteria’ and the ‘KOGAS Guideline for Pipeline Management’. The FE model describes the current burial condition of Korea properly, and the DB-24 load model is adopted for this research. This study considers a varying velocity in the range of 40~160 km/h and $P_i=8$ MPa (internal pressure) with depth cover, $Z=1.5$ m. Maximum stress occurs at $v=80$ km/h and decreases after $v=80$ km/h. The maximum induced stress by DB-24 loads is about 10 MPa. Under the design pressure, however, the analysis results show that API 5L Gr. X65 pipelines have sufficient integrity to withstand the vibration of vehicle loads.

Key words : Buried gas pipeline, DB-24, Time-history analysis, Vehicle loads, Vibration

I. 서 론

2007년 현재, 도시가스는 우리나라 에너지 소비량의 약 8%를 차지하고 있다. 짧은 역사에 비추어 볼 때 상당히 가파른 성장을 보이고 있으며, 수도권 및 대도시를 떠나 국토전반으로 서비스가 확대되고 있는 실정이다. 도심지에 설치되어진 도시가스 배관은 상부에 도로가 통과할 경우, 시공 후 매설배관 상부에 사용기간 동안 지속적으로 차량이 운행하게 되며 이러한 동적하중이 매설배관에 미치는 영향은 차량하중의 동적특성과 배관이 매설된 지반의 진동특성에 의해 크게

변화하게 된다. 이에 주기적인 진동에 노출되어 있는 도로 하부 매설배관에 대하여 차량하중에 대한 정량적인 하중 증감에 대한 수치해석을 실시하여 매설배관의 건전성을 평가하고자 한다. 표준화된 차량 및 열차하중과 매설지반 조건을 제시하기 위해 도로 관련 법규, 차량하중 특성 및 주변 지형 및 속도 등으로 인해 발생할 수 있는 하중인자에 대해 검토하였으며, 이를 바탕으로 수치해석을 수행하여 매설관로의 응력상태를 검토하고 안정성을 평가하였다. 수치해석은 지반 전용 유한요소 해석프로그램인 Midas GTS ver.2.0.2를 사용하였다.

†주저자:exameve@yonsei.ac.kr

II. 연구동향

국내외로 차량 및 열차 이동하중 관련 매설 배관 거동에 대한 연구는 상당히 많은 수의 연구 결과를 보이고 있으나, 일반적으로 차량하중은 열차하중에 비하여 작은 하중이기 때문에 열차하중 중심의 연구가 진행되고 있다.

김형식 등은 지중 매설 배관의 매설 심도 및 곡관부, DB-24 설계 기준 차량의 하중 등에 의한 정해석 결과를 기존 연구와의 비교를 통하여 지반 내 안정성 평가 결과를 제시하였고[1] 박선준은 차량하중의 이상화에 관한 연구에서 3가지 형태로 이상화된 모형들을 가지고 수치 해석하여 그 결과를 실험값과 비교함으로써 차량하중으로 인한 진동해석에 가장 적합한 하중을 연구하였다[2].

그러나 차량하중에 대한 국내의 매설 환경과 설계기준을 만족시키는 연구는 거의 이루어 지지 않았으며, 이에 국내 배관의 안정적인 관리를 위하여 다수의 연구가 필요할 것으로 판단된다.

III. 연구내용 및 범위

본 연구에서는 DB-24 하중의 매설 배관 상부 진행 속도에 따른 배관의 동적 거동을 검토하기 위하여 시간이력해석을 통하여 배관의 변위와 발생 응력을 검토, 거동을 분석하였다.

3.1. 해석 대상 선정

본 연구를 위한 대상 해석 배관은 한국가스공사 주 사용배관인 API 5L X65, D=0.762 m (30 inch), 두께 t=17.5 mm 배관을 사용하였으며 사용 압력은 설계 압력인 8 MPa이다[3,4]. 배관 매설지반을 정의하기 위하여 건설교통부 제정 도로설계기준에서 도로 포장의 표준 단면을 차용하였다[5]. 해석 대상 배관 및 지반의 물성값은 Table 1에 정의하였으며 지반 물성은 지반조사 데이터를 바탕으로 일반적으로 사용되어지는 값을 선정

하였다[6].

도로교 설계기준[7]이 제안한 표준 도로단면을 고려한 해석 도로 모델은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 맨 아래층부터 2 m의 풍화토, 3.1 m의 잔류토, 0.4 m의 노상, 0.2 m의 보조기층, 0.15 m의 기층과 0.15 m의 표층으로 구성되어 있다. 한국가스공사 가스 배관 매설기준[3]과 도로 설계 기준을 비교하였을 때 Fig. 1의 해석모델에서 배관은 잔류토에 매설되며, 배관의 매설심도는 단면의 지표인 표층으로부터의 깊이로 정의한다. Fig. 2는 실제 해석에 사용되어진 유한요소 해석 모델로서 배관진행방향의 수직방향으로 재하된 차량하중이 도시되어 있다.

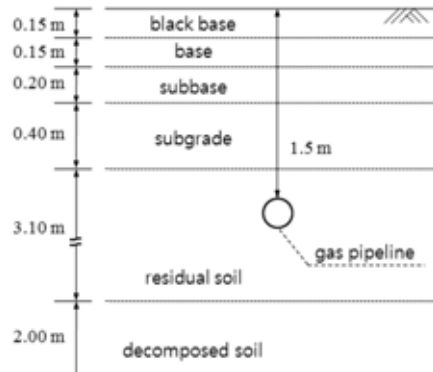


Fig. 1. Soil profile for analysis.

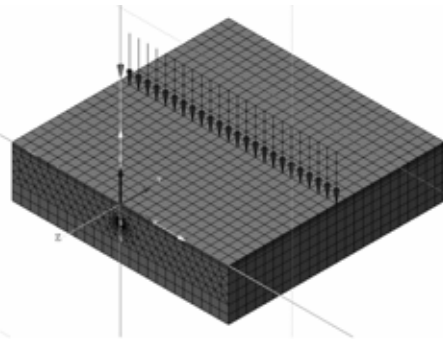


Fig. 2. FEA model.

Table 1. Material property.

	API 5L Gr. X65	Black base	Base	Subbase	Subgrade	Residual soil	Decomposed soil
γ (ton/m ³)	7.85	2.3	2.3	2.2	2.0	1.8	1.9
E (MPa)	2.1×10^5	2.1×10^3	3×10^2	2×10^2	1.5×10^2	1.0×10	5.0×10
ν	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4	0.35	0.3
C (KPa)	-	10	1	1	0	10	20
Φ (°)	-	35	35	35	40	30	35

3.2. 차량 주행 하중 모형

주행 하중 모형은 도로면에 발생하는 차량의 중량을 일정한 하중 분포로 가정하는 방법이다. 일반적으로 차량 주행 하중은 삼각파하중(symmetrical triangular pulse force), 하버사인파 하중(haversine pulse force), 반사인파 하중(half-cycle sine pulse force)의 3가지 형태로 이상화되어진다. 박선준의 '차량하중의 이상화에 관한 연구'에서 해석결과와 실험결과를 비교한 결과, 삼각파 형태로 차량 주행하중을 이상화하는 경우에 보다 높은 신뢰도를 얻을 수 있었다는 연구 결과를 토대로 하여[2] 본 연구의 차량하중은 차량의 각 바퀴가 절점을 지나가는 짧은 시간동안 선형으로 가감되는 삼각파 하중 형태를 선택하며 Fig. 3과 같이 각 바퀴에 재하되는 정적 축하중을 정점으로 하는 삼각형 형태의 하중으로 모형화하기로 한다. 삼각형 하중의 시간간격은 차량의 주행속도와 모형화에 사용된 요소의 절점간격에 따라 결정되며 고속도로의 설계속도인 100 km/h에 적용할 경우, t_1 과 t_2 값은 다음 식 (1), (2)와 같이 계산된다.

$$t_1 = l/v$$

$$= 1.05 \text{ m}/(100 \text{ km/h}) = 0.0378 \text{ sec} \quad (1)$$

$$t_2 = 2 \times t_1 = 0.0756 \text{ sec} \quad (2)$$

여기서, t_1 과 t_2 는 삼각형 하중의 시간 간격, l 은 해석 모델 상 유한 요소의 길이, v 는 차량의 이동속도이다.

도로교 설계기준[7]에서는 자동차 하중으로 표준트럭하중과 차선하중, 보도하중 등을 활하중으로 사용하고 있다. 본 연구에서는 도로교 시방서의 표준트럭 하중인 DB 하중을 사용하였다. 이때 도로교 설계기준에 따르면 DB 하중은 한 개의 교량에 대해 차량진행방향과 동일한 방향으로 한 대를 원칙으로 하고, 차량진행 방향의 수직방향으로는 재하 가능한 대수를 재하하되, 설계부재에 최대응력이 발생도록 배치하는 것으로 규정하고 있다. DB하중은 교량 등급에 의해서 분류되며 1, 2 및 3등급에 대해서 DB-24, 18 그리고 13.5로 나뉜다. 본 연구에서는 배관에 가장 불리한 조건을 적용하

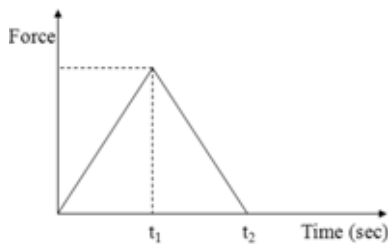


Fig. 3. Symmetrical triangular pulse.

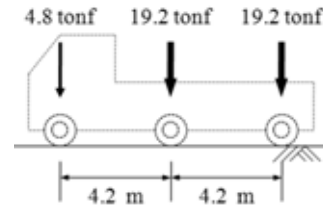


Fig. 4. DB-24 vehicle loads model.

기 위하여 주요 도시의 고속도로와 국도 등의 설계에 사용되는 DB-24 하중을 사용하며, 배관의 축방향 응력에 대한 효과를 고려하기 위하여 배관 진행 방향의 수직 방향으로 차량하중을 배치하였다. DB-24 하중의 각 축에 해당하는 하중 및 유한 요소 해석 모델 상의 하중 재하 모형은 Fig. 4에 도시하였다. 배관의 매설 심도는 통상 매설 심도인 1.2~1.5 m를 고려하여 일반적으로 직경 30 inch 이상의 대구경 관들이 매설되는 1.5 m로 설정하였다.

3.3. 시간 이력 해석

주행하중에 의하여 발생하는 파동의 해석 모델 표면에서의 감쇠를 위하여 점탄성경계로 구속조건을 정의하였다. 우선 고유진동수 해석을 위해서 Surface Spring으로 탄성경계를 구성하고 Spring 상수는 도로교설계기준(하부 구조편)[5]의 지반반력계수에 따라 산정하였다. 연직지반 반력계수 및 수평지반 반력계수는 식 (3) 및 식 (4)를 사용하여 산정하였다.

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{30} \right)^{-3/4} \quad (3)$$

$$k_h = k_{h0} \left(\frac{B_h}{30} \right)^{-3/4} \quad (4)$$

여기서, $k_{v0} = \frac{1}{30} \alpha E_0 = k_{h0}$, $B_v = \sqrt{A_v}$, 그리고 $B_h = \sqrt{A_h}$ 이다. A_v 와 A_h 는 각각 지반의 연직 방향 면과 수평방향 면의 단면적이며, E_0 는 지반의 탄성계수이다. 또한 α 는 지반반력계수 추정을 위한 계수로서 평상시에 1.0을 사용한다.

지반과 같은 무한한 매질을 모델링할 경우, 정해석에서는 일반적으로 지반 내 공동크기(매설배관의 직경)의 5배 정도의 지반 경계와 구조물 사이 거리를 확보하는 것이 합당하고, 시뮬레이션 과정에 일반적이거나, 동해석에서는 일반적인 지반경계를 선정할 경우 과가 반사되는 효과가 생기기 때문에 큰 오차가 유발될 수 있다. 이를 방지하기 위해 본 해석에서는 1972년 Lysmer와 Wass[8]가 제안한 점성경계(viscous boundary)를 적용하고, 점성경계를 정의하기 위하여 해당 지반 물성 값에

대한 x, y, z 방향에 대하여 Damper 값을 산정하여 입력하였으며, Damper 값을 산정하는 식은 P파에 대하여 식 (5), S파에 대하여 식 (6)을 사용하였다.

$$C_p = \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}}$$

$$= WA \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{9.81W}} = c_p A \quad (5)$$

$$C_s = \rho A \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

$$= WA \sqrt{\frac{G}{9.81W}} = c_s A \quad (6)$$

여기서 λ 는 체적탄성계수(tonf/m^2), G 는 전단탄성계수(tonf/m^2)이며 v 는 포아송비, A 는 유한 요소 해석 모델 상 지반의 단면적(m^2)이다.

IV. 차량 이동 속도의 영향

차량속도에 따른 응력의 영향을 알아보기 위하여, 차량의 속도를 40, 60, 80, 100, 120, 150, 그리고 160 km/h로 변화시키면서 배관의 응력을 관찰하였다. 차량하중을 정하중으로 재하하였을 경우와 비교하여 각 차량속도에 대한 해석결과, 차량의 속도가 40 km/h에서 80 km/h까지 증가할 때 각 응력은 증가하며, 80 km/h부터 다시 응력이 감소하였다. 차량의 이동속도에 따른 배관의 응력을 Table 2에 요약하였으며, 차량의 이동속도에 따른 각 응력의 분포 추이를 Fig. 5 및 Fig. 6에 나타내었다. 또한 Table 2에서 정해석(static analysis)은 차량 하중을 정하중으로 재하시킨 경우, 동해석(dynamic analysis)은 차량 주행속도를 고려하여 재하한 경우이며, 기준 응력(reference stress)은 차량하중을 고려하지 않은, 상부의 토압 및 내압에 의한 응력만을 고려한 해석 결과이다. $\Delta\sigma$ 는 동하중에 의하여 배관에 발

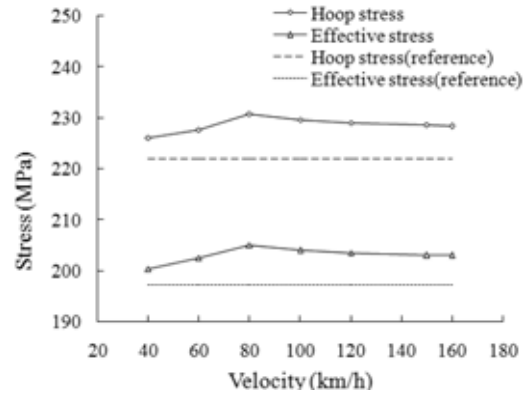


Fig. 5. Hoop and effective stress.

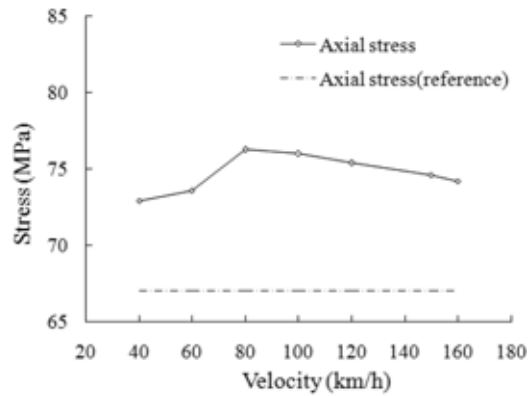


Fig. 6. Axial stress.

생한 응력이다.

해석에 사용한 DB-24하중은 설계를 위한 하중으로서 실제 차량 모델이 존재하지 않기 때문에, 해석결과의 검증에 위하여 API(America Petroleum Institute)의 매설 가스배관 설계 시 고려되는 교통하중의 산정방법을 사용하였으며, 그 중 적용가능한 원주방향 응력

Table 2. Induced stress according to velocity.

v (km/h)	Static analysis (MPa)			Dynamic analysis (MPa)			$\Delta\sigma$ (MPa)			Reference stress (MPa)		
	Hoop	Axial	Effective	Hoop	Axial	Effective	Hoop	Axial	Effective	Hoop	Axial	Effective
40	233.19	79.94	210.02	225.99	72.89	200.29	4.74	6.41	5.67	221.84	67.03	197.07
60				227.60	73.58	202.46	6.78	7.10	6.63			
80				230.72	76.26	205	9.83	9.77	9.46			
100				229.48	75.98	203.91	8.76	9.48	8.79			
120				228.91	75.37	203.38	8.02	8.89	8.19			
150				228.55	74.61	202.97	7.60	8.13	7.6			
160				228.29	74.19	202.93	7.72	7.70	7.19			

에 대한 이동하중에 의하여 증가하는 응력을 검토하였다[9]. API는 RP 1002에서 원주방향 응력의 증분에 대하여 다음 식 (7)을 제안하고 있으며 각 계수에 대한 값은 실험값에 의하여 그래프로 제안하고 있다.

$$\Delta\sigma_h = K_{Hh} G_{Hh} R L F_i \omega \quad (7)$$

여기서 K_{Hh} 는 도로 강성 계수로서 탄성계수와 배관 두께/배관 직경을 고려한 계수이며, G_{Hh} 는 도로 형상 계수로서 매설 심도와 배관의 직경을 반영하고 있다. 또한 R 과 L 은 도로 포장계수 및 도로 축 형상계수로서 포장재의 강성 및 매설심도, 배관 직경을 변수로 내재하고 있다. F_i 및 ω 는 충격계수 및 교통하중을 나타낸다. 유한 요소 해석 조건을 식 (7)에 적용하였을 경우 $K_{Hh} = 11$, $G_{Hh} = 0.95$, $R = 0.9$, $L = 0.65$ 의 값을 가지며 $F_i = 1.5$ 그리고 축하중 $\omega = 1.012$ MPa의 값을 도표로부터 추출할 수 있다. 이에 식 (7)은 다음 식 (8)과 같이 계산되어 원주방향 응력의 증분은 약 9.28 MPa로서 가장 근접한 동적 증폭계수를 보이는 시속 80 km/h에서의 $\Delta\sigma_h$ 의 값과 매우 유사한 값을 보이는 것으로 판단할 때에 해석결과는 실제와 유사한 거동을 모사함을 알 수 있다. 이후 보다 정확한 거동의 분석을 위하여 실제 차량을 모델로 하는 실증 실험 및 해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_h &= 11 \times 0.95 \times 0.9 \times 0.65 \times 1.5 \times 1.012 \\ &= 9.28 \end{aligned} \quad (8)$$

배관 진행방향의 수직으로 진행되는 차량 주행 하중은 1차적으로 수직하중을 증가시켜 hoop stress의 증가를 가져오지만, 차량 하중으로 인하여 배관에 발생하는 응력은 axial stress와 미소한 부등 침하로 발생하게 되는 shear stress가 그 주된 원인이라고 할 수 있다. Fig. 5에서와 같이 40 km/h일 때의 유효응력은 200.29 MPa이며 60 km/h, 80 km/h의 속도에서는 각각 202.46 MPa와 205 MPa로 점점 증가하였다. 반면 100 km/h의 속도에서 203.91 MPa로 응력이 감소하였으며, 120 km/h와 150 km/h, 160 km/h에서 역시 응력은 점차 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 표면파인 rayleigh파의 주파수가 커짐에 따라 진폭이 감소하고 일정 매설 심도에 매설되어 있는 배관에 미치는 영향 역시 감소하는 것으로 판단되며[10,11] 원주방향응력과 축방향응력 모두 같은 경향을 갖는 것을 관찰할 수 있다.

DB-24하중이 설계를 위한 가상의 차량하중임을 고려하였을 때 일반적인 도로의 설계 속도인 80~100 km/h에서 배관에 발생하는 응력은 가장 크게 분포하는 것으로 확인할 수 있다. 그러나 차량 하중으로 인하여 발

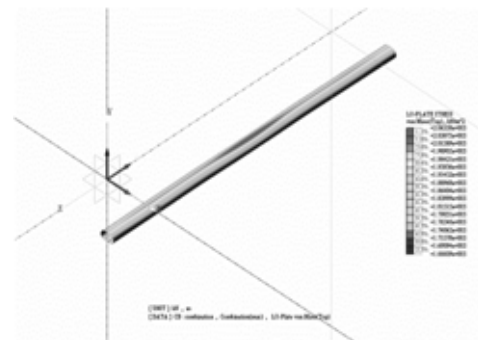


Fig. 7. Effective stress distribution ($v = 80$ km/h).

생하게 되는 응력, $\Delta\sigma$ 는 약 5~10 MPa의 분포를 보임으로서 배관의 최대 operation pressure인 설계압력을 고려한 경우에도 충분한 안정성을 확보하고 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

차량 이동 속도에 따른 지중 매설 배관의 거동을 검토하기 위하여 차량 이동 속도를 40~160 km/h로 변화시키며 그 영향을 고찰하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 내압 8 MPa, 매설심도 1.5 m에 대하여 API 5L Gr. X65 매설 배관은 hoop stress 기준 약 220 MPa, 67 MPa의 axial stress가 발생하였으며 본 연구에서 이는 reference stress 값으로 사용되었다.
- 2) 시속 80 km/h를 정점으로 이동 하중에 의하여 발생하는 하중은 소폭으로 증가하다가 감소하는 경향을 보이며 이는 표면파의 감쇄효과에서 기인하는 것으로 판단된다.
- 3) 40~160 km/h의 차량 이동 속도에 대하여 80 km/h에서 가장 큰 응력 증가폭을 보였다. hoop 및 axial stress 공히 약 10 MPa이 증가하였으나, API 5L Gr. X65 매설 배관은 충분한 안정성을 갖는 것으로 확인하였다.

IV. 차량 이동 속도의 영향

Fig. 7은 최대 응력이 발생한 차량 이동속도, $v = 80$ km/h에서의 배관 유효 응력 분포이다.

감사의 글

본 연구는 한국가스공사 연구개발원의 지원으로 이

루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 김형식, 김우식, 홍성호, 방인완, 오규환, “매설천연 가스 배관의 응력에 미치는 제반하중의 영향”, *대한 기계학회논문집, A*, **23**(8), 1261-1269, (1999)
- [2] 박선준, 강성후, 박연수, “차량하중의 이상화, 굴착 공사 구간에 노출된 가스관의 차량하중에 대한 진동 응답 평가”, *대한토목학회 논문집*, **23**(2A), 211-217, (2003)
- [3] 한국가스공사, “한국가스공사 표준 주배관 매설심도 설계 기준”, (2003)
- [4] 한국가스공사 연구개발원, “GSM-2101 배관자재규격”, (1997)
- [5] 건설교통부, “도로설계기준”, (2003)
- [6] 서주원, 최준성, 김수일, “차량 주행 속도를 고려한 아스팔트 콘크리트 포장 구조체의 물성 추정에 관한 연구”, *대한 토목 학회 학술 발표회 논문집*, CD, (2001)
- [7] 대학토목학회, “도로교 설계 기준 · 해설”, (2003)
- [8] Lysmer, J. and G. Wass, “Shear Waves in Plane Infinite Structures”, *J. Engng. Mech. Div. ASCE*, **98**, 85-105, (1972)
- [9] America Petroleum Institute, API Recommended Practice 1002, 6th ed., (1993)
- [10] Gurowski, T.G. and C.L. Dym, “Propagation of Ground Vibration”, *Journal of Sound and Vibration*, **49**(2), 179-193, (1976)
- [11] Verhas, H.P. “Measurement and Analysis of Train-Induced Ground Vibration”, *Noise Control Engineering*, **13**(1), July-August, 28-41, (1979)