



도로 하부 통과 배관의 주행 하중 속도에 따른 진동 특성

†원종화 · 선진선* · 유한규** · 김문겸

연세대학교 토목공학과, *삼부토건, **한양대학교 토목공학과
(2007년 12월 13일 접수, 2008년 2월 13일 채택)

Dynamic Characteristics of Buried Pipeline under Vibration Velocity of Vehicle Loads

†Jong Hwa Won · Jin Sun Sun* · Han-Kyu Yoo** · Moon Kyum Kim

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

*Sambu Construction Co., Ltd., Seoul 100-804, Korea

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

(Received December 13, 2007, Accepted February 13, 2008)

요 약

지진 및 외부 진동에 의하여 구조물에 발생하게 되는 진동량은 진동 속도와 피해규모가 비례하는 관계에 있음을 고려하여 일반적으로 진동속도로 나타내어진다. 본 연구에서는 진동 속도 기반의 구조물 진동 기준을 검토하고, 이를 고려하여 도로 하부 매설 가스 강관의 안정성 평가를 수행하였다. 가스공사 주사용 배관인 762 mm API 5L Gr. X65 강관을 해석 대상 배관으로 선정하였으며 도로설계기준에 의하여 지반 매설 조건 및 DB-24 하중을 다양한 속도에 대한 시간 함수로 고려하여 재하하였다. 진동속도는 차량 진행 속도 80 km/h까지 증가하다가 이후 감소하는 경향을 보였으며, 차량 진행 속도 80 km/h에서 0.034 cm/s의 진동 속도를 보임으로서 진동 기준 대비 매우 작은 값을 확인하였다. 또한 감쇄법칙을 적용하여 진행과의 속도를 분석한 결과, 차량 진행 속도 80 km/h에서 가장 작은 속도를 나타내었다.

Abstract – Vibration velocity induced by earthquakes or external vibration sources is one of the integrity assessment indexes, and is also a representative value used to describe the amount of vibration because it is based on a proportional relationship with the damage scale. In this study, the vibration velocity criterion for structures is first examined. Then, based on the velocity criterion, an integrity assessment is performed. Burial condition is set up based on the “Highway and Local Road Design Criteria” with API 5L Gr. X65 pipeline (D = 762 mm). The FE model considers DB-24 vehicle load as a time function with a varying velocity in the range of 20~160 km/h. Maximum vibration velocity occurs at $v = 80$ km/h and decreases after $v = 80$ km/h. The maximum vibration velocity of buried pipeline by DB-24 loads is about 0.034 cm/s. The velocity that occurs is in the range of allowable values for each vibration velocity criterion. The wave propagation velocity was identified based on attenuation law and the minimum value appears at vehicle velocity 80 km/h that has maximum vibration velocity.

Key words : Buried gas pipeline, Vibration velocity, Vibration criterion, Attenuation law

I. 서 론

본 연구에서 대상으로 하는 차량하중이나 각종 건설 장비 또는 열차통행 등으로부터 유발되는 동적인 움직임은 일정시간 지속적인 진동(vibration)과 충격(shock)으로 구분하여 생각할 수 있다. 구체적으로 말하면, 진동은 평형상태에 대한 반복적인(oscillatory) 움직임을 의미하며, 충격은 대상물의 갑작스런 움직임의 변화를

나타낸다. 여기서, ‘갑작스런 움직임’이란 실제 대상물의 진동주기와 비교하여 움직임의 변화가 보다 짧은 시간에 일어남을 의미한다. 본 연구는 도로하부에 매설된 가스 수송관의 차량 진행시에 발생하는 차량 이동속도에 따른 진동특성을 파악하여, 수치해석을 통한 매설배관의 건전성 평가를 수행하며, 탄성 매질을 통과하는 파의 감쇄 법칙을 사용하여 거동을 분석한다. 수치해석은 지반전용 유한요소 해석프로그램인 Midas GTS ver.2.0.2를 사용하였다.

†주저자:exameve@yonsei.ac.kr

II. 지반 전달파의 성질 및 진동 속도 기준

진동원으로부터 발생한 진동은 매질을 통해 전파가 이루어지며, 차량 및 열차 등에 의하여 발생한 진동은 지반을 통하여 전달된다. 지반을 통하여 전달되는 진동은 소음으로 변환되어 주거 환경에 불편을 주기도 한다. 이러한 진동은 속도, 가속도 및 변위 등으로 표현되며 연구결과, 진동속도가 구조물에 발생하는 피해정도를 가장 밀접하게 묘사할 수 있다고 한다[2].

2.1. 지반 전달파의 성질

진동원에 인접한 구조물의 피해 원인은 지반을 통하여 전파가 이루어지는 진동에 기인하며, 이와 같이 전파되는 지반진동은 전파거리에 따라 다른 크기의 감쇄가 발생한다. 지반 내·외부의 진동원에서 발생한 진동은 진동원 및 매질의 특성에 의해서 물리적 성질이 변화하게 된다. 진동에 의한 파는 진행거리 및 시간이 증가할수록 그 크기와 에너지가 감소하게 되는데, 지반에 작용하는 파에 대한 감쇄법칙은 다음 식 (1)과 비례하는 형태로 나타난다[1].

$$\frac{\Delta\omega}{e^{2Q\beta}} \quad (1)$$

여기서, Δ 는 파의 진행거리, ω 는 파의 주파수, Q 는 지반의 성질에 따른 감쇄 상수이며 β 는 파의 속도이다. 일반적으로 Q 는 약한 풍화암에서는 50, 경암에서는 2000~3000정도의 값을 사용한다. 일반적으로 토피 및 연암에서는 저주파가 증폭되며 고주파는 낮은 밀도로 인하여 소산된다. 그러나 잘 다져진 지반 및 경암에서는 반대로 고주파 영역의 증폭이 두드러지며 감쇄현상은 큰 값의 Q 와 β 로 인하여 거의 무시된다.

탄성체에 충격이 발생하게 되면 항상 압축파인 P파 및 전단파인 S파가 동시에 발생하게 되며, Rayleigh파 혹은 Love파라고 일컫는 표면파가 발생하게 된다. 표면파의 경우 깊이에 따라 급속히 감소하는데, 표면에서는 거리의 제곱근에 반비례하여 감소하나 표면에서는 약해지지 않고 전달된다. P, S 및 표면파의 에너지 비는 표면파가 전체의 약 2/3를 차지하고 S파가 나머지의 4/5, P파가 1/5 정도로 가장 작다. 이런 이유로 지표면부근에서의 진동의 피해는 주로 표면파에 의하여 발생하게 된다. 표면파는 비균질 지반의 경우에는 가진 진동수에 따라 전파속도가 변하는 이른바 분산특성을 가지므로 진동수 성분에 따라 파장이 달라진다. 또한 하나의 가진 진동수에 대해서도 서로 상이한 전파속도를 갖는 전파모드가 존재하는 이른바 모드특성을 가지고 있어, 이론적으로는 파장이 다른 수많은 파들이 함께 전파될 수

있다. 도로에서 발생하는 차량 및 열차에 의한 진동은 그 크기도 작을 뿐만 아니라 지표면에 직접적으로 작용하기 때문에 지하 매설 구조물에 작용하는 파는 주로 표면파와 압축파인 P파로 한정할 수 있다.

2.2. 진동 속도 기반의 구조물 진동기준

미국의 Duvall과 Fogelson(1962)은 광무국 지원 아래 지상구조물의 피해에 대해서 연구한 결과 진동속도가 구조물의 피해 정도와 가장 깊은 상관관계를 맺는다고 결론지었다. 또한 유럽, 캐나다 등 여러 나라의 연구결과에서도 수십~수백 Hz 주파수의 진동에서 구조물의 피해정도가 진동속도에 비례한다고 보고하였으며, 이를 진동 규제의 대상으로 삼고 있다[2]. 지반진동에 의한 구조물의 피해는 구조물의 상태, 지반상황, 사용 장비 등에 따라 매우 다양하게 나타나며 여러 학자들에 의해 많은 실험결과와 측정 예가 보고되고 있다. 지상구조물의 경우, 상당수의 연구 결과가 있으나 지하 매설 구조물에 대한 기준은 모호하며, 연구자체도 미비한 실정이다. 지반 내에서 발생하는 지진동에 의한 구조물의 진동은 구조물 자체의 진동 감쇄효과 및 주변 지반의 효과로 지상 구조물에 비하여 상당히 경미한 량을 차지하지만, 유지 보수를 위한 접근성이 매우 떨어지고, 한번 파손되면 사회적으로 막대한 피해를 유발하는 라이프라인의 특성상 매설 구조물에 대한 진동 수준에 따른 안정성 평가는 반드시 이루어져야 할 것이다.

서울 지하철 제2호선, 제3호선 건설 당시 외국의 자료를 참고하여 설정한 서울메트로의 구조물 진동 기준은 다음 Table 1과 같다[2]. 기타의 경우에는 조건에 따라 미 광무국(USBM) 등 외국의 사례를 근거로 하여 설계기준을 마련하고 있으며 대체로 안전율을 높여 엄격하게 적용하고 있는 실정이다. Table 2는 한국가스공사[2]의 진동 기준치로서 상대적으로 진동에 취약한 국내의 지상 구조물의 기준과 비교하였을 때 매우 엄격한 기준을 적용하고 있음을 확인할 수 있다. 서울대 류창하 등[3]이 주파수의 영향을 고려하여 10~35 Hz에서 진동속도 1~2 cm/s, 35 Hz 이상에서는 5 cm/s로 허용기

Table 1. Vibration Specification (Seoul Metro).

Subject Structure	Allowable Vibration Velocity (cm/s)
Historical Remains and Cultural Assets	0.2
Building with Cracks and Defects	0.5
Building with Cracks and No Defects	1.0
Industrial Concrete Structure	1.0~4.0

Table 2. Vibration Specification (KOGAS).

	Limitation	Range for Repair	Safe
Maximum Vibration Velocity (cm/s)	2.0	2.0~0.4	under 0.4
Repair		- Non-vibrational Construction - Construction after Reinforcement	

준을 제시한 바 있다.

III. 차량진행속도에 따른 배관 진동 속도

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 MPa로 설정하였다[4,5]. 건설교통부 제정 도로설계기준의 도로 포장 표준 단면을 고려하여 배관 매설 기반을 모형화하였다[6]. 해석 대상 배관 및 지반의 물성 값은 Table 3에 정의하였으며 지반 물성은 일반적으로 사용되어지는 현장 도로 실험값과 도로설계기준의 물성값을 비교 검토하여 선정하였다[7].

유한요소 해석을 위하여 도로 표준단면을 도로설계기준에서 차용하였으며, 이는 Fig. 1과 같이 0.15 m의 표층(포장재), 0.15 m의 기층, 0.2 m의 보조기층 및 0.4 m의 노상, 3.1 m의 잔류토, 하부 2 m의 풍화토로 구성하였다[6]. 이때, 배관은 일반적으로 1.2 m 이상의 매설심도를 확보하도록 규정한 한국가스공사 가스배관 매설기준[4]에 따라 잔류토에 매설된다. 비교적 대구경 배관으로서 연성관의 거동을 보이는 762 mm 배관은 통상 1.5 m의 매설심도를 유지하므로 해석 모형에서는 1.5 m의 심도를 고려하였다. Fig. 2는 유한 요소 해석을 위한 실제 해석 모형이며 배관 진행방향의 수직방향으

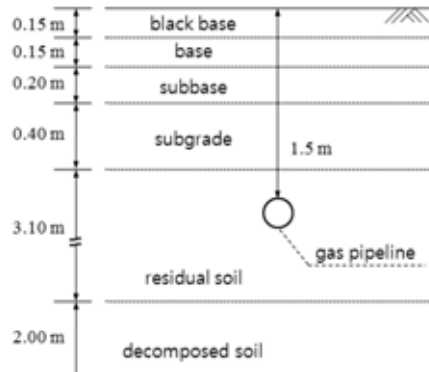


Fig. 1. Soil profile for analysis.

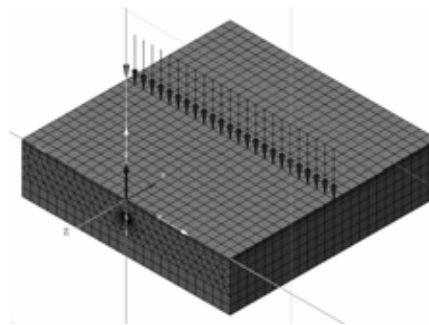


Fig. 2. FEA model.

로 재하된 차량 이동 하중이 화살표 모형으로 도시되어 있다.

3.2. 차량 주행 하중 모형

차량 주행 하중 모형은 도로면에 차량으로 인하여 발생하는 동하중을 시간에 대한 분포하중으로 모사하

Table 3. Transportation Pipe and Soil 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
($^\circ$)	-	35	35	35	40	30	35

여 동적 거동을 단순하게 해석에 적용하기 위한 모형이다. 일반적으로 차량 주행 하중은 삼각파 하중(symmetrical triangular pulse force), 하버사인과 하중(haversine pulse force), 반사인과 하중(half-cycle sine pulse force)의 3가지 형태로 이상화되어진다. 박선준[9]은 차량하중의 이상화에 관한 연구에서 3가지 형태로 이상화된 모형들을 가지고 수치 해석하여 그 결과를 실험값과 비교함으로써 삼각파 하중이 실제의 하중을 가장 유사하게 모사한다는 연구 결과를 바탕으로 본 연구에서는 DB-24 하중을 삼각파 형태의 하중 모형으로 구성하기로 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 (2), (3)과 같이 계산된다.

$$t_1 = l/v = 1.05 \text{ m}/(100 \text{ km/h}) = 0.0378 \text{ sec} \quad (2)$$

$$t_2 = 2 \times t_1 = 0.0756 \text{ sec} \quad (3)$$

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

본 연구에서는 배관에 적용할 차량하중을 선정하기 위하여 도로교 설계기준[8]에서 표준 트럭 하중으로 규정하고 있는 DB하중을 사용하기로 한다. DB하중은 교량 등급에 의하여 분류되며, 1, 2 및 3등급에 대해서 DB-24, 18 그리고 13.5로 나뉜다. 이에 배관에 가장 불리한 조건을 위하여 고속도로 및 주요 도시의 도로 등을 설계하는 데에 사용되는 Fig. 4와 같은 하중을 갖는

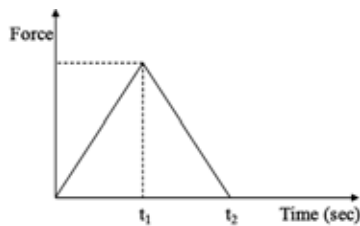


Fig. 3. Symmetrical triangular pulse.

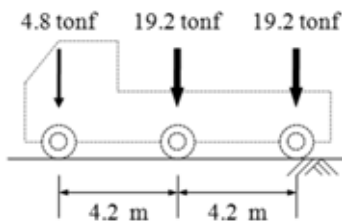


Fig. 4. DB-24 vehicle loads model.

DB-24 하중을 고려하였으며, 차량이 이동할 때에 발생하는 배관의 휨에 의하여 발생하는 축방향 응력을 검토하고자 배관 진행방향의 수직 방향으로 차량하중을 배치하였다(Fig. 2).

3.3. 시간 이력 해석

터널과 같은 지반 내 공동이 존재하는 무한 매질을 고려할 때, 공동에 의한 응력 산란 영향을 제거하기 위하여 정해석에서는 일반적으로 공동의 가장자리에서 지반 모형의 표면까지 약 공동 직경의 5배 정도의 거리를 확보하여 모형화하고, 지반 경계에 변위에 대한 구속 조건만 제약한다. 그러나 동해석에서는 일반적인 지반 경계를 선정할 경우 파가 매질 표면에서 반사되어 다시 내부로 입사하는 효과가 생기기 때문에 큰 오차가 유발될 수 있다. 이를 방지하기 위해 본 해석에서는 1972년 Lysmer와 Wass[10]가 제안한 점성경계(viscous boundary)를 적용하였으며, 고유진동수 해석을 위해서 Surface Spring으로 탄성경계를 구성하고 Spring 상수는 도로교 설계기준(하부 구조편)[8]의 지반 반력 계수에 따라 산정하였다. 연직 지반 반력 계수 및 수평 지반 반력 계수는 식 (4) 및 식 (5)를 사용하여 산정하였다[6].

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

$$k_h = k_{h0} \left(\frac{B_h}{30} \right)^{-3/4} \quad (5)$$

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.

점성경계를 정의하기 위하여 해당 지반 물성 값에 대한 x, y, z 방향에 대하여 Damper 값을 산정하여 입력하였으며, Damper 값을 산정하는 식은 P파에 대하여 식 (6), S파에 대하여 식 (7)을 사용하였다.

$$C_p = \rho A \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{\rho}} = WA \sqrt{\frac{\lambda + 2G}{9.81 W}} = c_p A \quad (6)$$

$$C_s = \rho A \sqrt{\frac{G}{\rho}} = WA \sqrt{\frac{G}{9.81 W}} = c_s A \quad (7)$$

여기서 λ 는 체적탄성계수(tonf/m²), G 는 전단탄성계수

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

IV. 차량이동속도에 따른 지중배관진동

차량속도에 따른 응력의 영향을 알아보기 위하여, 차량의 속도를 20~160 km/h로 변화시키면서 배관에 발생하는 진동 속도를 검토하였다. Table 4 및 Fig. 5에 차량 진동속도에 대한 배관의 최대 진동속도 양상을 요약하였으며 Fig. 6에 차량 진행속도에 따른 배관 축방

Table 4. Maximum Vibration Velocity.

Vehicle Velocity (km/h)	Vibration Velocity (cm/s)
20	0.006
40	0.011
60	0.022
80	0.049
100	0.034
120	0.032
150	0.025
160	0.029

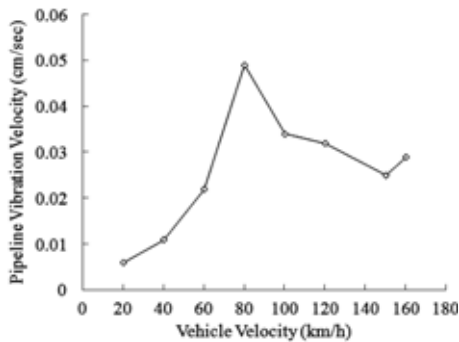


Fig. 5. Pipeline vibration velocity.

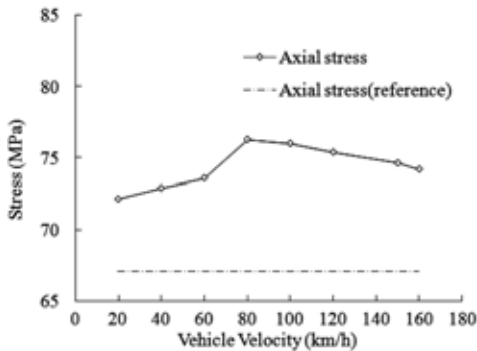


Fig. 6. Axial stress.

향 응력 발생추이를 도시하였다. Fig. 6에서 Axial stress (Reference)는 동하중을 제외한 배관에 작용하는 상재도 압과 내압에 의한 발생응력이며 Axial stress는 차량의 이동속도에 따라 배관에 발생하는 휨에 의한 응력이다.

대체적으로 0.006에서 최대 0.05 cm/s의 진동속도를 보이며 이는 가스공사를 비롯하여 다른 기관의 진동기준 값과 비교하였을 때 매우 작은 진동이며, 진동에 의하여 증가하는 배관 축방향 응력 값 역시 최대 약 10 MPa로써 배관의 항복에 거의 영향을 못 미치고 있다.

일반적으로 차량 진동원에 의하여 발생하는 진동 주파수가 차량의 이동속도와 비례하는 관계를 고려하여 식 (1)의 감쇄법칙을 적용하면 파의 진행거리 Δ 와 지반 감쇄 상수 Q 는 동일 지반, 동일 매설 심도를 고려한 해석 모형에서 일정한 상수로, 진행파의 주파수 ω 는 차량 진동원의 속도에 비례하는 상대적인 값으로 치환하여 적용할 수 있다. 질량 m 인 배관이 진동하는 속도 v 의 제곱이 배관에 전달되어진 에너지양에 비례한다고 할 때, 차량 이동 특성에 의하여 생성된 감쇄 에너지는 v^2 과 비례관계에 있다고 할 수 있다. 이를 통하여 진행 파의 상대적인 속도 β 를 유추할 수 있으며 다음 Fig. 7 및 8에 나타내었다.

차량 이동 속도가 증가할수록 진동원에 의하여 발생하는 파의 이동속도도 비례하여 증가하는 추세를 보이며, 최대 진동 속도가 발생하는 시속 80 km/h에서 Fig. 8에서와 같이 추세선의 기울기가 변하는 것을 확인 할 수 있었다. 상대적으로 단단한 지반 조건을 가지고 있는 도로하부에서 작은 진동수 및 진행 속도를 갖는 파의 감쇄가 적게 발생하여 배관에 보다 많은 진동을 발생시키는 경향을 나타내고 있으며, 상대적으로 주파수 및 진행속도가 큰 파의 영역에서는 지반에 의한 감쇄 효과가 상대적으로 크게 발생하는 것으로 설명할 수 있다[1]. 또한 Fig. 8에서 차량 이동속도가 증가할수록 고주파 영역의 고속부에서 파의 전파 속도 기울기(Fig. 8, line 2)가 차량이동속도 80 km/h를 기점으로 저속부의

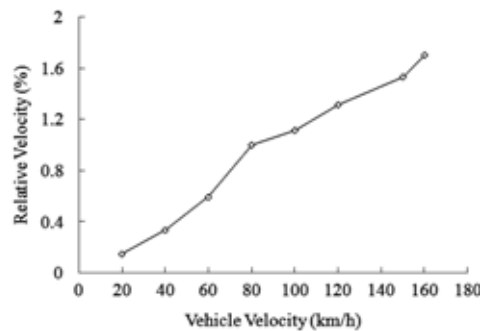


Fig. 7. Relative wave velocity.

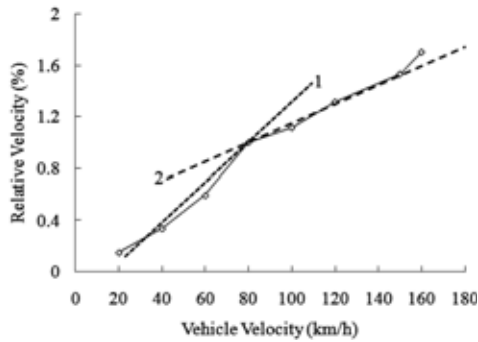


Fig. 8. Slope variation.

기울기(Fig. 6, line 1)보다 다소 감소하는 경향을 보인다. 이는 Fig. 3~6을 종합하여 살펴볼 때, 상대적으로 진행속도가 느린 파가 지중 매질 구조물에 보다 큰 손상을 발생시키는 것을 알 수 있다. 이는 탄성 매질에서 near field의 경우 파에 의하여 발생하는 매질의 변위가 파의 진행속도에 반비례하는 경향과 같은 맥락에 있음을 보여준다. DB-24 하중이 설계를 위하여 고려되어진 가상의 하중임을 고려할 때, 일반적으로 차량하중에 의한 파의 속도는 80~100 km/h에서 가장 크게 발생하며, 이상의 속도에서는 감쇄효과가 크게 나타나는 것으로 분석할 수 있다.

V. 결 론

도로 하부에 매설된 가스 수송 강관에는 상재 토압에 의한 정하중과 차량에 의하여 발생하는 진동하중이 지속적으로 작용한다. 차량의 진동을 최소화하고 도로의 사용 수명을 극대화하기 위하여 표준화된 도로 단면을 사용하고 있지만 진동원의 크기 및 특성 등에 따라 하부 구조물에 미치는 영향은 각각 상이하게 나타나며, 경우에 따라 구조물에 치명적인 영향을 미칠 수도 있다. 본 연구에서는 DB-24 하중에 의하여 나타나는 지하 1.5 m에 매설된 가스 배관의 차량 이동속도에 따른 진동 특성과 감쇄법칙을 사용하여 진동원의 속도에 따른 진행파의 속도를 분석하여 배관에 발생하는 축방향 응력추이를 검토하였다.

1) 국내외의 구조물에 대한 안전 진동기준은 구조물의 특성 및 지반의 조건에 따라 0.2~7.0 cm/s의 분포를 보이며, 특히 한국가스공사의 지중 배관 진동 한계는 0.4 cm/s로 제한하고 있다.

2) 1등교 설계 하중인 DB-24하중의 진행속도를 20~160 km/h의 범위에서 변화시켜 해석한 결과 0.006에서 최대 0.05 cm/s의 진동속도를 보이며, 80 km/h에서 최

대값을 보이고 속도에 따라 감소하는 경향을 확인하였다. 이는 배관에 발생하는 응력추이와 매우 유사한 거동을 보이며 80~100 km/h 구간에서 배관에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

3) 파의 이동거리와 감쇄 상수를 상수로 고려하고 일반적으로 진동원의 진행 속도와 발생 주파수의 비례관계를 고려하여 감쇄법칙에 적용한 결과, 파의 진동속도는 배관 진동 속도가 최대인 차량 이동 속도 80 km/h를 기준으로 진행 속도의 기울기가 감소하였으며, 이는 배관에 발생하는 응력값 추이와 매우 밀접한 관계를 보인다. 고속 이동 하중에 의하여 발생하는 진행파의 감쇄 효과가 크게 나타나는 것으로 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국가스공사 연구개발원의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] Trifunac, M.D. and A.G. Brady, "On the Correlation of Seismic Intensity Scales with the Peaks of Recorded Strong Ground Motion", *Bulletin of The Seismological Society of America*, **65**(1), 139-162, (1975)
- [2] 한국가스공사 연구개발원, "차량 및 열차통과 배관의 건전성 평가방안 확립", (2006)
- [3] 류창하, 이정인, "발파작업에 의한 지반 진동이 지상구조물에 미치는 영향에 관한 연구", *대한광산학회지*, **16**(1), 41-50, (1979)
- [4] 한국가스공사, "한국가스공사 표준 주배관 매설심도 설계 기준", (2003)
- [5] 한국가스공사 연구개발원, "GSM-2101 배관자재규격", (1997)
- [6] 건설교통부, "도로설계기준", (2003)
- [7] 서주원, 최준성, 김수일, "차량 주행 속도를 고려한 아스팔트 콘크리트 포장 구조체의 물성 추정에 관한 연구", *대한 토목 학회 학술 발표회 논문집*, CD, (2001)
- [8] 대학토목학회, "도로교 설계 기준 · 해설", (2003)
- [9] 박선준, 강성후, 박연수, "차량하중의 이상화, 굴착공사 구간에 노출된 가스관의 차량하중에 대한 진동 응답 평가", *대한토목학회 논문집*, **23**(2A), 211-217, (2003)
- [10] Lysmer, J. and G. Wass, "Shear Waves in Plane Infinite Structures", *J. Engng. Mech. Div. ASCE*, **98**, 85-105, (1972)