



차량 하중을 받는 노출 가스배관의 진동특성 연구

A Study of Vibration Characteristics of Exposed Gas Pipeline under Vehicle Loading

홍성경* · 김준호* · 정석영*

S.K. Hong · J.H. Kim · S.Y. Jeong

(1999년 9월 10일 접수, 1999년 10월 27일 채택)

ABSTRACT

Exposed gas pipeline in underground, especially subway construction site, has been continuously vibrated by vehicle above ground. Because this vibration can cause unexpected damages to pipeline, we had measured and analyzed the vibration. This paper presents results of the vibration analysis of exposed gas pipeline and the results are as follows. The major vertical vibration frequency of pipeline was about 13 Hz and the other frequency components disappeared when the vibration transmitted to I-beam and wire rope. Existence of wooden casement had not affect vibration of exposed gas pipeline. The results of modal analysis by experimental and analytical methods have good agreement and it is also shown that exposed pipeline has possibility of resonance at second mode.

1. 서 론

가스배관은 주로 도로나 도로 주변에 매설되어 있다. 최근 도심지에서 진행되고 있는 지하철 공사는 도로를 따라 장기간에 걸쳐서 이루어지고 있으며, 이에 따라서 기존에 매설되어 있던 가스배관이 대기로 노출되고 있다. 노출된 가스배관은 지하구조물 공사를 위해 설치된 철

골 구조물에 가스관 전용보를 설치한 후 여기에 와이어로프를 이용하여 가스관을 매달아 관리하고 있으며, 가스관 상부는 복공판으로 덮어 건설공사가 끝날 때까지 임시도로로 사용하고 있다. 이와 같이 매달린 가스배관은 지하구조물 공사를 위한 발파 작업 등의 다양한 진동원에 의해 진동을 받게 되며, 복공판 위로 주행하는 차량에 의해 직접적이고 장기적이며 충격적인 진

* 한국가스공사 연구개발원

동을 받게 된다. 차량이 주행할 때 차량으로부터 가스배관 상부의 복공판에 가해지는 충격적 진동은 복공판 지지보와 가스배관 전용보, 그리고 와이어로프를 통해 가스배관에 전달되고 이로 인해 가스배관은 진동을 하게 된다^{1,2)}.

진동하는 가스배관은 강성을 갖는 물체이므로 일정 수준 이상의 진동을 받게 될 경우 안전상의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 지하철공사가 진행되고 있는 2곳의 현장을 선정하여 현재의 진동수준을 정량적으로 분석하고, 복공판으로부터 가스배관까지 진동전달 과정을 규명하여 가스배관의 안전성을 확보하고자 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 가스배관의 진동 및 경계조건

노출된 가스배관은 양 끝단이 고정되어 있고 길이가 길기 때문에 자체 하중을 지탱하기 위하여 가스배관 전용보에 와이어로프로 매달기 공사를 하여 보호조치를 취하고 있다. 가스배관의 하중을 지지하고 있는 와이어로프는 복공판 지지보와 가스배관 전용보의 진동 영향으로 흔들리게 되며, 이러한 와이어로프의 상하방향 진동은 가스배관의 횡진동을 유발시킨다. 즉, 와이어로프는 가스배관을 지지하는 역할 뿐만 아니라 가진하는 역할을 하고 있다. 따라서 가스배관, 와이어로프, 복공판 지지보는 Fig. 1과 같이 기반의 조화운동을 수반하는 진동계로 해석될 수 있다^{3~5)}.

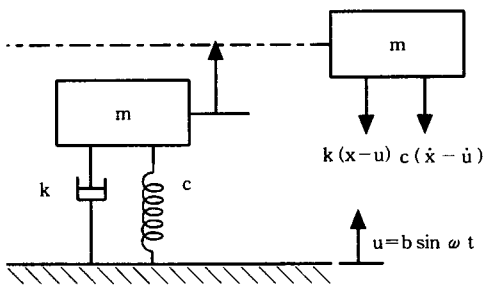


Fig. 1 Vibration system which basement is in harmonic motion

Fig. 1과 같은 진동계에서 기반이 강제적으로 $u = b \sin \omega t$ 로 상하방향으로 진동하는 경우, 질량 m 의 기반에 대한 상대변위는 $x - u$ 가 되므로 m 에 작용하는 스프링력은 $-k(x - u)$, 점성 감쇠력은 $-c(\dot{x} - \dot{u})$ 로 된다.

따라서, m 의 운동방정식은

$$m \ddot{x} = -c(\dot{x} - \dot{u}) - k(x - u) \quad \dots\dots\dots(1)$$

가 된다. 여기에서,

$$z = x - u = x - b \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(2)$$

로 놓고, 식 (1)에 대입하면

$$m \ddot{z} + c \dot{z} + kz = mb \omega^2 \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(3)$$

식 (3)의 특수해는

$$z = Z \sin(\omega t - \phi) \quad \dots\dots\dots(4)$$

로 놓고, 식 (3)에 대입하면 진폭과 위상각은

$$Z = \frac{b \omega^2 / \omega_n^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2 \zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2 \zeta \omega / \omega_n}{1 - \omega^2 / \omega_n^2} \quad \dots\dots\dots(5)$$

로 된다. 여기서, 이 경우의 진폭비 Z/b 와 ω/ω_n 와의 관계를 표시하면 Fig. 2와 같은 응답곡선이 얻어진다.

Fig. 2에서 $\omega \ll \omega_n$ 일 때는 Z 가 0에 접근하므로 x 가 u 에 접근하게 되어 m 은 기반과 같은 운동을 하게 된다. 한편, $\omega \ll \omega_n$ 에서는 ζ 의 값에 관계없이 진폭비가 1에 접근하고, 이 경우의 위상각 ϕ 가 180° 에 접근하기 때문에 상대변위는 $Z \approx b \sin(\omega t - \pi) = -b \sin \omega t \quad \dots\dots\dots(6)$

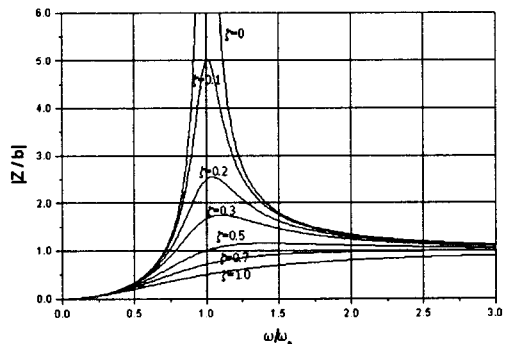


Fig. 2 Relation of Z/b and ω/ω_n

가 되어 절대변위 x 가 0에 접근하게 되므로, m 은 거의 정지상태로 된다.

또한, ω 가 ω_n 에 접근하면 진폭비는 급격히 증가하여 극대값에 도달하여 공진이 생긴다. 그때의 ω/ω_n 의 값은 $\partial Z/\partial(\omega/\omega_n)=0$ 에 의해서

$$\frac{\omega}{\omega_n} = \frac{1}{\sqrt{1-2\xi^2}} \dots\dots\dots(7)$$

이 되며, Z 의 극대값은

$$Z_{\max} = \frac{b}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}} \dots\dots\dots(8)$$

이다. 한편, 절대변위는

$$x = z + u = Z \sin(\omega t - \phi) + b \sin \omega t \dots(9)$$

로 표시된다. 또, 식 (9)의 우변을 합성하면

$$\begin{aligned} x &= (Z \cos \phi + b) \sin \omega t - Z \sin \phi \cos \omega t \\ &= \sqrt{(Z \cos \phi + b)^2 + (Z \sin \phi)^2} \sin(\omega t - \phi) \\ &= \frac{b\sqrt{1 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \sin(\omega t - \phi) \\ &= X \sin(\omega t - \phi) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tan \phi &= \frac{Z \sin \phi}{Z \cos \phi + b} \\ &= \frac{2\xi \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^3}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(2\xi \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \dots\dots\dots(10) \end{aligned}$$

이 된다. 이 경우의 진폭비와 진동수비와의 관계를 도시하면 Fig. 3과 같다. 이 그림에서 ω/ω_n

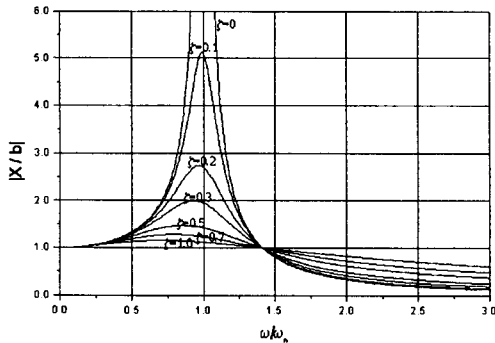


Fig. 3 Relation of X/b and ω/ω_n

$=\sqrt{2}$ 일 때는 감쇠비에 관계없이 진폭비는 1이고, 진동수비가 $\sqrt{2}$ 보다 크면 진폭비 $|X/b|$ 는 1보다 작아진다. 그러므로 $\omega/\omega_n=\sqrt{2}$ 는 진동절연이 시작되는 진동수비이다. 또한, $\omega/\omega_n \gg \sqrt{2}$ 일 때 진폭비는 아주 작아지며, 이것은 질량 m 이 정지한다는 것을 의미한다.

2.2 가스배관의 진동모드 해석

모드해석(modal analysis)은 구조물의 고유진동수(natural frequency)와 진동모드(mode shape)를 이론적으로 해석하는 분석법이다. 고유진동수는 구조물이 가장 진동하기 쉬운 구조물 고유의 진동주파수로서 피아노의 현에서와 같이 고유한 진동을 발생시키는 주파수를 의미하며, 이러한 고유진동수에 의해 변형된 형상을 진동모드라고 한다. 이러한 진동모드의 해석은 하나의 구조물에서 구성요소들간에 동적 간섭현상(dynamic interaction)이 나타나 이상진동이 발생하는 공진현상(resonance)을 피하기 위해서 뿐만 아니라, 구조물의 설계변경으로 나타나게 될 동적 특성의 변화를 예측하고자 할 경우 또는 외부 가진력에 대한 구조물의 반응을 해석할 경우 등에 수행된다^{6,7)}.

모드해석은 감쇄가 없고 외부 가진력이 없는 구조물의 자유진동에 관한 식 (11)의 운동방정식 해를 구함으로써, 고유진동수와 이 고유진동수에 상응하는 진동모드를 얻게 된다. 여기서 $[K]$ 와 $[M]$ 은 각각 구조물의 탄성과 관성을 나타내는 강성행렬(stiffness matrix)과 질량행렬(mass matrix)이다.

$$[M] \{\ddot{u}\} + [K] \{u\} = 0 \dots\dots\dots(11)$$

또한 식 (11)이 조화해(harmonic solution)를 갖는 것으로 가정할 경우, 식 (12)와 같이 간단한 진동모드식으로 나타낼 수 있으며, 여기에서 $\{\phi_i\}$ 는 진동모드로 고유치(eigenvalue, λ)에 상응하여 나타난다.

$$[K - \lambda_i M] \{\phi_i\} = 0 \dots\dots\dots(12)$$

또한 식 (12)의 고유치는 고유진동수에 비례하는 값으로 고유치와 고유진동수 f 와의 관계는 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$f_i = \frac{\sqrt{\lambda_i}}{2\pi} \dots\dots\dots(13)$$

진동모드는 구조물의 각 절점에서 변위와 회전 이 나타난다는 점에서 정적변형 형상과 유사하나, 정적변형 해석에서는 가진력에 대한 실제적인 물리적 변위가 나타나지만 모드해석에서는 가진력을 고려하지 않으므로, 구조물에 나타나는 변형은 각 변형모드에 대해 상대적인 변형양상을 나타내게 되어 각 진동모드간의 변형량의 비교는 의미가 없다. 또한 각 진동모드에서는 각 요소들의 힘이나 응력 그리고 반작용력 등은 정적해석에서와 마찬가지로 해석되나, 이러한 값들은 대상으로 한 진동모드에 대해서만 의미를 갖게 된다⁸⁾.

3. 실험 및 분석방법

지하철 공사장에 노출되어 있는 가스배관의 진동특성을 분석하기 위하여 공사중인 지하철역사 2개소를 선정하였으며, 복공판 위로 차량이 통과함에 따라 가스배관에 발생하는 진동을 측정·분석하였다.

3.1 진동전달과정 및 주파수범위

공사중인 지하철역사 내부에는 지하에 매설되어 있던 가스배관이 대기로 노출됨에 따라 노출된 가스배관의 자중을 지지해 주기 위하여 복공판 지지보인 I-Beam에 가스배관 전용보인 H-Beam을 설치한 후, 여기에 와이어로프로 가스배관을 매달아 보호조치를 하고 있다. 진동전달 과정에서 진동 감쇠효과를 분석하기 위해서 복공판 지지보와 가스배관의 진동을 동시에 측정하였으며, 충분한 시간동안 기록장비에 기록하였다. Table 1에 본 연구에서 사용한 센서의 종류와 분석장비에 대해 제작사와 모델명을 나타내었다.

차량의 충격진동이 복공판 지지보에 가해질 때, 이 복공판 지지보의 진동특성에 대한 데이터의 신뢰성을 위하여 복공판 지지보에서는 진동측정가능 주파수범위가 400 Hz인 가속도계를 이용하였으며(Wilcoxon Research, 731), 가스배관에서는 100 Hz 이상의 고주파 진동신호는 감

쇠되어 사라지고 30 Hz 이하의 저주파 진동신호가 탁월하기 때문에 진동측정가능 주파수범위가 1~90 Hz인 진동계를 이용하여 측정하였다(RION VM-52).

Table 1 Sensor and Analyzer

Sensor and Analyzer	Maker	Model Number
FFT Analyzer	B & K	2035
		2144
Accelerometer	Wilcoxon Research	731
	RION	VM-52
Amplifier	Wilcoxon Research	P31
	B & K	2635
Recorder	SONY	PC209A

3.2 목재 덮개의 진동감쇠 효과

지하철 공사장에서는 안전관리를 위하여 배관 상부의 진동을 주기적으로 측정하고 있으며, 측정할 때 가스배관 보호재인 목재 덮개를 제거하고 있으므로, 본 논문에서는 목재 덮개를 한 배관 상부 및 목재 덮개를 제거한 배관 상부에서 진동을 동시에 측정하여 목재 덮개가 진동전달에 어느 정도 영향을 주고 있는지 분석하였다. Fig. 4에 본 연구에서 적용한 진동측정 및 분석시스템 구성에 대한 개략도를 나타내었으며, 목재 덮개와 관련된 현장상황도 함께 도시하였다.

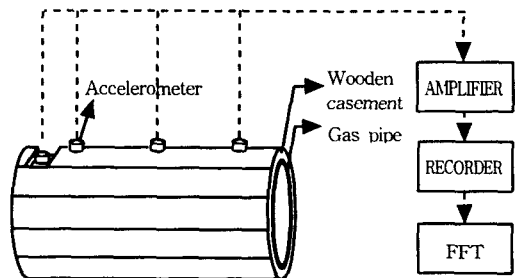


Fig. 4 Schematic view of vibration measurement and analysis system

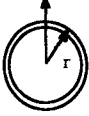
3.3 진동모드 해석

지하철역사에 노출된 가스배관의 횡진동(굽힘

진동) 형태와 최대진동 발생 지점을 확인하기 위하여, 양 끝단이 고정되어 있고 길이가 26m인 노출 가스배관에 대하여 시점으로부터 17m 지점을 기준으로 하여 2m 간격으로 3개 지점씩 동시에 상하방향의 진동을 측정하였다. 실험적 연구와 병행하여, 상용 유한요소해석 프로그램인 NASTRAN을 이용하여 Table 2의 물성치와 형상을 갖는 가스배관의 진동모드 시뮬레이션을 수행하였다. NASTRAN에서 고유치의 계산은 진동모드 해석시 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 Lanczos 방법⁸⁾을 이용하였으며, 이때 구속조건은 자유진동을 대상으로 하였다.

Table 2 Material properties and geometry of gas pipeline

Material properties	Geometry
Elastic modulus $E=2.07 \times 10^5 \text{ MPa}$ $=2.07 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$	Element type Bar(Circular Tube)
Poisson's ratio $\mu=0.3$	Shape radius=254mm thickness=7.92mm length=26m
Weight density $\rho=7.86 \times 10^{-9} \text{ N} \cdot \text{sec}^2/\text{mm}^4$	



4. 결과 및 고찰

4.1 진동의 전달 및 수준

노출 가스배관이 지지되어 있는 지하철 공사장의 가스배관 매달기 방호는 차량이 통행하는 복공판, 복공판 지지보인 I-Beam, 가스배관 전용보인 H-Beam, 가스배관 매달기용 와이어로프 및 가스배관으로 구성되어 있다. 그러므로 차량 통과시 차량에 의한 충격진동은 복공판보(I-Beam), 가스관 전용보(H-Beam), 와이어로프를 거쳐 최종적으로 가스배관으로 전달된다.

가스배관의 수평방향 및 수직방향 진동을 비교·분석한 결과, 수평방향 탁월진동은 A역사가 4Hz, B역사가 10Hz에서 발생하고 있으며, 수직방향의 경우 A역사가 10Hz, B역사가 13Hz에서 발생하고 있다. 이와 같은 탁월 진동주파수의 차이는 수평방향 진동의 경우 와이어로프의 길이 및 장력 등의 차이에 의한 것으로 판단하며, 수직방향 진동은 가스배관 전용보의 부재의 종류 및 부재에 하중이 작용하는 유효길이의

차이에 의한 것으로 판단된다.

복공판 지지보에서 발생된 진동이 가스배관으로 전달되면서 진동특성이 어떻게 변화하고 있는가를 분석하기 위하여, Fig. 5, 6에 각각 복공판 지지보와 가스배관의 수직방향 진동가속도 및 진동속도에 대한 주파수분석을 나타내었다. 복공판 지지보인 I-Beam에서는 50~120Hz 주파수 영역의 진동이 지배적이며, 이 주파수 영역의 충격진동은 H-Beam과 와이어로프를 지나면서 가스배관에서는 대부분 감쇠되고 13Hz 영역의 진동이 탁월하게 증폭되어 나타나고 있다.

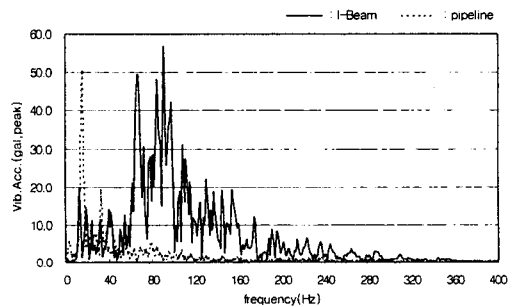


Fig. 5 Comparison of vibration acceleration between I-beam and gas pipeline in vertical direction

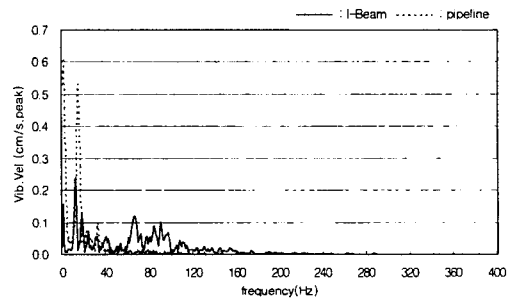


Fig. 6 Comparison of vibration velocity between I-beam and gas pipeline in vertical direction

4.2 목재 덮개의 진동감쇠 효과

지하철 공사장에서는 위험시설의 안전관리를 위하여 가스배관 상부의 진동을 상시 측정하고 있으며, 측정할 때에 가스배관 보호재로 사용하고 있는 목재 덮개를 제거하고 있으므로 목재 덮개의 유무에 따라 진동측정 결과에 어느 정도

차이가 있는지 비교·분석하였다. Fig. 7, 8의 진동속도 주파수분석 결과, 수평방향에서는 미소한 차이가 있으나 대부분의 진동현상을 대표하는 수직방향 진동이 목재 덮개의 유무에 관계없이 거의 일치하고 있으며, 미소한 차이를 보이는 수평방향 진동의 경우 수직방향에 비해 매우 작으므로 가스배관의 진동측정시 목재 덮개를 제거할 필요가 없음을 확인하였다.

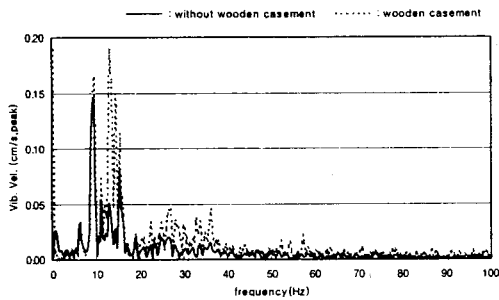


Fig. 7 Vibration velocity change of gas pipeline according to the existence and the non-existence of wooden casement in horizontal direction

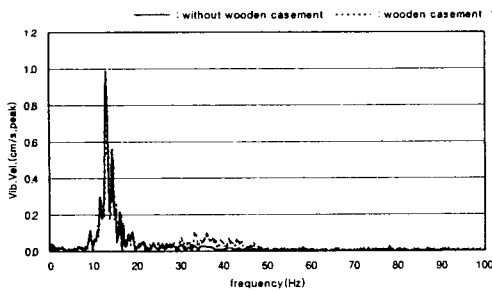


Fig. 8 Vibration velocity change of gas pipeline according to the existence and the non-existence of wooden casement in vertical direction

4.3 진동모드 해석

26m의 가스배관에 대한 진동모드 해석을 수행한 결과, 가스배관의 수직방향 진동 중 탁월한 진동은 12.75 Hz에서 발생하고 있으며, 이 주파수에 대한 가스배관의 진동모드 형상은 Fig. 9와 같다. 진동모드 형상을 보면 진동이 가장 크게 발생하고 있는 지점은 시점으로부터 14m 지점임을 알 수 있었다. 구조해석 프로그램을 이용

한 진동모드 시뮬레이션 결과, 노출된 가스배관은 4.78 Hz와 13.18 Hz, 그리고 25.83 Hz에서 고유주파수를 갖는 것으로 나타났으며, 이러한 주파수 영역에서 가스배관에 공진현상이 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

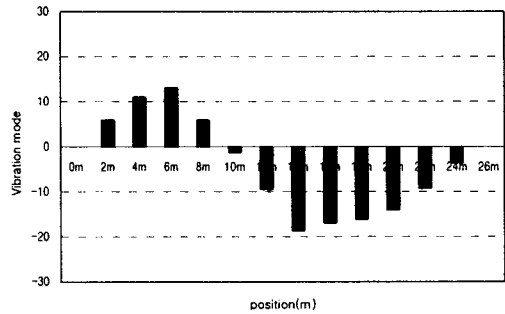


Fig. 9 Experimental results of vibration mode shape to 12.75 Hz in vertical direction

또한 진동모드 시뮬레이션을 통해서 얻은 Fig. 10~12의 결과를 Fig. 9의 12.75 Hz에서의 수직

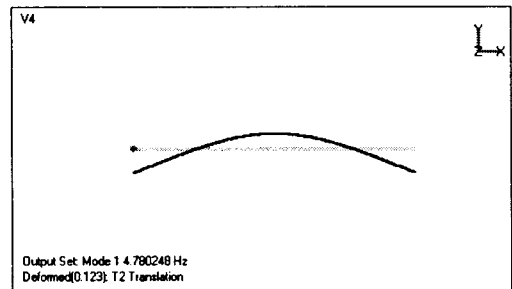


Fig. 10 Mode shape of vertical vibration by analytical method for mode 1 (4.78Hz)

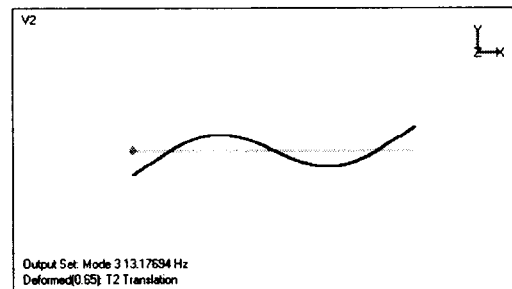


Fig. 11 Mode shape of vertical vibration by analytical method for mode 2 (13.18Hz)

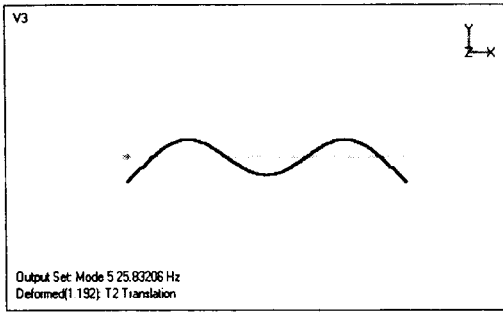


Fig. 12 Mode shape of vertical vibration by analytical method for mode 3 (25.83Hz)

방향 탁월진동과 비교하면, 13.18 Hz에서의 진동형상인 Fig. 11의 결과와 유사하게 나타나 차량에 의해 가스관이 진동하게 될 경우 이 주파수대에서 최대진동이 발생될 것으로 예상된다. 따라서, 가스배관 각각의 고유주파수를 주성분으로 하는 진동이 가스배관에 작용할 경우 이에 대한 진동저감 대책이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량이 통과하고 있는 지하철공사장의 노출 가스배관에 대하여, 복공판 지지보에서 가스관 전용보와 와이어로프를 거쳐서 가스배관으로 전달되는 진동의 양상을 분석하기 위해서 진동을 측정하고 그 신호를 분석하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 복공판 지지보에서는 50~120Hz 범위에서 진동이 지배적이거나, 이 주파수 영역의 충격 진동은 가스배관 전용보와 와이어로프를 지나면서 가스배관에서는 대부분 감쇠되어 13Hz의 주파수 영역에서 진동이 탁월하게 증폭되어 나타나고 있다. 따라서, 가스배관 전용보의 강성 및 와이어로프 연결 부위의 처리를 통하여 진동을 감소시킬 수 있는 방안을 강구하여야 한다.
- 2) 가스배관 상부의 목재 덮개를 부착한 경우와 제거한 경우 진동측정 데이터를 분석한 결과,

수평방향의 미소한 차이가 있으나 대부분의 진동을 나타내는 수직방향의 진동이 거의 일치하고 있으므로, 가스배관의 진동측정 시 목재 덮개를 제거하지 않고 측정해도 데이터의 신뢰성을 확보할 수 있음을 확인하였다.

- 3) 수직방향으로 12.75Hz에서 탁월진동이 발생하고 있는 지하철역사 가스배관에 대하여 실험적 방법과 구조해석 프로그램을 이용한 해석적 방법을 동시에 사용하여 진동모드 해석을 하였다. 해석을 통해 얻은 13.18 Hz에서의 진동모드 형상과 실험적으로 얻은 12.75 Hz에서의 진동모드 형상이 근사하게 일치하므로, 차량에 의해 가스관이 진동할 경우 이 주파수대에서 최대진동이 발생할 것으로 예상된다. 실험 결과로부터 진동이 가장 크게 발생하고 있는 지점은 시점에서 14m 위치인 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

- 1) 신진환, 오세욱, "발파진동이 지반의 안정에 미치는 영향", 한국산업안전학회지, Vol. 12, No. 4, pp. 102~107, 1997.
- 2) 홍성경, 김준호, 정석영, "외부하중을 받는 노출 가스배관의 진동 특성 연구", '98 한국산업안전학회 춘계학술논문발표회 논문집, pp. 83~88, 1998.
- 3) 천병식, 오재웅 공저, 지반진동 영향과 대책, 건설연구사, 1993.
- 4) 김광식 외 5인 역저, 기계진동학, 1981.
- 5) 김광식 외 3인 공저, 기계진동·소음공학, 교학사, 1993.
- 6) R.E.D. BISHOP, The Mechanics of Vibration, 1979.
- 7) Leonard Meirovitch, Analytical Methods in Vibration, Macmillan, 1967.
- 8) MSC/NASTRAN for Windows-User's Guide, The MacNeal-Schwendler Co., 1997.