

## 외부하중을 받는 노출 가스 배관의 진동 특성 연구

홍성경\*, 김준호\*, 정석영\*, 서정주\*\*

한국가스공사 연구개발원\*, 한국생산기술연구원 산업기술시험평가연구소\*\*

### 1. 서론

가스배관은 주로 도로를 따라 매설되어 있으며, 최근 지하철공사가 도심지에서 도로를 따라 지속적으로 이루어지고 있으므로 지하철공사시 기존에 매설되어 있는 가스배관이 대기로 노출되고 있다. 노출된 배관의 자중을 지탱해 주기 위하여 전용보를 설치한 후 와이어로프를 이용하여 가스배관을 전용보에 매달아 놓은 상태에서 지하구조물 공사를 하고 있으며, 도로는 임시적으로 철판으로 복공하여 사용하고 있는 실정이다.

이렇게 설치된 가스배관에 진동을 유발시키는 진동원은 많지만 복공판 위로 주행하는 차량이 직접적이고 가장 크게 영향을 주는 진동원 중의 하나이다. 차량이 주행할 때 차량으로부터 복공판에 가해지는 충격이 복공판 지지보에 가해지면 가스배관 전용보, 와이어로프의 경로를 통해 가스배관에 전달되고 있으며, 이로 인하여 가스배관은 진동을 하게 된다.

가스배관에 일정 수준 이상의 진동이 발생할 경우 가스배관에 안전상 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 대표할 수 있는 지하철 공사장 두 곳을 선정하여 현재의 진동수준을 정량적으로 분석하고, 복공판으로부터 가스배관까지 진동전달 과정에 대한 연구를 수행함으로써 가스배관의 안전성을 검토하는데 목적을 두고 있다.

### 2. 이론 및 실험

#### 2.1 가스배관의 진동 및 경계조건

노출된 가스배관은 양 끝단이 고정되어 있고 길이가 길기 때문에 자체 하중을 지탱하기 위하여 가스배관 전용보에 와이어로프로 지지시켜 놓은 상태이다. 가스배관으로 진동이 전달되는 과정을 보면, 가스배관의 하중을 지지하고 있는 와이어로프는 복공판지지보와 가스배관 전용보의 진동 영향으로 흔들리게 되며, 이러한 와이어로프의 상하방향 진동은 가스배관의 횡진동을 유발시킨다. 즉, 와이어로프는 가스배관을 지지하는 역할 뿐 만 아니라 가진하는 역할을 하고 있다. 복공판 지지보와 독립적으로 가스배관 전용보를 설치하고, 여기에 가스배관을 와이어로프로 지지하도록 하면 와이어로프는 가스배관을 지지하는 역할만 할 것이다.

가스배관 전용보 및 와이어로프의 설치목적이 가스배관의 하중을 지지하기 위한 것이므로, 양 끝단이 고정되어 있고 길이방향으로 일정거리에 스프링으로 지

지하고 있는 가스배관을 고려하면 배관의 편미분방정식은 다음 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$M(\ddot{u})+L(u)=F(x,t) \dots\dots\dots(1)$$

운동방정식에서 M과 L은 선형미분연산자이고, F(x,t)는 와이어로프의 스프링력이다. 배관의 진동변위 u(x,t)를 다음 식(2)와 같이 정의하면,

$$u(x,t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) q_i(t) \dots\dots\dots(2)$$

결과적으로 식(3)을 얻을 수 있다.

$$m_{\ddot{u}} q_i'' + k_{\ddot{u}} q_i = \int_0^l F(x,t) \phi_i(x) dx \triangleq Q_i(t) \dots\dots\dots(3)$$

그런데 x=ξ에서 스프링력이 작용하고 있는 것으로 생각할 수 있으므로, 스프링력은 F(t)δ(x-ξ)로 표현할 수 있으며, 여기서 δ(x-ξ)는 x=ξ에서 발생하는 delta 함수이다.

$$Q_i(t) = \int_0^l [F(t)\delta(x-\xi)] \phi_i(x) dx \dots\dots\dots (4)$$

$$F(t) = -ku(x,t) \Big|_{x=\xi} = -k \sum_j \phi_j(\xi) q_j(t) \dots\dots\dots (5)$$

i번째 진동에 대한 스프링력 Q<sub>i</sub>(t) 및 질량 m<sub>ii</sub>, 스프링력 k<sub>ii</sub>는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Q_i(t) &= -k \int_0^l \left[ \sum_j \phi_j(\xi) q_j(t) \right] \delta(x-\xi) \phi_i(x) dx \\ &= [-k \sum_j \phi_j(\xi) q_j(t)] \phi_i(\xi) \end{aligned}$$

$$m_{ii} = \int_0^l m(x) \phi_i^2 dx$$

$$k_{ii} = \int_0^l \phi_i L(\phi_i) dx$$

또한 가스배관의 양끝단이 고정되어 있으므로 경계조건은 다음과 같다.

$$\phi \Big|_{x=0,l} = 0, \quad \frac{d\phi}{dx} \Big|_{x=0,l} = 0$$

## 2.2 진동측정 및 분석

지하철 공사장의 노출되어 있는 가스배관의 진동특성을 분석하기 위하여 공사 중인 지하철 역사 2곳을 선정하였으며, 복공판 위로 차량이 통과할 때 가스배관

의 진동 현상을 측정·분석하였다.

#### (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 매달아서 보호조치를 하고 있다. 진동전달 과정에서 진동 감쇠효과를 분석하기 위해서 복공판 지지보와 가스배관의 진동을 동시에 측정하였으며, 충분한 시간동안 기록장치에 기록하였다. 차량의 충격진동이 복공판 지지보에 가해질 때, 이 복공판 지지보의 진동특성에 대한 데이터의 신뢰성을 위하여 복공판 지지보에서는 진동측정가능 주파수범위가 400Hz인 가속도계를 이용하였으며, 가스배관에서는 100Hz 이상의 고주파 진동신호는 감쇠되어 사라지고 30Hz 이하의 저주파 진동신호가 탁월하기 때문에 진동측정가능 주파수범위가 1~900Hz인 지반진동계를 이용하였다.

#### (2) 나무목의 진동감쇠 효과

지하철 공사장에서는 안전관리를 위하여 진동을 상시 측정하고 있으며, 측정할 때 가스배관 보호재인 나무목 덮개를 제거하고 있으므로 본 연구에서는 나무목 덮개 상부 및 덮개를 제거한 배관에서 진동을 동시에 측정하여 나무목 덮개가 진동전달에 어느 정도 영향을 주고 있는지 분석하였다.

#### (3) 진동모드 해석

지하철역사 가스배관의 횡진동(굽힘진동)이 어떠한 형태로 나타나고 있으며, 진동이 가장 크게 발생하고 있는 지점을 확인하기 위하여 가스배관에 작용하는 탁월 진동주파수에 대하여 진동모드 해석을 하였으며, 이 결과는 안전상 발생할 수 있는 문제에 대한 대책을 세우는데 이용할 수 있을 것이다. 양 끝단이 고정되어 있고 길이가 약 26m인 지하철 공사장에서, 가스배관 시점으로부터 약 17m 지점을 기준으로 하여 2m 간격으로 3개 지점씩 동시에 진동을 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

가스배관이 지지되어 있는 지하철 공사장은 복공판, 복공판 지지보인 I-Beam, 가스배관 전용보인 H-Beam, 가스배관 매달기용 와이어로프 및 가스배관으로 구성되어 있다. 그러므로 차량통과시 차량에 의한 충격진동은 I-Beam, H-Beam, 와이어로프를 거쳐 최종적으로 가스배관으로 전달된다.

A역사와 B역사 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 탁월진동주파수의 차이는 수평방향 진동의 경우 와이어로프의 길이 및 장력 등의 차이

에 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. 1, 2에 복공판 지지보와 가스배관의 수직방향 진동속도 및 진동가속도에 대한 주파수분석을 비교하였으며, 결과를 보면 복공판 지지보인 I-Beam에서는 50~120Hz 주파수영역의 진동이 지배적이며, 이 주파수 영역의 충격진동은 H-Beam과 와이어로프를 지나면서 가스배관에서는 대부분 감소되고 13Hz 영역의 진동이 탁월하게 증폭되어 나타나고 있다.

지하철 공사장에서는 안전관리를 위하여 진동을 상시 측정하고 있으며, 측정할 때에 가스배관 보호재인 나무목 덮개를 제거하고 있으므로 가스배관 보호재로 사용하고 있는 나무목 유무에 따라 진동측정 결과에 어느 정도 차이가 있는지 비교·분석하였다. Fig. 3, 4의 주파수분석 결과를 보면, 수평방향의 미소한 차이를 제외하면 대부분의 진동현상을 대표하는 수직방향의 결과가 나무목 유무시 거의 일치하고 있으며, 미소한 차이를 보이는 수평방향의 진동의 경우 수직방향에 비해 매우 작으므로 가스배관의 진동측정시 나무를 제거할 필요가 없음을 확인하였다.

진동모드 형상을 분석하기 위해서, 17m 지점에서 발생하는 상하방향 진동을 기준으로 가스배관의 길이를 따라 측정된 결과를 이용하여 약 26m 가스배관에 대한 진동모드 해석을 하였다. 지하철 B역사 가스배관의 수직방향 진동 중 탁월 진동은 12.75Hz에서 발생하고 있으며, 이 주파수에 대한 가스배관의 진동모드 형상은 Fig. 5와 같다. 진동모드 형상을 보면 진동이 가장 크게 발생하고 있는 지점은 시점으로부터 14m 지점이다.

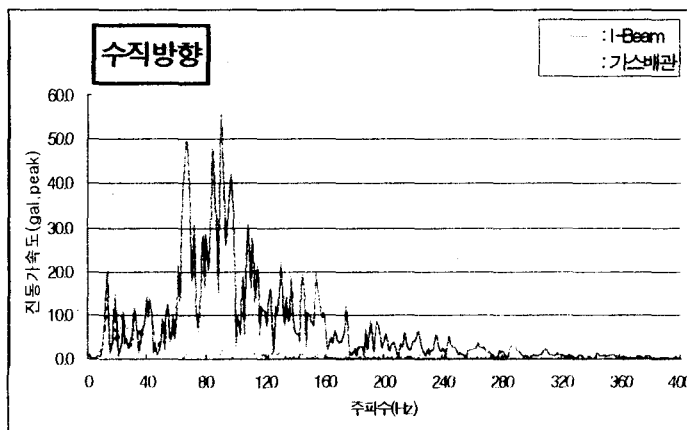


Fig. 1 I-Beam에서 가스배관으로 전달된 진동가속도의 주파수분석

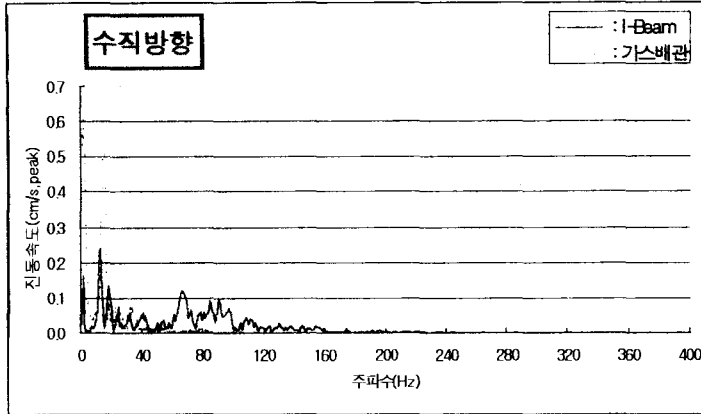


Fig. 2 I-Beam에서 가스배관으로 전달된 진동속도의 주파수분석

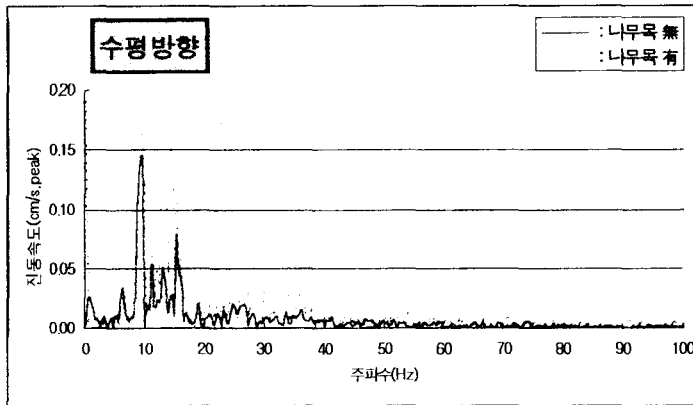


Fig. 3 가스배관에서 나무목 유무에 따른 진동속도의 주파수분석 비교

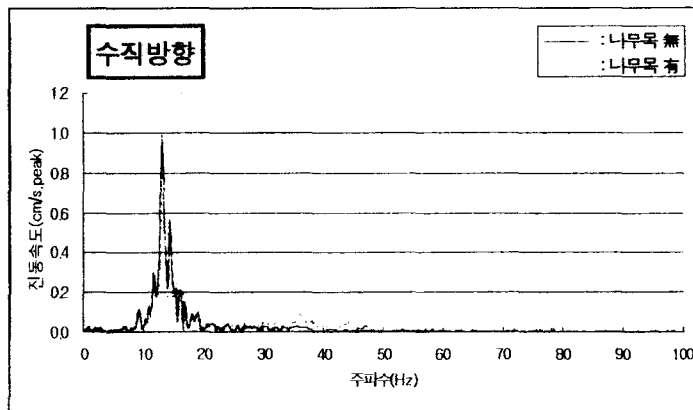


Fig. 4 가스배관에서 나무목 유무에 따른 진동속도의 주파수분석 비교

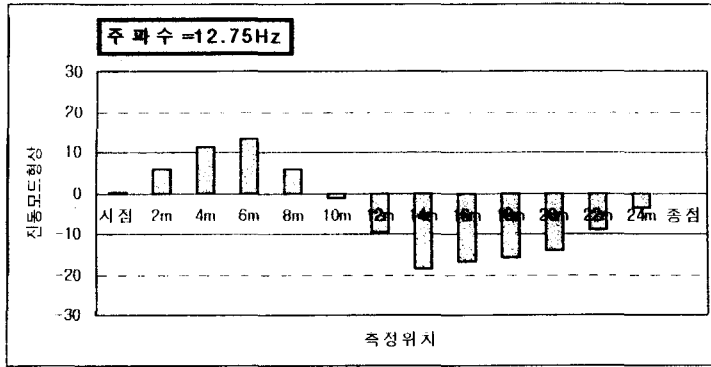


Fig. 5 가스배관의 수직방향 12.75Hz에서의 진동모드 형상

#### 4. 결론

본 연구에서는 차량이 통과하고 있는 지하철 공사장의 복공판 지지보에서 가스배관으로 전달되는 진동의 양상을 분석하기 위해서 진동신호를 주파수 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 복공판 지지보에서는 50~120Hz 범위에서 진동이 크게 발생하고 있으나, 가스배관 전용보와 와이어로프를 지나면서 대부분 감쇠되어 가스배관에서의 탁월진동은 13Hz의 주파수영역에서 나타나고 있다. 이 영역의 진동은 복공판 지지보 및 가스배관 전용보의 결과보다 증폭되어 가스배관의 진동을 지배하고 있으므로, 가스배관 전용보의 강성 및 연결 부위에 대한 적절한 처리를 통하여 진동을 감소시킬 수 있는 방안을 강구하여야 한다.

(2) 가스배관의 나무목 덮개 부착시와 제거시 진동측정 데이터를 분석한 결과 거의 일치하고 있으므로, 가스배관의 진동측정시 나무목 덮개를 제거하지 않고 측정해도 데이터의 신뢰성을 유지할 수 있다.

(3) 수직방향으로 12.75Hz에서 탁월진동이 발생하고 있는 지하철역사 가스배관의 진동양상을 분석하기 위하여 진동모드 해석을 하였다. 해석 결과, 진동이 가장 크게 발생하고 있는 지점은 시점으로부터 14m 위치인 것으로 나타나고 있다.

#### 참고문헌

- 1) 천병식, 오재용 공저, "지반진동 영향과 대책", 건설연구사, 1993
- 2) 사단법인 일본음향재료협회, "소음·진동대책 핸드북", 집문사, 1983
- 3) 김광식 외 5인 역저, "기계진동학", 1981
- 4) R.E.D. BISHOP외 1인, "The Mechanics of Vibration", 1979
- 5) Leonard Meirovitch, "Analytical Methods in Vibration", Macmillan, 1967
- 6) 雜 喉謙, "발파진동의 주변에의 영향과 대책", 원기술, 1994
- 7) 이출재, "작업환경소음진동학", 동화기술, 1992
- 8) 김재수, 원광대학교 건축공학과, "건설소음·진동의 기초이론과 영향", 한국소음진동공학회지 제7권 제4호 1997
- 9) 양형식, 전남대학교, "암 발파에서의 소음·진동 규제기준과 저감방안", 한국소음진동공학회지 제7권 제4호 1997