

## 가스 파이프라인의 차량진동 응답 예측

### A Response Estimation for Vehicle Vibration of Gas Pipeline

박 선 준<sup>†</sup> · 박 연 수\* · 강 성 후\*\*

Sun-Joon Park, Yeon-Soo Park and Sung-Hoo Kang

(2003년 7월 14일 접수 : 2003년 12월 16일 심사완료)

**Key Words** : Gas Pipeline(가스 파이프라인), Vehicle Vibration(차량진동), Response of Vibration(진동응답), Scaled Weight(환산중량), Isolation System(방진시스템)

#### ABSTRACT

In this paper, vibration response of aerial gas pipeline due to vehicle loads was quantitatively estimated through experiment and analysis in open cut construction site. The vehicle vibration of various construction machines causes serious effect to the aerial gas pipeline. The new vibration prediction equations presented in this study can estimate the vibration velocity response of the aerial gas pipeline. In the vibration prediction equations, the vehicle's weight and traveling velocity, which are the sources of vibration, are combined into the term called, "scaled weight". Methods to reduce vibration were proposed in case the vibration velocity response of the gas pipeline exceeded the vibration criterion, using the vibration prediction equations presented in this study. One was to limit the vehicle's traveling velocity and the other to install the isolation equipment. Both methods can be estimated quantitatively.

#### 1. 서 론

건설공사 현장에서는 다양한 특성을 가진 진동이 발생되며, 발생된 진동은 공사중인 구조물 혹은 기존 구조물에 직·간접적으로 영향을 미치고 있다. 진동의 영향권 내에 있는 구조물 중에서도 공사 기간 중 가시설물에 의해 지지되는 구조물에 대한 진동영향 검토는 반드시 필요한 사항이다. 특히 많은 부분이 도심지의 중심부에서 이루어지는 도시철도 건설공사의 경우 기존의 지하매설물에 대한 안전하고 적절한 처리 대책을 수립하는 것이 중요하다. 도시철도 건설을 위한 공법 중 널리 사용되고 있는 open cut 굴착공법에서는 임시 차량통행을 위해 설치한 복공판

의 지지보로 사용되는 주형에 매설가스 파이프라인을 매달아 노출시키는 방법을 주로 사용하고 있다.

본 연구에서는 복공판 위를 통행하는 차량에 의해 발생하는 진동이 광주도시철도 일부 공사구간에 노출된 가스 파이프라인에 미치는 진동 영향을 정량적으로 평가한 기존의 실험적 연구<sup>(1,2,3)</sup>를 바탕으로 진동 응답 해석을 수행하여 진동추정식을 제시하고 노출 가스 파이프라인으로 전달되는 진동의 크기를 감소시키기 위한 일련의 방진대책을 개발하고자 한다. 방진 대책에서는 일련의 흐름도를 따라 진동 영향을 평가하면서 방진시스템을 사용하는 적극적인 방법과 차량의 주행속도를 제한하는 소극적인 방법으로 구분하여 제시하였다.

#### 2. 이론적 고찰

##### 2.1 신뢰성 지수

최근에는 구조물 설계를 위해 사용되는 기존의 허

† 책임저자 : 정희원, 동신대학교 공과대학 토목공학과  
E-mail : parksj@dsu.ac.kr

Tel : (061)330-3136, Fax : (061)330-2830

\* 정희원, 전남대학교 공과대학 건설지구환경공학부

\*\* 동신대학교 공과대학 토목공학과

용응력 설계 개념이나 공칭안전률 설계 개념보다 한 단계 더 발전된 설계개념으로 신뢰성이론을 사용한 새로운 설계기준이 사용되고 있다. 이는 신뢰성지수 (reliability index :  $\beta$ )를 구조물 혹은 구조물의 모든 시스템에 대해 일정한 값으로 선택함으로써 강도와 하중의 가변성에 상관없이 요구되는 신뢰도( $P_r$ ) 혹은 상반되는 개념의 파괴확률( $P_f$ )을 갖도록 하는 것이다. 이렇게 함으로써 설계 시 포함될 수 있는 기존의 불확실량들을 통계적인 추정에 기초한 확률모형 즉, 신뢰성 이론에 의해 신뢰도 또는 신뢰성지수( $\beta$ )를 척도로 하여 해석하기 위함이다.<sup>(4)</sup>

$$\Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx \quad (1)$$

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2)$$

여기에서

$m_R, \sigma_R$  : 진동기준(저항분포의 평균값)치와 표준오차

$m_S, \sigma_S$  : 진동(하중작용)분포의 평균값과 표준오차

중앙값  $m_Z = \beta \sigma_Z$  이며 파괴확률  $P_f$  는 함수  $f_Z(z)$  의 특성 값으로 파악할 수 있다. 즉 신뢰성지수  $\beta$  의 값이 같으면 신뢰성도 같다. 이와 같은  $\beta$  를 신뢰성지수라 부르며 식 (2)와 같이 정의된다. 실측한 진동 응답 분포는 자연적 현상에서 발생하는 분포와 가장 유사한 형태를 띠며 연속확률 분포 중에서 가장 널리 사용되는 정규분포로 가정하였다.<sup>(4)</sup> 본 연구에서 신뢰성지수는 일정한 정도의 신뢰도가 부여된 진동 추정식을 제시하기 위하여 사용하였다.

### 2.2 가스 파이프라인의 진동기준

현재까지 국내는 물론 국외에서도 가스 파이프라인

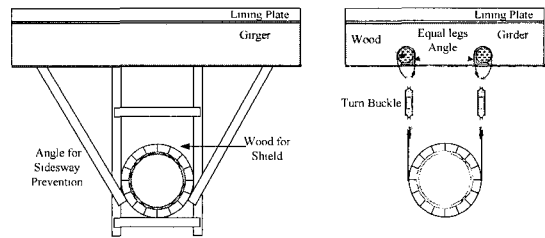
**Table 1** Vibration criteria of steel gas pipeline for vehicle vibration(KOGAS)

Division	Safety extent	Counterplan extent	Prohibition extent
Vel-max(cm/s)	to 0.6	0.6 to 2.0	more than 2.0

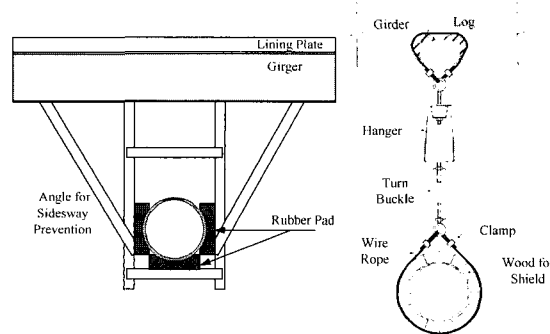
에 대한 진동기준이 법적으로 마련되어 있지 않은 상태이며, 한국가스공사(KOGAS)에서 건설진동에 대한 가스 파이프라인의 안전성을 평가하기 위하여 자체적으로 가지고 있는 차량진동에 대한 진동기준치는 Table 1<sup>(2)</sup>과 같다. 본 연구에서 제시하는 노출 가스 파이프라인의 방진 시스템은 진동 기준인 2.0cm/s를 만족하도록 하는데 1차 적인 목적이 있다.

### 2.3 방진 시스템

주형으로부터 전달되는 진동은 가스 파이프라인을 매달고 있는 와이어로프와 횡진방지 앵글을 통해서 가스 파이프라인으로 전달된다. Fig. 1(a)의 좌, 우측 그림은 노출된 가스 파이프라인의 일반적인 지지 형태를 보여주고 있으며, Fig. 2의 내측과 외측 지지형태에 각각 해당된다. 이와 같이 상부로부터 전달되는 진동을 효과적으로 차단할 수 있도록 현재 매달재로 사용되는 와이어로프를 대신하여 행어로드 중간부분이 절단된 형태를 갖는 방진행어를 사용하였다.(Fig. 1(b)) 방진행어는 고주파 방진에 우수한 네오프렌(고무재)과 저주파 방진에 우수한 금속스프링을 조합하여 직렬형태로 구성하였다. 본 연구에서 방진 시스



(a) Generally hanging method - CASE 1



(b) Hanging method with isolation system - CASE 2

**Fig. 1** Hanging and supporting conditions

템이라 함은 가스 파이프라인과 횡진방지 앵글 사이의 지지조건과 방진행어를 모두 고려한 것을 의미한다. 가스 파이프라인의 매달재와 지지 조건을 변화시켜 총 6가지 실험CASE에 대하여 실험하였으며<sup>(1,2)</sup>, 본 논문에서는 6가지 실험 CASE 중 방진효율이 가장 우수한 Fig. 1(b)와 같은 조건을 방진시스템으로 제시하였다. 본 논문에서 실험 CASE 1은 Fig. 1(a)와 같이 가스 파이프라인을 노출시키는 일반적인 방법에 대한 실험 CASE를 의미하며, 실험 CASE 2는 Fig. 1(b)와 같은 방진시스템이 적용된 실험 CASE를 의미한다. 방진행어의 강성과 하중용량은 가스 파이프라인의 직경에 따라 결정되며 3.2절 (3)의 Table 5에 제시하였다.

### 2.4 차량하중의 이상화

실제 open cut 굴착공사 구간에 설치된 복공판 위를 주행하는 차량에 의해 노출된 가스 파이프라인에 발생하는 진동 응답을 예측할 수 있는 간단하면서도 신뢰성 있는 진동 해석을 위하여 차량 하중을 삼각파 하중, 하버사인파하중, 반사인파하중의 3가지 형태로 이상화하였다. 동일한 구조물의 해석 모델에 3가지 형태의 이상화 하중을 입력하여 해석결과를 실험 값과 비교함으로써 가스 파이프라인의 진동 해석에 가장 적합한 하중의 형태를 결정하고, 이를 이용하여 진동 응답 해석을 수행하였다.

## 3. 실험 및 해석

### 3.1 진동응답 측정실험 및 분석

#### (1) 실험개요

실험 대상 가스 파이프라인의 노출 길이는 총 54 m, 직경 200 mm(D200)로써 광주도시철도 일부 공사

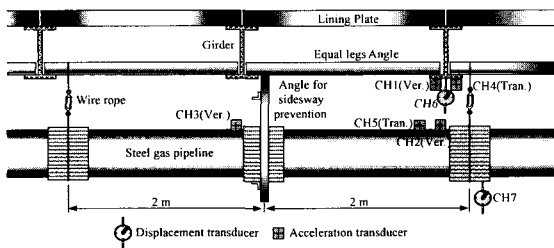


Fig. 2 Suspend method of an aerial gas pipeline and measurement positions

구간에 매설되어 있던 가스 파이프라인을 대상으로 하였다. 노출된 가스 파이프라인은 복공판을 지지하기 위하여 설치한 주형(I-700×300×13×24)과 주형 사이에는 등변 L자형 앵글(L-90×90×9)이 설치되어 있고 이 2개의 L자형 앵글에 매달려 있다. 횡진방지 L자형 앵글은 4.0m 등간격으로 설치되어 있으며, 지름 8mm의 와이어로프 또한 4.0m 등간격으로 설치되어 있다. 횡진방지 앵글과 와이어로프는 1개소씩 교대로 설치되어 가스 파이프라인을 2.0m 간격으로

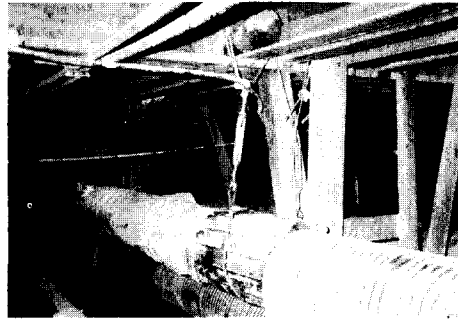


Fig. 3 Aerial gas pipeline and temporary equipment(CASE 1)



Fig. 4 Acceleration transducer attached on the surface of a gas pipeline



Fig. 5 Dynamic traveling test

지지하고 있는 상태이다. 이러한 매달기 방법은 일반적인 매설관로 노출방법으로 Fig. 1(a), Fig. 2와 같다.

주형의 하부플렌지에서 가스 파이프라인 표면까지의 최단거리는 75 cm~85 cm를 유지하고 있으며 실제 노출된 가스 파이프라인과 가시설물의 모습은 Fig. 3과 같다. 가스 파이프라인과 주형의 진동응답을 측정하기 위한 가속도계와 변위계의 설치 위치 개요도는 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 가속도계는 가스 파이프라인의 진동 응답을 정확하게 측정하기 위하여 Fig. 4에서처럼 보호재인 유리섬유, 로드시트 등을 제거한 후 가스 파이프라인의 표면에 직접 부착하였다.<sup>(6)</sup>

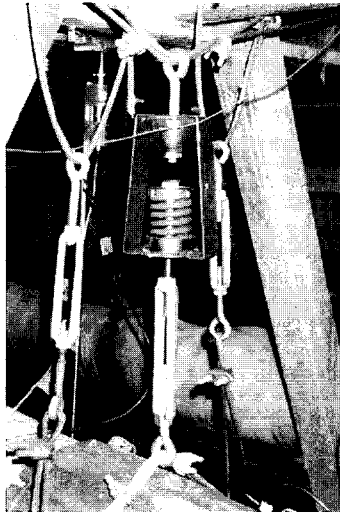


Fig. 6 Aerial gas pipeline with isolation system (CASE 2)

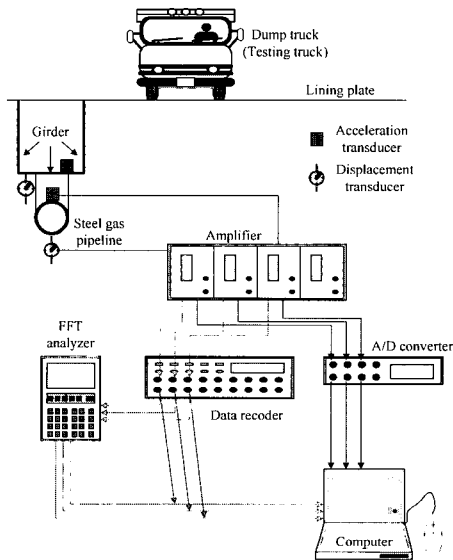


Fig. 7 Schematic diagram of acceleration and displacement measurement

실험차량은 적재중량을 포함하여 총 288.2 kN(전륜 69.6 kN, 중륜 108.8 kN, 후륜 109.8 kN)이며, 동적주행실험은 20 km/h, 35 km/h, 50 km/h의 3가지 속도로 한가지 속도에 대해서 3회씩 총 9회 주행하였다. 실험차량의 주행선은 가스 파이프라인을 양쪽 바퀴의 중앙에 위치하도록 복공판 위에 주행선을 그려 주행 실험동안에 동일한 위치로 주행할 수 있도록 하였다.(Fig. 5)

이러한 일련의 실험과정은 현재 가스 파이프라인이 노출되어 있는 실험 CASE 1(Fig. 1(a), Fig. 3)과 방진행어와 고무패드를 사용하여 매달기 조건과 지지 조건을 변화시킨 실험 CASE 2(Fig. 1(b), Fig. 6)에 대하여 동일하게 수행되었다. Fig. 7은 차량 주행실험 시 발생하는 진동 응답을 측정하기 위한 측정계통도를 보여주고 있다.

(2) 진동 응답분석

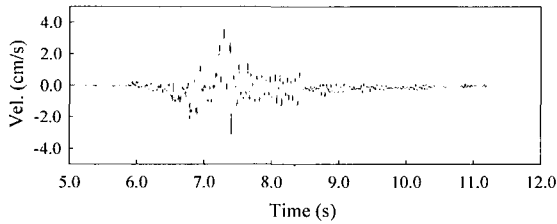
진동 속도 응답은 가속도계에서 얻어진 가속도 응답을 1회 수치 적분하여 구하였다. 여기에는 미국의 Strawberry Co.에서 개발하여 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 상용화된 진동 분석 프로그램인 Workbench를 사용하였다.<sup>(7)</sup> Fig. 8은 실험차량의 동적주행으로 얻어진 진동 응답 가운데 50 km/h 주행 시 발생된 가스 파이프라인의 속도 응답 시간이력을 실험 CASE별로 보여주고 있다. 실험차량의 주행으로 인한 노출가스 파이프라인의 진동 응답 측정 및 분석 결과를 Table 2에 정리하였다. 실험 CASE 1의 경우 가스 파이프라인의 진동 속도 응답(연직방향)은 20 km/h, 35 km/h, 50 km/h의 주행 속도에 따라 각 3회씩 반복 실험하여 얻어진 최대 값의 평균이 1.306 cm/s, 2.267 cm/s, 3.460 cm/s로 분석되어 대부분 가스 파이프라인의 진동 기준치 2.0 cm/s를 초과하여 발생하는 것으로 나타났으나, 방진시스템을 적용한 실험 CASE 2의 경우 CASE 1과 동일 조건에 대하여 각각 0.669 cm/s, 1.101 cm/s, 1.528 cm/s로 분석되어 49%~56%의 진동 응답 감소 효과를 보여주고 있다. CASE 2에 사용된 방진행어의 스프링 강성은 60 N/mm이며, 하중용량은 1.5 kN이다. 참고로 방진행어 1개가 부담하는 가스 파이프라인(직경 200 mm) 및 보호재의 중량은 1.10 kN이다. Table 2의 ↑과 ↔은

연직방향과 수평방향을 각각 의미하며, CH6과 CH7은 각각 주형과 가스 파이프라인의 변위 응답 값이다.

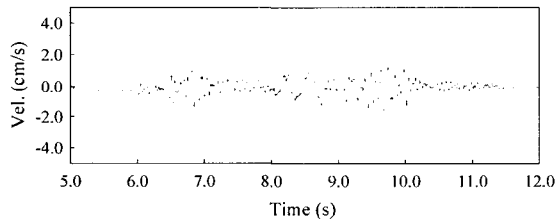
3.2 진동 응답 해석

(1) 가스 파이프라인 및 가스 파이프라인지지 구조물의 이상화

해석을 위해 사용된 각 요소별 대표 상수 값들은 Table 3과 같다. 또한 해석을 위한 주형의 지점 경계 조건은 힌지( $\theta_z =$  구속,  $U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_y =$  자유) 형태로 정의하였다.(Fig. 9) 널말뚝(H-pile)에 직접 연결되어 있는 한쪽 주형 지점은 힌지형



(a) CASE 1



(b) CASE 2

Fig. 8 Velocity response time history of gas pipeline

태의 지점조건 정의가 별 무리 없으나 계속 연결되는 반대쪽은 널말뚝에 지지되어 연속보의 형태로 계속 연결되어 있다. 이런 경우 대칭 조건이라면 회전각  $\theta_z$ 가 발생하지 않도록 고정단 개념의 지점 경계조건

Table 3 Representative material properties of each element

Elements	Density	Young's modulus	Reference
Girder	2403 kg/m <sup>3</sup>	2.1×10 <sup>9</sup> MPa	
Gas pipeline	801 kg/m <sup>3</sup>	2.1×10 <sup>9</sup> MPa	Outer diameter 200 mm, Thickness 5 mm
Wire rope	500 kg/m <sup>3</sup>	1.4×10 <sup>9</sup> MPa	Diameter 8 mm
Bracing	801 kg/m <sup>3</sup>	2.1×10 <sup>9</sup> MPa	
Lining plate	Considered converting by density to girder		

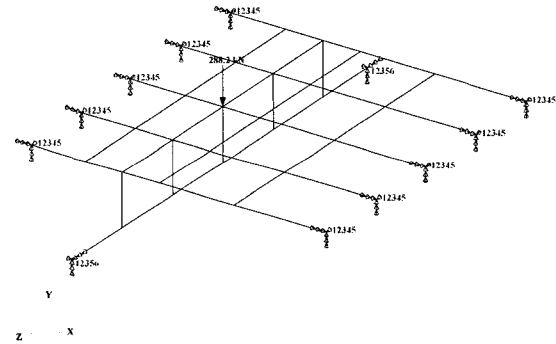


Fig. 9 Analysis modeling of a gas pipeline structure

Table 2 Vibration response for testing case

CASE	Division	Driving velocity(km/h)	CH1 (girder ↓)	CH2 (pipeline ↓)	CH3 (pipeline ↓)	CH4 (girder↔)	CH5 (pipeline↔)	CH6 (girder ↓)	CH7 (pipeline ↓)
1	Response of Vel.(cm/s)	20	3.212	1.306	1.320	0.187	0.791	-	-
		35	4.502	2.267	2.730	0.260	1.006	-	-
		50	6.930	3.460	3.548	0.303	2.217	-	-
2	Response of Acc.(m/s <sup>2</sup> )& Dis.(mm)	20	10.74	1.00	0.90	0.18	0.91	4.296	3.127
		35	11.81	1.73	1.51	0.37	1.81	4.801	3.262
		50	12.88	3.33	3.33	0.43	1.81	5.495	3.304
2	Response of Vel.(cm/s)	20	3.279	0.669	0.745	0.137	0.698	-	-
		35	4.067	1.101	1.098	0.221	0.922	-	-
		50	6.439	1.528	1.422	0.252	1.089	-	-
2	Response of Acc.(m/s <sup>2</sup> )& Dis.(mm)	20	11.18	0.480	0.440	0.240	0.490	4.730	1.491
		35	11.93	0.870	0.920	0.380	0.900	4.578	1.513
		50	13.21	1.320	1.400	0.350	1.690	5.504	1.778

을 사용해야 하지만 본 해석 대상인 주형 구조물의 형상은 대칭이나 하중이 비대칭인 관계로 역대칭 조건을 사용하였다. 공사현장의 상황에 따라 주형이 대칭인 조건에 놓일 수도 있지만 이는 양 차로에 하중이 동시에 재하되는 경우로 그렇지 않은 경우(즉, 역대칭)의 발생가능성도 있기 때문에 역대칭의 힌지 형태 경계조건을 사용하였다. 가스 파이프라인의 양단 지점 경계조건도 힌지 ( $\theta_x =$  구속,  $U_x = U_y = U_z = \theta_y = \theta_z =$  자유)로 정의하였다.(Fig. 9)

길이 방향으로 긴 가스 파이프라인 구조물의 효율적인 동적해석을 위하여 우선적으로 36m 구간을 모델링하여 해석을 수행하였다. 해석결과 동적 차량하중에 대한 가스 파이프라인의 가속도, 속도, 변위 응답이 하중 재하 위치를 기준 원점으로 하여 6.0m 이격된 절점에서부터는 급격히 "0"에 수렴하는 것으로 나타났다.(Fig. 10) 즉 해석적인 방법으로 가스 파이프라인의 진동 응답 해석을 수행하기 위해서는 하중 재하 위치를 중심으로 가스 파이프라인 길이 방향으로 전후 6.0m 구간, 전체 12m 구간만을 모델링 하여도 구조물의 진동 응답 특성을 충분히 표현할 수 있다는 것을 의미한다. 전체 12m 구간만을 모델링하여 해석한 결과를 36m 구간을 모델링하여 해석한 결과와 Fig. 10에 같이 나타내었다.

본 연구에서는 이와 같은 과정을 통해 가스 파이프라인의 길이방향 12m 구간만을 고려하여 모든 해석을 수행하였다. 동적하중이 작용하는 전체 시간동안에

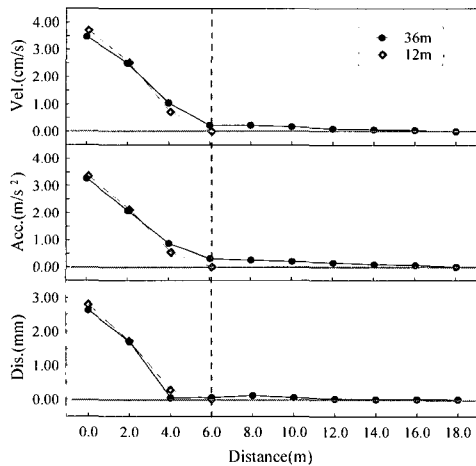


Fig. 10 Comparison of the vibration response analysis of a gas pipeline according to the scope of modeling

진동 응답 최대 값을 예측하기 위한 해석적인 관점에서 본다면 2가지 모델링 규모에 따른 결과 차이는 차량하중에 대한 가스 파이프라인의 진동응답을 예측하기에는 별다른 무리가 없을 것이라 판단된다. 구조물은 50cm 간격으로 절점을 구분하여 동적 응답을 충분히 표현할 수 있도록 하였다. 참고로 가스 파이프라인 36m 길이에 대한 구조물의 자유도수는 총 3244개였으며, 12m 길이에 대한 구조물의 자유도수는 총 948개였다. 가스 파이프라인 및 가스 파이프라인지지 구조물은 모두 보 요소로 이상화하였다.

(2) 차량하중의 이상화

현재 가스 파이프라인의 시설상태를 기준으로 실험 차량의 3가지 주행속도, 3가지 형태로 이상화한 실험 차량 하중을 각기 조합하여 최적의 차량하중 이상화 형태를 결정하기 위한 동적 구조해석을 수행하였다.<sup>(5,8)</sup> 해석결과와 실험결과를 비교한 Table 4를 기준 할 때 동적차량하중을 삼각파 형태로 이상화하는 경우에 보다 높은 신뢰도를 얻을 수 있었다. 차량하중의 최대값은 실험에 사용된 차량의 주행 속도에 관계없이 실제 실험차량의 중량 288.2 kN을 사용하였으며, 차량의 주행속도는 구조물(주형)의 한 절점에 입력되는 하중 지속시간으로 고려하였다.

(3) 가스 파이프라인의 진동 응답 해석

본 연구에서는 MSC/NASTRAN<sup>(9)</sup>과 범용 전후처리 프로그램인 MSC/PATRAN<sup>(10)</sup>을 연계하여 진동 응답 해석을 수행하였다. 가스 파이프라인의 진동 속도 응답 추정식을 제안하기 위하여 해석 대상으로 한 차량은 공사현장이 도심지에 위치한 특성을 고려하여 덤프트럭(259.7 kN), 버스(147.0 kN), 승합차(29.4 kN)로 구분하였다.

차량의 주행속도는 실험에 의해 진동 응답치를 알고 있는 20 km/h, 35 km/h, 50 km/h, 3가지로, 가스 파이프라인의 직경은 도시가스 파이프라인의 표준규

Table 4 Analysis results for each idealization of vehicle load (unit : cm/s)

Traveling velocity	Test values	Symmetrical triangular pulse force	Haversine pulse force	Half-cycle sine pulse force
50km/h	3.460	3.473	3.086	4.338
35km/h	2.267	2.433	2.164	3.153
20km/h	1.306	1.421	1.248	1.855

격인 D600, D300, D200, D150 4가지로 구분하였으며, 차량하중은 실험 값과 비교하여 가장 정확한 해석결과를 보인 삼각과 형태로 이상화하였다. 여기에서 D600은 직경이 600 mm임을 의미한다

Fig. 11에는 삼각과 형태로 이상화한 차량하중을 사용하여 해석적으로 얻은 가스 파이프라인의 속도 응답 시간이력을 Fig. 8(a)에서 제시한 진동 속도 응답 시간이력과 비교하여 하중이상화에 대한 신뢰도를 확인하였다.

해석은 차량의 종류(차량중량) 3가지, 차량의 주행 속도 3가지로 구분한 후 이를 조합하여 수행하였다. 또한 하나의 가스 파이프라인 직경에 대해 현재 노출되어 운용중인 상태와 동일한 조건에서 방진시스템이 설치되었을 경우 가스 파이프라인의 진동 응답을 비교하기 위한 해석도 병행되었다. 방진행어는 가스 파이프라인 직경에 따라 스프링 강성이 다른 2가지의 종류를 고려하였다. 해석대상의 강 가스파이프 라인 직경에 따라 사용된 방진행어의 스프링강성과 용량을 Table 5에 정리하였다. 방진시스템에 사용된 방진행어의 선택에는 방진행어 1개가 부담하게 될 가스 파이프라인의 중량과 방진행어 내부 스프링의 로킹 발생에 대한 사항을 고려하여 안전성이 확보되도록 결정하였다. 본 연구에서는 4가지 가스 파이프라인 종류

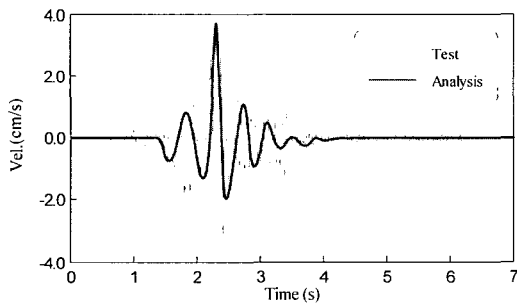


Fig. 11 Vibration response time history for symmetrical triangular pulse force

Table 5 Hanger types for gas pipeline

Diameter	D600		D300		D200		D150	
Spring constant (N/mm)	300	240	160	120	120	60	60	40
Capacity (kN)	7.5	6.0	4.0	3.0	3.0	1.5	1.5	1.0
Share of hanger(KN)	4.69		1.74		1.10		0.77	

를 대상으로 총 108가지 경우에 대해 해석하였다. MSC/NASTRAN을 사용하여 수행한 가스 파이프라인의 진동 응답 해석결과를 Table 6에 제시하였다. Table 6에서 D200 규격의 가스 파이프라인에 대한 결과 값에서 ( )안의 값은 실제 실험을 통하여 얻어진 실험 값을 의미한다. 실험 값과 해석 값의 비교를 통하여 방진시스템이 적용된 상태에서도 삼각과 형태의 하중 이상화는 유효함을 알 수 있다.

#### 4. 진동 속도 응답 추정식 및 방진시스템

##### 4.1 가스 파이프라인의 진동 속도 응답 추정식

가스 파이프라인의 진동응답에 직접 영향을 미치는 3가지 주요변수인 차량중량, 주행속도, 가스 파이프라인의 직경을 고려하여 진동 응답을 추정할 수 있도록 하였다. 진동을 발생시키는 진동 에너지원인 차량의 중량과 차량의 주행속도를 하나의 항으로 고려하여 새롭게 “환산중량(scaled weight)” 이라는 용어로 정의하였다. 환산중량은 차량 중량(MN)과 주행속도(km/h)의 곱으로 이루어진다. 해석에 의한 가스 파이프라인의 진동 속도 응답 108개의 자료 중 방진시스템이 설치되지 않은 일반적인 상태에 대한 39개의 자료를 환산중량에 대해 나타내어 이를 회귀분석 하였다. 회귀분석한 결과 가스 파이프라인의 진동 추정식은 Fig. 12 및 식 (3)과 같다.

$$Vel. = 0.2472(S.W.) \tag{3}$$

여기에서

Vel. : 가스 파이프라인의 연직방향 진동 속도 응

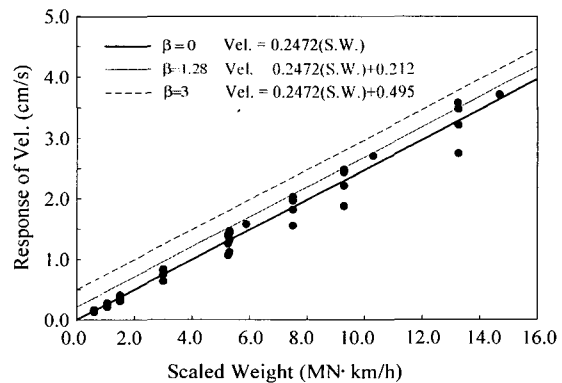


Fig. 12 Vibration velocity response equation of a gas pipeline by using reliability index

답(cm/s)

S.W. : 환산중량(MN · km/h)

식 (3)의 진동 추정식은 절편이 "0"인 원점을 통과하는 형태의 1차 직선식으로 제시하였다. 해석이나 실험을 통하지 않아도 차량의 중량이나 주행속도 중 한가지만 "0"이 되어도 가스 파이프라인에는 동적 응답인 진동 속도 응답이 발생되지 않기 때문이다. 식 (3)에서 제시한 진동 추정식의 표준오차 ( $S_e$ )는 0.165, 상관계수 ( $r$ )는 0.996, 결정계수 ( $R^2$ )는 0.991로 얻어졌다. 그러나 식 (3)의 진동 속도 응답 추정식은 가스 파이프라인의 진동 응답을 결정짓는데 상대적으로 미소한 영향을 미치는 변수들을 생략한 상태에서 제안되었으며 노면조도(복공판의 시설상태) 등의 사항을 고려하는 방법으로 가스 파이프라인의 진동 응답을 추정하는 데 사용자가 요구하는 정도의 안전율을 갖도록 하는 수정된 진동 속도 응답 추정식을 식 (4)와 같이 제안하였다. 식 (4)에서 얻어지는 진동 속도 응답은 "cm/s"의 단위를 갖게 된다. 신뢰성 지수( $\beta$ ) 0, 1.28, 3에 대해 각각의 진동 속도 응답 추정식은 50%, 90%, 99.9%의 신뢰도를 갖게 된다.(Fig. 12) 본 연구에서 얻어진 data가 정규분포를 보인다고 가정하였으므로 표준정규 분포표로부터 신뢰구간 즉, 신뢰도를 만족하는 신뢰성지수를 선택하였다.<sup>(4)</sup>

$$\text{Vel.} = 0.2472(\text{S.W.}) + \beta S_e \quad (4)$$

(단,  $0 < \text{S.W.} \leq 16 \text{ MN} \cdot \text{km/h}$ )

$$\beta = 0, \text{Vel.} = 0.2472(\text{S.W.})$$

$$\beta = 1.28, \text{Vel.} = 0.2472(\text{S.W.}) + 0.212$$

$$\beta = 3, \text{Vel.} = 0.2472(\text{S.W.}) + 0.495$$

또한 본 연구에서 제안한 가스 파이프라인의 진동 속도 응답 추정식인 식 (4)의 적용성과 신뢰성을 검증하기 위하여 실험으로부터 얻어진 가스 파이프라인 진동 속도 응답을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 제안된 진동 속도 추정식에 대한 실측치들의 표준오차 ( $S_e$ )는 0.389로 분석되었으며, 진동 추정식에 대한 실측치의 결정계수 ( $R^2$ )는 0.917로 얻어졌다. 이는 본 연구에서 제안한 진동 추정식이 실제 가스 파이프라인에 발생하는 진동 속도 응답의 91.7%를 결정지을 수 있다는 것을 의미한다. 상관계수( $r$ )는 0.958로 얻어져 상관성 또한 양호한 것으로 밝혀졌다.

Fig. 14는 회귀분석을 통하여 얻은 진동 추정식과

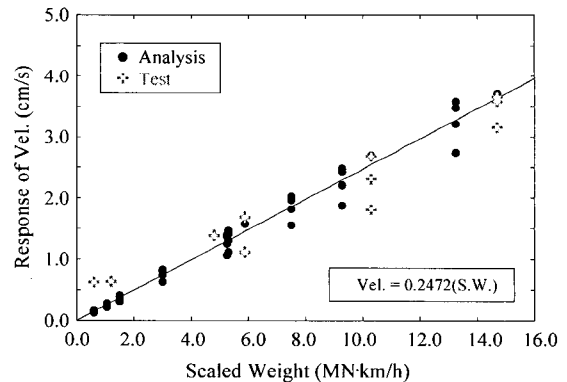


Fig. 13 Comparison of experiment and simulation

Table 6 Result of dynamic analysis of vibration response

Vehicle weight (kN)	Traveling velocity (km/h)	D600			D300			D200			D150		
		General state	240kN/mm	300kN/mm	General state	120kN/mm	160kN/mm	General state	60 kN/mm	120kN/mm	General state	40kN/mm	60kN/mm
259.7 (Dump truck)	50	2.743	0.322	0.392	3.211	0.935	1.145	3.473(3.460)	1.569(1.528)	1.884	3.575	2.117	2.250
	35	1.877	0.229	0.282	2.209	0.788	0.958	2.433(2.267)	1.011(1.101)	1.547	2.476	1.219	1.426
	20	1.112	0.131	0.161	1.309	0.447	0.539	1.421(1.306)	0.625(0.669)	0.875	1.466	0.836	0.893
147.0 (Bus)	50	1.553	0.182	0.222	1.818	0.529	0.648	1.966	0.888	1.066	2.024	1.198	1.274
	35	1.063	0.130	0.160	1.250	0.446	0.542	1.377	0.572	0.857	1.402	0.690	0.807
	20	0.630	0.074	0.092	0.741	0.253	0.305	0.804	0.354	0.497	0.830	0.473	0.506
29.4 (Passenger car)	50	0.311	0.036	0.044	0.364	0.106	0.130	0.393	0.178	0.213	0.405	0.240	0.255
	35	0.213	0.026	0.032	0.250	0.089	0.108	0.275	0.114	0.175	0.280	0.138	0.161
	20	0.126	0.015	0.018	0.148	0.051	0.061	0.161	0.071	0.099	0.166	0.095	0.101



해석 대상 D600, D300, D200, D150의 직경에 대한 각각의 회귀분석식의 편차를 환산중량에 따라 분석한 후 이를 고려하여 작성한 것이다. 신뢰도와 가스 파이프라인의 직경에 따른 보정이 가능하도록 본 연구에서 최종적으로 제안한 진동추정식은 식 (5)와 같다.

$$Vel. = \alpha + \beta S_e + \gamma \quad (5)$$

$$\beta = 0, \quad Vel. = \alpha + \gamma$$

$$\beta = 1.28, \quad Vel. = \alpha + 0.212 + \gamma$$

$$\beta = 3, \quad Vel. = \alpha + 0.495 + \gamma$$

여기에서

$$\alpha = 0.2472(S.W.)$$

$$\beta : \text{신뢰성 지수}(0, 1.28, 3)$$

$$S_e : \text{표준오차}(=0.165)$$

$$\gamma : \text{가스관경에 따른 속도 보정 값}(Fig. 14)$$

#### 4.2 가스 파이프라인의 방진시스템

식 (5)에 의해서 추정된 가스 파이프라인의 진동 속도 응답이 가스 파이프라인의 진동 기준(한국가스공사의 경우 2.0 cm/s)을 초과하게 되는 경우에는 진동기준을 만족할 수 있는 방진 대책의 수립이 필요하다. 방진 대책을 수립하기 위한 흐름도를 Fig. 15와 같이 제안하였으며, 방진 대책 수립 과정에서 소극적인 방법인 “차량 통행 속도 제한”과 적극적인 방법인 “방진시스템” 사용으로 인해 얻을 수 있는 가스 파이프라인의 진동 저감효과를 다음과 같이 정립하였다.

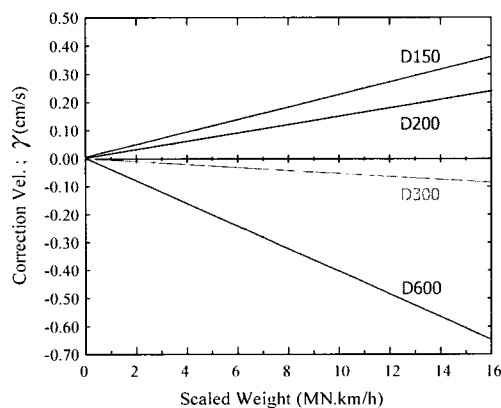


Fig. 14 Correction by gas pipeline diameter

(1) 차량 통행 속도 제한  
식 (5)의 진동 추정식과 Fig 15를 사용하여 추정된 진동응답 결과가 진동 기준치를 초과하게 되면 우선적으로 차량의 통행 속도를 제한하는 방법을 사용할 수 있다.

그러나 이 방법은 차량의 통행량, 통제방법 등을 고려하여 신중하게 결정되어야 한다. 차량의 통행 제한 속도를 결정하는 방법은 식 (5)의 “환산중량”항에서 주행속도를 미지수로 하여 Fig. 16과 같은 그래프로 나타내었다.

(2) 방진시스템 적용

Fig. 17은 방진시스템이 적용된 상태에서 해석한 결과를 사용하여 작성하였으며, 가스 파이프라인의 직경에 따라 적용되는 방진행어의 스프링 강성이 다른 점을 고려하여 가스 파이프라인 직경 별로 세분화하였다. 가스 파이프라인의 직경 D600, D300, D200, D150에 대한 방진행어의 스프링 강성은 각각 300 N/mm, 120 N/mm, 60 N/mm, 60 N/mm으로 하나의 가스 파이프라인 직경에 대해 검토한 2가지의 방진행어 중 보다 효율적인 스프링 강성을 갖는 방진행어를 선택하였다.

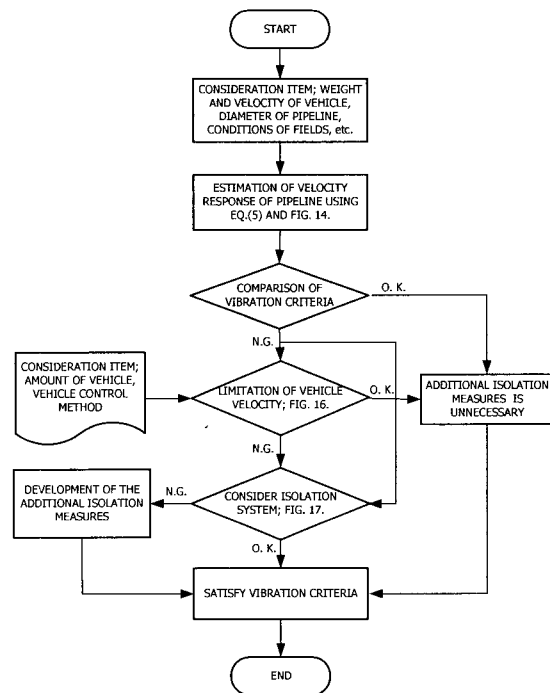


Fig. 15 Flowchart for isolation

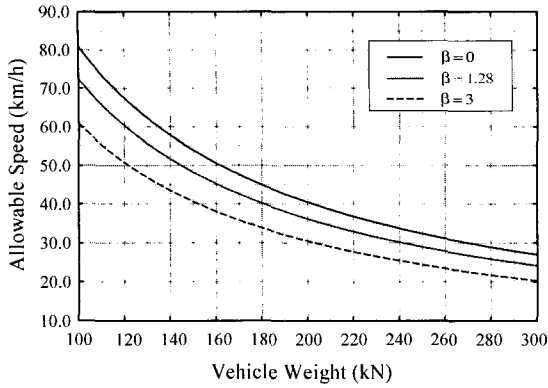


Fig. 16 Possible vehicles velocity according to weight of vehicles

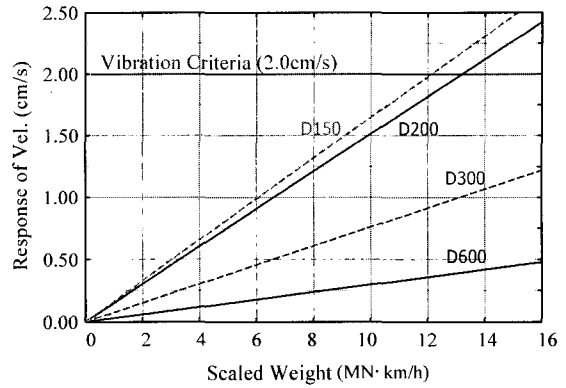


Fig. 17 Vibration response of aerial gas pipeline with isolation system

## 6. 결론

차량의 통행으로 인해 가스 파이프라인에 발생하는 진동 응답을 실험에 의해 평가하고 최종적으로 가스 파이프라인의 정량적인 방진 대책을 제안하기 위한 본 연구결과는 다음과 같다.

1. 실험 및 해석적 방법에 의해 가스 파이프라인의 진동 속도 응답을 추정할 수 있는 진동 추정식을 신뢰도 정도에 따라 50%, 90%, 99.9%로 구분하여 제안하였다. 제안된 식에서는 차량 중량과 주행속도를 "환산중량"이라는 하나의 항으로 새롭게 정의하였으며, 진동규준을 만족할 수 있는 환산중량을 신뢰도 정도에 따라 간편하게 결정할 수 있도록 하였다.

2. 현재의 가스 파이프라인 노출방법을 기준 할 때 8.1 MN·km/h(직경 200 mm, 신뢰도 50%기준)를 초과하는 환산중량이 작용되면 한국가스공사의 진동 규준인 2.0 cm/s 이상의 진동속도 응답이 발생하는 것으로 나타났다.

3. 진동 추정식을 사용하여 가스 파이프라인의 진동 속도 응답을 추정한 결과 값이 진동 규준을 초과하는 경우 차량의 주행속도를 제한하는 소극적인 방법과 방진시스템을 사용하는 적극적인 방법으로 구분하여 정량적인 평가가 가능한 방진 대책을 새롭게 제시하였다.

## 참고 문헌

- (1) 박연수, 강성후, 박선준, 2001, "차량진동에 대한 노출 가스관의 방진시스템 개발을 위한 실험적 연구", 한국소음진동공학회논문집, 제 11 권, 제 5 호, pp. 131~139
- (2) 박연수, 1999, "건설진동에 대한 가스배관의 방진장치 개발, 연구보고서, 한국가스공사연구개발원.
- (3) 박연수, 박선준, 1999, "차량 하중하에서 가스관의 진동측정 및 평가", 한국소음진동공학회 추계학술대회 논문집, pp. 572~577.
- (4) 박정식, 윤영선, 1997, "현대통계학", 다산출판사.
- (5) Chopra, A. K. 2001 Dynamics of Structures (2nd), Prentice Hall.
- (6) McConnell, K. G. 1995 Vibration Testing, John Wiley & Sons.
- (7) Strawberry Tree Inc. 1995 WorkBench PC for Windows Owner's manual(ver. 5.01).
- (8) Harris, C. M. 1997 Shock and Vibration Handbook, McGraw Hill.
- (9) MacNeal-Schwendler Corp. 1998 MSC/ NASTRAN User Manual.
- (10) MacNeal-Schwendler Corp. 1998 MSC/ PATRAN User Manual.