

발파진동에 의한 매설가스관의 진동 해석

† 정석영 · 박춘수 · 홍성경 · 김준호 · 고재필
한국가스공사 연구개발원, *충남대학교 토목공학과
(2002년 2월 8일 접수, 2002년 3월 4일 채택)

Vibration Analysis of Buried Gas Pipeline by Blast Vibration

S. Y. Jeong · C. S. Park* · S. K. Hong · J. H. Kim and J. P. Koh
R & D Center, Korea Gas Corporation
*Dept. of Civil Engineering, Chungnam University
(Received 8 February 2002 ; Accepted 4 March 2002)

요 약

지하철 공사나 도로 공사에서는 다양한 건설장비의 사용으로 인해 발생하는 진동이 가스관에 직·간접적으로 영향을 미치고 있다. 특히, 매설가스관은 매설된 위치와 근접한 곳에서 시행되는 발파로 인한 진동영향이 큰 상태이다. 매설가스관 근처의 발파작업시 발생하는 진동에 대한 응답을 해석하기 위해서 등가선형해석법을 적용하여 지반의 비선형거동을 구현하였다. 해석 결과, 매설가스관에서의 가속도 응답치는 실측치와 근사한 결과를 보였고, Peak치 발생시간도 실측치와 거의 일치하였다. 그러므로 매설가스관의 동적해석을 할 때 일반적인 지진해석 메카니즘의 적용이 가능함을 알 수 있었다.

Abstract - In subway or road construction, the vibration caused by various construction equipments influences gas pipelines directly or indirectly. Especially buried gas pipelines are influenced by the blast occurred near the pipeline buried place. To analyze vibration response of buried gas pipeline caused by blasting works, the nonlinear behavior of ground is realized by applying equivalent linear analysis. According to the results of this analysis, the acceleration response values of gas pipeline are close to the measured values and the occurring time of peak values are agreed to the measured values. Thus, It is concluded that conventional seismic analysis mechanism can be applied to the dynamic analysis of buried gas pipeline.

Key words: Vibration Analysis, Blast Vibration, Gas Pipeline

1. 서 론

인간의 경제활동과 문화생활을 원활하게 하고 삶의 질을 더욱 향상시키기 위하여 가스, 전기, 송유, 통신, 수도관 등과 같은 라이프 라인에 대한 투자와 이들 시설물에 대한 안정적 공급을 위한 노력이 지속적으로 요구되고 있는 실정이다. 1995년 4월 28일, 대구지하철공사장에서

에서 가스폭발 사고가 발생하였으며 이 사고로 218명의 사상자와 42억원의 재산 피해가 발생하였다. 그러므로, 인구가 많은 밀집지역에 건설된 가스관련 시설물은 주민들의 안전과 보호를 최우선으로 지키기 위해서는 집중적인 안전관리가 필요하다. 이와 같이 중요 시설물인 가스관은 다양한 건설 진동하중을 받고 있는 상태이며, 특히 지하철 공사나 도로 공사에서

건설장비의 작동으로 인하여 발생하는 진동은 가스관에 직접 또는 간접적으로 지대한 영향을 미치고 있다. 특히, 매설가스관은 매설된 가스관의 위치와 인접한 곳에서 시행되는 발파로 인한 진동의 영향이 가장 크다.

본 연구에서는 이와 같이 발파진동에 의하여 영향을 받고 있는 매설가스관에 대하여 안전성을 해석하였다. 발파작업 수행시 발생하는 진동에 대한 응답을 평가할 수 있는 등가선형해석법을 사용하여 지반의 비선형 거동을 분석하고, 프로그램을 이용하여 얻은 해석치를 가스관에서의 실측치와 비교 분석하여 해석치의 적합성을 규명하고자 한다.

2. 이론 및 측정 방법

2.1. 등가선형해석

등가선형해석은 변형률에 따라 비선형적으로 거동하는 지반을 선형적으로 모사할 수 있도록 하는 해석으로써, 복잡한 비선형거동을 하는 지반의 물성을 등가의 선형거동을 하는 물성으로 단순화하여 선형해석을 수행하는 방법이다.

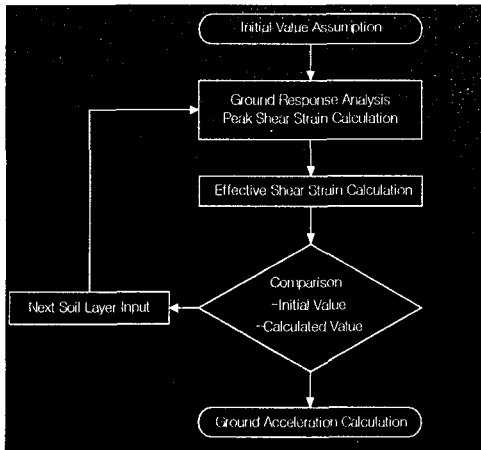


Fig. 1. Flowchart of program analysis.

지진동 또는 진동하중이 가해지는 지반의 거동은 비선형 히스테리시스 응력-변형률 거동으로 표현된다. 히스테리시스 응력-변형률 거동은 진동하중 재하에 대한 응답으로 인하여 발생하는 에너지 손실을 보여주는 것으로, 지반의 단순화된 일계도 시스템이 동일한 에너지 손실을 발생시키도록 하는 개념으로 비선형 시스템을 동등한 선

형 시스템으로 단순화하는 것이다. 등가선형해석에서 등가의 거동으로 단순화되는 지반의 물성은 전단탄성계수와 감쇠비이다.

등가선형 해석과정은 Fig. 1과 같다. 첫째, 시스템의 각 요소에서 최대전단탄성계수와 감쇠비의 초기치를 이용하여 입력진동이 가해졌을 때의 최대 전단변형률 시간이력을 계산한다. 둘째, 각 요소에서 계산된 유효 전단변형률의 시간이력에 상응하는 동적지반특성의 설계곡선에서 지반특성치인 전단탄성계수와 감쇠비를 선택한다. 셋째, 대입한 동적지반특성과 설계곡선에서 구한 값이 서로 일치할 때까지 접근된 입력치를 이용하여 반복계산을 함으로써 최종응답을 계산한다.

2.2. 발파진동의 측정 및 분석 방법

발파진동의 현장실측은 현재 공사가 진행되고 있는 ○○도시철도 ○공구 터널발파 현장주위에 매설되어있는 도시가스관에서 실시하였다.

가스관은 지하 1.2m지점에 도로측면의 인도를 따라서 매설되어 있다. 가스관은 직경이 200mm이고 압력이 5.0kg/cm²인 중압관이다.

○○도시철도공사 현장은 건물 및 가스관과 10m이상 이격되어 있으므로 제어발파에 의한 암굴착이 가능한 지역이다. 지하 10m이하에서는 NATM공법에 의한 제어발파에 의하여 암굴착이 실시되고 상부에서는 유압잭 및 팽창성 파쇄재를 이용한 무진동공법이 적용되고 있다.

측정을 위해 사용된 가속도 센서는 모두 6개로써 가스관의 수직방향과 수평방향의 진동을 측정할 수 있도록 가스관에 2개의 센서를 설치하였고, 지표면에도 수직방향과 수평방향의 진동을 측정할 수 있도록 센서를 설치하였다. 또한 발파지점으로부터 수직거리 30m, 수평거리 10m 및 25m 떨어진 도로변에 수직방향의 진동을 측정할 수 있도록 센서를 설치하였다. 가속도센서는 지표면과 가스관 위에 완전히 부착시켰으며 일체로 거동하여 진동을 측정할 수 있도록 하였다. 여러 지점에서 진동을 측정하여 거리에 따른 영향을 확인할 수 있게 하였고, 지표면과 가스관에서 진동을 동시에 측정하여 상부층으로 갈수록 진동가속도가 증폭되는지 확인할 수 있도록 하였다. 지층은 지표면부터 매립층, 봉적층, 풍화암층, 경암으로 구성되어 있다.

발파진동의 측정은 Fig. 2와 같은 계통도를 통하여 이루어졌다. 발파로 인해 발생하는 지

반의 진동을 지반 및 가스관에 고정시킨 가속도센서를 통하여 전기적인 신호로 받아들인 후 미미한 전기적 신호를 증폭기를 이용하여 증폭시켰다. 증폭된 신호를 data recorder에 저장하고 data shuttle을 통하여 아날로그 신호를 디지털 신호로 변화시켜 컴퓨터에 저장하였다. 저장된 데이터는 범용 데이터분석 프로그램을 이용하여 주파수분석과 적분을 통한 속도 값을 얻었다.

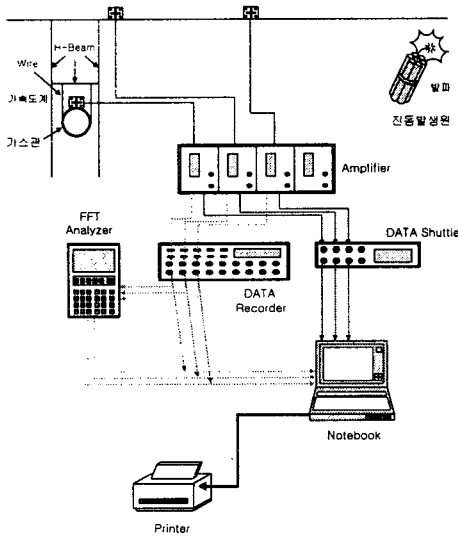


Fig. 2. Diagram of vibration measurement.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1. 모델링 및 입력데이터

비선형해석 유한요소 프로그램은 등가선형해석법을 사용하여 지반의 비선형거동을 구현하고 있다.

지반해석단면에 대한 모델링은 Fig. 3과 같이 구성하였다. 해석모델의 측면 경계조건은 원하는 지점에서의 지진응답에 영향을 주지 않도록 결정되어야 한다. 그리고 효율적인 계산 측면에서는 유한요소해석시의 요소크기를 최소화시키는 작업은 곧 해석단면의 최소화를 의미하게 되며, 단면이 감소함에 따라 경계조건이 해석결과에 미치는 영향이 증가하게 된다. 측면경계의 형태는 요소경계, 점성경계, 전달경계 등이 있다. 요소경계 및 점성경계의 위치는 지반의 변형률과 감쇠율에 따라 결정될 수 있으나 일반적으로 상부구조물의 측면으로부터의 거리가 구조물치수의 3배 이상이 되어야 한다.

여기서는 측면경계를 전달경계로 하였다.

하부경계조건은 일반적으로 강체 경계조건으로 가정할 수 있으며, 원하는 지점에서의 응답에 영향을 주지 않도록 구조물 하부로부터 충분한 거리를 두고 기반암과 위치시켰다. 지반은 58개의 node, 40개의 element로, 가스관은 4개의 beam요소로 모델링하여 해석하였다.

지반-구조물 상호작용에 있어 지반의 비선형특성을 고려하기 위한 등가선형해석을 위해서는 지반의 전단탄성계수, 감쇠율, 포아송비, 단위중 등이 결정되어야 하며, 이중 전단탄성계수 및 감쇠율은 전단변형률의 함수로 표시된다.

특히, 지반의 비선형성 때문에 동적지반해석은 변형률에 따른 변화특성을 관계곡선 혹은 공식으로 도출하여 등가선형 해석에 이용하고 있다. 현재까지 많은 시험결과들이 조합되어 변형률 변화에 따른 동적 지반특성의 변화식들이 제시되고 있으나 이들은 상당히 큰 편차를 보이고 있으며, 또한 포아송 비는 측정이 어렵기 때문에 일정한 범위 내에서 가정하는 경우가 많다. 이런 이유 때문에 동적탄성계수가 사용하기는 편리하나 동적전단계수를 환산해야하는 경우 포아송 비를 일정하게 가정할 영향 때문에 실제로 압축성이 더 큰 재료의 거동을 나타낼 수 있으며, 따라서 복잡하더라도 지반거동의 전단변형의 유사화에 더 효율적인 동적전단탄성계수를 해석에 이용하는 것이 합리적이다.

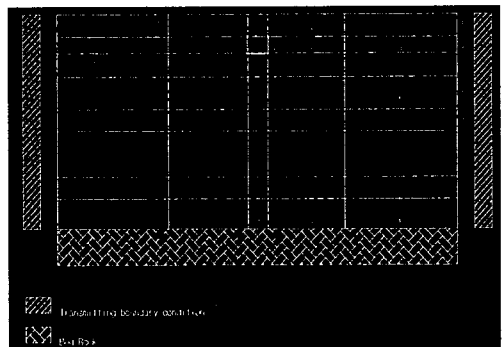


Fig. 3. Modeling of ground.

지반강도의 추정에 사용된 경험식에 의한 값들의 편차가 상당히 크므로 경험식으로 지반의 강도를 추정하는 데는 세심한 주의가 요구된다. 특히, 표준관입시험에의 N치에 의해 지반강도를 추정하는 경우는 사용할 경험식의 선택에 따라 그 결과가 매우 달라지므로 여러 경험식에 대한 평균값을 사용하였다.

단위중량, 포아송비, 전단탄성계수, 감쇠비는 지반조사결과와 국내지반 실험결과를 인용하여 사용하였다. Table 1은 지반해석에 사용된 각 층에 대한 대표적인 지반계수를 나타낸 것이고, Fig. 4와 5는 국내토질에 대하여 실험한 변형률 크기에 따른 정규화 전단탄성계수 감소 곡선 및 감쇠비 곡선을 나타낸 것이다.

Table 1. Input data of program.

Soil profile	Poisson's ratio	Unit weight (t/m ³)	Shear modulus : Low (t/m ²)	Shear modulus : High (t/m ²)	Damping ratio
Fill layer	0.42	1.8	6722	2067	0.07
Colluvial deposit	0.40	1.9	116171	5167	0.05
Weathering rock	0.35	2.1	1167857	184570	0.03

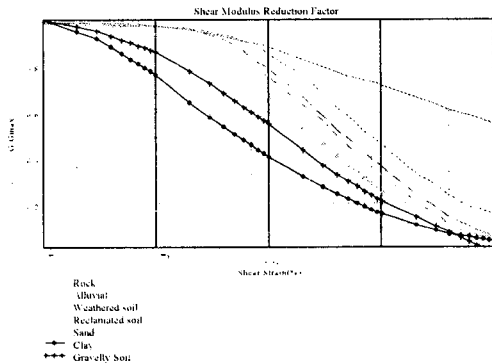


Fig. 4. Relation of shear strain and shear modulus reduction factor.

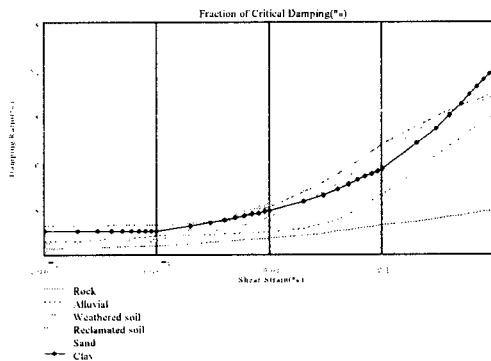


Fig. 5. Relation of effective shear strain and fraction critical damping.

3.2. 해석결과 및 고찰

Table 2는 발파진동 실측치를 나타낸 것이다. 가스관과 지표면에서의 진동치를 비교할 때 지표면에서의 진동치가 가스관에서의 진동치 보다 크게 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 진동파는 상부로 전달되면서 증폭되는 것을 확인할 수 있었으며, 자유면인 지표면에서는 가스관과 비교하였을 때 약 20%정도 증폭되어 나타났다.

또한 발파지점으로부터 각각 10m와 25m 떨어진 지점에서 측정된 진동치를 비교하면 거리가 멀어짐에 따라 진동치가 감소하며 주파수도 저주파로 변하는 것을 확인할 수 있었다.

지반에서의 가속도의 응답은 기반에서 상부로 올라올수록 그 값이 커지는 것을 볼 수 있다. 가스관에서의 최대가속도 크기는 실측가속도와 근사한 결과가 나타났다.

지반의 증폭정도에 영향을 주는 요소는 지반의 전단파속도, 지반과 암반의 강성도 차이, 토층 두께, 입력지진의 세기, 연약지반층의 존재 여부, 지반과 암반의 밀도, 지반의 비선형 변형 특성 등 여러 가지가 있다. 당 현장에서 수직 방향으로 지반가속도가 크게 변화하지 않는 해석결과가 나온 것은 지반과 암반의 강성도 차이가 미미하고, 입력파로 0.08g이하의 가속도를 사용하였고, 비선형 변형특성이 작은 지반상태를 나타내고 있기 때문인 것으로 판단된다.

Table 2. Peak acceleration, peak velocity and frequency.

Division	Measurement peak value		
	Acceleration (g)	Velocity (cm/s)	Frequency (Hz)
Vertical (Pipeline)	0.075	0.465	27.3
Horizontal (Pipeline)	0.042	0.129	26.9
Vertical (Surface)	0.096	0.561	27.3
Horizontal (Surface)	0.073	0.533	51.8
Vertical (10m)	0.200	0.643	51.8
Vertical (25m)	0.081	0.319	38.6

Table 3. Response results of gas pipeline and surface.

Division	Peak acceleration response values (vertical) (g)	Peak acceleration response values (horizontal) (g)
Node 9 (Surface)	0.076	0.043
Node 17 (Surface upper gas pipeline)	0.076	0.043
Node 18 (1.3m depth)	0.076	0.043
Node 20 (1.5m depth)	0.076	0.043
Node 22 (3m depth)	0.068	0.034

해석결과와 실측치의 가속도와 속도의 Peak 치 발생시간을 비교하여 보면 가속도의 경우 프로그램을 이용한 해석에서 Peak치 발생시간은 수직방향과 수평방향에서 모두 실측치와 거의 일치하는 결과를 나타냈다. 또한 속도의 경우 프로그램을 이용한 해석에서 수평성분의 Peak치 발생시간은 실측치와 근사하였으며, 수직성분의 경우는 약간의 차이가 있었다.(Table 4. 5 참조)

Table 4. Comparison of occurrence time by acceleration peak value.

Acceleration	Gas pipeline		Surface	
	Vertical component (sec)	Horizontal component (sec)	Vertical component (sec)	Horizontal component (sec)
Measured	0.618	0.690	0.604	0.816
Calculated	0.617	0.688	0.606	0.817

Table 5. Comparison of occurrence time by velocity peak value.

Velocity	Gas pipeline		Surface	
	Vertical component (sec)	Horizontal component (sec)	Vertical component (sec)	Horizontal component (sec)
Measured	0.612	0.728	0.608	0.642
Calculated	0.604	0.732	0.598	0.640

Fig. 6과 7은 가스관에서 측정된 수직방향의 가속도 실측치와 해석치를 나타낸 것이다. 가속도 크기 및 전체적인 파형이 모두 거의 일치하고 있다. Fig. 8과 9는 가스관에서 측정된 수평방향의 가속도 실측치와 해석치를 나타낸 것이다. 가속도 크기 및 전체적인 파형이 수직방향과 마찬가지로 거의 비슷한 양상을 보이고 있다.

프로그램을 이용한 구조해석 결과에서 가스관에서의 수직방향 가속도 응답은 0.076g로 실측한 가속도 0.075g와 근사한 결과를 나타냈고, 수평방향 가속도 응답도 0.043g로 실측치 0.042g와 근사한 결과를 나타냈다. 해석 프로그램을 이용한 구조해석을 하여 가스관에서의 진동치를 비교하였을 때 그 결과가 실측치와 잘 일치하는 것을 알았고, 발파진동도 지진해석 메카니즘 이용이 가능함을 확인할 수 있었다.

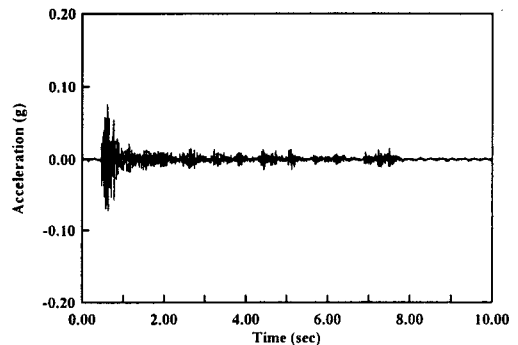


Fig. 6. Measured acceleration history of gas pipeline(vertical).

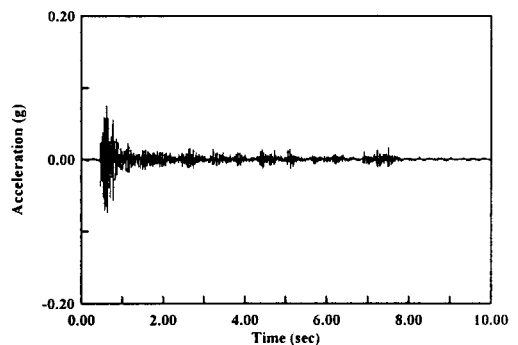


Fig. 7. Analytical acceleration history of gas pipeline(vertical).

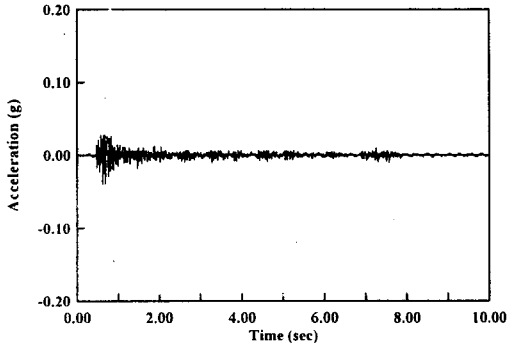


Fig. 8. Measured acceleration history of gas pipeline(horizontal).

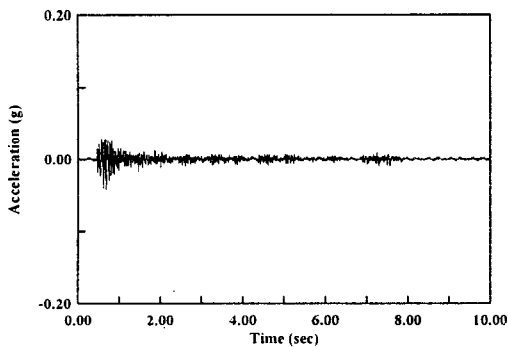


Fig. 9. Analytical acceleration history of gas pipeline(horizontal)

4. 결 론

지하철공사의 터널구간에서 발생하는 발파진동에 대한 매설가스관의 응답을 평가하기 위하여 지반의 비선형 거동을 해석하였고 프로그램부터 얻은 해석치와 실측치를 비교 분석하여 해석치의 적합성을 규명하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 발파진동에 의한 매설가스관에 작용하는 진동측정치는 지표면에서 0.096g, 가스관에서는 0.075g로 지표면에서의 가속도가 가스관보다 20%정도 증폭되어 크게 나타났으므로 지표면에서 측정된 진동치로부터 매설가스관의 진동치를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 발파진동에 의한 매설가스관에서 수직방향의 가속도 해석치는 0.076g, 실측치는 0.075g이고, 수평방향의 가속도 해석치는 0.043g, 실측치는 0.042g로 각각 근사한 결과를 보였으며, Peak치 발생시간도 실측치와 거의 일치하고 있어 매설가스관을 동적 해석할 경우 일반적인 지진해석 메카니즘 적용이 가능함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] A.A. Stamos, D.E. Beskos, "Dynamic Analysis of Large 3-D Underground Structures by the BEM", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.24, 1995, pp. 917-934.
- [2] C.H. Dowding, Construction Vibrations, Prentice Hall, 1996. pp. 32-202.
- [3] D. Barros, F.C.P., J.E. Luco, "Discrete Model for Vertical Vibrations of Surface and Embedded Foundations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.19, 1990, pp. 289-303.
- [4] D.S. Kim, K.H. Stokoe, "Torsional Motion Monitoring System for Small-Strain Soil Testing", Geotechnical Testing Journal, Vol.17, No.1, 1994, pp. 17-26.
- [5] H. Shakib, N. Shakib, "Analysis of Buried Pipelines to Random Ground Motion in Homogeneous Medium", Proceedings of Tenth European Conference on Earthquake Engineering, 1995, pp. 2185-2190.
- [6] J.E. Luco, J.G. Anderson, "Soil-Structure Interaction Effects on Strong Motion Accelerograms Recorded on Instrument Shelters", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.19, 1990, pp. 119-131.
- [7] J. Lysmer, FLUSH Manual, 1975.
- [8] R. Zhang, Y. Young, Y.K. Lin, , "Earthquake Ground Motion Modeling", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.117, 1992, pp. 2133-2148.
- [9] 건설진동에 대한 가스관의 설계지침 및 안전성평가 시스템 개발, 한국가스공사 연구개발원, 2000.11.
- [10] 홍성경, 김준호, 정석영, "차량하중을 받는 노출 가스배관의 진동특성 연구", 한국산업안전학회지 제14권 제4호, 1999.12. pp. 71-77.