

# 연약지반 매설 가스배관의 응력 모니터링 시스템

홍성경, 김준호, 정석영  
한국가스공사 연구개발원

## Stress Monitoring System for Buried Gas Pipeline in Poor Ground

Seong Kyeong Hong, Joon Ho Kim, Sek Young Jeong

Korea Gas Corporation, R&D Division

### 1. 서론

본 논문에서는 지반 개량공사로 침하가 진행되고 있는 연약지반에 매설되어 있는 가스배관의 안전성여부를 판단하기 위해 구축한 배관응력 모니터링 시스템을 소개하였다. 연약지반에 매설되어 지반과 동시에 침하되는 가스배관의 응력 데이터를 획득하는 일은 현장의 회소성 때문에 매우 어려운 일이었으나, 배관의 안전을 확보하기 위한 현장의 요청으로 배관 침하와 배관응력 데이터를 획득할 수 있었다. 1 년여의 지반개량 공사기간 동안 발생한 배관의 최대침하량은 47 cm로 나타났으며, 이 값은 지반개량 공사 설계시 예상한 침하량 (90 cm)에 미치지 못하는 작은 값으로 가스배관의 안전에는 문제가 없는 것으로 판명되었다.

본 논문에는 공사 시작 전에 배관의 안전을 확인하기 위한 목적으로 구조해석 프로그램을 사용하여 배관응력을 시뮬레이션한 결과가 포함되어 있으며, 구조해석을 수행한 결과, 배관에 발생하는 응력은 배관의 탄성범위 내에 있음을 확인하였다. 지반개량 공사로 지반과 배관이 동시에 침하되는 450 m 구간에 대하여 지반 침하에 따르는 배관의 응력을 해석하였고, 매설배관 및 지반 계층자료를 이용하여 가스관의 안전성을 검토하였다. 또한 공사기간 동안 연약지반 배관의 안전성을 확보하기 위한 목적으로 구축한 원격제어 배관응력 모니터링 시스템의 계측 결과를 나타내었고, 연약지반 배관응력 모니터링 시스템 및 개발 프로그램을 소개하였다.

### 2. 이론

지하에 매설되어 있는 가스배관은 토압하중, 차량하중, 지반침하 등의 외부하중에 의한 영향을 지속적으로 받고 있다. 특히 연약지반에 매설되어 있는 배관은 지반침하로 인하여 커다란 영향을 받고 있는 것으로 알려지고 있다. 연약지반은 지반의 공학적 성질이 복잡한 특성을 가지고 있으며, 지반의 강도가 작고 특히 심도가 깊을 때는 침하 등의 변형이 매우 크다. 특히 지반개량을 실시하는 연약층과 단단한 층의 경계에 가스배관이 매설되어 있는 경우에는 경계부분에서 매우 큰 응력이 발생될 수도 있기 때문에 침하에 대한 가스배관의 안전성검토 및 지속적인 계측관리가 반드시 이루어져야 한다. 배관에 작용하는 내압이나 토압, 차량하중 등으로 가스배관에 발생하는 응력을 나타내면 다음과 같다.<sup>[1,2]</sup>

(1) 내압에 의한 원주방향 응력

$$\sigma_{\alpha} = \frac{P \cdot (D-t)}{2t} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{\alpha}$ 는 내압에 의한 배관의 원주방향 응력,  $P$ 는 배관 내압,  $D$ 는 배관 외경,  $t$ 는 배관 두께이다.

(2) 내압에 의한 축방향 응력

$$\sigma_{\beta} = \frac{\nu \cdot P \cdot (D-t)}{2t} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_{\beta}$ 는 내압에 의한 배관의 원주방향 응력,  $\nu$ 는 배관의 Poisson 비이다.

(3) 연직하중에 의한 원주방향 응력

토압, 자동차하중, 열차하중, 공사하중 등의 연직하중이 작용하고 있는 경우

$$\sigma_{\omega} = \frac{D_e K_b W_b R E I_t}{Z_t (E I_t + 0.061 K_b R^4 + 2 K_x D_e P R^3)} \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_{\omega}$ 는 연직하중에 의한 배관의 원주방향 응력,  $W_b$ 는 단위길이당 작용하중,  $D_e$ 는 처짐시간계수,  $K_b$ 는 관의 휨모멘트 계수,  $K_x$ 는 관의 수평방향 변형계수,  $R$ 은 배관 반경,  $P$ 는 배관 내압,  $K_h$ 는 수평방향 지반반력계수,  $E$ 는 배관의 탄성계수,  $I_t$ 는 배관의 단면2차모멘트,  $Z_t$ 는 배관 단면계수,  $t$ 는 배관두께이다.

#### (4) 합성 응력

매설배관의 축방향응력, 원주방향 및 전단응력의 합성응력은 다음과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{\omega}^2 + \sigma_b^2 - \sigma_{\omega} \sigma_b + 3\tau^2} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_{\omega}$ 는 원주방향 응력,  $\sigma_b$ 는 축방향 응력,  $\tau$ 는 관축 직각방향 전단응력이다.

### 3. 현장상황 및 응력 모니터링 시스템

모니터링 대상인 연약지반 현장은 한국가스공사 00구간으로 가스배관이 매설되어 있는 상태에서 연약지반 개량공사를 시행하였다. 현장 지반은 매립층, 퇴적층, 풍화토, 기반암 등으로 구성되어 있으며, 가스관은 최상부층인 성토매립층에 매설되어 있다. 매립층과 지지층 사이의 연약층(퇴적층)은 7 m 내외로 비교적 두꺼운 층을 형성하고 있으며 N치가 2 이하로 매우 연약한 점토층이다.

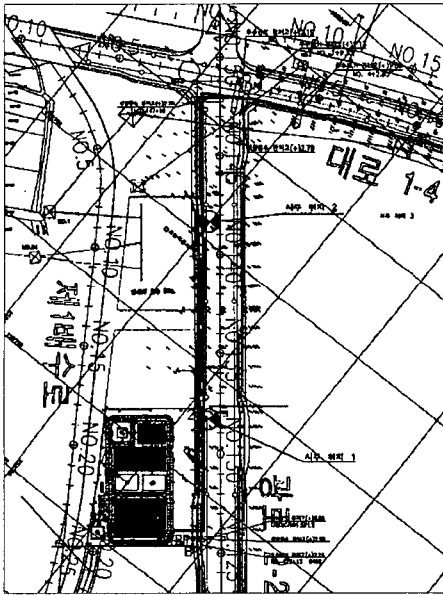


Fig. 1 현장개략도

가스관은 건설예정인 도로 측부를 따라 매설되어 있으며, 도로 구조물을 건설하기 위하여 연약지반 개량공법인 Pack Drain과 압성토공법을 적용하였다. 연약지반 개량공법을 적용하기 전의 가스관 심도는 1.9 m이며, 여기에 3.5 m 내외의 2차 매립 및 압성토 공사가 추가로 시행되었다. 지반 개량공사 시작 전에 지반개량 공사로 지반과 배관이 동시에 침하되는 450 m 구간에 대하여 구조해석을 수행하여 배관의 안전성을 검토하였고, 공사기간 동안의 배관 안전성을 확보하기 위하여 가스배관 응력 모니터링 시스템을 운용하였다.<sup>[3]</sup>

Fig. 1은 00공급관리소 주변의 공사도면을 나타낸 것으로 굵은 선이 가스관의 매설위치이며, 광로 2-2 도로를 건설하기 위한 연약지반 개량공사 시행 구간이다. 본 연구에서는 매설배관 및 지반의 계측자료를 이용하여 압성토 및 최종단계에서의 가스관의 안전성을 검토하였다.

#### 3-1. 침하측정센서 및 스트레인게이지 설치현황

연약지반 개량공사로 지반과 배관이 동시에 침하되는 450 m 구간에 대하여 배관의 구조해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 최대응력의 발생이 예상되는 배관의 3개 지점을 선정하였다. 공사 현장의 3개 지점을 굴착, 배관을 노출시켜 배관 상부와 측부에 각각 2개씩, 3개 지점에 총 12개의 2축 스트레인게이지를 설치하였다. 노출된 배관 3개 지점의 배관 침하량을 측정하기 위한 침하관측공을 설치하였다. Fig. 2는 배관에 설치한 스트레인게이지와 수분침투를 막기 위한 방수처리를 나타낸 그림이다.

도로 시공회사에서는 연약지반의 변형상태를 파악하기 위하여 Fig. 3과 같이 침하판, 경사

계, 수위계, 간극수압계, 층별침하계 등을 설치하여 지반의 침하를 관찰하였다.

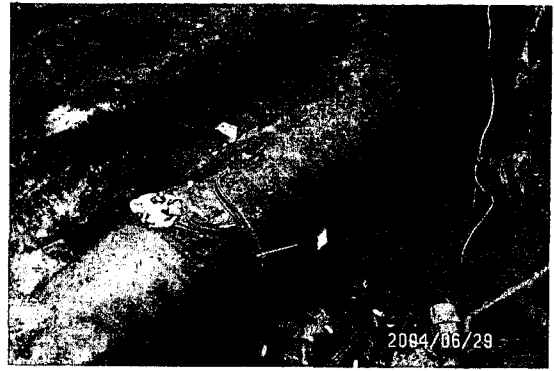


Fig. 2 스트레인게이지 배관설치 사진

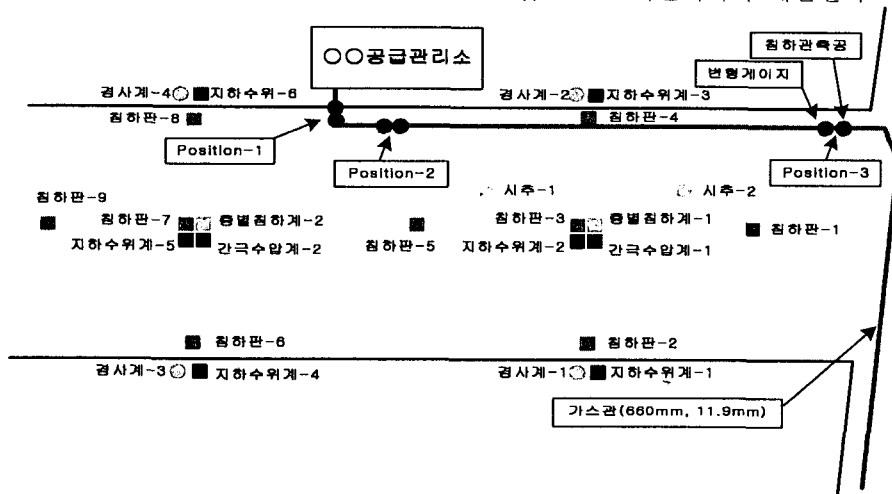


Fig. 3 지반 계측기 설치 위치도

### 3-2. 배관응력 모니터링 시스템

현장에 설치된 배관응력 모니터링 시스템은 인터넷만 연결되면 어디에서든지 배관응력을 모니터링 할 수 있도록 인터넷 기반으로 개발되었다. 시스템 본체는 펜티엄 컴퓨터를 이용하였고, 스트레인 측정용으로는 National Instrument사(이하 NI로 표기)의 Ethernet Network Module (FP-2000)과 스트레인 Module (FP-SG-140)을 조합하여 구성하였다. 본체에서 Position 1까지는 STP LAN 케이블을 사용하였고, Position 1에는 LAN을 분배하기 위한 스위치 Hub를 설치하고 여기에 스트레인 측정용 Ethernet Network Module을 연결하였고, 450 m 떨어진 Position 3과의 무선연결을 위하여 AP(Base)와 지향성 안테나를 설치하였다. Position 2에는 Position 1에서 분배된 LAN을 이용하여 Ethernet Network Module과 스트레인 Module을 구성하였다. Position 3에는 Position 1에서 분배된 LAN을 무선으로 연결하기 위한 AP(Subscriber)와 지향성 안테나, 스위치 Hub, Ethernet Network Module 등을 설치하였다.

3개 지점의 배관응력을 모니터링 하기 위한 배관응력 모니터링 시스템의 구동 프로그램은 그래픽 개발환경을 제공하는 LabVIEW 7.0을 이용하여 개발하였다. 3개 지점을 동시에 볼 수 있도록 1개의 화면으로 구성하였고, 배관의 응력을 막대그래프 타입으로 표현하여 시인성을 좋게 하였다. 각 Position 마다 배관상부, 배관측부 별로 구분하여 길이방향응력, 원주방향응력, 합성응력을 각각 나타내었다. 또한 각 방향의 응력과 발생하는 최대 합성응력을 그래프로 나타내었고, 1일 중 최대값을 저장하도록 구성하여 경향관리가 가능하도록 하였다.

현장에 설치된 배관응력 모니터링 시스템의 사진을 Fig. 4~5에 나타내었으며, Fig. 6에 모니터링 시스템의 현장설치 개략도를 나타내었다. Pipeline Stress Monitoring System의 Main 화면은 Fig. 7에 나타난 것과 같으며 그 결과를 사내 어디에서든지 볼 수 있도록 Web publishing을 실시하였으며, 현장의 시스템 컴퓨터는 연구개발원에서 원격제어하여 프로그램을 수정하고 데이터를 수집하였다.

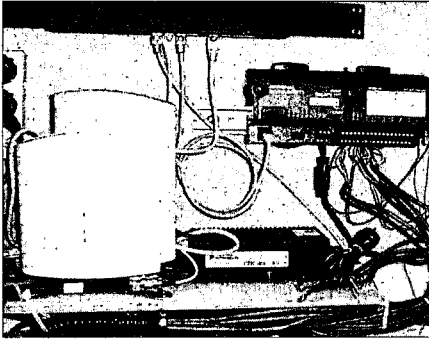


Fig. 4 모니터링시스템 현장 사진(내부)



Fig. 5 모니터링시스템 현장 사진

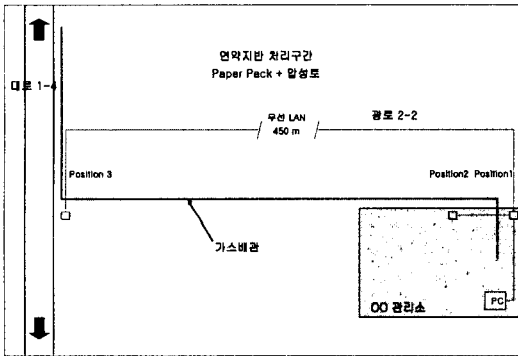


Fig. 6 모니터링 시스템 현장설치 개략도

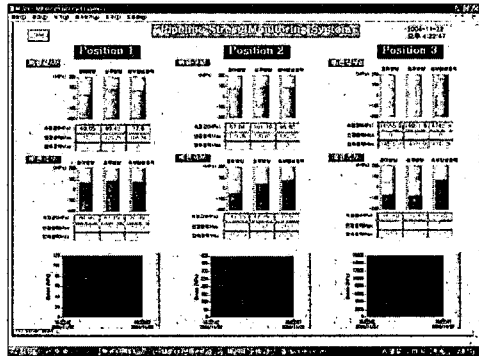


Fig. 7 배관응력 모니터링 시스템 Main 화면

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 배관응력 모니터링 해석

약 1년여 동안의 배관응력 모니터링 결과를 Position 별로 Fig. 8~10에 각각 나타내었다. 모니터링 결과, 배관에 걸리는 응력은 지반개량 공사를 시작한 이후 160일까지는 Position 1, 2, 3 모두 계속해서 증가하는 경향을 보였다. 170일 이후에는 모두 계속해서 감소하는 양상을 보였다. 이것은 압성토 높이 변화와 같은 주변 환경의 변화 없이 배관의 응력해소 현상이 나타나는 특이한 결과이다. 300일 이후부터는 변화가 없다가, 350일 이후 다시 증가하는 양상을 보이는데 350일 시점은 압성토를 제거하기 시작한 때이며, 압성토 제거 후에 배관의 응력이 증가하기 시작하는 현상은 더 많은 연구를 통해서 규명해야 할 것으로 보인다.

2005년 10월 현재 배관 응력은 공급압력으로 발생하는 배관의 응력을 제외하고 90~100 MPa 범위에 있다. 현재 배관의 가스압력 (3.5 MPa)으로 배관에 발생하는 원주방향 응력은 95.2 MPa이고, 여기에 배관의 축정응력 90~100 MPa을 추가하면 185.2~195.2 MPa로 항복 응력의 41~43.6% 수준의 응력이 걸리고 있다. 따라서 배관의 현재상태는 안전한 상태이며 향후 도로건설 공사 시 계속해서 배관의 감시가 필요한 상황이다. Fig. 9~10에 나타난 바와 같이 현장의 영향으로 스트레인 게이지가 훼손되어 데이터를 온전히 취득할 수 없었던 점은

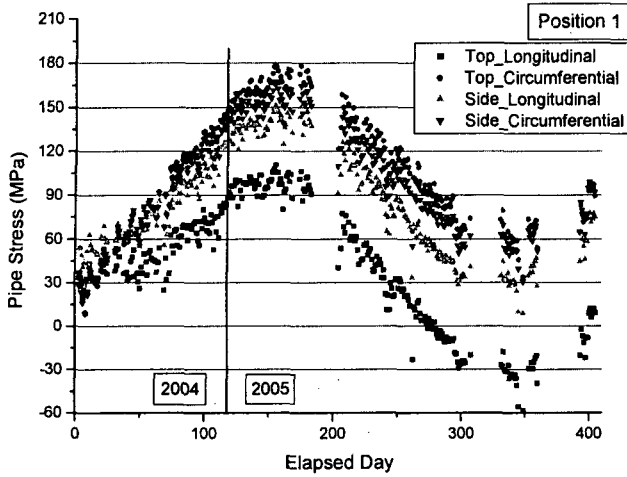


Fig. 8 배관응력 모니터링 결과  
(Position 1, 2004/09/03~2005/10/10)

아쉬운 부분이나, Position 1의 결과와 매우 유사한 결과를 보이기 때문에 본 결과만으로도 연약지반 개량공사 현장에 놓여 있는 배관의 거동을 파악하는 데는 문제가 없는 것으로 보인다.

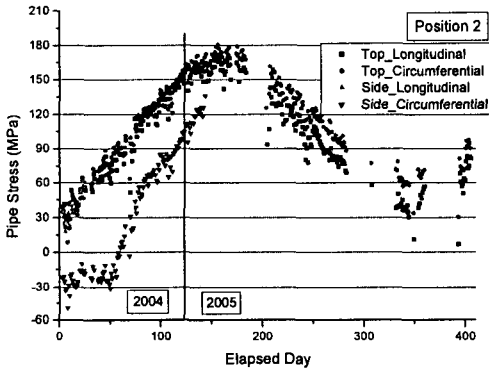


Fig. 9 배관응력 모니터링 결과  
(Position 2, 2004/09/03~2005/10/10)

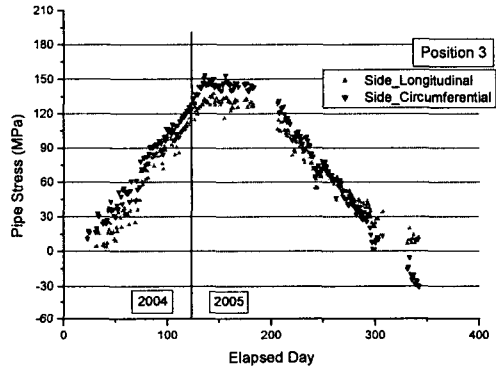


Fig. 9 배관응력 모니터링 결과  
(Position 3, 2004/09/03~2005/08/15)

#### 4.2 배관 침하관측공 및 침하관

Table 1은 배관에 설치된 침하관측공의 월별 측정치이며, 최대 침하량은 침하관측공-3에서 47 cm로 측정되었다. 침하관측공-1과 2는 성토가 가스관 직상부에 사면으로 쌓여있기 때문에 침하량이 상대적으로 작게 생기는 것으로 보이며 경과시간에 따른 침하량이 거의 같은 양상을 보이고 있고, 침하관측공-3은 60일이 경과한 후부터 큰 폭으로 침하량이 증가하고 있다.

Table 1 배관 침하관측공 계측 결과

관리번호	설치일	침하량(cm)					
		2004.7.28	2004.9.22	2004.11.10	2005.1.6	2005.4.20	2005.8.22
침하관측공-1	04.7.2	0.0	5.0	10.0	15.0	19.0	19.0
침하관측공-2	04.7.2	1.0	4.0	13.0	18.0	21.0	24.0
침하관측공-3	04.7.2	2.0	17.0	26.0	33.0	39.0	47.0

#### 4.3 지반침하로 인한 매설배관 구조해석

매설배관의 안전성을 검토하기 위해 구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN for Windows 2004를 사용하여 해석을 수행하였다. 가스배관의 관경은 660 mm, 두께는 11.9 mm이며, 관

리소 인입부구간 (50 m)와 직선구간 (450 m)에 대해 구조해석을 수행하였다. 경계조건은 관 리소 끝단은 완전고정, 인입부는 상하방향 구속, 직선구간 끝단은 완전고정하였으며, 내부압 력은 제외하고 해석하였다. 지반개량 공사로 인한 침하량이 90 cm로 예상되므로 450 m 구 간에 90 cm의 강제변위를 가하여 해석하였다. 배관에 발생하는 응력과 변형을 동시에 나타 낸 해석결과를 Fig. 11에 나타내었다. 관리소 인입부(0 m)와 직선구간의 끝단(450 m)에 응 력이 집중되고 있으며 직선구간의 끝단에서 최대응력이 발생함을 알 수 있다. 직선구간 끝 단에서 발생하는 응력은 완전고정한 경계조건의 영향으로 과도하게 나타나는 것으로 보이 며, 실제로는 관리소와 직선구간의 엘보우 부근과 직선구간의 끝단에서 120~180 MPa 범위 의 응력이 발생하는 것으로 판단된다. 이 결과로 엘보우 부분의 전후단과 직선구간의 끝단 부근 3개 지점에 스트레인 게이지를 설치하고 배관응력을 모니터링 하였다.

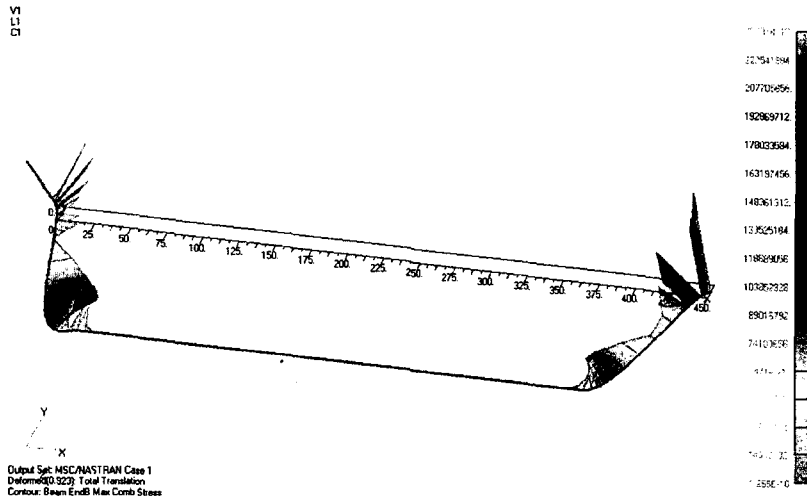


Fig. 11 연약지반 개량공사 발생응력 Simulation

## 5. 결 론

연약지반 개량공사로 인하여 침하영향을 받고 있는 한국가스공사 oo구간에 매설된 가스 배관의 모니터링 및 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 매설배관에 설치된 침하관측공의 계측결과, 2005년 8월 현재 가스배관의 최대 침하량은 47 cm로 나타났으며, 이 값은 지반개량 공사의 예상침하량에 미치지 못하는 값으로 배관의 안전에는 이상이 없는 것으로 판명되었다.

(2) 배관응력 모니터링 결과, 배관에 발생하는 응력은 배관상부 압성토 후 160일까지는 3 지점 모두 증가하는 경향을 보였으며, 170일 이후에는 모두 감소하는 양상을 보였다. 이것은 성토 높이의 변화 없이 배관의 응력해소 현상이 나타나는 특이한 결과이다. 또한 배관응력 구조해석 해석결과와 모니터링 결과가 비교적 좋은 일치를 보이고 있다.

(3) 2005년 10월 현재 측정된 배관응력은 90~100 MPa 범위에 있으며, 여기에 가스압력 (3.5 MPa)으로 발생하는 원주방향응력을 추가하면 185.2~195.2 MPa로 항복응력의 41~43.6% 수준의 응력이 걸리고 있다.

## 6. 참고문헌

1. 사단법인 한국강구조학회, 강구조공학, 구미서관, 2000
2. 과학기술원집부, 지중매설관의 조사 : 설계에서 시공까지, 과학기술, 1998, 257-316
3. 홍성경, 김준호, 정석영, 배관응력 모니터링 시스템의 개발 및 적용, 한국안전학회 춘계학술발표회, 2005, 21-26