

연약지반 배관응력 모니터링 시스템 개발 및 적용

홍성경[†] · 김준호 · 정석영

한국가스공사 연구개발원

(2005. 10. 27. 접수 / 2006. 1. 13. 채택)

Stress Monitoring System for Buried Gas Pipeline in Poor Ground

Seong Kyeong Hong[†] · Joon Ho Kim · Jeong Sek Young

Korea Gas Corporation, R&D Division

(Received October 27, 2005 / Accepted January 13, 2006)

Abstract : This paper introduces stress monitoring system for buried gas pipeline in poor ground. During the six months of improvement construction of poor ground, maximum settlement of gas pipeline is about 40 cm. This value represents relative small compared to the initial settlement estimation of ground improvement construction plan, 90 cm. Also, this paper includes the result of finite element analysis of gas pipeline to confirm safety of pipelines in poor ground. The stress monitoring system for gas pipeline was developed to guarantee the safety of buried gas pipeline in poor ground. Eventually, the ground improvement workings are ended safely and it is proved that the pipeline has no safety problem.

Key Words : pipeline, underground, monitoring system, poor ground

1. 서 론

본 논문에서는 지반 개량공사로 침하가 진행되고 있는 연약지반에 매설되어 있는 가스배관의 안전성을 판단하기 위해 구축한 배관응력 모니터링 시스템에 대하여 기술하였다. 연약지반에 매설되어 지반과 함께 침하되는 가스배관의 응력 데이터를 획득하는 것은 가스배관의 안전 확보 뿐만 아니라 학술적으로도 매우 가치 있는 일이다. 현장선정이 용이치 않아 데이터 수집에 어려운 점이 있었으나 배관의 안전을 확보하기 위한 현장의 요청으로 배관침하와 배관응력 데이터를 획득할 수 있었다. 약 6개월 동안의 지반개량 공사기간 동안 발생한 배관의 최대침하량은 약 40cm로 나타났으며, 이 값은 지반개량 공사 설계시의 예상침하량(90cm)에 미치지 않는 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, 이때 배관에 발생하는 응력은 배관의 탄성범위 내에 있음을 확인하였다. 지반개량 공사로 지반과 배관이 동시에 침하되는 450m 구간에 대하여 지반 침하에 따르는 배관의 응력을 해석하였고, 매설배관 및 지반 계층자료를 이용하여 가스배관의 안전성을 검토하였다. 또한 공사기간 동안 연약지반 배관의 안전성을 확보하기 위한 목적으로 구축한 원격제어 배관응력 모니터링 시스템의 계측 결과를 나타내었고, 연약지반 배관응력 모니터링 시스템 구축내용과 개발 프로그램을 기술하였다¹⁻³⁾.

2. 이 론

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. 또한 지반개량을 실시하는 연약층과 단단한

[†] To whom correspondence should be addressed.
hongsk@kogas.re.kr

층의 경계에 가스배관이 매설되어 있는 경우에는 경계부분에서 매우 큰 응력이 발생할 수도 있기 때문에 침하에 대한 가스관의 안전성검토 및 지속적인 계측관리가 반드시 이루어져야 한다.

배관에 영향을 미치는 하중에는 내압, 배관자중, 토압하중, 자동차하중, 열차하중 등의 주하중과 풍하중, 설하중, 온도하중, 지진, 타공사 하중 등의 종하중이 있다. 배관에 작용하는 응력에는 원주방향응력, 축방향응력과 합성응력 등이 있다⁴⁾.

2.1. 매설배관에 작용하는 하중

(1) 연직토압(상재하중)

매설배관에 작용하는 연직토압은 다음 식으로 표현된다.

$$W_v = \gamma \cdot h \cdot D \tag{1}$$

여기서, W_v 는 배관의 단위길이당 연직토압, γ 는 흙의 단위체적중량, h 는 배관 매설깊이, D 는 배관 외경이다.

(2) Marstone 하중

Marstone 하중은 다음 식으로 표현된다.

$$W_C = C_d \gamma B_d^2 \tag{2}$$

여기서, W_C 는 배관의 단위길이당 연직토압, C_d 는 하중전달계수, γ 는 흙의 단위체적중량, B_d 는 트렌치 폭이다.

(3) 자동차 활하중

자동차 활하중은 다음 식으로 표현된다⁴⁾.

$$W_T = \frac{2 \cdot T \cdot D}{L(a+2 h \tan\theta)}(1+i) \tag{3}$$

여기서, W_T 는 단위길이당 배관에 작용하는 차량하중, T 는 후륜하중 (9.6t, DB-24 하중 적용), a 는 접지폭, θ 는 분포각 (30~45°), L 은 차량점유폭, h 는 매설깊이, i 는 매설깊이에 따른 충격계수이다.

2.2. 배관의 작용하는 응력

(1) 내압에 의한 원주방향 응력

내압에 의한 배관의 원주방향응력은 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_{ci} = \frac{P \cdot (D-t)}{2t} \tag{4}$$

여기서, σ_{ci} 는 내압에 의한 배관의 원주방향 응력, P 는 배관 내압, t 는 배관 두께이다.

(2) 내압에 의한 축방향 응력

내압에 의한 배관의 축방향응력은 다음 식으로 표현된다.

$$\sigma_{ti} = \frac{\nu \cdot P \cdot (D-t)}{2t} \tag{5}$$

여기서, σ_{ti} 는 내압에 의한 배관의 축방향 응력, ν 는 배관의 Poisson 비이다.

(3) 연직하중에 의한 원주방향 응력

매설배관에 토압, 자동차하중, 열차하중 혹은 다른 공사 등의 연직하중이 작용하고 있는 경우, 원주방향의 응력은 다음과 같다⁴⁾.

$$\sigma_{co} = \frac{D_e K_b W_v R E I_i}{Z_i (E I_i + 0.061 K_h R^4 + 2 K_x D_e P R^3)} \tag{6}$$

여기서, σ_{co} 는 연직하중에 의한 배관의 원주방향 응력, W_v 는 단위길이당 하중, D_e 는 처짐시간계수, K_b 는 관의 휨모멘트 계수, K_x 는 관의 수평방향 변형계수, R 은 배관 반경, K_h 는 수평방향 지반반력계수, E 는 배관의 탄성계수, I_i 는 배관 단면2차 모멘트, Z_i 는 배관 단면계수이다.

(4) 활하중에 의한 축방향 응력

매설배관의 축방향 일부분에 차량하중이 적용된 경우에는 하중의 크기나 분포폭에 따라 응력이 다르며, 그 최대값은 다음과 같이 구한다⁴⁾.

$$\sigma_{to} = \frac{0.322 W_T}{Z_p} \sqrt{\frac{E I_p}{K_v D}} \tag{7}$$

여기서, σ_{to} 는 활하중에 의한 축방향 응력, W_T 는 차량하중, I_p 는 배관 단면2차 모멘트, Z_p 는 배관 단면계수, K_v 는 연직방향 지반반력계수이다.

(5) 합성 응력

매설배관의 축방향응력, 원주방향 및 전단응력의 합성응력은 다음과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{cs}^2 + \sigma_{ts}^2 - \sigma_{cs} \sigma_{ts} + 3\tau^2} \quad (8)$$

여기서, σ_{cs} 는 원주방향 응력, σ_{ts} 는 축방향 응력, τ 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, 기반암으로 구성되어 있으며, 가스관은 최상부층인 매립층에 매설되어 있다. 매립층과 지지층 사이의 연약층(퇴적층)은 7m 내외로 비교적 두꺼운 층을 형성하고 있으며 N치가 2 이하로 매우 연약한 점토층이다. 가스관은 건설예정인 도로부의 측부를 따라 매설되어 있으며 도로 구조물을 건설하기 위하여 연약지반 개량공법(Pack Drain)과 압성토공법을 적용하였다. 연약지반 개량공법을 적용하기 전의 가스관 심도는 1.9m이며, 여기에 3.5m 내외의 2차 매립 및 압성토가 추가로 시행되었다. 공사 전에 지반개량 공사로 지반과 배관이 동시에 침하되는 450m 구간에 대하여 구조해석을 수행하여 배관의 안전성을 검토하였고, 공사기간 동안 배관의 안전성을 확보하기 위하여 가스배관 응력 모니터링 시스템을 운용하였다.

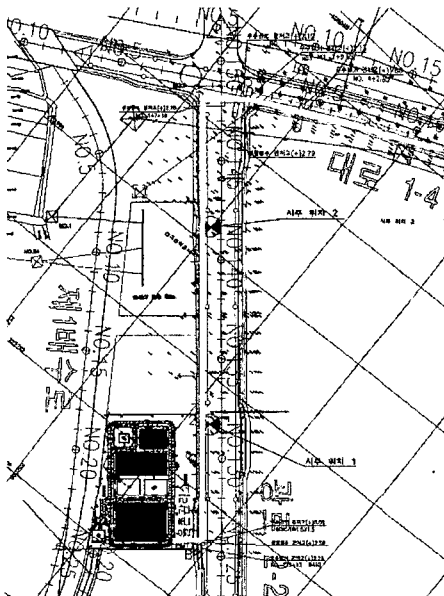


Fig. 1. Path of gas pipeline.

Fig. 1은 00관리소 주변 광로 2-2 구간의 공사도면을 나타낸 것으로 굵은 선이 가스관의 매설위치이며, 광로 2-2 도로를 건설하기 위하여 연약지반 개량공사를 시행하였다. 본 연구에서는 매설배관 및 지반의 계측자료를 이용하여 압성토 및 최종단계에서의 가스관의 안전성을 검토하였다.

3.1. 지반 침하계측기 설치현황

연약지반 개량공사가 수행되는 450 m 구간에 대하여 배관의 구조해석을 수행하였으며, 그 결과를 이용하여 최대응력의 발생이 예상되는 배관의 3개 지점을 선정하였다. 현장의 3개 지점을 굴착, 배관을 노출시켜 배관 상부와 측부에 각각 2개씩, 3개 지점에 총 12개의 2축 스트레인게이지를 설치하였다. 또한 3개 지점의 배관 침하량을 측정하기 위하여 스트레인게이지를 부착한 주변에 침하관측공을 설치하였다. Fig. 2는 배관에 설치한 스트레인게이지와 스트레인 게이지 보호를 위한 방수처리를 나타낸 그림이다. 도로 시공회사에서는 연약지반의 변형상태를 파악하기 위하여 Fig. 3과 같이 침하판, 경사계, 수위계, 간극수압계, 층별침하계 등을 설치하였다.

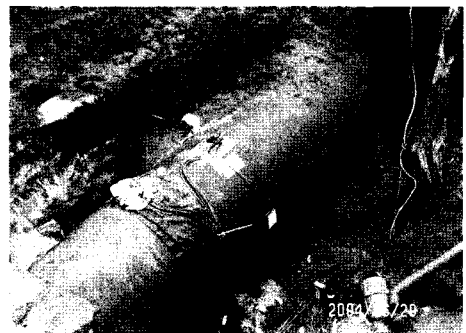


Fig. 2. Strain gage instrumentation on pipe.

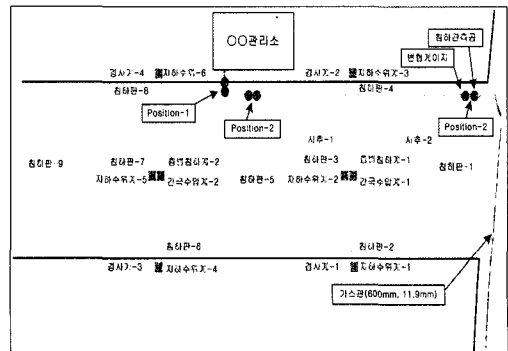


Fig. 3. Position of ground monitoring sensor.

3.2. 배관응력 모니터링 시스템

현장에 설치된 배관응력 모니터링 시스템은 사내 어디에서든지 배관응력을 모니터링 할 수 있도록 인터넷 기반으로 개발되었다. 시스템 본체는 펜티엄 컴퓨터를 이용하였고, National Instrument(이하 NI로 표기)의 이더넷 네트워크 모듈(FP-2000)과 스트레인 모듈(FP-SG-140)을 조합하여 스트레인 측정용으로 사용하였다. 본체에서 이더넷 네트워크 모듈까지 유선 LAN으로 연결하였다. Position 1에는 LAN을 분배하기 위한 스위치 허브, 스트레인 측정용 이더넷 네트워크 모듈 등을 설치하였고 450m 떨어진 Position 3과의 무선연결을 위하여 무선 LAN AP와 지향성 안테나를 설치하였다. Position 2에는 Position 1에서 분배된 유선 LAN을 이용하여 이더넷 네트워크 모듈을 설치하였다. Position 3에는 Position 1에서 분배된 LAN을 무선으로 연결하기 위한 무선 LAN AP와 지향성 안테나, 스위치 허브, 이더넷 네트워크 모듈 등을 설치하였다.

3개 지점의 배관응력을 모니터링 하기 위한 배관응력 모니터링 시스템의 구동 프로그램은 그래픽 개발환경을 제공하는 LabVIEW 7.0을 이용하여 개발하였다⁵⁾. 3개 지점을 동시에 볼 수 있도록 1개의 화면으로 구성하였고 배관의 응력을 막대그래프 타입으로 표현하여 시인성을 좋게 하였다. 배관상부, 배관측부 별로 길이방향응력, 원주방향응력, 합성응력을 각각 나타내었다.

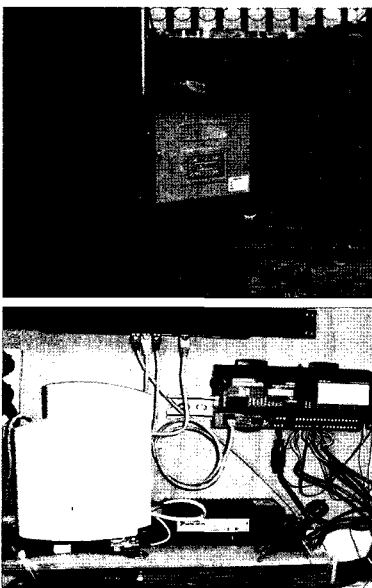


Fig. 4. Photographs of pipeline stress monitoring system.

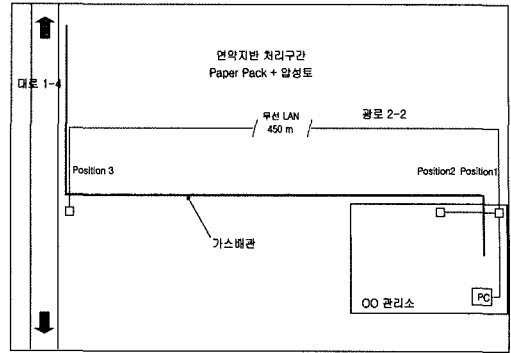


Fig. 5. Schematics of pipeline stress monitoring system.

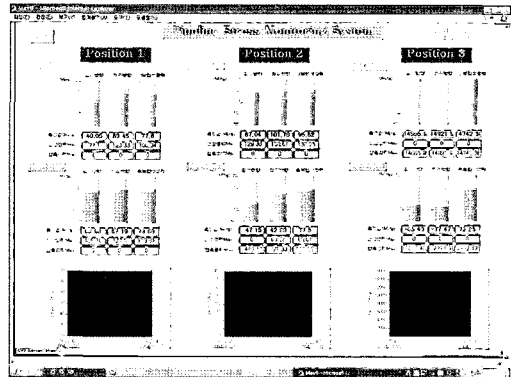


Fig. 6. Main screen of pipeline stress monitoring system.

또한 발생되는 최대 합성응력을 그래프로 나타내었고(1일 최대값), 이 값을 저장하도록 구성하여 경향관리가 가능하도록 하였다. Fig. 4에 현장에 설치된 배관응력 모니터링 시스템의 사진을 나타내었으며, Fig. 5에 모니터링 시스템의 현장설치 개략도를 나타내었다.

Pipeline Stress Monitoring System의 주화면은 Fig. 6에 나타낸 것과 같으며 그 결과를 사내 어디에서든지 볼 수 있도록 인터넷에 업로드하였다(Web publishing). 또한 현장의 시스템 컴퓨터를 연구실에서 원격 제어하여 프로그램을 수정하고 데이터를 수집하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 배관응력 모니터링 해석

Fig. 7~9에 Position 1, 2, 3에 대한 약 6개월 동안의 배관응력 모니터링 결과를 각각 나타내었다. 모니터링 결과를 분석해 보면, 배관에 걸리는 응력은 Position 1, 2, 3 모두 계속해서 증가하는 경향을

보이다가 5개월 이후로는 더 이상 증가하지 않고 있다. 2005년 3월 현재의 배관 응력은 압성토를 걸어 지반개량을 실시한 이후로 최대 150~180MPa 범위의 응력 증가를 나타내고 있다. 현재 배관의 가스 압력(3.5 MPa)으로 배관에 발생되는 원주방향 응력은 95.2MPa이고, 여기에 압성토로 인한 응력 150~180MPa를 추가하면 245.2~275.2MPa 범위로 배관 항복응력의 55~61% 수준의 응력이 걸리고 있다. 일본 석유 파이프라인 사업법에서는 항복응력(API 5L X65, 448MPa)의 90%를 허용기준으로 하며, 이 값을 제 3자에 의한 타공사 영향에 대한 할증률(1.5)로 나누어 주면 배관의 허용응력이 된다. 이렇게 계산된 배관의 허용응력은 268.8MPa로 가스배관 항복응력의 60% 수준이다. 따라서 현재상태에서 배관은 안전한 상태이지만 도로건설 공사 공정에 따른 지반의 추가 침하 발생에 대해서 지속적인 감시와 주의가 필요한 상황이다.

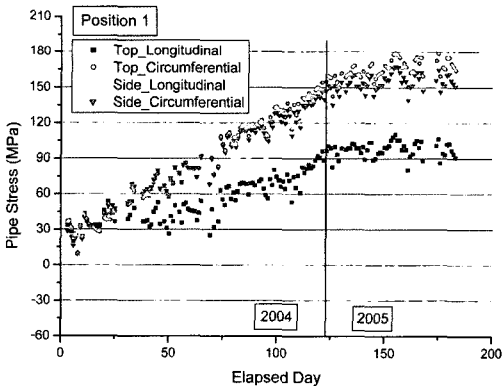


Fig. 7. Experimental result of pipeline stress. (Position 1, 2004/09/03~2005/03/02)

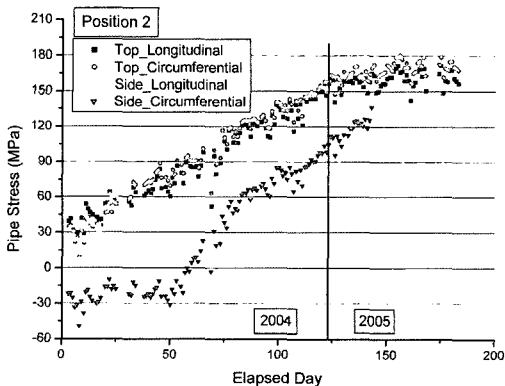


Fig. 8. Experimental result of pipeline stress. (Position 2, 2004/09/03~2005/03/02)

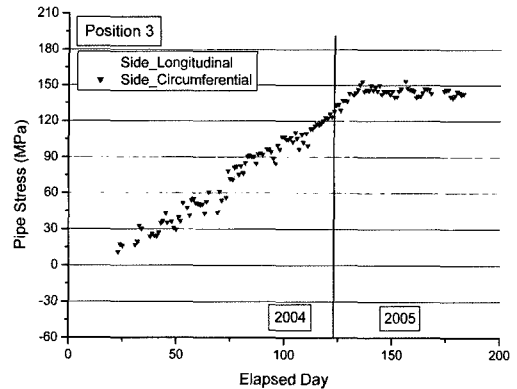


Fig. 9. Experimental result of pipeline stress. (Position 3, 2004/09/03~2005/03/02)

4.2. 배관 침하관측공 및 침하판

Table 1은 지반침하를 관측하기 위해 설치한 침하판의 계측결과를 나타내고 있고, Table 2는 배관에 설치한 침하관측공의 월별 측정치를 보여주고 있다. 침하관측공 측정결과를 보면 성토고가 높아지기 시작하는 2004년 9월부터 배관의 침하량이 증가하는 양상을 보이며, 배관은 Table 1의 침하판-4의 계측결과와 비슷하게 변화하고 있다.

2005년 1월 6일, 배관의 최대침하량은 침하관측공-3에서 33cm로 측정되었다. 침하관측공-1과 2는 압성토가 가스관 직상부에 사면으로 쌓여있기 때문에

Table 1. Results of ground settlement plate

관리 번호	설치일	침하량, cm (성토고, m)					
		2004. 7.28	2004. 8.25	2004. 9.21	2004. 10.20	2004. 11.16	2004. 12.16
침하판 -1	2004. 7.1	6.9	21.9	37.6	48.5	54.8	59.6
	7.1	(0.96)	(2.4)	(3.8)	(3.7)	(3.7)	(3.7)
침하판 -3	2004. 7.1	7.7	22.9	44.6	59.8	69.9	78.9
	7.1	(0.7)	(1.4)	(4.0)	(3.9)	(3.8)	(3.8)
침하판 -4	2004. 7.23	2.8	7.4	12.2	19.6	24.0	27.8
	7.23	(1.0)	(1.6)	(2.9)	(3.6)	(3.5)	(3.5)
침하판 -6	2004. 7.23	0.9	4.8	12.0	17.3	19.7	21.9
	7.23	(1.0)	(1.7)	(3.9)	(3.9)	(3.6)	(3.5)
침하판 -8	2004. 7.23	1.6	4.7	8.4	18.6	23.4	27.2
	7.23	(1.0)	(1.5)	(2.8)	(3.5)	(3.4)	(3.4)

Table 2. Results of pipeline settlement

관리 번호	설치일	침하량(cm)						
		2004. 7.28	2004. 8.23	2004. 9.22	2004. 10.26	2004. 11.10	2004. 12.2	2005. 1.6
침하공-1	04.7.2	0.0	5.0	5.0	10.0	10.0	12.0	15.0
침하공-2	04.7.2	1.0	3.0	4.0	12.0	13.0	15.0	18.0
침하공-3	04.7.2	2.0	7.0	17.0	23.0	26.0	29.0	33.0

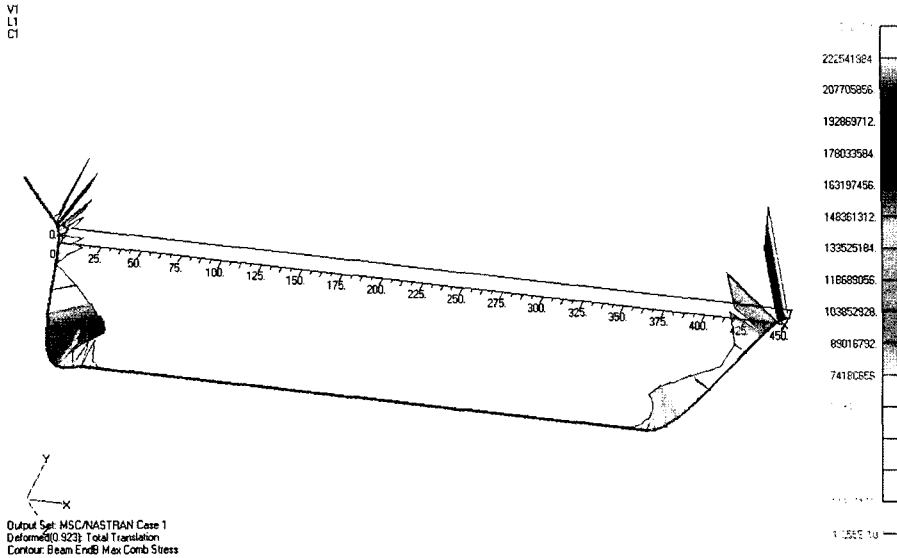


Fig. 10. Simulation of pipeline stress and deformation.

침하량이 상대적으로 작은 것으로 추측된다. 침하관측공-1과 2는 경과시간에 따른 침하량이 거의 같은 양상을 보이고 있고, 침하관측공-3은 60일이 경과한 후부터 큰 폭으로 침하량이 증가하고 있다.

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 11.9mm이며, 가스배관 도면을 참고로 하여 관리소 인입부 구간(50m)과 직선구간(450m)에 대해 구조해석을 수행하였다. 경계조건은 관리소 끝단은 완전고정, 인입부는 상하방향 구속, 직선구간의 끝단은 완전고정하였으며, 내부압력은 제외하고 해석하였다.

지반개량 공사로 인한 예상침하량이 90cm이므로 450m 구간에 90cm의 강제변위를 가하여 해석하였다. 배관에 발생하는 응력과 변형을 동시에 나타낸 해석결과를 Fig. 10에 나타내었다. 관리소 인입부(0m)와 직선구간의 끝단(450m)에 응력이 집중되고 있으며 직선구간의 끝단에서 최대응력이 발생함을 알 수 있다. 직선구간 끝단에서 발생하는 응력은 완전고정한 경계조건의 영향으로 과도하게 나타나는 것으로 보이며, 실제로는 관리소와 직선구간의 엘보우 부근과 직선구간의 끝단에서 150~180MPa 범위의 응력이 발생되는 것으로 판단된다. 이 결과로 엘보

우 부분의 전후단과 직선구간의 끝단 부근 3개 지점에 스트레인 게이지를 설치하고 배관응력을 모니터링 하였다.

5. 결 론

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

1) 매설배관에 설치된 침하관측공의 계측결과, 2005년 3월 현재 가스배관의 최대 침하량은 33~40 cm로 나타났으며, 이 값은 지반개량 공사의 예상침하량에 미치지 않는 값으로 배관의 안전에는 이상이 없는 것으로 판명되었다.

2) 배관응력 모니터링 결과, 배관에 발생하는 응력은 Position 1, 2, 3 모두 계속해서 증가하는 경향을 보이다가 5개월 이후로는 더 이상 변화하지 않고 있으며, 이 시점부터 지반개량이 완료되는 것으로 판단된다. 배관의 응력측정 결과에서는 각 Position 별로 원주방향과 길이방향의 응력이 일정한 결과를 보이지는 않고 있으나 전체적으로는 유사한 경향을 보이고 있다.

3) 압성토를 적용하여 지반개량을 실시한 이후로 2005년 3월 현재의 배관응력은 최대 150~180 MPa 이 증가하고 있다. 배관의 가스압력으로 발생되는

원주방향 응력은 95.2 MPa이고, 여기에 압성토로 인한 응력 150~180 MPa을 추가하면 245.2~275.2 MPa 범위로 배관 항복응력의 55~61 % 수준의 응력이 걸리고 있다. 따라서 현재상태의 배관은 안전한 상태이며 도로 건설공사 공정에 따라 지속적인 감시와 주의가 필요하다.

참고문헌

- 1) 한국강구조학회, “강구조공학”, 구미서관, 2000.
- 2) National Cooperative Highway Research Program, “Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges”, 1987.
- 3) 홍성경, 김준호, 정석영, “연약지반 배관응력 모니터링 시스템 개발 및 적용”, 한국안전학회 춘계학술발표회, pp. 21~26, 2005.
- 4) 과학기술편집부, “지중매설관의 조사 : 설계에서 시공까지”, pp. 257~316, 1998.
- 5) National Instrument, LabVIEW 7 Express, 2003.