

연약지반 배관응력 모니터링 시스템 개발 및 적용

홍성경 · 김준호 · 정석영

한국가스공사 연구개발원

1. 현장상황

매설 가스배관은 토압하중, 차량하중, 지반침하 등의 외부하중에 의한 영향을 지속적으로 받고 있다. 그 중에서도 연약지반에 매설되어 있는 배관은 지반침하로 인한 영향이 매우 큰 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 매설된 경우에는 경계부분에서 매우 큰 응력이 발생될 수도 있기 때문에 침하에 대한 가스관의 안전성 검토 및 지속적인 계측관리가 반드시 이루어져야 한다.

연구대상인 연약지반 현장은 한국가스공사 ○○구간이며 가스배관이 매설된 상태에서 연약지반 개량을 시행하였다. 현장 지반은 매립층, 퇴적층, 풍화토, 기반암으로 되어 있다. 가스관은 최상부층인 성토매립층에 매설되어 있고, 매립층과 지지층 사이의 연약층(퇴적층)은 7 m 내외로 비교적 두꺼운 층을 형성하고 있으며 N치가 2 이하로 매우 연약한 점토층이다. 가스관은 건설예정인 도로부의 측부를 따라 매설되어 있으며 도로

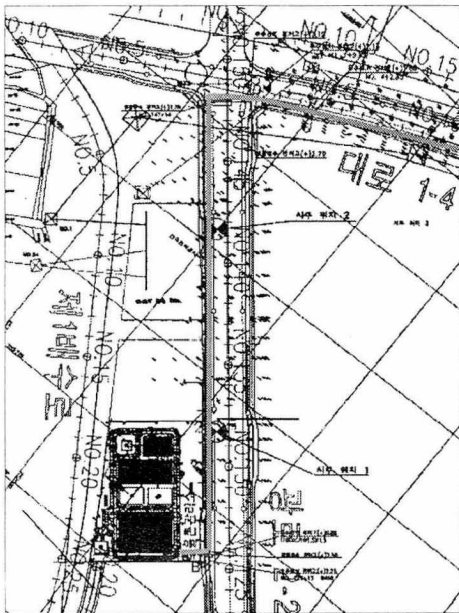


Fig. 1 현장상황도

구조물을 건설하기 위하여 연약지반 개량공법인 Pack Drain과 압성토공법을 적용하였다. 개량공법 적용 전 가스관의 심도는 1.9 m이며, 3.5 m 내외의 2차 매립 및 압성토가 추가로 시행되었다. 지반개량 공사로 지반과 배관이 동시에 침하되는 구간은 450 m로 이 구간에 대하여 구조해석을 수행하여 지반의 침하에 따르는 배관의 안전성을 검토하였고, 공사기간 동안 배관의 안전성을 확보하기 위하여 가스배관 응력 모니터링 시스템을 운용하였다.

Fig. 1은 공급관리소 주변 광로 2-2 구간의 공사 도면을 나타낸 것으로 굵은 선이 가스관의 매설위치이며, ○○관리소 앞의 광로 2-2 도로를 건설하기 위하여 연약지반을 개량하고 있

다. 매설배관 및 지반의 계측자료를 이용하여 압성토 및 최종단계에서의 가스관의 안전성을 검토하였다.

2. 지반 침하계측기 설치현황

구조해석 결과를 이용하여 응력 집중이 예상되는 매설배관의 3개 지점을 선정하였으며 이 지점을 노출시켜 스트레인게이지를 설치하였다 (Position 1, 2, 3) 배관 상부와 측부에 각각 2개씩, 3개 지점에 총 12개의 2축 스트레인게이지를 부착하여 배관의 응력 상태를 측정하였다. 또한 노출시켰던 3개 지점의 배관 침하량을 측정하기 위하여 침하 관측공을 설치하였다. 도로 시공회사에서는 연약지반의 변형상태를 파악하기 위하여 아래와 같이 침하판, 경사계, 수위계, 간극수압계, 층별침하계 등을 설치하였다. Fig. 2는 배관에 부착한 스트레인게이지 사진이며, Fig. 3은 계측기의 설치위치를 나타낸 현장상황도이다.



Fig. 2 스트레인게이지 배관설치 사진

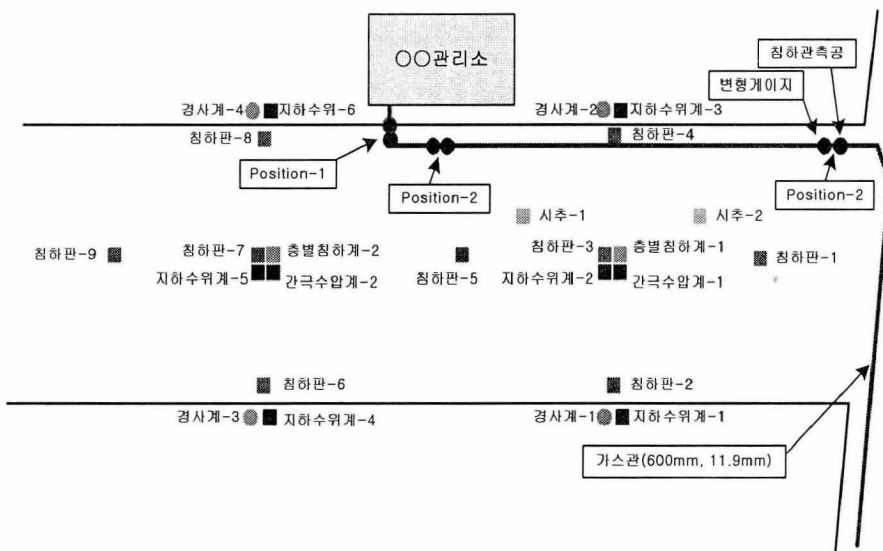


Fig. 3 계측기 설치 위치도

3. 배관응력 모니터링 시스템 및 현장설치

현장에 설치된 배관응력 모니터링 시스템은 인터넷 기반으로 개발되어 있으며 인터넷만 연결되면 어느 곳에서든지 배관응력을 모니터링 할 수 있다. 시스템 본체는 일반 컴퓨터를 이용하였고, 스트레인 측정용으로 Ethernet Network Module (NI FP-2000)과 스트레인 Module (NI FP-SG-140)을 조합하여 측정하고자 하는 3개 지점에 설치하였다. 본체에서 Ethernet Network Module까지 LAN 선으로 연결하였다. 스위치 HUB가 설치된 Position 1은 시스템 본체와 유선 LAN으로 연결되고 (100 m), 450 m 떨어진 Position 3과의 무선연결을 위하여 AP (Base)와 지향성안테나를 설치하였다. Position 2는 스위치 HUB에서 유선으로 연결하였고 (50 m), Position 3은 Position 1과 무선으로 연결되며 AP (Subscriber)와 지향성안테나, 스위치 HUB 등을 설치하여 구성하였다.

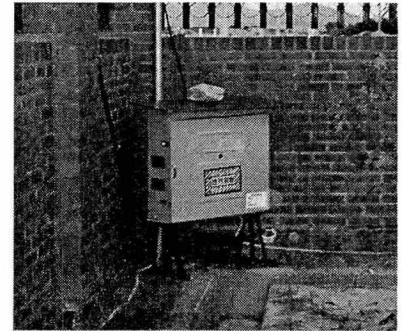
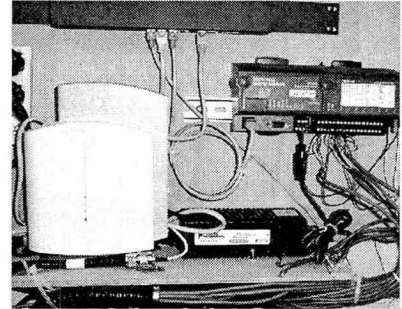


Fig. 4 모니터링 시스템 현장설치 사진

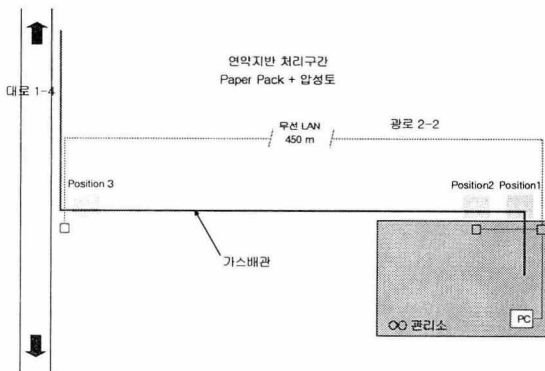


Fig. 5 모니터링 시스템 현장설치 개략도

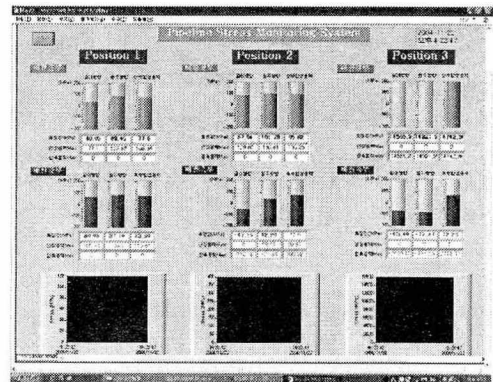


Fig. 6 배관응력 모니터링 시스템 Main 화면

노출배관 모니터링 시스템 구동용 프로그램은 그래픽 개발환경을 제공하는 National Instrument 사의 LabVIEW 7.0을 이용하여 개발하였다. 3개 지점을 동시에 볼 수 있도록 1개의 화면으로 구성하였고, 시인성을 좋게 하기 위해서 매설배관의 응력을 막대

그래프 타입으로 표현하였다. 배관상부, 배관측부 별로 길이방향응력, 원주방향응력, 합성응력을 각각 나타내었다. 또한 발생하는 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 나타내었고 모니터링 시스템의 Main 화면은 Fig. 6에 나타낸 것과 같다.

4. 해석결과

4.1 배관응력 모니터링 해석

장기간의 모니터링 결과, 배관에 걸리는 응력은 Position 1, 2, 3 모두 계속해서 증가하는 추세에 있으며 현재 배관 응력은 공급압력으로 인한 응력을 제외하고 100~130 MPa 범위에 들어 있다. Fig. 7에 Position 1의 배관응력 모니터링 결과를 나타내었다. 현재 배관의 가스 압력 (3.5 MPa)으로 배관에 발생하는 원주방향 응력은 95.2 MPa이고, 여기에 압성토로 인한 응력 100~130 MPa을 추가하면 195.2~225.2 MPa로 배관 항복응력의 43~50% 수준의 응력이 걸리고 있다. 따라서 현재상태에서 배관은 안전한 수준이며 지반의 추가 침하에 따라서 계속적인 감시가 필요한 상황이다.

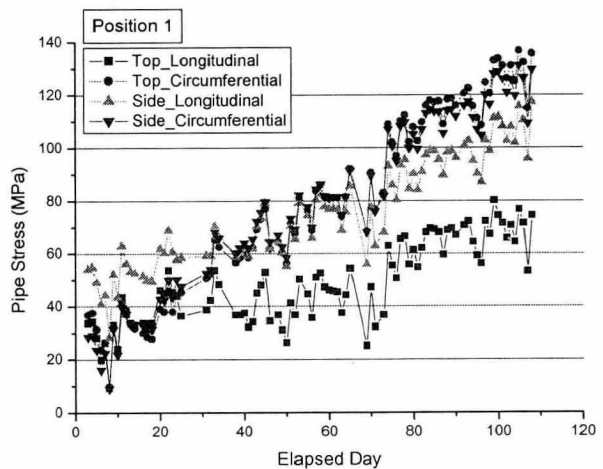


Fig. 7 배관응력 모니터링 결과
(Position 1, '04/09/03~12/17)

4.2 배관 침하관측공 및 침하판

Table 1은 배관에 설치된 침하관측공의 월별 측정치이다. 성토고가 높아지기 시작하는 9월부터 침하량이 증가하는 양상을 보이며 Table 2의 침하판 계측결과 중 침하판-4와 거의 비슷하게 변화하고 있다. 최대 침하량은 침하관측공-3에서 29 cm로 측정되었다. 침하관측공-1과 2는 성토가 가스관 직상부에 사면으로 쌓여있기 때문에 침하량이 상대적으로 작게 생기는 것으로 추측된다. 침하관측공-1과 2는 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)					
		04.7.28	04.8.23	04.9.22	04.10.26	04.11.10	04.12.2
침하관측공-1	04.7.2	0.0	5.0	5.0	10.0	10.0	12.0
침하관측공-2	04.7.2	1.0	3.0	4.0	12.0	13.0	15.0
침하관측공-3	04.7.2	2.0	7.0	17.0	23.0	26.0	29.0

Table 2 지표면 침하판 계측 결과

관리번호	설치일	침하량, cm (성토고, m)					
		04.7.28	04.8.25	04.9.21	04.10.20	04.11.16	04.12.16
침하판-1	04.7.1	6.9(0.96)	21.9(2.4)	37.6(3.8)	48.5(3.7)	54.8(3.7)	59.6(3.7)
침하판-2	04.7.1	2.5(0.7)	8.48(1.7)	23.3(3.4)	30.1(3.4)	35.5(3.3)	40.0(3.3)
침하판-3	04.7.1	7.7(0.7)	22.9(1.4)	44.6(4.0)	59.8(3.9)	69.9(3.8)	78.9(3.8)
침하판-4	04.7.23	2.8(1.0)	7.4(1.6)	12.2(2.9)	19.6(3.6)	24.0(3.5)	27.8(3.5)
침하판-5	04.7.1	6.5(0.8)	15.4(1.6)	33.5(3.4)	42.0(3.7)	47.8(3.6)	53.2(3.6)
침하판-6	04.7.23	0.9(1.0)	4.8(1.7)	12.0(3.9)	17.3(3.9)	19.7(3.6)	21.9(3.5)
침하판-7	04.7.23	1.1(1.1)	17.2(1.8)	32.2(4.0)	46.3(4.0)	54.9(4.0)	62.7(4.0)
침하판-8	04.7.23	1.6(1.0)	4.7(1.5)	8.4(2.8)	18.6(3.5)	23.4(3.4)	27.2(3.4)
침하판-9	04.7.23	1.3(0.9)	13.9(1.6)	22.5(3.4)	35.5(3.8)	44.0(3.8)	51.3(3.7)

4.3 지반침하로 인한 매설배관 구조해석

매설배관의 스트레인게이지 설치 지점을 결정하기 위해 구조해석 프로그램인 MSC/NASTRAN for Windows 2003을 사용하여 해석을 수행하였다. 가스배관의 관경은 660 mm, 두께는 11.9 mm이며, 가스배관 도면을 참고로 하여 ○○관리소 인입부 50 m 구간과 직선구간 450 m 구간에 대해 구조해석을 수행하였다. 관리소 끝단은 완전고정, 인입부는 상하방향으로 구속하였고 450 m 직선구간의 끝단은 완전 고정하는 경계조건을 적용하였으며, 내부압력으로 인한 하중은 제외하고 해석하였다. 최대응력이 발생하는 것으로 해석되는 엘보 부분의 전후단과 직선구간의 끝단 3개 지점에 스트레인게이지를 설치하여 압성토 기간 동안 가스배관의 응력상태를 모니터링하였다.

2004년 12월을 기준으로 Table 1, 2의 가스배관 침하관측공과 침하판-4의 측정데이터를 이용하여 현재상태의 구조해석을 수행하였다. 구조해석 결과, Fig. 8과 같이 관리소의 인입부와 엘보 부분, 직선구간의 끝단에서 응력이 주로 발생하고 있음을 알 수 있다. 완전 고정된 경계조건에 의해 과도하게 나타나는 끝단의 응력을 제외하면 실제 배관에서는 관리소와 엘보 부분에서 약 98 MPa의 응력이 작용하고 있으며, 직선구간의 끝단에서는 약 40 MPa의 응력이 작용하고 있는 것으로 해석되었다.

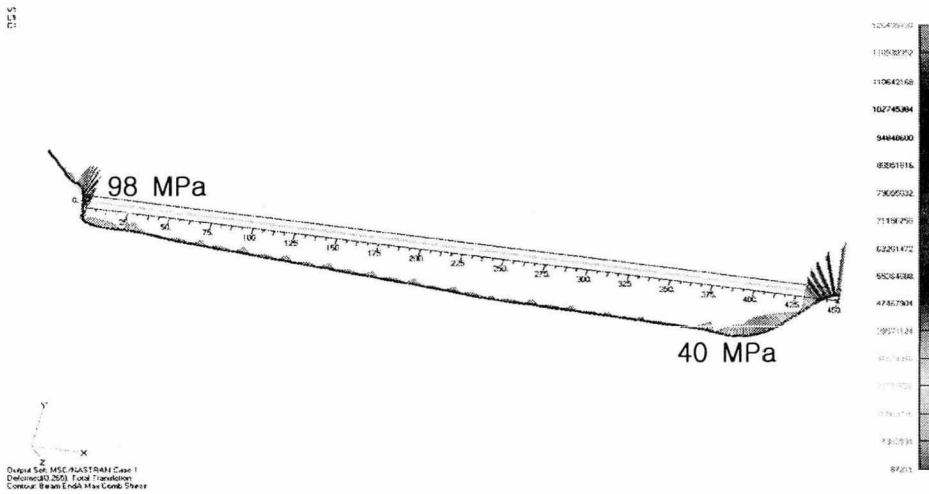


Fig. 8 현재상태의 구조해석 결과

5. 결론

도로 성토 및 연약지반 개량공사로 인하여 침하영향을 받고 있는 ○○구간에 매설된 가스배관의 구조해석 및 가스배관 모니터링 결과를 요약하면 다음과 같다. 매설배관 근처에 설치된 침하판과 배관 침하관측공의 계측결과를 분석한 결과, 2004년 12월 현재 가스관의 최대 침하량은 29 cm로 나타났다. 현재 배관의 침하량을 근거로 구조해석한 결과, 관리소 인입부와 엘보 부분에서 약 98 MPa의 응력이 작용하고 있으며, 직선구간의 끝단에서는 약 40 MPa이 응력이 작용하고 있는 것으로 나타났다. 응력집중이 예상되는 3개 지점에 대한 가스배관 응력 모니터링 결과, 압성토로 인한 응력 100~130 MPa에 현재 공급압력으로 배관에 발생하는 원주방향 응력 95 MPa을 추가하면 195~225 MPa로 배관 항복응력의 43~50% 수준의 응력이 걸리고 있다. 구조해석 결과와 모니터링 결과가 비교적 좋은 일치를 보이고 있으며, 현재상태의 배관응력은 안전한 수준으로 판단된다.

참고문헌

- [1] "강구조공학", 사단법인 한국강구조학회, 구미서관, 2000
- [2] National Cooperative Highway Research Program, "Fatigue Evaluation Procedures for Steel Bridges", 1987
- [3] 지중매설관의 조사 (설계에서 시공까지)
- [4] MSC/NASTRAN for Windows 2003