지반 침하를 고려한 도시가스 입상배관의 응력평가

길성희 · 김병덕* · 권정락* · 윤기봉

한국가스안전공사 가스안전연구원*, 중앙대학교 기계공학과
(2013년 1월 14일 접수, 2013년 2월 18일 수정, 2013년 2월 18일 채택)

A Study on Stress Assessment of Standing Gas Pipeline Subjected to Ground-Subsidence

Seong-Hee Kil · Byung-Duk Kim* · Jeong-Rock Kwon* · Kee-Bong Yoon

**Dept. of Gas Safety R&D Institute, Korea Gas Safety Corporation*

Dept. of Mechanical Engineering of Chung-Ang University

(Received January 14, 2013; Revised February 18, 2013; Accepted February 18, 2013)

요 약

본 연구에서는 공동주택의 외벽에 설치되어 있는 도시가스 입상배관이 지반 침하에 의해 손상된 사례를 약 120여건 조사하였다. 조사결과 약 100mm~200mm 지반 침하가 발생한 것으로 확인되었으며 지반 침하로 인하여 배관이 절단되어 가스가 누출될 정도로 배관이 손상된 사례도 있었는데 이때 절단된 배관 사이의 간격이 약 50mm 이상 되었다. 지반 침하에 의한 배관의 침하량을 측정하기 위한 장치를 설계 및 제작하여 실제 공동주택에 설치한 후 약 5개월 동안 배관의 침하량을 측정한 결과 약 1.3mm 정도 배관이 침하되었음을 확인하였다. 현장 측정 결과를 토대로 현장 상황을 모사한 이론적 배관응력평가를 실시하였다. 그리고 지반 침하가 발생한 경우 가스 입상 배관 전단부에 설치 가능한 신축흡수방법을 검토하고 신축흡수방법을 설치한 경우를 고려하여 가스 입상 배관의 안전성을 평가하였다.

Abstract - In this study, 120 cases of damage due to ground subsidence of city gas pipeline which is hanging on apartment outer wall were investigated. From the survey results, it was determined to be approximately 100m~200mm ground subsidence occurred and at severe damage, pipeline was cut and the gap was about 50mm between two cut pipeline. Device for measuring the amount of deformation of standing gas pipeline was designed and fabricated. And installed it on apartment outer wall for measuring the deformation due to ground subsidence, after 5 months measurement the amount of ground subsidence was measured to 1.3mm. Stress assessment was conducted based on results of ground subsidence occurred on standing gas pipeline.

Key words : ground subsidence, gas pipeline, deformation, theoretical analysis, stress assessment, hoop stress, expansion joint, thermal stress

1. 서 론

최근 아파트에 설치되어 있는 도시가스 입상배관의 전단부가 지반침하로 인하여 파손되는 사례가 증가하고 있다[1]. 사례를 살펴보면 아파트는 기초 구조 위에 설치되고 도시가스 입상배관은 아파트 지반

과는 다른 지반 위에 설치된 경우에 지반이 침하되면서 배관이 파손되어 파손된 부분에서 가스가 누출된 것이다. 이러한 경우에는 도시가스 입상배관이 아파트 외벽에 가이드로 부착되어 아파트 지반과는 다른 지반 위에 즉 기초 구조 위에 시공되지 않았기 때문에 지반의 침하가 발생하면서 배관을 지지하던 지반이 소실되어 도시가스 입상배관이 파손된 것이다. 또한 지반이 점차 침하되면서 배관의 파손과 더불어 배관을 고정하는 장치 등이 이탈하는 사례도

[†]Corresponding author: kiljudy@kgs.or.kr

발생하고 있다. 이러한 상황은 특정 지역에 국한하여 발생하는 것이 아니며 전국 대부분의 지역에서 발생하고 있다. 특히 도시가스 입상배관이 기초 구조 또는 지하주차장 구조가 아닌 곳에 설치될 경우 전반적으로 침하가 진행 중인 것으로 조사되었으며 지반 침하에 의한 배관 손상이 발생하여 1년 마다 배관을 보수하는 작업을 반복하는 사례도 있었다. A 도시가스사가 가스공급 권역 내 설치된 공동주택 사용자 공급관의 지반 침하에 의한 배관 안전성을 평가하기 위하여 조사를 실시한 결과 점검 대상 49개 시설 중에서 8%에 해당하는 4개 시설에서 고정 지지대 이탈 등으로 인하여 입상관의 침하 및 입상관 파손이 발생하여 즉시 보수를 실시하였다. 또한 현재 지반 침하가 진행되고 있어 배관의 손상이 예상되므로 개선해야 할 시설이 총 20건으로 약 41%에 해당하는 것으로 확인되었다.

관할 지역을 대상으로 약 120여 건의 지반 침하 사례를 조사한 결과 전반적인 지반 침하량은 약 10cm~20cm 정도 발생한 것으로 확인되었으며 특히 가장 심한 사례의 경우에는 도시가스가 누출될 정도로 배관이 파손되었으며 이때 배관의 간격은 약 5cm 이상 이었다.

따라서 현재 고층 아파트의 외벽에 설치되어 있는 도시가스 입상배관을 대상으로 지반 침하에 의해 배관이 파손된 사례를 조사하고 만약 지반 침하가 발생할 경우 어느 정도 지반 침하에 의하여 배관이 하부로 이동하는 지를 실제 현장실험을 통해 측정하였다. 현장실험을 위하여 첫 번째로 배관 침하량을 측정하기 위한 시험장치를 설계 및 제작하였으며 두 번째로 제작한 변형량 측정장치를 실제 아파트 도시가스 입상배관에 설치하여 배관의 침하량을 일정기간 동안 측정하였다. 그리고 세 번째로 측정한 결과를 바탕으로 현장 상황을 모사한 이론적 배관응력 평가를 실시하였다.

II. 사례 조사

2.1. 기준

도시가스안전관리기준 통합고시 제2장 제18절 배관의 설치·보호에는 다음과 같은 사항이 제시되어 있다.

① 도시가스 배관은 배관의 지반 침하가 현저하게 진행 중인 곳이나 과거의 실적으로 미루어 지반 침하의 우려가 추정되는 곳을 통과하지 아니하도록 하여야 한다.

② 연약지반에 설치하는 배관은 모래기초 또는 그 밖의 단단한 기초공사 등으로 지반 침하를 방지

하여야 한다.

즉 도시가스 입상배관의 경우 지반 침하를 고려한 조치를 하여야 한다는 내용이 포함되어야 한다.

2.2. 설치 현황

다음 Fig. 1은 일반적으로 공동주택에 설치되어 있는 도시가스 입상배관의 모습이다. 지하에서 올라온 도시가스 배관이 공동주택 외벽에 부착되어 있는 모습이며 이 배관에서 각 층 세대로 도시가스를 공급하기 위하여 분기관이 설치되어 있다.

2.3. 지반 침하에 의한 배관 파손 사례

가. 공동주택 사용자 공급관 파손

1994년 12월 24일 준공된 아파트 입상배관에서 지반 침하가 원인이 되어 티(TEE) 용접부에 크랙이 발생하여 가스가 누출된 사례이다.

Fig. 2는 파손된 도시가스 사진이며 Fig. 3은 가스 누출 위치를 나타내는 개략도 이다.

나. 매설된 폴리에틸렌배관 파손

지반 침하로 인하여 지하에 매설된 폴리에틸렌 배관 용착부에서 파손이 발생하여 용착부에서 가스가 누출이 된 사례이다. Fig. 4의 사진을 살펴보면 가스가 누출되어 비눗방울 시험을 실시했을 때 방울이 형성되고 있는 것을 확인할 수 있다.

다. 배관의 파손에 의한 변형

아파트 도시가스 입상배관은 아니지만 지반 침하로 인하여 관경 150mm PLP 강관이 지반 침하로 인

Fig. 1. Picture of city gas pipeline which is hanging on apartment outer wall.

Fig. 2. Failure of city gas pipeline which is hanging on apartment outer wall.

Fig. 4. Picture of gas leak due to welding joint failure.

Fig. 3. Overview of facilities.

a) deformation of elbow angle

b) deformation of pipe diameter

Fig. 5. Picture of steel pipeline failure due to ground subsidence.

하여 변형된 사례이다. Fig. 5를 살펴보면 90° 엘보우의 각도가 115°까지 변형이 되었고 배관의 지름도 165mm에서 122mm로 줄어들면서 변형된 사례이다.

라. 정압기실 내 배관 파손

Fig. 6은 도시가스 사용자 단독 정압기실 내 배관이 지반 침하에 의하여 파손된 사례이다. Fig. 7은 단독 정압기실 내 지반이 침하에 의하여 지반이 변형된 즉 지반이 일정한 경사각을 이룰 정도로 변형된 모습이다.

마. 아파트 입상관 기울기 변형

다음 Fig. 8은 지반 침하로 인하여 아파트 도시가스 입상배관의 기울기가 변형된 사례이다. 실제 이 사진의 배관은 파손 사고가 발생하지는 않았으나 같은 장소의 다른 도시가스 입상배관에서는 지반 침하로 인하여 배관이 파손되면서 도시가스가 누출되었다. 그래서 새롭게 배관을 보수하였으며 추가로 곡관을 이용한 신축흡수조치를 설치하였다.

Fig. 6. Steel pipeline failure due to ground subsidence in governor station.

Fig. 7. Deformation of ground slope.

III. 배관 변형량 측정실험

3.1. 배관 변형량 측정장치 설계

지반 침하 등 내·외부 물리적 변화에 의해 배관에 발생하는 변형을 수치화한 후 모니터링 시스템으로 전송하여 원거리에서도 배관의 관리가 가능한 장치를 설계하였다. 즉 높이 변위 및 기울기 변위를 검출할 수 있는 감지센서를 배관에 부착하고 센서가 측정한 데이터를 RS 485 통신포트를 통하여 실시간으로 데이터를 송수신할 수 있도록 설계하였다. 또한 기존 아날로그 측정방식에서 디지털식 측정방식으로 센서의 정밀도를 향상시켰으며 (Resolution(센서오차) : $\pm 1/100$) 센서별 노이즈 자동 차단회로를 내장하여 신뢰성을 확보할 수 있도록 하였다. 계측제어 소프트웨어를 사용 가능토록 하였으며 기존의 센서 수량에 따라 증가하는 연결 케이블이 485 통신을 함으로써 통신에 필요한 4가닥의 케이블만으로 255개의 센서를 모니터링할 수 있도록 하였다. 설계한 장치 구성도는 다음 Fig. 9과 같다.

각 유닛별 기능을 좀 더 자세히 살펴보면 다음과 같다. 첫 번째로 배관 상태를 실시간 측정하는 센서 유닛은 배관의 포인트별 기울기, 배관의 포인트별 높이 변위, 부착된 센서의 온도를 감지하여 데이터를 전송하고 두 번째 데이터 수집 유닛은 A 유닛으로부터 측정된 데이터(기울기/높이변위/센서온도)를 취합하고 그리고 CDMA로 전송하는 유닛(최대 255개소/유닛, RS488 통신 수행)이다. 세 번째로 모뎀은 CDMA 방식의 무선 통신을 하며 데이터 상위 레벨로 입력된 주기로 실시간 전송한다. 마지막으로 계측제어 소프트웨어는 배관의 상태를 모니터링하고 제어하는 소프트웨어(프로그램)로서 이상 상/하한치 입력이 가능하도록 하였으며 실시간 상태 그래프

Fig. 8. Deformation of city gas pipeline.

지만 침하를 고려한 도시가스 입상배관의 응력평가

Fig. 9. Schematic for the device to measure the amount of deformation.

a) city gas pipeline

b) tilt sensor

c) casing of tilt sensor

d) control box

Fig. 10. Picture of device installed in the field.

표시도 가능하도록 하였다. 그리고 경계값을 초과할 경우 경보 기능이 작동하도록 하였으며 예측 진단 및 센서의 데이터를 일정한 주기로 입력할 수 있도록 하였다.

3.2. 배관 변형량 측정장치 설치

지반의 침하가 안정화 단계에 접어들었다고 판단되는 아파트를 대상으로 배관 변형량 측정장치를 설치하고 일정시간 동안 배관이 변형되는 정도를 측정하였다. 실제 아파트 입상관에 설치한 시점은 2011

Table. 1. Stress assessment results of city gas pipeline at normal condition(not ground subsidence)

노드번호	급힘 응력	허용 응력	%
5	203.8	3,111.3	7
10	587.5	3,055.3	19
11	835.9	2,949.0	28
15	699.3	3,026.3	23
17	56.8	3,132.6	2
20	29.3	3,136.8	1

년 7월 21일이며 초기에는 30분 간격으로 기온기값과 온도를 측정하였으며 약 24시간 동안 초기 안정

Fig. 11. Layout of city gas pipeline divided as a node.

화를 위하여 시스템을 관찰하였다. 관찰 결과 이상 변동이 없음을 확인하고 7월 22일부터는 1일 동안 12시간 간격으로 즉 오전 10시 및 오후 10시에 각각 한 번씩 기온기 값과 온도를 측정하였다. 배관 변형량 측정장치의 현장 설치 모습은 다음 Fig. 10과 같다.

IV. 이론적 배관응력평가

4.1. 정상적인 경우

지반 침하를 모사한 이론적 배관응력 평가를 위하여 우선적으로 지반 침하가 일어나지 않는 정상적인 상태의 입상배관에 대한 배관응력 평가를 실시하였다[2-5]. 배관응력 평가에 사용한 프로그램은 Caesar II이다. 참고로 이때 배관에 발생하는 응력 평가는 열변위에 의한 응력만을 적용한 상태이다. 입력 조건은 주입상 배관 지름은 60.5mm이며 주입상 배관 두께는 3.65mm, 가정 분기배관 지름은 27.2mm, 가정 분기배관 두께는 2.65mm이다. 배관의 각 노드별 배치 간격은 다음과 같다.

- ① 5 ~ 10 : 1,000mm
- ② 10 ~ 11 : 300mm
- ③ 11 ~ 15 : 130mm
- ④ 15 ~ 20 : 2,665mm
- ⑤ 20 ~ 25 : 10mm

배관의 열변위를 고려하기 위하여 겨울철은 -20℃, 여름철은 60℃, 평상시는 20℃의 온도 편차를 입력조건으로 사용하였다.

4.2. 지반 침하가 발생한 경우

지반 침하가 0.5cm 발생한 경우를 가정하여 도시가스 입상배관에 발생하는 응력을 평가하여 정상적인 경우와 비교하였다. 또한 사례조사에서 검토한 10cm ~20cm의 지반 침하가 발생하는 것을 상황을

Fig. 12. Result of measuring city gas pipeline subsidence.

Fig. 13. Temperature measurement.

검토하여 배관의 응력을 평가하였다.

V. 결 과

5.1. 배관 침하량 측정 결과

실제 아파트 입상관에 배관 변형량 측정장치를 설치한 2011년 7월 21일부터 12월 1일까지 약 6개월 이상의 실험 결과를 다음 Fig. 12에 나타내었다. 또한 기온의 변화도 Fig. 13에 나타내었다. Fig. 12를 살펴보면 시간이 경과함에 따라 지반의 침하량은 최대 1.3mm까지 증가하였다. 이 침하량은 Fig. 13의 기온 변화 곡선과 비교해 볼 때 온도의 영향에 의해 배관의 변형량이 증가한 것은 아니라고 판단된다. 즉 기온의 변화를 살펴보면 최대 약 15°C 정도 감소하였기 때문에 온도의 영향에 의해 배관의 변형량이 발생한 것은 아닌 것으로 판단된다.

5.2. 정상적인 경우의 배관 응력 평가 결과

지반 침하가 발생하지 않은 정상적인 경우에 배관의 각 노드에 발생하는 응력은 다음 Table 1과 같다.

5.3. 지반 침하가 발생한 경우의 배관 응력 평가 결과

지반 침하가 0.5cm 발생한 경우를 가정했을 때 5.2의 정상적인 경우와 동일한 조건을 입력하면 각 노드에 발생하는 응력은 다음 Table 2와 같다.

지반 침하가 0.5cm 발생한 경우 지하에서 지상으로 가스배관이 나온 부분에서 허용 응력을 약 203% 초과하는 굽힘 응력이 발생하며 특히 밸브 주변에서는 223% 이상의 굽힘 응력이 작용하는 것을 확인할 수 있었다.

5.4. 지반 침하를 고려한 신축흡수방법

몇몇 도시가스사에서는 지반 침하를 고려하여 곡관(또는 루프 배관)으로 지반 침하에 의한 변위를 흡수하기 위한 신축흡수방법을 설치하고 있다[6,7]. 곡관은 강관을 구부리거나 이음 등으로 곡관부를 만들어 변위를 흡수하므로 추가로 설치에 필요한 장소

Table. 2. Stress assessment results of city gas pipeline in case of 0.5cm ground subsidence

노드번호	굽힘 응력	허용 응력	%
5	6,341.7	3,123.5	203
10	4,498.7	3,124.1	144
11	6,967.6	3,122.6	223

Fig. 14. Loop pipe.

Fig. 15. Loop pipe length L .

가 필요하다는 제한이 있으나 압력에 잘 견딜 뿐만 아니라 고장도 적어서 공장이나 옥외의 고압 증기관으로도 널리 이용된다[8]. 또한 벨로우즈 이음매 등 다른 이음매보다 가격면에서 저렴하기 때문에 다양하게 이용되고 있다.

입상배관이 위치한 지반에 침하가 발생한 경우 필요한 곡관 길이는 다음 식을 이용하여 산출할 수 있다.

$$L = 74 \sqrt{D \cdot \Delta l}$$

여기서

L : 곡관의 길이(cm)

$$L = 2A + B$$

D : 곡관에 사용한 관의 외경(cm)

Δl : 관의 신축량(cm)

Table. 3. Loop length needed to ground subsidence

지반 침하량 (cm)	필요한 곡관 길이(m)	곡관 길이에 대한 고찰
0.5	1.30	도시가스사 적용중
10	5.76	현실적으로 불가능
20	8.14	현실적으로 불가능

입상배관이 위치한 지반에 일정한 깊이로 침하가 발생할 경우 필요한 곡관 길이를 위의 식에 따라 산출한 결과는 다음 Table 3과 같다.

실제 지반 침하가 10cm 이상 발생한다면 필요한 곡관 길이는 5.76m로서 총 5m 이내의 입상관에 이 곡관을 설치하는 것이 현실적으로 불가능할 만큼 큰 길이이다. 따라서 0.5cm 이내의 지반 침하가 발생한 경우에는 곡관 등의 신축흡수방법을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 공동주택의 외벽에 설치되어 있는 도시가스 입상배관이 지반 침하에 의해 손상된 사례를 조사하였고 지반 침하에 의한 변형량을 측정하기 위한 장치를 설계 및 제작하였다. 그리고 실제 공동주택에 설치하여 지반 침하에 의한 배관의 변형량을 측정하였고 이 결과를 바탕으로 지반 침하가 발생한 경우의 배관에 대한 이론적인 응력 평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 120여건의 지반 침하 사례를 조사한 결과 지반이 침하된 깊이가 약 100mm부터 200mm 었다.
- 2) 실제 공동주택 외벽에 설치한 도시가스 입상배관의 지반 침하에 의한 변형량을 약 5개월 이상 측정한 결과 지반 침하가 1.3mm 정도 측정되었다. 측정한 장소는 준공 후 2년이 경과한 아파트로서 지반 침하가 안정화 단계에 접어들었다고 판단되는 지역이다.
- 3) 지반 침하량이 5mm 이하일 경우에만 배관 응력을 최소화하기 위한 신축흡수방법으로 곡관 사용

이 가능할 것으로 판단되며 이때 곡관의 길이는 총 1,300mm 이상이 되어야 한다. 지반 침하량이 5mm 이상일 경우에는 설치 공간을 많이 차지하는 곡관 보다는 벨로우즈형 신축 이음매, 슬리브형 신축 이음매 등을 사용할 수 있다.

VII. 고 찰

배관이 매설되는 부분의 지반을 다짐 작업할 때 다짐 작업이 충분하지 못하면 지반 침하에 의해 배관이 파손될 수 있다. 그뿐만 아니라 초기 아파트 건설을 위하여 토지 조성 중에 지반을 충분하게 다지 지 않은 경우에도 지반 침하가 발생하는 것을 현장 조사 결과로서 확인할 수 있었다. 즉 기초 구조 또는 지하 주차장 구조 위에 설치한 도시가스 입상배관의 경우 지반 침하에 의한 배관 파손 사례가 거의 없는 것이 이를 증명해 주는 결과라고 사료된다. 아파트는 실제 파일 등으로 지지되어 있으나 입상 배관은 단순히 아파트 외벽에 지지되어 있기 때문에 아파트 외의 주변부가 지반 침하로 인하여 내려앉으면 배관도 견디지 못하고 파손되는 이유가 바로 이것이라 할 수 있다. 따라서 배관 매설시의 지반 다짐도 중요하지만 아파트 건설시 초기 토지 조성할 때 지반의 다짐이 철저하게 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] Gas Accident Annual Report, Korea Gas Safety Corporation
- [2] ANSI/ASME B 31.3 Petro-chemical plant process piping
- [3] BS 8010, Section 2.8 Piping Design Criteria
- [4] Piping Design, Japan Gas Facilities Technical Standards
- [5] CAN/CSA-Z184-M92 Canada Piping Design Standards
- [6] Dae-Gu City Gas Specification
- [7] Seoul City Gas Specification
- [8] Piping Support Design, Gi Jeon Yun Gu Sa, pp58~92, 2007