



## 교량에 부착된 도시가스 배관의 응력에 관한 연구

†이수경 · 임봉관\*

서울산업대학교 안전공학과, \*삼천리 도시가스(주)  
(2006년 6월 3일 접수, 2006년 9월 11일 채택)

## A Study of Stress of City Gas Pipe Attached on the Bridge

†Su-Kyung Lee · Bong-Gwan Lim\*

Dept. of Safety Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea  
\*Samchully City Gas, Samchully Bldg, 35-6, Youido-dong Youngdungpo-gu Seoul  
(Received 23 June 2006, Accepted 11 September 2006)

### 요 약

본 연구에서는 교량에 부착된 도시가스 배관 53개소에 대해 현장조사를 실시하고 위해요인이 발생할 우려가 있는 도시가스배관 대해 구조해석 프로그램을 이용한 응력분석을 실시하고 취약부위에 대한 현장 응력 측정을 통해 배관에 미치는 응력에 관한 분석을 실시하여 가스배관의 안전성을 평가하고자 했다. 현장 안전진단의 결과는 일차적으로 선정된 대상 10개소 중 가장 응력적으로 취약할 것으로 판단되는 2개소에 대해 현장 응력측정을 통한 진단을 수행하였다. 안전계수 2를 고려한 배관 최대 지지응력의 70% 이상 수준의 응력이 부가되는 것으로 나타났다. 보수시점을 넘어선 교량첨가배관에 대해 응력 해소 공사, 지지대 보수 및 교체 공사를 통해 부가되는 응력을 해소하였다. 현장진단 결과로 나타난 바와 같이 장기간 경과된 배관에서도 견고한 고정으로 발생하는 응력은 보수를 통하여 해소해줌으로 안전성을 확보할 수 있었다.

**Abstract** - The survey team has conducted the on-the-site inspection of 53 bridges to which LNG gas pipelines are attached, to ascertain their level of safety, durability and any defect by adapting a method of computer data input process and precision analysis. In this way, we could estimate an effective corrective action on the defective gas pipelines found through this survey. Our survey team has analyzed carefully these 2 defective lines selectively out of 10 lines, which are considered to be most seriously weak. According to our elaborate analysis, these two pipelines go over 70% of the set standard stress based on our Safety Manual Scale. We have taken corrective actions on these lines by repairing/replacing/obsolete damaged lines to ensure the distress of the bridges involved with the pipelines and could secure safety.

**Key words** : LNG, Pipeline, Stress, Bridges

### I. 서 론

가스배관에 영향을 주는 요인은 주변 시설물의 공사, 주변 시설물의 전기적 간섭 및 도로 위를 지나가는 차량 등 인위적인 영향발생 요인과 지진, 계절변화 및 일교차에 따른 온도변화, 지하수 및 지반 침하 등과 같은 자연적인 영향발생 요인 등이 있다. 이 중에 차량 및 지반 침하, 온도변화와 같은 영향발생 요인은 가스배관에 응력이 가해지는 주요 요인이 되며, 이러한 요인에 의해 배관이 초기에 설치했을 때와는 달리 변형이 일어

나거나 취약해지는 경향을 보인다. 또한 도심 구간에서의 지하철도 및 지하철 건설 등과 같은 공사로 인해 매설되었던 배관이 노출되어 방호조치를 해야 하는 경우도 발생하게 된다. 이런 상황에서는 도시가스 배관 중 특히 교량에 부착되거나 하천에 매설된 배관은 응력과 진동에 대한 꾸준한 영향을 받게 되어 잠재적인 위험성이 존재하여 가스 안전사고의 요인이 될 수 있다[1].

본 연구에서는 이러한 도시가스 배관에 편환, 균열, 파열 등의 사고를 일으킬 수 있는 원인이 될 수 있는 응력을 연구하여 가스배관의 안전성을 확보할 수 있는 교량부착배관에 미치는 응력에 관한 연구를 하고자 한다.

†주저자: lsk@snut.ac.kr

## II. 이 론

### 2.1. 구조해석 프로그램[2]

#### 2.1.1. 기본 개념

본 연구에 사용한 방법은 구조해석의 한분야인 FEM (finite element method)은 구조 분야(건축, 토목, 자동차, 항공, 조선, 기계구조, 의공학 등), 열(온도)과 비구조 분야(열전달, 유체의 유동, 전자장) 등의 모든 분야에서 적용되는 기본이 되며, 오랜 기간 동안 검증되어 일반화된 도구(Tool)라 할 수 있다. 하지만 유체의 유동 문제는 많은 요소 및 내부 알고리즘의 문제로 많은 시간이 소요된다. 반면 어떤 유동의 형상도 모델이 가능하다. 예를 들면 구조에서 요소가 50,000개 정도되면 많은 편에 속하는데 이를 해석용 컴퓨터에 따라 결과를 얻는 시간이 대략 20분 정도 소요되나, 유체의 유동 문제에 있어서는 유동의 특성에 따라 대략 1주일 이상 소요된다. 결과의 정확한 정도는 모델에 따라 상이하다.

#### 2.1.2 ABAQUS 수행 과정

Fig. 1은 ABAQUS의 수행하는 절차도이다.

##### (1) Preprocessing (ABAQUS/Pre)

모델의 외형적 문제를 정의, ABAQUS input file의 생성하는 단계 ABAQUS/Pre나 다른 Preprocessor를 사용하여 시각적으로 모델생성 단순한 모델은 메모장과 같은 editor로 직접 input file 생성

##### (2) Simulation(ABAQUS/Standard)

Input file로 정의된 수치적인 문제를 계산하는 단계

##### (3) Postprocessing(ABAQUS/Post)

Simulation을 마친 후 계산되어 진변위와 응력 결과들을 시각적으로 평가가능

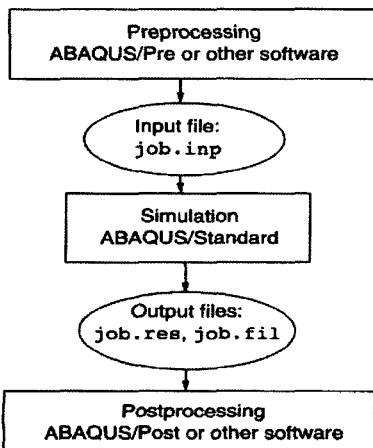


Fig. 1. The stage of ABAQUS analysis.

#### 2.1.3 구조해석의 단계별 순서

(1) 모델의 차원(model dimension) 결정구조물의 형상 및 해석의 주관점에 따라 유한요소모델의 접근을 2차원으로 할 것인지 3차원 모델로 할 것인지를 결정한다. 만약 구조형상이 축에 대해서 또는 어떤 좌표를 기준으로 대칭이면 그 기준면을 중심으로 1/2 또는 1/4요소 모델만 구축한다.(Symmetric model)

(2) 경계 조건 부여(boundary conditions) 작성한 구조해석 용 유한요소모델에 경계 조건을 부여한다. 모든 구조물에는 그 구조물을 고정하고 있는 부분이 있다. 따라서 이 부분이 유한요소모델로 구현이 되었다면, 이 부분을 부분 특성에 따라 경계 조건을 부여해야 한다. 단, 전체 모델이 아닌 대칭형(symmetric model)의 모델로 구현되었다면, 그 대칭면에 대칭모델에 적합한 경계 조건을 부여해야 한다. 경계 조건은 6개의 자유도(degree of freedom)의 경계 조건이 존재하는데(Ux, Uy, Uz, Rx, Ry, Rz), 모델의 형상에 따라 자유도는 서로 다르다. 예를 들어 자유도가 "0"으로 입력되면 각 방향별 완전 구속이며, "0"이 아닌 숫자로 입력이 되면 그 부분에 강제 변위 하중(forced displacement loading)으로 입력된다.

(3) 하중 조건 부여(loadings)경계 조건과 마찬가지로 중요한 부분이며, 그 하중의 종류는 다음과 같다.

- ① 자중(dead weight) : 구조물의 무게(밀도, 중력 가속도, 중력 방향으로 입력)
- ② 집중하중(concentrated nodal force) : 일정한 지점에 집중적인 하중 작용축 방향 하중(Fx, Fy, Fz), 모멘트(Mx, My, Mz)
- ③ 온도하중(nodal temperature loading) : 열적인 조건(열팽창 계수 입력)
- ④ 균일분포하중(distributed pressure loading) : 일정한 영역에 균일 하중 작용Uniform pressure (등분포하중), Non-uniform pressure(불균일 분포하중), Hydrostatic pressure(수두압), Wind load(바람 하중), Seismic(지진, 가진 하중)

(4) 기계적 물성치 부여(material properties)일반적인 강(steel)의 경우, 재질을 균질체(homogeneous)로 가정하여 해석을 수행한다. 따라서 3축 방향(x, y, z)에 대하여 각각 탄성계수(elastic modulus, young's modulus) 및 프아송 비(Poisson's ratio)가 같기 때문에 등방성(isotropic)이라 할 수 있다. 그러한 이유로 외력에 대한 정적 해석(linear static) 해석을 수행하기 위해서는 탄성계수(Ex) 및 프아송 비(vxy) 두개의 특성만 입력하게 된다. 각 재질별 입력 물성치는 다음과 같다.

- ① 등방성 재질(isotropic material) : 탄성계수 (Ex), 프아송 비(vxy)
- ② 정방성 재질(orthotropic material) : 탄성계수 (Ex, Ey, Ez), 프아송 비(vxy, vyz, vzx)
- ③ 이방성 재질(anisotropic material) : laminated/solid/sandwich composite
- ④ 세로탄성계수(Ex, Ey, Ez), 가로탄성계수(Gx, Gy, Gz), 프아송 비
- ⑤ Tensile/Compressive failure stress (x, y, z-direction)
- ⑥ Shear failure stress (in plane/out-of-plane)
- ⑦ Coupling coefficient (tsai-wu theory)

(5) 모델특성 입력(model properties)

Beam, Truss, Bar, Spring, Cable 등 : 단면적, 단면계수, 관성모멘트

Solid element : 실험상 입력

Shell element : 두께 입력

(6) 입력 파일 작성과 직접적으로 해석을 위해 coding 된 내용을 하나의 text file로 작성한다.

(7) 해석 수행

(8) 결과 분석(result evaluation)

2.2. 응력측정 방법[6]

실제 배관의 응력을 측정하는 방법으로 변형률을 측정하여 응력으로 변환하는 방법으로 변형률은 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였으며, 스트레인 게이지는 응력 측정 또는 응력 해석의 수단으로 실험적인 변형률을 구할 수 있는 대표적인 방법으로 그 원리는 다음과 같다.

Fig. 2와 같이 전기 전면을 베이스(base)에 가나다란 저항선을 고정시킨 후 베이스를 측정하고자 하는 구조

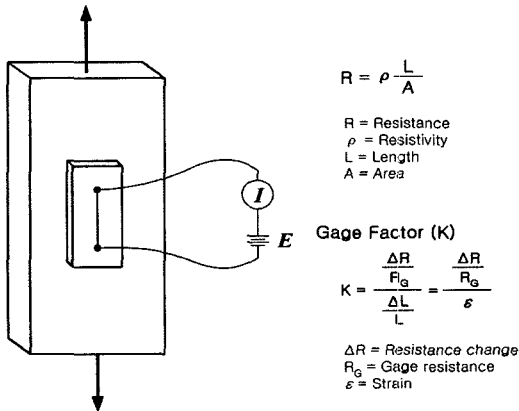


Fig. 2. Strain gage[3].

물에 접촉한다. 이로서 측정하고자 하는 구조물에 발생 하는 변형률은 변형률 베이스를 경유하여 게이지용 저항선에 전달되고 늘어나든가 줄어들든가 한다. 이로 인하여 저항선은 전기 저항의 변화를 가져오게 한다. 즉 물리적인 변화량을 전기적인 변화량으로 변환하여 간접적으로 측정하는 결과가 된다. 이 때, 식 (1)과 같이 게이지 고유의 저항(RG = resistance)은 저항성(ρ = resistivity)과 길이(L = length), 면적(A = area)의 관계식으로 표현되며, 물리적인 변형량(ε)과 저항 변화(ΔR) 사이에는 식 (2)와 같이 게이지 계수(K = gage factor)의 관계식이 성립된다.

$$R_G = \rho \frac{L}{A} \tag{1}$$

$$K = \frac{\Delta R/R_G}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R_G}{\epsilon} \tag{2}$$

따라서 계측기를 이용하여 저항 값의 변화를 정확히 측정하면, 작용하는 상태의 표면에서 일어나는 물리적인 변화량인 변형률 값을 쉽게 계산하고, 이를 이용하여 응력의 상태를 파악할 수 있다. 이와 같이 스트레인 게이지를 이용한 실제 응력 측정법은 측정 대상을 파괴하지 않는 비파괴 평가 방법이므로 이에 따른 경제적인 이점은 있으나, 대상 전체에 대한 응력을 측정하고자 한다면 많은 시간이 소요되며, 주변의 환경에 민감한 영향을 받는다는 단점이 있다.

III. 실험결과 및 고찰

3.1. 교량에 부착된 배관의 현장조사 내용

교량에 부착된 배관 53개소를 점검표를 이용하여 각 교량 전체에 대하여 현장 조사를 실시하였고 점검시 조사해야 할 내용은 다음과 같으며 조사할 때는 점검표를 만들어 사용하였다.

- (1) 교량에 부착된 배관 설계 방법
  - 교량에 부착된 배관의 강도 검토 방법 확인
- (2) 행거(hanger)형 서포트 구조
  - 연직 하향만 지지(관측방향/수평방향 구속효과 없음 : 특정부위에 대한 과대 하중 집중 우려)
  - 앵커볼트에 의한 형강 등의 bracket : 교량에 설치 여부 확인
- (3) 지지형 서포트 구조
  - 접촉면이 슬라이딩 가능한 구조 확인(서포트와 관이 동일하게 움직이지 않으므로, U-bolt 채용으로 슬라이딩이 용이하도록 간격 유지)

- 서포트의 반력은 지지 스패(span)의 2배로 산출한 하중에 대하여 안전한 구조 여부 확인
- (4) 도장, 피복
  - 노출부의 PLP코팅 여부 확인
  - 직사일광이 닿는 부분 고무시트, SUS판 감음
  - PLP는 일반적으로 도료를 칠하지 않음
- (5) 교대 배면 침하 여부
  - 침하 발생 여부 침하봉 등 설치, 제1 서포트 반력 발생
  - 보링 시험을 통한 토질 조건 확인
  - 시공 시 침하량 예측
- (6) 교량에 부착된 배관 설치계획
  - 기설 교량 설치 → 교량 본체의 강도 검토
  - 지지부 : 콘크리트그 앵커볼트 강재교량 용접
  - 앵커볼트 사용 시 : 화학식/기계식 여부 확인
  - 전용 위치 확인 : 보수 공간 여부 확인
- (7) 진동
  - 진동 측정 → 피로 해석

(8) 점검항목

- 빗물의 침투에 의한 녹에 의한 감육
- Expansion 부의 SUS판 시공 여부
- 교대 관통부의 급속적 접촉이 일어나지 않도록 충분한 간격 확인
- 교대 관통부의 가스관과 관통부 홀의 간격이 절연재로 충진되어 있는지 확인

3.2. 교량부착 배관의 조사결과 및 선정[4]

조사 결과 전체 교량에 부착된 배관 53개소 중 10개소를 선정하였다. 선정된 10개소 교량부착배관에 대하여 위에서 언급한 순위 선정 세부기준을 적용하여 순위를 선정하였으며, 그 결과 순위가 결정되었다. 조사는 교량부착배관 점검표에 의해 실시하였으며, 육안 검사 위주로 실시하고 설계년도등 현장점검에서 확인을 할 수 없는 것은 기존 설계 자료를 참고하였다. 10개소의 교량에 대하여 위에서 서술한 것을 토대로 순위를 선정한 결과가 Table 1과 같다. 본 연구에서는 순위

Table 1. Results of city gas pipe line attached on the bridge

Ranking	Pressure	Diameter	Pipe Material	Supprt no.(K)	Device	Field test result	etc.
1	LP	350	PLW	27(6.7)	없음		
	8	8	10	7	10	10	
2	MPB	300	PLW	34(7.4)	유동성 배관		*1
	9	8	10	7	9	10	
3	MPB	300	PLW	13(3.5)	없음		
	9	8	10	7	10	10	
4	MPB	300	PLW	15(4.9)	없음		
	9	8	10	7	10	7	
5	MPB	300	PLW	28(6.1)	없음		
	9	8	10	7	10	5	
6	MPB	300	PLW	13(5.8)	Elbow 2		
	9	8	10	7	9	5	
6	MPB	300	PLW	8(5.3)	Elbow 2		
	9	8	10	7	9	7	
8	MPB	300	PLW	21(4.1)	Elbow 4		
	9	8	10	7	9	5	
9	MPB	300	PCW	32(5.33)	Elbow 4		*2
	9	8	9	7	9	5	
10	MPB	150	PCW	20(2.1)	Elbow 4		
	9	6	9	8	9	5	

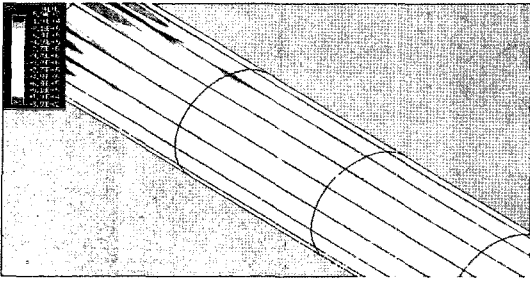


Fig. 3. HS-03 direction of cylinder's stress of distribution.

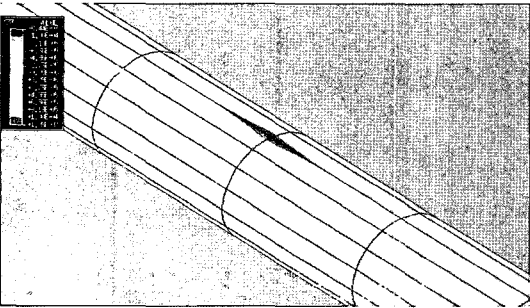


Fig. 4. HS-04 direction of cylinder's stress of distribution.

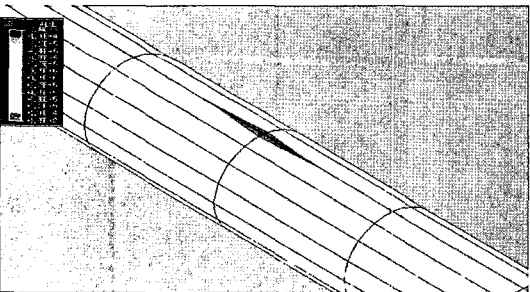


Fig. 5. HS-05 direction of cylinder's stress of distribution.

1위, 2위의 교량을 대상으로 연구를 실시하였다.

### 3.3. 배관의 응력 해석 결과

다음과 같은 Software 해석 결과물을 얻을 수 있었으며 각 부분에 대한 샘플을 도시하였다. Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5는 취약개소로 확인된 HS-03, 04, 05 부위의 응력 해석 결과물이며 원주방향 상단부분의 적색부위는 응력이 작용 하는 것을 나타내는 것이며 그림 상단에 응력 수치가 표시되어 있다[5]. Table 2는 각 위치별 응력해석 결과이다.

교량에 부착된 배관 중 현장점검에서 오래되고 취약하다고 판단되어 선정된 배관에서 총 여섯 군데 취약 부위에 대한 배관 벽 두께별 축 방향 및 원주방향 응

Table 2. Stress Analysis of Each Points

ID	Weak point position	Analyze stress (kgf/cm <sup>2</sup> )
HS-01	(Northern shore-open part)	13.09
HS-02	(Northern shore-buried part)	78.91
HS-03	No. 1 support	115.03
HS-04	No. 2 support	118.41
HS-05	end pier	88.09
HS-06	Open pipe-center	16.11

력 분포를 확인하였다. 확인된 응력 분포를 배관 재료인 KS D 3507 배관용 탄소 강관의 허용 응력과 비교해본 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

① 취약 부위는 현재 주어진 조건에 대해 응력이 집중되는 부위이며, 운전 및 하중 조건의 변화에 따라서 달라질 수 있으며 대부분의 취약 부위는 구조물의 형상 변화가 심한 부분에서 확인되었으며, 이는 교량에 부착을 위한 배관 설계 시 대부분 고려된다.

② 교량첨가배관에 대하여 내압, 토압, 자중, 차량에 의한 하중, 바람에 의한 하중 및 눈에 의한 하중에 의한 응력의 영향은 거의 미소하였다.

③ 각 운전 및 하중 조건은 배관 벽 두께별로 KS D 3507 배관용 탄소 강관의 허용 응력에 비해 약 2,000% -1000%의 낮은 수준의 응력을 나타내었으며 6군데 취약 부위 전부 원주방향 응력이 축방향 응력에 비해 약 0.1% 높았다. 그러나 전체적으로 낮은 응력 수준을 보이기 때문에 우려할 정도는 아니다.

선정된 취약 부위에 대하여 실제 응력 측정을 수행하였으며, 다음장에 그 내용을 기술하였다.

### 3.4. 현장진단 조사 결과

#### 3.4.1. A교

Fig. 6은 A교의 배관계의 응력이 안전계수를 고려한 배관의 파손레벨에 이르게 되면 배관은 파괴되며 경계레벨(alert level)에 이르기 전에 배관은 보수되어야 한다. 현재 경계레벨에 이르지 않은 상태이므로 평가 시점에서는 응력적으로는 문제가 없다. 다만 도복장 부분에서 도장 손상, 발청 등이 발견되었으며 이에 대한 보수가 시급한 실정이다.

배관의 파손레벨은 배관재료인 KSD3507 최대인장강도(290 kgf/cm<sup>2</sup>) 안전계수를 나눈 수치로 배관의 허용응력을 나타내며 경계레벨은 파손레벨의 70%를 나타내며 즉시 보수를 하여 배관계에 작용하는 응력을 해소하여 파손레벨에 이르지 않도록 하여야 할 것이며 경

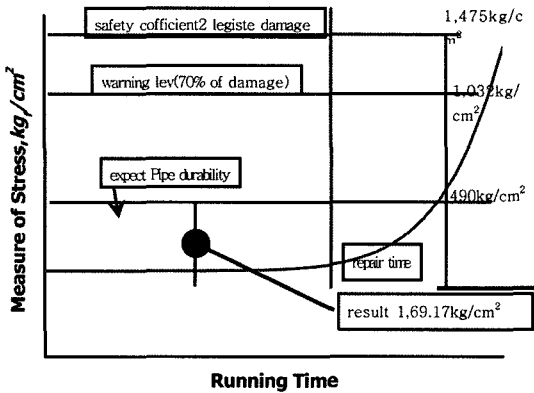


Fig. 6. 'A Bridge' stress of city gas pipe attached on the bridge.

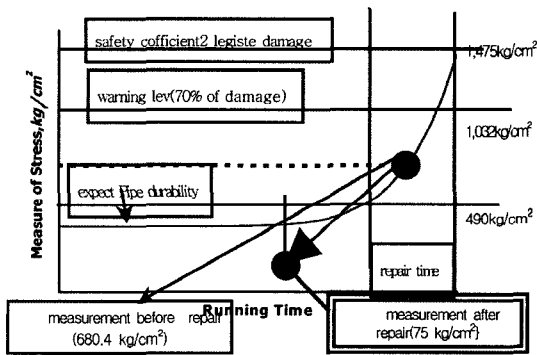


Fig. 7. 'B Bridge' stress of city gas pipe attached on the bridge

보레벨은 수리를 위한 준비 및 수리를 위한 시점으로서 최대레벨의 30%의 수치이다.

### 3.4.2. B교

Fig. 7은 B교 대한 응력의 측정 결과로서 보수 전 배관에 걸리는 최대응력(680.4 kgf/cm<sup>2</sup>)이 예상 배관 수명에 있어 보수시점을 훨씬 넘어선 상태를 보여준다. 배관계의 응력이 안전계수를 고려한 배관의 파손레벨에 이르게 되면 배관은 파괴되며, 경계레벨(alert level)에 이르기 전에 배관은 보수 되어야 한다. 이때 경계레벨은 안전계수를 고려한 배관의 파손 레벨의 약 30%이며, 경계레벨을 넘어섰다는 의미는 배관에 걸리는 응력이 그 재료의 허용 지지응력의 30% 이상의 수준까지 부하된다는 의미이다. 따라서 응력이 경계레벨에 넘어선 배관계는 보수가 시급한 상태이다.

응력 해방/배관 보호관 시공/배관 지지대의 보수 교체 수행 등을 통한 응력적 집중 해소를 수행한 현재 B

교에 걸리는 응력은 75.6 kgf/cm<sup>2</sup>로 배관 부하 응력을 초기 치에 비해 약 89% 가량 감소시켰다. 따라서 배관에는 응력적으로 안전한 상태이며, 기타 도복장 및 방식 등 손상 요인은 별도로 존재하지만 배관을 지속적으로 사용하는데 문제가 없다.

### 3-4-2. 교량에 부착된 배관의 응력 해소작업

응력을 해소하기 위하여 보수하는 방법은 교량에 부착된 배관의 설치방법이 비슷하여 응력해소를 위한 작업 또한 비슷하므로 선정배관 1개소에 대한 응력해소를 위한 작업을 기술하였다. 응력을 해소시키기 위해서는 배관 양단 호안 근방을 굴착하여야 하는데 완전한 효과를 얻으려면 교량첨가배관 전 구간 길이의 약 1/10 이상을 굴착하여야 한다. 그러나 이 경우에는 현장 여건상 그만큼 길이를 굴착할 수 없었다. 따라서 일부만 굴착하여 약간의 응력 해방 효과를 얻은 후 배관에 발생하는 전체 응력을 추정할 수 밖에 없었다[6].

응력 해방(도압 해방)을 위해 A지점 호안 근방을 약 1 m 가량 굴착하였으며, 그 결과 배관에 걸리는 최대 응력을 측정하였다. 응력 해방 시 최대 응력은 25.7 kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났으며, 전술한 바와 같이 주변 지역 가로수 및 법면 붕괴 우려로 인하여 완전한 응력 해방을 수행하지 못한 상황이었다. 완전한 응력해방 효과를 얻기 위해서는 배관 길이의 10% 이상, 즉 13 m 가량의 굴착이 수행되어야 한다. 또한 1번과 2번 지지대를 제거 및 다시 체결함으로써 지지대 풀어줌 효과 시 응력을 측정하였는데 그 결과 85.66 kgf/cm<sup>2</sup> 값을 구할 수 있었다. 이는 온도변화에 의한 배관 신축을 지지대가 고정함으로써 발생된 응력으로, 추후 지지대 재시공 시 온도변화 및 지반 이동에 따른 배관 이동 유동성을 줄 수 있는 지지대로 교체를 요하는 상태이다.

마지막으로 배관 설치상태 복원 조치 jack를 이용한 배관 부상을 통해 배관에 걸리는 최대 응력을 측정하였는데, 이때 169.17 kgf/cm<sup>2</sup>의 값을 측정할 수 있었다. 이는 배관 재질에 대해 안전계수 2를 고려한 지지응력의 약 11.5%에 해당하는 값이다. 이러한 결과를 고찰해 보면 엘보우 부분에 응력이 집중됨을 확인할 수 있었다. A지점 교량첨가배관 구조상 엘보우가 다수(4개) 설치되어 있는 상태이며, 엘보우에 대한 응력 집중을 막기 위해 배관 수평화 보수 및 지지대 교체가 필요한 상태이다.

## IV. 결 론

도심의 하천구간에 장기간으로 설치되어 있는 교량

에 부착된 도시가스 배관은 견고한 고정 등으로 지속적인 응력이 발생하나 육안중심의 점검관리의 수준으로 시행되고 있으므로 배관계에 작용하는 위험상태 여부를 파악하기가 불가능하며, 정확한 위험진행 정도를 파악할 수 없다.

현장 안전진단의 결과는 배관에 걸리는 응력은 안전계수2를 고려한 배관 최대 지지응력에 비해 배관에 걸리는 응력의 상태를 파악하였으며 그중 1개소는 배관의 지지응력을 넘어선 응력(680.4 kgf/cm<sup>2</sup>)이 작용하는 것을 알 수 있었으며 이는 지지응력(경보레벨 490 kgf/cm<sup>2</sup>)보다 강한 응력이 작용함으로 즉시 응력해소를 위한 보수작업이 필요함을 알 수 있었다. 보수시점을 넘어선 교량에 부착된 가스배관에 대해 응력 해방 공사, 지지대 보수 및 교체 공사를 통해 추가되는 응력을 해소하였다.

취약부위에 대한 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 결과와 실제 현장의 응력 측정 결과는 약 30% 정도의 차이를 보였으며, 이는 시뮬레이션 시 적용된 운전 및 하중조건의 조정에 따라 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 현재로서는 현장측정과의 차이가 크므로 시뮬레이션의 결과를 좀더 정확하게 하기위한 기법의 개발이 필요하다고 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 사단법인 한국도시가스협회, “도시가스사업현황 2002”, (2003)
- [2] ABAQUS User's Manual-Ver. 5.8, Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., (1999)
- [3] 한용교 외, “스트레인 게이지를 위한 계측방법, 스트레인게이지”, (2001)
- [4] 한국가스안전공사, “교량등에 설치하는 배관의 세부 기술 기준”, (2003)
- [5] Huh, N.S., H.J. Cha, J.B. Choi, Y.J. Kim, and C.R. Pyo, “Prediction of Piping Failure Behavior using Wide-Plate Test”, *Key Engineering Materials*, **183-187**, 655-660, (2000).
- [6] Huh, N.S., H.J. Cha, J.B. Choi, Y.J. Kim, and C.R. Pyo, “Development of a Piping Integrity Evaluation Simulator Based on the Hardware-in-the-Loop Simulation”, *Transactions of the KSME, Part A*, **25(7)**, 1031-1038, (2001)
- [7] ASME, “Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components-ASME Boiler and Pressure Vessel Code”, Section XI, (1996).