

공정플랜트 연료배관의 시스템응력 해석에 의한 구조 건전성 평가

정성용 · 윤기봉* · 팜반듀엣 · 유종민 · 김지윤**

중앙대학교 대학원 · *중앙대학교 기계공학부 · **중앙대학교 에너지·안전연구소
(2013. 2. 28. 접수 / 2013. 5. 24. 채택)

Structural Integrity Evaluation by System Stress Analysis for Fuel Piping in a Process Plant

Seong Yong Jeong · Kee Bong Yoon* · Pham Van Duyet · Jong Min Yu · Ji Yoon Kim**

Graduate School, Chung-Ang University · *Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University
**Energy Safety Research Institute of Chung-Ang University
(Received February 28, 2013 / Accepted May 24, 2013)

Abstract : Process gas piping is one of the most basic components frequently used in the refinery and petrochemical plants. Many kinds of by-product gas have been used as fuel in the process plants. In some plants, natural gas is additionally introduced and mixed with the by-product gas for upgrading the fuel. In this case, safety or design margin of the changed piping system of the plant should be re-evaluated based on a proper design code such as ASME or API codes since internal pressure, temperature and gas compositions are different from the original plant design conditions. In this study, series of piping stress analysis were conducted for a process piping used for transporting the mixed gas of the by-product gas and the natural gas from a mixing drum to a knock-out drum in a refinery plant. The analysed piping section had been actually installed in a domestic industry and needed safety audit since the design condition was changed. Pipe locations of the maximum system stress and displacement were determined, which can be candidate inspection and safety monitoring points during the upcoming operation period. For studying the effects of outside air temperature to safety the additional stress analysis were conducted for various temperatures in 0~30°C. Effects of the friction coefficient between the pipe and support were also investigated showing a proper choice if the friction coefficient is important. The maximum system stresses were occurred mainly at elbow, tee and support locations, which shows the thermal load contributes considerably to the system stress rather than the internal pressure or the gravity loads.

Key Words : piping stress, system stress analysis, structural integrity, safety, ASME B31, pipe support, thermal stress

1. 서론

정유 및 석유화학 등의 공정산업은 주요 국가기간산업 중의 하나로서 1960년대 후반부터 울산, 여수, 대산에 국가 산업단지 이루고 있으며 많은 시간이 지난 현재에도 활발한 생산 활동을 하고 있다. 하지만 오랜 가동 기간으로 인해 설비들의 노후화가 진행되었고, 최근 일본의 지진에 따른 원자력발전소의 방사성 물질 누출과 국내의 불산 누출 사고 등의 심각한 안전사고 등으로 공정플랜트 설비의 안전에 대해 관심이 높아지고 있다¹⁾.

특히, 공정 플랜트의 특성상 많은 설비들 중의 기본 설비인 여러 배관이 고압, 고온의 인화성, 폭발성 물질을 이송하고 있으며 그동안의 개보수 및 증설 등을 통해 복잡한 형상으로 배관이 형성되어 있고, 다양한 지지 시스템을 가지고 있어서 배관 안전관리에 있어서 정확한 분석과 구조 건전성의 확보가 필요하다.

공정플랜트의 안전하고 효율적인 운영관리의 한 방안으로 2000년대 들어서 위험도기반 검사(RBI, Risk Based Ins-

pection)기법을 이용한 플랜트 안전관리가 국내에 활발히 도입되었으며, 시설의 위험도에 따라 검사주기를 조절하는 RBI에 의해 효율적으로 안전성을 향상 시킬 수 있었다^{2,4)}. 하지만, 이는 주로 반응기, 가열기, 펌프 등의 주요 요소군을 대상으로 하였으며, 배관시스템만을 대상으로 해석한 것은 아니므로, 공정 배관을 주 대상으로 주요 검사 부위 등을 결정하는 절차의 개발도 필요하다. 지금까지는 원자력발전소의 배관⁵⁾ 또는 화력 발전소의 고온 배관⁶⁻⁷⁾에 대해서 이러한 해석이 수행되어 왔다.

공정플랜트 배관 중에 상온 근처에서 사용되는 경우 기본적으로 배관시스템의 안전성 또는 구조 건전성 평가를 위해서는 배관의 시스템 응력 및 열응력 해석을 통한 검사 우선 부위 또는 고 위험부위 파악을 위한 해석이 실시되며, 이를 바탕으로 주요 관리대상 부위를 결정하여 효율적인 검사 및 공정플랜트 배관의 운영관리를 수행할 수 있다⁸⁾. 최근 공정플랜트의 사용연료가 플랜트 내에서 생산되는 부생가스에서 천연가스로 대체 또는 부생가스와 천연가스를 혼합하여 사용하는 경우가 많이 발생하고 있으며, 이러한 내

*Corresponding Author: Kee Bong Yoon, Tel : +82-2-820-5328, E-mail : kbyoon@cau.ac.kr
Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, 84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul 156-756, Korea

부 사용 가스의 변화에 따른 압력, 온도 및 가스성분의 변동에 따라 배관의 사용 안전성을 재평가 하는 경우가 종종 발생하고 있다.

본 연구에서는 상온에서 사용하는 공정플랜트 배관의 주요 검사부위를 선정하는 방법을 제시하기 위해, 부생가스와 천연가스를 혼합 사용하는 경우를 대상으로 한 개의 실제 배관 라인 구간을 해석하여 배관 주요 부위의 최대응력 및 변위 결과를 보여주었다. 또한 배관의 시스템 응력에의 민감도를 이해하기 위해 배관의 지지대(support) 조건 및 외부 온도 조건을 변화시켜 가면서 이들이 응력 및 배관 변위 해석에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 해석 방법

2.1. 해석 대상 배관

공정플랜트에서 발생하는 여러 부생가스와 천연가스를 혼합하여 사용하는 배관을 대상으로 하였다. 두 가스를 혼합하는 믹싱 드럼(mixing drum)에서 낙아웃 드럼(knock-out drum)까지 연결된 배관을 대상으로 해석을 수행하였다. 내부 사용가스의 압력 하중, 배관의 자중에 의한 하중 및 내부 유체온도가 대기온도 보다 높아 발생하는 열하중을 고려하여 부생가스 및 천연가스 혼합 배관을 해석하였다.

2.2. 해석 대상 배관 정보

해석 대상 배관 구간의 기본적인 운영 정보와 각 사용연료에 따른 배관 사용조건은 Table 1과 2에 나타내었다.

안전성 평가 대상 배관의 내부 유체인 부생가스 및 천연가스의 혼합가스는 4.1 kg/cm²의 압력과 38°C의 온도 조건에서 사용된다.

배관 재질인 ASTM A53-B Gr B의 기계적 물성은 Table 3에 나타낸 바와 같다. 상온에서의 항복 강도는 241.3 MPa이었으므로, 해석 결과에 발생한 시스템 응력은 항복 강도에 대한 비율로 나타내었다.

Table 1. Characteristics of the pipe section for stress analysis.

Length (m)	No of Supports	No of Elbows	No of Tees
237	52	20	7

Table 2. Specification and operating conditions of the pipe.

Name	Diameter (mm)	Thickness (mm)	Materials	Pressure (kg/cm ²)	Temperature (°C)
Mixed Gas Pipe	250	9.2	A53-B	4.1	38
	400	9.5	A53-B	4.1	38

Table 3. Mechanical properties of ASTM A53-B Gr B.

Material	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Longitudinal Modulus (GPa)
A53-B	241.3	413.7	200
Hoop Modulus (GPa)	Shear Modulus (GPa)	Density(kg/m ³)	Poisson's Ratio
200	80	7,833	0.3

2.3. 배관 응력 해석 방법

배관의 열하중에 의한 응력, 자중에 의한 시스템 굽힘 모멘트에 의한 응력 및 내압에 의한 응력 등을 조합하여 Von Mises 등가응력을 결정하였으며 이를 항복강도와 비교하여 안전율을 평가하였다. Von Mises 등가응력 계산에 사용된 식은 내압에 의한 원주방향 응력(hoop stress), 열팽창에 의한 길이방향 응력(longitudinal stress), 비틀림에 의한 전단 응력(torsional stress)을 합하여 아래와 같이 계산하였으며, 계산식은 다음과 같다.

$$\sigma_{VonMises} = \sqrt{(S_h^2 - S_L S_h + S_L^2 + 3S_t^2)} \quad (1)$$

여기서 S_h 는 원주방향 응력, S_L 는 길이방향 응력, S_t 는 전단 응력이다.

배관시스템의 응력해석에 있어 외부온도는 20°C를 기준으로 해석을 수행하였고, 그 결과 응력 크기가 큰 상위 6개의 위치에 대해서는 외부 온도의 변화에 따른 응력값의 변화를 알아보기 위해 추가로 해석을 수행하였다. 또한 배관 지지대와 배관 사이의 마찰계수의 영향에 대해 해석하였다. 배관을 단순화 한 효과를 알아보기 위해서 배관 엘보 단순화에 따른 배관 처짐의 변화도 해석하였다.

3. 배관 모델링

3.1. 해석 수행 프로그램

본 연구 대상 배관 구간의 해석을 위해 상용 솔버인 AutoPIPE (Version V8i) 소프트웨어를 사용하였으며¹⁰⁾, 해석의 기준이 되는 코드는 ASME B31.3 Process Piping 코드¹¹⁾와 ASME B31.8 Gas Transmission and Distribution Piping 코드⁸⁾를 적용하였다.

3.2. 모델링 방법

해석 대상 구간인 믹싱 드럼 후단부에서 낙아웃 드럼까지 연결되는 배관은 부생가스배관으로 사용 중이었으나, 연료의 변동에 따라 부생·천연가스 혼합배관으로 용도 변경하여 사용하게 되었다. 기존 사용 압력 및 온도는 용도 변경 후 사용 압력 및 온도와 동일하다. 대상 구간에서 직선부에 설치된 배관 지지대는 일반적으로 3.2~3.5 m의 간격으로 설치되어 있으며, 엘보 티의 지지대를 포함하여 총 52개의 지지대가 설치되어 있다. 일반적인 형태의 지지대는 강재 사이 마찰계수 조건인 0.8로 설정하여 축방향 슬라이딩 조건으로 해석하였고, 루프 구간 등 다른 형태의 지지대는 현장 실사를 통해 지지대의 구속조건을 달리하여 모델링 하였다. 배관의 단열 보온재는 40 mm 두께의 펄라이트(perlite) 재질에 알루미늄 케이싱이 되어 있는 조건으로 해석하였다. 이때, 보온재의 밀도는 208 kg/m³으로 적용하였다. 케이싱 밖의 외부 온도는 20°C, 금속 배관 내의 가스 온도는 38°C 조건으로 해석을 수행하였다.

3.3. 대상 배관구간 모델

대상 배관구간의 모델링 수행 결과를 Fig. 1에 전체적

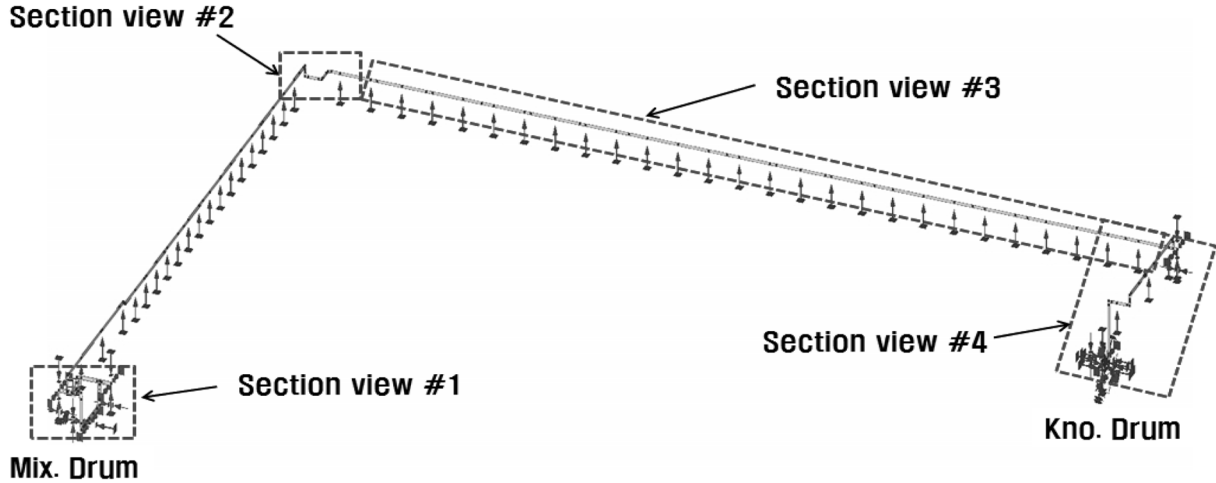


Fig. 1. Full model for pipe stress analysis for mixed gas.

인 형상을 Fig. 2~5에 엘보나 티 부분 등 주요 부위 4곳을 확대하여(section view) 상세히 나타내었다. Fig. 1에서는 전체 구간의 배관 모델을 나타내었다. 전체 길이가 길어 주요 부위가 축소되어 있지만, 확대된 주요부위의 위치와 믹싱 드럼, 녹아웃 드럼의 위치를 나타내었다.

Fig. 2는 믹싱드럼에서 부생가스와 천연가스가 혼합되어 배출되는 배관의 시작점으로 400 mm 직경의 배관이 250 mm 관경의 배관으로 축소되어 직선배관으로 형성되는 주요부위 1을 나타낸다.

첫 번째 직선구간 후 곡관부로 배관 방향이 바뀌는 주요부위 2를 Fig. 3에 나타내었으며, 첫 번째 곡관부로부터 넥 아웃드럼으로 분기되는 직선 구간인 주요부위 3을 Fig.

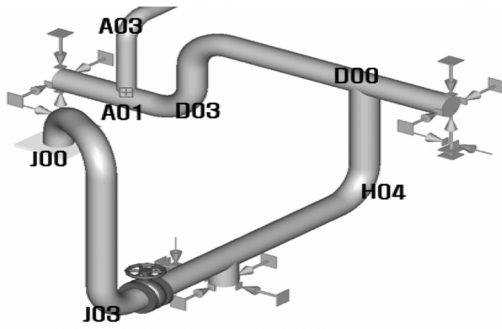


Fig. 2. Section view #1 of the pipe stress analysis model.

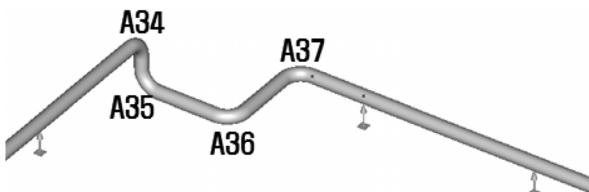


Fig. 3. Section view #2 of the pipe stress analysis model.

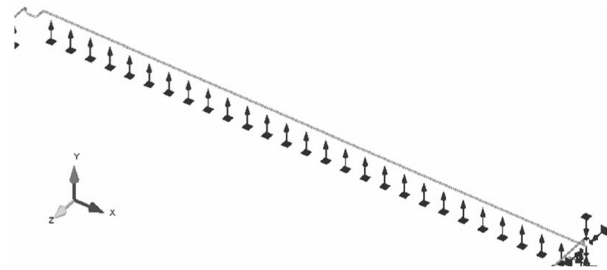


Fig. 4. Section view #3 of the pipe stress analysis model.

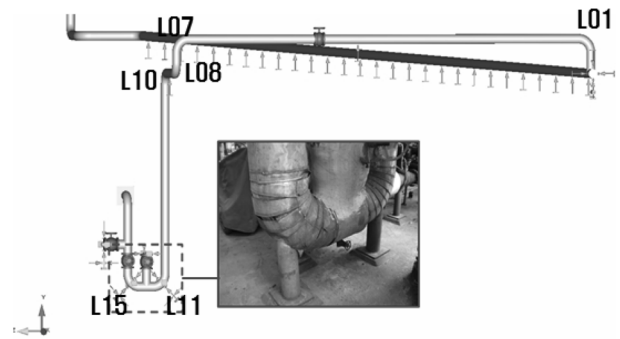


Fig. 5. Section view #4 of the pipe stress analysis model.

4에 나타내었다.

Fig. 5는 해석 대상 배관의 마지막 주요부위로 두 번째 직선구간에서 분기되어 넥 아웃드럼까지 연결되는 주요부위 4를 나타낸다. 넥 아웃드럼과 인접한 U자형 엘보 부위에 고정형 지지대가 사용되어 변형이 완전히 구속되는 강성 조건으로 응력 해석을 수행하였다.

4. 결과 및 토의

4.1. 배관 응력해석

응력해석 결과 발생한 응력이 큰 상위 6개 배관의 위치

를 각 배관 부위를 확대하여 Fig. 6(a)-(c)에 점선원으로 나타내었다.

배관의 응력이 가장 큰 부분은 Fig. 6(a)에 원으로 표시된 지점 중 A01 지점이다. A01 지점은 400 mm 직경의 배관에서 250 mm으로 관경이 줄어 직선구간으로 분기되는 시작점으로서 20°C의 외부온도조건에서 35.51 MPa의 응력이 발생된다. 응력 해석 결과 경향을 보면 티나 엘보 등 분기되는 위치나 곡관에서 높은 응력이 주로 나타나며 이는 열변형에 의해 발생된 응력 때문이다.

이상에 설명한 상위 6개 위치에서의 응력 및 응력/항복

Table 4. Total stress and stress/yield strength ratio at top 6 high stress locations.

No	Location	System Stress (MPa)	Stress/Yield Strength Ratio
1	A01	35.51	0.15
2	J00	28.54	0.12
3	D03	23.58	0.10
4	A02	21.59	0.09
5	A35	21.34	0.09
6	A94	21.00	0.09

강도의 비를 Table 4에 나타내었다. 최대응력 위치인 A01의 응력/항복강도 비는 0.15로 항복강도의 15%에 해당되는 응력을 받고 있다. 6개중 가장 낮은 응력을 갖는 위치는 A94지점이며, 넥 아웃드럼 전단부의 고정형태의 지지를 받고 있는 엘보 부분이다. 응력은 21.00 MPa이며 응력/항복강도 비는 0.09로 항복강도의 9% 응력을 받고 있다.

즉, 배관의 시스템 응력이 항복강도의 9~15% 수준이므로 외부온도 20°C에서는 대상구간의 배관 구조건전성이 확보되어 구조적 안전에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 응력이 높은 부위들을 주요 검사 및 관리의 대상으로 선정할 수 있다.

4.2. 외부 온도에 따른 배관응력 변화

앞에서 확인하였던 외부 온도 20°C 조건에서의 상위 6개의 응력발생 부위에 대하여 추가로 0°C에서 30°C까지 10°C단계로 변화를 주어 총 4가지 외부 온도조건을 재설정하였으며, 이에 대한 배관 응력해석을 수행하였다. Fig. 7과 Table 5에 외부온도 변화에 따른 배관 응력변화를 나타내었으며, Table 6에는 외부온도에 따른 응력/항복강도 비 변화를 나타내었다.

대부분의 지점에서 외부온도가 감소함에 따라 배관에 작용하는 응력이 증가한다. 외부온도의 변화에 따른 응력변화가 가장 큰 지점은 400 mm관경의 배관에서 250 mm관경의 배관으로 줄어들어 직선구간으로 분기되는 엘보 부분인 A02지점이었다. A02에서의 응력은 20°C 외부온도

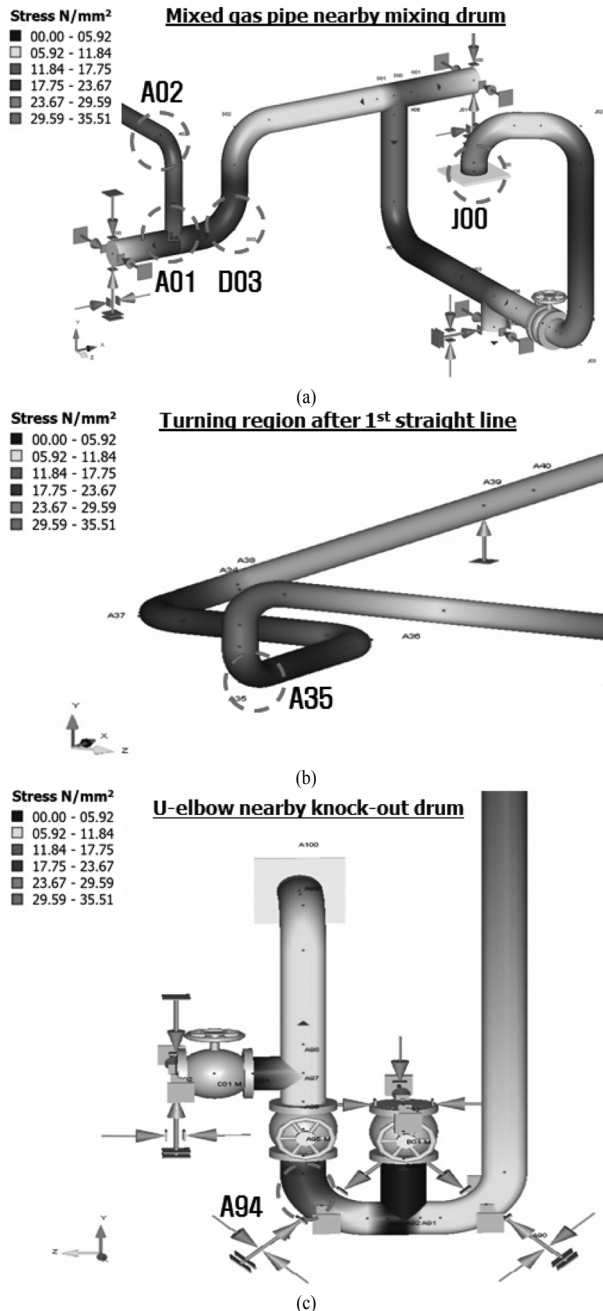


Fig. 6. Six locations in the pipe with high stress results.

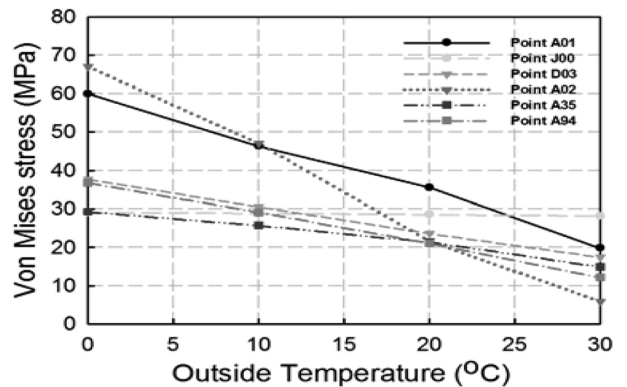


Fig. 7. Dependence of pipe system stress on outside air temperature.

Table 5. Variations of system stress with outside air temperature.

No	Location	System Stress(MPa)			
		0°C	10°C	20°C	30°C
1	A01	59.91	46.27	35.51	19.82
2	J00	29.00	28.84	28.54	28.17
3	D03	37.68	30.49	23.58	17.40
4	A02	67.01	46.96	21.59	5.86
5	A35	29.26	25.66	21.34	14.89
6	A94	36.73	29.09	21.00	12.11

Table 6. Variations of stress/yield strength ratio with outside air temperature.

No	Point	Stress/Yield Strength Ratio			
		0°C	10°C	20°C	30°C
1	A01	0.25	0.19	0.15	0.08
2	J00	0.12	0.12	0.12	0.12
3	D03	0.16	0.13	0.10	0.07
4	A02	0.28	0.19	0.09	0.02
5	A35	0.12	0.11	0.09	0.06
6	A94	0.15	0.12	0.09	0.05

조건일 때보다 0°C조건에서 3배 이상인 67.01 MPa의 응력이 발생하였으며 항복강도의 28%의 수준으로 증가하였다. 따라서, 동절기에 외부 대기 온도가 더 낮아지면, A02 지점에서의 시스템 응력은 더욱 증가될 수 있으므로, 이 위치는 주요 검사부위로 지정하여 주기적인 안전 점검이 필요하다고 볼 수 있다. 전체적으로 외부온도가 감소함에 따라 배관응력이 증가함을 확인하였지만 가장 높은 응력이 항복강도의 30%에 미치지 못하는 수준이므로 배관의 구조적 안전성은 양호하다고 볼 수 있다.

이와는 달리 믹싱드럼에서 분기되는 혼합가스배관의 시작점인 J00지점은 외부온도에 따른 응력변화가 크지 않았다. 이는 열변형에 의한 응력보다는 주로 자중에 의해 응력이 발생하기 때문이다.

4.3. 마찰계수 변화에 따른 배관 변위 및 응력 변화

앞 절의 해석에서 배관해석에서의 지지대 마찰계수는 금속과 금속간의 마찰계수인 0.8을 적용하였으나, 이를 콘크리트와 금속간 마찰계수인 0.45로 다시 적용하여 마찰계수에 따른 모든 온도 조건에서의 배관의 변위량 변화와 상위 응력 지점의 응력 변화를 확인하였다.

배관 외부온도 20°C 조건에서 수행한 배관의 변위 해석 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 변위가 가장 큰 지점은 점선의 원으로 표시한 A37지점으로서 1차 직선구간에서 2차 직선구간으로 연결되는 곡관 엘보 부분이다. 배관 응력이 5번째로 높은 A35지점의 변위도 나타내었다.

변위가 가장 컸던 A37지점에 대해서 지지대의 마찰계수를 달리한 배관의 변위 해석결과를 Table 7에 나타내었다. 모든 외부 온도조건에서 변위의 차이가 크지 않았다. 본 연구에서 가장 심한 조건인 외부온도 0°C에서도 배관의 변위 차

이가 2.2 mm 정도에 불과하였다.

마찰계수 변화에 따른 상위 응력지점 및 응력 변화를 Table 8에 나타내었다. 지지대 마찰계수가 0.8에서 콘크리트와 금속간 마찰계수인 0.45로 줄어들면서 상위 6개 응력 지점이 변화하였다. 지지대와 배관사이의 마찰이 줄어들면서 열변형의 구속력이 줄어든 것이다. 배관 변위가 가장 큰 곡관 엘보 부분의 A35지점은 마찰계수 변화에 따라 약 4.3 MPa의 응력이 줄어 7번째로 높은 응력에 해당되었으며, 상위 6개의 응력 지점에 해당되지 않았던 넥 아웃드럼 전반부에 위치한 엘보 부분인 A89 지점이 6번째로 높은 응력 지점으로 변화하였다. Fig. 9에 A89 지점을 나타내었다. 따라서, 지지대의 마찰계수를 현실적으로 결정하여 해석에 사용하는 것이 상위 응력부위를 신뢰성 있게 찾아내는데 중요하다고 볼 수 있다.

4.4. 곡관부 단순화에 따른 배관 변위의 변화

4.3절에서 확인한 바대로 배관 변위가 가장 큰 지점인 1차 직선구간에서 2차 직선구간으로 연결되는 곡관부분

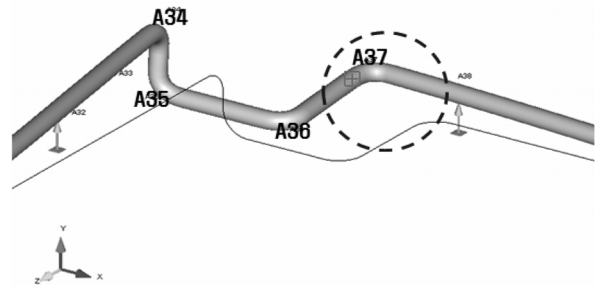


Fig. 8. Pipe displacement analysis result.

Table 7. Change of pipe displacement under different friction coefficient value.

Point	Outside Temp.(°C)	Displacement(mm)	
		Friction coefficient = 0.8 (steel to steel)	Friction coefficient = 0.45 (concrete to steel)
A37	0	43.30	45.51
	10	30.49	32.15
	20	17.87	19.24
	30	5.46	6.01

Table 8. Change of high stress locations with different friction coefficient values.

No	Location	System Stress(MPa)	
		Friction coefficient = 0.8	Friction coefficient = 0.45
1	A01	35.51	32.45
2	J00	28.54	28.48
3	A02	21.59	26.11
4	D03	23.58	23.10
5	A94	21.00	20.97
6	A89	17.72	19.58
7	A35	21.34	17.01

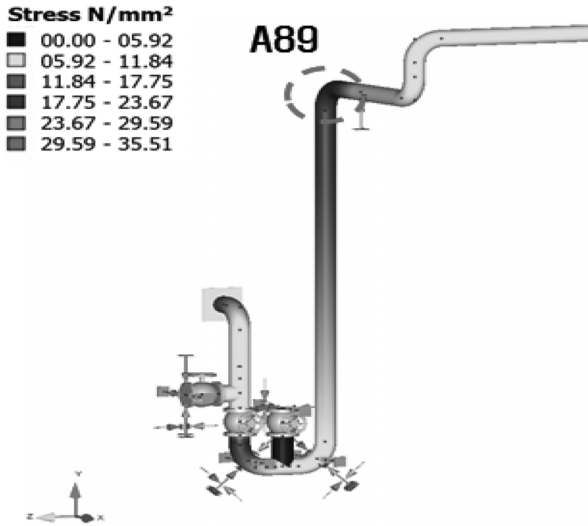


Fig. 9. A89 location with high stress result under 0.45 friction coefficient condition.

에 대하여 곡관부 형상을 단순화하여, 이에 따른 배관의 변위 변화를 알아보았다. 기존에는 총 4개의 엘보가 사용되어 복잡하게 형성된 곡관 부분을 2개의 엘보를 사용하여 비교적 단순한 형상으로 변경하였으며, Fig. 10에 단순화된 배관 형상을 나타내었다.

곡관부분의 단순화 해석결과를 Table 9에 나타내었다. 기존 곡관부분의 형상에서 배관 변위가 가장 큰 A37지점과 단순화된 형상의 곡관을 사용했을 때의 배관 변위가 가장 큰 A103지점의 변위를 비교하였을 때 그 차이가 크지 않았다. 가장 심한 온도 조건인 외부온도 0°C 에서도 변위의 차이가 2 mm 정도였다. 따라서 배관 곡관부의 단순화에 의해서 전체 구조건전성의 개선은 이루어지지 않았다.

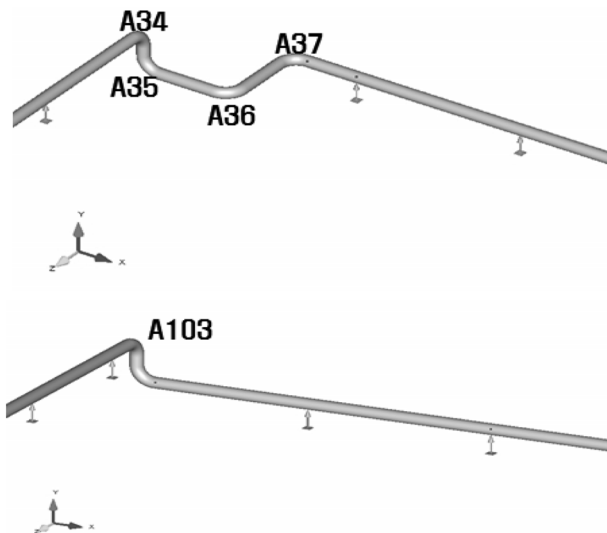


Fig. 10. Simplified model for the elbow section.

Table 9. Change of pipe displacement after simplifying the elbow.

Outside Temp.(°C)	Displacement(mm)	
	A37	A103
0	43.30	41.38
10	30.49	28.94
20	17.87	16.77
30	5.46	5.34

5. 결론

본 연구에서는 공정플랜트에서 부생가스와 천연가스의 혼합 및 이송을 위해 설치된 연료배관을 대상으로 하나의 실제 배관 라인 구간을 해석하여 배관의 최대 시스템 응력 및 변위 발생 위치를 평가하고, 이를 바탕으로 주요 검사 및 안전관리 대상 부위를 판단하여 제시하였다. 해석결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 배관의 시스템 응력 해석을 수행함으로써, 발생하는 응력이 높은 상위 일정 개수의 배관 부위를 안전관리 대상부위로 선정하여 관리할 수 있다. 응력이 가장 크게 발생하는 부위는 대부분 엘보, 티, 지지대 중 일부이다. 본 연구에서 수행한 실기 해석의 경우 항복강도의 9~15%에 해당하는 시스템 응력이 발생하여 건전성을 확인할 수 있었다.

2) 배관의 외부 온도가 감소함에 따라 배관 주요 부위에 작용하는 응력이 증가하였다. 실기 해석의 결과 30°C의 외부 온도의 변동에 주요부위 응력이 3배 증가한 경우도 있었다. 하지만 가장 높은 응력이 항복강도의 30% 수준이었므로, 외부 온도가 낮은 동절기에도 배관의 구조 건전성이 확보되어 있다고 볼 수 있다.

3) 지지대의 마찰계수 값에 따른 배관의 응력 및 변위 해석을 수행하였다. 강재사이 마찰계수 조건(0.8)과 콘크리트와 강재 사이의 마찰계수 조건(0.45)을 고려한 해석 결과를 비교하여 보면, 응력이 높은 상위 6개 배관 부위가 바뀌었다. 따라서, 지지대의 마찰계수 값을 현실적으로 결정하여 해석에 사용하는 것이 상위 응력부위를 신뢰성 있게 찾아내는데 중요하다고 볼 수 있다.

4) 배관 응력 해석을 사용하여 복잡하게 형성되어 있는 배관의 형상을 변경하였을 때의 발생하는 시스템 응력을 줄일 수 있는지 확인할 수 있다. 본 연구에서는 복잡한 엘보를 단순화 하였을 때의 효과를 제시하였다.

감사의 글: 본 연구의 일부는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 에너지인력양성사업(20114030200020)으로 수행되었습니다. 또한 일부 연구는 한국가스안전공사 용역 지원에 의한 것이며 관계자 여러분께 감사드립니다.

References

1) Government-Civilian Joint Committee for Auditing National

- Energy Facility, “Final Report for Main Committee for Auditing National Energy Facilities”, Ministry of Knowledge Economy, 2012.
- 2) Sang-Hoon Shim, Jung-Soo Song, Ji-Yoon Kim and Kee-Bong Yoon, “Development of RBI Procedures and Implementation of a Software Based on API Code (I) - Qualitative Approach ”, Journal of Korean Institute of Industrial Safety, Vol. 17, No. 3, pp. 66-72, 2002.
 - 3) Jung-Soo Song, Sang-Hoon Shim, Jung-Rock Kwon, and Kee-Bong Yoon, “Development of RBI Procedures and Implementation of a Software Based on API Code (II) - Semi-Quantitative Approach ”, Journal of Korean Institute of Industrial Safety, Vol. 17, No. 4, pp. 110-118, 2002.
 - 4) Jung-Soo Song, Sang-Hoon Shim, Song-Chun Choi, and Kee-Bong Yoon, “Development of RBI Procedures and Implementation of a Software Based on API Code (III) - Quantitative Approach ”, Journal of Korean Institute of Industrial Safety, Vol. 18, No. 1, pp. 56-63, 2003.
 - 5) Jai-Hak Park, Jae-Bong Lee and Young Hwan Choi, “Analysis of Failure Probabilities of Pipes in Nuclear Power Plants due to Stress Corrosion Cracking”, Journal of Korean Society of Safety, Vol. 26, No. 2, pp. 6-12, 2011.
 - 6) Kyu-In Shin, Jin-Sang Lee and Kee-Bong Yoon, “3-Dimensional Stress Analysis for Creep Life Assessment of Y-Piece Under Inner Pressure”, Journal of Korean Society of Safety, Vol. 22, No. 2, pp. 22-27, 2007.
 - 7) Yang-Mi Kwon, Young-Wha Ma, Seong-Wook Cho and Kee Bong Yoon, “Stress Analysis and Residual Life Assessment of T-piece of High Temperature Pipe”, Journal of Korean Society of Safety, Vol. 20, No. 3, pp. 34-41, 2005.
 - 8) ASME B31.8 Gas Transmission and Distribution Piping System, 2010.
 - 9) Ji-Yoon Kim and Kee-Bong Yoon, “System Stress Analysis and Structural Integrity Assessment for a Piping System” KGS engineering project report, Energy·Safety Research Institute of Chung-Ang University, 2013. 01.
 - 10) AutoPIPE V8i(SELECTseries 3) Tutorial Manual, Bentley Systems Inc., 2011.
 - 11) ASME B31.3 Process Piping, 2010.