

신축이음과 하중행거가 함께 설치된 고온플랜트 배관계의 시스템응력 해석 연구

박도준* · 유종민** · 한승연** · 윤기봉***† · 김지윤****

중앙대학교, *가스·에너지플랜트공학과 대학원

기계공학과 대학원, *기계공학부 · ****에너지·안전 연구소

(2014년 8월 7일 접수, 2014년 9월 10일 수정, 2014년 9월 12일 채택)

A Study on System Stress Analysis of High Temperature Plant Piping with Expansion Joints and Load Hangers

Do Jun Park* · Jong Min Yu** · Seung Yeon Han** · Kee Bong Yoon***† · Ji Yoon Kim****

Chung-Ang University, Graduate School, *Gas & Energy Plant Engineering · **Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering · *Energy Safety Research

(Received 7 August 2014, Revised 10 September 2014, Accepted 12 September 2014)

요약

고온에서 운전되는 플랜트에서는 열변형에 의한 배관 사고를 예방하고 배관계통의 우선 검사관리 부위의 선정을 위해 배관 시스템하중 해석을 수행하는 경우가 많다. 본 연구에서는 국내 한 공정플랜트에서 설계변경에 따라 반응기와 반응기 사이에 추가 설치된 연결배관을 대상으로 배관 시스템응력 해석을 수행하였다. 특히 배관에 일반적으로 설치되는 하중행거(hanger) 이외에 열팽창을 흡수하는 신축이음(expansion joint)이 함께 설치된 경우의 배관 특성을 연구하였다. 이를 위해 배관 응력을 형성하는 구조적 요인의 영향을 평가하기 위해 배관계에 포함된 행거와 신축이음이 비정상적으로 작동되는 경우도 가정하여 해석하였다. 추가적인 인입라인이 있는 경우도 해석을 수행하였다. 정상 운전 시 배관계의 시스템 응력 결과와 비정상적인 운전 경우의 해석결과를 비교하여 각각 배관요소의 역할을 연구하였다.

주요어 : 고온플랜트, 배관응력해석, 신축이음, 정하중행거

Abstract - In the plants operated under high temperature condition, piping system load analysis is often performed to prevent accidents caused by thermal deformation and also to locate inspection priority points of the piping system. In this study, piping system stress analysis was performed for a pipe system between the reactors in a process plant. The piping system includes typically installed hangers and expansion joints. In order to evaluate the effects of structural components such as hangers and expansion joints, the case for the expansion joint or the hanger under abnormal operation is considered. By comparison analysis results of piping system during normal operation and abnormal operation, the role of each pipe components are studied.

Key words : High temperature plant, Piping stress analysis, Expansion joint, Constant hanger

1. 서 론

†To whom corresponding should be addressed.
Department of Mechanical Engineering Chung-Ang University
84, Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, Korea
Tel : 02-820-5328 E-mail : kbyoon@cau.ac.kr

국내 석유화학산업 설비의 노후화, 공정 고도화에
따른 설비 증설 및 설계 변경으로 인해 사용 안전성

확보를 위한 노력이 경주되고 있다. 인화, 폭발성의 위험물을 제조하고 저장 취급하는 석유화학플랜트의 안전사고는 안전 우선 정책으로 인해 더욱 중요한 문제로 인식되고 있다[1-6].

석유화학플랜트 설비 중 배관계통은 설계 변경은 잦으나 기존설계코드의 적용이 의무사항이 아니며 엔지니어링 주체에 의해 판단되어 설계된다. 따라서, 결합 발생 빈도가 높고 관리가 필요한 배관계통의 경우 시스템응력 해석을 통해 상대적 위험도가 높은 부위를 파악하여 주요 관리대상 부위를 결정하여야 한다. 이는 RBI(Risk Based Inspection)에 의한 플랜트 설비 안전관리에도 효과적인 절차로 적용될 수 있다[7].

공정플랜트 배관 설비는 고온에서의 운전으로 인한 열하중과, 오랜시간 운전에 의한 크리프 변형 누적으로 행거 및 행거하중의 초기 설정값을 관리하여야 한다. 추가로 지지대 또는 행거에 의한 지지하중 작용 및 배관 구속성도 고려하여야 한다. 최근의 연구에서는 이러한 지지대 구속 조건의 배관 응력에 대한 영향과 외부 온도에 따른 배관 응력 변화에 대한 연구가 수행되었다[8].

본 연구에서는 특히 배관의 시스템응력을 완화하기 위한 신축이음장치(expansion joint)가 있는 경우에 대해 연구하였다. 배관계의 시스템응력을 형성하는 구조적인 요인들의 영향을 평가하기위해 정상 운전 시 배관계의 시스템응력 해석결과와 행거, 신축이음의 비정상 작동을 가정하였을 경우의 해석결과를

비교 연구하였다. 또한, 구조건전성 평가를 위한 대상 범위 선정을 위해 주배관에 연결된 인입배관의 영향도 검토하여 보았다.

2. 배관 응력 해석방법

국내의 한 석유화학공정 상의 반응기 3기와 반응기 사이의 연결배관들을 대상으로 해석을 수행하였다. 해당 설비는 기존에 2기의 반응기로 운용되어 오다 공정 개선을 위해 스마트 반응기 1기를 좁은 공간에 추가로 증설하였다. 증설 후 기존 반응기, 신규 반응기, 기존 반응기 순으로 반응 공정을 개선해 사용하고 있다. 반응기의 증설과 공정 상의 목적으로 인해 설비들은 좁은 지역에 밀집되어 있으며, 제한적인 공간에서 복잡한 형상으로 연결배관과 지지시스템 등의 설비가 설치되어있으므로 배관 응력에 따른 관리 포인트를 결정할 필요가 있다. 내부 사용유체 온도에 의한 열하중, 사용유체 압력 하중, 배관의 자중 및 지지시스템에 의한 하중을 고려하여 해석하였다.

2-1 해석대상 배관 정보

해석 대상 배관군의 기본 정보 및 설계 운전 조건과 배관 구성 요소를 각각 Table 1, 2에 나타내었다. 배관 재질인 A240-304H 강의 기계적 물성은 Table 3에 나타내었다.

Table 1. Specification and operating condition of the piping system

PIPE SPEC.	Actual O.D (mm)	Wall Thick. (mm)	Material	Pressure (MPa)	Temperature (°C)
PIPE	2148	20	A240-304H	0.07	535, 550
Reactor	R1	3200	A240-304H		540~600
	R2	4000			580~600
	R3	4560			535~560
	Expansion Joint	2507			1.524
Reducer (shell of reactor)	2148 ~4560	45	A240-304H		535~550
Insulation	-	200	Calcium Silicate	-	-
Cladding	-	2	Aluminum	-	-

Table 2. Components of the system

Total Pipe Length (m)	No. of Hanger	No. of Elbows	No. of Expansion Joint
133	8	8	4

Table 3. Mechanical properties of A240-304H

Pipe ID	Yield Strength (MPa)	Ultimate Strength (MPa)	Longitudinal Modulus ($\times 10^6$ MPa)	Hoop Modulus ($\times 10^6$ MPa)	Shear Modulus ($\times 10^6$ MPa)	Density (kg/m^3)	Poisson's Ratio
A240-304H	206.84	517.11	0.195	0.195	0.075	8025	0.3

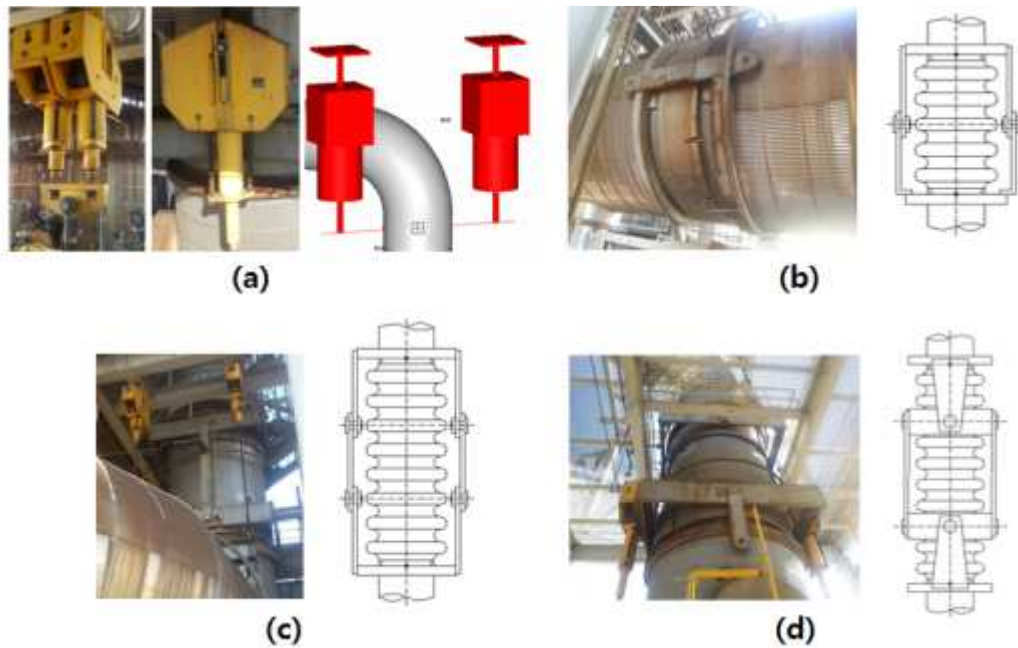


Fig. 1. Hangers and expansion joints in the piping for this study ; (a) Constant hanger support, (b) Hinged expansion joint, (c) Double hinged joint and (d) Double gimbal joint

복잡한 형상의 배관을 지지하기 위해, 배관에 변위가 생기더라도 일정한 행거 하중을 가하는 정하중 행거가 사용되었으며, 해석에는 설계 상의 행거 하중을 적용하였다. 열팽창에 의한 응력발생을 억제하기 위해 총 4기의 신축이음기 설치되어 있다. 설치된 행거 및 신축이음기의 실제 형상과 모델을 Fig. 1에 보였다.

열 하중에 의한 열응력, 내압에 의한 후프응력, 자중 및 행거 하중에 의한 응력을 평가하였으며, 각 응력을 조합하여 Von Mises 등가응력을 평가하였다 [8-9]. 외부 대기 온도는 21.1°C로 가정하였다. 응력 해석 결과 Von Mises 응력이 큰 상위 5개의 응력 지점을 도출하였다.

2-2 배관 모델링

배관 시스템 응력 해석을 위해 상용 해석 솔버인 AutoPIPE V8i를 사용하였다[9]. 모델링과 해석 기준을 위해 ASME B31.3 Process Piping 코드를 적용하였다[10]. 반응기 3기는 직경이 큰 배관 요소로 모델링하였으며, 배관 인입이 반응기 상부에서 이뤄지는 반응기는 실제 경관 형상과 유사한 모사를 위해 리듀서를 적용하였다. 다른 반응기들은 평면으로 경관을 모사하였다. 신축이음기는 구속방향성을 고려하여 강성을 고정 또는 0으로 적용하였다. 전체 모델링에서 총

36개의 지점이 발생하였다. 생성된 지점을 기준으로 해석을 위해 Tee, Elbow 전후단에 지점을 포함한 총 68 지점에서 응력을 평가하였다.

2-3 해석별 운전조건

배관계의 여러 경우의 운전조건에 따른 배관 시스템응력해석을 수행하기 위하여 우선 해석 기준이 되는 정상 운전 상태에서의 배관 시스템 응력해석을 수행하였으며[11], 또한 배관 요소 중 행거와 신축이음이 비정상적으로 작동하는 경우를 가정하여 해석을 수행하였다. 추가로 주배관에 비해 구경이 작은 분기 배관이 연결되어 있으므로 이의 영향을 알아보기 위해 분기배관을 고려한 응력해석도 수행하였다. 각 응력해석 사례를 Table 4에 보였다.

가) 정상 운전 상태의 배관계

설비의 정상적인 운영상태에서의 배관 구조 건전성 평가를 위해 실제 운전조건에 따른 응력해석을 Case 1으로 수행하였다. 운전 온도는 설비의 실측 데이터를 참고하여 적용하였다. 행거 하중은 설계값을 적용하였으며, 신축이음기는 도면의 설계상황과 실제 설치상황이 일치하지 않는 경우가 많이 있으므로 직접 현장 확인에 따른 실제 구속방향을 적용하여 해석

하였다. 부위별 적용된 온도조건을 Fig. 2에 보였다.

나) 행거 및 신축이음의 비정상 작동 시 배관계 설비의 구조적 최악의 조건을 가정하기 위해, 행거와 신축이음의 비정상 작동을 가정하였다. Case 2에서 모든 행거 하중을 0으로 가정하고 그 외의 조건은 Case 1과 같이 하였다. Case 3에서는 정상 운전 상태와 비교하여 신축이음이 그 역할을 수행하지 못하도록 모든 방향으로의 구속조건을 적용하였다. 즉, 신축이음은 기본 배관과 동일한 거동을 보인다고 가정한 것이다. 신축이음의 구속성을 제외하고는 Case 1과 같은 조건을 적용하였다. Case 4에서는 행거와 신축이음 모두 비정상 작동을 가정하였다. 모든 행거 하중을 0로 적용하였으며, 신축이음은 모든 방향 구속으로 가정하였다. 그 외 조건은 Case 1과 같이 적용하였다.

다) 분기배관을 포함한 배관계

주배관에서 600mm 직경으로 분기되는 증기배관을 고려하여 응력해석을 수행하였다(Case 5). 해당

배관은 반응기 2호기에 전단 주배관에 분기되어 있으며, 공정상 수증기를 주입하는 목적으로 사용되고 있다. 분기배관의 기본적인 정보와 형상을 Table 5와 Fig. 3에 각각 나타내었다.

3. 결과 및 토의

3-1 Case별 배관 응력해석 결과

해석결과 각 Case별 응력값을 Table 6에 나타내었다. Von Mises 등가응력을 기준으로 고응력 5개 부위의 위치를 각 Case별로 Fig. 4(a) ~ 4(d) 및 Fig. 5에 나타내었다.

Case 1의 해석 결과, 고응력 5개 부위는 반응기 2와 반응기 3의 연결배관 중 반응기 2에 매우 가까운 곡관부에 집중되어 나타났다. 고응력 발생부위에서 응력의 크기는 Von Mises 등가응력을 기준으로 138.28MPa부터 44.56MPa으로 평가되었다. 각 응력

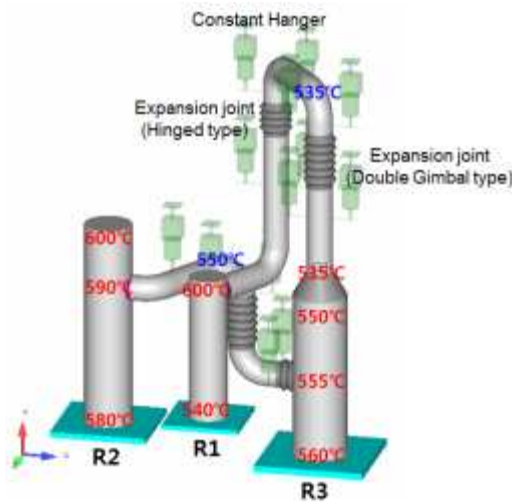


Fig. 2. Modeling and local operating temperature

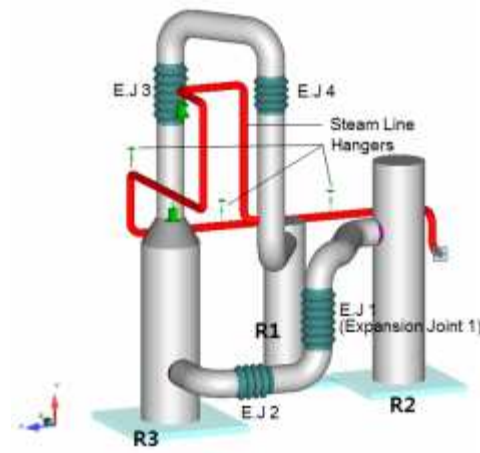


Fig. 3. Modeling of additional steam line (in red color)

Table 4. Cases for stress analysis of the piping system

Component condition	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Hanger	normal operation	hanger removed	normal operation	hanger removed	normal operation
Expansion joint	normal operation	normal operation	expansion joint removed	expansion joint removed	normal operation
Others	-	-	-	-	additional steam line installed

Table 5. Components of the additional steam inlet line

Actual O.D (mm)	Wall Thick. (mm)	Total Pipe Length (m)	No. of Support	No. of Elbows	Operating Temp. (°C)	Operating Pressure (MPa)
609	8	81	9	11	471	0.07

Table 6. Stress values of high ranked points for each analysis case

Case of Analysis	High Stress Location (Ranking)	Von Mises Stress (MPa)	Sustain Stress (MPa)	Hoop Stress (MPa)	Expansion Stress (MPa)
Case 1	1	138.28	105.32	4.27	0
	2	132.25	101.90	4.27	0
	3	58.47	45.48	4.27	0
	4	53.34	41.51	4.27	0
	5	44.56	34.90	4.27	0
Case 2	1	83.65	62.46	4.27	0
	2	83.15	62.90	4.27	0
	3	58.64	43.66	4.27	0
	4	49.62	37.19	4.27	0
	5	29.94	26.25	4.27	0
Case 3	1	123.57	14.37	4.27	102.88
	2	116.23	34.26	4.27	70.74
	3	116.14	14.32	4.27	95.56
	4	113.47	32.59	4.27	74.14
	5	111.13	16.80	4.27	124.59
Case 4	1	132.00	5.32	4.27	124.59
	2	126.86	17.08	4.27	106.07
	3	98.78	17.42	4.27	84.53
	4	92.04	11.48	4.27	84.26
	5	88.91	12.54	4.27	102.88
Case 5	1	138.28	105.32	4.27	0
	2	132.25	101.90	4.27	0
	3	69.50	30.43	2.53	32.27
	4	67.53	28.40	2.53	32.04
	5	62.18	26.89	2.53	27.53

요소별 해석값을 분석한 결과, 행거하중 및 자중에 의한 Sustain 응력이 가장 크게 나타났다. Hoop응력은 비교적 작게 나타났으며, 열응력은 나타나지 않았다. 이는 신축이음에 의해 배관의 열팽창이 모두 흡수되기 때문인 것으로 판단된다. 특히 고응력부 1, 2는 반응기 2에 매우 가깝게 설치된 행거 A의 초기 하중에 의해 발생한 것이다. 신축이음 1과 신축이음 2가 작동하여 열변형을 거의 흡수하여 마치 배관이 연결되어 있지 않은 것 같은 효과가 있는 상태에서 행거 A의 초기하중이 과하게 작용하면 오히려 1, 2 부분의 응력이 과하게 올라갈 수 있기 때문이다. 행거 부 이후 배관의 응력은 58.47MPa로 감소하였다.

Case 2의 경우, 행거의 하중이 모두 0으로 세팅된 경우이다. 반응기 1과 반응기 3 연결배관의 곡관부와 반응기 2와 반응기 3 연결배관의 곡관부에 고응력부가 분포되어 발생하였다. 응력의 크기는 83.65MPa부터 29.94MPa으로 계산되었다. 이는 행거에 초기하중이 정상적으로 부가된 경우의 Case 1과 비교하여 더

낮은 응력값이 발생한 것이며, 행거하중에 의해 불필요하게 발생되는 1과 2 부위의 Sustain 응력이 오히려 낮아진 결과로 판단된다. 하지만 Case 1의 3번째 응력(58.47MPa)과 Case 2의 1번째 응력(83.65MPa)을 비교해보면 적절한 초기하중이 작용하지 않은 결과 응력의 전반적 수준은 상승한 것을 알 수 있다.

Case 3의 경우는 신축이음부가 모두 신축성이 없어진 경우를 가정한 것이다. 반응기 2와 반응기 3의 연결배관의 곡관부에서 전체적으로 고응력이 발생하였다. 응력의 크기는 123.57MPa부터 111.13MPa으로 계산되었다. 행거하중이 없어져서 Case 1의 1, 2부 응력의 발생 조건이 없어져서 최고 응력값은 Case 1에 비해 낮지만, 신축이음이 모든 방향으로 구속됨으로 인해 열팽창에 의한 응력을 흡수하지 못해 전체 배관계에 열하중이 나뉘어져서 전체적으로 매우 높은 응력이 발생하였으며, 그 결과 상위 1~5의 응력값이 모두 높게 계산되었다.

Case 4의 경우 Case 3과 유사하게 신축이음이 작

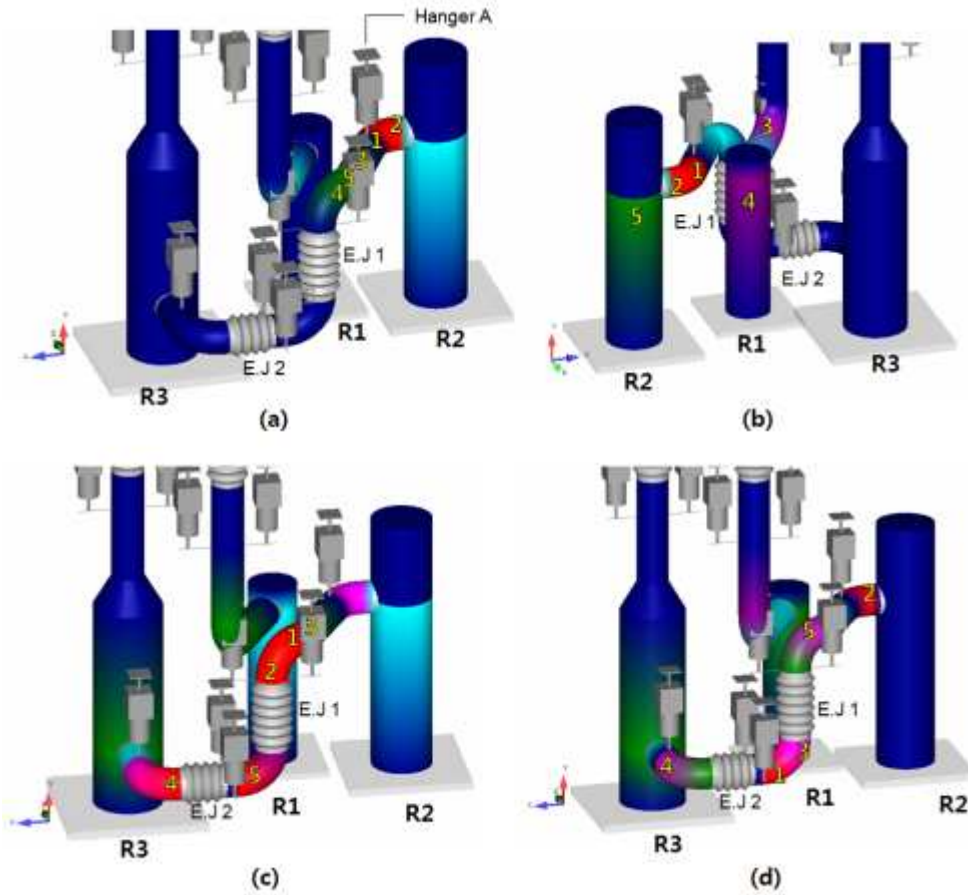


Fig. 4. Pipe stress analysis results for various conditions ; (a) Case 1 ; normal hangers and normal expansion joints, (b) Case 2 ; abnormal hangers and normal expansion joint, (c) Case 3 ; normal hangers and abnormal expansion joints and (d) Case 4 ; abnormal hangers and abnormal expansion joints

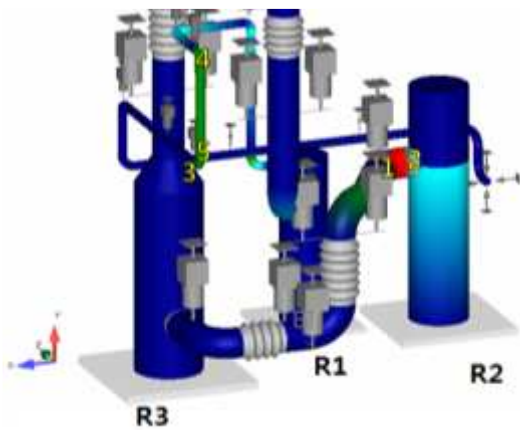


Fig. 5. Pipe stress analysis results with additional steam lines (Case 5)

동하지 않으므로 반응기 2와 반응기 3의 연결배관의 곡관부에서 높은 응력이 발생하였다. 응력의 크기는 132.00MPa부터 88.91MPa로 계산되었다. 행거하중

의 제거와 열팽창을 흡수하는 기능도 제거된 결과로 열팽창을 전혀 고려하지 않은 경우의 최대 시스템하중이라고 생각하면 된다. 즉, Case 1의 1, 2번 응력은 반응기 2에 연결된 단관이 과도한 초기 행거하중에 의해 외팔보와 비슷한 하중조건에서 발생한 비정상적 응력으로 간주한다면 Case 4의 열응력이 연결되어 있는 배관계에서 발생가능한 가장 높은 열응력이라 간주될 수 있다.

Case 5의 경우, 반응기 2와 반응기 3의 연결배관에서 반응기 2 전단 곡관부와 추가 연결배관의 곡관부에 고응력이 발생하였다. 반응기 2와 반응기 3 연결배관에서의 발생응력은 Case 1과 동일하다. 연결배관에서는 신축이음이 없으므로 열팽창에 의한 응력이 비교적 크게 발생하였다. 추가 배관이 직접 연결되어 있는 반응기 1과 반응기 3의 연결배관의 경우 응력 변화가 미미하였다.

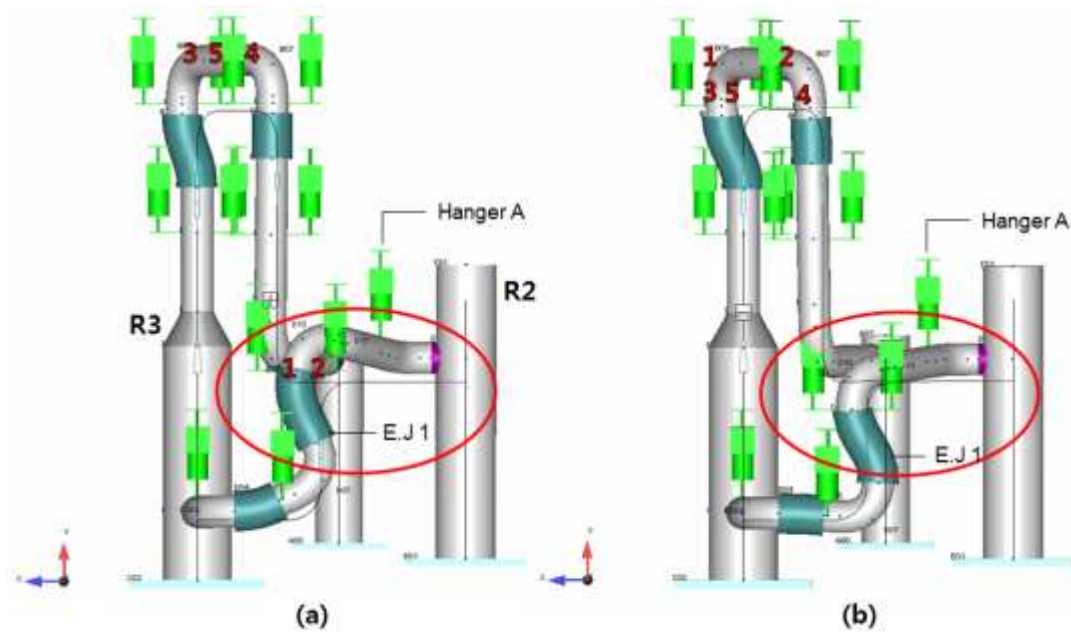


Fig. 6. Pipe displacements at the pipe connected to Reactor 2, (a) under normal hanger and normal expansion joints and, (b) after removing the hanger load

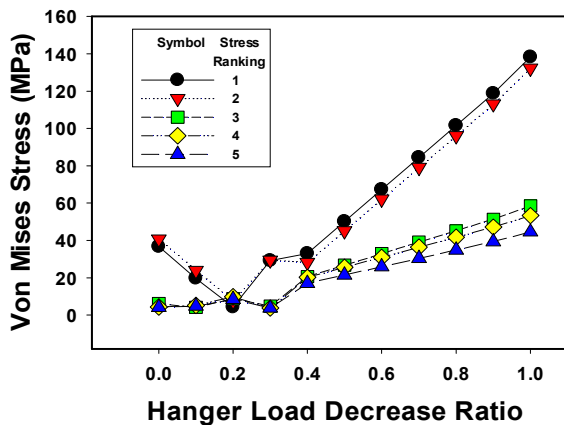


Fig. 7. Change of Von Mises stress level at the fine high stress locations for normal conditions (Case 1)

3-2 결과 토의

Case 1의 경우 정상 운전 시 배관계를 모사하였으므로, 신축이음에 의해 발생된 열응력이 대부분 신축이음부에서 흡수되어 발생하는 열응력은 거의 사라지는 것으로 계산된다. 따라서 행거하중 및 자중에 의한 Sustain 응력이 주로 발생하였다. 행거하중을 모두 제거한 Case 2의 경우가 정상상태인 Case 1과 비교해 보았을 때 외견상 더 낮은 응력값이 평가된 것처럼 보인다. 하지만 이는 Case 1의 상위 1, 2의

(138.28, 132.25MPa) 지점의 응력 때문이다. 이 응력은 반응기 2의 연결배관의 행거하중 때문이었으므로 이 두 지점을 제외하면 Case 2의 응력이 더 높다고 볼 수 있다. 즉, cold/hot상태에서 일정한 행거하중을 작용시키는 정하중 행거의 행거하중이 정상 운전 시 더 큰 응력을 발생시키는 요인으로 작용한 것이다. Case 3과 같이 신축이음의 내부 고착 등 비정상적 작동으로 인한 모든 방향으로의 구속조건을 적용하면 전체 배관계의 응력을 상승시키나, 짧은 직선구간 후 곡관부에 발생하는 국부적 응력은 낮아지는 경우도 있었다. 이는 신축이음부가 정상 작동하여 곱힘하중이나 인장하중을 모두 흡수하게 되면, 마치 배관이 이 부분에서 연결되어 있지 않은 듯 작용하게 되므로 오히려 배관지지력이 감소되기 때문이다. 즉, 반응기 2와 연결된 배관의 곡관부의 경우, 신축이음이 정상 작동되면 신축이음부(E.J. 1)의 배관연결이 끊어진 것과 같아, 행거하중이 외팔보에 작용된 것과 같은 상황으로 해석될 수 있어 높은 응력이 발생하게 된다. 보의 끝에 작용하는 행거하중의 영향을 크게 받는 상황으로 간주될 수 있다. Case 1과 Case 2의 경우 배관 변형상태를 확대 표시하여 Fig. 6의 원 안에 나타내었다. 행거 A가 작동하지 않은 Case 2의 경우 오히려 배관의 변형이 작은 것으로 나타나고 있으며 이는 신축이음 1에서는 배관이 연결되어 있지 않은 듯 자유

롭게 변형하므로 행거 A의 효과가 Case 1에서 크게 나타나기 때문이다. 행거 A의 하중을 감소시켜 가면서 나타나는 상위 5군데의 Von Mises 응력 변화를 Fig. 7에 보였다. 행거 A의 하중을 현재의 20~30% 수준으로 낮게하면 고응력부의 응력수준이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 즉, 행거 A의 하중은 20~30% 수준으로 조정하는 것이 바람직하다.

4. 결론

본 연구에서는 고온에서 운영되는 공정플랜트에서 반응기와 반응기 사이에 연결된 배관을 대상으로 배관에 설치된 신축이음과 행거가 정상적으로 작동될 때 배관 시스템응력을 해석하였고, 이들 요소들이 비정상적인 상태에서 운전하는 경우 배관계의 시스템응력 변화를 평가하여 비교하였다. 해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 반응기를 포함한 배관계를 대상으로 행거(hanger)와 신축이음(expansion joint) 등이 정상적으로 작동되는 때, 행거하중이 제거되었을 때, 신축이음이 모두 고착되어 열변형 흡수를 못하는 때, 행거하중이 모두 제거되고 신축이음이 모두 고착되었을 때를 각각 가정하며, Case별로 해석을 수행하였다. 해석결과 Von Mises 등가응력을 기준으로 상위 5개 부위의 고응력 위치를 결정하였으며, 각 응력의 발생원인을 파악하기위해 Sustain 응력, Hoop 응력, Expansion 응력의 응력원인별 평가를 수행하였다. 이에 의해 행거와 신축이음의 역할을 연구하였다.
- 2) 배관요소가 정상적인 작동을 하는 정상 운전 시 반응기와 가까운 행거 사이의 연결배관에서 고응력발생부위가 집중되어 나타났는데, 이유는 신축이음에 의해 열팽창 및 배관변위가 자유롭게 허용되는 상황에서 과도한 행거하중을 가하면, 배관의 지지력이 감소되어 오히려 해당 배관부에 큰 응력이 발생되기 때문으로 볼 수 있다. 사례해석 결과 이 부위에서는 배관재질의 항복응력을 넘어서는 응력도 나타났으나, 다른 부위에서는 항복응력 이하의 응력이 발생하였다. 신축이음을 사용하는 경우에는 신축이음 부근에 행거를 사용하는 경우 이런 사항을 유의하여야 할 것이다.
- 3) 행거하중을 조정하여 민감도해석(sensitivity analysis)을 수행하여 초기 하중의 20~30% 정도 수

준이 적정한 초기 행거하중임을 보였다. 이와 같이 배관해석을 활용하면 초기 행거하중의 최적값을 결정할 수 있다.

4) 대상 배관계의 주배관에 비교적 작은 구경(관경 비율 약 1/3)으로 인입되는 추가배관의 영향을 분석하였으며, 해석결과 추가 배관의 영향은 작은 것으로 나타났다. 이는 추가배관 자체적으로도 배관지지시스템을 갖추고 있으며 배관의 관경또한 큰 차이가 있으므로 응력발생의 결과를 독립적으로 평가하여도 된다.

5) 일반적으로 배관에 힌지형(hinge-type) 또는 짐발형(gimbal-type) 등의 신축이음을 설치하면 열팽창을 흡수하는 효과가 커서 대부분의 발생된 열응력이 흡수된다. 하지만 이 경우 주변 행거의 하중결정에 유의하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행된 결과입니다(No. 20132010500060). 또한 일부는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 결과입니다(No. 20141010101850).

References

1. 김국래, 황세연, 김봉훈 : “국가산업단지의 석유화학 안전관리 방안에 관한 연구”, 한국화재소방학회 논문지, 제 26권 제 1호(2012)
2. 최정우, 윤기봉 : “에너지 안전 기술의 현황 및 개발 전략”, 에너지공학, 제 17권 제 4호(2009)
3. 윤기봉, 최정우 : “차세대 에너지 안전 첨단 관리 시스템 개발사업 소개 및 발전설비 CMMS 개발 현황”, 한국에너지공학회 2007년도 추계 학술발표회 pp3-28 (2007)
4. 최정우, 이관주, 김희진, 오지수, 원두일, 서재민, 박원영, 윤기봉 : “화력발전 플랜트의 최적 설비 관리를 위한 손상 기구 정보 시스템 개발”, 한국에너지공학회 2009년도 추계 학술발표회 pp89 (2009)
5. 이호준, 김유빈, 최정우, 윤기봉 : “플랜트의 위험도 관리를 위한 GUI 기반 RBI시스템 개발”, 한국에너지공학회 2010년도 추계 학술발표회

pp176 (2010)

6. 변철현, 윤기봉 : “Bowtie 위험성평가 기법의 정
유설비 효율적 적용방안에 대한 연구”, 한국에너
지공학회 2013년도 추계 학술발표회 pp18 (2013)
7. 윤기봉, 응웬반장, 위엔두안선, 정성용, 이주영, 김
지윤 : “부생가스 연료배관의 설계변경에 따른 안
전성 평가”, 한국가스학회지, 제 17권 제 2호(2013)
8. 정성용, 윤기봉, 팜반듀엣, 유종민, 김지윤 : “공
정플랜트 연료배관의 시스템응력 해석에 의한
구조 건전성 평가”, 한국안전학회지, 제 28권
제 3호(2013)
9. AutoPIPE V8i(SELECTseries 3) Tutorial
Manual, Bentley Systems Inc (2011)
10. ASME B31.3 Process Piping, (2010)
11. Kee Bong Yoon, Jong Min Yu, Nguyen Tuan
Son, Ji Yoon Kim, Yong Seog Choi, Kwang
Chul Park : "Cracking at 304H Stainless
Steel Weld in a Chemical Reactor During
Service at 560°C", ICEFA VI 6-9 July,
Lisbon, Portugal (2014)