

## 루프디자인에 따른 배관시스템의 열응력에 관한 연구

이정현<sup>a</sup>, 박지성<sup>b\*</sup>

## A Study on Thermal Stress of Power Piping due to Loop Design

JungHyun Lee<sup>a</sup>, JiSung Park<sup>b\*</sup><sup>a</sup> Volvo Cars, c/o Hasse Andersson, Plantagegatan 10 lgh 626, 413 05 GÖTEBORG, Sweden<sup>b</sup> Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	13	January	2014
Revised	20	May	2014
Accepted	11	August	2014

## Keywords:

High temperature piping system  
Thermal expansion  
Piping stress analysis  
Pipe support design  
Optimum design

## ABSTRACT

Domestic power plants have consistently been developed over the years in industrially developed nations with high standards of living. Considering the power plant development strategy, design efficiency is of utmost importance. Therefore, an improper design directly affects the power plant's risk management plan and the potential risks of the piping system. Therefore, in this study, research is intended to be carried out to allow efficient power plant operation, through optimization of the design of the piping system. The purpose of the study is to confirm economic feasibility by changing the piping loop design, expanding the length of pipe loops, and to investigate the thermal stress influence on the piping system through simulations of systems similar in condition to those currently used in existing plants in Korea.

## 1. 서 론

## 1.1 연구배경 및 목적

발전플랜트(Power Plant)의 목적은 일상생활과 산업전반에 걸쳐 필요한 전력을 경제적인 가격으로 안정성 있게 생산하는 것이다. 발전플랜트는 사용 연료에 따라 원자력발전플랜트(Nuclear Power Plant), 석탄·천연가스·석유 등을 이용하는 화력발전플랜트(Fired Power Plant), 수력·풍력·태양열을 이용하는 재생에너지발전플랜트(Recycled Energy Power Plant) 등으로 나누어지는 대표적인 사회간접자본으로서 기술 집약형의 고부가가치 산업이다<sup>[1,2]</sup>. 현재 국내 발전플랜트는 지속적인 발전을 이뤄왔으며, 특히 디자인(Design)의 중요성이 부각되고 있다. 디자인은 발전소의 외관 및 기능에 상당한 영향을 미칠 뿐만 아니라 경제성에서도 큰 영향을

차지한다<sup>[3]</sup>. 그러나 이처럼 중요한 발전플랜트 디자인은 설계자의 잦은 디자인변경, 복잡한 형상 및 잘못된 디자인 방법으로 배관시스템의 위험성을 증가시키고 있으며, 그 건전성을 유지하지 못하고 있는 경우가 상당하다. 기존 연구에서는 열응력에 관한 누수 및 파손사고가 종종 일어남에 따라 Expansion Joint 사용금지 및 자체를 제한하고 있다<sup>[4]</sup>. 또한 열팽창에 의한 배관시설의 변형 및 파열로 안전설계 및 시스템 최적 설정에 관한 연구도 다양하게 진행되고 있다<sup>[5]</sup>. 이러한 연구를 바탕으로 본 연구는 열응력에 대한 배관시스템의 안정성과 효율성을 고려한 설계방법에 관해 연구를 수행하였다. 연구내용은 과도한 열응력(Thermal Stress)을 받는 배관시스템에 공인된 Code 요건과 Standard의 요구사항을 만족하면서 배관의 최적화 디자인<sup>[6]</sup>(Optimum Design)을 선정하고, 모든 배관시스템의 유연성(Flexibility) 및 Loop 배관 디자인의 효율적 설

\* Corresponding author. Tel.: +82-10-8796-2018

Fax: +82-2-949-1458

E-mail address: jisung1012@hanmail.net (JiSung Park).

계방법에 관해 다루기로 한다<sup>[7]</sup>.

## 1.2 연구범위 및 방법

배관 시스템 디자인 개선방안에 관한 연구범위는 현재 우리나라에서 가동되고 있는 발전소 중 대표적인 열응력 흡수 방법인 L형, Z형 및 C형 배관 시스템에 대해 연구를 수행하였다. 해당시스템의 각 배관별 사이즈를 50 mm, 200 mm, 400 mm로 디자인에 따라 배관시스템에 미치는 영향을 확인하며 각 조건에서 배관시스템이 받는 영향에 대해 평가하고 최적의 디자인방법을 확인하였다. 연구 방법은 배관응력해석 프로그램(Piping Stress Analysis Program)을 통해 해당 배관시스템을 해석모델로 모사하였다. 각 배관은 고온·고압의 증기를 운반하는 시스템으로 가정하였으며, 실험에 동일한 운전조건을 고려하여 해석을 수행하였다<sup>[8]</sup>. 또한, 각종 국제 규정 및 Code, Standard 등 다양한 안전조건을 적용시켜 해석을 수행하였으며<sup>[9]</sup>, 구체적인 연구방법은 다음과 같다.

- (1) 해당 배관시스템을 주어진 조건과 동일한 디자인 상태를 적용하여 모사한 후, 배관시스템에 작용하는 응력분포를 선형 유한요소해석 프로그램(Linear Finite Element Analysis Program)을 통해 분석하였다.
- (2) 각 배관시스템 모사 후, 열팽창하중을 많이 받는 부분에 Loop 형태로 디자인을 변경하여 해당 배관시스템이 Code 요건에 만족하는지 확인하였다.
- (3) Loop 디자인 형상으로 디자인 변경 후 그 Loop 길이를 증가시키면서 배관시스템에 미치는 영향을 확인하여 가장 이상적인 디자인 방법을 확인하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 디자인 기준

#### 2.1.1 적용 Program (Stress Analysis)

배관 응력 해석 상용프로그램은 ADLPipe와 Pipeplus 및 PEPS 그리고 미국 Sargent & Lundy 사에서 개발한 Pipsys 등 여러 가지가 상용화되어 있다. 이 프로그램들은 ASME Code Section III, Subsection NB/NC/ND 및 ASME B31.1 Code의 각종 요구사항에 따라 해석하도록 구성하였으며, 특히 독자적으로 구성된 Library에는 각종 배관정보, 응력지수와 응력 집중계수(Stress Indices and Stress Intensification Factor)가 내장되어 있어 사용자의 별도입력을 필요로 하지 않으므로 입력오류(Input Error)를 최소화할 수 있다. 이 연구에서 사용한 전산프로그램은 Pipestress이다. Pipestress는 배관시스템의 정적, 동적 해석용 선형 유한요소해석 프로그램이다. 이 프로그램에서 사용할 수 있는 재료는 곡관, 엘보우, 분기관, 소켓용접, 맞대기 용접, 유연 커플링 및 플랜지

등이 있으며 각각의 요소에 적합한 연성계수 및 응력지수를 부여한다<sup>[10]</sup>. 프로그램에서 사용할 수 있는 지주물 종류에는 강제지지물, 가변 스프링, 콘스탄트 스프링, 스너버, 앵커 또는 사용자 정의 지지물 등이 있으며 어느 방향으로도 지지가 가능하다<sup>[11]</sup>. Pipestress는 상용 전산프로그램으로 DST Computer Service사의 품질보증프로그램에 따라 검증되었다.

#### 2.1.2 디자인 참고자료

디자인기준은 국제적으로 공인된 Code (ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 1992)와 Standard 기준에 포함되는 디자인이어야 한다<sup>[12]</sup>. 그 외 디자인기준에서 특기하지 않은 사항은 관련 규제기관의 승인을 득한 안전성 분석보고서에서 사용한 디자인 방법이나 사례에 따라 디자인 및 응력 해석을 수행한다. 배관시스템의 디자인 및 응력 해석<sup>[13]</sup>에 적용한 디자인은 발전 플랜트에서 사용하였던 디자인자료와 도면을 참고하여 디자인한다. 상기의 각종 자료에서도 규정하지 않은 디자인사항은 한국 전력산업기술기준인 Kecip Code를 기준으로 디자인한다<sup>[14]</sup>.

#### 2.1.3 디자인 물리적 사항

해석 대상 배관시스템의 응력해석을 위한 수학적 해석모형은 L형, Z형, C형 배관 법을 기준으로 연구하였다. 또한 배관시스템의 해석을 위한 입력자료(Input Data)는 3.2절의 Table 1을 참고한다. 배관시스템에 사용될 재료는 디자인 기준에 기술된 재료를 이용하였으며, 해석을 위한 재료<sup>[15]</sup>의 물리적, 기계적 성질은 ASME Sec. II Materials Part D-Properties에서 주어진 값을 이용한다. 재료의 세부 적용 Code 및 사양은 배관의 현장 시공용 도면인 3차원 도면(Isometric Drawing)과 배관지지대 디자인도면을 참고한다.

### 2.2 디자인 적용 Code 및 운전조건

디자인기준의 적용규격 및 하중조합에 따라 ASME B31.1, 1992 Edition CODE를 적용하며, 다음과 같은 디자인과 운전 상태를 고려해야 한다.

#### 2.2.1 디자인 조건(Design Condition)

배관의 디자인압력(Design Pressure)과 디자인온도(Design Temperature)는 디자인기준서 및 Piping Specification Category에 기술된 내용을 참고하여 동일한 조건으로 실험에 적용한다. 디자인 조건에서의 각 응력 한계에 적용될 지속하중은 자중(Dead Weight)과 타 지속하중(Other Sustained Loads)이 있다. 자중은 배관 자체중량과 배관내의 유체중량에 의한 정 중량과 배관과 정상 운전 중 배관에 영구적으로 부착된 기기(Valve, 각종 계기 및 보온재 등)의 자중에 의한 정 중량이며, 타 지속하중(Other sustained

Loads)은 해당 배관시스템에서 고려해야 할 다른 지속하중을 고려한다.

### 2.2.2 운전조건(Service Condition)

배관시스템은 각 디자인 및 운전조건에서의 지속하중(Sustained Loads), 일시적 하중(Occasional Loads) 및 열 변위 하중을 고려하여 디자인 및 응력 해석을 한다.

#### ① 디자인 조건에서의 고려사항 : 104.8.1

디자인 조건에서는 다음과 같은 지속하중(Sustained Loads)에 의한 허용응력을 만족하면 된다. 허용응력은 ASME Code에서 명시하고 있는 응력지수(Stress Indices)와 응력증대계수(Stress Intensification Factor)를 고려하여 계산한다. 계산한 응력강도(Stress Intensity)는 허용응력과 비교 하여 아래 식과 같이 정의된 응력 값 이내에 들어와야 배관건전성이 만족된다. 작용응력과 허용응력에 관한 방정식은 다음 식과 같이 정의된다.

-지속하중(Sustained Loads)에 의한 응력

$$S_L = \frac{PD_O}{4t_n} + \frac{0.75 \cdot M_A}{Z} \leq 1.0S_h \quad (1)$$

여기서,  $P$ 는 내압  $D_O$ 는 설계 내압,  $t_n$ 은 관의 두께,  $M_A$ 는 지속하중에 의한 모멘트,  $Z$ 는 단면 계수,  $S_h$ 는 고온에서 허용응력 이다.

#### ② 운전조건(Service Conditions) : 104.8.2

- 일시적 하중(Occasional Loads)에 의한 응력

운전한계에서의 압력, 자중, 기타 지속하중과 지진을 포함한 일시적 하중이 다음의 식 (2)을 만족해야 한다.

$$S_{OL} = \frac{PD_O}{4t_n} + \frac{0.75 \cdot i \cdot M_B}{Z} \leq 1.2S_h \quad (2)$$

여기서,  $i$ 는 응력강화계수,  $M_B$ 는 일시적하중에 의한 모멘트이다.

- 열 변위 하중(Thermal Expansion) : 104.8.3

운전한계에서의 열 변위 하중은 다음의 식 (3)을 만족해야 한다.

$$S_E = i \frac{M_C}{Z} \leq S_A + (S_H - S_L) \quad (3)$$

여기서,  $M_C$ 는 열 변위에 의한 모멘트,  $S_A$ 는 허용응력 값이다.

## 3. 기준 배관시스템의 디자인 정보 및 일반사항

### 3.1 배관시스템의 모델 및 형상입력

본 연구에 사용된 배관시스템의 모델 및 형상은 배관 내 발생하

는 열응력을 배관자체의 탄성을 이용하여 흡수하는 방법으로 곡관을 이용하며 그 종류는 L, Z, C형이 있다<sup>[6]</sup>.

#### 3.1.1 L 형 형상

L 형 형상은 L-Bend 법이라 하며 곡관을 1개를 사용하여 열응력을 흡수하는 방법으로 가장 기본이 되는 신축 흡수방법이다. Fig. 1은 L형 배관법의 기본적인 형상을 나타낸다.

#### 3.1.2 Z 형 형상

Z 형 형상은 L 형 형상과 유사하지만 곡관을 2개를 사용하여 열응력을 양쪽으로 흡수할 수 있는 방법이다. Fig. 2 는 Z형 형상의 기본적인 형상을 나타낸다.

#### 3.1.3 C 형 형상

C 형 형상은 L 형 형상의 중심선을 경계로 분리하여 L-Bend와 동일한 양면으로 되어 있으며 곡관을 4개를 사용하여 열응력을 흡수하는 방법이다. Fig. 3은 C 형 형상의 기본적인 형상을 나타낸다.

### 3.2 배관시스템의 디자인 입력정보

본 연구에 사용된 배관시스템의 배관 입력 정보는 Table 1에 명

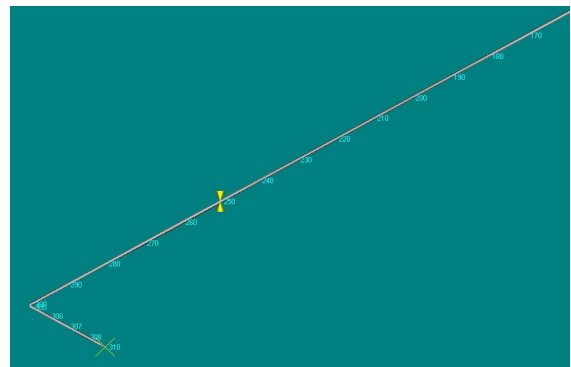


Fig. 1 L Type

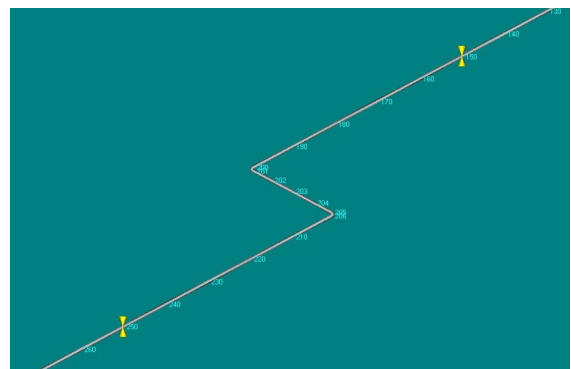


Fig. 2 Z Type

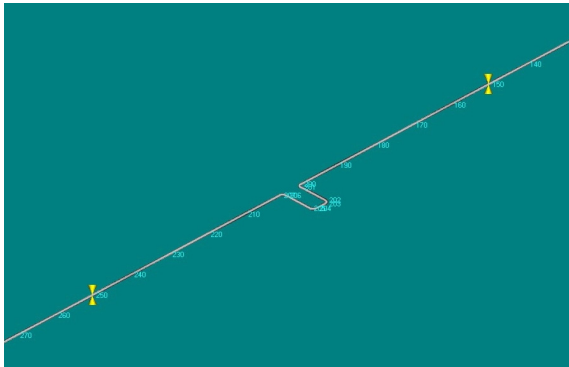


Fig. 3 C Type

Table 1 Piping Design Data

Specification		Data
50 mm Pipe	Pipe Size O.D, mm	60.33
	Wall Thickness, mm	2.77
	Pipe Weight (kg/m)	3.93
200 mm Pipe	Pipe Size O.D, mm	219.1
	Wall Thickness, mm	3.76
	Pipe Weight (kg/m)	19.96
400 mm Pipe	Pipe Size O.D, mm	406.4
	Wall Thickness, mm	4.75
	Pipe Weight (kg/m)	47.29
Initial Test Length		20 m
Material		SA106 Grade B
Pipe Class		1100
Design Pressure, Mpa		7.48
Design Temperature, °C		316
Operating Pressure, Mpa		1.2
Operating Temperature, °C		250

시되어 있으며 배관 무게 및 온도조건 등의 정보를 전산프로그램해석에 반영하여 연구를 수행하였다.

### 3.3 기준 배관시스템 적용하중

본 연구 관련 배관시스템은 내진등급 II등급을 고려하였으며, 다음과 같은 하중에 대한 배관응력해석을 수행하였다.

#### 3.3.1 자중(Weight Load)

배관, 배관요소, In-Line 요소 및 배관 내 유체 무게를 고려하였다.

#### 3.3.2 열응력(Thermal Load)

운전조건을 고려하여 열 변위 해석을 수행하였다.

Table 2 Maximum Stress Ratio (Eq. 3)

Pipe Nominal Size (mm)	L Type (%)	Z Type (%)	C Type (%)
50	3.093	0.748	3.15
200	9.047	1.837	3.694
400	1.109	0.446	0.667

Table 3 Minimum Stress Ratio (Eq. 3)

Pipe Nominal Size (mm)	L Type (%)	Z Type (%)	C Type (%)
50	0.081	0.176	0.118
200	0.293	0.305	0.253
400	0.324	0.340	0.260

### 3.3.3 기타 적용 하중(Other Loads)

응답 스펙트럼 감쇄 비 및 계통에 작용하는 그 외의 하중은 플랜트이론 및 계통설계서 교재를 참고하여 해석을 수행하였다.

### 3.4 디자인 고려사항

본 배관시스템의 디자인 방법은 Code 에서 사용한 디자인 방법이나 사례에 따라 디자인 및 응력해석을 수행하였으며, 배관응력해석은 각 형상별 디자인에 동일한 조건을 적용하여 해석업무를 수행하였다.

## 4. 연구 결과

### 4.1 각 시스템 형상에 따른 최고 응력 값

먼저 상기 3가지의 형상에 대해 전산프로그램을 통해 해석대상을 모델링 한 후 그 결과 값을 확인하였다. 복원 방법은 Table 1 Piping Design Data 의 배관 입력정보를 입력 후 각 형상별로 배관의 루프길이 변경에 따른 그 결과 값을 확인하였다. 해석 결과 값이 100%가 넘는 응력 값은 해당 배관시스템의 건전성을 유지하지 못한다.

상기 결과를 통해 알 수 있듯이 L Type의 형상에서 가장 큰 응력 값을 확인하였으며 Z Type이 가장 낮은 응력 값을 나타내었다. 위 결과는 L Type이 열응력 흡수를 가장 적게 하며 공간과 장소의 영향을 받지 않는다면 Z Type과 C Type이 권고된다.

### 4.2 각 시스템 형상에 따른 최저 응력 값

다음은 각 조건별 최저 응력 값을 비교 검토 하였다. Table 3을 통해 알 수 있듯이 각 구경별 최저 응력 값은 C type의 형상에서 가장 최저 응력 값을 확인하였다.

상기 결과를 통해 알 수 있듯이 각 형상에서 최저 응력 값은 세

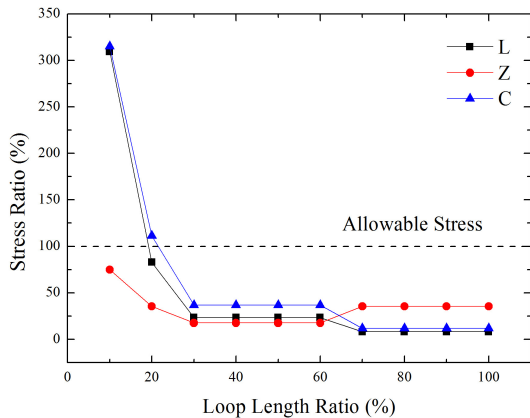


Fig. 4 Stress Analysis Result (50 mm Pipe)

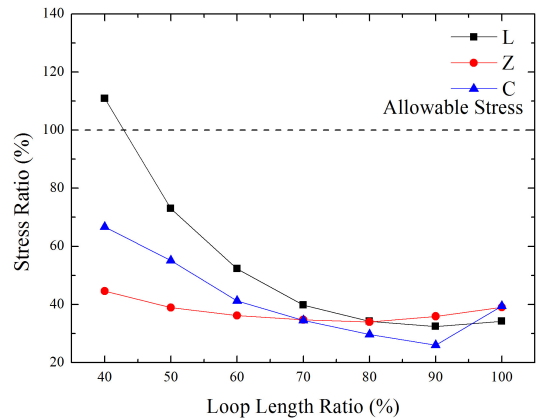


Fig. 6 Stress Analysis Result (400 mm Pipe)

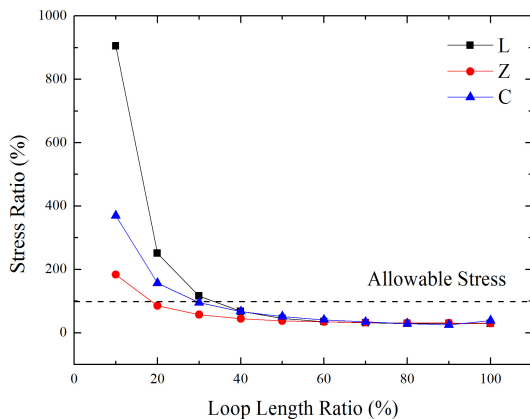


Fig. 5 Stress Analysis Result (200 mm Pipe)

가지 형상 모두 큰 차이는 없었다. 이는 공간과 장소가 제한되지 않을 경우에는 세 형상 모두 루프 길이를 증가함에 따라 응력 값을 위와 같이 줄일 수 있음을 확인하였다.

#### 4.3 각 시스템 루프 길이에 따른 응력결과

다음은 최고 응력 값과 최저 응력 값으로 알 수 없는 최적의 루프 길이를 확인하기 위해 각 형상별 배관 열응력의 결과 값을 그래프를 통해 확인하였다. 배관 루프 길이를 점점 증가시키기에 따라 응력 값은 각 배관 길이 및 관경에 따라 다른 결과 값을 보여주었으며, Fig. 4를 통해 그 결과를 확인할 수 있다.

Fig. 4는 50 mm 관경의 루프길이에 따른 열응력 결과 값이다. 그림을 통해 알 수 있듯이 초기 디자인 상태에서 가장 효율적인 디자인은 Z 형상으로 확인하였다. 이는 일정 길이 이내에 Z 형상이 가장 열응력 흡수율이 뛰어나다는 것을 증명하였다. L 형상과 C 형상은 열응력 값이 유사함을 그림을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 5는 200 mm 관경의 루프길이에 따른 열응력 결과 값이다. 50 mm 결과 값에 비해 초기 열응력 값이 상당히 높다. 이를 통해 배관관경에 따라 관경이 클수록 열응력 값이 커짐을 알 수 있다.

또한 응력 값은 50 mm와 동일하게 Z 형상이 가장 열응력을 감소시켰으며. 루프관경이 50% 정도 증가하면 대부분 디자인에서 열응력이 비슷한 형상을 보였다.

마지막으로 상기 그림은 관경이 가장 큰 결과 값인 Fig. 6의 응력 해석 결과 값이다. 400mm 관경은 루프로 디자인 할 수 있는 Elbow의 길이 때문에 그 최소 결과 값이 40%부터 측정 가능하다.

앞의 결과 값과 마찬가지로 Z 형상이 일정 길이 내에서 가장 효율적으로 열응력을 흡수하는 것을 확인 할 수 있으며 그 외의 형상들은 유사한 루프길이의 50% 이상부터는 유사한 결과 값을 확인할 수 있다.

상기 그림을 통해 알 수 있듯이 각 루프 디자인은 전체 길이의 50%이상 증가 시부터 비슷한 결과 값을 나타내었다. 이는 전체 배관시스템에서 효율적인 루프 디자인을 고려할 때 일정 길이까지는 열응력 감소율이 높지만, 그 이상의 길이는 증가된 길이에 비해 효율성에 크게 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다. 실제 현장에서는 작업장소가 굉장히 협소한 공간이나 디자인이 어려운 상황에 직면하는 경우가 많기 때문에 상기 결과를 참고하면 각 상황마다 적용해야 할 디자인을 판단 할 수 있다.

## 5. 결론

배관시스템에 작용하는 열응력 흡수에 관한 결과를 수치해석을 통해 확인하였다. 해석 결과 각 상황에 맞게 디자인 변경을 고려하여 전체 배관시스템의 응력분포를 분산시켜 Code 요건의 건전성을 유지하면서 배관시스템 설계를 수행하여야 된다는 사실에 대해서는 의심의 여지가 없다. 이는 배관시스템의 최적화 디자인을 위한 디자이너의 노고가 필요할 것이 분명하다. 고온 배관시스템에 작용하는 열응력에 대해 Code 및 Standard 요건에 만족할 수 있는 효율적 디자인 방안을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 배관 시스템의 열응력 흡수는 루프 디자인에 따라서 시스템에 작용하는 전체적인 응력 값이 다르게 나타난다.
- (2) 각 루프 디자인은 루프 길이가 길어질수록 열응력 값이 감소하였으며, 일정 길이 이상의 루프 길이는 열응력의 감소량이 점점 둔화됨을 확인 할 수 있다.
- (3) 최소한의 루프 길이를 사용해 열응력을 가장 크게 감소시킬 수 있는 디자인은 Z 형상이 선호되며, 이는 공간과 장소의 제한된 상황에서 가장 효율적인 열응력 감소 방법으로 간주 된다.

## References

- [1] Yoo, D. W., 2006, Opportunity of Plant Industry and Our Institute's Requirement, The Plantech Journal 2:3 2-3.
- [2] Park, H. J., 2006, Overseas Expansion Strategy of EPC Power Plant Industry, The Plantech Journal 2:3 23-33.
- [3] Lee, J. H., Park, J. S., 2013, A Study on Improvement of Support Design in Plant Piping System, Korea Science & Art Forum 13 289-298.
- [4] Kong, J. H., Shin, B. K., 2005, A Study on the Absorption of Thermal Stress on the Underground Piping for the District heating, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers 14:1 81-88.
- [5] Char, S. C., Hwang, S. Y., Kang, K. S., 2007, A Study on Safety Engineering & System Optimization in the Closed Piping System, Journal of the Korea Safety Management and Science 9:1 1-8.
- [6] Cho, W. J., 1998, A Finite Element Analysis of Stress Indices for Piping Branch Connection, Master thesis, Hanyang University, Republic of Korea.
- [7] Kim, J. T., 2009, A Study for Positioning of Piping Support and Thermal Stress Analysis of Plant Piping, Master thesis, Pusan National University, Republic of Korea.
- [8] Sam, K., 1985, Introduction To Pipe Stress Analysis, Houston, United States of America.
- [9] ANSI/ASME B31.3, 1980, Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping, New York, United States of America.
- [10] ITT Grinnell Industrial Piping, 1981, Piping Design and Engineering 6th Edition, United States of America.
- [11] The M. W., Kellogg Co., 1995, Design of Piping System 2nd Edition, United States of America.
- [12] ASME, 2004, ASME Boiler & Pressure Vessel Code, New York, United States of America.
- [13] Lee, C. G., Lee, W. R., Park, C. Y., 2011, A Study of Welding Conditions for Plastic Piping, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. 20:5 564-575.
- [14] KEPIC, 2000, Korea Electric Power Industry Code, Seoul, Republic of Korea.
- [15] ASTM, 2012, Different Parts for Different Materials, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, United States of America.
- [16] Kim, S. M. 2009, A Study on Thermal Analysis in Ventilated Disk Brake by FEM, Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers 18:5 544-549.