

[Technical Paper]

## 소방배관 형상에 따른 배관 내진해석

최호성 · 이재오<sup>\*†</sup>

대전대학교 소방방재학과 대학원생, \*대전대학교 소방방재학과 교수

## Seismic Analysis of Firefighting Pipe Networks

Ho-Sung Choi · Jae-Ou Lee<sup>\*†</sup>

Graduate Student, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon Univ.,

\*Professor, Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon Univ.

(Received October 7, 2019; Revised October 16, 2019; Accepted October 17, 2019)

### 요 약

지진 발생 시 소방배관의 안전성은 무엇보다 중요하다. 국내의 경우 국가화재안전기준(NFSC)에 따라 사양위주의 설계를 하고 있지만 특별한 성능이 요구되는 건물에는 공학적인 성능위주 설계를 적용하고 있다. 소방배관의 경우 트리방식을 적용하여 왔다. 하지만 여러 단점으로 인해 최근에는 그리드방식, 루프방식을 적용하고 있다. 국내 소방 배관 내진설계는 NFPA 13의 cook book 방식을 적용하고 있지만, 신뢰성을 확보하기 위해서는 공학적인 해석이 필요하다. 국내에서 적용 중인 NFPA 13 기준은 ASCE와 ASME의 지침을 준용한 것으로 지진이나 배관의 공학적 해석이 부족한 기술자들이 사용하도록 만들어 놓은 설계방식이다. 국내 내진설계는 버팀대에 대한 검토만 진행되고 있다. 하지만 신뢰성 있는 해석을 위해서는 배관의 내압, 지속 하중에 의한 힘, 지진과 같은 하중 조건에서의 다양한 해석이 요구된다. 공학적 내진해석을 통해 트리방식 배관은 그리드나 루프 방식의 배관에 비해 안전성이 떨어지는 것을 알 수 있었으며, 응력 기반의 내진해석 방식과 변형률 기반의 해석방식을 비교한 결과 변형률 해석이 Over Stress 범위에서는 보수적인 결과 값을 보였다. 배관의 내진해석은 일률적인 계산을 통한 해석보다 공학적 해석을 통해 엔지니어가 본인의 의도에 맞게 해석을 하는 것이 좀 더 합리적이며, 여러 가지 해석조건을 고려하여 분석되어야 한다.

### ABSTRACT

The stability of firefighting pipes is crucial in the event of an earthquake. In Korea, specification-based designs are used in accordance with NFSC. However, engineering performance-based designs are used for buildings that have special requirements. For firefighting pipes, tree type pipe networks are usually utilized in buildings; however, they are characterized by several limitations. Hence, grid type and loop type networks are being utilized lately. Earthquake-resistant designs for firefighting pipes in Korea utilize NFPA 13 as the cookbook. Nevertheless, an engineering analysis is required to verify its reliability. The NFPA 13 standard used in Korea is a design method for engineers who lack earthquake engineering analysis knowledge of pipes and adapt ASCE and ASME guidelines. Earthquake resistant designs in Korea review braces only. Hence, various analyses under load conditions, such as the internal pressure of a pipe, force exerted by a continuous load, and an earthquake, are required to ensure reliability. An engineering earthquake-resistance analysis showed that tree type pipe networks are less stable than grid and loop type pipe networks. A comparison of earthquake-resistance analysis based on stress and strain revealed that strain analysis exhibited a conservative result value in the range of over-stress. Therefore, for the earthquake-resistance analysis of pipes, it is rational that engineers perform analysis to achieve the required standards through engineering analysis rather than uniform calculations, which should also be analyzed considering various analysis conditions.

**Keywords :** Seismic, Fire fighting pipe, Stress base design, Strain base design, Displacement

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [krokasig@dju.ac.kr](mailto:krokasig@dju.ac.kr). TEL: +82-42-280-2598, FAX: +82-42-280-2596

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

### 1. 서 론

한반도는 지진학적으로 판구조 운동에 의해 국지적 응력이 축적되어 지진이 발생할 수 있는 판 내부에 속하는 특성을 갖고 있다. 판 내부지진은 지진의 시공간 분포가 불규칙적이므로, 예측이 쉽지 않으며 지진 발생 빈도가 낮고 우발적이라 할 수 있다. 2016년 9월 12일 발생한 규모 5.8의 경주 지진, 2017년 11월 15일 발생한 규모 5.4의 포항 지진, 2019년 4월 22일 발생한 규모 3.8의 울진 지진 등 한반도 주변에서 빈번한 지진이 발생하고 있다<sup>(1)</sup>. 이는 지진에 대한 구조물과 비구조물의 안전성 확보가 무엇보다 중요하다는 것을 깨닫는 계기가 되었다.

특히 2016년 9월 12일 경주 지진은, 관측 이후 역대 최대 규모(M5.8)로서 이전에 경험하지 못한 구조물의 피해를 발생시켰다. 이로 인해 국내에서도 각종 시설물에 대한 내진설계에 많은 관심이 증가하였고, 특히 비구조 요소의 파괴로 인한 직접적 피해가 다수 발생하면서 자연스럽게 건축물에 설치된 비구조물에 관심도 증대되었다. 최근에는 소방시설의 내진설계 기준, 건축기계설비설계기준, 열수송 내진설계기준 등이 마련되면서 비구조물에 대한 법 규정이 제정되고 있다<sup>(2-4)</sup>. 하지만 주관부처, 관리기관에 따라 마련된 내진설계 기준은 내진설계에 대한 공학적 이론이나 근거보다는 경험에 의해 제시된 것이 많다. 또한, 기준들 사이에 체계가 마련되지 않아 실무자들은 혼란을 겪고 있는 실정이다.

국내에서 사용되는 대부분의 내진설계 방식은 배관이나 덕트의 하중을 지지하는 방식의 설계가 주로 사용되고 있다<sup>(7)</sup>. 하지만 지진이 발생했을 때 단순하게 배관의 하중을 지지하는 방식으로 설계하는 것이 아니라 배관 재료의 응력이나 변위에 대한 해석이 중요하다. 플랜트에서는 배관의 진동이나 지진 해석 시 지상배관에서는 응력해석 방법을 매립 배관에서는 변형을 해석방법을 적용하여 오래전부터 설계에 반영하고 있다. 또한 미국토목공학회(American society of civil engineers: ASCE)에서 기술지침으로 발행한 배관내진

설계의 기준에는 총 4가지 방식의 배관설계 방식을 적용하고 있다. 첫 번째 요리책 방식(Cook book), 두 번째 정역학적 수계산 방식(Static hand calculations), 세 번째 정역학적 시스템 분석 방식(Static system analysis) 그리고 네 번째로 응답 스펙트럼 방식(Response spectra analysis)이다<sup>(8)</sup>.

본 연구에서는 전세계적으로 통용되고 있는 ASME B31.1 Power Piping Code에 따른 내진설계 방법(정적해석)을 적용하여 여러 소방배관 형상에 따라 배관에서 발생하는 변위와 응력 그리고 모멘트를 활용 분석하여 소방배관의 구조적 안전성을 판단할 수 있는 기준마련에 도움이 되고자 한다<sup>(9)</sup>.

### 2. 본 문

#### 2.1 해석방법에 대한 이론

소방내진설계기준에 명시된 ‘버팀대 세장비 및 회전반경’에 대한 검토는 지진 발생 시 좌굴 발생에 대해서 버팀대가 건널 수 있는지 여부만 검토되고 있다. 하지만 본 연구에서는 지진 하중을 Figure 1과 같이 그리드, 루프, 트리 형식의 소방배관에 적용시켰을 때 응력 및 변형률로서 지진에 대한 안전성을 Bentley, 2018 “Autopipe advanced”를 이용하여 해석하고자 한다<sup>(10)</sup>.

응력 기반 해석은 ASME B31.1 Power Piping Code 104.8.2 Stress Due to Occasional loads로서 식 (1)을 기반으로 구조적 안전성을 평가하였고, 변형률 기반 해석은 최근 법제화된 집단에너지 시설 기준에 의거하여 인장: 1%, 압축  $\text{Min}\{1\%, 30 \times \text{배관두께/배관외경}(\%)\}$ 로 평가하였다. 서포트의 구조적 안전성을 보는 것도 중요하지만 먼저 검토되어야 할 사항으로는 배관의 Force 값을 계산 후 지진과 같은 비 정상적인 Force가 작용하였을 때 배관에 작용하는 하중 값을 확인 후 구조 설계가 가능하다. 배관의 서포트 Type 및 Location에 따라 응력 집중 포인트가 달라지므로 반드시 Piping route도 함께 검토가 이루어져 한다<sup>(10)</sup>.

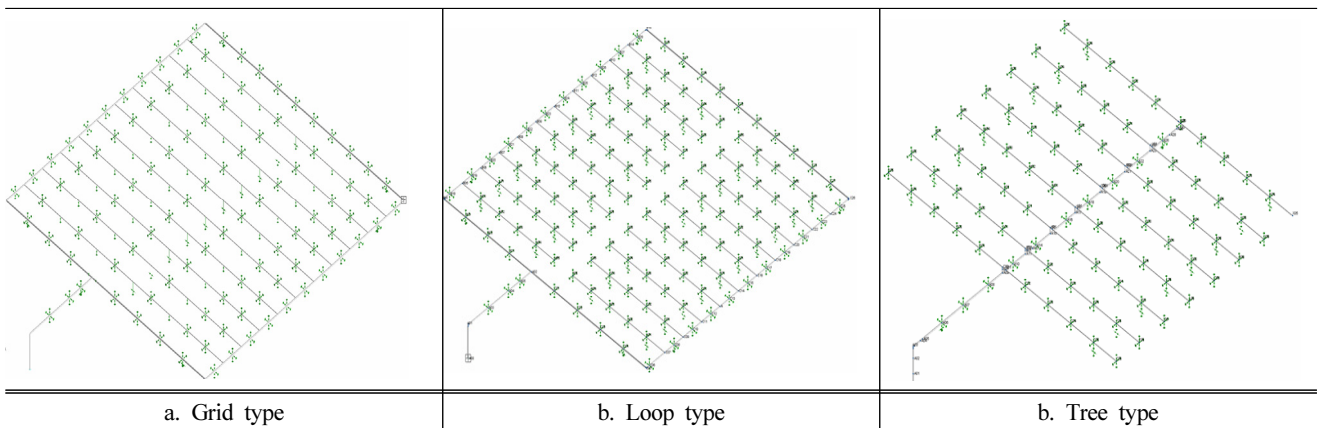


Figure 1. Fire-fighting piping type.

**Table 1.** Piping Physicality

Material	Pipe ID	Temp (°C)	Pressure (bar)	Hot Allow (kg/cm <sup>2</sup> )	Remark
A53 Gr.A	100 SCH.40	21	16	843.68	
A53 Gr.A	50 SCH.40	21	16	843.68	

**Table 2.** Static Earthquake

Devison	X (g)	Y (g)	Z (g)
Seismic 1	0.5	0	0.5
Seismic 2	0.5	0.5	0
Seismic 3	0	0.5	0.5

$$\frac{PD_0}{(1000)4t_n} + \frac{0.75iM_A}{Z} + \frac{0.75iM_B}{Z} \leq KS_h \quad (1)$$

P = internal design pressure

$D_O$  = Outside diameter of pipe

$t_n$  = Wall thickness

I = Stress intensification factor

$M_A$  = Resultant moment loading on cross section due to weight and other sustained

$M_B$  = Resultant moment loading on the cross section due to occasional loads, such as thrusts from relief/safety valve loads, from pressure and flow transients, and earthquake

Z = Section modulus of piping

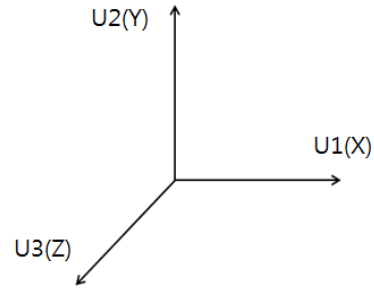
$S_h$  = Basic material allowable stress at maximum (hot) temperature

K = 1.15 for occasion loads acting for no more than 8hr at any one time and no more than 800 hr/year

= 1.2 for occasional loads acting for no more than 1hr at any one time and no more than 800 hr/year

### 2.2 지진하중

배관 응력해석은 크게 나누어 정적(Static)인 해석과 동적(Dynamic)인 해석이 있다. 그 중 정적인 해석의 요소가 되는 무게나 열팽창에 의한 응력해석은 충분히 고려되고 있으며, 허용응력 평가 기준은 통상적으로 하루에 한번 운전 과정을 거치는 것으로 계산하여 약 7000 Cycle (365 Cycle/year × 20 year) 정도를 피로 파괴 기준으로 하여 ASME Code 에서 규정하고 있다. 반면 동적인 해석은 그 원인이 다양해 예측되거나 검증된 데이터가 없어 정확한 분석을 못하는 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서 적용된 입력 지진은 소방내진설계 기준에 따라 계산된 등가지진하중을 Figure 1의 Grid, loop, Tree type 배관형상에 Table 1의 파이프 물성을 고려하여 Table 2의 수평 및 수직 방향의 정적 지진가속도를 적용시켜 해석했다. X, Y, Z 축에 대한 기



**Figure 2.** Coordinate reference.

준은 Figure 2와 같다.

## 3. 해석 방법 비교

### 3.1 응력 기반 해석(Stress-base Analysis)

배관시스템에서 강도평가를 위해 가장 일반적으로 적용되는 파손이론으로 최대 응력설(Maximum principal stress theory)과 최대 전단 응력설(Maximum shear stress)이 있다. 최대 응력설은 ASME B31, ASME Boiler and Pressure Vessel Codes 에서 제시하고 있으며, Piping System의 근간이 되고 있다. 최대 응력설은 배관요소의 항복은 어느 한 점에서 상호 수직인 3개의 주응력 어느 하나의 절대크기가 재료의 항복강도를 초과할 경우 발생한다고 본다. 최대 전단 응력설은 연성금속의 피로파괴와 항복 예측시 최대 응력설보다 더 정확하며 Subsections NB (Class 1) of ASME SECTION III에서 기술하는 Piping System의 근간이 된다. 본 연구에서는 ASME B31.1 CODE를 기준으로 해석하였기 때문에 최대주응력을 기준으로 따르고 있다. 응력의 분류는 배관계의 내압 및 외부에서 가해지는 힘과 Moment에 의해 발생하는 응력으로 내압 및 자중, 지진, 바람 등의 외력에 의하여 발생하는 1차 응력(Primary stresses)과 열과 같은 연속부하에 의하여 생기는 2차 응력(Secondary stress)으로 분류할 수 있다

1차 응력은 재료의 파괴 과정이 항복 강도를 초과할 경우 즉시 파괴가 발생하지만 2차 응력은 연속부에서의 응력 집중으로 한번 작용으로는 절대 파괴에 이르지 않으면 서서히 소성변형이 증가되어 파괴되는 차이가 있다. 본 연구에서는 지진과 같은 반복하중이 배관에 작용할 때 1차 응력에 대한 안전 여부를 재료의 허용응력(Allowable stress)과 비교하고자 한다.

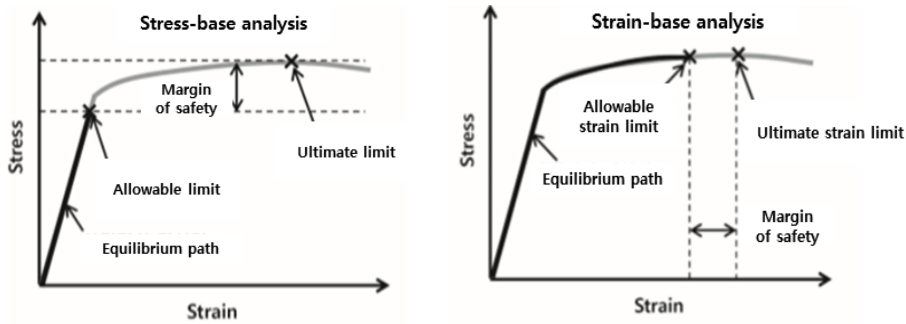


Figure 3. Material performance available for design.

Table 3. Force & Moment

Devison	Point	Combination	$M_A$ (N.m)				$M_B$ (N.m)				Remark
			MX	MY	MZ	MR	MX	MY	MZ	MX	
a. Grid Type	N04	Seismic 1	0	0	-244	244	0	-157	0	157	Abs.sum
	W04	Seismic 2	0	0	-244	244	0	0	122	122	
	W04	Seismic 3	0	0	-244	244	0	-157	122	199	
b. Loop Type	A00	Seismic 1	-13	-1	1	13	-2099	-133	882	2281	
	A05	Seismic 2	1211	1	4	1211	-605	111	-61	618	
	B01	Seismic 3	-87	20	854	859	43	-1295	423	1363	
c. Tree Type	A00	Seismic 1	48	0	0	48	-11	-73	831	835	
	A30	Seismic 2	-3	-2	-22	22	984	-13	-9	984	
	A30	Seismic 3	-3	-2	-22	22	984	-13	-9	984	

### 3.2 변형률 기반 해석(Strain-base Analysis)

소방배관은 외부 환경적인 요인 때문에 배관 설치나 운용 중 소성 변형율의 발생을 피할 수 없으며, 이 경우 응력 기반 해석법으로는 배관의 안전성을 평가 할 수 없다. 이러한 경우 응력 기반 해석법보다는 변형률 기반 해석법이 대안으로 사용된다. 변형률 기반 해석기법은 높은 수준의 구조물 인성을 요구하는 내진설계기법과 지반의 강성 변화가 극심한 곳에 설치된 구조물의 인성 검토기법에서 유래 되었다. 변형률 기반 해석은 안전성 분석을 위해 허용응력 대신 허용 변형률(Allowable strain)을 사용한다. 일축인장시험을 예로 들면 하중을 0 에서 점차 증가시키면서 시험하는 하중제어 방법과 변위를 0 에서부터 점차 증가시키는 변위 제어 방법으로 시험을 수행한다. 하중 제어 방법에서는 작용 하중이 항복응력(Yield strength)에 해당하는 하중을 초과 하면 소성 상태로 진입하여 하중-변위선도의 기울기가 탄성 기울기에서 벗어나게 된다. 작용하중이 시험체의 최대 인장 강도를 초과하면 시험체는 안정성(Stability)을 상실하여 파 단된다. 반면 변위제어방식에서는 극한하중(Ultimate load)에 해당하는 극한변위를(Ultimate displacement)를 초과하면 변형률이 일부 단면으로 집중하는 넉킹(Necking)은 발생하지만 시험체 전체의 하중-변위선도(Global load-displacement relation)는 스냅 백(Snap-back)이 발생하는 지점까지 안정적으로 얻을 수 있다. 구조물의 경우 이와 유사한 거동을 보

이며, 외부작용이 변위 제어인 경우 구조물이 안정적으로 거동하는 범위가 훨씬 크다고 이해할 수 있다. 물론 실제 구조물의 경우 외부작용의 불확실성 때문에 변위 제어의 경우에도 변형성능(Strain capacity or deformation capacity)을 극한 변위 이상까지 허용하지 않는다<sup>(12)</sup>.

변형률 해석기법은 변위 제어로 외부작용이 작용할 때 이를 합리적으로 설계에 반영할 수 있는 설계기법이다. Figure 3과 같이 파이프 강재의 변형률 성능이 요구 변형률과 적정 안전율을 감안하여 상회해야 한다. 변형률 성능은 크게 압축 변형률과 인장 변형률을 이용해서 평가한다. 각 규격에서는 별도로 정한 변형율 한도 내에서 평가할 경우 작용 압력, 직경, Y/T (Ratio of yield strength to ultimate strength), Crack tip opening displacemt (CTOD), 응력비 등의 함수로 압축 변형률 성능과 인장 변형률 성능을 간편히 계산할 수 있도록 하고 있다<sup>(13,14)</sup>.

## 4. 결 과

### 4.1 응력 기반 해석 결과

응력 기반 해석을 한 결과, 가장 큰 힘과 모멘트가 발생 되는 지점은 Table 3과 같았으며, 최대 힘과 모멘트 발생 지점에서의 응력 값은 Table 4와 같이 해석되었다. 이를 통해 배관의 형식에는 차이가 있지만 지진의 하중조건에 따

Table 4. Code Stress

Devison	Point	Combination	Pressure	Bending	Stress	Allowable	Ration	Result	Remark
			N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%		
a. Grid Type	N04	SUS + E1	4.00	58.30	62.30	99.30	0.63	OK	
	W04	SUS + E2	4.00	53.29	57.20	99.30	0.58	OK	
	W04	SUS + E3	4.00	64.40	68.30	99.30	0.69	OK	
b. Loop Type	A00	SUS + E1	10.30	56.80	66.30	99.30	0.67	OK	
	A05	SUS + E2	10.30	45.30	55.60	99.30	0.56	OK	
	B01	SUS + E3	10.30	55.00	65.40	99.30	0.66	OK	
c. Tree Type	A00	SUS + E1	3.00	82.70	85.80	99.30	0.86	OK	
	A30	SUS + E2	3.00	109.50	112.70	99.30	1.14	Failure	
	A30	SUS + E3	3.00	109.50	112.70	99.30	1.14	Failure	

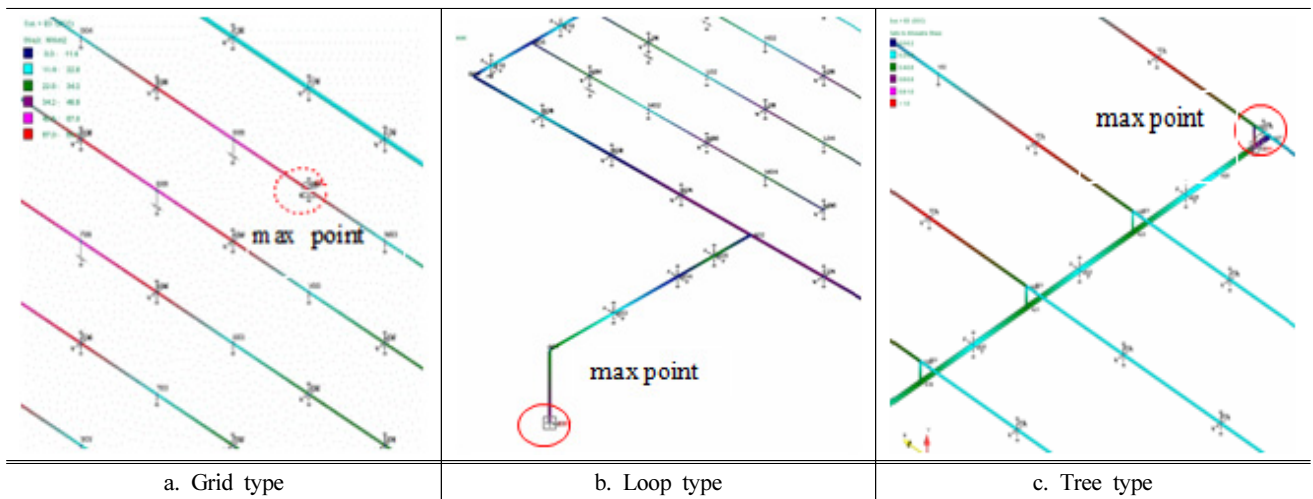


Figure 4. Stress intensificaion point.

라 그리드배관과 루프배관에서는 배관에서 발생하는 응력이 허용 값을 초과하지 않았다. 하지만, 트리타입의 경우 A30 지점에서 허용응력의 114%가 발생되어 배관의 안전성에 문제가 발생됨을 알 수 있었으며, 배관의 형태에 따른 최대 응력 발생지점은 Figure 4와 같다.

4.2 변형률 기반 해석 결과

변형률 기반 해석을 한 결과, 가장 큰 변위가 발생하는 지점은 Table 5와 같이 해석되었다. 그리드타입과 루프타입 배관의 경우 모든 지점에서 허용 변위량의 26%를 넘지 않는 안전율이 해석되었다. 하지만 트리타입의 경우 S04 (SUS + E2) 지점에서 허용 변위량의 340%가 분석되었으며, P04 (SUS + E3) 지점에서 허용 변위량의 310%가 분석되어 배관의 안전에 심각한 문제가 발생됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

소방배관은 시설의 중요도 및 엔지니어의 역량에 따라

그리드, 루프, 트리타입의 배관 설계가 가능하다. 현재 통상적으로 적용하고 있는 공학적 배관 내진해석 방식은 응력 기반 해석방식과 변형률 기반 해석방식으로 구분된다. 응력 기반 해석과 및 변형률 기반 해석으로 소방 배관의 지진에 대한 구조적 안전성을 평가해본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 그리드 타입 및 루프 타입 배관 방식이 트리 타입 배관 방식에 비해 지진 발생 시 배관의 안전성이 뛰어난을 알 수 있었다.
- 2) 배관의 내진성능에 대하여 응력 기반 해석과 변형률 기반 해석을 비교 분석한 결과 변형률 기반 해석이 보수적인 결과 값으로 해석되었다. 따라서 초고층 건물 및 발전소 등 국가기반시설 소방배관 내진 설계 시에는 응력 기반 해석과 더불어 변형률 기반 해석을 통해 좀 더 보수적인 값을 이용한 설계가 되어야 한다.
- 3) 국내에서 주로 사용하고 있는 소방내진설계는 버팀대에 대한 검토만 진행되고 있는데 배관에는 내압, 지속하중에 의한 Force, 지진과 같은 일시적 하중에 의한 Force 등

**Table 5.** Deformaion Analysis

Devison	Point	Combination	Displacement (mm)				$\Delta D$	Strain (%)	Result ( $\leq 1\%$ )	Remark
			DX	DY	DZ	DR				
a. Grid Type	W04	SUS + E1	0.04	0	6.06	6.06	6.06	0.20	OK	
	K06	SUS + E2	0	7.46	0	7.46	7.44	0.24	OK	
	D04	SUS + E3	0	7.45	4.13	8.52	8.52	0.24	OK	
b. Loop Type	A02	SUS + E1	0.12	-0.04	9.64	9.64	9.94	0.25	OK	
	A00	SUS + E2	4.04	0	0.07	4.04	4.04	0.11	OK	
	B01	SUS + E3	0	2.23	9.72	9.97	9.97	0.26	OK	
c. Tree Type	X05	SUS + E1	0	22.61	-1.14	22.64	22.37	0.63	OK	
	S04	SUS + E2	0	0	122.59	122.59	120.59	3.40	Failure	
	P04	SUS + E3	0	0	122.58	122.58	120.58	3.10	Failure	

※ SUS: Analysis Taking Into Account the Influence of Weight and Pressure

배관의 설치조건에 따라 가정하여야 하는 힘이 존재하므로 적용 가능한 모든 조건을 고려하여 내진 해석 및 설계가 이루어져야 한다.

4) 내진 해석은 데이터로 끝나는 해석이 아닌 현장에서 시공하는 엔지니어가 알 수 있도록 Seismic Stress ISO 을 작성하여야 한다. 또한 배관 서포트의 위치 및 형식, Force, Displacement 값을 한눈에 알기 쉽도록 작성하여야 시공하는 엔지니어가 설계자의 의도를 알고 시공을 할 수 있다.

즉 신뢰성 있는 내진설계를 위해서는 지진 발생 시 배관에서 발생될 수 있는 조건을 고려하여 해석 하여야 한다. 또한 응력 기반 해석과 변형률 기반 해석을 통해 나온 배관의 위험조건을 서로 비교하여 보수적인 관점으로 설계에 반영하여야 한다.

## References

1. Korea Meteorological Administration, <http://www.kma.go.kr/> (2017).
2. NEMA, "Seismic Design Criteria of Fire-fighting Facilities" (2016).
3. MOLIT, "Construction Equipment Design Criteria" (2016).
4. Ministry of Trade and Industry a Law Examination, "Heating Facility standard of District Heating System" (2018).
5. J. O. Lee, H. K. Kim and S. B. Cho, "A Study on Performance-based Seismic Design Method of Fire Extinguishing Pipe System", Fire Science & Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 86-94 (2017).
6. J. O. Lee, K. Y. Oh and D. S. Bang, "Comparison of Methods to Improve Seismic Performance Depending on the Use of Expansion Joint", International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, Vol. 8, Issue. 8S2, pp. 670-674 (2019).
7. NFPA 13, "Standard for the Installation of Sprinkler Systems, Ch.9" (2016).
8. American Lifelines Alliance, "Seismic Design and Retrofit of Piping Systems" (2002).
9. ASME B31.1, "Power Piping" (2012).
10. Bentley, "Autopipe Advanced" (2019).
11. Piping Team, "Stress Manual" Hyundai Engineering (2004).
12. B. Liu, X. J. Liu and H. Zhang, "Strain-based Design Criteria of Pipelines", Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 22, No. 6, pp. 884-888 (2009).
13. F. P. Beer, E. R. Johnston and D. F. Mazurek, "Vector Mechanics for Engineers (Statics)" McGraw-Hill, US (2007).
14. F. P. Beer, E. R. Johnston and D. F. Mazurek, "Mechanics of Materials" McGraw-Hill, US (2015).