

[Research Paper]

## 소화설비 배관의 성능위주 내진설계 방법에 관한 연구

이재오 · 김홍경 · 조순봉<sup>\*†</sup>

대전대학교 소방방재학과, <sup>\*</sup>비엔에스조인트

### A Study on Performance-based Seismic Design Method of Fire Extinguishing Pipe System

Jae-Ou Lee · Hong-Kyung Kim · Soon-Bong Cho<sup>\*†</sup>

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

<sup>\*</sup>BNS Joint Corporation

(Received August 17, 2017; Revised August 18, 2017; Accepted August 19, 2017)

#### 요 약

본 연구에서는 소방시설의 내진설계기준에 의한 Cook Book 방식과 Static System Analysis 방식을 비교 해석하였다. Cook Book 방식은 배관을 동일 구간마다 나누어 해석한다. 이 방식은 배관, 물 그리고 관부속의 무게에 따라 버팀대를 설계하는 방식으로 해석하는 구간 외에는 응력해석이 불가능하다. 그러나 Static System Analysis는 배관 전체를 하나의 구조체로 보기 때문에 전체 배관에 대한 응력해석이 가능하다. 국소적으로 발생하는 치명적 응력 값에 대해서는 국부적으로 배관의 응력을 해소할 수 있는 장치의 설치를 통해 적극적으로 배관해석을 할 필요가 있다. 국내의 경우 소방시설의 내진설계기준이 Cook Book 방식만을 제시하고 있어 내진설계의 다양화에 많은 문제점을 가지고 있다. 그러므로 공학적으로 검증된 여러 종류의 Static System Analysis 방법을 통해 배관의 내진 설계를 방법을 적용할 필요가 있다.

#### ABSTRACT

In the present study, a Cook Book method and a Static System Analysis method were compared with each other on the basis of a seismic design criteria of fire-fighting facilities and analyzed. The Cook Book method is analyzed by dividing a pipeline in each same section. In this method, a stress analysis is not possible except for the section analyzed in such a way that a brace is designed according to the weight of pipe, water and pipe fitting. To the contrary, in case of the Static System Analysis method, the stress analysis for the whole pipeline can be performed because the whole pipeline is regarded as a single structure. For the fatal stress values locally generated, it is necessary to actively perform a pipeline analysis by installing a device capable of locally relieving the stress of the pipeline. In Korea, only the Cook Book method is provided as the seismic design criteria of fire-fighting facilities, which causes many problems with diversification of seismic design. Thus, it is necessary to apply the seismic design method of the pipeline by using various kinds of engineered Static System Analysis methods.

**Keywords** : Seismic, Cook Book, Static System Analysis, Performance-Based, Pipe System

#### 1. 서 론

2016년 09월 12일 19시 44분 32초에 경상북도 경주시 남남서쪽 9 km 지점에서 5.1 규모의 지진 이후 경상북도 경주시 남남서쪽 9 km 지점에서 진도 5.8의 역대 최대 규모의 지진이 연이어 저녁 8시 32분에 일어났다. 본 지진은 1978년 대한민국 지진 관측 이래 역대 최강의 지진이다. 대한민국 내 육상 지진으로는 1978년 충청북도 속리산에서

규모 5.2, 충청남도 홍성군에서 규모 5.0의 지진 발생 후 38년만의 대형 지진이며 이는 TNT 50만톤이 한 번에 폭발한 위력인 것으로 알려졌다.<sup>(1)</sup>

기존 지진에 대한 안전 개념은 건축물의 구조체에 대한 안전성 부분만을 고려하여 설계해 왔다. 하지만 최근에는 건축물 내에 설치되는 비구조체에 대한 안전성과 유지력 부분에 대한 관심도 증대되고 있다.<sup>(2)</sup> 소방시설에 대한 내진설계 기준은 국내 현장에 적용할 만한 기준이 없어

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: 27095p@naver.com, TEL: +82-31-433-8062, FAX: +82-31-433-8063

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

NFPA 13, “Standard for the Installation of Sprinkler Systems, Ch.9 Hanging, Bracing, and Restraint of System Piping”을 그대로 준용하여 사용하고 있으며 그 외의 사항은 국토교통부 고시인 건축구조 등에 따른 구조설계를 근간으로 안착되어왔다.<sup>(3)</sup>

국내에서의 내진성능 제품의 경우 UL 인증을 받은 제품을 대부분 사용하고 있다. UL 인증 시험 기준은 미국기계학회(American Society of Mechanical Engineers; ASME), 미국토목학회(American Society of Mechanical Engineers; ASCE), 미국전기학회(Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE) 등의 기술 기준을 준용한 것으로 별도의 시험 기준이 있는 것이 아니다. 또한 NFPA code의 경우도 소화배관에 관련된 기준은 ASME의 파이프 설계 기준을 지진 경우는 ASCE의 지진 관련 기준을 경보시스템에 관련된 기준은 IEEE의 기준을 준용하는 것이다.

현재 사용되고 있는 소화설비에 대한 내진설계는 배관의 하중을 지지하는 버팀대 위주로 설계되고 있다. 버팀대 위주의 설계의 경우 배관의 하중, 배관 내부에 있는 물의 하중 그리고 관 부속품의 하중에 대하여 버팀대가 구조적으로 문제가 발생하지 않느냐에 대한 해석을 주로 하게 된다. 하지만 이와 관련된 해석 프로그램의 경우 관련 제품을 제조하거나 유통하는 업체에서 공급하는 것으로 기술적 검토나 검증도 되고 있지 않아 신뢰성에 큰 문제가 있을 수 있다.

미국의 경우 ASCE에서 발행한 기술 지침에 따라 신규로 설치할 배관이나 기존에 설치한 배관에 대하여 다음의 4가지 내진설계 방법을 제시하고 있다. 첫 번째로 Cook Book (요리책 방식), 두 번째로 Static Hand Calculations (정역학적 수계산 방식), 세 번째로 Static System Analysis (정역학적 시스템 분석 방식) 그리고 네 번째로 Response Spectra Analysis (응답 최적 분석 방식)이다. 현재 국내에서 도입해서 사용하고 있는 버팀대 위주의 내진설계 방식의 경우 첫 번째로 제시한 Cook Book 방식으로 과도할 정도로 안전율을 잡고 있는 아주 보수적인 배관의 내진설계 방식이다. 이 방식을 도입한 이유는 배관계통이나 내진에 대한 공학적 지식을 알지 못하는 누구나 내진 설계를 할 수 있도록 하는 것이 취지였다.<sup>(4)</sup> 그러나 우리나라의 경우 소화배관의 내진설계 방식에 대한 다양한 기술의 검토 없이 NFPA 13 기준의 Cook Book 방식에 대한 내용만을 소화설비의 내진설계 기준에 반영하여 다양한 배관의 내진설계 방법에 제한을 두게 되었다. 소방시설의 내진설계 기준 제2조 적용범위 2항에 따르면 “각 설비에 대하여 특수한 구조 등으로 특별한 조사·연구에 의해 설계하는 경우에는 그 근거를 명시하고, 이 기준을 따르지 아니할 수 있다”라고 명시하여 Cook Book 방식 외에도 다른 방식을 사용할 수 있는 근거는 제시하고 있다. 하지만 다른 방법에 대한 구체화가 되어 있지 않고, 배관의 내진 설계방법에 대한 여러 방식을 공학적으로 이해할 수 있는 기술자가 거의 없어 이를 적용하는

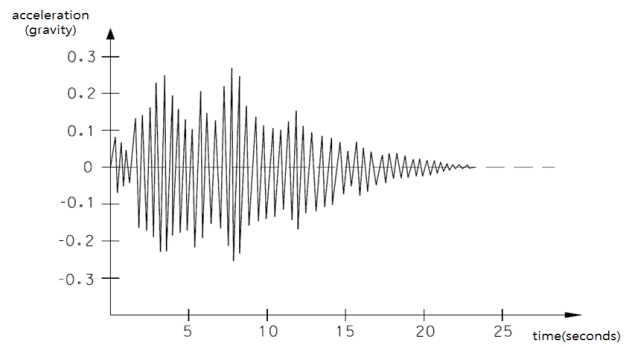


Figure 1. Illustration of a seismic time history acceleration.<sup>(4)</sup>

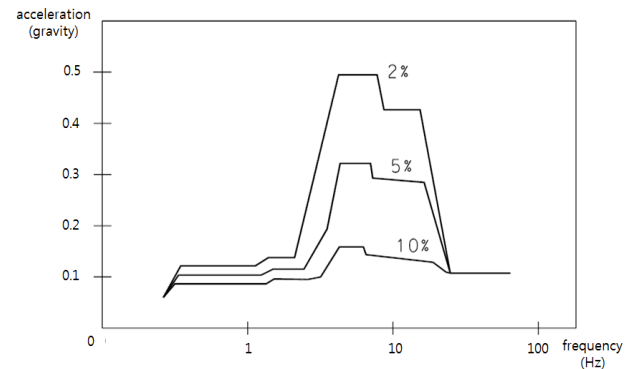


Figure 2. In-Structure seismic response spectra.<sup>(4)</sup>

데에는 한계가 있다.<sup>(5)</sup>

따라서 본 연구에서는 지진으로 인해 배관에 전달될 수 있는 지진의 최대가속도와 다양한 하중의 변화를 통한 소화설비 배관의 응력 변화를 공학적으로 해석하고자 한다. 배관의 응력 해석은 인천의 00주상복합현장의 소화배관을 Static System Analysis 프로그램을 이용하여 수행하였으며, 지진 시 배관 및 배관의 버팀대에 전달될 수 있는 여러 조건을 고려한 공학적 응력 해석을 통해 소화설비 배관의 성능위주의 내진설계 정착에 활용하고자 한다.<sup>(6)</sup>

## 2. 본 문

소화배관의 정확한 내진설계를 위해서는 Figure 1과 같은 동역학적 시간 이력, Figure 2와 같은 동역학적 응답 스펙트럼, equation (1) 또는 (2)과 같은 정역학적 정적 계수 확률적 데이터 그리고 파이프 버팀대 간의 움직임의 차이에 대한 입력에 의해 가능하다.

$$RP = T / r^* \quad \text{- equation (1)}^{(6)}$$

$$r^* = - \log_e (NEP)^{r(1+0.5r)}$$

RP = return period

r = exceedance probability = 1-NEP

NEP = non-exceedance probability

T = exposure period, years

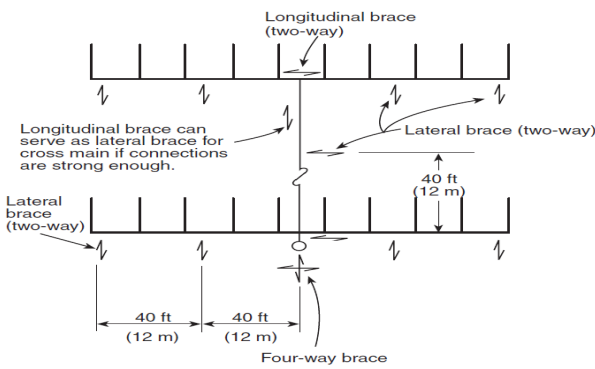


Figure 3. Typical location of bracing on a tree system.<sup>(3)</sup>

Table 1. Piping Weights for Determining Horizontal Load<sup>(3)</sup>

Nominal Dimensions		Weight of Water-Filled Pipe	
in	mm	lb/ft	kg/m
Schedule 40 Pipe			
1	25	2.05	3.05
1 1/4	32	2.93	4.36
1 1/2	40	3.61	5.37
2	50	5.13	7.63
2 1/2	65	7.89	11.74
3	80	10.82	16.10
3 1/2	90	13.48	20.06
4	100	16.40	24.41
5	125	23.47	34.93
6	150	31.69	47.16
8	200	47.40	70.99
Schedule 10 Pipe			
1	25	1.81	2.69
1 1/4	32	2.52	3.75
1 1/2	40	3.04	4.52
2	50	4.22	6.28
2 1/2	65	5.89	8.77
3	80	7.94	11.82
3 1/2	90	9.78	14.55
4	100	11.78	17.53
5	125	17.30	25.75
6	150	23.03	34.27
8	200	40.08	59.65

국내 소방시설의 내진설계 기준의 경우 지진분리이음, 지진분리장치, 버팀대, 방진장치, 내진스토퍼를 중심으로 기술하고 있으며, 배관의 경우 지진분리이음, 지진분리장치, 버팀대를 중심으로 내진설계를 하도록 되어 있다. 지진 분리이음이나 지진분리장치의 경우 외부에서 배관으로 전달되는 힘을 분리해주는 용도로 설치된다. 버팀대 위주의

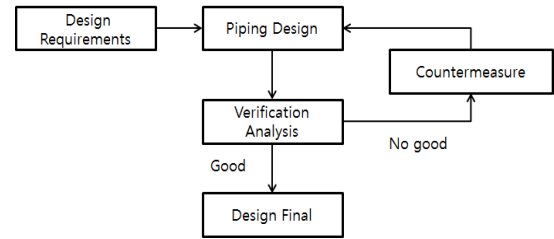


Figure 4. Seismic piping design flowchart.

설계방식의 경우 지진에 대한 순간하중에 대해 버팀대를 고정간격으로 설치하는 방식으로 해석한다.<sup>(5)</sup> Figure 3과 같이 횡방향 흔들림 방지 버팀대의 경우 12 m 간격으로 종방향 흔들림 방지 버팀대의 경우 24 m 간격으로 설치하게 되어 있다.

소방시설의 내진설계 기준에 의해 배관을 설계하는 경우 Table 1을 통해 각 구간에 있는 모든 배관과 물의 무게를 합한 후 배관의 관 부속에 대한 무게를 대략적으로 배관과 물의 총 무게의 15%로 간주하여 버팀대를 설계하게 된다.

기존의 공학적 배관의 내진설계 방식은 굽힘 응력 및 지지력에 대한 빔 공식을 사용하여 직접 수 계산을 통해 해석하였다. 그러나 배관의 응력해석이 가능한 배관 설계 소프트웨어가 개발된 후에는 직접 수 계산을 하는 것보다 빠르고 정확한 소프트웨어를 이용한 배관 해석방식이 선호되고 있다. Figure 4의 경우 일반적인 배관의 내진설계에 대한 순서도로 설계에 대한 요구사항에 대한 검증이 완료될 때 까지 피드백을 통하여 최종 검증단계에 이르는 방식을 사용하고 있다. 그 외에 유한요소 응력해석 소프트웨어의 경우는 특정 배관 부속의 상세한 응력 분포를 계산하는 연구를 제외하고는 배관 설계에는 사용되지 않고 있다.

배관의 내진설계와 관련된 코드를 적용하기 위해서는 배관에 대한 정확한 해석을 통한 Isometric diagram을 통해서 가능하다. 국내의 경우 배관의 내진설계와 관련된 공학적 해석을 위한 관련 코드가 없기 때문에 국제적으로 배관의 설계에 공인되어 사용되고 있는 코드 중 ASME B31.3, “Code for pressure piping”을 기반으로 내진 해석을 하였다.<sup>(7)</sup> Figure 5는 인천 00지역에 있는 주상복합건축물의 소화배관 isometric diagram으로 (a)는 입상배관을 (b)는 펌프에서 입상배관에 이르는 수평배관을 나타낸다. 배관은 Schedule number가 10인 배관을 사용하였으며 주요 설비 구성으로는 가압송수장치로 Pump가 설치되어 있고, 건물이 2동으로 구성되어 있어 입상배관이 2개의 라인으로 구성되어 있다. 배관의 지지를 위한 버팀대는 3m 간격으로 설치하였고 이를 기준으로 250여개의 node로 나누어 해석하였다. 지진에 대한 최대 가속도는 0.1 g, 0.2 g, 0.3 g, 0.4 g 그리고 0.5 g까지 각각 적용하여 해석하였으며, Table 2는 Modified Mercalli Intensity Scale (MMIS)와 지진에 대한 최대 가속도를 비교하여 설명한 것이다.

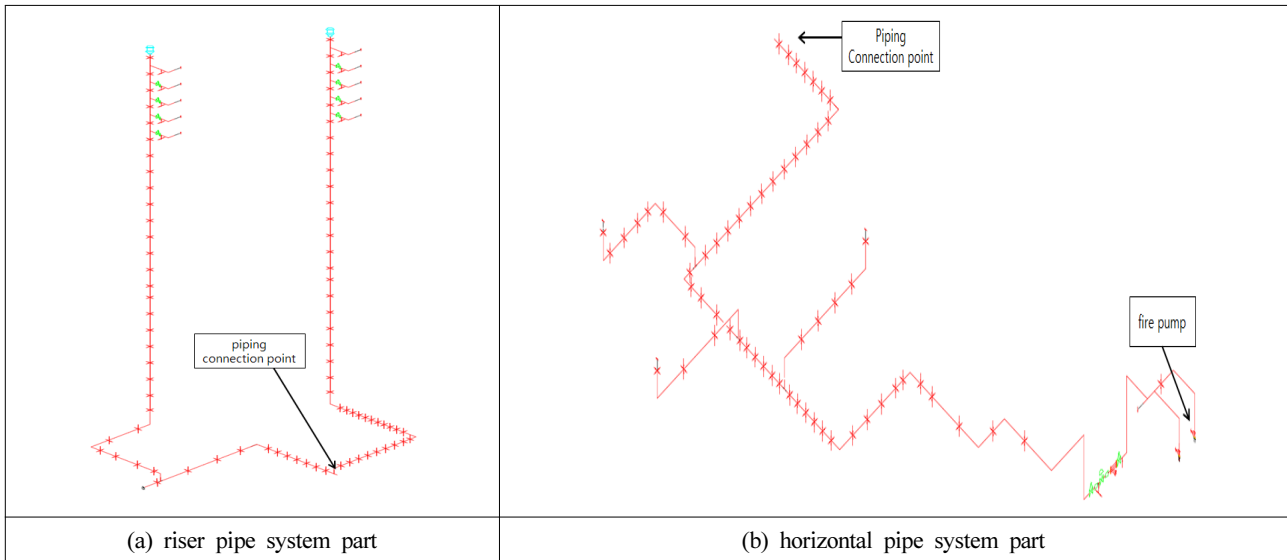


Figure 5. Isometric diagram for seismic analysis.

Table 2. Damage for Modified Mercalli Intensity Scale and Maximum Acceleration<sup>(8)</sup>

MMI Value	Maximum Acceleration	Description/Damage
I		Not felt except by very few under especially favorable conditions.
II		Felt only by a few people at rest, especially on upper floors of buildings.
III		Felt quite noticeably by people indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated.
IV	0.015~0.02	Felt indoors by many, outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing motor cars rocked noticeably.
V	0.03~0.04	Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. Pendulum clocks may stop.
VI	0.06~0.07	Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight.
VII	0.10~0.15	Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable damage in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken.
VIII	0.25~0.30	Damage slight in specially designed structures; considerable damage in ordinary substantial buildings with partial collapse. Damage great in poorly built structures. Fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned.
IX	0.50~0.55	Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations. Liquefaction.
X	0.60 over	Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent.
XI		Few, if any, (masonry) structures remain standing. Bridges destroyed. Broad fissures in ground. Underground pipe lines completely out of service. Earth slumps and land slips in soft ground. Rails bent greatly.
XII		Damage total. Waves seen on ground surfaces. Lines of sight and level distorted. Objects thrown upward into the air.

배관의 해석을 위해서는 배관에 전달되는 최대 가속도에 대한 입력 값도 중요하지만 배관을 어떤 하중 조건에서 분석할 것인지에 대한 부분도 중요한 고려사항이다. Table

3은 배관의 내진 해석을 위한 하중 조건으로 총 37가지 조건을 입력하였다. OPE의 경우 배관에서 물이 유동될 때를 고려한 해석, SUS의 경우는 배관과 물의 중량에 의한 영향

**Table 3.** Listing of Static Load Cases for this Analysis

Number	Analysis of Condition Case	Load Case	Number	Analysis of Condition Case	Load Case
1	HYD	L1=W+HP	20	OCC	L20=L8-L2
2	OPE	L2=W+T1+P1	21	OCC	L21=L9-L2
3	OPE	L3=W+T1+P1+U1+U2	22	OCC	L22=L10-L2
4	OPE	L4=W+T1+P1-U1-U2	23	OCC	L23=L14+L15
5	OPE	L5=W+T1+P1+U1-U2	24	OCC	L24=L14+L16
6	OPE	L6=W+T1+P1-U1+U2	25	OCC	L25=L14+L17
7	OPE	L7=W+T1+P1+U2+U3	26	OCC	L26=L14+L18
8	OPE	L8=W+T1+P1-U2-U3	27	OCC	L27=L14+L19
9	OPE	L9=W+T1+P1+U2-U3	28	OCC	L28=L14+L20
10	OPE	L10=W+T1+P1-U2+U3	29	OCC	L29=L14+L21
11	OPE	L11=W+T1+P1+U1+U3	30	OCC	L30=L14+L22
12	OPE	L12=W+T1+P1-U1-U3	31	OCC	L31=L11-L2
13	OPE	L13=W+T1+P1+U1-U3	32	OCC	L32=L12-L2
14	SUS	L14=W+P1	33	OCC	L33=L13-L2
15	OCC	L15=L3-L2	34	OCC	L34=L14+L31
16	OCC	L16=L4-L2	35	OCC	L35=L14+L32
17	OCC	L17=L5-L2	36	OCC	L36=L14+L33
18	OCC	L18=L6-L2	37	EXP	L37=L2-L11
19	OCC	L19=L7-L2			

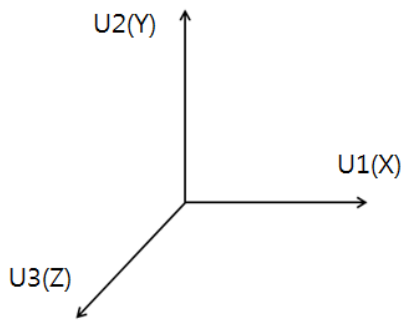
note:

HYD : hydraulic pressure test

OPE : analysis assuming operating conditions, SUS : analysis taking into account the influence of weight

EXP : analysis considering the effect of heat, OCC : analysis assuming a state where a short-term load is applied

W1 : weight, T1 : temperature, P1 : pressure, U1 : X-axis direction, U2 : Y-axis direction, U3 : Z-axis direction



**Figure 6.** Coordinate reference.

을 고려한 해석, EXP의 경우는 열에 의한 영향을 고려한 해석 그리고 OCC의 경우는 지진이나 바람 기타 외부의 충격같이 일시적인 힘을 고려한 해석이다. 또한 배관과 물의 하중(W), 배관의 온도(T) 그리고 배관의 압력(P)에 따른 배관의 응력 변화와 Figure 6과 같이 배관에 힘이 전달되는 방향에 따라 X축 방향(U1), Y축 방향(U2), Z축 방향(U3)으로 다양하게 해석하였다. 온도는 21 °C를 압력은 14 kg/cm<sup>2</sup>를 기준으로 해석하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Table 4는 Static System Analysis 방식을 통해 250여개의 Node로 구성된 소화배관에 전달되는 5가지 최대 가속도 조건, 37가지 하중조건을 고려한 배관의 응력 해석 값이다. 총 46,000여개가 조건에 따른 응력이 해석되었지만, 최대 가속도 별로 가장 위험한 조건을 13개씩 총 65개의 응력 해석 값을 표로 나타내고 있다. 해석 프로그램의 단위가 kg/cm<sup>2</sup>을 사용하고 있어 신뢰성을 위해 SI 단위를 대신하여 표기하였다. 배관의 Allowable Stress (허용응력)은 ASME code에서 제시하고 있는 1496.15 kg/cm<sup>2</sup>을 적용하였다.

0.1 gravity에서는 배관의 Element node가 1265 node, 2245 node, 2448 node에서 큰 응력이 발생하였다. 1265 node의 경우 fail load L 36조건에서 배관의 응력이 1,420.16 kg/cm<sup>2</sup>이 계산되어 허용 응력 값의 94.90%로 가장 큰 위험이 있는 node임을 알 수 있다. 0.2 gravity에서도 element node가 1265 node, 2245 node, 2448 node에서 큰 응력이 발생하였으며, 1265 node의 경우 fail load L 34조건에서 1,427.86 kg/cm<sup>2</sup>이 계산되어 허용 응력 값의 95.44%로 0.1 gravity와 동일하게 배관에서 가장 큰 영향을 받는 node임을 알 수

**Table 4.** Stress Change of Piping Accompanying Increase of Seismic Acceleration

No	Seismic Factor			Fail Load	Load Case Analyzed	Element Nodes	ASME Code Stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Allowable Stress (kg/cm <sup>2</sup> )	Percent (%)
	X	Y	Z						
1	0.1	0.1	0.1	(OCC)L15=L3-L2	X / Z	1265	7.52	1496.15	7.52
2				(OCC)L18=L6-L2	Y / -Z	2245	150.97	1496.15	10.09
3				(OCC)L19=L7-L2	W+P+X+Z	2448	272.05	1496.15	18.18
4				(OCC)L21=L9-L2	W+P+Y-Z	2448	280.15	1496.15	18.72
5				(OCC)L23=L14+L15	W+P+X+Y	1265	1122.61	1496.15	75.03
6				(OCC)L26=L14+L18	W+P-X+Y	1265	1125.1	1496.15	75.20
7				(OCC)L27=L14+L19	X / -Z	1265	1125.99	1496.15	75.26
8				(OCC)L29=L14+L21	W+P+X+Z	1265	1126.19	1496.15	75.27
9				(OCC)L34=L14+L31	W+P-X-Z	1265	1420.16	1496.15	94.90
10				(OCC)L35=L14+L32	X / Y	1265	1396.43	1496.15	93.33
11				(OCC)L36=L14+L33	-X / Y	1265	1421.54	1496.15	95.01
12				(OCC)L31=L11-L2	X / Z	2448	270.54	1496.15	18.08
13				(OCC)L31=L12-L2	-X / -Z	2448	276.15	1496.15	18.46
1	0.2	0.2	0.2	(OCC)L15=L3-L2	X / Z	1265	223.8	1496.15	14.96
2				(OCC)L18=L6-L2	Y / -Z	2245	301.94	1496.15	20.18
3				(OCC)L19=L7-L2	W+P+X+Z	2448	410.11	1496.15	27.41
4				(OCC)L21=L9-L2	W+P+Y-Z	2448	280.15	1496.15	18.72
5				(OCC)L23=L14+L15	W+P+X+Y	1265	1139.16	1496.15	76.14
6				(OCC)L26=L14+L18	W+P-X+Y	1265	1149.66	1496.15	76.84
7				(OCC)L27=L14+L19	X / -Z	1265	1496.15	1496.15	76.66
8				(OCC)L29=L14+L21	W+P+X+Z	1265	1149.49	1496.15	76.83
9				(OCC)L34=L14+L31	W+P-X-Z	1265	1433.48	1496.15	95.81
10				(OCC)L35=L14+L32	X / Y	1265	134.01	1496.15	91.84
11				(OCC)L36=L14+L33	-X / Y	1265	1427.86	1496.15	95.44
12				(OCC)L31=L11-L2	X / Z	2448	410.69	1496.15	27.45
13				(OCC)L31=L12-L2	-X / -Z	2448	415.18	1496.15	27.75
1	0.3	0.3	0.3	(OCC)L15=L3-L2	X / Z	610	572.42	1496.15	38.26
2				(OCC)L18=L6-L2	Y / -Z	610	553.82	1496.15	37.11
3				(OCC)L19=L7-L2	W+P+X+Z	2408	417.23	1496.15	27.89
4				(OCC)L21=L9-L2	W+P+Y-Z	2448	427.25	1496.15	28.56
5				(OCC)L23=L14+L15	W+P+X+Y	1265	114.41	1496.15	77.83
6				(OCC)L26=L14+L18	W+P-X+Y	1265	1196.33	1496.15	79.96
7				(OCC)L27=L14+L19	X / -Z	1265	1182.39	1496.15	79.03
8				(OCC)L29=L14+L21	W+P+X+Z	1265	1184.74	1496.15	79.19
9				(OCC)L34=L14+L31	W+P-X-Z	1265	1464.14	1496.15	97.86
10				(OCC)L35=L14+L32	X / Y	1265	1368.9	1496.15	91.49
11				(OCC)L36=L14+L33	-X / Y	1265	1466.04	1496.15	97.99
12				(OCC)L31=L11-L2	X / Z	820	429.57	1496.15	28.71
13				(OCC)L31=L12-L2	-X / -Z	2448	422.13	1496.15	28.21
1	0.4	0.4	0.4	(OCC)L15=L3-L2	X / Z	610	1269.77	1496.15	84.87
2				(OCC)L18=L6-L2	Y / -Z	610	1253.87	1496.15	83.81
3				(OCC)L19=L7-L2	W+P+X+Z	738	935.55	1496.15	62.53
4				(OCC)L21=L9-L2	W+P+Y-Z	738	913.06	1496.15	61.03
5				(OCC)L23=L14+L15	W+P+X+Y	610	1314.99	1496.15	87.89
6				(OCC)L26=L14+L18	W+P-X+Y	610	1299.5	1496.15	86.87
7				(OCC)L27=L14+L19	X / -Z	1265	1227.56	1496.15	82.05
8				(OCC)L29=L14+L21	W+P+X+Z	1265	1228.9	1496.15	82.12
9				(OCC)L34=L14+L31	W+P-X-Z	1265	1472.19	1496.15	98.40
10				(OCC)L35=L14+L32	X / Y	610	1336.35	1496.15	89.32
11				(OCC)L36=L14+L33	-X / Y	1265	1478.55	1496.15	98.82
12				(OCC)L31=L11-L2	X / Z	610	1030.85	1496.15	68.90
13				(OCC)L31=L12-L2	-X / -Z	610	1051.69	1496.15	70.29
1	0.5	0.5	0.5	(OCC)L15=L3-L2	X / Z	610	1855.96	1496.15	124.50
2				(OCC)L18=L6-L2	Y / -Z	610	1839.7	1496.15	122.97
3				(OCC)L19=L7-L2	W+P+X+Z	738	1542.69	1496.15	103.11
4				(OCC)L21=L9-L2	W+P+Y-Z	738	1500.55	1496.15	100.29
5				(OCC)L23=L14+L15	W+P+X+Y	610	1887.3	1496.15	126.14
6				(OCC)L26=L14+L18	W+P-X+Y	610	1871.26	1496.15	125.07
7				(OCC)L27=L14+L19	X / -Z	738	1570.45	1496.15	104.97
8				(OCC)L29=L14+L21	W+P+X+Z	738	1529.07	1496.15	102.20
9				(OCC)L34=L14+L31	W+P-X-Z	610	1929.09	1496.15	128.54
10				(OCC)L35=L14+L32	X / Y	610	1937.52	1496.15	129.50
11				(OCC)L36=L14+L33	-X / Y	610	1653.16	1496.15	110.49
12				(OCC)L31=L11-L2	X / Z	610	1647.3	1496.15	110.12
13				(OCC)L31=L12-L2	-X / -Z	610	1650.8	1496.15	110.33

있다. 0.3 gravity에서는 배관의 element node가 610 node, 820 node, 1265 node, 2408 node, 2448 node에서 큰 응력이 발생하였다. 1265 node의 경우 fail load L34조건에서 가장 큰 응력이 발생되었으며 0.1 gravity와 0.2 gravity에서 큰 응

력을 발생되었던 2245 node보다 610 node, 820 node, 2408 node에서 더 큰 응력이 발생되었다. 0.4 gravity에서는 배관의 element node가 610 node, 738 node, 1265 node에서 큰 응력이 발생되었다. 이 중 1265 node에서는 0.3 gravity 해석



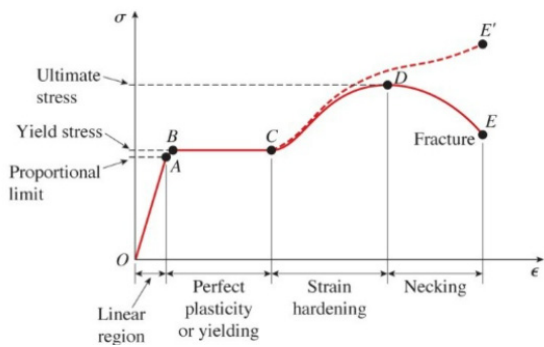


Figure 7. Stress strain curve of ductile material.

시와 동일하게 가장 큰 응력이 발생되었으며 fail load L 34 조건에서 배관의 응력은  $1,472.19 \text{ kg/cm}^2$  이 계산되어 허용 응력 값에 98.82%에 도달되었다. 이는 배관에 안전율을 고

려하여 제시된 허용 응력 값을 비교하였을 때는 문제가 되지 않는다. 하지만 배관에 전달되는 모든 힘을 고려하지 못하였기 때문에 배관의 지진에 대한 안전을 고려한다면 배관의 허용 응력을 개선할 필요가 있다. 배관에 전달되는 최대 가속도 0.5 gravity에서는 element node가 610 node, 738 node 에서 허용 응력 값을 초과하는 응력이 발생되었다. 610 node 에서 fail load L 35조건에서 배관의 응력은  $1,937.52 \text{ kg/cm}^2$  이 계산되었으며, 이는 배관의 허용 응력 값에 129.50%를 초과하는 값으로 소화 배관에 심각한 문제가 발생됨을 예상해 볼 수 있다.

소방시설의 내진설계기준에 따른 방법을 통해 버팀대에 전달되는 하중에 대한 단순한 응력 해석 방법도 필요하지만 Figure 7과 같이 배관 자체가 가지고 있는 인장 및 압축 응력에 대한 재료적 특성을 고려한 좀 더 정밀하고 신뢰성 있는 역학적 해석을 할 필요가 있다.

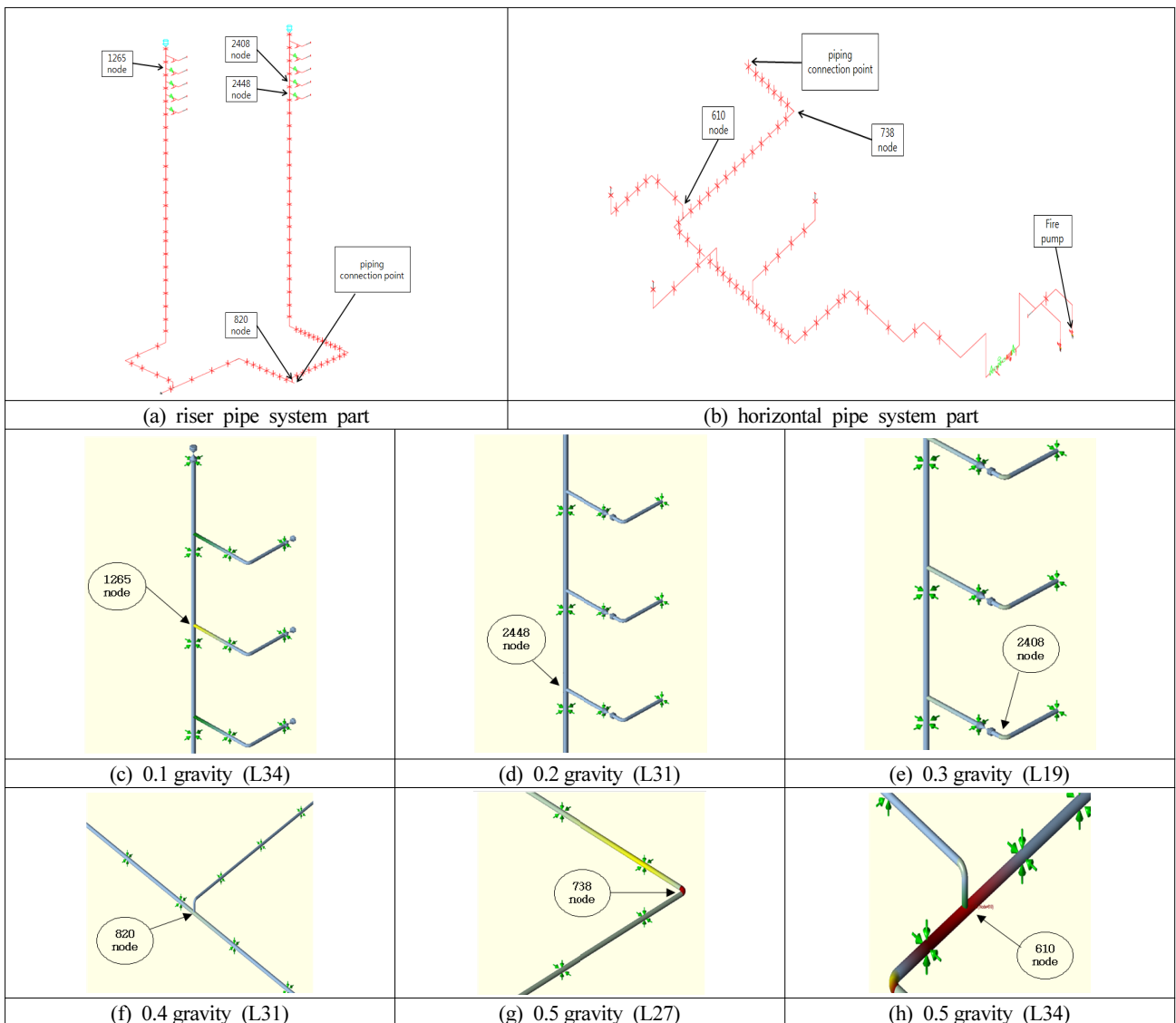


Figure 8. Isometric diagram for failed load nodes.

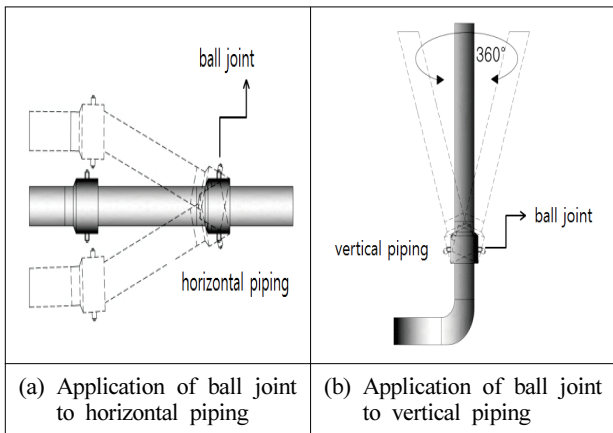


Figure 9. Examples of using ball joints & multi joints<sup>(9)</sup>

Static System Analysis 방식의 경우 Table 5와 같이 소화 배관에 전달되는 하중의 조건에 따라 배관에 응력이 집중되는 부위에 대한 해석이 가능해 기존의 버팀대를 기준으로 한 내진설계 방식에 비해 신뢰성 있는 응력 해석이 가능하다. 또한 응력이 집중되는 부위를 찾아내 응력을 해소시킬 수 있는 대책을 세울 수 있다는 장점이 있다. Figure 8의 경우 5개의 지진가속도 조건과 37개의 하중조건에 따라 응력이 집중되는 부위에 대한 해석을 통해 응력이 집중되는 node에 대한 isometric diagram을 나타낸 것이다. Figure 8의 (c), (d), (e), (f), (g), (h)를 통해 배관의 응력이 집중되는 부분은 직선배관 부위보다는 배관과 배관이 접속되는 엘보나 티 등의 관 부속 부위임을 알 수 있었다. 0.1 gravity~0.4 gravity까지 내진 설계 시에는 국소적으로 응력이 집중되는 1265 node에 대하여 응력을 해소시킬 수 있는 방법을 고려하여야 하며, 0.5 gravity까지 내진 설계 시에는 610 node, 738 node 뿐 아니라 0.1 gravity~0.4 gravity에서 최대 응력이 발생하는 1265 node에 대한 고려를 하여야 한다.

Figure 9은 외부에서 전달된 하중에 대해 가변성 있는 움직임을 통해 응력을 해소해 주는 장치에 대한 개념도이다. 기존의 소화시설의 내진설계기준에는 이런 국소적 장치에 대한 개념이 지진분리이음 및 지진분리장치로만 되어 있다. 이는 배관의 이음방식을 볼 조인트나 멀티조인트 방식이 아닌 그르부 조인트(Groove joint)방식을 대부분 적용한 것으로 이음부위에 직각방향으로 하중이 걸릴 경우 굽힘 응력에 대해 내구성을 갖지 못하는 단점이 있다. 하지만 Figure 9의 볼 조인트나 멀티조인트의 경우 배관에 직각방향으로 걸리는 하중과 변위에 대해 충분한 내구성을 가지고 있어 공인된 성능 안에서는 국소적으로 응력을 해소시키는 방식으로 사용하여도 문제가 발생하지 않는다. 각종 플랜트의 주요 배관의 내진 설계 시에도 버팀대를 이용한 방식보다는 Static System Analysis 방식을 이용하여 1차 해석 후 응력이 집중되는 곳에 볼 조인트나 멀티 조인트가 배관에 설치된 것으로 가정하여 2차 해석을 통해 응력을

저감시키는 방식의 기술을 사용하고 있다. 또한 내진 버팀대의 경우 신규로 설치하는 배관에는 적용이 가능하지만 기존에 설치된 배관에 대해 적용하는데 어려움이 있다. 하지만 볼 조인트나 멀티조인트를 사용하는 방식은 신규로 설치하는 배관 뿐 아니라 기존에 설치된 배관과 버팀대에 대한 응력 해석 후 응력이 집중되는 곳에 장치를 적용하여 내진 시공을 할 수 있는 장점도 있어 필요에 따라 내진보강공사도 가능하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 국내의 소방시설의 내진설계 기준에서 제시하고 있는 Cook Book 방식과 Static System Analysis 방식의 비교 해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 소방시설의 내진설계 기준에 의해 소화배관을 해석하는 경우 구간의 하중을 기준으로 버팀대의 응력에 대한 부분만을 해석하기 때문에 구간의 하중이 동일할 경우 위치와 상관없이 같은 응력이 발생하는 것으로 해석되며 배관에 대해서는 응력이 해석되지 않는 단점이 있음을 알 수 있었다.

2) Static System Analysis 방식으로 배관을 해석한 결과 발생하는 응력을 node에 따라 정확하게 해석할 수 있었으며, 구간이 아닌 전체 배관에 대하여 응력이 집중되는 여러 node의 해석이 가능해 응력이 집중되는 부위에 대한 대책을 세울 수 있다는 장점이 있었다.

3) Static System Analysis 방식에 의해 소화배관에서 발생하는 응력을 해석할 경우 지진에 의한 가속도와 하중에 대한 여러 조건에 따라 같은 node에서도 다른 응력 값이 계산됨을 알 수 있었다.

4) Static System Analysis 방식에 의해 지진의 가속도와 하중에 대한 여러 조건에 따라 발생하는 최대 응력을 해석한 결과 항상 동일한 node에서 최대 응력이 발생하는 것이 아니라 가속도의 크기와 하중에 대한 여러 케이스에 따라 다른 node에도 발생할 수 있음을 알 수 있었다.

5) 배관의 경우 응력이 집중되는 부위는 직선구간의 배관 보다는 배관이 분기되는 곳에 집중되는 경향을 보였으며 이 구간에는 대부분 관부속이 설치되어 있음을 알 수 있었다.

즉, 공학적으로 신뢰성 있는 소화설비 배관의 내진설계를 위해서는 배관에 전달되는 지진가속도에 따른 배관의 응력변화를 해석하는 것이 필수 조건이다. 또한 건축 구조물의 내진 요구 성능에 따라 배관의 내진 요구 성능을 일치시킬 필요가 있다. 하지만 소화시설의 내진설계 기준의 Cook Book 방식은 버팀대에 전달되는 배관의 무게를 중심으로 설계하는 방식이기 때문에 배관에 대한 정확한 응력 해석이 불가능하고 건축 구조물의 내진 요구 성능에 따른 설계가 불가능하다. 그러므로 소화설비 배관의 성능위주 내진설계를 위해서는 1차적으로 건축 구조물의 요구 내진



성능을 파악하여야 하며 이에 따라 배관의 응력을 해석을 하고 문제가 발생된 node에 대하여 응력을 저감시킬 수 있는 장치를 설치하는 방식의 합리적인 내진 설계를 채용할 필요가 있다.

### References

1. [Http://www.kma.go.kr/](http://www.kma.go.kr/), Korea Meteorological Administration (2017).
2. J. H. Kwark and J. K. Yoon, “Development of a Seismic Test Method for Fire Protecting Components by Equivalent Linear Analysis Theory”, Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 27, No.1, pp. 46-51 (2013).
3. NFPA 13 “Standard for the Installation of Sprinkler Systems, Ch.9” (2016).
4. ASCE, “Seismic Design and Retrofit of Piping Systems” (2002).
5. NEMA, “Seismic Design Criteria of Fire-fighting Facilities” (2016).
6. C.A.E Eng’g S/W, “CAESAR II Technical Reference Manual” (2013).
7. ASME B31.3, “Code for Pressure Piping”, (2014).
8. [Http://www.USGS.gov/](http://www.USGS.gov/), United States Geological Survey Website (2017).
9. [Http://www.bnsjoint.co.kr/](http://www.bnsjoint.co.kr/), Korea BNS JOINT Corporation Website (2017).