

<연구논문>

# 원자력발전소 비안전등급 배관의 내진해석 방법론 연구

서건창\*·반치범†

## Seismic Analysis Methodology for Non-Nuclear Safety Piping in Nuclear Power Plants

Keon Chang Seo\* and Chi Bum Bahn†

(Received 12 November 2021, Revised 20 May 2022, Accepted 8 June 2022)

### ABSTRACT

Currently, there is no technical standard and regulation for seismic analysis of non-nuclear safety piping. Accordingly, ASME Sec.III ND, a standards applied to safety class 3 piping, is applied. However, the technical standard applied for other than seismic analysis is ASME B31, which leads to controversy. In this study, the feasibility of applying ASME B31E was confirmed by reviewing rulescomparing technical standards, and evaluating piping allowable stress margins. The evaluation revealed that applying ASME B31.1 as a technical standard is too conservative compared to ASME Sec.III ND. On the other hand, ASME B31E (issued at the request of the industry) clearly presents the technical standards for seismic analysis of ASME B31 piping, and shows a similar level of conservatism compared to ASME Sec.III ND. It is expected to reduce the controversy over technical standards for seismic analysis of non-nuclear safety piping by applying ASME B31E.

**Key Words :** Pipe Stress Analysis(배관응력해석), Seismic Analysis(내진해석), ASME B31.1(미국기계학회 B31.1), ASME B31E(미국기계학회 B31E), ASME Sec.III ND(미국기계학회 Sec.III ND)

### 기호설명

$B_1, B_2$  = primary stress indices  
 $C_x$  = dimension associated with socket welds  
 $D_o$  = outside diameter of pipe  
 $i$  = stress intensification factor  
 $k$  = allowable stress multiplier  
 $M_A$  = resultant moment loading on cross section due to weight and other sustained loads  
 $M_B$  = resultant moment loading on cross section due to occasional loads, such as earthquake

$P$  = internal design pressure ( $=P_d$ )  
 $P_{max}$  = peak pressure  
 $R$  = nominal bend radius of curved pipe or elbow  
 $r_m$  = mean pipe radius =  $(D_o - t_n)/2$   
 $S_h$  = material allowable stress  
 $S_{OL}$  = stress due to occasional loads, such as earthquake  
 $S_y$  = material yield strength  
 $t_n$  = nominal wall thickness  
 $Z$  = section modulus

## 1. 서 론

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : bahn@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-1033 FAX : (051)582-9164

\* 부산대학교 대학원 원자력공학전공, 한국수력원자력

원자력발전소 배관 설계 시 내진해석은 중요한 요소 중 하나이고 경주 지진 이후 원전 설비의 안전성과 신뢰성 증진을 위한 주요 현안으로 대두되었다.

국내 원전에서는 안전등급1,2,3 배관 및 비안전등급 배관 중 내진범주 I, II에 해당하는 배관에 내진해석을 수행하여 배관의 건전성을 확인한다.

배관응력해석 수행 시 안전등급 1,2,3의 경우 KEPIC MNB, MNC, MND (ASME Sec.III NB, NC, ND)의 3600항<sup>(1,2)</sup>을 적용한다. 방사성폐기물 계통을 제외한 대부분의 비안전등급의 경우 KEPIC MGE (ASME B31.1) 104항<sup>(3,4)</sup>을 적용하고 방사성폐기물 계통의 배관은 ASME B31.3 302항을 적용한다. 또한, 배관계통의 내진범주 I, II에 해당하는 경우 안전정지지진(Safe Shut-Down Earthquake) 및 운전기준지진(Operating Base Earthquake)에 대한 내진해석을 수행한다.

안전등급1,2,3 배관은 내진범주 I에 해당하며, 배관의 내진해석을 수행할 때 해당 기술기준인 ASME Sec.III NB, NC, ND 3610항의 Service Level A, B, C, D의 개념을 적용하여 normal, upset, emergency, faulted의 경우에 따라 allowable stress multiplier(k)를 적용하여 응력 요건 만족 여부를 평가한다.

비안전등급 배관 중 내진범주 I, II에 해당하는 배관의 내진해석을 수행할 때는 ASME B31.1 및 B31.3에서 Service Level에 대한 개념이 존재하지 않아 ASME Sec.III ND를 적용하여 건전성을 평가한다. 국내 가동 원전의 설계사별 비안전등급 내진범주 I, II 배관 내진 해석 기술기준 적용 현황을 Table 1에 정리하였다.

그러나 비안전등급 배관을 ASME Sec.III ND 기준으로 내진해석 하는 것이 보수적인 것은 아니다. ASME B31.1 및 B31.3 대신 ASME Sec.III ND를 적용함으로써 Allowable stress multiplier(k)가 증가하여 허용응력이 커지게 되어 보수성이 떨어진다. 또한, 배관의 재료, 설치, 용접, 비파괴검사, 누설시험 등의 요건은 ASME B31.1 및 B31.3을 적용하고 설계는 ASME Sec.III ND를 적용하는 것은 품질관리나 기술기준 적용의 일관성 측면에서 논란의 여지가 있다.

한편, 산업계에 임계 배관(Critical Piping, 지진 이후에도 누설되지 않고 작동성이 확보되어야 하는 배관계)의 내진설계가 법규 또는 규제 요건에서 요구되거나

**Table 1** Status of applied code of seismic analysis for non-nuclear safety, seismic cat. I, II piping

Site	Engineering Firm	Applied Code
Kori#3,4	Bectel	ASME Sec.III ND
Hanbit#3,4	S&L	ASME Sec.III ND
ShinKori#3,4	Kepeco E&C	ASME Sec.III ND

자발적으로 공공의 안전을 위해 도입되고 있다. 이에 미국 산업계는 지진에 대한 명확하고 체계적인 Allowable Stress 적용을 ASME에 요구하여 B31 Mechanical Design Technical committee를 구성하였고, B31E(Standard for the seismic Design and retrofit of above-ground piping systems)<sup>(5)</sup>를 2008년도에 발행하였다.

본 연구에서는 방사성폐기물 계통을 제외한 대부분의 원자력발전소 비안전등급 배관의 내진해석과 관련하여 국내 기술기준 관련 법규 및 ASME Sec.III ND, ASME B31.1, ASME B31E에 따른 계산식을 검토하고 실제 배관계의 해석 및 평가를 통해 ASME B31E 적용 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 배관계통 응력해석 기술기준

### 2.1 국내 관련 법규 검토

국내 원전의 안전등급 배관 내진설계는 원안위 고시 제2018-6호(원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙) 별표 KEPIC 등의 기술기준 적용에 대한 제한 사항에 따라 KEPIC MN 1995Ed.(ASME Sec.III 1993 Add.)을 적용하고, 비안전등급 배관 내진설계와 관련한 별도의 기준이 규정되어 있지 않다.

#### 2.1.1 원자력 안전법

원자력 안전법 제21조(허가기준) 2항에 따라 발전용 원자로 및 관계시설의 성능이 위원회규칙으로 정하는 기술기준에 적합하여 방사성물질 등에 따른 인체, 물체, 및 공공의 재해방지에 지장이 없어야 한다.

#### 2.1.2 원자력안전위원회규칙

원자력안전위원회규칙 제30호(원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙) 제12조(안전등급 및 규격) 1항에 따라 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기는 안전기능의 중요도에 상응하는 안전등급 및 규격에 따라 설계, 제작, 설치, 시험, 검사되어야 하며 등급별 규격은 원자력안전위원회가 고시하도록 한다. 여기에서 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기는 원자로시설 중에서 안전에 중요한 설비로서 필수 안전기능을 수행하는 안전 관련 설비와 고장 시 안전 관련 설비의 기능수행에 직접영향을 미칠 수 있는 비안전설비를 말한다.

#### 2.1.3 원안위 고시

안전등급이 부여된 설비는 원안위 고시 제2018-6호

(원자로시설의 안전등급과 등급별 규격에 관한 규정) 제 9조(등급별 규격)에 따라 아래와 같은 기술기준을 적용하여야 한다.

안전등급1,2,3의 기계설비 : KEPIC MN(2000년판부터 2009년 추록까지) 또는 ASME Code Sec.III(1995년판부터 2008년 추록까지)

별표 KEPIC 등의 기술기준 적용에 대한 제한사항 배관 내진설계는 KEPIC(1997년 추록~2007년 추록) MNB 3200, MNB 3600, MNC 3600, MND 3600은 사용할 수 없고, KEPIC(1995년판)MNB 3200, MNB 3600, MNC 3600, MND 3600은 용접다리 치수 요건을 만족하는 경우 사용할 수 있다.

비안전등급 기계설비에 대한 기술기준은 원안위 고시에서도 제시하고 있지 않다.

## 2.2 KEPIC MND (ASME Sec.III ND)

현재 국내 원전의 비안전등급 내진범주 I, II 배관의 내진해석은 KEPIC MND 1995Ed. (ASME Sec.III ND 1993Add.)을 기준으로 하며 Service Level B급 운전한계에서의 압력, 자중, 기타 지속하중과 지진을 포함한 일시적 하중(Occasional Loads)은 식(1)의 요건을 만족해야 한다.

$$S_{OL} = B_1 \frac{P_{\max} D_o}{2t_n} + B_2 \left( \frac{M_A + M_B}{Z} \right) \leq 1.8S_h \quad (1)$$

이때, 허용응력은  $1.5S_y$ 보다 커서는 안 된다.

여기에서  $P_{\max}$ 는 첨두압력,  $D_o$ 는 외경,  $t_n$ 는 관의 두께,  $M_A$ 는 지속하중에 의한 모멘트,  $M_B$ 는 지진을 포함한 일시적 하중에 의한 모멘트,  $Z$ 는 단면계수,  $S_h$ 는 고온에서 허용응력이다.

- Service Level C급 운전한계를 적용하는 경우, 허용응력은  $2.25S_h$ 를 적용하며 그 값은  $1.8S_y$ 보다 커서는 안 된다.
- Service Level D급 운전한계를 적용하는 경우, 허용응력은  $3.0S_h$ 를 적용하며 그 값은  $2.0S_y$ 보다 커서는 안 된다.

## 2.3 KEPIC MGE (ASME B31.1)

비안전등급 배관은 재료, 설치, 용접, 비파괴검사 및 누설시험 등의 기술기준으로 KEPIC MGE 2009 Add. (ASME B31.1 2008 Add.) 104.8항을 적용하며 압력, 자중, 기타 지속하중과 지진을 포함한 일시적 하중

(Occasional Loads)은 식(2)의 요건을 만족해야 한다.

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

여기에서  $i$ 는 응력강화계수(stress intensification factor)이다.

## 2.4 ASME B31E

ASME B31E 2008 Ed.에 의하면, 배관에 대한 내진설계는 Design by Rule 방법과 Design by Analysis 방법이 있으며 3.4항의 Design by Analysis는 식(3)의 요건을 만족해야 한다.

$$S_{OL} = \frac{PD_o}{4t_n} + 0.75i \frac{M_A + M_B}{Z} \leq \min[2.4S_h; 1.5S_y; 60ksi] \quad (3)$$

## 2.5 기술기준 간 비교

상기 2.2항, 2.3항, 2.4항에 기술한 기술기준별 내진관련 응력해석 수식을 요약하여 Table 2에 제시하였다.

Table 2 Comparison of occasional load equation indices<sup>(6)</sup>

Code	$\alpha$ Axial Pressure Stress Index	$\beta$ Sustained-Occasional Moment Stress Index	$k$ Allowable Stress Multiplier
Sec. III ND	$B_1$	$B_2$	1.8(but not to exceed $1.5S_y$ ) level B 2.25(but not to exceed $1.8S_y$ ) level C 3.0(but not to exceed $2.0S_y$ ) level D
B31.1			1.2
B31E	0.5	$0.75i$	2.4 (but not to exceed $1.5S_y$ or 60ksi)

ASME B31.1 기술기준을 따르는 비안전등급 배관을 Sec.III ND를 적용하여 내진해석을 수행하면 Allowable stress multiplier( $k$ )가 1.2에서 1.8~3.0으로 증가하여 허용응력이 커지므로 보수성이 떨어지는 경향이 있으며, B31E를 적용하면 2.4로 B31.1과 Sec.III ND의 중간값을 활용한다. 다만, 기술기준별 Stress Index 값이 피팅류의 종류와 연결 방법에 따라 상이하여 직접적인 비교는 할 수 없으며 피팅류에 따른 응력지수 값을 Table 3에 나타내었다.

**Table 3** Comparison of stress indices by piping products

Piping Product	$\alpha$ Axial Pressure Stress Index		$\beta$ Sustained -Occasional Moment Stress Index	
	NB ( $B_1$ )	B31.1, B31E	NB ( $B_2$ )	B31.1, B31E ( $0.75i$ )
Straight (Butt Weld)	0.5	0.5	1.0	$1 \leq i(\text{Various}) \leq 1.9$
Elbow (Butt Weld)	$-0.1+0.4h$ $h = \frac{t_n R}{r_m^2}$		$1.30/h^{\frac{2}{3}}$ $h = \frac{t_n R}{r_m^2}$	$i=0.9/h^{\frac{2}{3}}$ $h = \frac{t_n R}{r_m^2}$
Tee (Butt Weld)	0.5		$0.5(r_m/t_n)^{2/3}$	$i=0.9/h^{\frac{2}{3}}$ $h = \frac{3.1t_n}{r_m^2}$
Socket Weld (Between pipe and fitting)	0.75 $(t_n/C_x) \geq 0.5$ $C_x \geq 1.25t_n$		1.5 $(t_n/C_x) \geq 1.0$ $C_x \geq 1.25t_n$	$i=1.3$

여기에서, ASME는 배관과 피팅류 사이의 Socket Weld에는 Stress index를 규정하고 있으나 Socket Weld 피팅류에는 규정하고 있지 않다<sup>(7)</sup>. 또한, Socket Weld 배관계에서 가장 취약한 부분은 배관과 피팅류 사이의 Socket Weld(Fillet Weld)이므로 피팅류의 해석은 무시할 수 있다.

기술기준 별로 Stress index가 다르므로 수식 비교만으로는 기술기준의 보수성을 확인 할 수 없다. 따라서, 기술기준 별 상세 비교를 위 실제 계통에 대한 응력해석 및 평가를 아래 3장에 기술하였다.

### 3. 기술기준별 내진해석 여유도 평가

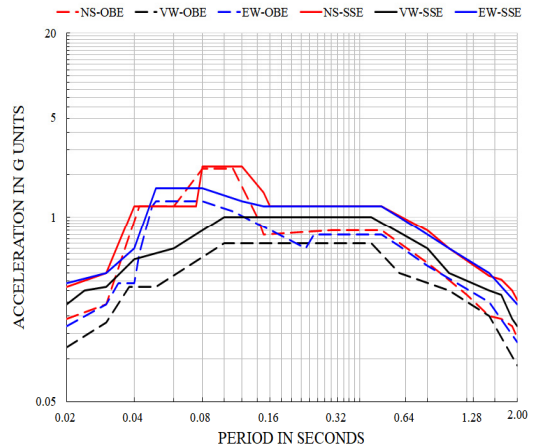
#### 3.1 평가 방법

기술기준 별 Stress Index가 배관의 연결방법(Butt weld or Socket weld)에 따라서 다르게 적용되므로 국내 원전 관련 배관 중 배관직경 및 연결 방법을 기준으로 비안전등급, 내진범주I, II 배관계 두 가지를 대상으로 선정하였으며 Table 4와 같다.

위의 두 가지 경우에 대하여 기술기준별(ASME Sec.III ND, B31.1, B31E) 배관응력해석을 수행하였으며 배관응력해석 프로그램은 PIPESTRESS Ver. 3.9.0<sup>(8)</sup>을 사용하였다.

**Table 4** Cases of piping stress analysis

Case	Building	Pipe Size	Joint Type	Material	Piping Product
1	Fuel building	4 inch (Large bore)	Butt Weld	A312 TP304	Straight, Elbow
2	Aux. building	1/2 inch (Small bore)	Socket Weld	A312 TP304	Straight, Elbow, Tee



**Fig. 1** Fuel building 142ft FRS(OBE & SSE).

본 평가에서 지진해석은 층응답스펙트럼(Floor response spectrum; FRS)이 배관계에 작용하는 것으로 하여 배관, 밸브 및 기기의 관성효과를 고려하였다. OBE(Operating Base Earthquake, Service Level B) 및 SSE(Safe Shut-Down Earthquake, Service Level D) 가속도 값을 Case-1에는 142ft 높이를 기준으로, Case-2에는 125ft 높이를 기준으로 선정하였으며, X축(NS), Y축(VW), Z축(EW) 방향으로의 가속도 값을 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타내었다. 여기에서 감쇠 값은 Regulatory Guide 1.61(Damping values for seismic design of nuclear power plants)<sup>(9)</sup>에 따라서 OBE는 1%, SSE는 2%를 적용하였다.

PIPESTRESS 프로그램은 ASME B31E 기술기준을 지원하지 않아 ASME B31E 식(3)은 수기 계산으로 대체하였다. 여기에서 좌변인  $S_{OL}$ (Stress duo to occasional loads)은 식(2)와 동일하므로 ASME B31.1 해석 결과값을 적용하였고 우변인 Allowable stress는 수기 계산하였으며 기술기준별 Allowable stress는 Table 5와 같다. 이때, Allowable stress는 각각의

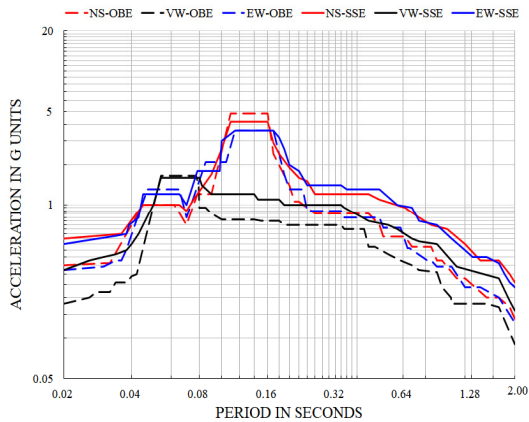


Fig. 2 Aux. building 125ft FRS(OBE & SSE)

Table 5 Comparison of allowable stress for A312 TP304

Code/ Equation	$k$ Allowable stress multiplier	$S_h$ psi	$k_y$ Yield stress multiplier	$S_y$ psi	Allowable stress psi min. ( $k \times S_h$ , $k_y \times S_y$ )
Eq.(1) OBE Sec.III ND Service Level B	1.8	17800	1.5	25000	32040
Eq.(1) SSE Sec.III ND Service Level D	3.0	17800	2.0	25000	50000
Eq.(2) B31.1	1.2	16700	-	25000	20040
Eq.(3) B31E	2.4	16700	1.5	25000	37500

코드의 부록에 정의된  $S_h$  (Material allowable stress) 및  $S_y$  (Material yield stress)에 Multiplier(승수)를 곱한 값 중 작은 값을 적용하였다.

### 3.2 Case-1

Fuel building의 대구경 배관계통(Butt Weld)을 OBE 및 SSE 지진하중 조건에서 기술기준별로 평가하였다.

#### 3.2.1 해석모델

Fig. 3과 같이 4inch, butt Weld, A312 TP304 재질의 대구경 배관을 모델링하였다. Node point 100은 연결부이고 Node point 370은 방출부이다.

#### 3.2.2 입력정보

배관응력해석에 고려된 하중조건은 자중, 운전기준 지진하중(OBE), 안전정지지진하중(SSE)이며 배관 입력정보는 Table 6에 명시하였다.

Table 6 Piping design data for Case-1

Specification		
Node points	From	100
	To	370
Outside Diameter(inch)		4.5
Schedule		40S
Wall thickness(inch)		0.2370
Material		A312 TP304
Design	Pressure(psig)	300
	Temperature(oF)	200
Max. Operating	Pressure(psig)	285
	Temperature(oF)	120
Weight (LBS/FT)	Pipe	10.79
	Fluid	5.52
	Total	16.31
Seismic Category		I

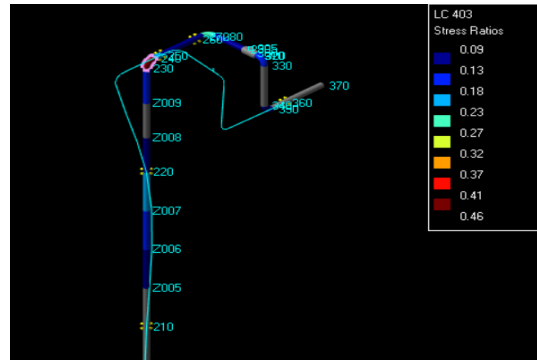


Fig. 4 Stress ratio for Case-1(ASME Sec.III ND, SSE).

#### 3.2.3 평가결과

Fuel building 대구경 배관계통을 SSE 지진하중 조건에서 평가한 결과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. Node Point 240(Elbow)에서 가장 높은 Stress ratio(0.487 for Sec.III ND, 0.648 for B31.1, 0.346 for B31E)가 나타났으며 모든 경우 1미만으로 코드요건을 만족하였다.

배관응력해석 및 평가 결과 중 ASME Sec.III ND 기준으로 최고 응력 값 20개소의 응력 및 응력비 (Total stress/Allowable stress)를 Table 7에 정리하였고 기술기준별 응력비를 Fig. 6에 나타내었다.

현 적용 기술기준인 Sec.III ND 및 원 배관의 기술 기준인 B31.1의 모든 경우 응력비가 1 미만으로 만족하였다. OBE의 2개 개소에서 응력비가 Sec.III ND일 때가 B31.1일 때보다 크고 나머지 OBE 18개 개소와

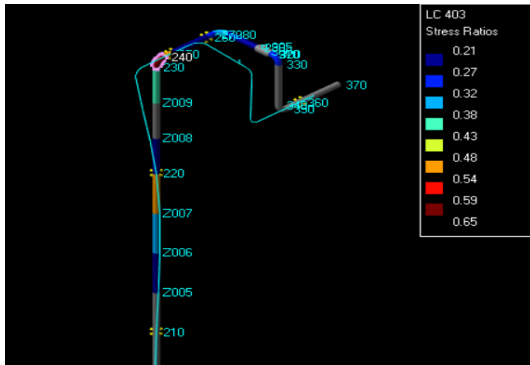


Fig. 5 Stress ratio for Case-1(ASME B31.1, SSE).

Table 7 Top 20 Highest stress ratio for Case-1.

No. (Node Point)	ASME Sec.III ND (Eq. 1)		B31.1 & B31E (Eq. 2&3)		ASME B31.1 (Eq. 2)		ASME B31E (Eq. 3)			
	Total stress psi		Stress ratio		Total stress psi		Stress ratio			
	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE		
1 (240, Elbow)	15593	23049	0.487	0.461	9159	12980	0.457	0.648	0.244	0.346
2 (230, Elbow)	12443	19136	0.388	0.383	7548	10980	0.377	0.548	0.201	0.293
3 (270, Elbow)	8121	11971	0.253	0.239	5316	7280	0.265	0.363	0.142	0.194
4 (280, Elbow)	7727	11202	0.241	0.224	5116	6889	0.255	0.344	0.136	0.184
5 (250, Straight)	8013	10627	0.250	0.213	8029	10652	0.401	0.532	0.214	0.284
6 (220, Straight)	6846	10029	0.214	0.201	6831	10005	0.341	0.499	0.182	0.267
7 (240, Straight)	6711	9355	0.209	0.187	6727	9380	0.336	0.468	0.179	0.250
8 (320, Elbow)	6383	8854	0.199	0.177	4434	5697	0.221	0.284	0.118	0.152
9 (330, Elbow)	6133	8601	0.191	0.172	4307	5569	0.215	0.278	0.115	0.149
10 (230, Straight)	5594	7967	0.175	0.159	5609	7991	0.280	0.399	0.150	0.213
11 (Z007, Straight)	5140	7365	0.160	0.147	5130	7348	0.256	0.367	0.137	0.196
12 (120, Elbow)	4611	5628	0.144	0.113	3531	4051	0.176	0.202	0.094	0.108
13 (270, Straight)	4061	5427	0.127	0.109	4059	5423	0.203	0.271	0.108	0.145
14 (340, Elbow)	3946	5208	0.123	0.104	3188	3834	0.159	0.191	0.085	0.102
15 (280, Straight)	3922	5154	0.122	0.103	3920	5151	0.196	0.257	0.105	0.137
16 (260, Straight)	3758	5008	0.117	0.100	3755	5003	0.187	0.250	0.100	0.133
17 (Z008, Straight)	3652	4919	0.114	0.098	3636	4893	0.181	0.244	0.097	0.130
18 (130, Straight)	3682	4816	0.115	0.096	4162	4814	0.208	0.240	0.111	0.128
19 (Z006, Straight)	3423	4658	0.107	0.093	3417	4649	0.171	0.232	0.091	0.124
20 (310, Straight)	3433	4298	0.107	0.086	3434	4300	0.171	0.215	0.092	0.115

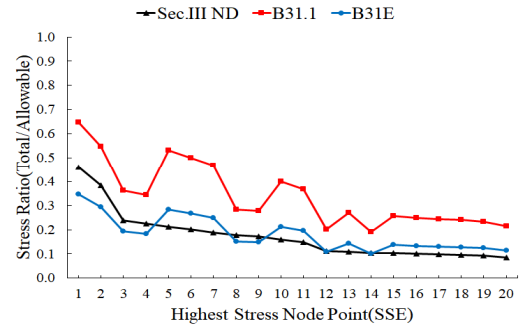
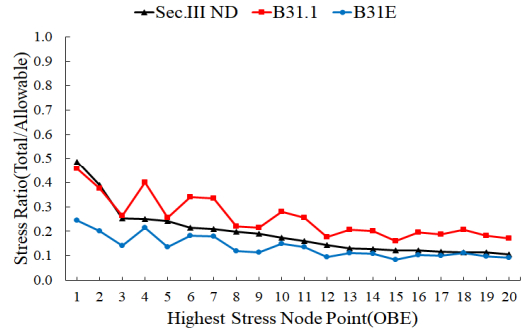


Fig. 6 Stress ratio of 20 node points for case-1 (Top: OBE, Bottom: SSE).

SSE 20개소에서는 응력비가 B31.1일 때 가장 큰 값을 나타내어 대부분의 경우 B31.1로 해석한 값이 보수적임을 알 수 있었다. 또한 OBE의 경우 보다 SSE의 경우에 B31.1의 보수성이 더욱 증가함을 확인할 수 있었다.

Stress index에 따른 경향을 확인하기 위하여 20개소 중 피팅별로 나누어 Elbow 8개소와 Straight Pipe 12개소로 구분하여 응력비를 Fig. 7에 나타내었다.

Butt Weld로 연결되는 대구경 배관계통에서는 Stress index에 영향을 주는 피팅류의 종류에 따라 응력비를 나타내었을 때, Node point 증가에 따라 응력비가 감소하는 경향을 보였다.

### 3.3 Case-2

Aux. building의 소구경 배관계통(Socket Weld)을 OBE 및 SSE 지진하중 조건에서 기술기준별로 평가하였다.

#### 3.3.1 해석모델

Fig. 8과 같이 1/2 inch, Socket Weld, A312 TP304 재질의 소구경 배관을 모델링하였다. Node point 100은 연결부이고 Node point 615은 방출부이다.

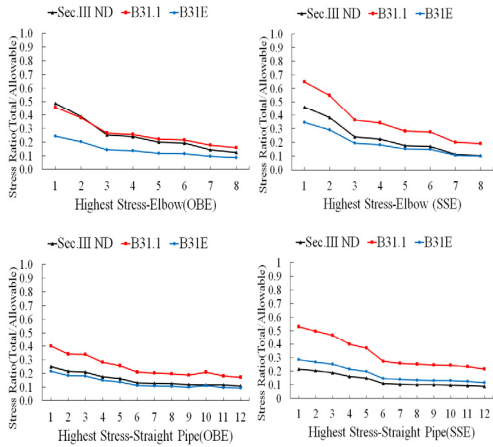


Fig. 7 Stress ratio by piping products for case-1 (Top: Elbow, Bottom: Straight Pipe).

Table 8 Piping design data for Case-2

Specification		
Node points	From	100
	To	615
Outside Diameter(inch)		0.84
Schedule		40S
Wall thickness(inch)		0.109
Material		A312 TP304
Design	Pressure(psig)	200
	Temperature(oF)	200
Max. Operating	Pressure(psig)	75
	Temperature(oF)	130
Weight(LBS/FT)	Pipe	0.851
	Fluid	0.132
	Total	0.983
Seismic Category		II

3.3.2 입력정보

배관응력해석에 고려된 하중조건은 자중, 운전기 준지진하중(OBE), 안전정지지진하중(SSE)이며 배 관 입력정보는 Table 8에 명시하였다.

3.3.3 평가결과

Aux. building 소구경 배관계통을 SSE 지진하중 조건에서 평가한 결과를 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내 었다. 이때, Socket Weld 피팅류의 Stress index는 ASME에서 지정하고 있지 않으나 PIPESTRESS 프 로그램 내 지정된 기본 값으로 해석결과가 출력되

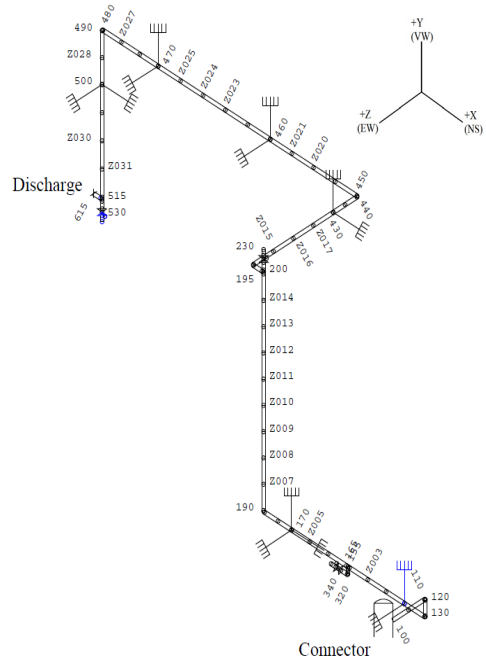


Fig. 8 Stress isometric drawing for Case-2.

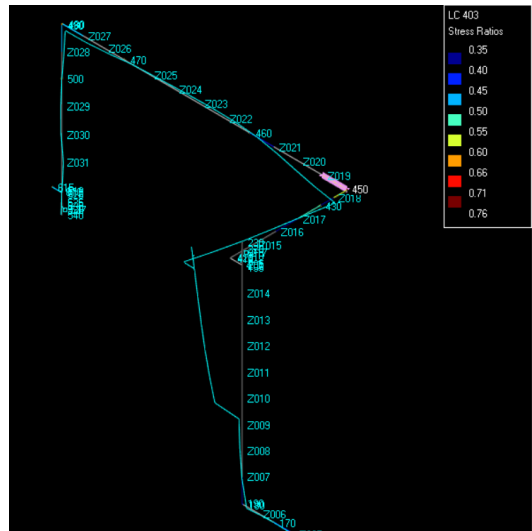


Fig. 9 Stress ratio for Case-2(ASME Sec. III ND, SSE)

지만 이 값은 ASME 코드요건에 해당하지 않는 사 향으로 무시하고 소구경 배관계통의 취약 개선인 배관과 피팅류와의 용접부만 평가하였다.

Sec. III ND에서는 Node Point 450(Socket Weld)에 서 가장 높은 Stress ratio(0.768, OBE)가 나타났으며, B31.1 및 B31E에서는 Node point 430(No Weld)에서

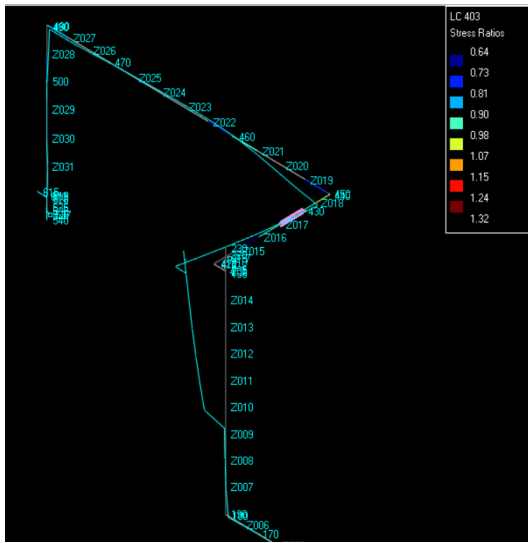


Fig. 10 Stress ratio for Case-2(ASME B31.1, SSE).

가장 높은 Stress ratio(1.321, SSE for B31.1, 0.706, SSE for B31E)가 나타났다. B31.1에서 Stress ratio 1 을 초과하여 코드요건을 불만족하였다.

배관응력해석 및 평가 결과 중 ASME Sec.III ND 기준으로 최고 응력 값 20개소의 응력 및 응력비 (Total stress/Allowable stress)를 Table 9에 정리하였고 기술기준별 응력비를 Fig. 11에 나타내었다.

현 적용 기술기준인 Sec.III ND의 경우 응력비가 1 미만으로 모든 경우 만족하였으나, 배관의 원 기술기준인 B31.1의 경우 OBE 1개소, SSE 3개소의 응력비가 1을 초과하여 불만족하였다. OBE 및 SSE 모든 개소에서 B31.1 기술기준이 가장 큰 응력비를 나타내어 가장 보수적인 것을 확인할 수 있었다. 또한 OBE의 경우 보다 SSE의 경우에 B31.1의 보수성이 더욱 증가함을 확인할 수 있었다.

Stress index에 따른 경향을 확인하기 위하여 20개소 중 연결 방법으로 나누어 Socket Weld(배관과 피팅류 사이) 9개소와 No Weld(지지점 등) 11개소로 구분하여 응력비를 Fig. 12에 나타내었다.

Socket Weld로 연결되는 소구경 배관계에서는 Stress index에 영향을 주는 연결 방법의 종류에 따라 응력비를 나타내었을 때, Node point 증가에 따라 응력비가 감소하는 경향을 보였다.

### 3.4 고찰

Case-1의 경우 모든 개소에서 응력비가 1미만으로

만족하였으나, Case-2의 경우 배관의 원 기술기준인 B31.1에서 OBE 1개소, SSE 3개소의 응력비가 1을 초과하여 불만족하여 비안전등급 배관의 내진해석을 ASME Sec.III ND로 해석하여 만족하였더라도 원 기술기준인 ASME B31.1로 평가를 할 경우 불만족할 수 있음을 확인하였다.

또한, 대부분의 경우에서 ASME B31.1로 내진해석을 수행하는 것이 ASME Sec.III ND 및 ASME B31E로 해석하는 것보다 보수적이고 특히 지진하중이 더 큰 경우에 ASME B31.1의 보수성이 더 커지는 것을 확인하였다.

Table 9 Top 20 Highest stress ratio for Case-2

No. (Node Point)	ASME Sec.III ND (Eq. 1)		B31.1 & B31E (Eq. 2&3)		ASME B31.1 (Eq. 2)		ASME B31E (Eq. 3)			
	Total stress psi		Stress ratio		Total stress psi		Stress ratio			
	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE	OBE	SSE		
1 (450, Socket Weld)	24595	29221	0.768	0.584	17873	21235	0.892	<u>1.060</u>	0.477	0.566
2 (440, Socket Weld)	23849	28911	0.744	0.578	17330	18544	0.865	0.925	0.462	0.495
3 (165, Socket Weld)	23370	27103	0.729	0.542	16983	19695	0.847	0.983	0.453	0.525
4 (430, No Weld)	22458	26482	0.701	0.530	22457	26482	<u>1.121</u>	<u>1.321</u>	0.599	0.706
5 (480, Socket Weld)	19581	24212	0.611	0.484	14229	17595	0.710	0.878	0.379	0.469
6 (490, Socket Weld)	19212	23719	0.600	0.474	13961	17237	0.697	0.860	0.372	0.460
7 (170, No Weld)	18970	22468	0.592	0.449	18970	22468	0.947	<u>1.121</u>	0.506	0.599
8 (Z017, No Weld)	17562	19530	0.548	0.391	17561	19529	0.876	0.975	0.468	0.521
9 (Z018, No Weld)	12455	18544	0.389	0.371	12455	18544	0.622	0.925	0.332	0.495
10 (460, No Weld)	11907	18337	0.372	0.367	11907	18337	0.594	0.915	0.318	0.489
11 (615, Socket Weld)	15852	17650	0.495	0.353	11519	12826	0.575	0.640	0.307	0.342
12 (190, Socket Weld)	13859	17388	0.433	0.348	10071	12636	0.503	0.631	0.269	0.337
13 (500, No Weld)	14300	17204	0.446	0.344	14300	17204	0.714	0.858	0.381	0.459
14 (155, Socket Weld)	14530	17145	0.453	0.343	10559	12459	0.527	0.622	0.282	0.332
15 (180, Socket Weld)	13212	16758	0.412	0.335	9601	12178	0.479	0.608	0.256	0.325
16 (Z005, No Weld)	12827	15383	0.400	0.308	12827	15383	0.640	0.768	0.342	0.410
17 (Z019, No Weld)	13735	14684	0.429	0.294	13735	14685	0.685	0.733	0.366	0.392
18 (Z004, No Weld)	11906	14157	0.372	0.283	11906	14157	0.594	0.706	0.317	0.378
19 (Z016, No Weld)	13149	13642	0.410	0.273	13149	13642	0.656	0.681	0.351	0.364
20 (Z029, No Weld)	10374	12026	0.324	0.241	10374	12026	0.518	0.600	0.277	0.321



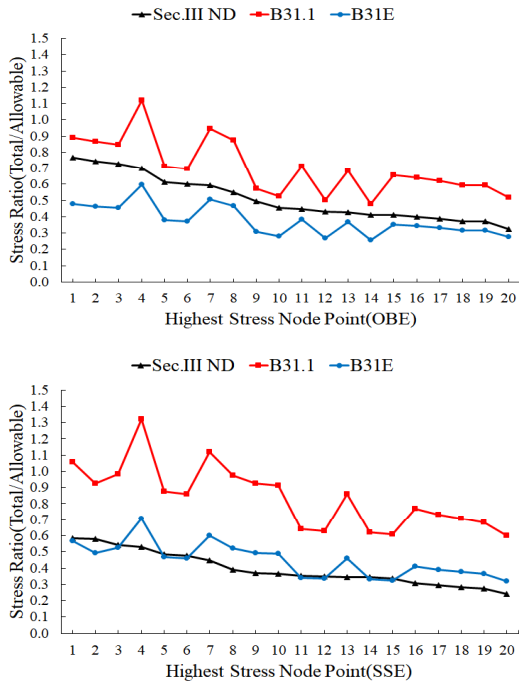


Fig. 11 Stress ratio of 20 node points for Case-2 (Top: OBE, Bottom: SSE)

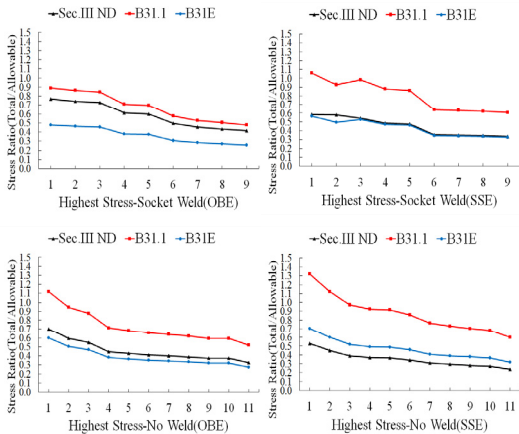


Fig. 12 Stress ratio by welding joint types for Case-2 (Top: Socket Weld, Bottom: No Weld).

그리고 Butt Weld인 경우 배관의 피팅류에 따라서 Stress Index에 영향이 있어 응력비의 경향이 결정되었고, Socket Weld인 경우 피팅류의 Stress Index는 ASME에서 규정하지 않아 평가 대상이 아니며 연결방법에 따라서 Stress Index에 영향이 있어 응력비의 경향이 결정되었다.

Table 10 Summary of evaluation

Design Code for Non-Nuclear Safety Piping (Seismic Cat.I,II)	Conservatism	Consistency with Material, Installation, Test and etc.	Reference
Sec.III ND	Reference value	Inconsistent	Current Code
B31.1	Most conservative	Consistent	Original Code
B31E	Similar level with Sec.III ND	Consistent	Recommended Code

한편, ASME B31 압력배관에 대한 내진설계 표준 방법론으로 제시된 ASME B31E 기술기준으로 평가한 결과는 현재 비안전등급 배관의 내진해석 기술기준으로 적용하고 있는 ASME Sec.III ND 기술기준으로 평가한 결과보다 경우에 따라서 보수적이거나 비보수적이었지만 ASME B31.1보다 ASME Sec.III ND에 근접한 응력비를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 요약 및 결론

현재 국내 관련 법규에서 비안전등급 배관의 내진해석에 관한 명확한 기술기준을 제시하고 있지 않아 안전등급 배관에 적용하는 기술기준인 ASME Sec.III ND를 적용하고 있다. 그러나 내진해석 외 재료, 설치, 용접, 비파괴 및 시험에 관한 기술기준은 ASME B31.1을 적용하여 일관성이 떨어지므로 논란의 여지가 있었다. 본 연구에서는 원자력발전소 비안전등급 배관의 내진해석 관련 법규 검토, 기술기준에 대한 비교 및 배관 여유도 평가를 통해 ASME B31E 적용 타당성을 확인하였으며 그 결과를 요약하여 Table 10에 나타내었다.

ASME B31.1을 내진해석 기술기준으로 적용할 경우 ASME Sec.III ND와 비교해서 지나치게 보수적이었다. 한편, 산업계의 요구로 발행된 ASME B31E는 ASME B31 배관에 대한 내진해석 기술기준을 명확히 제시하며 ASME Sec.III ND와 비교해서 경우에 따라 차이가 있지만 비슷한 수준의 보수성을 보인다. 더불어 특정주제보고서 형식으로 ASME B31E를 국내 원전에 적용하면 국내 관련 법규에서 규정하지 않아 인허가 과정 중 빈번하게 발생한 비안전등급 배관의 기술기준에 대한 논쟁을 줄일 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- (1) KEPIC MN, 1995, “Nuclear Mechanical,” Korea Electric Association, Seoul.
- (2) ASME BPVC Sec.III, 1993, “Rules for Construction of Nuclear Facility Components,” American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (3) KEPIC MGE, 2009, “Piping,” Korea Electric Association, Seoul.
- (4) ASME B31.1, 2008, “Power Piping,” American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (5) ASME B31E, 2008, “Standard for the Seismic Design and Retrofit of Above- Ground Piping Systems,” American Society of Mechanical Engineers, NY.
- (6) Lee, S. H., Lee, Y. S., Kim, H. D., Lee, K. S., and Hwang, K. M., 2015, “Review on the Integrity Evaluation and Maintenance of Wall-Thinned Pipe,” *Trans. of the KPVP*, Vol. 11, No. 2, pp.51-60.
- (7) Rodabaugh, E. C. and Moore, S. E., 1975, “Stress Indices for ANSI Standard B16.11 Socket-Welding Fittings,” Oak Ridge National Lab., Tennessee, *ORNL-TM--4929*
- (8) PIPESTRESS Ver.3.9.0, 2016, © DST Computer Services S.A., CHE.
- (9) Reg. Guide 1.61 Rev.0, 1973, “Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants,” U.S. Atomic Energy Commission.
- (10) Reg. Guide 1.143 Rev.2, 2001, “Design Guidance for Radioactive Waste Management Systems, Structures and Components Installed in Light-Water-Cooled Nuclear Power Plant,” U.S. Atomic Energy Commission.
- (11) Seo, K.C., 2022, *Seismic Analysis Methodology for Non-Nuclear Safety Piping in Nuclear Power Plants*, Pusan National University, M.S Thesis.