

원전 엘보우의 성능기반 안전여유도 분석

이성호* · 박치용[†] · 박재학**

(2009년 3월 30일 접수, 2009년 6월 29일 수정, 2009년 6월 29일 심사완료)

Investigation of the Performance Based Structural Safety Factor of Elbows in Nuclear Power Plants

Sung-Ho Lee, Chi-Yong Park and Jai-Hak Park

Key Words: Structural Safety Factor(안전 구조여유도), Elbow(엘보우), TES Plastic Load(2배탄성 구배 소성하중), Design Allowable Stress(설계허용응력)

Abstract

The piping systems in nuclear power plant are composed of various typed pipes such as straight, elbow pipe, branch and reducer etc. The elbow is connected from straight pipe to another pipes in order to establish the complicated piping system. Elbow is one of very important components considering management of wall thinning degradation. It is however applied by various loads such as system pressure, earthquake, postulated break loading and many transient loads, which provoke simply the internal pressure, bending and torsional stress. In this study, firstly pipes in the secondary system of the nuclear power plant are classified as pipe size and type for selecting the investigating range. Next, a large number of finite element analysis considering the all typed dimensions of commercial pipe has been performed to find out the behavior of TES(twice elastic slop) plastic load of elbows, which is based on evaluation of the structural safety factor. Finally performance based structural safety factor was investigated comparing with maximum allowable load by construction code.

기호설명

- D_o : 외경
- R_m : 평균반경
- P : 내압
- t_n : 공칭두께
- R_m/t_n : 평균반경과 공칭두께와의 비
- M_A : 자중 및 지속하중에 의한 모멘트 하중
- M_B : 비-역전 동적하중에 의한 모멘트 하중

1. 서론

원자력발전소(원전) 증기 사이클을 구성하는 2차 계통배관은 탄소강으로 이루어져 있으며, 배관계통은 직관, 엘보우(Elbow), 분기관 및 리듀서(Reducer) 등으로 구성된다. 엘보우는 배관 구조의 설치를 용이하게 하기 위해 직관과 직관을 곡선으로 연결하기 위해 사용되고 있다. 탄소강 배관의 중요한 열화기구인 유동유발 부식에 의한 국부적인 두께감소(감육)현상은 엘보우에서 주로 발생하기 때문에 엘보우는 경제적이고 안전한 배관관리 측면에서 중요한 관리대상이다.^(1,2) 엘보우에 대한 국부 두께 감소 배관의 건전성 평가와 관련된 연구⁽³⁻⁵⁾가 수행된 바 있으나, 감육이 일어나지 않는 설계 초기 상태에서의 안전여유도에

[†] 책임저자, 회원, 한전전력연구원 원자력발전연구소
E-mail : cypark@kepri.re.kr

TEL : (042)865-5524 FAX : (042)865-5537

* 한전전력연구원 원자력발전연구소

** 충북대학교 안전공학과

대한 기준을 근거로 이루어져야 함에도 불구하고 체계적으로 수행되지 못하고 있는 실정이다.

배관의 구조적 안전여유도 확보는 최적의 배관 관리를 위해 필요하며, 배관의 각 상태에 따른 기준을 정확하게 알고 있음으로 인해 설계 및 관리를 최적 상태로 유지할 수 있다. 배관 상태에 따른 기준을 분류하면 손상원인 분석에 사용되는 배관의 물리적 파단 기준, 운영중인 배관 관리를 위한 성능기반 건전성기준, 설계를 위한 안전성 확보 설계기반기준 등으로 분류할 수 있다.

본 논문에서는 엘보우의 건전성 기준으로 사용되고 있는 2배탄성구배(TES : Twice elastic slop) 소성하중을 기준으로 성능기반 안전여유도를 분석함으로써 최적화된 배관 관리를 위한 기반 데이터를 제공하고, 감육 배관의 성능기준 건전성 평가 모델 개발을 위한 기초 자료를 확보하고자 한다. 엘보우의 내압 및 굽힘하중이 작용하는 다양한 배관에 대해 유한요소해석을 통하여 TES 소성하중을 도출하고 외경·두께·굽힘하중방향내압 등에 따른 거동을 비교함으로써 다양한 형상의 배관을 포괄하는 성능기반 안전여유도 분석을 수행하였다.

2. 분석 대상부위 선정

2.1 원전 증기사이클 배관 요소 분석

원전의 증기사이클은 Fig. 1에서와 같이 복수·급수·주증기·추기증기·습분분리&재열·증기발생기·취출수 등의 필수 배관계통으로 구성⁽⁶⁾된다. 각 배관계통은 직관, 엘보우, 분기관, 밸브, 노즐, 리듀서, 오리피스 등의 배관요소들로 이루어져 있다.

국내 대표적 원전인 OPR-1000형의 원전인 경우 2차계통 탄소강중에서 각 형상의 수량적 구성비는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 상대적으로 작용하중 및 응력 상태가 복잡한 엘보우가 약 30%를 점하고 있다. 전체 형상과 본 연구대상인 엘보우의 외경(outer diameter)별 수량적 구성비는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 외경 60 mm(2.375 inch)와 610 mm(24 inch) 사이에 대부분 분포하고 있다.

2.2 분석대상 범위의 선정

상용 배관에 대한 규격으로부터 평균반경과 공칭두께와의 비인 R_m/t_n 를 도출하여 Table 1에 제시하였다. 배관의 구조적 특성을 나타내는 R_m/t_n 는 외경 60 mm와 610 mm 사이의 값을 나타내는

3~30의 범위라면 원전 2차계통 배관을 대표할 수 있을 것으로 판단되기 때문에 이러한 범위에 대해 유한요소해석 및 TES 소성거동에 의한 하중 지지능력 등에 대한 분석 대상으로 선정하였다. 곡률반경은 상업용 엘보우 피팅값인 $1.5 D_o$ 이다.

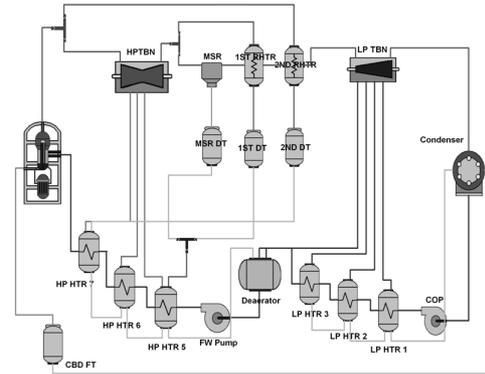


Fig. 1 Typical secondary piping system of nuclear power plant

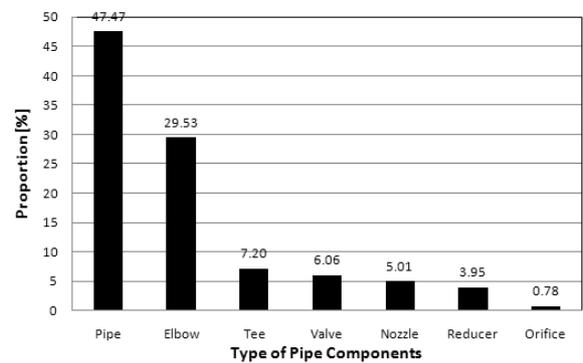


Fig. 2 Distribution of pipe type in the secondary side piping system in nuclear power plant (OPR-1000/PWR)

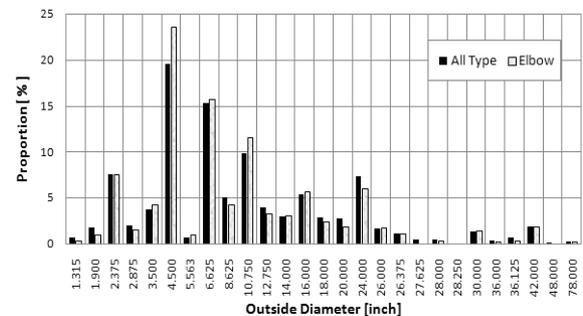


Fig. 3 Distribution of pipe size in the secondary side piping system in nuclear power plant (OPR-1000/PWR)

Table 1 R_m/t_n for commercial pipe

O.D. [inch]	SCHEDULE															
	5S	10	20	30	STD	40	60	XS	80	100	120	140	160			
2.375	17.8	10.4			7.2	7.2	4.9	4.9								3.0
2.875	16.8	11.5			6.6	6.6	4.7	4.7								3.3
3.500	20.6	14.1			7.6	7.6	5.3	5.3								3.5
4.000	23.6	16.2			8.3	8.3	5.8	5.8								
4.500	26.6	18.3			9.0	9.0	6.2	6.2			4.6					3.7
5.563	25.0	20.3			10.3	10.3	6.9	6.9			5.1					4.0
6.625	29.9	24.2			11.3	11.3	7.2	7.2			5.4					4.1
8.625	39.1	28.6	16.8	15.1	12.9	12.9	10.1	8.1	8.1	6.8	5.5	4.8	4.3			
10.750	32.1		21.0	17.0	14.2	14.2	10.3	10.3	8.5	7.0	5.9	4.9	4.3			
12.750	34.9		25.0	18.8	16.5	15.2	10.8	12.3	8.8	7.1	5.9	5.2	4.4			
14.000	36.7	27.5	21.9	18.2	18.2	15.5	11.3	13.5	8.8	7.0	5.9	5.1	4.5			
16.000	42.1	31.5	25.1	20.8	20.8	15.5	11.7	15.5	9.0	7.3	6.1	5.1	4.5			
18.000	47.4	35.5	28.3	20.0	23.5	15.5	11.5	17.5	9.1	7.3	6.0	5.3	4.6			
20.000	45.4	39.5	26.2	19.5	26.2	16.3	11.8	19.5	9.2	7.3	6.2	5.2	4.6			
22.000	50.0	43.5	28.8	21.5	28.8		12.1	21.5	9.3	7.5	6.3	5.4	4.7			
24.000	47.5	47.5	31.5	20.9	31.5	16.9	11.9	23.5	9.3	7.3	6.1	5.3	4.6			
26.000		41.2	25.5		34.2			25.5								
28.000		44.4	27.5	21.9	36.8			27.5								
30.000	47.6	47.6	29.5	23.5	39.5			29.5								
32.000		50.8	31.5	25.1	42.2			31.5								
34.000		54.0	33.5	26.7	44.8			33.5								
36.000		57.2	35.5	28.3	47.5			35.5								
42.000					55.5			41.5								
48.000					63.5			47.5								

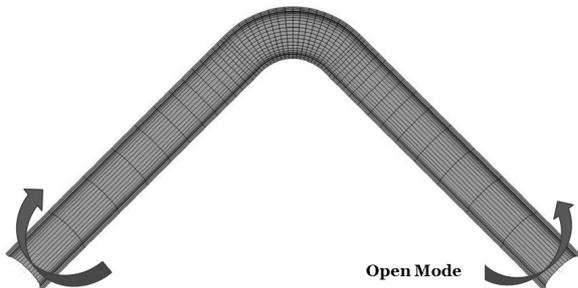


Fig. 4 FEA Model of elbow and open mode load

3. TES 소성하중 거동 해석

3.1 유한요소 모델링 및 해석

Fig. 4는 ABAQUS 상용 프로그램을 활용한 유한요소해석 모델의 예로서, 20절점의 육면체 저감적분요소(C3D20R)를 사용하였고, 배관길이 방향면 대칭, 끝단에 MPC(multi point constraint) 구속조건을 적용하여 R_m/t_n , 외경, 굽힘하중 방향 및 압력을 변경해 가면서 해석하였다.

유한요소해석 모델에 적용한 물성은 Table 2에 나타낸 바와 같으며, ASTM A234 WPB 재질의 상용 엘보우로부터 추출하여 제작된 시편으로부터 인장시험을 통해 확보한 Fig. 5의 진응력-진변

Table 2 Mechanical properties used in FEA

σ_y [MPa]	σ_u [MPa]	σ_{ut} [MPa]	E [GPa]	ν [-]
291.1	481.6	583.1	210	0.3

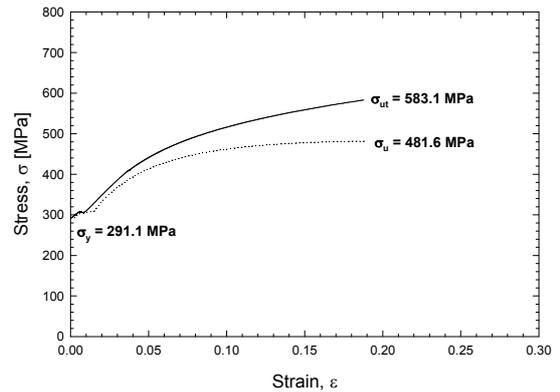


Fig. 5 Stress-strain curve used in elastic-plastic FEA

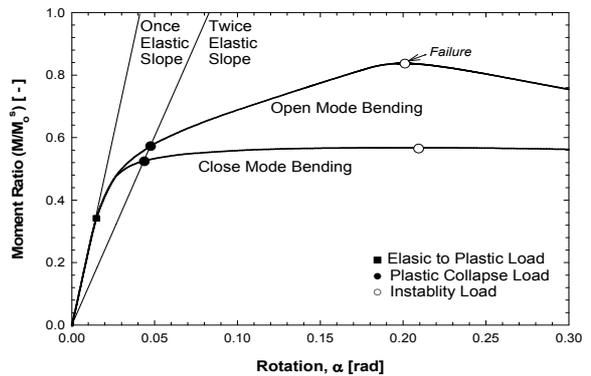


Fig. 6 TES load definitions in elbow

형률 곡선을 적용하였다. 탄소성해석에 감육부의 대변형과 응력-변형률 거동에 대한 기하학적 비선형성 옵션을 적용하였으며, 1단계에서 내압을 가한 후 2단계에서 내압이 유지되면서 열림방향(OM : Open Mode) 또는 닫힘방향(CM : Close Mode)으로의 변위 조절을 통해 굽힘하중을 가하는 2단계 해석을 수행하였다.

3.2 TES 소성하중

유한요소해석 결과로부터 양 끝점에서의 반력과 변위를 얻어 하중-변위 곡선을 구하고 이를 회전각 대비 모멘트 곡선으로 변환한 후 Fig. 6에서 2배탄성구배에 해당하는 TES 소성하중을 도출하였다.

본 연구에서는 Fig. 6에서 정의된 TES 소성하중을 배관계의 엘보우가 붕괴없이 성능을 유지할 수 있는 건전성 기준으로 설정하였다.

3.3 해석 결과

Table 1에서의 상용 규격 엘보를 포괄하기 위해 외경 2.375~24.0 인치와 평균반경과 두께와의 비(R_m/t_n) 3~30의 범위 및 0 MPa과 10 MPa의 내압조건, 닫힘하중(CM)과 열림하중(OM)에 대한 각각의 해석 결과를 Fig. 7 과 Fig. 8에 도시하였다. 원전에서 주요 안전계통 배관은 R_m/t 가 5이하의 값을 나타내고, 2차 계통은 10에서 20의 범위를 가지고, 비안전계통은 20 이상의 값을 가지므로 분리하여 도시하였다. 특히, R_m/t 가 작은 배관은 압력용기에 가까운 배관으로 내압 및 하중작용 방향에 따라 상대적인 하중지지능력의 차이가 없는 것은 내압에 의한 영향이 미소하게 작용하기 때문이다.

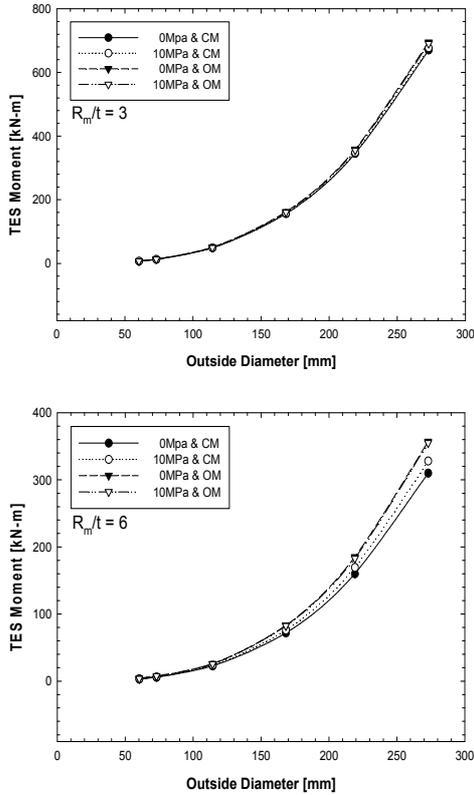


Fig. 7 TES plastic loads obtain from various O.D., pressure, and bending direction with respect to small R_m/t

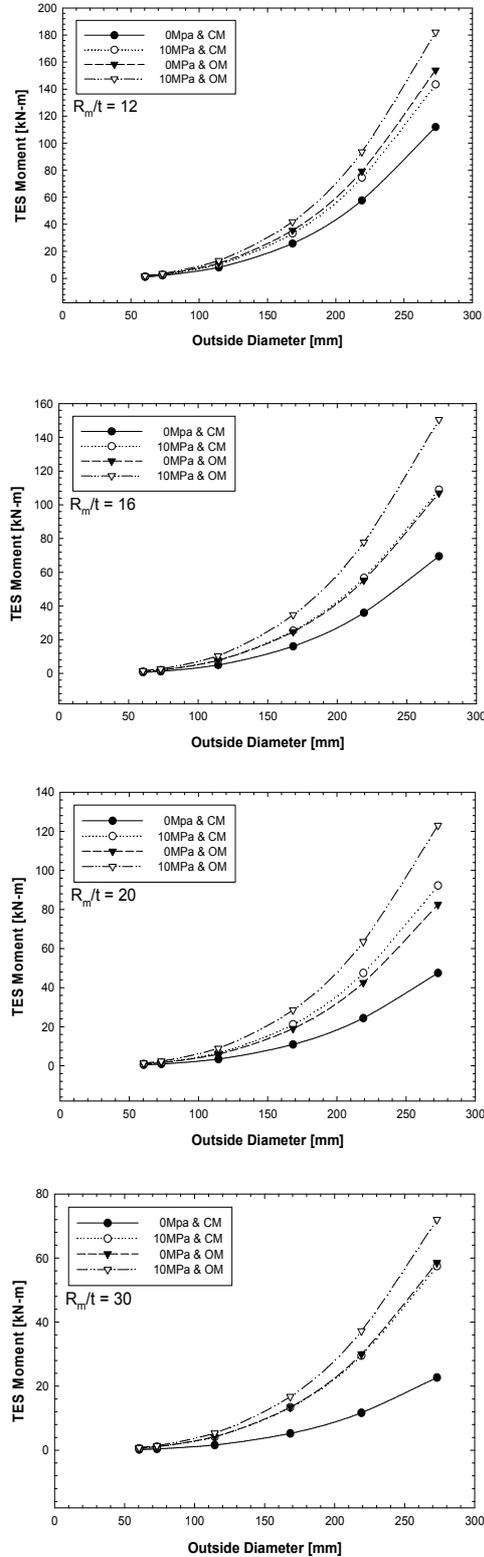


Fig. 8 TES plastic loads obtain from various O.D., pressure, and bending direction with respect to medium and high R_m/t

3.4 하중지지능력 비교 분석

하중지지능력을 나타낸 Fig. 7과 Fig. 8에서 공통적으로 관찰할 수 있는 현상은 모든 평균반경과 두께의 비(R_m/t_n), 하중작용 방향 및 내압에 무관하게 외경이 커질수록 TES 소성하중은 지수함수적으로 증가하는 거동을 보인다. 즉, 외경이 커짐과 동시에 두께가 두꺼워지기 때문에 하중지지능력이 커짐을 의미한다. 평균반경과 두께와의 비가 작은 Fig. 7에서는 내압 및 하중작용 방향에 따라 하중지지능력이 크게 변하지 않으나, R_m/t_n 가 큰 배관을 나타낸 Fig. 8에서는 하중지지능력이 내압 및 하중작용 방향에 따라 상대적으로 큰 차이를 나타내고 있다.

또한, Fig. 8에서 관찰되는 특징은 엘보우에 내압 없이 굽힘하중만 작용하는 경우가 내압과 굽힘의 복합하중이 작용하는 경우에 비해 낮은 TES 소성하중을 나타낸다. 이는 내압으로 인한 원주방향응력의 발생이 굽힘하중에 의한 축방향응력과 조합을 이루어 하중지지능력의 증가를 가져오고 있으며, 이는 기존 연구 결과⁽⁷⁻⁸⁾와 동일한 경향을 보이고 있다.

엘보우에 단힘방향 굽힘하중이 작용하게 되는 경우가 열림방향 굽힘하중이 작용하는 경우에 비해 낮은 TES 소성하중을 나타내며 평균반경과 두께와의 비(R_m/t_n)가 커질수록 그 차이 정도는 상대적으로 커진다. 이로부터 엘보우는 열림방향 굽힘 모멘트에 대해 더 많은 하중 지지능력을 가지고 있기 때문에, 손상하중 평가, 설계 및 성능기준 평가를 위한 기준 설정을 위해서는 하중지지능력이 낮은 단힘방향 굽힘하중에 대해 지지할 수 있는지를 고려하여야 함을 알 수 있다.

4. 성능기준 하중지지능력의 안전여유

4.1 엘보우 성능기반 하중지지능력

실제 배관계통에서는 굽힘하중이 어느 방향으로 작용하고 있는지를 알 수 없고 작용하는 내압은 엘보우의 하중지지능력에 긍정적인 영향을 미치며, 단힘방향 굽힘하중이 가장 낮은 하중지지능력을 보이고 있기 때문에, 내압이 없는 단힘방향 굽힘하중 조건에서의 TES 소성하중을 엘보우에 대한 성능기반 하중지지능력(M_{TES})으로 설정할 수 있다. Fig. 9에서는 내압이 없는 단힘방향

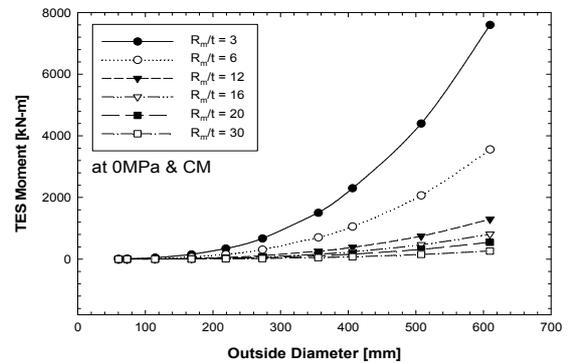


Fig. 9 Performance based load carrying capacity (M_{TES}) by means of TES plastic loads (0 MPa and close mode bending)

굽힘하중 조건에서의 TES 소성하중을 외경 및 R_m/t_n 변화 조건에 따라 도시하였다. 성능기반 하중지지능력은 R_m/t_n 가 적은 배관에서 외경의 증가에 따라, 즉 상대적 배관 두께가 큰 배관에서 급격히 증대함을 알 수 있다.

4.2 설계기준 최대허용하중

원전 2차계통 배관의 설계시 요구되는 요건은 ASME⁽⁹⁾ NC/ND-3653에 규정하고 있는데, 여기서는 압력, 자중(dead weight), 지속하중(sustained load), 비역전 동적하중(non-reversing dynamic loads) 등을 함께 고려하는 일시하중(occasional loads)에 관한 배관계통 해석에서 아래 식 (1)의 요건을 만족하도록 규정하고 있는데, 이는 주어진 재료·압력·외경·공칭두께의 배관은 식 (2)에 따른 설계기준 최대허용하중($M_{(M_A + M_B)}$ in NC/ND) 이하로 설계됨을 의미한다.

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

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

성능기반 하중지지능력의 안전여유도 비교를 위해, 설계시 가상의 극한하중(faulted load)보다는 운전중 과도상태를 나타내는 일시하중(occasional load)을 비교하는 것이 합리적이므로, 일시하중에 의한 배관의 하중지지능력을 운전중 배관의 검사 및 관리를 위한 성능기반 하중으로 정의하였다.

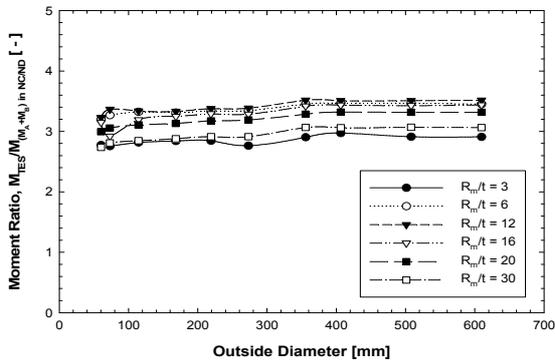


Fig. 10 Performance based structural safety factor by comparison between TES plastic and max. design allowable load

4.3 설계요건 대비 하중지지능력의 안전여유

본 연구의 목적인 성능기반 안전여유도 분석을 위해 앞 절에서 정의한 Fig. 9의 최대압력이 0 MPa인 가장 보수적인 경우에, 성능기반 하중지지능력(M_{TES})과 식(2)에서 공칭두께를 R_m/t_n 에 해당하는 두께로 대체한 설계기준 최대허용하중 ($M (M_A + M_B)$ in NC/ND) 즉, 설계시 성능기반하중과의 비를 Fig. 10에 나타내었다. 이를 성능기반 안전여유도(performance based structural safety factor)라 정의하면, 이는 배관의 외경, R_m/t_n 에 무관하게 2.7~3.5의 여유도를 가지고 있다. 이는 엘보우의 건전성 평가 기준 수립을 위한 성능기반 하중지지능력의 정의가 적절함을 확인하는 것이다.

5. 결론

원전 2차 계통에서 주로 사용되는 엘보우에 대한 내압 및 굽힘하중이 작용하는 조건에서 TES 소성하중 거동을 기반으로 성능기반 안전여유도를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 엘보우에 내압이 존재하면 순수 굽힘하중에 조건에 비해 높은 하중지지능력을 보인다.
- (2) 엘보우에 단힘방향 굽힘하중이 인가되는 조건이 열림방향 굽힘하중 조건에 비해 낮은 하중지지능력을 가지고 있었다.
- (3) 손상이 없는 엘보우의 성능기반 하중지지능력 조건은 단힘방향 순수 굽힘하중 조건에 해당하는 TES 소성하중으로 정의할 수 있다.
- (4) 설계기준 최대허용하중과 정의된 성능기반

허용하중과의 비로서 성능기반 안전여유도를 평가한 결과, 외경 및 R_m/t_n 에 무관하게 2.7~3.5의 균등한 값을 보이고 있어서, 성능기반 하중지지능력(M_{TES})은 배관계통 구조건전성을 유지하는 엘보우 관리 기준으로 적합하다.

본 연구의 결과를 기반으로 손상 엘보우에 대해서도 성능기반 하중지지능력을 설정하고 건전 엘보우와 비교함으로써 효율적인 배관관리를 수행하는 기준 설정이 가능할 것이다.

참고문헌

- (1) Frank, M., Hans, R., and Helmut, S., 2001, "Experience with Piping in German NPPs with Respect to Ageing-Related Aspect," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 207, pp. 307~316
- (2) INPO, 2006, "Flow-Accelerated Corrosion," *Engineering Program Guideline*
- (3) Zhang, L., Wang, Y., Chen, J. and Liu, C., 2001, "Evaluation of Local Thinned Pressurized Elbows," *Int. J. of Pressure Vessels and Piping*, Vol.78, pp. 697~703
- (4) Kim, J.W., Park, C.Y. and Kim, B.N., 2001, "Evaluation of Local Wall Thickness of Thinned Pipe Subjected to Internal Pressure and Bending Moment," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 25, No. 1, pp. 81~88
- (5) Kim, J.W., Kim, T.S. and Park, C.Y., 2004, "Effect of Local Wall Thinning Defect on the Collapse Moment of Elbow," *Trans. of KSME (A)*, Vol. 27, No. 4, pp. 402~409
- (6) Lee, S.H., et. al., 2008, *Optimization of Thinned Pipe Management Program and Application*, Korea Hydro & Nuclear Power Co.
- (7) Chattopadhyay, J., Kushwaha, H.H. and Roos, E., 2009, "Improved Integrity Assessment Equations of Pipe Bends," *Int. J. of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 86, No. & pp. in Press.
- (8) Oh, C.S., Kim, Y.J. and Park, C.Y., 2008, "Shakedown Limit Loads for elbows under Internal Pressure and Cyclic in-Plane Bending," *Int. J. of Pressure Vessel and Piping*, Vol. 85, No. 6, pp.394~405.
- (9) ASME, 1998 ed., *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Sec. III, Div. 1, Subsection NC/ND and B31.1.