

노즐이 원자력 배관의 파단전누설 해석 결과에 미치는 영향

김영진* · 허남수* · 곽동옥** · 유영준*** · 표창률****
(2000년 3월 30일 접수)

Effect of Nozzle on Leak-Before-Break Analysis Result of Nuclear Piping

Young-Jin Kim, Nam-Su Huh, Dong-Ok Kwak, Young-Joon Yu
and Chang-Ryul Pyo

Key Words: LBB(파단전누설), Crack Opening Area(균열개구면적), Crack Opening Displacement(균열개구변위), Detectable Leakage Crack(감지가능한 누설균열), J/T Analysis(J/T 해석)

Abstract

For traditional Leak-Before-Break (LBB) analyses, symmetric conditions were assumed for a pipe-nozzle interface to simplify the analysis in calculating J -integral. However, this assumption could result in an overly conservative design criteria for a pipe-nozzle interface. Since the pipe-nozzle interface is asymmetric due to the difference of stiffness between pipe and nozzle, it is required to develop a new methodology considering the nozzle effect. The objective of this paper is to evaluate the effect of nozzle on the development of LBB design criteria for nuclear pipings. For this purpose, extensive finite element analyses were performed to evaluate the effect of nozzle on Crack Opening Area (COA), Detectable Leakage Crack (DLC) length and J -integral values. In conclusion, it was proven that the application of LBB concept could be extended for more nuclear piping system by considering the nozzle.

1. 서 론

원자력발전소의 배관설계에 파단전누설(Leak-Before-Break; LBB) 개념^(1,2)을 적용하려면 대상 배관계에 대한 파괴역학적 균열 안정성 평가를 수행하여야 한다. 이를 위해서는 탄소성 파괴역학의 전문지식이 요구되며, 해석에 많은 시간이 소요된다. 또한 대상 배관계가 LBB 조건을 만족하지 못하면 지지구조물의 추가 또는 배관계의

기하학적 구조의 재설계가 불가피하며 이로 인해 전체 공기가 지연된다는 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고 원자력발전소 배관계통의 설계초기단계에서 쉽게 LBB 개념 적용가능성을 예측하기 위한 다양한 LBB 평가선도(LBB evaluation diagram)가 제안되어 있다.⁽³⁻⁵⁾

현재 일반적으로 사용되고 있는 LBB 해석 방법은 배관계의 전체적인 기하학적 구조나 가상균열의 위치를 고려하지 않고 Fig. 1에 나타난 바와 같이 단순 배관(straight pipe)으로 가정하여 해석을 수행한다. 이와 같은 해석 방법은 해석에 소요되는 시간을 단축할 수 있다는 장점이 있으나 균열이 있는 배관의 실제적인 탄소성 거동을 평가하는 데는 한계가 있다. 또한 단순 배관 모델을 사용하여 LBB 해석을 수행하면 해석 결과가

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

** 회원, 삼성종합기술원

*** 회원, 국방과학연구소

**** 회원, 인덕대학 기계과

매우 보수적이므로 직경이 작은 배관을 비롯하여 보다 많은 배관계통에 LBB 개념을 확대 적용하기가 어렵다. 따라서 가상균열의 위치 및 배관계의 전체적인 기하학적 구조를 고려한 새로운 해석 방법이 개발되어야 한다. 특히 배관의 끝단 (terminal end) 등과 같이 배관과 노즐의 경계면에 균열을 가정하는 경우에는 배관의 중간부분 (intermediate location)과는 달리 재질 및 기하학적 비대칭성이 존재하므로 이의 영향을 평가할 수 있는 해석 방법이 필요하다.^(6,7)

본 논문의 목적은 노즐이 감지가능한 누설균열 (Detectable Leakage Crack; DLC)길이, 균열개구면적 (Crack Opening Area; COA), 그리고 작용하중에 의한 J -적분값에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것이다. 또한 배관-노즐 모델에 대한 LBB 평가선도를 작성하여 노즐이 LBB 해석 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하는 것이다.

2. 해석대상 및 유한요소모델

2.1 해석대상

Fig. 2는 해석대상인 국내 원자력발전소 "Y"의 안전주입계통(safety injection line) 노즐부의 형상을 나타낸 것이다.

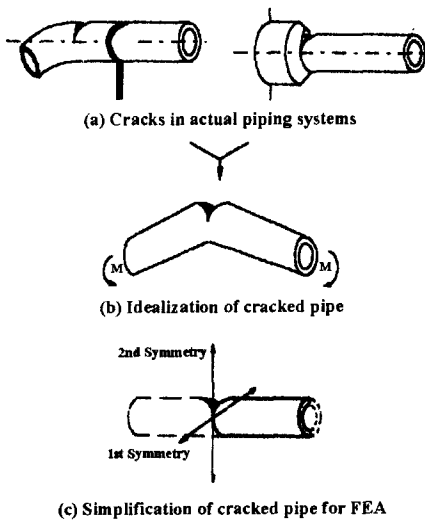


Fig. 1 Typical idealization of pipe-nozzle, elbow and straight pipe for LBB analysis

여기서, 배관부의 외경은 356mm, 두께는 36mm이며, 노즐부의 외경과 두께는 각각 534mm, 115mm이다. 이 노즐부를 선정할 이유는 단순 배관 모델에 대한 해석 결과, LBB 개념 적용을 위한 안전여유도(safety margin)가 가장 작기 때문이다.^(8~10)

또한, LBB 해석 결과에 미치는 노즐부의 영향을 파악하고 이를 비교하기 위해 가압밀림계통 (surge line)의 노즐부에 대해서도 해석을 수행하였다. Fig. 3은 가압밀림계통 노즐부의 형상을 나타낸 것으로 배관부의 외경은 324mm, 두께는 33mm이며, 노즐부의 외경과 두께는 각각 522mm, 119mm이다.

2.2 배관-노즐부에 대한 유한요소모델

Fig. 4는 해석에 사용된 대표적인 유한요소모델로 해석을 단순화하기 위해 대칭성을 고려하여 전체의 1/2만을 모델링하였다. 또한 하중은 내압과 굽힘 모멘트를 작용시켰으며, 해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS⁽¹¹⁾를 사용하였다. 가상균열의 위치는 노즐의 영향을 최대로 반영하기 위하여 배관과 노즐의 연결부위 (safe-end)로 설정하였다. 노즐부의 재질은 모두 SA508 Class 1a 탄소강이며, 배관부의 재질은 안전주입계통은 SA312 TP316 스테인리스강이며, 가압밀림계통은 SA312 TP347 스테인리스강이다.

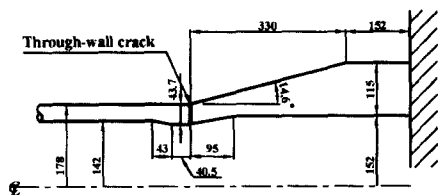


Fig. 2 Idealized nozzle geometry of safety injection line (Unit : mm)

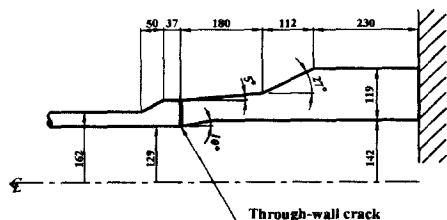


Fig. 3 Idealized nozzle geometry of surge line (Unit : mm)

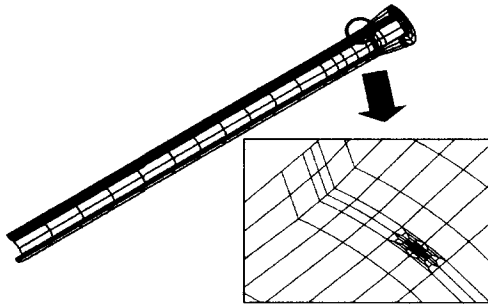


Fig. 4 Three dimensional mesh for finite element analysis

3. 노즐의 영향을 고려한 LBB 해석 방법

3.1 노즐의 영향을 고려한 LBB 해석 절차

노즐의 영향을 고려한 LBB 해석 방법 및 절차는 LBB 설계 절차서^(1,2)에 근거하였다. Fig. 5는 단순 배관 모델 및 배관-노즐 모델에 대한 LBB 해석 순서를 나타낸 것이다.

원자력발전소의 배관계에 LBB 개념을 적용하려면 정상운전(Normal Operation; NOP)하중 하에서 10gpm의 누설량에 해당하는 감지가 가능한 누설 균열길이 a 를 결정해야 한다. 그리고 누설균열길이 a 와 2배의 안전여유를 고려한 $2a$ 에 대해 균열 안정성을 입증해야 한다. 누설균열길이의 산출에는 EPRI에서 개발한 PICEP 프로그램⁽¹²⁾이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 PICEP 프로그램은 단순 배관 모델에 대한 누설균열길이만을 제공하므로 배관-노즐 모델에는 적용할 수 없다. 따라서 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 유한요소해석을 연계한 새로운 누설균열길이 결정 방법이 필요하다. 본 논문에서 사용한 배관-노즐 모델의 누설균열길이 산출 방법은 다음 절에 자세히 기술하였다. 누설균열길이 산출을 제외한 그 외의 LBB 해석 절차는 단순 배관 모델의 경우⁽¹³⁾와 동일하다.

3.2 배관-노즐 모델의 누설균열길이 산출방법

배관-노즐 모델의 누설균열길이는 균열개구면적과 상관관계가 있기 때문에 앞서 언급한 바와 같이 PICEP 프로그램과 유한요소해석을 연계하여 누설균열길이를 결정하였다. 본 논문에서 사

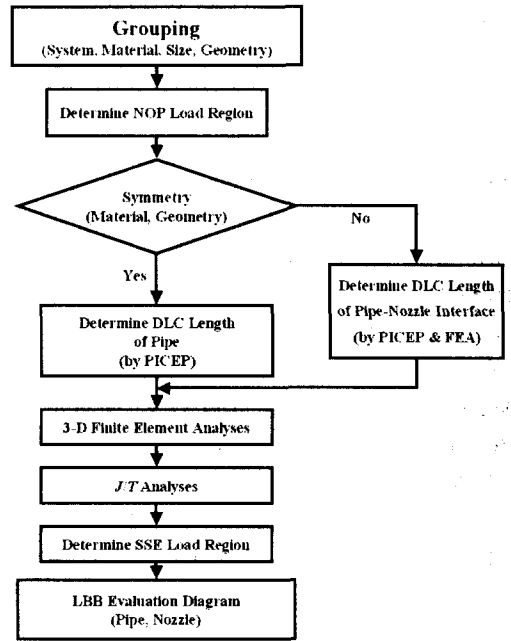


Fig. 5 Analysis procedure for LBB application to nuclear piping

용한 누설균열길이 계산 절차는 다음과 같다.

Step 1 : 배관 모델에 대한 누설균열길이와 균열개구면적을 PICEP 프로그램으로 결정한다.

Step 2 : 배관 모델에 대해 계산된 누설균열길이를 이용하여 배관-노즐 모델에 균열을 가정하고 이에 대한 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하여 균열개구면적을 계산한다.

Step 3 : 배관 모델에 대한 균열개구면적과 배관-노즐 모델에 대한 균열개구면적을 비교한다.

Step 4 : 배관-노즐 모델의 균열길이를 변화시켜 해석을 수행하고, 배관-노즐 모델의 균열개구면적이 배관 모델의 균열개구면적과 동일할 때의 균열길이를 배관-노즐 모델에 대한 누설균열길리로 결정한다.

배관 모델의 균열개구면적은 PICEP 프로그램으로 구한 균열개구변위(Crack Opening Displacement; COD)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$COA_{PIPE} = \pi \cdot a \cdot COD \quad (1)$$

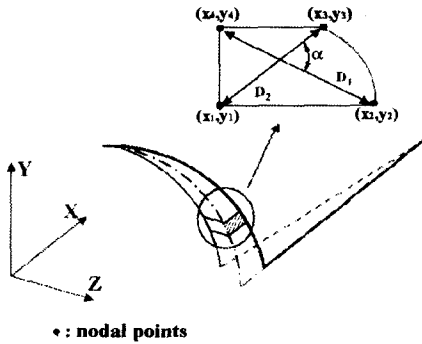


Fig. 6 Calculation of crack opening area using nodal displacement

배관-노즐 모델의 균열개구면적은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 탄소성 해석으로 구한 절점 변위를 이용해서 다음과 같이 계산된다. 여기서 균열개구면적은 Fig. 7에 나타난 바와 같이 작용하중으로 인해 벌어진 균열의 투영면적을 의미한다.

$$COA_{NOZZLE} = \frac{1}{2} D_1 D_2 \sin \alpha \quad (2)$$

여기서,

$$\cos \alpha = \frac{(x_3 - x_1)(x_4 - x_2) + (y_3 - y_1)(y_4 - y_2)}{D_1 D_2}$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{(x_3 - x_1)(x_4 - x_2) + (y_3 - y_1)(y_4 - y_2)}{D_1 D_2} \right]$$

x_i, y_i : 절점 좌표 및 변위

4. 해석 결과

4.1 노즐이 누설균열길이에 미치는 영향

Fig. 8은 안전주입계통 노즐부에 대해서 앞에서 기술한 절차에 따라 구한 배관 및 배관-노즐 모델에 대한 누설균열길이의 비를 나타낸 것이며, Fig. 9는 가압밀림계통 노즐부에 대한 해석 결과이다. 배관과 배관-노즐 모델의 누설균열길이의 비는 작용하중이 증가함에 따라 증가하였다. Fig. 8과 Fig. 9를 비교해보면 해석 결과의 경향은 같

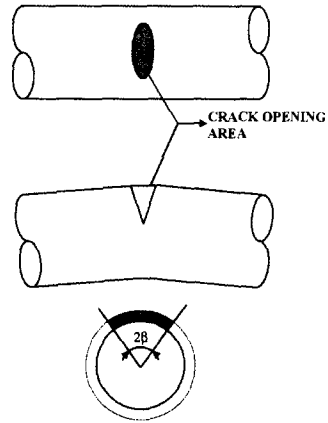


Fig. 7 Definition of crack opening area used in LBB analysis

지만 누설균열길이의 비는 큰 차이를 보인다. 이는 노즐부에 대한 LBB 해석시 고려해야할 중요한 매개변수인 가상균열부위의 응력 분포와 배관-노즐 모델의 경사각의 영향으로 생각된다. Fig. 10과 Fig. 11은 각각 안전주입계통과 가압밀림계통의 노즐부에 대해 균열을 가정하지 않고 응력 해석을 수행하여 구한 균열열림방향의 응력 분포를 나타낸 것이다. 해석 결과, 안전주입계통의 경우는 최대 응력이 균열부에 작용하였고, 가압밀림계통은 최대 응력값의 약 50%에 해당하는 응력이 균열부에 작용하였다. 따라서 안전주입계통의 균열부에 가압밀림계통보다 더 큰 소성역이 발생하였다. 소성역이 커지면 균열 성장에 필요한 하중이 더 커지므로 안전주입계통이 가압밀림계통보다 누설균열길이비가 작아진 것으로 판단된다.

4.2 노즐의 형상이 균열개구면적에 미치는 영향

노즐부의 형상변화가 균열개구면적에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 형상 매개변수를 Fig. 12와 같이 노즐의 길이(l), 배관-노즐 연결부의 두께(d_1), 그리고 배관-노즐 연결부의 각도(θ)로 설정하였다.

Fig. 13은 노즐의 길이를 변화시켜 구한 균열개구면적을 나타낸 것이다. 해석 결과 노즐의 길이는 균열개구면적에 영향을 미치지 않았다. 따라서 노즐의 길이는 해석의 편의성을 고려해 증감

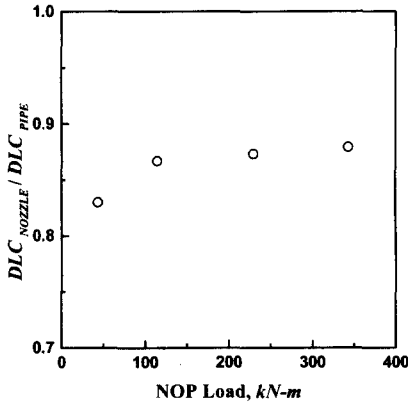


Fig. 8 Ratio of DLC for pipe and pipe-nozzle model of safety injection line

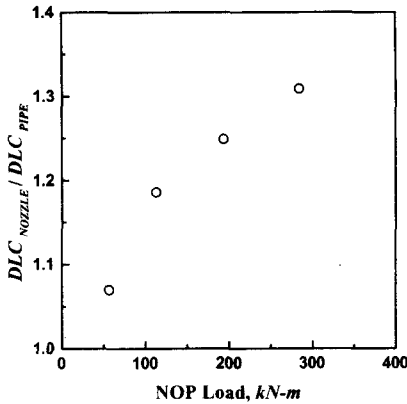


Fig. 9 Ratio of DLC for pipe and pipe-nozzle model of surge line

하여도 해석 결과에는 영향을 미치지 않는다. Fig. 14는 균열이 위치하는 배관-노즐 연결부의 두께를 변화시키면서 구한 균열개구면적을 나타낸 것이다. 해석 결과 배관-노즐 연결부의 두께가 얇은 경우에는 균열개구면적의 변화가 컸으나 두께가 두꺼운 경우에는 균열개구면적의 변화가 적었다. 이는 두께가 작은 배관의 경우에는, 배관-노즐 연결부의 두께가 LBB 개념 적용 가능성에 큰 영향을 미치며 LBB 개념 확대 적용시 매우 중요한 인자로 작용함을 의미한다. 반대로 두께가 큰 경우에는 노즐로 인한 영향이 크지 않다는 것을

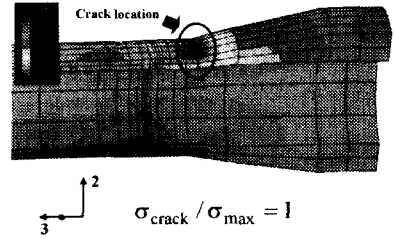


Fig. 10 Stress distribution of crack opening mode for pipe-nozzle model of safety injection line

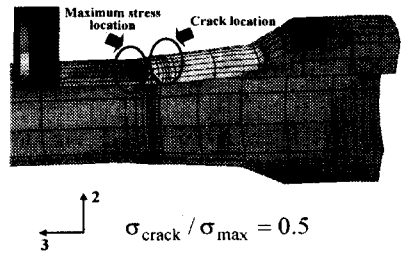


Fig. 11 Stress distribution of crack opening mode for pipe-nozzle model of surge line

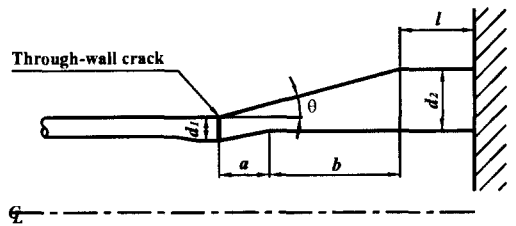


Fig. 12 Parameters for pipe-nozzle model

알 수 있으며 따라서 두께가 큰 배관계에서는 현재 일반적으로 사용되고 있는 방법과 같이 노즐을 고려하지 않고 LBB 해석을 수행해도 무방하다고 생각된다. Fig. 15는 배관-노즐 연결부의 각도를 변화시키면서 구한 균열개구면적을 나타낸 것으로 각도가 작은 경우에는 균열개구면적이 크게 변화하였으나 각도가 큰 경우(θ 가 약 20° 이상)에는 거의 변화하지 않았다. 이는 4.1절에서 언급한 안전주입계통과 가압밀림계통의 누설균열 길이비(Fig. 8과 Fig. 9)의 차이가 발생하는 원인으로 설명할 수 있다. 즉, 노즐부의 각도가 작은

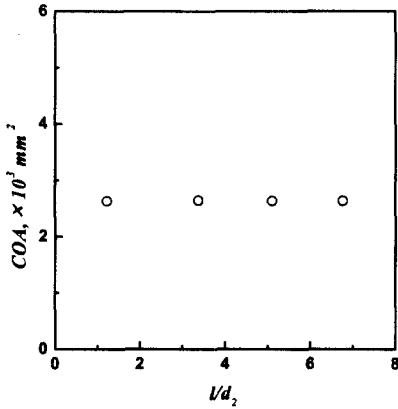


Fig. 13 Effect of " l/d_2 " on COA

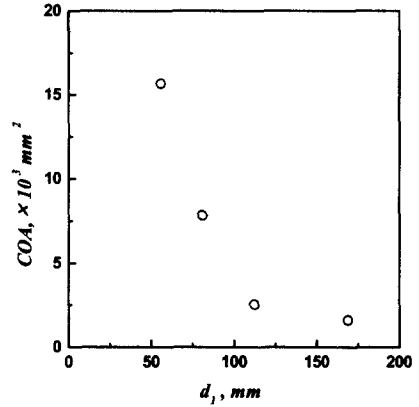


Fig. 14 Effect of " d_1 " on COA

안전주입계통 ($\theta=14.6^\circ$)이 각도가 큰 가압밀림계통 ($\theta=27^\circ$)보다 균열개구면적이 커지고, 이에 따라 누설균열길이는 작아졌다. 따라서 균열개구면적에 영향을 미치는 노즐부 형상 매개변수를 순서대로 나열하면 균열부의 두께, 배관-노즐 연결부의 각도, 노즐의 길이이다.

4.3 노즐이 작용하중에 의한 J-적분값에 미치는 영향

노즐부의 상이한 재질과 기하학적 형상의 비대칭성이 작용하중에 의한 J-적분값에 미치는 영향을 평가하기 위해서 동일한 균열길이를 가진 배관-노즐 모델 및 배관 모델에 대하여 J-적분값을 계산하고 이를 비교하였다.

Fig. 16과 Fig. 17은 각각 안전주입계통과 가압밀림계통의 배관 모델에서 구한 J-적분값(J_{PIPE})과 배관-노즐 모델에서 구한 J-적분값(J_{NOZZLE})을 비교하여 작용하중에 대해 나타낸 것이다. 그림에서 보면 작용하중에 따른 J_{NOZZLE}/J_{PIPE} 의 비는 1보다 작은 것으로 나타났다.

이는 배관과 노즐의 강성도 차이로 인하여 배관-노즐 모델의 균열선단에 발생하는 소성역 크기가 배관 모델에 발생하는 소성역의 크기보다 작기 때문이며, 하중의 크기가 증가할수록 그 차이가 점점 증가하기 때문이다. 또한 작용하중의 증가에 따라 J_{NOZZLE}/J_{PIPE} 의 비가 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 이상의 결과들은 배관과 노즐의 경계면에 대한 LBB 해석시, 배관-노즐 모델을 사용하지 않고 단순 배관 모델을 이용

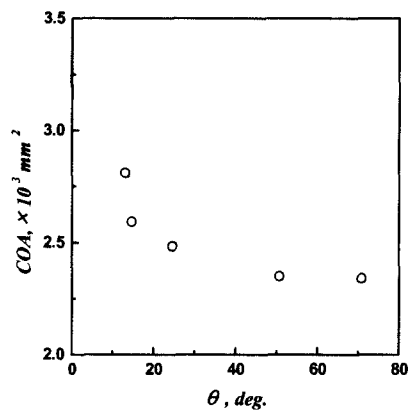


Fig. 15 Effect of " θ " on COA

하면 J-적분값 계산 측면에서 매우 보수적인 결과를 얻게 된다는 것을 의미한다.

4.4 노즐이 LBB 평가선도에 미치는 영향

안전주입계통의 경우, 배관-노즐 모델의 작용하중에 의한 J-적분값이 동일한 크기의 균열을 가지는 배관 모델에 비하여 더 작았으며, LBB 해석시 필요한 감지가 가능한 누설균열길이도 더 작았다. 여기서 작용하중에 의한 J-적분값의 감소는 LBB 해석시 보다 많은 안전여유도를 확보할 수 있게 한다. 또한 누설균열길이의 감소도 LBB 해석시 안전여유도를 증가시키는 요인으로 작용한다. 그러나 가압밀림계통의 경우는 배관-노즐 모델의 작용하중에 의한 J-적분값은 감소하였으나, 누설균열길이는 증가하였다. J-적분값의 감소는

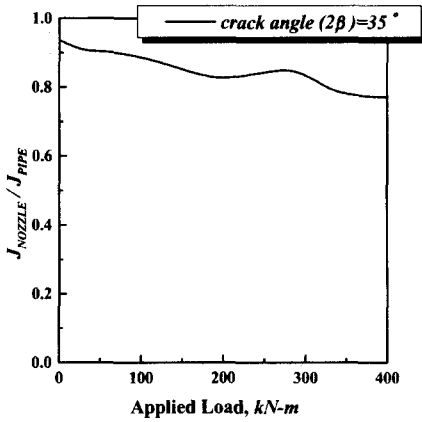


Fig. 16 Ratio of J -integral for pipe and pipe-nozzle model of safety injection line

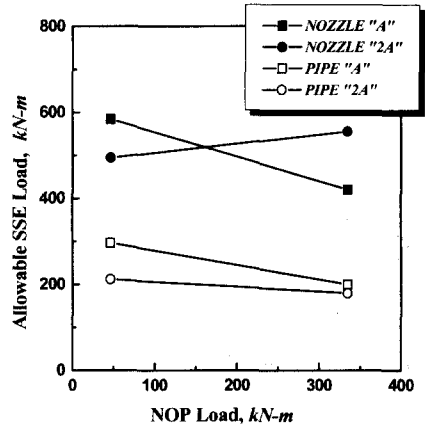


Fig. 18 Comparison of allowable SSE load region for pipe and pipe-nozzle model of safety injection line

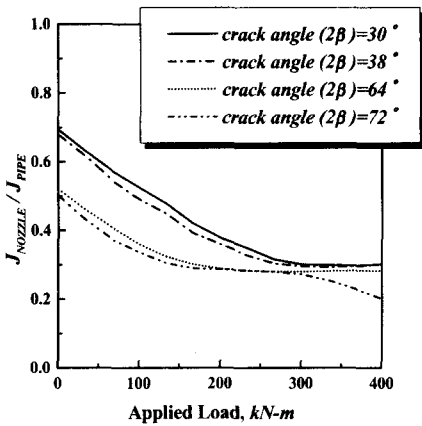


Fig. 17 Ratio of J -integral for pipe and pipe-nozzle model of surge line

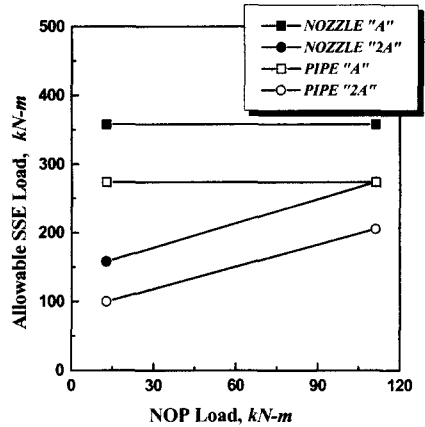


Fig. 19 Comparison of allowable SSE load region for pipe and pipe-nozzle model of surge line

앞서 언급한 바와 같이 안전여유도를 증가시키나, 누설균열길이의 증가는 안전여유도를 감소시킨다. 따라서 이에 대한 정량적 평가를 위하여 국내 원자력발전소 "Y"의 안전주입 및 가압밀림 계통의 배관 모델과 배관-노즐 모델의 LBB 평가 선도를 작성하여 그 영향을 평가하였다. Fig. 18은 안전주입계통의 배관 모델에 대한 LBB 평가 선도와 배관-노즐 모델에 대한 LBB 평가 선도를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 "A"는 누설균열길이가 a 인 경우의 LBB 개념 적용가능영역을 의미하고, "2A"는 $2a$ 인 경우의 LBB 개념 적용가능영역을 의미한다.

해석 결과, 배관-노즐 모델에 대한 허용 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake; SSE) 하중이 배관 모델에 대한 허용 SSE 하중보다 최소 70%에서 최대 190% 정도 큰 것으로 나타났다. Fig. 19는 가압밀림계통의 배관 모델과 배관-노즐 모델에 대한 LBB 평가 선도를 비교하여 나타낸 것으로 배관-노즐 모델에 대한 허용 SSE 하중이 배관 모델에 대한 허용 SSE 하중보다 최소 30%에서 최대 60% 정도 큰 것으로 나타났다. 따라서 누설균열길이의 증가로 인한 영향보다 J -적분값의 감

소로 인한 영향이 지배적이었으며, 노즐의 영향을 고려하여 LBB 해석을 수행하면 LBB 개념 적용가능영역이 더 커진다.

5. 결 론

본 논문에서는 재질 및 기하학적 형상의 비대칭성이 존재하는 노즐부의 감지가능한 누설균열길이 산출방법을 제시하고, 노즐이 원자력발전소 배관의 LBB 해석 결과에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 배관-노즐 모델과 배관 모델의 누설균열길이의 비(DLC_{NOZZLE}/DLC_{PIPE})는 작용하중이 증가함에 따라 증가하였다.

(2) 배관-노즐 모델의 균열개구면적에 가장 많은 영향을 미치는 노즐부의 형상 매개변수는 배관-노즐 연결부의 두께이고 노즐의 길이는 영향을 미치지 않았다.

(3) 배관-노즐 모델과 배관 모델의 J -적분값의 비(J_{NOZZLE}/J_{PIPE})는 1보다 작았으며 작용하중이 증가할수록 일정한 값으로 수렴하였다.

(4) 노즐부의 영향을 고려한 LBB 개념 적용가능영역은 노즐부를 고려하지 않았을 때보다 30%~190% 정도 커졌다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

(1) 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Break," NUREG 1061, Vol. 3, USNRC.
 (2) 1987, "Leak Before Break Evaluation Procedure," SRP 3.6.3, USNRC.
 (3) Nana, A.D. and Yoon, K.K., 1994,

"Leak-Before-Break Allowable Load Windows Approach," *ASME Conference*, PVP-Vol. 287, pp. 35~41.

(4) Fabi, R.J. and Peck, D.A., 1994, "Leak Before Break Piping Evaluation Diagram," *ASME Conference*, PVP-Vol. 283, pp. 111~115.

(5) Swamy, S.A., Mandava, P.R., Bhowmick, D.C. and Prager, D.E., 1996, "LBB Considerations for A New Plant Design," *NEA-CSNI/R(95)18*, Vol. 1, pp. 199~205.

(6) Yu, Y.J., Kim, Y.J. and Park, S.H., 1993, "Evaluation of Large Leakage Crack Effect on the Distribution of Loads in a Small Diameter Pipe," *SMIRT-12*, G05/4, pp. 75~79.

(7) Lee, J.B. and Choi, Y.H., 1999, "Application of LBB to High Energy Piping of a Pressurized Water Reactor in Korea," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 190, pp. 191~195.

(8) 허남수, 이철형, 김영진, 석창성, 표창률, 1999, "원전 배관의 LBB 적용을 위한 간략 설계기법 개발," 한국산업안전학회지, 제14권, 제2호, pp. 32~41.

(9) 허남수, 김영진, 표창률, 유영준, 양준석, 1999, "차세대 원전배관의 LBB 적용을 위한 수정배관평가선도의 개발," 대한기계학회논문집 A 권, 제23권, 제5호, pp. 763~771.

(10) 1993, "Final Safety Analysis Report (YGN 3/4)," KOPEC, Technical Report.

(11) 1999, "ABAQUS User's manual," Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc.

(12) Norris, D.M. and Chexal, B., 1987, "PICEP : Pipe Crack Evaluation Program," EPRI NP 3596-SR.

(13) Kim, Y.J., Lee, Y.Z., Huh, N.S., Pyo, C.R. and Yang, J.S., 1999, "Development of Modified Piping Evaluation Diagram for Leak-Before-Break Application to Korean Next Generation Reactor," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 191, pp. 135~145.