

< 논 문 >

직경이 작은 원자력배관의 파단전누설 해석에 미치는 노즐의 영향

유영준* · 김영진**

(1995년 12월 18일 접수)

Effects of Nozzle on LBB Evaluation for Small Diameter Nuclear Piping

Y. J. Yu and Y. J. Kim

Key Words: Leak Before Break (파단전누설), LBB(파단전누설), PED(배관평가선도), Stability Evaluation(안정성 평가), Leak Rate(누설률)

Abstract

LBB(Leak-Before-Break) analysis is performed for the highest stress location of each different type of materials in the nuclear piping line. In most cases, the highest stress occurs in the pipe and nozzle interface location. i.e. terminal end. The current finite element analysis approach utilizes the symmetry condition both for locations near the nozzle and for locations away from the nozzle to minimize the size of the finite element model and to make analysis simple when calculating the J-integral values at the crack tip. In other words, the nozzle is not included in the finite element model. However, in reality, the symmetric condition is not applicable for the pipe-nozzle interface location. Because the pipe-nozzle interface location is asymmetric due to different stiffness of the pipe and nozzle (both material and dimensions). This simplified analysis approach for pipe-nozzle interface location is too conservative for a smaller diameter piping. In this paper, various analyses are performed for the range of materials and crack sizes to evaluate the nozzle effect for a LBB analysis. This paper presents methodology for developing the piping evaluation diagram at the pipe-nozzle interface location.

기 호 설 명

J	: J-적분값	E	: 탄성계수
Δa	: 균열진전량	σ_f	: 유동응력
a	: 균열길이	C_1, C_2	: 상수
σ_{ap}	: 응력텐서	DLC	: 감지가능한 균열길이
dU	: 변형에너지 해방률	NOP	: 정상운전상태
T	: 찢김계수	SSE	: 안정정지지진
T_m	: 재료에 대한 찢김계수	u_a	: 변위벡터
T_a	: 작용하중에 의한 찢김계수	W	: 변형에너지 밀도
		θ_{ap}	: 자유열팽창 변위
		t_a	: 표면력 벡터

*한국원자력연구소

**회원, 성균관대학교 기계설계학과

1. 서 론

일반적으로 원자력발전소는 운전도중 발생할 수 있는 모든 사고를 가정하여 이 중 가장 심각한 사고하에서도 모든 기기 및 구조물들이 제 기능을 발휘하고 충분한 안전성을 확보할 수 있도록 설계된다. 과거 이와 같은 설계기준에 의해서 가정된 사고중의 하나가 배관의 양단순간파단에 의한 사고이다. 그러나 최근에는 탄소성 파괴역학의 발달과 확률론적 연구결과⁽¹⁾를 토대로 배관의 양단순간파단 대신 파단전누설(leak-before-break : LBB)개념을 배관설계시 고려할 수 있도록 관련 규제조치가 완화되었고 이를 원자로계통 설계에 새로운 기준으로 적용할 수 있게 되었다.^(2~4) LBB개념이란 일반적으로 배관이 파단에 이르기전 적당량의 누설(leak)을 허용함으로써 배관에 발생된 균열을 미리 발견할 수 있고 따라서 배관의 양단순간파단과 같은 극한적인 상황을 사전에 방지할 수 있다는 개념이다. 이와 같은 LBB개념을 원자력발전소의 설계에 적용하면 배관파단으로 인해 방출된 고온, 고압의 유체가 파단된 배관 주위의 각종 기기 및 부품에 미칠 수 있는 동적영향(dynamic effect)을 설계기준에서 배제할 수 있으므로 각종 구조물의 설계가 단순해지고, 배관 파단에 대비해 설치되었던 여러가지 지지구조물들을 제거할 수 있기 때문에 설계에 소요되는 비용을 크게 절감할 수 있는 잇점이 있다. 이와 같은 잇점때문에 원자력발전소내 직경이 큰 배관을 비롯한 주요 배관에는 이미 LBB개념을 적용하여 설계하고 있으며 최근에는 이를 보다 많은 배관에 확대 적용하기 위한 시도가 이루어지고 있다.^(5~8) 그러나 현재 일반적으로 사용되고 있는 LBB 해석방법은 해석절차의 단순화 및 해석시간의 단축을 위하여 전체 배관계에 대한 구조적 특성을 고려하지 않고 있기 때문에 균열이 있는 배관의 파괴역학적 거동을 정확하게 예측하는데 한계가 있으며 경우에 따라서는 매우 보수적인 해석결과를 제공한다. 따라서 LBB개념을 보다 많은 배관에 확대 적용하기 위해서는 균열이 있는 배관의 탄소성거동에 영향을 미치는 인자들에 대한 체계적인 평가를 통해서 합리적인 해석방법을 개발하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 직경이 작은 배관(직경 304.8 mm

이하)의 LBB 해석에 미치는 노즐의 영향을 정량화하고 LBB개념을 보다 많은 배관에 확대 적용하기 위한 새로운 LBB 해석방법을 개발하였다. 본 논문에서는 이를 위하여 노즐의 재질 및 기하학적 비대칭성이 균열개구면적 및 균열의 안정성 평가에 미치는 영향을 탄소성 파괴역학을 이용한 유한요소 해석법을 이용하여 평가하였으며 이를 실제 LBB 해석에 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 노즐 및 배관 경계부위의 LBB 해석을 단순화하기 위한 배관평가선도(piping evaluation diagram : PED)⁽⁹⁾를 개발하였다.

2. 현재의 LBB 해석방법

원자력발전소 배관에 대해 LBB개념을 적용하기 위해서는 먼저 LBB개념을 적용하고자 하는 배관에 대한 정적(static), 동적(dynamic) 배관해석 및 피로해석을수행한다. 배관해석 및 피로해석 결과는 LBB 해석을 위한 가상균열의 위치 및 감지가 가능한 균열(detectable leakage crack)의 크기를 결정하는데 이용되며, 여기서 말하는 가상균열은 관통균열(through-wall crack)을 의미한다. 가상균열의 위치는 배관계통을 구성하고 있는 각각의 재료에 대해서 가장 큰 응력이 발생하는 지점으로 결정되며 가상균열의 크기는 그 지점에 작용하는 하중의 크기에 따라 결정된다. 현재 감지가 가능한 균열의 크기는 일반적으로 미국의 EPRI에서 개발한 PICEP⁽¹⁰⁾ 프로그램을 이용하여 결정하고 있으며 LBB 해석은 GE/EPRI에서 개발한 J-평가법⁽¹¹⁾을 사용하거나 별도의 유한요소해석 방법을 이용해서 수행하고 있다. 이들 해석에 사용되는 해석모델은 배관계의 전체적인 기하학적 구조나 노즐 등과 같은 국부적인 비대칭성을 고려하지 않고 해석을 단순화하기 위해서 배관계의 모든 위치에 대해서 Fig. 1과 같이 2개의 축방향으로 대칭성이 존재한다고 가정한다. LBB 해석을 위한 하중은 발전소 운전중 발생될 수 있는 가장 심각한 하중(정상운전하중+안전정지 지진하중 : NOP+SSE)으로 가정한다. 이 하중은 균열이 없는 배관계에 대한 배관해석으로부터 구해지며 균열이 있는 배관의 탄소성 파괴거동을 평가하기 위하여 하중을 Fig. 1(c)와 같은 외팔보 형태의 모델에 작용시킨다. 이와 같은 단순화된 해석방법은 해석에 소요되는 시간을 단축시키고 해석을 단순화시키는 장점이 있으나 실제 균열이 있는 배

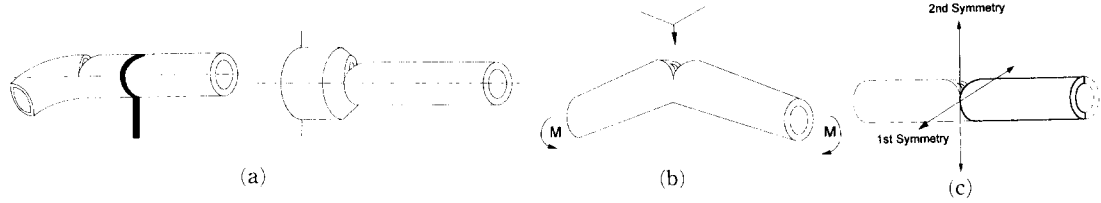


Fig. 1 Typical idealization of nozzle-pipe and straight pipe for LBB analysis

관의 거동을 정확하게 평가하는데는 문제가 있다고 생각된다. 특히 직경이 작은 배관의 경우는 배관계 전체가 매우 유연(flexible)한 구조로 되어 있고 감지가능 균열크기가 상대적으로 매우 크기 때문에 균열주위의 국부적인 컴플라이언스의 변화에도 균열주위의 파괴역학적 거동 및 전체 배관계에 대한 구조적 거동에 많은 영향을 미치게 된다. 따라서 직경이 작은 배관에 대해서는 이와 같은 방법으로 LBB 해석을 수행하는 것이 매우 보수적이라고 생각된다.

3. 노즐의 영향 평가

3.1 배관 및 노즐 경계 부위에 대한 평가

배관의 끝단(terminal end) 등과 같은 노즐 및 배관의 경계면에서는 배관의 중간부분(intermediate location)과는 달리 재료특성 뿐만 아니라 기하학적으로도 비대칭성이 존재하므로 Fig. 1과 같이 모델을 단순화시켜서 균열이 있는 배관의 탄소성 해석을 수행하는 것은 매우 보수적이며 현실적이지 못하다. 본 논문에서는 균열이 있는 배관의 탄소성 거동에 노즐이 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 노즐이 (1) J-적분값 계산에 미치는 영향, (2) 균열개구면적(crack opening area)에 미치는 영향, (3) 감지가능 균열크기(detectable leakage crack size)에 미치는 영향 및 (4) 안정성 평가

(stability evaluation)에 미치는 영향 등을 평가하였다.

3.2 배관 및 노즐 경계 부위에 대한 해석모델

본 논문에서는 노즐의 영향을 평가하기 위해서 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 3가지 경우에 대해서 해석을 수행하였으며 모든 경우에 대해서 현재 일반적으로 사용되는 단순모델(배관모델)과 배관-노즐 모델에 대한 해석을 동시에 수행하였다.

- CASE 1 : 배관 및 노즐이 모두 탄소강인 경우
- CASE 2 : 배관은 스테인레스강이고 노즐은 탄소강인 경우
- CASE 3 : 배관은 스테인레스강이고 노즐은 강체인 경우

CASE 1에 대한 해석은 단지 기하학적 비대칭성만 고려한 경우에 대한 해석이며, CASE 2는 기하학적 비대칭성 및 재료의 비대칭성이 동시에 존재하는 경우에 대한 해석이다. CASE 3는 매우 극한적인 경우로서 노즐을 완전강체로 가정하여 노즐의 영향을 극대화하였다. 모든 경우 배관의 직경은 304.8 mm (12 inch)로 가정하였으며 원주방향으로 $\alpha=30^\circ, 38^\circ, 62^\circ$, 및 72° 크기의 균열에 대해 탄소성해석을 수행하였다.

본 논문에서는 비선형전문 해석 코드인 CE-MARC를 이용하여 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 3(a) 및 (b)는 해석에 사용된 유한요소 모델이

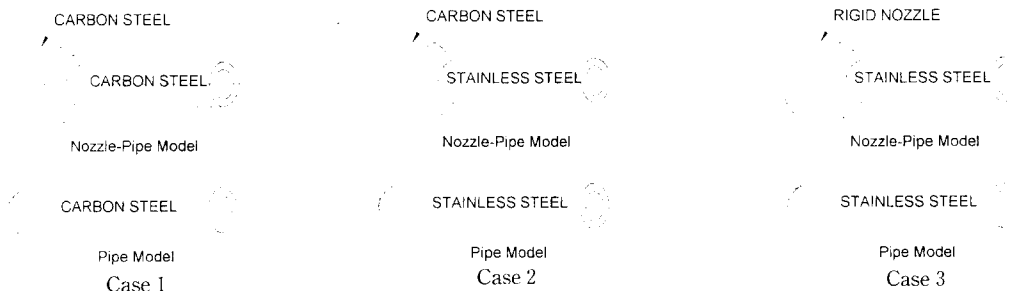


Fig. 2 Material used for the three cases

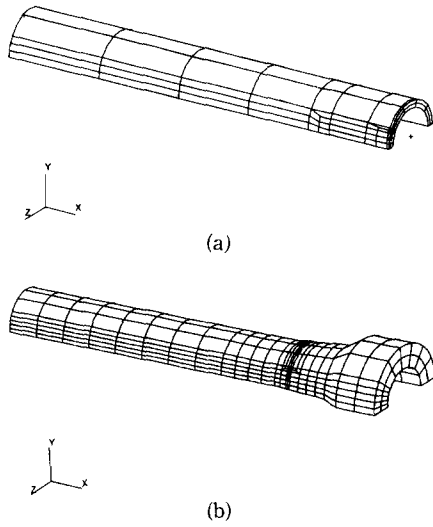


Fig. 3 Finite element meshes used for analyses

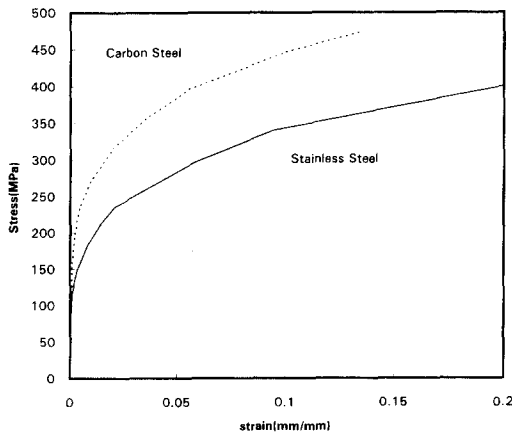


Fig. 4 Stress-strain curve used in analyses

며, Fig. 4는 본 논문에서 사용한 탄소강 및 스테인레스강에 대한 응력-변형률 곡선이다.

4. 배관 및 노즐 경계 부위에 대한 평가 및 결과

4.1 작용하중에 의한 J-적분값에 미치는 영향

작용하중에 따른 J-적분값은 가상균열진전법 (virtual crack extension method)를 이용하여 결정하였다. 즉,

$$J = (1/t) (dU/da) \tag{1}$$

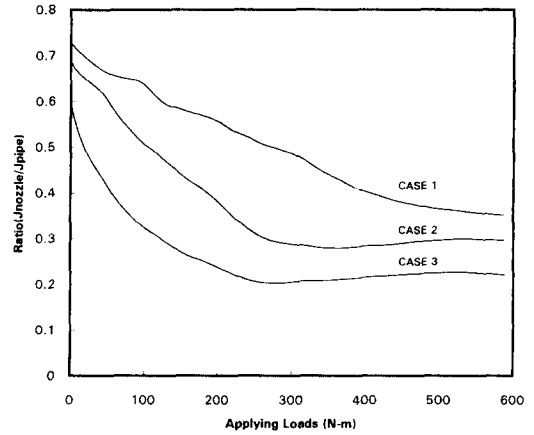


Fig. 5 J-ratio for 30° crack angle

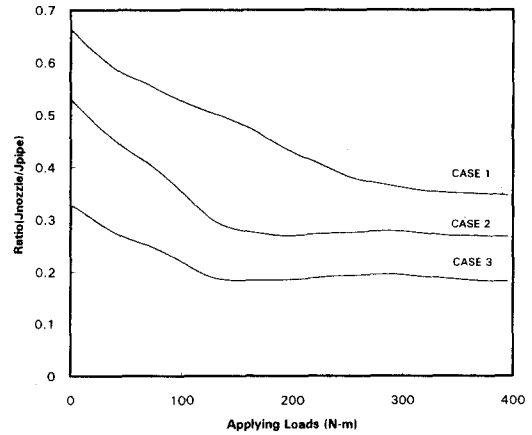


Fig. 6 J-ratio for 64° crack angle

여기서, dU 는 변형률 에너지해방률, da 는 균열선단에서의 가상변위이며 t 는 배관의 두께이다. dU 를 결정하기 위해서 3차원 탄소성해석시 균열선단 주위의 절점에 균열의 개구방향으로 가상변위를 작용시켰다. 가상변위의 크기는 균열선단에 위치한 요소의 약 10^{-3} 정도에 해당하는 크기로 하였으며⁽¹²⁾ 해방되는 에너지 U 는 다음 식에 의하여 계산하였다.^(13~15)

$$U = \int_V \left(\sigma_{\alpha\beta} \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} - W \sigma_{\alpha\beta} \right) \frac{\partial \Delta x_\beta}{\partial x_\beta} dV + \int_V \sigma_{\alpha\beta} \frac{\partial \theta_{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} \Delta x_\beta dV - \int_S t_\alpha \frac{\partial u_\alpha}{\partial x_\beta} \Delta x_\beta dS \tag{2}$$

윗식에서 첫번째 항은 적분영역 외부에서 작용하는

하중에 의한 에너지해방률이며, 두번째 항은 적분 영역 내부의 온도구배로 인한 영향으로서 균열선단에서의 에너지해방률에 영향을 미친다. 세번째 항은 균열면에 작용하는 하중에 의한 에너지해방률 성분을 나타낸다.

Figs. 5~8은 작용하중의 크기에 따라 노즐이 J-적분값에 미치는 영향을 각각의 경우에 대해서 나타낸 그림이다. 하중은 균열주위에서 배관반경의 약 10배만큼 떨어진 지점에 굽힘모멘트의 형태로 미소 증분씩 나누어 작용하였다. 그림에서 *J*pipe는 배관 모델에 대한 탄소성해석으로부터 계산된 J-적분값이며, *J*nozzle은 배관-노즐모델에 대한 탄소성해석으로부터 얻은 J-적분값이다. 그림에서 나타내고 있는 바와 같이 작용하중 및 노즐의 강성도가 증가할수록 *J*nozzle/*J*pipe의 비가 감소하는 것을 알 수 있으며 작용하중의 크기가 임의의 크기 이상이 되

면 *J*nozzle/*J*pipe의 비가 일정한 값으로 수렴하는 것으로 나타났다. 또한 하중의 증가에 따라 수렴되는 *J*nozzle/*J*pipe의 비는 노즐의 강성도가 클수록 작아지는 경향을 보이고 있으며 약 0.2~0.4 정도 범위의 값을 나타내고 있다.

Fig. 7 및 8은 균열의 크기에 따른 *J*nozzle/*J*pipe의 비를 나타내고 있다. 그림에서 보면 균열이 크기가 증가할수록 *J*nozzle/*J*pipe의 비가 감소하는 경향을 보이고 있으며 하중이 크기에 따라 그 비가 선형적으로 감소하다가 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 결과는 배관 및 노즐 경계면에 대한 LBB 해석시 배관-노즐모델을 사용하지 않고 배관모델을 이용하는 경우(J-적분값 계산 측면에서) 최소 약 1.4배에서 최대 약 5배까지 보수적인 결과를 얻게 된다는 것을 의미한다. 여기서, *J*nozzle/*J*pipe의 비가 수렴하는 이유는 재료의 응력-변형률 거동과 관계가 있다고 판단된다. 즉 초기에는 배관재와 노즐재료의 응력-변형률곡선 기울기가 많은 차이가 있으나 변형률이 증가되면서 그 기울기에 큰 차이가 없다. (Fig. 4 참조) 즉, 하중이 증가하여 노즐부위에도 소성영역이 증가하게 되면 노즐의 응력-변형률곡선의 기울기가 배관재와 비슷하게 되어 탄소성거동이 일정한 비율로 나타나기 때문인 것으로 판단된다. $a=72^\circ$ 일 때 수렴하지 않는 이유는 노즐부위는 탄소성영역에 있는 반면 배관부분이 거의 완전소성 영역에 도달하여 이와 같은 균형이 깨어졌기 때문이라 판단된다.

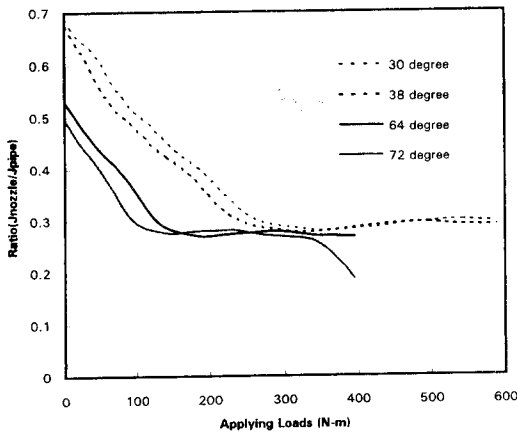


Fig. 7 J-ratio for different crack angle(case 2)

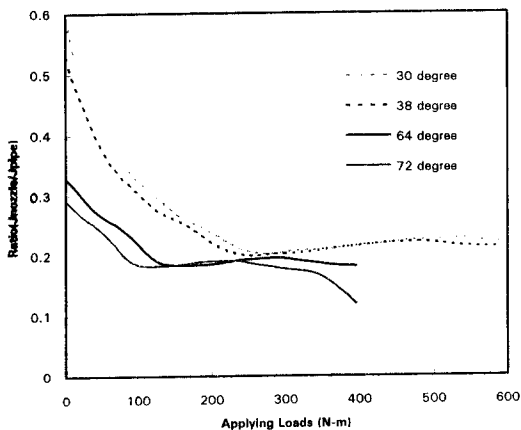


Fig. 8 J-ratio for different crack angle(case 3)

4.2 균열개구면적에 미치는 영향

균열개구면적은 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 작용하중으로 인해 벌어진 균열의 투영면적을 의미하며 유한요소해석을 통해서 계산된 균열면에서의 절점 변위를 이용하여 계산하였다.

Fig. 10은 배관모델 및 배관-노즐모델의 탄소성 유한요소해석으로부터 각각 얻은 균열개구면적을 비교한 그림이다. 그림에서 보면 두 모델간에 균열개구면적에서 많은 차이가 나는 것을 알 수 있으며 균열의 크기 및 작용하중의 크기가 클수록 균열개구면적의 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 배관-노즐모델이 주어진 하중하에서 배관모델과 동일한 크기의 균열개구면적을 갖기 위해서는 배관모델보다 더 큰 균열크기가 필요하다는 것을 의미한다. 즉 배관-노즐모델을 사용하여 LBB 해석을 할 경우 LBB 해석에 필요한 감지가능균열의 크기가

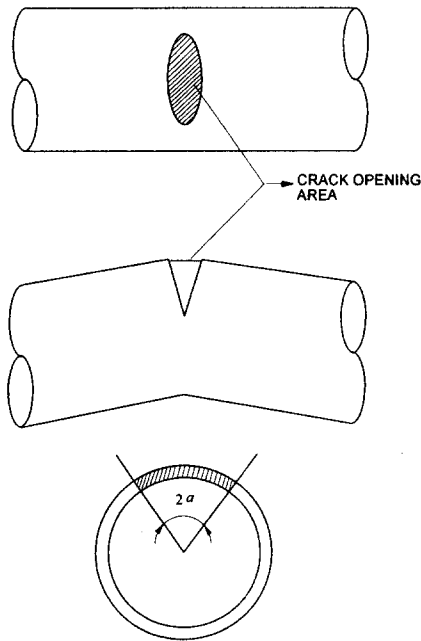


Fig. 9 Definition of crack opening area

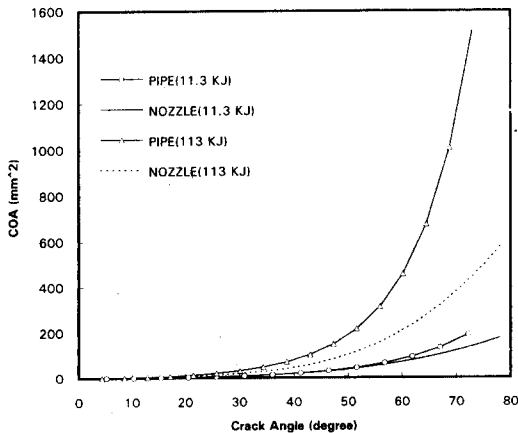


Fig. 10 Crack opening areas for applied load(case 2)

배관모형을 사용할 때보다 커지게 되므로 이를 고려하여 감지가능 균열크기를 결정하여야 한다. 따라서 배관-노즐의 경계면에 대해 LBB 해석을 하는 경우에는 노즐이 J-적분값 계산에 미치는 영향 뿐만 아니라 감지가능 균열의 크기에 미치는 영향을 동시에 고려하여야 한다는 것을 알 수 있다.

4.3 감지가능 균열크기에 미치는 영향

감지가능한 균열의 크기는 누설률 뿐만 아니라

주어진 크기의 균열을 통한 유체의 유출률(flow rate)과도 밀접한 관계가 있기 때문에 감지가능한 균열의 크기를 계산하기 위해서는 균열을 통한 유체의 유출률을 정확히 예측해야 한다. 그러나 유출률은 균열의 기하학적 구조뿐만 아니라 유체의 온도 및 균열단면의 표면조도(surface roughness)에 따라 좌우되기 때문에 이를 정확하게 예측하기가 매우 어려우며 문헌에 따라서는 많은 차이를 보이고 있다.^(10,16) 현재까지 알려진 바에 의하면 ERRI에서 개발한 PICEP(pipe crack evaluation program) 프로그램⁽¹⁰⁾이 가장 보수적인 값을 제공하는 것으로 알려져 있으며 발전소의 정상운전조건에서 약 146~204 l/min/cm² (250~350 gpm/in²)의 값을 제공한다. 그러나 PICEP 프로그램은 기본적으로 Fig. 1(c)와 같이 대칭적인 배관모델에 대한 균열크기만을 제공하므로 이를 이용하여 배관-노즐 경계면에서의 감지가능 균열크기를 직접 구할 수는 없으며 배관 및 노즐의 경계부위에 이를 이용하는 경우 균열크기가 실제보다 과대평가되어 LBB 해석에는 오히려 비보수적인 결과를 제공할 수도 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 PICEP 해석결과 및 별도의 유한요소 해석결과를 이용해서 배관-노즐 경계면에서의 감지가능 균열크기를 결정할 수 있는 방법을 개발하였다. 다음은 본 논문에서 개발한 계산절차이다.

Step 1 : PICEP을 이용하여 정상운전상태의 하중하에서 배관모델에 대한 감지가능 균열크기 및 균열개구면적을 결정한다.

Step 2 : 배관모델에 대해 계산된 감지가능 균열크기를 근거로 배관-노즐모델에 임의 크기의 균열을 가정하고 이에대한 3차원 탄소성 유한요소해석을 통해서 균열 개구면적을 계산한다.

Step 3 : 배관모델에 대한 균열개구면적과 배관-노즐모델에 대한 균열개구면적을 비교한다.

Step 4 : 배관-노즐모델의 균열크기를 변화시키면서 배관-노즐모델의 균열개구면적이 배관모델의 균열개구면적과 동일할 때의 균열크기를 구하고 이를 배관-노즐모델에 대한 감지가능 균열크기로 결정한다.

Fig. 11은 CASE 2에 대해 배관모델 및 배관-노즐 모델에 대한 감지가능 균열크기를 비교한 그림이다. 그림에서 보면 정상운전하중의 증가에 따라 감지가능 균열크기의 차이가 점차 커지는 것을 알 수 있으며 이 균열크기의 비는 Fig. 12와 같이 정

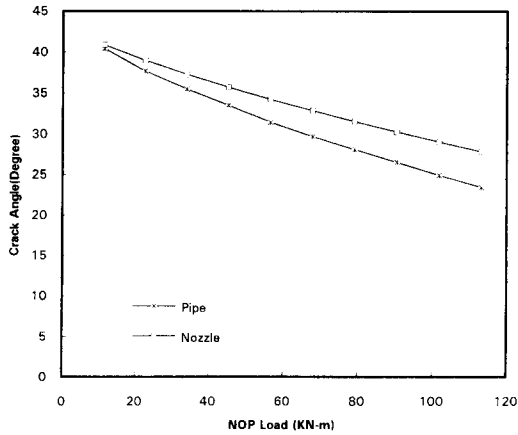


Fig. 11 Comparison of detectable leakage crack angle(case 2)

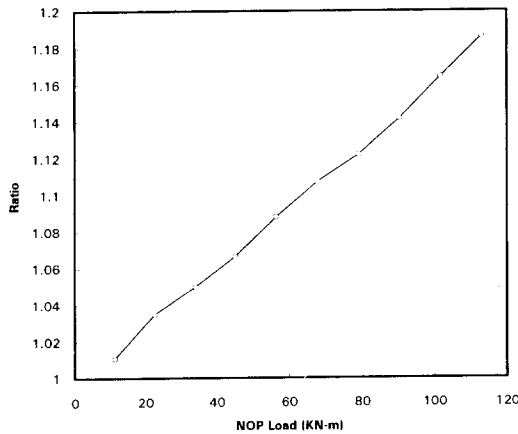


Fig. 12 Ratio of detectable leakage crack size for case 2(ratio=DLC_{nozzle}/DLC_{pipe})

상운전하중의 변화에 따라 선형적인 관계를 보이고 있다. 즉, 배관-노즐 경계면에서의 LBB 해석을 위해서는 현재 LBB 해석시 가정하는 감지가능 균열크기 보다 더 큰 크기의 균열을 가정해야 한다는 것을 나타내고 있다.

4.4 안정성 평가에 미치는 영향

노즐이 균열이 있는 배관의 안정성평가에 미치는 영향을 평가하기 위하여 J-T법을 이용하였다. 균열 전진을 고려한 탄소성해석을 위하여 참고문헌 (17)에서 제시한 방법을 이용하여 유한요소 모델링 및 해석을 수행하였으며 감지가능 균열길이에 미치는 영향 평가에서와 마찬가지로 CASE 2에 대해서만

본 영향을 평가하였다. J-T평가법에 대해서는 NUREG 1061, Vol. 3⁽⁹⁾에 구체적으로 기술되어 있으며 재료에 대한 J-적분값과 찢김계수(tearing modulus)의 관계를 작용하중에 의한 J-적분값과 찢김계수의 관계와 비교함으로써 안정성 여부를 평가하는 방법이다. 여기서, 찢김계수는 J-R 선도, 탄성계수(E) 및 유동응력(σ_f)을 이용하여 다음과 같이 정의되며 균열길이 변화에 따른 J-적분값의 변화율을 나타낸다.

$$T_{material} = \frac{E}{\sigma_f} \frac{dJ_{material}}{da} \tag{3a}$$

$$T_{applied} = \frac{E}{\sigma_f} \frac{dJ_{applied}}{da} \tag{3b}$$

여기서, $T_{applied}$ 는 작용하중에 의한 찢김계수이며 본 논문에서는 유한요소해석을 이용한 탄소성해석으로부터 결정하였다. 본 논문에서는 균열길이 a 에 대한 $T_{applied}$ 를 구하기 위하여 $a-\delta$, a , $a+\delta$ 의 균열길이를 가지는 3가지 유한요소 모델에 대하여 탄소성해석을 수행하였으며 해석결과를 이용하여 균열길이에 대한 J-적분값의 관계를 다음과 같은 2차식의 형태로 결정하였다.

$$J(a) = c_1 a^2 + c_2 a + c_3 \tag{3c}$$

여기서, δ 는 미소증분으로서 본 논문에서는 균열길이의 약 5~10% 정도로 가정하였으며 c_1 , c_2 및 c_3 는 임의의 상수이다. 한편, $T_{applied}$ 의 계산에 필요한 dJ/da 는 식 (3c)를 균열길이 a 에 대해서 미분함으로써 결정하였다.

$T_{material}$ 은 재료의 고유값으로서 일반적으로 ASTM-1152⁽¹⁸⁾에 의한 파괴저항(J-R)시험을 통해서 결정되며 재료의 파괴저항치를 나타낸다. 본 해석에서는 미국 MEA의 PIFRAC 데이터베이스⁽¹⁹⁾ 및 국내 원전 배관재료에 대한 재료시험결과를 근거로 하여 최소 파괴저항곡선⁽²⁰⁾을 결정하였으며 Fig. 13은 본 논문에서 사용된 파괴저항곡선이다.

따라서 균열이 있는 배관의 안정조건(stability criteria)은 다음의 수식으로 표시된다.

$$\frac{dJ_{applied}}{da} < \frac{dJ_{material}}{da} \tag{4}$$

본 논문에서는 노즐이 안정성 평가에 미치는 영향을 체계적으로 평가하기 위하여 Fabi 등⁽⁹⁾이 개발한 LBB 배관평가선도(PED: piping evaluation

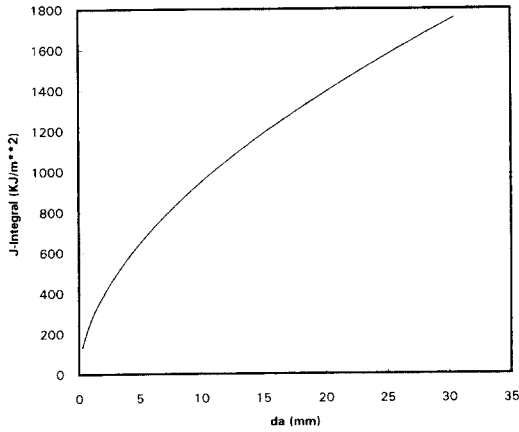


Fig. 13 J-R curve for stainless steel weld material

diagram) 개념을 도입하였다. 그러나 Fabi 등이 개발한 배관평가선도는 노즐의 영향을 고려하지 않고 있기 때문에 이를 직경이 작은 배관에 대한 LBB 평가에 직접 적용하는 것은 매우 보수적이라고 생각된다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 노즐이 균열이 있는 배관의 안정성 평가에 미치는 영향을 고려 할 수 있도록 배관-노즐 경계면에 대한 수정된 배관평가선도를 개발하였다. 배관평가선도 작성을 위한 안정성 평가는 NUREG 1061 Vol. 3⁽³⁾ 및 SRP 3.6.3⁽⁴⁾에서 규정하고 있는 기준에 따라 수행하였다. 다음은 배관-노즐 경계면에 대한 배관평가선도를 구하기 위하여 본 논문에서 개발한 절차이다.

Step 1 : 원자력발전소 운전중 예상되는 최소 및 최대 정상운전(NOP) 하중의 크기를 가정한다.

Step 2 : 가정된 최소 정상운전(NOP)하중 및 최대 정상운전 하중하에서 4.3에서 제시한 절차에 따라 10 gpm의 누설을 허용하는 감지가능 균열크기를 결정한다.

Step 3 : 각각의 균열크기에 대해서 유한요소해석을 수행하고 J-T법을 이용하여 안정성 평가를 수행한 후 각각의 균열크기에 대해서 배관-노즐 경계면에 작용할 수 있는 최대 허용 LBB 하중을 결정한다.

Step 4 : 최대 허용 LBB 하중이 결정되면 다음 식을 이용하여 각각의 균열크기에 대해 안전정지진(safe shutdown earthquake : SSE) 하에서의 최대허용하중을 결정한다.

- 감지가능한 크기의 균열을 가진 배관

$$M_{\max(i)} = \sqrt{2} (M_{SSE(i)} + M_{NOP(i)}) \tag{5a}$$

$$M_{SSE(i)} = M_{\max(i)} / \sqrt{2} - M_{NOP(i)} \tag{5b}$$

- 감지가능한 크기의 2배 균열을 가진 배관

$$M_{\max(i)} = M_{SSE(i)} + M_{NOP(i)} \tag{6a}$$

$$M_{SSE(i)} = M_{\max(i)} - M_{NOP(i)} \tag{6b}$$

여기서, *i* : 최소 또는 최대 정상운전하중

M_{SSE} : 안전정지진하에서의 하중

M_{NOP} : 정상운전상태에서의 하중

M_{max} : 최대 허용 LBB 하중

Step 5 : 식 (5b) 및 (6b)에서 결정된 하중 및 정상운전하중과 관계를 이용하여 LBB 배관평가선도를 작성한다.

Fig. 14는 LBB 적용을 위한 배관평가선도의 대표적인 그림이다. 만일 배관계의 최대응력이 발생하는 지점에서의 하중조합(정상운전하중 및 안전정

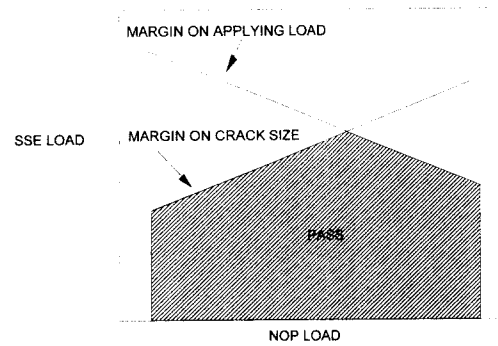


Fig. 14 Typical LBB evaluation diagram

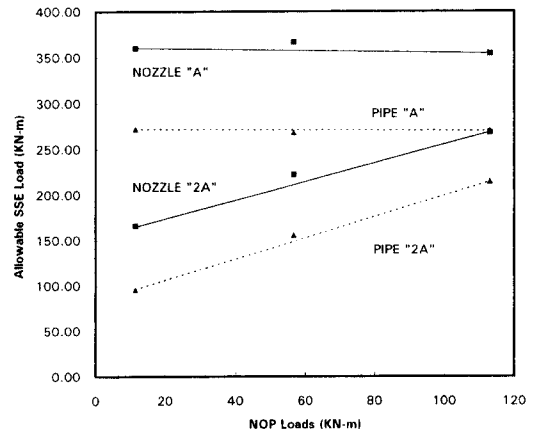


Fig. 15 PED for nozzle-pipe model and pipe model(case 2)

지지전하중 : NOP, SSE)이 그림의 빗금친 부분내에 있으면 LBB개념을 적용할 수 있으며 반대로 빗금친 부분을 벗어나면 그 배관계에는 LBB개념을 적용할 수 없다는 것을 의미한다. 이와 같은 배관평가선도는 배관의 설계 과정에서 이용될 수 있으며 LBB개념 적용을 위한 배관의 기하학적 구조 결정 및 각종 배관 지지구조물의 형태 및 종류를 결정하는데 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

Fig. 15는 CASE 2에 대해 앞의 절차에 따라 구해진 배관-노즐 경계부위에 대한 배관평가선도(NOZZLE "A" 및 NOZZLE "2A")를 배관모델을 이용해서 구한 배관평가선도(PIPE "A" 및 PIPE "2A")와 비교한 그림이다. 여기서, "A" 및 "2A"는 각각 감지가 가능한 크기의 균열을 가진 배관 및 감지가 가능한 크기의 2배 균열을 가진 배관을 의미한다. 이 그림에서 보면 배관모델을 사용하여 배관평가선도를 작성하는 경우 배관-노즐을 이용해서 얻은 배관평가 선도보다 약 20~60% 정도 보수적인 결과를 보이고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 직경이 작은 배관에서 노즐이 균열이 있는 배관의 파괴역학적 거동에 미치는 영향 및 LBB 해석에 미치는 영향을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 직경이 작은 배관에 대해 현재 일반적으로 사용되는 단순화된 해석모델인 배관모델을 이용하여 LBB 해석을 수행하는 것은 매우 보수적이며 노즐을 영향을 고려 한 배관-노즐모델을 사용하여 LBB 해석을 수행하는 것이 바람직하다.

(2) 노즐의 영향을 고려하여 LBB 해석을 하기 위해서는 노즐로 인한 J-적분값의 감소뿐만 아니라 배관 및 노즐의 강성도(stiffness)차이로 인한 균열 개구면적의 감소현상을 고려하여 해석을 수행해야 한다.

(3) 본 논문에서는 배관 및 노즐 경계부위의 LBB 평가에 필요한 수정된 배관평가선도를 개발하였으며 이를 직경이 작은 배관계에 대한 LBB 평가에 적용함으로써 LBB 해석상 많은 여유를 확보할 수 있고 보다 많은 배관에 파단전 누설개념을 확대 적용할 수 있다.

(4) 직경이 큰 배관에 대해서도 노즐의 영향을

평가하여 일반적인 LBB 해석의 개선방안을 개발해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) Woo, H. H., Holman, G. S. and Chou, C. K., 1984, "Failure Probability of PWR Reactor Coolant Loop Piping," *LLNL Report UCRL-86249*.
- (2) 10 CFR 50, 1985, Appendix A, "General Design Criterion 4," July.
- (3) NUREG-1061, 1984, "Evaluation of Potential for Pipe Break," Vol. 3.
- (4) NRC, 1987, *Leak Before Break Evaluation Procedure*, Draft Standard Review Plan 3.6.3.
- (5) Paris, P. C. and Tada, H., 1983, "The Application of Fracture-Proof Design Methods Using Tearing-Instability Theory to Nuclear Piping Postulating Circumferential Through-Wall Cracks," *NUREG/CR-3464*.
- (6) Smith, E., 1993, "The Effect of Axial Forces on the Conservatism of the Net-Section Stress Criterion for the Failure of Cracked Stainless Steel Piping," *SMiRT12, G05/1*, pp. 57~62.
- (7) Yu, Y. J., Kim, Y. and Park, S. H., 1993, "Evaluation of Large Leakage Crack Effect on the Distribution of Loads in a Small Diameter Pipe," *SMiRT12, G05/4*, pp. 75~79.
- (8) Yu, Y. J., Park, S. H., Sohn, G. H., Kim, Y. J. and Urko, W., 1995, *Application of LBB to a Nozzle-Pipe Interface*, Specialist Seminar on LBB in Reactor Piping and Vessels.
- (9) Fabi, R. J. and Peck, D. A., 1994, "Leak Before Break Piping Evaluation Diagram," *Presented at The 1994 PVP Conference, PVP*, Vol. 283, pp. 111~115.
- (10) Norris, D. M. and Chexal, B., 1987, "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program," *EPRI NP 3596-SR*.
- (11) Kumar, V., German, M. D. and Shih, C. F., 1981, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis," *EPRI NP-1931*.
- (12) Parks, D. M., 1974, "A Stiffness Derivative Finite Element Technique For Determination of

- Elastic Crack Tip Stress Intensity Factors," *International Journal of Fracture*, Vol. 10, No. 4, pp. 487~502.
- (13) Parks, D. M., 1977, "The Virtual Crack Extension Method for Nonlinear Material Behavior," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 12, pp. 353~364.
- (14) DeLorenzi, H. G., 1982, "On the Energy Release Rate and the J-Integral for 3-D Crack Configurations," *International Journal of Fracture*, 19, pp. 183~193.
- (15) Bass, B. R. and Bryson, J. W., 1983, "Energy Release Rate Techniques for Combined Thermo-Mechanical Loading," *International Journal of Fracture*, 22, R3-R7.
- (16) NUREG/CR-1319, 1980, "Cold Leg Integrity Evaluation," Battelle Columbus Lab.
- (17) 유영준, 최석남, 김 일, 1993, "균열진전을 고려한 탄소성 파괴역학 해석 방안 개발," 대한기계학회 춘계학술대회논문집, pp. 121~124.
- (18) ASTM 1152, "Standard Test Method for Determining J-R Curves," American Society for Testing and Materials.
- (19) PIFRAC Data Base, Material Engineering Associates, Inc.
- (20) 석창성, 최용식, 김영진, 장운석, 김종욱, 1994, "영광 원자력 배관소재의 재료물성치 평가 (I)," 대한기계학회논문집, pp. 1106~1116.