

안전주입 및 정지냉각 배관의 LBB 적용을 위한 배관평가선도 개발

허남수, 서명원, 김영진
성균관대학교
표창률
인덕전문대학
박상덕
한국전력공사 전력연구원

요약

원전 배관계통에 LBB를 적용하면 배관파단으로 인한 동적영향(dynamic effect)을 고려하지 않아도 되므로 각종 구조물의 설계가 단순해지고, 배관파단에 대비해 설치하였던 각종 지지구조물들을 제거할 수 있으므로 설계비용 절감 등 경제적 이점을 얻을 수 있다. 본 논문의 목적은 차세대원전 안전주입 및 정지냉각계통 배관에 대해 설계초기단계에서 LBB적용 여부를 판단할 수 있는 배관평가선도를 개발하는 것이다. 이를 위해 먼저 배관재료의 응력-변형률곡선을 사용하여 감지가 가능한 균열길이를 산출하였으며, 3차원 유한요소해석과 배관재료의 파괴저항곡선을 이용한 균열안정성평가를 수행하여 배관평가선도를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 배관평가선도를 배관설계초기단계에 사용하면 LBB적용여부로 인한 설계변경과정이 불필요하므로 전체공기를 단축할 수 있으며, 특정한 배관계통이 아닌 일반 배관계통에 적용할 수 있으므로 LBB해석회수를 상당히 줄일 수 있다.

1. 서론

현재 사용되고 있는 파단전누설(Leak-Before-Break : LBB) 해석방법[1]은 배관계통의 기하학적 구조 및 지지구조물의 형태를 결정한 후, 배관계통 해석에서 구한 하중을 이용하여 수행한다. 만일 대상 배관계통이 LBB 조건을 만족하지 못하면 지지구조물의 추가 및 변경설치 또는 배관계통의 기하학적 구조의 재설계가 불가피하며, 이로 인해 전체 공기에 큰 영향을 미칠 수 있다. 또한, 수행된 LBB 해석결과는 특정배관에 대해서만 적용 가능하며, 동일 재질 및 크기의 배관계통에 대해서도 기하학적 구조나 지지구조물의 위치 및 형태가 변경된 경우에는 재해석을 해야 한다. LBB 해석시 정상운전(Normal Operation : NOP) 하중은 감지 가능한 균열크기를 구할 경우에 사용하며, 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake : SSE) 하중은 균열이 존재하는 배관의 안정성평가에 사용한다. 따라서 NOP 하중과 SSE 하중 사이의 관계를 정량적으로 계산함으로써 주어진 배관의 재질 및 치수에 따라 LBB 적용이 가능한 하중조합을 결정할 수 있다. 이를 이용하여 NOP 하중과 SSE 하중의 관계를 도표로 작성

하면 주어진 배관계통의 재질 및 치수에 대한 LBB 적용에 필요한 각 위치에서의 허용하중을 배관설계 단계에서 쉽게 구할 수 있으므로 배관설계자와 LBB 해석자간의 설계변경과정이 불필요하여 전체공기를 단축할 수 있다. 또한 배관의 기하학적 구조나 지지 구조물의 형태에 무관하고 특정한 배관계통이 아닌 일반 배관계통에 적용할 수 있으므로 LBB 해석회수를 상당히 절감할 수 있다.

본 연구의 목적은 차세대원자력발전소의 안전주입(Safety Injection) 및 정지냉각(Shutdown Cooling) 계통 배관설계에 이용할 수 있는 LBB평가선도를 개발하는 것이다.

2. LBB 평가선도의 개발절차

평가선도를 개발하기 위한 해석 방법 및 절차는 LBB설계에 기준이 되는 절차서인 NUREG 1061, Vol.3[1]와 Standard Review Plan 3.6.3[2]에 근거한다. 또한 LBB평가선도 개발에 필요한 재료물성치 데이터는 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 LBB 재료시험결과[3,4]를 데이터베이스화하여 구하였다. 일반적인 LBB 해석법은 감지가능한 누설균열길이(Detectable Leakage Crack : DLC)의 결정에는 인장실험 결과중 모재의 best-fit 선도를 사용하고, 균열안정성 평가에는 파괴저항 특성으로 용접재의 lower bound 선도, 인장특성도 모재의 lower bound 선도를 사용한다. 그러나 본 연구에서는 추가적인 실험으로 인한 $\sigma - \epsilon$ 곡선의 변동에도 충분한 여유를 확보할 수 있도록 하기 위하여 탄소성 유한요소해석을 이용한 균열안정성평가(crack stability evaluation)시 Table 1과 같은 다양한 $\sigma - \epsilon$ 곡선을 사용하였다.

Table 1 Combination of $\sigma - \epsilon$ curves

	Determination of DLC	Crack stability evaluation
$\sigma - \epsilon$ curve	Best-fit	Upper bound
		Best-fit
		Lower bound

2.1 해석조건

해석대상은 원자력발전소 2차계통인 안전주입 및 정지냉각계통 배관으로 재질, 크기 및 가동온도에 따라서 Table 2와 같이 분류하였다.

Table 2 Grouping for characteristics of each system

Group	System	Material	O.D. (mm)	Thickness (mm)	Temp. (°F)
1	SI	SA312 TP316	324	33.3	120
2	SI	SA312 TP316	356	35.7	565
3	SI	SA312 TP316	273	28.6	565
4	SI	SA312 TP304	356	9.5	122
5	SC	SA312 TP316	406	40.5	621

2.2 NOP 하중

본 연구에서 사용한 최소 및 최대 NOP 하중의 범위는 이미 설계가 완료된 원전의 각 배관에 대한 정적·동적 배관해석을 통하여 구한 하중을 기준으로 하여 가능한 넓은 해석범위를 선택하였다.

2.3 누설균열길이

배관의 파괴역학적 안정성 여부를 평가하기 위하여 발전소의 정상운전중 누설감지장치를 통하여 감지할 수 있는 누설량인 1gpm에 10배의 안전여유를 고려한 10gpm의 누설량에 해당하는 크기를 DLC로 결정하였다. 이때 DLC의 크기는 EPRI에서 개발한 PICEP 프로그램[5]을 이용하여 구하였다.

2.4 탄소성 유한요소 해석

균열안정성 평가를 위한 탄소성 유한요소해석에는 ABAQUS를 이용하였다. DLC 크기의 균열을 가정한 경우에는 $\sqrt{2}(\text{NOP}+\text{SSE})$ 의 하중을, 2배의 DLC 크기의 균열을 가정한 경우에는 $(\text{NOP}+\text{SSE})$ 의 하중을 가하여 J-적분값을 계산하였다.

2.5 J/T 해석

USNRC에서는 안정성 평가법으로 J/T법을 추천하고 있는데, J/T법은 식 (1)과 같이 재료에 대한 J-적분($J_{mat.}$)과 찢김계수(tearing modulus)의 관계를 작용하중에 대한 J-적분($J_{app.}$)과 찢김계수의 관계와 비교함으로써 균열이 있는 배관의 안정성을 평가하는 방법이다.

$$\frac{dJ_{app.}}{da} (= T_{app.}) < \frac{dJ_{mat.}}{da} (= T_{mat.}) \quad (1)$$

파괴저항값인 $J_{mat.}$ 는 파괴저항측정시험에 의하여 얻은 데이터를 다음 식과 같이 곡선적합하여 균열길이 (a)의 함수로 나타내어 구한다.

$$J_{mat.} = C_1(\Delta a)^{C_2} \quad (2)$$

탄소성 유한요소해석으로 주어진 하중에 대한 $J_{app.}$ 를 구할 때에는 균열길이에 대한 정확한 J-적분의 변화율을 알기 위하여 가상균열길이 $a-\delta$, a , $a+\delta$ 와 $2a-\delta$, $2a$, $2a+\delta$ 에 대해 각각 해석을 수행하여 J-적분과 균열길이의 관계를 식 (3)과 같이 2차 다항식으로 나타내어 구한다.

$$J_{app.} = C_1a^2 + C_2a + C_3 \quad (3)$$

2.6 SSE 하중

SSE 하중은 NUREG 1061, Vol.3에 제시되어 있는 기준에 따라 다음의 식을 이용하였다.

균열길이 a에 대한 평가 ;

$$M_{total} = \sqrt{2} [M_{NOP} + M_{SSE} + M_{etc}],$$

$$SSE \text{ Load} = (M_{SSE} + M_{etc}) = \frac{M_{total}}{\sqrt{2}} - M_{NOP} \quad (4)$$

균열길이 2a에 대한 평가 ;

$$M_{total} = [M_{NOP} + M_{SSE} + M_{etc}],$$

$$SSE \text{ Load} = (M_{SSE} + M_{etc}) = M_{total} - M_{NOP} \quad (5)$$

2.7 LBB 평가선도 작성

각 배관계에 대해 가정한 최소 및 최대 NOP 하중상태에서 LBB해석을 수행하여 LBB적용이 가능한 최대허용하중(M_{max})을 구하여, 이 값을 식(4)와 (5)에 대입하여 허용가능한 SSE 하중을 구하였다.

3. LBB 평가선도의 개발

Fig. 1~5는 본 연구에서 구한 안전주입 및 정지냉각계통 배관에 대한 LBB 평가선도이다. LBB 평가선도에서 균열길이 a와 2a의 아래부분이 안정조건을 만족하는 LBB적용이 가능한 영역이다. 얻어진 LBB 평가선도에서 배관의 직경과 두께가 두꺼울수록 LBB 적용가능영역이 크게 나타났다. 그러나, Group 1 배관은 직경과 두께가 Group 2의 값보다 작지만 LBB 적용가능영역은 Group 1의 경우가 더 큰 결과를 얻었다. 이와같은 결과는 가동온도의 차이로 인해 Group 1의 항복용력이 Group 2의 항복용력보다 크기 때문이라고 생각된다. 따라서 항복용력이 클수록 LBB 적용가능영역이 더 넓어지는 것을 알 수 있다. 또한 LBB 평가선도에서 NOP 하중이 작은 경우에는 균열길이 2a인 경우가 LBB 적용가능영역에 큰 영향을 미쳤으며, NOP하중이 큰 경우에는 균열길이 a인 경우가 LBB 적용가능영역에 큰 영향을 미쳤다. 본 연구에서 개발한 평가선도는 ABB-CE에서 개발한 System 80+의 배관계통에 대한 평가선도와 비교적 잘 일치하여 본 해석의 타당성이 입증되었다.

Fig. 6은 균열길이 a인 경우, Group 1 배관계통에 대하여 균열안정성 평가시 $\sigma - \epsilon$ 곡선이 배관평가선도에 미치는 영향을 평가한 결과이다. 해석결과 Group 1~Group 5 모두 동일한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이때 lower bound 선도를 이용한 평가법이 가장 보수적인 결과를 가져오는 것으로 판명되어 기존 LBB 해석법의 타당성이 입증되었다.

4. 결론

차세대 원자력발전소 안전주입 및 정지냉각계통 배관에 LBB를 적용하기 위한 평가선도 개발연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 배관의 직경과 두께가 클수록 LBB적용이 가능한 영역이 증가하였다.
- (2) 배관재료의 항복응력이 높을수록 LBB 적용이 가능한 영역이 증가하였다.
- (3) NOP 하중이 작은 경우에는 균열길이 2a인 경우가 LBB 적용가능영역에 큰 영향을 미쳤으며, NOP 하중이 큰 경우에는 균열길이 a인 경우가 LBB 적용가능영역에 큰 영향을 미쳤다.
- (4) 균열안정성 평가시 모재의 Lower bound $\sigma - \epsilon$ 곡선값을 사용하여 해석한 결과가 가장 보수적이다.

5. 참고 문헌

- [1] "Evaluation of Potential for Pipe Break", NUREG 1061 Vol.3, USNRC, 1984.
- [2] "Leak Before Break Evaluation Procedure", SRP 3.6.3, USNRC, 1987.
- [3] 김영진, 석창성, "영광 원자력발전소 3/4호기용 2차계통 배관소재의 응력변형 및 파괴저항특성", 성균관대 연구보고서, 1992.
- [4] 김영진, 석창성, "울진 원자력발전소 3/4호기용 2차계통 배관소재의 LBB 시험평가", 성균관대 연구보고서, 1996.
- [5] D.M. Norris, B. Chexal, "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program", EPRI Report NP 3596-SR, 1987.

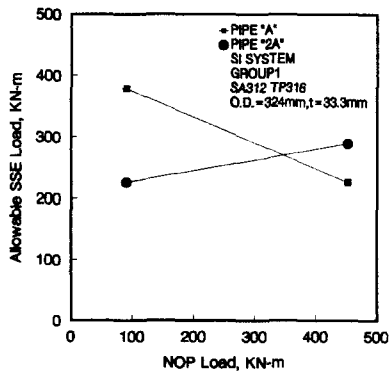


Fig. 1 LBB evaluation diagram(for group1)

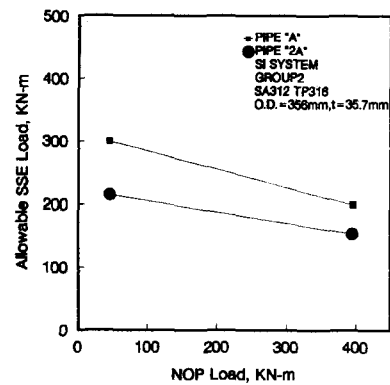


Fig. 2 LBB evaluation diagram(for group2)

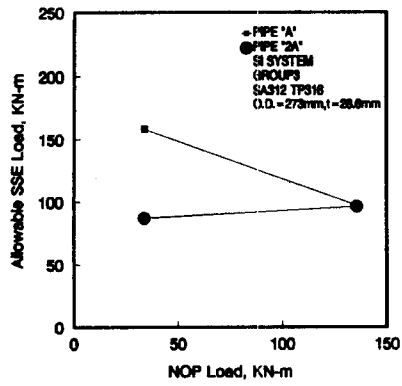


Fig. 3 LBB evaluation diagram(for group3)

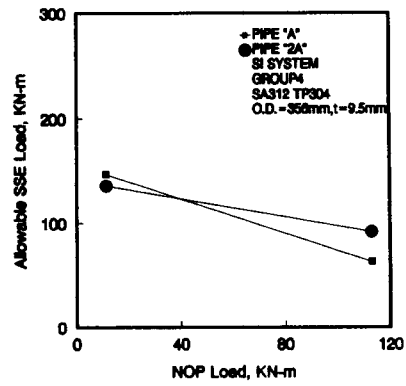


Fig. 4 LBB evaluation diagram(for group4)

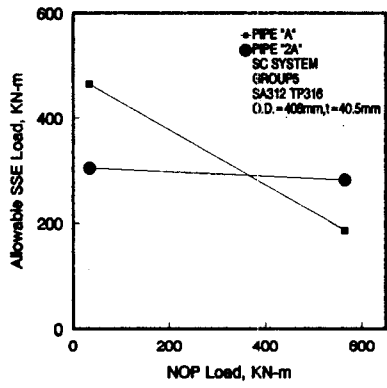


Fig. 5 LBB evaluation diagram(for group5)

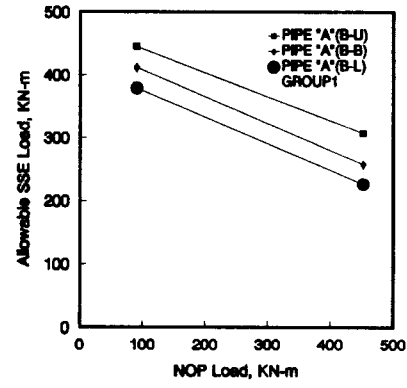


Fig. 6 Comparison of $\sigma - \epsilon$ combination (for group1)