

## 원전 배관의 LBB 개념 적용을 위한 간략 설계기법 개발

### Development of a Simplified Design Method for LBB Application to Nuclear Piping

허남수\* · 이철형\* · 김영진\* · 석창성\* · 표창률\*\*

N.S. Huh · C.H. Lee · Y.J. Kim · C.S. Seok · C.R. Pyo

(1999년 2월 3일 접수, 1999년 5월 26일 채택)

#### ABSTRACT

If the Leak-Before-Break (LBB) concept is applicable to the nuclear piping design, it is not necessary to consider the dynamic effect due to pipe rupture. Therefore, the construction cost can be significantly reduced by eliminating unnecessary pipe whip restraints and jet impingement devices. The objective of this paper is to develop the Piping Evaluation Diagram (PED) for efficient application of LBB concept to piping system at an initial piping design stage. For this purpose, the 3-D finite element analyses were performed to evaluate the crack stability. And the stress-strain curve based on the pipe material tests were used to calculate the detectable leakage crack length. Finally, the present PED which was composed as a function of NOP load and allowable SSE load, was developed for an application of LBB concept to the safety injection and shutdown cooling line in Korean Next Generation Reactor (KNGR).

#### 1. 서론

원자력발전소의 배관설계에 LBB 개념을 적용하면 배관파단으로 인한 동적영향(dynamic effect)을 고려하지 않아도 되므로 각종 구조물의 설계가 단순해지고, 배관파단에 대비해 설치

되었던 여러 가지 지지구조물들을 제거할 수 있기 때문에 설계에 소요되는 비용을 크게 절감할 수 있는 이점이 있다.

현재 사용되고 있는 LBB 해석방법<sup>1)</sup>은 배관계통의 기하학적 구조 및 지지구조물의 형태를 결정한 후, 배관계통 해석에서 구한 하중을 이용

\* 성균관대학교 기계공학부

\*\* 인덕대학 기계과

하여 수행한다. 만일 대상 배관계통이 LBB 조건을 만족하지 못하면 지지구조물의 추가 및 변경설치 또는 배관계통의 기하학적 구조의 재설계가 불가피하며, 이로 인해 전체 공기에 미치는 영향이 매우 크다. 또한, 수행된 LBB 해석결과는 특정배관에 대해서만 적용 가능하며, 동일 재질 및 동일 크기의 배관계통에 대해서도 기하학적 구조나 지지구조물의 위치 및 형태가 변경된 경우에는 재해석을 해야 한다.

LBB 해석 및 결과에 영향을 미치는 주요 인자는 배관계통의 각 부분에 작용하는 하중의 크기 및 재료물성치이다. LBB 해석시 정상운전(Normal Operation; NOP) 하중은 감지가 가능한 누설균열(Detectable Leakage Crack; DLC)길이를 구할 경우에 사용되며, 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake; SSE) 하중은 균열이 존재하는 배관의 안정성평가에 사용된다. 따라서 NOP 하중과 SSE 하중 사이의 관계가 정량적으로 계산되면 주어진 배관의 재질 및 치수에 따라 LBB 개념이 적용 가능한 하중조합이 결정될 수 있다. 이를 이용해 NOP 하중과 SSE 하중의 관계가 도표로 작성되면 배관설계자는 주어진 배관계통의 재질 및 치수에 대해 LBB 개념 적용에 필요한 각 위치의 허용하중을 쉽게 구할 수 있다.

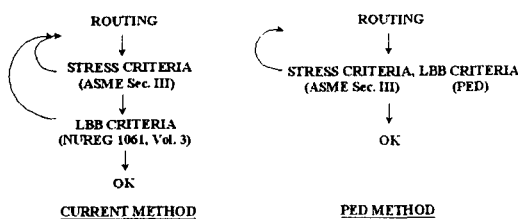


Fig. 1 Comparison of pipe design methods for LBB application

Fig. 1은 원전 배관에 LBB 개념을 적용하기 위한 현재의 배관 설계 절차와 배관평가선도를 이용한 배관 설계 절차를 비교하여 나타낸 것이다. 배관평가선도를 이용하여 배관계통을 설계할 경우, 배관 각 위치에 작용하는 하중의 크기가 LBB 개념 적용에 필요한 허용하중 범위 내에서 설정될 수 있으므로 배관설계자와 LBB 해

석자간의 설계변경과정이 불필요하여 전체공기를 단축할 수 있다. 또한 LBB 해석결과는 배관의 기하학적 구조나 지지 구조물의 형태에 무관하고 특정한 배관계통이 아닌 일반 배관계통에 적용될 수 있으므로 LBB 해석회수가 상당히 절감된다.

현재 원자력발전소의 배관설계 초기단계에 LBB 개념을 적용하기 위한 많은 연구가 수행되고 있다. Nana와 Yoon<sup>2)</sup>은 배관의 설계초기과정에서 배관설계자가 배관 각부에 발생하는 최대하중 및 최소하중을 이용하여 쉽게 LBB 개념 적용가능성을 판단할 수 있는 "Allowable Load Window"를 제안하였다. 또한 Fabi 등<sup>3,4)</sup>은 NOP 하중과 SSE 하중의 관계를 이용하여 간단하게 LBB 개념 적용가능 여부를 판단할 수 있는 "PED(Piping Evaluation Diagram)"를 제안하였다. Swamy등<sup>5)</sup>은 정상운전상태에서의 발생응력과 최대응력을 이용하여 쉽게 LBB 개념 적용가능성을 판단할 수 있는 "BAC(Boundary Analysis Curve)"를 제안하였다. 그러나 이들이 제시한 방법은 평가선도 개발에 사용된 재료성질과 실제 배관의 재료성질이 차이가 나는 경우, 이 차이가 LBB 해석결과에 미치는 영향을 평가할 수 없다는 단점이 있다.

본 연구에서는 차세대 원자력발전소의 안전주입(Safety Injection) 및 정지냉각(Shutdown Cooling) 배관의 설계초기단계에서 쉽게 LBB 개념 적용가능성을 예측할 수 있는 배관평가선도를 개발하고, 다양한 응력-변형을 곡선을 사용한 배관평가선도를 추가로 개발하여 응력-변형률 곡선의 변화가 LBB 해석결과에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 재료물성치 데이터베이스의 개발

본 연구에서는 배관평가선도의 개발에 앞서 국내에서 수행된 원자력배관 재료물성치 시험결과를 바탕으로 하여 원전배관 재료물성치 데이터베이스(NUclear PIPing Material database; NUPIIM database)를 구축하였다. 데이터베이스 구축의 목적은 산재해 있는 재료물성치 측정시험 결과를 통합하여 배관평가선도를 개발하는데

필요한 각 재질별 응력-변형률 곡선과 파괴저항 곡선을 구하는 것이다.

### 2.1 NUPIM의 구조

NUPIM의 구성에는 지능형 데이터베이스(intelligent database) 방식을 이용하였다. 즉 데이터베이스와 추론기관을 연결하여 필요한 데이터를 보다 정확하고 신속하게 찾을 수 있도록 하였다. 또한 NUPIM에서는 데이터베이스 관리시스템(DataBase Management System; DBMS)을 이용하여 저장된 데이터를 검색하도록 하였다. 여기서 사용되어진 데이터는 국내에서 수행된 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 2차계통 배관의 재료물성치<sup>6,7)</sup>이다. NUPIM에는 재료명, 용접방법, 시편방향 및 가동온도를 기준으로 하여 인장시험 데이터와 파괴저항시험 데이터가 데이터 파일의 형태로 수록되어있다.

### 2.2 NUPIM의 검색방법

본 연구에서 개발한 NUPIM에서는 사용하고 자 하는 재료에 대한 검색조건을 입력하면 그와 관계되는 모든 데이터를 불러들여 데이터를 참조하거나 필요한 데이터만을 검색할 수도 있다. 따라서 배관평가선도 개발에 필요한 응력-변형률 곡선과 파괴저항곡선이 간단하게 구해진다.

NUPIM의 검색조건 입력화면은 재료명, 재료종류, 용접방법, 원전발전소, 항복강도, 인장강도, 탄성계수, 실험온도, 배관크기, 배관두께, 변형률 속도, 하중속도의 모두 12개의 메뉴로 구성되어 있다. Fig. 2는 NUPIM을 이용하여 응력-변형률 곡선을 검색한 결과이다.

### 3. 배관평가선도의 개발절차

배관평가선도를 개발하기 위한 해석절차는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 크게 7단계로 구분된다. 1단계에서는 LBB 개념을 적용할 배관을 계통, 재질, 크기 및 가동온도로 구분한다. 2단계에서는 배관계에 대한 정적·동적 해석을 통해 구한 하중을 바탕으로 배관의 NOP 하중의 범위를 결정한다. 3단계에서는 PICEP 프로그램<sup>8)</sup>을

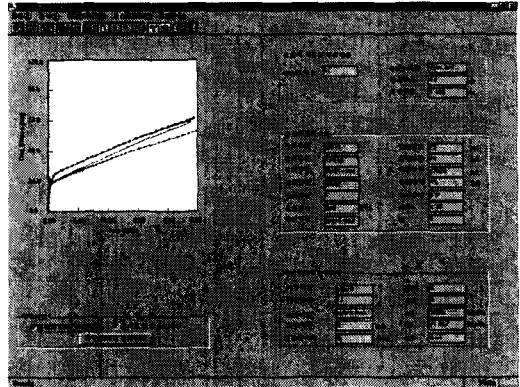


Fig. 2 Stress-strain curves obtained from NUPIM database

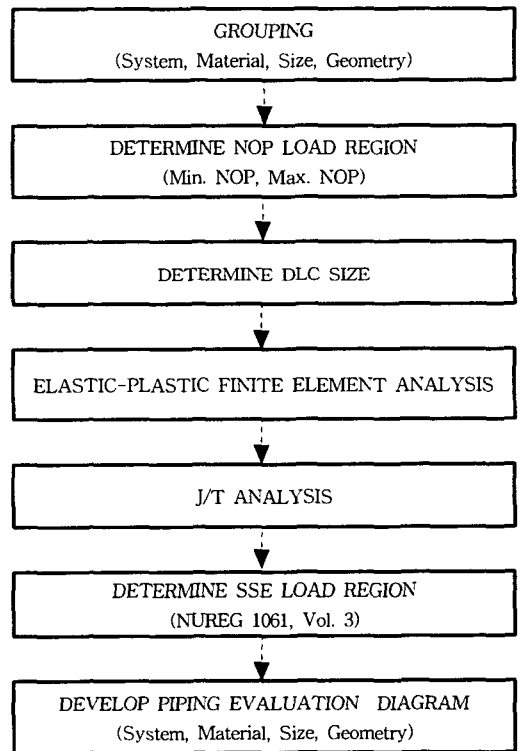


Fig. 3 Procedure for development of the PED

사용하여 감지가 가능한 누설균열길이  $a$ 를 구한다. 이때 균열길이를 산출하기 위한 PICEP 프로그램의 입력자료는 배관의 재료물성치와 NOP 하중이다. 4단계에서는 균열길이  $a - \delta$ ,  $a$ ,  $a +$

$\delta$  및  $2a - \delta$ ,  $2a$ ,  $2a + \delta$ 에 대해 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하여 작용하중에 의한 J-적분값을 산출한다. 본 연구에서는 유한요소 해석을 위해 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS 프로그램<sup>9)</sup>을 사용하였다. 5단계에서는 J/T 해석을 수행하여 균열의 불안정성장점 (instability point)에서의 최대하중을 구한다. 6 단계에서는 NUREG 1061, Vol. 3<sup>11)</sup>에 제시되어 있는 기준에 따라 SSE 하중의 범위를 구하고, 마지막 7단계에서는 위에서 결정한 NOP 하중과 SSE 하중을 이용하여 각 배관에 대한 배관평가 선도를 구한다.

일반적인 LBB 해석법은 감지가 가능한 누설균열길이의 결정에는 배관재료에 대한 인장시험결과 중 모재의 평균값(best-fit) 곡선을 사용하고, 균열안정성 평가 시에는 보수적인 해석을 위하여 파괴저항 특성으로 용접재의 하한계(lower bound) 곡선, 인장특성도 모재의 하한계(lower bound) 곡선을 사용한다. 그러나 본 연구에서는 일반적인 LBB 해석법에 의한 배관평가선도를 개발하고, 응력-변형을 곡선의 변화가 LBB 개념 적용가능영역에 미치는 영향을 정량적으로 평가하여 보다 광범위하게 사용가능한 배관평가선도도 개발하고자 한다. 이를 위해 감지가 가능한 누설균열길이의 산출에는 인장시험결과 중 모재의 평균값 곡선이 사용되었으며, 탄소성 유한요소 해석을 이용한 균열안정성 평가시에는 3가지의 응력-변형을 곡선(상한계 곡선, 평균값 곡선, 하한계 곡선)이 사용되었다.

이러한 연구를 수행하게 되면 데이터베이스에 입력된 데이터 외에 추가적인 시험으로 인해 응력-변형을 곡선이 변할 경우에도 LBB 해석시 충분한 여유를 확보할 수 있으며 현재 사용하는 해석법의 타당성을 검증할 수 있다.

### 3.1 해석대상

배관평가선도의 개발 대상은 차세대 원자력 발전소의 안전주입 및 정지냉각 배관으로 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 배관의 계통, 재질, 크기 및 가동온도를 참고 데이터로 하여 Table 1 과 같이 5개의 Group으로 분류하였다. 또한 평가선도 개발에 필요한 재료물성치는 앞에서 언

급한 바와 같이 영광 3,4호기 및 울진 3,4호기 2 차계통 재질의 재료물성치 시험에서 얻은 데이터들을 데이터베이스로 구축하여 각 Group별로 필요한 입력데이터들을 구하였다.

Table 1 Grouping for characteristics of each system

Group	System	Material	O.D. (mm)	Thickness (mm)	Temp. (°C)
1	SI	SA312 TP304	356	9.5	50
2	SI	SA312 TP316	356	35.7	296
3	SI	SA312 TP316	273	28.6	296
4	SI	SA312 TP316	324	33.3	49
5	SC	SA312 TP316	406	40.5	327

### 3.2 NOP 하중의 범위

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 설정하였다. 이와 같이 넓은 NOP 하중의 범위를 가정함으로써 향후 건설될 차세대 원자력발전소의 배관에 충분히 적용될 수 있는 배관평가선도를 개발하고자 한다.

### 3.3 누설균열길이 결정

원전 배관에 대한 LBB 해석을 위해서는 배관계통내에 가장 큰 응력이 발생하는 지점에 가상 관통균열(through-wall crack)을 가정하고 이 균열의 파괴역학적 안정성 여부를 평가해야 한다. 이 가상 관통균열의 크기는 발전소의 정상운전중 누설감지장치를 통하여 감지할 수 있는 누설량인 1gpm에 10배의 안전여유를 부여해 10gpm의 누설을 허용하는 길이로 결정하였다. 이 때 감지가 가능한 누설균열길이는 앞에서 언급한 바와 같이 EPRI에서 개발한 PICEP 프로그램을 이용하여 구하였으며, 입력자료로는 일반적인 LBB 해석절차에 따라 배관재료의 인

장시험결과 중 모재의 평균값 곡선이 사용되었다.

3.4 탄소성 유한요소 해석

USNRC<sup>1)</sup>에서는 감지가능한 누설균열길이와 2배의 감지가능한 누설균열길이에 해당하는 두 가지 관통균열을 가정하도록 규정하고 있다. 감지가능한 누설균열길이의 균열을 가정한 경우에는  $\sqrt{2}$  (NOP+SSE)의 하중을, 2배의 감지가능한 누설균열길이의 균열을 가정한 경우에는 (NOP+SSE)의 하중을 가하여 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 4는 유한요소해석에 사용된 요소망으로 대칭성을 고려하여 전체배관의 1/4모델을 이용하였다.

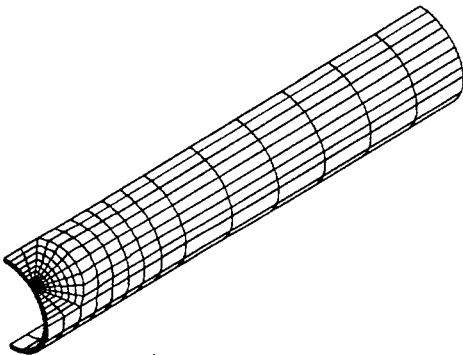


Fig. 4 Three dimensional mesh design for finite element analysis

3.5 J/T 해석

USNRC<sup>1)</sup>에서는 균열안정성 평가법으로 J/T 평가법을 추천하고 있다. J/T 평가법은 재료에 대한 J-적분값( $J_{mat}$ )과 찢김계수(tearing modulus)의 관계를 작용하중에 대한 J-적분값( $J_{app}$ )과 찢김계수의 관계와 비교함으로써 균열이 있는 배관의 안정성을 평가하는 방법이다.  $J_{app}$ 는 탄소성 유한요소해석을 통하여 구하고  $J_{mat}$ 는 파괴저항 측정시험에 의하여 얻은 데이터를 다음 식으로 곡선적합하여 균열길이(a)의 함수로 나타낸다.

$$J_{mat} = C_1 (\Delta a)^{C_2} \dots\dots\dots (1)$$

따라서, 재료의 찢김계수는 식(1)을 균열길이에 대해 미분하여 아래와 같이 구한다.

$$\frac{dJ_{mat}}{da} = C_1 C_2 (\Delta a)^{C_2-1} \dots\dots\dots (2)$$

또한, 탄소성 유한요소해석으로 작용하중에 대한  $J_{app}$ 를 구할 때에는 균열길이에 대한 정확한 J-적분값의 변화를 알기 위하여 가상균열길이  $a - \delta$ ,  $a$ ,  $a + \delta$  및  $2a - \delta$ ,  $2a$ ,  $2a + \delta$ 에 대해 각각 유한요소해석을 수행하여 J-적분값과 균열길이의 관계를 식(3)과 같이 2차 다항식으로 나타내어 구한다. 여기에서  $\delta$ 는 균열길이의 미소변화로 초기 균열길이의 10%로 가정하여 해석을 수행하였다.

$$J_{app} = c_1 a^2 + c_2 a + c_3 \dots\dots\dots (3)$$

따라서, 작용하중에 의한 찢김계수는 재료의 찢김계수와 동일하게 식(3)을 균열길이로 미분하여 식(4)와 같이 구한다.

$$\frac{dJ_{app}}{da} = 2c_1 a + c_2 \dots\dots\dots (4)$$

균열이 존재하는 배관에 대한 안정성은 식(2)와 식(4)를 이용하여 아래와 같이 평가할 수 있다<sup>1)</sup>.

$$\frac{dJ_{app}}{da} (=T_{app}) < \frac{dJ_{mat}}{da} (=T_{mat}) \dots (5)$$

J/T 평가시 보수적인 해석을 위해서 재료의 파괴저항곡선으로 용접재의 하한계 곡선을 사용하였으며, 유한요소해석시 인장곡선도 모재의 하한계 곡선을 사용한다.

3.6 SSE 하중의 결정

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

- 균열길이 a에 대한 평가;

$$\begin{aligned} M_{total} &= \sqrt{2} [M_{NOP} + M_{SSE} + M_{etc}], \\ SSE \text{ Load} &= (M_{SSE} + M_{etc}) \\ &= \frac{M_{total}}{\sqrt{2}} - M_{NOP} \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

- 균열길이 2a에 대한 평가;

$$\begin{aligned} M_{total} &= [M_{NOP} + M_{SSE} + M_{etc}], \\ SSE \text{ Load} &= (M_{SSE} + M_{etc}) \\ &= M_{total} - M_{NOP} \dots\dots\dots (7) \end{aligned}$$

### 3.7 배관평가선도 작성

배관평가선도의 개발을 위해서는 LBB 개념을 적용하고자 하는 배관계에 발생할 수 있는 최소 및 최대 NOP 하중을 가정하고 미리 LBB 해석을 수행하여 각각의 경우에 대하여 LBB 개념 적용이 가능한 최대하중( $M_{total}$ )을 구한 후 그 값을 식(6)과 식(7)에 대입하여 허용가능한 SSE 하중을 구한다.

Fig. 5는 NOP 하중과 SSE 하중의 관계를 도식적으로 나타낸 것이다. 만일 배관계의 최대응력이 발생하는 지점에서의 NOP 하중과 SSE 하중 조합이 점 X와 같은 경우에는 배관계에 실제 발생하는 하중이 LBB 개념 적용이 가능한 허용하중보다 크므로 LBB 개념 적용이 불가능하다. 마찬가지로 NOP 하중과 SSE 하중 조합이 점 Y와 같은 경우에도 하중에  $\sqrt{2}$  배의 안전여유를 부여한 균열길이  $a$  인 경우에 대해서는 안정조건을 만족하지만 균열길이에 2배의 안전여유를 부여한  $2a$  인 경우에 대해서는 안정조건을 만족하지 못하기 때문에 LBB 개념 적용이 불가능하다. 그러나 NOP 하중과 SSE 하중의 조합이 점 Z와 같은 경우에는 균열길이  $a$  및  $2a$  인 경우 모두 안정조건을 만족하므로 LBB 개념 적용이 가능하다.

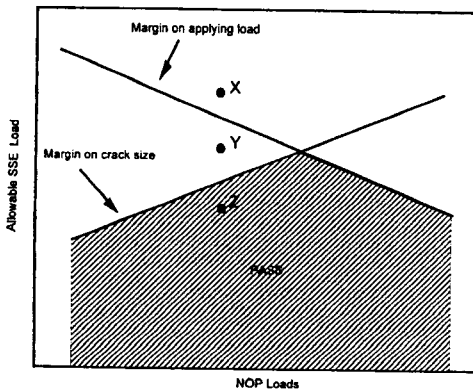


Fig. 5 Typical piping evaluation diagram

## 4. 배관평가선도 개발절차의 검증

### 4.1 해석방법 및 모델의 타당성 검증

본 연구에서는 원자력 배관의 설계초기단계에서 체계적이고 간단하게 LBB 개념 적용 가능성을 예측할 수 있는 배관평가선도를 개발하기 위하여 유한요소법을 이용한 탄소성 파괴역학해석을 수행하였다. 해석에 앞서 본 연구의 해석 방법 및 모델에 대한 타당성을 입증하기 위해 아래와 같은 상호비교해석(benchmark test)을 한국원자력연구소(KAERI)와 함께 수행하였다.

#### 4.1.1 해석조건

해석대상은 영광 원자력발전소의 가압밀림관(surge line)이다. 재료는 SA312 TP316 강으로 외경은 324mm, 두께는 33mm이며, 해석을 위해 가정한 관통균열의 길이는 73mm이다. J/T 평가를 위한 응력-변형률 곡선과 파괴저항곡선은 한국원자력연구소와 동일한 것을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 ABAQUS 프로그램을 사용하여 탄소성 유한요소해석을 수행하였으며 한국원자력연구소는 CE-MARK 프로그램을 사용하였다.

#### 4.1.2 해석결과

균열의 불안정성장점은 작용하중에 의한 J/T 선도와 재료의 J/T 선도가 만나는 점으로 불안정성장점에서의 J-적분과 찢김계수, 그리고 최대하중의 값을 비교하여 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서 구한 균열의 불안정성장점에서의 J-적분값은 한국원자력연구소에서 구한 값과 5%내에서 잘 일치하였으며, 찢김계수값은 1%내에서 잘 일치하였다. 또한 본 연구에서 구한 최대하중은 한국원자력연구소에서 구한 값과 7%내에서 잘 일치하였다. 이상과 같이 본 연구에서 구한 균열의 불안정성장점에서의 값들은 한국원자력연구소에서 구한 결과와 잘 일치하여 본 연구에서 사용한 해석방법 및 모델의 타당성이 잘 입증되었다.

### 4.2 평가선도 개발절차의 타당성 검증

배관평가선도를 개발하기 위한 해석절차는 앞에서 언급한 바와 같이 LBB 설계절차서에 의거하여 7단계로 구분된다. 본 연구에서는 이와 같은 해석절차의 타당성을 검증하기 위하여 한국원자력연구소에서 개발한 가압밀림관에 대한 배관평가선도 개발연구를 반복 수행하여 그 결

과를 비교하였다.

Table 2 Comparison of benchmark test results

	KAERI	SKKU	Difference (%)
Maximum Load (kN-m)	470	440	6.4
J-Integral (kJ/m <sup>2</sup> )	1,400	1,340	4.3
Tearing Modulus (kJ/m <sup>3</sup> )	44,400	43,900	1.1

4.2.1 해석조건

해석대상은 영광 원자력발전소의 가압밀림관이다. 해석에서 사용한 NOP 하중의 범위는 최소 11.3kN-m, 최대 113kN-m이다. 균열의 불안정성장점에서의 최대하중을 구하기 위해서 해석절차에 따라 3차원 탄소성 유한요소해석을 수행하여 작용하중에 의한 J-적분값을 산출하였으며, 재료의 파괴저항곡선을 이용하여 J/T 평가를 수행하였다. SSE 하중의 범위는 NUREG 1061, Vol. 3에 제시되어 있는 기준에 의거하여 식(6)과 식(7)을 이용하여 산출하였다.

4.2.2 해석결과

해석결과 균열길이가 2a 이고 NOP 하중이 113kN-m인 경우는 3.6% 정도의 차이가 발생하였으며, 균열길이가 2a 이고 NOP 하중이 11.3 kN-m인 경우는 3%의 차이가 발생하였다. 그리고 균열길이가 a 이고 NOP 하중이 113kN-m인 경우는 10% 정도의 차이가 발생하였으며, 균열 길이가 a 이고 NOP 하중이 11.3kN-m인 경우는 4.5%의 차이가 발생하였다. 그러나 전체적으로 두 연구의 해석결과가 잘 일치하여 본 연구에서 사용할 해석절차의 타당성이 잘 입증되었다.

5. 배관평가선도의 개발

Fig. 6~Fig. 10은 본 연구에서 안전주입 및 정지냉각계통 배관에 대하여 일반적인 LBB 해석절차를 이용하여 구한 배관평가선도이다. 배관평가선도에서 직선 "A"는 균열길이 a인 경우에 대한 LBB 개념 적용가능영역을 나타내며,

직선 "2A"는 균열길이 2a에 대한 LBB 개념 적용가능영역을 나타낸다. 앞에서 언급한 바와 같이 배관평가선도에서 균열길이 a와 2a의 아래 부분이 안정조건을 만족하는 LBB 개념 적용이 가능한 영역이다. 얻어진 배관평가선도의 결과를 종합 비교하면 배관의 직경과 두께가 두꺼울수록 LBB 개념 적용가능영역이 크게 나타났다. 그러나, Group 4 배관은 직경과 두께가 Group 2의 값보다 작지만 LBB 개념 적용가능영역은 Group 4의 경우가 더 큰 결과를 얻었다. 이와 같은 결과는 Table 1에 나타낸 바와 같이 Group 4 배관재의 인장특성 및 파괴저항특성이 온도의 영향에 의해서 Group 2 배관재보다 높기 때문이다. 또한 배관평가선도에서 NOP 하중이 작은 경우에는 균열길이 2a인 경우가 LBB 개념 적용가능영역에 큰 영향을 미쳤으며, NOP 하중이 큰 경우에는 균열길이 a인 경우가 LBB 개념 적용가능영역에 큰 영향을 미쳤다.

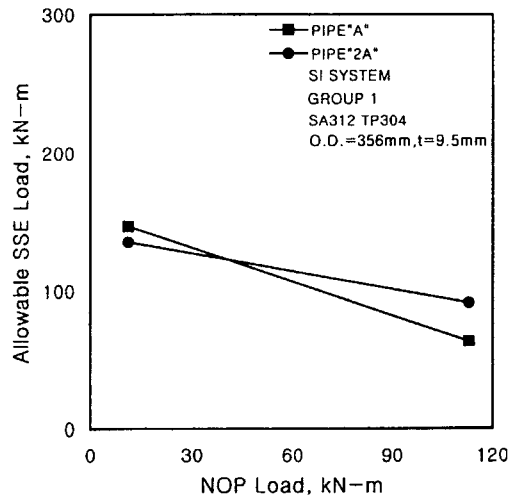


Fig. 6 Piping evaluation diagram for Group 1

일반적으로는 배관평가선도를 작성하는데 있어 최소 NOP 하중과 최대 NOP 하중의 2가지 경우에 대해 해석을 수행하여 SSE 하중을 구한 후 두 개의 점을 선형적으로 연결하여 LBB 개념 적용가능영역을 결정한다. 본 연구에서는 이와 같은 방법의 타당성을 검증하기 위해 최소

NOP 하중과 최대 NOP 하중의 중간점에 대해 해석을 수행하여 그 거동을 확인하였다. 해석대상은 Group 2의 배관으로 해석을 수행한 결과, Fig. 7에 나타낸 바와 같이 최소 NOP 하중과 최대 NOP 하중 하에서의 결과를 선형으로 연결한 결과와 잘 일치하였다. 따라서 본 연구에서는 최소 NOP 하중과 최대 NOP 하중에서 구한 SSE 하중을 선형적으로 연결하여 배관평가선도를 개발하였다.

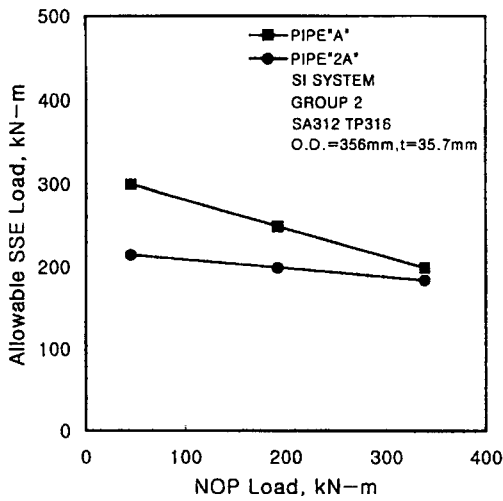


Fig. 7 Piping evaluation diagram for Group 2

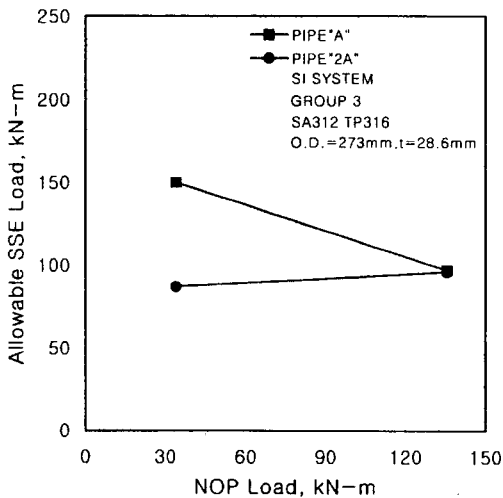


Fig. 8 Piping evaluation diagram for Group 3

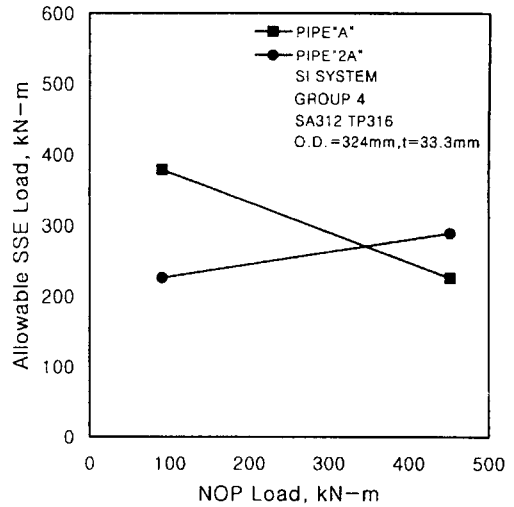


Fig. 9 Piping evaluation diagram for Group 4

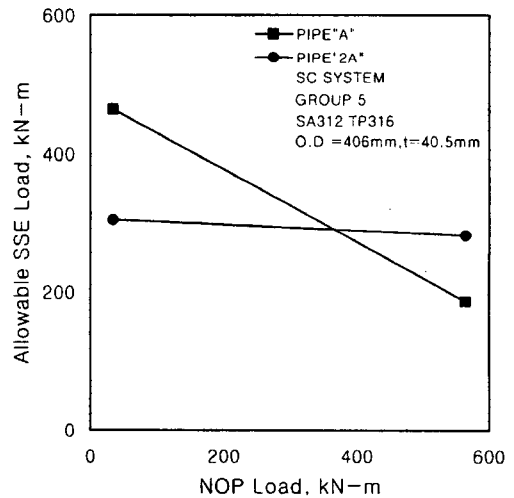


Fig. 10 Piping evaluation diagram for Group 5

Fig. 11~Fig. 12는 균열안정성 평가시 3가지의 응력-변형률 곡선을 사용하여 Group 1의 균열길이 a와 2a인 경우에 대하여 구한 배관평가선도이다. 여기서 균열길이 a인 경우에는 하중에  $\sqrt{2}$  배의 안전여유를 부여하였고, 균열길이에 2배의 안전여유를 고려한 2a인 경우에는 하중에 안전여유를 고려하지 않았다. 일반적인 LBB 해석법에 의해 구한 배관평가선도와 마찬가지로 균열길이 a와 2a의 안정조건을 동시에



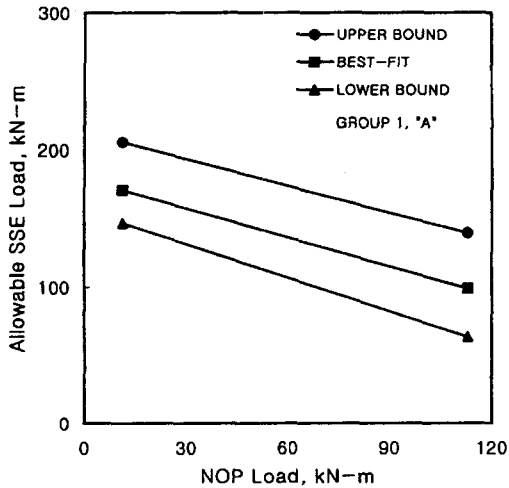


Fig. 11 Comparison of  $\sigma - \epsilon$  curve combination for Group 1 (DLC)

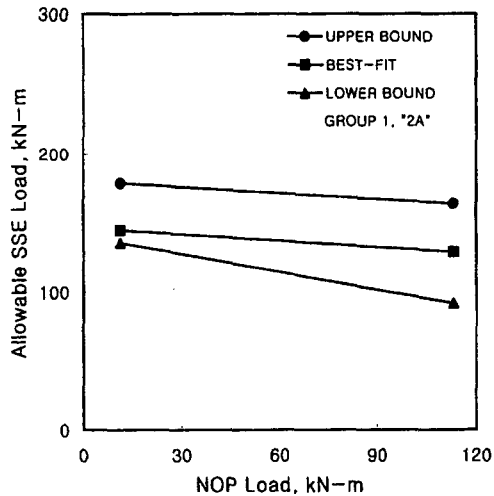


Fig. 12 Comparison of  $\sigma - \epsilon$  curve combination for Group 1 (2x DLC)

만족하는 영역이 LBB 개념 적용가능 영역이다. 해석결과 Group 1~Group 5의 모든 Group에 대하여 같은 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이때 하한계의 응력-변형률 곡선을 이용한 균열안정성 평가법이 가장 보수적인 결과를 가져오는 것으로 판명되었는데, 이는 같은 작용하중 하에서 하한계의 응력-변형률 곡선을 사용한 경

우가 상한계의 응력-변형률 곡선을 사용한 경우보다 더 큰 J-적분값을 얻게 되고, 이러한 영향으로 하한계 곡선을 이용한 배관평가선도가 가장 낮은 SSE 하중의 범위를 나타냈다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 원자력발전소의 배관설계 초기단계에서 LBB 개념을 체계적이고 쉽게 적용할 수 있도록 하기 위하여 안전주입 및 정지냉각 배관에 대한 배관평가선도를 일반적인 LBB 해석법에 근거하여 개발하였다. 또한 응력-변형률 곡선의 변화가 LBB 개념 적용가능영역에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고, 보다 광범위하게 사용가능한 배관평가선도를 개발하기 위하여 균열안정성 평가시 3가지의 응력-변형률 곡선을 사용한 배관평가선도를 개발하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 원자력발전소의 안전주입 및 정지냉각 배관에 대한 배관평가선도를 개발하여, 배관설계 초기단계에서 설계자가 쉽게 LBB 개념 적용가능성을 판단할 수 있도록 하였다.
- 2) 배관의 직경과 두께가 클수록 LBB 개념 적용가능영역이 증가하였다.
- 3) 균열안정성 평가시 모재의 하한계 응력-변형률 곡선을 사용하여 해석한 결과가 가장 낮은 LBB 개념 적용가능영역을 나타냈다.
- 4) 평가선도 개발결과, NOP 하중이 작은 경우에는 균열길이  $2a$  인 경우에 의해 LBB 개념 적용가능영역이 결정되며, NOP 하중이 큰 경우에는 균열길이  $a$  인 경우에 의해 LBB 개념 적용가능영역이 결정된다.

## 기 호 설 명

- a : 누설균열길이
- $C_1, C_2$  : 파괴저항곡선의 곡선적합상수
- $c_1, c_2, c_3$  : 작용하중에 의한 J-적분식의 상수
- J : J-적분값
- $J_{app}$  : 작용하중에 의한 J-적분값
- $J_{mat}$  : 재료의 J-적분값
- M : 굽힘하중

- n : 가공경화지수
- T : 찢김계수
- T<sub>app.</sub> : 작용하중에 의한 찢김계수
- T<sub>mat.</sub> : 재료의 찢김계수
- $\alpha$  : Ramberg-Osgood 상수
- $\delta$  : 균열의 미소변화

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

### 참 고 문 헌

- 1) "Evaluation of Potential for Pipe Break", NUREG-1061, Vol.3, USNRC, 1984
- 2) Nana, A.D. and Yoon, K.K., "Leak-Before-Break Allowable Load Windows Approach", ASME Conference, PVP-Vol. 287, pp. 35~41, 1994.
- 3) Fabi, R.J. and Peck, D.A., "Leak Before Break Piping Evaluation Diagram", ASME Conference, PVP-Vol. 283, pp. 111~115, 1994.
- 4) Yu, Y.J., Park, S.H., Sohn, G.H., Kim, Y.J. and Urko, W., "Application of LBB to a Nozzle-Pipe Interface", LBB 95 LYON-FRANCE, 1995.
- 5) Swamy, S.A., Mandava, P.R., Bhowmick, D.C. and Prager, D.E., "LBB Considerations for A New Plant Design", NEA/CSNI/R(95)18, Vol. 1, pp. 199~205, 1996.
- 6) 김영진, 석창성, "영광 원자력발전소 3/4호기용 2차계통 배관소재의 응력-변형률 및 파괴저항 특성", 성균관대학교 과학기술연구소, 1992.
- 7) 김영진, 석창성, "울진 원자력발전소 3/4호기용 2차계통 배관소재의 LBB 시험평가", 성균관대학교 기계기술연구소, 1996.
- 8) Norris, D.M. and Chexal, B., "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program", EPRI NP 3596-SR, 1987.
- 9) ABAQUS User's manual, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1996.