

‘95 춘계 학술발표회 논문집  
한국원자력학회

영광3,4호기 가압기 밀림관의 파단전 누설 설계(LBB) 타당성

전재풍, 정대율  
한국전력공사

요 약

본 보고서는 영광 3,4호기 가압기 밀림관(Surge Line)에 대한 파단전누설(Leak Before Break) 개념의 적용방법, 해석절차 및 해석결과에 대하여 기술하고 있다. 영광 3,4호기 가압기 밀림관에 대한 파단전누설해석은 배관계에 대한 정적, 동적 배관해석 결과를 토대로 큰 응력 값이 작용하는 부분에 대하여 수행하였다. 가상균열의 크기는 정상운전상태에서의 하중을 이용하여 결정하였으며 격납용기에 설치된 누설감지장치의 감지능력을 1.0gpm으로 가정하였다. 영광 3,4호기 가압기 밀림관에 대한 파단전 누설해석은 NUREG 1061, Vol.3 및 SRP3.6.3에 근거하여 수행하였으며 해석결과는 동 자료에서 제시하고 있는 적용기준을 만족하고 있는 것으로 평가되었다.

1. 서 론

1983년 이전에 설계된 CE 발전소는 미국 NRC규제요건인 일반설계기준(GDC-4)에 따라 주냉각재 배관과 연계배관에 가상의 배관파단사고시동적인 효과를 고려하여 완전파단사고개념(DEGB개념)을 적용하였다.

1980년대 초기에 미국 NRC와 산업계의 지원을 받아 수행한 Lawrence Livermore National Laboratories(LLNL)의 연구결과 원전의 배관에서 완전파단사고(DEGB)의 가능성이 아주 낮게 평가됨에 따라 1986년 7월에 NRC가 가압경수로(PWR)의 모든 고 에너지 배관에 파단전 누설개념(LBB)의 적용을 허용하였다. 따라서 국내 최초로 1989년에 영광원자력 3,4호기 RCS

및 Surge Line(이상 NSSS분)과 SCS 및 SIS의 배관(이상 A/E분)에 파단전 누설(LBB)개념을 적용한 바 있는데, 본 보고서에서는 영광 3,4호기 가압기 밀림관의 LBB적용절차,평가방법 그리고 해석결과에 대해 논의하고자 한다.

## 2. 가압기 밀림관(그림1 참조)

영광 3,4호기 가압기 밀림관은 SA-347 S/S로 구성된 12 Inch,Schedule 160 배관이다. 배관의 연결부위는 차폐 금속 아아크용접(SMAW)을 사용하여 Shop에서 용접하였다. 또한 일부는 가스 텅스텐 아아크용접(GTAW)방법을 활용하여 Field에서 용접되었다. 가압기 밀림관의 Safe-Ends는 고온측 원자로 냉각재 배관과 가압기 밀림관 배관에 Inconel SMAW방법을 사용하여 Shop에서 용접되었다.

## 3. 기술적 타당성 검토

### 3.1 해석 절차도(그림2 참조)

### 3.2 LBB 주요변수

#### 3.2.1 하 중

- 정상운전하중
  - 100%출력 운전하중
  - 자중+운전압력+100%출력선형 열적팽창+32°F 열충화 유동

#### ○ 열성충 유동하중

발전소의 운전조건에 따라 열성충 유동하중은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- 배관의 상하부 온도차가 32°F인 경우(정상운전상태)
- 배관의 상하부 온도차가 고온상태에서 320°F인 경우(653°F-333°F)
- 배관의 상하부 온도차가 저온상태에서 320°F인 경우(440°F-120°F)

#### ○ 지진하중(SSE)하중

ASME Code Case N-411에 의거 Damping값 변화에 따른 특정 값을 사용하였다.

### 3.2.2 하중 조합

정상운전중(운전압력, 자중 및 선형 열팽창에 의한 하중)과 배관의 상하부 온도차가 고온상태에서 320°F인 경우의 하중을 대수적으로 조합한후 이 조합된 하중의 절대값을 안전정지지진(SSE)하중의 절대값과 다시 조합하여 최종안정성평가지 사용하였다.

### 3.2.3 최대하중 작용 위치

배관응력해석용 전산코드인 SUPERPIPE를 사용하여 가압기 밀림관 배관에 작용하는 하중 분석을 실시하여 최대하중위치를 선정하였다. 아래 표 1에서 이들 결과를 요약하고 있다.

<표1>

재 료	위 치 (그림1참조)	정상운전 (K-in)	DW+SF+SSE (K-in)
SWAW(Shop)	1A	704	2,180
GTAW(Field)	1	507	2,575
Base Metal	1	507	2,575
Safe End	1A	534	2,609
Safe End Weld	1A	534	2,609

### 3.2.4 누설탐지능력(LDC)

LBB해석에 필요한 주요변수중의 하나는 격납건물 내부의 누설탐지 가능한 누설량이다. 이 변수는 NUREG 1061, Vol.3 및 SRP3.6.3에 정의된 바와 같이 LBB분석에 사용될 수 있도록 10배를 곱한다.

### 3.2.5 탐지가능한 누설균열길이(DLC)

누설탐지능력이 결정되면, 탐지가능한 누설균열길이가 결정될 수 있다. 탐지 가능한 누설균열 길이는 균열이 존재하고 있는 배관의 유한요소모델을 사용하여 PICEP전산코드에 의해 계산된다.

### 3.2.6 재료물성치

#### ○인장강도

재료의 인장강도물성치는 응력-변형을 곡선에 의해 나타내며 실제 발전소 운전온도근처(600

°F)에서 재질이 연성특성의 나타내고 있음을 입증하는 것이다.

○하한치 J-R곡선(파괴인성)

가압기 밀림관 재질의 J-R곡선을 생성하기 위해 2가지 근접방법이 사용된다(표2참조). 첫번째 방법은 J-R곡선을 생성하기 위해 영광 3,4호기 배관재질의 Sample Archival 재질로부터 J-R Curve 자료를 평가하는 것이다. 시험은 ASTM E1152-87에 적합하게 수행되어야 한다. 제한된 자료를 확대 적용하기 위해 자료를 검토한 후 Data를 Power Law를 적용하여 Curve Fitting하는 ASTM 813-89방법이 사용되었다. 두번째 방법은 하한치 곡선을 설정하기 위해 적용 가능한 산업계 자료를 이용하였다. 가능한 Archival 재료시험 자료와 Power Law곡선들이 유사한 재질관련 다른 산업계 자료와 비교하였다.

< 표2 >

종 류	J-R곡선 전개방법
Pipe & Elbows Safe-ends Safe-ends Welds	20% Side-Grooved 1T-CT 시편
SMAW Shop Welds GTAW Field Welds	○ Non-Side-Grooved 시편 ○ 1T - 3T 시편 ○ 산업계 자료 이용

### 3.3 LBB해석

#### 3.3.1 이론적인 측면(FEM)

○ 균열길이의 결정(DLC)

하중, 누설균열면적 그리고 재료물성치가 알려지면, 요구면적에 상응하는 균열길이를 결정하기 위해 유한요소해석(FEA)방법이 수행되었다. 10gpm에 상응하는 균열면적을 가지도록 가압기 밀림관의 FEM모델에 압력 및 정상운전 하중을 적용하여 균열길이를 구할 수 있다. 이것은 시행착오(Trial-and-Error)에 의해 결정될 수 있는데 CEMARC전산코드를 사용하여 수행되었다.

○ J-a(응력강도계수-균열크기)곡선

- 균열 a, a+ $\kappa$ , a- $\kappa$ 와 균열 2a, 2a+ $\kappa$ , 2a- $\kappa$ 의 경우에 외부하중을 적용하여 FEM방법을

사용하여 J값 계산

- 균열길이 a의 함수로 J값을 계산후, a와 2a근처에서 DJ/Da값 계산
- J 및 DJ/Da의 Fitting(다항식 사용)
  - $J(A)=C_1a^2+C_2a+C_3$
  - $DJ/Da=2C_1a+C_2$ (2a의 경우에도 적용가능)
- J-T Diagram 생성(그림3 참조)

### 3.3.2 실험적인 측면

- 재료의 인장시험(그림 4참조)
- 시험자료의 J-a 곡선생성(POWER Law적용 Fitting)
  - $J=C_1\Delta a^{C_2}$
  - $DJ/Da=C_1C_2\Delta a^{C_2-1}$
- J-DJ/Da Diagram생성

### 3.3.3 균열 안전성 평가

관통균열의 안전성을 평가하기 위해서는 적용하중, 누설균열크기 그리고 재료물성치 등을 알아야 한다. 배관하중, 굽힘모멘트는 표3에서 언급한 바 있다. 균열이 존재하고 있는 배관의 안전성은 재료의 균열 저항값과 배관에 작용하는 외부하중에 의한 J적분을 비교하여 평가된다. 연성재질의 균열 확장시 도입되는 안전성 기준은 다음과 같다.

$$J_{\text{applied}} < J_{\text{material}}$$

$$\text{and } \frac{DJ_{\text{applied}}}{Da} < \frac{DJ_{\text{material}}}{Da}$$

### 3.3.4 해석결과

검토대상 보고서에서는 영광 3,4호기 Surge Line에 대한 정적,동적 배관해석을 수행하고 배관해석결과를 근거로 하여 가상균열의 발생가능위치를 선정하였으며 선정된 모든 지점에 대해 LBB해석을 수행하였다. 표 3에서 보는 바와 같이 LBB 해석결과 모든 가상균열위치에서 안정성 기준을 만족하고 있는 것으로 나타났다.

< 표3 >

내 용 \ 위 치		1a	1a	1	1	14
응력-변형을		Safe end	Safe end	Base	Base	Base
J-R		Inconel	Safe end	GTAW	Base	SMAW
1/2 균열크기(in)		2.79	2.79	2.69	2.69	2.49
정상운전하중 (X 10 in - lb)		.534	.534	.507	.507	.704
최대배관하중 (X 10 <sup>3</sup> in - lb)		2.609	2.609	2.575	2.575	2.18
Instability (X 10 <sup>6</sup> in - lb)	a	3.5	3.5	3.5	3.6	3.3
	2a	2.85	2.85	2.94	2.99	*2.78
만 족 여 부		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

\* ; 그림5 참조

#### 4. 결 론

- 본 보고서에서는 NUREG 1061, VOL.3 및 SRP 3.6.3에 제시된 LBB 해석방법에 따라 영광 3,4호기 Surge Line에 대한 LBB해석을 수행한 결과 1.0gpm의 누설량 허용조건에서 모든 가상 균열위치에서 안전기준을 만족하고 있으므로 영광3,4호기의 가압기 밀림관은 LBB개념의 적용이 타당하다.

#### 5. 참고문헌

- [1] Leak-Before-Break Evaluation of the Yonggwang Nuclear Power Plant Unit 3 and 4 Surge Line, Attached to the ABB CE letter NU/RD 930246L dated May 1993.
- [2] CE calculation K-ME-C-230, Rev. 00, "Demonstration of Leak Before Break for Surge Line", 6/60/89
- [3] CE calculation k-ME-230, Rev. 01, "Demonstration of Leak Before Break for Surge Line", 8/22/89
- [4] NUREG-1061, Vol. 3./ "Evaluation of Potential for Pipe Break"
- [5]USNRC Draft Standard Review Plan 3.6.3, " Leak-Before-Break Evalration Procedure", March, 1987



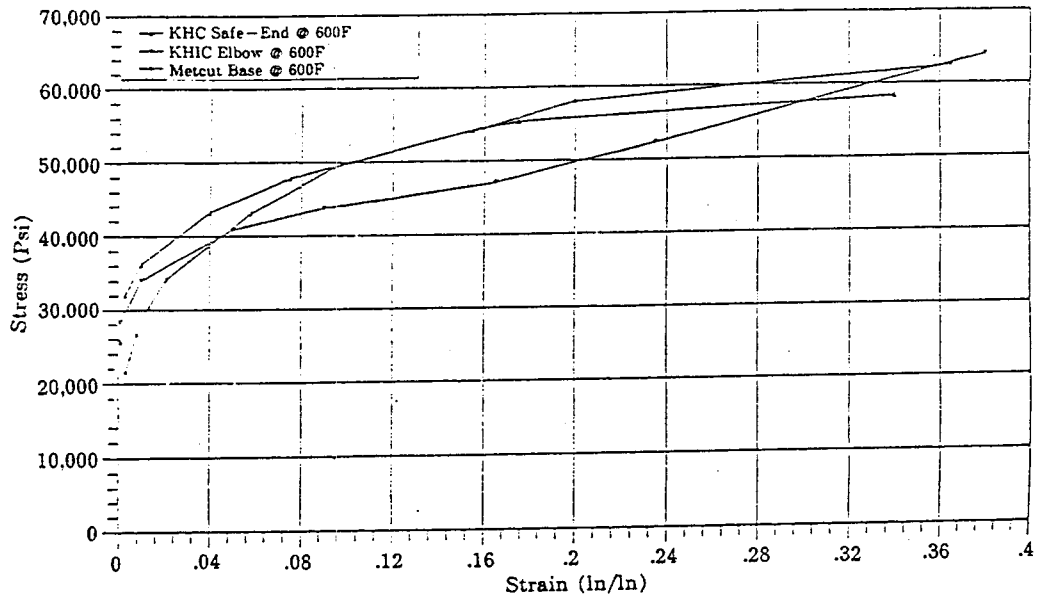


그림 4. 가압기 밀림판의 응력-변형률 선도

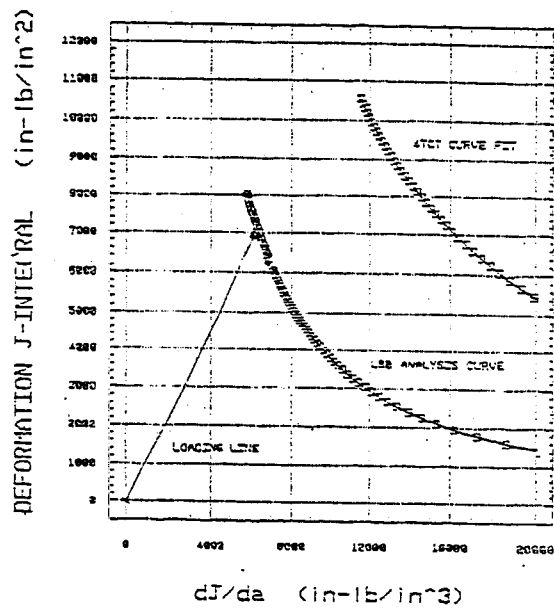


그림 5. 가압기 밀림판 SMAW 부위 J-R선도