

# 원자력 발전소 배관의 응력부식에 의한 파손확률 해석

박재학<sup>†</sup> · 이재봉\* · 최영환\*\*

충북대학교 안전공학과 · \*두산중공업 · \*\*한국원자력안전기술원  
(2010. 5. 24. 접수 / 2011. 3. 19. 채택)

## Analysis of Failure Probabilities of Pipes in Nuclear Power Plants due to Stress Corrosion Cracking

Jai Hak Park<sup>†</sup> · Jae Bong Lee\* · Young Hwan Choi\*\*

Department of Safety Engineering, Chungbuk University

\*Doosan Heavy Industries

\*\*Korea Institute of Nuclear Safety

(Received May 24, 2010 / Accepted March 19, 2011)

**Abstract :** The failure probabilities of pipes in nuclear power plants due to stress corrosion are obtained using the P-PIE program, which is developed for evaluating failure probability of pipes based on the existing PRAISE program. Leak, big leak and LOCA(loss of coolant accident) probabilities are calculated as a function of operating time for several pipes in a domestic nuclear plant. The sensitivity analysis is also performed to find out the important parameters for the failure of pipes due to stress corrosion. The results show that the steady state oxygen concentration and steady state temperature are important parameters and failure probability is very low when the oxygen concentration is maintained according to the regulation.

**Key Words :** pipe, failure probability, stress corrosion cracking

### 1. 서론

원자력 발전소 설비에 대한 안전성 분석은 주로 결정론적 해석을 근거로 수행되어 왔으나 결정론적 방법은 규제 효율성을 저하시키고 지나치게 보수적인 규제가 될 수 있다고 지적되어 왔다. 이러한 결정론적 방법에 의한 규제의 단점을 보완하기 위하여 국내외에서 확률론적 안전성평가 방법론에 관심을 보이고 있으며 몇몇 현안에 대해서는 위험도 정보활용 및 성능기반 규제 기법이 적용되고 있다<sup>1,3)</sup>.

원전 배관에 대한 확률적 안전성평가를 가능하게 하는 프로그램인 P-PIE(piping probabilistic integrity evaluation) 코드가 기존의 PRAISE 프로그램<sup>4)</sup>을 기초로 하여 개발되었다<sup>5,6)</sup>. 프로그램 개발의 목적은 새로운 이론이나 규제사항을 프로그램에 첨가시키고 적용 범위를 확대시키려 함이다. 이러한 목적은 계속된 연구를 통하여 달성될 것이다. 본 논

문에서는 개발된 프로그램에 고리 1호기 RCS 배관의 데이터를 적용하여 응력부식에 대한 배관의 파손확률을 구하였다. 사용 중 응력부식에 의하여 생성되는 균열을 고려하였고, 이들 균열들이 응력부식에 의하여 성장하여 배관의 누설(leak), 큰누설(big leak) 및 파단으로 이르게 되는 확률을 계산하였다. 균열의 생성 시간은 손상변수에 의존하는 확률변수로 취급되며, 균열성장 속도는 응력강도계수가 고려된 손상변수의 함수로 표현된다.

또한 응력부식 관련 변수들에 대한 민감도 해석을 수행하여 파손확률에 큰 영향을 미치는 주요한 변수들을 구하였다.

### 2. 이론적 배경

#### 2.1. 응력부식 균열의 생성

응력부식 균열은 재료의 응력부식에 대한 민감성, 가해지는 응력 및 부식환경의 세 가지 조건이 만족될 때 생성된다. 따라서 이 세 가지 조건이 고

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
jhpark@chungbuk.ac.kr

려된 손상변수  $D$ 가 다음과 같이 정의된다<sup>4)</sup>.

$$D = f_1(\text{material}) f_2(\text{environment}) \times f_3(\text{loading}) \quad (1)$$

식 (1)의  $f_1$ 함수는 다음의 형태로 가정된다.

$$f_1 = C_1 (P_a)^{C_2} \quad (2)$$

여기서  $P_a$ 는 예민화수(sensitization number)로 예민화의 정도를 나타내는 값이다.  $P_a$ 는  $C/cm^2$ 의 단위를 가지며 EPR(electrochemical potentiokinetic re-passivation)이라 불리는 과정을 통하여 구해진다. 단위에서  $C$ 는 coulomb이다. 식 (1)의  $f_2$  함수는 다음과 같이 가정된다.

$$f_2 = O_2^{C_3} \exp[C_4 / (T + 273)] \log(C_5 \gamma^{C_6}) \quad (3)$$

여기서  $O_2$ 는 산소농도(단위 ppm),  $T$ 는 섭씨온도,  $\gamma$ 는 수분전도율(단위  $\mu s/cm$ )이다. 식 (1)에서 하중항인  $f_3$ 는 작용하중이 변하는 경우 변형률속도의 함수로 고려되고, 작용하중이 일정한 경우 응력의 함수로 고려된다. 즉 하중이 변하는 경우는,

$$f_{3e} = \dot{\epsilon}^{C_7} \quad (4)$$

이 되고, 하중이 일정하면 다음과 같이 표현된다.

$$f_{3\sigma} = (C_8 \sigma^{C_9})^{C_7} \quad (5)$$

여기서  $\dot{\epsilon}$ 은 변형률속도이고,  $\sigma$ 는 응력(단위 ksi)이다. 위 식에서  $C_i (i = 1$  to  $9)$ 는 실험실이나 필드 데이터의 곡선맞춤(curve fitting)에 의하여 얻어지는 상수들이다.

Table 1. Constant  $C_i$  values<sup>4)</sup>

$C_i$	Type 304	Type 316NG
$C_1$	23.0	1.879
$C_2$	0.51	0.0
$C_3$	0.18	0.24
$C_4$	-1123	-1123
$C_5$	8.7096	4.0
$C_6$	0.35	0.35
$C_7$	0.55	0.49
$C_8$	$2.21 \times 10^{-15}$	$2.21 \times 10^{-15}$
$C_9$	6.0	6.0

스테인리스 강 type 304와 type 316NG 재료에 대한 상수 값이 Table 1에 요약되어 있다. Table 1에서 316NG 재료는 예민화가 거의 되지 않기 때문에  $C_2 = 0.0$ 으로 취하고 있고, 316NG의  $C_4$ ,  $C_8$  및  $C_9$ 의 경우는 데이터가 부족하여 type 304와 동일한 값을 사용하고 있다.

균열 생성시간은 분포가  $D$ 에 의존하는 확률변수로 취급된다. 손상변수  $D$ 가 일정한 경우에도 균열생성시간,  $t_f$ 는 상당한 분산을 보인다. 주어진  $D$ 에 대하여 균열생성시간을 대수정규분포로 가정한다. 이때  $\log t_f$ 의 평균값과 표준편차는 다음 식으로 표현된다.

$$\text{mean of } \log t_f = B_0 + B_1 \log(D) \quad (6)$$

$$\text{Std. Dev. of } \log t_f = B_2 + B_3 \log(D) \quad (7)$$

여기서  $D$ 는  $D_\sigma$ 이거나  $D_e$ 이다.  $B_0$  및  $B_1$  값은 Table 2에,  $B_2$  및  $B_3$  값은 Table 3에 요약되어 있다.

응력부식균열의 생성시간을 평가하기 위하여 용접부를 2 inch 길이의 조각으로 나누며, 각 조각들에서의 균열발생은 서로 독립적이라 가정한다. 따라서 한 용접부에 다수의 균열이 생성될 수도 있다.

균열 생성시의 균열의 길이  $2b$ 는 중앙값이 1/8 inch인 대수정규분포로 보며,  $\log b$ 의 표준편차로 0.85의 값을 사용한다. 생성균열의 깊이는  $10^{-3}$  inch로 가정된다.

예민화수  $P_a$ 는 근사적으로 Weibull 분포특성을 가진다고 가정되며, 이 경우 누적분포함수는 다음과 같이 표현된다.

Table 2. Constants  $B_0$  and  $B_1$  values<sup>4)</sup>

Material	Changing Load		Constant Load	
	$B_0$	$B_1$	$B_0$	$B_1$
304	0.536	-0.531	-0.9344	-1.27
316NG	-0.65	-0.76	-7.72	-5.39

Table 3. Constants  $B_2$  and  $B_3$  values<sup>4)</sup>

Mat.	Range of $\log D_e$	Changing Load		Constant Load	
		$B_2$	$B_3$	$B_2$	$B_3$
304	All	$10^{-5}$	-0.108	0.3081	0
	<-3.96	0.32774	0	(1)	(1)
316 NG	-3.96 to -3.32	-0.7461	-0.2731	(1)	(1)
	>-3.32	0.1056	0	(1)	(1)

(1) Assumed same as changing load due to lack of data

$$F(P_a < x) = 1 - e^{-(x/b)^c} \quad (8)$$

여기서  $b = 17.3 \text{ C/cm}^2$ ,  $c = 1.05$ 의 값을 가진다<sup>4)</sup>. 이 값들은 예민화가 많이 된 경우의 데이터들에서 얻어진 결과이므로 보수적인 수치로 생각할 수 있다.

## 2.2. 응력부식 균열 성장률

생성된 균열이 작은 경우는 성장률을 응력강도계수와 같은 파괴변수로 나타낼 수 없다. 균열이 어느 정도 크기로 성장한 후 비로소 파괴변수에 바탕을 둔 SCC(stress corrosion cracking) 성장식을 사용하게 된다. 따라서 SCC 균열성장 해석은 다음 두 부분으로 나뉘어 고려된다.

- (1) 균열생성에 사용된 것과 유사한 방법으로 해석되는 초기 성장단계
- (2) 파괴역학적 방법으로 해석되는 이후 단계

파괴역학적 방법으로 해석되는 단계에 도달할 때까지 생성된 균열은 일정한 속도로 성장한다고 가정한다. 초기 단계에서 성장속도( $\dot{a}$ )는 다음 식으로 나타낸다.

$$\log(\dot{a}) = F + G \log(D) \quad (9)$$

여기서  $D$ 는  $D_\sigma$ 이거나  $D_\epsilon$ 이며,  $G$ 는 상수이고,  $F$ 는 정규분포를 따르는 확률변수로 취급된다.  $G$  값과  $F$ 의 평균값과 표준편차는 Table 4 및 5에 요약되어 있다. 균열성장속도 단위는 inch/day이다.

초기균열은 모두 항상 파괴역학적인 속도로 성장한다. 발생된 균열에 대하여 파괴역학적 균열 성

Table 4. Constants in Eq. (9) for changing load condition<sup>4)</sup>

Material	Changing Load		
	F		G
	Mean	Std. Dev.	
304	0.4587	0.3578	0.7044
316NG	-0.02266	0.2052	0.63136

Table 5. Constants in Eq. (9) for constant load condition<sup>4)</sup>

Material	Changing Load		
	F		G
	Mean	Std. Dev.	
304	2.551	0.4269	1.3477
316NG	-0.02266(1)	0.2052(1)	0.63136(1)

(1) Assumed same as changing load due to lack of data

장속도가 발생단계 균열성장속도보다 커지면 파괴역학적 균열 성장속도로 성장한다. 또한 균열깊이가 0.1 inch 보다 커지면, 균열의 성장은 항상 파괴역학적 성장속도에 의해서 이루어진다.

파괴역학적인 해석에서 부식균열 성장률을 정의하기 위하여 다음과 같이  $f_2$ 와  $K$ 가 포함된 손상 변수  $D_K$ 를 정의한다.

$$D_K = C_{12} \log[f_2(\text{env.})] + C_{13} K \quad (10)$$

그리고 성장률  $\dot{a}$ 와  $D_K$ 와는 다음과 같은 관계가 있다고 가정한다<sup>4)</sup>.

$$\log \dot{a} = C_{14} + C_{15} D_K \quad (11)$$

스테인리스 강인 type 304와 type 316NG에 대한 식 (10) 및 (11)의 각 계수들 값은 Table 6과 같다.  $D_K$ 값이 Table에 도시된 한계값(threshold)보다 작으면 균열은 성장되지 않는다. 계수  $C_{14}$ 는 정규분포를 가지는 확률변수로 취급된다. 식 (10)과 (11)에서  $K$ 의 단위는 ksi  $\sqrt{\text{in}}$  이고  $\dot{a}$ 의 단위는 inch/day이다.

## 2.3. 균열의 연결

이미 언급한 바와 같이 용접부는 2 inch 길이의 조각으로 나뉘어 균열의 생성이 고려된다. 따라서 한 용접부 내에 다수의 균열이 생성될 수 있으며 성장을 하면서 서로 연결될 수도 있다. 연결 조건과 연결 후 균열의 형상은 다음과 같이 가정한다. 균열 1과 2는 다음 조건이 만족될 경우 서로 연결된다고 가정한다.

$$s < 2a_1 \text{ or } s < 2a_2 \quad (12)$$

여기서  $a_1$ 은 균열 1의 깊이,  $a_2$ 는 균열 2의 깊이이며,  $s$ 는 균열 1과 2사이의 거리로 Fig. 1에 도시되

Table 6. Constants in Eqs. (10) and (11)<sup>4)</sup>

Constants	304	316NG	
C12	0.8192	0.8192(1)	
C13	0.03621	0.03621(1)	
C14	Mean	-3.1671	-4.006
	Std. Dev.	0.7260	0.5792
C15	1.7935	1.19	
Threshold DK	-0.85	-0.89	

(1) Assumed same as type 304 due to lack of data

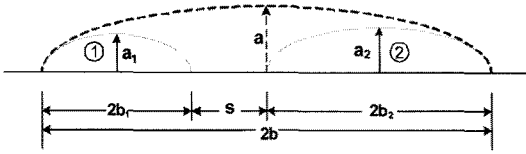


Fig. 1. Link of two cracks.

어 있다. 연결 후 균열의 깊이  $a$ 는  $a_1, a_2$  중 큰 값으로, 길이는  $2b = 2b_1 + s + 2b_2$ 로 가정된다.

### 2.4. 불안정 균열성장

응력부식에 의하여 균열이 성장하다 어떤 임계 조건에 도달하면 불안정 균열성장을 하여 관통균열이 되거나 배관의 파괴로 연결된다. 균열의 불안정성에 대한 판단은 전면항복조건이나 J 적분을 사용한 균열의 불안정해석에 바탕을 두고 있다.

원주균열의 경우 전면항복(net-section yielding)이 발생하는 조건은 다음과 같다.

$$\sigma_{LC} A_p > \sigma_{fyo} (A_p - A_{crack}) \quad (13)$$

여기서  $A_p$ 는 관의 횡단면이고,  $A_{crack}$ 는 횡단면에서 균열면의 면적,  $\sigma_{LC}$ 는 관에 작용되는 축방향 응력 중 하중제어에 해당되는 성분,  $\sigma_{fyo}$ 는 재료의 유동 응력이다.

### 2.5. 검사 및 누설

프로그램에서 가동전 및 가동중 비파괴검사를 고려할 수 있다. 프로그램에서 불검출확률은 다음 식과 같이 표현된다<sup>4)</sup>.

$$P_{ND}(A) = \varepsilon + \frac{1}{2}(1 - \varepsilon) \operatorname{erfc} \left( \nu \ln \frac{A}{A^*} \right) \quad (14)$$

여기서  $P_{ND}$ 는 면적  $A$ 인 균열이 발견되지 않을 확률이고,  $\nu, \varepsilon, A^*$ 는 상수들이다. 상수들은 사용자에게 의해 입력되어야 한다.

표면균열이 성장하여 관통균열이 되면 누설이 발생된다. 따라서 누설확률은 관통확률과 동일하다. 또한 누설률이 입력되는 큰누설률 값보다 커지면 큰누설로 평가된다. 누설률이 데이터로 입력되는 검지가능 최소누설률보다 커지면 균열이 발견되어 배관 자체가 교환되거나 균열이 보수된다고 가정되고, 누설률이 검지가능 최소 누설률보다 작으면 계속적으로 균열은 성장하게 된다.

### 2.6. 해석 알고리즘

응력부식 균열에 대하여 개발된 프로그램의 해석과정은 다음과 같다.

- (1)  $t = 0$ 으로 두고 해석을 시작한다.
- (2) 시간을 증가시켜 가며 해석을 행한다. 현 해석 단계의 시간을  $t_i (= t_{i-1} + \Delta t)$ 라 하자. 여기서  $\Delta t$ 는 시간의 증분이다.
- (3)  $\Delta t$  시간 동안 응력부식에 의하여 새로 생성된 균열을 포함시킨다.
- (4) 균열들에 대한 응력강도계수(stress intensity factor)를 계산한다. 이때 고려되는 응력들은 압력과 굽힘 모멘트 등에 의한 기계적 응력과 열응력, 지진응력, 진동응력 및 잔류응력 등이다. 이들 응력들은 데이터로 입력되거나 별도의 모듈에서 계산된다.
- (5) 응력부식에 의한 균열의 성장량을 구한다.
- (6) 성장하는 균열이 합쳐지는지 검토한다.
- (7) 성장된 균열에 의하여 배관이 파단되거나 누설 또는 큰누설이 발생하는지 검토한다.
- (8) 파단되거나 누설 또는 큰누설이 발생하는 경우 파단회수, 누설회수 또는 큰누설 회수에 1을 더한다.
- (9)  $t_i > t_{given}$ 의 조건이 만족될 때까지 단계 (2)에서 단계 (8)까지의 해석을 반복하여 행한다. 여기서  $t_{given}$ 은 주어진 시간이다.
- (10) 충분한 시물레이션 회수가 될 때까지 단계 (1)에서 단계 (9)까지의 해석을 반복하여 행한다.
- (11) 시물레이션 회수와 파단회수, 누설회수 또는 큰누설 회수로부터 파단확률 또는 누설 확률 및 큰누설 확률을 계산한다.

응력부식균열 해석의 경우 층화추출법(stratified sampling scheme)이 적용되지 않으므로 해석에 많은 시간이 소요된다. 일반 PC를 사용하는 경우 시물레이션 회수  $10^6$ 회에 대하여 대략 3.4시간이 소요된다. 본 논문에서 설명하지 않는 이론적 배경 및 개발된 프로그램에 특성에 대해서 참고문헌 5에 자세히 설명되어 있다.

## 3. 응력부식균열 해석

### 3.1. 사용 데이터

국내 원자력 발전소의 배관 데이터를 입력 데이

Table 7. Data for Kori 1 RCS pipe

Type	OD (in)	Thickness (in)	Temp (°F)	Material
Hot leg	34.6	2.8	606.9	SA351 Gr. CF8M
Cold leg	32.9	2.7	541.2	
Crossover	37.0	3.0	541.0	

터로 사용하여 P-PIE 프로그램으로 누설, 큰누설 및 LOCA(loss of coolant accident) 확률 해석을 행하였다. Table 7에 도시된 고리 1호기의 RCS(reactor coolant system) 배관 데이터를 사용하였다. RCS 배관의 경우 배관이 파단되면 LOCA가 발생되므로 배관파단확률은 LOCA 발생 확률이 된다. 배관재료인 SA351 Gr. CF8M은 스테인리스강이다. 우선 균열성장 해석에서 사용된 중요한 데이터는 다음과 같다.

- (1) 운전 중 응력부식에 의하여 생성되는 균열만 고려한다.
- (2) 응력부식균열의 생성가능 위치는 46이다. 즉 배관 내부 원주길이를 2로 나눈 후 정수로 올림한 값이 46이다.
- (3) 플랜트 최대 수명은 40년이다.
- (4) 응력부식 균열 성장률 식에서의 계수 값들은 type 304에 대한 디폴트 값들이 사용된다.
- (5) LOCA는 전면항복 조건에 의하여 판정된다.
- (6) 잔류응력은 고려되지 않는다.
- (7) 검출할 수 있는 누설물의 한계는 3 gpm, 일반 누설과 큰누설을 구별하는 경계값은 10 gpm이다.
- (8) 정하중응력 2.08 ksi, 정하중응력과 열팽창의 구속에 의한 응력은 8.58 ksi, 정상운전 압력 2.4 ksi, 정수압 내구시험과 고주기 진동응력은 고려되지 않는다.
- (9) 과도현상으로 heat-up과 cool-down을 고려하며 이때 온도차는 550°F이고, 0.2년의 주기로 발생된다.

### 3.2. 해석결과 및 고찰

Fig. 2는 고온관(hot leg)에서 정상상태 산소농도가 0.05, 0.07 및 0.1ppm인 경우 누설 및 큰누설 확률을 가동시간의 함수로 도시한 것이다. 기동상태의 산소농도는 0.1ppm이다. Fig. 2에 도시된 결과를 볼 때 정상상태 산소농도가 누설 및 큰누설 확률에 미치는 영향이 대단히 크음을 알 수 있다. 현재 고리 1호기의 운전요구되는 산소농도의 조건은

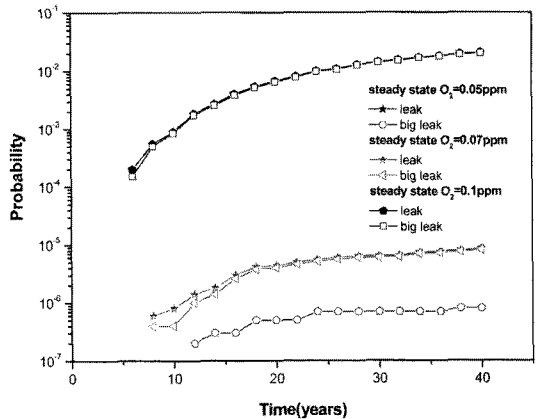


Fig. 2. Effect of steady state O<sub>2</sub> concentration on the failure probabilities of hot leg.

기동상태에서는 0.1 ppm 이하를 유지하여야 하고 정상상태에서는 검출이 불가능한 정도로 낮게 유지하여야 한다. 따라서 운전조건을 적용할 경우의 파손확률은 아주 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 3은 고온관에서 정상상태 온도의 영향을 보여주고 있다. 현재 고온관의 정상상태 온도는 606.9°F인데 이를 50°F 및 100°F 올렸을 경우의 결과를 보여주고 있다. 이때 기동상태 산소농도는 0.1 ppm, 정상상태 산소농도는 0.05 ppm으로 가정되었다. 온도가 올라감에 따라 누설 및 큰누설 확률이 많이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 4는 저온관(cold leg)에서 기동상태 산소농도의 영향을 보여주고 있다. 이때 정상상태의 산소농도는 0.1 ppm이다. 그림에서 기동상태 산소농도가 0.5, 0.7 및 1.0 ppm인 경우의 결과들을 보여주고 있는데 산소농도가 높을수록 파손확률이 높아지는

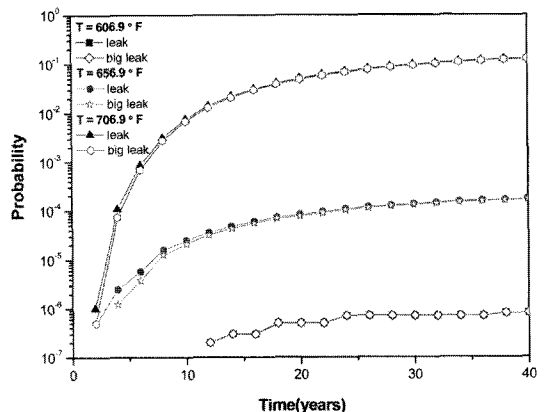


Fig. 3. Effect of steady state temperature on the failure probabilities of hot leg.

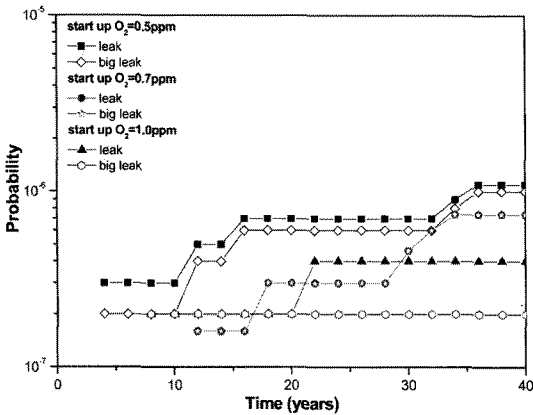


Fig. 4. Effect of start-up  $O_2$  concentration on the failure probabilities of cold leg.

경향은 보여주지 않고 있고 정상상태 산소농도에 비하여 영향이 적음을 알 수 있다.

Fig. 5는 저온관에서 정상상태 산소농도가 0.15, 0.2 및 0.3 ppm인 경우 누설 및 큰누설 확률을 도시한 것이다. 산소농도를 고온관에 비하여 높게 가정한 이유는 온도가 낮아 산소농도가 낮을 경우 파손확률이 낮아져서 계산시간이 너무 길어지기 때문이다. 이때 기동상태의 산소농도는 0.1 ppm로 가정되었다. 고온관에서와 동일하게 정상상태 산소농도가 누설 및 큰누설 확률에 미치는 영향이 대단히 크음을 알 수 있다.

Fig. 6은 저온관에서 정상상태 온도의 영향을 보여주고 있다. 현재 저온관의 정상상태 온도는 541.2 °F인데 이를 20°F 및 40°F 올렸을 경우의 결과를 보여주고 있다. 이때 기동상태 산소농도는 0.1 ppm, 정상상태 산소농도는 0.15 ppm으로 가정되었다. 온도가 올라감에 따라 누설 및 큰누설 확률이 많이

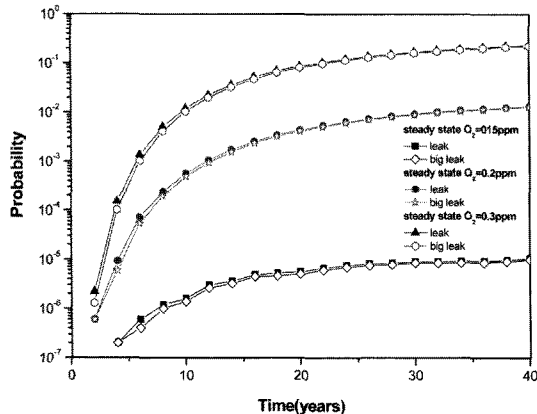


Fig. 5. Effect of steady state  $O_2$  concentration on the failure probabilities of cold leg.

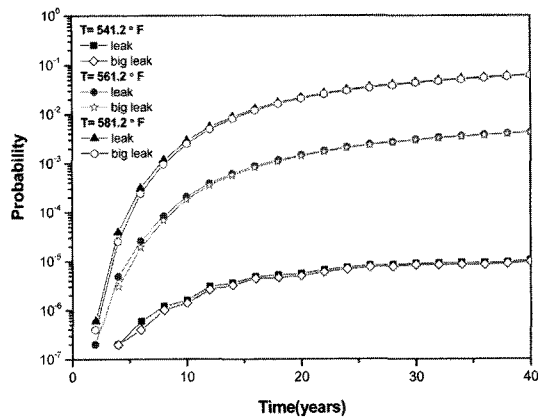


Fig. 6. Effect of steady state temperature on the failure probabilities of cold leg.

증가하고 있는 것을 볼 수 있다. Fig. 3과 비교할 때 온도변화의 영향이 고온관에 비하여 더 큰데 이는 정상상태 산소농도를 높게 가정하였기 때문이다.

Fig. 7은 중간관(crossover)에서 정상상태 산소농도가 0.15 및 0.2 ppm인 경우 누설 및 큰누설 확률을 도시한 것이다. 이때 기동상태의 산소농도는 0.1 ppm이다. 고온관 및 저온관에서와 동일하게 정상상태 산소농도가 누설 및 큰누설 확률에 미치는 영향이 대단히 크음을 알 수 있다. Fig. 8은 중간관에서 정상상태 온도의 영향을 보여주고 있다. 현재 중간관의 정상상태 온도는 541.0°F인데 이를 20°F 및 40°F 올렸을 경우의 결과를 보여주고 있다. 이때 기동상태 산소농도는 0.1 ppm, 정상상태 산소농도는 0.15 ppm으로 가정되었다. 온도가 올라감에 따라 누설 및 큰누설 확률이 많이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

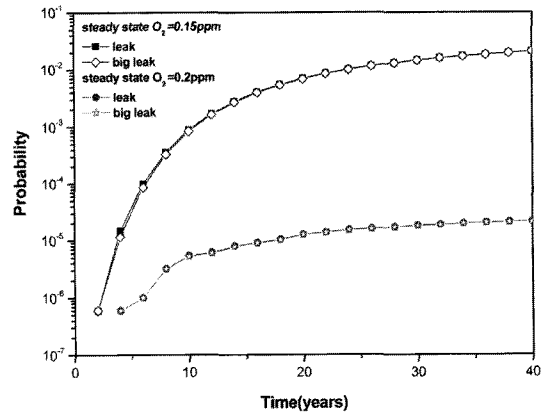


Fig. 7. Effect of steady state  $O_2$  concentration on the failure probabilities of crossover pipe.

### 3.3. 차후 연구

개발된 P-PIE 프로그램을 바탕으로 지속적인 연구가 이루어질 것이다. 새롭게 제안된 응력부식 균열성장률의 적용, 적용 균열의 확대, 새로운 규제 사항의 첨가 등은 차후 연구과제가 될 것이다. 또한 각 매개변수의 영향에 대해서도 지속적인 연구가 진행될 것이다.

## 5. 맺음말

원자력 배관의 파손확률을 계산하기 위하여 개발된 P-PIE 프로그램을 이용하여 응력부식에 의한 배관의 파손확률을 계산하였다. 고리 1호기의 배관 데이터를 사용하여 해석하였으며 원전 배관의 응력부식에 의한 누설, 큰누설 확률을 시간의 함수로 계산하였다. 또한 응력부식 관련 변수들에 대한 민감도 해석을 수행하여 파손확률에 큰 영향을 미치는 주요한 변수들을 구하였다. 얻어진 결과들은 다음과 같다.

- 1) 냉각수의 정상상태 산소농도, 정상상태 온도 등의 변수들이 파손확률에 큰 영향을 미쳤다.
- 2) 기동상태 산소농도는 정상상태 산소농도 보다 파손확률에 작은 영향을 미쳤다.

3) 고온관의 경우 냉각수의 정상상태 산소농도가 0.05 ppm에서 0.1 ppm으로 증가하는 경우 40년 가동 후의 누설확률이  $2.5 \times 10^4$ 배 증가하였다.

4) 고온관의 경우 가동온도를 100°F 증가시키는 경우 40년 가동 후의 누설확률은 10<sup>6</sup>배 이상 증가하였다.

감사의 글 : 이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) KINS/GR-359, 원자력 안전규제 기술개발 : 원전 기기건전성 평가 규제 기술 개발, 2006.
- 2) USNRC NUREG/BR-0303, Guidance for Performance-Based Regulation, 2002.
- 3) USNRC SECY-98-144, Risk-Informed and Performance-Based Regulation, 1998.
- 4) EMT TR-98-4-1, D.O. Harris and D. Dedhia, "Win-PRAISE 98 : PRAISE Code in Windows", 1998.
- 5) 박재학, 이재봉, 최영환, "원전배관의 파손확률평가를 위한 P-PIE 프로그램의 개발", 한국안전학회지, 제25권, 제6호, pp. 1~8, 2010.
- 6) 박재학, "확률론적 배관 건전성 평가 프로그램 개발", 원자력안전기술원 보고서, KINS/HR-991, 2010.