

# 원전 배관의 파손확률 평가를 위한 P-PIE 프로그램의 개발

박재학<sup>†</sup> · 이재봉<sup>\*</sup> · 최영환<sup>\*\*</sup>

충북대학교 안전공학과 · <sup>\*</sup>두산중공업 · <sup>\*\*</sup>원자력안전기술원  
(2010. 5. 24. 접수 / 2010. 11. 17. 채택)

## Development of P-PIE Program for Evaluating Failure Probability of Pipes in Nuclear Power Plants

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

Department of Safety Engineering, Chungbuk University

<sup>\*</sup>Doosan Heavy Industries

<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Nuclear Safety

(Received May 24, 2010 / Accepted November 17, 2010)

**Abstract** : P-PIE program is developed for evaluating failure probability of pipes in nuclear power plants based on the existing PRAISE program. In the program, crack growth due to fatigue loading and stress corrosion can be considered and the probability of fracture or leakage of pipes can be calculated. Crack growth simulation is performed based on stress intensity factor and a damage parameter and failure of a pipe is determined based on J integral or net section yielding. Using the developed program the failure probabilities of tubes in a domestic nuclear power is obtained and discussed.

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

### 1. 서론

원자력 발전소에 대한 기존의 안전성 분석은 주로 결정론적 해석(deterministic analysis)을 근거로 수행되어 왔으나 결정론적, 규정적 접근방법은 규제 수요 팽창 시 규제의 효율성을 저해하고, 사업자의 창의적이고 자발적인 안전성 확보 노력을 저하시킬 수 있으며, 지나친 보수성과 규제의 획일적 적용으로 인해 불필요한 규제부담이 야기될 수 있다고 지적되어 왔다.

이러한 결정론적 방법에 의한 규제의 단점을 보완하기 위하여 국내외에서 확률론적 안전성평가(probabilistic safety assessment, PSA) 방법론에 관심을 보이고 있으며 몇몇 현안에 대해서는 위험도 정보활용 및 성능기반 규제(risk-informed and performance-based regulation, RIPBR) 기법이 적용되고 있다<sup>1-3)</sup>.

본 연구에서는 원전 배관에 대한 확률론적 건전

성평가를 가능하게 하는 프로그램인 P-PIE(piping probabilistic integrity evaluation) 코드를 개발하였다. 프로그램은 기존의 PRAISE 프로그램<sup>4)</sup>을 기초로 하여 개발되었으며, 따라서 PRAISE와 동일한 식과 알고리즘이 많이 사용되었다. 그러나 새로운 식들도 첨가하여 옵션으로 선택할 수 있도록 하였다. 앞으로 국내 배관에 적합한 식 및 알고리즘을 적용함으로써 국내 배관에 적합한 배관 파손해석 프로그램으로 발전시키려고 한다. 프로그램에서는 초기부터 존재하는 균열과 사용 중 생성되는 균열을 고려할 수 있으며, 이들 균열들이 피로 및 응력부식(stress corrosion)에 의하여 성장하여 배관의 누설(leak), 큰누설(big leak) 및 파단으로 이르게 되는 확률을 계산할 수 있다.

개발된 프로그램은 원전 배관의 운전 및 보전 계획에 활용될 수 있다. 결정론적 건전성 평가는 보수성이 높다는 지적이 많은 상황에서 확률적 평가기법의 개발 및 활용은 원전기기의 운전 및 보전에 유연성을 제공함으로써 경제성을 제고할 수 있으며, 원전 배관의 안전성 유지에 대한 투자를

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

위험성이 큰 부분에 집중시킬 수 있다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 초기균열

초기균열로 배관 내벽에 존재하는 원주방향 반 타원형 표면균열을 고려한다. 이때 균열 깊이를  $a$ , 표면에서의 균열길이를  $2b$ 라 한다. 초기 균열의 크기 및 발생빈도는 확률변수로 가정한다. 초기 균열의 특성은 균열 깊이분포, 균열 종횡비분포 및 균열 발생빈도 세 가지에 의해 정의된다<sup>4)</sup>.

#### 1) 균열 깊이분포

균열깊이를 지수분포나 대수정규분포로 고려할 수 있다. 지수분포의 경우 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p(a) = \frac{1}{\mu} e^{-a/\mu}, \quad 0 \leq a \leq \infty \quad (1)$$

$\mu$ 는 분포함수의 매개변수이며 지수분포의 평균 값이 된다.  $\mu$ 의 대표적인 값으로  $\mu = 0.246\text{inch}$ 의 값이 사용된다. 프로그램에 입력되는 데이터는  $\mu$  값이 아닌  $\lambda = 1/\mu$ 로 정의되는  $\lambda$ 이다.

식 (1)로 정의되는 분포에서 균열깊이는 배관두께보다 더 큰 값도 가질 수 있다. 따라서 프로그램에서는 식 (1)을 사용하여 균열깊이를 생성한 후 배관두께보다 큰 값이 얻어지면 그 값을 버린다.

#### 2) 균열 종횡비분포

프로그램에서 균열의 종횡비를 지수분포나 대수정규분포로 고려할 수 있다. 균열의 종횡비분포는 균열의 깊이와 관계가 없다고 가정된다. 다만  $b < a$ 인 경우는 배제된다. 이 경우의 지수분포의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p(\beta) = \begin{cases} 0 & \text{when } \beta < 1 \\ \lambda e^{-\lambda(\beta-1)} & \text{when } \beta > 1 \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $\beta = b/a$ 이고, 필수 입력 값은  $\lambda$ 이다.

#### 3) 균열 발생빈도

용접부에서의 초기 균열의 존재 확률은 용접체적의 지배를 받는다고 가정된다. 용접체적에는 열영향부까지 포함되며, 용접부 쪽은 배관두께의 두 배정도로 가정된다. 단위체적당 균열이 존재할 확

률을  $P_V^*$ 라 하고,  $P_V^*$ 값이 아주 작은 경우 체적  $V$ 에 균열이 존재할 확률은 대략적으로  $VP_V^*$ 가 된다.  $P_V^*$ 의 대표적인 값은  $P_V^* = 10^{-4}/\text{in}^3$ 이다<sup>4)</sup>.

### 2.2. 응력강도계수

피로 및 응력부식 균열 성장률을 구하기 위해서 균열에 대한 응력강도계수(stress intensity factor, SIF)를 계산하여야 한다. PRAISE 프로그램에서는 RMS (root mean square) 평균 SIF 값을 사용하고 있다. 몇 가지 경우에 대해서 RMS 평균 SIF 값을 식으로 표현하고 있는데, 보고서<sup>4)</sup>에 제시된 식의 계수에 잘못이 있어 수정된 식을 다시 제시한다. 깊이가  $a$ 이고 표면에서의 길이가  $2b$ 인 원주방향 반타원형 표면균열이 배관 내벽에 존재하고 일정한 수직응력  $\sigma$ 가 균열면에 작용되는 경우 SIF는 다음과 같다<sup>4)</sup>.

$$\bar{K}_a = \left[ \begin{aligned} & (1.8781 - 0.7248\zeta - 0.2035\zeta^2 + 0.2432\zeta^3) + \\ & (-1.9181 + 0.4252\zeta + 8.0667\zeta^2 - 7.4870\zeta^3)\alpha + \\ & (7.7162 - 11.3209\zeta - 10.4922\zeta^2 + 15.9368\zeta^3)\alpha^2 + \\ & (-6.0324 + 10.469\zeta + 2.0322\zeta^2 - 7.6101\zeta^3)\alpha^3 \end{aligned} \right] \times \sigma a^{1/2} / (1 - \alpha)^{1/2} \quad (3)$$

$$\bar{K}_b = \left[ \begin{aligned} & (1.3003 + 0.1046\zeta - 0.1943\zeta^2 + 0.03935\zeta^3) + \\ & (-1.3745 + 0.7675\zeta - 1.3837\zeta^2 + 1.5430\zeta^3)\alpha + \\ & (4.0255 - 7.0179\zeta + 10.6008\zeta^2 - 7.7883\zeta^3)\alpha^2 + \\ & (-3.2410 + 5.3097\zeta - 7.8403\zeta^2 + 5.4374\zeta^3)\alpha^3 \end{aligned} \right] \times \sigma a^{1/2} / (1 - \alpha)^{1/2} \quad (4)$$

여기서  $\bar{K}_a$ 는 균열의 가장 깊은 곳에서의 RMS 평균 SIF 값을 의미하고,  $\bar{K}_b$ 는 자유표면과 만나는 균열선단에서의 RMS 평균 SIF 값을 의미한다. 또한  $\alpha$ 는  $a/h$ ,  $\zeta$ 는  $a/b$ 를 의미한다. 여기서  $h$ 는 배관두께이다. 선형으로 변화하는 응력의 경우는 다음 식으로 표현된다<sup>4)</sup>.

$$\bar{K}_a = \left[ \begin{aligned} & (1.01392 - 0.78506\alpha + 3.31506\alpha^2 - 0.991159\alpha^3) + \\ & (-0.34032 + 2.5896\alpha - 9.02996\alpha^2 + 2.88101\alpha^3)\zeta + \\ & (0.045722 - 1.90305\alpha + 6.05041\alpha^2 - 1.93187\alpha^3)\zeta^2 \end{aligned} \right] \times \sigma_a a^{1/2} \quad (5)$$

$$\bar{K}_b = \left[ \begin{aligned} & (0.47954 - 0.206885\alpha + 1.112738\alpha^2 - 0.19908\alpha^3) + \\ & (-0.0249092 + 0.144091\alpha - 1.61755\alpha^2 - 0.176543\alpha^3)\zeta + \\ & (0.0450383 - 0.223205\alpha + 1.97511\alpha^2 + 0.779899\alpha^3)\zeta^2 + \\ & (-0.04859 + 0.37304\alpha - 1.5687\alpha^2 - 0.3790668\alpha^3)\zeta^3 \end{aligned} \right] \times \sigma_a a^{1/2} \quad (6)$$

여기서  $\sigma_a$ 는 가장 깊은 균열선단에서의 응력이다. 이때 응력은 배관 안쪽에서 0이 되며, 선형적으로 변화하여 가장 깊은 균열선단에서는  $\sigma_a$ 가 된다.

RMS 평균 SIF 값이 아닌 국부적인 SIF 값도 이용할 수 있도록 하였다. 내경이  $R_i$ 이고 두께가  $h$ 인 배관에 원주방향 반타원형 균열이 배관 내벽에 존재하고, 작용되는 응력이  $\sigma(x) = A_0 + A_1x$ 와 같이 표현된다고 가정한다. 여기서  $x$ 는 배관 내벽에서부터 두께방향으로의 좌표이다. 이 경우 SIF는 다음과 같이 표현된다<sup>3)</sup>.

$$K_I = \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} (G_0 A_0 + G_1 A_1 a) f_w \quad (7)$$

여기서  $Q$ 와  $f_w$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$Q = 1 + 1.464 \left( \frac{a}{b} \right)^{1.65} \quad (8)$$

$$f_w = \sqrt{\sec \left( \frac{\pi b}{2W} \sqrt{\frac{a}{h}} \right)} \quad (9)$$

식 (9)의  $f_w$ 는 유한한 폭의 영향을 고려한 계수로 본 해석에서는  $2W = 2\pi R_i$ 의 값을 사용하였다.

관통 원주균열에 대한 RMS 평균 SIF 값도 참고 문헌 4에 주어졌지만 표현식에 잘못이 있다. 수정된 식은 참고문헌 6에 제시되어 있다.

### 2.3. 균열성장해석

피로균열성장의 경우 균열성장식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = F(\Delta K, R) \quad (10)$$

여기서  $a$ 는 균열깊이 혹은 길이,  $N$ 은 피로하중 사이클 수,  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ,  $R$ 은 응력비로  $R = K_{\min} / K_{\max}$ ,  $F$ 는 어떤 함수이고 재료에 따라 구체적인 함수형태가 주어진다.

$N$ 번의 하중 사이클을 가지는 하중 블록의 시작점에서의 균열크기를 기준으로  $K_{\max}$ 와  $K_{\min}$ 을 구하게 되며, 하중 블록의 끝점에서의  $a_{after}$ 와  $b_{after}$ 는 다음 식으로 구해진다.

$$a_{after} = a_{before} + NF(\Delta K_a, R_a) \quad (11)$$

$$b_{after} = b_{before} + NF(\Delta K_b, R_b) \quad (12)$$

사용자는 일정한 진폭을 가지는  $N$  사이클의 하중 블록을 입력하여 피로성장해석을 행할 수 있다.

응력부식(stress corrosion) 균열 성장속도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{da}{dt} = G(K) \quad (13)$$

시간증분 시작점에서의 균열크기를 이용하여 응력강도계수를 구한다. 시간증분  $\Delta t$  후의 균열길이는 다음과 같이 주어진다.

$$a_{after} = a_{before} + G(\Delta K_a) \Delta t \quad (14)$$

$$b_{after} = b_{before} + G(\Delta K_b) \Delta t \quad (15)$$

시간증분  $\Delta t$ 는 다음 식에 의해 정의된다.

$$\Delta t = \min [t_s, 0.1 \text{ in}/(da/dt)] \quad (16)$$

여기서  $t_s$ 는 사용자에게 의해 정의된 시간증분이며, 보통 0.1 year의 값을 취한다.  $da/dt$ 는 시간증분 시작점에서 깊이 방향의 균열성장속도이다.

피로균열성장과 응력부식 균열성장이 동시에 존재하는 경우에는 피로기여도와 응력부식균열 기여도를 더함으로써 간단히 계산된다.

### 2.4. 불안정 균열성장

균열은 피로나 응력부식에 의하여 성장하다 어떤 임계조건에 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<sup>4)</sup>.

$$\sigma_{LC} A_p > \sigma_{f0} (A_p - A_{crack}) \quad (17)$$

여기서  $A_p$ 는 관의 횡단면이고,  $A_{crack}$ 는 균열부분의 면적,  $\sigma_{LC}$ 는 관에 작용되는 축방향 응력 중 하중제어에 해당되는 성분,  $\sigma_{f0}$ 는 재료의 유동응력이다. 작용하중을 하중제어에 해당되는 성분과 변위제어

에 해당되는 성분으로 나눌 수 있는데, 정하중이나 압력은 하중제어에 해당되고, 구속에 의한 열응력 등은 변위제어에 해당된다. 전면항복을 평가하는 경우는 하중제어 성분만을 고려한다.

유동응력인  $\sigma_{f0}$ 는 재료의 항복강도와 인장강도의 평균이고, 확률변수로 고려할 수 있다. 프로그램에서는  $\sigma_{f0}$ 가 정규분포의 특성을 가지는 확률변수로 취급할 수 있고, 오스테나이트 스테인리스강의 유동응력  $\sigma_{f0}$ 의 정규분포의 특성에 대한 디폴트 값은 평균이 44.9ksi이고, 표준편차가 1.9ksi이다.

프로그램에서 J 적분을 이용하여 균열의 불안정 해석을 행할 수 있다. 다음 두 조건이 만족될 때 균열의 불안정성장이 시작된다.

$$J_{app} > J_{IC} \quad (18)$$

$$T_{app} > T_{mat} \quad (19)$$

여기서  $T$ 는 찢음계수(tearing modulus)로 다음과 같이 정의된다.

$$T = \frac{E}{\sigma_{f0}^2} \frac{dJ}{da} \quad (20)$$

프로그램 내에서  $dJ/da$ 를 구하기 위하여 균열길이  $a$ 와  $a+0.001a$  각각에 대하여 J 적분을 구한 후 J 적분의 차이를 0.001a로 나눈다.  $J_{IC}$  및  $T_{mat}$  값은 프로그램에 데이터로 입력된다.

PRAISE 프로그램에서는 배관 내벽에 존재하는 원주방향 표면균열에 대한 J 적분 값으로 원주각이 360°인 완전 원주균열에 대한 J 적분식을 사용하여 큰 보수성을 보이고 있다. 이를 수정하기 위하여 프로그램에서는 타원형 표면균열에 대한 J 적분식도 사용할 수 있도록 하였다.

### 2.5. 검사

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

$$P_{ND}(A) = \varepsilon + \frac{1}{2}(1-\varepsilon)\text{erfc}\left(\nu \ln \frac{A}{A^*}\right) \quad (21)$$

여기서  $P_{ND}$ 는 면적 A인 균열이 발견되지 않을 확률이고,  $\nu$ ,  $\varepsilon$ ,  $A^*$ 는 상수들이다. 상수들은 사용자

에 의해 입력되어야 한다. 만약 균열길이  $2b$ 가 초음파 탐촉자의 빔직경  $D_B$ 보다 작으면 균열의 면적은 다음과 같이 주어진다.

$$A = \frac{1}{2} \pi ab \quad (22)$$

만약  $2b$ 가  $D_B$ 보다 큰 경우는 다음과 같다.

$$A = \frac{1}{4} \pi a D_B \quad (23)$$

식 (21)의 상수들에 대한 값으로 두꺼운 주조 오스테나이트 배관에 대하여  $\nu=1.60$ ,  $A^*=1.25$  inch,  $\varepsilon=0$ 의 값들이 사용되고, 단련(wrought) 오스테나이트 배관에 대해서는  $\nu=1.60$ ,  $A^*=1.25$  inch,  $\varepsilon=0.005$ 의 값들이 사용된다<sup>4)</sup>. 또한  $A^*=(\pi/4)D_B A^*$ 로 주어진다.

프로그램에서는 성장하고 있는 균열이 발견되면 완전히 보수되는 것으로 가정된다.

표면균열이 성장하여 관통균열이 되면 누설이 발생된다. 누설률이 검지가능 최소누설률보다 커지면 균열이 발견되어 배관 자체가 교환되거나 균열이 보수된다고 가정되고, 누설률이 검지가능 최소누설률보다 작으면 계속적으로 균열은 성장하게 된다. 누설률을 추정하기 위해서는 균열열림면적(crack opening area)을 알아야 하며, 균열열림면적은 다음 식으로 표시된다.

$$A = \frac{4}{\sigma} \int_0^b J(x) dx \quad (24)$$

여기서  $J$ 는 작용 J 적분,  $\sigma$ 는 J 적분의 계산에 사용되는 작용응력이다. 또한 식 (24)에서의 적분은 J 적분을 균열길이의 반인  $b$ (식에서  $x$ )의 함수로 표현한 후 0에서 현재의 균열길이의 반인  $b$ 까지 적분함을 뜻한다.

## 3. 프로그램 개발

### 3.1. 해석 알고리즘

개발된 프로그램의 전체 해석과정을 설명하면 다음과 같다.

- (1) 초기 균열분포를 가정한다.
- (2) 비파괴검사를 행한 후 발견된 균열은 보수

가 행해졌다고 가정하고 초기 균열분포에서 제외시킨다.

- (3) 시간을 증가시켜 가며 해석을 행한다. 현 해석 단계의 시간을  $t_i (=t_{i-1} + \Delta t)$ 라 하자. 여기서  $\Delta t$ 는 시간의 증분이다.
- (4)  $\Delta t$ 시간 동안 응력부식에 의하여 새로 생성된 균열을 균열분포에 포함시킨다.
- (5) 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.
- (6) 피로나 응력부식에 의한 균열의 성장량을 구한다.
- (7) 성장된 균열에 의하여 배관이 파단되거나 누설 또는 큰누설이 발생되는지 검토한다.
- (8) 파단되거나 누설 또는 큰누설이 발생되는 경우 파단회수, 누설회수 또는 큰누설 회수에 1을 더한다.
- (9)  $t_i > t_{given}$ 의 조건이 만족될 때까지 단계 (3)에서 단계 (8)까지의 해석을 반복하여 행한다. 여기서  $t_{given}$ 은 주어진 시간이다.
- (10) 충분한 시뮬레이션 회수가 될 때까지 단계 (1)에서 단계 (9)까지의 해석을 반복하여 행한다.
- (11) 시뮬레이션 회수와 파단회수, 누설회수 또는 큰누설 회수로부터 파단확률 또는 누설 확률 및 큰누설 확률을 계산한다.

### 3.2. 프로그램 개발 및 특징

프로그램은 Visual C++ 언어로 작성되었으며, MS Visual Studio 6.0을 사용하여 개발되었다. 프로그램의 메인 윈도우는 Fig. 1과 같다. 데이터는 파일이나 윈도우를 통하여 입력할 수 있다. Fig. 2는 데이터 입력 윈도우의 예를 보여주고 있고, Fig. 3은 결과 윈도우의 예를 보여주고 있다.

배관에서의 누설률을 계산하기 위해서는 해당 온도에서의 물 및 증기의 특성을 알 수 있어야 한다. PRAISE 프로그램에서는 이를 위하여 ELMOP.LIB 이란 라이브러리(library)를 이용하였다. 그러나 이 라이브러리의 소스코드를 알 수는 없으므로 본 프로그램에서는 Riemer, Jacobs 및 Boehm<sup>7)</sup>에 의해 개발된 프로그램을 활용하였다. Fortran 언어로 작성된 Riemer 등의 프로그램을 이용하여 P-PIE의

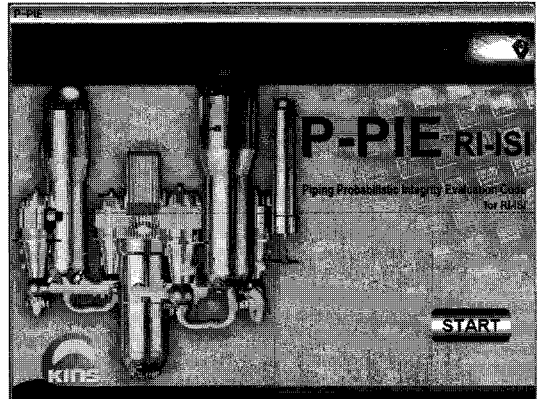


Fig. 1. Main window of P-PIE program.

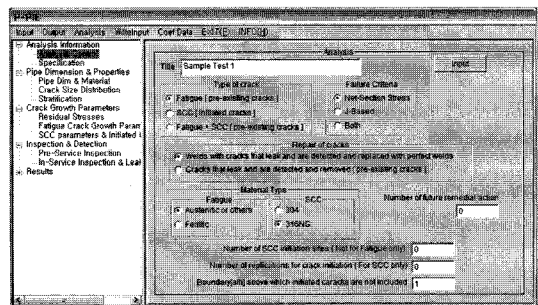


Fig. 2. Example of data input window of P-PIE program.

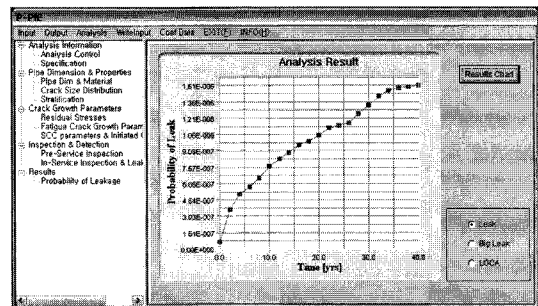


Fig. 3. Example of output window of P-PIE program.

목적에 맞게 C++ 언어로 모듈을 작성한 후 프로그램에 추가하였다.

추가된 모듈의 정확성을 확인하기 위하여 온도  $T=550.6^{\circ}\text{F}(=288.1^{\circ}\text{C})$ , 압력  $P=2400\text{psi}(=16.547\text{MPa})$ 을 ELMOP.LIB와 추가된 모듈에 대입하여 결과를 얻은 후 비교하였다. 우선 ELMOP.LIB 결과는  $v=0.021299\text{ft}^3/\text{lb}$ ,  $U=537.356\text{BTU}/\text{lb}$ ,  $H=546.86\text{BTU}/\text{lb}$ ,  $S=0.74089\text{BTU}/\text{lb}\cdot\text{F}$ 이고, 추가된 모듈의 결과는  $v=0.0213\text{ft}^3/\text{lb}$ ,  $U=537.831\text{BTU}/\text{lb}$ ,  $H=547.293\text{BTU}/\text{lb}$ ,  $S=0.74256\text{BTU}/\text{lb}\cdot\text{F}$ 이다. 여기서  $v$ 는 단위질량의 부피,  $U$ 는 내부에너지,  $H$ 는 엔탈피,  $S$ 는 엔트로피이

다. 두 모듈이 유사한 결과를 주고 있음을 알 수 있다.

또한 그래프를 이용한 출력을 위하여 상용프로그램인 Chart FX 6.2 모듈을 프로그램에 삽입하였다. 이 모듈을 이용하면 Fig. 3에서와 같이 계산된 확률을 시간의 함수로 나타낼 수 있다.

개발된 프로그램의 몇 가지 특징을 살펴보면 다음과 같다.

- (1) 이미 존재하는 초기균열과 응력부식에 의하여 생성되는 균열을 고려할 수 있다.
- (2) 초기균열에 대하여 얻어지는 배관의 파손확률은 균열이 1개 존재한다는 전제 하에서 계산된 확률이다. 균열이 1개 존재할 확률 자체에 대해서는 프로그램 내에서 고려하지 않으며, 발전소 배관설비 전체에 대한 파손 확률도 고려하지 않는다.
- (3) 응력부식 균열생성에서는 용접부를 2inch 시험편이 모여 이루어진 것으로 가정한다.
- (4) 관통균열을 통한 누설률이 최소검출 누설률보다 큰 경우 해당 균열은 발견되어 완전히 보수되는 것으로 가정된다.
- (5) 계산시간을 단축시키기 위하여 층화추출법(stratified sampling scheme)이 사용된다. 이 방법은 초기균열에 대해서만 사용되고 SCC에 의한 생성균열에 대해서는 사용되지 않는다.
- (6) 주로 고려된 균열은 배관 내벽에 존재하는 원주방향 반타원형 표면균열이다. 경우에 따라 축방향 균열에 대해서도 해석할 수 있다.
- (7) 운전 중 배관 두께, 산소농도 등의 변화를 고려해 줄 수 있다. 4회까지 변화가 가능하다.
- (8) Heat-up, cool-down과 같은 과도현상들을 고려할 수 있다.

### 3.3. 고려 하중

프로그램 내에서 고려할 수 있는 응력으로 우선 압력, 정하중(dead weight), 열팽창의 구속에 의한 응력 등이 있다. 압력 및 정하중에 의한 응력은 하중제어로 취급되고 열팽창에 의한 응력은 변위제어로 취급된다. 또한 지진, 진동, 배관 반경방향 온도 구배에 의한 열응력, 용접 잔류응력 등을 고려할 수 있다.

잔류응력은 SCC 균열의 발생 및 성장에서 큰 역할을 한다. 잔류응력은 피로균열 성장에도 영향

을 끼치나 잔류응력에 의해서  $\Delta K$ 는 변하지 않고 단지 응력비  $R$ 만 변하기 때문에 부차적인 영향만 주게 된다. 프로그램에서 잔류응력을 결정론적이거나 또는 확률변수로 나타낼 수 있다. 또한 대형, 중형 및 소형 오스테나이트 배관에 대해서 PRAISE 프로그램<sup>4)</sup>에서 주고 있는 잔류응력 분포를 이용할 수도 있다.

### 3.4. Monte Carlo 시뮬레이션

프로그램에서는 용접부의 파손확률을 예측하기 위하여 Monte Carlo 시뮬레이션 기법을 사용한다. 시뮬레이션에서의 기본적인 식은 다음과 같다.

$$P(t_F \leq t) = \frac{N_F(t)}{N} \tag{25}$$

여기서  $N$ 은 전체 시뮬레이션 수,  $N_F(t)$ 는 시간  $t$ 에 혹은 그 전에 파손이 발생된 시뮬레이션의 수이다. 또한  $P(t_F \leq t)$ 는 시간  $t$ 에 혹은 그 전에 파손될 확률을 뜻한다.

초기 균열 크기에 대한 샘플링을 균열크기 표본공간 전체에 대하여 행할 경우 계산이 비효율적으로 될 수 있다. 일반적으로 작은 크기의 초기균열이 존재할 가능성이 아주 크고 큰 균열이 존재할 가능성은 아주 적을 것이며, 작은 균열의 경우 배관의 파손으로 연결될 가능성은 거의 없을 것이다. 이 경우 시뮬레이션의 거의 대부분은 파손 가능성이 거의 없는 작은 균열을 가정하여 행하게 되므로 필요 없는 해석을 많이 하게 된다. 예를 들어 파손확률이  $10^{-7}$ 으로 아주 작은 경우를 시뮬레이션한다고 가정하면 적어도  $10^7$ 번 이상의 시뮬레이션이 필요하게 된다.

이러한 계산상의 비효율성을 개선하기 위하여 프로그램에서는 층화추출법(stratified sampling scheme)을 사용하였다. 이 방법에서는 표본공간을 몇 개의 셀(cell)로 분할하여 해석한다<sup>4)</sup>. 층화추출법에서 우선 균열크기가 해당 셀에 있을 확률  $P_m$ 을 계산한다. 확률계산은 균열크기에 대한 분포를 알 경우에 가능하다. 해당 셀의 크기를 가지는 균열을  $N_m$ 번 샘플링 한 후 배관파손해석을 행하여 이중  $N_{F,m}$ 번의 시뮬레이션에서 배관 파손이 발생하였다고 하면, 해당 셀에 대한 배관의 파손 확률은  $(N_{F,m}/N_m)P_m$ 이 될 것이다. 따라서 전체 표본공간에 대한 파손확률은 다음식과 같이 표현된다.

$$P(t_F \leq t) = \sum_{m=1}^M \frac{N_{Fm}(t)}{N_m} P_m \quad (26)$$

여기서  $M$ 은 셀의 수,  $N_m$ 은  $m$ 번째 셀의 표본수,  $N_{Fm}(t)$ 는  $m$ 번째 셀에서 추출된 표본 중 시간  $t$  전에 혹은  $t$ 에서 파손된 표본수를 뜻한다.  $P_m$ 은 초기 균열 크기가  $m$  번째 셀에 있을 확률이다.

#### 4. 결과 및 고찰

국내 원자력 발전소의 배관 데이터를 입력 데이터로 사용하여 P-PIE 프로그램으로 누설, 큰누설 및 LOCA 확률 해석을 행하였다. Table 1에 도시된 고리 2호기의 RCS(reactor coolant system) 배관 데이터를 사용하였다. 배관재료인 SA351 Gr. CF8M은 스테인리스강이다. 우선 피로균열성장 해석에서 사용된 중요한 데이터는 다음과 같다.

- (1) 초기균열만 고려하여 피로성장해석을 행한다.
- (2) 초기 균열의 균열깊이는 지수분포, 중형비는 대수정규분포로 가정한다.
- (3) 플랜트 최대 수명은 40년이다.
- (4) 피로성장 관계식에서 SIF의 하한계값은 4.6 ksi-in<sup>1/2</sup>이고 지수는 4이다.
- (5) 피로성장 관계식의 상수에 대한 대수정규분포에서 중앙값은 9.14×10<sup>-12</sup>, 90백분위수는 3.5×10<sup>-11</sup>이다.
- (6) 유동응력의 평균값은 43ksi, 표준편차는 4.2ksi이다.
- (7) 초기균열의 균열깊이에 대한 지수분포에서 λ= 4.07(in<sup>-1</sup>)이다.
- (8) 초기균열의 중형비에 대한 대수정규분포에서 중앙값은 1.34이고, 형태모수는 0.538이다.
- (9) 검출할 수 있는 누설률의 한계는 3gpm, 일반 누설과 큰누설을 구별하는 경계값은 10gpm이다.
- (10) 정하중응력 2.08ksi, 정하중응력과 열팽창의 구속에 의한 응력은 8.58ksi, 정상운전 압력 2.4ksi, 정수압 내구시험의 압력 3ksi, 고주기

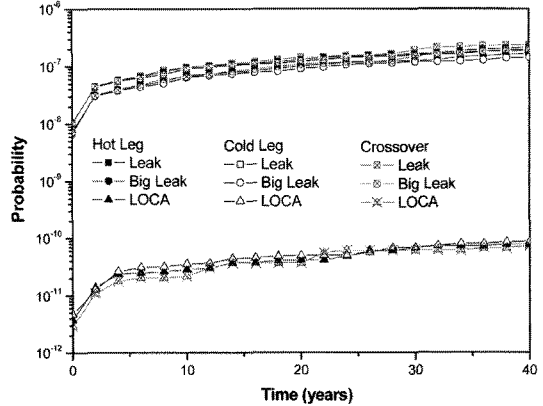


Fig. 4. Fatigue failure probabilities of Kori 2 RCS pipe due to heat-up and cool-down transient.

진동응력은 고려되지 않고, 하중비의 하한계값은 0으로 한다.

- (11) 과도현상으로 heat-up과 cool-down을 고려하며 이때 온도차는 550°F이고, 0.2년의 주기로 발생된다.

프로그램 결과로 얻어진 heat-up과 cool-down의 과도현상에 의한 가동연수에 따른 누설, 큰누설 및 LOCA의 결과를 정리하면 Fig. 4와 같다. 고온관(hot leg), 저온관(cold leg) 및 중간관(crossover)은 유사한 파손확률을 보이고 있다. 이는 Table 1에서 보는 바와 같이 배관 직경과 두께가 유사하기 때문으로 판단된다.

40년 후의 LOCA 확률에 대해서는 10<sup>-11</sup> 이하의 아주 작은 확률이 얻어졌으며 누설 및 큰누설은 10<sup>-7</sup> 정도의 확률을 나타내고 있다. 얻어진 확률은 용접부에 균열이 한 개 존재한다고 가정하였을 때의 파손확률이다. 따라서 균열이 1개 존재할 확률과 다수의 용접부에 대한 전체 확률은 별도로 고려하여야 한다.

개발된 프로그램은 앞으로 주요 변수들의 변화가 파손확률에 미치는 영향에 대한 분석 등에 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 5. 맺음말

원자력 배관의 파손확률을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 기존의 PRAISE 프로그램을 기초로 하여 개발되었으며, SIF식 및 J 적분식 등을 옵션으로 선택할 수 있도록 하였다. 개발된 프로그램으로 원전 배관의 피로 및 응력부식에 의한 누

Table 1. Data for Kori 2 RCS pipe

Type	OD(in)	Thickness(in)	Temp(°F)	Material
Hot leg	35.0	3.0	606.1	SA351 Gr. CF8M
Cold leg	33.5	3.0	549.9	
Crossover	37.0	3.0	541.0	

설, 큰누설 및 LOCA 확률을 계산할 수 있다. 개발된 프로그램을 이용하여 고리 2호기에 대하여 heat-up 및 cool-down 피로하중에 대한 RCS 배관의 누설, 큰누설 및 LOCA 확률을 계산하였다. 개발된 프로그램은 원전 배관의 건전성 해석에 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글 : 이 논문은 한국원자력안전기술원의 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) I.S. Raju and J.C. Newman, "Stress-intensity factors for internal and external surface cracks in cylindrical vessels", J. of Pressure Vessel Technology, Vol. 104, pp. 293~298, 1972.
- 6) 박재학, "확률론적 배관 건전성 평가 프로그램 개발", 원자력안전기술원 보고서, KINS/HR-991, 2010.
- 7) D.H. Riemer, H.R. Jacobs and R.F. Boehm, "A computer program for determining the thermodynamic properties of water", Report DGE/1549-2, 1976.