

## 원전 배관의 파손확률에 대한 검사의 영향§

박재학\*† · 최영환\*\*

\*충북대학교 안전공학과, \*\*한국원자력안전기술원

### Effect of Inspection on Failure Probability of Pipes in Nuclear Power Plants

Jai Hak Park\*† and Young Hwan Choi\*\*

\* Dept. of Safety Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.,

\*\* Korea Institute of Nuclear Safety

(Received February 29, 2012 ; Revised June 24, 2012 ; Accepted June 28, 2012)

**Key Words** : Inspection(검사), Pipe(배관), Leak Probability(누설확률), Nuclear Power Plant(원자력발전소)

**초록:** 원자력발전소의 배관에 대하여 행하는 검사는 배관의 구조건전성에 큰 영향을 미친다. 그러나 검사에는 많은 인력과 비용이 소요되므로 검사의 영향을 평가하여 최적의 검사주기와 검사품질을 결정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 원자력발전소 배관의 파손확률을 평가할 수 있도록 개발된 P-PIE 프로그램을 사용하여 검사의 유무, 검사주기 및 검사품질 등이 배관의 파손확률에 미치는 영향을 살펴보았다. 국내 원전의 배관 데이터를 사용하여 해석하였으며, 피로 및 부식에 의한 균열성장을 고려하였다.

**Abstract:** Pipe inspections conducted in nuclear power plants play an important role in ensuring the structural integrity of pipes. Because considerable manpower and expense is required for pipe inspections, it is very important to determine the optimum inspection period and the level of inspection. In this study, the effects of the period and the inspection quality on the failure probability of pipes are investigated using the P-PIE program, which has been developed to calculate the failure probability of pipes. The pipe data of an internal nuclear power plant is used in the study, and fatigue and stress corrosion crack growth are considered in the analysis.

## 1. 서론

원자력 발전소 배관의 파손을 방지하기 위해서 가동전 및 가동중 검사가 행해진다. 이들 검사의 배관 파손확률에 미치는 영향을 평가하여 검사의 주기 및 검사의 품질을 결정하는 것은 중요하다. 검사의 주기를 짧게 하거나 검사의 품질을 높이면 파손확률을 줄일 수는 있을 것이나 그만큼 많은 검사시간과 경비가 소요된다. 본 논문에서는 이들 검사에 관련된 변수들이 배관파손에 미치는 영향을 살펴보았다.

해석에는 원자력 배관의 피로 및 응력부식균열 성장에 의한 누설, 큰누설(big leak) 및 LOCA(loss of coolant accident) 확률을 구할 수 있도록 개발된

P-PIE 프로그램<sup>(1,2)</sup>이 이용되었다. P-PIE 프로그램은 PRAISE 프로그램<sup>(3)</sup>을 기반으로 하여 개발되었으며, 박재학 및 박정순 등<sup>(4,5)</sup>은 이 프로그램을 사용하여 배관 파손확률에 미치는 주요 변수에 대하여 살펴보았다.

본 논문의 해석결과는 검사 관련 변수의 배관 파손확률에 미치는 영향을 이해하고, 검사주기를 결정하고 검사 성능을 정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

## 2. 해석과정

### 2.1 P-PIE 프로그램

P-PIE 프로그램에서 해석과정은 다음과 같다.<sup>(1)</sup>

- (1) 초기 균열분포를 가정한다.
- (2) 가동전 검사로 비파괴검사를 행한 후 발견된 균열은 보수가 행해졌다고 가정하고 초기 균열분포에서 제외시킨다.
- (3) 시간을 증가시키며 해석을 행한다. 현

§이 논문은 2012년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2012. 2. 16.-17., 제주대) 발표논문임

† Corresponding Author, [jhpark@chungbuk.ac.kr](mailto:jhpark@chungbuk.ac.kr)

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

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 생성된 균열을 균열분포에 포함시킨다.
- (5) 가동중 검사 시간이  $t_{i-1}$  과  $t_i$  사이가 되면 비파괴검사를 행하고, 균열이 발견되면 해당 균열은 보수가 행해졌다고 가정한다.
- (6) 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.
- (7) 피로나 응력부식에 의한 균열의 성장량을 구한다.
- (8) 성장된 균열에 의하여 배관에서 누설 또는 큰누설이 발생되거나 LOCA 가 발생되었는지 검토한다.
- (9) 누설 또는 큰누설이 발생되거나 LOCA 가 발생된 경우 누설횟수, 큰누설 횟수 및 LOCA 횟수에 1 을 더한다.
- (10) LOCA 가 발생된 경우는 단계 (12)로 가고, 누설이 발생된 경우 누설률이 검출가능 최소 누설률보다 크면 해당 균열은 발견되어 보수가 행해졌다고 가정한다.
- (11)  $t_i > t_{given}$  의 조건이 만족될 때까지 단계 (3)에서 단계 (10)까지의 해석을 반복하여 행한다. 여기서  $t_{given}$  은 주어진 가동 시간이다.
- (12) 충분한 시물레이션 횟수가 될 때까지 단계 (1)에서 단계 (11)까지의 해석을 반복하여 행한다.
- (13) 시물레이션 횟수와 누설횟수, 큰누설 횟수 또는 LOCA 횟수로부터 누설확률, 큰누설 확률 및 LOCA 확률을 계산한다. 예를 들어 누설확률은 누설횟수를 시물레이션 횟수로 나눈 값이 된다.

LOCA 의 발생 조건으로 전면항복(net-section yielding) 발생조건과 J 적분을 이용하는 방법을 사용할 수 있는데 본 해석에서는 전면항복 발생조건을 사용하였다. P-PIE 프로그램에 대한 보다 자세한 내용은 참고문헌 1 및 2 에 기술되어 있다.

2.2 검사

균열면 면적이  $A$  인 균열이 비파괴검사에서 발견될 확률  $P_D$ 는 다음 식으로 표현된다.<sup>(3)</sup>

$$P_D = 1 - \varepsilon - \frac{1}{2}(1 - \varepsilon)erfc\left(\nu \ln \frac{A}{A^*}\right) \quad (1)$$

여기서  $\varepsilon$ ,  $\nu$  및  $A^*$ 는 상수이다. 각 배관의 종류 및 검사품질에 따른 대표적인 값이 Table 1 및 Table 2 에 주어져 있다. Table 1 및 2 에서  $t$ 는 배관두께이고, SCC 는 응력부식균열(stress corrosion cracking)을 의미한다. 배관 내면에 존재하는 깊이가  $a$  이고 표면길이가  $2b$  인 반타원형 표면균열에 대하여, 만약  $2b$  의 길이가 초음파 탐사의 탐촉자 지름  $D_B$  보다 작은 경우 균열면 면적  $A$  는  $A = (1/2)\pi ab$  으로 표현되고,  $2b$  가  $D_B$  보다 큰 경우는  $A = (1/4)\pi a D_B$  로 표현된다.

오스테나이트 스테인리스강에 대하여 검사품질의 디폴트 값, 한계값(marginal quality) 및 양호한 값(good quality)에 대한 POD 를  $a/t$  의 함수로 나타내면 Fig. 1 과 같다. 디폴트 값의 경우 한계값보다 POD 가 더 낮음을 알 수 있다. 계산에서 디폴트 값으로 Table 2 의 A 값이 사용되었고, 배관 직경은 34.6 in.(879 mm), 두께는 2.8 in.(71.1 mm) 그리고  $b/a = 2$  로 가정되었다.

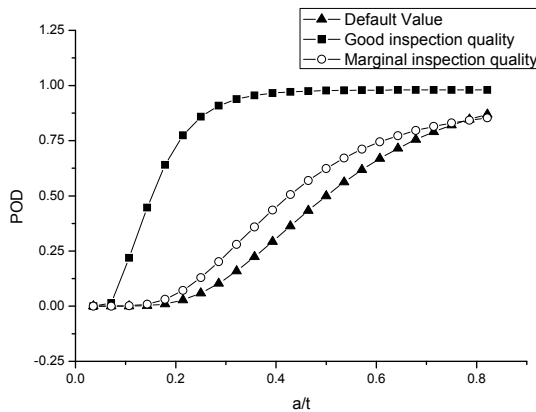
Table 1 Constants in Eq. (1) <sup>(3)</sup>

Quality of inspection	Constant	Ferritic	Austenitic	
		Fatigue cracks	Fatigue cracks	SCC cracks
Out-standing	$A^*$	$0.05t$	$0.05t$	$0.05t$
	$\nu$	1.6	1.6	1.6
	$\varepsilon$	0.005	0.005	0.005
Good	$A^*$	$0.15t$	$0.15t$	$0.4t$
	$\nu$	1.6	1.6	1.6
	$\varepsilon$	0.02	0.02	0.10
Marginal	$A^*$	$0.4t$	$0.4t$	$0.65t$
	$\nu$	1.6	1.6	1.6
	$\varepsilon$	0.10	0.10	0.25

**Table 2** Default values in Eq. (1) <sup>(3)</sup>

Type	$\epsilon$	$A^*$	$\nu$
A	0.	0.5t	1.6
B	0.005	0.25	3.0
C	0.005	0.25	1.33

Note : Type A is thick-walled austenitic pipe,  
 Type B is thick-walled ferritic pipe,  
 Type C is thin-walled austenitic pipe.



**Fig. 1** POD as a function of  $a/t$

### 3. 피로에서의 검사의 영향

#### 3.1 해석문제

국내 한 원자력발전소의 배관 데이터를 이용하여 검사의 영향을 살펴보았다. SCC 에 의한 균열 성장을 고려하였고, 배관에서의 누설확률을 계산하였다. 배관 재질은 SA351Gr. CF8M 스테인리스강이고 배관 치수 및 가동 온도는 Table 3 과 같다. 해석에서는 고온관(hot leg)에 대한 데이터를 사용하였다.

검출가능 최소 누설률은 3 gpm(11.36 l/min)으로 가정하였고, 누설률이 10 gpm(37.9 l/min)이상이 되면 큰누설로 보았다. 재료의 극한강도는 70 ksi(483 MPa), 항복강도는 30 ksi(209 MPa)의 값을 가지며 유동응력은 평균이 50 ksi(345 MPa)이고 표준편차가 3.5 ksi(24.1 MPa)인 확률변수로 취급하였다.

과도현상으로 heat-up 과 cool-down 을 고려하며 이때 온도차는 550°F(288°C)이고 0.2 년의 주기로 발생한다. 정하중 응력은 2.08 ksi(14.34 MPa), 정하중 및 열팽창에 의한 응력은 8.58 ksi(59.2 MPa), 정상운전 압력은 2.4 ksi(16.55 MPa)이다.

초기균열에 대한 누설 및 LOCA 확률을 구하였다. 초기 균열은 배관 내면에 존재하는 원주방향 반타원형 표면균열로 가정하였고, 균열의 깊이는

**Table 3** Pipe properties used in this study

Type	OD(in)	Thickness(in)	ID(in)	Temp(°F)
Hot leg	34.6	2.8	29.0	606.9
Cold leg	32.9	2.7	27.5	541.2
Crossover	37.0	3.0	31.0	541.0

지수분포, 균열 중횡비  $b/a$  는 대수정규분포를 따르는 확률변수로 취급하였다. 이 경우 균열깊이의 확률밀도함수는 다음 식으로 표현된다.

$$p(a) = \lambda \exp(-\lambda a) \quad (2)$$

여기서  $\lambda$  는 매개변수이며  $\lambda = 4.07 \text{ in}^{-1}$  의 값이 계산에서 사용되었다. 이때 평균 균열깊이는  $1/\lambda$  로 표현된다. 균열 중횡비에 대한 대수정규분포에서 중앙값으로 1.34 in., 형태모수로 0.538 의 값이 사용되었다.

재료의 피로균열의 성장속도는 다음 식으로 표현된다.

$$\frac{da}{dN} = C \left[ \frac{\Delta K}{\sqrt{1-R}} \right]^4 \quad (3)$$

여기서  $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ ,  $R$  은 응력비,  $C$  는 상수이다.  $C$  는 대수정규분포를 보이는 확률변수로 취급되며, 이때 중앙값은  $9.14 \times 10^{-12}$ , 표준편차는  $2.2 \times 10^{-11}$  이다. 이때  $da/dN$  의 단위는 in/cycle 이고,  $\Delta K$  의 단위는  $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$  이다.

또한 불안전 균열성장 조건으로 전면항복이 발생하는 조건을 이용하였다.

#### 3.2 검사품질의 영향

검사품질의 영향을 살펴보았다. 사용전 검사만 행하고 사용중 검사는 행하지 않는 것으로 가정하였다. 양호한 품질의 경우 식 (1)의 계수값으로  $\epsilon = 0.02$ ,  $A^* = 0.42$ ,  $\nu = 1.6$  의 값들이 사용되었고, 한계 품질의 경우  $\epsilon = 0.10$ ,  $A^* = 1.12$ ,  $\nu = 1.6$  의 값들이 사용되었다. Fig. 2 에서 누설 및 LOCA 확률을 시간의 함수로 보여주고 있다. 얻어진 누설 및 LOCA 확률값들이 아주 작은 값들임을 알 수 있고, 검사품질에 따라 누설 및 LOCA 확률이 아주 달라짐을 알 수 있다.

이는 확률변수로 생성된 초기균열의 깊이가 커지는 경우 양호한 품질의 검사에서는 균열이

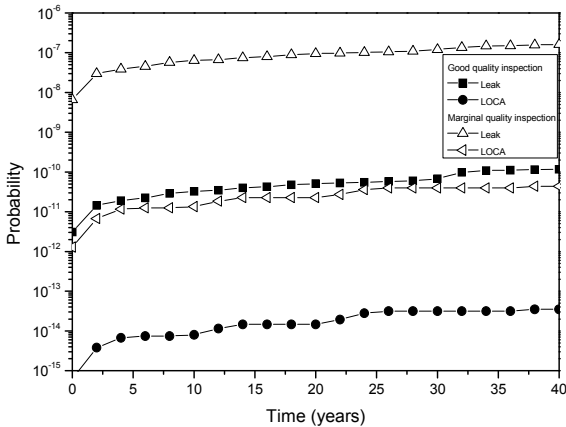


Fig. 2 Effect of quality of inspection on the failure probability of a pipe

많이 발견되어 보수되는데 반하여 한계 품질의 검사인 경우 발견되지 않고 그대로 존재하고 있어 가동중 누설이나 LOCA 로 연결되기 때문이다. 이를 볼 때 검사품질을 높여 깊이가 깊은 초기 균열을 제거하는 것이 대단히 중요함을 알 수 있다.

3.3 검사주기의 영향

다음으로 검사주기의 영향을 살펴보았다. Fig. 3 는 그 결과를 보여주고 있다. 가동중 검사를 하지 않은 경우, 5 년 및 10 년 마다 행한 경우의 누설 및 LOCA 확률을 보여주고 있다. 모든 경우 가동 전 검사는 행하는 것으로 가정되었다. 식 (1)의 계수 값으로 Table 1 의 A 에 도시된 디폴트 값이 사용되었다.

Fig. 3 의 결과로부터 가동 중 검사를 행하는 경우 누설확률 및 LOCA 확률을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 가동 중 검사를 행하는 경우 시간에 따라 파손확률이 계속적으로 증가함에 반하여 10 년 주기로 검사를 행하는 경우 10 년 가동시간에서의 파손확률에서 더 이상 증가하지 않고 거의 동일한 확률값을 유지함을 알 수 있다. 이는 10 년 주기의 검사에서 관통할 가능성이 있는 균열들이 대부분 발견되고, 남아 있는 균열들의 성장속도가 빠르지 않아 다음 검사주기까지 관통이 되지 못하기 때문으로 보인다. 5 년 주기로 검사를 행하는 경우 10 년 주기와 유사한 경향을 보이고 있고, 파손확률이 더욱 낮아지고 있다.

3.4 검출가능 최소 누설률의 영향

다음으로 검출가능 최소 누설률의 영향을 살펴보았다. 프로그램에서 누설률이 검출가능 최소 누설률

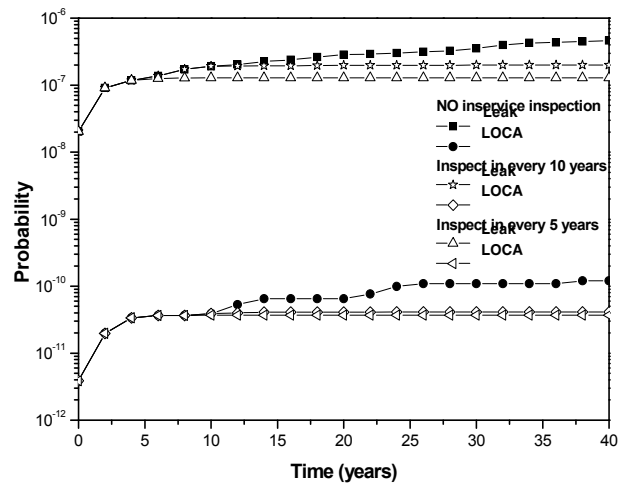


Fig. 3 Effect of inspection interval on the failure probability of a pipe.

보다 커지면 균열이 발견되어 보수되는 것으로 가정된다. 따라서 검출가능 최소 누설률이 작아지면 즉 누설률을 검출하는 장비의 성능을 높이면 보다 작은 균열을 찾을 수 있을 것이므로 배관의 파손을 낮출 수 있을 것이다. 그러나 Fig. 4 의 결과에서는 검출가능 최소 누설률을 0.1, 1.0 및 10 gpm 으로 했을 경우 거의 유사한 큰누설 및 LOCA 확률을 주고 있다.

이러한 결과가 얻어진 원인에는 프로그램에서 사용되는 관통균열 모델의 영향도 존재한다. 프로그램에서 Fig. 5(a)와 같은 표면균열이 관통조건을 만족하면 관통균열이 되는데 이때 보수적으로 누설을 평가하기 위하여 Fig. 5(b)에 도시된 형상의 관통균열로 가정된다. 이때에는 균열열림면적(crack opening area)이 크므로 누설률이 이미 10 gpm 정도 되는 관계로 검출가능 최소 누설률을 0.1 gpm 으로 가정하더라도 영향을 미치지 못한다. 그러나 실제 경우는 Fig. 5(c)와 같은 형상의 관통균열이 될 것이므로 이때에는 검출가능 최소 누설률의 영향이 나타날 것으로 판단된다. 따라서 검출가능 최소 누설률의 영향을 평가하기 위해서는 관통균열 모델을 실제 현상과 유사하게 수정하여야 한다.

4. 부식균열에서의 검사의 영향

4.1 해석문제

사용된 배관 및 하중 데이터는 피로균열 해석에서와 동일하다. 응력부식 균열은 재료의 응력부식에 대한 민감성, 가해지는 응력 및 부식환경의 세가지 조건이 만족될 때 생성된다. 응력부식균열의 생성 및 성장은 참고문헌 3 에 제시된 식을 사용

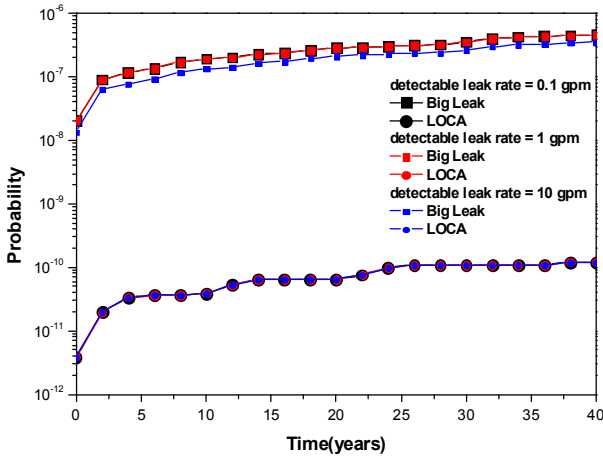


Fig. 4 Effect of detectable leak rate on the failure probability of a pipe

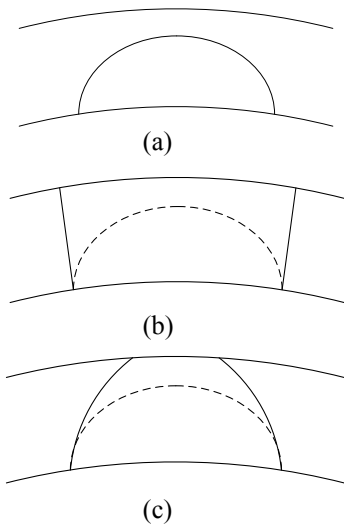


Fig. 5 Model of a through-thickness crack

하였고, 구체적인 식과 값은 참고문헌 2 및 3 에 제시되어 있다. 응력부식 균열성장의 경우 기동상태 산소 농도와 정상상태 산소농도가 성장속도에 큰 영향을 미친다. 응력부식에 의하여 균열이 생성될 때 균열 길이  $2b$  는 중앙값이 1/8 in.(3.18 mm) 인 대수정규분포로 가정되며,  $\log b$  의 표준편차로 0.85 의 값이 사용된다. 또한 생성 균열의 깊이는  $10^{-3}$  in.(0.0254 mm)로 가정된다.

4.2 초기 균열에 대한 검사품질의 영향

초기 균열에 대한 검사품질의 영향을 살펴보았다. 균열의 깊이는 지수분포로 가정되었고 식 (2) 에서  $\lambda=10.0 \text{ in}^{-1}$  의 값이 사용되었다. 균열 중형비는 대수정규분포를 따르는 확률변수로 취급하였고, 이때 중앙값은 1.34 in.이고, 형태모수는 0.538

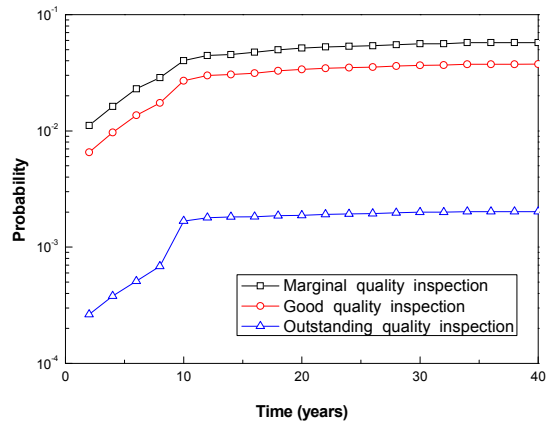


Fig. 6 Variation of leak probability according to the quality of pre-service and in-service inspections for an initial crack

이다.

기동상태 산소농도는 0.1 ppm 으로, 정상상태의 산소농도는 0.01 ppm 으로 가정하였다. 현재 운전 에 요구되는 산소농도 조건은 기동상태에서 0.1 ppm 이하를 유지하여야 하고, 정상상태에서 검출 이 불가능할 정도로 낮게 유지하여야 한다.

사용전 검사와 10 년 주기의 가동중 검사를 한 경우 고온관에 대하여 얻어진 누설확률은 Fig. 6 과 같다. 모든 경우 LOCA 는 발생되지 않았다. 그림에서 볼 때 검사품질의 영향이 아주 큼을 알 수 있다. 특히 우수한 품질의 검사를 행하는 경우 누설확률을 아주 많이 감소시킬 수 있다.

4.3 생성 균열에 대한 검사품질의 영향

다음으로 생성균열에 대한 검사품질의 영향을 살펴보았다. 초기 균열은 존재하지 않는다고 가정 하고 생성되는 균열만을 고려하였으며, 기동상태 산소농도는 0.1 ppm 으로, 정상상태의 산소농도는 0.08 ppm 으로 가정하였다. 정상상태의 산소농도를 0.01 ppm 으로 하는 경우 파손 확률값이 너무 작게 나와 계산 시간을 줄이기 위하여 산소농도 값을 크게 가정하였다. 가동중 검사는 10 년 주기로 한다고 보았다.

고온관에 대한 계산 결과를 Fig. 7 에 도시하였다. 그림에서 가동중 검사를 하지 않는 경우, 양호한 품질의 가동중 검사를 하는 경우, 아주 좋은 품질의 검사를 하는 경우에 대하여 누설확률을 시간의 함수로 도시하였다. 모든 경우 LOCA 는 발생되지 않았다. 그림에서 보는 바와 같이 검사를 하는 경우와 하지 않는 경우의 누설확률 차이가 그다지 크지 않음을 알 수 있고, 검사품질이 아주 좋은 경우에 누설확률이 작아지고 있으나 큰 차이는 보이지 않는다. 이 결과는 초기 균열에 대한

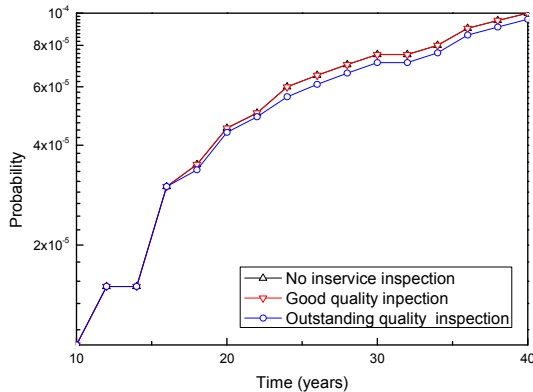


Fig. 7 Variation of leak probability according to the quality of in-service inspection. Only initiated cracks are considered

피로해석이나 응력부식해석 결과와 상이함을 알 수 있다.

생성 균열의 경우 검사품질이 배관 파손확률에 미치는 영향이 작은 이유는 다음과 같다. 응력부식의 생성 균열의 깊이는  $10^{-3}$  in.로 가정되기 때문에 이렇게 작은 균열깊이에서는 검사품질에 관계없이 검사로 균열을 찾을 수 있는 확률은 아주 낮다. 균열이 성장하여 가동중 검사에서 검출할 수 있는 깊이로 성장한 후에는 균열성장 속도가 빨라 10년 주기로 행해지는 가동중 검사 전에 배관을 관통하여 누설이 발생하게 되기 때문이다.

또한 모든 경우 LOCA 확률은 0이다. 그 이유는 누설이 발생된 후 LOCA로 연결되기 전에 누설률이 검출가능 최소 누설률보다 커서 균열이 검출되어 보수되기 때문이다.

## 5. 결론

P-PIE 프로그램을 이용하여 검사가 배관의 파손 확률에 미치는 영향을 살펴보았다. 국내 원자력발전소의 배관 데이터를 사용하였으며, 피로 및 SCC에 의한 균열성장을 고려하였다. 해석 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로 균열성장의 경우 검사품질이 누설 및

LOCA 확률에 미치는 영향이 크다.

(2) 피로 균열성장의 경우 검사 주기를 단축함으로써 배관 파손확률을 낮출 수 있다.

(3) 응력부식 균열성장에서 초기 균열을 고려하는 경우 검사품질이 파손확률에 미치는 영향은 크다.

(4) 응력부식 균열성장에서 생성 균열만을 고려하는 경우 검사품질이 파손확률에 미치는 영향은 제한적이다.

## 후기

이 논문은 2011년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) Park, J. H., Lee, J. B. and Choi, Y. H., 2010, "Development of P-PIE Program for Evaluating Failure Probability of Pipes in Nuclear Power Plants," *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 25, No. 6, pp. 1~8.
- (2) Park, J. H., Lee, J. B. and Choi, Y. H., 2011, "Analysis of Failure Probabilities of Pipes in Nuclear Power Plants due to Stress Corrosion Cracking," *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 2, pp. 6~12.
- (3) Harris, D. O. and Dedhia, D., 1998, "WinPRAISE 98 : PRAISE Code in Windows," EMT TR-98-4-1.
- (4) Park, J.H., Lee, J.B. and Choi, Y.H., 2010, "Effects of Several Factors on the Solution of Failure Probability of Pipes in Nuclear Power Plants," *Proceedings of ASME 2010 PVP Conference*, July 18-22, 2010, Bellevue, USA.
- (5) Park, J. S., Choi, Y. H. and Park, J. H., 2010, "Evaluation of Piping Failure Probability of Reactor Coolant System in Kori Unit 1 Considering Stress Corrosion Cracking," *Transactions of the Korean Society of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 6, No. 1, pp. 43~49.