

P-PIE 프로그램을 이용한 배관에서의 누설확률 평가

박재학[†] · 신창현^{*}

충북대학교 안전공학과 · *화학물질안전원

(2017. 4. 5. 접수 / 2017. 6. 29. 수정 / 2017. 12. 13. 채택)

Evaluation of Leak Probability in Pipes using P-PIE Program

Jai Hak Park[†] · Chang Hyun Shin^{*}

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University

*National Institute of Chemical Safety

(Received April 5, 2017 / Revised June 29, 2017 / Accepted December 13, 2017)

Abstract : P-PIE is a program developed to estimate failure probability of pipes and pressure vessels considering fatigue and stress corrosion crack growth. Using the program, crack growth simulation was performed with an initially existing crack in order to examine the effects of initial crack depth distribution on the leak probability of pipes. In the simulation stress corrosion crack growth was considered and several crack depth distribution models were used. From the results it was found that the initial crack depth distribution gives great effect on the leak probability of pipes. The log-normal distribution proposed by Khaleel and Simonen gives lower leak probability compared other exponential distribution models. The effects of the number and the quality of pre-service and in-service inspections on the leak probability were also examined and it was recognized that the number and the quality of pre-service and in-service inspections are also give great effect on the leak probability. In order to reduce the leak probability of pipes in plants it is very important to improve the quality of inspections. When in-service inspection is performed every 10 years and the quality of inspection is above the very good level, the leak probability shows nearly constant value after the first inspection for an initially existing crack.

Key Words : leak probability, pipe, crack growth simulation, crack depth distribution, pre-service inspection, in-service inspection

1. 서론

화학설비에 대한 위험성평가(risk assessment)를 위해 서나 원자력 배관에 대한 파단전 누설(leak before break, LBB) 개념의 적용을 위해서는 배관이나 압력용기에서의 누설확률을 정확하게 평가할 수 있어야 한다.

배관에 대한 누설확률의 평가 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 그 중 한 가지는 배관에 대한 포괄적인 누설확률을 구한 후 평가 대상 배관에 대한 구체적인 정보를 고려한 조정계수를 곱하여 누설확률을 평가하는 것이다. 이때 조정계수는 배관의 두께나 사용 연수 및 사용 환경 등을 고려하여 정하게 된다. 다른 한 가지는 배관에 초기 결함을 가정한 후에 이 균열의 성장해석을 행하여 관통균열이 되는 과정을 시뮬레이션 하고, Monte Carlo 방법을 이용하여 누설확률을 구하는 방법이다.

포괄적인 누설확률을 이용하는 방법으로 1981년 Thomas¹⁾가 배관과 압력용기에 대한 포괄적 누설 및 파단 확률을 이용하여 대상 배관과 압력용기에 대한 누설 및 파단확률을 구하는 방법을 소개하였고, Lydell²⁾은 Thomas에 의하여 제안된 방법을 수정한 방법을 제시하였다. API RP-581 코드³⁾에서도 배관의 파손확률을 구하는 방법이 제시되고 있으며, 배관에 대한 파손확률 데이터베이스로부터 파손확률을 구하는 방법^{4,5)}도 제시되고 있다.

가정된 균열의 성장해석을 이용하여 누설과 파단확률을 구하는 방법으로는 PICEP⁶⁾, PRAISE^{7,8)}, PRO-LOCA^{9,10)} 등의 프로그램이 개발되어 원자력발전소 배관해석에 사용되고 있다. 박재학^{11,12)}은 한국원자력안전기술원과 함께 배관에서의 누설과 파단확률을 구할 수 있는 P-PIE 프로그램을 개발하였다.

본 논문에서는 배관에서의 누설확률을 구할 수 있는

[†] Corresponding Author : Jai Hak Park, Tel : +82-43-261-2460, E-mail : jhpark@chungbuk.ac.kr

Department of Safety Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Korea

방법들에 대하여 살펴보고 P-PIE 프로그램을 사용하여 배관에 대한 파손확률을 계산하여 초기 균열크기 분포 특성 및 비파괴검사 특성이 파손확률에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 통하여 주요 변수가 누설확률에 미치는 영향을 살펴보고 또한 검사 회수와 검사 성능의 중요성 등을 검토하였다.

2. 누설확률을 구하는 방법

2.1 포괄적 누설확률 데이터의 이용

우선 포괄적 누설확률 데이터를 이용하여 배관에 대한 누설확률을 구하는 방법에 대하여 살펴본다. 1981년 Thomas¹⁾는 배관과 압력용기에서의 누설확률이 대체적으로 $10^{-7} \sim 10^{-9}/(Q_e \text{ year})$ 범위의 값을 가진다고 하였다. 여기서 Q_e 는 다음과 같이 정의되는 변수이다.

$$Q_e = Q_p + 50Q_w \quad (1)$$

여기서 Q_p 는 배관 모재부분의 Q 값, Q_w 는 배관 용접부의 Q 값이다. Q 는 배관의 크기나 형상이 누설률에 미치는 영향을 고려하기 위하여 도입된 변수로, $Q = DLh^{-2}$ 로 정의되는데, D 는 배관의 평균직경, L 은 길이, h 는 배관 두께이다. 또한 식(1)에 포함된 50의 값은 용접부의 누설확률이 모재부에 비하여 50배 큼을 의미한다.

그리고 누설확률 P_L 의 대표 값으로 다음 식을 제시하였다.

$$P_L \sim 10^{-7} Q_e F \quad (2)$$

여기서 F 는 플랜트 노화계수(plant age factor)로 플랜트의 가동연수를 고려한 계수이며, 플랜트가 10년 가동된 경우 $F=1$ 이고, 20년 가동된 경우 $F=1.378$ 이 된다. 즉 가동시간이 증가함에 따라 F 의 증분은 점차 감소된다.

2000년 Lydell²⁾은 Thomas¹⁾가 제시한 방법을 수정한 방법을 제시하였다. 우선 Q_e 를 다음과 같이 수정하였다.

$$Q_e = Q_p + A Q_w \quad (3)$$

여기서 A 를 용접부 패널티계수 (weld penalty factor)라고 하고, Thomas의 경우 $A=50$ 의 일정한 값을 사용하였으나 Lydell은 경우에 따라 다른 값을 사용할 수 있도록 하였다. Lydell의 해석에서 $Q_p = DLh^{-2}$ 로 정의하여 Thomas의 Q 정의와 동일하나 Q_w 는 다음과 같이 상이하게 정의하였다.

$$Q_w = 1.75 ND/h \quad (3)$$

여기서 N 은 설비의 배관에서 원주방향 용접이 행해진 부위의 수이며, 1.75의 값이 곱해진 이유는 용접부에서 열영향부까지 포함하는 경우 용접부 폭의 1.75배 정도 된다고 가정하였기 때문이다.

배관 파손에 관한 데이터베이스를 이용하여 배관 누설 혹은 파단확률을 구하려는 연구도 계속되고 있으며^{4,5)}, 배관의 파손확률의 예를 Table 1에서 보여주고 있다. Table 1은 영국의 HSE(Health and Safety Executive)에서 주고 있는 데이터이다¹³⁾. 배관의 길이 1 m당 1년 동안의 파손율(failure rate)을 보여주고 있다. 표에서 구멍크기(hole size)는 배관에 발생하는 구멍의 크기를 의미하며, 구멍크기가 클수록 배관 내 유체의 누설률도 증가한다. 또한 길로틴(Guillotine)은 배관의 파단을 의미한다. Table 1에서 볼 때 동일한 크기의 파손에서 배관의 직경이 커질수록 파손율은 점차 작아지고 있음을 알 수 있다.

배관의 파손확률을 API RP-581 코드³⁾에서 제시하고 있는 다음 식을 통해서도 평가할 수 있다.

$$P_f(t) = gff \cdot D_f(t) \cdot F_{MS} \quad (4)$$

여기서 $P_f(t)$ 는 시간의 함수로 표시되는 파손확률, gff 는 포괄적 파손빈도(generic failure frequency), $D_f(t)$ 는 손상계수(damage factor), F_{MS} 는 관리시스템계수(management system factor)이다.

Table 1. Failure rate per m per year for pipe diameter¹³⁾

Hole size	Pipe diameter (mm)				
	0 - 49	50 - 149	150 - 299	300 - 499	500 - 1000
3 mm diameter	1×10^{-5}	2×10^{-6}	-	-	-
4 mm diameter	-	-	1×10^{-6}	8×10^{-7}	7×10^{-7}
25 mm diameter	5×10^{-6}	1×10^{-6}	7×10^{-7}	5×10^{-7}	4×10^{-7}
1/3 pipe diameter	-	-	4×10^{-7}	2×10^{-7}	1×10^{-7}
Guillotine	2×10^{-6}	5×10^{-7}	2×10^{-7}	7×10^{-8}	4×10^{-8}

2.2 균열성장 시뮬레이션을 이용하는 방법

배관에서의 누설 및 파단확률을 구하는 다른 방법으로 초기 균열을 가정한 다음, 균열의 성장을 시뮬레이션하고 이를 통하여 확률을 구하는 방법이 있다. 박재학¹¹⁾은 P-PIE 프로그램을 개발하여 누설확률과 파단확률을 구하였다. P-PIE 프로그램에서는 다음과 같은 과정으로 해석이 행해진다¹¹⁾.

(1) 배관 내면 표면에 균열 길이 및 깊이가 어떠한 확률분포를 따르는 초기 표면균열들을 가정한다.

(2) 가동전 비파괴검사를 시뮬레이션 한 후 발견된 균열은 보수가 되었다고 가정하고 초기 균열분포에서 제외시킨다.

(3) 시간을 증가시켜 가며 해석을 행한다. 현 해석 단계의 시간을 $t_i (= t_{i-1} + \Delta t)$ 라 하자. 여기서 Δt 는 시간의 증분이다.

(4) Δt 시간동안 응력부식에 의하여 새로 생성된 균열을 균열분포에 포함시킨다.

(5) 균열들에 대한 응력강도계수(stress intensity factor, SIF)를 계산한다. 이때 고려되는 응력들은 압력과 굽힘 모멘트 등에 의한 기계적 응력과 열응력, 지진응력, 진동 응력 및 잔류응력 등이다. 이들 응력들은 데이터로 입력되거나 별도의 모듈에서 계산된다.

(6) 피로나 응력부식에 의한 균열의 성장량을 구한다.

(7) 성장된 균열에 의하여 배관이 파단되거나 누설이 발생되는지 검토한다.

(8) 파단되거나 누설이 발생되는 경우 파단회수 또는 누설회수에 1을 더한다.

(9) 해당 시간에 가동중 비파괴검사가 행해지는 경우 이를 시뮬레이션 하고, 발견된 균열은 균열분포에서 제외시킨다.

(10) $t_i > t_{given}$ 의 조건이 만족될 때까지 단계 (3)에서 단계 (9)까지의 해석을 반복하여 행한다. 여기서 t_{given} 은 주어진 시간이다.

(11) 충분한 시뮬레이션 회수가 될 때까지 단계 (1)에서 단계 (10)까지의 해석을 반복하여 행한다.

(12) 시뮬레이션 회수와 파단회수 또는 누설회수로부터 파단확률 또는 누설확률을 계산한다.

3. 누설확률에 영향을 주는 주요 인자

3.1 초기 균열크기 분포 및 발생빈도

균열 성장 시뮬레이션을 통하여 누설확률을 구할 경우 초기 균열크기 분포와 균열의 발생빈도, 균열성장속도, 검사성능 등이 누설확률에 미치는 영향이 크기 때문에

이와 관련된 데이터에 대한 정확한 값이 알려져야 한다. 우선 현재까지 제안되어 있는 값들을 검토하고, 이들 변수들이 누설확률에 미치는 영향을 살펴본다.

균열 깊이 a 를 지수분포나 대수정규분포로 나타낼 수 있다. 지수분포의 경우 확률밀도함수는 다음 식으로 표현되며, μ 는 균열 깊이의 평균과 동일하다.

$$f(a) = \frac{1}{\mu} e^{-a/\mu} \quad 0 \leq a \leq \infty \quad (6)$$

Marshall은 균열 깊이 a 를 지수분포로 나타내고 $\mu = 6.248 \text{ mm}(0.246 \text{ inch})$ 의 값을 가진다고 하였다. 그러나 Harris 등¹⁴⁾은 Marshall의 μ 값은 보수적으로 크게 취한 값이라고 하고, $\mu = 1.702 \text{ mm}(0.067 \text{ inch})$ 의 값을 사용하는 경우 228개의 표면균열 데이터에서 구해진 Becher와 Hansen의 대수정규분포에 가까운 분포가 된다고 하였다.

균열 깊이 a 를 대수정규분포로 나타낼 경우 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(a) = \frac{1}{\lambda a \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln(a/a_{50})]^2}{2\lambda^2}\right\} \quad (7)$$

여기서 a_{50} 는 균열 깊이의 중앙값이고 λ 는 형상모수(shape parameter)이다. a_{50} 과 λ 에 대한 값으로 다음과 같은 값들이 주어지고 있다^{9,14)}. 페라이트 강의 MMAW(manual-metal-arc weld) 용접부에 대해서는,

$$a_{50} = 0.0519h^{[-0.4572 + 0.04326 \ln(h)]} \quad (8)$$

$$\lambda = 0.5102 + 0.2294 \ln(h) \quad (9)$$

으로 주어지고, 페라이트 강 TIG 용접부에 대해서는,

$$a_{50} = 0.0519h^{[-0.8592 - 0.2467 \ln(h)]} \quad (10)$$

$$\lambda = 0.5665 + 0.2862 \ln(h) \quad (11)$$

으로 주어진다. 여기서 h 는 배관 두께이며 단위는 inch이다.

균열의 종횡비분포는 균열의 깊이와 관계가 없다고 가정된다. 다만 $b < a$ 인 경우는 배제된다. 종횡비분포는 지수분포 혹은 대수정규분포로 나타내고 지수분포인 경우의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$p(\beta) = \begin{cases} 0 & \text{when } \beta < 1 \\ \lambda e^{-\lambda(\beta-1)} & \text{when } \beta > 1 \end{cases} \quad (12)$$

여기서 $\beta = b/a$ 이고, a 는 균열 깊이, $2b$ 는 표면에서의 균열 길이이다.

균열발생빈도도 누설확률에 큰 영향을 미친다. 프로그램에서 균열의 존재확률은 용접체적의 지배를 받는다고 가정된다. 용접체적에는 열영향부까지 포함되고 용접부 폭은 배관두께의 두 배정도로 가정되며, 이 경우 용접체적 V 는 다음과 같다.

$$V = \pi D_i h (2h) = 2\pi D_i h^2 \quad (13)$$

여기서 D_i 는 배관의 내경이다.

단위체적당 균열이 존재할 확률을 P_V^* 로 나타낸다면, Harris 등¹⁵⁾은 P_V^* 값은 대략적으로 $10^{-5} \sim 2 \times 10^{-4}/\epsilon^3$ 의 범위를 가진다고 하고, 대표적인 값으로 $P_V^* = 10^{-4}/\epsilon^3$ 을 제안하였다.

winPRAISE⁸⁾와 PRO-LOCA⁹⁾ 프로그램에서는 배관 내면의 용접부 길이 25.4 mm(1 inch)당 균열 개수 n_{cr} 에 대하여 다음 식을 사용하고 있다.

$$n_{cr} = \text{larger} \left[\begin{array}{c} 0.000655 \exp(1.491499 h) \\ \text{or} \\ 0.0022 h^2 - 0.0066 h + 0.0063 \end{array} \right] \quad (14)$$

여기서 h 는 배관 두께이며 단위는 inch이다. 식에서 주는 값은 검사가 행해진 후의 값이다. 검사가 행해지지 않은 경우는 식에서 계산된 값에 12.8을 곱하여야 한다⁸⁾.

3.2 균열성장 속도

응력부식 균열성장 모델의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\frac{da}{dt} = A (K - K_{th})^n \quad (15)$$

여기서 K 는 응력확대계수(stress intensity factor)이고, $K \leq K_{th}$ 이면 균열이 성장되지 않으며, A 와 n 은 재료에 따라 주어지는 상수이다. 계수 A 가 확률변수로 표현된다.

피로균열 성장에 대한 일반적인 식은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^n \quad (16)$$

보다 일반적인 형태의 피로균열 성장모델로 다음 식이 제안되어 있다⁹⁾.

$$\frac{da}{dN} = E(T_R, \text{material, chemistry}) \times C(T)S(R)C(\Delta K)^n \quad (17)$$

여기서 E 는 환경의 영향을 고려한 수정계수로 하중의 증가시간(rise time) T_R 과 재료 및 환경에 따라 변한다. $C(T)$ 는 온도의 영향을 $S(R)$ 은 응력비의 영향을 고려한 수정계수이다.

3.3 비파괴검사 성능

프로그램에서 가동전 및 가동중 비파괴검사를 고려할 수 있다. 프로그램에서 불검출확률은 다음 식과 같이 표현된다⁸⁾.

$$P_{ND}(A) = \epsilon + \frac{1}{2}(1 - \epsilon) \operatorname{erfc}\left(\nu \ln \frac{A}{A^*}\right) \quad (18)$$

여기서 P_{ND} 는 균열면 면적이 A 인 균열이 발견되지 않을 확률이고, ν , ϵ , A^* 는 상수들이다. 만약 균열 길이 $2b$ 가 탐촉자 직경 D_B 보다 작으면 균열의 면적은 $A = (1/2)\pi ab$ 으로 주어지고, 만약 $2b$ 가 D_B 보다 큰 경우는 $A = (1/4)\pi a D_B$ 으로 주어진다⁸⁾.

$A = (1/4)\pi a D_B$ 와 같이 A 가 균열 깊이 a 에 대하여 선형적으로 변하는 경우 식(18)은 다음과 같이 표현된다.

$$P_{ND}(A) = \epsilon + \frac{1}{2}(1 - \epsilon) \operatorname{erfc}\left(\nu \ln \frac{a}{a^*}\right) \quad (19)$$

여기서 a^* 는 P_{ND} 값이 0.5가 되는 균열 깊이, ϵ 은 크기가 큰 균열에서 예상되는 P_{ND} 의 최소값이다. Griesbach 등¹⁷⁾은 4가지 단계의 비파괴검사 품질에 대하여 Table 2와 같은 값을 제안하였다.

Table 2. P_{ND} curve parameters for four performance levels¹⁷⁾ (h is the wall thickness of the pipe)

Inspection Performance Level	a^*/h	ϵ	ν
Marginal	0.65	0.25	1.4
Good	0.40	0.10	1.6
Very good	0.15	0.02	1.6
Advanced	0.05	0.005	1.6

4. 주요 인자의 영향

4.1 초기 균열크기의 영향

누설확률에 큰 영향을 미치는 인자 중의 한 가지가

초기균열 크기이다. 가정된 균열크기가 누설확률에 미치는 영향을 살펴본다.

원주방향 반타원형 표면균열 1개가 배관 내면에 존재하는 것으로 가정하였다. 배관은 외경이 406.4 mm (16 inches)이고 두께는 12.7 mm로 가정하였다. 배관 재료는 저합금강이고, 응력부식에 의한 균열 성장만을 고려하였다. 성장속도는 식(15)에서 $A=3.29 \times 10^{-17}$, $K_{th}=0$, $n=4.0$ 의 값을 사용하였다. 이때 K 의 단위는 $MPa\sqrt{m}$ 이고 da/dN 의 단위는 m/s이다. 성장속도로 사용된 값들은 참고문헌 16에서 General Electric 모델의 저유황곡선(low sulphur line)으로 주고 있는 값으로 288°C 정도의 온도에서 저합금강에 대한 SCC 성장률 데이터의 보수적인 상한계를 나타내는 값이다.

재료의 항복강도는 234 MPa, 극한강도는 534 MPa, 탄성계수는 $E=184$ GPa의 값을 사용하였고, 다음 식과 같은 Ramberg-Osgood 식으로 나타내는 경우 $\alpha=1.57$, $n=4.59$ 의 값을 사용하였다¹⁸⁾. Ramberg-Osgood 식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_o} = \frac{\sigma}{\sigma_o} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (20)$$

여기서 ϵ 은 변형률, σ 는 응력, σ_o 는 참조응력(reference stress)으로 항복강도와 동일한 값이 사용되었고, $\epsilon_o = \sigma_o/E$ 이다.

가동전 및 가동중 행하는 비파괴검사에서 검사 품질로 Table 2의 좋음(Good)에 해당되는 값을 사용하였다. 배관에는 축방향으로 112.6 MPa의 응력이 작용한다고 가정하였다.

초기균열 깊이의 영향을 보기 위하여 다음과 같은 네 가지 경우의 균열 깊이 분포에 대하여 살펴보았다.

- ① $\mu=6.25$ mm인 경우의 지수분포
- ② $\mu=1.70$ mm인 경우의 지수분포
- ③ $a_{50}=1.848$ mm (0.07275 in.), $\lambda=0.3512$ 인 경우의 대수정규분포
- ④ $a_{50}=1.318$ mm (0.0519 in.), $\lambda=0.5102$ 인 경우의 대수정규분포

분포 ③과 ④의 경우는 페라이트 강의 MMAW 용접부에 해당되는 값으로 각각 배관두께 0.5 in. 및 1.0 in.를 식(8) 및 (9)에 대입하여 얻어진 값이다. 또한 λ 는 사용하는 길이 단위에 무관하게 동일한 값을 가진다.

각각의 분포를 그리면 Fig. 1과 같다. 그림에서 볼 때 지수분포는 균열 깊이가 깊어짐에 따라 존재 확률

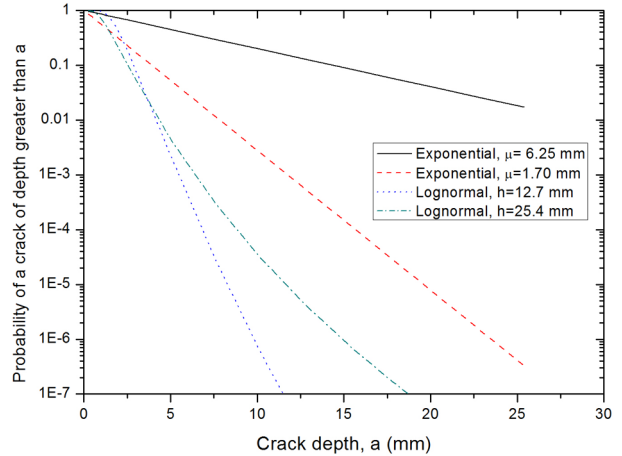


Fig. 1. Crack depth distributions.

이 서서히 감소되는 반면 대수정규분포는 급격히 감소하고 있음을 알 수 있고, $\mu=6.25$ mm인 경우의 지수분포는 다른 분포에 비하여 깊은 균열의 발생확률이 너무 높아 보수적으로 설정된 분포임을 알 수 있고, $\mu=1.70$ mm인 경우의 지수분포도 대수정규분포에 비하여 깊은 균열의 발생확률이 높음을 알 수 있다.

균열 깊이의 영향을 보기 위하여 초기 균열 깊이가 $\mu=1.70$ mm인 경우의 지수분포와 $a_{50}=1.848$ mm, $\lambda=0.3512$ 인 경우의 대수정규분포를 나타내는 경우에 대하여 누설확률을 구하였다. 이때 가동전 검사는 행하지 않지만 가동 중에는 검사를 행하지 않는 것으로 가정하였고, 균열의 중형비는 대수정규분포를 따른다고 보았다. 이때 중형비의 중앙값으로 1.158, 형상모수 값으로 0.383의 값을 사용하였다.

해석 결과는 Fig. 2와 같다. 처음부터 존재하는 균열 1개에 대한 누설확률을 가동시간의 함수로 나타내었다. 30년 가동 후의 누설확률이 지수분포의 경우 1.731×10^{-3} 이고, 대수정규분포의 경우 9.29×10^{-6} 이 얻어졌다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 사용되는 균열 깊이 분포에 따라 누설확률이 많이 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 정확한 누설확률을 구하기 위해서는 정확한 균열 깊이 분포를 사용하는 것이 중요함을 알 수 있다.

Fig. 2의 누설률은 1개의 균열이 존재하는 경우의 값이므로 용접부 단위 길이에 대한 누설확률을 구하기 위해서는 얻어진 누설확률에 균열이 존재하는 빈도를 곱하여야 한다. 식(14)에 의하면 두께가 12.7 mm인 경우 용접부 길이 25.4 mm당 균열의 존재 빈도는 0.00355개이고, 용접부 1 m당 빈도는 0.1398개이다. 따라서 30년 가동 후의 용접부 길이 1 m당 누설확률은 지수분포의 경우 2.42×10^{-4} 이고, 대수정규분포의 경우 1.299×10^{-6} 이 된다.

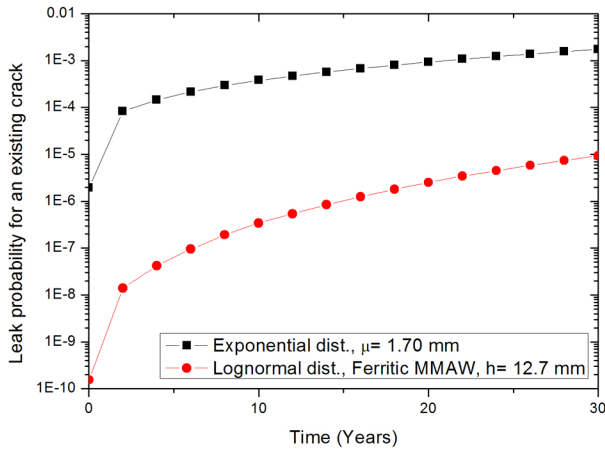


Fig. 2. Leak probability for an existing crack,

4.2 가동중 검사 회수의 영향

가동중 행하는 검사가 누설확률에 미치는 영향을 살펴보았다. 해석에서 가동전 검사는 행하는 것으로 하였고, 비파괴검사의 성능은 Table 2의 좋음(Good)에 해당되는 값을 사용하였다. 초기 균열 깊이는 $a_{50} = 1.848$ mm, $\lambda = 0.3512$ 의 대수정규분포로 가정하였다.

Fig. 3에서는 가동중 검사를 하지 않는 경우, 10년에 한 번 검사를 하는 경우, 5년에 한번 검사를 하는 경우의 누설확률을 보여주고 있다. 30년 가동 후 검사를 하지 않는 경우의 누설확률이 9.29×10^{-6} , 10년에 한 번 검사한 경우는 1.010×10^{-6} , 5년에 한 번 검사 하는 경우는 1.465×10^{-7} 으로 낮아지고 있다.

Fig. 4는 검사회수가 누설확률의 증가율에 미치는 영향을 보여주고 있다. 검사를 행하지 않는 경우는 누설확률의 증가율이 계속 증가하고 있지만 검사를 행하는 경우는 증가율이 낮아 졌다가 가동시간에 따라 다시 증가하고 있는 것을 알 수 있다.

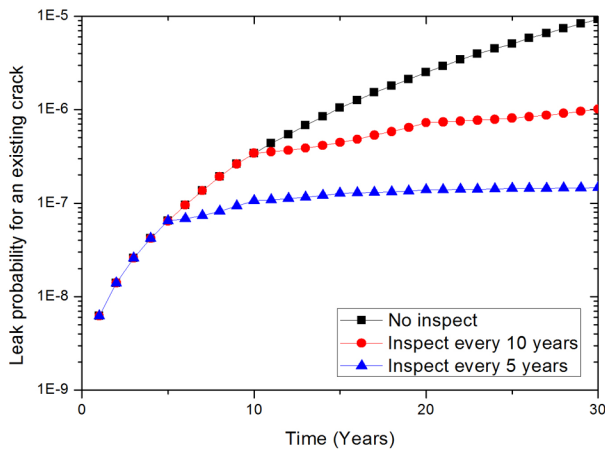


Fig. 3. Effect of the number of in-service inspections on the leak probability for an existing crack,

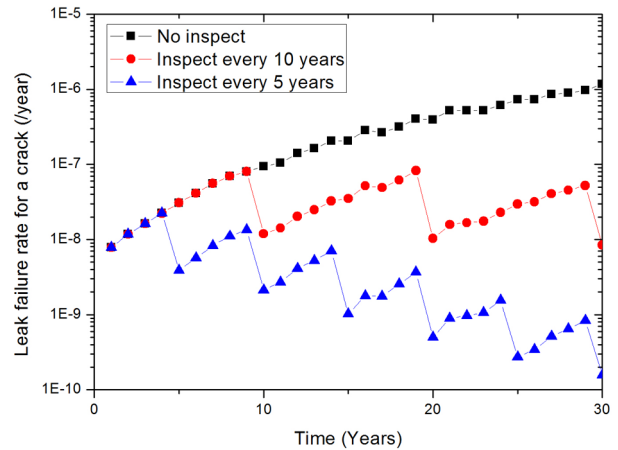


Fig. 4. Effect of the number of in-service inspections on the leak failure rate for an existing crack,

4.3 검사 품질의 영향

검사의 품질이 누설확률에 미치는 영향을 살펴보았다. 검사를 행할 경우 결함이 발견되지 않을 확률은 식 (18)과 식(19)로 표현되고 검사 품질에 따라 계수 값들은 Table 2와 같이 제안되고 있다. 배관의 두께가 12.7 mm인 경우 각 검사 품질에 따른 미검출확률을 균열 깊이의 함수로 나타내면 Fig. 5와 같다. 검사 품질이 나쁜 경우 검사 후에도 크기가 큰 균열이 존재할 가능성이 높음을 알 수 있다.

Fig. 6은 검사 품질이 누설확률에 미치는 영향을 보여주고 있다. 가동중 검사는 행하지 않고 가동전 검사만 행한 경우이다. 가동전 검사의 품질에 의해서도 누설확률의 차이가 많이 남을 알 수 있다. 따라서 가동전 검사의 품질을 향상시킴으로써 설비 가동기간 동안 누설확률을 상당히 낮출 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 7은 가동전 검사와 함께 10년에 한 번씩 가동중

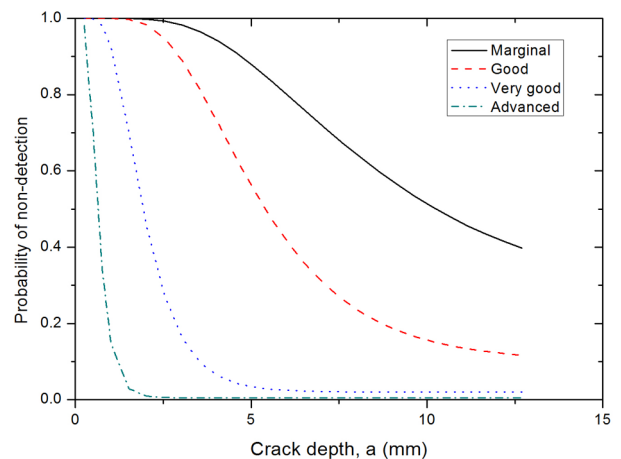


Fig. 5. Probability of non-detection as a function of crack depth,

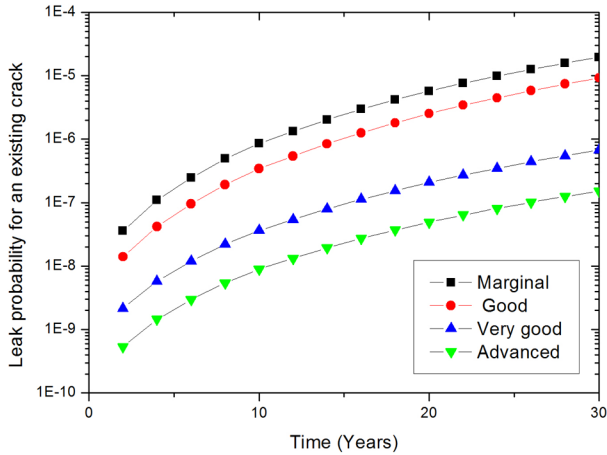


Fig. 6. Effect of the inspection performance level on the leak probability of an existing crack when only pre-service inspection is performed.

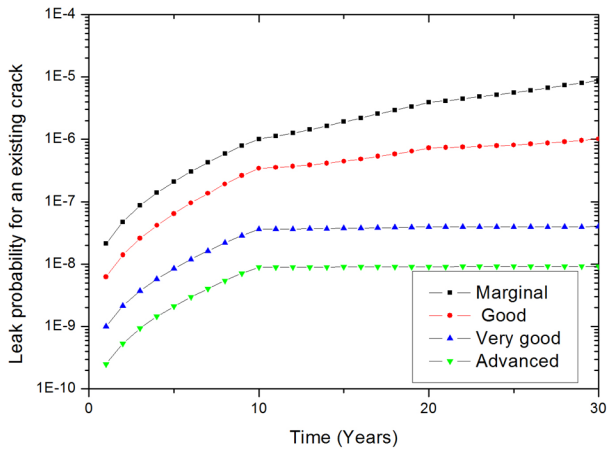


Fig. 7. Effect of the inspection performance level on the leak probability of an existing crack when in-service inspection is performed every 10 years.

검사를 행한 경우의 가동기간에 따른 누설확률의 변화이다. 검사 품질이 매우 좋음(Very good) 이상인 경우는 10년 뒤에 행하는 가동중 검사 시의 누설확률이 더 이상 증가되지 않고 그대로 유지됨을 볼 수 있고, 검사 품질이 좋음(Good)인 경우는 10년 후에 행하는 가동중 검사 시의 누설확률에서 조금 더 증가하고 있으나 증가율은 가동중 검사 이전에 비하여 아주 낮아지고 있음을 볼 수 있다. 이로부터 가동 중에 행하는 검사가 누설확률을 낮추는데 아주 중요함을 알 수 있다.

4. 결론

초기균열을 가정하고, 응력부식에 의한 균열성장을 시뮬레이션 하는 방법을 이용하여 배관에서의 누설확

률을 해석하였고, 초기균열 깊이 분포, 검사 회수 및 검사 품질 등 주요변수들이 누설확률에 미치는 영향을 살펴보았다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기 균열의 깊이 분포가 누설확률에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. Khaleel와 Simonen이 제안한 대수정규분포를 사용한 경우 Harris 등이 제안한 지수 분포로 가정한 경우보다 작은 누설확률을 얻었다.
2. 가동전 검사만을 행하는 경우 검사 품질이 누설 확률에 미치는 영향을 살펴보았고, 검사 품질에 따라 가동 중의 누설확률이 많이 달라짐을 확인할 수 있었다. 따라서 검사 품질을 높이는 것이 누설확률을 낮추는데 아주 중요하다.
3. 가동전 검사와 가동중 검사를 행하는 경우 검사 회수 및 검사 품질이 누설확률에 미치는 영향을 살펴보았고 누설확률에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 초기 균열만을 고려하고 생성 균열을 고려하지 않는 경우에는 검사 품질이 높은 가동중 검사를 행한 후 누설 확률이 증가하지 않고 거의 동일한 값을 유지하였다.

감사의 글: 이 논문은 2015년도 충북대학교 학술연구지원사업의 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음

References

- 1) H. M. Thomas, "Pipe and Vessel Failure Probability", Reliability Engineering, Vol. 2, pp. 83-124, 1981.
- 2) B. O. Y. Lydell, "Pipe Failure Probability-the Thomas paper revisited", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 68, pp. 207-217, 2000.
- 3) American Petroleum Institute, Risk-Based Inspection Technology, API RP-581, 2nd Ed., American Petroleum Institute, Washington, USA, 2008.
- 4) B. Lydell and J. Rizinec, "OPDE-The International Pipe Failure Data Exchange Project", Nuclear Engineering and Design, Vol. 238, pp. 2115-2123, 2008.
- 5) R. Nyman, et al., Reliability of Piping System Components. Framework for estimating failure parameters from service data, Report 97:26, Swedish Nuclear Power Inspectorate, Stockholm, Sweden, 1997.
- 6) D. M. Norris, A. Okamoto, B. Chexal and T. Griesbach, "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program", EPRI Report EPRI NP-3596-SR, 1984.
- 7) D. O. Harris, D. D. Dedhia and S. C. Lu, "Theoretical and User's Manual for pc-PRAISE", USNRC Report NUREG/

- CR-5864, 1992.
- 8) D. O. Harris and D. Dedhia, "WinPRAISE 07; Expanded PRAISE Code in Windows", Structural Integrity Associates, Inc., 2007.
 - 9) PRO-LOCA-GUI/PRO-LOCA User's guide (Version 3.5.32), Battelle, 2009.
 - 10) Y. K. Cho, S. H. Kim and J. H. Park, "Sensitivity Analyses of Failure Probability of Pipes in Nuclear Power Plants Using PRO-LOCA", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 29, No. 3, pp. 136-142, 2014.
 - 11) J. H. Park, Development of a Program for Assessment of LOCA Probability of Pipes, KINS Report, KINS/HR- 1337, 2014.
 - 12) J. H. Park, J. B. Lee and Y. H. Choi, "Development of P-PIE Program for Evaluation Failure Probability of Pipes in Nuclear Power Plants", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 25, No. 6, pp. 1-8, 2010.
 - 13) HSE, Failure Rate and Event Data for Use within Risk Assessment (28/06/2012), 2012, HSE Publication
 - 14) M. A. Khaleel and F. A. Simonen, Evaluation of Structural Failure Probabilities and Candidate Inservice Inspection Programs, NUREG/CR-6986, Pacific Northwest National Lab., Washington, USA, 2009.
 - 15) D. O. Harris, E. Y. Lim and D. D. Dedhia, Probability of Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant, NUREG/CR-2189, Vol. 5, Science Applications Inc., Livermore, California, USA, 1981.
 - 16) H. P. Seifert, Literature Survey on the Stress Corrosion Cracking of Low-Alloy Steels in High-Temperature Water, PSI Bericht Nr. 02-06, Paul Scherrer Institut, 2002.
 - 17) T. J. Griesbach, D. O. Harris, H. Qian, D. Dedhia and J. Hayden, "The Effects of Flaw Size and In-Service Inspection on CASS Piping Reliability", 9th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components, May 22-24, 2012, Seattle, Washington, USA, 2002.
 - 18) K. D. Bae, H. W. Ryu, Y. J. Kim, J. W. Kim, J. S. Kim and Y. J. Oh, "Determination Method of Ramberg-Osgood Constants for Leak Before Break Evaluation", Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 39, No. 7, pp. 645-652, 2015.