

<논 문>

페라이틱 강 배관내의 원주방향 표면균열 평가를 위한 새로운 Z-Factor의 개발

최영환* · 정연기* · 이정배* · Gery Wilkowski**

(1995년 9월 28일 접수)

Development of New Z-Factor for the Evaluation of Circumferential Surface Crack in Ferritic Steel Pipings

Y. H. Choi, Y. K. Chung, J. B. Lee and Gery Wilkowski

Key Words : Circumferential Surface Crack (원주방향 표면균열), Ferritic Steel Pipings (페라이틱 강 배관), ASME Z-Factor Method (ASME Z-Factor 방법), Z-Factor (Z 계수), Limit Load Method (한계하중방법)

Abstract

The purpose of this paper is to develop new Z-Factors to evaluate the behavior of circumferential surface crack in ferritic steel pipings including base metal and Submerged Arc Weld(SAW) metal in nuclear power plant. The Z-Factor is a load multiplier to convert plastic load to elasto-plastic load. However the current Z-Factor gives too conservative results. In this study, a J-estimation method, SC.TNP method, which is based on GE/EPRI expression, is used to develop new Z-Factors. The desirabilities of both the SC.TNP method and the new Z-Factors are examined using the previous experimental results for the circumferential surface crack in ferritic steel pipings. The results are as follows ; (1) The SC.TNP method is good for describing the circumferential surface crack behavior in ferritic steel pipings, while the well-known R6 method and DPFAD method give too conservative results. (2) The ASME Z-Factor method using new Z-Factors well predicts the behavior of circumferential surface crack in ferritic steel pipings including base metal and SAW metal.

기 호 설 명

a : 원주방향 표면균열의 균열길이

A_{ASME} : ASME A 값

A_{NEW} : 새로운 A 값

A_{NEW-1} : 페라이틱 강 배관 모재에 대한 새로운 A 값

A_{NEW-2} : 페라이틱 강 배관 SAW 용접부에 대한 새로운 A 값

b : 균열 비형성부길이 (uncracked ligament, $b = t - a$)

FR : 파괴비 (fracture ratio)

h_1, h_3 : GE/EPRI 방법 계수

H_n : SC, TNP 방법 계수

I : 관성모멘트 (moment of inertia)

J : J-적분

L : SC, TNP 방법 특성길이

M : 배관에 가해지는 모멘트

M_{EP-max} : 탄소성 해석에서 결정된 최대하중 (모멘트)

*회원, 한국원자력안전기술원 기계설비그룹

**Engineering Mechanics Group, Battelle Memorial Institute, USA

- M_{exp} : 실험에서 측정된 최대모멘트
- M_L : 한계하중(모멘트)
- M_{pred} : Z-Factor 방법으로 결정된 최대모멘트
- n : Ramberg-Osgood 경화지수
- OD : 배관 외경
- ρ : 배관내 유체 압력
- P_b : 굽힘응력(applied bending stress)
- $P_{b'}$: 소성파단시의 굽힘응력
- P_e : 열응력
- P_m : 막응력(membrane stress)
- R_c : 배관 외반경
- R_i : 배관 내반경
- R_m : 배관 평균반경
- S_L : 허용굽힘응력(allowable bending moment)
- SF : 안전여유도(safety factor)
- Z : Z-Factor(load multiplier)
- Z_{ASME} : ASME Z-Factor
- Z_{NEW} : 새로운 Z-Factor
- Z_{NEW-1} : 케라미틱 강 배관 모재에 대한 새로운 Z-Factor
- Z_{NEW-2} : 케라미틱 강 배관 SAW 용접부에 대한 새로운 Z-Factor
- t : 배관두께
- α : Ramberg-Osgood 경화계수
- β : (-)y 축에서 중립면까지의 각도
- γ : (+)y 축에서 J를 평가하려는 곳까지의 각도
- ρ : (+)x 축에서 중립면까지의 각도
- σ_{exp} : 실험에서 결정된 최대응력
- σ_0 : 기준응력
- σ_p : 압력에 의해 발생하는 응력
- σ_{pred} : SC, TNP 방법으로 예측된 응력
- σ_f : 유동응력(flow stress)
- σ_u : 인장강도
- σ_y : 항복응력
- ϵ_0 : 기준변형률
- 2θ : 원주방향 표면균열의 균열길이

중에서 특히 배관은 1000 MW급 원전의 경우, 한 호기당 총연장이 100 km 이상되며, 이중 70 km 이상이 원전 안전에 중요한 안전성관련 배관(safety related pipings)이다.

원전 배관들은 1차계통의 경우 약 150기압/288°C, 2차계통의 경우는 약 80기압/288°C의 고온 고압 유체를 지지할 수 있어야 한다. 이외에도 배관들은 운전상태에 따라 반복되는 열하중과 사고시 발생하는 하중, 그리고 외부의 지진하중으로부터도 그 건전성을 유지할 수 있어야 한다. 이와 관련하여 미국 기계학회 기준인 ASME Boiler and Pressure Vessel Code(이하 ASME Code로 약칭함) Sec. III에는 원전 배관의 건전성 확보를 위한 설계기준이 제시되어 있으며, Sec. XI에는 가동중 검사(inservice inspection)에 관한 요건이 규정되어 있다.^(1,2) 우리나라를 포함하여 세계 대부분의 국가에서는 이 ASME Code에 따라 원전의 안전성 관련 배관들을 설계, 제작 및 검사를 수행하고 있다.

배관 설계단계에서는 배관에 균열이 없다는 가정 하에서 설계가 수행되나, 실제 원전 배관에는 재질의 불균일성이나 용접과정상의 문제 등의 이유로 인해 미소균열(micro crack)이 존재한다. 이러한 미소균열중 일부는 원전 운전시 계속적인 반복하중에 의하여 배관 건전성에 영향을 줄 수 있는 크기의 표면균열(surface crack)로 성장할 수 있다. 표면균열을 그대로 방치할 경우 표면균열 역시 반복하중에 의해 계속 성장하여 배관을 관통하는 관통균열(through-wall crack)이 된다. 균열이 배관을 관통할 경우 배관내의 냉각수가 누설되거나, 극단적으로는 배관이 양단파단되어 원전의 안전성에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 현재 운전중인 원전에서는 안전성관련 배관에서 표면균열이 발견될 경우, ASME Code Sec. XI "Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components"의 요건에 따라 그 균열의 안정성이 입증되어야만 원전 가동을 허용하고 있다.⁽²⁻⁴⁾

이와 같이 배관내에 존재하는 표면균열 거동에 대한 평가는 원전 안전성에 매우 중요한 문제이다. 그러나 배관내의 균열은 그 형상이 3차원적이기 때문에 탄성해외는 달리 정확한 탄소성해를 구하는 것은 매우 어렵다.⁽⁵⁻⁷⁾ 따라서 대부분의 원전 균열에 대한 평가는 수치적인 방법에 근거하고 있으며, 굽힘/인장하중, 표면균열/관통균열, 원주방향균열/

1. 서 론

원자력발전소는 원자로, 증기발생기, 가압기 등의 압력용기와 이들 압력용기를 연결하는 배관(piping), 그리고 펌프, 밸브, 열교환기 등의 여러 기기(component)들로 구성된다. 이들 원전기기들

축방향균열, 원형균열/타원형균열 등 여러 변수에 대한 많은 해들이 제시되어 있다.⁽⁸⁻³⁰⁾ 배관내 균열 거동을 평가하는 많은 방법들 중에서 ASME Code Sec. XI에서는 가동중 원전 배관에서 발견된 표면 균열에 대한 안정성 평가방법을 배관재질에 따라 다음과 같이 제시하고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 즉, 오스테나이트 배관에 대해서는 소성붕괴(plastic collapse)에 근거하는 한계하중법(limit load method)을 표면균열 안정성 평가방법으로 제시하고 있으며,^(2,3) 페라이트 강 배관에 대해서는 배관물성치와 배관에 가해지는 하중의 정도에 따라 (1) 탄성파괴역학(LEFM)에 근거하는 K_I 방법, (2) 탄소성과파괴역학(EPFM)에 근거하는 Z-Factor 방법(이하 ASME Z-Factor 방법이라 약칭함), (3) 소성과단에 근거한 한계하중방법 등 세 가지 방법을 제시하고 있다.^(2,4)

이들 중 ASME Z-Factor 방법은 기본적으로는 한계하중방법과 같으나, 다만 탄소성의 영향을 Z-Factor라는 매개함수를 사용하여 보정해 주어 탄소성 응력장에서의 균열거동을 평가하는 방법이 다.

그러나 ASME Z-Factor 방법은 실제 균열거동을 너무 보수적으로 평가한다는 많은 연구 결과들이 보고되고 있으며, 이는 ASME Code Sec. XI에서 사용되고 있는 Z-Factor의 값이 너무 실제보다 너무 큰 데에 기인하는 것으로 알려져 있다.⁽⁵⁻⁷⁾

이 연구에서는 페라이트 강 배관의 모재 및 용접부에 존재하는 원주방향 표면균열의 거동을 예측하기 위한 새로운 Z-Factor를 개발하고, 기 수행된 페라이트 강 배관 표면균열 실험을 통해 그 타당성을 입증하고자 한다. 배관 표면균열 실험결과는 우리 나라와 미국, 영국, 프랑스, 캐나다, 일본 등 15개국이 참여한 배관 건전성 국제공동연구(International Piping Integrity Research Group Program, IPIRG Program)를 통해 확보하였다.

2. ASME Z-Factor 방법

ASME Code Sec. XI에서는 배관내 원주방향 표면균열의 안정성을 판정하는 기준으로 다음과 같은 식을 제시하고 있다.⁽²⁾

$$P_b \leq S_c \tag{1}$$

식 (1)에서 P_b 는 배관에 실제 작용되는 굽힘응

력(applied bending stress)이고 S_c 는 허용 굽힘응력(allowable bending moment)이다. S_c 는 배관물성치, 균열길이 및 깊이, 파괴양식, 안전여유도, 배관응력 수준 등에 따라 결정된다. S_c 를 결정하는 많은 방법들이 제안되어 있으나,⁽⁵⁻⁹⁾ ASME Code Sec. XI에서는 다음과 같이 Z-Factor를 사용하여 결정하도록 규정하고 있다.

$$S_c = (P_b' / Z - P_e) / (SF - P_m, 1 - 1 / \{Z \cdot (SF)\}) \tag{2}$$

여기서, P_b' , P_e , P_m , SF 는 다음과 같이 정의된다.

P_b' = 소성과단시의 굽힘응력

P_e = 열응력

P_m = 막응력(membrane stress)

SF = 안전여유도(safety factor)

= 2.77 : 원전 정상/이상 운전조건시

= 1.39 : 원전 비상/손상 운전조건시

식 (2)에서 Z-Factor는 페라이트 강 배관 모재와 페라이트 강 배관 Submerged Arc Weld(SAW) 용접부에 대해 각각 다음과 같이 주어진다. (앞으로는 ASME Code에서 주어진 Z-Factor를 Z_{ASME} 로 표기함)

$$Z_{ASME-1} = 1.20 [1 + 0.021 \cdot A \cdot (OD - 4)] \tag{3}$$

: 모재

$$Z_{ASME-2} = 1.35 [1 + 0.0184 \cdot A \cdot (OD - 4)] \tag{4}$$

: SAW용접부

여기서, Z_{ASME-1} 는 페라이트 강 배관 모재에 대한 Z-Factor이고 Z_{ASME-2} 는 페라이트 강 배관 SAW 용접부에 대한 Z-Factor이다. 또한 OD 는 인치

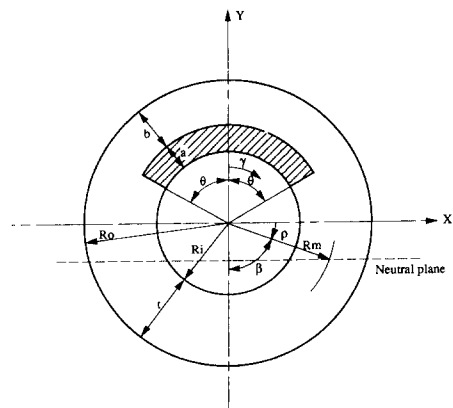


Fig. 1 Geometry of circumferential surface crack

Table 1 Reference tensile properties of ferritic steel pipings

σ_y	σ_u	σ_f	ϵ_o	α	n
MPa	MPa	MPa			
186.84	411.62	299.23	0.0010423	2.51	4.2

(inch)로 주어지는 배관 외경이고, A 는 배관 배관 두께에 대한 평균반경의 비(R_m/t)의 함수로서 다음과 같이 주어진다. (앞으로는 ASME Code에서 주어진 A 를 A_{ASME} 로 표기함.)

$$A_{ASME} = [0.125(R_m/t) - 0.25]^{0.25} : 5 \leq R_m/t \leq 10$$

$$= [0.4(R_m/t) - 3.0]^{0.25} : 10 \leq R_m/t \leq 20$$

(5)

Z-Factor 방법은 탄소성 하중방법을 사용하여 쉽게 균열거동을 예측할 수 있게 해주는 장점이 있다. Fig. 1은 배관의 단면을 보여주는 그림이다. 여기서, R_o 는 외반경, R_i 는 내반경, a 는 균열길이, 2θ 는 원주각으로 표시되는 균열길이, b 는 균열 비형성부(uncracked ligament, $b=t-a$)이다. Fig. 1에는 (-)y축에서 중립면까지의 각도 β 가 표시되어 있으며, J-평가시 사용을 위해 x축에서 중립면까지의 각도 ρ 도 함께 표시되어 있다.

식 (3)과 식 (4)로 주어진 Z_{ASME} 는 페라이트 강 배관의 물성치중 하한치를 선정하여 계산된 것이다. (7) Table 1에는 페라이트 강 배관에 대한 인장 물성치가 주어져 있다. 이 값은 페라이트 강 배관 모재에 대한 것이며, 페라이트 강 배관 SAW 용접부에 대한 Z_{ASME} 결정시에도 페라이트 강 모재의 인장물성치를 사용하였다. 그 이유는 용접부의 인장치가 모재보다 크기 때문에 작은 값을 사용함으

로써 용접부의 해석시 보수성을 주기 위함이다. (2,7) 또한 Z_{ASME} 결정시 필요한 페라이트 강 배관의 파괴물성치는 모재와 SAW 용접부에 대해 각각 Fig. 2에 주어진 J-R Curve를 사용하였다. (7) 파괴물성치가 필요한 이유는 탄소성조건하에서 최대하중을 결정할 때 균열진전의 영향을 고려하기 위함이다.

3. 새로운 Z-Factor (Z_{NEW})의 결정

3.1 Z-Factor의 정의

Z-Factor는 소성하중을 탄소성하중으로 보정해주는 하중보정계수(load multiplier)로서 다음과 같이 정의된다. (2)

$$Z = M_L / M_{EP-max} \tag{6}$$

여기서, M_L 은 배관 표면균열에 대한 한계하중이고 M_{EP-max} 는 탄소성해석에서 결정된 최대하중이다. 따라서 Z-Factor를 결정하기 위해서는 주어진 조건하에서의 한계하중과 탄소성해석을 통한 최대하중을 알아야 한다.

3.2 표면균열에 대한 한계하중 M_L 의 평가식

배관내 원주방향 표면균열에 대한 한계하중 M_L 은 다음과 같이 결정된다. (2-4)

(가) $\theta + \beta \leq \pi$ 인 경우

$$M_L = 2\sigma_f R_m^2 t \{2\sin\beta - (a/t)\sin\theta\} \tag{7}$$

$$\beta = \{\pi - (a/t)\theta - \pi(P_m/\sigma_f)\} \tag{8}$$

(나) $\theta + \beta > \pi$ 인 경우

$$M_L = 2\sigma_f R_m^2 t (2 - a/t)\sin\theta \tag{9}$$

$$\beta = \pi\{1 - (a/t) - P_m/\sigma_f\} / (2 - a/t) \tag{10}$$

여기서, σ_f 는 항복응력(σ_y)과 인장강도(σ_u)의 평균값으로 정의되는 유동응력(flow stress)이며, P_m 은 막응력으로 배관에 압력이 작용할 때 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_m = pR_i^2 / (R_o^2 - R_i^2) \tag{11}$$

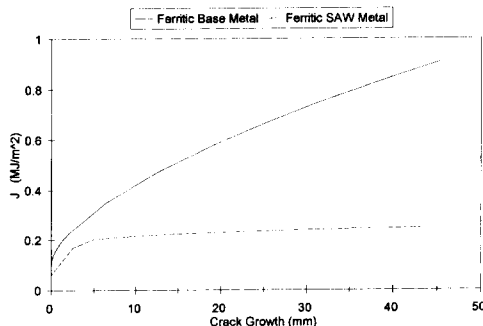


Fig. 2 Reference J-R curves for base metal and SAW metal

여기서, p 는 배관에 작용되는 유체압력이다. 한계하중을 계산하는 식 (7)~(11)들은 ASME Code의 한계하중방법에서도 사용되고 있는 식들이다.

3.3 표면균열에 대한 J-평가방법(SC, TNP) 및 최대하중 M_{EP-max} 의 결정

한계하중 M_L 을 결정하기 위해 식 (7)~(10)으로 주어진 표면균열에 대한 한계하중식은 널리 인정되고 있으나, M_{EP-max} 을 결정하기 위한 탄소성해석 방법으로는 여러가지 다른 방법들이 제안되어 있다. 배관 표면균열에서의 탄소성해석으로 널리 알려진 방법으로는 J-적분 방법, R6 방법,⁽⁸⁾ DPFAD 방법⁽⁹⁻¹⁰⁾ 등이 있으며, J-적분방법도 어떤 방식으로 J를 결정하느냐에 따라 많은 방법들^(5,6,11-14)이 제안되어 있다. R6 방법과 DPFAD 방법은 모두 파단평가선도(failure assessment diagram)를 탄소성적으로 결정하여 균열평가를 하며, 파단평가선도를 결정하는 여러 가지 방법이 제안되어 있다. 파단평가선도는 일반적으로는 J 적분을 사용하여 결정된다. 이 중 배관 표면균열에 대한 J-적분 방법중 가장 널리 쓰이는 것은 GE/EPRI 방법이다.⁽¹³⁾

GE/EPRI 방법에서는 J 를 탄성성분 J_e 와 소성성분 J_p 으로 나누고 J_p 를 다음과 같이 표현한다.⁽¹³⁾

$$J_p = a \cdot \epsilon_0 \cdot \sigma_0 (1 - a/t) \cdot a \cdot h_1 \cdot [(\sqrt{3}/2)(t/b)(\sigma/\sigma_0)]^{n+1} \quad (12)$$

여기서, a , t , b 는 Fig. 1에 나타나 있는 균열길이, 배관두께, 균열 비형성부이고, h_1 은 GE/EPRI Handbook⁽¹³⁾에 주어져 있다. 이 식은 다음과 같은 응력-변형률 관계식을 사용한 것이다.

$$(\epsilon/\epsilon_0) = \alpha(\sigma/\sigma_0)^n \quad (13)$$

여기서, ϵ_0 는 기준변형률이고, σ_0 는 기준응력으로 이 연구에서는 항복응력을 기준응력으로 사용하였다. α 와 n 은 각각 경화계수와 경화지수이다. 배관에 모멘트 M 이 가해질 때 식 (12)의 σ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾

$$\sigma = [M/(4 \cdot R_m^2 \cdot t \cdot H_n)] \cdot [(\sin \rho + \cos \gamma) / \{1 + (a \cdot h_3/2L)(\sqrt{3}t/2b)^n\}]^{1/n} \quad (14)$$

식 (12)와 (14)를 사용하여 J를 평가하는 방법을 SC, TNP(Surface Crack in Thin Pipe) 방법이라 한다. 식 (14)에서의 ρ 와 γ 는 Fig. 1에 표시되어 있다. ρ 는 x축에서 중립면까지의 각도, γ 는 y

축에서 J를 평가하려는 부분의 각도이다. H_n 은 참고문헌 (15)에 표로 주어져 있고, h_3 는 h_1 과 같이 GE/EPRI Handbook⁽¹³⁾에 주어져 있다. 식 (14)의 L 은 특성길이를 나타내는 것으로 SC, TNP방법에서는 n 이 1보다 매우 크다($n \gg 1$)는 가정하에 배관 두께, t 를 특성길이 L 로 하였다. 식 (12)와 (14)는 J-적분과 모멘트 M 의 관계를 나타내 주는 관계식으로서 이 식들과 실제 재료의 J-R 곡선을 사용하면 균열진전에 따른 모멘트를 배관의 회전각의 함수로 결정할 수 있다. 이 모멘트-회전각 곡선의 최대값이 최대 모멘트 M_{EP-max} 이다. 이 SC, TNP 방법의 타당성에 대해서는 이 논문의 4장에서 조사하기로 한다.

3.4 새로운 Z-Factor의 결정

본 연구에서는 새로운 Z-Factor(앞으로는 새로운 Z-Factor를 Z_{NEW} 로 표기함) 결정시 필요한 탄소성 응력장에서의 최대하중 M_{EP-max} 을 앞 절에서 기술한 SC, TNP 방법을 사용하여 결정하였으며, 한계하중 M_L 은 식 (7)~(10)을 사용하여 결정하였다.

Z Factor는 페라이트 강 배관의 모재(Z_{NEW-1})와 SAW 용접부(Z_{NEW-2})에 대해 별도로 구하였다. 각각의 계산시, 주어진 배관직경과 R_m/t 에 대해, 균열크기의 영향을 보기 위해 a/t 에 대해 네 가지 경우($a/t=0.1, 0.3, 0.5, 0.75$) 그리고 θ/π 에 대해 네 가지 경우($\theta/\pi=0.1, 0.25, 0.5, 1$) 등 모두 16가지 경우에 대해 Z_{NEW} 를 계산하였다. 또한 배관직경이 Z_{NEW} 에 미치는 영향을 조사하기 위해 세 가지 배관직경, 즉 4.5, 16, 42 인치에 대해 Z_{NEW} 를 각각 계산하였으며, R_m/t 가 Z_{NEW} 에 미치는 영향을 보기 위해 세 가지의 R_m/t , 즉 5, 10, 20에 대해 각각 계산하였다. 각 경우에 대해 한계하중(M_L), 최대하중(M_{EP-max}), Z_{NEW} 가 계산되었다.

Z-Factor의 결정시 SI Unit 대신에 British Unit를 사용한 이유는 ASME Code가 British Unit를 사용하고 있고, 우리나라의 원전 배관도 이에 맞추어 단위를 British Unit로 사용하고 있기 때문이다. 앞으로 Z Factor와 관련하여 나오는 배관외경 OD의 단위는 British Unit인 '인치(inch)'이다.

페라이트 강 배관 모재와 SAW 용접부에 대한 Z_{NEW} 평가시에는 Table 1과 Fig. 2에 주어진 기존의 ASME Code Z-Factor(Z_{ASME}) 결정시 사용된

인장 및 파괴물성치가 사용되었다.

3.4.1 페라이트 강 배관 모재의 Z-Factor(Z_{NEW-1})

Fig. 3은 페라이트 강 모재 16인치 배관에 대한 한계하중을 보여주는 그림이다. 각각의 계산시 균열크기의 영향을 보기 위해 a/t 에 대해 네 가지 경우($a/t=0.1, 0.3, 0.5, 0.75$) 그리고 θ/π 에 대해 네 가지 경우($\theta/\pi=0.1, 0.25, 0.5, 1$) 등 모두 16가지 경우에 대해 계산하였다. Fig. 4는 Fig. 3과 같은 크기의 배관에 대한 최대하중을 보여주는 그림이다. 이 값들은 전술한 바와 같이 SC.TNP 방법으로 구한 것이다. Fig. 5는 한계하중과 최대하중을 사용하여 구한 페라이트 강 모재 16인치 배관에 대한 새로운 Z-Factor(Z_{NEW-1})를 보여주는 그림이다. 그림에는 ASME Code에서 주어지는 Z-Factor(Z_{ASME-1})도 함께 표시되어 있다. Z_{ASME-1} 값은 균열길이나 균열깊이의 함수가 아니므로 이 그림에 나타난 바와 같이 일정한 값을 갖는다. 이는 Z_{ASME} 값을 결정할 때 표면균열이 아닌 관통균

열에 대해 Z_{ASME} 를 평가했기 때문이며 이것이 기존의 Z_{ASME} 가 보수적인 결과를 주는 원인중의 하나이다.⁽⁷⁾ Z_{NEW-1} 은 균열깊이가 작을수록 약간 감소하는 경향을 보이나, 균열깊이에 대해서는 크게 변하지 않음을 보여준다. 그러나 Z_{NEW-1} 값은 Z_{ASME-1} 값보다 작음을 알 수 있다. 이 연구에서는 균열길이와 균열깊이에 대한 16가지 경우의 Z_{NEW} 중 가장 큰 값을 주어진 배관의 경우를 대표하는 Z_{NEW-1} 로 정의하였다.

Fig. 6은 페라이트 강 모재에 대한 Z_{NEW-1} 을 4.5, 16, 42 인치 배관 외경에 대해 구한 그림이다. 그림에는 Z_{ASME-1} 값도 함께 표시되어 있다. Z_{NEW-1} 값은 Z_{ASME-1} 값에 비해 평균 40% 작은 값을 보여주고 있다. Z_{NEW-1} 은 다음과 같이 배관외경의 함수로 근사(fitting)할 수 있다.

$$Z_{NEW-1} = 1.2[0.744 + 0.0152A_{NEW-1} \cdot (OD-4) - 0.0002A_{NEW-1} \cdot (OD-4)^2] \quad (15)$$

여기서, A_{NEW-1} 은 R_m/t 의 함수로서 페라이트 강

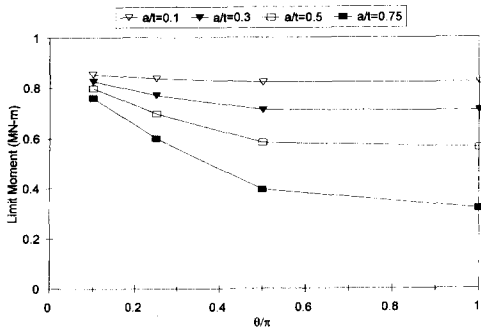


Fig. 3 Limit moment for ferritic base metal with OD = 16 in

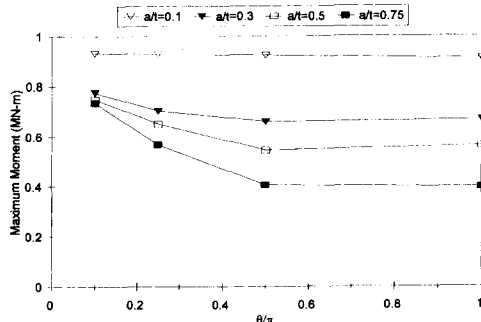


Fig. 4 Maximum moment for ferritic base metal with OD = 16 in

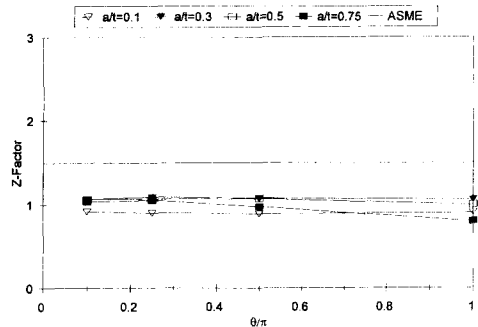


Fig. 5 Z-Factors for ferritic base metal with OD = 16 in

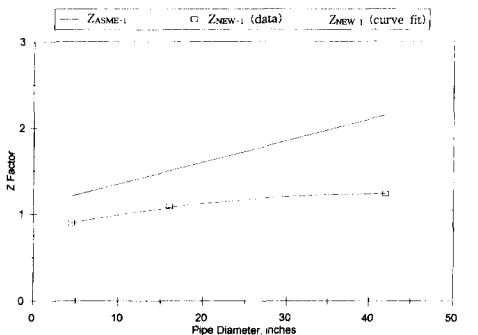


Fig. 6 Comparison of new Z-Factor(Z_{NEW-1}) with ASME Z-Factor(Z_{ASME-1}) for ferritic base metal pipings

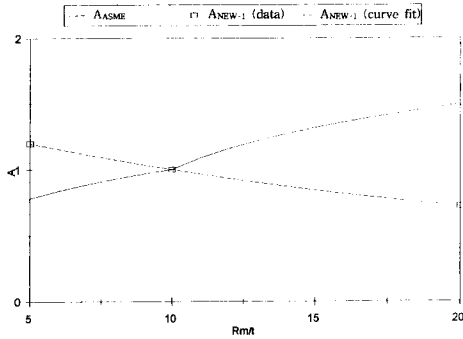


Fig. 7 Comparison of new A value(A_{NEW-1}) with ASME A value(A_{ASME-1}) for ferritic base metal pipings

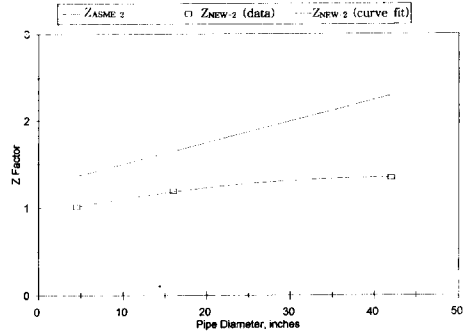


Fig. 8 Comparison of new Z-Factor(Z_{NEW-1}) with ASME Z-Factor(Z_{ASME-1}) for ferritic SAW pipings

모재에 대해 다음과 같이 구할 수 있다.

Fig. 7은 페라이트 강 모재에 대한 A_{NEW-1} 을 세 가지의 R_m/t , 즉 $R_m/t=5, 10, 20$ 에 대해 구한 것이다. 그림에는 역시 ASME Code의 $A(A_{ASME})$ 값이 함께 나타나 있다. A_{ASME} 값과는 달리 A_{NEW-1} 값은 R_m/t 가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다. 새로운 A_{NEW-1} 은 다음과 같이 근사(fitting)할 수 있다.

$$A_{NEW-1} = [0.0125(R_m/t) + 0.875]^{-2.791} \quad (16)$$

$5 \leq R_m/t \leq 20$

3.4.2 페라이트 강 배관 SAW 용접부의 Z-Factor (Z_{NEW-2})

주어진 배관크기와 균열크기에 대해 페라이트 강 배관 SAW 용접부에 대한 한계하중은 모재와 같다. 그 이유는 SAW 용접부에 대한 인장물성치를 모재와 같은 값을 사용하였기 때문이다. 그러나 페라이트 강 배관 SAW 용접부의 최대하중 M_{EP-max} 의 값은 모재와는 다르며 그 이유는 J-R 곡선이 서로 다르기 때문이다.

페라이트 강 배관 SAW 용접부에 대한 Z-Factor도 모재의 경우와 마찬가지로 네 가지 경우의 a/t ($a/t=0.1, 0.3, 0.5, 0.75$) 그리고 네 가지 경우의 θ/π ($\theta/\pi=0.1, 0.25, 0.5, 1$)에 대해 계산하였다. 또한 배관직경이 Z-Factor에 미치는 영향을 조사하기 위해 세 가지 배관직경, 즉 4.5, 16, 42 인치에 대해 Z-Factor를 각각 계산하였으며, 배관 두께가 Z-Factor에 미치는 영향을 보기 위해 세 가지의 R_m/t , 즉 5, 10, 20에 대해 각각 계산하였다. 각 경우에 대한 한계하중, 최대하중, Z-

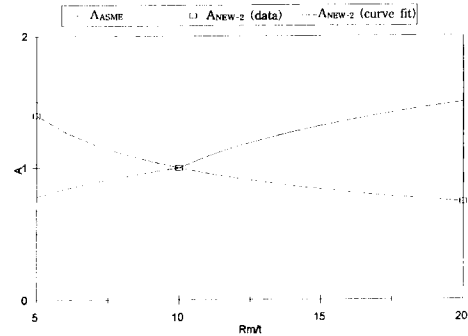


Fig. 9 Comparison of new A value(A_{NEW-1}) with ASME A value(A_{ASME-1}) for ferritic SAW pipings

Factor에 대한 그림은 여기서는 생략하기로 하고 배관직경과 R_m/t 의 영향만을 보기로 한다.

Fig. 8은 페라이트 강 배관 SAW 용접부에 대한 새로운 Z-Factor(Z_{NEW-2})를 4.5, 16, 42 인치 배관의 외경에 대해 구한 그림이다. 그림에는 ASME Code에서 주어지는 (Z_{NEW-2})도 함께 표시되어 있다. Z_{NEW-2} 는 다음과 같이 배관 외경의 함수로 근사(fitting)할 수 있다.

$$Z_{NEW-2} = 1.35 [0.742 + 0.0134 A_{NEW-2} \cdot (OD-4) - 0.000176 A_{NEW-2} \cdot (OD-4)^2] \quad (17)$$

여기서, A_{NEW-2} 는 R_m/t 의 함수로서 페라이트 강 배관 SAW 용접부에 대해 다음과 같이 구할 수 있다. Fig. 9는 A_{NEW-2} 를 세 가지의 R_m/t , 즉 $R_m/t=5, 10, 20$ 에 대해 구한 것이다. 그림에는 A_{ASME} 값이 함께 나타나 있다. A_{ASME} 값과는 달리 A_{NEW-2} 값은 R_m/t 가 증가함에 따라 감소하는 경

향을 보인다. 새로운 A_{NEW-2} 는 다음과 같이 근사 (fitting)할 수 있다.

$$A_{NEW-2} = [0.1161(R_m/t) - 0.161] - 0.383 : 5 \leq R_m/t \leq 20 \quad (18)$$

4. 결과 및 토론

4.1 배관 표면균열실험

배관내 존재하는 균열에 대한 안정성 평가방법을 실험을 통해 실증적으로 입증하기 위해 미국 Battelle 연구소에서는 지난 15년간 많은 배관 파괴실험을 수행한 바 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 이들 실험은 배관 건전성 평가를 위한 연구 프로젝트인 Degraded Piping Program,⁽⁵⁾ IPIRG Program,⁽⁶⁾ 그리고 Short Crack Program⁽⁷⁾의 일부로 수행된 것이다. 이들 배관 파괴실험 중 표면균열에 대한 실험은 모두 48개이고, 이중 페라이트 강 배관에 대한 표면 균열실험은 모두 10개였다.

Table 2는 Battelle 연구소에서 수행한 10개의 페라이트 강 배관 표면균열실험을 요약한 것이다. 표에는 실험번호, 재질사양, 외경(OD), 두께(t), 균열길이(θ/π %), 균열깊이(a/t %), 항복응력(σ_y), 인장강도(σ_u), 기준변형도(ϵ_0), 경화계수(α), 경화지수(n), 압력(p), 그리고 실험에서 측정된 최대모멘트(M_{exp})의 값이 SI Unit로 표시되

어 있다. 10개의 페라이트 강 배관 실험은 A106 탄소강 모재 7개, A516 탄소강 모재 1개, 그리고 A106 SAW 용접부 2개 등에 대해 수행되었다.

Table 2에 제시된 실험은 모두 4점굽힘(4-point bending) 실험으로 수행되었으며 실험온도는 모두 가압경수형 원전의 운전온도인 288°C였다. 실험 #1에서 #5까지는 압력이 가해지지 않는 순수굽힘실험이었으며 실험 #6에서 #10까지는 9.563 MPa에서 15.513 MPa까지의 압력이 배관내에 가해졌다. 배관에 압력이 가해지는 경우에는 배관내 유체를 주입하여 가압시켰다. 균열진전량은 전위차법(potential drop method)으로 측정하였다. 실험장치와 방법, 실험데이터의 처리 및 평가방법 등은 참고문헌 (5), (6)에 자세히 나와 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.

4.2 SC.TNP 방법의 타당성 확인

Table 3은 10개의 페라이트 강 배관 표면균열 실험에 대해 본 연구에서 사용한 SC.TNP 방법으로 결정된 최대하중(M_{EP-max})을 실험결과(M_{exp})와 비교한 표이다. 표에는 예측치를 실험치로 나눈 파괴비(Fracture Ratio, FR)가 나타나 있다. 파괴비는 배관내에 압력이 작용하는 경우를 고려하여 다음 식과 같이 응력을 사용하여 정의하였다.

$$FR = (\sigma_{exp} + \sigma_p) / (\sigma_{pred} + \sigma_p) \quad (19)$$

Table 2 Test matrix of surface crack experiments in ferritic steel pipings

Exp.No	Material Spec.		OD	t	θ/π	a/t	σ_y	σ_u	ϵ_0	α	n	p	M_{exp}
			mm	mm	%	%	MPa	MPa				MPa	MN-m
1	Base metal	A106	169.3	7.44	50.8	63.1	212.36	467.47	0.0011	0.499	7.222	0	0.38
2			167.5	14.78	50.3	68	319.92	620.53	0.00152	1.97	5.366	0	0.0801
3			168.2	21.46	52.6	63.3	258.56	570.20	0.00134	0.171	8.263	0	0.1174
4			402.6	26.42	53.2	66.2	237.18	610.19	0.00124	2.189	3.729	0	0.7484
5			404.9	12.70	53.5	66.2	262.00	611.57	0.00138	2.972	3.998	0	0.3656
6			167.5	13.49	43.2	64.7	319.92	620.53	0.00152	1.97	5.366	15.51	0.0616
7			167.4	14.02	41.9	72	319.92	620.53	0.00152	1.97	5.366	15.51	0.0616
8		A516	711.2	22.68	25	50	230.98	544.00	0.00119	1.382	5.644	9.563	2.1899
9	SAW weld	A106	403.2	25.37	50	67	237.18	610.19	0.00124	2.189	3.729	15.49	0.5946
10			609.6	42.67	25	60.5	334.42	541.93	0.00114	3.206	3.41	15.51	2.5753

Table 3 Comparison of fracture ratio from SC.TNP, R6 and DPFAD method

Exp.No	SC.TNP	R6	DPFAD
1	0.799	1.217	1.120
2	1.018	1.388	1.480
3	0.998	1.636	1.800
4	1.032	1.546	1.584
5	0.906	1.242	1.230
6	1.063	1.411	1.458
7	0.920	1.206	1.262
8	0.854	1.208	1.167
9	1.178	1.747	1.630
10	0.916	1.261	1.435
Average	0.968	1.391	1.416
Devlation	0.105	0.184	0.209

여기서, σ_{exp} 는 실험에서 결정되는 응력이고 σ_p 는 압력에 의해 발생하는 응력, σ_{pred} 는 SC.TNP 방법으로 예측된 응력으로 다음과 같이 각각 구할 수 있다.

$$\sigma_{exp} = M_{exp} R_m / I \quad (20)$$

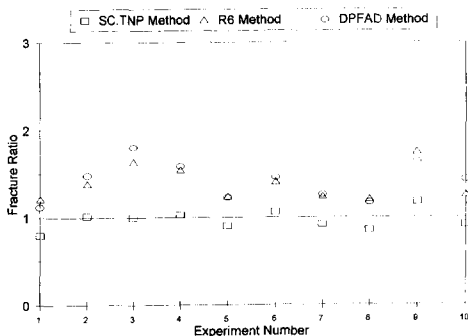
$$\sigma_{pred} = M_{EP-max} R_m / I \quad (21)$$

$$\sigma_p = p R_i^2 / (R_o^2 - R_i^2) \quad (22)$$

여기서, I 는 관성모멘트로서 배관에 대해서는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I = (\pi/4) (R_o^4 - R_i^4) \quad (23)$$

Table 3에는 SC.TNP 방법 이외에도 기준에 널

**Fig. 10** Comparison of fracture ratio from SC.TNP, R6 and DPFAD method

리 사용되는 R6 방법과 DPFAD 방법으로 결정된 파괴비도 함께 나타나 있다.

Table 3에 나타난 바와 같이 SC.TNP 방법의 파괴비는 0.968이며 편차는, 0.105이다. R6과 DPFAD의 파괴비는 각각 1.391과 1.416이며 편차는 0.184와 0.209이다. 즉, SC.TNP 방법이 실험치를 가장 잘 예측하고 있을 뿐만 아니라 데이터의 분산도 가장 작음을 보여주고 있다. R6 방법이나 DPFAD 방법은 SC.TNP 방법에 비해 보수적인 결과를 보여주고 있다.

Fig. 10은 Table 3에 주어진 SC.TNP, R6, 그리고 DPFAD 세 가지 방법에 대한 파괴비를 나타낸 그림이다. 그림의 횡축은 실험번호를 나타낸다. 그림에서도 나타나 있는 것처럼 SC.TNP는 압력이 있는 경우나 없는 경우에 대해, 그리고 모재와 SAW 용접부에 대해 모두 배관의 파괴거동을 잘 예측하고 있음을 보여준다.

4.3 새로운 Z-Factor를 사용한 ASME Z-Factor 방법의 타당성 평가

이 절에서는 Z_{NEW} 의 타당성을 4.1절에서 기술한 배관 표면균열에 대한 실험결과와의 비교를 통해 보이고자 한다.

ASME Code에서는 ASME Z-Factor 방법을 사용할 경우, 식 (2)로 주어지는 허용응력의 계산시

Table 4 Comparison of moments and fracture ratio from ASME Z-Factor[ASME] and new Z-Factor [New]

Exp.No	M_{exp}	M_{pred} (ASME)	M_{pred} (New)	FR (ASME)	FR (New)
	MN-m	MN-m	MN-m		
1	0.038	0.029	0.040	1.298	0.957
2	0.080	0.068	0.090	1.180	0.893
3	0.117	0.087	0.113	1.355	1.037
4	0.748	0.566	0.758	1.323	0.987
5	0.366	0.277	0.425	1.318	0.860
6	0.077	0.062	0.085	1.210	0.913
7	0.062	0.058	0.080	1.049	0.792
8	2.190	1.202	2.531	1.556	0.890
9	0.595	0.347	0.513	1.504	1.124
10	2.575	1.894	2.718	1.287	0.955
			Average	1.308	0.941
			Deviation	0.140	0.089

평가식에 안전여유도를 주도록 규정하고 있다. 안전여유도를 주는 이유는 원자력발전소 배관의 안전성을 더욱 확보하기 위함이다. 이 연구에서는 실험치와의 비교를 위해 안전여유도를 1로 하여 ASME Z-Factor 방법을 평가하였다.

Table 4에는 페라이트 강 배관의 모재와 SAW 용접부에 대한 실험에서 측정된 최대하중(M_{exp})과 Z_{ASME} 를 사용하여 구한 모멘트 M_{pred} (ASME), 그리고 Z_{NEW} 를 사용하여 구한 모멘트 M_{pred} (New)가

나타나 있다. Table 4에는 $M_{pred}(Z_{ASME})$ 와 $M_{pred}(Z_{NEW})$ 에 대한 파괴비 FR(ASME)와 FR(New)도 함께 나타나 있다. 이 파괴비도 식(19)를 사용하여 결정한 것이다. 표에 나타낸 바와 같이 Z_{ASME} 를 사용한 경우의 파괴비는 평균이 1.308이고 분산은 0.140인데 비하여 Z_{NEW} 를 사용한 경우의 파괴비는 평균이 0.941이고 분산이 0.089로서, Z_{NEW} 를 사용하여 구한 파괴비가 훨씬 실험치에 접근하고 있고 분산도 작음을 알 수 있다. 즉, Z_{ASME} 를 사용하여 구한 예측치는 실제치와 비교하여 (+)30.8%의 오차가 있으나, Z_{NEW} 를 사용하여 구한 예측치는 실제치와 (-)5.9%의 오차만이 있음을 보여주고 있다. 데이터의 분산도 Z_{ASME} 를 사용한 결과와 비교하여 Z_{NEW} 를 사용한 경우가 약 46% 감소했음을 보여준다.

Fig. 11은 Table 4에 주어진 결과를 그림으로 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바대로 Z_{ASME} 대신에 Z_{NEW} 를 사용할 경우 ASME Z-Factor 방법이 실제 실험결과를 잘 예측하고 있음을 보여준다.

4.4 추후 연구과제

Fig. 5에는 Z값이 1보다 작은 경우가 있다. 이것은 탄소성하중이 한계하중보다 크다는 것을 의미

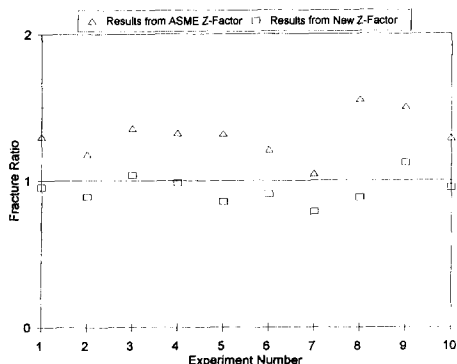


Fig. 11 Comparison of fracture ratio from ASME Z-Factor and new Z-Factor

하므로 문제가 있다. 예를 들어 Fig. 5에 나타난 직경 16 in의 경우 균열깊이가 0.1인 경우와 또 균열깊이가 커지는 경우에 1보다 작은 경우가 나타나고 있다. 이 이유는 크게 두 가지로 생각된다. 첫째, 한계하중식에 문제가 있는 경우이다. 현재 논문에서 사용한 한계하중식은 ASME Code에서 제시된 것을 사용하였으며, 그 이유는 현재의 ASME Code Z-Factor와 비교하기 위함이었다. 둘째는 SC.TNP방법에서 M_{EP-max} 를 결정할 때 사용되는 몇 가지 상수들, 즉 H_n 또는 h_3 과 같은 값들을 사용할 때 균열깊이가 작아지거나 균열깊이가 커지는 경우 이들 값을 외삽(extrapolation)하여 사용하고 있는데, 여기서, 오차가 발생할 가능성이 있다. 본 연구에서는 원자력발전소 적용시 보수성을 부여하기 위해 16가지의 Z-Factor 중 가장 큰 값을 해당 외경에 대한 대표값으로 사용하였으나 앞서 지적한 내용에 대해서는 계속적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

또한 Tables 3, 4에는 파괴비(FR)가 1보다 작은 경우가 있다. 이 경우는 안전 측면에서 비 보수적이기 때문에 문제가 있다. $FR < 1$ 을 초래하는 가장 큰 이유는 SC.TNP방법으로 최대하중을 예측할 때 발생하는 것으로 생각되며 이를 고려하여 SC.TNP 방법의 수정이 요구된다고 하겠다.

ASME Code Sec.XI에는 본 연구에서 수행한 페라이틱 강 배관의 모재와 용접부에 대한 Z-Factor 뿐만 아니라, 오스테나이트 배관의 SMAW 용접부와 SAW 용접부에 대한 Z-Factor도 제시되어 있다. 원전 1차계통 배관의 상당수는 오스테나이트 배관이고, 또한 오스테나이트 배관의 SMAW 용접부와 SAW 용접부에 대한 ASME Z-Factor 방법도 보수적인 결과를 준다고 알려져 있기 때문에, (5-7) 오스테나이트 배관의 SMAW 용접부와 SAW 용접부에 대한 새로운 Z-Factor의 개발에 대한 연구도 계속되어야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

(1) J-평가방법중의 하나인 SC.TNP 방법을 사용하여 원전 배관의 원주방향 표면균열 평가에 적용할 수 있는 새로운 Z-Factor를 페라이틱 강 배관 모재와 SAW 용접부에 대해 각각 개발하였다.

(2) SC.TNP 방법의 타당성과 새로운 Z-Factor의 타당성을 기존의 페라이틱 강 배관 표면균열실

험 결과를 통해 입증하였다. 새로운 Z-Factor를 사용한 ASME Z-Factor 방법은 실제 실험결과를 5.9% 이내로 예측할 수 있었으며, 데이터의 분산도 기존 방법의 결과와 비교하여 46% 감소하였다.

참고문헌

- (1) ASME, 1992, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Section III, Division 1.
- (2) ASME, 1992, "Rule for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," *ASME Boiler and Pressure Vessel Code*, Section XI.
- (3) Norris, D. M., et al., 1986, "Evaluation of Flaws in Austenitic Steel Piping," *Electric Power Research Institute, EPRI Report, NP-4690*.
- (4) Norris, D. M., et al., 1988, "Evaluation of flaws in ferritic piping," *Electric Power Research Institute, EPRI Report, NP-6045*.
- (5) Wilkowski, G. M., et al., 1989, "Degraded Piping Program-Phase II," *US NRC Report, NUREG/CR-4082*.
- (6) Wilkowski, G. M., et al., 1993, *International Piping Integrity Research Group-Final Report*, Battelle Memorial Institute.
- (7) Wilkowski, G. M., et al., 1995, "Fracture Behavior of Short Circumferentially Surface-Cracked Pipe," *US NRC Report, NUREG/CR-6298*.
- (8) Milne, et al., 1986, "R6 Method," *CEGB Report, R/H/R6-Rev 3*.
- (9) Bloom, j. M., 1990, "Validation of the Deformation Plasticity Failure Assessment Diagram (DPFAD) Approach-the Case of an Axial Flow in a Pressurized Cylinder," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol 112.
- (10) Bloom, J. M., 1983, "Extension of the Failure Assessment Diagram Approach Semi-Elliptical Flaw in Pressurized Cylinder," *ASME Winter annual Meeting*.
- (11) Paris, P. C., Tada, H., Zahoor, A. and Ernst H., 1979, "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth," *ASTM STP 668*, pp. 5~36.
- (12) Hutchinson, J. W. and Paris, P. C., 1979,

- "Stability Analysis of J-Controlled Crack Growth," *ASTM STP 668*, pp. 37~53.
- (13) Kumer, V, et al., 1981, "An Engineering Approach for Elastic-Plastic Fracture Analysis, General Electric Company Corporate Research and Development," *Electric Power Research Institute, EPRI Report, NP-1931*.
- (14) Bloom, J. M. and Malik, S. N., 1982, *Procedure for the Assessment of the Integrity of Nuclear Pressure Vessels and Piping Containing Defects*, Electric Power Research Institute.
- (15) Scott, P. M. and Ahmad, J., 1987, "Experimental and Analytical Assessment of Circumferentially Surface-Cracked Pipes Under Bending," *US NRC Report, NUREG/CR-4872*
- (16) Ahmad, J., et al., 1989, "A Predictive J-Estimation Method for Circumferentially Surface-Cracked Pipes of Power-Low Hardening Material in Pure Bending," in *Advanced in Fracture and Fatigue For The 1990's - Load History Effects of Fracture Resistance*, *Proceeding of ASME PVP Conference*.
- (17) Sturm, D., et al., 1988, "Estimation of the Ductile Unstable Fracture of Pipe with a Circumferential Surface Crack Subject to Bending," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 106, pp. 265~273.
- (18) Wilkowski, G. M. and Scott, P. M., 1989, "A Statistical Based Circumferentially Cracked Pipe Fracture Mechanics Analysis for Design or Code Implementation," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 107, pp. 173~187.
- (19) Pan, J., 1984, "Some Considerations on Estimation of Energy Release Rates for Circumferentially Cracked Pipe," *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 106, pp. 391~398.
- (20) Zahoor, A., 1992, "Analysis of Part through-Wall Crack in a Pipe under Combined Tension and Bending," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 114, pp. 245~249.
- (21) Rahman, S. and Brust, F., 1992, "A Estimation Method for Evaluating Energy Release Rates of Circumferential Through-Wall Cracked Pipe Welds," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 43, No. 3, pp. 417~430.
- (22) Rahman, S. and Brust, F., 1992, "Elastic-Plastic Fracture of Circumferential through-Wall Cracked Pipe Welds Subject to Bending," *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 114, No. 4, pp. 410~416.
- (23) Quinones, D. F., et al., 1997, "Static and Dynamic Analysis of Flaw Stability in Piping systems," *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 112, pp. 2040~2122.
- (24) Zahoor, A. and Kanninen, M. F., 1981, "A plastic Fracture Mechanics Prediction for Fracture Instability in Circumferentially Cracked Pipe in Bending-Part I: J-Integral Analysis," *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 103, pp. 352~358.
- (25) Gilles, P. and Brust, F., 1991, "Approximate Fracture Methods for Pipes - Part I: Theory," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 127, pp. 1~12.
- (26) Gilles, P. and Brust, F., 1991, "Approximate Fracture Methods for Pipes - Part II: Application," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 127, pp. 13~31.
- (27) Sanders, J., L., Jr., 1983, "Circumferentially Through-Wall Crack in a Cylindrical Shell under Combined Bending and Tension," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 50, p. 221.
- (28) Sanders, J., L., Jr., 1982, "Circumferentially Through-Wall Crack in a Cylindrical Shell under Tension," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 49, pp. 103~107.
- (29) Wuthrich, C., 1983, "Crack Opening Areas in Pressure Vessels and Pipes," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 18, No. 5.
- (30) Edrogan, F. and Delale, F., 1981, "Ductile Fracture of Pipes and Cylindrical Containers with a Circumferential Flaw," *Trans. ASME, Journal of Pressure Vessel and Technology*, Vol. 103, pp. 160~168.