

균열이 존재하는 배관의 하중 지지능력 평가

장윤석* · 김현수* · 진태은*

(2000년 12월 12일 접수, 2001년 7월 13일 심사완료)

Evaluation of Load-Carrying Capacities for Cracked Pipes

Yoon-Suk Chang, Hyun-Su Kim and Tae-Eun Jin

Key Words: J-Integral(J-적분), Tearing Modulus(찢김계수), Through-Wall Crack(관통균열), Surface Crack(표면균열), Analytical Method(공학적 해석방법), FEM(유한요소법)

Abstract

During the last decade, a number of experiments and numerical analyses had been performed in conjunction with the development of simplified analytical methods to estimate the fracture behavior of cracked piping in nuclear power plant. However, the necessity of further investigation for the analytical methods was issued because of the discrepancies with the experimental data. The objective of this paper is to find out the optimum methods to evaluate the load-carrying capacities for cracked pipes. To do this, numerous analytical and finite element analyses were carried out for various pipe and crack geometries and materials. These results were synthesized for crack shapes and can be used as basic data for leak before break analyses and risk informed inspections.

기호설명

- a, 2c : 균열 깊이, 균열 길이
- A : 배관 치수 보정계수
- C_c : 타원화 현상 보정계수
- D, R : 배관 직경, 배관 반경
- I : 관성 모멘트
- J_{IC} : 탄소성 파괴인성
- L : 길이 매개변수
- m : 균열 길이 및 깊이 보정계수
- M : 작용 모멘트
- t : 배관 두께
- Z : 하중 보정계수
- α, n : Ramberg-Osgood 상수
- β, θ : (중립축과 이루는 각)/2, (균열각)/2
- σ_r : 유동응력

1. 서론

원전 설비의 파괴역학적 설계 및 건전성평가를 위해서는 J-적분을 비롯한 주요 매개변수의 정확한 계산이 필수적이며, 확률론적 기법의 반영 등을 위한 신속성 및 편의성도 요구된다. 해외에서는 지난 10여년간의 공동연구^(1,2)를 통해 배관 파괴거동을 예측할 수 있는 공학적 해석방법을 제시하였으나, 예측결과와 일관성 결여와 시편 및 실증 실험결과와의 상이함이 문제점으로 지적된 바 있다. 본 논문의 목적은 산재되어 있는 공학적 해석방법^(3,4)을 비교하여 원자력 산업계에서 활용할 수 있는 최적의 방법을 도출하고, 주요 매개변수의 영향을 파악하기 위한 것이다. 이를 위해 다수의 공학적 해석 및 유한요소해석을 수행하여 배관 및 균열의 형상, 재료특성 변화에 따른 하중 지지능력을 예측하고, 문헌에 제시된 실험결과와 종합적으로 비교 분석하였다. 본 연구결과는 향후 과단전누설(Leak Before Break : LBB) 설계 및 위험도기준검사(Risk Informed Inspection) 등을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

* 책임저자, 회원, 한국전력기술(주)

E-mail : cys@kopec.co.kr

TEL : (031)289-4283 FAX : (031)289-3189

* 회원, 한국전력기술(주)

2. 공학적 해석방법 분석

본 연구에서는 Fig. 1에 간략히 나타낸 원주방향 관통 또는 표면 균열이 존재하고 순수 굽힘하중이 작용하는 배관의 파괴거동을 예측하고자 한다. 각 공학적 해석방법은 파괴역학 매개변수 결정을 위해 상이한 이론 및 가정을 부여하고 있으므로, 해석에 앞서 주요 특징을 비교하였다.

2.1 관통균열 해석방법^(1,2)

2.1.1 GE/EPRI 방법

공학적 해석방법 중 가장 먼저 제시되고 지속적으로 보완된 것으로서, 유한요소해석을 통해 개발한 무차원 영향함수(Dimensionless Influence Function)를 사용한다.

2.1.2 Paris/Tada 방법

Irwin의 소성역 크기 보정식을 토대로 Paris/Tada가 제시한 무차원 영향함수를 이용하여 J-적분의 탄성성분을 결정하고, 한계하중 해석(Limit Load Analysis)을 통해 구한 배관의 모멘트를 소성 회전각에 대해 수치적분하여 구한 소성성분과 합산하여 탄소성 해를 산출하는 형식을 취한다.

2.1.3 LBB.NRC 방법

재료의 경화거동을 고려하지 못하는 Paris/Tada 방법을 보완하기 위하여 개발된 것으로서, Irwin의 소성역 크기 보정식을 통해 구한 유효 균열크기를 사용하여 균열 주변에서의 소성 회전각을 산출하고, 이를 수치적분하여 J-적분의 소성성분

을 계산한다.

2.1.4 LBB.BCL1 방법

LBB.NRC 방법의 소성성분 계산결과를 변형소성이론에 보다 일치하도록 보완한 것으로서, GE/EPRI 영향함수를 활용하여 배관의 회전각을 결정하고, J-적분의 소성성분을 계산한다.

2.1.5 LBB.BCL2 방법

균열선단에서 소성역에 의한 배관 컴플라이언스(Compliance) 감소효과를 고려하였으며, 균열부위의 배관 두께 및 길이를 조정하여 배관의 회전각을 산출한 후 이를 수치적분하여 J-적분의 소성성분을 산출한다.

2.1.6 LBB.ENG2 방법

LBB.BCL2 방법과 유사하게 배관 컴플라이언스 감소효과를 고려한 방법으로서, 균열 영향에 상응하는 만큼 두께를 감소시킨 배관에서 도출한 상미분 방정식의 해로부터 J-적분의 소성성분을 산출하는 형식을 취한다.

2.1.7 순단면붕괴 방법(Net Section Collapse: NSC)

균열면에서의 균일한 응력분포가 대규모 소성에 의해 임계응력에 도달했을 때 배관 파단이 일어난다고 가정한 방법으로서, 식 (1)에 따라 최대 기준모멘트만을 예측할 수 있다.

$$M_{NSC} = 2\sigma_f R_m^2 A [2\sin\beta - \sin\theta] \quad (1)$$

여기서,

$$\beta = (\pi - \theta)/2$$

이다.

2.1.8 ASME IWB 방법

NSC 방법을 수정하여 두께가 두꺼운 배관에도 적용이 가능하도록 한 방법이다. 이 방법은 NSC 방법과 마찬가지로 식 (2)에 따른 최대 기준모멘트만을 예측할 수 있다.

$$M_{ASME} = \frac{4I\sigma_f}{\pi D_o} (2\sin\beta - \sin\theta) / Z \quad (2)$$

여기서,

$$Z = 1.2 [(1 + 0.021A(D_{NPS} - 4))] \quad : CS모재$$

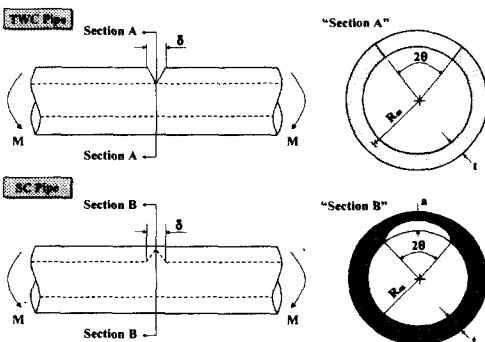


Fig. 1 Schematics of circumferentially through-wall and surface cracked pipes

$Z = 1.35[(1 + 0.0184A(D_{NPS} - 4))]$: CS 용접재

$Z = 1$: SS 모재

$Z = 1.30[(1 + 0.01A(D_{NPS} - 4))]$: SS 용접재

$A = [0.125(\frac{R_m}{t}) - 0.25]^{0.25}$: $5 \leq (\frac{R_m}{t}) \leq 10$

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

이다.

2.2 표면균열 해석방법^(2,5,6)

2.2.1 SC.TNP1 방법

배관내 응력이 일정한 값에 수렴하게 되는 지점에서부터 균열면까지의 거리를 의미하는 길이 매개변수(Length Parameter) L을 사용한다. 이 방법은 배관의 두께가 얇다는 가정하에서 GE/EPRI 영향함수를 사용한다.

2.2.2 SC.TNP2 방법

SC.TNP1 방법의 L 추정에 사용된 유한요소해석 결과를 보정한 것이다. SC.TNP1 방법에서는 L을 배관의 두께로 가정하였으나 이 방법에서는 Ramberg-Osgood 변형을 경화지수 n을 사용하여 L을 (n-1)t로 가정한다.

2.2.3 SC.TKPI 방법

SC.TNP1 방법과 유사하게 GE/EPRI 영향함수를 사용하나, 두께가 두꺼운 배관에 적용할 수 있다.

2.2.4 SC.TKP2 방법

SC.TKPI 방법의 L 추정에 사용된 유한요소해석 결과를 개선한 것이며, L은 (n+1)/(2n+1)t로 가정한다.

2.2.5 SC.ENG1 방법

균열로 인한 배관 컴플라이언스 감소효과를 모사하기 위해 배관 두께 감소 유추법을 사용하며, J-적분 계산시 기본적인 NSC 모멘트를 채택한다.

2.2.6 SC.ENG2 방법

전반적으로 SC.ENG1 방법과 유사하나, J-적분 계산시 Kurihara가 제시한 순단면붕괴 모멘트를 채택하였다는 점에서 상이하다.

2.2.7 NSC 방법

전반적으로 관통균열의 경우와 유사하며, 최대 기준모멘트 결정식은 다음과 같다.

$$M_{NSC_{original}} = 2\sigma_f R_m^2 t [2\sin\beta - \frac{a}{t} \sin\theta] \quad (3)$$

2.2.8 Kurihara 수정 NSC 방법⁽⁷⁾

기본적인 NSC 방법에 짧고 깊은 균열에 대한 실험결과에서 산출한 보정계수(m)를 반영하여 다음과 같이 최대 기준모멘트를 결정한다.

$$M_{NSC_{Kurihara}} = 2m\sigma_f R_m^2 t [2\sin\beta - \frac{a}{t} \sin\theta] \quad (4)$$

2.2.9 Battelle 연구소 수정 NSC 방법

기본적인 NSC 방법에 실험결과를 토대로 산출한 배관의 타원화(Ovalization) 현상 보정계수를 반영하여 식 (5)에 따른 최대 기준모멘트를 결정한다.

$$M_{NSC_{Battelle}} = 2C_e\sigma_f R_m^2 t [2\sin\beta - \frac{a}{t} \sin\theta] \quad (5)$$

2.2.10 ASME IWB 방법

전반적으로 관통균열의 경우와 유사하며, 균열 깊이비(a/t)를 고려한 최대 기준모멘트 결정식은 다음과 같다.

$$M_{ASME_{Original}} = \frac{4I\sigma_f}{\pi D_o} (2\sin\beta - \frac{a}{t} \sin\theta) / Z \quad (6)$$

2.2.11 수정 ASME IWB 방법⁽⁸⁾

ASME IWB 방법에 실험결과를 토대로 산출한 수정 Z-Factor를 반영한 것이다.

3. 파괴역학 해석

원주방향 균열이 존재하는 스테인리스강 및 탄소강 배관에 순수 굽힘하중이 작용하는 경우를 대상으로 공학적 해석 및 유한요소해석을 수행하였다. 사용된 배관 및 균열의 형상, 재료특성은 기본적으로 288℃에서 수행된 준정적(Quasi-Static) 실험결과⁽⁹⁾를 인용하였으며, 입력변수 변화에 따

른 영향을 비교분석 하였다. Table 1, 2 및 Fig. 2, 3은 이를 요약 정리한 것이다. 한편 공학적 해석 수행시 2장에서 제시한 방법 중 12개는 해외에서 개발한 프로그램⁽⁹⁾을 이용하였고, 7개는 식 (1)~(6) 등을 토대로 자체 개발한 프로그램을 이용하였다.

3.1 관통균열 존재 배관

실험결과⁽⁹⁾가 제시되어 있는 기본모델과 기본모델의 입력변수 중 평균반경/두께비(R_m/t), 균열길이비 $[2c/(\pi D_m)]$, Ramberg-Osgood 상수(a , n), 유동응력(Flow Stress)을 변화시킨 모델을 대상으로 공학적 해석을 수행하였다. 균열발생 모멘트와 최대모멘트는 각각 J_{IC} 와 $[(dJ/da)_{app}=(dJ/da)_{mat}]$ 에 해당하는 값으로 결정하였으며, GE/EPRI, Paris/Tada, LBB.NRC, LBB.BCL1, LBB.BCL2, LBB.ENG2, NSC, ASME IWB 방법 등 8가지 방법을 사용하였다.

또한 공학적 해석에 병행하여 3가지 기본모델과 R_m/t , $2c/(\pi D_m)$ 을 변화시킨 모델을 대상으로 ABAQUS를 이용한 탄소성 유한요소해석을 수행하였다. 3차원 유한요소 모델 구성시 대칭성을 고려하여 전체 배관의 1/4만을 모델링 하였고, 5,009개의 절점과 840개의 C3D20 요소를 사용하였다. 4점 굽힘하중을 작용시킨 실험조건을 모사하기 위해 해석모델의 상, 하단부에 집중하중을 작용시켰으며, 하중 지지능력을 대표하는 균열발생 모멘트와 최대모멘트는 각각 J_{IC} 와 $[T_{app}=T_{mat}]$ 에 해당하는 값으로 결정하였다.

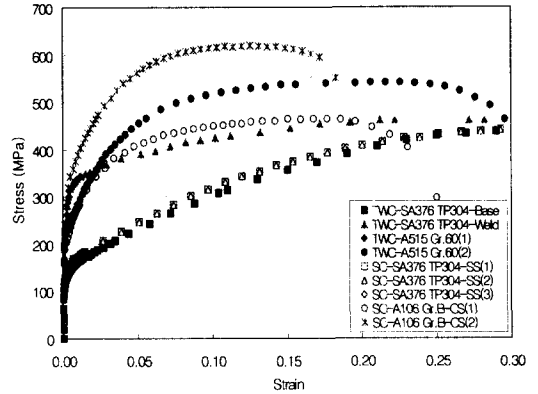


Fig. 2 Stress-strain curves for various pipe materials

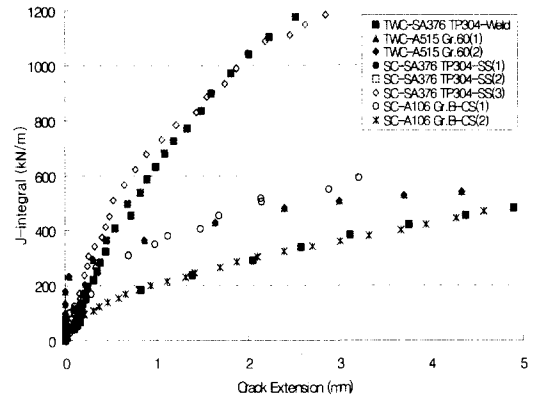


Fig. 3 J-R curves for various pipe materials

Table 1 Geometric and material characteristics of through-wall cracked pipes

Identification	SA376 TP304		A515 Gr.60 (1)	A515 Gr.60 (2)
	Base Metal	Weld Metal	Base Metal	Base Metal
E (GPa) / ν	183 / 0.3	183 / 0.3	179 / 0.3	179 / 0.3
σ_Y / σ_U (MPa)	138 / 449	324 / 466	231 / 544	231 / 544
$2c/(\pi D_m)$ (%)	37.1		6.25	37.0
D_i / D_o (mm)	139.7 / 168.3		665.6 / 711.0	663.8 / 711.0
t (mm) / R_m/t	14.3 / 5.39		22.7 / 15.16	23.6 / 14.56

Table 2 Geometric and material characteristics of surface cracked pipes

Identification	SA376 TP304 Base Metal			A106 Gr.B Base Metal	
	SS (1)	SS (2)	SS (3)	CS (1)	CS (2)
E (GPa) / ν	183 / 0.3	183 / 0.3	182 / 0.3	193 / 0.3	211 / 0.3
σ_Y / σ_U (MPa)	147 / 499	147 / 499	139 / 450	212 / 467	320 / 621
$2c/(\pi D_m)$ (%) / a/t	25.0 / 0.50	50.2 / 0.63	51.8 / 0.66	50.8 / 0.63	50.3 / 0.68
D_i / D_o (mm)	154.1 / 168.3	153.4 / 167.4	141.4 / 168.6	154.4 / 169.3	137.9 / 167.5
t (mm) / R_m/t	7.1 / 11.35	7.0 / 11.46	13.6 / 5.70	7.44 / 10.88	14.8 / 5.16

3.2 표면균열 존재 배관

실험결과⁽⁹⁾가 제시되어 있는 기본모델과 기본 모델의 입력변수 중 R_m/t , $2c/(\pi D_m)$ 및 a/t 를 변화 시킨 모델을 대상으로 공학적 해석을 수행하였다. 해석시 채택한 방법은 SC.TNP1, SC.TNP2, SC.TKP1, SC.TKP2, SC.ENG1, SC.ENG2, NSC, ASME IWB 방법과 Kurihara 및 Battelle 연구소 수정 NSC 방법 등 11가지 방법을 사용하였다.

또한 공학적 해석에 병행하여 5가지 기본 해석 모델에 대해 ABAQUS를 이용한 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. Fig. 4는 3차원 유한요소해석 모델을 나타낸 것으로서, 대칭성을 고려하여 배관의 1/4만을 모델링하였으며, 9,865개의 절점과 1,944개의 C3D20 요소를 사용하였다. 하중조건으로는 관통균열의 경우와 마찬가지로 해석모델의 상, 하단부에 4점 굽힘하중을 작용시켰으며, 균열 발생 모멘트와 최대모멘트 또한 J_{IC} 와 $[(dJ/da)_{app} = (dJ/da)_{mat}]$ 에 해당하는 값으로 결정하였다.

4. 해석결과

공학적 해석 및 유한요소해석을 통해 예측한 균열발생 모멘트와 최대모멘트를 분석하고, 기존 실험결과와 비교 검토한 내용은 다음과 같다.

4.1 관통균열 존재 배관

Fig. 5는 기본모델을 대상으로 예측 및 실험으로 구한 균열발생 모멘트비와 최대모멘트비를 나타낸 것이다. 일부 방법에서 예외는 있으나 전반적으로 예측값이 실험값보다 작게 나타났으며, 이는 대부분의 해석방법이 하중 지지능력을 보수

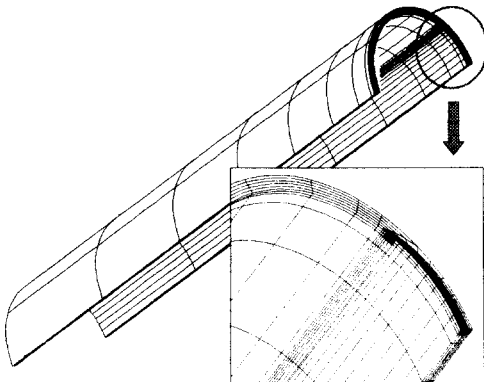


Fig. 4 FE model for surface cracked pipe

적으로 예측함을 의미한다. 또한 균열발생 모멘트비의 편차가 최대모멘트비의 편차에 비해 상대적으로 더 크며, 그 값은 평균 9% 정도이었다.

하중 지지능력 예측결과를 보다 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. LBB.NRC, LBB.BCL1, 유한소해석 방법은 실험결과를 비교적 잘 모사할 뿐만 아니라 재질 및 형상 변화에 따른 예측/실험 모멘트비의 산포도도 적은 것으로 나타났다. GE/EPRI와 LBB.BCL2 방법의 경우 실제 하중 지지능력을 과소평가하는 경향을 보였고, NSC와 ASME IWB 방법의 경우 상대적으로 과대평가하였다. 이외에 Paris/Tada 방법의 경우 주어진 조건에 따라 예측경향이 다를 뿐만 아니라 예측/실험 모멘트비의 산포도도 상대적으로 크게 나타났으며, 이는 제시된 방법이 재료의 경화거동을 명확히 반영하지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 6은 A515 Gr.60(1) 배관의 R_m/t 변화에 따른 최대모멘트 예측결과를 나타낸 것이다. R_m/t 가 5에서 15.16으로 변화함에 따라 하중 지지능력이 3배 정도 감소하였으며, 이 때 하중 지지능력 감소폭은 R_m/t 가 5~10인 구간에서 10~15인 구간보다 크게 나타났다. 또한 A515 Gr.60(1) 배관의 $2c/(\pi D_m)$ 을 변화시키면서 공학적 해석 및 유한요소해석으로 구한 최대모멘트 예측결과는 $2c/(\pi D_m)$ 이 6배 증가함에 따라 하중 지지능력이 약 1/3 수준으로 감소하였다. 이러한 R_m/t 및 균열크기 변화에 따른 하중 지지능력 예측경향 및 감소수준은 균열발생 모멘트 및 타 해석모델에 대한 예측결과에서도 유사하게 나타났다.

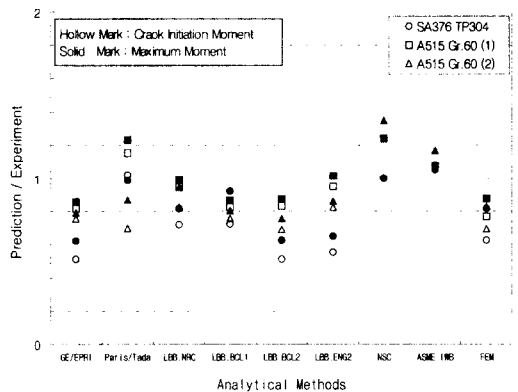


Fig. 5 Crack initiation and maximum moment ratios for through-wall cracked pipes

Fig. 7은 A515 Gr.60(2) 배관의 Ramberg-Osgood 상수 α 값을 변화시키면서 공학적 해석으로 구한 최대모멘트 예측결과를 비교한 것이다. 예측결과 는 GE/EPRI, LBB.BCL2, LBB.ENG2 방법을 이용할 때와 같이 α 값 증가에 따라 하중 지지능력이 감소하는 경우와 Paris/Tada, LBB.BCL1, NSC, ASME IWB 방법을 이용할 때와 같이 α 값 변화의 영향이 거의 없는 경우로 구분할 수 있다. 동일한 조건하에서 n 값 변화에 따른 영향을 비교한 결과도 이와 유사한 2가지 형태로 나타났으나, 전반적인 경향은 α 값 변화에 따른 결과와 반대 이었다. 즉, GE/EPRI, LBB.NRC, LBB.BCL2, LBB.ENG2 방법의 경우 n 값 증가에 따라 하중 지지능력이 증가하나, 나머지 방법을 이용한 경우에는 n 값 변화의 영향이 거의 없는 것으로 나타났다.

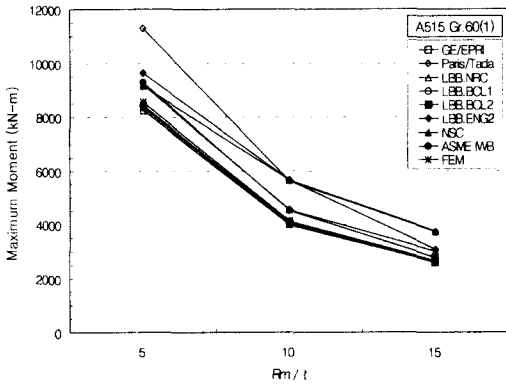


Fig. 6 Predicted maximum moments for the variation of R_m/t

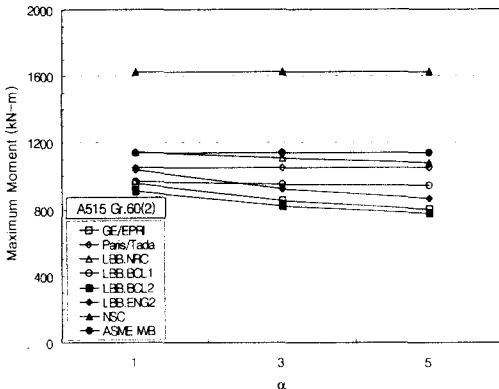


Fig. 7 Predicted maximum moments for the variation of α

α 및 n 값 변화에 따른 하중 지지능력의 변화량은 해석방법에 따라 다소 차이가 있으나, 전반적으로 최대모멘트 변화량이 균열발생 모멘트 변화량에 비해 2배 정도 큰 경향을 보였다.

배관의 하중 지지능력 예측결과에는 유동응력의 정의에 따라서도 차이가 있다. Table 3은 A515 Gr.60(1) 및 (2) 배관에 대해 ASME IWB 방법으로 구한 예측결과를 나타낸 것이다. 유동응력으로는 현재 통용되고 있는 항복강도와 인장강도의 평균값, 통계적 분석을 통해 제시된 항복강도와 인장강도 평균의 1.15배값, ASME 코드에서 권고하는 $3S_m$ 값을 사용하였다⁽¹⁰⁾. 제한적인 해석결과에 근거한 것이기는 하나 $0.5(\sigma_y + \sigma_u)$ 를 채택할 경우의 예측값이 실험결과와 가장 유사하고, $3S_m$ 값을 사용하였을 경우의 예측값이 가장 보수적이며, 통계적 제시값을 사용할 경우 하중 지지능력을 다소 과대평가하는 것으로 나타났다.

4.2 표면균열 존재 배관

Fig. 8은 기본모델을 대상으로 공학적 해석과 유한요소해석으로 구한 균열발생 모멘트 및 최대모멘트 값을 해당 실험 모멘트 값과 비교한 것으로서, 최대모멘트비는 균열발생 모멘트비보다 평균 13% 정도 작다. 또한 관통균열 존재 배관에 비해 예측/실험 모멘트비의 산포도가 상대적으로 크기는 하나 균열발생 모멘트비의 편차가 최대모멘트비의 편차에 비해 다소 크게 나타나는 경향은 전반적으로 동일하였다.

하중 지지능력 예측결과를 보다 구체적으로 살펴보면 다음과 같다. 유한요소해석으로 구한 예측결과가 다소 보수적이기는 하나 일관된 예측경향을 보여주는 등 NSC 방법과 함께 실험결과를 비교적 잘 모사하는 반면 SC.TNP1 방법의 경우 하중 지지능력을 과대평가 하는 것으로 나타났

Table 3 Predicted maximum moments using ASME IWB method for various flow stresses

$2c/(\pi D_m)$	R_m/t	$M_{Exp.}$ (kN-m)	$M_{Predicted}$ (kN-m)		
			0.5 ($\sigma_y + \sigma_u$)	0.575 ($\sigma_y + \sigma_u$)	$3S_m$
6.25%	6	-	9543	10975	9293
	10	-	4643	5339	4521
	15	3015	2845	3271	2770
37%	5	-	3991	4296	3329
	10	-	2075	2233	1731
	14.6	1206	1170	1345	1139

다. 나머지 방법은 예측결과가 실험결과와 유사한 경우도 있으나, 관통균열에 비해 상대적으로 균열 형상이 복잡하여 예측/실험 모멘트비의 산포도가 크고 재료특성에 따라서도 경향이 변화하기 때문에 일관성을 파악하기 어려운 실정이다.

Table 4는 기본모델을 대상으로 기본적인 NSC 방법과 Kurihara 및 Battelle 연구소가 수정한 방법을 사용하여 구한 최대모멘트를 비교한 것이고, Table 5는 현행 ASME IWB 방법과 IPIRG-2 프로그램⁽⁴⁾에서 제시된 수정 ASME IWB 방법으로 구한 최대모멘트를 비교한 것이다. 당초 예상과는 달리 Kurihara의 수정 NSC 방법을 사용하여 예측한 결과는 기본적인 NSC 방법에 비해 평균 13% 정도 보수적인 경향을 보였으며, Battelle 연구소의 수정 NSC 방법은 R_m/t 가 작은 SS(3) 배관에에서만 실험결과와 잘 일치할 뿐 다른 배관에 대해서는 실험결과와의 편차가 기본적인 NSC 방법에 비해 더 크게 나타났다. 한편 수정 ASME IWB 방법으로 구한 최대모멘트 예측결과는 탄소강 배관의 경우 현행 ASME IWB 방법으로 구한 예측

결과와 유사하나, 스테인리스강 배관의 경우 차이가 있으며, 실험결과와의 편차는 오히려 15% 정도 더 크게 나타났다.

Fig. 9는 CS(1) 배관의 R_m/t 를 변화시키면서 공학적 해석으로 구한 최대모멘트 예측결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 R_m/t 가 5.2에서 10.8로 2배 증가함에 따라 하중 지지능력이 1/2 수준으로 감소하였으며, 해석에 사용한 방법의 R_m/t 민감도는 SC.TNP1 방법과 NSC 방법이 가장 크고 ASME IWB 방법이 가장 작은 것으로 나타났다.

Fig. 10은 CS(2) 배관의 $2c/(\pi D_m)$ 을 변화시키면서 공학적 해석으로 구한 최대모멘트 예측결과를 나타낸 것이다. $2c/(\pi D_m)$ 이 25%에서 50%로 2배 증가함에 따라 하중 지지능력은 약 10% 정도 감소하였으며, 해석에 사용한 방법의 $2c/(\pi D_m)$ 민감도는 SC.TKP2 방법이 상대적으로 가장 큰 반면 SC.TNP2, SC.ENG2 및 ASME IWB 방법이 가장 작은 것으로 나타났다.

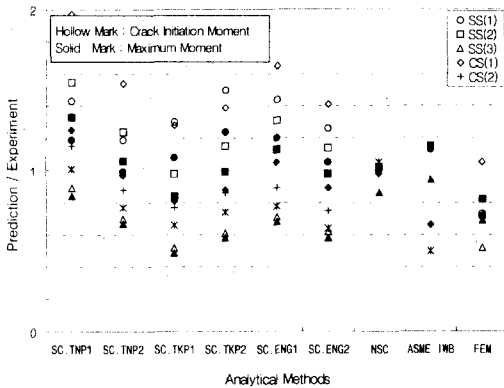


Fig. 8 Crack initiation and maximum moment ratios for surface cracked pipes

Table 4 Predicted maximum moments using various NSC methods

ID	M_{Exp} (kN-m)	$M_{Predicted}$ (kN-m)		
		NSC _{Original}	NSC _{Kurihara}	NSC _{Battelle}
SS(1)	44.3	44.2	38.0	44.9
SS(2)	29.5	30.1	25.2	31.2
SS(3)	59.6	51.0	42.2	58.5
CS(1)	38.0	37.1	31.3	38.9
CS(2)	80.1	84.3	68.0	97.7

Table 5 Predicted maximum moments using various ASME IWB methods

ID	M_{Exp} (kN-m)	ASME _{Original}		ASME _{Modified}	
		Z-Factor	$M_{Predicted}$ (kN-m)	Z-Factor	$M_{Predicted}$ (kN-m)
SS(1)	44.3	1	49.9	0.782	63.8
SS(2)	29.5	1	34.0	0.781	43.5
SS(3)	59.6	1	56.3	0.794	71.0
CS(1)	38.0	1.272	25.2	0.938	34.1
CS(2)	80.1	1.252	40.3	0.947	53.2

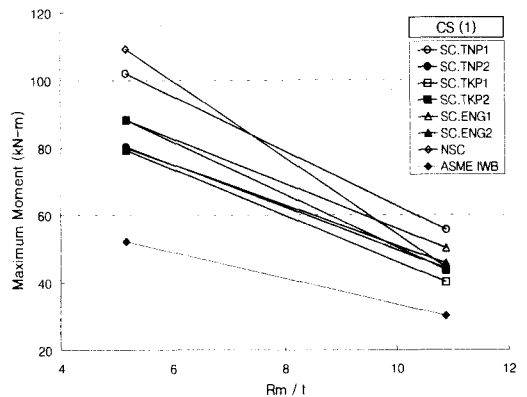


Fig. 9 Predicted maximum moments for the variation of R_m/t

한편 균열발생 모멘트 및 타 해석모델에 대한 예측결과도 Fig. 9, 10에 나타난 CS(1), CS(2) 배관의 R_m/t 와 $2c/(\pi D_m)$ 변화에 따른 하중 지지능력 예측경향 및 감소수준과 유사하게 나타났다.

Fig. 11은 SS(3) 배관의 a/t 를 변화시키면서 공학적 해석으로 구한 최대모멘트 예측결과를 도시한 것이다. a/t 가 0.5에서 0.66으로 30% 증가함에 따라 하중 지지능력이 25% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 예측경향은 타 해석모델에 대해서도 평균 18% 정도로 비교적 유사하였으며, 해석에 사용한 방법의 a/t 의 민감도는 SC.ENG2 방법이 가장 큰 반면 SC.TNP1 방법이 가장 작은 것으로 파악되었다.

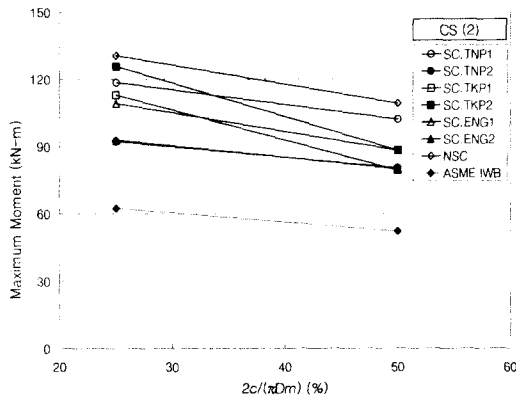


Fig. 10 Predicted maximum moments for the variation of $2c/(\pi D_m)$

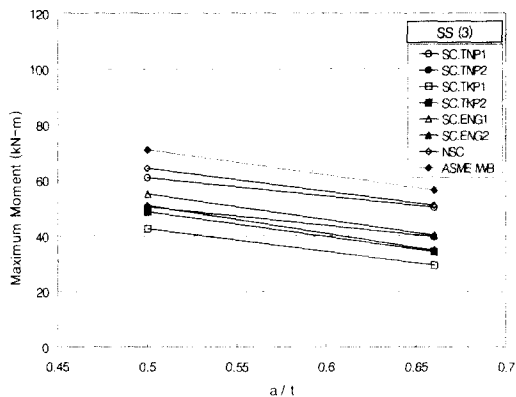


Fig. 11 Predicted maximum moments for the variation of a/t

5. 결론

원주방향 균열이 존재하며 순수 굽힘하중이 작용하는 배관의 파괴거동 예측에 사용할 수 있는 최적의 공학적 해석방법을 결정하고, 주요 파괴역학 매개변수가 하중 지지능력에 미치는 영향을 파악하기 위해 수행한 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) LBB.NRC, LBB.BCL1 방법은 실험결과에 비해 다소 보수적이기는 하나 유한요소해석 방법과 함께 관통균열 존재 배관의 하중 지지능력 결정시 사용할 수 있는 적절한 방법으로 판단된다.

(2) ASME IWB 해석방법을 사용하여 관통균열이 존재하는 배관의 하중 지지능력을 예측하는 경우 $0.5(\sigma_y + \sigma_u)$ 값을 유동응력으로 채택하는 것이 실험결과와 가장 잘 일치하였다.

(3) 기본적인 NSC 방법은 유한요소해석 방법과 함께 표면균열 존재 배관의 하중 지지능력 결정시 사용할 수 있는 적절한 방법으로 판단된다.

(4) SC.TNP2 방법과 SC.ENG2 방법으로 구한 표면균열 존재 배관의 하중 지지능력은 실험결과와 비교적 유사하나 조건에 따라 예측 경향이 변화하므로 추가적인 검토가 요구된다.

(5) 수정 NSC 및 ASME IWB 방법은 특정 조건에서만 유효하므로, 현재로서는 기본적인 방법을 채택하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

(6) 표면균열 존재 배관에 대한 예측/실험 모멘트비의 산포도는 관통균열 존재 배관에 비해 크며, 이는 상대적으로 부족한 실험 데이터의 확보 등을 통해 해결될 수 있을 것으로 생각된다.

(7) 관통 및 표면균열에 대한 나머지 공학적 해석방법의 경우 하중 지지능력 예측 경향이 조건에 따라 변화하므로, 일반적인 적용을 위해서는 보완이 필요한 것으로 판단된다.

(8) 향후 타당성이 입증된 공학적 해석방법을 이용하여 추가적인 해석을 수행할 예정이며, 이는 확률론적 방법에 기반을 둔 해석 및 검사의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

(1) Wilkowski, G. M., Ahmad, J., Barnes, C. R., Broek, D., Kramer, G., Landow, M., Marschall, C. W., Maxey, W., Nakagaki, M., Scott, P. M.,

- Papaspyropoulos, V., Pasupathi, V. and Popelar, C., 1984, "Degraded Piping Program - Phase II," NUREG/CR-4082, Vol. 1~Vol. 8.
- (2) Wilkowski, G. M., Ahmad, J., Brust, F., Ghadiali, N., Krishnaswamy, P., Landow, M., Marschall, C. W., Scott, P. M. and Vieth, P., 1994, "Short Cracks in Piping and Piping Welds," NUREG/CR-4599, Vol. 1, No. 1~Vol. 4, No. 1.
- (3) Scott, P. M., Wilson, M., Olson, R., Marschall, C. W., Schmidt, R. and Wilkowski, G. M., 1991, "International Piping Integrity Research Group Program," Final Report, NUREG/CR-6233.
- (4) Hopper, A., Wilkowski, G. M., Scott, P. M., Olson, R., Rudland, D., Kilinski, T., Mohan, R., Ghadiali, N. and Paul, D., 1996, "International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) Program," Final Report, NUREG/CR-6452.
- (5) Scott, P. M. and Ahmad, J., 1987, "Experimental and Analytical Assessment of Circumferentially Surface Cracked Pipes Under Bending," NUREG/CR-4872.
- (6) Krishnaswamy, P., Scott, P. M., Mohan, R., Rahman, S., Choi, Y. H., Brust, E., Kilinski, T., Francini, R., Ghadiali, N., Marschall, C. W. and Wilkowski, G. M., 1995, "Fracture Behavior of Short Circumferentially Surface Cracked Pipe," NUREG/CR-6298.
- (7) Kurihara, R., Ueda, S. and Sturm, D., 1988, "Estimation of the Ductile Unstable Fracture of Pipe with a Circumferential Surface Crack Subjected to Bending," Nuclear Engineering and Design, Vol. 106, pp. 265~273.
- (8) Choi, Y. H., Chung, Y. K., Park, Y. W., Lee, J. B. and Wilkowski, G. M., 1997, "Development of New Z-Factors for the Evaluation of a Surface Crack in Nuclear Pipings," Transactions of the 14th International Conference on SMiRT, Vol. 4, pp. 603~610.
- (9) Battelle, 1998, "Pipe Fracture Encyclopedia," Vol. 1~Vol. 4, Internal Communication.
- (10) Wilkowski, G. M., Ahmad, J., Brust, F., Guerrieri, D., Kramer, G., Kulhowickr, G., Landow, M., Marschall, C., Nakagaki, M., Papaspyropoulos, V. and Scott, P., 1987, "Analysis of Experiments on Stainless Steel Flux Welds," NUREG/CR-4878.