

# 재료물성을 고려한 감육배관의 공학적 한계하중해 제시

최재봉\*·김진수\*·구본걸\*\*·김영진\*·최영환\*\*\*

## Engineering Estimation of Limit Load Solution for Wall-Thinned Pipes Considering Material Properties

Jae-Boong Choi, Jin-Su Kim, Bon-Geol Goo, Young-Jin Kim  
and Young-Hwan Choi

**Key Words:** Wall Thinned Pipe(감육배관), Limit Load Solution(한계하중해), Erosion and Corrosion (침부식), SA106 Gr. B, Finite Element Analysis(유한요소해석)

### Abstract

A potential loss of structural integrity due to aging of nuclear piping may have a significant effect on the safety of nuclear power plants. In particular, failures due to the erosion and corrosion defects are a major concern. As a result, there is a need to assess the remaining strength of pipe with erosion/corrosion defects. In this paper, a limit load solution for the eroded and corroded SA106 Grade B pipes subjected by internal pressure is developed. based in 3-D finite element analyses, considering a wide range of the shape of pipeline, flaw depth and axial flaw length parametrically.

### 1. 서 론

원자력발전소 기기설비의 40%를 차지하는 원전배관의 건전성은 원자력발전소의 안전성과 관련된 매우 중요한 문제이다. 특히 원전배관의 감육현상은 배관의 건전성을 저해하는 주요 인자로 주로 2차 계통 배관에서 발생한다. 이러한 감육현상은 1980년대 미국 Surry 2호기의 대형배관(직경 457 mm)의 파단사고를 통해 주목받게 되었다.

외국의 경우 약 15년 운전 후 교체를 필요로 하는 정도의 감육이 상당히 발견된 바 있다<sup>(1)</sup>. 국내에서도 1990년대 부터 가동중 검사에 배관의

두께측정을 추가하면서 배관의 감육현상이 발견되고 있다<sup>(2)</sup>. 원자력발전소의 안전성 측면에서는 감육이 발견되거나 또는 예상되는 배관을 모두 교체하는 것이 가장 바람직하지만, 경제성을 고려한다면 모든 감육배관을 교체하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 감육배관에 대한 교체, 보수 및 계속 사용 등의 여부를 정확히 판단할 수 있는 건전성 평가방법의 확립이 필요하다. 원자력 산업계에서는 최근에 들어서야 감육현상에 대한 관심을 가지게 되었으며, ASME에서는 이를 반영하여 Code Case N-597<sup>(3)</sup>을 통해 감육배관에 대한 허용두께 평가 기준을 제시하였다. 그러나 이 기준은 규제기관에 의해 아직 인정받지 못하고 있으며 공학적인 측면에서는 과도한 보수성을 내포하고 있다.

감육배관의 파손모드는 하중의 작용형태와 감육부위의 형상에 따라 다르게 나타난다<sup>(4,5)</sup>. 내압이나 굽힘하중을 받을 경우 감육배관은 주로 감육부에서 넥킹(necking)에 의한 소성붕괴(plastic

\* 회원. 성균관대학교 기계공학부

\*\* 회원. 현대자동차(주)

\*\*\* 회원. 한국원자력안전기술원

E-mail : yjkim@yurim.skku.ac.kr

TEL : (031)290-5274 FAX : (031)290-5276

collapse)에 의한 파괴 거동을 나타낸다<sup>(6)</sup>. 이러한 실험결과를 근거로 내압과 굽힘하중이 작용하는 감육배관의 파괴 기준으로는 소성붕괴 해석에 의한 한계하중법이 적용되고 있다.

일반 가스배관의 경우, 감육부의 안전성 평가를 위해 파괴 응력을 예측할 수 있는 다양한 한계 하중해가 제시되어 있다. 일반적으로 감육배관의 한계하중은 배관 재료의 강도 및 인성에 따라 다르게 나타난다. 그러나 이러한 한계하중해는 모든 재료에 동일하게 적용하도록 되어 있으며, 재료에 따라 지나치게 보수적이거나 또는 비보수적인 예측결과를 나타낼 수 있다. 특히 가스배관은 저인성강으로 강도 및 인성이 다른 원자력 배관에 적용하기는 매우 어렵다.

따라서 본 연구에서는 원자력 발전소 2차 계통에 널리 사용되고 있는 SA106 Gr. B 배관 감육부에 대한 한계하중해를 제시하였다. 이를 위해 감육배관에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였으며, 감육부 형상인자의 민감도 분석을 통해 한계하중해를 제시하였다. 또한 감육배관의 파괴예측시 기준응력 선정에 따른 안전여유도를 평가하기 위하여 파괴 기준응력을 항복강도(yield strength), 유동응력(flow stress), 인장강도(ultimate strength)로 설정하여 각각의 경우에 따른 한계하중해를 제시하였다.

## 2. 감육배관 건전성 평가법

### 2.1 ASME Code Case N-597

ASME에서는 가동중 국부적으로 감육이 발생한 원전배관에 대한 평가 절차 및 사용, 보수, 교체에 판단 지침을 제공하기 위해 Code Case N-597을 제시한 바 있다. 이 기준에 따르면 배관의 안전성을 확보하기 위해서, 허용두께 기준과 응력 기준을 만족해야 한다. 각 판단 기준은 다음과 같다.

#### 2.1.1 감육두께 평가기준

감육배관 두께에 대한 평가는 다음주기 검사시의 예상되는 배관 감육부 두께가 배관의 공칭 두께의 87.5%보다 클 경우 계속운전을 허용하고, 공칭두께의 20% 이하일 경우에 보수 및 교체를 한다. 감육부 두께가 공칭 두께의 20% 이상이고 87.5% 이하일 경우에는 감육부의 형상에 따라

Limited Transverse Extent, Limited Axial and Transverse, Unlimited Transverse Extent 의 3가지 조건으로 나누어 허용두께를 평가한다.

#### 2.1.2 응력허용 기준

감육 배관의 안전성을 확보하기 위해서는 허용두께 기준 이외에도 ASME Sec. III<sup>(6)</sup> 및 ANSI/ASME B31.1<sup>(7)</sup>과 같은 설계코드의 응력기준을 만족해야 한다. 이 때, 감육에 의한 단면적 감소를 고려하여 전체 배관 두께를 감육부의 최소 두께로 가정하여 보수적으로 평가하거나, 감육된 영역의 두께 측정치를 사용하여 응력기준에 적용한다.

### 2.2 Modified B31G

ANSI/ASME B31G에서는 Fig 1과 같이 부식된 감육배관에 대한 한계하중해를 제시한 바 있다. Kiefner<sup>(8)</sup>는 부식배관에 대한 파괴시험을 수행하여 기존 ANSI/ASME B31G 식의 정확성을 높인 수정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$P_{max} = \frac{2t}{D_i} (S + 68.95 \text{ MPa}) \times \left[ \frac{1 - (0.85)(a/t)}{1 - (0.85)(a/t)/M} \right] \quad (1)$$

여기서  $P_{max}$ 는 파손응력,  $\sigma_f$ 는 유동응력,  $S$ 는 허부 항복강도이다.  $M$ 은 Folias 벌정계수 (bulging factor)로서 다음과 같이 정의된다.

$$M = \sqrt{1 + 0.6275 \frac{l^2}{D_o t} - 0.003375 \frac{l^4}{D_o^2 t^2}} \quad \text{for } l^2 / (D_o t) > 50$$

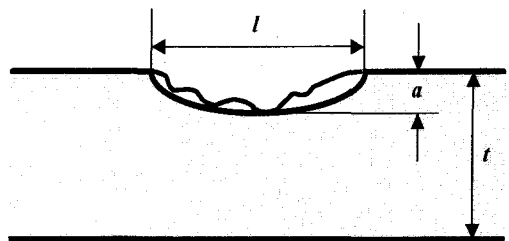


Fig. 1 Flaw shape idealization for ASME B31G

$$M = 0.032 \frac{l^2}{D_o t + 3.3} \quad (2)$$

for  $l^2 / (D_o t) > 50$

### 2.3 PCORRC

Battelle은 기존 한계하중해의 보수성을 줄이고 손상배관의 파괴를 제어하는 메커니즘을 정립하기 위해 1990년대 PRC International과 함께 연구를 수행한 바 있다<sup>9)</sup>. 연구 결과, 고인성 배관은 소성붕괴에 의해 파괴되며, 이 때 유동응력보다는 인장강도의 영향을 받는다는 것을 밝힌 바 있다. 이를 바탕으로 Battelle은 고인성 배관의 부식손상부에 대해 새로운 파괴기준을 제시하였다.

$$P_f = \frac{2t}{D} \sigma_{ult} \times \left( 1 - \frac{d}{t} \left( 1 - \exp \left( -0.157 \frac{L}{\sqrt{Rt^*}} \right) \right) \right) \quad (3)$$

이 식은 Battelle에서 개발한 고인성 배관의 부식손상 평가 프로그램인 PCORRC에 제시되어 있으며 PCORRC 식으로 알려져 있다. 식 (3)은 샤프 상부에너지(upper shelf energy)가 60 J이상인 배관에 대해 사용할 수 있다.

## 3. 유한요소해석

### 3.1 유한요소모델

감육부위의 형상변화에 따른 배관의 한계하중

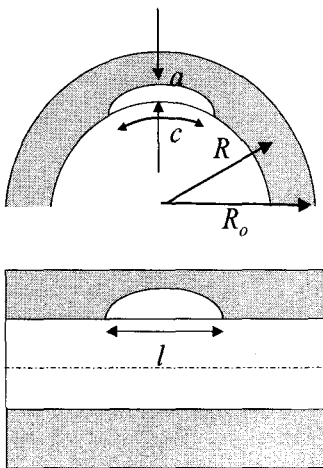


Fig. 2 Schematic illustration of wall-thinned pipes

해는 배관재료의 강도 및 인성에 따라 다르다.

본 연구에서는 원자력 발전소 2차 배관으로 널리 사용되는 SA106 Gr. B 배관 감육부에 대한 한계하중해를 제시하기 위해 재료 특성 및 배관 형상을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다. 해석에 사용된 모델은 두께 23.8 mm, 직경 457.2 mm 인 원자력발전소 2차계통 배관이며, Fig. 2와 같이 배관 내벽에 감육부가 존재한다고 가정하였다. 유한요소모델은 Fig. 3과 같이 대칭성을 고려하여 1/4만을 모델링 하였으며 20절점 등사각 주요소를 사용하여 1,044개의 요소와 5,711개의 절점으로 구성하였다. 하중조건은 배관에 작용하는 대표적인 하중

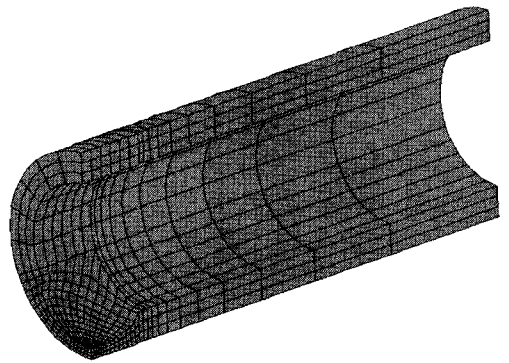


Fig. 3 Finite element model for wall-thinned pipe

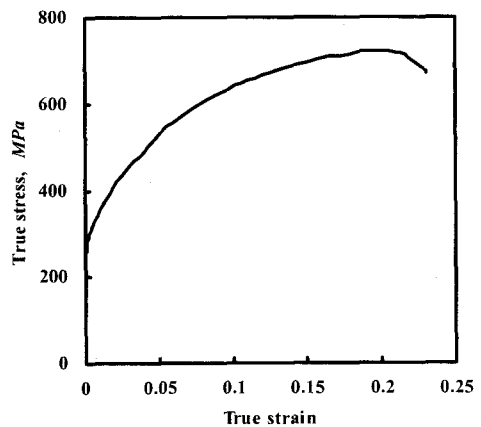


Fig. 4 True stress-strain curve for SA106 Gr. B steel tested at 316°C

인 내압을 사용하였다. 해석에 사용된 재료물성치는 PIFRAC 데이터베이스<sup>(10)</sup>로부터 구하였으며, 원전가동온도인 316°C에서의 데이터를 이용하였다. Fig. 4은 SA106 Gr. B강의 진응력-진변형률 선도를 나타내며, Table 1은 해석에 사용된 재료물성치를 나타낸다.

유한요소해석은 감육부 형상이 미치는 영향을 파악하기 위해 감육부위 깊이비( $a/t$ )를 0.1, 0.265, 0.5로 변화시켰으며, 감육부위 축방향길이( $l/\sqrt{Rt}$ )를 0.5, 1, 2, 4, 6으로 변화시켰다. 내압에 의한 파괴는 원주방향 응력에 지배적이므로 감육부의 원주방향길이( $c$ )의 영향은 무시할 수 있다. 따라서 원주방향길이비는 ( $c/\pi R_o$ )는 1/4로

Table 1 Material Properties of SA106 Gr. B

Young's modulus	195 GPa
Poisson's ratio	0.3
Yield strength, $\sigma_y$	294 MPa
Ultimate strength, $\sigma_u$	700 MPa

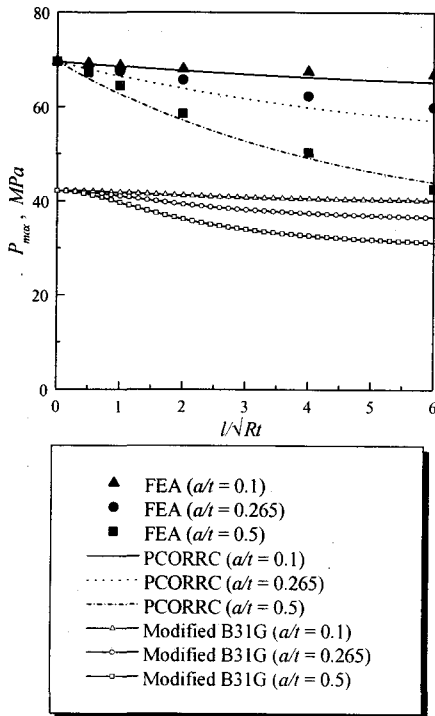


Fig. 5 Comparison of Pmax with different failure criterion for SA106 Gr. B pipe

고정하였다.

### 3.2 한계하중 결정

유한요소해석시 한계하중의 결정은 감육부위에 발생한 소성분포(plastic flow)가 배관벽 전체에 도달할 때의 하중으로 결정하였다. 잔여리가먼트 부분에 소성분포가 전역(global)에 걸쳐 생성되면 잔여리가먼트 영역은 더 이상의 하중 지지능력을 상실한 것으로 판단할 수 있으며 배관이 최대로 견딜 수 있는 하중, 즉 한계하중  $P_{max}$ 는 이 때 작용하는 내압으로 정의하였다. 한계하중의 경우, 소성역 발생의 기준이 되는 기준응력이 선택이 해석결과에 많은 영향을 미치므로 본 연구에서는 기준응력을 항복강도, 유동응력, 인장강도로 설정하고 각 경우에 대한 한계하중해를 제시하였다. 유동응력은 실패관실험을 통해 얻은 결과<sup>(8)</sup>를 통해  $\sigma_y + 68.95MPa$ 를 사용하였다.

## 4. 해석 결과

### 4.1 한계하중해의 비교

Fig. 5는 기준응력을 인장강도로 설정한 경우의 유한요소해석과 Battelle에서 개발한 PCORRC방법, Modified B31G방법에 의한 한계하중값을 비교한 것이다. 유한요소해석결과는 Modified B31G 값에 비해 40~70%이상 높게 예측되었다. 이는 배관의 재료물성과 관련된 것으로 저인성강에 대한 평가식인 Modified B31G식이 고인성강인 SA106 Gr. B 배관의 파괴거동을 제대로 모사하지 못하기 때문이다. 한편 고인성강에 대한 PCORRC 방법은 유한요소 해석결과와 3% 이내로 거의 일치하였다.

Fig. 6~8은 감육깊이비( $a/t$ )별로 각각의 기준응력에 따른 한계하중값을 비교한 것이다. 인장강도가 기준응력인 경우 유동응력이 기준응력인 경우보다 약 50~70%정도 높게 예측되었고, 항복응력이 기준응력인 경우 유동응력이 기준응력인 경우보다 약 10~30%정도 낮게 예측되었다. 따라서 감육배관의 파손압력예측시 기준응력의 선정이 매우 중요한 요소이며 이를 위해서는 실패관 가압파손실험이 필요한 것으로 판단된다. 초기에 개발된 배관 감육부 평가기준은 감육부에 작용하는 응력이 재료의 유동응력(flow stress)에 도달하면 파괴가 일어난다고 가정하였다. 하지만 지난

5년 동안 Battelle과 다른 연구기관에서는 최근 제작된 고인성 배관의 감육부는 유동응력보다는 인장강도에 의해 제어됨을 보여주었다. 따라서 최근에 제작되는 고인성 배관에는 인장강도 기준이 적절한 것으로 판단된다.

#### 4.2 공학적 한계하중해 계산식 제시

본 논문에서는 유한요소 해석결과를 이용하여 기준응력 및 감육형상을 고려한 감육배관 평가식을 다음과 같이 제시하였다.

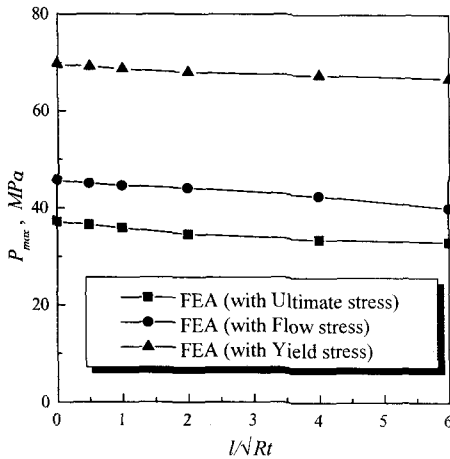


Fig. 6 Comparison of  $P_{max}$  with different a criterion stress ( $a/t = 0.1$ )

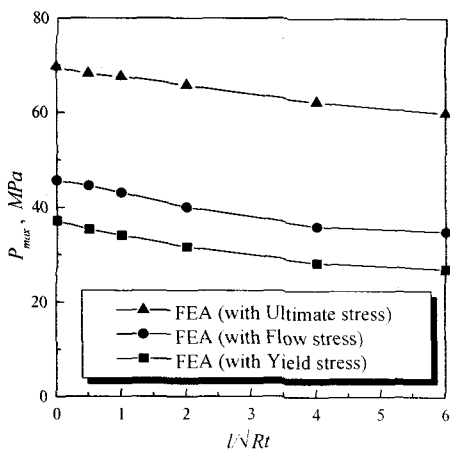


Fig. 7 Comparison of  $P_{max}$  with different a criterion stress ( $a/t = 0.265$ )

#### 4.2.1 인장강도 기준

$$P_{max} = \frac{2t}{D_i} \sigma_u \left[ A_2 \left( \frac{l}{\sqrt{Rt}} \right)^2 + A_1 \left( \frac{l}{\sqrt{Rt}} \right) + A_0 \right] \quad (4)$$

여기서

$$A_2 = 0.012 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 0.002 \left( \frac{a}{t} \right) + 0.001$$

$$A_1 = -0.2676 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 0.0187 \left( \frac{a}{t} \right) - 0.001$$

$$A_0 = 0.0617 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 0.0268 \left( \frac{a}{t} \right) + 1.001$$

#### 4.2.2 유동응력 기준

$$P_{max} = \frac{2t}{D_i} \sigma_f \left[ A_2 \left( \frac{l}{\sqrt{Rt}} \right)^2 + A_1 \left( \frac{l}{\sqrt{Rt}} \right) + A_0 \right] \quad (5)$$

여기서

$$A_2 = -0.0148 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + 0.0339 \left( \frac{a}{t} \right) - 0.082$$

$$A_1 = 0.1698 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 0.4129 \left( \frac{a}{t} \right) + 0.019$$

$$A_0 = -0.3156 \left( \frac{a}{t} \right)^2 + 0.1619 \left( \frac{a}{t} \right) + 1.0637$$

#### 4.2.3 항복응력 기준

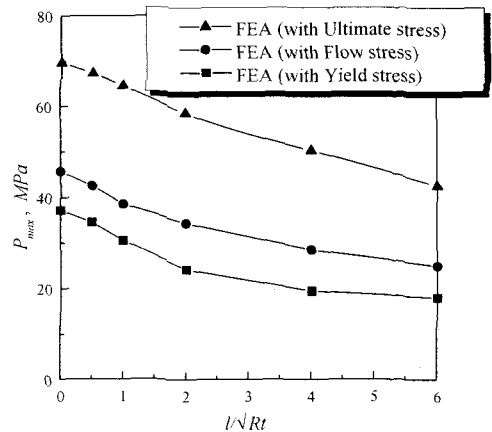


Fig. 8 Comparison of  $P_{max}$  with different a criterion stress ( $a/t = 0.5$ )

$$P_{\max} = \frac{2t}{D_i} \sigma_y \left[ A_2 \left( \frac{l}{\sqrt{Rt}} \right)^2 + A_1 \left( \frac{l}{\sqrt{Rt}} \right) + A_0 \right] \quad (6)$$

여기서

$$A_2 = 0.0952 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 0.0111 \left( \frac{a}{t} \right) - 0.06$$

$$A_1 = -0.5475 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 0.1177 \left( \frac{a}{t} \right) - 0.0202$$

$$A_0 = 0.1423 \left( \frac{a}{t} \right)^2 - 0.0659 \left( \frac{a}{t} \right) + 1.0872$$

식 (4)-(6)은 SA106 Gr. B 배관에 적용이 가능하며 유한요소 해석결과를 감육깊이비( $a/t$ ), 감육길이비( $l/\sqrt{Rt}$ )인 영향인자별로 회귀분석하여 작성하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 내압을 받는 SA106 Gr. B 배관 감육부에 대한 한계하중해를 제시하였다. 이를 위해 배관형상 및 감육부 형상을 파라미터로 총 15 가지 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 한계하중해를 예측하였으며, 파괴기 준응력의 변화가 한계하중해에 미치는 영향을 살펴 보았다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) 이성호, 1999, "FAC 모델해석용 전산코드를 활용하는 원전 이차계통 감육배관 관리기술," 한국 원자력학회 추계학술대회논문집, CD-ROM.
- (2) 김범년, 1999, "감육배관의 최소 허용두께 거정방법에 따른 고찰," 대한기계학회 보일러 및 압력용기위원회 학술대회 논문집, PP. 35-41.
- (3) ASME Code Case N-597, 1998, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec. XI, Division I.
- (4) Isozaki, 1993, JAERI-M, 93-074, pp. 104-115.
- (5) Miyazaki, 1998, "Fracture Strength and Behavior for Carbon Steel Pipes with Local Wall Thinning," Proceeding for ASME PVP, Vol. 371, pp. 93-100.
- (6) ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III, 1998, "Rules for Construction of Nuclear Power Plant Components".
- (7) ANSI/ASME B31. G, 1991, Manual for Remaining Strength of Corroded Pipelines.
- (8) Kiefner, J. F., 1992, "Pressure Calculation for Corroded Pipe Developed," Oil & Gas Journal, pp. 84-89.
- (9) Stephens, D.R., Leis, B.N., Kurre, J.D. and Rudland, D.L., 1999, "Development of an Alternative Failure Criterion for Residual Strength of Corrosion Defects in Moderate- to High- Toughness Pipe," Battelle report to PRC International Report, A.G.A. Catalog Number L51794, January.
- (10) Hiser, A.L., Callahan, G.M., 1987, "A User's Guide to the NRC's Piping Fracture Mechanics Data Base (PIFRAC)," Battelle, NUREG/CR-4894.