

## 파단전 누설 평가를 위한 Ramberg - Osgood 상수 결정법

배경동\* · 류호완\* · 김윤재\*\* · 김진원\*\* · 김종성\*\*\* · 오영진\*\*\*\*

\* 고려대학교 기계공학부, \*\*조선대학교 원자력공학과, \*\*\* 국립순천대학교 기계우주항공공학부,  
\*\*\*\* 한국전력기술

### Determination Method of Ramberg-Osgood Constants for Leak Before Break Evaluation

Kyung Dong Bae\*, Ho Wan Ryu\*, Yun Jae Kim\*\*, Jin Weon Kim\*\*, Jong Sung Kim\*\*\*  
and Young Jin Oh\*\*\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Univ.,

\*\* Dept. of Nuclear Engineering, Chosun Univ.,

\*\*\* Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Suncheon Nat'l Univ.

\*\*\*\* KEPCO Engineering & Construction Co. Inc.

(Received August 22, 2014 ; Revised April 27, 2015 ; Accepted May 4, 2015)

**Key Words:** Leak Before Break Assessment(파단전 누설 평가),  $J$ -integral( $J$ -적분), Crack Opening Displacement(균열 열림 변위), Ramberg-Osgood Equation(램버그 오스굿 관계식), Circumferential Through-wall Crack(원주방향 관통 균열), Incremental Plasticity(증분 소성 이론), Deformation Plasticity(변형 소성 이론)

**초록:** 본 논문은 이전 연구에서 제시한 여러 가지 Ramberg-Osgood 상수 결정법을 비교하여 파단전 누설평가에 사용되기 가장 적합한 상수 결정법을 선정하였다. 비교에 사용한 재료는 운전온도인 316°C에서 실험한 SA312 TP316 과 SA508 Gr.1a 이다. 상수 결정법을 선정하기 위해 실제 응력-변형률 데이터를 모두 이용하는 증분 소성 이론과 Ramberg-Osgood 상수를 이용하는 변형 소성이론을 유한요소 해석에 적용하여 계산한  $J$  적분과 균열 열림 변위를 비교하였다. 비교 결과에서 증분 소성 이론 결과와 가장 잘 일치하는 상수 결정법을 최종적으로 파단전 누설 평가에 적합한 방법으로 선정하였다.

**Abstract:** In this study, a method for determining Ramberg-Osgood constants for leak-before-break evaluation was investigated. The Ramberg-Osgood constants were calculated for SA312, TP316, and SA-508 Gr.1a in an operating temperature of 316 oC. Incremental plasticity, using stress-strain data obtained from experiment, and deformation plasticity, using the Ramberg-Osgood constants, were considered in a finite element analysis. Using incremental plasticity and deformation plasticity,  $J$ -integrals and crack opening displacement values were calculated and compared. By comparing the results of incremental plasticity and deformation plasticity, a suitable method for determining Ramberg-Osgood constants for leak-before-break evaluation was confirmed.

- 기호설명 -

$J$  :  $J$ -적분  
 $COD, \delta$  : 균열 열림 변위  
 $E$  : 탄성계수

$R_m/t$  : 배관 두께에 대한 평균 반경의 비  
 $\theta$  : 균열의 원주방향 길이각  
 $\sigma_o$  : 항복강도  
 $\epsilon_o$  :  $= \sigma_o/E$   
 $M$  : 배관에 작용하는 모멘트  
 $\sigma_u$  : 인장강도  
 $\epsilon_u$  : 균일 연신율

### 1. 서론

정확한 파단전 누설 평가를 하기 위해서는 평가에 사용되는 파괴역학적 매개변수인  $J$ -적분과 균열 열림 변위의 정확한 계산이 필요하다. 일반적으로 평가에 사용하는 코드에서 제시하는 변형 소성 이론(deformation plasticity) 기반의 공학적 평가식은 평가하고자 하는 배관의 형상과 균열의 형상 그리고 인장 물성에 대한 Ramberg-Osgood 상수가 필요하다.<sup>(1)</sup> 계산에 사용하는 Ramberg-Osgood 상수는 인장 실험으로 얻을 수 있는 해당 재료의 응력-변형률 데이터와 Ramberg-Osgood 관계식을 이용하여 곡선 적합(curve fitting) 등의 방법을 통해 결정할 수 있다.

하지만 곡선 적합에 사용하는 프로그램이 실험이나 평가를 진행하는 기관마다 달라 상수 값의 차이가 있고, 곡선 적합의 방법이나 사용하는 데이터의 범위에도 각각 차이가 있어서 한가지 재료에 명백한 하나의 상수를 구할 수 없다는 문제점이 있다. 이렇게 여러 가지 방법으로 구한 서로 다른 Ramberg-Osgood 상수는  $J$ -적분이나 균열 열림 변위의 계산 결과에 영향을 주기 때문에 최종적으로는 평가 결과에도 영향을 줄 수 있다.<sup>(2)</sup>

또한 곡선 적합을 사용하여 Ramberg-Osgood 상수를 구하는 경우에는 전체 응력-변형률 데이터가 필요하지만 실제 평가를 할 때 제한적인 경우가 많다. 그러므로 항복강도와 인장강도만 이용하여 Ramberg-Osgood 상수를 구하는 방법도 전체 데이터를 이용하는 Ramberg-Osgood 상수 결정법과 함께 고려되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 원주방향 관통균열이 존재하는 직관에 대해 실제 응력-변형률 데이터를 바로 이용하는 증분 소성 이론(incremental plasticity)과 Ramberg-Osgood 상수를 이용하는 변형 소성 이론을 유한요소 해석에 적용하여  $J$ -적분과 균열 열림 변위를 계산할 것이다. 이때 실제 응력-변형률 데이터를 사용하는 증분 소성 이론의 결과를 기준으로 변형 소성 이론의 결과를 비교하여 두 방법의 결과가 가장 잘 일치하는 Ramberg-Osgood 상수 결정법을 파단전 누설 평가에 사용할 방법으로 선정할 것이다.

본 논문은 2 장에 연구에서 사용한 유한요소 해석에 대해 설명하고, 3 장에서 Ramberg-Osgood 상수 결정법에 대해 설명할 것이다. 마지막으로 계산 및 비교 결과를 제시한 후 결론을 기술할 것이다.

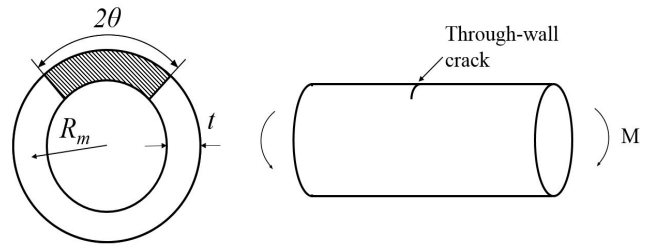


Fig. 1 Schematic of through-wall cracked pipe

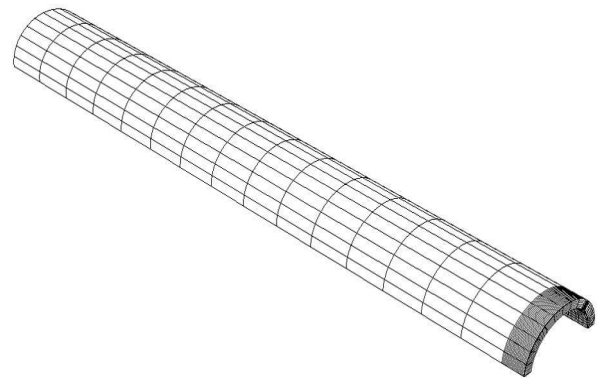


Fig. 2 Typical finite element model

### 2. 유한 요소 해석

#### 2.1 형상 변수 및 해석 형상

Fig. 1 은 본 연구에서 사용한 변수들을 제시하고 있다. 배관의 형상과 관련된 변수에는 배관의 평균 반경인  $R_m$  과 두께  $t$ , 평균 반경과 두께의 비인  $R_m/t$  가 있다. 균열의 형상과 관련된 변수에는 관통균열의 원주방향 길이각  $\theta$  를  $\pi$  로 나누어  $\theta/\pi$  의 값이 1 이 되면 관통균열의 길이가 배관 전체에 해당할 수 있도록 무차원화 한 값을 사용하였다.

본 연구의 목적은 파단전 누설 평가에 사용하는 Ramberg-Osgood 상수를 결정하는데 있기 때문에 배관의 형상은 실제 파단전 누설 평가가 적용되는 배관의 형상인  $R_m=304.8\text{mm}$  배관을 사용하였고, 두께에 대한 평균 반경의 비  $R_m/t$  는 5 와 10 이 고려되었다. 관통 균열의 형상은  $\theta/\pi$  가 0.125, 0.375 가 되도록 고려하였다.

유한요소모델에서는 원래의 형상을 그대로 사용하지 않고 대칭성을 고려하여 1/4 모델만 사용하였다.

#### 2.2 해석 방법

Fig. 2 는 유한요소 해석에서 사용한 모델을 제

시하고 있다. 총 사용된 요소는 4951 개이며, 소변형 해석을 진행하였다. 유한요소 해석에서 사용하는 요소는 해석시간을 단축하기 위해 3 차원 20 절점 저감 적분 요소(reduced integration elements)를 사용하였다.

본 연구의 하중 조건은 굽힘 모멘트로 고려하였다. 굽힘 모멘트는 직관의 끝 부분에 ABAQUS<sup>(3)</sup> MPC(multi-point constraint) 옵션을 이용하여 끝 단과 중심의 한 점을 고정한 후 한 점에 아래의 식 (1)에서 정의되는 굽힘 하중을 받는 원주방향 관통 균열 직관 한계하중 값의 1.5 배를 적용하였다.

$$M_L = 4\sigma_o R_m^2 t \left\{ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{1}{2} \sin \theta \right\} \quad (1)$$

유한요소해석에서 사용한 재료는 오스테나이트 강인 SA312 TP316( $E=174.4\text{GPa}$ ,  $\sigma_o =153.77\text{MPa}$ ,  $\sigma_u =454.6\text{MPa}$ )과 페라이트 강인 SA508 Gr.1a ( $E=184\text{GPa}$ ,  $\sigma_o =234.45\text{MPa}$ ,  $\sigma_u =534.35\text{MPa}$ ) 이다.<sup>(4,5)</sup> 물성은 앞서 서론에서 언급한 것과 같이 증분 소성 이론과 변형 소성 이론의 두 가지 이론을 바탕으로 유한요소 해석에 고려하였다. 먼저 증분 소성 이론은 ABAQUS<sup>(3)</sup>에서 제공하는 elastic 옵션과 plastic 옵션을 사용하여 각각 탄성계수와 Poisson's ratio, 응력과 그에 해당하는 소성변형률을 직접 계산하여 입력하였다. 변형 소성 이론은 ABAQUS<sup>(3)</sup>의 deformation plasticity 옵션을 사용하였고, 다음 장에서 설명하는 5 가지 방법을 통해 구한 Ramberg-Osgood 상수를 이용하여 적용하였다.

### 3. Ramberg-Osgood 상수 결정법

#### 3.1 전체 응력-변형률 데이터를 이용하는 경우

전체 응력-변형률 데이터를 이용할 수 있는 경우에는 실험에서 얻어진 응력-변형률 데이터를 진응력-진 변형률로 변환하고 2 가지 범위에서 곡선 적합을 진행하였다. 곡선 적합은 식 (2)와 같이 Ramberg-Osgood 관계식에서 상수  $\alpha$  와  $n$  을 변수로 정하여 결정한다.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} = \frac{\sigma}{\sigma_o} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (2)$$

첫 번째 방법(Fit A)은 전체 데이터 중에서 5% 변형률까지의 결과를 곡선 적합에 사용하는 것이다. 곡선적합 범위를 5%까지로 결정한 것은 파

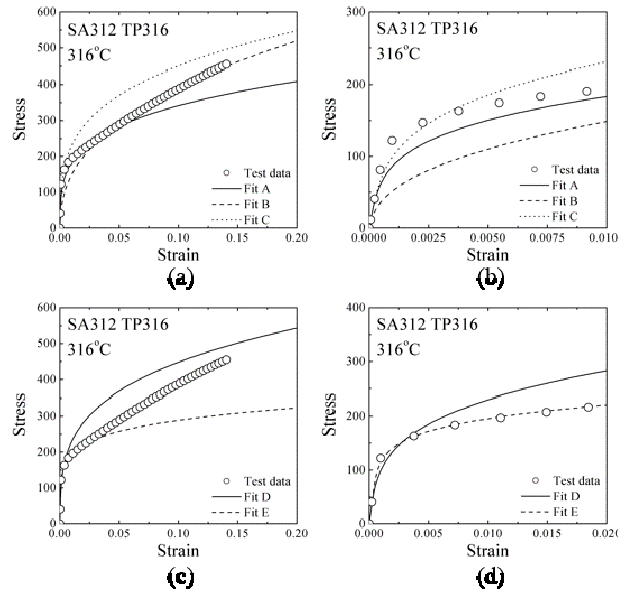


Fig. 3 SA312 TP316 tensile test data with Ramberg-Osgood equation: (a) Fit A, Fit B, Fit C results in entire region, (b) Fit A, Fit B, Fit C results in small strain region, (c) Fit D, Fit E results in entire region, (c) Fit D, Fit E results in small region

단전 누설 평가에 사용하는 원주방향 관통균열 배관의 누설률 평가를 위한 전산프로그램인 PICEP의 사용자 매뉴얼 권장사항을 고려하였다.<sup>(6)</sup> 두 번째 방법(Fit B)은 전체 응력-변형률 데이터를 곡선 적합에 사용하는 것이다. 이 두 가지 방법은 같은 곡선 적합 프로그램을 이용하여 상수를 계산하였고, 사용하는 데이터의 범위만 다르게 한 것이다. 세 번째 방법(Fit C)은 김윤재 등<sup>(7)</sup>의 연구결과에서 제시한 식을 이용하는 방법이다. 이 방법은 Ramberg-Osgood 상수  $\alpha$  와  $n$  을 식 (3)과 식 (4)를 통해서 구할 수 있다. 먼저 식 (3)의 상수  $\alpha$  는 소변형률 영역의 중요성을 고려하여 0.2% offset 항복점을 Ramberg-Osgood 곡선이 반드시 지나가도록 강제하는 방법이다. 따라서 식 (3)과 같이 상수  $\alpha$  를 결정할 수 있다.

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_o} = \frac{\sigma}{\sigma_o} + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n, \quad \varepsilon_o = \frac{\sigma_o}{E}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_o + 0.002, \quad \sigma = \sigma_o \quad (3)$$

$$\rightarrow \frac{(\varepsilon_o + 0.002)}{\varepsilon_o} = \frac{\sigma_o}{\sigma_o} + \alpha \left( \frac{\sigma_o}{\sigma_o} \right)^n$$

$$\alpha = \frac{0.002E}{\sigma_o}$$

식 (3)에서  $E$  는 재료의 탄성계수이고,  $\sigma_o$  는 재

료의 항복강도 이다.

$$n = \frac{\ln \left\{ \frac{(\epsilon_{u,t} - \sigma_{u,t} / E)}{0.002} \right\}}{\ln(\sigma_{u,t} / \sigma_o)} \quad (4)$$

식 (4)는 상수  $\alpha$  를 고정한 후 0.2% offset 항복강도와 인장강도 데이터를 이용하여 상수  $n$  을 구하는 식이다. 여기서 사용하는  $\sigma_{u,t}$ ,  $\epsilon_{u,t}$  는 진응력과 진 변형률로 계산된 인장강도와 균일 연신율이고, 아래의 식 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\sigma_{u,t} = (1 + \epsilon_u) \sigma_u ; \epsilon_{u,t} = \ln(1 + \epsilon_u) \quad (5)$$

세번째 방법(Fit C)은 정해진 재료물성인 강도를 식에 넣어서 계산함으로써 기관마다 사용하는 곡선 적합 프로그램과 곡선 적합 방법에 약간씩 차이가 있더라도 일정한 상수 값을 결정할 수 있다는 장점이 있다. 이 방법은 영국의 구조물 평가코드인 R6<sup>(8)</sup>에 수록되어 전체 응력-변형률 데이터를 이용 가능할 때 사용하는 방법이기도 하다.

Fig. 3 의 (a), (b)와 Fig. 4 의 (a), (b)는 실험에서 얻은 두가지 재료의 응력-변형률 데이터와 3 가지 방법으로 구한 Ramberg-Osgood 상수를 이용하여 나타낸 것이다.

### 3.2 항복강도와 인장강도만 이용하는 경우

앞서 언급한 것과 같이 평가시에 평가를 하고자 하는 배관의 재료 물성 중에 항복강도와 인장강도로 제한되어 사용 가능한 경우가 있다. 따라서 이전에 제시된 방법과 별도로 기본적으로 제공되는 두가지 물성을 이용하여 상수를 계산할 수 있는 식을 이전 연구결과에서 다음의 두 가지 방법을 제안하였다. 이 두 가지 방법에서 상수  $\alpha$  는 식 (3)을 통해  $\sigma_o$  와  $E$  만 입력하여 계산할 수 있기 때문에 상수  $n$  을 구하는 식을 제시하여 사용한다.

Krik 등<sup>(9)</sup>은 항복강도와 인장강도의 비를 사용하여 상수  $n$  을 구할 수 있는 식 (6a)를 제시하였다. 식 (6a)를 통해 상수  $n$  을 계산할 때는 많은 양의 반복계산이 필요하기 때문에 기존 연구<sup>(7,9)</sup>에서 3 차 다항식으로 regression 한 식이 제시되었다. 이 식은 식 (6b)(Fit D)이다.

$$\frac{\sigma_u}{\sigma_o} = \left( \frac{1}{0.002n} \right)^{1/n} \exp\left(-\frac{1}{n}\right) \quad (6a)$$

$$\frac{1}{n} = 0.629 - 1.536 \left( \frac{\sigma_o}{\sigma_u} \right) + 1.723 \left( \frac{\sigma_o}{\sigma_u} \right)^2 - 0.814 \left( \frac{\sigma_o}{\sigma_u} \right)^3 \quad (6b)$$

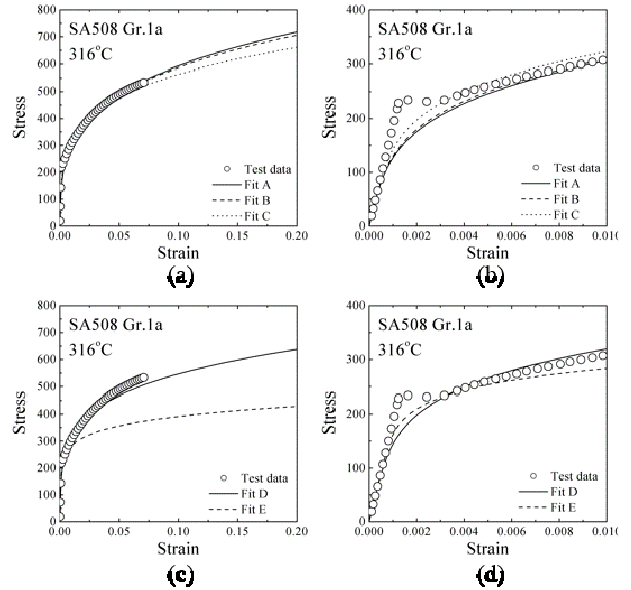


Fig. 4 SA508 Gr.1a tensile test data with Ramberg-Osgood equation: (a) Fit A, Fit B, Fit C results in entire region, (b) Fit A, Fit B, Fit C results in small strain region, (c) Fit D, Fit E results in entire region, (d) Fit D, Fit E results in small region

이 방법은 Fit C 방법과 마찬가지로 영국의 구조물 평가코드인 R6<sup>(8)</sup>에 수록되어 이용되고 있다. 또한 이 방법은 진 응력-진 변형률을 고려하여 만들어진 식이다. 하지만 진 응력-진 변형률을 사용한 곡선 적합은 초기의 변형률 구간에서 가공경화를 과도하게 예측하는 경향을 보이기 때문에 공칭 응력-공칭 변형률을 곡선 적합에 사용한 결과도 함께 비교해 보도록 한다.<sup>(7)</sup> 공칭 응력-공칭 변형률을 이용한 방법(Fit E)은 아래의 식 (7)과 같다.

$$\frac{1}{n} = 0.324 - 0.666 \left( \frac{\sigma_o}{\sigma_u} \right) + 0.660 \left( \frac{\sigma_o}{\sigma_u} \right)^2 - 0.318 \left( \frac{\sigma_o}{\sigma_u} \right)^3 \quad (7)$$

Fig. 3 의 (c), (d)와 Fig. 4 의 (c), (d)는 항복강도와 인장강도만 이용하여 구한 Ramberg-Osgood 상수로 응력-변형률 선도를 그린 결과와 실험 결과를 비교한 것을 제시하고 있다.

## 4. 결 과

### 4.1 Ramberg-Osgood 상수 계산 결과

각기 다른 방법으로 계산한 Ramberg-Osgood 상수의 결과를 Table 1 에 제시하였다. Fit A 와 Fit B 를 제외한 세가지 방법은 상수  $\alpha$  를 구하는 식을 같이 사용하기 때문에 상수  $\alpha$  값이 같다. 또한 Fit C 와 Fit D 의 결과가 거의 비슷하다는 것을 알 수 있다.

먼저 오스테나이트계 강인 SA312 TP316의 결과를 보면 Fig. 3(a)에서 제시한 Fit B의 결과가 큰 변형률 범위에서 잘 일치하는 것으로 보인다. 하지만 작은 변형률 범위의 결과(Fig. 3(b), (d))를 보면 Fit B의 결과는 정확도가 떨어지고 Fit E의 결과가 가장 높은 정확도를 보인다. 이 결과의 인장 곡선의 소변형률 구간 차이는 J-적분과 균열 열림 변위 계산에 차이를 가져올 것으로 예상할 수 있다. 페라이트계 강인 SA-508 Gr.1a의 결과에서는 SA312 TP316의 결과(Fig. 3)와 다르게 상수 결정법의 결과 차이가 크지 않으며 큰 변형률 범위와 작은 변형률 범위를 모두 고려하였을 때, Fit C가 가장 잘 맞는 것을 확인할 수 있다.

다른 한가지 특징으로는 페라이트계강인 SA-508 Gr.1a 재료는 항복점 부근에서 Luders band가 관찰된다. 하지만 본 연구에서 사용하는 Ramberg-Osgood equation에서는 이 부분을 정확히 고려할 수 없다. 그렇기 때문에 Fig. 3과 Fig. 4의 작은 변형률 범위의 그래프에서 보면 실험 결과와 Ramberg-Osgood equation 결과의 차이가 크다는 것을 알 수 있다. 이는 J-적분 계산 결과에도 영향이 있을 것으로 예상된다.

4.2 J-적분 계산 결과

앞서 언급한 것과 같이 증분 소성 이론을 고려한 계산 결과를 바탕으로 하여 변형 소성 이론을 고려한 계산 결과와 비교하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 전체 응력-변형률 데이터를 이용할 수 있는 경우의 결과를 나타내고, Fig. 7과 Fig. 8은 항복강도와 인장강도만 제한적으로 이용하는 경우의 결과를 나타낸다. 먼저 Fig. 5와 Fig. 7은 오스테나이트

계강인 SA312 TP316의 결과를 제시하고 있다. Fig. 5의 결과에서 보면 Fit A와 Fit B의 Ramberg-Osgood 상수를 사용한 변형 소성 이론의 결과가 증분 소성 이론을 적용한 결과에 비해 J-적분 값이 크게 계산되었고, 전체 응력-변형률 데이터를 이용할 수 있는 경우에는 Fit C가 증분 소성 이론

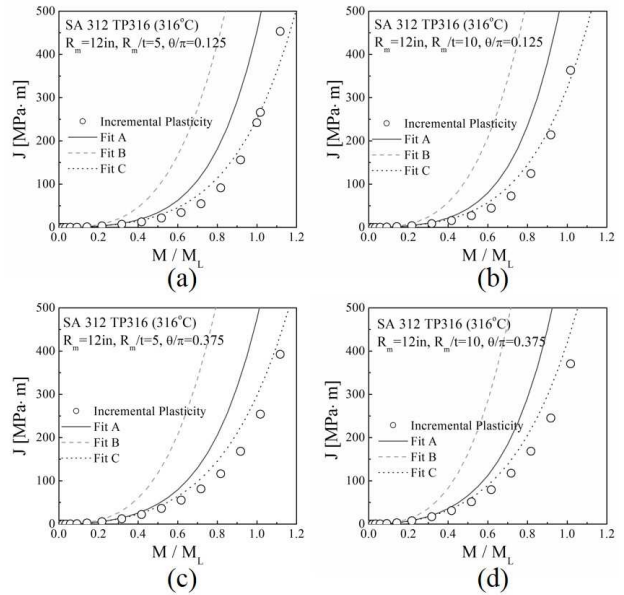


Fig. 5 J-integral results of SA312 TP316 with full tensile data: (a)  $R_m/t = 5, \theta/\pi = 0.125$  (b)  $R_m/t = 10, \theta/\pi = 0.125$  (c)  $R_m/t = 5, \theta/\pi = 0.375$  (d)  $R_m/t = 10, \theta/\pi = 0.375$

Table 1 Ramberg-Osgood constants results

	Ramberg-Osgood constant	Material	
		SA-312 TP316	SA-508 Gr.1a
Fit A	$\alpha$	5.109	2.410
	$n$	3.861	3.714
Fit B	$\alpha$	11.237	2.237
	$n$	2.456	3.836
Fit C	$\alpha$	2.269	1.570
	$n$	3.614	4.426
Fit D	$\alpha$	2.269	1.570
	$n$	3.636	4.587
Fit E	$\alpha$	2.269	1.570
	$n$	6.176	7.577

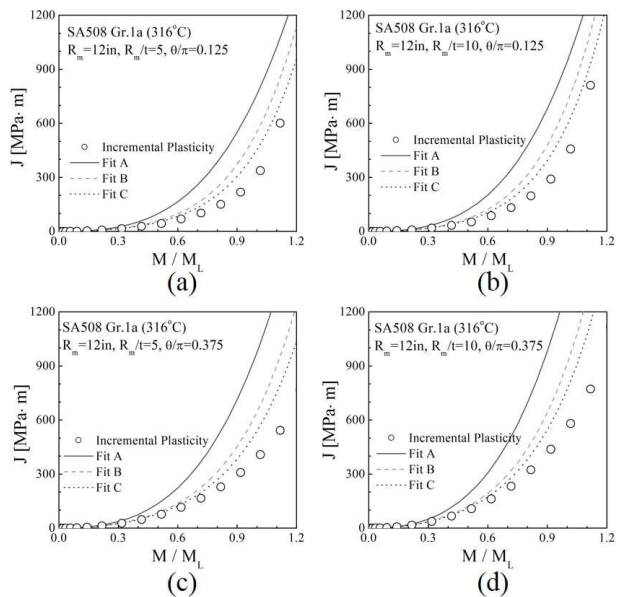


Fig. 6 J-integral results of SA508 Gr.1a with full tensile data: (a)  $R_m/t = 5, \theta/\pi = 0.125$  (b)  $R_m/t = 10, \theta/\pi = 0.125$  (c)  $R_m/t = 5, \theta/\pi = 0.375$  (d)  $R_m/t = 10, \theta/\pi = 0.375$

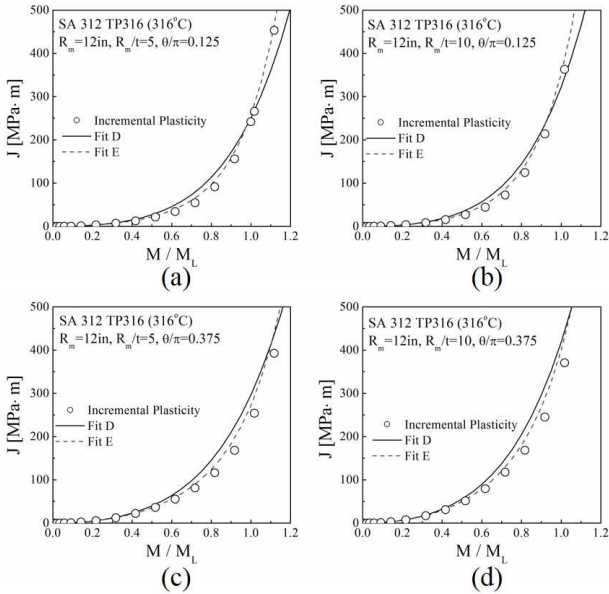


Fig. 7 *J*-integral results of SA312 TP316 with yield strength and tensile strength only: (a)  $R_m/t = 5$ ,  $\theta/\pi = 0.125$  (b)  $R_m/t = 10$ ,  $\theta/\pi = 0.125$  (c)  $R_m/t = 5$ ,  $\theta/\pi = 0.375$  (d)  $R_m/t = 10$ ,  $\theta/\pi = 0.375$

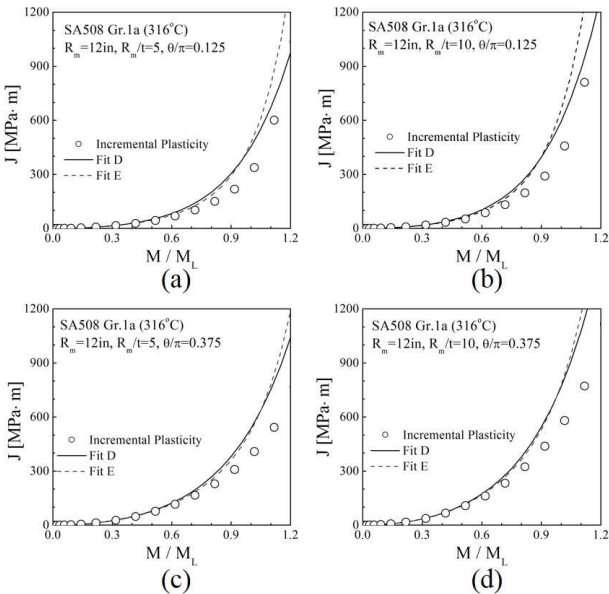


Fig. 8 *J*-integral results of SA508 Gr.1a with yield strength and tensile strength only: (a)  $R_m/t = 5$ ,  $\theta/\pi = 0.125$  (b)  $R_m/t = 10$ ,  $\theta/\pi = 0.125$  (c)  $R_m/t = 5$ ,  $\theta/\pi = 0.375$  (d)  $R_m/t = 10$ ,  $\theta/\pi = 0.375$

을 이용한 결과와 가장 유사한 결과를 갖기 때문에 정확한 평가를 위해서는 Fit C의 방법으로 Ramberg-Osgood 상수를 계산하여 사용해야 한다. Table 1에서 확인할 수 있듯이 Fit C와 Fit D의 상수 계산 결과가 결과가 거의 비슷하고, *J*-적분 계산 결과가 비슷하다는 것도 역시 확인할 수 있었

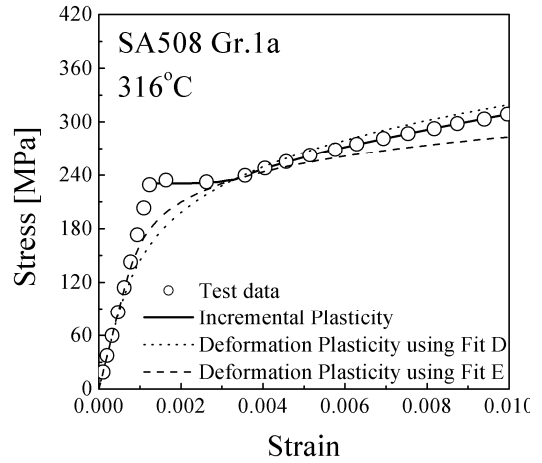


Fig. 9 Luders band of SA508 Gr.1a

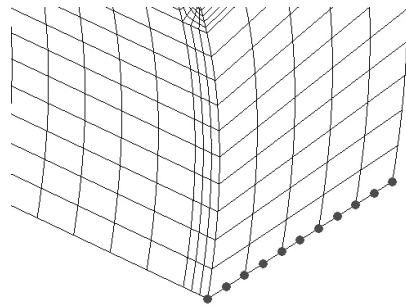


Fig. 10 Points using COD calculation

다. Fig. 7에서는 두 가지 방법의 Ramberg-Osgood 상수 결정법 모두 증분 소성 이론의 결과와 유사하지만 소변형률 범위에서 실제 인장 실험 결과와 잘 일치한 공칭 응력-공칭 변형률의 결과가 더 정확하다. 따라서 오스테나이트 강인 SA312 TP316 재료의 평가에는 공칭 응력-공칭 변형률을 기준으로 한 Fit E의 방법을 사용하는 것이 가장 타당할 것으로 예상된다.

다음으로 Fig. 6과 Fig. 8은 페라이트강인 SA508 Gr.1a의 결과를 제시하고 있다. 먼저 Fig. 6의 결과에서 크게 봤을 때 앞선 SA312 TP316의 결과와 같은 경향을 보이고 있다. 하지만 Fit A의 결과와 Fit B의 경향이 반대가 된 것을 알 수 있다.

한편 SA508 Gr.1a의 결과에서도 Fit C와 Fit D의 결과는 유사하다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8에서는 SA312 TP316의 결과에서는 증분 소성 이론과 잘 일치했던 Fit E의 결과 보다 Fit D의 결과가 더 잘 맞는 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 9와 같이 Fit D가 Fit E보다 항복점 이후의 소변형률 구간과 더 잘 일치하기 때문이다.

4.3 균열 열림 범위 계산 결과

균열 열림 범위는 Fig. 10과 같이 두께방향으로

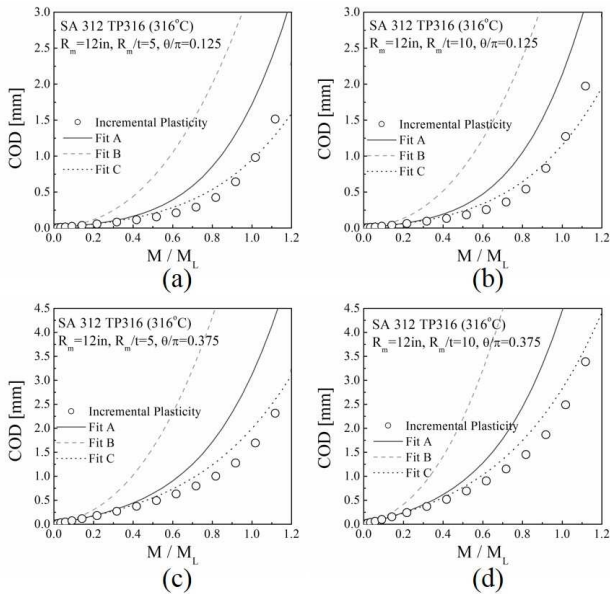


Fig. 11 COD results of SA312 TP316 with full tensile data: (a)  $R_m/t = 5, \theta/\pi=0.125$  (b)  $R_m/t = 10, \theta/\pi=0.125$  (c)  $R_m/t = 5, \theta/\pi=0.375$  (d)  $R_m/t = 10, \theta/\pi=0.375$

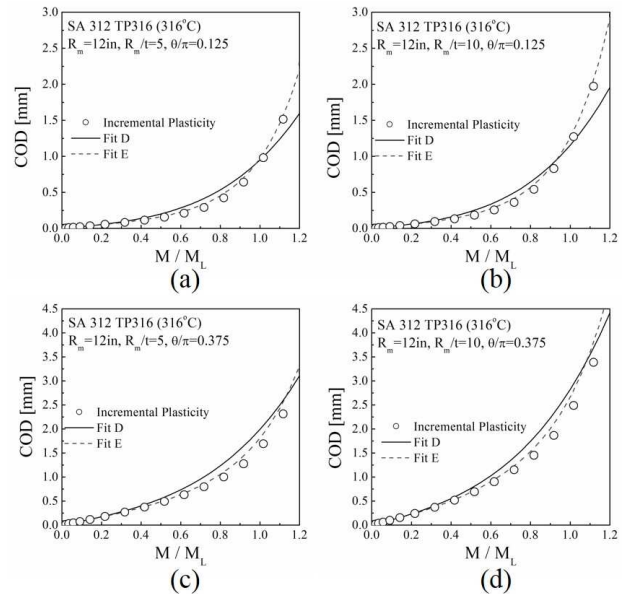


Fig. 13 COD results of SA312 TP316 with yield strength and tensile strength only: (a)  $R_m/t = 5, \theta/\pi=0.125$  (b)  $R_m/t = 10, \theta/\pi=0.125$  (c)  $R_m/t = 5, \theta/\pi=0.375$  (d)  $R_m/t = 10, \theta/\pi=0.375$

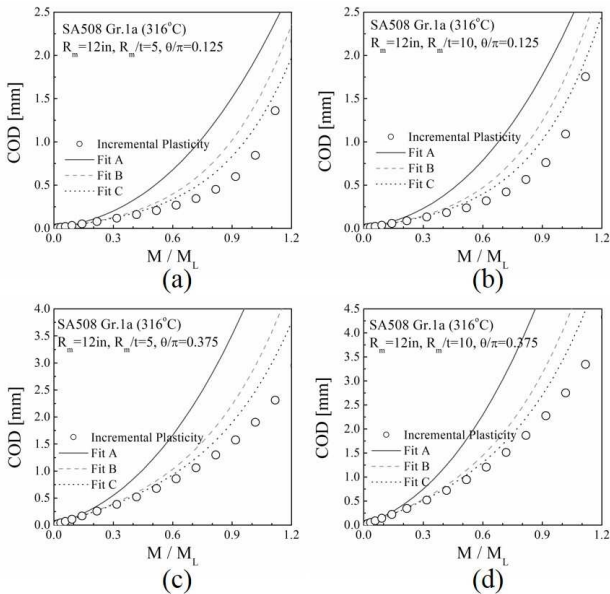


Fig. 12 COD results of SA508 Gr.1a with full tensile data: (a)  $R_m/t = 5, \theta/\pi=0.125$  (b)  $R_m/t = 10, \theta/\pi=0.125$  (c)  $R_m/t = 5, \theta/\pi=0.375$  (d)  $R_m/t = 10, \theta/\pi=0.375$

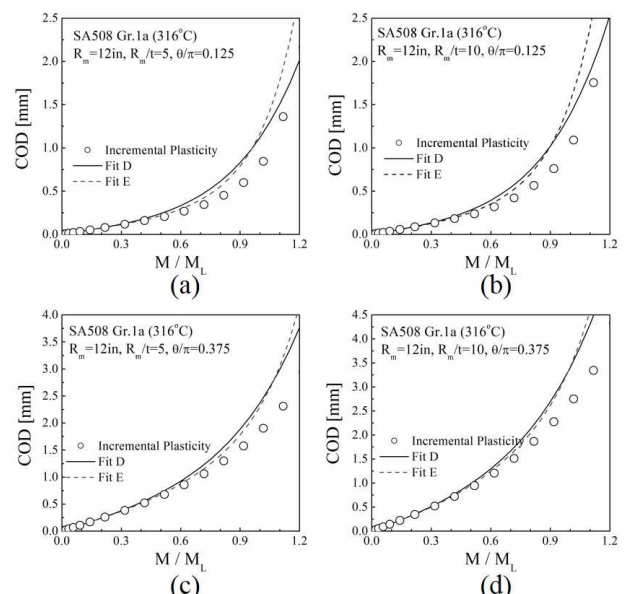


Fig. 14 COD results of SA508 Gr.1a with yield strength and tensile strength only: (a)  $R_m/t = 5, \theta/\pi=0.125$  (b)  $R_m/t = 10, \theta/\pi=0.125$  (c)  $R_m/t = 5, \theta/\pi=0.375$  (d)  $R_m/t = 10, \theta/\pi=0.375$

계산하여 평균값을 취하였다. 계산 결과를 Fig. 11 ~ Fig. 14에 제시하였고, 균열 열림 변위 결과는 J-적분과 같은 경향을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

마찬가지로 균열 열림 변위도 항복점 이후의 소변형 구간과 잘 일치하는 상수 결정법이 가장 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 파단전 누설 평가에 사용하는 Ramberg-Osgood 상수를 결정하는 여러 가지 방법에 대해 고려하고, 최종적으로 가장 적절한 방법을 선정하였다. 연구는 응력-변형률 데이터를 그대로 이용하는 증분 소성 이론을 적용한 결과값과

서로 다른 5 가지 방법으로 구한 Ramberg-Osgood 상수를 이용하는 변형 소성 이론을 적용한 결과를 비교하여 결론을 제시하였다. 결과의 비교에는 파 단전 누설 평가에서 사용하는 파괴역학적 변수인  $J$ -적분과 균열 열림 변위를 사용하였다.

Ramberg-Osgood 상수를 구하는 방법은 크게 전체 응력-변형률 데이터를 이용할 수 있는 경우와 항복강도와 인장강도만 제한적으로 이용할 수 있는 경우로 나누었다. 먼저 전체 응력-변형률 데이터를 이용할 수 있는 경우에는 전체 범위의 실험 데이터를 곡선적합에 이용하는 경우(Fit A)와 전체 범위의 5% 만 곡선적합에 이용하는 경우(Fit B)를 고려하여 Ramberg-Osgood 상수를 구하였다. 또한 소변형률 영역의 중요성을 고려하여 0.2% offset 항복점을 반드시 지나가게 상수  $\alpha$  를 먼저 결정 후 나머지 상수  $n$  을 구하는 방법(Fit C)도 함께 고려하였다. 그 결과 다른 두 방법에 비해 0.2% offset 항복점을 반드시 지나가게 강제 하는 방법이 증분소성이론과 변형소성이론의 비교에서 더 높은 정확도를 보였다. 또한 이 방법은 실험에서 얻은 데이터와 곡선적합을 이용하여 Ramberg-Osgood 상수를 구하는 방법보다 곡선적합에 사용하는 프로그램과 실험 데이터 양, 프로그램 사용자의 실수와 같은 단순 오류에 덜 민감하다는 장점이 있다. 다음으로 항복강도와 인장강도만 제한적으로 이용할 수 있는 경우에는 앞서 0.2% offset 항복점을 반드시 지나도록 상수  $\alpha$  를 결정하고 상수  $n$  은 항복강도와 인장강도의 비를 통해 결정하는 방법을 사용하였다. 상수  $n$  을 결정하는 방법은 진응력-진변형률을 사용하는 경우(Fit D)와 공칭응력-공칭변형률을 사용하는 경우(Fit E)로 나누어 고려하였다.

현재 연구의 최종 결과를 바탕으로 하면 각 재료의 파단전 누설 평가에 사용하는 Ramberg-Osgood 상수 결정법은 SA312 TP316 재료는 Fit E 방법, SA508 Gr.1a 재료는 Fit D 방법으로 결정할 수 있다. 하지만 SA508 Gr.1a 재료의 경우 Luders band 의 영향으로 SA312 TP316 재료에 비해 낮은 정확도와 일관적인 결과를 제시하지 못하는 것을 알 수 있다. 앞으로 추가연구를 통하여 Luders band 에 대한 영향을 충분히 고려할 수 있다면 SA508 Gr.1a 와 같이 luders band 를 가진 재료에서 높은 정확도를 갖는 Ramberg-Osgood 상수를 결정할 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 2014 년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아

수행한 연구 과제입니다.(No. 20131520202170)

이 논문은 2013 년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구 과제입니다.(NRF-2013M2A8A1040924)

이 논문은 2014 년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업입니다.(NRF- 2013M2A7A1076396)

## 참고문헌

### (References)

- (1) Huh, N.S., Park, Y.J., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2003, "New Engineering J and COD Estimation Methods for Axial Through-Wall Cracked Pipes," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 27, No. 2, pp. 239~246
- (2) Huh, N.S., Kim, Y.J. and Kim, Y.J., 2001, "Application of Enhanced Reference Stress Method to Nuclear Piping LBB Analysis: Finite Element Validation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 25, No. 4, pp. 741~747
- (3) Dassault Systemes, 2013, ABAQUS User's manual, version 6.13
- (4) KEPSCO E&C, 2013, "Evaluation of Material Performance and Analysis of Regulation Requirement for Application of Induction Vending Pipe to Nuclear Piping Components"
- (5) Kim, J.W., Choi, M.L., Lee M.Y., Nam H.S. and Kim Y. J., 2014, "Effect of Strain Rate on the Deformation and Failure Behaviors of SA508 Gr.1a Low-alloy Steel Piping Material," *Trans. Korean Soc. Mech. Spring Conference*, 53~54
- (6) Norris, D.M. and Chexal, B., 1987, "PICEP: Pipe Crack Evaluation Program, Rev.1," Electric Power Research Institute, NP-3596-SR, Rev.1
- (7) Kim, Y.J., Huh, N.S. Kim, Y.J., Choi, Y.H. and Yang, J.S., 2003, "On Relevant Ramberg-Osgood Fit to Engineering Non-Linear Fracture Mechanics Analysis" *Trans. Korean Soc. Mech. Spring Conference*, 170~177
- (8) British Energy Generation Ltd., 2009, "R6: Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects.", Rev. 4
- (9) Kirk M.T. and Dodds R.H. Jr., 1993, "J and CTOD Estimation Equations for Shallow Cracks in Single Edge Notch Bend Specimens," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 21, No. 4, pp.228~238
- (10) Kim, Y.J., 1998, "Note on Y/T vs.  $n$  for SINTAP Procedure: Continuous and Dis-continuous Hardening," *Structural Integrity Assessment Procedures for European Industry-SINTAP*.