

Reference 선도를 이용한 Ramberg-Osgood 상수 결정법 Determination of Ramberg-Osgood constant using Reference curve

*조성근¹, 허 용¹, 김형익¹, #석창성², 구재민²

*S. K. Cho¹, Y. Huh¹, H. I. Kim¹, #C. S. Seok(seok@skku.edu)², J. M. Koo²

¹성균관대학교 일반대학원 기계공학과, ²성균관대학교 기계공학부

Key words : Ramberg-Osgood, Welding, Elastic-Plastic Fracture, J-intergral, Reference curve

1. 서 론

GE/EPRI^{1,2,3}법과 같은 변형소성이론(deformation plasticity)에 기반한 공학적 계산식으로 균열 구조물에 대한 탄소성 파괴역학(Elastic-Plastic Fracture Mechanics; EPFM) 매개변수인 J-적분을 구하는 경우에는 입력조건으로 구조물 및 균열의 형상, 그리고 인장 물성치에 대한 Ramberg-Osgood (R-O)⁴ 상수가 사용된다. 따라서 J-적분 계산을 위해서는 먼저 해석 대상의 응력-변형률 곡선을 R-O 관계식으로 이상화하여야 한다. 그러나 R-O 상수는 응력-변형률 곡선의 곡선 접합(curve fitting) 구간 및 방법에 따라 변하며 이로 인해 J-적분 계산결과도 크게 변한다는 문제가 있다.^{5,6} 이로 인해 정확한 EPFM 매개변수를 구할 수 있는 최적의 R-O 곡선 적합 방법은 아직 제시되지 못하고 있으며 해석 대상과 평가자에 따라 다양한 방법이 사용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 reference 선도를 이용한 새로운 R-O 곡선 적합 방법을 제시하는 것이다. 이를 위해 먼저 실제 응력-변형률 데이터와 R-O 관계식을 이용하여 R-O 상수를 획득하였고, 이 결과를 기반으로 reference 선도를 작성하였다. 항복강도를 변화시켜 획득한 reference 선도가 재료의 종류에 영향을 받지 않도록 고려하였으며, 재료의 항복강도만 알 수 있다면 R-O 상수를 획득할 수 있는 방법을 제시하였다

2. Reference 선도를 이용한 R-O 상수 결정법 제시

Fig. 1은 SA508 Cl.1a, SA508 Cl.3a 그리고 용접부에 대한 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 용접부에 대한 응력-변형률 선도는 SA508 Cl.1a와 SA508 Cl.3a가 용접된 부위 중앙부에서 용접부 시편을 채취하여 획득한 결과이다. 이 중에서 용접부 인장 데이터와 R-O 관계식(Eq. 1)을 이용하여 R-O 상수인 α 와 n 을 획득하였고 Table 1에 그 결과를 나타내었다. Fig. 1은 획득한 reference 선도를 나타낸 그림이다

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_o} = \frac{\sigma}{\sigma_o} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_o} \right)^n \quad (1)$$

여기서, σ_o 는 기준 응력으로서 일반적으로 재료의 항복강도를 사용한다. ϵ_o 는 기준 변형률이며, E는 탄성계수이다.

Table 1 Reference curve offset

Yield Strength (MPa)	Fitting R-O		Fitting		Function Fitting	
	α	n	α	n	α	n
312 (SA508 Cl.1a)	6.23	4.47	3.131	4.92	3.531	4.92
500 (SA508 Cl.3a)	3.774	6.336	2.109	6.79	2.540	6.79
400 (Weldment)	3.792	4.987	2.526	5.83	2.953	5.83
200	4.249	3.912	4.663	3.80	4.820	3.80
300	3.511	4.868	3.661	4.80	3.629	4.80
400	2.964	5.824	2.999	5.80	2.967	5.80
500	2.488	6.836	2.526	6.80	2.538	6.80
600	2.149	7.83	2.177	7.80	2.234	7.80
700	1.828	8.942	1.910	8.80	2.006	8.80
800	1.591	10.04	1.700	9.80	1.827	9.80

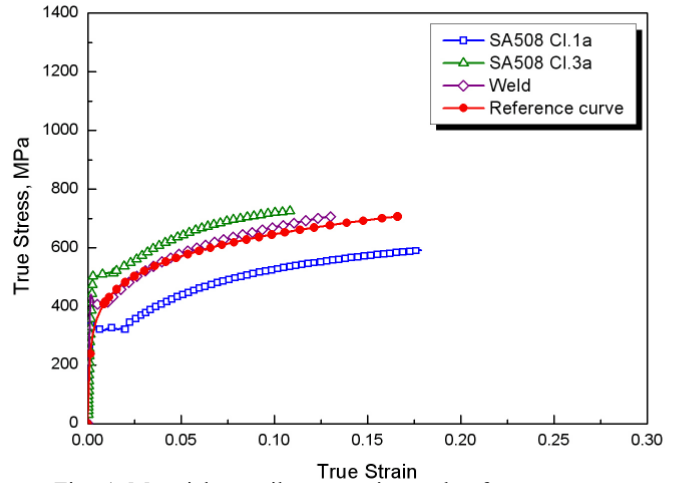


Fig. 1 Materials tensile properties and reference curve

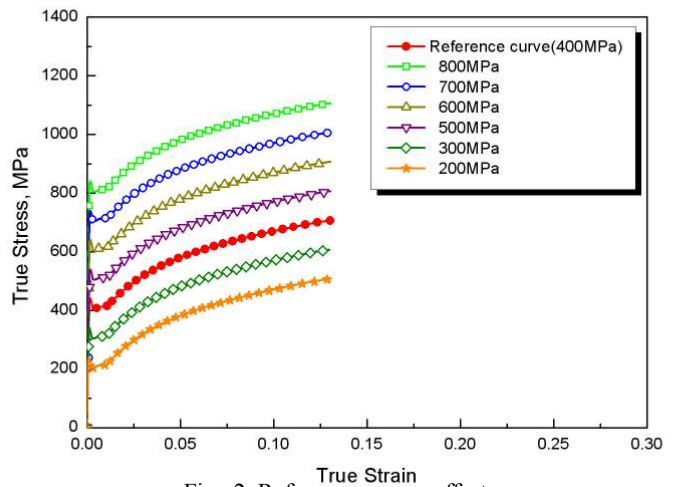


Fig. 2 Reference curve offset

Reference 선도는 용접부 인장 데이터를 사용하였기 때문에 항복강도가 400MPa이다. 항복강도 이전의 데이터는 실제 용접부 인장 데이터가, 항복강도 이후의 데이터는 R-O 상수인 α 와 n 을 이용하여 획득한 데이터가 reference 선도에 사용되었다.

Fig. 2는 reference 선도가 재료의 종류에 영향을 받지 않도록 고려하기 위하여 항복강도의 변화(200MPa ~ 800MPa)에 따라서 reference 선도를 offset한 결과를 나타낸 그림이다. Eq. 1을 이용하여 offset된 선도들에 대한 R-O 상수인 α 와 n 을 획득하였으며, 그 결과를 Table 1의 fitting R-O에 나타내었다. Fitting R-O에 나타낸 α 와 n 중에서 α 를 고정하여 상수 n 을 항복강도의 함수로 나타내었으며, 획득한 함수를 이용하여 다시 항복강도 변화에 따른 n 값을 획득하였다. 또한 Table 1의 fitting에서 추출된 n 값을 고정하여 상수 α 를 항복강도의 함수로 나타내었으며, n 값을 획득한 동일한 방법으로 항복강도의 변화에 따른 α 값을 획득하였다. Table 1의 function fitting과 Fig. 3은 획득한 결과와 관계식을 나타낸 표와 그림이다.

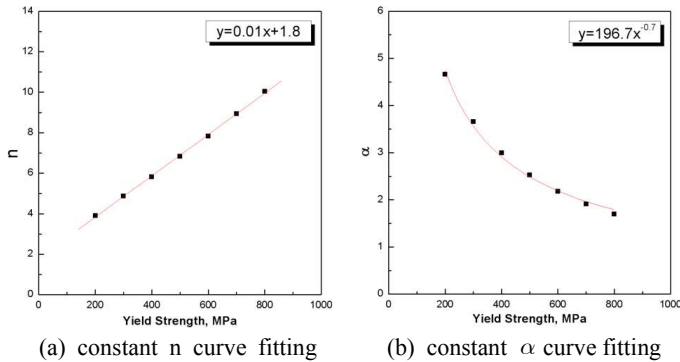


Fig. 3 Constant n and α equations

3. 실제 데이터를 이용한 타당성 검증

새롭게 제시된 Reference 선도를 이용한 R-O 상수 결정법의 타당성을 검증하기 위해 3가지 재료를 사용하였다. ASTM 시험법에 준하여 인장 시험을 수행하였고, 획득한 응력-변형률 선도 및 R-O 관계식을 이용하여 획득한 R-O 상수인 α 와 n 값은 Fig. 1과 Table 1의 fitting R-O에 나타내었다. 또한 본 논문에서 새롭게 제시한 R-O 곡선 집합 방법으로 획득한 R-O 상수도 Table 1의 function fitting에 나타내었다.

Fig. 4는 실제 응력-변형률 선도와 R-O 관계식을 이용하여 획득한 R-O fit과 새롭게 제시된 reference 선도를 이용하여 획득한 function fit을 비교하여 나타낸 것이다. 변형률이 점차 증가할수록 R-O fit과 function fit의 차이가 나타났지만, 변형률이 작은 영역에서는 거의 일치하였다. 변형률이 작은 영역에서 정확한 R-O 곡선 집합 결과가 비교적 정확하다는 참고문헌⁶에 비추어 볼 때 새롭게 제시된 R-O 상수 결정법은 정확하다고 판단된다.

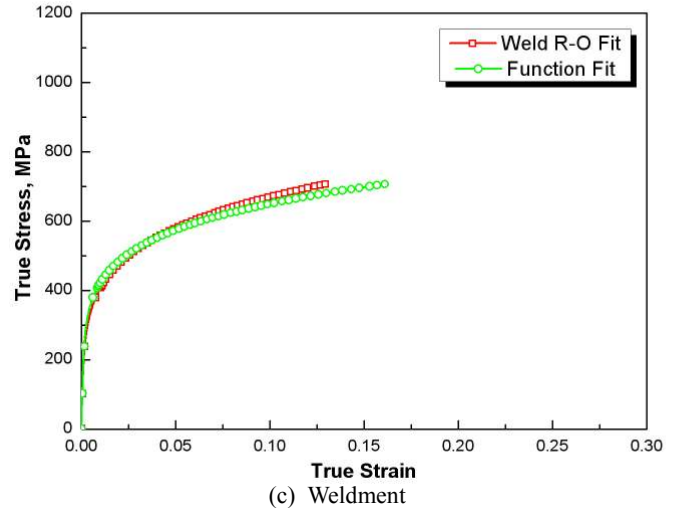


Fig. 4 Comparison of Ramberg-Osgood fitting and Function fitting

4. 결 론

본 논문에서는 reference 선도를 이용하여 정확하게 Ramberg-Osgood 곡선 집합 방법을 새롭게 제시하였다. 또한 제시된 R-O 곡선 적합 방법의 타당성을 검증하기 위해 실제 응력-변형률 선도를 이용하여 획득한 R-O 곡선 집합 방법과 비교하였으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

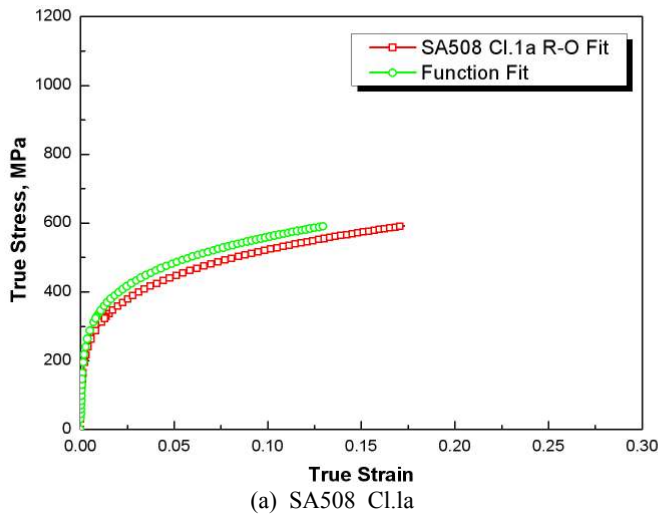
새롭게 제시된 Reference 선도를 이용한 R-O 상수 결정법은 재료의 종류에 관계없이 적용될 수 있다. 이에 대한 타당성을 검증하기 위해 실제 응력-변형률 선도를 이용하여 비교한 결과, 새롭게 제시된 결정법은 최대 5%이내에서 일치하였다. 향후 전체 응력-변형률 선도가 없는 경우라도 항복강도만 알 수 있다면 정확한 R-O 상수를 획득할 수 있을 것으로 판단된다.

후기

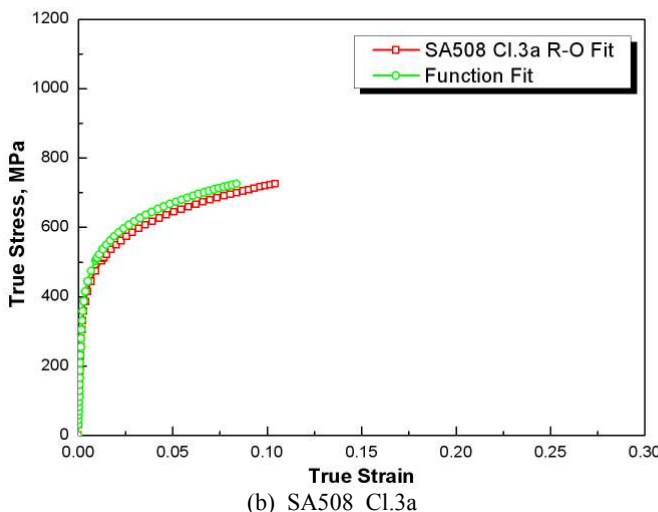
이 논문은 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. V. Kumar and M.D. German, "Elastic-Plastic Fracture Analysis of Through-Wall and Surface Flaws in Cylinders", EPRI Report, NP-5596.
2. N.S. Huh, Y.J. Park, Y.J. Kim and Y.J. Kim, "New Engineering J and COD Estimation Methods for Axial Through-Wall Cracked Pipes", Transactions of the KSME(A), Vol. 27, No. 2, pp. 239-246, 2003.
3. S. Rahman, F. Brust, N. Ghadiali and G. Wilkowski, "Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes-Part I : Analytical Models", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 357~373, 1998.
4. W. Ramberg and W.R. Osgood, "Description of Stress-Strain Curves by Three Parameters", NACA-TN-902, NACA, 1943.
5. S. Rahman, F. Brust, N. Ghadiali and G. Wilkowski, "Crack-Opening-Area Analyses for Circumferential Through-Wall Cracks in Pipes-Part II : Model Validations", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, pp. 375~396, 1998.
6. N.S. Huh, Y.J. Kim and Y.J. Kim, "Application of Enhanced Reference Stress Method to Nuclear Piping LBB Analysis : Finite Element Validation", Transactions of the KSME(A), Vol. 25, No. 4, pp. 741-747, 2001.



(a) SA508 Cl.1a



(b) SA508 Cl.3a