

Gr. 91 강에 대한 크리프 강도의 신뢰성 평가 Reliability Assessment of Creep Strength for Gr. 91 Steel

*김우곤¹, 박재영², 이형연¹, 김선진²

*W.G. Kim(wgkim@kaeri.re.kr)¹, J. Y. Park², H. Y. Lee¹, S. J. Kim²

¹한국원자력연구원, ²부경대학교 기계자동차공학과

Key words : Gr. 91 steel, Creep strength, Larson-Miller parameter, Reliability curves, Z parameter

1. 서론

제 4 세대 원자로 형 중의 하나인 소듐냉각 고속로(SFR)는 설계 수명을 60 년 목표로 하기 때문에 장시간 크리프 강도를 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다¹⁾.

지난 수년간 장시간 크리프 강도 및 수명 예측을 위하여 다수의 방법들이 개발되었다. 이 중에서 시간-온도 파라미터(time-temperature parameter, TTP)에 기초한 Larson-Miller parameter (LMP)²⁾ 방법이 여러 내열강에 폭 넓게 가장 많이 사용되고 있다. 장시간 크리프 강도나 장시간 수명의 예측에 있어서 하나의 평균값을 취하는 기존의 결정론적인 방법은 크리프 수명에 영향을 미치는 재료, 시험조건 및 측정 등의 불확도를 포함하지 못한다. 또한 수명예측에 있어서 소수의 크리프 시험 데이터의 사용으로 인하여 마스터 곡선의 정확도는 떨어지게 되므로, 데이터의 분산을 고려하는 통계적인 방법이 보다 좋은 방법이 될 수 있다³⁾.

본 연구에서는 크리프 마스터 곡선에 대한 크리프 파단 데이터의 편차를 나타내는 Z-파라미터를 사용하여 장시간 크리프 강도의 신뢰성 곡선인 응력-파단시간-신뢰성 곡선($\sigma-t_r-R$), 응력-TTP 파라미터-신뢰성 곡선($\sigma-TTP-R$) 그리고 허용응력-온도-신뢰성 곡선($[\sigma]-T-R$)을 예측하였다.

2. 결과 및 고찰

2.1 크리프 파단 데이터의 분포 특성

본 연구에 사용된 Z-파라미터는 크리프 파단 데이터의 분산을 고려하는 것으로 log-LMP 관계에서 얻어지는 최적 마스터 곡선에 대한 크리프 파단 데이터의 편차의 크기로 정의되는

값이다³⁾. 크리프 파단 강도는 LMP (P)의 함수로서 나타낼 수 있으며 크리프 강도의 편차를 나타내는 Z-파라미터 식은.

$$Z_i = Z_o + f(P_i) - \log \sigma_i \quad (1)$$

이 된다. 여기서 P_i 는 i 데이터($T_{is}, \sigma_{is}, t_{ri}$)의 통합 파라미터이며, Z_i 는 마스터 곡선으로부터 $\log(\sigma)$ 데이터의 편차 값을 나타낸다.

Gr. 91 강의 690 개 크리프 파단 데이터를 이용하여 얻은 최적의 마스터 곡선을 Fig. 1에 나타내었다. 본 마스터 곡선에 대하여 크리프 데이터의 편차를 나타내는 Z-파라미터로 나타내어 그 분포 특성을 조사한 결과, Fig. 2에 보인 것처럼 정규분포를 잘 따르는 것으로 나타났다. 본 정규분포에서 평균(μ) 값은 0.00436이었으며, 표준편차(s) 값은 0.03139이었다.

2.2 신뢰성 곡선의 예측

Z-파라미터의 정규분포의 결과를 이용하여 고온 설계에 필요한 응력-TTP 파라미터-신뢰성 곡선, 응력-파단시간-신뢰성 곡선, 그리고 허용응력-온도-신뢰성 곡선을 예측하였다. 크리프 강도의 신뢰성 곡선은 크리프 마스터 곡선에다 크리프 데이터의 표준편차 값과 임의의 확률(probability, $P_{(x)}$)에서의 정규분포 전환상수(α)의 곱한 값을 차감하여 얻어지며 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$\log \sigma = Z_o + a_1 P + a_2 P^2 + \dots + a_n P^n - s \cdot \alpha_i \quad (2)$$

정규분포 전환상수 α 는

$$\alpha = \ln [4P_{(x)}(1 - P_{(x)})] \quad (3)$$

의 식으로 구해지며, $P_{(x)}$ 는 신뢰도를 나타내는 확률이다. Gr. 91 강의 크리프 데이터로부터 크리프 강도의 확률적 신뢰성 곡선은

$$\sigma = \exp(10.5448 - 0.7157 P + 0.0230 P^2 - 2.763 E - 4 P^3) - s \cdot \alpha \quad (4)$$

식으로 나타낼 수 있다.

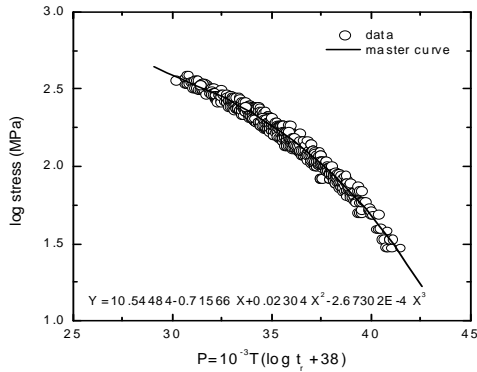


Fig. 1 A master curve for Gr. 91 steel

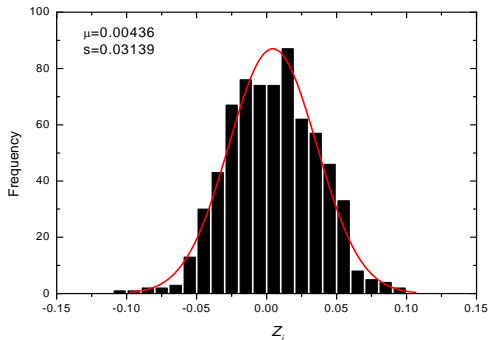


Fig. 2 Z-parameter distribution of creep rupture data

Fig. 3 은 50%, 1s(84.1%), 2s(97.7%)일 경우의 예로서 LMP 방법으로 10^6 h 까지 예측한 장시간 크리프 강도의 응력-파단시간-신뢰성 곡선의 결과를 나타낸 것이다. 여기서 50% 신뢰도 곡선은 평균값을 의미하는 것이다. 이외에도 허용응력-온도-신뢰성 곡선과 임의의 시간 조건에서 평균응력-온도 곡선을 LMP 로 예측한 신뢰성 결과 곡선들을 각각 예측할 수 있었다.

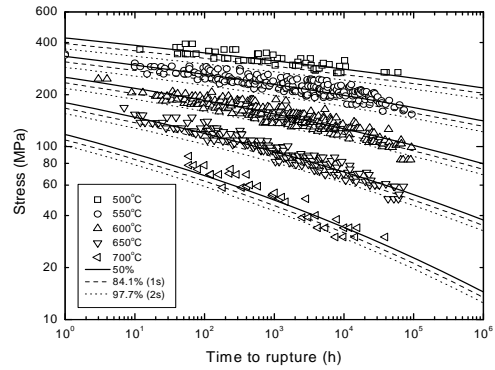


Fig. 3 The σ - t_r -R curves at various temperatures

3. 결론

Gr. 91 강의 크리프 데이터를 Z-파라미터로 나타낼 때 정규분포를 잘 따르는 것으로 나타났으며, 이 분포로부터 고온 설계에 필요한 σ -TTP-R, σ - t_r -R 그리고 $[\sigma]$ -T-R 등의 신뢰성 곡선을 예측하여 얻었다. 본 결과를 이용하면 Gr. 91 강의 크리프 강도를 신뢰도에 따라서 결정할 수 있으므로 기존의 결정론적인 방법에 비해 유용한 방법으로 활용될 수 있다.

후기

본 연구는 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국연구재단 국제협력사업의 지원으로 수행된 것입니다.

참고문헌

1. Kim, W.G, Yin, S.N. and Koo, G.H., "Generation of Isochronous Stress-Strain Curves with a Nonlinear Least Square Fitting Method for Modified 9Cr-1Mo Steel", *Met. Mater. Int.*, **15**, 727~732, 2009..
2. Larson, F.R. and Miller, J., *Trans. ASME*, **74**, 765~781, 1952.
3. Zhao, J., Li, D., and Fang, Y., "Z Parameter and Its Application on Reliability Prediction of Creep Rupture Life", *ECCC Creep Conference*, 778~786, Zurich, Swiss. 2009.