

< 논문 >

링 시험편을 이용한 ZIRLO 피복관의 크리프 특성 평가

배봉국* · 구재민* · 석창성*
(2004년 12월 10일 접수, 2005년 5월 21일 심사완료)

The Evaluation of the Creep Properties of ZIRLO Cladding Using the Ring Specimen

Bong-Kook Bae, Jae-Mean Koo and Chang-Sung Seok

Key Words: Cladding(피복관), Ring Specimen(링 시험편), Load-displacement Conversion Relationship of Ring(링 변환관계), Ring Creep Test(링 크리프시험), Burst Creep Test(파열 크리프시험), Uniform Circumferential Elongation(균일 원주변형률)

Abstract

In this study, we suggested the ring creep test using the ring specimen of Arsene for estimating the burst creep properties of the cladding in stead of burst creep test. For this objective, we used the load-displacement conversion relationship of ring specimen called LCRR which had been determined on our previous study at high temperature by performing the ring tensile test and the numerical analysis. Then we carried out both the ring creep test and the burst creep test between 350 °C and 600 °C which were higher than the in-service temperature of the cladding in a reactor. The creep properties from the ring creep test with applying LCRR were compared with those from the burst creep test of closed-end specimens. From the results, it could be seen an very strong relationship between them, especially in Larson-Miller parameter. So, it is expected that we can easily predict the creep properties of not only claddings but also various small pressure pipes using the ring creep test.

1. 서론

피복관은 원자로 내에서 핵연료를 냉각제로부터 분리하고 고정시키는 역할을 한다. 원자로 가동 중에 초기반응도사고(RIA: Reactivity Initiated Accident)나 냉각제상실사고(LOCA: Loss Of Coolant Accident)와 같은 사고가 발생했을 때 고온 고압에서 파열되기까지 피복관이 버틸 수 있는 파괴한도를 예측하거나 고연소도 운전조건에 맞는 피복관을 개발하고자 할 때 피복관의 내압 크리프 파열특성이 필요하다.⁽¹⁾

내압 파열특성 평가에는 밀봉 시험편을 이용한

내압 파열 시험이 주로 사용된다.⁽²⁾ 이것은 고온에서 내압으로 크리프 파괴를 일으키는 방법으로 실제가동 조건과 유사한 시험조건에서의 결과를 얻을 수 있으나 시험준비가 복잡하고 시험과정이 위험하며 시험재료의 소모가 많은 단점이 있다. 내압이 작용할 때 길이방향과 원주방향의 이축응력이 작용하는데 그 중 원주응력이 파괴에 주로 영향을 미친다. 압력관에 대하여 원주방향 특성을 측정하는 방법으로 내압 파열 시험이외에 링 인장시험이 있다. 링 인장시험은 링 형상의 시험편의 내부에 핀을 걸고 양쪽으로 당겨서 파괴시키는 방법으로서 시험과정이 비교적 간단하다. 하지만 링 시험편은 평행부가 일정한 곡률로 휘어져 있어서 인장시험 중에 굽힘 응력과 변형이 작용하여 오차가 발생하므로 이에 대한 보정이 필요하다. 많은 연구자들이 링 인장시험에 대한 연구를 수행한 바 있는데 그 중 가장 최근에 제시된 것은 Arsene 등⁽³⁾에 의한 방법으로서 링

† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : seok@skku.edu

TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

* 회원, 성균관대학교 기계공학부

Table 1 Chemical compositions of Zirlo (wt.%)

Element	Sn	Fe	Cr	O	Nb	Zr
Composition	1.0	0.01	0.008	0.01	1.0	bal.

시험편의 내부에 중앙조각을 삽입하여 인장 중에 링 시험편의 평행부가 펼쳐지는 것을 억제하는 것이다. 하지만 이 방법은 또한 중앙조각과 평행부 사이에 마찰이 발생하므로 표면조건을 고려해 주어야 한다.

본 연구자들은 기존의 상온과 고온에서의 연구를 바탕으로, 링 인장시험과 수치해석을 수행하고 마찰계수를 고려하여 고온에서의 링 변환관계(LCRR: Load-displacement Conversion Relationship of Ring)를 산출한바 있다.⁽⁴⁻⁶⁾ 본 연구에서는 기존의 연구를 바탕으로 피복관의 내압 크리프 파괴 특성을 평가하기 위한 방법으로 링 시험편을 이용한 링 크리프 시험을 제안하였다. 이를 위하여 링 크리프 시험과 내압 파열 크리프 시험을 각각 수행하고, 링 크리프 시험 결과에 링 변환관계를 적용하여 얻은 크리프 특성과 내압 파열 크리프 특성을 비교하여 링 크리프 시험의 적용가능성을 고찰하였다.

2. 링 크리프 시험

2.1 시험편과 시험장치

피복관의 재료는 지르코늄합금인 지르로(Zirlo)로서 화학적인 조성은 Table 1과 같다.⁽¹⁾ 본 연구에서는 Arsene 등이 제안한 방법을 참고하여 Fig. 1과 같이 중앙조각을 포함한 시험장치와 링 시험편을 제작하여 인장시험을 수행하였다. 시험장치의 재료로는 고온에서도 시험할 수 있도록 인코넬이 사용되었다. Fig. 2에 링 시험장치의 조립도를 나타내었다.

2.2 링 변환관계식

링으로부터 얻어진 하중-변위선도에서 시험편과 링의 굽힘 변위를 보정하기 위한 보정식을 구하기 위하여 링 보정시험을 수행하였고, 응력-변형률 선도를 구하기 위한 링 변환 관계식을 산출하기 위하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 3에 링의 1/8 모델과 경계조건을 나타내었다.

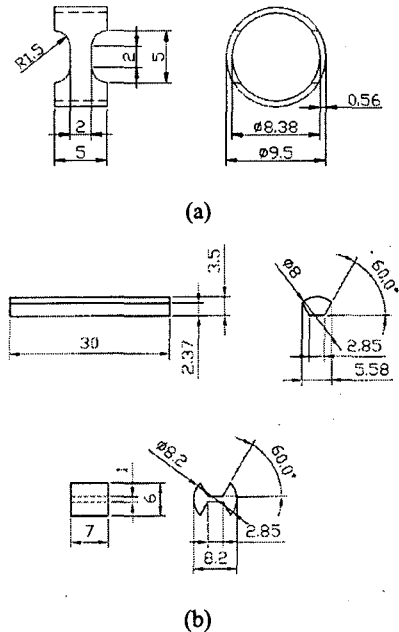


Fig. 1 Specimen and device (a) Ring tensile specimen (b) Pin and central piece (mm)

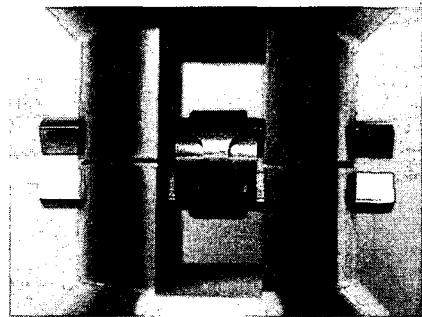


Fig. 2 Testing assembly

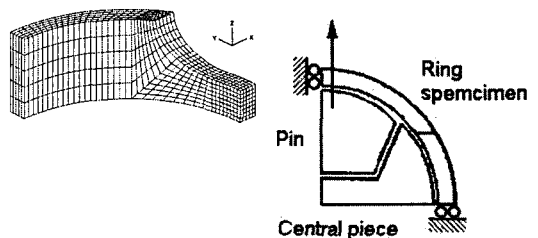


Fig. 3 Boundary condition

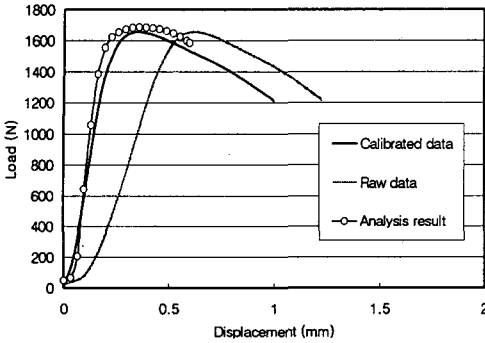


Fig. 4 Load versus displacement curves of calibrated test results and analysis ones

$$\delta = \delta_{Total} - 0.00157 (P - 50)^{0.6592} \quad (1)$$

여기서 δ 는 보정된 변위 [mm], δ_{Total} 는 전체 측정변위 [mm], P 는 측정하중 [N]이다.

링 인장시험에서 굽힘 변위를 보정하기 위하여 링 보정시험으로부터 구한 보정식은 식 (1)과 같고, 보정식을 적용하여 변위를 보정한 결과는 Fig. 4와 같다. 링의 굽힘을 보정하면 변위의 시작점이 앞으로 오프셋되고 시험장치의 굽힘을 보정하면 하중-변위선도의 기울기가 증가하여 보정된 결과가 해석결과와 유사한 것을 확인할 수 있다.

$$\varepsilon = 1.360 (1 - e^{-1.103 \delta})^{2.850} \quad (\delta < 0.3553) \quad (2)$$

$$\varepsilon = 0.1727 \delta - 0.00644 \quad (\delta > 0.3553)$$

$$\begin{aligned} \sigma &= f_c \frac{P}{A} \\ &= \frac{1.025}{2.24} P \\ &= 0.4576 P \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 σ 는 원주응력, f_c 는 하중비이다.

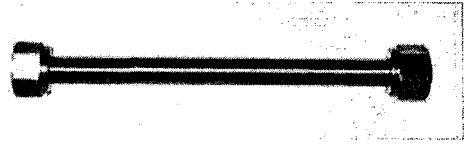


Fig. 5 Closed-end specimen in creep burst test

보정된 링 인장 변위와 측정하중으로부터 응력-변형률 선도를 구할 수 있는 변형률-변위 관계식 (2)와 응력-하중 관계식 (3)을 고온에서의 조건인 마찰계수 0.15에서 수치해석을 수행하여 결정하였다.⁽⁴⁻⁶⁾ 식 (2)에서 0.3553은 본 연구의 링 인장 시험에서 최대 인장하중에서의 변위에 해당하며, 식 (3)에서 하중은 변위의 함수이며 전체인장과정 동안 하중비가 동일하다고 가정하였다.

2.3 시험방법

크리프 시험온도는 가압경수로의 가동온도인 300~330°C 보다 높은 350~600°C 사이에서 4 가지를 선정하였다. 피복관으로 사용되는 주성분인 지르코늄의 용점은 1860°C(2133 K)이므로 시험온도는 약 0.3~0.4 T_m [K]의 범위에 해당한다.

크리프 시험기로는 최대 100 kN 용량의 레버식 크리프파단시험기를 사용하였다. 가열로 내부의 중앙에 설치된 열전대로 온도를 측정하고, 온도 조절기의 오차 온도범위는 $\pm 1^\circ\text{C}$ 였다.

시험편을 설치하고 시험 하중의 10% 이내의 하중을 가한 상태에서 가열로를 닫고 온도를 올린다. 원하는 온도에 도달한 후 안정화될 때까지 약 30분간 유지시간을 두었다. 시험온도는 365, 435, 505, 570°C의 4가지 온도로 설정하였으며, 한 온도에서 응력조건을 3~4 가지로 다르게 하여 실험하였다.

3. 크리프 파열 시험

3.1 시험편과 시험장치

Fig. 5는 내압시험에 사용된 시험편의 형상을 나타내고 있다. 시험편은 ASTM B811의 규격에 맞추어 제작하였다.⁽²⁾ 시험편의 길이는 150 mm로 하였으며, 내압시험을 위해 끝단(end fit)을 밀봉하였다. 시험편의 외경과 두께는 각각 9.5 mm, 0.56 mm로써, 시험편의 길이방향으로 일정간격 마다 측정하여 평균한 값을 사용하였다.

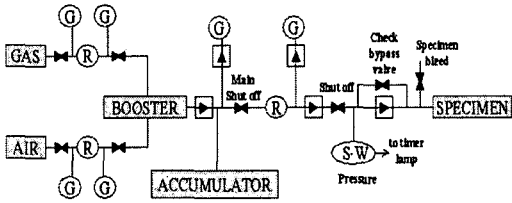


Fig. 6 Diagram of creep burst test equipment

Fig. 6은 내압실험장치의 구성을 나타낸다. 그림에서 R은 레귤레이터, G는 압력계지를 나타낸다. 최대 가압 용량은 약 140 MPa이며, 압력유체로는 아르곤가스를 공기와 적절한 비율로 혼합하여 사용한다. 압력유체는 부스터를 통해 가압되고 밸브들을 거쳐 시험편의 내부로 인입되는데, 이때 체크밸브에 의해 역류를 방지하고, 어큐뮬레이터에 의해 안정된 유량을 공급하며, 타이머와 연결된 압력스위치에 의해 시험편의 파단시점을 알 수 있다.

3.2 시험방법

제작된 시험편을 내압실험장치에 연결하여 고정시키고 350 ~ 600 °C 사이의 온도구간에서 압력을 변화시키며 내압크리프시험을 수행하였다. 시험온도는 각각 365, 435, 505, 570 °C로 하였으며, 원하는 온도에서 30 분간 유지한 후 압력밸브를 열고 단계적으로 증압하여 원하는 압력에 도달하도록 하였다. 시험편은 주어진 온도에서 내압에 의해 축응력과 원주응력의 비가 1:2인 상태로 유지되다가 크리프에 의해 원주방향으로 파열된다. 시험 전과 시험 후에 시험편의 길이방향으로 6.35 mm 마다 두 지점씩 총 38 개 지점의 직경을 측정하여 시험 전 측정값은 평균하여 초기 시험편 직경으로, 시험 후 측정값은 최종 시험편 직경으로 균일 원주변형률(UCE: uniform circumferential elongation) 계산에 사용하였다. 응력은 온도마다 4~5 단계씩 변화시켰다.

시험편의 치수와 내압으로부터 원주응력(hoop stress)과 원주변형률(hoop strain)을 계산할 수 있다. 시험을 내압만으로 수행하므로 축응력과 원주응력은 일정하게 1:2의 응력비를 가지며 이들 중 큰 값인 원주응력이 파단에 주로 영향을 미치므로 파단응력(ultimate strength)으로 간주한다. 앞

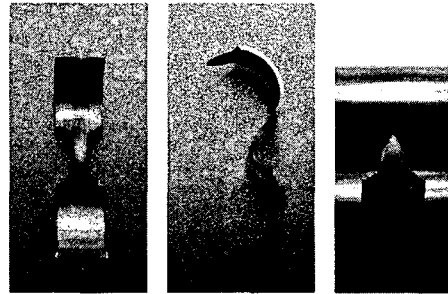


Fig. 7 Ruptured specimen after ring creep test at 570 °C

은 두께를 가진 원통형에서의 원주응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sigma_{\theta} = \frac{pD}{2t} \tag{4}$$

여기서 σ_{θ} 는 파열강도[MPa], p 는 내압[MPa], D 는 외경-두께, t 는 두께이다. 크리프 변형률 속도는 균일 원주변형률을 파단시간으로 나누어 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{UCE}{t_r} \tag{5}$$

여기서 UCE 는 균일 원주변형률, t_r 은 파단시간이다.

4. 결과 및 고찰

4.1 파단시험편

Fig. 7은 링 크리프 시험을 통해 파단된 시험편의 형상을 나타낸다. 링 크리프 시험은 파단되면 추의 무게로 인하여 양쪽 고정구가 끝까지 벌어지므로 시험편이 완전히 펼쳐진다. 파단된 단면적이 매우 작고 뾰족하게 늘어난 치즐 포인트(chisel point)형 파괴였다.

Fig. 8에 지를로의 내압에 의해 파단된 시험편의 형상을 나타냈다. 원주방향으로 균열이 전파되어 파열이 발생하였으며, 온도가 높을수록 변형량이 컸다. 이러한 경향은 Fig. 9에 나타낸 온도와 응력에 따른 원주방향 변형률 그래프에서도 확인할 수 있다.

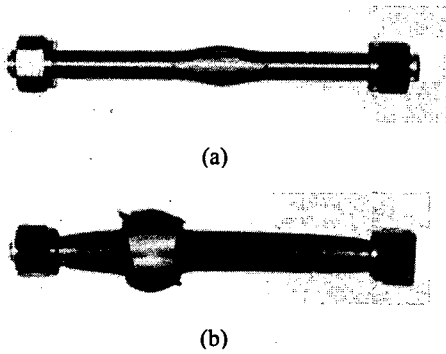


Fig. 8 Ruptured specimens after creep burst test
(a) at 365°C (b) at 570°C

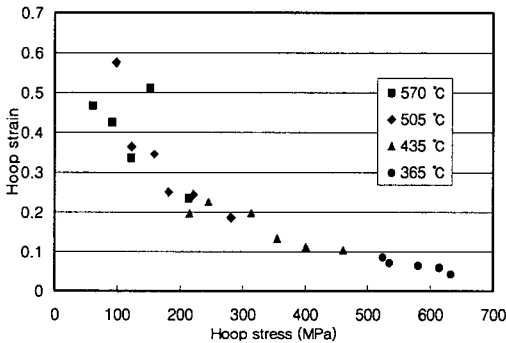


Fig. 9 The relationship between hoop strain and applied stress in creep burst test

4.2 크리프 특성

링 크리프와 크리프 파열 시험으로부터 구한 응력값은 모두 원주응력만을 환산한 것이므로 높은 유사성이 있으리라는 것을 기대할 수 있다. 실제로 이들의 크리프 특성을 비교하면 다음과 같다.

Fig. 10은 각 온도에서 응력에 따른 정상상태 크리프 변형률속도의 관계를 나타낸 것으로, B는 이축응력(biaxial stress)인 크리프 파열시험으로부터 얻어진 원주응력, U는 일축응력(uniaxial stress)인 링 크리프시험으로부터 얻어진 원주응력을 의미한다. 데이터의 분포에서 밀접한 유사성을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 온도변화에 따른 파단시간과 응력의 관계이며, 앞서와 마찬가지로 링 크리프와 크리프 파열 시험의 기술기와 데이터의 분포가 거의 일치함을 확인할 수 있다.

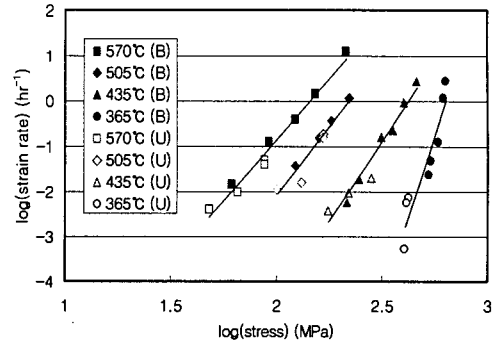


Fig. 10 Strain rate versus hoop stress of ring creep and creep burst

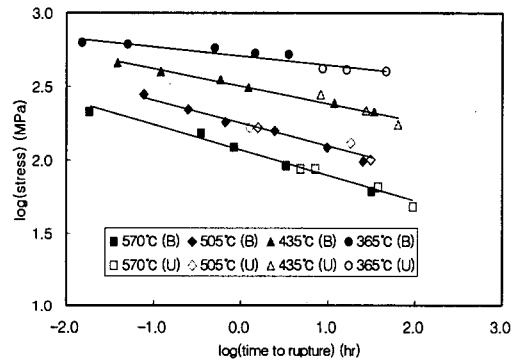


Fig. 11 Hoop stress versus rupture time of ring creep and creep burst

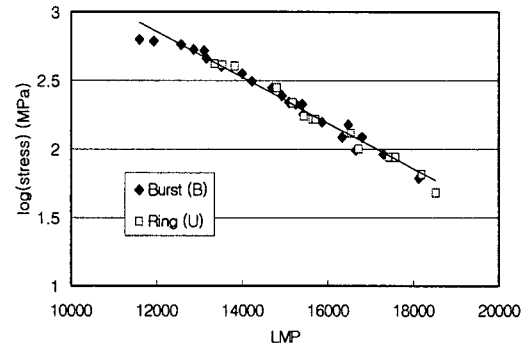


Fig. 12 LMP of ring creep and creep burst

Fig. 12는 라슨-밀러⁽⁸⁾ 파라미터(LMP)와 작용응력과의 관계를 나타낸다. 식 (6)에서 C는 재료에 따라 17~23의 값을 가지는 상수로서, 본 연구에

서는 Zhou 등⁹⁾의 연구를 참고하여 20으로 적용하였다. 라슨-밀러 선도는 크리프의 거동을 예측하기 위한 곡선으로서, 두 크리프 시험의 데이터가 잘 일치하는 것으로 보아 링 크리프 시험결과로부터 크리프 파열 특성을 예측할 수 있을 것이다.

$$LMP = T\{C + \log(t_r)\} \quad (6)$$

여기서 T 는 절대온도 [K], t_r 는 파단시간 [hr], C 는 재료상수이다.

5. 결론

본 연구에서는 Zirlo를 대상으로 온도 350 ~ 600°C 사이에서 링 크리프 시험 및 내압 크리프 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 링 인장시험을 고온에 적용하기 위하여 고온에서의 마찰계수를 고려한 변형률-변위, 응력-하중의 링 변환관계식을 제시하였다.

(2) 크리프 변형률 속도와 응력이 파열 크리프와 링 크리프에서 동일한 온도에 대하여 하나의 직선으로 나타낼 수 있어 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

(3) 링과 파열의 라슨-밀러 파라미터의 데이터가 거의 일치하므로 링 크리프 시험으로 내압 크리프 파열 시험을 대체할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2003-B-071) 주관으로 수행된 과제이며 또한 두뇌한국21 사업에 의하여 지원되었습니다.

참고문헌

- (1) KAERI, 1999, Development of Advanced LWR Fuel Cladding, KAERI/RR-2020/99.
- (2) ASTM B811-90, 1990, "Standard Specification for Wrought Zirconium Alloy Seamless Tubes for Nuclear Reactor Fuel Cladding".
- (3) Sylvie Arsene and Jinbo Bai, 1996, "A New Approach to Measuring Transverse Properties of Structural Tubing by a Ring Test," *Journal of Testing and Evaluation, JTEVA*, Vol. 24, No. 6, Nov. pp. 386~391.
- (4) Bae, B. K., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2005, "A Study on the Tensile Property of Ring Specimen Having Gauge Length," *Trans. of the KSME A*, Vol. 29, No. 4, pp. 555~562.
- (5) Bae, B. K., Koo, J. M. and Seok, C. S., Kim, H. I. and Lee, Y. M., 2004, "Analysis for the Effect of Friction Coefficient in Ring Tensile Test," *Proc. of KSPE Spring Annual Meeting*, p. 88.
- (6) Bae, B. K., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2005, "Evaluation of the Tensile Properties of Fuel Cladding at High Temperatures Using a Ring Specimen," *Trans. of the KSME A*, Vol. 29, No. 4, pp. 600~605.
- (7) Bae, B. K., Song, C. H. and Seok, C. S., 2003, "A Study on the Mechanical Properties of Nuclear Fuel Cladding Materials," *Trans. of the KSME A*, Vol. 27, No. 2, pp. 231~238.
- (8) Larson, F. R. and Miller, J., 1952, *Trans. ASME*, 74, p.765.
- (9) Zhou, Y., Devarajan, B. and Murty, K. L., 2004, "Short-term Rupture Studies of Zircaloy-4 and Nb-modified Zircaloy-4 Tubing Using Closed-end Internal Pressurization," *NED* 228 pp. 3~13.