

< 논문 >

링 시험편을 이용한 피복관의 고온 인장특성 평가

배봉국* · 구재민* · 석창성*
(2004년 10월 22일 접수, 2005년 2월 18일 심사완료)

Evaluation of the Tensile Properties of Fuel Cladding at High Temperatures Using a Ring Specimen

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

Key Words: Ring Test(링 시험), LCRR(링 시험편의 하중-변위 변환관계), Friction Coefficient(마찰계수), Fuel Cladding(피복관), Dynamic Strain Aging(동적변형시효)

Abstract

In this study, the ring tensile test at high temperature was suggested to evaluate the hoop tensile properties of small tube such as the cladding in the nuclear reactor. Using the Arsene's ring model, the ring tensile test was performed and the test data were calibrated. From the result of the ring test with strain gauge and the numerical analysis with 1/8 model, LCRR(load-displacement conversion relationship of ring specimen) was determined. We could obtain the hoop tensile properties by means of applying the LCRR to the calibrated data of the ring tensile test. A few difference was observed in view of the shape of fractured surface and the fracture mechanism between at the high temperature and at the room temperature.

1. 서 론

원자로 내에서 핵연료를 격리, 보호하는 피복관(cladding)은 고온 특성이 좋아야 하고 RIA(초기 반응도사고)나 LOCA(냉각제상실사고)와 같은 사고로 인한 급격한 내압의 상승에도 어느 정도 견딜 수 있어야 한다.⁽¹⁾ 내압으로 인한 파괴에는 원주방향의 응력이 주된 요인으로 작용하므로, 피복관과 같은 압력관의 안전성 평가를 위해서는 원주방향의 인장특성을 파악하는 것이 중요하다. 압력관의 원주방향의 인장특성을 평가하기 위한 방법의 하나로 링 시험법(ring test)이 사용된다. 링 시험에는 관을 축방향에 수직으로 절단하여 링 형태로 제작한 링 시험편(ring specimen)이 사

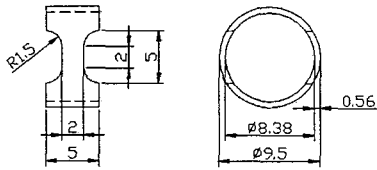
용된다. 링 시험편은 표준인장시험편과 달리 평행부에서 굽힘이 발생하므로 링 시험 초기에 변위가 증가하는 특유의 인장곡선이 나타난다. 또한 이 인장곡선에는 시험장치의 굽힘 오차도 포함되므로 링 인장시험으로부터 표준 인장특성을 산출하기 위해서는 적절한 보정과 변환이 필요하다.

기존의 연구들은 링 시험편의 형상이나 실린더의 형상을 변화시켜 굽힘을 억제하고 정확한 응력-변형률 선도를 얻고자 하였으나 아직까지 명확한 링 시험법의 기준은 마련되어 있지 않은 상태이다. Arsene⁽²⁾ 등은 중앙조각을 도입하여 시험편 평행부에서의 굽힘을 최소화하고, 하중-변위 선도로부터 인장특성을 산출할 수 있는 변환선도를 제시한 바 있다. 하지만 이 경우 중앙조각과 시험편 사이에 마찰이 발생하며, 고온의 시험조건에서는 상온과는 다른 마찰조건이 형성될 것이므로 마찰계수가 다른 경우에 대한 분석이 필요하다. 본 연구자는 마찰의 영향을 고려하여 핵연료 피복재인 지를로를 대상으로 링 인장 시험과

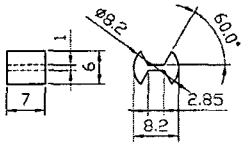
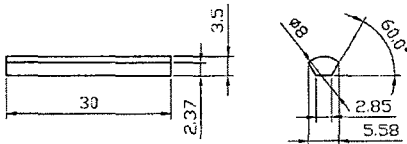
* 회원, 성균관대학교 기계공학부
† 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부
E-mail : seok@skku.edu
TEL : (031)290-7446 FAX : (031)290-7482

Table 1 Chemical compositions of Zirlo (wt.%)

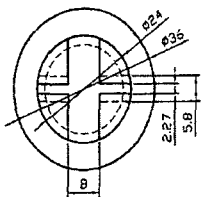
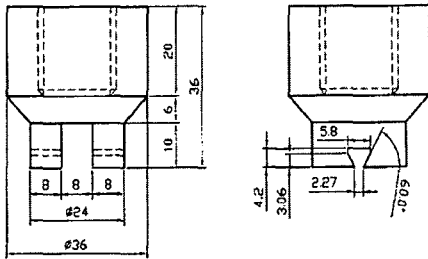
Element	Sn	Fe	Cr	O	Nb	Zr
Composition	1.0	0.01	0.008	0.01	1.0	bal.



(a)



(b)



(c)

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

수치해석을 수행하여 다양한 마찰조건에 따른 링 변환관계(load-displacement conversion relationship of ring specimen: LCRR)를 제시한 바 있다.⁽³⁻⁴⁾

본 연구에서는 링 변환관계를 고온 링 인장시험에 적용하고자 하였다. 피복관으로 링 시험편을 제작하여 고온 링 인장시험을 수행하고, 앞선 연구에서 얻어진 링 변환 관계를 적용하여 피복관의 원주방향 고온 인장특성을 평가하였다. 본 방법을 이용하면 고온에서 다양한 압력관의 원주방향 인장특성 평가가 가능할 것이다.

2. 고온 링 인장특성 평가

2.1 고온 링 인장시험

피복관의 재료는 지르코늄 합금인 지르로(Zirlo)로서 화학적인 조성은 Table 1과 같다. 시험편과 고정구는 Arsene의 모델을 참고하여 Fig. 1과 같이 제작하였다. 시험장치의 재료로는 고온에서도 시험할 수 있도록 인코넬을 사용하였다. 실험에 사용된 가열로는 최대 1200 °C까지 가열이 가능하며, 3지점에서 열전대를 통하여 온도가 측정되어 컨트롤러에 의해 ±1 °C의 오차범위에서 제어된다. Fig. 2에 가열로와 시험장치의 사진을 나타냈다.

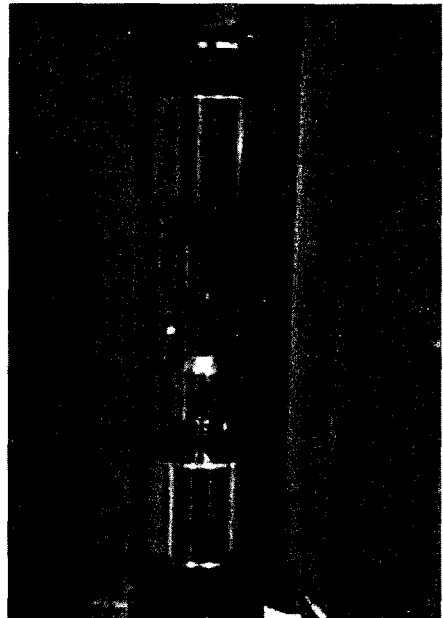


Fig. 2 Chamber and testing device

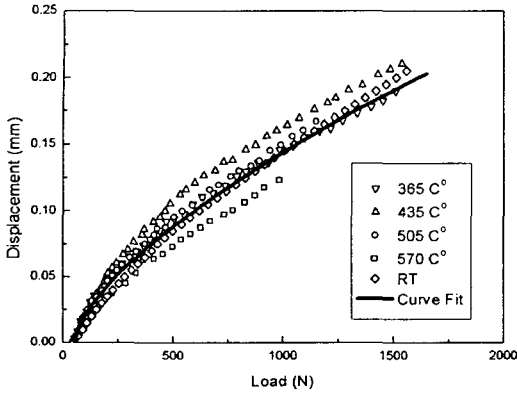


Fig. 3 Calibration curve for the bending

피복관의 사용온도가 300~330 °C이지만, RIA 나 LOCA와 같은 사고발생 조건을 가정하여 이 보다 높은 365, 435, 505, 570 °C 의 4가지 온도를 실험조건으로 설정하였다. 시험편을 설치하고 가열하여 실험온도에 도달하면 온도의 안정화를 위하여 약 30분간 유지한 후 인장속도 0.1 mm/min 로 실험을 수행하였다. 링 시험에 사용되는 시험장치는 그 크기의 제한으로 인하여 충분한 강성을 가지지 못하므로 하중이 가해질 때 탄성 굽힘 변형이 발생할 수 있으므로 식 (1)과 같이 링 시험에서 측정된 전체변위 (δ_{Total})에는 시험장치의 굽힘변위(δ_{Device})가 포함되어 있으므로 이를 보정해주어야 한다.

$$\delta_{Total} = \delta_{Specimen} + \delta_{Device} \quad (1)$$

이를 위하여 전체 시험온도 구간에서 시험편 대신 강성이 큰 링을 설치하여 하중에 따른 시험장치의 굽힘 변위를 측정하였으며, 그 결과 Fig. 3과 같이 시험장치의 굽힘변위와 하중사이의 관계를 구하였다. 전체 온도구간에 대한 평균값을 구하여 이것을 측정하중 P 에 관한 지수함수 형태로 적합시켜 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, Fig. 3에서 실선으로 표시된 곡선에 해당한다. 이때의 오차는 ± 0.025 mm에 해당한다.

$$\delta_{Device} = 0.00157 (P - 50)^{0.6592} \quad (2)$$

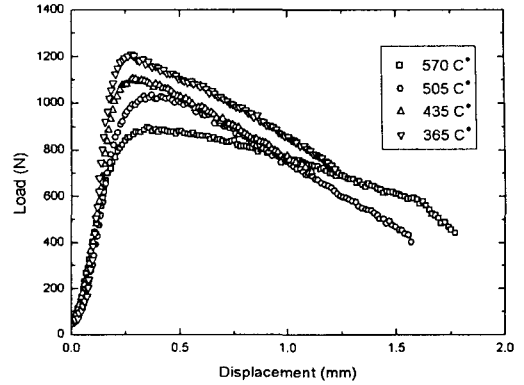


Fig. 4 Load versus calibrated displacement of Zirlo at high temperature

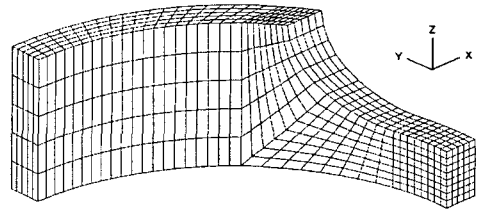


Fig. 5 FEM model of ring specimen

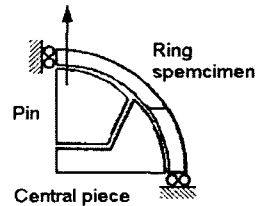


Fig. 6 Boundary condition

식 (1)과 (2)를 적용하면 링 인장시험에서 얻은 변위로부터 시험편의 변위 ($\delta_{Specimen}$)를 구할 수 있다. Fig. 4는 고온 링 인장시험에서 이렇게 보정된 하중-변위 ($\delta_{Specimen}$) 선도를 나타낸다. 초기에 J 형태로 휘어진 이유는 링의 굽힘이 남아있기 때문이다. 보정된 하중-변위 선도로부터 응력-변형률 선도를 구하기 위해서는 링 변환관계식을 적용해야 한다.

2.2 링 변환관계식(LCRR)

Bae⁽⁴⁾ 등의 연구에서 링 변환관계식을 산출하기 위하여 수치해석을 수행한 바 있다. 수치해석에는 Fig. 5와 같은 링의 1/8 모델이 사용되었으며 경계조건은 Fig. 6과 같다.

수치해석을 통해 구할 수 있는 변형률은 최대 하중까지만 유효하므로 그 이후는 일정한 기울기를 가지는 것으로 가정하여 적용한다. 최대하중 이전의 변위-변형률 선도는 식 (3)과 같은 지수함수인 체프만(Chapman) 곡선으로 적합(curve fitting)시킬 수 있다. 최대하중점(δ_{P_U}) 이후에는 체프만 곡선의 미분값에 보정계수를 곱한 값을 기울기로 하는 직선을 식 (4)와 같이 적용하였다. 각 계수들은 마찰계수에 따라 다른 값을 가진다.

$$\epsilon = c_1(1 - e^{-c_2\delta})^{c_3} \quad (\delta < \delta_{P_U}) \quad (3)$$

$$\epsilon = p_1\delta + p_2 \quad (\delta > \delta_{P_U}) \quad (4)$$

여기서, $p_1 = k \frac{d\epsilon}{d\delta}$
 $k = \frac{1 - e^{-c_2\delta}}{e^{-c_2\delta}}$

앞선 연구⁽⁴⁾에서 수치해석을 통하여 마찰계수가 0.0~0.3 사이에서 변할 때 각 경우의 변위에 따른 평행부에서의 변형률과 응력을 산출하여 링 변환관계식의 계수들을 산출한 바 있다. 본 연구에서는 앞선 연구에서의 상온 마찰계수 0.1과 Lee⁽⁵⁾ 등이 구한 지르코늄합금 피복관의 고온 특성을 참고하여 고온에서의 마찰계수를 0.15로 선정하고 링 변환관계식을 결정하였으며 얻어진 고온에서의 변형률-변위 관계식은 식 (5)와 같다.

$$\epsilon = 1.360(1 - e^{-1.103\delta})^{2.850} \quad (\delta < \delta_{P_U}) \quad (5)$$

$$\epsilon = 0.1727\delta - 0.00644 \quad (\delta > \delta_{P_U})$$

응력은 Fig. 7에서 평행부에 가해지는 하중 F_y 를 단면적으로 나누어서 구한다. 링 인장시험에서 측정되는 하중 P 는 핀에 의해 가해지는 수직력 $(F_p)_y$ 뿐이지만 실제로 링의 평행부에는 중앙조각에 의한 수직력 $(F_{cp})_y$ 도 함께 가해지므로, 정확한 평행부 하중을 구하기 위하여 하중비

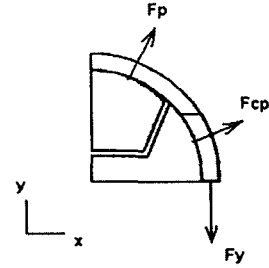


Fig. 7 Free-body diagram

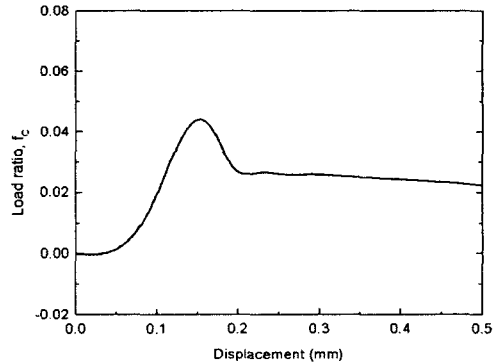


Fig. 8 Relationship between load ratio and displacement

f_c 를 도입한다. 하중비란 링 시험편에 가해지는 중앙조각의 수직력과 핀의 수직력의 비를 의미하며, 수치해석을 통하여 구할 수 있다.

Fig. 8은 수치해석을 통해 얻어진 하중비를 나타내며 초기에 요동을 보이다가 약 2.5%에서 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 하중비가 2.5%라는 것은 측정하중 보다 2.5% 만큼 더 큰 하중이 평행부에 가해지고 있음을 의미한다. 이때 요동 부분의 값이 크지 않으므로 수렴된 값을 이용하여 응력을 수식으로 나타내면 다음 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma &= (1 + f_c) \frac{P}{A} \\ &= \frac{1.025}{2.24} P \\ &= 0.4576 P \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, σ : 원주 응력 (MPa)

f_c : 하중비, $\frac{(F_{cp})_y}{(F_p)_y}$

A : 단면적 $2wl$ (mm^2)

2.3 파단 시험편 형상

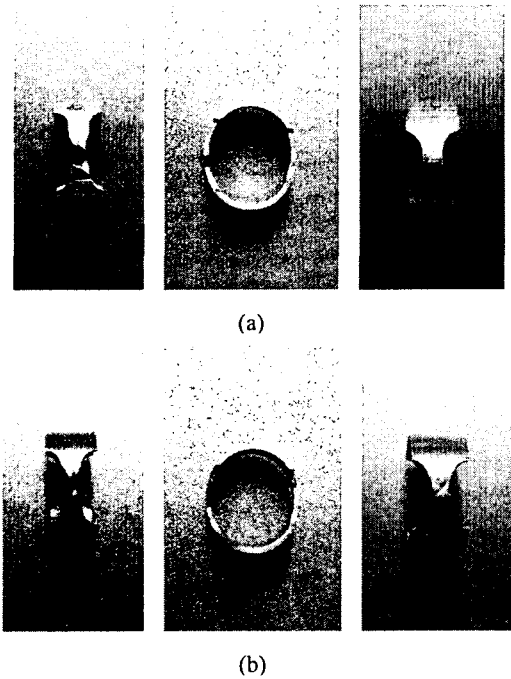


Fig. 9 Fractured specimens: (a) at room temperature (b) at 435 °C

Fig. 9는 파단된 링 시험편의 형상을 나타낸 것이다. 비교를 위하여 상온 시험편을 함께 나타내었다. 시험편은 모두 한쪽 평행부에서만 파단되었으며, 파단면의 형상은 Link^(6,7) 등의 연구결과와 같이 모두 국부적인 네킹을 보이고 있으며, 상온 시험편의 경우 폭방향으로 기울어진 슬립형태로, 고온 시험편의 경우 요철형태로 나타났다.

파단되지 않은 평행부에서는 45° 슬립선이 양쪽으로 발생하고 있는 모습을 보이는데, 고온의 경우 더 뚜렷하게 나타나고 있다.

2.4 고온 인장특성

Fig. 10은 하중-변위선도 Fig. 4에 링 변환관계식 (5)와 (6)을 적용하여 구한 응력-변형률 선도를 나타낸다. 비교를 위하여 상온에서의 응력-변형률 선도를 함께 나타내었다. Table 2에 온도별 인장강도와 0.2% 항복강도를 정리하였다. 기존 Zircaloy-4의 상온 횡방향 인장특성⁽⁸⁾과 비교하여 강도와 연신율에서 약간 더 큰 값을 가진다.

Table 2 Ultimate tensile strength of Zirlo at various temperatures

Temp. (°C)	570	505	435	365	RT
UTS (MPa)	409	470	505	551	768
0.2%YS (MPa)	230	245	270	340	445

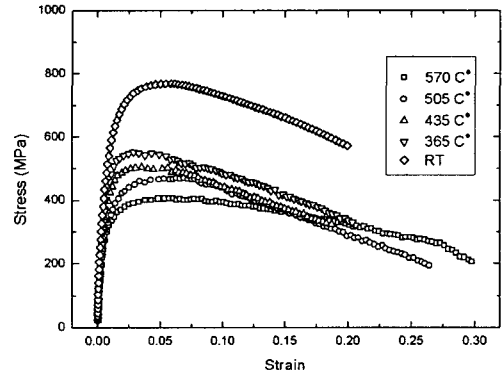


Fig. 10 Stress versus strain of Zirlo at various temperatures

3. 고찰

Fig. 9에서 시험편의 두 평행부 중 한 쪽에서만 파단이 발생한 이유는 고정구로부터 시험편의 양쪽 평행부에 균등한 하중이 가해지지만 어느 한 쪽에 네킹이 발생하면서 단면적이 감소하여 응력집중이 발생하기 때문이다.

파단되지 않은 평행부의 형태로부터 인장 시험 한 쪽 평행부가 먼저 항복점에 도달한 후 다른 쪽 평행부가 항복하고 연신이 발생하는 동안 먼저 항복하였던 평행부가 파단되었음을 추정할 수 있다. 즉 한쪽에서 먼저 항복에 도달하면서 변형경화가 발생하고 그 도중에 다른 쪽에서도 항복에 도달한 것이다.

Fig. 4에서 초기에 J 형태로 약간 남아있던 굽힘 변위가 링 변환관계식을 적용한 후에 완전히 보정되었음을 Fig. 10의 초기 선도의 형태로부터 확인할 수 있다.

Fig. 10의 응력-변형률 선도에서 강도는 고온으로 갈수록 감소하는 경향을 보이는 반면 연신율의 경우 고온으로 갈수록 증가하지만 435 °C와 365 °C에서는 상대적으로 낮은 값을 가졌다. 연신율이 고온에서 불규칙하게 나타나는 이유는 동적 변형시효(dynamic strain aging) 때문인 것으로 판

단된다. 동적변형시효는 기지내의 용질원자와 전위와의 상호작용에 의해 발생하는 현상으로서, 온도와 변형속도에 의존하여 기계적인 성질에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 동적변형시효가 발생하는 경우 유동응력-온도 곡선에서 plateau 혹은 peak가 나타나고, 연신을 곡선에서 최소연신율(elongation minimum)이 나타난다고 보고되고 있다. 지르코늄 혹은 지르코늄 합금에 대한 기존의 연구 결과에 따르면 200~600 °C 범위, 특히 300~500 °C 구간에서 주로 동적변형시효가 관찰된 바 있다.^(1,9-12) 본 연구에서는 시험 온도분포가 조밀하지 못하여 응력-온도에 대한 plateau나 peak 여부를 알 수 없었으나, 400 °C 부근에서 관찰된 최소연신율은 동적변형시효로 인한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 링 시험을 이용하여 고온에서의 원주방향 특성을 평가하고자 하였으며, 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고온에서 링 인장시험을 수행하고, 마찰계수가 0.15인 경우의 링 변환관계식을 적용하여 고온 원주방향 응력-변형을 선도를 얻었다.
- (2) 인장강도는 온도의 증가에 따라 감소하였고, 연신율의 경우 대체로 증가하였으나 400 °C 부근에서 최소연신율이 관찰되었는데, 이는 동적 변형시효로 인한 것으로 판단된다.
- (3) 파괴형태는 모두 국부적인 네킹에 의한 것으로서, 상온의 경우 전단형 슬립파괴, 고온의 경우 요철형 파괴였으며, 파괴과정은 시험편의 두 평행부에서 시간차를 두고 항복이 발생하여 한 쪽이 먼저 파단되었다.

후 기

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

참고문헌

(1) KAERI, 1999, Development of Advanced LWR Fuel Cladding.

(2) Arsene, Sylvie and Bai, Jinbo, 1998, "A New Approach to Measuring Transverse Properties of Structural Tubing by a Ring Test - Experimental Investigation," *Journal of Testing and Evaluation, JTEVA*, Vol. 26, No. 1, January, pp. 26~30.

(3) Bae, B. K., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2003, "A Study on the Method of Evaluating the Tensile Property of Ring Specimen Having Gauge Length," *Proc. KSME fall*, pp. 167~172.

(4) Bae, B. K., Kim, H. I., Lee, Y. M., Koo, J. M. and Seok, C. S., 2004, "Analysis for the Effect of Friction Coefficient in Ring Tensile Test," *Proc. KSPE spring*, p. 88.

(5) Lee, K. W., Kim, S. K., Kim, K. T. and Hong, S. I., 2001, "Ductility and Strain Rate Sensitivity of Zircaloy-4 Nuclear Fuel Claddings," *Jr. of Nuclear Materials*, 295, pp. 21~26.

(6) Link, T. M., Koss, D.A. and Motta, A.T., 1998, "Failure of Zircaloy under transverse plane-strain deformation," *Nuclear Eng. and Design*, Vol. 186, pp. 379~394.

(7) Pierron, O.N., Koss, D.A. and Motta, A.T., 2003, "Tensile Specimen Geometry and the Constitutive Behavior of Zircaloy-4," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 312, pp. 257~261.

(8) Oh, D. J., Ahn, S. B. and Hong, K. P., 2003, "New Fracture Toughness Test Method of Zircaloy-4 Nuclear Fuel Cladding," *Jr. of KSME*, Vol. 27, No. 5, pp. 823~832.

(9) Cho, Y. R., Jeong, H. Y. and Kim, I. B., 1990, "A Study on the High Temperature Tensile Properties of Hydrided Zircaloy-4," *Jr. of KISE*, Vol. 23, No. 1, pp. 44~51.

(10) Kallstrom, K. and Svenzon, M., 1973, "Dynamic Strain Aging in Zircaloy and its Dependence on Cold Work, Recrystallization and Grain Size," *Scandinavian Jr. of Metallurgy*, Vol. 2, pp. 55~58.

(11) Ramachandran, V. and Reed-Hill, R.E., 1970, "Dynamic Strain Aging and Ductility Minima in Zirconium," *Metallurgical Trans.*, Vol. 1, pp. 2106~2109.

(12) Rheem, K. S. and Park, W. K., 1976, "Strain Ageing in Zircaloy-4," *Jr. of Korean Nuclear Society*, Vol. 8, No. 1, pp. 19~27.