

Zr-2.5Nb 합금의 크리프 물성 측정을 위한 SP 크리프 시험의 적용성에 대한 연구

박태규* · 마영화** · 정일석*** · 윤기봉†
(2002년 4월 6일 접수, 2002년 11월 15일 심사완료)

A Study on Applicability of SP Creep Testing for Measurement of Creep Properties of Zr-2.5Nb Alloy

Tae Gyu Park, Young Wha Ma, Ill Seok Jeong and Kee Bong Yoon

Key Words: Creep(크리프), CANDU Pressure Tube(CANadian Deuterium Uranium 압력관), Zr-2.5Nb, Anisotropic Material(이방성 재료), Small Punch Creep Test(소형펀치 크리프 시험), Finite Element Analysis(유한요소해석)

Abstract

The pressure tubes made of cold-worked Zr-2.5Nb alloy are subjected to creep deformation during service period resulting in changes to their geometry such as longitudinal elongation, diameter increase and sagging. To evaluate integrity of them, information on the material creep property of the serviced tubes is essential. As one of the methods with which the creep property is directly measured from the serviced components, small punch(SP) creep testing has been considered as a substitute for the conventional uniaxial creep testing. In this study, applicability of the SP creep testing to Zr-2.5Nb pressure tube alloy was studied particularly by measuring the power law creep constants, A, n. The SP creep test has been successfully applied for other high temperature materials which have isotropic behavior. Since the Zr-2.5Nb alloy has anisotropic property, applicability of the SP creep testing can be limited. Uniaxial creep tests and small punch creep tests were conducted with Zr-2.5Nb pressure tube alloy along with finite element analyses. Creep constants obtained by each test method are compared. It was argued that the SP creep test result gave results reflecting material properties of both directions. But the equations derived in the previous study for isotropic materials need to be modified. Discussions were made for future research directions for application of the SP creep testing to Zr-2.5Nb tube alloy.

1. 서 론

CANDU-PHW(CANadian Deuterium Uranium Pressurized Heavy Water) 원자로는 천연우라늄(UO₂)을 연료로 사용하며 중수(D₂O)를 냉각재와

감속재(moderator)로 사용한다.⁽¹⁾ 핵연료와 냉각재를 포함하고 있는 압력관(pressure tube)은 냉각가공된 Zr-2.5Nb 합금을 사용하여 길이 6.3 m, 안지름 103 mm, 두께 4.2 mm의 형상으로 제작된다. 압력관은 10 MPa의 내압과 입구 250℃ 및 출구 315℃의 온도 조건에서 운전되므로 가압중수로에서 가장 높은 신뢰성이 요구되는 요소이다. 원자로의 운전 중 온도와 압력, 중성자 조사에 의해 발생하는 열화 또는 조사 크리프(radiation creep)에 의해 관의 직경 및 길이가 점차 증가하여 발생하는 압력관의 팽윤 또는 처짐(sagging)이 건전성 상실의 원인이 된다. 즉, 수평으로 배치되어 있는 연료채널(fuel channel)의 자체 무게와 조사

† 책임저자, 회원, 중앙대학교 기계공학부

E-mail : kbyoon@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5328 FAX : (02)812-6474

* 중앙대학교 기계물성연구실 위촉연구원,
현재 GIT 재료공학과 방문연구원

** 중앙대학교 대학원,
현재 원자력연구소 석사후 연수생

*** 한전 전력연구원

Table 1 Material properties of the tested Zr-2.5Nb alloys at 300°C

Elastic modulus ⁽⁵⁾ (GPa)	Poisson ratio ⁽⁵⁾	Yield strength ⁽⁹⁾ (MPa)	Creep constants (Longitudinal direction)	
			A (MPa ⁻ⁿ · hr ⁻¹)	n
78.68	0.3	450	3.55E-54	18.81

Note) $\dot{\epsilon}_{creep} = A\sigma^n$

크리프로 인하여 압력관의 처짐 현상이 발생하며 부식과 수소침투로 인한 delayed hydride cracking (DHC) 등이 발생하여 누출사고가 발생한다.⁽²⁻⁵⁾

CANDU 원자로의 압력관은 부식과 크리프 저항성 및 강도를 향상시키기 위해 압출 및 냉간인발 제조법을 사용하여 제작된다. 이러한 제조공정은 압력관을 방향에 따라 기계적 물성이 상이한 이방성(anisotropy)을 갖도록 한다.⁽⁶⁻¹⁰⁾ Zr-2.5Nb 압력관의 이방성 크리프 변형은 지르코늄의 육방 결정구조의 물리적 성질과 압력관의 제조공정에 의해 기인한다. Causey,⁽⁷⁾ Ibrahim⁽⁸⁾ 등은 중성자에 의해 발생하는 Zr-2.5Nb 압력관의 조사 크리프 거동의 이방성에 대해 연구하였으며, Shewfelt⁽⁹⁻¹¹⁾ 등은 고온에서 Zr-2.5Nb 압력관의 방향에 따른 크리프 모델을 제안하였다.

고온 설비의 잔여 크리프 수명을 측정하는 방법으로는 실기에서 크리프 시험을 채취하여 크리프 수명을 실측하는 방법으로 SP 크리프 시험 (Small Punch creep test)이 제안되어 연구되고 있다.⁽¹²⁻¹⁶⁾ SP 크리프 시험은 실기 부재의 크리프 파단수명을 평가하기에 적합하다고 보고되고 있다. 또한, 최근 9Cr 강에 대하여 일축 크리프 시험의 크리프 곡선을 통해 크리프 상수를 구하는 것과 유사하게, SP 크리프 시험으로 얻은 SP 변위 곡선으로부터 크리프 상수를 결정하는 방법이 유한요소해석 및 SP 크리프 실험을 이용하여 제안되었다.⁽¹²⁾

본 연구에서는 실험 및 해석적 방법을 사용하여 Zr-2.5Nb 압력관 합금의 크리프 특성을 연구하였다. 300°C의 온도에서 길이방향 시험편에 대해 일축 크리프 실험과 SP 크리프 실험을 수행하여 각각의 2차 크리프 상수를 비교, 분석하였다. 또한, Yoon 등에⁽¹²⁾ 의해 제안된 기존의 SP 크리프 변환식을 SP 크리프 시험의 다른 연구 결과를 이용하여 검증하였으며 Zr-2.5Nb 합금에 대해 SP 크리프 변환식의 적용성을 검토하였다.

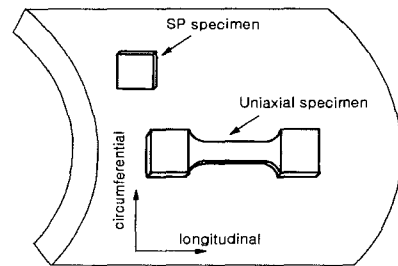


Fig. 1 Uniaxial creep and SP creep specimen sampling position at pressure tube

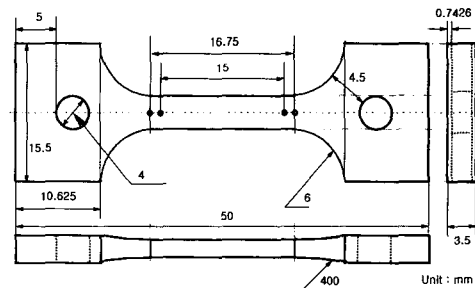


Fig. 2 Dimensions of uniaxial creep specimen

2. 실험방법 및 유한요소해석

2.1 시험편 및 실험방법

SP 크리프 실험 및 일축 크리프 실험에 사용된 재료는 CANDU형 원자로 압력관 재료로 사용되는 Zr-2.5Nb 합금이다. Table 1에 300°C에서의 Zr-2.5Nb 압력관의 일반적인 인장물성 및 측정된 크리프 물성을 나타내었다. Fig. 1에 Zr-2.5Nb 압력관에서 일축 크리프 시험편과 SP 크리프 시험편의 채취 위치 및 방향을 나타내었다. 일축 크리프 시험편은 압력관의 제한된 형상으로 인하여 가로방향의 시험편의 채취는 불가능하고 길이방향의 시험편만이 제작 가능하였다. 시험편은

ISO 6892:1998 (Metallic materials-tensile testing at ambient temperature)의 조건을 만족하도록 미소 시험편을 제작하였다.

일축 크리프 시험에 사용된 미소시험편의 형상 및 치수를 Fig. 2에 나타내었다. 일축 크리프 시험은 길이방향 시험편에 대하여 300°C의 온도 조건과 380 MPa, 400 MPa, 440 MPa의 일정 응력하에서 시험하여 일축 크리프 상수를 측정하였다.

SP 크리프 시험은 일축 크리프 시험과 동일한 300°C의 온도 조건에서 10×10×0.5 mm 크기의 SP 크리프 시험편을 사용하여 1044N, 946N, 897N, 848N, 799N의 정하중을 펀치를 통해 볼에 부가하여 SP 크리프 시험을 실시하였다. SP 크리프 실험 방법은 기존에 발표한 연구와 동일한 방법으로 실험을 수행하였다.^(12,13)

2.2 유한요소해석 방법

Zr-2.5Nb 압력관의 SP 크리프 시험에 대한 유한요소해석에는 상용 프로그램인 ABAQUS ver. 5.8을 사용하였다. 등방성 탄소성 재료를 사용하였고 해석 방법 및 모델링은 기존에 발표한 연구와 동일한 절차로 유한요소해석을 수행하였다.^(12,13) 다만, 시험편의 재료 물성값과 펀치하중만을 변화시켰으며 시험편에 사용된 재료물성 입력 데이터는 Table 1에 나타난 값을 사용하였다. 유한요소해석에 사용된 크리프 상수는 실제 압력관의 길이방향 시험편에 대한 일축 크리프 시험의 2차 크리프 상수이다.

유한요소해석은 정하중 조건에서 800N, 850N, 900N, 1000N의 정하중을 볼에 부가하여 SP 크리프 변위곡선, 유효응력 및 등가 크리프 변형률을 해석하였다.

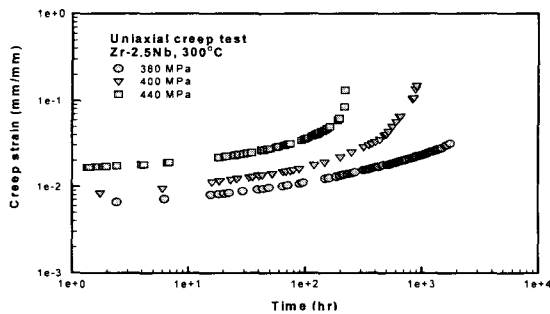


Fig. 3 Experimentally measured creep strain-time curves of Zr-2.5Nb alloy at 300°C

3. 결과 및 고찰

3.1 일축 크리프 실험결과

300°C의 온도와 380 MPa, 400 MPa, 440 MPa의 응력 조건에서 일축 크리프 시험을 실시한 결과 일축 크리프 시험의 시간에 따른 크리프 변형률 선도를 Fig. 3에 나타내었다. 일축 크리프 시험으로부터 구한 각 시험편의 정상상태 크리프 변형률 속도 값으로부터 Fig. 4에 보인바와 같이 Norton 크리프 상수를 구하였으며 결정된 A는 3.55E-54 MPa⁻ⁿhr⁻¹이며 n은 18.81 이었다.

3.2 유한요소해석 결과

SP 크리프 시험의 SP 변위곡선으로부터 일축 크리프 상수와 동일한 크리프 상수를 결정해 보기 위해 이전 연구와⁽¹²⁾ 유사하게 등방성 유한요소 해석을 수행하였다. 각각의 하중에 대한 부하

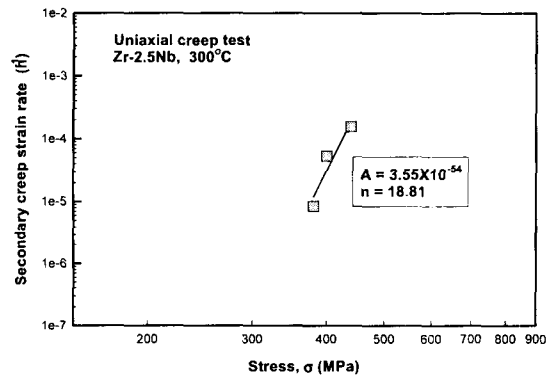


Fig. 4 Norton's creep constants obtained by uniaxial creep tests

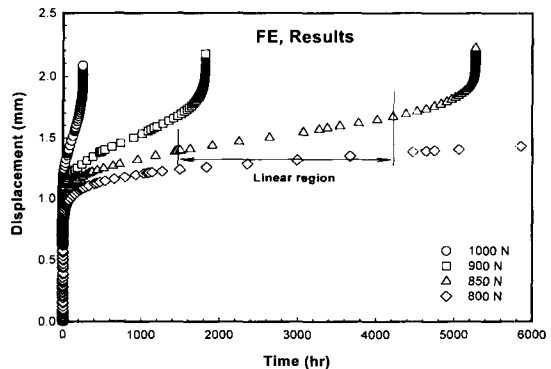


Fig. 5 Punch displacement vs. time curves obtained by FEA

시간에 따른 SP 펀치의 변위선도를 Fig. 5에 나타내었다.

시험편의 두께가 최소가 되는 부분(시험편의 과단이 예상되는 부분)에서 각각의 작용하중에 대하여 부하시간의 경과에 따른 Von Mises 유효응력의 변화를 시험편의 중간 두께부에 대하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 7에는 동일한 위치에서 부하시간의 경과에 따른 등가 크리프 변형률의 변화를 나타내었다. Fig. 6은 SP 크리프 시험이 시험중 대부분의 시간동안 일정응력 시험조건이 성립됨을 보여주며 Fig. 7은 그때의 정응력 크리프 곡선을 나타낸다. 선형구간에서 펀치하중과 네킹부의 유효응력은 선형적인 관계가 성립하며 변위속도가 증가함에 따라 네킹부의 등가 크리프 변형률 속도도 선형적으로 증가한다. 이러한 선형적인 관계에서 다음의 변환식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_e = 0.500P - 4.635$$

$$\dot{\epsilon}_e = 0.749\dot{\delta} - 5.704 \times 10^{-6}$$

위의 식으로부터 다음과 같은 간단한 SP 크리프 변환식을 얻을 수 있다.

$$P = 2\sigma_e, \dot{\delta} = 1.34\dot{\epsilon}_e \quad (1)$$

위의 관계식은 기존의 9Cr 강의 SP 크리프 시험의 유한요소해석에서 구한 SP 크리프 변환식과 일치한다.⁽¹²⁾ 시험편의 네킹이 발생하는 부분에서의 등가 크리프 변형률 속도와 Von Mises 유효응력으로부터 정상상태 크리프 상수 A와 응력지수 n을 구하면 A는 $2.85E-54 \text{ MPa}^{-n}\text{hr}^{-1}$, n은 18.80의 값으로 나타났다. 이 값들은 입력값인 일축 크리프 시험의 정상상태 크리프 상수 A, $3.55E-54 \text{ MPa}^{-n}\text{hr}^{-1}$ 와 응력지수 n, 18.81과 일치한다.

Zr-2.5Nb 압력관이 등방성 재료와 유사한 거동을 SP 크리프 시험에서도 나타낸다면 식 (1)과 같은 변환식을 사용하여 일축 2차 크리프 상수를 결정할 수 있어야 한다.

3.3 압력관의 SP 크리프 실험결과

SP 크리프 시험은 일축 크리프 시험과 동일한 온도 조건인 300°C 에서 1044N, 946N, 897N, 848N, 799N의 정하중을 볼에 부가하여 실시하였으며 측정된 SP 펀치의 변위선도를 Fig. 8에 나타내었다. 유한요소해석으로부터 구한 변환식 (1)을 사용하여 Fig. 8의 선형구간에서 펀치 변위속

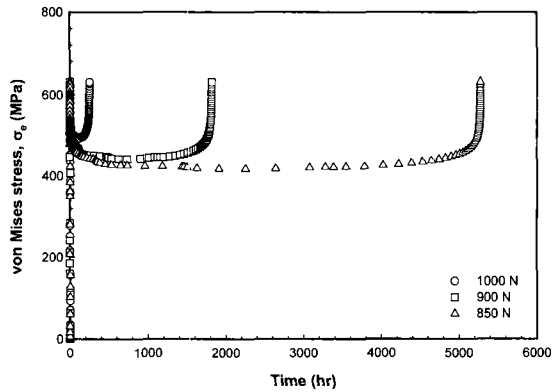


Fig. 6 Von Mises stress vs. time curves at critical position of SP creep tests

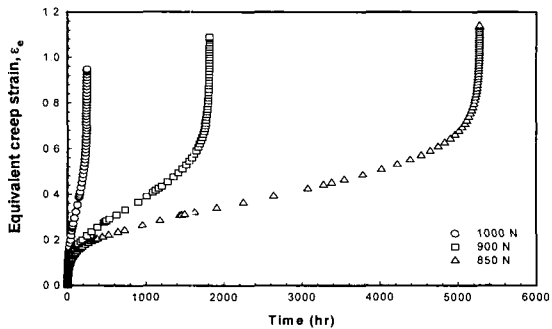


Fig. 7 Equivalent creep strain vs. time curves at critical position of SP creep tests

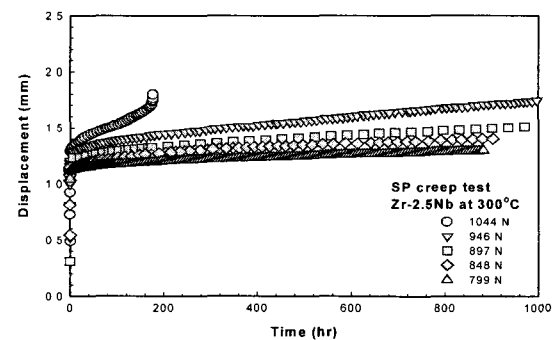


Fig. 8 Experimentally measured punch displacement-time curves of Zr-2.5Nb alloy at 300°C

도와 편치하중을 $\sigma_e, \dot{\epsilon}_e$ 값으로 환산하였으며 이를 이용하여 크리프 상수 A와 하중지수 n을 구하여 보았다. Fig. 9에 보인 그래프로부터 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\dot{\epsilon}_{ss} = 1.54E-39\sigma^{13.216} \quad (2)$$

등방성 재료 거동을 가정하고 구한 크리프 상수와 응력지수는 일축 크리프 시험에서 측정된 크리프 상수와는 상당한 오차가 존재함을 알 수 있다. 즉, n은 18.81 대신 13.22 값으로 A는 3.55E-54 대신 1.54E-39 값으로 측정되었다. 유한요소해석을 이용하여 구한 SP 크리프 변환식은 등방성 유한요소해석을 수행하여 구한 변환식이므로 압력관 재료로 사용되는 Zr-2.5Nb 합금과 같이 길이방향과 가로방향의 크리프 변형이 상이한 이방성 재료에는 적용되지 않는 것을 확인할 수 있다.

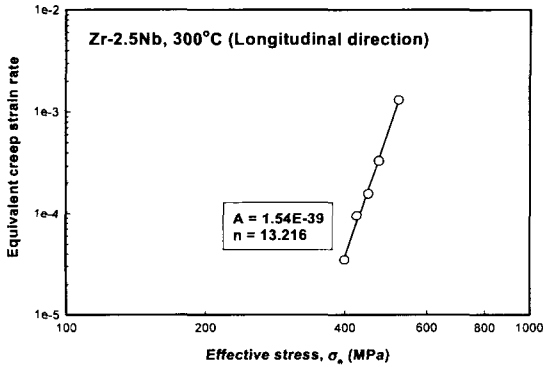


Fig. 9 Creep constants determined from converted $\sigma_e, \dot{\epsilon}_e$ values obtained by SP creep tests

3.4 SP 크리프 변환식의 검증

그러면 이전 연구에서 제안된⁽¹²⁾ SP 크리프 변환식의 유효성을 우선 다시 검증해볼 필요성이 있다. 이를 기존의 문헌 데이터를 이용하여 검증해 보기로 한다. 문헌상에 보고된 Ule와⁽¹⁴⁾ Komazaki의⁽¹⁵⁾ SP 크리프 실험결과 측정값을 SP 크리프 변환식 (1)을 사용하여 구한 SP 크리프 상수와 일축 크리프 시험으로부터 직접 구한 일축 2차 크리프 상수를 비교하여 Table 2에 나타내었다. 등방성 크리프 거동 재료인 경우 SP 크리프 변환식을 사용하여 구한 SP 크리프 상수와 일축 크리프 시험의 2차 크리프 상수는 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 따라서 등방성 크리프 변형을 하는 재료에서는 식 (1)과 같은 변환식을 적용하여 일축 크리프 시험의 2차 크리프 상수를 결정할 수 있으며 SP 크리프 변환식의 유효성은 입증된 것이다.

아직까지 압력관의 제한된 형상으로 인하여

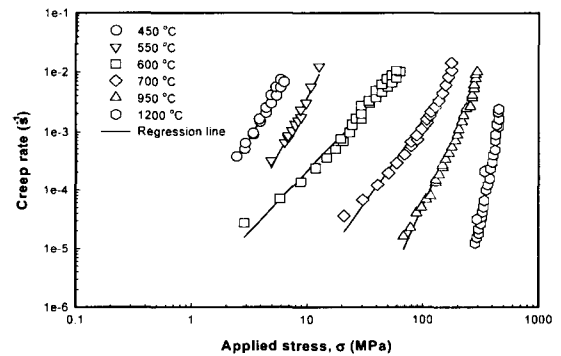


Fig. 10 Relations between creep rate and the applied stress⁽⁹⁾

Table 2 Uniaxial creep constants and SP creep constants determined from converted values

Material	Creep test	Test Temp. (°C)	Creep constants		Reference
			A (MPa ⁻ⁿ hr ⁻¹)	n	
14 MoV 6 3	Uniaxial	600	1.326E-34	13.03	Ref. 14
	SP	600	1.738E-33	12.45	Ref. 14
P92	Uniaxial	650	7.590E-29	12.43	Ref. 17
	SP	650	5.012E-33	12.55	Ref. 15
9Cr	Uniaxial	566	1.781E-34	12.76	Ref. 12
	SP	566	5.898E-35	12.64	Ref. 12

300°C의 온도에서 가로방향의 크리프 물성이 보고되지 않고 있다. Shewfelt 등은 450~1200°C의 온도에서 Zr-2.5Nb 압력관의 가로방향에 대한 크리프 모델을 제안하였다.⁽⁹⁾ Fig. 10에 참고문헌 (9)에 보고된 고온에서의 Zr-2.5Nb 합금의 가로방향 크리프 특성을 나타내었다. Fig. 11에는 참고문헌 (10)에 보고된 Zr-2.5Nb 압력관의 550, 600, 700°C의 온도에서 방향에 따른 크리프 특성을 나타내었다. 온도가 증가함에 따라 응력지수는 감소하였으며 또한 각각의 방향에 따른 크리프 특성은 가로방향 보다는 길이방향의 시험편이 응력지수가 더 높으며 크리프 변형도 가로방향이 더 큰 것이 일반적 경향임을 알 수 있다.

Shewfelt의 크리프 시험 결과로부터 300°C의 Zr-2.5Nb 합금의 가로방향에 대한 크리프 상수를 근사적으로 예측하여 Table 3에 나타내었다. 이 표에서 보면 SP 크리프 시험으로 측정된 크리프 지수 13.22는 11.76과 18.81 사이의 값이며 SP 크리프 시험으로 측정된 계수 1.54E-39는 3.55E-54와 4.50E-37 사이의 값이다. 즉, SP 크리프 시험으로부터 측정된 SP 크리프 상수는 가로방향과 길이방향의 일축 크리프 시험의 정상상태 크리프 상수 사이에 위치함을 알 수 있다. 이는 SP 크리프 시험이 이방성 재료의 경우 각각의 방향에 따른 크리프 특성을 모두 표현하여 그 가운데 값을 나타내는 것으로 볼 수 있다. Fig. 12에 크리프 지수 n을 두 방향 물성의 평균값인 15.28로 고정하고 각 조건의 데이터를 Norton의 크리프 법칙인 직선으로 나타내었다. SP 크리프 시험과 변환식 (1)으로 구한 결과가 길이방향 크리프 물성에

근사한 값을 주기는 하지만 길이방향과 가로방향의 중간값을 표현해주고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 13은 SP 크리프 시험중 파단이 발생하는 초기의 파손양상을 나타내는 SEM 사진이다. 등방성 재료의 경우와 달리 이방성 재료의 경우에는 길이방향의 결함으로부터 균열이 형성되어 파단이 진행되는 경향을 보이고 있다. 이는 본 연구의 관심영역인 SP 크리프 곡선의 직선부분에 해당되는 영역은 아니지만 이방성 재료의 변형 및 파단거동이 등방성 재료의 것과는 다름을 간접적으로 보여주고 있는 것이다.

3.5 향후 연구방향

Zr-2.5Nb 합금과 같이 이방성 재료인 경우에 대해 SP 크리프 시험으로 일축 2차 크리프 상수를 결정하고자 할 때에는 등방성 유한요소해석으로부터 구한 SP 크리프 변환식을 사용할 수는 있지만, 이로부터 구한 크리프 상수 결과는 길이방

Table 3 Creep constants of Uniaxial and SP creep tests at 300°C

Creep test		Creep constants	
		A (MPa ⁻ⁿ hr ⁻¹)	n
Uniaxial	Longitudinal	3.55E-54	18.81
	Transverse	4.50E-37	11.76
SP		1.54E-39	13.22

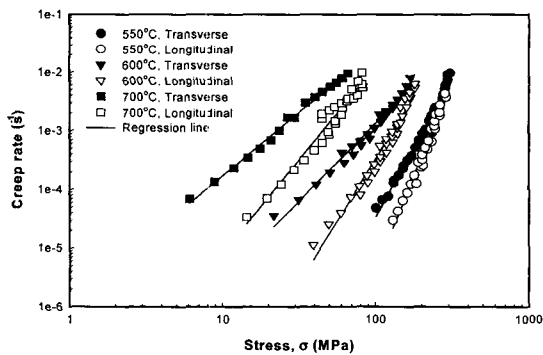


Fig. 11 Relations between creep rate and the applied stress of transverse and longitudinal specimens⁽¹⁰⁾

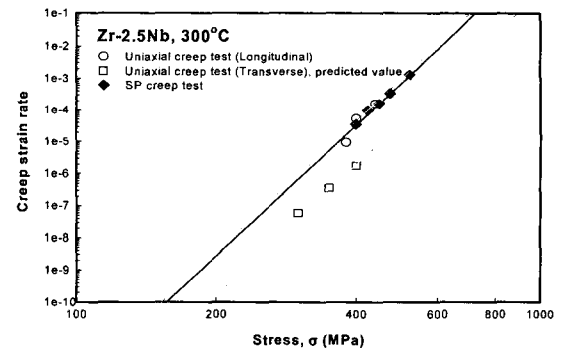


Fig. 12 Uniaxial creep constants in longitudinal and transverse direction of Zr-2.5Nb alloy and creep constants determined from SP creep tests

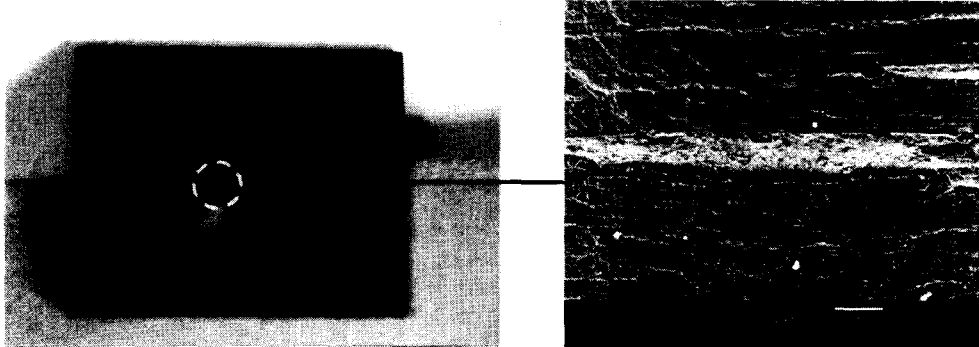


Fig. 13 Scanning electron fractography of a microcrack in small punch creep test specimen

향 및 가로방향의 크리프 특성을 모두 반영하는 값이므로 이로부터 Zr-2.5Nb 합금의 원하는 방향의 크리프 물성을 알아내는 방법의 연구가 필요하다.

향후 다음과 같은 연구 절차를 개발함으로써 이방성 재료에 대한 정확한 크리프 특성 평가가 가능할 수 있다.

(i) 각각의 방향에 따라 재료물성을 달리하는 이방성 유한요소해석을 수행하여 제안된 등방성 SP 크리프 변환식을 수정하여야 한다.

(ii) 이방성 변형 재료에 대하여 길이방향의 일축 크리프 상수와 다축방향의 크리프 특성을 표현하는 SP 크리프 상수를 이용하여 나머지 다른 방향의 크리프 상수를 결정할 수 있는 절차를 개발하여야 한다.

(iii) SP 크리프 시험에서 압입자인 불과 시험편의 형상만을 변화시켜 이방성 재료에 대해 일축 크리프 시험에서와 같이 한쪽 방향만의 크리프 특성을 측정할 수 있는 실험방법을 개발할 수도 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 Zr-2.5Nb 합금의 SP 크리프 시험의 유한요소해석 및 실험적 방법을 사용하여 얻은 편치 변위선도로부터 일축 크리프 시험의 정상상태 크리프 상수 및 응력지수를 얻는 방안에 대해 연구하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 등방성 재료인 경우 SP 크리프 시험의 편치하중과 선형구간 변위 속도를 일축 크리프 시

험의 작용응력과 등가 크리프 변형률 속도로 변환할 수 있는 아래 관계식의 기존연구 결과를 문헌상에 보고된 다른 등방성 재료에 대해 적용하여 유효성을 보임으로써 변환식의 일반성을 입증하였다.

$$\sigma_e = 0.5P, \quad \dot{\epsilon}_e = 0.75 \dot{\delta}$$

(2) 압력관 재료인 Zr-2.5Nb 합금의 경우 등방성 SP 크리프 변환식을 사용하여 SP 크리프 상수를 구하고 일축 크리프 상수와 비교하면 문헌상에 보고된 길이방향 및 가로방향의 크리프 상수의 중간값을 표현해 주게 된다. 따라서 SP 크리프 시험이 양 방향에 따른 크리프 특성을 모두 반영하고 있음을 알 수 있다.

(3) Zr-2.5Nb 합금과 같이 방향에 따라 재료물성이 상이한 이방성 재료는 등방성 재료에 대하여 제안된 식 (1)의 변환식을 사용하여 특정 방향의 일축 크리프 상수만을 측정할 수는 없다. 따라서 이방성 재료는 방향에 따라 재료의 크리프 특성이 변화하므로 각각의 방향에 따라 재료물성을 달리하는 이방성 유한요소해석을 수행하여 제안된 변환식을 수정하여야 한다.

(4) 다축방향의 크리프 특성을 나타내는 SP 크리프 시험을 이용하여 Zr-2.5Nb 합금과 같은 이방성 재료에 대해 이방성 크리프 특성을 평가하기 위한 향후 연구방향에 대해 제안하였다.

후 기

본 연구는 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 위탁 연구인 "압력관의 사용중 손상 및 구조건전성 관리기술 개발" 및 "경년열화 손상관리 적용 기술 개발"과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Cheadle, B. A., Coleman, C. E. and Licht, H., 1982, "CANDU-PHW Pressure Tube: Their Manufacture, Inspection, and Properties," *Nuclear Technology*, Vol. 57, pp. 413~425.
- (2) Manfred, P. P., 1997, "Assessment of Aging of Zr-2.5Nb Pressure Tubes in CANDU Reactors," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 171, pp. 137~148.
- (3) Field, G. J., 1988, "Problems Caused by Irradiation Deformation in CANDU Reactors," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 159, pp. 3~11.
- (4) Seo, Y. C., and Kim, Y. S., 2000, "Creep Behavior of Zr-Nb Alloys," KAERI/TR-1489/2000.
- (5) Puls, M. P., 1990, "Effects of Crack Tip Stress States and Hydride-Matrix Interaction Stresses on Delayed Hydride Cracking," *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21A, pp. 2905~2917.
- (6) Fleck, R. G., Price, E. G., and Cheadle, B. A., 1984, "Pressure Tube Development for CANDU Reactors," *ASTM STP 824*, pp. 88~105.
- (7) Causey, A. R., 1981, "Anisotropy of Irradiation Creep of Zr-2.5wt%Nb and Zircaloy-2 Alloys," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 98, pp. 313~321.
- (8) Ibrahim, E. F., Holt, R. A., 1980, "Anisotropy of Irradiation Creep and Growth of Zirconium Alloy Pressure Tubes," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 91, pp. 311~321.
- (9) Shewfelt, R. S. W., Lyall, L. W. and Godin, D. P., 1984, "A High-Temperature Creep Model for Zr-2.5wt% Nb Pressure Tubes," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 125, pp. 228~235.
- (10) Shewfelt, R. S. W., 1984, "The Anisotropic Deformation of Zr-2.5wt%Nb CANDU Pressure Tubes between 20 and 700°C," *Canadian Metallurgical Quarterly*, Vol. 23, pp. 441~445.
- (11) Shewfelt, R. S. W., Lyall, L. W., 1985, "A High-Temperature Longitudinal Strain Rate Equation for Zr-2.5wt%Nb Pressure Tubes," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 132, pp. 41~46.
- (12) Yoon, K. B., Park, T. G., Shim, S. H. and Jeong, I. S., 2001, "Assessment of Creep Properties of 9Cr Steel Using Small Punch Creep Testing," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 25, No. 9, pp. 1493~1500.
- (13) Park, T. G., Shim, S. H., Yoon, K. B. and Jang, C. H., 2002, "A Study on Parameters Measured during Small Punch Creep Testing," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 1, pp. 171~178.
- (14) Ule, B., Sustar, T., Dobes, F. and Milicka, F., 1999, "Small Punch Test Method Assessment for the Determination of the Residual Creep Life of Service Exposed Components: Outcomes from an Interlaboratory Exercise," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 192, pp. 1~11.
- (15) Komazai, S., Hashida, T., Shoji, T., and Suzuki, K., 2000, "Development of Small Punch Tests for Creep Property Measurement of Tungsten-Alloyed 9%Cr Ferritic Steels," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 28, No. 4, pp. 429~256.
- (16) Baek, S. S., Lee, D. H., Ha, J. S. and Yu, H. S., 2002, "Development of Evaluation Technique of High Temperature Creep Characteristics by Small Punch-Creep Test Method (II)," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 1, pp. 55~60.
- (17) Ennis, P. J., Zielinska-Lipiec, A., and Wachter, O., 1997, "Microstructural Stability and Creep Rupture Strength of the Martensitic Steel P92 for Advanced Power Plant," *Acta Materialia*, Vol. 45, No. 12, pp. 4901~4907.