

## 상온과 343°C에서 Alloy 690TT 증기발생기 전열관의 인장물성치 평가<sup>§</sup>

엄 기 현\* · 김 진 원\*\*

\*조선대학교 원자력공학과

### Evaluation of Tensile Properties of Alloy 690TT Steam Generator Tube at Room Temperature and 343°C

Ki Hyeon Eom\* and Jin Weon Kim\*\*

\*Dept. of Nuclear Engineering, Chosun Univ.

(Received February 25, 2014 ; Revised April 21, 2014 ; Accepted April 21, 2014)

**Key Words:** Alloy 690TT(690TT 합금), Steam Generator Tube(증기발생기세관), Tensile Property(인장물성치), Design Temperature(설계온도), Tube Specimen(튜브시편), Ring Specimen(링시편)

**초록:** 본 논문에서는 상온과 원전 설계온도에서 증기발생기 전열관의 축방향과 원주방향 응력-변형률 거동과 인장물성치를 파악하기 위해서, 튜브 시편과 링 시편을 이용하여 상온과 343°C에서 Alloy 690TT 전열관에 대한 인장시험을 수행하였다. 축방향 인장시험 결과 상온과 343°C에서 모두 항복점 현상이 관찰되었으며, 343°C에서는 Serration이 관찰되었다. 축방향과 원주방향 모두 상온에 비해 343°C에서 강도는 감소하였으나 연신율은 거의 변화가 없었다. 343°C에서 가공경화율은 상온에 비해 약간 감소하였으나, 가공경화 거동의 변화는 없었다. 시험 온도에 관계없이 축방향에 비해 원주방향의 항복강도와 인장강도가 약 5~10% 정도 낮았다. 시편 방향에 관계없이 상온 대비 343°C에서 Alloy 690TT 전열관의 항복강도와 인장강도 감소는 ASME Sec.II의 온도 보정계수에 의해 예측된 것보다 큰 것으로 확인되었다.

**Abstract:** This study conducted tensile tests on an Alloy 690TT tube at room temperature (RT) and at 343°C using tube- and ring-type specimens to investigate the stress-strain behavior and tensile properties of a steam generator (SG) tube in the axial and circumferential directions at RT and at the design temperature of a nuclear power plant (NPP). The results of the axial tensile test showed that yield point phenomena appeared at both RT and 343°C, and serrated flow in the stress-strain curve appeared at 343°C. Yield and tensile strengths for both directions were clearly lower at 343°C compared to RT; however, the elongations were approximately the same at both test temperatures. Regardless of the test temperature, the strengths in the circumferential direction were lower by approximately 5~10 % than those in the axial direction. In addition, the test data revealed that the reduction in the yield and tensile strengths of the Alloy 690TT SG tube with the test temperature was more significant than that estimated by the temperature correction factor of ASME Sec.II.

### 1. 서론

원자력발전소(이하 원전)에서 증기발생기(Steam Generator, SG)는 원자로에서 가열된 1차측의 냉각

재로부터 열을 전달 받아 2차측에서 수증기를 생산하여 터빈에 공급하는 기기이다. 증기발생기에서 전열관은 1차측과 2차측의 경계로 열전달 면적을 제공할 뿐 아니라 1차측과 2차측의 압력 차이를 지탱하는 압력경계로서 역할을 한다. 따라서, 증기발생기에서 전열관의 손상은 원전의 냉각재 상실 사고로 이어질 수 있기 때문에 전열관의 건전성 유지는 원전의 안전성 확보 측면에서 매우 중요하다. 그러나, 증

§ 이 논문은 대한기계학회 2013년도 학술대회(2013. 12. 18.-20., 강원랜드) 발표논문임.

† Corresponding Author, [jwkim@chosun.ac.kr](mailto:jwkim@chosun.ac.kr)

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

**Table 1** Tensile properties and geometries of Alloy 690TT SG tube used in experiment based on CMTR

Yield stress (YS) [MPa]	Ultimate tensile stress (UTS) [MPa]	Elongation (TE) [%]	Outer diameter (D) [mm]	Thickness (t) [mm]
314.9	692.4	50.0	19.05	1.067

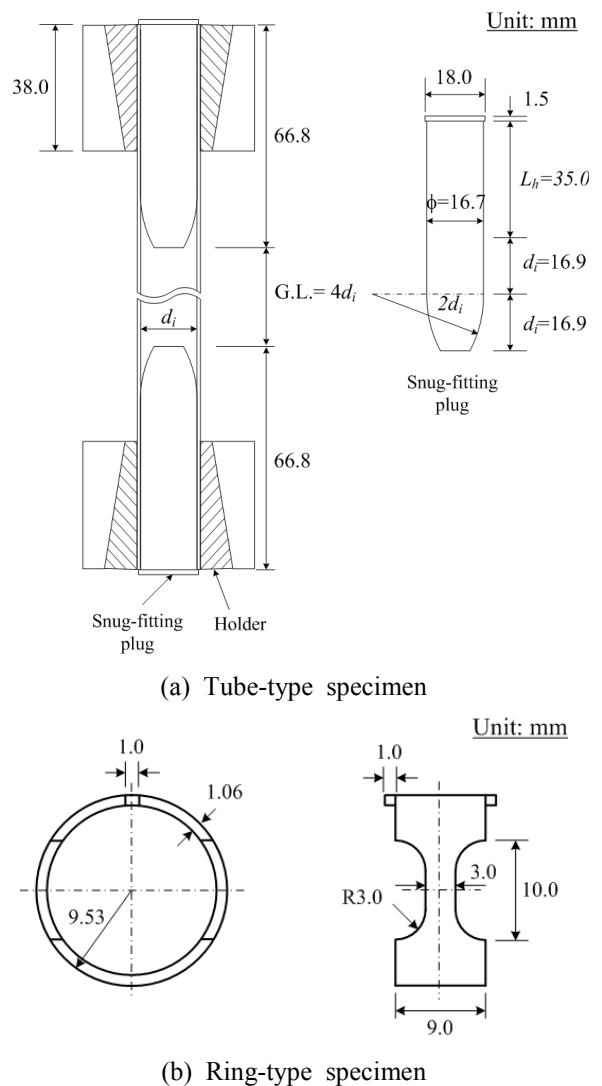
**Table 2** Chemical composition of Alloy 690TT SG tube based on CMTR (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Mo	Co	Ti	Nb	Al	B	N	Fe
0.018	0.30	0.26	0.012	0.000	0.04	29.63	59.34	0.03	0.011	0.25	0.00	0.17	0.000	0.006	9.91

기발생기의 운전 년 수가 증가됨에 따라 수화학적 또는 기계적인 열화 요인에 의해 전열관에서 결함이 발생되고 있다.<sup>(1)</sup> 따라서, 최근 증기발생기 전열관 결함에 대한 건전성 평가 방법 개발과 평가 방법의 신뢰성에 대한 관심이 더욱 높아지고 있다.<sup>(2,3)</sup>

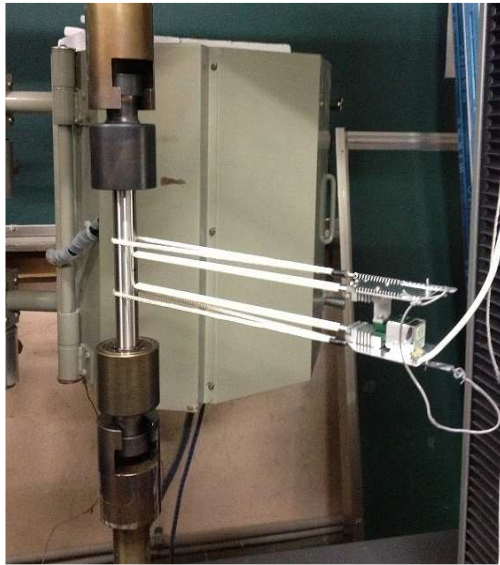
현재 증기발생기 전열관에 대한 건전성 평가에는 설계온도에서 전열관의 항복강도와 인장강도가 중요한 입력 변수로 적용되고 있다.<sup>(1)</sup> 그러나, 전열관 제작사에서는 상온의 인장물성치만 재료성적서 (Certified Material Test Report, CMTR)로 제공하고 있다. 따라서, 현재 전열관의 건전성 평가에 필요한 설계온도의 항복강도와 인장강도는 상온의 항복강도와 인장강도에 ASME Sec.II<sup>(4)</sup>의 온도 보정계수를 적용하여 결정하고 있다.<sup>(1)</sup> 그러나, 아직까지 이와 같은 방법의 타당성이 국내 원전의 증기발생기 전열관을 대상으로 검토된 바 없다. 따라서, 결함이 존재하는 증기발생기 전열관의 건전성 평가에 대한 신뢰성 확보를 위해서는 이와 같은 설계온도 조건의 항복강도와 인장강도 결정 방법이 타당한지 확인이 필요하다. 또한, 결함이 존재하는 증기발생기 전열관에 대한 상세한 구조건전성 평가를 위해서는 항복강도와 인장강도 뿐 아니라 전열관에 대한 응력-변형률 데이터가 확보되어야 한다. 그러나, 국내 뿐 아니라 해외 자료에서도 Alloy 690TT 전열관에 대한 설계온도 조건의 응력-변형률 데이터는 제공되지 않고 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내 원전의 증기발생기 전열관으로 사용되고 있는 Alloy 690TT에 대한 인장시험을 상온과 원전 1차측 설계온도인 343°C에서 수행하였다. 인장시험은 시편의 방향성을 고려하여 축방향과 원주방향으로 구분하여 각각 수행되었다. 인장시험을 통해 Alloy 690TT에 대한 상온과 설계온도의 응력-변형률 데이터를 얻고, 시험 온도와 시편 방향에 따른 인장물성치와 변형거동을 살펴보았다. 또한, 시험 결과

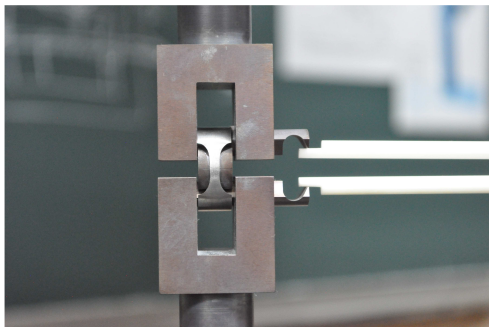


**Fig. 1** Dimensions of tensile specimens used in the experiment

를 이용하여 현재 설계온도 조건에서 전열관의 항복강도와 인장강도를 결정하는데 적용하고 있는 ASME Sec.II<sup>(4)</sup>의 온도 보정계수에 대한 적절성을 살펴보았다.



(a) Axial tensile test



(b) Circumferential tensile test

Fig. 2 Test set-up for axial and circumferential specimens

## 2. 재료 및 시험절차

### 2.1 재료 및 시편

본 연구에서는 국내 원전의 증기발생기 제작에 사용되고 있는 Alloy 690TT 전열관이 사용되었다. Table 1과 2는 CMTR에 제시된 Alloy 690TT 전열관의 상온 인장물성치, 형상, 그리고 화학조성을 나타낸 것이다.

축방향 인장시험을 위한 시편으로는 Fig. 1(a)의 튜브시편이 사용되었다. Fig. 1(a)의 튜브시편은 ASTM E8-09<sup>(5)</sup>에 제시된 표준시편으로 인장시험기에 작용되는 하중이 크고 시편 가공에 많은 소재가 소요되는 단점이 있지만, 다른 형태의 시편에 비해 시험 결과의 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다. 원주방향 인장물성치 평가를 위한 시편으로는 링 형태의 시편이 사용되었다(Fig. 1(b)). 링 시편은 핵연료봉의 원주방향 인장물성치 평가에 흔히 사용되고

있으며,<sup>(6,7)</sup> 증기발생기 전열관의 원주방향 인장물성치 평가에도 적용된 바 있다.<sup>(8)</sup> 링 시편은 표준시편이 아니므로 최적의 시편 형상은 튜브의 직경과 두께, 그리고 재질 특성에 따라 결정된다. 본 연구에서는 기존 연구 결과들<sup>(6~8)</sup>을 기초로 유한요소해석을 통해 시편 형상을 결정하였다.

### 2.2 시험 방법 및 절차

#### 2.2.1 축방향 인장시험

증기발생기 전열관의 축방향 인장물성치를 평가하기 위한 시험은 상온과 원전 1차측 설계온도인 343°C의 공기분위기에서 각각 수행되었다. 시험에는 5톤 용량의 로드 셀이 장착된 기계식 만능시험기가 사용되었다. 인장시험에서 시편의 변위는 고온용 신물계를 사용하여 측정하였다. Fig. 1(a)에 나타낸 것과 같이 시편의 게이지길이는 시편 내경 ( $d_i$ )의 4 배로 약 70 mm이다. 그러나, 고온용 신물계의 게이지 길이가 25 mm이므로 시편에서 최종 파단이 예상되는 중심부에 신물계를 설치하였다(Fig. 2(a)). 고온 시험의 경우, 시편의 상·하부(시편 중심에서  $\pm 25$  mm 위치)에 K-type 열전대를 용접하여 시편의 온도를 측정하고 전기로를 제어하였으며, 시편 상·하부의 온도가  $343 \pm 2^\circ\text{C}$  범위에서 약 20분 이상 유지된 후 시험을 시작하였다. 모든 시험에는 2 mm/min의 하중선변위 속도( $\dot{\epsilon} = 4.76 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )가 적용되었으며, 초당 1개씩 하중과 변위 데이터를 취득하였다.

#### 2.2.2 원주방향 인장시험

전열관의 원주방향 인장물성치를 평가하기 위해서 링 시편을 사용하여 인장시험을 수행하였다. 시험은 상온과 343°C의 공기분위기에서 각각 수행되었다. 시험에는 1톤 용량의 로드 셀이 장착된 기계식 만능시험기가 사용되었다. 링 시편의 경우에는 신물계를 시편의 평행부에 직접 설치하여 변위를 측정하는 것이 불가능하므로 Fig. 2(b)와 같이 시편에 하중을 전달하는 핀에 게이지를 거치하여 하중선 변위를 측정하였다. 고온 시험의 경우, 시편의 상·하부에 열전대를 용접하여 시편의 온도를 측정하고 전기로를 제어하였으며, 시편 상·하부의 온도가  $343 \pm 1^\circ\text{C}$  범위에서 약 20분 이상 유지된 후 시험을 시작하였다. 원주방향 인장시험에서는 시편의 균일부 길이가 짧은 것을 고려하여 0.2 mm/min의 하중선 변위 속도를 적용하였으며 초당 1개씩 하중과 변위 데이터를 취득하였다.

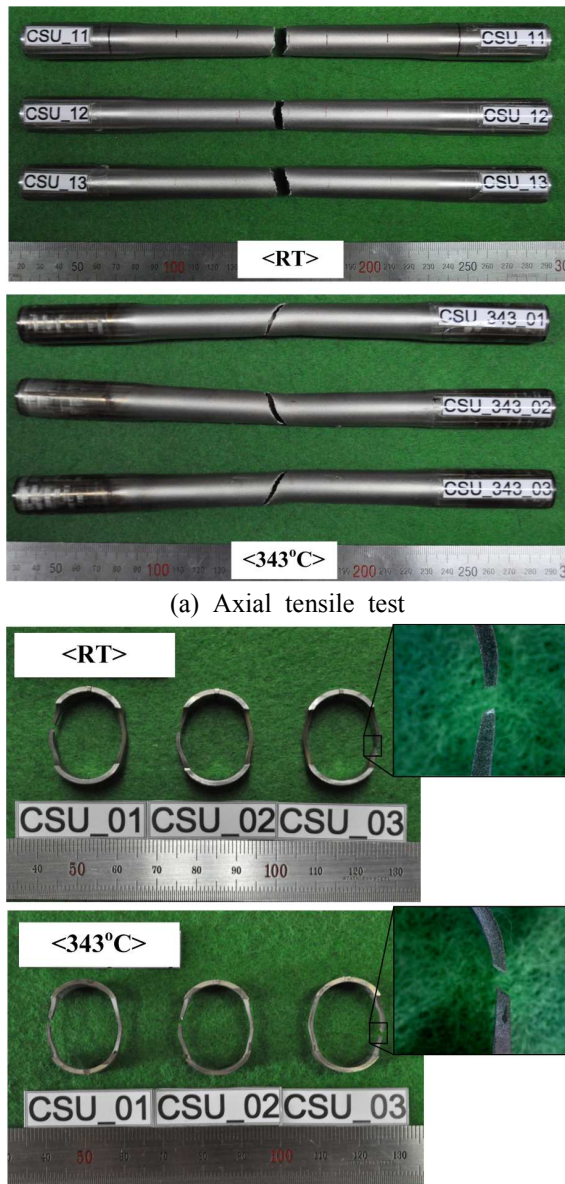
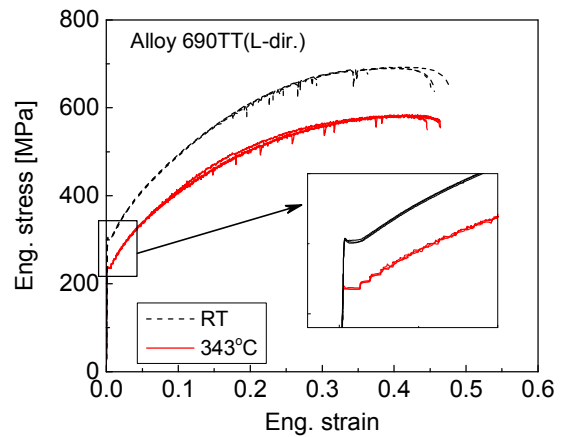


Fig. 3 Failure mode of tensile specimens

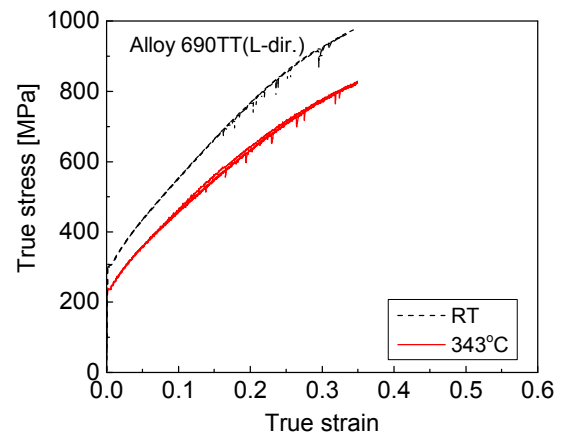
### 3. 시험 결과 및 토의

#### 3.1 손상모드

Fig. 3(a)에 나타낸 것과 같이 상온과 343°C에서 수행된 축방향 인장시험 결과, 모든 시편에서 네킹과 최종 파단이 시편의 게이지길이 내에서 발생하였다. 따라서, 튜브시편을 사용한 축방향 인장시험 결과는 모두 유효한 것으로 판단된다. 시편의 손상 형태를 살펴보면 상온에서는 최종 파단면이 시편의 길이방향과 거의 수직을 이루는 반면, 343°C에서 시험된 튜브시편의 최종 파단면은 시편의 길이방향과



(a) Engineering stress-strain curves



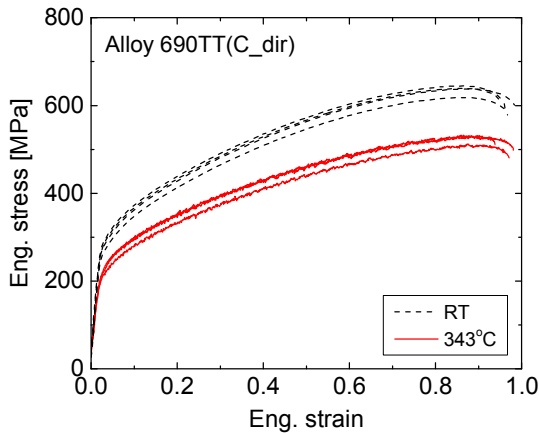
(b) True stress-strain curves

Fig. 4 Engineering and true stress-strain curves of Alloy 690TT SG tube in axial direction at RT and 343°C

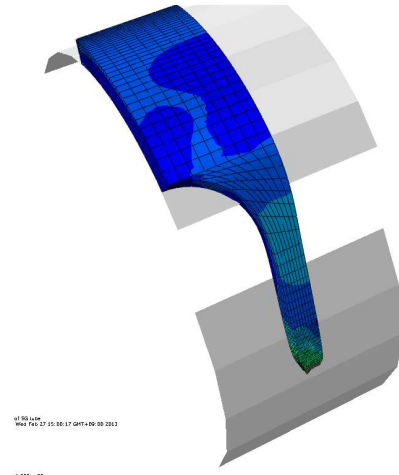
약 35~40° 정도 경사를 이루는 것을 알 수 있다. 일부 시편에서는 경사면을 따라 나선형으로 균열이 전파되었다. 상온과 343°C에서 이와 같은 손상모드의 차이는 온도에 따른 강도와 변형 모드의 변화에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나, 보다 정확한 설명을 위해서는 파면이나 결정립의 변형과 같은 미세조직적인 분석이 필요하다.

링 시편을 이용한 원주방향 인장시험의 경우, 시험 온도에 관계없이 링 시편의 평형부 내에서 네킹 후 최종 파단이 발생하였다(Fig. 3(b)). 다만, 링 시편의 양쪽 평형부 중 한쪽에서만 파단이 발생하였다. 파단면을 살펴보면 상온에 비해 343°C 시편에서는 두께 방향으로 전단 파면이 보다 뚜렷한 것을 알 수 있다. 이것은 축방향 인장시험에서 관찰된 온도에 따른 손상모드의 변화와 유사한 원인에 기인하는 것으로 판단된다.





**Fig. 5** Engineering stress-strain curves of Alloy 690TT SG tube obtained from circumferential tensile tests



**Fig. 6** Finite element (FE) simulation for circumferential tensile test

### 3.2 Alloy 690TT 전열관의 인장 특성

#### 3.2.1 축방향 응력-변형률 거동

Fig. 4는 축방향 인장시험에서 주어진 상온과 343°C의 공칭응력-공칭변형률 곡선과 네킹까지의 진응력-진변형률 곡선을 나타낸 것이다. 공칭응력-공칭변형률 곡선을 살펴보면, 상온과 343°C에서 모두 항복점 현상이 관찰되었다. 상온의 경우에는 모든 시편이 15~35%의 변형률 영역에서 수차례의 응력강하(Stress drop)를 보였다. 343°C의 공칭응력-공칭변형률 곡선에서는 전체 소성변형 영역에서 미세한 응력 강하현상이 관찰되었다. 343°C에서 관찰되는 응력강하 현상은 Ni-합금이 200°C 이상에서 소성 변형될 때 나타나는 동적변형시효 현상에 기인하는 Serration인 것으로 알려져 있다.<sup>(9,10)</sup> 그러나, 상온에서 관찰된 응력강하 현상은 아직까지 명확한 원인을 파악하지 못한 상태이다. 다만, 유사한 강도와 동일한 형상을 갖는 TP304 스테인리스강 튜브를 동일한 시험기와 방법으로 시험한 결과에서는 응력강하 현상이 관찰되지 않았다. 따라서, Alloy 690TT 전열관에서 관찰된 응력강하 현상이 실험상의 문제에 기인한 것으로 단정하기 어렵다. 또한, 재료의 변형거동으로 설명하기도 어려운 현상이므로 시험기와 시편 그림을 교체한 추가 시험과 분석이 필요하다.

상온과 343°C의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 비교하면, 온도 증가에 따라 전체적으로 강도는 뚜렷이 감소하였으나, 343°C에서 연신율은 상온과 유사한 것으로 파악되었다. 또한, 진응력-진변형률 곡선의 비교(Fig. 4(b))에서 알 수 있는 것과

같이 상온에 비해 343°C에서 가공경화 능력은 약간 감소하지만, 전체적인 가공경화 경향은 상온과 유사한 것으로 파악되었다. 실제 Holloman식(식 (1))<sup>(11)</sup>을 이용하여 가공경화지수(n)를 구하면, Table 3에 나타낸 것과 같이 온도 증가에 따라 가공경화률이 1~2% 감소하는 것을 알 수 있다.

$$\sigma_T = K\epsilon_T^n \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_T$ 와  $\epsilon_T$ 는 진응력과 진변형률이다.

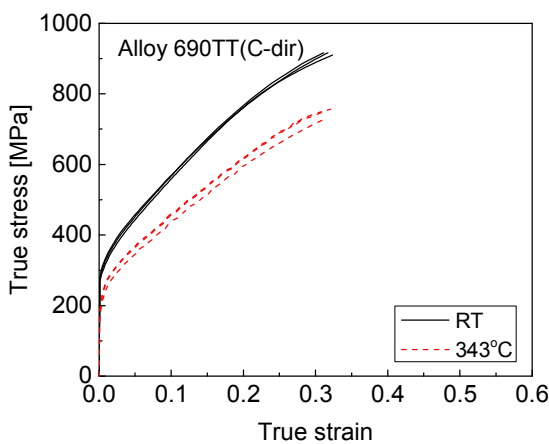
#### 3.2.2 원주방향 응력-변형률 거동

Fig. 5는 원주방향 인장시험에서 주어진 하중-변위에 링 시편의 평형부 단면적과 길이를 고려하여 구한 공칭응력-공칭변형률 곡선을 나타낸 것이다. 시험 온도에 관계없이 축방향 인장시험에서 관찰된 항복점 현상은 관찰되지 않았으며, 상온에서는 변형에 따른 응력강하 현상도 관찰되지 않았다. 그러나, 343°C에서는 축방향 시험 결과와 같이 동적변형시효 현상에 의한 응력강하가 관찰되었다. Fig. 5에서 상온과 343°C의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 비교하면, 전체적인 경향은 유사하지만 상온에 비해 343°C에서 강도가 감소하였으며, 연신율은 유사한 것으로 나타났다.

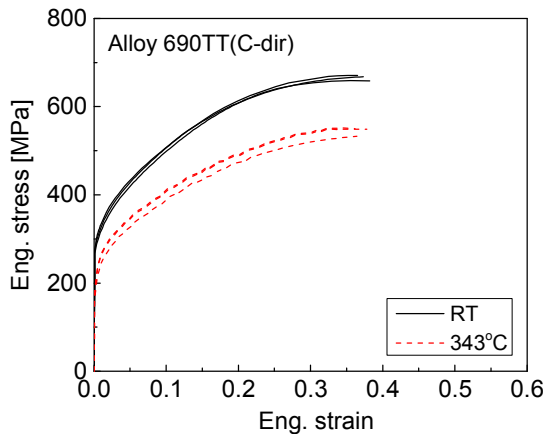
앞서 하중-변위 데이터에서 직접 구한 Fig. 5의 공칭응력-공칭변형률 곡선으로부터 상온과 343°C의 상대적인 인장 특성 차이는 파악할 수 있었다. 그러나, Fig. 5의 공칭응력-공칭변형률 곡선은 링 모양의 시편이 펼쳐지면서 발생하는 굽힘하중과 변형이 포함된 하중과 변위로부터 계산되었

**Table 3** Tensile properties of Alloy 690TT SG tube in axial and circumferential directions at RT and 343°C

	Axial direction		Circumferential direction	
	RT	343°C	RT	343°C
	Mean (Std. Dev.)	Mean (Std. Dev.)	Mean (Std. Dev.)	Mean (Std. Dev.)
Yield stress, YS [MPa]	302.1 (1.78)	236.6 (2.63)	293.8 (8.07)	215.9 (23.54)
Tensile stress, UTS [MPa]	690.6 (1.46)	583.5 (0.91)	655.7 (13.50)	544.3 (10.29)
Uniform elongation, UE [%]	40.0 (0.78)	41.1 (0.50)	39.2 (3.91)	36.9 (2.10)
Total elongation, TE [%]	46.1 (1.32)	45.7 (1.07)	-	-
Hardening exponent, n	2.232 (0.0145)	2.196 (0.0349)	2.585 (0.1162)	2.375 (0.0152)



(a) True stress-strain curves



(b) Engineering stress-strain curves

**Fig. 7** True and engineering stress-strain curves of Alloy 690TT SG tube in circumferential direction obtained from FE simulation

다. 따라서, Fig. 5의 공칭응력-공칭변형률 곡선은 전열관의 원주방향 응력-변형률 거동을 정확히 보여주지 못하고 있다. 실제 Fig. 5에서 원주방향 연신율이 95% 이상으로 평가되는 비현실적인 값을 보였다. 이러한 링 시편 시험의 한계를 해결하기 위해서 본 연구에서는 원주방향 인장시험

결과와 유한요소 시뮬레이션을 결합하여 네킹까지의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 구했다. 즉, 링 시편 시험에 대한 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 시험에서 주어진 하중-변위 곡선을 가장 잘 예측하는 진응력-진변형률을 얻고, 이것으로부터 식 (2)를 적용하여 네킹까지의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 역으로 계산하였다.

$$\sigma_E = \frac{\sigma_T}{\exp(\epsilon_T)}, \quad \epsilon_E = \exp(\epsilon_T) + 1 \quad (2)$$

여기서,  $\sigma_E$ 와  $\epsilon_E$ 은 공칭응력과 공칭변형률이다. 이와 같이 링 시편을 이용한 시험 결과로부터 원주방향 응력-변형률 곡선을 결정하는 방법은 이전 연구에서 적용성이 입증된 바 있다.<sup>(6,8)</sup> Fig. 6은 본 연구에서 적용한 유한요소 시뮬레이션의 예를 보여주는 것으로, 대칭성을 고려하여 시편의 1/8만 모델링하였다. 시뮬레이션에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS code<sup>(12)</sup>가 사용되었다. 시뮬레이션에서 시편과 하중 핀의 마찰 계수는 선행 연구 결과를 참조하여 0.15을 적용하였다.<sup>(8)</sup>

Fig. 7은 링 시편을 이용한 인장시험과 유한요소 시뮬레이션을 결합하여 구한 상온과 343°C의 원주방향 진응력-진변형률 곡선과 공칭응력-공칭변형률 곡선을 나타낸 것이다. 비록 유한요소 시뮬레이션을 통해 네킹까지의 공칭응력-공칭변형률 곡선만 구할 수 있지만, 이들 곡선으로부터 항복강도, 인장강도, 그리고 균일연신을 등의 인장물성치와 응력-변형률 거동은 파악할 수 있다. Fig. 7(b)의 공칭응력-공칭변형률 곡선을 살펴보면, 축방향 인장시험 결과와 유사하게 상온에 비해 343°C에서 강도는 감소하지만 균일연신율은 거의 유사한 값을 보였다. 또한, 상온과 비교하여 설계온도인 343°C에서 가공경화률이 감소하지만

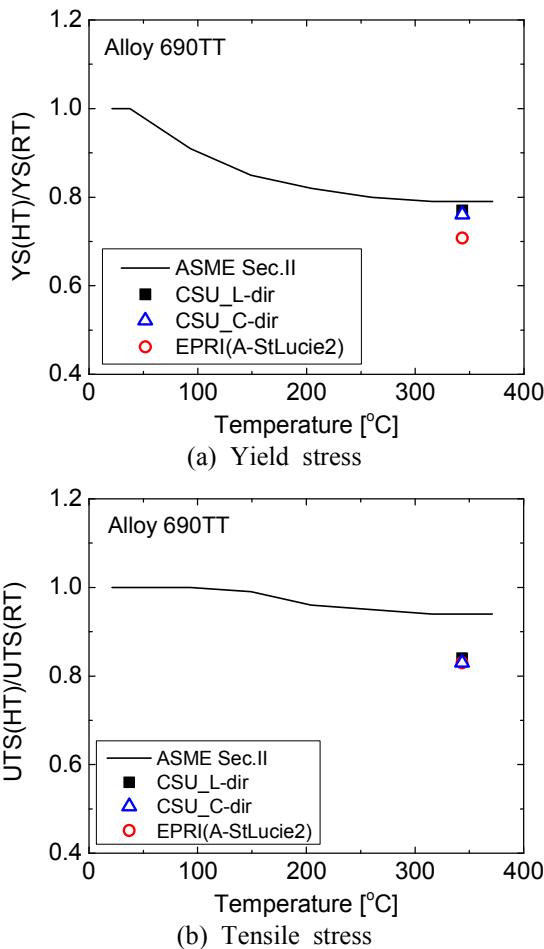


Fig. 8 Comparison of 343°C to RT strength ratios of Alloy 690TT evaluated by ASME Sec.II and present experiment

(Table 3), 전체적인 가공경화 경향은 변화가 없는 것으로 파악되었다(Fig. 7(a)).

3.2.3 온도와 방향에 따른 인장물성치

앞서 인장시험과 유한요소 시뮬레이션을 통해 Alloy 690TT 전열관의 축방향과 원주방향 응력-변형률 데이터를 상온과 설계온도인 343°C에서 확보하였다. 이들 결과로부터 시험온도와 방향에 따른 인장물성치의 차이를 살펴보기 위해서, Fig. 4와 Fig. 7로부터 항복강도, 인장강도, 균일연신율, 총연신율을 구해 Table 3에 정리하였다.

Table 3의 결과를 살펴보면 시편의 방향에 관계없이 상온에 비해 설계온도에서는 항복강도와 인장강도가 각각 약 20~25%와 15% 정도 감소하였다. 그러나 연신율은 시험 온도에 관계없이 거의 유사한 값을 보였다. 한편, 시편의 방향에 따라 인장물성치를 비교하면, 시험 온도에 관계없

이 원주방향이 축방향에 비해 약 5~10% 정도 낮은 항복강도와 인장강도를 보였다. 연신율도 축방향에 비해 원주방향에서 약간 낮은 값을 보였으나 차이는 미미하였다. Alloy 690TT 증기발생기 전열관에서 원주방향 인장물성치가 축방향에 비해 약간 낮은 값을 보이는 것은 상온에서 수행된 기존의 인장시험 결과<sup>(8)</sup>에서도 관찰된 것으로 증기발생기 전열관의 제작 방법과 관련이 있는 것으로 판단된다.

3.3 ASME Sec.II 온도 보정계수의 타당성 검토

앞서 설명한 바와 같이 현재 적용되고 있는 증기발생기 전열관에 대한 평가 절차<sup>(1)</sup>에서는 전열관에 대한 설계온도의 항복강도와 인장강도를 상온의 항복강도와 인장강도에 ASME Sec.II<sup>(4)</sup>의 온도 보정계수를 적용하여 결정하고, 이것을 건전성 평가에 적용하고 있다. 따라서, 설계온도 조건의 항복강도와 인장강도를 구하기 위해 사용되는 온도 보정계수의 신뢰성이 전열관에 대한 건전성 평가 결과의 신뢰성에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서, 여기서는 인장시험 결과를 이용하여 Alloy 690TT 전열관에 대한 ASME Sec.II의 온도 보정계수의 타당성을 살펴보았다.

Fig. 8은 Alloy 690TT 전열관에 대한 343°C의 항복강도와 인장강도를 상온의 항복강도와 인장강도로 정규화하여 항복강도와 인장강도에 대한 ASME Sec.II<sup>(4)</sup>의 온도 보정계수와 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 시편의 방향에 관계없이 상온과 비교하여 343°C에서 Alloy 690TT 전열관의 항복강도와 인장강도의 감소율이 ASME Sec.II의 감소율보다 더 큰 것으로 나타났다. ASME Sec.II와 비교하여 축방향 항복강도는 4.1% 정도 더 감소하였으며, 축방향 인장강도는 ASME Sec.II 보다 12.7% 이상 더 감소한 것으로 평가되었다. 원주방향의 경우에도 상온 대비 343°C에서 항복강도와 인장강도의 감소 정도는 축방향의 경우와 거의 일치하였다.

따라서, 설계온도에서 실제 Alloy 690TT 전열관의 항복강도와 인장강도는 상온의 항복강도와 인장강도에 ASME Sec.II<sup>(4)</sup>의 온도 보정계수를 적용하여 예측한 값보다 더 낮은 것으로 평가되었다. 이것은 전열관의 구조건전성 평가에 ASME Sec.II의 온도 보정계수를 적용하여 구한 설계온도의 강도를 적용하는 현재의 평가 절차가 보수적이지 못하다는 것을 의미한다. 따라서, 보다 다

양한 증기발생기 전열관 재료에 대한 설계온도의 인장시험 데이터를 확보하여, ASME Sec.II<sup>(4)</sup>의 온도 보정계수 적용에 대한 적절성을 파악할 필요가 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 상온과 원전 1차측 설계온도인 343°C에서 증기발생기 전열관 재료인 Alloy 690TT에 대한 축방향과 원주방향 인장시험을 수행하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 축방향 인장시험 결과, 상온과 343°C에서 항복점 현상이 관찰되었으며, 343°C에서는 소성 변형 영역에서 serration이 관찰되었다.

(2) 시편의 방향에 관계없이 상온에 비해 343°C에서 항복강도와 인장강도는 뚜렷한 감소를 보였으나, 연신율은 거의 차이가 없었다. 또한, 상온과 비교하여 343°C에서 가공경화 거동의 뚜렷한 변화는 없었다.

(3) 시험 온도에 관계없이 원주방향이 축방향에 비해 낮은 항복강도와 인장강도를 보였다. 그러나, 전열관에서 방향에 따른 연신율 차이는 매우 작았다.

(4) 상온 대비 343°C에서 Alloy 690TT 전열관의 항복강도와 인장강도 감소는 ASME Sec.II의 온도 보정계수에 의해 예측된 값보다 더 큰 것으로 평가되었다.

#### 후 기

본 연구는 2012년도 산업통산부 재원으로 한국 에너지기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행된 연구과제의 결과입니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) EPRI, 2001, "Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook," Final Report 1001191.
- (2) Moon, S.-I., Chang, Y.-S., Kim, Y.-J., Lee, J.-H., Song, M.-H., Choi, Y.-H. and Hwang, S.-S., 2006, "Assessment of Plastic Collapse Behavior for Tubes with Collinear Cracks," *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 73, pp. 296~308.
- (3) KHNP, 2013, "Development of Technologies for Improving Integrity of Axial ODS in OPR100 Steam generator," Final Report, TR-A10TX10.
- (4) ASME, ASME B&PV Code Sec. II, "Materials," 2004ed.
- (5) ASTM, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM E08-09.
- (6) Martin-Rengel, M.A., Gomez Sanchez, F.J., Ruiz-Hervias, J., Caballero, L. and Valiente, A., 2012, "Revisiting the Method to Obtain the Mechanical Properties of Hydrided Fuel Cladding in the Hoop Direction," *J. Nucl. Mater.*, Vol. 429, pp. 276~283.
- (7) Arsene, S., Bai, J.B. and Bompard, P., 2003, "Hydride Embrittlement and Irradiation Effects on the Hoop Mechanical Properties of Pressurized Water Reactor (PWR) and Boiling-Water Reactor (BWR) Zircaloy Cladding Tubes: Part 1. Hydride Embrittlement in Stress-Relieved, Annealed, and Recrystallized Zircalloys at 20°C and 300°C," *Metal. and Mater. Trans. A*, Vol. 34A, pp.553~566.
- (8) Cho, S.-K., Bae, B.-K. and Seok, C.-S., 2005, "Evaluation of the Tensile Properties of a Steam Generator Tube," *Proc. of 2012 KSME Spring meeting*, pp.457~462.
- (9) Hanninen, H., Ivanchenko, M., Yagodzhinsky, Y., Nevdacha, V., Ehrnsten, U. and Aaltonen, P., 2005, "Dynamic Strain Aging of Ni-base Alloys Inconel 600 and 690," *Proc. of the 12<sup>th</sup> ICEDM in Nuclear Power System - Water Reactors -*, pp.1423~1430.
- (10) Ivanchenko, M., Yagodzhinsky, Y., Ehrnsten, U., Karlsen, W. and Hanninen, H., 2009, "Manifestations of DSA in Austenitic Stainless Steels and Inconel Alloys," *Proc. of the 20<sup>th</sup> International Conference on Strength Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20)*, SMiRT 20-Divition 1, Paper 2013.
- (11) Dieter, G.E., 1988, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, London, pp. 283~289.
- (12) ABAQUS User manual, version 6.12, Hibbitt, Karlson & Sorensen, 2013.