

Inconel 617 노치시편의 상온 및 고온 인장실험 해석

오창식* · 마영화** · 윤기봉*** · 김윤재†

Analysis of Notched Bar Tensile Tests for Inconel 617 at Room and Elevated Temperatures

Chang-Sik Oh, Young-Wha Ma, Kee-Bong Yoon and Yun-Jae Kim

Key Words : Tensile test(인장실험), Notched tensile specimen(노치인장시편), Tensile property(인장물성), Finite element analysis(유한요소해석), Elevated temperature (고온)

Abstract

In this paper, notched bar tensile tests of Inconel 617 were performed at room (20°C) and elevated (800°C) temperature. Finite element analyses are also performed. It is found that, at the room temperature, smooth bar tensile test results could be used to simulate notched bar tensile tests. However, at the elevated temperature, notched bar tensile test results can not be simulated from smooth bar tensile test results. Metallurgical examination reveals that strength weakening results from many cavities over the specimens for smooth bar test at the elevated temperature. "True" tensile properties at the elevated temperature is found using FE simulations. It also suggests that cautious should be taken to determine tensile properties of Inconel 617 at elevated temperatures using smooth bar tests.

1. 서 론

미래의 에너지 수요의 원자력의 능동적인 대응을 위해 미래형 Gen IV 원전에 대한 연구가 국제적으로 활발히 진행되고 있다. 미래형 원전은 800°C 이상의 고온환경에서 작동하며, VHTR(very high temperature reactor)의 경우에는 1000°C까지의 가동온도를 요구한다. 따라서 고온환경하에서 사용될 수 있는 원전 기기 설계를 위해 이에 적합한 재료 개발이 매우 중요하다^{1,2}. 그 중 한가지 재료가 ASME Code Case 로 제시중인 Inconel 617 재료이다³. Inconel 617 재료는 Ni 합금으로서 고온 저항성이 뛰어난 재료로 알려져 있다. 예를 들면, 고온에서도 항복응력과 인장강도가 크게 떨어지지 않으며, 크리프 특성도 뛰어나다. 그러나 이러한

특성자료들은 대부분 6,70 년대에 수행된 실험결과를 바탕으로 작성된 결과이므로, 앞으로 이 재료를 사용하기 위해서는 검증실험이 이루어져야 한다. 따라서 본 논문에서는 Inconel 617 의 상온 및 고온 인장실험을 통해 인장특성을 관찰하였으며, 실험결과로부터 얻어진 인장물성을 이용하여 유한요소해석을 통한 고온기기설계의 가능성을 살펴보고자 한다.

2. 상온 및 고온 인장실험

2.1 고온 인장실험 장치

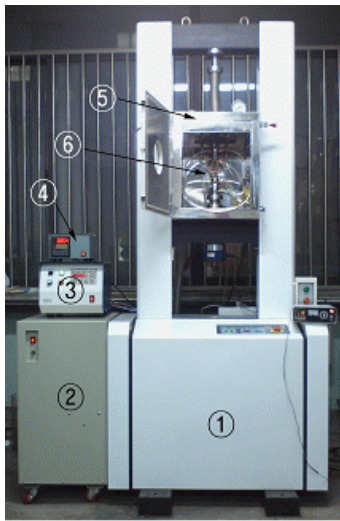
기존의 고온 재료물성 측정을 위한 가열로는 800°C 이하에서는 안정적으로 사용할 수 있으나, 그 이상의 온도 범위에서는 실험상의 위험성 및 장비 안정성 등이 확보되지 않아 사용에 한계가 있다. 따라서 800°C 이상의 초고온에서 재료의 기계적 거동 특성을 평가하기 위해서는 해당 온도범위에서도 안정적으로 온도제어가 가능한 고온시험시스템이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이러한 조건들을 만족하는 시스템으로 유도가열로

† 고려대학교 기계공학과
E-mail : kimy0308@korea.ac.kr
TEL : (02)3290-3372 FAX : (02)926-9290

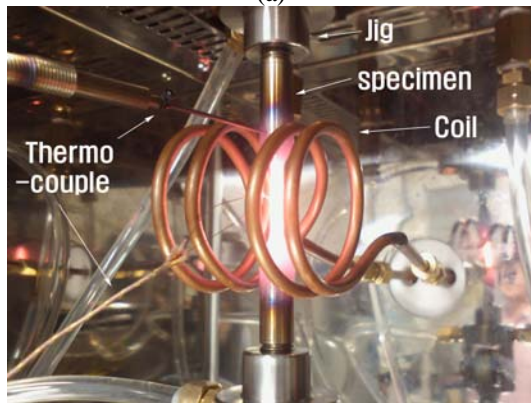
* 고려대학교 기계공학과 대학원

** 중앙대학교 기계공학과 대학원

*** 중앙대학교 기계공학과



- ① Material Tester
- ② Cooling System
- ③ Induction Heating Controller
- ④ Induction Heating Control Panel
- ⑤ Chamber



(b)

Fig. 1 High temperature testing system of notched specimen.

Table 1 Specification of testing system.

Capacity of load cell	50kN (5,000kgf)
Induction heater (PID control)	Maximum 1,100°C
Chamber	Vacuum range: $\sim 10^{-3}$ torr
Cooler (OSW2)	Quantity: 30 ℓ /min, Pressure: 3kg/cm ²
Effective range of tension	~ 490 mm(maximum)
Extensometer range	Maximum 60%
Loading speed	0.1~300mm/min
Resolution	Load: 1/5000, crosshead: 0.001mm, Strain: 0.001mm

(induction heating system)를 선택하여 제작하였다. 시험의 원활한 수행을 위해 냉각 시스템을 장착하였고, 외부 환경(대기환경, 헬륨 분위기 등)에 의한 기계적 거동 특성의 차이를 관찰하기 위해 챔버(chamber)도 장착하였다. 제작된 시스템을 Fig. 1에 보였고, 시스템 사양을 Table 1에 정리하였다.

Table 2 Chemical composition of Inconel 617 (w.t%)

Al	B	C	Co	Cr	Cu	Fe
1.14	0.002	0.09	11.53	21.68	0.05	1.16
Mn	Mo	Ni	P	S	Si	Ti
0.06	9.74	53.94	0.006	<0.001	0.08	0.52



R = ∞, 10, 5, 2

Fig. 2 Experimental specimens; R=∞, 10, 5 and 2.

2.2 인장시험

본 논문에 사용된 시편은 Inconel 617 재료로 만들었으며, 재료의 화학조성은 Table 2에 나타나 있다. 실험에 사용된 시편의 형상에 따라 크게 두가지로 나뉘어진다. 하나는 노치가 없는 평편한 봉상시편이며, 다른 하나는 노치가 있는 봉상시편이다. Fig. 2는 실험에 사용된 봉상시편들을 보여준다. 노치가 있는 봉상시편은 노치반경(R)에 따라 R=10, 5, 2의 세가지이다. 또한 모든 시편에 대해 최소 직경은 6mm이다. 인장실험은 상온(20°C)과 고온(800°C)에서 각각 수행되었다.

2.3 상온 인장실험

상온 인장실험은 20°C 온도조건에서 앞장에서 기술한 네가지 시편에 대해 수행하였다. 인장실험은 ASTM E9M 및 E21에 준하여 변위제어방식으로 0.5mm/min 속도 조건에서 수행하였다. Fig. 3은 네가지 시편에 대한 상온 인장실험 결과를 나타낸 그림이다. 노치가 없는 시편의 경우, 인장강도가 항복강도의 약 2배이며 넥킹이 일어난 후 급격히 파단됨을 알 수 있다. 노치가 있을 경우, 노치반경이 작아짐에 따라 인장강도가 증가하며 연신율은 감소한다. 이것은 노치 선단에 발생하는 삼축응력 때문이다.

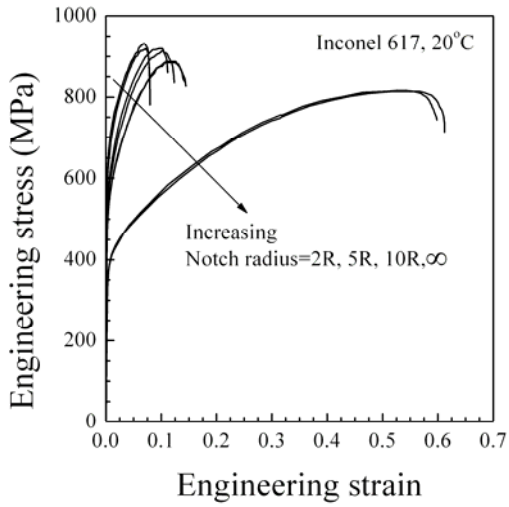


Fig. 3 Experimental tensile results of Inconel 617 at 20°C.

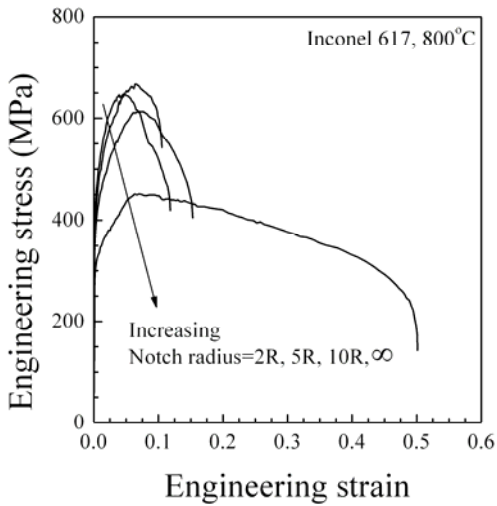
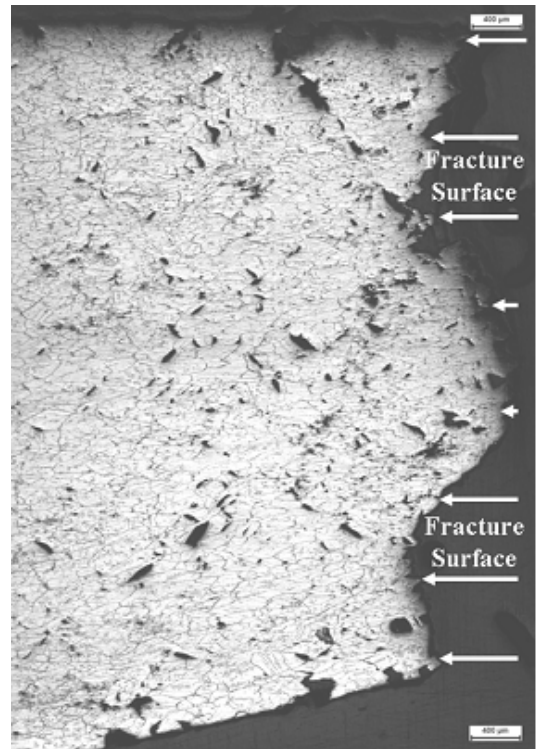


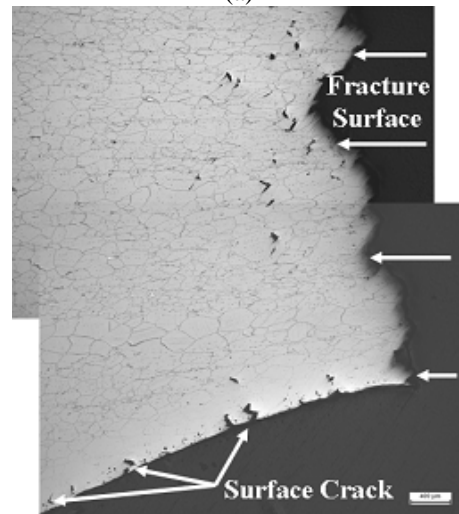
Fig. 4 Experimental tensile results of Inconel 617 at 800°C.

2.4 고온 인장실험

고온 인장실험은 800°C 온도조건에서 앞장에서 기술한 네가지 시편에 대해 수행하였다. 인장실험은 상온 인장실험과 같이 ASTM E9M 및 E21에 준하여 변위제어방식으로 0.5mm/min 속도 조건에서 수행하였으며, 고온 산화 영향을 최소화하기 위해 아르곤 가스 분위기에서 실험하였다. 고온 인장실험 중 온도제어는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 범위 내에서 일정하게 유지시켰다. Fig. 4는 네가지 시편에 대한 고온 인장실험 결과를 나타낸 그림이다. 상온 인장실험의 결과와 같이 notch반경이 감소함에 따라 인장강도가 증가하며, 연신율은 감소한다. 그러나 notch가



(a)



(b)

Fig. 5 Inspection near the fracture surface after tension test at 800°C; (a) for smooth specimen and (b) notched specimen(R=5).

없는 시편의 경우, 대부분의 변형률이 넥킹이 발생한 후에 발생한다. 이것은 notch가 없는 시편의 상온 인장실험 결과와 매우 다른 현상이다. 이러한 현상의 원인을 파악하기 위해 고온 인장실험 후 시편의 길이 방향을 따라 절단한 후 시편 내부를 살펴보았다. 에칭조건은 Kalling's reagent(distilled water-40ml, CuCl_2 -2g, HCl-40ml, Alcohol-40~80ml)를 사용하여 20~30 초 정도 에칭

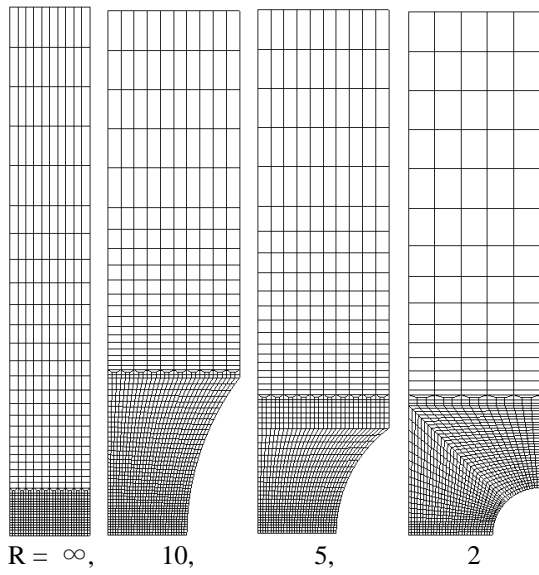


Fig. 6 FE meshes employed in the present work.

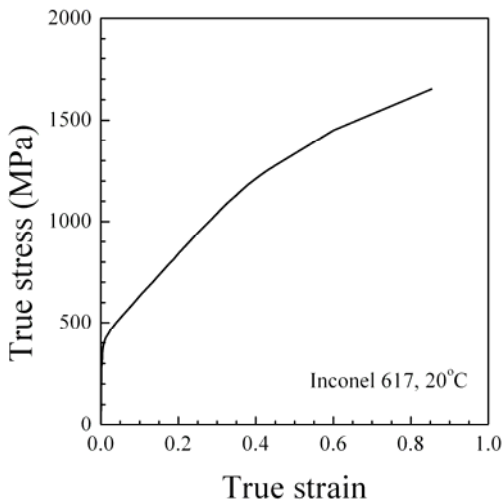
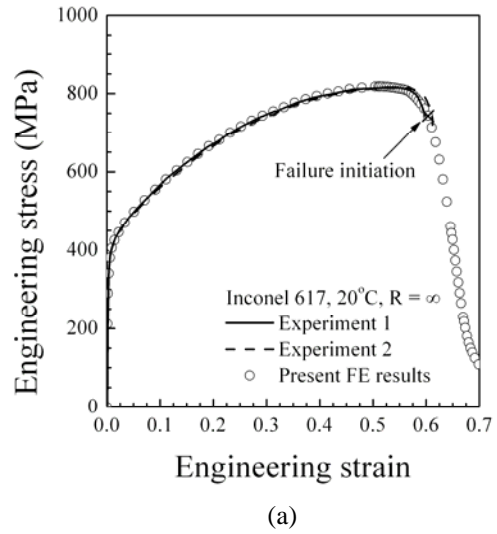
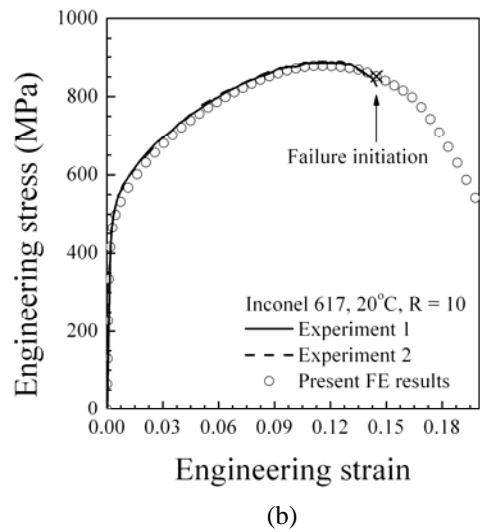


Fig. 7 True stress-strain curve from tensile test for smooth specimen of Inconel 617 at 20°C.

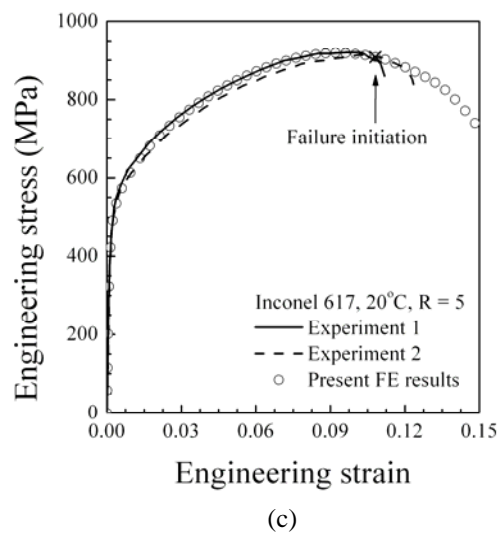
하였다. Fig. 5(a)는 노치가 없는 시편의 파단면 부근의 내부조직을 보여주며, Fig. 5(b)는 $R=5$ 인 노치가 있는 시편의 파단면 부근의 재부조직을 보여준다. 노치가 없는 시편을 관찰한 결과, 시험편의 균일 단면부 전반에 걸쳐 크고 작은 많은 기공들이 관찰되었다. 또한 고온산화에 의한 시험편 표면으로부터 발생 및 성장한 균열(Oxidation crack)들이 관찰되었다. 특히 이러한 손상들은 넥킹 부위에서 집중적으로 발생하였다. 반면 $R=5$ 인 노치가 있는 시편의 경우, 노치가 없는 시편의 경우와 달리 내부 기공과 산화균열은 노치부의 최소직경 부위에서만 관찰되었다. $R=10, 2$ 인 노치가 있는 시편의 경우도 이와 비슷한 현상이 관찰되었으며, 자세한 사진은 지면상 생략하였다.



(a)



(b)



(c)

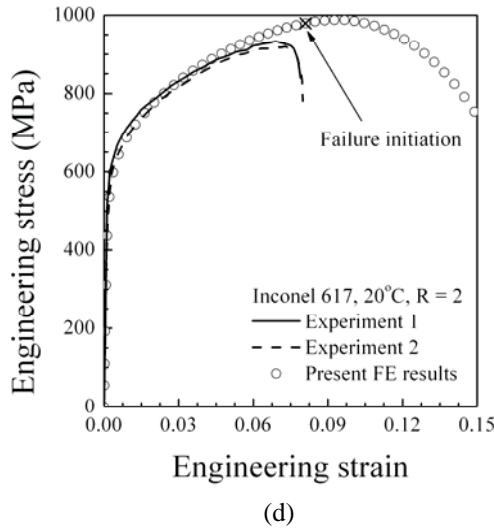


Fig. 8 Tensile test simulations comparing with the experimental results at 20°C; (a) $R=\infty$, (b) $R=10$, (c) $R=5$, (d) $R=2$.

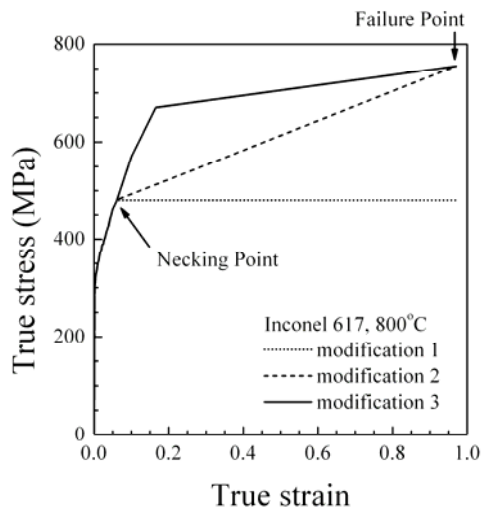


Fig. 9 True stress-strain curve from tensile test for smooth specimen of Inconel 617 at 800°C.

3. 유한요소 해석

발전소 기기의 유한요소 해석을 수행하기 위해서는 재료의 인장곡선을 얻어야 한다. 이때 노치가 없는 시편의 인장실험으로부터 얻은 인장곡선을 이용하여 발전소 기기의 유한요소 해석이 수행되는데, 본 논문에서는 특정 기기를 대신하여 노치가 있는 시편의 인장실험 모사를 하였다. Fig. 6은 해석에 사용된 상온 및 고온 인장시편 모델이며, 실험에 사용된 시편과 동일한 형상조건을 가

진다. 축대칭 조건의 2 차원 해석을 수행하였으며, 해석은 ABAQUS 를 사용였다⁴.

3.1 상온 인장 해석

해석에 사용된 Inconel 617의 재료물성은 노치가 없는 시편의 상온 인장실험 결과로부터 Fig. 7과 같이 진응력-진변형률 곡선을 사용하였다. 다음과 같이 표현되는 Bridgman correction⁵을 사용하여 파단응력을 수정하였으며, 수정된 파단점과 넥킹점을 직선으로 연결함으로써 넥킹이후의 진응력-변형률 곡선을 구하였다.

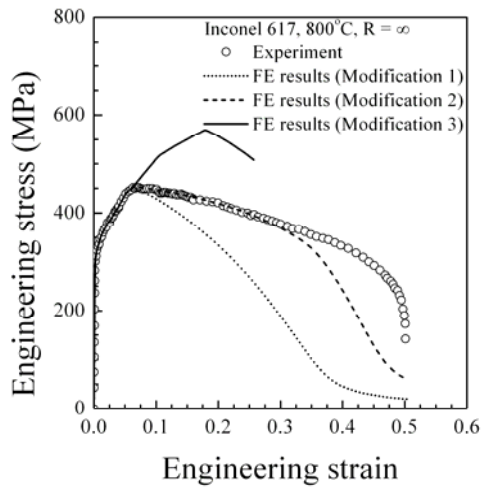
$$\tilde{\sigma}_B = B\tilde{\epsilon} \quad (1)$$

$$B = 0.83 - 0.186 \log \tilde{\epsilon} \quad (0.15 \leq \tilde{\epsilon} \leq 3)$$

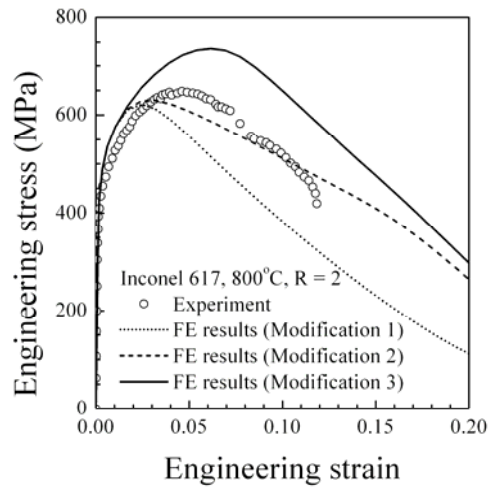
Fig. 8은 Fig. 7의 인장물성을 사용하여 상온 인장실험을 모사한 결과이다. $R=\infty$, 10, 5인 시편에 대한 해석결과는 실험과 매우 잘 일치하지만, $R=2$ 인 시편의 경우 최대인장강도를 높게 예측한다. $R=2$ 인 경우의 해석결과와 실험결과의 차이는 실험시편의 가공의 어려움으로 인해 시편이 손상되었을 것으로 예상된다. 그러나 전반적으로 해석결과와 실험결과가 매우 잘 일치하며, 이는 노치가 없는 시편의 상온 인장실험 결과로부터 발전소 기기의 유한요소 해석이 가능함을 보여주는 결과이다.

3.2 고온 인장 해석

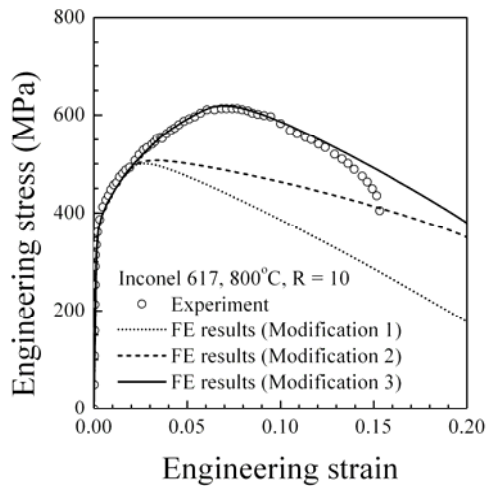
해석에 사용된 물성은 노치가 없는 시편의 고온 인장실험으로부터 얻은 Fig. 9와 같은 진응력-진변형률 곡선을 사용하였다. 이때 파단응력은 Bridgman correction을 사용하지 않았으며, 넥킹후 진응력-진변형률은 Fig. 9와 같이 세가지의 경우로 가정하였다. 첫번째는 넥킹후의 진응력을 넥킹의 진응력으로 일정하게 가정한 경우이고, 두번째는 넥킹점과 파단점을 직선으로 연결한 경우이며, 세번째는 넥킹점을 선형적으로 증가시킨후 수정된 넥킹점과 파단점을 직선으로 연결한 경우이다. Fig. 10은 네가지 시편 형상에 대해 유한요소 해석결과를 나타낸 그림이다. Fig. 10(a)의 노치가 없는 시편의 경우에는 두번째 가정의 인장물성을 사용한 해석결과와 실험결과가 잘 일치한다. 그러나 Fig. 10(b)-(d)의 경우에는 세번째 가정의 인장물성을 사용한 해석결과와 실험결과가 잘 일치한다. 이것은 고온에서의 노치없는 시편의 인장실험 결과가 최대인장강도를 실제 재료의 최대인장강도보다 낮게 측정되었음을 의미한다. 이 원인은 앞장에서 살펴본 내부조직에서 노치가 없는 시편 전반에 걸쳐 크고 작은 많은 기공과 균열이 발생하였기 때문인 것으로 생각된다. 따라서 Inconel 617 재료의 고온 인장물성을 얻기 위한 노치없는 시편의 고온 인장실험은 주의를 기울일 필요가 있다.



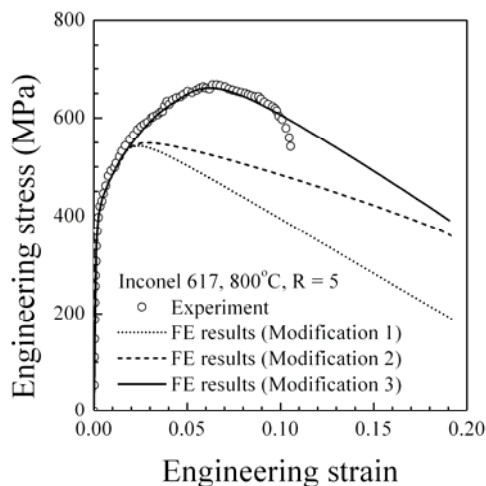
(a)



(d)



(b)



(c)

Fig. 10 Tensile test simulations comparing with the experimental results at 800 °C; (a) $R=\infty$, (b) $R=10$, (c) $R=5$, (d) $R=2$.

4. 결론

본 논문에서는 고온 인장실험을 위한 고온 전용 인장시험기를 제작하였다. 이 시험기를 이용하여 Inconel 617 재료의 상온 및 고온 인장실험을 수행하여 재료의 인장특성을 살펴 보았다. 노치가 없는 시편의 상온 인장실험 결과는 노치가 있는 시편의 상온 인장실험 해석을 위해 바로 사용될 수 있었지만, 고온 인장실험 결과는 최대인장강도를 수정할 필요가 있었다. 이 원인은 고온에서 시편 평면부 전반에 걸쳐 크고 작은 많은 기공과 균열이 발생했기 때문이다. 따라서 Inconel 617 재료의 노치가 없는 시편의 고온 인장실험을 통한 인장특성을 얻는 방법은 주의가 필요하며, 노치가 있는 시편으로부터 노치가 없는 재료의 인장물성을 예측하는 방법이 더욱 타당함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) W Ren and P Rittenhouse, 2005, "Construction of web-accessible materials handbook for Gen IV nuclear reactors," ASME PVP conference, PVP 2005-71780.
- (2) R W Swindeman, M J Swindeman, and W Ren, "A brief review of models representing creep of Alloy 617," ASME PVP conference, PVP 2005-71784.
- (3) Alloy 617 Code Case (draft), 2006.
- (4) ABAQUS Version 6.4., 2003, "User's manual," Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc, RI.
- (5) N. E. Dowling, 1999, "Mechanical behavior of materials," Prentice Hall, New Jersey.