

## 탄소강 배관 재료의 DSA 거동에 미치는 노치 영향 평가

이사용\* · 김진원\*† · 김홍덕\*\*

\* 조선대학교 원자력공학과, \*\* 한수원(주) 중앙연구원

### Evaluation of Notch Effect on the Dynamic Strain Aging Behavior of Carbon Steel Piping Material

Sa Yong Lee\*, Jin Weon Kim\*† and Hong Deok Kim\*\*

\* Dept. of Nuclear Engineering, Chosun Univ., \*\* Central Research Institute, KHNP

(Received July 11, 2011 ; Revised January 1, 2012 ; Accepted January 1, 2012)

**Key Words:** Dynamic Strain Aging(동적변형시효), Notch Effect(노치효과), Carbon Steel Piping(탄소강 배관)

**초록:** 본 연구에서는 탄소강 배관 재료의 동적변형시효 거동에 미치는 노치에 의한 응력과 변형 집중 효과를 파악하기 위해서, 표준 시편과 노치 시편을 이용하여 다양한 온도와 시험 속도에서 인장시험을 수행하였다. 또한, 시편의 형상에 따른 응력과 변형률 상태의 차이를 파악하기 위해서, 각 시편에 대한 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 노치 시편을 이용한 인장시험 결과에서도 표준 시편에서 관찰된 것과 같은 동적변형시효의 증거인 serration과 인장강도의 증가 현상이 관찰되었다. 동일한 시험 속도에서 인장시험이 수행된 경우에 표준 시편에 비해 노치 시편에서 동적변형시효 현상이 고온에서 나타났다. 유한요소 해석 결과에 의하면 표준 시편에 비해 노치 시편에서 동적변형시효가 고온에서 나타나는 것은 노치부에서 응력과 변형의 집중으로 인한 높은 변형률 속도에 기인하는 것으로 확인되었다.

**Abstract:** In this study, tensile tests were performed using standard and notched-bar specimens under two different displacement rates and various temperatures, in order to investigate the effects of the stress and strain concentration at the notched section on the dynamic strain aging (DSA) behavior of carbon steel piping material. In addition, finite element simulations were conducted to evaluate quantitatively the stress and strain states for both types of specimen under uniaxial tensile loading. The results showed that serration and an increase in tensile strength, which are considered to be evidence of DSA in carbon steels, can be observed from tensile tests for notched-bar specimens. It was also found that the temperature region of DSA observed in the notched-bar specimens was higher than the DSA region observed in the standard tensile specimens tested under the same displacement rate. The results of finite element analysis showed that this behavior is associated with the high strain rate at the notched section, which is caused by the stress and strain concentration.

### 1. 서 론

원자력발전소(이하 원전)는 다양한 배관으로 구성되어 있다. 가압중수로(CANDU)형 배관계통 대부분과 가압경수로(PWR)형 원전의 2 차측 배관계통에는 탄소강이 사용되고 있다. 일반적으로 탄소강 재료는 원전 2차측 배관의 운전온도인 150~350°C 범위에서 동적변형시효(Dynamic Strain Aging, DSA) 현상이 발생하며, 탄소강에서 DSA 현상은 재료의 강도를 증가시키고 연성과 파괴인

성을 감소시키는 것으로 알려져 있다.<sup>(1-4)</sup> 탄소강에서 DSA 발생 메커니즘은 재료 내에 침입형 원자 형태로 존재하는 탄소와 질소가 확산하여 소성변형시 이동하는 전위와 상호작용을 일으키기 때문인 것으로 알려져 있다.<sup>(1-3)</sup> 따라서, 탄소강 재료에서 DSA 현상이 발생하는 온도 영역은 재료 내에 침입형 형태로 존재하는 탄소와 질소의 함량과 전위의 이동을 지배하는 변형 속도에 의존한다. 따라서, 원전 탄소강 배관에 대한 건전성 평가의 신뢰성 확보를 위해서는 운전온도에서 DSA 현상이 반영된 재료물성치의 확보가 필요하며, 이를 위해서는 재료물성치 평가시 시험 온도

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

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

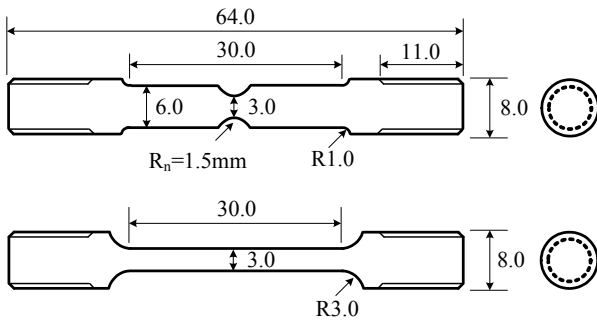


Fig. 1 Dimensions of standard and notched-bar tensile specimens

뿐만 아니라 시험 속도를 적절히 고려하여야 한다.

일반적으로 DSA가 발생하는 온도 영역과 DSA에 의한 재료의 거동은 표준 인장시험을 통해 파악되어 왔다. 즉, 1축 응력 상태에서 재료의 변형에 따른 DSA 거동이 파악되었다. 그러나, 실제 원전 배관계통에 외력이나 변위가 작용되는 경우에 응력과 변형이 집중되는 결함이나 불연속부 등에서 소성변형이 발생되며, 변형이 발생하는 국부 영역의 응력과 변형률 상태는 건전부위와 다른 값을 갖는다. 따라서, 표준 인장시험 시험에서 파악된 재료의 DSA 온도 영역과 거동이 실제 건전성 평가 대상인 결함이 존재하는 배관계통에서의 DSA 거동과 일치하지 않을 수 있다. 이러한 차이는 탄소강 배관의 건전성 평가에서 재료 물성치 측면의 불확실성을 증가시키는 원인이 될 수 있으며, 이를 명확히 파악하기 위해서는 결함에 의한 응력과 변형의 집중이 재료의 DSA 거동에 미치는 영향을 체계적으로 살펴보는 것이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 2종류의 변형 속도와 다양한 온도에서 표준 시험과 결함을 가정한 노치 시험을 이용하여 인장시험을 수행하고, 시험 형상에 따른 DSA 거동의 차이를 살펴보았다. 또한, 표준 시험과 노치 시험에 대한 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 변형이 진행되는 동안 시험에서 응력과 변형률을 평가하였다. 이들 결과를 바탕으로 탄소강 배관 재료의 DSA 거동에 미치는 노치의 영향을 파악하였다.

## 2. 시험 및 실험 절차

### 2.1 재료 및 시험

본 연구에는 표준 시험과 노치 시험을 사용하

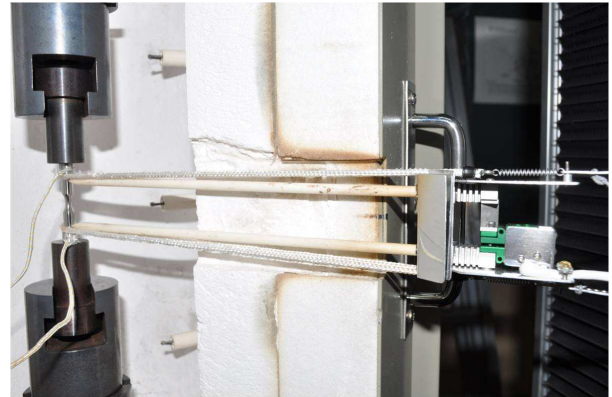
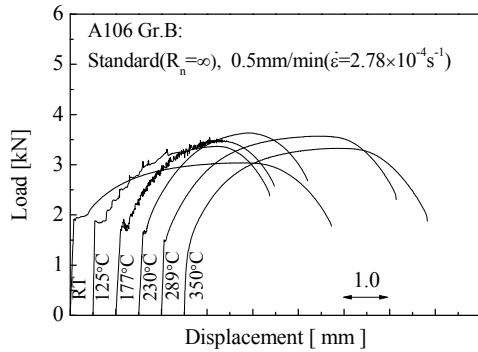


Fig. 2 Set-up for tensile test using notched-bar specimen at high temperature

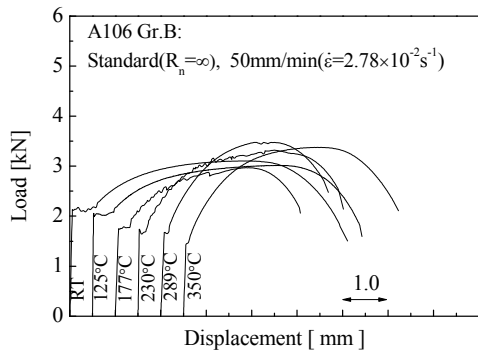
여 인장시험을 수행하였다. 시험 재료로는 PWR형 원전의 2 차측 배관계통에 흔히 사용되는 ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관재가 사용되었다. 시험편은 공칭외경( $D_o$ )과 공칭두께( $t$ )가 각각 114.3 mm와 8.56 mm인 직관(100A, Sch. 80)에서 길이 방향으로 채취하였다. Fig. 1은 시험에 사용된 표준 시험편과 노치 시험편의 형상을 나타낸 것이다. 표준 시험편은 평형부의 직경과 길이가 각각 3 mm와 30 mm인 봉상으로 가공되었다. 노치 시험편 역시 노치부의 직경이 3 mm이며 노치 반경( $R_n$ )과 깊이가 각각 1.5 mm인 봉상으로 가공되었다.

### 2.2 실험 절차

표준 시험편과 노치 시험편을 이용한 인장시험은 모두 원전 2 차측 배관계통의 고온대기온도인 177 °C와 운전온도인 289 °C를 포함하여 상온부터 350 °C 또는 400 °C까지 6~7 개 온도 조건에서 수행되었다. 두 종류의 시험편 모두 0.5 mm/min과 50 mm/min의 변위 속도로 시험되었으며, 0.5 mm/min과 50 mm/min은 표준 시험에서  $2.78 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 와  $2.78 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 의 변형률 속도에 해당하는 변위 속도이다. 시험에는 기계식 만능시험기가 사용되었으며, 게이지 길이가 25 mm인 고온용 신율계를 시험편에 설치하여 변형률을 측정하였다. 시험편의 온도는 시험 양단 어깨부에 열전대를 용접하여 측정하고 제어하였다. 고온에서 수행된 모든 시험은 시험 양단에서 측정된 온도와 설정 온도의 차이가  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  미만인 상태에서 30 분간 유지 후 수행되었다. Fig. 2는 고온 시험을 위해 노치 시험편을 시험기에 장착한 상태를 보여주는 사진이다.

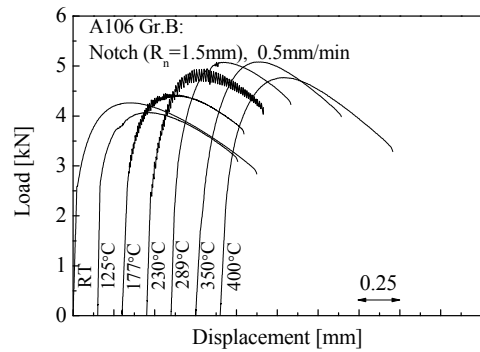


(a) 0.5mm/min

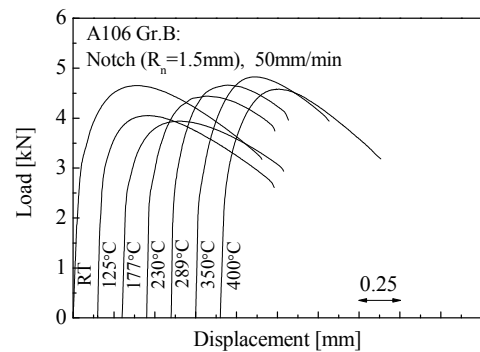


(b) 50mm/min

Fig. 3 Load-displacement curves from tensile test using standard specimens



(a) 0.5mm/min



(b) 50mm/min

Fig. 4 Load-displacement curves from tensile test using notched-bar specimens

### 3. 실험 결과

본 논문에서는 표준 시편과 원형 노치가 가공된 노치 시편을 이용하여 다양한 온도와 변형 속도에서 인장시험을 수행하였다. 실험 결과로부터 ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관재에 대한 DSA 특성과 거동을 파악하기 위해서, 시험 온도와 변형 속도에 따른 하중-변위 곡선과 인장강도의 변화를 살펴보았다.

#### 3.1 하중-변위 거동

Fig. 3은 표준 인장시편을 이용하여 준정적 속도(0.5 mm/min)와 동적 속도(50 mm/min)에서 시험된 ASTM A106 Gr.B 배관재의 하중-변위 곡선을 시험 온도에 따라 나타낸 것이다. 시험 속도에 관계없이 온도가 증가함에 따라 항복강도는 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 항복강도와 인장강도의 차이(i.e., 가공경화 능력)가 0.5 mm/min에서는 증가하다 감소하는 경향을 보였고, 50 mm/min에서는 감소하다 증가하고 다시 감소하는

경향을 보였다. 즉, 일정 온도 영역에서는 온도가 증가함에 따라 가공경화 능력이 증가하는 경향을 보였다. 0.5 mm/min의 시험 속도에서는 125 °C와 177 °C에서 하중-변위 곡선의 하중이 요동치는 serration이 관찰되었다. 50 mm/min에서는 177 °C와 230 °C에서 serration이 관찰되었으며, 289 °C에서도 최대하중 부근에서 미약한 하중의 요동이 관찰되었다. 일반적으로 인장시험 결과로 주어진 하중-변위 곡선에서 serration의 관찰과 온도 증가에 따른 가공경화 능력의 증가는 탄소강 재료에서 DSA 현상에 대한 중요한 증거로 인식된다.<sup>(1-4)</sup> 따라서, ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관재는 준정적 시험 속도(0.5 mm/min)에서 최소 125 °C부터 DSA 현상이 발생되며, DSA 현상이 나타나는 온도 영역이 시험 속도 증가에 따라 고온으로 이동하는 것을 확인하였다. 이러한 거동은 기존의 연구에서 알려진 탄소강 재료의 DSA 거동과 일치하는 것이다.<sup>(1,3,4)</sup>

한편, 노치 시편에서 주어진 하중-변위 곡선에서도 시험 속도에 관계없이 항복강도와 인장강도

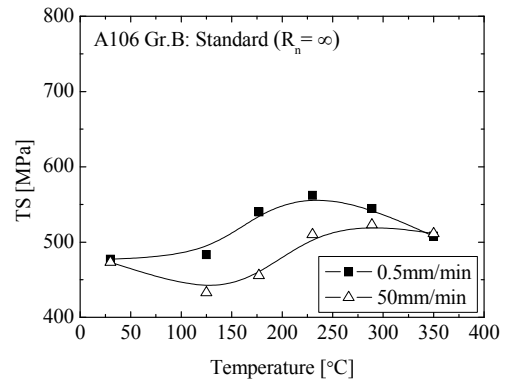
의 차이가 온도에 따라 감소하다 증가하고, 다시 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4). 또한, 50 mm/min에서는 관찰되지 않았지만, 0.5 mm/min에서는 150 °C와 177 °C의 하중-변위 곡선에서 serration이 관찰되었다. 따라서, 노치 시편에 대한 인장시험 결과에서도 표준 시편의 결과와 유사하게 DSA 현상에 의한 serration과 온도 증가에 따른 가공경화 능력의 증가 현상이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 다만, 동일한 시험 속도에서 수행된 표준 시편의 시험 결과와 비교하여 serration이 관찰되는 온도와 가공경화 능력이 증가하기 시작하는 온도가 고온에서 나타났다. 이는 DSA 거동에 미치는 노치부에서 응력과 변형의 집중 현상 때문으로 판단되며, 유한요소 시뮬레이션 결과로부터 보다 자세히 살펴볼 것이다.

### 3.2 시험 온도와 속도에 따른 인장강도 변화

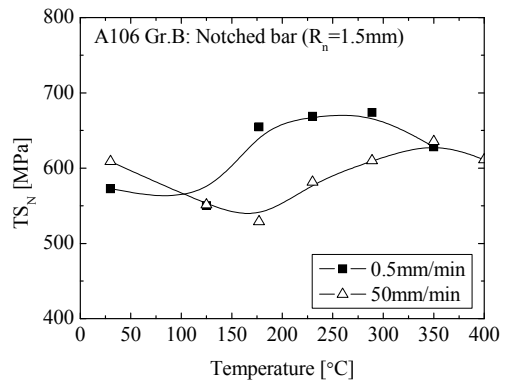
앞서 DSA 현상에 대한 증거로 알려져 있는 하중-변위 곡선에서 serration의 관찰과 온도 증가에 따른 가공경화 능력의 증가를 확인하였다. 이것에 추가하여 온도에 따른 재료의 인장강도(TS) 증가 역시 DSA 현상에 대한 중요한 증거로 알려져 있다.<sup>(2,3)</sup> 일반적으로 재료의 인장강도는 온도가 증가함에 따라 점차 감소하지만, DSA 현상이 발생하는 경우에는 일정한 온도 영역에서 온도 증가에 따라 인장강도가 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 본 논문에서는 인장강도가 증가하기 시작하는 온도에서 인장강도의 최대가 나타나는 온도 범위를 DSA 현상이 발생하는 온도 영역으로 고려하였다. 노치 시편의 경우에는 표준 시편과 달리 인장시험 결과로부터 공칭응력-공칭변형을 정의하는 것이 불가능하다. 따라서, 여기서는 식 (1)과 같이 하중-변위 곡선의 최대하중을 노치부의 초기 단면적( $A_0$ )으로 나눈 값을 노치시편에 대한 인장강도( $TS_N$ )로 정의하였다.

$$TS_N = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (1)$$

Fig. 5는 표준 시편과 노치 시편에서 주어진 인장강도를 시험 온도에 따라 나타낸 것이다. Fig. 5(a)에서 알 수 있는 것과 같이 표준 시편의 경우, 0.5 mm/min ( $\dot{\epsilon} = 2.78 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ )의 변형 속도에서는 인장강도가 125 °C부터 증가하여 230 °C에서 최대 값을 보였다. 230 °C에서의 인장강도는



(a) Standard specimen



(b) Notched bar specimen

Fig. 5 Variation of tensile strengths with test temperature

상온과 비교하여 17.8 % 정도 높은 값이다. 50 mm/min ( $\dot{\epsilon} = 2.78 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ )의 속도에서는 온도가 증가함에 따라 인장강도가 감소하여 125 °C에서 최소를 보이고 177 °C부터 증가하여 289 °C에서 최대 값을 보였다. 이 경우에 최대 인장강도는 125 °C의 최소 값과 비교하여 20.8 % 정도 증가된 값이다. 따라서, 표준 시편에 대한 인장시험 결과로부터 ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관재의 경우에 변형 속도가 100배 정도 증가되면 DSA 현상이 나타나는 온도 영역이 약 50 °C 정도 고온으로 상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한, DSA에 의한 인장강도의 증가 정도는 변형 속도에 관계없이 거의 유사한 것을 알 수 있다.

한편, 노치 시편에 대한 인장시험 결과를 살펴보면, Fig. 5(b)에 나타낸 것과 같이 전체적으로 시험 온도가 증가함에 따라 인장강도가 감소하다 증가하고, 다시 감소하는 경향을 보였다. 0.5 mm/min의 변형 속도에서는 125 °C에서 인장강도의 최소가 나타났으며, 289 °C에서 최대를 보였고 최대 인장강도는 최소와 비교하여 약 22.5 %

정도 높은 값이다. 50 mm/min의 변위 속도에서는 인장강도의 최소가 177 °C에서 관찰되었으며, 350 °C에서 최대를 보였다. 이 경우에도 최대 인장강도는 최소 인장강도 보다 약 20.1 % 정도 높은 것을 알 수 있다. 따라서, 응력과 변형률의 집중이 큰 노치 시편에서도 표준 시편의 결과와 유사하게 시편에 가해지는 변위 속도가 100배 증가될 때, DSA가 발생하는 온도 영역이 약 50 °C 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 노치 시편에서도 DSA에 의한 인장강도의 증가율이 변형 속도에 관계없이 거의 유사하며, 표준 시편에서 파악된 인장강도 증가율과도 거의 유사한 것을 알 수 있다.

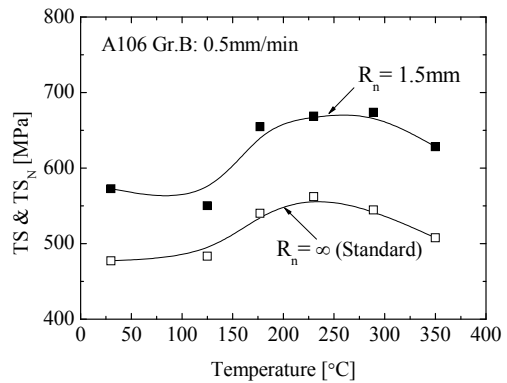
3.3 DSA 거동에 미치는 노치의 영향

인장시험 결과로부터 DSA 거동에 미치는 노치의 영향을 살펴보기 위해서, 동일한 시험 속도에서 온도에 따른 인장강도의 변화를 시편의 형상에 따라 비교하였다(Fig. 6). 전체적으로 노치 시편이 표준 시편에 비해 높은 인장강도를 보였으나, 시험 온도에 따른 인장강도의 전반적인 변화 경향은 시편의 형상에 관계없이 유사하였다. 즉, 온도가 증가함에 따라 인장강도는 감소하다 증가하고, 다시 감소하는 경향을 보였다. 다만, 두 시험 속도에서 모두 노치 시편에서는 인장강도가 증가하는 온도 영역이 표준 시편에 비해 약 50 °C 정도 고온에서 형성되었다.

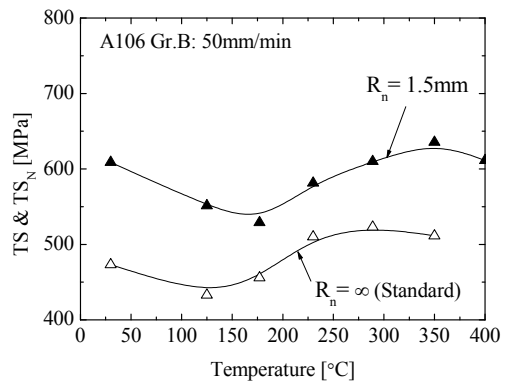
따라서, 시편에 가해지는 거시적인 변형 속도가 일정할지라도 노치가 존재하는 시편에서는 DSA 현상이 고온에서 나타나는 것을 확인하였다. 온도에 따른 인장강도의 변화에서 파악된 이와 같은 DSA 거동에 미치는 노치의 영향은 노치 시편에서 serration이 관찰되는 온도 영역이 표준 시편에 비해 고온에서 나타나는 것과 일치한다. 이것은 노치부에서 응력과 변형의 집중 현상과 관련이 있는 것으로 판단되며, 재료의 DSA 거동과 노치에서의 응력과 변형률 집중의 상관 관계는 다음 절의 유한요소 시뮬레이션 결과로부터 파악될 것이다.

4. 유한요소 시뮬레이션

앞서 인장시험 결과에서 의하면, 변형 속도에 관계없이 깊이와 반경이 각각 1.5 mm인 원형 노치가 존재하는 시편에서는 표준 시편에 비해



(a) Quasi-static



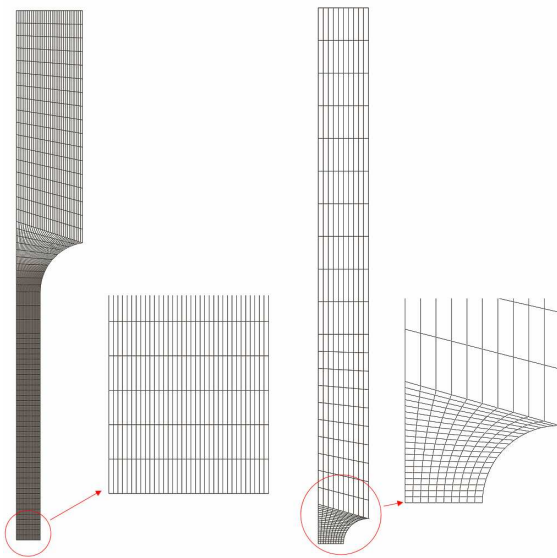
(b) Dynamic

Fig. 6 Comparison of tensile strengths obtained from standard and notched-bar specimens

DSA 현상이 약 50 °C 정도 고온에서 관찰되었다. 여기서는 이러한 노치의 영향을 보다 정량적으로 파악하기 위해서, 상온의 준정적 속도에서 수행된 표준 시편과 노치 시편의 시험 결과를 유한요소 시뮬레이션하여 변형에 따른 응력과 변형률을 평가하였다.

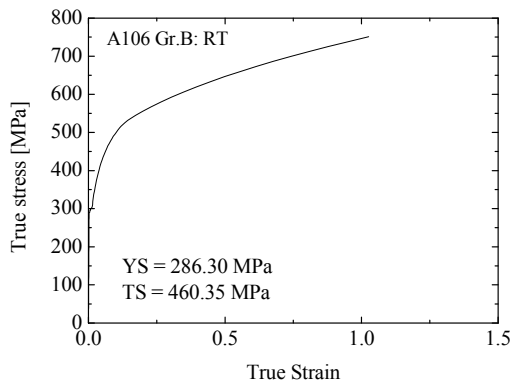
4.1 유한요소 모델

표준 시편과 노치 시편에 대한 유한요소 시뮬레이션에는 Fig. 7에 나타난 2차원 축대칭 모델이 사용되었다. 시편의 대칭성을 고려하여 각 시편의 1/4만을 모델링하였으며, 모델에는 감소적분이 고려된 8절점의 사각형 요소(CAX8R in ABAQUS)가 사용되었다. 모델의 끝단에 다중구속 절점(MPC in ABAQUS)을 정의하여 일정한 크기의 변위를 가함으로써 시편을 변형시켰다. 변위가 가해지는 동안 다중구속 절점에서 반력의 크기로부터 시편에 작용되는 하중을 구하고, 시편의 변위는 게이지가 설치된 위치에서 절점이 이동한 거리로부터 계산되었다.



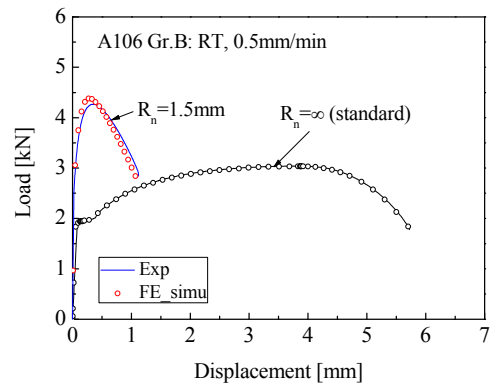
(a) Standard( $R_n=\infty$ ) (b) Notched-bar( $R_n=1.5\text{mm}$ )

**Fig. 7** FE model for standard and notched-bar specimens



**Fig. 8** True stress - true strain curve used in FE simulation

해석에는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS<sup>(5)</sup>가 사용되었으며, 해석시 노치부에서의 대변형을 반영하기 위해서 기하학적 비선형성 (NLGEOM in ABAQUS)을 고려하였다. 재료의 거동은 증분소성이론을 따르는 것으로 가정하였다. Fig. 8은 유한요소 시뮬레이션에 적용된 재료의 진응력-진변형률 곡선은 나타낸 것이다. 네킹 이전까지의 진응력-진변형률 곡선은 표준 인장시험에서 주어진 공칭응력-공칭변형률 데이터로부터 계산을 통해 구하고, 네킹 이후의 진응력-진변형률 곡선은 반복적인 유한요소 시뮬레이션을 통해 결정하였다. 즉, 진응력-진변형률 곡선을 수정하며 반복적인 유한요소해석을 수행하여 시험에서



**Fig. 9** Comparison of load-displacement data obtained from experiment and FE simulation

주어진 하중-변위 곡선과 일치하는 하중-변위 곡선을 보이는 진응력-진변형률 곡선을 구했다.

#### 4.2 시뮬레이션 결과

##### 4.2.1 응력 및 변형률 분포

Fig. 9는 표준 시편과 노치 시편에서 주어진 하중-변위 곡선과 유한요소 시뮬레이션에서 구한 하중-변위 곡선을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 시험 결과와 시뮬레이션 결과가 비교적 잘 일치하였다. 따라서, 유한요소해석이 시편의 종류에 관계없이 인장시험 결과를 잘 시뮬레이션하고 있는 것을 확인하였다. 또한, 유한요소 시뮬레이션 결과로부터 시편의 변형에 따른 응력과 변형률을 적절히 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 10은 상온에서 0.5 mm/min의 준정적 속도로 시험된 표준 시편과 노치 시편의 단면에서 등가 소성변형률의 분포를 나타낸 것이다. Fig. 10(a)는 각 시편에서 항복이 발생하는 시점과 최대하중의 중간 단계에서 소성변형률의 분포를 비교한 것이며, Fig. 10(b)는 최대하중 시점에서 두 시편의 등가 소성변형률 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 것과 같이 동일한 변형 단계에서는 전체적으로 노치 시편이 표준 시편에 비해 높은 변형률을 보였다. 또한, 표준 시편은 시편의 단면에서 변형률이 일정한 값을 보인 반면, 노치 시편은 시편의 단면에서 큰 변형률 차이를 보였으며 중심에 비해 가장 자리에서 큰 변형률을 보였다.

따라서, 응력과 변형의 집중이 발생하는 노치

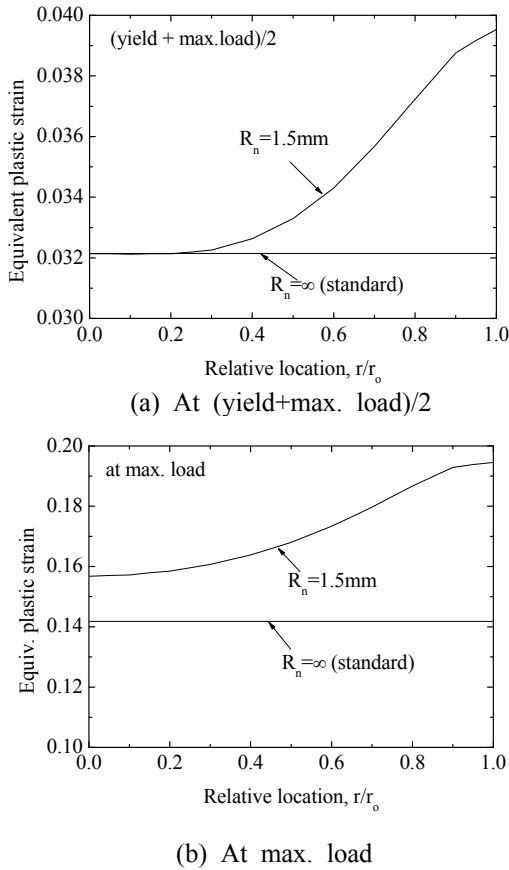


Fig. 10 Distribution of equivalent plastic strains over the cross section of standard and notched-bar specimens

시편은 같은 변형 단계에서 표준 시편에 비해 시편 단면에서 높은 변형률을 보였으며, 특히 여기서 고려된 원형 노치의 경우(노치 깊이와 변경이 1.5 mm)에는 노치 루터부에서 변형률의 집중이 크게 나타나는 것을 확인하였다.

4.2.2 변형률 속도

일반적으로 재료의 DSA 거동은 온도와 변형률 속도에 크게 의존한다.<sup>(1-2)</sup> 따라서, 시뮬레이션 결과로부터 확인된 노치시편에서의 높은 변형률이 재료의 DSA 거동에 어떤 영향을 미치는지 분석하기 위해서, 각 변형 단계별로 시편 단면에서 주어진 등가 소성변형률을 이용하여 두 시편에서 변형률 속도를 계산하였다. 노치 시편의 경우에는 시편 단면에서 변형률이 위치에 따라 큰 차이를 보이므로, 여기서는 시편 단면에서 평균한 등가 소성변형률을 이용하여 변형률 속도를 계산하였다. 변형률 속도 역시 위치에 따라 차이를 보

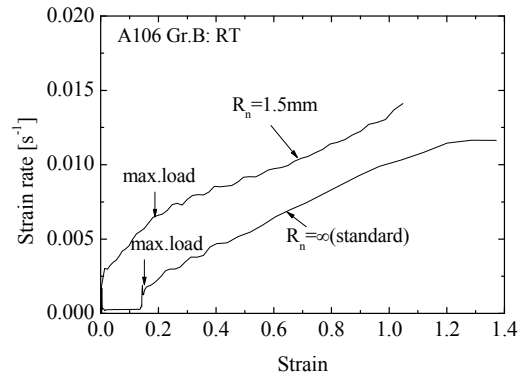


Fig. 11 Comparison of strain rates for standard and notched-bar specimens under loading rate of 0.5mm/min.

일 수 있으나, 변형률 속도는 시간에 따른 변형률의 변화이므로 위치에 따른 변형률 차이가 클지라도 변형률 속도의 편차는 크지 않을 것으로 판단하였다.

Fig. 11은 표준 시편과 노치 시편에서 계산된 변형률 속도를 각 시편에서 단면 평균 변형률의 함수로 나타낸 것으로, 인장시험에서 각 시편이 최종 파단되는 시점까지 데이터를 나타내었다. 표준 시편의 경우에는 최대하중까지 변형률에 관계없이 거의 일정한 변형률 속도를 보였으며, 최대하중 이후부터 변형률이 증가함에 따라 변형률 속도가 증가하는 경향을 보였다. 이것은 기존에 알려진 1축 응력상태에서 표준 시편의 변형 거동과 잘 일치하는 결과이다. 표준 시편은 네킹이 발생하기 전까지 균일 변형을 보이므로 일정 속도로 변위가 가해지는 경우에 변형률 속도가 거의 일정하다. 최대하중 이후에는 네킹이 발생하여 변형이 네킹 영역에 집중되므로 일정한 속도의 변위가 시편에 가해질지라도 변형률 속도가 증가한다.

한편, 노치 시편에서는 전체적으로 변형률 속도가 표준 시편에 비해 큰 값을 보였으며, 표준 시편과 달리 변형 초기부터 변형률이 증가함에 따라 변형률 속도가 증가하는 경향을 보였다. 노치 시편의 경우에는 변형 초기부터 노치부에 변형이 집중되므로 일정한 속도의 변위가 시편에 작용될지라도 노치부에서의 국부적인 변형률 속도가 증가하는 것이다. 즉, 표준 인장시편에서 네킹 이후에 변형률 속도가 증가하는 것과 같은 효과이다.

따라서, 동일한 속도의 변위가 시편에 작용될 지라도 노치 시편에서는 응력과 변형의 집중 효과로 인해 표준 시편과 비교하여 전체적으로 높은 변형률 속도를 보이는 것을 확인하였다. 노치에 의한 변형률 속도의 증가 정도를 정량적으로 확인하기 위해서, Fig. 11에서 최대하중까지의 변형률 영역에서 변형률 속도를 평균하였다. 일반적으로 DSA 현상이 재료의 가공경화 특성에 크게 영향을 미치므로,<sup>(1-3)</sup> 여기서는 최대하중까지의 변형률 속도만을 평균하였다. 표준 시편에서는 평균 변형률 속도가  $\dot{\epsilon} = 2.64 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 로 계산되었으며, 노치 시편은  $\dot{\epsilon} = 4.53 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 로 평가되었다. 즉, 노치 시편이 표준 시편에 비해 약 17배 정도 높은 변형률 속도를 보였다. 따라서, 앞서 노치 시편에서 인장강도의 증가나 serration의 관찰과 같은 DSA 거동이 표준 시편에 비해 고온에서 나타나는 것은 노치부에서 높은 변형률 속도와 관련이 있는 것으로 파악되었다. 다만, 인장시험 결과에 의하면 노치 시편에서는 DSA 거동이 표준 시편에 비해 약 50 °C 정도 높은 온도에서 관찰되었으며, 변형률 속도가 100배 증가할 때 DSA 발생 온도가 약 50 °C 정도 상승하였다. 그러나, 유한요소 시뮬레이션 결과에서는 노치 시편이 표준 시편에 비해 약 17배 정도 높은 변형률 속도를 보였다. 기본적으로 DSA 발생 온도는 변형률 속도의 로그함수에 비례한다.<sup>(1,3)</sup> 따라서, 변형률 속도에서 17배와 100배의 차이가 DSA 발생 온도에 미치는 영향이 상대적으로 크지 않기 때문에 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 탄소강 배관재의 동적변형시효(DSA) 거동에 미치는 노치 효과를 파악하기 위해서, ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관에서 채취한 표준 시편과 노치 시편을 이용하여 다양한 온도와 변위 속도에서 인장시험을 수행하였다. 또한, 이들 시험에 대한 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다. 이들 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 노치 시편을 이용한 인장시험 결과에서도

표준 시편에서와 같이 DSA의 증거인 serration과 인장강도 증가 현상이 관찰되었다.

(2) 준정적 속도에서 ASTM A106 Gr.B 탄소강 배관재의 DSA 현상은 125 ~ 230 °C 범위에서 발생하였으며, 시험 속도가 약 100배 빨라짐에 따라 DSA 영역이 약 50 °C 정도 고온으로 이동하였다.

(3) 동일한 시험 속도에서 수행된 노치 시편의 시험 결과에서는 표준 시편에 비해 DSA 현상이 고온에서 관찰되었다.

(4) 표준 시편에 비해 노치 시편에서 DSA 거동이 고온에서 나타나는 것은 응력과 변형률 집중으로 인해 노치부에서 국부적으로 변형률 속도가 증가하기 때문인 것으로 평가되었다.

## 후 기

이 논문은 교육과학기술부의 재원으로 시행하는 한국과학재단의 원자력기술개발사업으로 지원받았습니다.(연구과제 관리코드: M2011-0018943)

## 참고문헌

- (1) Baird, J.D., 1971, "The Effects of Strain Aging Due to Interstitial Solutes on the Mechanical Properties of Metals," *Metall. Reviews*, Vol.16, pp.1~18.
- (2) Marschall, C.W. et al., 1994, "Effect of Dynamic Strain Aging on the Strength and Toughness of Nuclear Ferritic Piping at LWR Temperatures," *NUREG/CR-6226*.
- (3) Kim, J.W. and Kim, I.S., 1997, "Investigation of Dynamic Strain Aging on SA106 Gr.C Piping Steel," *Nucl. Eng. & Design*, Vol.172, pp.49~59.
- (4) Yoon, J.H., Lee, B.S., Oh, Y.J. and Hong, J.H., "Effects of Loading Rate and Temperature on J-R Fracture Resistance of an SA516-Gr.70 Steel for Nuclear Piping," *Int. J. Press. Ves. & Piping*, Vol.76, pp.663~670.
- (5) ABAQUS User Manual, Version 6.9, Hibbitt, Karlson & Sorensen, 2010.