

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2015.39.4.383>

ISSN 1226-4873(Print)  
2288-5226(Online)

## 상온과 316°C에서 SA508 Gr.1a 저합금강 배관과 TP316 스테인리스강 배관의 변형거동에 미치는 하중속도의 영향<sup>§</sup>

김진원\*† · 최명락\*

\* 조선대학교 원자력공학과

### Effect of Loading Rate on the Deformation Behavior of SA508 Gr.1a Low Alloy Steel and TP316 Stainless Steel Pipe Materials at RT and 316°C

Jin Weon Kim\*† and Myung Rak Choi\*

\* Dept. of Nuclear Engineering, Chosun Univ.

(Received January 9, 2015 ; Revised January 27, 2015 ; Accepted February 4, 2015)

**Key Words:** Loading Rate(하중속도), Deformation Behavior(변형거동), SA508 Gr.1a Low Alloy Steel(SA508 Gr.1a 저합금강), SA312 TP316 Stainless Steel(SA312 TP316 스테인리스강)

**초록:** 본 논문에서는 원전 배관 재료의 변형거동에 미치는 하중속도의 영향을 파악하기 위해서, SA508 Gr.1a 저합금강과 SA312 TP316 스테인리스강 배관재를 대상으로 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 다양한 변형률 속도로 인장시험을 수행하였다. 시험 결과, 상온에서는 두 배관재의 변형거동이 일반적인 하중속도 의존성을 보였다. 즉, 하중속도가 증가함에 따라 강도는 증가하고 연성은 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 316°C에서는 하중속도가 증가함에 따라 SA508 Gr.1a 저합금강의 강도와 연신률이 모두 감소하였고 단면수축률은 감소 후 증가하는 비선형 거동을 보였다. SA312 TP316 스테인리스강의 강도, 연신률, 그리고 단면수축률은 하중속도에 관계없이 거의 일정한 값을 보였다. 시험 온도에 관계없이 SA508 Gr.1a 저합금강의 가공경화능력은 하중속도에 거의 영향을 받지 않았으나, SA312 TP316 스테인리스강에서는 하중속도가 증가함에 따라 가공경화능력이 감소하였다.

**Abstract:** This study conducted tensile tests on SA508 Gr.1a low alloy steel and SA312 TP316 stainless steel piping materials under various strain rates at room temperature (RT) and 316°C to investigate the effects of loading rate on the deformation behavior of nuclear piping materials. At RT, the deformation behavior for both pipe materials showed a typical loading rate dependence, i.e., the strength increased and the ductility decreased as the loading rate increased. At 316°C, however, the strength and elongation of SA508 Gr.1a low alloy steel decreased as the loading rate increased, and its reduction of area non-linearly varied with the loading rate. For SA312 TP316 stainless steel, the strength, elongation, and reduction of area at 316°C were almost the same regardless of the loading rate. At both temperatures, the strain hardening capacity was nearly independent of the loading rate for SA508 Gr.1a low alloy steel, while it decreased with increasing loading rate for SA312 TP316 stainless steel.

#### 1. 서론

원자력발전소(이하 원전)의 주요 기기들은 정상

운전뿐 아니라 지진과 같은 과도 조건에서도 건전성이 유지되어야 한다. 따라서, 다른 기기에 비해 지진하중이 크게 작용될 수 있는 배관시스템의 경우, 지진하중 조건에서 신뢰성 있는 건전성 평가와 이를 통한 건전성 확보가 매우 중요하게 고려되고 있다.<sup>(1,2)</sup> 특히 후쿠시마 원전 사고 이후에는 설계기준지진뿐 아니라 설계기준초과지진 조

§ 이 논문은 대한기계학회 2014년도 추계학술대회 (2014. 11. 11.-14., 김대중컨벤션센터) 발표논문임.

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

© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

**Table 1** Chemical composition of piping materials used in the experiment (wt. %)

Material	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al	Cu
SA508 Gr.1a	0.223	1.27	0.009	0.0047	0.225	0.242	0.118	0.026	0.003	0.024	0.200
SA312 TP316	0.02	1.31	0.009	0.000	0.039	11.2	16.4	2.05	-	-	-

건에서도 주요 기기에 대한 건전성 확보를 요구하고 있기 때문에 최근 지진하중 조건에서 배관 건전성 평가에 대한 관심이 더욱 높아지고 있는 실정이다.<sup>(3,4)</sup>

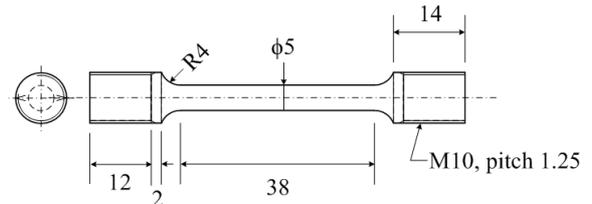
현재 적용되고 있는 지진하중 조건의 배관 건전성 평가 절차를 살펴보면, 선형탄성해석을 통해 배관에 작용되는 지진하중의 크기를 계산하고 준정적(Quasi-static)·단일(Monotonic)하중 조건에서 시험된 재료물성치를 입력으로 배관의 구조 건전성과 결합 안정성을 평가한다.<sup>(2,5,6)</sup> 그러나, 실제 배관에 작용되는 지진하중은 크기와 형태가 불규칙하며 동적(Dynamic)이고 반복적(Cyclic)인 특징을 갖는다.<sup>(7,8)</sup> 일부 연구에 의하면 동적·반복하중이 작용되는 경우에는 재료의 변형거동과 파괴거동이 준정적·단일하중 조건에서와 큰 차이를 보이는 것으로 알려져 있다.<sup>(8,9)</sup> 또한, 재료 거동에 미치는 동적·반복하중의 영향이 재료에 따라 다르게 나타나는 것으로 보고되어 있다.<sup>(8-11)</sup> 따라서, 지진하중 조건에서 배관 건전성 평가에 대한 신뢰성 확보를 위해서는 배관 재료의 변형거동과 파괴거동에 미치는 동적 효과와 반복하중의 영향을 명확히 파악하고, 건전성 평가에서 이러한 재료 거동을 적절히 반영하는 것이 필요하다.

이와 관련하여 본 논문에서는 우선적으로 배관 재료의 변형거동에 미치는 하중속도의 영향을 파악하고자 한다. 이를 위해서 원전 배관에 사용되는 대표적인 2 종류의 배관재를 대상으로 상온과 원전 운전온도에서 다양한 변형률 속도를 고려하여 인장시험을 수행하였다. 시험 결과로부터 각 배관재의 강도, 연신률, 단면수축률, 그리고 가공경화률 등에 미치는 하중속도의 영향을 살펴보았다. 또한, 지진하중 조건에서 배관 건전성 평가시 재료의 변형거동에 미치는 하중속도의 영향을 어떻게 고려할 것인지 검토하였다.

## 2. 시편 및 시험절차

### 2.1 재료 및 시편

본 시험에는 원전 1 차계통 배관에 사용되는

**Fig. 1** Dimension of tensile specimen used in the experiment

SA508 Gr.1a 저합금강과 SA312 TP316 스테인리스강 배관재가 사용되었다. SA508 Gr.1a 저합금강은 한국표준형 원전의 주냉각재 배관에 사용되고 남은 잔재로 외경( $D_o$ )과 두께( $t$ )가 각각 1075.4 mm와 102.6 mm인 단조재이며, SA312 TP316 스테인리스강은 4inch, Sch.160(공칭직경 및 공칭두께가 114.3 mm와 13.5 mm)인 배관재이다. Table 1은 두 배관재의 화학조성을 정리한 것이다.

시험에는 ASTM E8-09<sup>(12)</sup>에 따라 설계된 직경이 5 mm이고 균일길이가 38 mm인 봉상시편이 사용되었다. 시편은 배관의 길이방향과 시편의 인장방향이 일치(L-방향)하도록 채취되었다. Fig. 1은 시험에 사용된 인장시편의 형상을 나타낸 것이다.

### 2.2 시험조건 및 절차

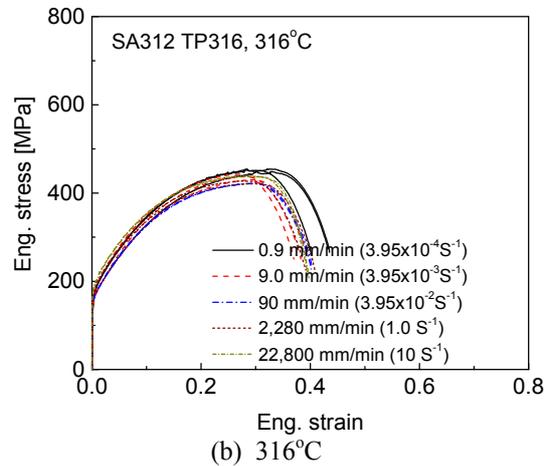
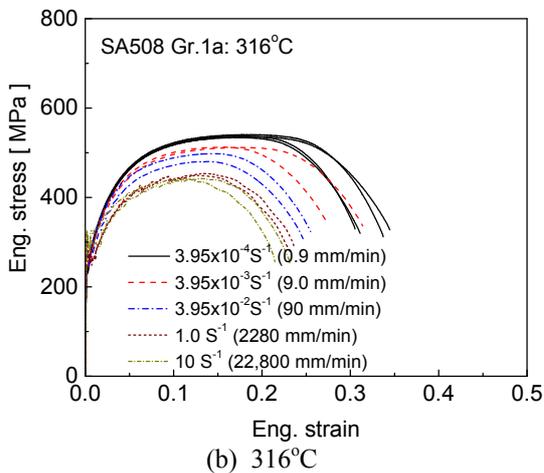
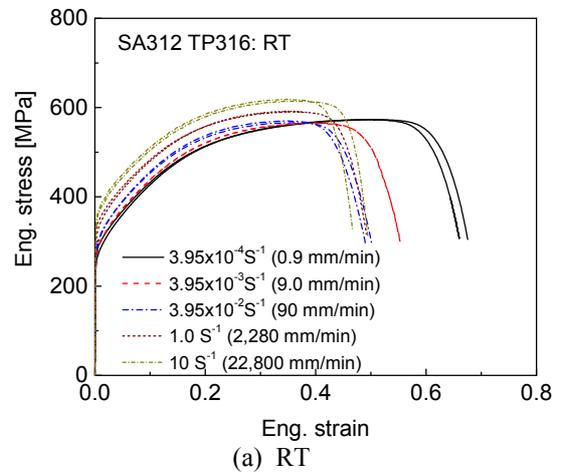
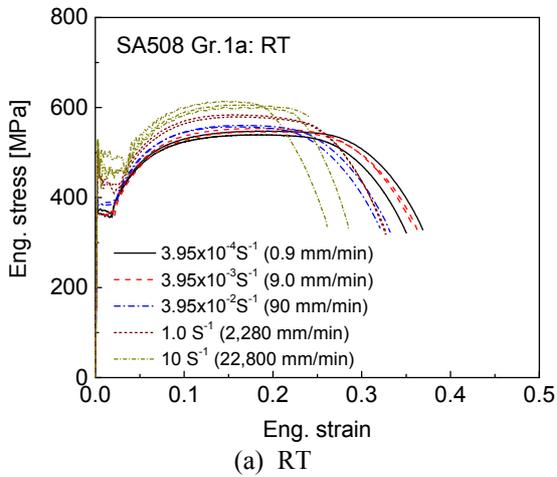
상온과 원전 운전온도인 316°C의 공기 분위기에서 시험이 수행되었다. 인장시험은 준정적 하중속도와 동적 하중속도를 포함하는 5 조건의 변형률 속도( $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ ,  $3.95 \times 10^{-3} s^{-1}$ ,  $3.95 \times 10^{-2} s^{-1}$ ,  $1.0 s^{-1}$ ,  $10 s^{-1}$ )에서 수행되었다.

시험에는 변형률 속도에 따라 50 kN 용량의 로드 셀이 부착된 기계식 만능시험기와 100 kN 용량의 로드 셀이 부착된 유압식 만능시험기가 각각 사용되었다. 시편의 변형률은 시험온도에 관계없이 게이지 길이가 25 mm인 고온용 신률게이지를 이용하여 측정하였다.

## 3. 시험 결과 및 토의

### 3.1 응력-변형률 거동에 미치는 하중속도 영향

Fig. 2는 상온과 원전 운전온도인 316°C에서



**Fig. 2** Variation of engineering stress-strain curves of SA508 Gr.1a low alloy steel pipe material with strain rate

**Fig. 3** Variation of engineering stress-strain curves of SA312 TP316 stainless steel pipe material with strain rate

SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 공칭응력( $\sigma$ ) - 공칭변형률( $\epsilon$ ) 곡선을 변형률 속도에 따라 나타낸 것이다. 상온에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 강도는 증가하고 연성은 감소하는 경향을 보였으며, 항복점 현상이 더욱 크게 나타났다. 반면, 원전 운전온도인 316°C에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 강도와 연성이 모두 감소하는 경향을 보였다. 또한, 316°C에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 항복점 현상이 뚜렷해 졌으며,  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-2} s^{-1}$ 와  $1.0 s^{-1}$ 에서는 균일소성변형 영역에서 동적변형시효(DSA, Dynamic Strain Aging)의 증거인 톱니모양 응력 변화(Serration)가 관찰되었다.<sup>(13,14)</sup>

SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 공칭응력 - 공칭변형률 곡선을 살펴보면, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 상온에서는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관

재와 유사하게 변형률 속도가 증가함에 따라 강도가 증가하고 연성이 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 원전 운전온도인 316°C에서는 변형률 속도에 따른 응력-변형률 거동의 변화가 크지 않았다. 다만,  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ 에서 관찰된 Serration이 변형률 속도가 증가함에 따라 사라졌다.

한편, 배관재의 가공경화거동에 미치는 하중속도의 영향을 살펴보기 위해서, 식 (1)을 적용하여 네킹이 발생하는 위치까지의 공칭응력 - 공칭변형률 데이터로부터 진응력( $\sigma_T$ ) - 진변형률( $\epsilon_T$ ) 곡선을 구하고, 식 (2)를 적용하여 곡선적합(Curve Fitting)함으로써 가공경화지수( $n$ )를 구했다.<sup>(15)</sup> 가공경화지수는 곡선적합에 적용되는 데이터의 범위에 크게 영향을 받는다. 여기서는 항복점 현상이 있는 경우에  $1.05 \times$  항복강도(YS)에 해당하는 변형률부터 네킹변형률까지, 항복점 현상이 없는 경우에

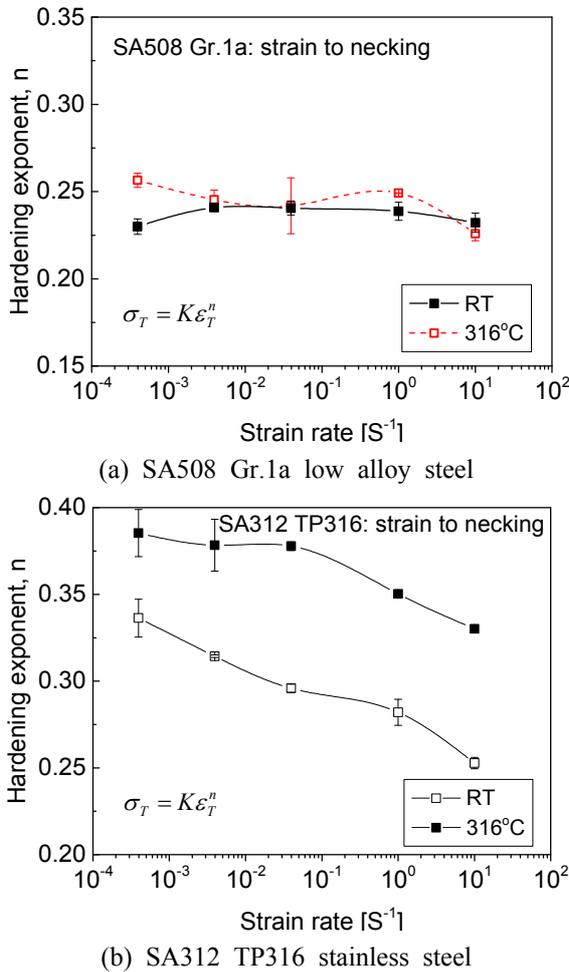


Fig. 4 Variation of strain hardening rate of pipe materials with strain rate

는 항복강도에 해당하는 변형률부터 네킹변형률까지 데이터를 곡선적합에 적용하였다.<sup>(16)</sup>

$$\sigma_T = \sigma(\epsilon + 1), \epsilon_T = \ln(\epsilon + 1) \tag{1}$$

$$\sigma_T = K\epsilon_T^n \tag{2}$$

Fig. 4는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재와 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 가공경화지수를 변형률 속도에 따라 나타낸 것이다. SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 가공경화지수는 상온과 316°C에서 모두 변형률 속도가 증가함에 따라 전반적으로 감소하는 경향을 보였으나 감소 정도는 미미했다. 즉, SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 경우, 시험온도에 관계없이 가공경화거동이 하중속도에 크게 영향을 받지 않는 것으로 확인되었다. 그러나, SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 경우에는 상온과 316°C에서 모두 변형률 속도가 증가함에 따라 가공경화지수가 감소하는 경향을 보

였으며, 가공경화지수의 감소는 316°C에 비해 상온에서 더욱 뚜렷했다. 따라서, SA312 TP316 스테인리스강 배관재는 준정적 하중에 비해 동적 하중에서 가공경화능력이 뚜렷이 감소하는 것을 알 수 있다.

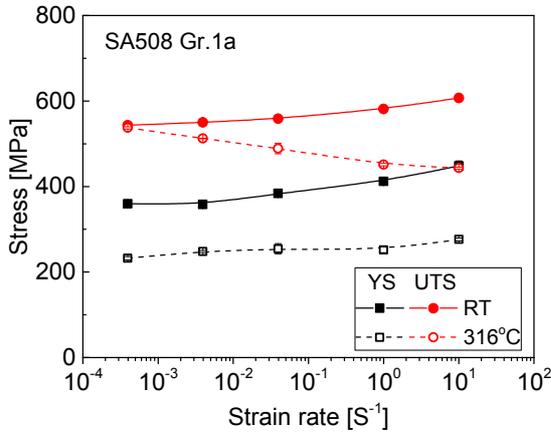
### 3.2 기계적물성치에 미치는 하중속도 영향

#### 3.2.1 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재

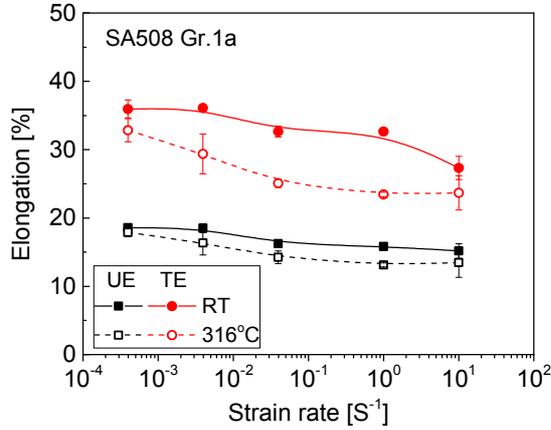
Fig. 5(a)는 상온과 316°C에서 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 항복강도(YS)와 인장강도(UTS)를 변형률 속도에 따라 나타낸 것이다. 상온에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 항복강도와 인장강도가 모두 증가하여, 준정적 변형률 속도 ( $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ )에 비해  $\dot{\epsilon} = 10 s^{-1}$ 에서 항복강도와 인장강도가 각각 24.6%와 17.0% 정도 큰 값을 보였다. 한편, 원전 운전온도인 316°C에서 항복강도는 변형률 속도가 증가함에 따라 약간씩 증가하지만, 인장강도는 변형률 속도가 증가함에 따라 감소하여  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ 에 비해  $\dot{\epsilon} = 10 s^{-1}$ 에서 17.5% 정도 낮은 값을 보였다.

Fig. 5(b)에서 변형률 속도에 따른 균일연신률(UF)과 총연신률(TE)의 변화를 살펴보면, 상온에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 균일연신률과 총연신률이 연속적으로 감소하여 준정적 변형률 속도에 비해  $\dot{\epsilon} = 10 s^{-1}$ 에서 각각 18.4%와 24.0% 정도 낮은 값을 보였다. 316°C에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 균일연신률과 총연신률이  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-2} s^{-1}$ 까지 감소 후, 그 이상의 변형률 속도에서는 서서히 수렴하는 경향을 보였다.  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ 에 비해  $\dot{\epsilon} = 10 s^{-1}$ 에서 균일연신률과 총연신률은 각각 24.8%와 27.9% 정도 낮은 값을 보였다. 따라서, 시험 온도에 관계없이 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 연신률은 하중속도가 증가함에 따라 감소하였으며, 이러한 경향은 316°C에서 더 뚜렷한 것을 알 수 있다.

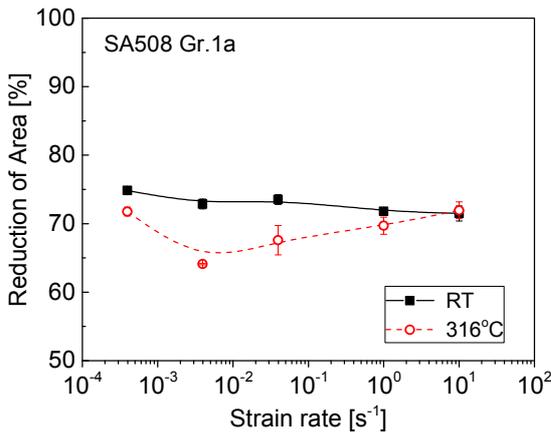
한편, 변형률 속도에 따른 단면수축률의 변화를 살펴보면, Fig. 5(c)에서 알 수 있는 바와 같이 상온에서는 변형률 속도에 따라 단면수축률이 완만하게 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 316°C에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 단면수축률이 크게 감소하여  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-3} s^{-1}$ 에서 최소값을 보이고, 변형률 속도가 더욱 증가함에 따라 다시 증가하여  $\dot{\epsilon} = 10 s^{-1}$ 에서는 준정적 변형률 속도에



(a) Yield (YS) and tensile strength (UTS)



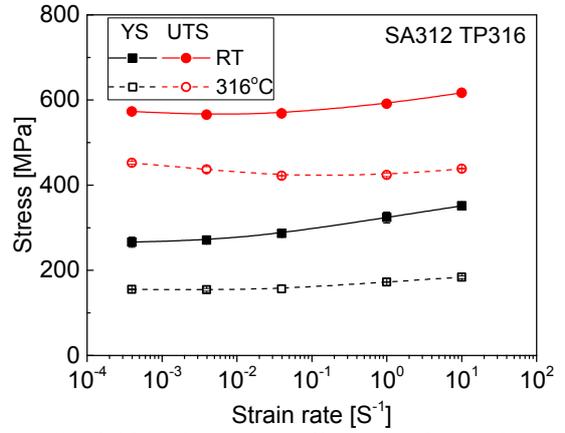
(b) Uniform (UE) and total elongation (TE)



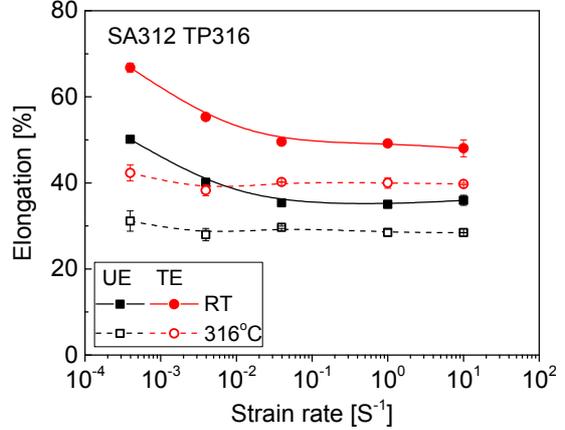
(c) Reduction of area (RA)

**Fig. 5** Variation of tensile properties of SA508 Gr.1a low alloy steel pipe material with strain rate

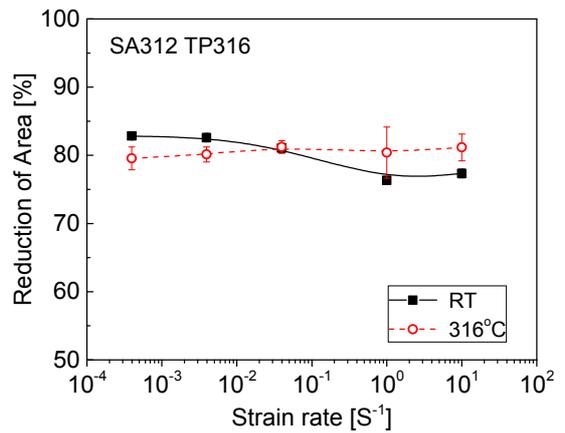
서와 거의 같은 값을 보였다.  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-3} s^{-1}$ 에서 단면수축률은 준정적 변형률 속도에서 보다 10.6% 정도 작았다. Fig. 5(b)의 연신률과 비교하면 상온에서는 변형률 속도에 따른 단면수축률과 연신률의 변화 경향이 거의 일치하지만, 316°C에



(a) Yield (YS) and tensile strength (UTS)



(b) Uniform (UE) and total elongation (TE)



(c) Reduction of area (RA)

**Fig. 6** Variation of tensile properties of SA312 TP316 stainless steel pipe material with strain rate

서는 연신률과 단면수축률이 서로 다른 변형률 속도 의존성을 보이는 것을 알 수 있다.

하중속도가 증가함에 따라 항복강도와 인장강도가 증가하고 연신률이 감소하는 것은 금속 재료에서 관찰되는 일반적인 경향이다.<sup>(15,16)</sup> 따라서,

상온에서 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 변형거동은 재료의 일반적인 하중속도 의존성과 일치하는 것을 알 수 있다. 그러나, 원전 운전온도인 316°C에서는 하중속도가 증가함에 따라 인장강도가 감소하는 음(Negative)의 하중속도 의존성을 보이고, 특정 하중속도 조건에서 단면수축률의 최소를 보였다. 이와 같이 316°C에서 변형거동이 일반적인 하중속도 의존성을 보이지 않는 것은 탄소강이나 저합금강에서 나타나는 DSA 현상에 기인하는 것으로 판단된다.<sup>(13,14)</sup> Fig. 2의 공칭응력-공칭변형률 곡선에서 관찰된 Serration은 316°C에서 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 DSA 발생을 잘 뒷받침하고 있다.

### 3.2.2 SA312 TP316 스테인리스강 배관재

Fig. 6은 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 항복강도와 인장강도를 변형률 속도에 따라 나타낸 것이다. 상온에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 항복강도가 뚜렷이 증가하였으며 인장강도는 약간 감소하다 다시 증가하는 경향을 보였다. 준정적 변형률 속도에 비해  $\sim 10^4$ 배 빠른 동적 변형 속도에서 항복강도는 약 32%, 인장강도는 약 7.5% 증가하였다. 원전 운전온도인 316°C에서는 상온에 비해 변형률 속도에 따른 항복강도와 인장강도의 변화가 크지 않았다. 변형률 속도가 증가함에 따라 항복강도는 약간씩 증가하여  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ 에 비해  $\dot{\epsilon} = 10 s^{-1}$ 에서 18% 정도 높은 값을 보였으며, 인장강도는 변형률 속도가 증가함에 따라 미소하게 감소하여  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ 에 비해  $\dot{\epsilon} = 10 s^{-1}$ 에서 6.6% 정도 낮은 값을 보였다.

Fig. 6(b)에서 변형률 속도에 따른 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 균일연신률과 총연신률을 살펴보면, 상온에서는 변형률 속도가 증가함에 따라  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-2} s^{-1}$ 까지 연신률이 감소하다 그 이상에서는 거의 일정한 값으로 수렴하였다. 따라서,  $\dot{\epsilon} = 10 s^{-1}$ 에서 균일연신률과 총연신률은  $\dot{\epsilon} = 3.95 \times 10^{-4} s^{-1}$ 에 비해 28% 정도 낮은 값을 보였다. 그러나, 316°C에서는 변형률 속도에 따른 균일연신률과 총연신률의 변화가 미미하여, 변형률 속도가 준정적 속도에 비해  $\sim 10^4$ 배 증가할지라도 균일연신률과 총연신률의 감소는 8.7%와 6.1% 정도에 불과했다.

한편, 변형률 속도에 따른 단면수축률의 변화

를 살펴보면, 상온에서는 변형률 속도가 증가함에 따라 단면수축률이 감소하다 수렴하는 경향을 보였으나, 원전 운전온도인 316°C에서는 변형률 속도에 관계없이 거의 일정한 값을 보였다. 따라서, SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 경우에는 시험 온도에 관계없이 하중속도에 따른 단면수축률과 연신률의 변화 경향이 유사한 것을 알 수 있다.

앞서 살펴본 바와 같이 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 경우에도 상온에서는 변형거동이 일반적인 하중속도 의존성을 따르는 것으로 확인되었다. 그러나, 316°C에서는 일반적인 하중속도 의존성을 보이지 않고, 하중속도가 증가할지라도 강도와 연성이 거의 일정한 값을 보였다. 하중속도가 증가함에 따라 강도가 증가하고 연성이 감소하는 것은 전위가 슬립면에서 장애물을 빠져나갈 수 있는 시간적 여유가 충분치 않기 때문이다. 따라서, 316°C에서 하중속도가 증가할지라도 강도가 증가하고 연성이 감소하지 않는 것은 SA312 TP316 스테인리스강의 경우 상온에 비해 고온에서 전위의 이동과 상승이 용이하므로 슬립면에서 전위가 장애물을 쉽게 통과할 수 있기 때문으로 판단된다.<sup>(17)</sup>

### 3.3 건전성 평가시 변형거동에 미치는 하중속도 영향 고려 방안

일반적으로 금속 재료는 하중속도가 증가함에 따라 강도가 증가하는 것으로 알려져 있다. 따라서, 기존의 평가법에서는 지진하중 조건에서 강도 기반의 배관 건전성 평가시 준정적 하중조건에서 시험된 기계적물성치를 입력으로 적용하는 것이 보수적인 결과를 주는 것으로 가정해 왔다.<sup>(2)</sup> 그러나, 본 시험 결과에 의하면 상온에서는 2 종류 배관재 모두 하중속도가 증가함에 따라 강도가 증가하지만, 원전 운전온도인 316°C에서는 하중속도가 증가함에 따라 강도가 감소하거나 거의 일정하게 유지되었다. 따라서, 동적하중이 작용되는 지진하중 조건에서 강도 기반의 배관 건전성 평가시 준정적 하중속도로 시험된 기계적물성치를 적용하는 것이 항상 보수적인 결과를 주지는 않는다는 것을 알 수 있다. 특히 원전 운전온도에서 DSA 현상이 나타나는 저합금강이나 탄소강 배관의 경우에는 동적 하중속도에서 강도가 크게 감소할 수 있으므로, 지진하중을 고려한 하중속도에서 시험된 기계적물성치를 건전성 평

가의 입력으로 적용해야 할 것으로 판단된다.

인장시험 결과에서 단면수축률은 1 축 인장응력 조건에서 재료의 파단변형률(Fracture Strain)과 등가한 재료물성치이다. 따라서, Figs. 5(c)와 6(c)의 결과로부터 원전 운전온도에서 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 파단변형률은 하중속도에 거의 영향을 받지 않지만, SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 파단변형률은 하중속도에 따라 비선형적으로 변화한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 재료의 변형률을 기반으로 지진하중 조건의 배관 건전성 평가를 수행하는 경우, SA312 TP316 스테인리스강 배관은 재료의 변형거동에 미치는 하중속도의 영향을 고려할 필요가 없다. 그러나, SA508 Gr.1a 저합금강 배관의 경우에는 재료의 변형거동에 미치는 하중속도의 영향을 파악하고, 이를 평가에 반영해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재와 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 변형거동에 미치는 하중속도의 영향을 파악하기 위해서, 상온과 원전 운전온도인 316°C에서 다양한 변형률 속도로 인장시험을 수행하였다. 이들 결과로부터 다음의 결론을 얻었다.

(1) 상온에서는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재와 SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 변형거동이 일반적인 하중속도 의존성을 보였다. 즉, 준정적 하중속도에 비해 동적 하중속도에서 강도는 증가하고 연성은 감소하는 경향을 보였다.

(2) 316°C에서는 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 인장강도와 연신률은 하중속도가 증가함에 따라 감소하였으며, 단면수축률은 감소하다 다시 증가하는 경향을 보였다. SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 강도, 연신률, 단면수축률은 하중속도에 관계없이 거의 유사한 값을 보였다.

(3) 시험 온도에 관계없이 SA508 Gr.1a 저합금강 배관재의 가공경화능력은 하중속도에 거의 영향을 받지 않았으나, SA312 TP316 스테인리스강 배관재의 가공경화능력은 하중속도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

(4) 지진하중 조건에서 배관에 대한 건전성 평가시 SA312 TP316 스테인리스강 배관은 변형거동에 미치는 하중속도의 영향을 고려할 필요가 없으나, SA508 Gr.1a 저합금강 배관은 재료의 변

형거동에 미치는 하중속도의 영향을 평가에 반영해야 할 것으로 판단된다.

#### 후 기

본 논문은 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 원자력기술개발사업(NRF-2013M2A8A1040924)과 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(20141520100860)의 결과입니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Budnitz, R.J., Amico, P.J., Cornell, C.A., Hall, W.J., Kennedy, R.P., Reed, J.W. and Shinozuka, M., 1985, "An Approach to the Quantification of Seismic Margins in Nuclear Power Plants," *NUREG/CR-4334*.
- (2) DeGrassi, G., Nie, J. and Hofmayer, C., 2008, "Seismic Analysis of Large-Scale Piping Systems for the JNES-NUPEC Ultimate Strength Piping Test Program," *NUREG/CR-6983*.
- (3) Stevenson, J.D., 2014, "Summary of the Historical Development of Seismic Design of Nuclear Power Plants in Japan and the U.S.," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 269, pp. 160~164.
- (4) Kostov, M., 2014, "Seismic Safety Evaluation Based on DIP," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 269, pp. 256~261.
- (5) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.III, "Nuclear components," 1998ed.
- (6) American Society of Mechanical Engineer, ASME B&PV Code Sec.XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," 1998ed.
- (7) Tong, L.L., Duan, R. and Cao, X.W., 2015, "Seismic Analysis of RCS with Finite Element Model for Advanced PWR," *Prog. Nucl. Energy*, Vol. 79, pp. 142~149.
- (8) Scott, P., Olson, R., Bockbrader, J., Wilson, M., Gruen, B., Morbitzer, R., Yang, Y., Williams, C., Brust, F., Fredette, L. and Ghadiali, N., 2005, "The Battelle Integrity of Nuclear Piping (BINP) Program Final Report," *NUREG/CR-6837*, Vol.2.
- (9) Hopper, A., Wilkowski, G., Scott, P., Olson, R.,

- Rudland, D., Kilinski, T., Mohan, R., Ghadiali, N. and Paul, D., 1996, "The Second International Piping Integrity Research Group (IPIRG-2) Program - Final Report," *NUREG/CR-6452*, BMI-2195.
- (10) Boyce, B.L. and Dilmore, M.F., 2009, "The Dynamic Tensile Behavior of Tough, Ultra-Strength Steels at Strain-Rates from  $0.0002\text{s}^{-1}$  to  $200\text{s}^{-1}$ ," *Int. J. Impact Eng.*, Vol.36, pp. 263~271.
- (11) Solomos, G., Albertini, C., Labibes, K., Pizzinato, V. and Viaccoz, B., 2004, "Strain Rate Effects in Nuclear Steels at Room and Higher Temperatures," *Nucl. Eng. & Design*, Vol. 229, pp. 139~149.
- (12) American Standard for Testing Materials, 2009, "Standard Test Methods for Tension Testing on Metallic Materials," ASTM E8/E8M-09.
- (13) 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.
- (14) Marschall, C.W., Mohan, R., Krishnaswamy, P. and Wilkowski, G., 1994, "Effect of Dynamic Strain Aging on the Strength and Toughness of Nuclear Ferritic Piping at LWR Temperatures," *NUREG/CR-6226*.
- (15) Diter, G.E., 1988, *Mechanical Metallurgy*, McGraw-Hill, London, pp. 283~301.
- (16) American Standard for Testing Materials, 2007, "Standard Test Methods for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Steel Materials," ASTM E646-07.
- (17) Murty, K.L. and Charit, I., 2009, *An Introduction to Nuclear Materials - Fundamental and Applications*, Wiley-VCH, Weinheim, pp.193~195.