

박판 스프링용 스테인리스강재(STS301CSP)의 시험온도에 따른 기계적 특성평가

류태호*(서울산업대학원 정밀기계공학과, 동은정공(주)), 원시태(서울산업대 금형설계학과), 박상연, 임철록(대원강업(주))

The Effects of the Testing Temperatures on the Mechanical Properties of the Stainless Steel(STS301CSP) for Flat Spring

T. H. Ryou(Pre. Mech. Eng. Dept., SNUT, Dong Eun CO., LTD.), S. T. Won(Die & Mold Design. Dept., SNUT), S. E. Park, C. R. Lim(Daewon Kang Up Co., Ltd.)

ABSTRACT

This study examined the effects of the testing temperature on the mechanical properties of the stainless steels (STS301CSP-3/4H and STS301CSP-H) for flat spring. Hardness test and fatigue test were performed at room temperature (20℃). Tensile test and creep test were performed at temperature range 20℃ ~ 100℃. The micro-vickers hardness values of STS301CSP-3/4H and STS301CSP-H were HV=443 and HV=488, respectively. The Elastic modulus, tensile strength, yield strength and strain of these materials were decreased with increasing testing temperature, respectively. The maximum creep strain for 100hr at creep temperature (100℃ ~ 100℃) and creep stress (Tensile strength×50%) of these materials were 0.53%~0.58%. The fatigue limit of STS301CSP-3/4H and STS301CSP-H were 64.5Kgf/mm² and 67.4Kgf/mm², respectively.

Key Words : Stainless steel for flat spring(박판 스프링용 스테인리스강재), Testing temperature(시험온도), Tensile test(인장시험), Creep test(크리프시험), Fatigue test(피로시험)

1. 서론

점점, 릴레이 스위치, 리드디스차지 밸브 등과 같이 가전제품, 통신기기, 자동차 관련 산업에서 광범위하게 사용되고 있는 박판 스프링은 점점 소형화 되고 있으며, 이들 제품의 고속화, 다기능화에 따라 고정밀도 및 고강도의 특성이 요구되고 있다. 특히 판 두께 1mm 이하의 박판 스프링에 대해서는 평가방법에 따라 특성값도 상이하게 나타나기 때문에 일본의 경우에는 박판 스프링의 특성평가 위원회가 구성되어 특성 평가방법을 규정하여 사용하고 있다.^{1,2}

한편 박판 스프링용 재료는 전기적 특성, 내식성 및 가공성 때문에 인칭동, 베릴륨동과 같은 비철계 합금이 사용되고 있으나 아직도 철강 재료가 많이 사용되고 있는 실정이다.³

특히 탄소공구강은 일반적으로 내구성이 좋아 산업기기, 자동차, 가전제품에 이용되고 있으며, 스테인리스 강재는 내식성 및 비자성의 특성 때문에 전기, 전자부품이나 내식성이 요구되는 스프링 용도에 널리 이용되고 있다.^{4,6} 특히 박판 스프링용 오스테나이트계 스테인리스강은 용체화 처리 후 조질 압연에 의해 다량의 변형유기 마르텐사이트가 발생하는 특징 때문에 이 재료는 냉간 압연율을 조절하여 필요한 강도를 얻어 사용한다.⁴

이와같이 주변 관련 산업의 발달과 더불어 점차 박판 스프링의 용도가 널리 확대되고 있는 시점에서 국내의 경우 박판 스프링의 국산화 및 사용 환경을 고려한 특성 평가에 대한 자료는 매우 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 국산 박판 스프링용 재료의 사용온도 및 하중조건하에서의 이들 특성값의 데이터 베이스화를 위한 계통적인 연구의 일환으로

스테인리스 강재인 STS301CSP재에 대하여 평가 실험을 행하였다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험재료

스테인리스 강대는 열간 코일에서 냉간압연을 하여 1150~ 1160℃에서 고용화 열처리를 한 후 조질압연을 통하여 최종 가공 두께를 결정하고, 조질압연의 크기에 따라 소재의 경도 및 강도를 증가시킨다.

본 실험에 사용한 STS301CSP-3/4H 및 STS301CSP-H인 스테인리스 강대의 조질 압연 후의 두께는 0.5mm이고 Table 1.은 화학성분을 나타낸 것이다.

Table 1. Chemical compositions of specimens

Specimens	t(mm)	Chemical composition						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
STS301CSP-3/4H	0.5	0.111	0.55	0.93	0.025	0.002	17.07	6.67
STS301CSP-H	0.5	0.12	0.58	0.84	0.026	0.003	17.11	6.08

2.2 현미경 조직검사방법

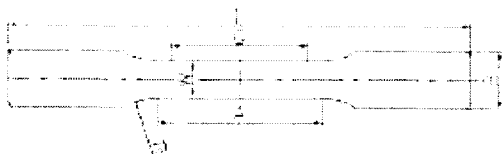
현미경 조직은 왕수[HCl(3)+HNO₃(1)] 용액을 사용하여 부식시킨 후 주사 전자현미경(SEM, Hitachi S-2300)에서 1500배의 배율로 관찰하였다.^{7,8}

2.3 경도실험방법

실험 재료는 0.5mm의 박판이므로 경도값의 측정은 시험편을 마운팅 한 후, 미소 비커어스 경도계[Model Future Tech. FM-7]를 사용하여 100g, 200g, 300g의 3종류의 시험하중 조건에서 측정 한 후, 시험하중의 영향을 비교하였다. 이 때 측정회수는 각각의 시험하중에서 10회 실시하였다.²

2.4 인장시험편 및 인장실험방법

인장시험편의 규격 및 형상은 Fig. 1과 같고, 시험편의 동일 규격화를 위하여 금형을 제작하여 프레스에서 블랭킹 가공을 하였다.



A=60(mm) B=20(mm) G=50(mm) L=170(mm)
R=25(mm) W=12.5(mm) t=0.5(mm)

Fig. 1 Geometry of tensile test specimen

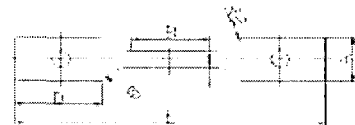
인장시험은 가열챔버[Model SF868E]가 부착된 Instron 인장시험기[Model 8516]를 이용하였고, 시험속도는 10mm/min로 하였다.

이때 시험온도는 상온(20℃)과 50℃, 100℃, 150℃, 200℃의 5종류를 선정하였다.²

한편 상온에서의 탄성계수의 측정은 시험편의 평행부에 스트레인게이지를 부착한 후 실험하였다.

2.5 크리프시험편 및 크리프실험방법

크리프 시험편의 형상과 규격은 Fig. 2와 같고, 시험편의 동일한 규격화를 위하여 금형을 제작하여 프레스에서 블랭킹 가공을 하였다. 크리프 시험은 가열챔버[최대온도 1000℃] 및 스트레인메타[1/100mm측정가능]가 부착된 크리프시험기[Model CR500]를 이용하였다. 이때 크리프 시험은 크리프온도 100℃, 150℃, 200℃에서 크리프하중은 각각 상온 인장강도의 1/5, 1/3, 1/2로 설정한 후, 100시간 유지하는 동안의 크리프 변형률을 측정하였다.²



A=20(mm) B=30(mm) C=7(mm)
D=35(mm) E=120(mm) t=0.5(mm)

Fig. 2 Geometry of creep test specimen

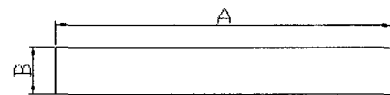
2.6 피로시험편 및 피로실험방법

피로시험은 Fig. 3의 규격과 형상을 갖는 4개의 피로시험을 Fig. 4와 같이 장착하여 구동축에서 일정 변위량(진폭) ±10mm를 반복속도 500rpm으로 동시에 줄 수 있는 Fig. 5의 쉘레버 Type의 기계식 피로시험기를 이용하였다.

이때 피로응력 σ 는 상온 인장강도의 40~ 80%범위에서 식(1)을 이용하여 Fig. 4의 외팔보 길이 l 을 결정하였다.

$$\sigma = \frac{6FL}{Bk^2} = \frac{3Ek\delta}{2l^2} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 E : 종탄성계수, k =0.5mm, δ =10mm이다.



A=100(mm) B=10(mm) t=0.5(mm)

Fig. 3 Geometry of fatigue test specimen

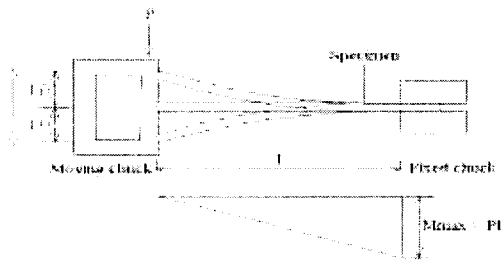


Fig. 4 Setup of the specimen for fatigue test

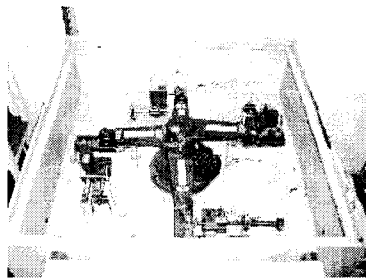


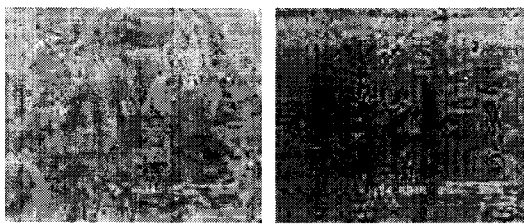
Fig. 5 Cantilever type fatigue test machine

3. 실험결과 및 고찰

3.1 현미경 조직사진 결과 및 고찰

Fig. 6은 본 실험에서 사용한 스테인리스강재의 조직 사진으로서 조직 압연에 의해 오스테나이트 조직이 치밀해 지고 있음을 볼 수 있었다.

특히 조직 압연율의 크기가 큰 STS301CSP-H재의 경우가 STS301CSP-3/4H재에 비해 오스테나이트조직이 더욱 치밀하고, 집합조직 내에 더욱 많은 슬립 발생에 의한 쌍정조직을 관찰 할 수 있다.



(a) STS301CSP-3/4H (b) STS301CSP-H
Fig. 6 Micro-Structure of Stainless steel(1500X)

3.2 경도실험결과 및 고찰

Fig. 7은 실험재료에 대한 시험하중과 경도값의 관계를 나타낸 것으로서 100~ 300kgf 시험하중에 의한 경도값의 차이는 거의 나타나지 않고 STS301CSP-3/4H재의 경도값은 HV=443, STS301CSP-H재의 경도값은 HV=488으로 조직 압연율이 큰 STS301CSP-H재의 경도값이 크게 나타난다.

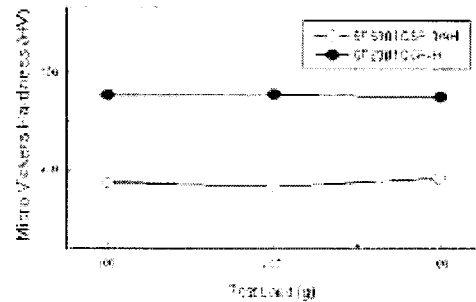


Fig. 7 The relation between Micro-vickers hardness and measuring load

3.2 인장실험결과 및 고찰

Fig. 8은 상온~ 200℃의 인장시험 온도범위에서 얻어진 스테인리스강재의 탄성계수, 인장강도, 항복강도 및 연신율의 관계를 나타낸 것이다.

먼저 STS301CSP-3/4H재의 인장실험 결과를 살펴보면 탄성계수는 상온에서 15,543kgf/mm²이고, 200℃에서 12,907kgf/mm²로 상온의 약 0.83배의 크기를 갖는다. 또한 인장강도는 상온에서 128.9kgf/mm²이고 200℃에서 110.5kgf/mm²로 상온의 약 0.86배의 크기를 갖는다. 한편 항복강도는 상온에서 115.7kgf/mm²이고 200℃에서 89.8kgf/mm²로 상온의 약 0.78배로 나타났다. 특히 변형률은 상온에서 25.1%이지만 100℃에서 8.4%로 상온의 약 0.33배의 크기로 변형률이 급격하게 저하하였으며, 200℃에서의 변형률은 5.3%로 상온의 약 0.23배로 감소하였다.

한편 STS301CSP-H재의 인장시험 결과를 살펴보면 탄성계수는 상온에서 16,519kgf/mm²이고, 200℃에서 13,986kgf/mm²로 상온의 약 0.85배의 크기를 갖는다. 또한 인장강도는 상온에서 149.8kgf/mm²이고, 200℃에서 140.6kgf/mm²로 상온의 약 0.94배의 크기를 갖는다. 한편 항복강도는 상온 및 100℃의 시험온도에서는 약 141kgf/mm²으로 큰 변화가 없지만 150℃ 및 200℃에서는 각각 129.1kgf/mm² 및 127.9 kgf/mm²로 상온의 약 0.90배로 나타났다. 또한 변형률은 상온에서 15.2%이고 100℃에서 4.3%로 상온의 약 0.28배의 크기로 변형률이 급격하게 저하하였으며, 200℃에서의 변형률은 2.9%로 상온의 약 0.19배로 감소하는 것을 볼 수 있었다.

이상의 인장실험결과를 종합하면 동일한 시험온도에서 나타나는 이들 재료의 탄성계수, 인장강도 및 항복강도는 냉간압연율이 큰 STS301CSP-H재의 이들값이 STS301 CSP-3/4H의 이들값보다 크게 나타나고 있으며, 이들 두 재료 모두 시험온도가 상온에서 200℃로 증가함에 따라 이들 특성값은 서서히 저하하였다. 한편 변형률은 시험온도가 증가할수록 항복강도 및 인장강도가 저하함에도 불구하고 증가하지

않고 점점 저하하는 현상이 나타나고 있다. 이 결과는 STS301 및 STS304재를 $-200^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 의 시험온도에서 인장실험을 실시한 결과, 시험온도가 증가할수록 인장강도는 계속 저하지만, 변형률은 -200°C 에서 50°C 까지의 시험온도 범위에서는 시험온도가 증가할수록 서서히 증가한 후, 50°C 에서 200°C 의 시험온도 범위에서는 시험온도가 증가할수록 오히려 변형률이 저하하는 현상이 나타난다는 결과⁹⁾와 일치한다.

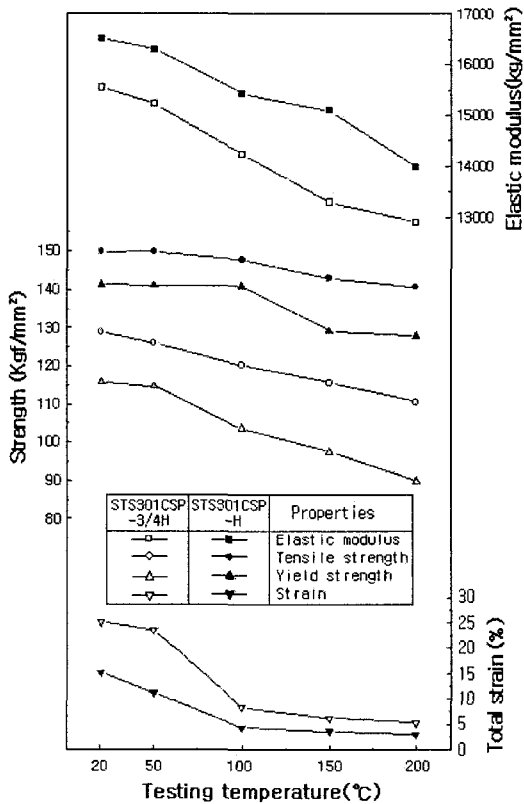


Fig. 8 The relations between mechanical properties and tensile testing temperature

3.4 크리프실험결과 및 고찰

Fig. 9 및 10은 STS301CSP-3/4H재 및 STS301CSP-H재에 대하여 크리프 온도 100°C , 150°C 및 200°C 에서 각각 상온 인장강도의 20%인 $25.78\text{kgf}/\text{mm}^2$ 및 $29.96\text{kgf}/\text{mm}^2$, 상온 인장강도의 33.3%인 $42.97\text{kgf}/\text{mm}^2$ 및 $49.89\text{kgf}/\text{mm}^2$, 상온 인장강도의 50%인 $64.45\text{kgf}/\text{mm}^2$ 및 $74.90\text{kgf}/\text{mm}^2$ 로 일정한 부하 응력을 가한 후 100시간까지 경과하는 동안에 나타나는 크리프 변형률의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 11은 이들 재료가 각각의 크리프 온도에서 크리프 응력이 작용하여 100시간이 경과한 후 발생한 크리프 변형률과 크

리프 온도와의 관계를 나타낸 것이다.

이 결과 STS301CSP-3/4H재 및 STS301CSP-H재 모두 크리프 응력이 인장강도의 20%로 낮은 경우에는 $100^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 의 크리프 온도에서는 크리프 초기 변형률 및 100시간 경과후의 크리프 변형률이 약 0.23% 이하의 크기를 갖으며, 크리프 응력이 인장강도의 50%에서는 $100^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 의 크리프 온도범위에서 크리프 초기변형률 및 100시간이 경과한 후의 크리프 변형률은 약 0.5%~0.58% 정도로 나타나고 있음을 알 수 있었다.

한편 Fig. 12 및 Fig. 13은 STS301CSP-3/4H재 및 STS301CSP-H재에 대하여 크리프 온도와 크리프 시간을 고려한 LMP(Larson Miller Parameter)^{10,11}와 크리프 변형률의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 14는 이들 재료에 대한 크리프 부하응력의 크기와 Fig. 12 및 Fig. 13의 LMP와 크리프 변형률 관계에서 구한 크리프 변형률 기울기와의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과 STS301CSP-3/4H재는 크리프 응력이 증가하면 기울기 값이 0.00857에서 0.02136으로, STS301CSP-H재는 0.0106에서 0.02416으로 서서히 증가함을 알 수 있다.

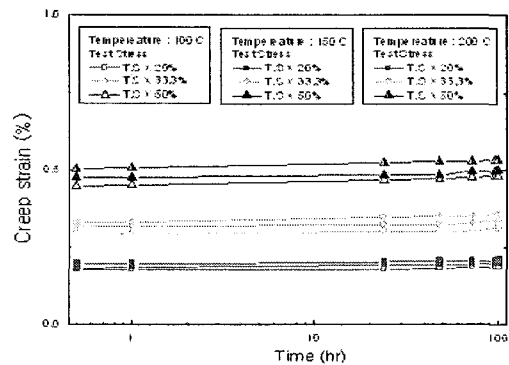


Fig. 9 The relation between creep strain and creep time of STS301CSP-3/4H material

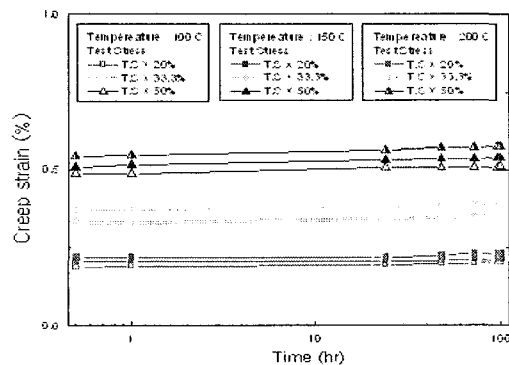


Fig. 10 The relation between creep strain and creep time of STS301CSP-H material

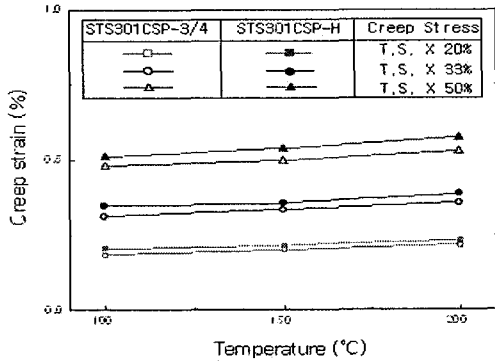


Fig. 11 The relation between creep strain and creep temperature for creep time 100hr

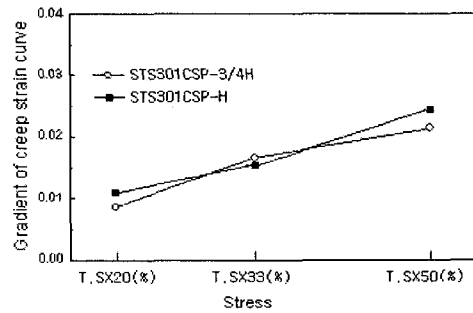


Fig. 14 The relations between gradient of Creep Strain and Creep stress

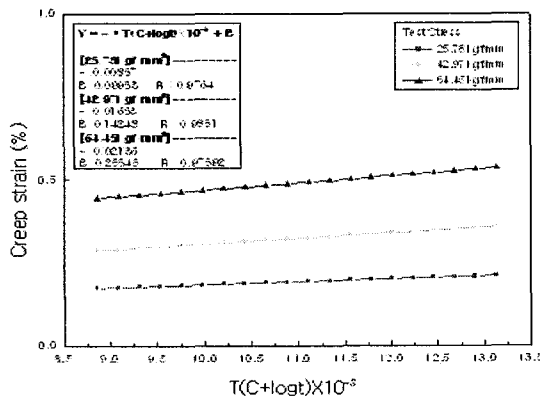


Fig. 12 The relations between creep strain and LMP of STS301CSP-3/4H material

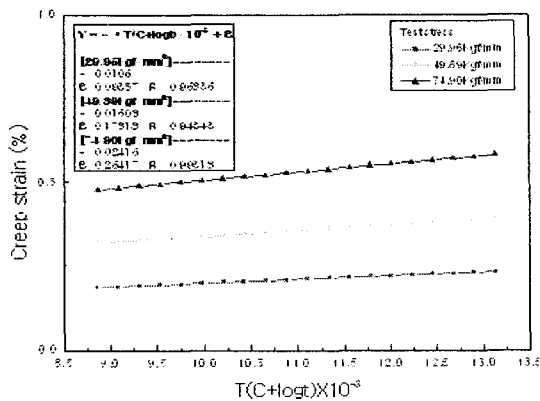


Fig. 13 The relations between creep strain and LMP of STS301CSP-H material

3.5 피로실험결과 및 고찰

Fig 15는 STS301CSP-3/4H 및 STS301 CSP-H재의 피로실험 결과에서 얻어진 S-N 곡선을 나타낸 것이다. STS301CSP-3/4H재의 경우 인장강도의 약 60%인 77.34kgf/mm²의 피로응력에서의 피로수명은 약 100,000회이고, 인장강도의 약 50%인 64.5kgf/mm²의 피로응력에서는 10⁷회에서도 파손이 발생하지 않았다. 따라서 본 실험에서 사용한 STS301CSP-3/4H재의 피로한도는 상온 인장강도의 약 50%의 크기임을 알 수 있었다. 또한 STS301CSP-H재의 경우 인장강도의 약 60%인 89.88kgf/mm²의 피로응력에서의 피로수명은 약 98,000회이고, 인장강도의 약 45%인 67.41kgf/mm²의 피로응력에서는 10⁷회에서도 파손이 발생하지 않았다. 따라서 본 실험에서 사용한 STS301CSP-H재의 피로한도는 상온 인장강도의 약 45%의 크기임을 알 수 있었다.

특히 피로실험결과 STS301CSP-H재의 피로한도는 67.4kgf/mm²로서 STS301CSP-3/4H재의 64.5kgf/mm² 보다 크지만, 내구한도비[피로한도/인장강도]는 0.45로서 STS301CSP-3/4H재의 내구한도비 0.5보다 작게 나타나고 있는 것은 준안정 오스테나이트계 스테인리스강인 STS301재는 압연율이 클수록 인장강도는 증가하지만 내구한도비는 저하하는 경향이 나타난다고 한 결과¹ 와도 일치하고 있음을 볼 수 있다.

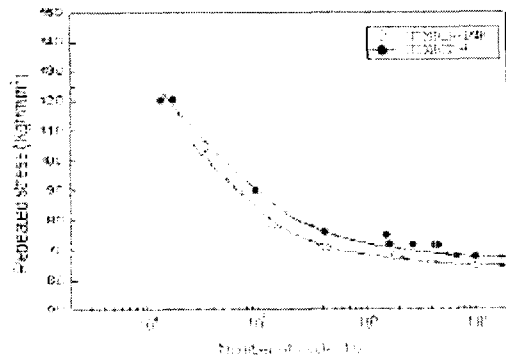


Fig. 15 S-N curve of STS301CSP

4. 결론

박판 스프링용 스테인리스 강대인 STS301CSP-3/4H 및 STS301CSP-H의 시험온도에 따른 기계적 특성실험 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. 경도값은 조질 압연율이 큰 STS301CSP-H재가 HV488로서 STS301CSP-3/4H재의 HV443보다 크다.

2. 인장 실험결과 조질 압연율이 큰 STS301CSP-H재의 탄성계수, 인장강도 및 항복강도는 STS301CSP-3/4H재의 이들값보다 크게 나타나며, 이들 재료는 모두 시험재료가 상온에서 200℃로 증가하면 이들 특성값은 서서히 저하한다. 그러나 변형률은 시험온도가 증가할수록 항복강도 및 인장강도가 저하함에도 불구하고 계속적인 저하현상이 나타난다.

3. 크리프 시험결과 STS301CSP-3/4H재 및 STS301CSP-H재는 크리프 응력이 인장강도의 20%로 낮은 경우에는 100℃~200℃의 크리프 온도 범위에서 크리프 초기 및 100시간 경과 후의 크리프 변형율은 약 0.23% 이하이며, 크리프 응력이 인장강도의 50%에서는 크리프 초기 및 100시간 경과 후의 크리프 변형률은 약 0.5%~0.58% 정도로 나타난다.

4. 피로시험결과 STS301CSP-H재의 피로한도는 67.4kgf/mm²로서, STS301CSP-3/4H재의 64.5kgf/mm²보다 크지만, 내구한도비는 0.45로서 STS301CSP-3/4H재의 내구한도비인 0.5보다 작게 나타난다.

참고문헌

- (1) ばね技術研究會, 細線・薄板疲勞特性研究會, ? 細線・薄板疲勞特性デ? 夕集?, pp.3, pp. 7, pp.20~ 23, pp.27, pp.49~ 51, 2001. 3
- (2) 薄板ばね強度委員會, ? 薄板ばねの特性評? 法に關する研究?, ばね論文集, 第31?, pp.76~ 102
- (3) ばね技術研究會, ? 薄板ばね?, 1975.8
- (4) ばね技術研究會, ばね技術シリ?ズ, ばねの種類と用途例", 日刊工業新聞社, 東京, pp.28~ 33, 1998.
- (5) 田中良平, ? JIS使い方トシリズ, ステンレス鋼の選ひ? 方使い方?, 日本規格協會, pp.129~ 146, pp.210~ 215, 1994
- (6) ばね技術研究會, ? ばね技術シリ?ズ, ばね用材料とその特性?, 日刊工業新聞社, 東京, pp.147~ 157, 2000
- (7) 佐藤知雄, ? 鐵鋼の顯微鏡寫眞と解説?, 丸善(株), pp.184~ 193, 1975
- (8) Gunter Peter(原), 文人炯(譯), ? Metallographisches Atzen(金屬組織에칭技術)? pp.63~

67, pp.71~ 78, 1987

- (9) ? 스테인리스 강 편람?, 세화출판사, pp.18, pp.112, pp.157~ 158, 1992.12
- (10) Larson, F. R and Miller, J., A? Time Temperature Relationship for Rupture and Creep Stresses?, Transaction of the ASME, pp.756~ 775, 1952
- (11) 鈴木房幸, ? 工業材料のクリプ?, コロナ社, pp.314, pp.318, 1965