

고강도 소재의 인장과 저주기피로 물성치의 연관성에 관한 연구

박명규¹ · 서창희[#]

A Study on the Relationship between Tensile and Low Cycle Fatigue Properties of High Strength Material

M. K. Park, C. H. Suh

(Received December 6, 2013 / Revised February 10, 2014 / Accepted February 21, 2014)

Abstract

Low cycle fatigue characteristics are very important in the development of automobile suspension parts. Fatigue properties using the strain life approach are usually obtained from low cycle fatigue tests. However, low cycle fatigue testing requires a lot of time and cost. In the current study, an attempt to estimate low cycle fatigue properties of high strength steel sheet from tensile test and tensile simulations is performed. In addition, low cycle fatigue testing was conducted to compare the fatigue properties obtained from tensile testing and simulations. In conclusion, the results effectively predict the low cycle fatigue properties. However, some deviations still exist.

Key Words : Tensile Test, Low Cycle Fatigue, High Strength Steel, Fracture Strain, Finite Element Simulation

1. 서론

내구성이 요구되는 자동차 현가부품의 설계를 위해서는 피로해석이 필수적으로 요구된다. 피로해석을 위해서는 부품이 외부에서 하중을 받을 때 부품의 내부에 발생하는 응력값과 소재의 피로 물성치가 필요하다. 부품의 내부에 발생하는 응력은 구조해석을 통해서 얻어지며, 발생하는 응력이 탄성응력이면 응력-수명 접근법(stress-life approach)에 관련된 고주기피로(high cycle fatigue) 물성치가 요구되고 소성응력인 경우에는 변형율-수명 접근법(strain-life approach)에 관련된 저주기 피로(low cycle fatigue) 물성치가 요구된다. 자동차 현가 부품은 소성변형을 허용하는 설계를 하기 때문에 변형율-수명 접근법에 의한 저주기 피로수명예측이 주로 이루어진다.

소재의 저주기피로 물성치는 피로시험기, 변형율

제어기, 많은 양의 피로 시험편 등을 사용하여 장시간의 피로시험을 통해서 얻어진다. 따라서 피로시험에 따른 시간과 비용의 낭비를 줄이기 위해서 손쉬운 시험인 인장시험을 통해서 저주기피로 물성치를 구하고자 하는 연구들이 진행되고 있다[1~3]. 하지만 이러한 연구들은 대부분 봉상형의 저강도 소재들을 대상으로 하고 있다.

본 연구에서는 최근에 현가부품의 소재로 사용되고 있는 시편의 단면이 사각인 보론강(boron steel)[4] 판재소재를 대상으로 인장특성과 저주기피로 특성의 상관성을 검토하였다. 보론강은 열처리 조건을 달리하여 다양한 고강도 특성을 부여하여 사용하였으며, 인장시험과 인장해석을 사용하여 저주기피로 물성치를 예측하였다. 그리고, 저주기피로 시험을 수행하였으며, 인장시험과 저주기피로 시험에서 얻어진 피로 물성치를 비교검토 하였다.

1. 영남이공대학교 기계계열

Corresponding Author : Daegu Mechatronics & Materials Institute, E-mail : suhch@dmi.re.kr

Table 1 Chemical compositions of boron steel (wt. %)

| Elements | C | Si | Mn | P | S | B | Fe |
|----------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| Contents | 0.24 | 0.22 | 1.19 | 0.01 | 0.002 | 0.002 | Bal. |

2. 실험 및 해석방법

2.1 실험 방법

본 연구에 사용된 보론강의 화학 조성은 Table 1과 같으며, 두께는 2.6mm이다. 인장시편은 ASTM E8, 저주기피로 시험은 ASTM 606 규격에 따라서 제작하여 사용하였다. 제작된 시편에 고강도 특성을 부여하기 위해서 열처리를 실시하였다. 900℃로 가열된 가열로(furnace)에서 5분 동안 가열하였으며, 수냉(water cooling), 유냉(oil cooling), 공냉(air cooling)의 3가지 조건으로 냉각하였다. 인장시험은 2 mm/min의 속도로 수행하였으며, 표점거리가 25mm인 연신율계와 Instron 5569 시스템을 사용하였다. 인장시험 후 파단신율(fracture strain)을 확인하기 위해서 비접촉식 치수측정기를 사용하여 파단된 단면적을 측정하였다. 파단신율은 식(1)을 사용하여 계산하였다.

$$\bar{\epsilon}_f = \ln \frac{A_0}{A_f} \quad (1)$$

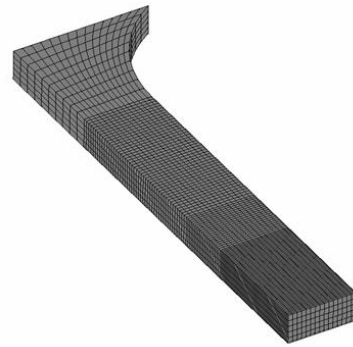
여기서 $\bar{\epsilon}_f$ 은 파단신율을, A_0 는 초기단면적, A_f 는 파단 단면적을 나타낸다.

저주기피로 시험은 MTS810 시스템을 사용하였으며, 변형율비를 -1로 하였다. 변형율 속도는 5×10^{-3} /s이며, 삼각파를 사용하여 시험하였다. 판재의 저주기 피로시험에서는 압축시 좌굴의 발생위험이 있기 때문에 좌굴방지 장치를 제작하여 시험하였다[5].

2.2 해석 방법

인장시편의 파단 단면적을 사용하여 계산된 파단신율은 넥킹(necking)발생의 영향으로 인해서 오차를 포함하게 된다. 따라서 인장시험을 통해 얻어진 파단신율을 인장해석을 활용하여 비교검토하여 사용하여야 한다. 인장해석을 통해서 정확한 파괴시점을 예측하기 위해 연성파괴조건인 하나인 식(2)와 같은 Modified Cockcroft-Latham 모델[6]을 사용하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C \quad (2)$$

**Fig. 1 Finite elements model for tensile simulation**

여기서 σ^* 는 최대인장주응력, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\bar{\epsilon}_f$ 는 파단신율을 나타낸다. 파단신율은 소재별 파괴조건을 나타내는 상수로 본 연구에서는 식(1)을 통해 얻은 값을 사용하였다.

유한요소 모델은 대칭성과 해석시간을 고려하여 Fig. 1과 같이 인장시편의 1/8만 모델링하여 사용하였다. 변형이 크게 발생하는 표점거리부에는 상대적으로 많은 요소를 할당하여 정밀한 해석이 되도록 하였으며, 소성거동을 표현하기 위해서 Von Mises 항복조건과 등방경화이론을 적용하였다. 연성파괴조건에 도달한 요소들은 해석 모델에서 제거하면서 실제의 연성 파괴를 묘사하였다. 유한요소해석은 상용 탄소성 해석 프로그램인 MARC2010을 사용하였으며, 인장시험에서 얻어진 유동응력을 사용하여 해석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 파단신율 및 파단응력

인장시험 전 측정된 초기 단면적, 인장시험 후 측정된 파단 단면적, 식(1)을 사용해 계산된 파단신율을 Table 2에 나타냈다. 그리고, Fig. 2에는 비접촉식 치수측정기로 측정된 유냉된 시편의 파단면을 나타냈다.

인장시험 후 파단면을 활용하여 얻어진 파단신율의 정확성을 확인하기 위해서 인장해석을 수행하였다. 인장해석에서는 유동응력이 필요하기 때문에 인장시험에서 얻어진 데이터를 활용하여 유동응력을 획득하였다. 항복점에서 최대인장강도까지 일축인장영역의 데이터를 활용하였으며, 자동차용 금속소재의 유동응력 구성식으로 널리 사용되는 Holloman식

Table 2 Cross section area and fracture strain obtained from tensile specimens

| | Air cooling | Oil cooling | Water cooling |
|--------------------|-------------|-------------|---------------|
| $A_0(\text{mm}^2)$ | 12.715 | 12.715 | 12.715 |
| $A_f(\text{mm}^2)$ | 6.346 | 7.806 | 8.473 |
| $\bar{\epsilon}_f$ | 0.693 | 0.489 | 0.405 |

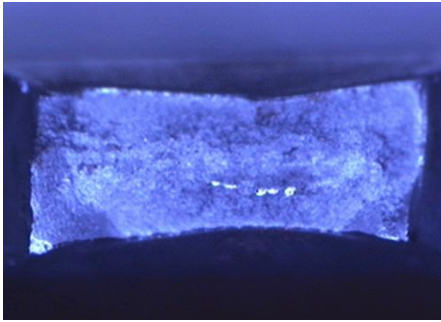


Fig. 2 Fractured area of oil cooled specimen after tensile test

(3)과 Swift식(4)를 사용하여 피팅하였다. 파단신율은 실험에서 얻어진 값을 사용하였으며, 연성과파괴조건을 적용하였다. 균일연신구간에서 최대인장주응력과 유효응력의 비는 1을 가지며, 네킹발생이후는 최대인장응력이 유효응력에 비해서 다소 높은 값을 가지지만 그 차이가 크지 않기 때문에 파괴시까지 최대인장주응력과 유효응력의 비는 1이라고 가정하였다. 즉, 파단신율과 C값이 같다는 가정을 하고 해석을 수행하였다.

$$\sigma = K\epsilon^n \quad (3)$$

$$\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n \quad (4)$$

Fig. 3에 인장해석에서 넥킹 발생 후 시편의 심부에서 연성과파괴가 발생하는 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 인장시험에서와 동일하며, 인장해석으로 인장시험의 파단을 정확히 표현할 수 있음을 확인하였다. Fig. 4에 인장시험과 해석에서 얻어진 공칭응력-변형을 비교하여 나타냈다.

공냉의 경우는 Swift식을 사용한 경우가, 유냉과 수냉의 경우는 Holloman식을 사용한 경우에 유효응력의 전체적인 거동과 공칭상태의 연신율이 실험과 잘 일치하였다. 즉, 인장시험 후 측정된 파단면을 사용하여 구한 파단신율이 인장의 파괴예측을 하는데 매우 효과적인 값을 도출해 주고 있음을 확인할 수 있다. 단, 인장시험에서 균일연신 이내에서 얻어진

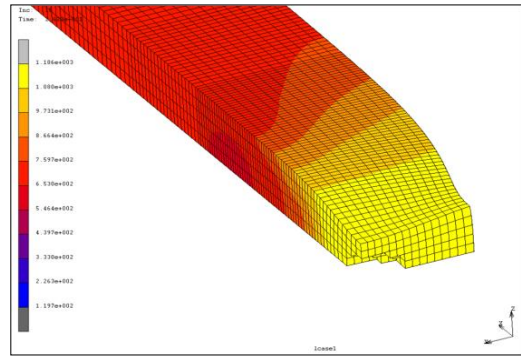
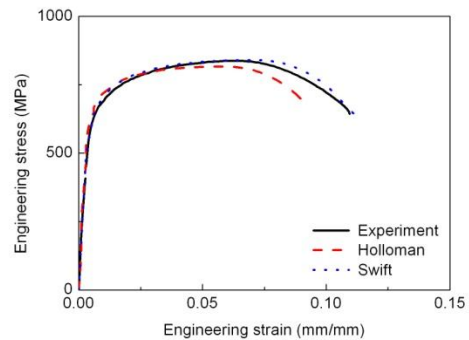
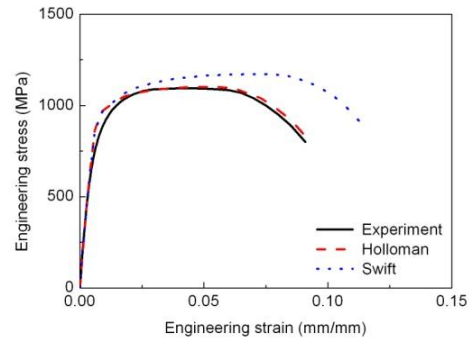


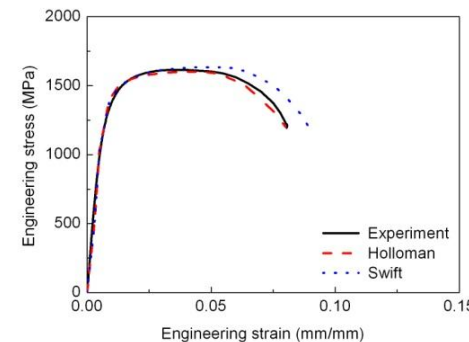
Fig. 3 The result of tensile simulation



(a) Air cooling



(b) Oil cooling



(c) Water cooling

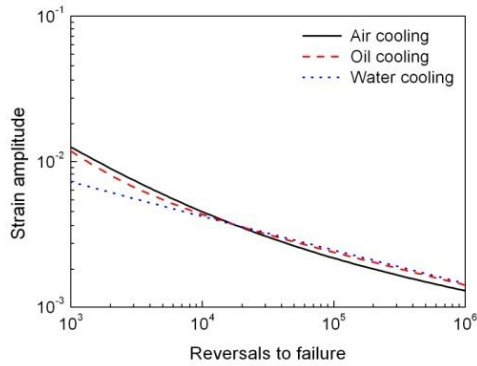
Fig. 4 Comparison of engineering stress-stain curves obtained from tensile test and tensile simulation

Table 3 Fracture stress obtained from flow stress constitutive equation

| | Air cooling | Oil cooling | Water cooling |
|------------------------|-------------|-------------|---------------|
| $\bar{\sigma}_f$ (MPa) | 1,237 | 1,471 | 2,023 |

Table 4 Fatigue properties obtained from low cycle fatigue tests according to cooling methods

| | ϵ'_f | c | σ'_f (MPa) | b |
|---------------|---------------|-------|-------------------|-------|
| Air cooling | 0.72 | -0.63 | 1,959 | -0.15 |
| Oil cooling | 10 | -1.09 | 3,777 | -0.22 |
| Water cooling | 0.018 | -0.61 | 7,084 | -0.23 |

**Fig. 5 Strain-life curves according to cooling methods**

데이터를 사용하여 유동응력 구성식을 피팅하는 과정에서 데이터의 양이 많지 않아서 몇 번의 보정과정을 거쳐서 최종 선정된 유동응력을 사용하였다. 파단응력은 각각의 유동응력식에 파단신율값을 사용하여 구하였으며, Table 3에 결과를 나타냈다.

3.2 저주기피로 물성치

저주기피로수명의 예측을 위해서는 Coffine-Manson[7]과 Basquin[8]이 제안한 식을 주로 사용하며, 식 (5)와 같이 표현된다. 여기서 $\Delta\epsilon/2$ 은 전변형율진폭, σ'_f 는 피로강도계수, b 는 피로강도지수, ϵ'_f 은 피로연성계수, c 는 피로연성지수, N_f 는 피로수명을 의미한다. 상기의 피로물성치들은 저주기피로 시험을 통해서 얻을 수 있으며, 실험을 통해 얻어진 결과를 Table 4에 나타냈다. Fig. 5에는 저주기피로 시험을 통해서 얻어진 피로물성치를 사용한 변형율-수명선도를 나타냈으며, 3가지 조건의 저주기피로 수명선도가 교차되는 변형율진폭은 약 0.005로 나타났다. 0.005 이하의 저변형율진폭영역에서는 고강도특성이

피로수명을 지배해서 인장강도가 높은 수냉, 유냉, 공냉의 순으로 피로수명이 높게 나타났으며, 고변형율진폭영역에서는 연성이 피로수명을 지배하기 때문에 연성이 우수한 공냉, 유냉, 수냉의 순으로 수명이 높게 나타났다. 이러한 경향은 이전의 연구들에게서도 나타나는 현상으로 본 연구에서도 동일한 경향을 나타냈다. 다만, 공냉의 경우는 고변형율진폭 영역과 그 이하의 저변형율진폭 영역에서 피로수명 데이터를 획득할 수 있었으나 유냉과 수냉의 경우는 소재의 고강도 특성으로 인해서 고변형율진폭 영역의 데이터를 획득하는데 어려움이 있었다. 따라서 피로연성계수 및 지수 값들이 다소의 오차를 포함하고 있을 것으로 생각된다.

$$\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{\sigma'_f}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (5)$$

3.3 인장-저주기피로 물성치 관계

피로강도계수와 피로연성계수는 각각 식(6) 및 (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 이 두 가지 피로물성치는 인장시험과 해석에서 얻어진 결과를 사용해서 구할 수가 있다. 피로강도지수는 대부분의 금속에서 -0.12 ~ -0.05의 범위를 가진다고 보고되고 있지만[3] 본 연구에서는 저주기피로 시험결과 -0.23 ~ -0.15의 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 피로연성계수는 대부분의 금속소재의 경우 -0.7 ~ -0.5의 값을 가진다고 알려져 있으며[3], 본 연구에서는 -1.09 ~ -0.61의 값을 가짐을 확인하였다.

$$\bar{\sigma}_f \approx \sigma'_f \quad (6)$$

$$\bar{\epsilon}_f \approx \epsilon'_f \quad (7)$$

Fig. 6에 저주기 피로시험에서 구한 피로물성치와 인장시험 및 해석에서 구한 피로물성치를 사용하여 구해진 변형율-수명선도를 나타냈다. 인장시험을 활용한 변형율-수명선도에서는 인장에서 얻어진 파단신율과 파단응력을 사용했으며, 피로강도지수와 피로연성지수는 기존 연구에서의 평균값인 -0.085와 -0.6을 사용하였다. 공냉의 경우에는 인장시험에서 얻어진 결과와 피로시험결과가 유사하게 나타났지만, 유냉 및 수냉의 경우에는 다소의 차이를 나타냈다. 공냉의 경우는 피로시험을 통해서 저변형율진폭과 고변형율진폭 영역 모두에서 데이터를 확보할

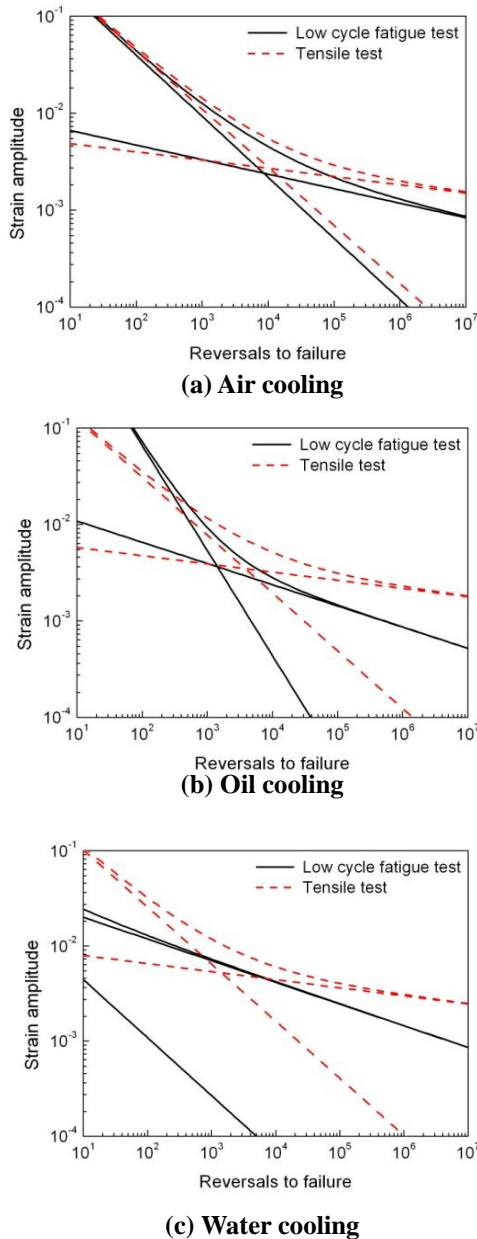


Fig. 6 Comparison of strain-life curves obtained from tensile test and low cycle fatigue

수 있었기 때문에 신뢰성 있는 피로시험 데이터를 획득할 수 있었다. 반면에 유냉과 수냉의 경우는 피로시험시 좌굴방지지를 부착하였지만 소재의 고강도 특성으로 인해서 고변형율진폭 영역에서의 시험은 좌굴발생으로 불가능하였다. 즉, 저변형율진폭 영역의 시험데이터만을 얻을 수 있었기 때문에 피로물성치의 신뢰성이 다소 떨어졌을 것으로 생각된다. 따라서 변형율-수명선도의 차이를 나타낸 것으로 생각된다. 또한 이전의 연구들은 대부분 원통형

의 시편을 사용해서 피로시험을 수행하였기 때문에 시편의 표면상태를 균일하게 할 수 있으며, 사각시편의 모서리와 같은 취약영역이 없기 때문에 피로시험 데이터의 신뢰성을 담보할 수 있었을 것으로 생각된다. 또한, 본 연구에서는 사각시편을 밀링으로 가공하여 사용하였기 때문에 표면거칠기 효과가 피로수명에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

피로강도지수와 피로연성지수를 저주기피로시험에서 얻어진 값을 사용하였을 경우도 참고문헌의 값을 사용한 경우와 유사한 경향성을 나타냈으며, 사각단면을 가지는 판재시편의 피로수명 예측을 위해서는 위에서 언급한 내용을 고려하여 추가의 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

판상형 고강도 소재를 대상으로 인장시험을 활용한 저주기피로 물성치의 예측에 대해서 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 인장시험 후 파단면 측정을 통해서 파단신율을 획득하였으며, 연성과피조건을 활용한 인장해석을 통해서 측정된 파단신율의 정확성을 확인하였다. 또한, 유동응력 구성식을 사용하여 파단응력을 구할 수 있었다.

(2) 인장시험과 인장해석에서 얻어진 피로물성치와 저주기피로 시험을 통해서 얻어진 피로물성치를 비교한 결과 인장강도가 약 800MPa 정도인 공냉의 경우는 유사한 결과를 얻을 수 있었으나, 1,000MPa 이상의 고강도특성을 가지는 유냉과 수냉의 경우에는 다소의 차이를 나타냈다.

후 기

이 논문은 2012학년도 영남이공대학교 연구조성비 지원에 의한 것임.

REFERENCES

- [1] J. A. Bannantine, J. J. Comer, J. L. Handrock, 1990, Fundamentals of Metal Fatigue Analysis, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, pp. 63~64.
- [2] J. H. Park, J. H. Song, 1995, Detailed Evaluation of Methods for Estimation of Fatigue Properties, Int. J.

- Fatigue, Vol. 17, No. 5, pp. 365~373.
- [3] R. W. Landgraf, 1970, Resistance of Metals to Cyclic Deformation, ASTM STP 467, pp. 3~36.
- [4] J. K. Park, Y. S. Kim, O. S. Seo, M. G. Lee, H. Y. Kim, 2013, Improved Hot-stamping Analysis of Tubular Boron Steel with Direct Measurement of Heat Convection Coefficient, Int. J. Auto. Technol., Vol. 14, No. 5, pp. 717~722.
- [5] W. S. Jang, C. H. Suh, S. K. Oh, D. B. Kim, J. H. Sung, Y. C. Jung, Y. S. Kim, 2010, Low-cycle Fatigue in Quenched Boron Steel Sheet due to Hot Stamping, Trans. Korea Soc. Mech. Eng. A, Vol. 34, No. 10, pp. 1419~1425.
- [6] S. I. Oh, C. C. Chen, S. Kobayashi, 1979, Ductile Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing, J. Eng. Ind. Trans. ASME, Vol. 101, No. 1, pp. 36~44.
- [7] L. F. Coffin, Jr., 1954, A Study of the Effects of Cyclic Thermal Stresses on a Ductile Metal, Trans. ASME, Vol. 76, pp. 931~950.
- [8] O. H. Basquin, 1910, The Exponential Law of Endurance Tests, Am. Soc. Test. Mater. Proc., Vol. 10, No. Part II, pp. 625~630.