

열간성형공법으로 제작된 현가부품의 피로특성 연구

서창희* · 박명규** · 박종규*** · 김영석****†

* 대구기계부품연구원, ** 영남이공대학교, *** (주)화신, **** 경북대학교

Study on Fatigue Characteristic of Suspension Part Using Hot Forming

Chang Hee Suh*, Myung Kyu Park**, Jong Kyu Park*** and Young Suk Kim****†

* Daegu Mechatronics & Materials Institute,

** Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam College of Science & Technology,

*** Hwashin Co., Ltd.

**** School of Mechanical Engineering, Kyungpook Natl. Univ.

(Received July 25, 2012 ; Revised October 15, 2012 ; Accepted October 16, 2012)

Key Words : Hot Forming(열간성형), Suspension Part(현가부품), Fatigue(피로), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

초록: 보론강을 사용하는 열간성형은 경량화된 자동차 차체부품의 생산을 위해서 최근에 널리 사용되고 있으며, 열간성형 후 약 1,500 MPa 정도의 고강도 특성을 얻을 수 있다. 그러나 열간성형이 현가부품에 사용되기 위해서는 고강도 특성보다 피로특성이 더 중요해진다. 따라서, 본 연구에서는 열간성형에 의해 제작된 자동차 현가부품의 일종인 튜블러 토션빔 액슬의 피로특성에 대하여 연구하였다. 냉각방식에 따른 보론강의 저주기 피로특성에 대하여 연구하였으며, 튜블러 토션빔 액슬의 피로수명을 예측하기 위해서 구조 및 피로해석이 수행되었다. 튜블러 토션빔 액슬의 토션빔 영역에서 응력집중이 발생하였으며, 열간성형에 의한 고강도화가 튜블러 토션빔 액슬의 수명향상에 큰 영향을 미쳤다.

Abstract: Hot forming using boron steel is currently used for manufacturing low-weight automobile body parts, and a high tensile strength of about 1,500 MPa is obtained after hot forming. However, a high fatigue life is a more important factor than high strength when it is used for automobile suspension parts. A tubular torsion beam axle (TTBA) is one of these suspension parts, and this research deals with the fatigue characteristic of TTBA using hot forming. The low cyclic fatigue life of boron steel is investigated according to the cooling method. In addition, a structural and fatigue analysis of TTBA is performed to predict the fatigue life. The stress concentration that occurs in the tubular torsion beam is found, and the longest fatigue life occurs when rapid cooling is utilized in the TTBA fabrication.

1. 서론

자동차용 현가부품은 타이어의 운동을 제어하면서 운전자가 원하는 방향으로 움직이게 하거나 노면과 타이어에서 발생하는 진동을 차체로 전달하는 과정에서 진동을 흡수하는 역할을 하기 때문에 우수한 피로특성이 요구된다.

소형 자동차의 후륜용 현가부품으로 토션빔 액슬(Torsion beam axle)이 널리 사용되고 있는 추세이며, 일체화와 비용저감을 위해서 튜브(Tube)소재를 적용한 튜블러 토션빔 액슬(Tubular torsion beam

axle)이 일부 적용되고 있다. 최근에는 튜블러 토션빔 액슬의 경량화와 피로수명을 향상시키기 위해서 보론강과 같은 열처리용 소재를 사용해 열간성형공법으로 초고강도화 하려는 요구가 지속적으로 대두되고 있다.

기존의 열간성형에 대한 연구들은 대부분 판재로 성형되는 차체부품들을 대상으로 하고 있으며, 이러한 연구들은 대부분 열간성형 공정시 성형성,⁽¹⁻³⁾ 열전달 현상,^(4,5) 조직의 변화^(6,7) 등에 초점이 맞추어져 있다. 최근에 튜브형 소재를 사용하여 성형과 열처리 특성에 대한 연구들이 일부 수행되고 있다.^(8,9) 하지만 현가부품에 보론강을 적용하기 위해서는 성형성 이외에 소재와 부품의 피로특성에 대한 연구가 요구된다.

† Corresponding Author, caekim@knu.ac.kr

이 등⁽¹⁰⁾은 판재형 시편으로 시험이 용이한 열간성형된 보론강관의 고주기 피로특성을 연구하여 원소재에 비해서 우수한 피로수명을 가진다고 보고하였으며, 장 등⁽¹¹⁾은 보론강관을 사용하여 열처리를 통해서 고강도의 마르텐사이트를 생성시켜 저주기피로특성에 대하여 연구하였다. 하지만 지금까지의 연구들은 대부분 소재적인 관점에서 접근한 연구들이며, 열간성형 중 급냉된 소재에 대한 피로특성을 다루고 있는 연구들이었다. 따라서 본 연구에서는 열간성형공정에서 냉각속도를 달리하여 제작된 소재의 피로시험을 통해 도출된 변형률-수명 선도를 사용하여 현가부품의 피로수명을 예측하는 종합적인 연구를 수행하였다.

2. 소재 피로특성

2.1 실험 방법

본 연구에 사용된 보론강의 화학조성은 Table 1 과 같으며, 두께는 2.6 mm 이다. 인장시편과 피로 시편은 ASTM E8 과 ASTM 606 규격에 따라서 제작하였으며, 표점거리부는 가공시 열영향을 최소화하기 위해서 저속에서 밀링가공 하였다. 가공된 시편은 열간성형공정을 묘사하기 위해서 900℃에서 5 분 동안 가열하였으며, 강제공냉(Air cooling), 유냉(Oil cooling), 수냉(Water cooling)의 3 가지 방식으로 냉각하였다. 인장시험은 0.017 mm/s 의 속도로 변위 제어방식으로 수행하였으며, 표점거리가 25mm 인 연신율계와 Instron 5569 장비를 사용하였다. 저주기 피로시험은 MTS810 을 사용하였으며, 변형률 제어방식으로 변형률비 -1 에서 시험하였다. 변형률 속도는 $5 \times 10^{-3}/s$ 이며, 삼각파형을 사용하여 시험하였다. 판재의 저주기 피로시험에서는 압축시 좌굴의 발생위험이 있기 때문에 좌굴방지 장치를 제작하여⁽¹¹⁾ 시험하였다.

2.2 실험 결과

인장시험 결과를 Fig. 1 과 Table 2 에 나타냈다. 강도는 수냉, 유냉, 공냉의 순으로 높게 나타났으며, 연신율은 반대의 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 수냉에서 가장 냉각속도가 빠르기 때문에 고강도의 마르텐사이트 조직이 얻어졌으며, 냉각속

도가 느릴수록 페라이트와 같은 연한 조직이 생성되었기 때문일 것으로 예상된다.

저주기 피로시험 후 변형률-수명 결과를 Fig. 2 및 Table 3 에 나타냈다. 유냉과 공냉한 시편을 사용한 피로시험에 비해서 수냉한 시편은 높은 변형률 진폭에서 좌굴이 발생하여 낮은 변형률진폭 수준에서만 시험이 이루어졌다. 따라서 소성변형 영역에서의 정확한 변형률-수명 결과를 얻기 어려웠으나, 탄성영역과 항복점 근처의 미소한 소성영역이 발생하는 영역에서는 정상적인 실험이 이루어졌다. 현가부품 피로특성

3. 현가부품 피로특성

3.1 구조해석

튜브러 토션빔 액슬에서는 롤내구성(Roll durability)이 중요하게 요구되기 때문에 실제 피로 시험이 수행되는 롤거동과 동일한 조건으로 구조 해석을 수행하였다. 롤거동은 차체와 부착되는 두 곳과 타이어가 연결되는 한곳을 고정하고 반대쪽 타이어와 고정되는 나머지 한곳을 상하 운동시키는 조건으로 차량의 주행시 가장 가혹한 조건의 하나이다.

Table 2 The results of tensile test

Condition	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
Air cooling	824	591	14
Oil cooling	1,098	877	10
Water cooling	1,622	1,296	9

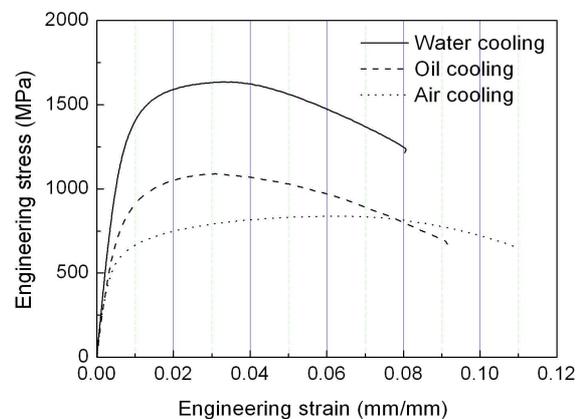


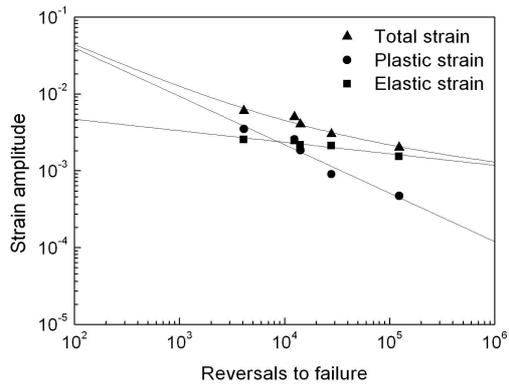
Fig. 1 Engineering stress - strain curves according to cooling methods

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

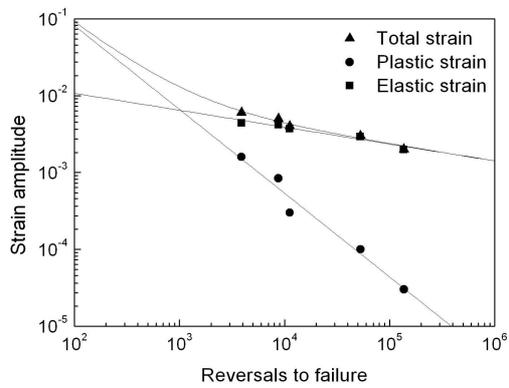
Elements	C	Si	Mn	P	S	B	Fe
Contents	0.24	0.22	1.19	0.01	0.002	0.002	Bal.

Table 3 Fatigue properties according to cooling methods

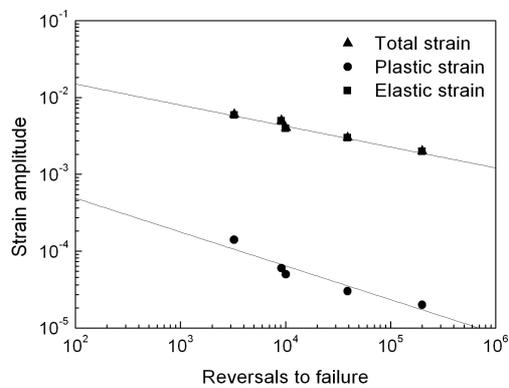
	ϵ_f'	c	σ_f'	b	K'	n'
Air cooling	0.72	-0.63	1,959	-0.15	2,606	0.32
Oil cooling	10	-1.09	3,777	-0.17	2,844	0.24
Water cooling	0.018	-0.61	7,084	-0.23	9,015	0.41



(a) Air cooling



(b) Oil cooling



(c) Water cooling

Fig. 2 Strain amplitude vs reversals to failure according to cooling methods

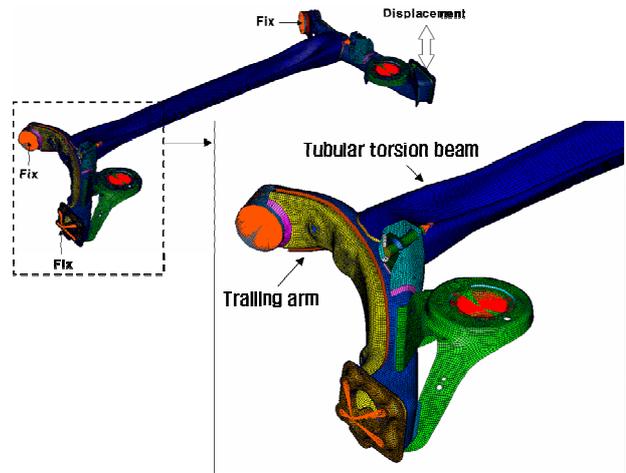
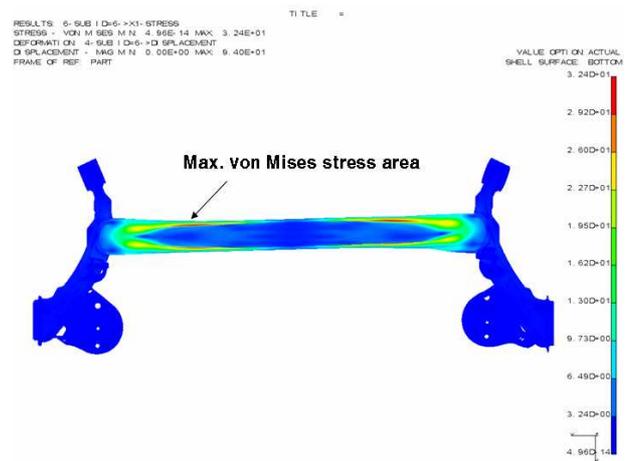
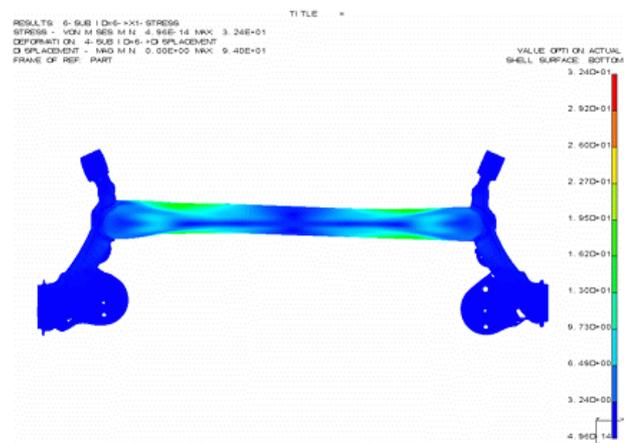


Fig. 3 Finite element model and boundary condition of tubular torsion beam axle for structural simulation



(a) Top view



(b) Bottom view

Fig. 4 Stress distribution of tubular torsion beam axle after structural simulation

해석에 사용된 유한요소모델과 경계조건을 Fig. 3에 나타냈다. 튜블러 토션빔 액슬은 튜블러 토션빔(Tubular torsion beam)영역과 트레일링암(Trailing arm)영역으로 크게 나뉘어진다. 차체와 타이어에 부착되는 3부분을 구속하고 나머지 한 부분에 변위제어 방식으로 ±80 mm의 변위를 부여하였다. 해석에 사용된 요소는 쉘요소이며, 구속부와 변위부여부에 노드(Node)를 생성하고 강체요소(Rigid bar)를 사용하여 연결하였다. 탄성계수는 210 GPa, 프아송비는 0.3을 사용하였다. 구조해석을 위해서 사용된 소프트웨어는 MSC. Nastran 이다.

해석결과를 Fig. 4에 나타냈다. 튜블러 토션빔 내부에 형상이 급변하는 구간에 317.5 MPa(32.4 kgf/mm²)의 최대 von Mises 응력이 발생하였다. 최대 von Mises 응력이 발생하는 구간은 Fig. 4(a)에 표시된 구간이지만 제품 형상의 대칭성으로 인해서 거의 유사한 수준의 최대응력이 중심부를 기준으로 오른쪽 대칭 구간에도 발생하고 있음을 확인하였다. 용접부에서 발생하는 응력은 상대적으로 크지 않았으며, 이는 트레일링암영역이 튜블러 토션빔에 비해서 상대적으로 강건하게 설계되었기 때문일 것으로 생각된다.

열처리 조건에 따라서 소재의 강도는 변하지만 탄성계수는 거의 영향을 받지 않기 때문에 소재에 관계없이 구조해석결과는 모두 동일한 응력 분포를 가지게 된다. 하지만 동일한 응력이 작용하고 있는 경우에 소재의 피로특성이 다르기 때문에 현가부품의 피로수명은 변하게 된다. 구조해석에서 발생하는 최고응력인 317.5 MPa는 보론강 소재의 인장시험 결과와 비교했을 때 소성변형이 거의 발생하지 않는 낮은 응력상태이다. 따라서 튜블러 토션빔 액슬의 피로수명은 탄성거동에 의해서 주로 영향을 받을 것으로 생각된다.

3.2 피로해석

기존에 냉간성형공법으로 제작되는 튜블러 토션빔은 DP590 소재를 사용하고 있기 때문에 DP590 소재의 피로물성치⁽¹²⁾와 열간성형공정에서 냉각방식에 따라서 제작된 3종의 보론강(공냉, 유냉, 수냉)의 저주기 피로물성치를 사용하여 튜블러 토션빔 액슬의 피로수명을 예측하였다. 피로해석을 위해서 사용된 소프트웨어는 MSC. Fatigue 이며, 구조해석의 선형 응력 및 변형률 결과를 탄소성 응력 및 변형률로 변환하기 위해서 Neuber rule⁽¹³⁾을 적용하였다. 피로해석에서는 인장방향의 응력이 피로균열의 생성에 지배적인 역할을 하기 때문에 구조해석에서 얻어진 최대주응력을 사용하여 피로

해석을 수행하였다.

Fig. 5에 공냉된 소재의 피로물성치를 사용한 피로수명분포 결과를 나타냈으며, Table 4에는 소재별 피로수명 결과를 나타냈다. 피로해석에서 균열이 생성되는 위치는 구조해석에서 응력이 집중되는 부위와 동일하였으며, 소재의 인장강도가 증가할수록 피로수명은 증가하는 경향을 나타냈다. 소재에 따라서 피로수명의 분포는 큰 차이를 나타내지 않았으며, Fig. 5에 나타난 공냉조건과 거의 유사한 분포를 나타냈다. 롤거동조건에서 요구되는 피로수명이 30 만회 이기 때문에 DP590, 공냉, 유냉 조건의 소재는 피로수명기준을 만족하지 못하였다. 하지만 수냉된 소재는 기준수명을 만족하였다. 이러한 결과는 소재의 롤거동시 발생하는 최대응력이 소재에 소성변형을 거의 발생시키지 않는 응력범위로 튜블러 토션빔 액슬이 설계되었기 때문일 것으로 판단된다. 보론강을 급냉하여 소재의 강도를 향상시키면 피로수명도 증가하는 효과를 가져오기 때문에 현가부품의 설계 자유도 향상에 유리할 것으로 판단된다. 또한 동일한 형상에서 피로수명이 향상되기 때문에 소재의 두께를 감소하여 경량화가 가능할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 시제품 제작

튜블러 토션빔은 열간성형공법으로 제작하였다. 금형과 튜브를 접촉시키면서 냉각시키는 공법으로

Table 4 Fatigue life after fatigue simulation

	DP590	Air cooling	Oil cooling	Water cooling
Fatigue Life (Cycles)	147,000	154,000	155,000	859,000

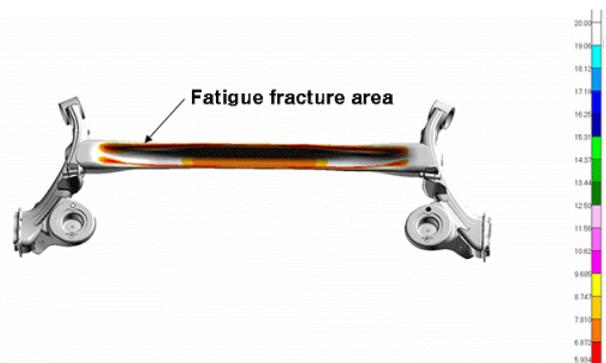
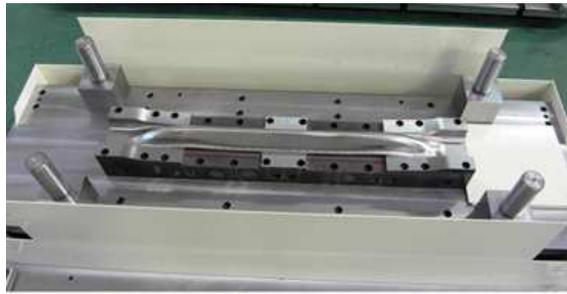
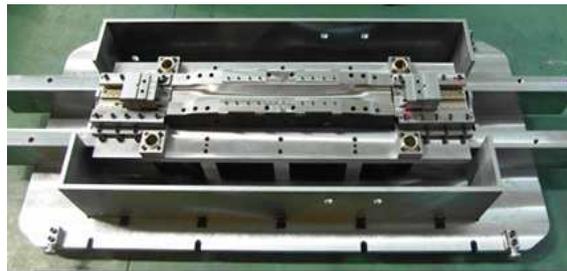


Fig. 5 Fatigue life distribution of tubular torsion beam axle which has Air cooling fatigue properties after fatigue simulation



(a) Upper die



(b) Lower die

Fig. 6 Dies for hot forming

소재를 급냉하여 고강도 특성을 생성하였으며, 금형과 접촉이 되지 않는 부분은 직접적으로 물을 뿌리는 방식으로 냉각하였다. 개발된 공정으로 튜블러 토션빔을 성형하였으며, Fig. 6 에 성형에 사용된 금형을 나타냈다.

Fig. 7 에는 열간성형된 튜블러 토션빔의 형상과 단면의 경도 실험 결과를 나타냈다. 개발된 열간성형공법에 의해서 튜브소재가 급냉되어져 전체적으로 고강도 특성이 얻어졌음을 확인하였다.

Fig. 8 에는 최종적으로 완성된 튜블러형 토션빔 액슬의 형상을 나타냈다. 열간성형공법으로 튜블러형 토션빔을 제작하였으며, 트레일링암부의 각종 브라켓(Bracket)들은 일반적인 프레스 공법으로 제작하여 아크용접을 통해서 최종 시제품을 완성하였다.

3.4 현가부품의 피로시험

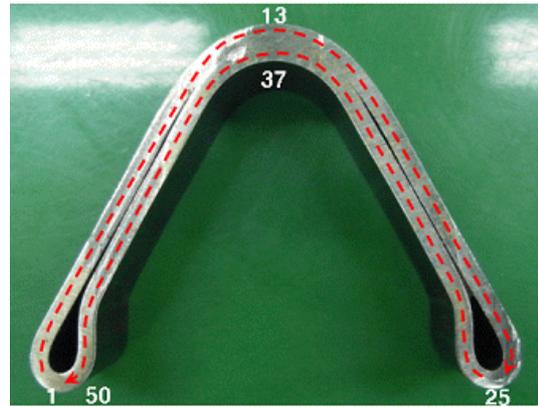
물거동을 표현하기 위해서 구조해석과 동일한 조건으로 현가부품의 피로시험을 수행하였으며, Fig. 9 에 피로시험 지그에 장착된 튜블러형 토션빔 액슬의 전경을 나타냈다. 3 부분을 고정시키고 1 부분에 액추에이터(Actuator) 및 로드셀(Load cell)을 장착하였으며, 변위제어 방식으로 시험을 수행하였다. 구조해석과 동일하게 ±80 mm 의 변위를 부여하였으며, 시험속도는 0.5 Hz 로 고정하였다.

피로시험 결과 30 만회의 요구조건까지 시험을 완료한 후 부품의 전체면을 면밀히 검토한 결과

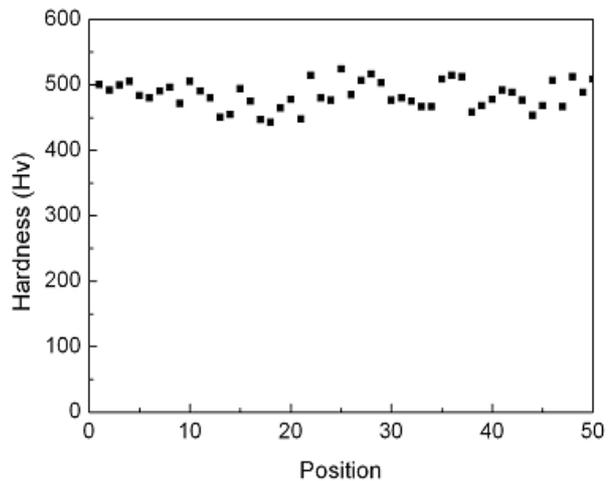
피로균열은 발생되지 않았다. 피로해석에서 30 만



(a) Tubular torsion beam



(b) Measured positions of hardness test



(c) The result of hardness test

Fig. 7 Prototype of tubular torsion beam and hardness distribution at the cross section of the center of tubular torsion beam



Fig. 8 Prototype of tubular torsion beam axle

회 이상의 수명을 나타내는 경우는 수냉을 한 경우이며, 시제품 제작도 급냉을 통해서 제작되었기 때문에 시험결과와 해석결과는 잘 일치하고 있는 것으로 판단된다. 물거동 조건에서는 튜블러 토션빔을 열간성형에 의해서 고강도화하는 시도가 피로수명을

향상시킬 수 있는 중요한 요소임을 확인하였다.

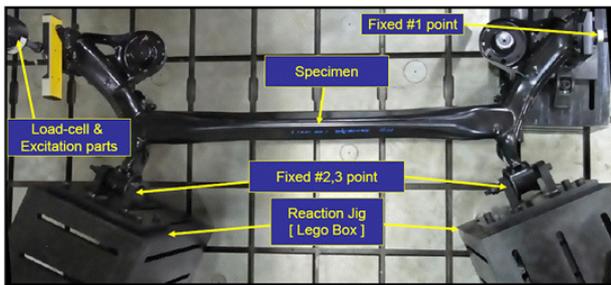


Fig. 9 The experimental apparatus for suspension part fatigue test

4. 결론

본 연구에서는 현가부품의 일종인 튜블러 토션빔 액슬을 열간성형공법으로 제작하여 롤거동시 피로특성에 대하여 검토하였으며, 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 열간성형 소재인 보론강을 사용하여 냉각조건에 따른 저주기 피로물성치를 획득하였다.

(2) 열간성형공법으로 제작된 튜블러 토션빔 액슬을 대상으로 구조해석을 수행하였으며, 튜블러 토션빔 내부의 형상이 급변하는 부분에서 최대응력이 발생하였다. 즉, 튜블러 토션빔의 피로물성치가 부품의 수명을 지배하게 된다.

(3) 구조해석 후 응력분포를 사용하여 피로해석을 수행하였으며, 기존에 사용되는 소재인 DP590 과 공냉, 유냉의 경우는 현가부품의 목표 수명을 만족하지 못하였으나, 수냉의 경우는 목표수명을 달성하였다. 롤거동시 현가부품은 소재의 항복강도에 비해서 낮은 응력상태를 나타냄으로 수냉에 의한 고강도화된 토션빔의 피로수명이 가장 우수하였다.

(4) 수냉으로 제작된 튜블러 토션빔을 사용한 액슬의 피로시험결과 피로해석의 결과는 동일하게 목표수명을 만족하여 해석의 유효성을 검증하였다.

참고문헌

(1) Merklein, M. and Lechler, J., 2006, "Investigation of the Thermo-Mechanical Properties of Hot Stamping Steels," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, pp.452~455.
 (2) Bariani, P. F., Bruschi, S., Ghiotti, A. and Turetta, A.,

2008, "Testing Formability in the Hot Stamping of HSS," *CIRP Annals-Manufacturing Technol.*, Vol. 57, pp.265~268.

(3) Turetta, A., Bruschi, S. and Ghiotti, A., 2006, "Investigation of 22MnB5 Formability in Hot Stamping Operations," *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, pp.396~400.

(4) Hoffmann, H., So, H. and Steinbeiss, H., 2007, "Design of Hot Stamping Tools with Cooling System," *Annals of the CIRP*, Vol.56, No. 1, pp.269~272.

(5) Abdulhay, B., Bourouga, B. and Dessain, C., 2011, "Experimental and Theoretical Study of Thermal Aspects of the Hot Stamping Process," *Appl. Thermal Eng.*, Vol. 31, pp.674~685.

(6) Naderi, M., Ketabchi, M., Abbasi, M. and Bleck, W., 2011, "Analysis of Microstructure and Mechanical Properties of Different High Strength Carbon Steel After Hot Stamping," *J. Mat. Process. Technol.*, Vol. 211, pp. 1117~1125.

(7) Liu, H., Jin, X., Dong, H. and Shi, 2011, J., "Martensitic Microstructural Transformations from the Hot Stamping, Quenching and Partitioning Process," *Mat. Characterization*, Vol. 62, pp. 223~227.

(8) Chae, M. S., Lee, G. D., Suh, Y. S., Lee, K. H. and Kim, Y. S., 2009, "Mechanical and Forming Characteristics of High-Strength Boron-Alloyed Steel with Hot Forming," *Trans. Mater. Process.*, Vol. 18, pp.239~244.

(9) Yoon, S. J., Park, J. K., Kim, Y. S., Suh, C. H., Lee, K. H. and Kim, H. Y., 2009, "Try out Analytical Researches on Quenching Process of Coupled Torsion Beam Axle Using Boron Steel Tube," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, Gangneung, Korea, October, pp. 181~184.

(10) Lee, H. J., Joo, B. D., Park, S. P. and Moon, Y. H., 2010, "High Cycle Fatigue Characteristics of Hot Stamping Boron Steel," *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf.*, Daegu, Korea, May, pp.203~206.

(11) Jang, W. S., Suh, C. H., Oh, S. K., Kim, D. B., Sung, J. H., Jung, Y. C. and Kim, Y. S., 2010, "Low-Cycle Fatigue in Quenched Boron Steel Sheet due to Hot Stamping," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 10, pp. 1419~1425.

(12) POSCO, Automotive Steel Data Book 2011.

(13) Bannantine, J. A., Comer, J. J. and Handrock, J. L., 1990, *Fundamentals of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall, pp. 135~144.