

열간 금형재의 기계적 성질과 주조금형 피로해석모델

여은구*, 황성식(국민대 자동차전문대학원), 이용신 (국민대 기계자동차공학부),
곽시영, 김정태(한국생산기술연구소)

Mechanical Properties of Hot Working Die Steel and Fatigue Analysis Model of Casting Mold

E. G. Yoh, S. S. Hwang(Automotive Eng. Dept., KMU),
, Y. S. Lee(Mechanical Eng. Dept., KMU), S. Y. Kwak, J. T. Kim(KITECH)

ABSTRACT

Generally, the life of casting mold is limited by fatigue fracture or dimensional inaccuracy originated from wear in high temperature. Although recent research of metallic materials in high temperature fatigue have been much accomplished, many studies on brittle material as a die steel in high temperature fatigue does not have been reported. Especially, the study on the fatigue behavior over the transformation temperature is not studied sufficiently because of its difficult analysis and experiment. Therefore, reliable results of brittle material in high temperature fatigue behavior are needed. In this paper, stress-strain curves and stress-life curves in die STD61 steel are carefully examined between room temperature and 900°C, as the basic experimental data are used to predict from fatigue life of casting mold.

Key Words : High Temperature Fatigue (고온피로), BDTT (취성/연성전이온도), Stress-Life curve (응력-수명곡선), Fatigue Life (피로수명)

1. 서론

일반적인 열간공정 상태에서의 금형의 온도는 약 100-900°C 정도이다. 이러한 고온의 환경에서 성형하중과 열응력을 받게 된다면 재료의 물성치는 상온에서 측정된 값과는 전혀 다른 수치를 갖게 되며 오래 전부터 이러한 수치적 차이가 설계를 위한 해석에 고려되어 왔다. 취성재료의 피로파괴로 인한 수명예측은 하중에 의한 소재의 변형정도가 탄성영역일 경우 고사이클 응력-수명곡선을 기초로 예측하는데, 반복하중이 주어지는 온도가 고온으로 올라갈수록 기계적 물성치는 연성화된다. 최근 금속재료의 고온피로에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그럼에도 불구하고 금형강과 같은 취성재에 대한 고온피로, 즉 변태온도를 넘어선 환경에서의 피로거동에 대한 연구는 실험 및 해석상의 어려움으로 인하여 충분히 규명되어 있지 않다. 따라서 취성재의 고온피로거동에 대한 신뢰성있는 해석결과가 필요한 실정이다.

Shi 등^(1,2)은 TZM 몰리브덴합금의 고온피로거동에 대하여 열기계적 반복하중상태에서 실험한 결과로 수명예측을 하는 연구를 발표하였고, Yoo 등⁽³⁾은 고온충격, 굽힘에 대한 취성에서 연성으로 변동하는 재료의 성질에 대하여 연구하였다. Maday⁽⁴⁾는 고온에서 재료의 저사이클 피로거동에 대하여 연구하였다. Eck⁽⁵⁾와 Luo⁽⁶⁾ 등의 연구자들은 고온에서의 몰리브덴합금 거동에 대한 물성치 연구를 하였다. 하지만 대부분의 고온 피로, 크립 연구들⁽⁷⁻¹⁰⁾이 200-600°C에서 이루어졌다.

따라서 본 연구에서는 금형강 STD61 의 상온, 300°C, 500°C, 700°C, 900°C 에서 기계적 물성치와 응력-수명 곡선을 실험을 통하여 구하고 이러한 물성치 실험자료를 기초로 주조금형의 피로파괴해석을 수행한다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 실험재료는 STD61 중의 금형

강으로서, 일반적인 열간 단조, 압출, 주조용 금형 재료로 사용된다. Fig. 1 은 사용한 시편의 형상으로 규격은 ASTM E 606-92 에 맞추어 제작하였고, 금형의 경도를 만족시키기 위하여 시편가공 후 열처리하여 표면경도를 55(HRC)로 맞추었다. 열처리 효과를 비교하기 위해 공냉한 재료와 노냉한 재료를 준비하였다. 실험재료의 화학적 조성은 Table 1 과 같다. 실험장비는 MTS 810 만능재료시험기와 고온로(furnace), 냉각장치를 사용하였다. 피로실험은 하중제어로 일정하중 값을 주어 파손이 일어날 때까지 반복 수행하도록 하였다. 실험조건은 일정 응력비(R=0)와 일정 하중속도(16Hz)로 고정하였다.

피로실험에 들어가기에 앞서 고온인장실험을 하여 고온상태에서 열성화된 STD61 의 기계적성질을 측정한다. 장착된 시편의 표점거리 주변을 감싸는 소형 고온로를 설치하여 표점거리 주변을 가열한다. 고온로의 온도센서는 시편과 가열판 사이에 장착되어 있어서 시편의 온도를 감지한다. 고온에 의한 시편의 열팽창이 어느 정도 멎기까지 약 10 분에서 15 분 정도 소요된다. 마지막으로 열팽창이 적은 고온용 세라믹 신장계(extensometer)를 부착하고 나서 실험을 시작한다. 고온에서의 단축인장실험은 일정 변형률증분 (constant strain rate) 제어로 $\dot{\epsilon}=0.1, 0.01, 0.001$ (mm/mm/sec) 의 세가지 조건을 상온, 300℃부터 900℃까지 200℃간격으로 각각 구하였다. 본 실험에 사용한 고온로(furnace)는 100℃부터 1200℃까지 사용할 수 있는 장비로 가열구간이 45mm 밖에 되지않는 소형장비이다. 고온단축인장실험을 통해 구해진 고온극한강도는 고온 고사이클 피로실험에 최대하중 값으로 사용되며 피로실험의 경우 시편이 파손될 때까지의 수명을 측정하기 때문에 신장계는 부착하지 않는다.

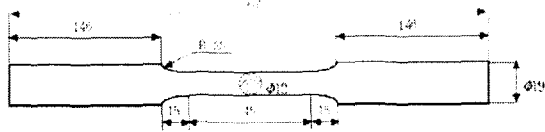


Fig. 1 Geometry of fatigue specimen

Table 1 Chemical composition of test piece

S T D 61	Chemical Composition(%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
	0.3	0.8	0.5	0.03	0.03	4.5	1	0.8
	~	~	↓	↓	↓	~	~	~
	0.4	1.2				5.5	1.5	1.2

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온단축인장

Fig. 2, 3, 4 는 상온부터 900℃까지의 단축인장실험 결과이다. STD61 은 열간 금형강으로서 상온에서는 취성의 기계적 성질을 가지고 있다가 약 600℃ 를 넘으면서 연성이 나타나는 것을 관찰할

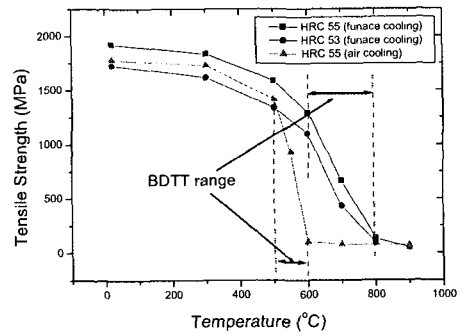


Fig. 2 Tensile Strength at Various Temperature

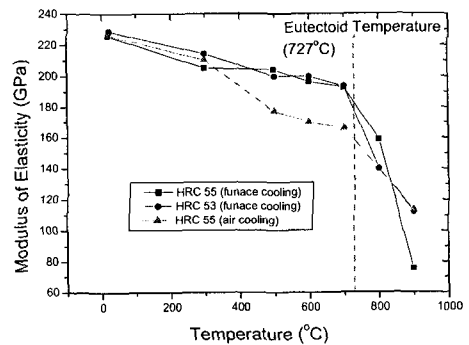


Fig. 3 Modulus of Elasticity at Various Temperature

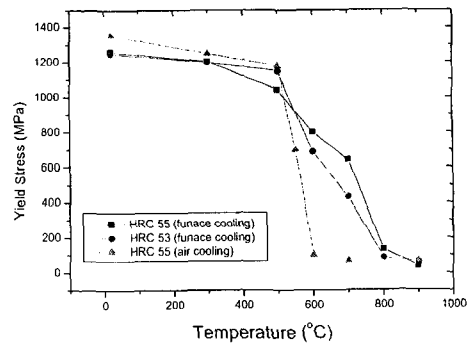


Fig. 4 Yield Strength at Various Temperature

수 있다(Fig. 2). 열처리시 담금질을 한후 냉각방법을 달리하여 실험한 결과 노냉식이 공냉식보다 재질을 더 좋게하는 것으로 확인됐다. 온도별 인장강도의 비교치를 볼 때 공냉식은 500-600℃에서 취성/연성 전이가 일어난것에 반하여, 노냉을 했던 재료는 600-800℃에서 취성/연성 전이가 일어났다. 이러한 차이는 탄성계수에서는 별다른 차이를 볼 수 없는데 반하여 항복강도를 관찰했을 때 확연히 나타났다(Fig. 3.4). 동일한 담금질을 하고 뜨임온도를 조절하여 경도를 달리한 재료의 경우 경도차이가 얼마되지 않아서 두 재료의 차이를 볼 수 없었다. 이러한 재질의 기계적 물성치는 같은 재료라 할지라도 열처리 방식에 따라서 확연히 틀려질 수 있다는 것을 확인하였다.

3.2 고온 고사이클 피로

Fig. 5 는 상온부터 900℃까지의 고사이클 실험 결과로서 Log-Log scale 로 표시한 S-N 곡선이다. 실험은 하중제어로서 일정하중 값을 주어 파손이 일어날 때까지 응력비(R=0), 온도조건 하에서 실험을 수행하였다. 하중입력파형은 Sine 파형이며 하중의 속도는 초당 16Hz 로 고정하였다.

온도의 상승에 따라 S-N 곡선은 하강하며, 그 하강차에 있어서 상온에서 500℃까지는 거의 변화가 없다가 700℃에서 900℃사이의 하강폭이 더 크게 관찰되었다. Fig. 6 는 피로실험에 의해 파손된 시편을 보여주고 있는데 파손의 형태만 보아도 연성 파괴임을 알 수 있다.

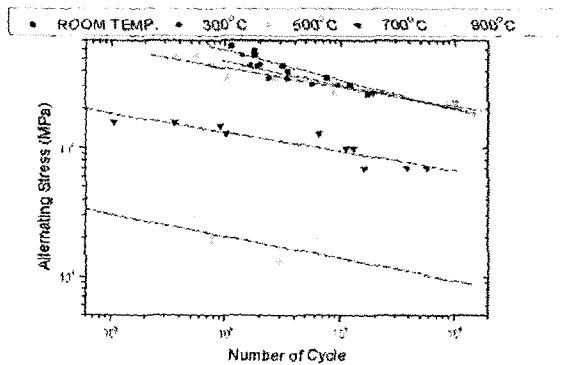


Fig. 5 S-N curve experimental results of STD61

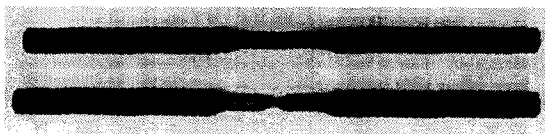


Fig. 6 Original and fractured specimen at 700℃

4. 주조금형의 피로해석모델

주조공정의 경우 금형에 가해지는 열응력이 가장 큰 외력이므로 주물에 의한 열전달해석과 주조금형의 열응력해석이 먼저 필요하다. 또한 다양한 3 차원공간에서 하중의 주기를 찾아야 하기 때문에 이력에 따른 응력 데이터가 누적되어야 한다. 이러한 하중 이력 데이터를 통해서 각 절점의 최대, 최소 응력에 따른 온도별 응력주기를 구한다. 실험에 의해 구해진 온도별 물성치값과 응력-수명곡선의 자료를 통해서 절점별 등가 피로응력을 찾아내면 그 절점의 피로수명 예측치를 알 수 있다(Fig. 7).

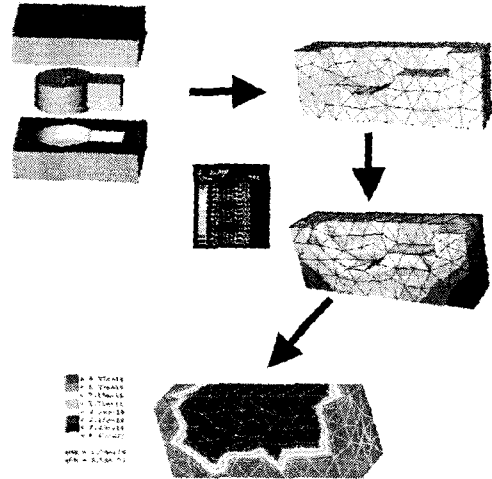


Fig. 7 Fatigue Analysis Process of Casting Mold

이러한 주조금형 피로해석모델의 응용으로 다연장 로켓 가이드 주조금형에 대한 피로수명을 해석하였다(Fig. 8).

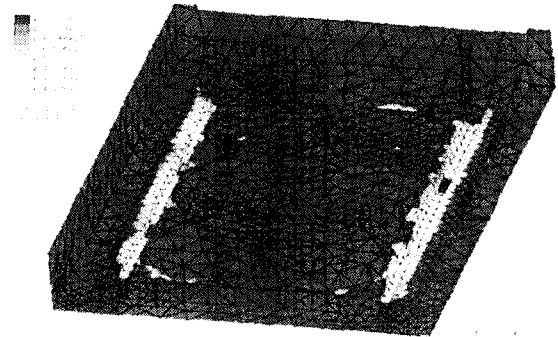


Fig. 8 Distribution of Fatigue Life in Bulk Head Mold

5. 결론

이상의 실험결과와 고찰, 주조금형 피로해석모델을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 열처리를 마친 STD61 금형강의 경우 약 600℃ 부근에서 취성/연성 전이가 일어난다.
- 2) STD61 금형강의 경우 담금질후 냉각방식에 따라 재질이 틀려지는데 공냉보다 노냉방식이 전이온도구간을 상승시킨다.
- 3) 고온에서 기계적 물성치를 알고있을 때 주조금형의 피로수명 예측모델을 제시하였다.

후 기

이 논문은 2003년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고문헌

1. Shi H. J., Niu L.S., Korn C., and Pluvinage G, "High temperature behaviour of TZM molybdenum alloy under mechanical and thermomechanical cyclic loads, "Journal of Nuclear Materials", Vol. 278, pp.328-333, 2000.
2. Shi H. J., Korn C. and Pluvinage G, "High temperature isothermal and thermomechanical fatigue on a molybdenum-based alloy", Materials Science and Engineering, Vol. A247, pp.180-186, 1998.
3. Myoung Ki Yoo, Yutaka Hiroaka, Hiroaki Kurishita, Hideo Kayano, and Ju Choi, "Recrystallization of TiC Dispersion Mo- Alloy, Int. J. of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 14, pp.355-364, 1996.
4. Maday, M.F., "Low cycle fatigue behaviour of TZM molybdenum alloy in divertor water coolant", Journal of nuclear materials., Vol.233., pp.1397-1402., 1996.
5. Eck, R., Bildstein, H., Simader, F., "Behavior of tungsten, molybdenum, and alloys under unusual heating conditions", high Temp. High Pressures, Vol. 21, pp.497-505, 1989.
6. Luo, A., Park, J. J., Jacobson, D. L., Tsao, B. H. & Ramalingam, M. L., " High-temperature tensile properties of molybdenum and a molybdenum-0.5% hafnium carbide alloy", Scripta Metall., Vol. 29, pp.729-732, 1993.
7. Nitta, A. and Kuwabara, K., "Thermal-Mechanical Fatigue Failure and Life Prediction", High Temperature Creep-Fatigue, Current Japanese materials Research, Vol. 3, pp.203-222, 1988.
8. Ohtani, R., Kitamura, T. and Tada, N., "High-Temperature Fatigue Crack Propagation under Cyclic Temperature", Trans. Japan Soc. Mech. Eng., Vol. 53, No. 490, pp.1030-1036, 1987.
9. Kitamura, T. and Ohtani, R., "Crack Propagation under Creep-Fatigue Interaction Condition", Trans. Japan Soc. Mech. Eng., Vol. 52, No. 480, pp.1816-1823, 1986.
10. 김현철, 김승한, 임병수, 김두현, 이용태, "Ti-6Al-4V 합금의 피로거동에 미치는 온도, 주파수 및 미세조직의 영향", 한국자동차공학회논문집, 제 4 권, 제 1 호, pp.198-207, 1996.