[논문] 한국소성가공학회지(2004), 제 13 권 제 5 호
Transactions of Materials Processing ***Vol.13, No.5, (2004)***

금형강 STD61 의 온도에 따른 기계적 성질의 변화

여은구* · 이용신**

(2004년 2월 24일 접수)

Temperature-dependence of Mechanical Properties of Die Steel STD61

E. G. Yoh and Y-S. Lee

Abstract

The temperature in hot forming of metallic materials, such as hot extrusion and hot forging, ranges from 300℃ to 900℃. Correspondingly, the die also exhibits high temperatures close to that of a work piece and its life is limited generally by high temperature fatigue. Thus, the analysis of high temperature fatigue would need the mechanical properties over the wide ranges of temperature. However, very few studies on the high temperature fatigue of brittle materials have been reported. Especially, the study on the fatigue behavior over such transition temperature regime is very rare. In this paper, the stress-strain curves and stress-life curves of a die steel such as STD61 are experimentally obtained. The wide ranges of temperature from 300℃ to 900℃ are considered in experiments and the transition temperature zone is carefully examined.

Key Words : High Temperature Fatigue, Hot Forging Die, Scanning Electron Microscope

1. 서 론

금형강 STD61 은 온간이나 열간 단조, 압출, 압연 가공 시 고온에서 안정되고 우수한 강도 및 피로특성을 갖고 있기 때문에 고온 금형재료로 널리 쓰여지고 있다. 일반 강재에 대한 열간가공 시 소재의 온도는 약 300~1000℃ 정도이다. 이때 성형소재 뿐만이 아니라 금형도 같은 고온의 환경에서 성형하중을 받게 된다. 기계적 물성치의 일반적인 경향은 가공온도가 고온으로 올라갈수록 금형재질이 연성화 됨을 관찰할 수 있는데 금형의 해석[1~2]을 위해서 온도에 따라 재료의 파괴를 예측하기 위한 물성치 자료가 있어야 한다. 최근 금속재료의 고온피로에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는데 그럼에도 불구하고 금형강과 같은 취성재에 대한 고온피로, 즉 변태온도를 넘어선 환경에서의 피로거동에 대한 연구는 실험 및 해석상의 어려움으로 인하여 충분히 규명되어 있지 않다. 따라서 금형재의 온도에 따른 기계적 물성치에 대한 신뢰성 있는 해석결과가 필요한 실정이다.

Shi[3] 등은 TZM 몰리브덴합금의 고온피로거동에 대하여 열기계적 반복하중상태에서 실험한 결과로 수명예측을 하는 연구를 발표하였고, Yoo[4] 등은 고온충격, 굽힘에 대한 취성에서 연성으로 변동하는 재료의 성질에 대하여 연구하였다.

* 국민대 자동차전문대학원
** 국민대 기계자동차공학부

Maday[5]는 고온에서 재료의 저사이클 피로거동에 대하여 연구하였다. Eck[6]와 Luo[7] 등의 연구자들은 고온에서의 몰리브덴합금 거동에 대한 물성치 연구를 하였다. 하지만 대부분의 고온 피로, 크립 연구들[8~9]이 200~600℃에서 이루어졌다.

따라서 본 연구에서는 금형강 STD61 의 300℃부터 900℃까지의 기계적 물성치, 응력-변형률 곡선과 응력-수명 곡선을 실험을 통하여 조사하였고, 온도에 따른 실험시편의 파면은 전자현미경을 통하여 고찰하였다.

2. 실험 방법

본 연구에 사용된 실험재료는 금형강STD61로서, 일반적으로 온간과 열간에서 단조용, 압출용 금형재료로 사용된다. Fig. 1은 실험시편의 형상으로 규격을 ASTM E 606-92에 맞추어 제작하였다. 시편의 경도를 실제 금형의 경도와 동일하게하기 위하여 시편가공 후 전기로에서 열처리하여 표면경도를 55(HRC)로 맞추었다. 실험장비는 MTS 810 만능재료시험기에 고온로(furnace)와 냉각장치를 부착하여 사용하였다.(Fig. 2)

기본적인 기계적 물성치를 측정하기 위하여 온도별 단축인장실험을 하였다. 고온실험에서 가열된 시편의 온도로 인한 열팽창을 고려하기 위하여 모든 시편은 실험온도에 도달한 후 10분간 실험온도를 유지한 후에 세라믹 신장계를 부착하고 나서 실험하였다. 고온에서의 기계적 물성치에 미치는 변형률속도(constant strain rate)와 온도의 영향을 관찰하기 위하여 300℃, 500℃에서는 $\dot{\varepsilon}$ =0.01, 0.001(mm/mm/sec), 700℃와 900℃에서는 $\dot{\varepsilon}$ =0.1, 0.001(mm/mm/sec)의 조건으로 각각 구하였다.

피로시편은 단축인장시편과 동일하게 제작하며 단축 하중제어로 일정하중 값을 주어 파손이 일어날 때까지 반복 수행하도록 하였다. 각 온도별 응력-수명곡선을 구하였으며, 실험조건은 일정 응력비(R=0)와 일정 하중속도(16Hz)로 고정하였다.

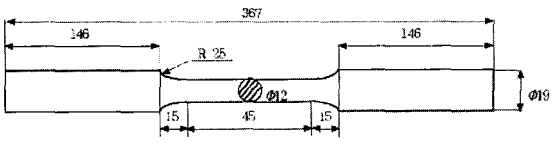

Fig. 1 Geometry of a specimen

Table 1 Chemical composition of STD61

	Chemical Composition(%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
STD61	0.32 ~ 0.42	0.80 ~ 1.20	0.5 ↓	0.03 ↓	0.03 ↓	0.045 ~ 5.50	1.00 ~ 1.50	0.80 ~ 1.20

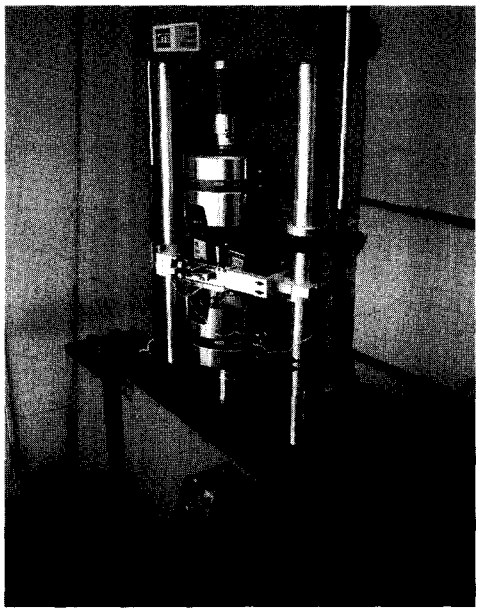

Fig. 2 Experimental equipment (MTS 810)

Table 2 Mmechanical properties of the STD61

Temper-ature(℃) /Strain rate		0.2% Yield Strength	Tensile Strength (MPa)	Modulus of Elasticity (GPa)
300℃	0.01	1250	1682	217.9
	0.001	1250	1732	210.4
500℃	0.01	1180	1439	214.8
	0.001	1180	1417	177.4
700℃	0.1	310	320	204.2
	0.001	65	80	166.0
900℃	0.1	70	80	164.3
	0.001	68	70.5	113.2

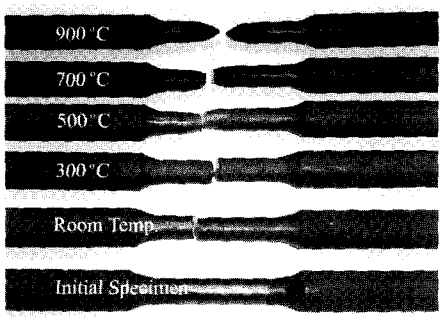

Fig. 3 Typical specimens

3. 실험결과 및 고찰

3.1 고온단축인장

금형강 STD61은 상온과 온간에서 동일한 기계적 성질을 유지하고 있지만, 일정온도에 도달하면 기계적 성질의 열화가 급격히 진행되는 것을 알 수 있다. Table 2는 300℃, 500℃, 700℃, 900℃에서 단축인장 실험을 통하여 구한 기계적 성질의 실험결과이다.(Fig. 3) 300℃와 500℃에서는 기계적 물성치가 온도에 따라 감소 폭이 적었으며 변형률속도의 영향 또한 거의 나타나지 않았다.(Fig. 4, 5)

700℃부터는 기계적 물성치의 열화가 현저하게 나타나고 있으며, 변형률속도에 대한 영향도 그 차이를 뚜렷하게 보여주고 있다.(Fig. 6) 900℃에서는 항복응력과 극한강도의 값이 300℃에 비하여 약 5% 정도 밖에 안될 정도로 현저하게 줄어듦을 관찰하였다.(Fig. 7) 이러한 사실로 700℃ 이상에서 시험편은 연성화가 급격히 진행 되었으며 연성/취성 천이온도구간이 500℃~700℃ 사이임을 추측할 수 있다. 온도가 증가함에 따라 탄성계수는 거의 변화가 없다가 700℃ 이후에 값이 감소하기 시작하여서 900℃에서는 300℃의 값보다 50% 감소한 것을 관찰할 수 있다. 온도에 가장 민감하게 변하는 물성치는 극한강도이며, 가장 둔감한 것은 탄성계수이다. 또한 변형률속도에 가장 큰 물성치 차이를 보여준 온도는 700℃ 이다. 700℃에서 기계적 물성치가 급격히 열화되는 양상의 원인은 온도가 증가됨에 따라 재료의 연성/취성 천이에 따른 것이라고 볼 수가 있다. 연성/취성 천이온도의결정 요인으로 열처리의 조건이 영향이 있는 것으로 보여진다. 이를 확인하기 위해서는 열처리와 연성/취성 천이온도의 관계에 대한 연구를 시편의 담금질(quenching)과 뜨임(tempering)의 조건에 따른 천이온도의 변동을 추적하며 관찰하는 추가 연구가 필요하리라 생각된다.

3.2 고온피로

온도에 따른 피로실험의 결과값인 응력과 수명을 통하여 S-N 곡선을 구하였다. 일반적으로 수명이 10^6 이상을 넘으면 무한수명으로 보기 때문에 본 실험에서도 10^6 을 넘는 값을 피로한도 값으로 선택하였다. 피로 시험편을 각 온도에 따라 측정되어진 값을 통하여 S-N 선도의 직선식을 최소자승법을 통하여 구하였다. S-N 선도를 통하여 금형강 STD61 의 온도에 따른 피로수명을 예측할 수 있다. 상온에서 피로한도는 225MPa 부근에서 무한 수명을 보였고,(Fig. 8) 300℃와 500℃에서도 비슷한 값의 무한 수명을 관찰할 수 있는데 이러한 현상은 열에 의한 탄화물의 석출량이 많아져서 재질의 연화가 둔화된 것으로 생각된다. 700℃의 파괴 된 시편은 모든 시편이 연성파괴의 모습을 보였는데, 파괴단면이 컵-컵 파괴(cup and cup fractu

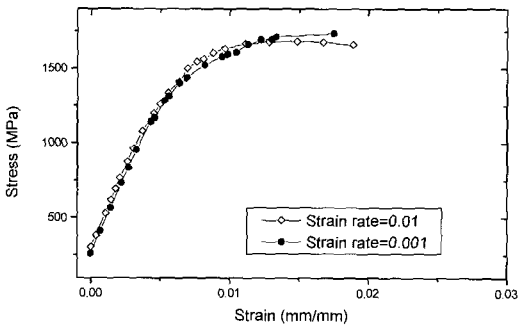

Fig. 4 Stress-strain at a constant strain rate(300℃)

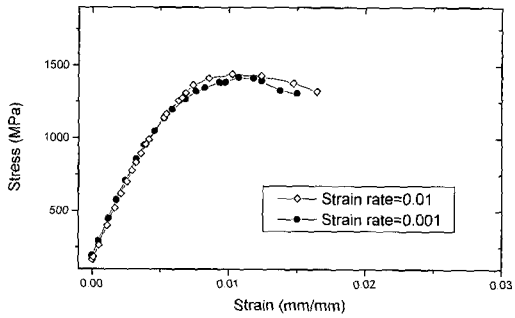

Fig. 5 Stress-strain at a constant strain rate(500℃)

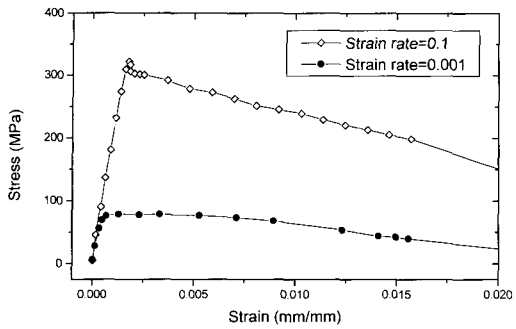

Fig. 6 Stress-strain at a constant strain rate(700℃)

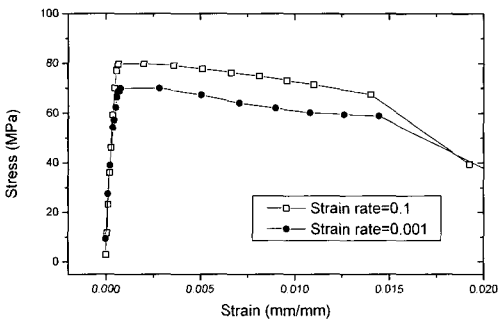

Fig. 7 Stress-strain at a constant strain rate(900℃)

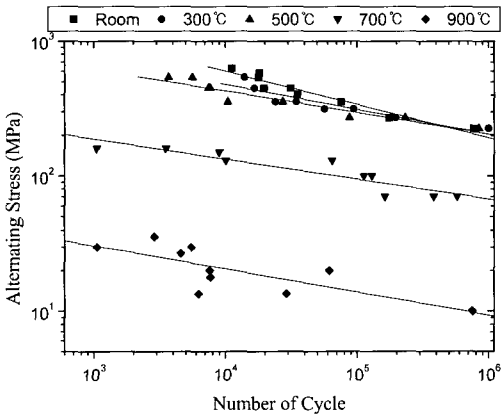

Fig. 8 S-N curves of STD61

-re)의 형상을 보인다. 열에 의한 재료의 연성화로 인하여 파괴되기 전에 파괴단면 주위에서 소성변형이 일어났음을 보여준다. 실제로 단면 감소율은 90% 이상이다. 700℃에서의 S-N 곡선을 보면 상온에서 300℃,500℃의 S-N 곡선의 하강 차 보다 크게 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이 온도에서는 피로한도가 급격히 줄어들어 상온에서의 피로한도보다 3배로 감소하였다. 900℃에서 시편은 더욱 큰 연성화로 단면감소율은 95% 이상을 보이고, 700℃에서의 S-N 곡선의 하강 차 보다 더 크게 감소하여 상온에서의 피로한도보다 23배로 감소하였다. Table 3은 최소자승법을 이용하여 각 온도에 따라 응력-수명곡선식을 구하였다.

Table 3 Coefficients for S-N curve

$\log S = a + m \cdot \log N_F$		
Temp.	a	m
Room Temp.	3.71206	-0.23537
300℃	3.41794	-0.18467
500℃	3.24083	-0.15245
700℃	2.71815	-0.14839
900℃	2.00548	-0.17268

3.3 파단면 관찰

파단면 분석을 위하여 상온(20℃), 300℃, 500℃, 700℃, 900℃에서의 시편을 각각 저주기와 고주기에서 파단된 시편을 채취하여 전자현미경(scanning electron microscope, SEM)사진을 촬영하여 취성파괴와 연성파괴의 특징적인 현상과 기공(dimple) 모양을 기준으로 파단면을 비교하였다.

먼저 상온에서 파단된 면을 보면(Fig. 9) 소성변형이 일어난 흔적이 보이지 않고 균열전파의 흔적을 볼 수 있는 가는 연흔이 부채꼴 모양으로 퍼져나간 것을 볼 수 있다. 온도가 올라감에 따라 파단 면의 모양이 취성파괴에서 연성파괴의 형태로 바뀌어 가는 것을 볼 수 있다.(Fig. 9~13) 연성파괴의 특징으로 균열 진전과 균열 전파를 발견할 수 없고 매끄러운 파단 면이 아니라 요철이 심하고 작은 기공들이 신장하여 파괴가 일어났다. 단면감소율은 온도가 높을수록 커졌고, 500℃까지는 취성파괴를 보이다가 고주기 20 만회이상에서 단면감소율은 74.6%로 연성파괴의 모습을 보였고, 700℃에서 약 90%의 감소율을, 900□에서는 약 95%의 감소율을 보였다. 이러한 실험의 결과로 연성/취성 천이 온도범위는 500℃와 700℃사이임을 확인할 수 있다. 300℃, 500℃의 대부분의 파단면은 상온에서 파단된 면과 비슷한 취성파괴의 모습을 보이나 깨진 단면의 모양이 왕관(crown)의 형상을 보이면서 단면은 매끄러운 면을 보였고,

파단 면의 모습이 동심원을 중심으로 파형을 이루며 파단 되었다.(Fig. 10, 11) 500℃에서도 대부분의 파단면이 취성파괴의 모습을 보이나 고주기에서 파단된 형태는 연성파괴 모습을 조금씩 보였다. 700℃부터는 미세 기공들이 성장하여 불규칙한 기공을 형성하였다. 이러한 현상으로 시편이 온도에 따라 크게 변형되면서 재질의 안쪽의 미세한 기공부위부터 파괴되면서 바깥쪽 부분이 크게 소성 변형되었음을 알 수 있다. 900℃에서의 피로 파단면에서는 단순한 원형의 기공보다는 기공과 기공이 서로 붙어 성장한 형태의 불규칙한 모양의 기공들과 700℃에서 파단된 단면에서 볼 수 없었던 산화된 흔적을 발견할 수 있다. 고온에서의 파단면을 관찰하여 보면 저 주기에서 모양은 끝 부분이 둥그스름한 반면, 고 주기에서 파단된 단면은 끝이 뾰족함을 확인할 수 있다. 이것은 오랜 시간동안 재질이 연화되어 소성변형이 지속적으로 일어났음을 보여준다.

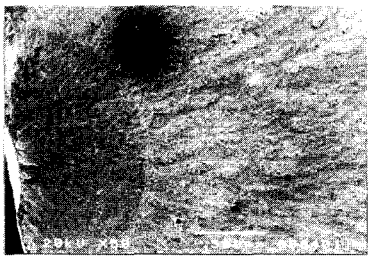

Fig. 9 Fracture surface at room temp.(20160cycles)

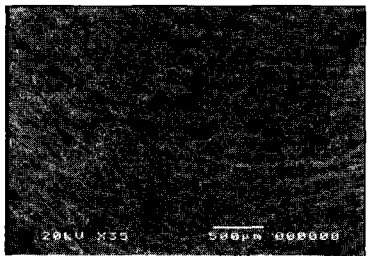

Fig. 10 Fracture surface at 300℃ (13984cycles)

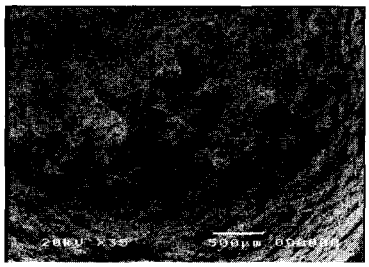

Fig. 11 Fracture surface at 500℃ (223202cycles)

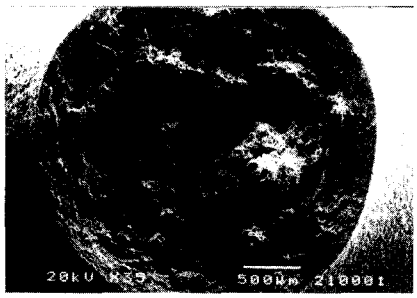

Fig. 12 Fracture surface at 700℃ (575452cycles)

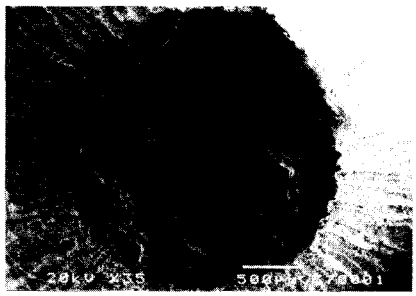

Fig. 13 Fracture surface at 900℃(61758cycles)

4. 결 론

이상의 실험결과와 고찰을 통하여 금형강 STD61의 기계적 물성치, 피로거동특성과 온도별 파괴면에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 500℃에서는 취성 파괴가 대부분이나, 고주기에서는 연성파단을 보이기 시작하였다. 한편, 700℃ 이상에서는 연성파괴와 더불어 기계적 물성치가 현저하게 열화된 것이 관찰되었다. 이에 연성/취성 천이 온도구간이 500℃-700℃ 사이임을 알 수 있었다.

(2) 상온에서 500℃사이에 피로한도의 변화는 크지 않은 반면에, 700℃와 900℃에서는 고온에 의한 연성화로 피로한도의 값이 급격히 떨어지는 것을 관찰하였다.

(3) 700℃와 900℃ 고주기 파괴시편의 단면을 SEM 사진으로 확인한 결과 내부 기공의 성장에 의한 컵-컵파괴의 형태로 관찰되었다.

후 기

본 연구는 2004 년도 두뇌한국 21 사업과 산업자원부가 지원하는 중기거점사업중 한국생산기술연

구원이 주관하는 주조기술개발사업의 위탁과제로 수행 중에 이루어진 것으로서 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

(1) 최병찬, 김병민, 1994,"소성가공에 있어서의 금형수명", 한국소성가공학회지, 제3권 제2호, pp. 147～155.

(2) J. H. Kang, I. W. Park, J. S. Jae and S. S. Kang., 1998, "A study on Die Wear Model of Warm and Hot Forgings", Metals and Materials, Vol. 4, No. 3, pp. 477～483.

(3) H. J. Shi, L. S. Niu, C. Korn and G. Pluvinage., 2000, "High temperature behaviour of TZM molybdenum alloy under mechanical and thermomechanical cyclic loads", J. Nuclear Materials, Vol. 278, pp. 328～333.

(4) M. K. Yoo, Yutaka Hiroaka, Hiroaki Kurishita, Hid -eo Kayano and Choi, Ju, 1996, "Recrystalli-zation of TiC Dispersion Mo-Alloy", Int. J. of Refractory Metals & Hard Materials, Vol. 14, pp. 355～364.

(5) M. F. Maday., 1996, "Low cycle fatigue behaviour of TZM molybdenum alloy in divertor water coolant", J. of Nuclear Materials, Vol. 233, pp. 1397～1402.

(6) R. Eck, H. Bildstein, F. Simader., 1989, "Behavior of tungsten, molybdenum, and alloys under unusual heating conditions", High Temp. High Pressures, Vol. 21, pp. 497～505.

(7) A. Luo, J. J. Park, D. L. Jacobson, B. H. Tsao & M. L. Ramalingam., 1993, "High-temperature tensile properties of molybdenum and a molybdenum-0.5% hafnium cardide alloy", Scripta Metall., Vol. 29, pp. 729～732.

(8) A. Nitta and K. Kuwabara., 1988, "Thermal-Mechanical Fatigue Failure and Life Prediction", High Temp. Creep-Fatigue, Current Japanese Materials Research, Vol. 3, pp. 203～222.

(9) R. Ohtani, T. Kitamura and N. Tada., 1987, "High-Temperature Fatigue Crack Propagation under Cyclic Temperature", Trans. Japan Soc. Mech. Eng. , Vol. 53, pp. 1030～1036.