

열간단조 금형강의 열충격과 열피로 특성연구

김정운* · 류재화** · 박형호*** · 문영훈*

(2001년 9월 17일 접수)

Analysis of Thermal Shock and Thermal Fatigue in Tool Steels for Hot Forging

J. W. Kim, J. H. Ryu, H. H. Park and Y. H. Moon

Abstract

The thermal shock and thermal fatigue test has been carried out to analyze the thermal characteristics of tool steels for hot forging and the effects of mechanical properties on this study have been investigated. The resistance to thermal shock is first of all a matter of good toughness and ductility. Therefore, a proper hot-work tool steel should be characterized by high fracture strength and high temperature toughness. Based on these results, some critical temperature($T_{fracture}$) at which fracture occur can be measured to characterize the thermal resistance of the materials. During thermal fatigue tests, the thermal fatigue cracks occur because of the repetitive heating and cooling of the die surface and the thermal fatigue damage was evaluated by analyzing different number of cycles to failure. The results showed that the resistance to thermal shock and thermal fatigue were found to be favoured by high hot tensile strength and high hot hardness, and thermal resistance of SKD61 was superior to that of ESC, SKT4 and this was caused by higher mechanical properties of SKD61.

Key Words : Thermal shock, Thermal fatigue, Hot work tool steel, Electro-slag casting

1. 서론

열간가공시 금형강이 가혹한 고온설비에 적용될 때 고온에서의 우수한 기계적 물성치뿐만 아니라 열공급의 주기적 반복에 의한 열피로와 큰 폭의 온도변화에 의한 열충격손상에 대한 저항성이 매우 중요하여 열적 특성에

대한 많은 연구가 필요하다. 또한 열간금형강은 가공동안 가혹한 열적, 기계적 응력에 쉽게 노출되기 쉽기 때문에 금형소재의 선정시, 다양한 조건에서의 여러 가지 물성치가 요구된다. 현재 열간금형소재의 기술적인 특성을 평가하기 위한 다양한 시험법^(1~2)이 활용되고 있는데, 이러한 시험법에는 Thermal fatigue resistance, Thermal

* 부산대학교 정밀기계공학과/정밀정형 금형가공 연구센터
** POSCO 기술연구소
*** HSD엔진 주식회사

Table 1 Chemical composition of steels investigated.

	chemical composition(wt,%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Al
ESC	0.51	0.24	0.92	0.012	0.005	1.95	0.96	0.47	0.12	0.008
SKT4	0.51	0.22	0.97	0.015	0.002	1.56	0.94	0.47	0.11	0.002
SKD61	0.36	1.0	0.44	0.028	0.009	-	5.3	1.3	0.98	

shock resistance, Wear resistance, Erosion 및 Corrosion resistance 등이 있다.

본 연구에서는 열간가공 급형강의 고온에서의 열적 저항성을 평가하기 위해 열충격과 열피로시험을 실시하고 이러한 열적 특성에 대해 고온에서 기계적 물성치와의 상관성을 조사하기 위해 고온인장시험과 경도시험을 각각 실시하였다.

2. 실험 방법

2.1 실험소재

실험에 사용된 소재의 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 모든 소재는 Quench-Tempered (870℃, 1hr유냉 +600℃, 1hr공냉) 된 열처리조건을 사용하였으며 시험편의 재질은 급형 및 공구강으로 널리 사용되는 SKD61과 열간단조 급형강인 SKT4, 또한 SKT4를 모재로 하여 Electroslag casting⁽³⁾방식으로 제작된 소재(이하 ESC)를 대상으로 실험하였다.

2.2 인장시험과 경도시험

고온인장시험은 Instron 장비에서 행하였으며 시험온도는 300℃, 500℃, 650℃로 설정하였다. 시험편은 ASTM A370을 기준으로 제작하였다. 경도시험은 Micro Vickers 경도기를 사용하였으며 시험하중은 500g으로 설정하고 각 시험편에 대하여 각각 5개의 값을 얻어 평균을 취하였다. 사용된 시험편의 시험면 및 배면은 서로 평행하게 원통형으로 가공하였으며 표면은 carborundum paper 및 polishing cloth로 연마하였다. 시험온도는 300℃, 500℃, 700℃로 설정하였다.

2.3 열충격 시험

시험은 Gleeble 3500(Fig. 1)을 이용하여 수행하였으며 시험편의 형상은 Fig. 2에 나와 있는 바와 같이 10mm직경의 V-노치 봉상 시험편으로 노치부의 직경은 5mm이며 각도는 60°로 제작하였다.

본 실험에 들어가기에 앞서, 최대유지온도 (Top temperature)를 구하는 예비실험에서 각 소재를 온도별로 인장속도와 냉각속도를 바꿔가며 실험을 하였다. 그 결과, 500℃이하에서는 시험편이 모두 파단되지 않았기 때문에 시험온도를 600℃, 700℃, 800℃, 900℃로 설정하였으며, 인장속도는 최대유지온도의 간격을 고려하여 파단이 일어나기 위한 최적 조건의 속도를 설정하였다. 전체적인 열충격 시험(thermal shock test)은 Uddeholm⁽²⁾의 열충격 시험법을 보완하여 Fig. 3과 같이 본 실험에 대한 공정으로 각 조건에 따라서 가열(heating), 유지(holding), 냉각(cooling)과 인장(tension)의 3단계를 차례로 거치면서 실시하였다.⁽⁴⁾ 시험절차는 처음 시험편의 노치부에 가장 가까운 부위에 Thermo-couple 을 점용접(spot weld)하여 부착한 후 시험편을 Gleeble에 장착한다.

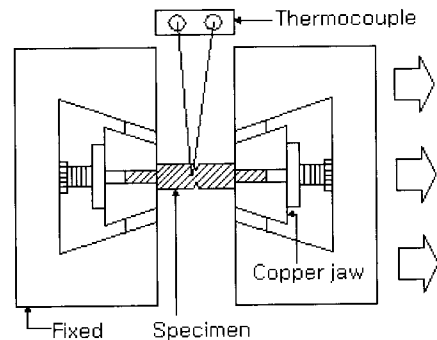


Fig. 1 Schematic diagram of thermal shock test

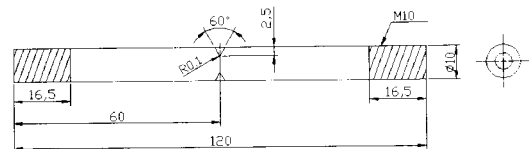


Fig. 2 Gleeble specimen for thermal shock test

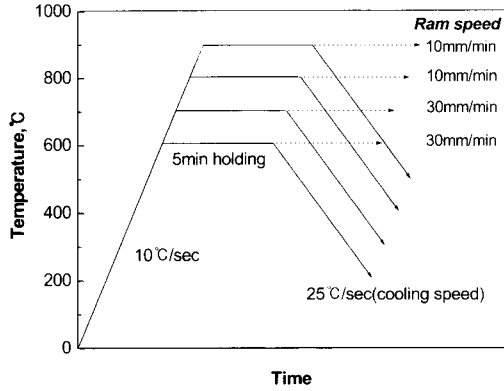


Fig. 3 Schematic diagram of thermal shock test conditions

이때 stroke control법을 이용하여 stroke를 0으로 조정하고 상온에서부터 10°C/sec의 승온속도로 최대유지온도(600°C, 700°C, 800°C, 900°C)까지 가열을 시킨 후 5분간 유지한다. 5분간 유지가 끝나는 시점에서 stroke를 0으로 조절하여 완전구속상태를 유지하였다. 이때 시험편의 최대유지온도 600°C, 700°C에서는 10mm/min의 속도로, 800°C, 900°C에서는 30mm/min의 속도로 인장력이 작용하기 시작하며, 동시에 냉각은 25°C/sec의 속도로 냉각되기 시작한다. 최대유지온도에서 인장과 냉각이 진행되는 동안에 시험편은 파단되며, 이때 파단에서의 온도와 하중을 측정하여 고정된 최대유지온도와의 차이(ΔT)와 파단온도를 측정한다. 이때 ΔT 는 소재의 열충격 저항에 대한 상대적인 값으로 정의된다.

2.4 열피로 시험

본 실험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 표점거리 18mm, 직경 8mm의 봉상시험편을 사용하였으며, 열피로 실험에 사용된 장치의 개략도를 Fig. 5에 나타내었다. 시험은 최소온도(T_{min})를 100°C, 최대온도(T_{max})는 600°C로 설정하였다. 이때 가열 및 냉각 속도는 10°C/sec로 하였고 시험이 완전구속상태에서 즉, 변형량이 0인 상태에서 실험을 하였다. 최초 상온에서 시험편의 최소온도와 최고온도의 평균값인 T_{mean} 까지 올린 후 이 온도에서 수분간 유지시켜 시험이 충분한 열팽창을 하고 평형상태에 도달한 후 완전구속상태에 놓이게 한다. 다음으로 시험편의 온도를 T_{mean} 에서 T_{max} 까지 올리고, 다시 T_{mean} 을 거쳐 T_{min} 까지 내리는 과정을 반복하게 되는데, 여기에서 $T_{mean} \rightarrow T_{max} \rightarrow T_{mean} \rightarrow T_{min} \rightarrow$

T_{mean} 의 열변화과정이 열피로에서의 1 cycle이 된다⁽⁵⁾. 이와 같은 온도변화에 따른 시험편의 팽창과 수축 정도의 변형률은 시험편 평행부의 중심에서 축방향으로 놓여 있는 표점거리내에 extensometer를 설치하여 열싸이클에 의해서 변화하는 변형률을 측정 후 변화된 변형량만큼 하중을 시험편에 가해서 열싸이클동안 Strain 값이 0인 완전구속상태가 유지되도록 하였다. 따라서 팽창시에는 압축응력이, 수축시에는 인장응력이 시험편에 반복적으로 작용하여 결국 crack의 발생과 전파로 인해 파괴가 일어나게 된다. 이때 각 소재에 대한 피로파괴까지의 cycle 수, 즉 열피로 수명(N_f)을 측정하였다.

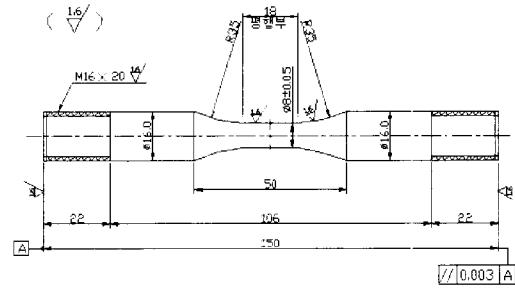


Fig. 4 Schematic drawing of thermal fatigue specimen

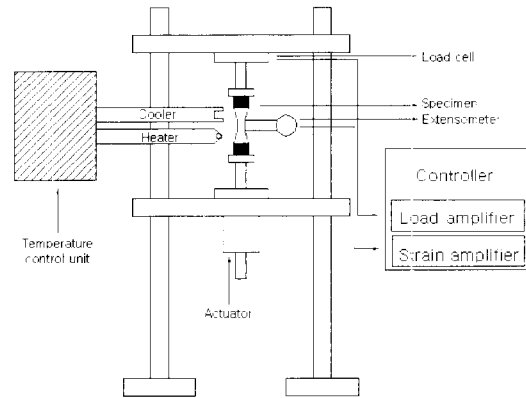


Fig. 5 Schematic diagram of the thermal fatigue apparatus

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 고온에서의 인장과 경도시험

Fig. 6은 고온(300°C, 500°C, 650°C)에서의 인장시험 후 소재별 인장강도와 연신율을 나타내고 있다. 고온에

서의 인장강도는 소재의 기계적 성질 중에서도 열적 저항에 가장 많은 영향을 미치며 파단까지의 연신을 통해 고온에서 소재의 연성을 알 수 있다. Fig. 6의 인장강도는 SKD61이 가장 높은 인장강도값을 가졌으며 SKT4, ESC는 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. 특히, 650°C에서는 SKD61이 두 소재에 비해 훨씬 높은 인장강도를 보여주고 있다. 특히 열간가공시 금형의 연화를 피하기 위해서는 600~750°C범위에서의 열적 저항성이 매우 중요하다.⁽²⁾ 이런 관점에서 볼 때 SKD61은 다른 소재에 비해 우수한 열적 저항성을 가질 것이라고 예측 할 수 있다. 고온에서 가공동안 금형에 발생하는 크랙은 열간가공의 적용시 주요한 문제점이 되고 있다. 따라서 소재의 우수한 연성은 열간가공 금형강의 가장 중요한 특성

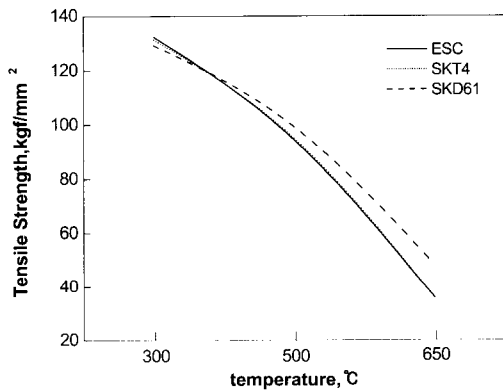


Fig. 6 Comparison of tensile strength at various temperature

이므로 Fig. 7에 인장시험시 각 소재의 온도증가에 따른 연신을 비교하였다. 그림에서 세 소재는 모두 큰 차이를 가지진 않지만 SKD61이 상대적으로 낮은 연신을 가졌다. 이러한 인장시험결과로 볼 때 세 소재는 고온에서의 인장강도와 연신이 상반된 경향을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 소재의 기계적 물성치는 금형의 파단과 밀접한 관계가 있으므로 열간금형강의 열에 대한 저항성에 많은 영향을 미칠 것으로 사료된다. Fig. 8에서는 소재의 고온경도값을 나타내고 있다. 고온으로 갈수록 SKD61의 경도값이 가장 높게 측정되었으며 이러한 경도값은 소재의 인장강도와 비례하는 것으로 나타났다. 이러한 소재의 기계적 물성치는 금형의 파단강도와 밀접한 관계가 있으므로 금형강의 열충격과 열피로시 열에 대한 저항성에 많은 영향을 미칠 것으로 사료된다.

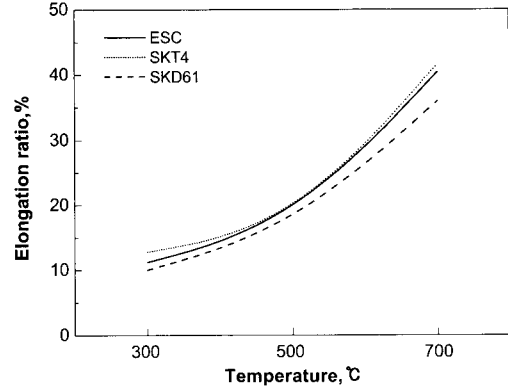


Fig. 7 Comparison of elongation ratio at various temperature

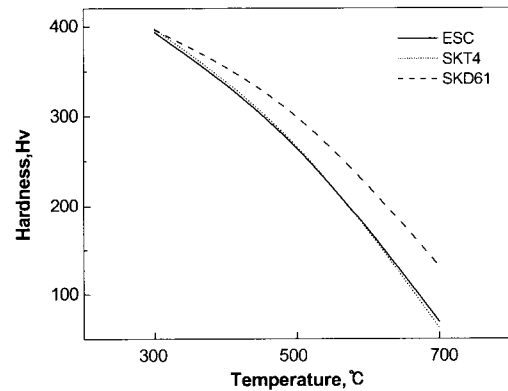


Fig. 8 Comparison of hardness value at various temperature

3.2 열충격 저항성

Fig. 9는 ESC의 시간에 따른 온도와 하중변화를 나타내고 있다. 최대유지온도를 5분간 유지한 후 냉각에 의해 소재에는 열수축 현상이 발생하게 되고 인장력에 의해서는 소재의 하중이 급격히 증가하게 되어 냉각이 진행되는 어느 시점에서 소재에 파단이 발생하였다. 이때 파단이 일어나는 시점에서의 온도는 급격히 낮아지게 된다. 파단에서의 ΔT값을 최대유지온도의 변화에 따라 측정한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. ESC, SKD61은 최대유지온도가 600°C일 때 파단이 발생하지 않았으며, 전체

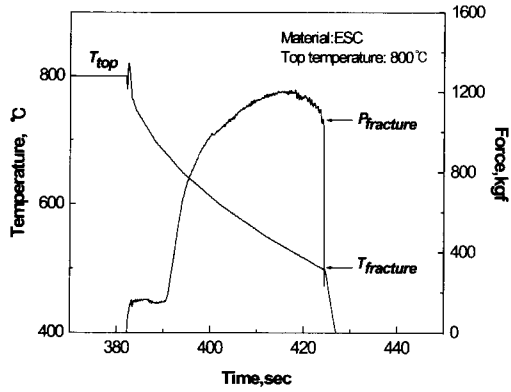


Fig. 9 Result of thermal shock test “Thermal shock resistance” $\Delta T = T_{top} - T_{fracture}$

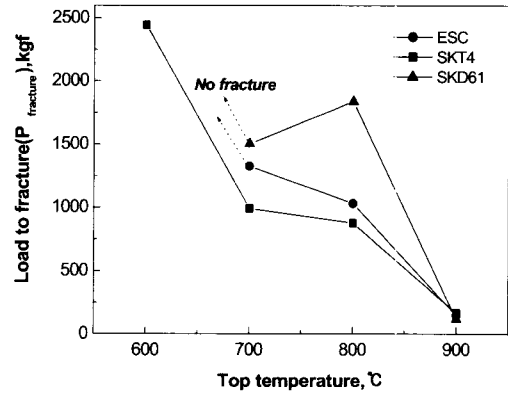


Fig. 11 Load to fracture versus top temperature

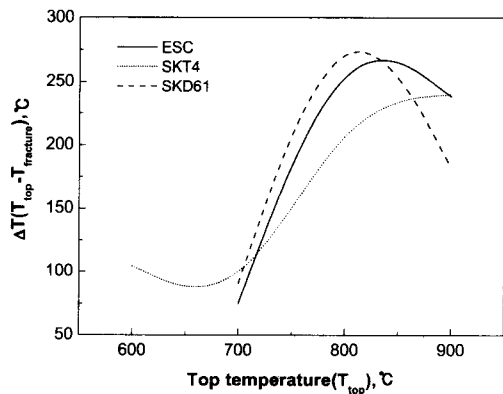


Fig. 10 Thermal shock resistance: (ΔT) versus top temperature

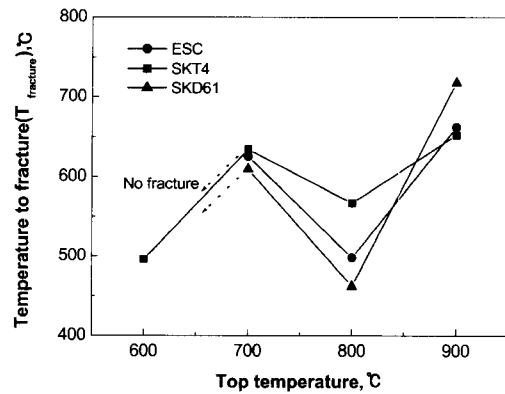


Fig. 12 Temperature to fracture versus top temperature

적인 최대유지온도의 변화에서는 800°C에서 ΔT 값이 가장 높게 측정되었으며 소재별로는 SKD61이 상대적으로 높은 값을 나타냈으며 그 다음 ESC, SKT4 순으로 나타났다. 이러한 결과로 볼 때 최대유지온도가 800°C일 때 소재의 열충격 (Thermal shock)에 대한 저항 (resistance)이 가장 높다는 것을 알 수 있었으며, 각 소재에서는 SKD61이 ESC, SKT4에 비해 상대적으로 열충격 저항이 우수함을 알 수 있었다. 최대유지온도의 변화에 따른 냉각시 소재의 파단하중과 파단온도를 각각 Fig. 11 와 12에 나타내었다.

Fig. 11에서는 전체적으로 온도가 증가할수록 소재의 열변형량이 증가하여 파단하중이 감소하였으며 900°C에

서는 고온으로 인한 연성의 증가로 인해 파단하중이 거의 일치하는 경향을 보였다. 소재별로는 SKD61이 다른 소재에 비해 상대적으로 높은 하중을 나타내었으며, 그 다음 ESC, SKT4 순으로 나타났다. 특히 최대유지온도 800°C에서의 파단하중 결과를 보면, SKD61의 파단하중이 급격히 높게 나타났는데 이것은 ΔT 의 값이 800°C에서 높게 나타난 원인과 상응하는 것으로 판단된다. 이러한 관계는 Fig. 12에 나타낸바와 같이 파단시 측정된 온도값의 변화에서도 알 수 있다.

즉, 최대유지온도 800°C에서 SKD61의 파단온도가 다른 소재에 비해 가장 낮게 측정되었다. 따라서 SKD61이 다른 측정온도에 비해 800°C에서의 열충격 저항성이 가

장 우수한 것으로 알 수 있다. 고온에서의 인장시험과 경도시험을 통해 얻은 결과에서 항복강도와 고온경도값은 본 열충격저항에 비례하고 소재의 연신에는 비례하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 실험에서 각 소재를 평가한 결과, 전체적인 열충격(Thermal shock) 저항(resistance)값은 SKD61>E SC>SKT4순으로 SKD61이 가장 우수한 것으로 나타났다.

3.3 열피로 특성

열피로 저항성에 가장 크게 영향을 미치는 인자는 열사이클에서의 최고온도이다. 이것은 최고온도에서 인장강도 등의 기계적 성질이 가장 낮고, 같은 응력값에서 소성변형 가능성이 가장 크기 때문이다. Fig. 13은 열피로 시험시 1cycle 동안 온도, 시간, 응력 사이의 관계를 나타내주는 모식도이다. 온도가 상승하는 T_{mean} 에서 T_{max} 사이의 구간에서는 열팽창이 일어나고, 이에 따른 시험의 양의 변형을 보정하기 위해 압축응력이 가해지며, T_{max} 에서 최소응력인 σ_{min} 의 상태가 된다. 반면에 T_{max} 에서 T_{min} 사이의 구간에서는 시험의 열수축을 막기 위해 압축응력상태에서 인장응력상태로 바뀌며, T_{min} 에서 최대압축응력(σ_{min})을, T_{min} 에서 최대인장응력(σ_{max})을 나타낸다. Fig. 13에서 최대인장응력인 σ_{max} 은 최대압축응력의 절대치인 $|\sigma_{min}|$ 보다 큰 값을 가지는데 그 이유는 다음의 식(1)로 알 수 있다.

$$\sigma = E \alpha \Delta T \quad (1)$$

σ : thermal stress

E : Young's modulus

α : thermal expansion coefficient

ΔT : temperature difference

식(1)은 완전구속상태에서의 온도변화에 따른 응력의 크기를 나타낸 식이다.⁽⁶⁾ 이는 σ_{min} 이 상대적으로 고온에서 받게 되는 변형을 보정하기 위한 값으로서 온도의 상승에 따라 Young's modulus가 감소되고⁽⁷⁾, 이에 따라 높은 온도에서의 변형에 따른 응력은 낮은 온도에서의 변형에 따른 응력보다 낮아지기 때문이다. 따라서 열피로과정에서의 최대인장응력은 최대압축응력보다 더 높은 비대칭 응력파형을 나타내게 된다. 이러한 열사이클에 의한 반복 열응력으로 인하여 결국 시험은 균열발생 및 전파에 의한 피로파단에 이르게 된다. 열피로특성에 대

한 결과를 cycle에 따른 소재의 압축응력, 인장응력, 평균응력, 응력차이 등의 변화로 표현할 수 있다. 이러한 응력기동에서 인장응력과 압축응력의 차이, 즉 응력차이(stress range; $\Delta\sigma$)는 세 소재에서 모두cycle의 진행에 관계없이 일정하다. 이는 식(1)에서 1 cycle내에서는 온도변화에 따라 E 가 변하지만 cycle의 진행에 관계없이 E 는 변화가 없고, ΔT 가 일정하면 $\Delta\sigma$ 도 일정하기 때문이다.⁽⁵⁾ 열피로시험시 각각의 열사이클에 의해 발생하는 열응력에 의해서 결국 시험은 파단에 이르게 된다.

이때 T_{max} 에서 일어나는 압축응력과 T_{min} 에서 일어나는 인장응력값의 변화와 이 값을 이용한 평균응력, 응

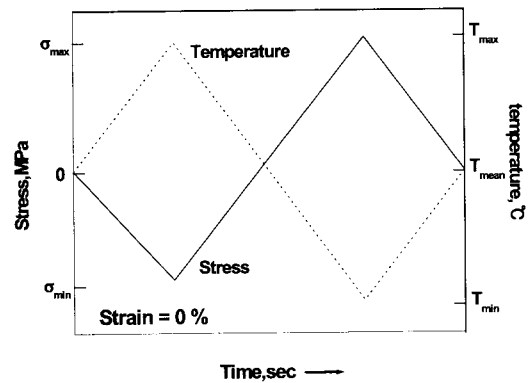


Fig. 13 Schematic diagram showing the relationship between temperature, stress, and time during the thermal fatigue test

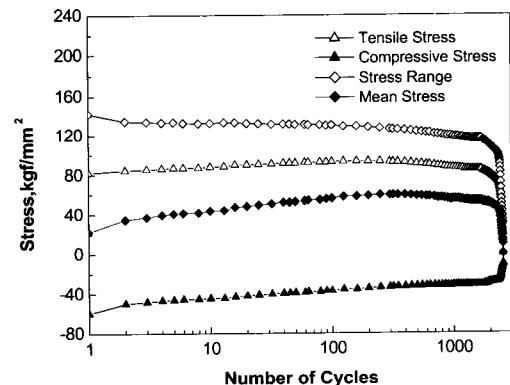


Fig. 14 Variation of the tensile, compressive, mean stress and stress range with the cycles, (materials:SKD61)

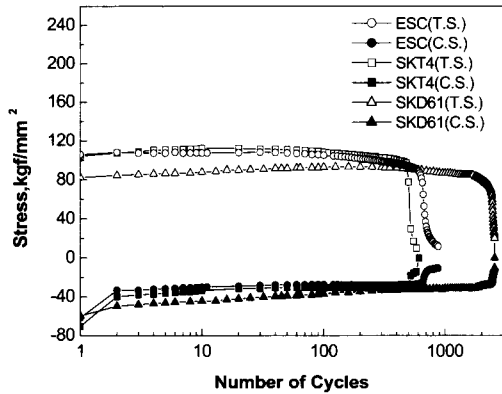


Fig. 15 Variation of the tensile and compressive stress with cycles (T.S:Tensile Stress, C.S:Compressive Stress)

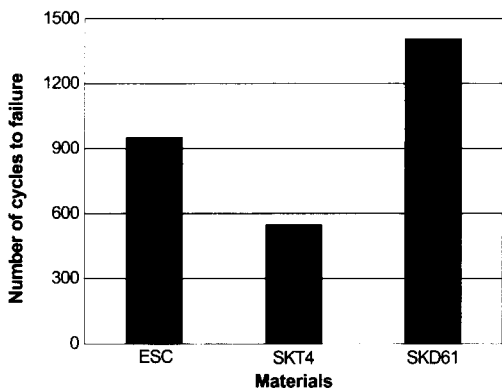


Fig. 16 Number of cycles to failure for various materials

력차이를 소재의 최종파단이 일어나는 사이클까지의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. 그리고 사이클이 진행됨에 따라 동적연화(cyclic softening)현상에 의해 증가하고 있는 최대인장응력과 최대압축응력값이 다르게 된다.

이에 따라 최대압축응력의 절대치는 감소하고 최대인장응력은 증가하였다. 즉 열피로에 의해 시편에 작용되는 인장응력은 압축응력보다 큰 비대칭 응력파형을 가짐을 알 수 있다. Fig. 15에 각 소재들의 응력변화를 나타내었다. 열사이클의 증가에 따라서는 응력감소사이클과 파단사이클이 ESC와 SKT4에 비해 SKD61이 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 SKD61의 열피로특성이 가장 우수하다는 것을 의미한다. Fig. 16에 각 재료별 열피로

수명을 나타내었다. SKD61이 상대적으로 가장 높은 파단 사이클을 가지는 것으로 나타났으며 전체적으로 열피로 특성은 SKD61이 가장 우수하였으며, 그 다음 ESC, SKT4 순으로 측정되었다. 일반적으로 열피로 시험에서 재료의 저항성은 여러가지 인자에 의해 영향을 받지만 특히, 기계적 성질 중에서도 인장강도가 큰 소재일수록 최대인장응력이나 최대압축응력의 절대치는 커지게 되며 우수한 열피로특성을 나타낼 것으로 기대된다. 따라서 이러한 경향성을 확인하기 위해 Fig. 6~8에 나타낸 고온에서의 기계적 물성치와 열피로 특성과의 상관성을 조사하였다. Fig. 3에서 측정온도가 650℃일 때, 인장강도는 ESC와 SKT4는 동일하게 대략 36 kgf/mm²로 측정된 반면에, SKD61은 48.2 kgf/mm²로 가장 높은 인장강도를 나타내었다. 또한 Fig. 7에서 언급한 소재의 연신율에서는 SKD61이 고온으로 갈수록 상대적으로 가장 낮은 연신을 나타내었으며 고온경도는 인장강도와 유사한 경향을 가졌다. 따라서 이러한 기계적 물성치에 의해 Fig. 15의 열피로 시험결과에서 SKD61은 다른 소재에 비해 최대인장응력의 절대값은 가장 작지만 고온에서의 우수한 기계적물성치와 파단까지의 사이클수가 가장 크기 때문에 SKD61의 열피로 수명은 ESC와 SKT4에 비해 높게 측정되는 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 열간단조금형의 열적 특성이 고온에서의 열충격과 열피로 시험에 의해 평가되었으며 고온에서의 인장시험과의 상관성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열간단조 금형강에 대해 열충격과 열피로 시험을 적용한 결과, 열충격이 우수한 소재는 열피로 특성도 우수하였다.
- (2) 열충격 저항성과 열피로 수명은 고온에서의 인장강도와 경도에 비례하는 것으로 확인되었다.
- (3) 열충격 시험시 파단에서의 ΔT값을 측정된 결과, 고온에서 높은 인장강도와 우수한 인성을 가지는 SKD61이 열충격에 대한 저항성이 가장 우수하였고 그 다음 ESC, SKT4 순으로 나타났다. 열피로 시험에서도 각 소재의 열사이클을 비교한 결과, SKD61이 가장 우수한 열피로 특성을 나타내었다.

참 고 문 헌

- (1) C. M. D. Starling, J. R. T. Branco., 1997,

- “Thermal fatigue of hot work tool steel with hard coatings”, *Thin Solid Films* 308-309, pp. 436~442.
- (2) L-Å. Norstrom., 1982, “Performance of Hot-Work Tool Steels”, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, No. 11, pp.33~38.
- (3) B. E. Paton, B. I. Medovar and G. A. Boiko., 1981, “Electrosalg Casting”, Kiev, Naukova Dumka Publ., pp.12~19.
- (4) J. H. Song, J. K. Lim and H. Takahashi., 1996, “Thermal Shock/Fatigue Evaluation of FG M by AE Technique”, *KSME Journal*, Vol. 10, No. 4, pp.435~442, 2th.
- (5) J. H. Ryu, S. H. Lee and K. S. Shin., 1997, “Effect of Microstructure on Thermal Fatigue Properties of Three Work Rolls”, *Proc. of The Eleventh Conf. on Mech Behaviors of Met.* Seoul, August 22. Korea.
- (6) G. E. Dieter., 1987, *Mechanical Metallurgy*, 3rd ed., McGraw-Hill., pp.428~430.
- (7) L. H. Van Vlack., 1984, “Elements of materials science and engineering”, Addison-Wesley, 5th ed, p.163.