

열간단조 금형강의 열충격특성연구

김정운 · 김봉준 · 조이석 · 문영훈*

*부산대학교 정밀기계공학과
부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

Analysis of Thermal Shock in Tool Steels for Hot Forging

J. W. Kim, B. J. Kim, I. S. Jo and Y. H. Moon*

*Dept. of Mechanical and Precision Engineering, Engineering Research
Center for Net Shape and Die Manufacturing, Pusan National University

Abstract The thermal shock resistance has been investigated and compared in three hot-work tool steels. 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. In this study, new test method is proposed to measure the thermal shock resistance. New method is basically based on Uddeholm's thermal shock test but some modification has been properly applied. Based on these results, some critical temperature ($T_{fracture}$) at which fracture occur can be measured to characterize the thermal resistance of the materials. The specific values of ΔT , the temperature difference between holding temperature and $T_{fracture}$, has been successfully used as a measure of the thermal shock resistance in this study. The results showed that the thermal shock method used in this study was properly modified.

(Received May 28, 2001)

Key words: Thermal shock, Tool steels, Hot yield strength, High temperature hardness

1. 서 론

열충격에 대한 높은 저항은 열간 가공 금형강에 있어서 중요한 성질이다. 실제로 매우 빠른 온도의 변화가 주어졌을 때, 즉 단시간 내에 큰 폭의 온도변화로 인한 큰 응력이 발생함으로써 재료에 손상이 가해질 수 있다. Norstrom[1]과 Lu[2]등에 의하면 열간가공시 금형은 과도한 열충격(Thermal Shock)을 받기 쉽기 때문에 금형의 표면에서의 크랙성장 또는 이른 파단을 일으킨다고 보고하였다. 따라서 현재 기술적인 특성을 평가하기 위한 다양한 시험법[1,3]이 활용되고 있는 데, 이러한 시험법에는 Thermal fatigue resistance, Thermal shock resistance, Wear resistance, Erosion/Corrosion resistance 등이 있다.

기존의 열충격 시험법을 간략히 요약하면, 최초 시험편을 시험온도까지 가열(preheating)시킨 후 고정된 위치에서 preload 또는 prestrain을 가한다. 그런 다음 시험편을 빠른 속도로 냉각을 시키게되면 소재는 열수축으로 인해 파단을 일으킨다. 이러한 기존의 시험법은 기계적 물성치의 차이를 많이 가지는 소재들일수록 적

절한 preload 또는 prestrain을 적용하기가 어렵기 때문에 본 시험에서는 소재의 가열 후 냉각(cooling)과 인장(tension)을 동시에 적용시키므로써 파단에서의 응력분포와 전체적인 온도변화를 동일조건에서 측정하여 열충격에 대한 저항성을 평가하였다. 이러한 열충격 저항성에 대한 평가는 소재를 고온에서 적용할 때 중요한 평가기준으로 사용되고 있다.

본 연구에서는 열간가공 금형강의 고온에서의 기술적인 특성을 평가하기 위해 Uddeholm의 열충격 시험법을 보완한 새로운 열충격(Thermal Shock)시험법을 제안하여 고온에서의 거시파단에 대한 저항성을 평가하였다[1]. 특히, 소재의 기계적 특성과 많은 상관성을 가지고 있으므로 고온에서의 인장시험과 경도시험을 통해 열충격 저항과의 상관성을 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 시험 소재

실험에 사용된 소재에 대한 화학조성을 Table 1에 나타내었다. 모든 소재는 Quenching-Tempered(870

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
STF4	0.51	0.22	0.97	0.015	0.002	1.56	0.94	0.47	0.11	0.002
STD61	0.36	1.0	0.44	0.028	0.009	-	5.3	1.3	0.98	

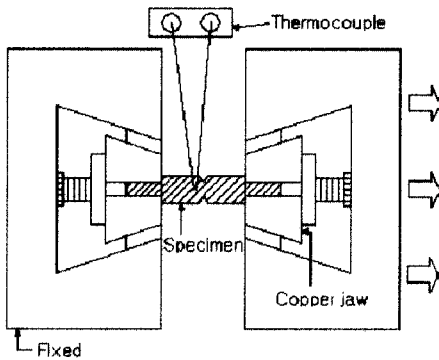


Fig. 1. Photograph of the Gleeble test and Schematic diagram.

°C, 1hr유냉 + 600°C, 1hr공냉) 된 열처리조건을 사용하였으며 시험편의 재질은 금형 및 공구강으로 널리 사용되는 STD61과 열간단조 금형강인 STF4를 모재로 하여 Electroslag casting[4]방식으로 제작된 소재(이하 ESC)를 대상으로 실험하였다.

2.2. 인장 시험과 경도시험

인장시험은 Instron 장비에서 행하였으며 Load control을 이용하여 300°C, 500°C, 650°C의 온도에서 시험하였다. 제작된 시험편은 ASTM A370을 참조하였다.

경도시험은 Micro Vickers 경도기를 사용하였으며 시험하중은 500 g으로 설정하고 각 시험편에 대하여 각각 5개의 값을 얻어 평균을 취하였다. 사용된 시험편의 시험면 및 배면은 서로 평행하게 원통형으로 가공하였으며

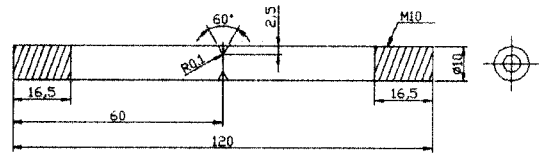


Fig. 2. Gleeble specimen for thermal shock test.

Table 2. Process parameters for thermal shock test.

실험조건	ESC	STF4	STD61
시험온도	600°C, 700°C, 800°C, 900°C		
열처리조건	Quenching-Tempered		

표면은 carborundum paper 및 polishing cloth로 연마하였다. 시험온도는 300°C, 500°C, 700°C로 설정하였다.

2.3. 열충격 시험

시험은 Gleeble 3500(Fig. 1)을 이용하여 수행하였으며 시험편의 형상은 Fig. 2에 나와 있는 바와 같이 10 mm직경의 V노치 봉상 시험편으로 노치부의 직경은 5mm이며 각도는 60° 제작하였다. 본 실험에 들어가기에 앞서, Top temperature를 구하는 예비실험에서 각 소재를 온도별로 인장속도와 냉각속도를 바꿔가며 실험을 하였다. 그 결과, 500°C이하에서는 시험편이 모두 파단되지 않았기 때문에 시험온도를 600°C이상으로 설정하였으며(Table 2), 인장속도는 Top temperature의 간격을 고려하여 파단이 일어나기 위한 최적 조건의 속도를 설정하였다. 전체적인 열충격 시험(thermal shock test)은 Fig. 3에 나와있는 열충격 시험법을 이용하여 Fig. 4의 본 실험에 대한 공정으로 각 조건에 따라서 가열(heating), 유지(holding), 냉각(cooling)과 인장(tension)의 3단계를 차례로 거치면서 실시하였다[5,6]. 시험절차는 처음 시험편의 노치부에 가장 가까운 부위에 Thermo-couple를 점용접(spot weld)하여 부착한 후 시험편을 Gleeble에 장착한다. 이때 stroke control법을 이용하여 stroke를 0으로 조정하고 상온에서부터

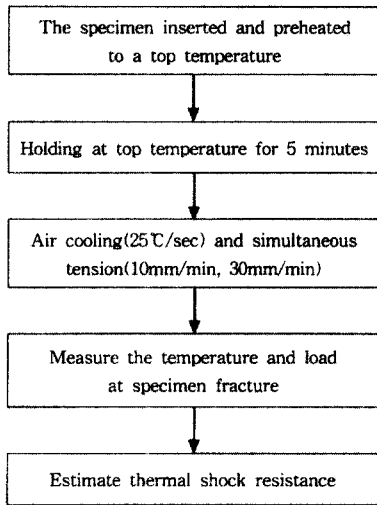


Fig. 3. Flowchart of the thermal shock test.

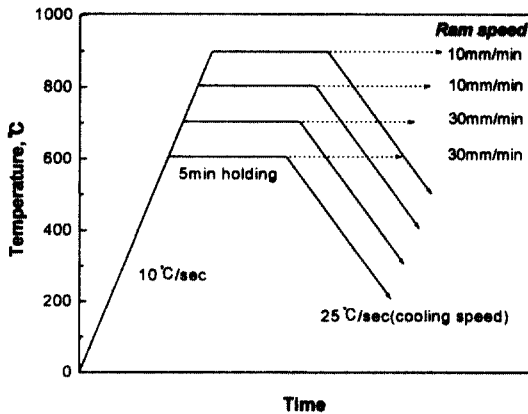


Fig. 4. Schematic diagram of thermal shock test conditions.

10°C/sec의 승온속도로 Top temperature(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 Top temperature 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. Top temperature에서 인장과 냉각이 진행되는 동안 시험편은 파단되며, 이때 파단에서의 온도와 하중을 측정하여 고정된 Top temperature와의 차이(ΔT)와 파단온도를 측정한다. 이때 ΔT 는 소재의 열충격 저항에 대한 상대적인 값으로 정의된다.

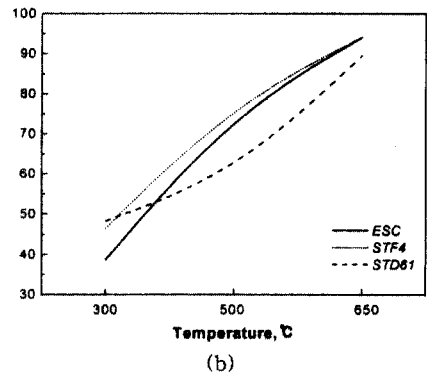
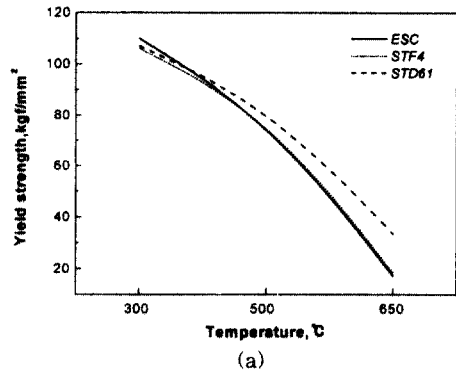


Fig. 5. Variation of the tensile test of ESC, STF4, STD61 with temperature increase. (a) yield strength, (b) area reduction ratio.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고온인장 시험과 경도시험

Fig. 5는 고온(300°C, 500°C, 650°C)에서의 인장시험 후 항복강도와 단면수축율을 나타내고 있다. 고온에서의 항복강도는 소재의 기계적 성질 중에서도 열적 저항에 가장 많은 영향을 미치며 특히 단면수축율을 통해 고온에서 소재의 연성을 알 수 있다. Fig. 5(a)에서 STD61은 가장 높은 항복강도값을 가졌으며 STF4, ESC는 가장 연한 소재로 나타났다. 650°C에서는 STD61이 상대적으로 훨씬 높은 항복강도를 보여주고 있다. 특히 열간가공시 금형의 연화를 피하기 위해서는 600~750°C범위에서의 열적 저항성이 매우 중요하다[1]. 이런 관점에서 볼 때 STD61은 다른 소재에 비해 우수한 열적 저항성을 가질 것이라고 예측할 수 있다. 고온에서 가공동안 금형에 발생하는 크랙은 열간가공의 적용시 주요한 문제점이 되고 있다. 따라서 소재의 우수한 연

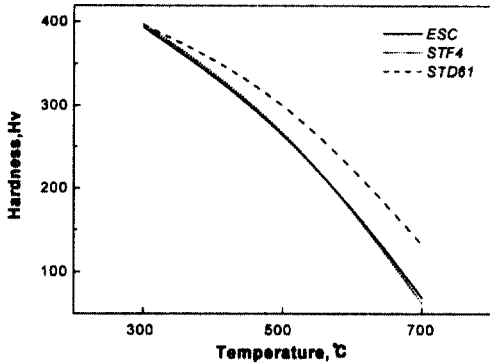


Fig. 6. Comparison of hardness value at various temperature.

성은 열간가공 금형강의 가장 중요한 특성이므로 Fig. 5(b)에 인장시험시 각 소재의 단면수축율을 비교하였다. 시편의 온도가 고온으로 갈수록 항복강도는 감소 한 반면에 단면수축률은 증가하였다. 이러한 결과로 볼 때 고온에서의 연성은 항복강도에 반비례한다는 것을 알 수 있었고, 높은 연성은 낮은 항복강도를 갖는 STF4와 ESC에서 얻어졌으며 반면에 STD61은 가장 나쁜 연성을 가지는 것으로 나타났다. Fig. 6에서는 소재의 고온 경도값을 나타내고 있다. 고온으로 갈수록 STD61의 경도값이 가장 높게 측정되었으며 이러한 경도값은 소재의 항복강도와 비례하는 것으로 나타났다. 이러한 소재의 기계적 물성치는 금형의 파단강도와 밀접한 관계가 있으므로 금형강의 열충격시 열에 대한 저항성에 많은 영향을 미칠 것으로 사료된다.

3.2. 열충격 저항

Fig. 7은 ESC의 시간에 따른 온도와 하중변화를 나타내고 있다. Top temperature를 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 ΔT 값을 Top temperature의 변화에 따라 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. ESC, STD61은 Top temperature가 600°C일 때 파단이 발생하지 않았으며, 전체적인 Top temperature의 변화에서는 800°C에서 ΔT 값이 가장 높게 측정되었으며 소재별로는 STD61이 상대적으로 높은 값을 나타냈으며 그 다음 ESC, STF4 순으로 나타났다. 이러한 결과로

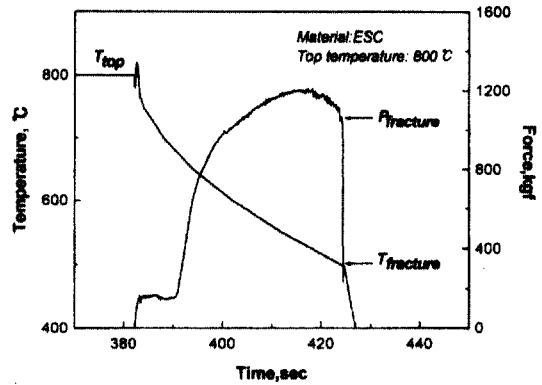


Fig. 7. Results of thermal shock test. "Thermal shock resistance" $\Delta T = T_{top} - T_{fracture}$.

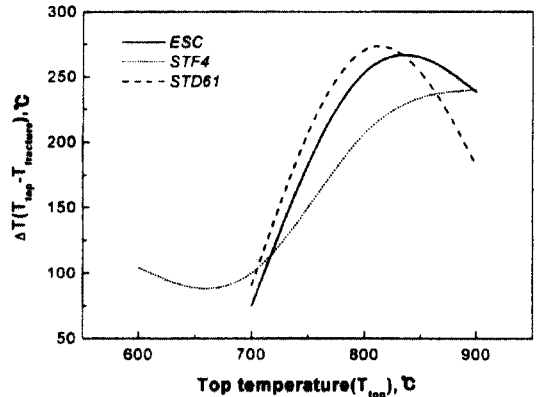


Fig. 8. Thermal shock resistance : (ΔT) versus top temperature.

볼 때 Top temperature가 800°C일 때 소재의 열충격 (Thermal shock)에 대한 저항(resistance)이 가장 높다는 것을 알 수 있었으며, 각 소재에서는 STD61이 ESC, STF4에 비해 상대적으로 열충격 저항이 우수함을 알 수 있었다. Top temperature의 변화에 따른 냉각시 소재의 파단하중과 파단온도를 각각 Fig. 9와 10에 나타내었다. Fig. 9에서는 전체적으로 온도가 증가할수록 소재의 열변형량이 증가하여 파단하중이 감소하였으며 900°C에서는 고온으로 인한 연성의 증가로 인해 파단하중이 거의 일치하는 경향을 보였다. 소재별로는 STD61이 다른 소재에 비해 상대적으로 높은 하중을 나타내었으며, 그 다음 ESC, STF4 순으로 나타났다. 특히 Top temperature 800°C에서의 파단하중 결과를 보면, STD61의 파단하중이 급격히 높게 나타났는데 이것은 ΔT 의 값이 800°C에서 높게 나타난 원인과 상응

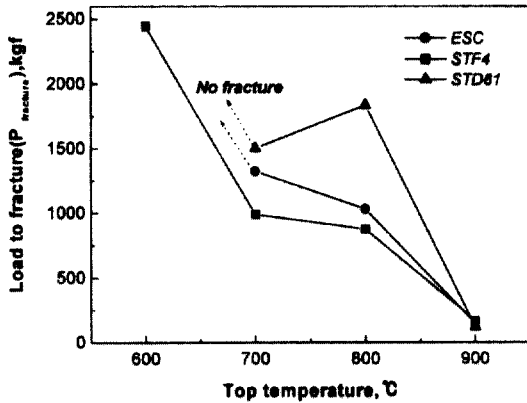


Fig. 9. Load to fracture versus top temperature.

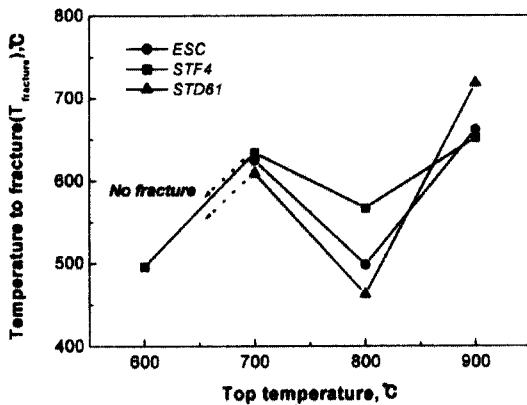


Fig. 10. Temperature to fracture versus top temperature.

하는 것으로 판단된다. 이러한 관계는 Fig. 10에 나타낸바와 같이 파단시 측정된 온도값의 변화에서도 알 수 있다. 즉, Top temperature 800°C에서 STD61의 파단온도가 다른 소재에 비해 가장 낮게 측정되었다. 따라서 STD61이 다른 측정온도에 비해 800°C에서의 열충격 저항성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 고온에서의 인장시험과 경도시험을 통해 얻은 결과에서 항복강도와 고온경도값은 본 열충격저항에 비례하고 단면 수축률에는 비례하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

따라서 본 실험에서 각 소재를 평가한 결과, 전체적인 열충격(Thermal shock) 저항(resistance)값은 STD61>ESC>STF4순으로 STD61이 가장 우수한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 열간단조 금형소재의 열충격에 대한 저항성을 알아보기 위해 열충격 평가를 실시하였으며 고온에서의 인장시험, 경도시험과의 상관성을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) Uddeholm의 열충격 시험방법을 보완한 새로운 열충격 시험법을 이용하여 실험한 결과 재현성이 우수한 열충격 측정방법임을 알 수 있었으며, 유지온도와 파단온도 사이의 온도차(ΔT)가 재료의 열충격 저항의 척도로 타당함을 알 수 있었다.

(2) 열충격에 대한 소재의 저항성은 고온인장강도와 고온경도가 높을수록 크게 나타났다.

(3) 열충격 시험시 파단에서의 ΔT 값을 측정한 결과, 고온에서 높은 항복강도와 우수한 인성을 가지는 STD61이 열충격에 대한 저항성이 우수한 것으로 확인되었다.

참고문헌

1. L -Å. Norstrom., "Performance of Hot-Work Tool Steels", Scandinavian Journal of Metallurgy, No. 11, pp. 33-38, 1982.
2. T. J. Lu and N. A. Fleck., "The Thermal Shock Resistance of Solids", Acta mater, Vol. 46, No. 13, pp. 4755-4768, 1998.
3. M. Collin, D. Rowcliffe., "Analysis and Prediction of Thermal Shock in Brittle Materials", Acta Mater, 48, pp. 1655-1665, 2000.
4. B. E. Paton, B. I. Medovar and G. A. Boiko., "Electroslag Casting", Kiev, Naukova Dumka Publ, 1981.
5. J. H. Song, J. K. Lim and H. Takahashi., "Thermal Shock/Fatigue Evaluation of FGM by AE Technique", KSME Journal, Vol. 10, No. 4, pp. 435-442, 2th, 1996.
6. J. H. Song, J. K. Lim., "A Study on Thermal Shock Characteristics of Functionally Gradient Ceramic/Metal Composites", KSME Journal, Vol. 20, No. 7, pp. 2134-2140, 1996.