연 구 논 문

열간단조 금형 육성용접부 내균열성 및 내열충격성 평가방법에 관한 연구

조상명* · 김성호**,† · 정연호** · 백승희*** · 장종훈**** · 박철규**** · 우희철**** · 정병호*****

*부경대학교 신소재공학부
**부경대학교 대학원 조선시스템관리공학 협동과정
***효성웰딩
****KISWEL
*****부경대학교 금속공학과

A Study on Assessment Method of Crack Resistance and Thermal Shock Resistance in Hardfacing for Hot Forging Die

Sang-Myung Cho*, Sung-Ho Kim**,†, Yun-Ho Jung**, Seung-hui Baek***, Jong-Hun Jang****, Chul-Gyu Park****, Hee-Chul Woo**** and Byong-Ho Jung*****

*Div. of Advanced Materials Sci. and Eng,. Pukyong, National University, Busan 608-739, Korea
**Dept. of Shipbuilding Systems Management Engineering, Graduate school, Pukyong National University Busan 608-739, Korea
***Hyo Seong Welding, Gimhae 621-841, Korea
****KISWEL, Changwon 641-120, Korea
*****Dept. of Metallurgical Eng,. Pukyong, National University, Busan 608-739, Korea

†Corresponding author : otoko81@nate.com
(Received December 24, 2009, Revised January 4, 2010, Accepted April 2, 2010)

Abstract

Hardfacing is one of the frequently applying method to increase surface hardness in hot forging die. Recently, hardfacing receives great attention due to it's repair availability and low cost. In hot forging die, crack resistance and thermal shock resistance have been considered as major properties, However there are few studies for the assessment of these properties. So, it is necessary to establish the assessment method for crack resistance and thermal shock resistance in hardfacing for hot forging die. In this study, flux cored arc welding was applied to make hardfacing welds. Three point bending test was carried out to assess hardfacing weld's crack resistance, and high temperature bending test using salt bath was developed for thermal shock resistance. Consequently, it was possible to assess crack resistance and thermal shock resistance of hardfacing welds for hot forging die quantitatively.

Key Words : Hardfacing, FCW, Bending test, Thermal shock, Salt bath, Crack resistance

1. 서 론

현재 열간단조 금형을 제작함에 있어 육성용접을 하여 기계가공 후 제작하는 방법이 금형강인 STD61, STD11 등으로 제작하는 방법에 비해 금형의 보수, 저가의 제작비용 등의 이점을 가지고 있기 때문에 점차적으로 증가하고 있는 추세이다[1]. 하지만 육성용접용 FCW (Flux Cored Wire)는 대부분 고가의 수입품이다. 이를 개선하기 위해 국내에서는 육성용접용 FCW를 개발하여 실제 금형에 적용하였으나, 수입 와이어로 제작한 열간단조 금형의 수명인 8,000 타점의 약 1/10

수준에 불과한 700 타점 전후에서 금형에 균열과 마모가 발생하는 문제점이 발생하였다.

이러한 문제점을 극복하기 위해서 와이어의 개선이 요구되나, 개선방향을 잡기 위한 육성용접부의 내균열성 및 내열충격성의 평가방법에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 특히 내열충격성의 경우 가열과 냉각의 반복사이클에 의한 열충격의 평가가 대부분이며 이러한 시험들은 높은 사이클로 인해 많은 시간이 걸리며, 또한 가열과 냉각을 반복할 수 있는 고가의 시험장치가 요구된다[2].

그러므로 육성용접부의 내균열성 및 내열충격성을 평가할 수 있는 방법에 대한 연구와 특히 내열충격성을 짧은 시간 내에 경제적으로 평가할 수 있는 방법이 필요하다.

본 연구에서는 열간단조 금형 육성용접부의 내균열성을 평가하기 위해 상온 굽힘시험을 실시하였고, 내열충격성을 평가하기 위해 염욕로를 이용한 고온 굽힘시험을 실시하여 경제적인 방법으로 육성용접부를 평가할 수 있는 시험법을 제안하고자 하였다.

2. 내균열성과 내열충격성 평가방법 제안

2.1 내균열성 평가방법

육성용접부는 HRc 50 근방의 고경도로서, 기계적특성을 평가하기 위해 노치 가공시 노치의 반복성 및 재현성이 열악하며 가공을 하더라도 가공비용이 상승하는 문제점이 있다.

또한 용접 시공시 결함이 있는 지점에서 균열이 우선적으로 발생하게 된다. 노치가 존재한다면 노치의 팁에서 균열이 발생, 성장하므로 용접결함에 대한 문제점을 정확히 인식할 수 없다[3].

J. K Kim 등은[4] 육성용접의 피로균열은 용접결함인 기공에서 발생하는 것이 지배적이라고 하였다. 파괴인성식 $K = \sigma_f \sqrt{\pi a}$ 의 측면에서도 경도가 높으면 파괴응력 σ_f가 높게 되며, 균열크기 a가 작아도 파괴에는 민감하게 영향을 미친다. 즉, 경도가 높으면 용접결함인 기공, 미세균열, 비금속 개재물 등이 재료의 파괴에 민감하게 영향을 미치게 된다. 그러므로 용접결함에 대한 평가는 매우 중요한 부분이라고 할 수 있다.

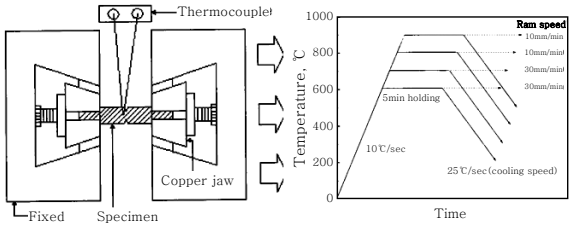
본 연구에서는 이러한 용접결함을 간접적으로 평가하기 위해서 $M_{\max}$(최대 모멘트)가 걸리는 위치에서 벗어난 경우를 고려하여 파단부 극한 굽힘응력 σ_{bf}를 사용하였고, σ_{bf}가 높으면 용접결함의 가능성 또한 낮을 것으로 판단하였다. 시편에 노치가 없는 상온 굽힘시험의 경우, HRc 50 근방인 고경도 육성용접부의 내균열성을 평가하기 위해 연성과 극한 응력을 측정하였으며, 극한 변형량이 크다면 연성이 우수하여 내균열성이 우수하고, 파단부 극한 응력이 클수록 내균열성이 우수한 것으로 평가하는 방법을 채택하였다.

2.2 내열충격성 평가방법

J. W. Kim 등은[5-6]은 Fig. 1의 (a)처럼 환봉에 노치가 형성되어 있는 시험편으로 Gleeble 3500을 이용하여 Fig. 1의 (b)와 같이 가열, 유지, 냉각과 동시에 인장을 실시하여 열충격을 평가하는 시험을 시행하여, 유지온도와 파단시의 온도 차이 ΔT가 클수록 열충격 특성이 우수하다고 판단하였다. 이 방법 또한 기존의 열충격 시험보다는 간단한 방법이지만 고가의 시험장치가 요구된다.

본 연구에서는 이러한 원리를 이용하여 내열충격성을 간편하고 빠르게 실험할 수 있는 방법을 고안하였다.

Fig. 2는 염욕로와 염욕로에서 가열된 시편을 보여준다. 염욕로에는 자체적으로 온도를 확인할 수 있게 K형 열전대가 부착 되었다. 염욕로를 이용하여 염욕로 내에서 850℃로 시험편이 가열될 수 있도록 하였고 시편을 5분간 가열하여 취출(取出)하였다. 이를 3점 굽힘시험할 수 있게 준비한 후 취출 1분 후 상온 굽힘시험과 동일하게 변위속도 2 mm/min인 변위제어 방식으로



(a) Schematic (b) Method

Fig. 1 Schematic of thermal shock test & test method

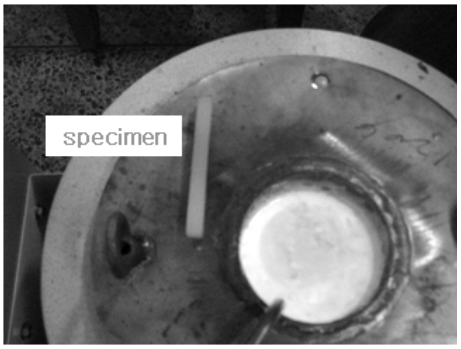


Fig. 2 Salt bath and specimen

시험하였다.

즉, 시편이 가열, 유지, 냉각 및 굽힘의 단계를 거치도록 실험하여 재료의 변위로 열충격을 평가하는 방법을 채택하였다.

3. 실험 재료 및 방법

3.1 실험 재료

본 실험에서는 SKT-4 기판 위에 육성용접을 실시하여 전용착금속(All deposited metal)에서 폭 10 × 길이 100 × 두께 10(mm)의 시편을 채취하였다. 상온 굽힘시험, 고온 굽힘시험은 각각 3 종류의 개발 와이어와 3 종류의 벤치마킹 와이어 총 6 종류의 와이어가 사용되었다.

일반적으로 경도와 내마모성은 비례하는 것으로 알려져 있다[7]. 즉, 경도가 높다면 내마모성 또한 우수한 것이라고 할 수 있으며 각 와이어의 내마모성을 간접적으로 나타내기 위하여 전용착금속의 경도값을 Table 1에 나타내었다.

각각의 와이어는 내균열성과 내마모성에 따라 "A", "B", "C"로 분류하였으며, 와이어 "A"는 내균열성이 우수하며, 와이어 "C"는 내마모성이 우수하고 와이어 "B"는 와이어 "A"와 "B"의 중간특성을 나타낸다. 와이어 표기를 "CA"와 "KA" 등으로 하였으며, 앞의 C와 K는 각각 벤치마킹 와이어와 개발 와이어를 의미한다.

3.2 실험 방법

3.2.1 상온 굽힘시험

상온 굽힘시험은 KS B 0804 금속재료 굽힘시험 방법을 참고하였다. 시편에 걸리는 하중 및 변위는 Instron 만능 인장 시험기에서 자동 측정되며, 시험기의 변위속도는 2 mm/min으로 하였으며 파단시의 변위를 시편의 극한 변형량으로 하였다. Fig. 3은 상온 굽힘시험의 모식도를 나타낸 것이다. 이때 M_{max}(최대 모멘트)가 걸리는 보의 중앙 위치에서의 인장응력이 시험편에 파단을 유발한다. 시편에 작용된 인장응력의 계산에는 시험기에서 측정된 파단시의 극한 하중 값과 시편의 전체 길이 100 mm가 아닌 span 80 mm가 사용되었다.

식(1) 으로 부터 인장응력을 계산하였다. 또한 육성용접된 시편은 파단이 M_{max}가 걸리는 보의 중앙 위치

Table 1 Hardness of various wire

Wire	CA	KA	CB	KB	CC	KC
Hardness (HRc)	48.7	48.2	53.2	53.1	55.3	55.8

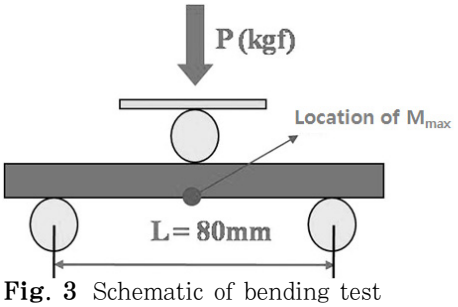


Fig. 3 Schematic of bending test

를 벗어나서 발생하기도 한다. 이 경우는 식(2)로 부터 파단부 극한 굽힘응력 σ_{bf}를 계산하였다.

$$\sigma_b = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

여기서 σ_b는 굽힘응력, b는 시편의 폭으로 10 mm, h는 시편의 두께로 10 mm, L은 span으로 80 mm이며 P는 파단시 가해진 하중 값이다.

$$\sigma_{bf} = \sigma_b(40 - x)/40 \quad (2)$$

여기서 x는 보의 중앙 (L=40 mm)에서 파단위치까지의 거리이다.

3.2.2 고온 굽힘시험

J. W. Kim 등[5-6]의 연구에서는 유지온도와 파단시의 온도차이 ΔT가 클수록 열충격에 더 잘 견디는 것으로 보고하였다. 본 연구에서는 이러한 원리를 이용하여 ΔT가 크다면 시간이 더 경과한 것으로 판단하여 2 mm/min의 변위속도를 가지는 변위제어 방식에서 극한변형량이 크다면 유지온도와 파단시의 온도 차이 ΔT가 크며 내열충격성이 우수한 것으로 평가하였다. Fig. 4는 실제 측정된 육성용접부의 냉각곡선으로 5분간의 가열 및 유지를 한 뒤 취출 후 시간이 지남에 따라 온도가 하강함을 보여준다. 그러므로 시간이 경과함에 따라 ΔT가 커지는 것을 알 수 있다.

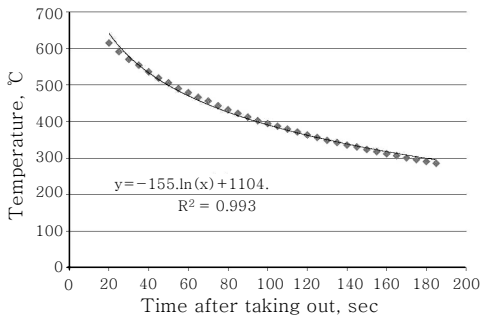


Fig. 4 Cooling rate of specimen

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 상온 굽힘시험

극한 굽힘 하중 및 극한 변형량은 만능 인장시험기에서 자동으로 측정되는 값으로 극한 굽힘하중은 시험중 가장 높게 나온 하중의 값이며, 극한 변형량은 시편이 파단될 때의 변위이다.

일반적으로 연성이 손실되면 균열의 발생, 진전이 더 잘 일어나는 것으로 알려져 있다[8-9]. 상온 굽힘시험시 시편에 발생하는 극한 변형량이 클수록 연성이 풍부하며 내균열성이 우수하다고 할 수 있다.

인장부위 파단위치는 시편의 중앙에서 파단지점까지의 거리를 말하며 값이 클수록 시편에 미세균열 또는 비금속 개재물 등의 용접결함이 존재할 가능성이 크다고 볼 수 있다. 즉, 용접결함의 문제점을 파악할 수 있다.

파단부 극한 응력 σ_{bf}는 인장부위 파단위치를 고려한 값으로 식 (2)로 부터 계산되며, 큰 값일수록 큰 응력에 견딜 수 있으므로 내균열성이 우수하다.

4.1.1 내균열성이 우수한 와이어 "A"의 상온 굽힘 특성 및 고찰

Table 2, 3에는 와이어 "A"의 상온 굽힘시험 데이터를 나타내었다. 개발 와이어 "KA"는 벤치마킹 와이어 "CA"와 거의 유사한 기계적 특성을 보이고 있다. 극한 굽힘하중, 인장부위 파단위치, 극한 변형량, 파단부 극한 굽힘응력의 4가지 값 모두 유사하며 큰 차이를 나타내지 않았다. 그 중 균열 발생지점과 극한 굽힘하중을 결합한 파단부 극한 굽힘응력 (σ_{bf})과 극한 변형량이 클수록 내균열성이 우수한 것으로 평가되는데, 두 와이어가 비슷한 값을 가짐에 따라 내균열성은 벤치마킹 와이어와 동등한 것으로 평가하였다.

또한 개발 와이어 "KA"는 내마모성은 부족하지만 내균열성이 우수한 특성을 가지고 있다. 그러므로 내마모성이 크게 요구되는 금형의 표면보다는 기계적 응력을 반복적으로 크게 받게 되는 부분에 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.1.2 내균열성 및 내마모성을 겸비한 와이어 "B"의 상온굽힘 특성 및 고찰

Table 4, 5에는 와이어 "B"의 상온 굽힘시험 데이터를 나타내었다. 개발 와이어 "KB"는 벤치마킹 와이어 "CB"보다 우수한 기계적 특성을 보인다. 인장부위 파단위치를 제외한 극한 굽힘 하중, 극한 변형량, 파단부 극한 굽힘응력의 3가지의 값이 벤치마킹와이어보다 양호하여 내균열성이 우수한 것으로 평가되었다.

4.1.3 내마모성이 우수한 와이어 "C"의 상온 굽힘특성 및 고찰

Table 6, 7에는 와이어 "C"의 상온 굽힘시험 데이터를 나타내었다. "KC"는 벤치마킹 와이어 "CC"보다 우수한 기계적 특성을 보이고 있다. 극한 굽힘하중, 인장부위 파단위치, 극한 변형량, 파단부 극한 굽힘응력의 4

Table 2 Test results of wire "CA"

Technical item	CA			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	2317	2511	2514	2447
Fracture point at tensile part(mm) (Distance from specimen's center)	3.43	5.21	5.97	4.87
Displacement(mm)	3.43	6.22	6.12	5.26
Fracture bending stress, σ_{bf} (kgf/mm^2)	258	262	257	259

Table 3 Test results of wire "KA"

Technical item	KA			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	2476	2471	2105	2350
Fracture point at tensile part(mm) (Distance from specimen's center)	9.56	4.31	0	4.62
Displacement(mm)	5.38	6.24	3.13	4.92
Fracture bending stress, σ_{bf} (kgf/mm^2)	226	265	253	248

Table 4 Test results of wire "CB"

Technical item	CB			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	2050	2228	1953	2077
Fracture point at tensile part(mm) (Distance from specimen's center)	1.42	0	1.20	0.87
Displacement(mm)	2.42	2.66	2.29	2.46
Fracture bending stress, σ_{bf} (kgf/mm^2)	237	267	227	244

Table 5 Test results of wire "KB"

Technical item	KB			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	2548	2663	2309	2506
Fracture point at tensile part(mm) (Distance from specimen's center)	0	3.71	0	1.23
Displacement(mm)	3.90	4.55	2.88	3.78
Fracture bending stress, σ_{bf} (kgf/mm^2)	305	299	277	290

Table 6 Test results of wire "CC"

Technical item	CC			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	1518	1535	1535	1555
Fracture point at tensile part(mm) (Distance from specimen's center)	4.23	4.23	1.32	2.62
Displacement(mm)	1.71	1.73	1.54	1.66
Fracture bending stress, σ_{bf} (kgf/mm^2)	162	173	165	167

Table 7 Test results of wire "KC"

Technical item	KC			
	1	2	3	Average
Ultimate bending load(kgf)	1583	2090	1801	1825
Fracture point at tensile part(mm) (Distance from specimen's center)	1.48	0.47	1.34	1.10
Displacement(mm)	1.72	2.30	1.94	1.99
Fracture bending stress, σ_{bf} (kgf/mm^2)	177	247	208	211

가지의 값 모두 우수하였으며 벤치마킹 와이어보다 크므로 내균열성이 우수한 것으로 평가되었다.

개발 와이어 "KC"는 "KA", "KB"보다는 내균열성이 부족하다. 그러므로 금형의 제작시 내마모성이 우수한 특성을 살려 재료와 접촉하는 표면쪽에 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.2 고온 굽힘시험

J. H. Song 등에[2] 의하면 열충격과 열피로 시험에서 균열의 진전은 냉각 중에 발생한다고 한다. 본 연구에서 냉각 및 굽힘의 단계에서 냉각 중에 의도적으로 균열을 생성/전파시키는 방법으로 통상적인 열충격시 시편의 거동을 유사하게 재현할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 8은 본 연구의 결과를 기존의 연구들과 비교한 것이다. M. Collin 등은[10] 강화 알루미나, 서멧(cermet), 고속도강 등의 HRc 65 근방의 고경도 취성재료의 내열충격성을 평가하기 위해서 비커스 압흔을 만들어 예비균열로 작용하게 하여 여러 온도에서 가열한 후 급냉 하여 균열의 길이가 변화하는 것을 관찰하였다. 이때 열응력 때문에 생기는 stress intensity factor가 크면 균열은 잘 생길 수 있지만, 재료의 인성이 우수하면 균열의 성장을 저지하는 특성을 갖게 되므로 두 가지의 조합에 의해 균열성장 특성이 변한다고 보았다. 즉, 예비균열이 있는 재료에 열전도성에 의해 결정되는

Table 8 Comparison of various studies

	M. Collin[9]	J. W. Kim[5-6]	Present study
Object	Brittle metarials without defect	Homogeneous tool steel without defect	Overay welded metal with welding defects
Fracture initiation	Pre-crack by vicker's indentation	Notch by machining	Random welding defects
Heating and cooling method	Furnace heating & water cooling(30℃)	Heating & cooling by Gleeble	Salt bath heating & air cooling
Thermal shock method	Quenching	Controlled cooling with tension	Controlled cooling with bending
Thermal shock resistance	Crack length increase	ΔT	Displacement
Excellence to thermal shock resistance	Low thermal stress intensity factor & high toughness	Large notch tip plastic deformation to lower temperature	Small weding defects & large plastic deformation by bending

열응력이 작고 소재의 인성이 크면 내균열성이 우수하다고 보았다. 이러한 방법도 기존의 열충격 특성보다는 간단하지만 균열의 성장특성을 보기 위하여 현미경 관찰 등의 정밀한 방법으로 인해 시간이 많이 걸리며 비커스 압흔이 예비균열로 작용할 수 있는 소재에 대해서만 적용가능하다는 단점이 있다.

J. W. Kim 등은[5-6] 노치를 가진 시편을 일정한 냉각속도에서 일정한 변위속도로 인장을 하면서 유지온도와 파단시의 온도차이 ΔT가 클수록 내열충격성이 우수하다고 평가하였다. 즉, 노치의 선단부가 저온이 될 때까지 충분한 소성변형이 가능하면 내열충격성이 우수하다고 보았다. 앞서 2장의 내열충격성 평가방법에서 설명한 바와 같이 이러한 방법도 고가의 시험장치가 요구되며, 또한 환봉형의 시편에 노치를 가공해야 하므로 가공비와 노치의 반복성 및 재현성이 부족하게 되는 단점이 존재한다.

본 연구에서는 고온 굽힘시험에서 극한 변형량이 크다면 내열충격성이 우수한 것으로 평가하였다. 즉, 소재 내에 미세균열 또는 비금속개재물과 같은 용접결함이 작아야 되며, 소재가 저온에 이르기까지 충분한 소성변형을 할 수 있으면 내열충격성이 우수하다고 보았다. 선행연구들과 비교하였을 때 저가의 장치를 이용하며 노치가공 시간 및 시험시간을 줄일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

4.2.1 내균열성이 우수한 와이어 "A"의 고온 굽힘 특성 및 고찰

Fig. 6은 와이어 "A"의 고온 굽힘시험 특성을 비교하였다. 개발와이어 "KA"는 벤치마킹 와이어 "CA"보다 고온 극한 변형량이 크며 세 와이어중 가장 우수한 내열충격성을 가지고 있지만 내마모성이 부족하기 때문에 금형의 표면에 사용하는 것은 바람직하지 못할 것으로 판단된다.

4.2.2 내균열성 및 내마모성을 겸비한 와이어 "B"의 고온굽힘 특성 및 고찰

Fig. 7에는 와이어 "B"의 고온 굽힘시험 특성을 비교하였다. 개발 와이어 "KB"는 벤치마킹 와이어 "CB"보다 다소 부족하지만 유사한 고온 극한 변형량을 가졌으므로 내열충격성은 벤치마킹 와이어와 동등한 것으로 평가된다.

4.2.3 내마모성이 우수한 와이어 "C"의 고온 굽힘 특성 및 고찰

Fig. 8에는 와이어 "C"의 고온 굽힘시험 특성을 비교하였다. 개발 와이어 "KC"는 벤치마킹 와이어 "CC"보다 고온 극한 변형량이 크므로 내열충격성이 우수한 특성을 가진 것으로 평가되었다. 또한 와이어 "KB"와 유사

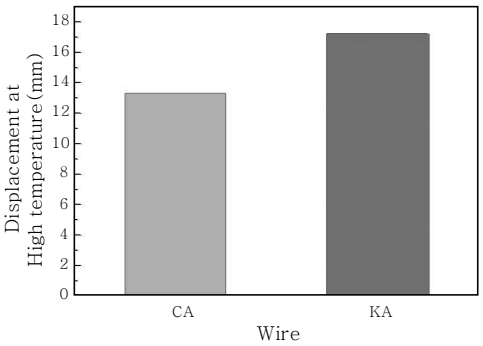


Fig. 6 Comparison of wire "CA" and "KA"

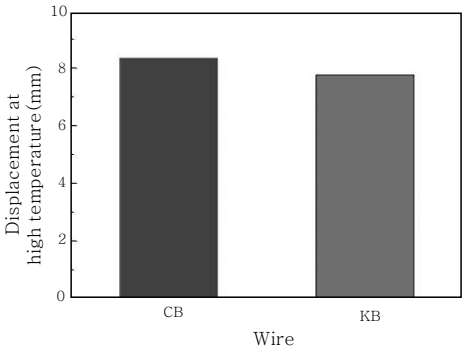


Fig. 7 Comparison of wire "CB" and "KB"

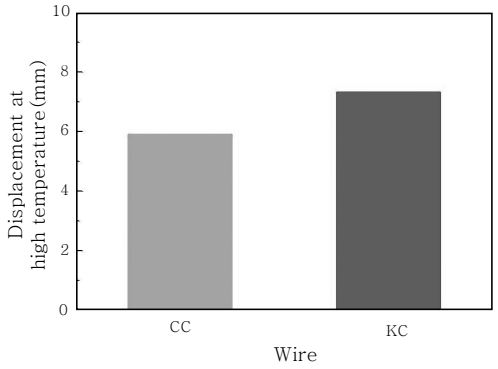


Fig. 8 Comparison of wire "C"

내열충격성을 보여주지만 내마모성은 "KC"가 우수하므로 금형의 표면에 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4.3 실제 열간단조 금형에 적용

본 연구에서 채택한 평가방법에 의해 개발 와이어의 성질이 벤치마킹 제품과 유사하거나 우수한 것으로 평가되었으며, 벤치마킹 와이어보다 부족한 금형 수명을 보여준 기존의 와이어보다 개선된 것으로 평가되었다. 이러한 평가방법의 정확성을 뒷받침하기 위해서 개발 와이어 "KC"로 육성용접하여 제작된 금형을 현장에 적용한 결과 기존의 700타점에서 8000타점으로 증가된 금형수명을 보였고, 다른 타점을 요구하는 현장에 적용한 결과 11400타점의 수명을 보였으며, 양호한 금형 수명을 나타내었다. 즉, 비교대상 와이어 "CC"로 제작한 금형과 유사한 수명을 가지는 것으로 판명 되었다.

5. 결 론

1) 열간단조 금형에 기계적 응력의 반복으로 발생되는 균열에 대한 저항력 평가를 위해 상온 굽힘시험을 실시하여, 내균열성을 평가할 수 있는 방법을 확립하였다.

2) 열간단조 금형에 중요한 내열충격성을 간편하게 측정하기 위해 염욕로를 이용하여 고온 굽힘시험을 하는 방법을 검토하여 고온 극한 변형량으로 내열충격성을 평가할 수 있다.

3) 개발 와이어 "KA"는 내마모성이 "KB", "KC"보다는 부족하지만 내균열성이 우수하므로, 금형에서 반복적인 응력이 작용하는 부분에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

4) 개발 와이어 "KC"는 내균열성 및 내열충격성은

"KA", "KB"보다는 부족하지만 내마모성이 우수하므로 금형의 표면에 사용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

5) 개발 와이어를 실제 열간단조 금형의 육성용접에 적용한 결과 금형의 수명이 벤치마킹 와이어로 만든 경우와 유사하였다.

참 고 문 헌

1. E. R. Baek, J. Y. Jung, S. H. Ahn : Trend of the weld surfacing technology, Journal of KWS, **15-5** (1997), 385-394 (in Korean)
2. J. H. Song, J. K. Lim, H. Takahashi : Thermal shock/fatigue evaluation of FGM by AE Technique, KSME Journal Vol. J.N DUPONT , **435-442**, 1996
3. Jiang Xu, Zhengyang Li, Wenhui Zhu, Zili Liu, Wenjin Liu : The comparative study of thermal fatigue behavior of laser deep penetration spot cladding coating and brush plating Ni-W-Co coating, Applied Surface Science, **253** (2006), 2618-2624
4. Jam-Kyu Kim, Seong-Dae Choi, Jong-Hyung Lee, Seon-Hwan Cheong, Hyun-Kyu Kweon : Characteristics of fatigue Crack behavior for overlay welding material, The Korean Society of Manufacturing Process Engineers 2005 Autumn Conference, 131-136 (in Korean)
5. J. W. Kim, J. H. Ryu, H. H. Park and Y. H. Moon : Analysis of Thermal Shock and Thermal Fatigue in Tool Steels for Hot Forging, Transactions of Materials Processing, **11-1**, 2002 (in Korean)
6. Y. H. Moon, J. W. Kim, C. J. Van Tyne : Thermal shock resistance of electroslag cast steel for hot-working tools, Journal of Materials Processing Technology **155-156** (2004), 2122-2126
7. 吳 世 鎭, 硬質크롬 鍍金에서 硬度와 耐磨耗性과의 關係, 金屬表面處理 第5卷 第2號, 技術報告 (in Japanese)
8. 대한용접·접합학회 : 용접·접합 편람, 2007, 27-29 (in Korean)
9. Choung-Rae Lee, Sang-Ho Um, Cheol-Choi, and Chang-Hee Lee : A Study on Hot Ductility behavior of Ni-based Superalloys, Journal of KWS, **22-2** (2004), 157-166 (in Korean)
10. M. Collin, D. Rowcliffe : Analysis and Prediction of Thermal Shock in Brittle Materials, Acta mater. **48** (2000), 1655-1665