

# Cr-Mo-V 터빈로터강에서의 Reheat Cracking 민감도 평가

김 광 수(순천향대학교, 재료공학과)

김 환 태 (한국기계연구원)

Evaluation of Reheat Cracking Susceptibility in Cr-Mo-V Turbine Rotor Steel

## 1. 서 론

터빈로터는 전력발전소 설비중에서 가장 핵심부분이며, 동시에 심한 고온응력을 받는 부분이다. 현재 발전설비의 터빈로터 재료로는 고온금속재료로 널리 알려진 Cr-Mo-V강, Ni-Cr-Mo강, Ni-Cr-Mo-V강 등이 사용되고 있으며 근래에 들어서는 용량의 대형화와 효율향상을 위하여 12Cr-Mo-V강 등도 채택되고 있다. 이중에서도 Cr-Mo-V 강은 국내 및 국외에서 많이 사용되고 있는 재료이다.

그러나 우수한 고온재료라 할지라도 장시간 고온에서 사용되는 경우 열적피로, 크립손상, 고온부식 등의 문제점이 단독 혹은 복합적 상호작용으로 인해 재료에 예기치 못한 손상을 가져오게 되어 중요한 발전설비의 수명을 단축시킬 수 있다. 이와같은 갑작스런 고장이 발생할 경우, 발전설비를 원상대로 복구하기에 막대한 시간과 경비가 소요된다. 일례로 미국에서는 터빈로터의 파손시 발전설비를 원상 복구하기에 새로운 로터의 설치 구입이 적용될 경우 약 350만 달러와 약 16개월이 소요되는 것으로 추정하고 있다. 따라서 터빈로터 등 발전 시스템재료의 사고와 수명연장을 위해 발전설비의 전체적교체를 피하고 좀더 효율적으로 국부적인 보수를 피함으로써 시간과 경비의 절약에 대한 많은 연구가 현재 미국과 유럽에서 진행되고 있으며, 국내에서도 이에 대한 자료수집과 동시에 연구가 진행되어야 할 것이다. 이러한 경우 용접은 시간과 경비면에서 가장 효과적으로 파손된 부분이나 수명연장이 필요한부분을 수리, 보완할 수 있는 가장 매력적인 방법으로 채택될 수 있다.

이에 본 연구는 Cr-Mo-V 터빈로터강의 용접에 있어서 어려운 과제로 제기되고 있는 용접열영향부의 Reheat Cracking 민감도 저항성에 관하여 연구하는데 목적을 두고, 용접분야에서 실제 용접대신 많이 활용되고 있는 GLEEBLE 용접 열영향부 재현기를 사용하여 연구분석함으로써 발전설비재료의 용접기술개선에 도움을 주고자 한다.

## 2. 실험방법

### 2. 1. 재료

연구에 사용된 재료로는 고압/중간압력(high/intermediate pressure)터빈로터 용으로 만들어진 1.0Cr-1.0Mo-0.25V 강을 사용하였다. Table 1은 사용되어진 재료의 화학조성을 표시하고 있다. 준비된 Cr-Mo-V 강은 GLEEBLE 용접열영향부 재현시험편으로 만들기 위하여, 용접사이클 재현용으로는 시편의 측면을 샤프리 충격시험편보다 약간 큰 시편 규격(11 mm x 11mmx 55 mm)으로 V노치 없이 가공하였다. 용접재현 사이클 이후에는 reheat cracking 민감도의 측정을 위해, 이 oversize blank Charpy 시편은 용접사이클 재현시에 생긴 산화 스케일을 제거하고 Charpy형태(V 노치를 포함한 10 mm x10mm x55mm )시편으로 2차 가공하였다. reheat cracking 민감도 시험은 노치열림 3점 굽힘시험(Charpy type opening 3 point bend test)을 사용하였다.

## 2. 2. 용접열영향부 재현 실험

V 노치가 없는 oversize blank 샤프리 시험편들은 GLEEBLE 1500를 이용하여 용접열영향부의 재현을 시도하였다. 이 용접열영향부의 재현은 온도와 시간을 정확히 조절하여 만들어졌다. 용접열영향부 재현시 열영향부의 온도 조절은 oversize blank 샤프리 시편의 정중앙부에 점용접에 의해 고정된 Chromel/Alumel 과 Platinum/Platinum-13%Rhodium 열전대를 부착하였으며, 동시에 열영향부의 재현사이클 이상 유무를 관찰하기 위하여 용접사이클중에 digital thermometer 와 paper recorder를 연결 이용하였다. 임의적으로 만들어진 용접열영향부는 Submerged Arc 용접에서 얻을수 있는 저입열(low heat input), 중간입열(medium heat input), 그리고 고입열(high heat input)을 기준으로 생산하였다. 열사이클은 최고온도(peak temperature)를 950°C, 1150°C, 그리고 1350°C 로 설정하였다. 아울러 후판용접시에서 활용되는 다중용접을 고려하여, 이중사이클로서 1차(single)열사이클, 2차(double) 열사이클이 적용되었으며 2차열사이클 적용시에는 열영향부의 겹침(superimposition)현상으로 인한 입계미세화(grain refinement)를 고려하여 1차 열사이클에서의 최고온도보다 낮은 온도를 채택하였다. 한편 다중용접시에 적용되는 예열(preheat temperature)과 중간열(interpass temperature)은 250°C 로 유지하였다. 끝으로 이러한 시뮬레이션에의 만들어진 재현된 용접열영향부 시편들은 관상로를 이용하여 677°C에서 1시간동안 후열처리(postweld heat treatment)를 행하였다. 자세한 열재현사이클과정은 Table 2 에 요약된 바와 같다.

## 3. 실험결과 및 고찰

Table 3은 변위를 다르게 적용하여 3점 굽힘시험을 하였을때 reheat crack의 발생여부 나타내고 있다. 일반적으로 균열의 발생및 전파는 적용된 변위의 양을 증가시키는 것에 의존하였다. 저입열에 의해 만들어진 열영향부는 비교적 과도한 변위의

적용시에도 reheat 균열에 대하여 우수한 저항성을 보인 반면에, 중간입열에 의해 만들어진 열영향부는 단일 사이클에서 균열이 발생하였지만, 사이클이 중복된 경우에는 균열의 민감도는 현저히 줄어 들었다. 고입열을 예상하여 만들어진 열영향부에서는 변위를 극소화한 경우에서도 균열을 발생할수 있었다.

Figure 1은 reheat 균열의 파괴양상을 보여주고 있다. 발생한 모든 균열은 Figure 1 에서와 같이 입계를 따라 전파되었으며, 균열의 파괴면에서는 Figure 2에서 보여주는 바와같이 깨끗한 입계면과 cavitation 이 산재해 있는 입계면을 관찰할수 있었다.

3점 굽힘시험기를 이용한 Reheat 균열의 민감도 평가는 효과적인 것으로 생각 되었으며, 균열의 발생은 열영향부의 조대입계 영역에서의 입계크기에 의존할 뿐 아니라 동시에 조대영역에서의 경도값에도 크게 의존한다는 것을 알수 있었다.

TABLE 1  
CHEMICAL COMPOSITION OF Cr-Mo-V ROTOR STEEL

COMPOSITION	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo	V
(WEIGHT %)	0.31	0.18	0.75	1.04	0.11	0.016	0.012	1.14	0.24

TABLE 2  
CHARACTERIZATION OF SIMULATED  
WELD THERMAL CYCLE

PEAK TEMPERATURE	: 950°C, 1150°C, and 1350°C
CYCLES	: Single and Double
PREHEAT TEMPERATURE	: 250°C
HEATING RATE	: 200°C/SEC.
$\Delta T_{800-500}$	: 50 SEC.
COOLING RATE	: 50°C/SEC.
INTERPASS TEMPERATURE	: 250°C
POSTWELD HEAT TEMPERATURE	: 677°C

TABLE 3  
RESULTS OF THE REHEAT CRACKING TEST

CONDITION	NOTCH OPENING DISPLACEMENT [ $\mu\text{m}$ ]			
	50	100	200	300
950°C SINGLE CYCLE	*	*	SAFE	SAFE
DOUBLE CYCLE	*	*	SAFE	SAFE
1150°C SINGLE CYCLE	CRACK	CRACK	*	*
DOUBLE CYCLE	*	SAFE	SAFE	*
1250°C SINGLE CYCLE	CRACK	*	CRACK	*
DOUBLE CYCLE	CRACK	CRACK	*	*

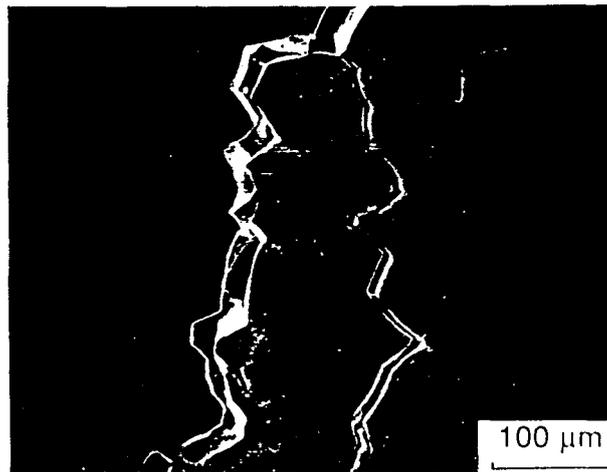


FIGURE 1. Reheat crack on the simulated heat affected zone.

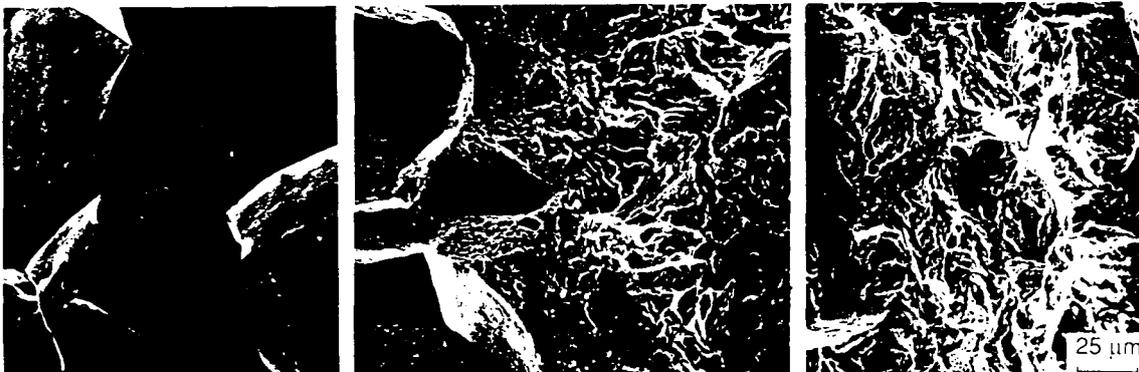


FIGURE 2. Fracture surface transition of reheat crack.