

1% Cr- 0.5% Mo 강의 재열 균열 감수성 평가

김수영, 한종만*, 한용섭
(대우조선공업(주) 기술연구소)

1. 서론

용접부 응력제거 소둔처리는 용접에 의해 발생하는 잔류응력의 경감이나 용접부 경화역의 연화를 목적으로 용접후에 광범위하게 행하여지고 있다. 강종에 따라서는 이 소둔과정에서 용접부 균열이 발생하는 것으로 알려져 있다. 특히 60kg/mm² 이상의 고장력강이나 Cr-Mo 계 내열강, Ni 계 초내열합금 등에서 주로 발생해 용접시공상의 큰 문제로 제기되는 균열이다. 응력제거소둔 균열(Stress Relief Cracking, S.R 균열)의 특징으로서는 500-750°C의 온도 범위에서 구속도가 크고, 잔류응력이 높은 이음부에서 발생하기 쉬우며 열영향부의 조립역에서 발생, 오스테나이트 입계를 따라 전파하는 입계균열이란 점을 들 수 있다. 본 연구에서는 열교환기 제작에 이미 사용한 경험이 있는 1% Cr-0.5% Mo 강에 대해 열재현 시험 장치를 이용하여 용접 열영향부의 S.R 균열 감수성을 조사하였다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

실험에 사용한 재료는 Table 1과 같고 열교환기 제작에 많이 사용되고 있다. S.R 균열 재현 평가 시험을 위해 Fig. 1과 같은 인장형 환봉 시편을 이용하여 고주파 유도 가열 방식 용접 열 Cycle 재현장치로 고온입계 파단 강도 측정시험과 정하중 승온 파단시험을 행하였다. 고온입계 파단강도 측정에서는 Fig. 2와 같이 Zero Load Control과 Free Expansion & Contraction 이 재현 용접열 Cycle 도중에 이용되었다. 정하중 승온 파단시험은 Fig. 3과 같이 HAZ 고온 강도에 미치는 냉각속도의 영향을 조사하였다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of test specimen

Spec.	Chemical composition (wt%)							Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Y.P(Kg/mm ²)	T.S (Kg/mm ²)	Hv5
A387 Gr.12	0.17	0.30	0.49	0.018	0.011	0.90	0.52	37.1	51.9	192

3. 결과 및 고찰

3.1 S.R 균열에 미치는 Peak 온도의 영향

Fig. 4에는 정하중 파단시험 결과를 나타내고 있으며 부하 하중이 모재 인장 강도의 60% 일때 비교하여 보면 Peak 온도가 1350°C 일때, 파단까지의 유지시간이 3시간으로 가장 길었고, 1450°C 일때 2시간, 900°C 일때 0.7 시간 순이었다. Photo. 1에는 정하중 열 Cycle 하에서의 광학현미경 사진으로 Peak 온도가 900°C 일때 Ferrite와 Pearlite의 조직을 나타내며, Peak 온도가 1350°C, 1450°C 일때 조직은 Bainite와 Martensite의 혼합 조직을 나타내고 있다. Photo. 2는 정하중 열 Cycle 하에서의 파면을 S.E.M으로 관찰한 것으로서, Peak 온도의 상승과 함께 연성파면에서 입계파면으로 파단형태가 바뀌었음을 알 수 있다.

Peak 온도 1350°C, 1450°C 일때 조직과 결정립 크기에는 차이가 없으나, Peak 온도 1450°C 경우에서 Peak 온도 1350°C 보다, S.R 균열 감수성이 높음을 나타내었다. Fig. 5의 열 Cycle 변화에 따른 용접 열영향부에서의 인장시험 결과에서 Peak 온도가 900°C 일때 HAZ 인장 강도 76.2 kg/mm², Peak 온도가 1350°C 일때 HAZ 인장 강도 90.6kg/mm² 으로 Peak 온도가 900°C 일때의 인장 강도는 Peak 온도가 1350°C 일때 보다 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 따라서 동일 하중일 경우 HAZ 인장강도에 대한 상대 하중이 많이 작용하게 되므로 파단시간이 짧아진 것으로 생각된다.

3.2 S.R 균열에 미치는 이중 열 Cycle 의 영향

Fig. 6에는 2중 열 Cycle 재현한 시험편에서의 정하중 파단시험 결과를 나타내었으며 이때 2 번째 Peak 온도는 900°C 로서 각각의 시험편에 동일하게 적용하였다. 부하 하중이 인장강도의 60% 일때 비교하여 보면 Peak 온도가 1350°C+900°C 일때 파단까지의 유지 시간이 7시간으로 가장 길었고, 1450°C+900°C 일때 3.6시간, 900°C+900°C 일때 1시간 순으로 단일 열 Cycle 적용시와 같은 순서를 보이고 있다. Fig. 4의 단일 열 Cycle 재현 시험편과 Fig. 6의 2중 열 Cycle 재현 시험편의 정하중 파단시험 결과를 비교하여 보면 단일 열 Cycle 재현 시험편의 경우에 비해 2중 열 Cycle 재현 시험편에서 파단까지의 유지시간은 약 100% 이상 증가하였다.

Fig.5의 용접열영향부의 인장시험 결과에서 보면 Peak 온도가 900°C+900°C, 1350°C+900°C 일때, 인장강도는 80.5 kg/mm², 88.6 kg/mm² 으로 단일 열 Cycle 에 비해서 Peak 온도가 900°C+900°C 인 것은 인장 강도 4 kg/mm² 정도 증가하였으며, Peak 온도가 1350°C+900°C 인 것은 인장강도가 2 kg/mm² 정도 감소하였다. 또한 연신율의 변화를 비교하여 보면 단일 열 Cycle 에서 Peak 온도가 900°C, 1350°C 일때 연신율은 20.9%, 15.5%, 2중 열 Cycle 에서 Peak 온도가 900°C +

900°C, 1350°C+900°C 일 때 연신율은 20.5%, 19.5%로 단일 Cycle 에 비해서 2중 열 Cycle 의 경우 Peak 온도가 900°C+900°C 인 것은 연신율이 약간 감소하였으며, Peak 온도가 1350°C +900°C 인 것은 연신율이 4% 정도 증가하였다.

Photo. 3 에는 2중 열 Cycle 을 겪은 시편의 정하중 열 Cycle 하에서의 S.E.M 파면사진을 나타내었다. Peak 온도가 900°C+900°C인 경우에서 Peak 온도가 900°C 일때 보다 Dimple Size 가 더 작아진 전형적인 연성파면을 나타내고 있다. Peak 온도가 1350°C+900°C인 경우에는 Peak 온도가 1350°C 일때와 비교해서 파면형태가 입계파면에서 연성파면으로 완전히 바뀌었다.

Peak 온도가 1350°C와 1450°C인 경우에는 이중 열 Cycle 시 단일 열 Cycle 실험시보다 월등히 개선된 동일하중에서의 파단 유지시간을 보여주고 있다. 이러한 현상은 2중 열 Cycle 에 의한 P등의 불순물이 입내로 완전히 고용됨으로서 입계강화의 효과 감소와 결정립 미세화로 전형적인 연성파괴로 바뀌면서 일어난 현상으로 생각된다.

4. 결 론

1% Cr-0.5% Mo 강의 재열균열 감수성 평가에 대한 본 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 단일 열 Cycle 을 겪은 시험편에 대한 S.R 균열 감수성은 Peak 온도가 1350°C 일때 가장 낮았으며, Peak 온도가 900°C 일때 가장 높은 S.R 균열 감수성을 나타냈다.
- 2) 2중 열 Cycle 을 겪은 시험편에 대한 S.R 균열 감수성은 단일 열 Cycle 을 겪은 시험편에 대해 감소하였고, Peak 온도 1350°C + 900°C가 가장 낮은 S.R 균열 감수성을 보였다.

5. 참고 문헌

- 1) R. Steinmetz, R. E. Dolby and A. G. Vinckier : Status on Reheat Cracking in Nuclear Vessel Steels, 1976
- 2) A. T. Price and M. J. Siverns : Metal Const 2, 1970 259
- 3) J. D. Murray : Stress-relief Cracking in Carbon and Low Alloy Steels, British Welding Journal, Vol.14, No.8, 1967, 447
- 4) J. J. Debarbadillo, A. W. Pense and R. D. Stout : The Creep-rupture Properties of Pressure Vessel Steels-Prt II, Welding Journal, Vol.46, No.8, 1967, 366s

- 5) R. I. Presser and R. Mcpherson : IIW Doc. No. X-857-77, 1977
- 6) C. A. Hippofey, J. F. Knott and B. C. Edward : Acta Metal 28, 1980, 869
- 7) N. E. Moore, J. A. Grrithiths : J. I. S. I, 1, 1961, 29
- 8) C. F. Meitzner and WRC Bulletin, A11, 1975
- 9) C. F. Meitzner and A. W. Pense : Weld J. , 48, 1969, 4315

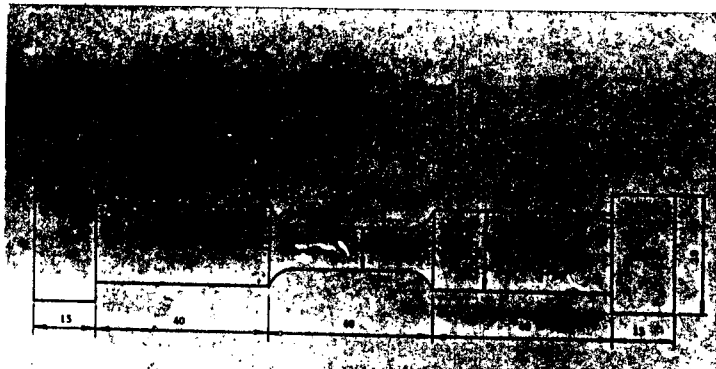


Fig. 1 The shape and dimension of the test specimen (Unit : mm)

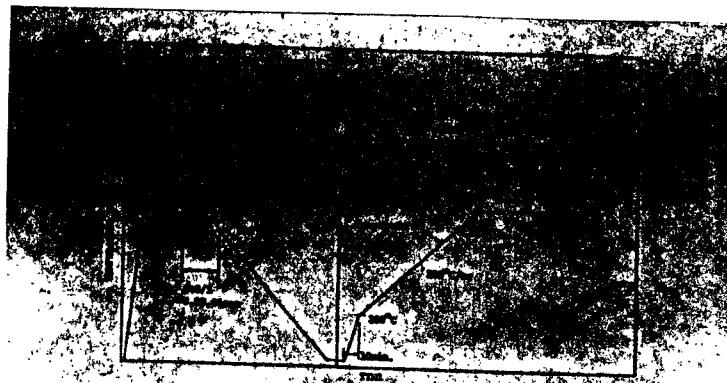


Fig. 2 Schematic diagram of synthetic thermal and stress cycles in reheat cracking test

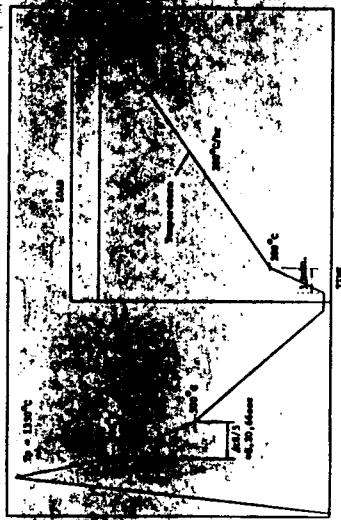


Fig. 3 Schematic diagram of synthetic thermal and stress cycles in constant load test

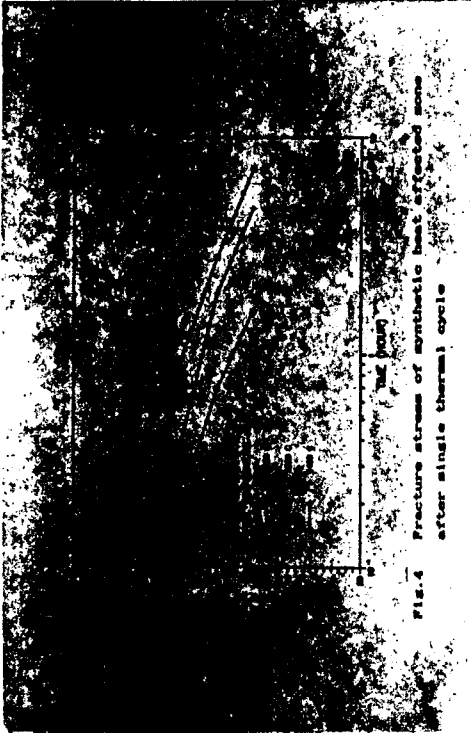


Fig. 4 Fracture stress of synthetic heat affected zone after single thermal cycle



Fig. 5 Effect of peak temperatures on tensile strength and elongation of synthetic heat affected zone

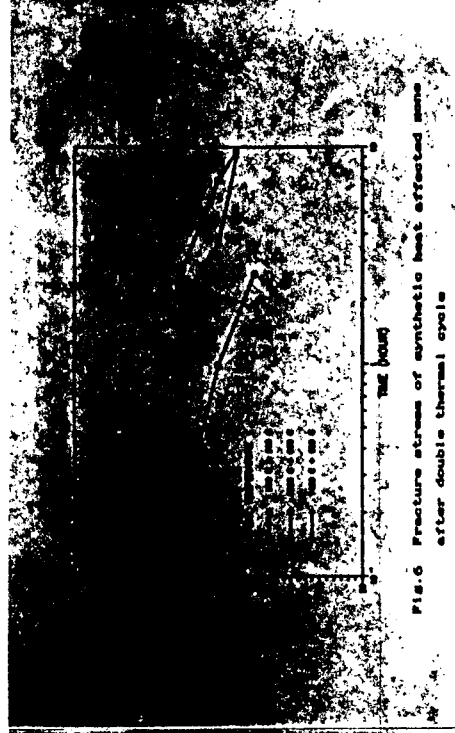
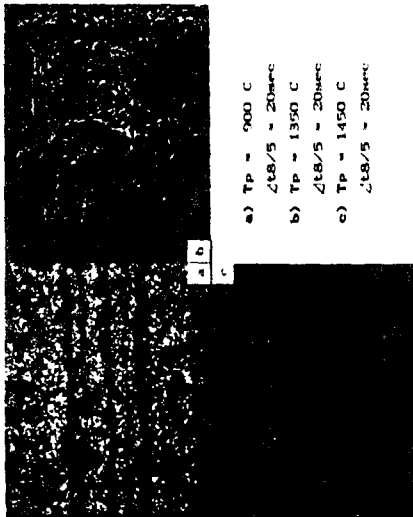
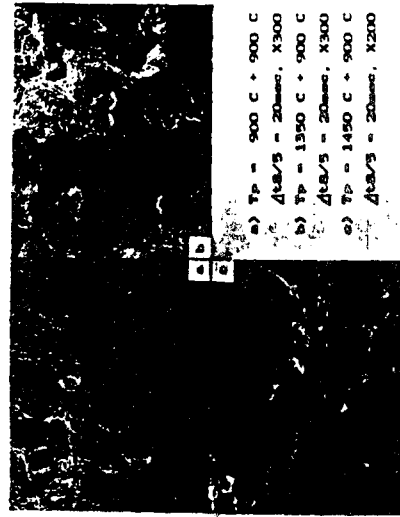


Fig. 6 Fracture stress of synthetic heat affected zone after double thermal cycle



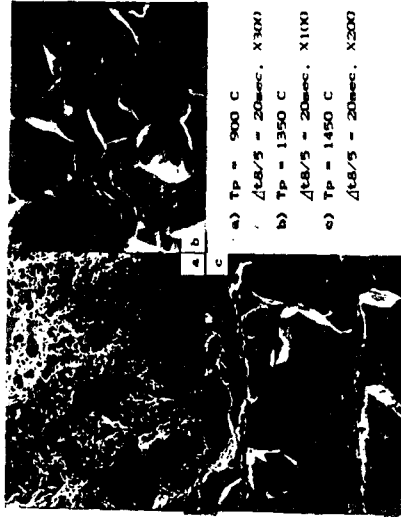
- a) $T_p = 900\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$
- b) $T_p = 1350\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$
- c) $T_p = 1450\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$

Photo 1. Microstructure of synthetic heat-affected zone in single thermal cycle. (X200)



- a) $T_p = 900\text{ C} + 900\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$, X300
- b) $T_p = 1350\text{ C} + 900\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$, X300
- c) $T_p = 1450\text{ C} + 900\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$, X200

Photo 4. SEM observation of fracture surface after rupture.



- a) $T_p = 900\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$, X300
- b) $T_p = 1350\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$, X100
- c) $T_p = 1450\text{ C}$
 $\Delta t_{8/5} = 20\text{sec}$, X200

Photo 2. SEM observation of fracture surface after ru