研 究 論 文
大 韓 熔 接 學 會 誌
第4卷, 第2號, 1986年 9月
Journal of the Korean Welding Society
Vol. 4, No. 2, Sept., 1986

열 영향부의 시뮬레이숀에 의한 12% Cr강의 용접성 평가

金 在 道*

Weldability of 12% Cr Steel by Thermally Simulated HAZ

J. D. Kim

Key words : martensite(마르텐사이트), Toughness(인성), microstructure(미세조직), Weldability(용접성)

Abstract

This investigation is concerned with the toughness and microstructure of martensitically simulated HAZ in 12% Cr steel. Unnotched specimens were subjected to weld thermal cycles in a weld simulator. The parameters-peak temperatures, cooling rate, influence of PWHT and plastic deformation were considered. After weld simulation, the specimens were heat-treated, V-notched and impact tested. An optical metallographic examination was performed to correlate the HAZ toughness with microstructure. Also a fractographic examination was done to obtain information on the fracture mode.

The toughness of the coarse grained zone and the part of HAZ subjected to a peak temperature range 700-800°C are lower than the other parts. However, they are still high enough. The double PWHT cycle could not improve the HAZ toughness in present study. However, if the first PWHT is conducted before the work piece is cooled below M_f, it is expected that the double PWHA may be beneficial to the toughness of the HAZ. It is also expected that martensitic welding can be used on production welds.

1. 서 론

작은 시편을 모의용접실험(weld simulation)을 하여 열영향부의 인성과 금속조직을 연구함으로써 재료의 용접성을 단기간에 알아 낼 수 있는데, 이 방법은 Nippes와 Savage에 의해서 최초로 시도되었다.[1,2,3]

12%Cr강은 pearlitic-martensitic강으로써 고온에서 매우 우수한 크리프저항을 갖고 있기 때문에 증기 발전소, 핵발전소의 보일러, 재가열로 등의 재료로 사용이 시도되고 있다. 최근에 600MW 용량이상의 발전소가 건설되면서 600℃, 160 bar에서 사용할 수 있는 재료가 필요하게 되었는데, 12%Cr강은 이 같은 조건에서 기계적 성질이 매우 우수한 것으로 알려져 있다.[4]

그런데, 12%Cr강은 용접이 매우 어려운 재료이다. 재료의 화학성분때문에 공기중에서 硬化가 일어나고, 용접후 공기 중에서 서냉시켜도 脆化한 마르텐사이

* 인하대학교 기계공학과,

트 조직이 나타난다. 용착금속과 열영향부가 매우 硬해져서 인성이 낮아지게 된다. 특히, cold cracking에 대한 감수성이 높기 때문에 적절한 예열처리와 후열처리가 꼭 필요하다.

예열온도에 따라서 오스테나이트 용접(austenitic welding)과 마르텐사이트 용접(martensitic welding)으로 구별할 수 있다.

오스테나이트 용접은 마르텐사이트 조직변화가 일어나는 온도, Ms보다 높은 온도로 예열하여 용접하는 방법이다. 용접재질을 400~450℃로 예열한 후에 용접하여야 한다. 용접후에 재료의 두께에 따라서 80~120℃로 온도를 유지하다가 760℃에서 템퍼링하여 인성을 향상시킨다.[5]

그 동안 12% Cr강은 이같은 오스테나이트 용접을 하였는데, 현장에서 예열온도를 400~450℃로 제어하기가 어렵고, 용접후 상온까지 냉각되는 것을 방지하여야 하고, 용접 즉시 열처리를 해야 하는 문제가 있었다. 또한 재료두께가 100mm 이상이면 이 방법으로 용접은 불가능하다.

마르텐사이트 용접은 이 같은 단점을 개선할 수 있는데, 예열온도를 마르텐사이트 조직변화가 일어나는 온도보다 낮게 하여 용접하는 방법이다. 보통 cold cracking이 일어나지 않게 할 정도의 온도로 예열하는데 두께에 따라서 200~275℃가 적절한 것으로 알려져 있다.

본 논문에서는 국제표준화기구(International Standard Organization) 시편에 의해서 모의용접실험을 하여 12% Cr강의 마르텐사이트 용접가능성에 대하여 고찰하였다.

2. 모의 용접 실험

2-1. 시험재료

시험편들은 직경 430mm, 두께 35mm인 관으로부터 길이방향으로 가공하였다. 시편의 크기는 Fig. 1과 같다. 양단에 구멍을 뚫어서 실험하는 동안 냉각속도를 제어할 수 있게 하였다. 12% Cr강의 화학성분과 기계적 성질은 Table 1과 같다. DIN 규격으로는 X20CrMoV 12 1 steel이며, Fig. 2는 본 재료의 T-T-T도이다.

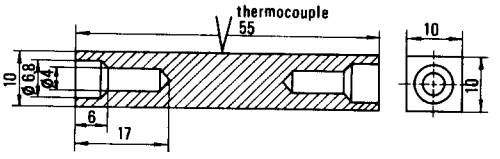


Fig. 1. Weld simulation specimen

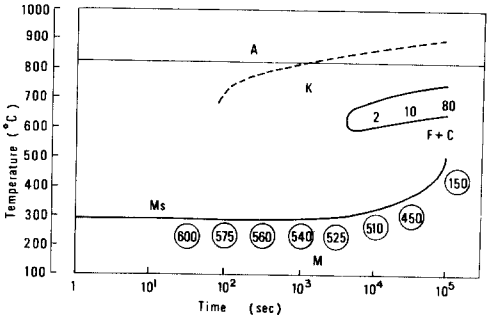


Fig. 2. Temperature-Time-Transformation diagram of 12% Cr steel (DIN, 20CrMo V 12 1)

2-2. 모의 용접실험 장치

재료의 용접성을 단기간에 연구할 수 있는 smith weld simulator (philip 제작, 모델 TCS 1405)는 전기저항가열부와 제어부로 구성되어 있다. 온도 사이클은 선형온도 사이클, 단일온도 사이클, 복합온도 사이클을 적용할 수 있다.[6,7]

시험 재료 중앙에 열전대를 연결하여 가열속도, 냉각속도, 최고점온도(peak temperature)를 제어할 수 있게 되어 있다. 가열하는 동안 불활성가스를 사용할 수 있는데, 유량은 10l/min이다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of material(X20CrMoV 12 1, DIN)

Chemical composition								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V
0.19	0,32	0.55	0.019	0.010	11.15	0.74	0.84	0.27

Mechanical properties			
Yield strength (N/mm^2)	Tensile strength (N/mm^2)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
610.0	802.0	18.0	52.0

금속조직의 변태온도를 알아보기 위해서 dilatometer를 이용할 수 있는데, 변위계와 센서로 구성되어 있다. 센서는 시편의 중앙에 설치하여야만 오차를 줄일 수 있다.

2-3. 냉각시간 계산

모의 용접 실험중에 냉각시간을 적용하여야 하는데, 아래와 같은 식을 이용하였다.[8,9]

열전달 모델로부터 냉각시간은 용접변수와 재료의 물리적 성질에 의해서 표현되어진다. 재료의 두께가 얇은 경우는 2차원 모델로, 두꺼운 경우는 3차원 모델로 표현된다.

2차원인 경우의 냉각시간은 식(1)과 같다.

$$t_{8/5}=\frac{1}{4\pi\lambda\rho c}\left(\frac{E}{d}\right)^2\left\{\left(\frac{1}{500-T_o}\right)^2-\left(\frac{1}{800-T_o}\right)^2\right\} \quad (1)$$

여기서 E=순입열량, ρ=비중, c=비열, λ=열전도도, T_o=예열온도, d=재료 두께이다.

3차원 경우에는 식(2)로서 표현된다.

$$t_{8/5}=\frac{E}{2\pi\lambda}\left(\frac{1}{500-T_o}-\frac{1}{800-T_o}\right) \quad (2)$$

윗식에서 알 수 있듯이 3차원인 경우는 재료 두께에 상관이 없이 계산된다.

2차원과 3차원의 임계재료 두께(transition plate thickness)는 식(1), 식(2)로부터 아래와 같이 구해진다.

$$d'=\left\{\frac{E}{2\rho c}\left(\frac{1}{500-T_o}+\frac{1}{800-T_o}\right)\right\}^{1/2} \quad (3)$$

2-4. 실험절차

시험편(55×10×10mm)의 중앙에 Cromel-Alumel 열전대를 flash-welder를 이용하여 용접하였는데 열전대 사이의 간격을 3mm 이하가 되게끔하였다. 시험편을 weld simulator에 고정하는데 있어서 고정대 사이의 간격을 15mm로 유지하였다. 간격의 변화가 심하면 본 재료는 민감한 성질변화를 나타내기 때문이다. 재료의 변태온도를 알기 위해서 dilatometer를 이용하였다.

열영향부의 충격치에 미치는 최고점 온도(peak temperature)의 영향을 연구하기 위해서 700, 750, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1350℃로 하였고, 냉각시간은 10초로 하였다. 변형 취화가 열영향부의 충격치에 미치는 영향을 연구하기 위해서 시험편의 중앙부에 5%의 소성변형을 상온에서 하였다. 5% 소성변형된 시험편에 대해서도 최고점 온도를 700, 750, 800, 900, 1000, 1100, 1200, 1300, 1350℃로 변화시키면서 실험하였다. 최고점온도가 800℃ 이하에서는 냉각시간을 수정하여야 하는데, Tp=800℃일 때는 등가 $t_{8/5}$를 750℃와 300℃ 사이에서 28.5초, Tp=750℃일 때는 700℃와 300℃ 사이에서 27.2초, Tp=700℃일 때는 600℃와 300℃ 사이에서 24.1초로 계산하여 적용하였다.

Fig. 3는 모의 용접실험을 하는 동안 기록된 열 사이클과 온도에 대한 dilatation를 보여 주고 있다.

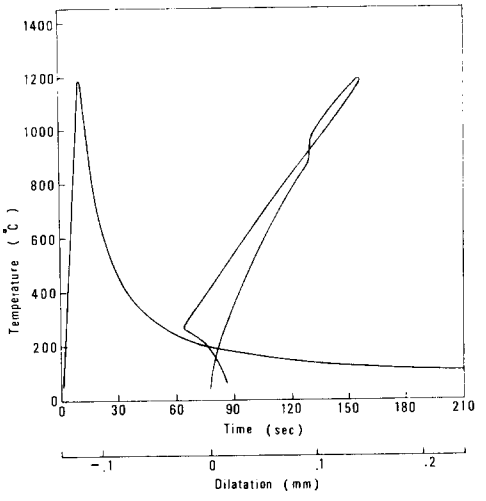


Fig. 3. Typical temperature versus time and temperature versus dilatation diagrams recorded during a weld thermal cycle (Tp=1200°C, $t_{8/5}$=10sec)

모의 용접실험이 끝난 시험편은 760℃에서 2시간 동안 후열처리를 하였는데, 단일 후열처리(single PWHT)와 이중 후열처리(double PWHT)를 하였다. Fig. 4는 후열처리도이다. 후열처리가 끝난 시험편은 charpy-v-cutter에 의해서 v-notch를 가공하였다. 충격시험은 AMSLER(300 Joule) 충격해머를 사용하였는데 상온에서 실험하였다.

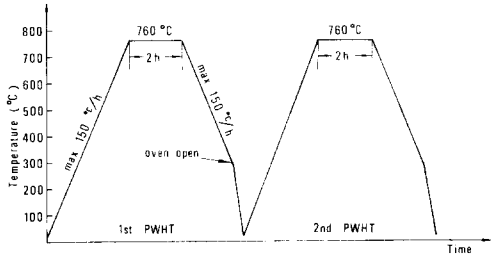


Fig. 4. PWHT diagram

3. 모의 용접실험 결과 및 고찰

Fig. 5, Fig. 6는 ISO-V-시편에 의한 충격시험 결과이다. 결과치들은 시편 3개의 평균값이다. 최고점 온도범위를 고온영역(1300~1350℃), 중간온도 영역(900~1200℃), 저온영역(700~800℃) 세 부분으로

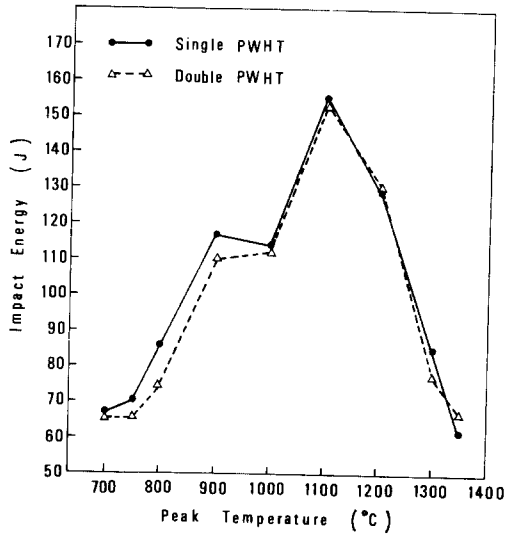


Fig. 5. Influence of peak temperature on charpy-v-value of weld simulated specimens (room temperature)

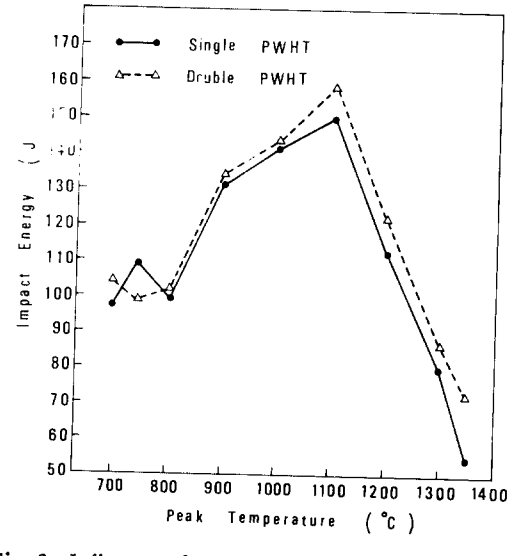


Fig. 6. Influence of a 5% plastic deformation and peak temperature on charpy-v-value of weld simulated specimens (room temperature)

구분할 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 고온영역과 저온영역에서 충격치가 낮으나, 중간온도영역에서는 매우 높은 결과를 보이고 있다. 고온영역에서는 결정립이 과대성장하고, 저온영역에서는 금속조직이 열처리에 의해서 변화하지 않기 때문에 충격치가 낮은 것으로 판단된다. 그러나, 이 정도의 충격치는 고온 고압에서 충분한 것으로 판단된다. 이것은 열처리하지 않은 열 영향부의 충격치보다 2.5배 높기 때문이다.

이 중 후열처리가 본 실험에서는 충격치를 향상시키지 못하고 있음을 보여주고 있다. 이것은 모의 용접 실험이 끝나고 후열처리하기 전의 온도와 재료의 금속조직으로부터 설명되어질 수 있다. 최고점 온도가 1100℃ 이상으로 모의 용접실험된 시험편의 Mf는 50℃ 아래이다. 본 실험에서는 후열처리전에 시험편은 상온에 있었고, 금속조직은 완전한 마르텐사이트 조직이었다. 첫번째 후열처리 후에 얻어진 금속조직은 tempered 마르텐사이트이다. 그러나 두번째 후열처리를 하더라도 금속조직 변화는 거의 일어나지 않기 때문에 충격치를 향상시키지 못하였다.

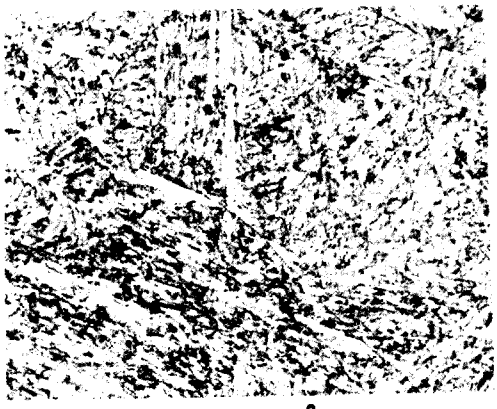
실제 현장에서 마르텐사이트 용접을 할 때는 용접 후에 Mf(50℃)보다 높은 온도를 유지해 주어야 하는데, 이때 금속조직은 마르텐사이트와 잔류 오스테나이트이다. 중간 유지온도(intermediate hold temperature)를 Mf보다 높게하는 이유는 hydrogen cracking과 취성파괴의 위험을 줄이기 위해서이다. 첫번째, 후열처리는 잔류 오스테나이트를 마르텐사이트조직으로 변화시키고, 두번째 후열처리에 의해서 tempered 마르텐사이트로 변화시키기 때문에 이중 후열처리는 실제 현장 용접에서 유용하다.[10]

Fig. 6는 열영향부가 될위치에 5% 소성변형시켜서 얻어낸 충격치이다. Fig. 5와 비교해서 열영향부의 충격치가 떨어지지 않는 것을 확인할 수 있다.

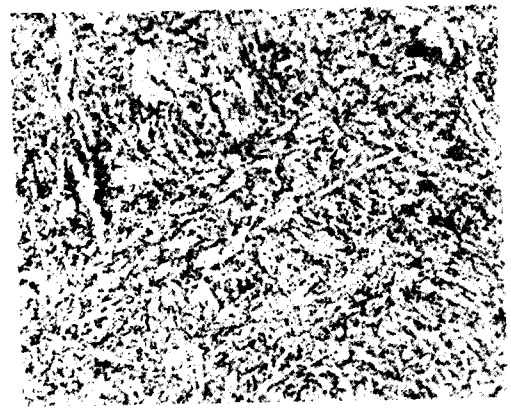
후열처리하기 전의 열영향부 경도는 Hv 350(load 0.5kg, 30 sec) 이었으나 후열처리후 측정한 경도는 Hv 290를 넘지 않았다. 후열처리후 모재의 경도는 Hv 265이었다. 단일 후열처리후나 이중 후열처리 후의 경도는 비슷하였다.

상온에서 연마하고, 5g $cucl_2$ + 45 ml 10% Hcl의 용해액으로 부식시켜 금속조직을 관찰하였다. 또한 파단면을 전자현미경으로 파단 모우드를 고찰하였다.

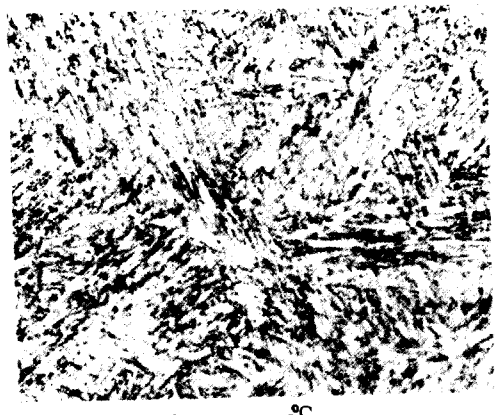
마르텐사이트 용접 조건하에서 모의 용접실험하고 후열처리된 열영향부의 금속조직은 기본적으로 tempered 마르텐사이트인 것을 알 수 있었다. photo. 1은 최고점 온도가 1350℃, 1100℃, 750℃이고 단일



(a) T_p=1350°C



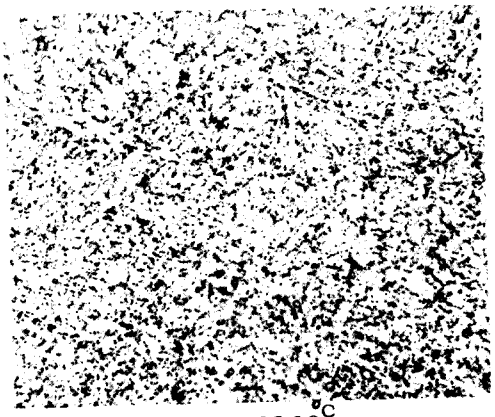
(b) T_p=1100°C



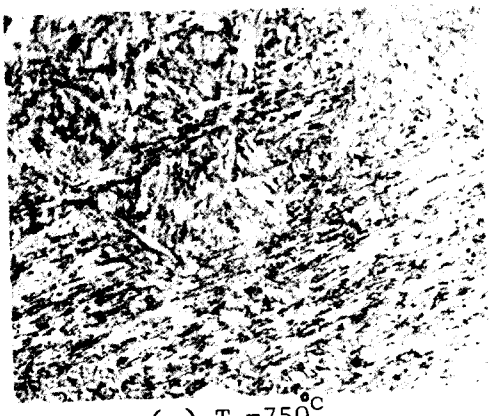
(c) T_p=750°C

Photo 1. Microstructure of weld simulated HAZ of 12% Cr-steel subjected to single PWHT (760°C, 2hr), ×540

(a) T_p=1350°C

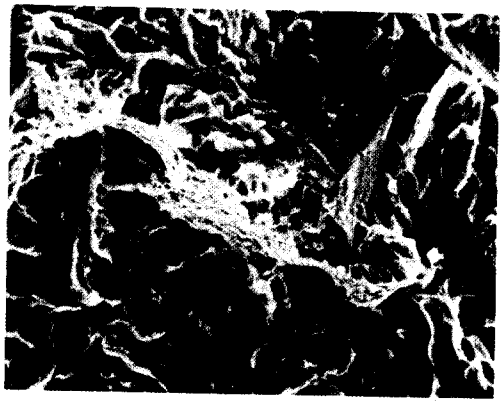


(b) T_p=1100°C

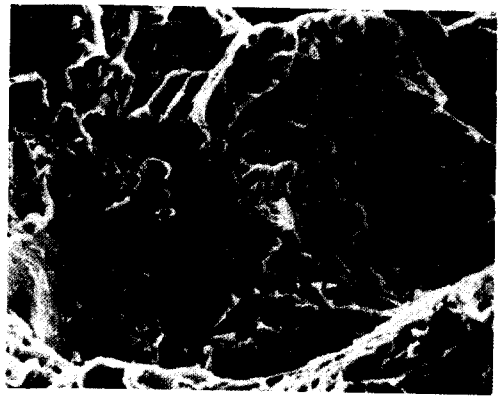


(c) T_p=750°C

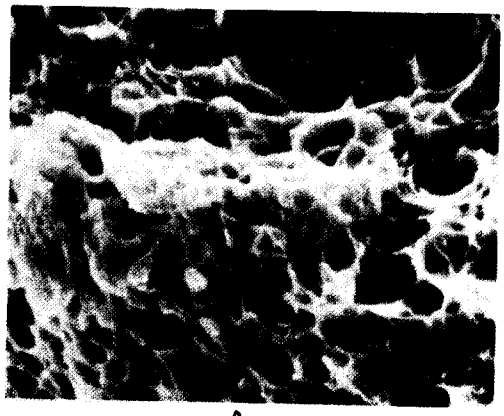
Photo 2. Microstructure of weld simulated HAZ of 12% Cr-steel subjected to double PWHT (760°C, 2hr two cycle), ×540



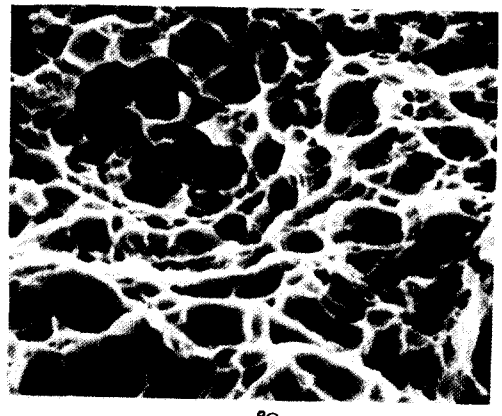
(a) T_p=1350°C, x745



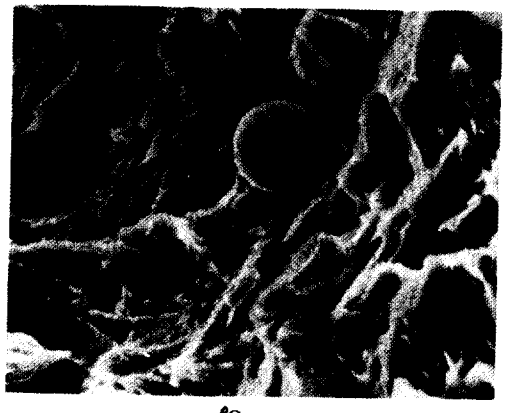
(a) T_p=1350°C, x745



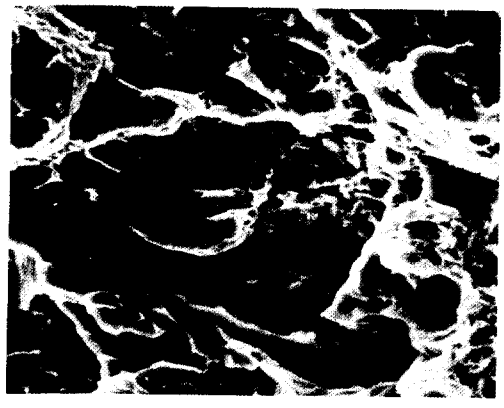
(b) T_p=1100°C, x2840



(b) T_p=1100°C, x2720



(c) T_p=750°C, x1490



(c) T_p=750°C, x1420

Photo. 3. SEM fractographs of weld simulated HAZ subjected to single PWHT (760°C, 2hr)

Photo. 4. SEM fractographs of weld simulated HAZ subjected to double PWHT (760°C, 2hr two cycle)

후열처리한 후의 금속조직이고, photo. 2는 이 중 후열처리한 후의 금속조직이다. 최고접온도가 1350℃일 때의 금속조직사진에서, tempered 마르텐사이트 조직화되기 이전의 오스테나이트 조직의 결정립경계를 관찰할 수 있다. 최고점 온도가 1100℃일 때의 금속조직은 결정립이 미세화되고 탄화물이 균일하게 분포하고 있다. 750℃일 때의 금속조직 변태는 일어나지 않는 것이 금속광학 현미경으로나 실험하는 동안 dilatation curve로부터 확인할 수 있었다.

photo. 3는 단일 후열처리 후 파단면에 대한 전자현미경 사진이고, photo. 4는 이 중 후열처리 후 파단면사진이다. 최고점 온도가 1350℃일 때의 파단모우드는 quasi-cleavage와 dimples이 혼합되어 있는데, 단일 후열처리나 이중 후열처리나 동일하였다. 1100℃일 때의 파단면은 1μm에서 5μm 되는 미세한 dimples로 이루어져있고, 750℃일 때는 quasi-cleavage와 dimples이 혼합되어 있는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

12% Cr강에 대하여 모의 용접실험을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모의용접 실험한 열영향부는 고온고압(600℃, 160 bar)에서 견딜 수 있는 충분한 인성을 갖고 있으며, 후열처리된 열영향부의 금속조직은 tempered martensite이다.
2) 본 실험에서는 이중 후열처리(double PWHT)가 인성을 향상시키지 못하였으나, 실제 현장 용접을 할 때는 중간유지 온도를 Mf보다 높게 유지하여야 하기 때문에 이중 후열처리는 인성을 향상시킬 수 있다.
3) 5% 소성변형되더라도 마르텐사이트 용접을 할 경우 변형 취화로 인해서 인성을 떨어뜨리지 않는다.

참 고 문 헌

1) R. E. Dolby, "Fracture Toughness Comparison of Weld HAZ and Thermally Simulated Microstructures", Metal Construction and British Welding Journal, Sept. 1972, pp. 59-63.
2) B. Watkins, H. G. Vaughan and G. H. Lees, "Embrittlement of Simulated Heat-affected-zones in Low Alloy Steels", British Welding Journal, June 1966, pp. 350-356.
3) C. F. Bilsby and K. J. Barton, "Microstructure of Simulated Heat affected zones in Low Alloy Steels", Metal Construction and British Welding Journal, May 1970, pp. 167-170.
4) R. K. Mannhein and E. D. Zurn, "Materials and Welding in Power Plants-Applications of the Steels 10CrMo 9 10, 14MoV6 3, X20CrMnV 12 1", Schwei β en and Schneiden, Vol. 10, 1985, pp. E162-E165.
5) C. S. Filderstadt, "Martensitic Welding of X20 CrMoV12 1 Steel", Schwei β en and Schneiden, Vol. 8, 1985, pp. E120-E122.
6) D. J. Widgery, "Weld Thermal Simulators: a Review", Metal Construction and British Welding Journal, July 1969, pp. 328-331.
7) T. E. Clifton and M. J. George, "Design and Construction of a Weld Heat-affected zone Simulator", Metal Construction and British Welding Journal, Sept. 1969, pp. 427-431.
8) P. F. Ivens and A. A. van den den Bergh, "Impact Testing of the HAZ", Metal Construction and British Welding Journal, July 1974, pp. 234-236
9) R. A. Muller, D. C. Howden and F. B. Simmons, "HAZ Thermocycle and Structure Simulation", American Welding Journal, Sept. 1973, pp. 411s-416s.
10) Report NR LG 82/65, Research Center of the Belgium Institute of Welding, May 1983.