

탄소강/스테인레스강 이종금속 접합부의 고온 노출에 의한 미세조직과 기계적 특성에 관한 연구

김 동 배, 이 상 율, 이 중 훈*
한국항공대학교 항공재료공학과, 한국기계연구원 내열재료실*

A Study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar metal weld between carbon and stainless steels with thermal exposure

D.B.Kim, S.Y.Lee, J.H.Lee*

Department of Materials Engineering, Hankuk Aviation University,
Koyang, Kyungki-Do, 412-791

*High Temperature Materials Laboratory, Korea Institute of Machinery and Metals,
Changwon, Kyungnam, 641-010

1. 서론

실제 현장에서 사용중 Crack이 발생한 Reactor의 Vessel과 Nozzle의 탄소강/스테인레스강 이종금속 용접조적을 관찰 분석한 결과 경계부위에 발생한 Crack의 원인은 고온에서 장시간 사용되면서 용접부위에서 확산이 일어나 모재 경계부위에 탈탄층 및 침탄층을 형성하는것에 기인하여 발생되는 것으로 추정하였다. 그래서 본 연구에서는 스테인레스강 중에서도 높은 강도와 내식성을 갖고 있는 오스테나이트계 스테인레스강(A182-F321)과 일반구조용강(A387 Gr.12 Cl.2)를 SMA용접으로 이종접합을 실시하여 시편을 제작, 고온에서 장시간 유지시킨 후 공냉시키는 고온노출 Simulation 한 후, 용접 경계부위의 미세조직 및 미소성분분석, 기계적 특성 검사를 통해 고온노출에 의한 물질이동과 그에따른 미세조직의 변화, 그리고 기계적 특성의 변화를 확인하여 고온노출로 인한 이종금속간 용접부의 특성 저하를 알아보하고자 하였다. 나아가서 실제 현장에서 사용되고있는 오스테나이트계 스테인레스강(A182-F321)과 일반구조용강(A387 Gr.12 Cl.2)의 이종접합구조물의 노출 시간과 온도에 따른 미세조직 및 기계적 특성값의 변화를 예상할 수 있는 데이터를 구하고자하였다.

2. 실험방법

용접 및 열처리

본 연구에 사용된 시편은 내식성이 우수한 ASTM A182-F321 오스테나이트계 스테인레스강과 조질 처리된 ASTM A387 Gr.12 Cl.2 구조용 저탄소강이다. 두께 40mm판재를 스테인레스강용 용접봉을 사용하여 피복아크용접으로 X-groove를 주어 맞대기 용접하였다.

용접한 판재는 약 10mm 두께로 절단하여 690℃에서 1시간 유지시켜 공냉시키는 후열처리를 하였다. 이와 같은 시편을 600℃, 650℃, 700℃에서 각각 50, 100, 200, 300시간 유지시킨 후 공냉시키는 열처리로 고온노출 Simulation을 하였다.

미세조직 및 미소성분분석, 경도시험

열처리가 끝난 시편은 용접부위를 적당한 크기로 절단하여 연마와 에칭 후 광학 현미경과 SEM을 이용하여 미세조직 관찰 및 미소성분분석을 하였다. 미소성분분석은 경계부위로부터 약 10~20 μ m 떨어진 스테인레스 용착부로 부터 경계 band에 수직방향으로 탄소강 모재까지 10 μ m 간격으로 정량분석 하였다.

용접 경계부에 형성되는 band부는 기계연마, Dimple grinding, Jet polishing의 시편준비 과정을 거쳐 시편을 제작하여 TEM으로 상분석을 하였다.

용접부위의 경도는 비커스 경도계를 이용하여 하중 2N으로 경계부를 중심으로 탄소강 모재와 스테인레스 용착부에 걸쳐 300 μ m 간격으로 측정하였다.

기계적 시험

경계부위가 중앙에 위치하도록 가공하여 인장 및 creep 시험용 시편을 제작하였다. 고온 인장시험은 400°C에서 실시하였으며, INSTRON 만능 인장 시험기를 사용하여 인장강도, 항복강도, 연신률을 측정하였다. 기계적 시험으로 파괴된 시편들은 SEM과 광학현미경을 이용하여 파면 및 단면을 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

용접 계면부위의 조직특성 및 경도시험

실제 현장의 Crack이 발생한 시편의 Macro조직을 관찰한 결과 Photo 1에서 보는 바와 같이 모재부위 내면에는 모두 Stainless steel로 clad 되어있고, Crack은 모재와 Weld Metal 경계부위에서 발생되어 진행되고 있음을 확인할 수 있다. Photo 2에서는 Crack 주위의 미세조직과 용접, 제작한 시편의 미세조직을 관찰하였다. 두 시편 모두 용접부의 미세조직은 δ -Ferrite를 함유하고 있는 전형적인 용접 조직을 보이고 있다. Photo 2에서 보는 바와 같이 Crack은 모재와 용접부의 경계부위를 따라 진행되고 있으며, 엄밀하게 말하면 경계부위에서도 주로 모재 Side에서 발생되어 진행되고 있다.

용접 직후의 시편에는 모재와 용접부의 계면부위에 Black band가 없으나 후열처리만 실시한 시편에는 Black band가 형성되었고, 고온 노출 결과 band를 중심으로 모재부에는 탈탄층이, 그리고 용착부에는 δ -Ferrite의 소멸층이 형성되었다. 또한 그 폭은 노출 온도와 시간의 증가에 따라 증가하는 양상을 나타내고 있다. TEM으로 Black band의 상분석 결과 내부에 $M_{23}C_6$ 탄화물이 석출되어있는 Bainite로 확인되었다. 모재와 용접부에 걸쳐 EPMA 선분석을 통한 Cr, Ni, Mn, Si등의 농도분포와 경도분포 결과를 종합해 볼 때 이중금속의 피복용접부에 대한 후열처리 및 고온노출시 상대적으로 용착부보다 탄소함량이 많은 Ferrite계 모재측에서는 탈탄지역이 형성되고, Austenitic계 용접부측에는 침탄지역이 형성되었다는 것을 알 수 있다. 또한 용접계면부위의 경도값의 급격한 증가는 Cr 등의 원소들이 탄소와 결합하여 탄화물을 석출함에 기인한다. 그 이유는 고온 노출시킬 경우 Ferrite강 내의 탄소 확산 속도가 Austenite강 내의 탄소 확산 속도보다 훨씬 빠르기 때문에 모재에서 이동해온 탄소가 모재와 용접부의 계면부위에 집적하게 되며 용접부측에 다량으로 존재하는 Cr 등의 탄화물 형성 원소가 확산되어 탄소와 결합하여 탄화물의 석출이 충분히 가능한 조건을 마련해 주기 때문이다. 용접후의 시편은 열영향부가 경도가 약 330Hv 이고 경계부위는 230Hv 정도의 값을 나타내다가 후열처리 및 고온노출시 노출 온도와 시간의 증가에 따라 모재의 열영향부는 경도값이 작아져 모재의 경도와 거의 같아지는 반면 경계부의 band부는 탄화물의 석출의 많아지면서 경도값이 400Hv 이상까지 증가하였다.

Cr, Ni, Mn, Si의 확산에 따른 농도분포 해석

용접계면으로 부터 약 10 μ m 떨어진 곳으로부터 모재부쪽으로 10 μ m 간격으로 EPMA 분석에 의한 성분 원소들의 정량분석 결과 용착부는 Cr 20~25w%, Ni 10~12w%로 용접부의 성분 조성은 거의 동일하였다. band로부터 탄소강 쪽으로 이동할수록 Cr, Ni의 농도가 감소하였다. 이때 용접후의 시편이 약 40 μ m 정도까지 Cr, Ni이 존재하고 있는데, 700°C에서 300시간 고온노출 시킨 경우 Cr이나 Ni이 약 70 μ m정도까지 확산되었음을 확인할 수 있었다. 고온노출 온도와 시간이 증가함에 따라 Mn이나 Si는 모재와 용착부 사이에 농도구배가 미세하여 분석 범위에 걸쳐 거의 일정한 농도 분포를 나타내는 반면 농도구배가 심한 Cr, Ni는 모재로 확산이 일어난다. 특히, Cr은 경계부에서, 모재로 부터 이동해온 탄소와 결합하여 탄화물을 형성하기 때문에 더 많은 양의 이동이 일어날 것이다.

침탄층 및 탈탄층 깊이의 해석

침탄층 및 탈탄층의 깊이 측정 결과를 이용하여 실제 현장에서 사용시간에 따른 탄소이동으로 인하여 형성되는 탈탄 및 침탄층 깊이를 예측할 수 있는 식을 도출할 수 있다.

탈탄층의 깊이는 $X = a\sqrt{(D_c^a \cdot t)}$, 침탄층의 깊이는 $X_1 = b\sqrt{(D_c^b \cdot t)}$ 로 얻어지며 실험을 통해 구한 깊이 측정치를 이용하여 상수 a, b를 구하면 탈탄층의 깊이 $X = 0.099\sqrt{(D_c^a \cdot t)}$, 침탄층의 깊이 $X_1 = 0.094\sqrt{(D_c^b \cdot t)}$ 가 된다.

기계적 특성

상온인장시험 결과 700℃에서 300시간 노출시킨 경우만 제외하고는 모두 A387-F321 모재 부위에서 파괴가 일어났다. 그리고 고온노출 시간 및 온도가 증가할수록 인장강도 및 항복강도가 작아지는 것을 확인할 수 있다. 이는 고온노출로 인해 경계부위 모재측에 탈탄층이 커지면서 그 부위에서 강도의 저하를 가져오기 때문으로 사료된다. 반면 고온인장 시험의 경우에는 모두 스테인레스 용착부에서 파괴되었다. 그 이유는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 온도가 증가함에 따라 탄소강의 강도저하에 비해 스테인레스강이 더 큰 비율로 감소하기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 고온노출에 따른 상온인장시험결과와는 달리 인장 및 항복강도의 변화는 불규칙적이었다. 문헌상에 나타난 본래 재료의 강도값들 보다 실제 고온노출시킨 시편의 강도값들이 낮게 나오는 것 또한 고온 노출에 기인한 것으로 사료된다.

4. 결론

실제 Reactor와 Vessel 용접부의 Crack 발생 시편과 용접 가공하여 제작한 Simulation용 시편의 고온노출에 대한 실험적 고찰과 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실제 현장에서 사용된 이종금속 용접구조물에 발생하는 Crack은 경계부위를 따라 모재측면의 탈탄부위에서 발생 전파되며, 이는 고온에서의 장시간 노출로 인한 강도의 저하에 따른 것이다.
- 2) 고온 노출에 의하여 탄소 및 성분원소들은 각각의 확산도로 이동이 일어나고, 이로 인해 경계부를 중심으로 모재측에는 탈탄층이, 용접부측에는 탄화물을 포함한 침탄층이 형성되며, 침탄 지역의 급격한 경도값의 증가는 바로 Cr 등의 원소와 탄소가 결합하여 생긴 탄화물에 의한 것이다.
- 3) 탄소 농도 분포식을 이용하여 구한 본 이종금속간 용접부의 고온 노출에 따른 탈탄층의 깊이는 $X=0.099\sqrt{(D_c^a \cdot t)}$, 침탄층의 깊이는 $X_1=0.094\sqrt{(D_c^r \cdot t)}$ 이다.
- 4) 이종금속간 용접부가 고온노출 될 경우 본래의 기계적 특성보다 더 낮은 값들을 갖게 되며 그 정도는 노출온도나 시간이 증가할수록 더 크게된다.

5. 참고문헌

1. "Steel and its heat treatment," K.E.Thelning, Butter worths publishing. 2nd Ed., (1984)
2. "Study of the Martensite Structure at the Weld Interface and the Fracture Toughness of Dissimilar Metal Joints," Wang,Z, Xu.B, Ye. C, Welding Journal 72, (8) (1993) Pp. 397~402
3. "Analysis of Carbon Migration With Post-Weld Heat Treatment in Dissimilar Metal Weld," Kim,B.-C. An,H.-S. Song,J.-T., International Trends in Welding Science and Technology, 1-5 June 1992 Pp. 307~313
4. "Dissimilar Metal Weld and Boiler Creep Damage Evaluation for Plant Life Extension," R.Viswanathan, Journal Pressure Vessel Technol. 107, (3) (1985) Pp. 218~225
5. "Study of Failure at Elevated Temperature of Dissimilar Metal Weld Joint-Austenitic Stainless to Ferrite Low Alloy Steel," H.L.Tsai W.R.Hornig, Met. Ind., 21, (2) (1987) Pp. 3~12
6. "An Evaluation of Austenitic Fe-Mn-Ni Weld Metal for Dissimilar Metal Welding," J.A.Self. D,K.Matlock. D,L.Olson., Welding Journal 63, (9) 1984 Pp. 282~288
7. "Creep Deformation and Local Strain Distribution in Dissimilar Metal Welds Between AISI Type 316 and 2.25Cr-1Mo Steels Made With 17Cr-*Ni-2Mo Weld Metal," I,J.Chilton. A,T.Price. B,Wilshire., Met. Technol. 11, (9) 1984 Pp. 383~391
8. "이종금속 피복용접부의 후열처리에 따른 탄소이동 해석," 김병철, 안희성, 김선진, 송진태, 한국재료학회지, 1, (1) (1991) Pp. 29~36
9. "Study on the disbonding of Stainless Steel Overlay Welded Metal," Y,H.Lee. E,P.Yoon. Journal of the KWS 1, (1) 1983

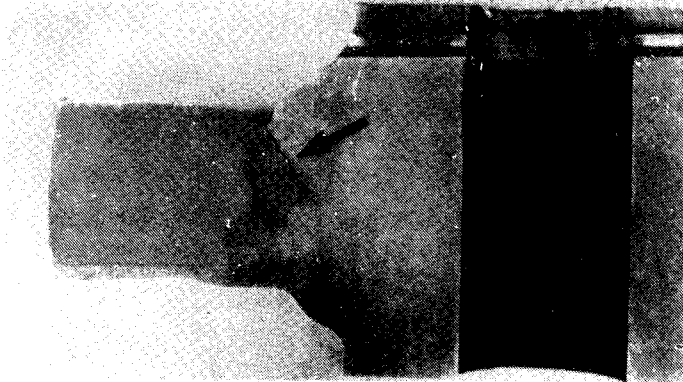


Photo 1. Micrograph of Welded Zone of Reactor

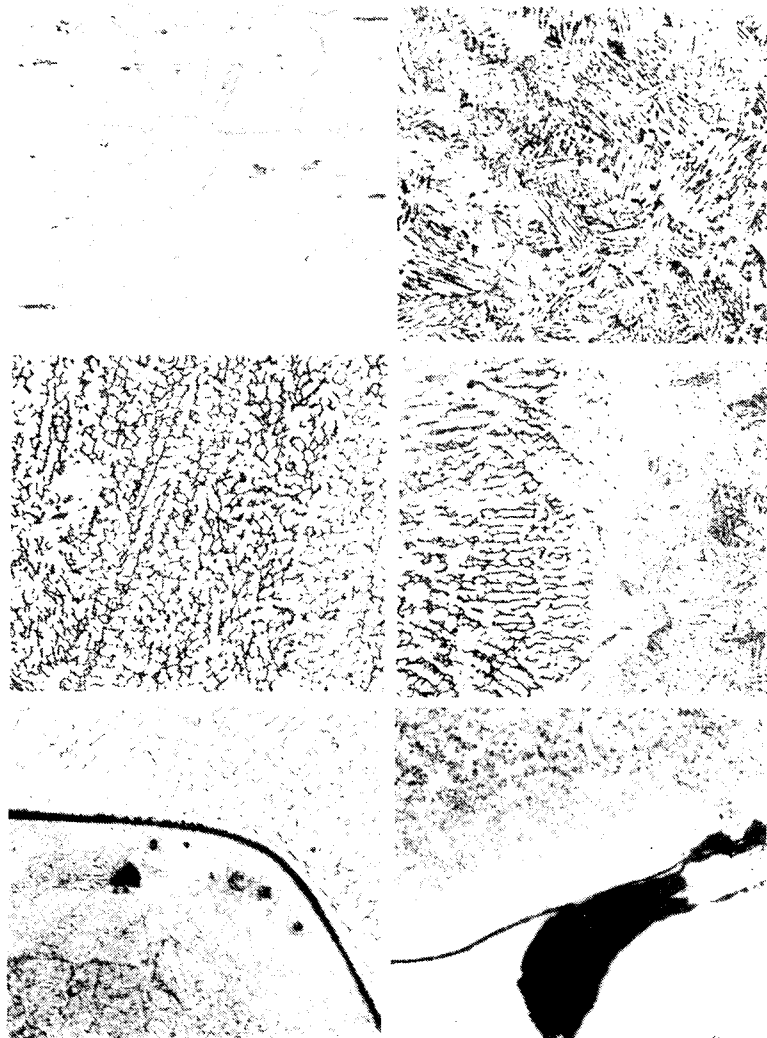


Photo 2. Microstructures of Welded Zone