10%Cr 마르텐사이트계 내열주강 모재 및 용접부 기계적 특성에 미치는 열처리 조건의 영향

Effect of heat treatment conditions on base and weld joint properties for 10%Cr martensitic casting steel.

이경운*, 지병하*, 권희경*, 방국수**
*두산중공업㈜ 기술연구원
** 부경대학교

1. 서 론

최근 화력발전 플랜트의 고능률화 목적으로 증기 조건의 고온, 고압화에 따른 새로운 재료 개발이 지속적으로 이루어 지고 있는데, 화력발전소 보일러와 터빈의 고온, 고압부에는 과거 수십년 동안 2.25Cr-1Mo계(ASTM T/P22, DIN 10CrMo9.10), 혹은 12Cr-1Mo계(DIN X20CrMo12.1, EM12 등) 구조용 내열강이 사용되어 왔다. 1980년대 후반부터는 기존 재료를 대체하여 Mod.9Cr-1Mo강 (ASTM T/P91, DIN X10CrMoVNb9.1)이 파이프, 튜브, 플레이트, 주강품 등의 광범위한 분야에 적용되기 시작하였다.

본 연구에 적용된 10%Cr 마르텐사이트계 터빈 케이싱 재료는 G.E. Spec.에 따라 제작되어진 주강품으로서 이 재료의 크리프 파단강도, 피로강도 등에 대한 모재 분야 연구는 광범위하게 진행되었지만, 보일러나 터빈 제작에 필수적인 용접부에 대한 체계적 연구는 아직 미흡한 실정이다.

제작 공정을 살펴보면 고온 어닐링 →노말라이징 →2단 템퍼링 등의 열처리 공정을 거치며, 이때 각각의 열처리 단계에서 주조 결함이 확인 될 경우 보수 용접을 수행하게 된다. 즉 터빈 케이싱은 복잡한 주형내의 응고과정을 통하여 제작되어지기 때문에 주조품 제작 도중 혹은 제품 제작 완료 후 기공, 균열, 내부수축 등의 주조결함이 발생하게 되고 이러한 주조결함 제거를 위해 보수용접을 수행한다.

주조 직후 어닐링 상태에서는 높은 경도를 가지기 때문에 보수용접이 힘든 것으로 알려져 있는데 본 연구에서는 보수용접전 모재의 열처리 상태를 어닐링(A재) 및 노말라이징+2단 템퍼링(NTT재)한 2가지로 달리한 경우 모재 자체의 용접균열 감수성(저온균열, 고온균열) 시험을 통하여 용접부 제특성을 평가하였으며, 또한 2가지 열처리 조건에 대한 보수용접을 수행하여 용접후 열처리 조건에 따른 용접부 기계적성질 및 미세조직 등을 분석하였다.

2. 실험방법

Table 1및 2는 본 연구에 사용된 10%Cr 마르텐사이트계 터빈 케이싱 재료의 화학성분 및 모재 특성을 나타내고 있는데, 실제 어닐링(A재) 및 노말라이징+2단 템퍼링(NTT재)의 물성치는 상당한 차이를 나타내고 있는데, A재의 경우 Hv 420 정도의 높은 경도값을 가지는 것에 비해서 NTT재의 경우는 250Hv 정도의 낮은 경도값을 가지는 것으로 확인되었다.

저온균열 감수성 시험은 JIS Z 3158에 따라 y형 용접균열시험(y-groove weld cracking test)을 수행하였다. 구속 용접 수행 후 시험용접은 AWS E9015-B9에 상당하는 용접봉을 사용하였으며, 용접조건은 전류 170A, 전압 25V, 용접속도 15cm/min로 하였다.

예열온도는 상온에서부터 최대 250℃까지로 하였으며, 용접 후 대기중 48시간 방치 후 시험 용접부를 5단면으로 절단하여 단면균열율을 측정하였으며, 파단면을 SEM으로 관찰하였다.

고온균열 감수성 시험은 varestraint시험 방법을 적용하였는데, Bending block의 곡률반경에 따라 0.2%에서 최대 3.8%까지의 부가변형을 주었으며, GTAW용접방법을 이용하여 전류 130A,전압 17V, 용접속도 18cm/min의 용접조건을 적용 하였다.

본 시험에서는 비드 길이 방향과 응력 부가 방향이 평행한 longitudinal 시험 및 응력 부가 방향이 수직인 Transverse시험의 2가지 시험을 모두 수행하여 총 균열길이 및 최대 균열길이를 측정하였다.

용접금속 특성 평가용 시험편은 모재 상태를 어닐링(A재) 및 노말라이징+2단 템퍼링(NTT재) 한 2가지로 달리한 40(T) x 200(W) x 300(L)의 Bevel Joint 시험편을 사용하였다.

Table 3.은 본 실험에 적용된 용접조건을 나타내고 있는데, 전류 180A, 전압 26V, 용접속도 16cm/min의 조건으로 5 시험편에 대해 동일한 용접조건이 준수되도록 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 저온균열 감수성

Fig.1은 저온 균열 감수성 시험 결과를 나타내고 있다. 두 강종 모두 예열을 하지 않은 경우와 50℃ 예열한 시험편은 100% 균열 발생율을 나타내고 있으나 75℃ 이상의 예열온도에서는 균열이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 균열은 모두 용접 Root부에서 발생하여 용접금속을 관통하는 경향을 나타내고 있다.

본 실험에서는 모재의 열처리 이력에 따른 저온균열 감수성은 큰 차이를 나타내고 있지 않으며, 한계 예열 온도는 75℃로서 통상의 고 Cr계 합금강에서 추천되어지는 200℃ 예열온도보다 낮은 것으로 나타났는데 이것은 본 실험에 적용된 시험편의 두께가 20mm로 상대적으로 얇았기 때문인 것으로 판단 되어진다. 또한 저온 균열의 발생 위치가 통상 용접열영향부(HAZ,Heat Affected Zone)인 것으로 알려져 있는데 본 시험에서는 모두 용착금속에서 균열이 발생되어 전파되는 것으로 나타났는데 이와 같은 원인은 용착금속이 약 450Hv정도의 높은 경도값을 가지기 때문으로 사료된다.

3.2 고온균열 감수성

용접금속 응고균열은 균열 전파 방향이 비드 방향과 동일한 종균열(Longitudinal crack) 및 비드 방향과 수직인 횡균열(Transverse crack)로 대별되어지는데 본 실험에서도 2가지 조건의 감수성 시험을 모두 수행하였다.

Fig.2는 고온 균열 감수성 시험 결과를 나타내고 있다.

Longitudinal varestraint시험 결과 부가 변형량 증가에 따른 총 균열길이 변화를 살펴보면 본 실험에 적용되어진 최저 변형인 0.2%에서도 A재 및 NTT재 모두 균열이 발생하였으며, 변형의 증가와 비례하여 균열길이도 증가하여 1.9%에서 NTT재 약 8mm, A재는 약 8.5mm를 나타내고 있다. 최대 변형량 3.8%에서는 NTT재 약 12.4mm, A재는 약 12.3mm로 모재 상태별 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 부가 변형량 증가에 따른 최대 균열길이 변화를 살펴보면 두 강종 모두 최저 변형인 0.2%에서 A재 약 0.6mm및 NTT재 약 0.5mm를 나타낸 후 부가 변형량이 증가하여도 균열 길이는 거의 증가하지 않고 포화되는 경향을 나타내고 있다. 따라서 두 강종 모두 변형의 증가에 따른 균열 길이의 변화는 없이 거의 일정한 값을 가지지만, 균열 개수의 증가가 크다는 것을 알 수 있다.

Transverse varestraint시험 결과는 Longitudinal varestraint시험 결과와 거의 유사한 경향성을 나타내고 있는데, 부가 변형량 증가에 따른 총 균열길이 변화를 보면 최저 변형인 0.2%에서 NTT재 약 2.7mm, A재는 약 8.5mm를 나타내고 있으며 최대 변형량 3.8%에서는 NTT재 약 7.3mm, A재는 약 8.3mm로 모재 상태별 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 최대 균열길이 변화를 살펴보면 두 강종 모두 최저 변형인 0.2%에서 NTT재 약 0.3mm및 A재 약 0.4mm를 나타낸 후 거의 일정한 값을 가지는 것으로 나타났다.

이상의 실험 결과로부터 총 균열길이, 최대 균열길이 및 한계 변형에서 두 강종의 뚜렷한 차이를 발견할 수 없으며 따라서 열처리 상태에 따른 응고균열 감수성은 큰 차이가 발생하지 않는 것으로 확인되었다.

3.3 용접금속 특성 평가

3.3.1 용접부 경도 특성

Fig 3은 Cross Weld에 대한 경도 측정결과를 나타내고 있다. 용접부 경도는 하중 1kg하에서 Vickers 경도 시험기로 측정하였다.

용접후열처리를 수행하지 않은 As weld 상태의 용접시험편(AT)에서 용착금속 최대 Peak 경도 451Hv, 용접열영향부 최대 Peak 경도 508Hv로서 통상 본 강종의 Grade에서 통상 허용되는 최대 Peak 경도는 약 350Hv로서 As weld 상태에서는 기준 경도값과 비교시 최대 30% 이상 높은 값을 가지고 있다.

용접후열처리를 수행함에 따라 용착금속 및 용접열영향부(HAZ)의 경도는 약 40%이상 떨어지는 것으로 나타났으며 700℃,730℃,760℃x 4hrs의 단일 열처리에 비해 NTT의 3단 열처리를 수행

한 시험편이 용착금속 및 용접열영향부(HAZ) 모두 경도값이 다소 낮은 것으로 나타났다.

73N,76N 및 NTT 시험편의 경우 용착금속 및 용접열영향부 최대 Peak 경도가 300Hv를 넘지 않는 반면 70N시험편의 경우 용착금속 최대 Peak 경도 302Hv, 용접열영향부 최대 Peak 경도 318Hv로서 다소 높은 경도값을 유지하고 있는 것으로 나타났다.

3.3.2 용접부 인장 특성

Cross Weld부 인장시험 파단 부위는 모두 모재에 위치한다.

용접후열처리 온도가 700℃에서 760℃로 증가함에 따라 인장강도는 감소하는 경향을 나타내고 있으며, 760℃ x 4hrs 의 경우 NTT 3단 열처리와 거의 유사한 71kg/mm²의 인장강도값을 나타내고 있다. 인장강도는 71~80kg/mm²으로 용접조건에 관계없이 모재 최소인장강도 요구치인 63kg/mm²을 모두 만족하고 있다.

3.3.3 용접부 충격 특성

본 시험에 적용된 재료의 용접부 충격에너지 기준은 ASME와 같은 Code에 규정되어 있지는 않지만 용접부 건전성을 판단하는 중요한 기준이 된다.

Fig.4는 Base metal, HAZ, Weld metal에서 측정된 샤-피 충격에너지를 보인다.

용접금속의 충격에너지는 As weld상태에서는 평균 약 4.5J/cm²로 매우 낮은 충격에너지 값을 가지며, 용접후열처리 700℃x4rs후에도 평균 16.7J/cm²의 충격에너지 값으로 개선 효과는 크지 않은 것을 알 수 있다. 용접후열처리 온도가 700℃에서 760℃로 Tempering Parameter가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내고 있는데 62~93J/cm²의 비교적 높은 값을 나타내고 있다.

용접열영향부의 경우 As weld상태에서도 평균 약 87J/cm²로서 높은 충격 에너지값을 가지고 있으며 용접후열처리 760℃x4rs 후에는 156J/cm² 로 가장 높은 충격 에너지값을 나타내고 있다.

모재도 용접열영향부와 동일한 경향을 나타내고 있는데 As weld 시험편의 경우도 평균 약 91J/cm²로 양호한 충격 인성값을 가지고 있으며 760℃x4hrs 용접후열처리 조건에서는 약 120J/cm²로 가장 높은 충격 인성값을 가지고 있다.

3.3.4 용접부 굽힘 특성

As weld 시험편의 경우 모두 용착금속에서 파단이 발생하였으며, 730℃x4hrs 용접후열처리에서 허용범위를 초과하는 균열이 발생하였다. 따라서 굽힘 연성 및 충격인성값을 고려해 볼 때 최적 용접후열처리 조건은 730℃x4hrs 이상이 되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

화력발전 터빈 케이싱 소재 10%Cr 마르텐사이트계 재료에 대한 최적 용접공정 확립을 위한 용접시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모재 열처리 조건별 저온 균열 민감도는 큰 차이가 없으며, 한계 예열온도는 75℃이다.
2) 모재 열처리 조건별 고온 균열 민감도는 큰 차이가 없으며, HAZ 액화균열은 확인되지 않았다.
3) Annealing 및 NTT상태에서의 용접 작업성과 용접 물성치의 뚜렷한 차이를 확인할 수 없었다. 용접 이음부 건전성 확보를 위해서는 용접후열처리는 730℃x4hrs 이상이 되어야 한다.

참고문헌

1. Kiyokata Nakamura, Masayuki Yamada, Eiji Yamada : Manufacturing and Evaluation of 12Cr Heat Resistance Steel for Advanced Steam Turbines, 火力原子力發展, Vol.39 No.9(1988)
2. Kazunari Takebayashi, Yasunori Tashiro, Akitsugu Fujita : Development of Heat Resisting High Chromium Cast Steel for Ultra Super Critical Turbine Plant, 鐵과鋼, 제7호(1990)
3. A.Strang, J.Cawley & G.W. Greenwood : Microstructural Stability of Creep Resistant Alloys for High Temperature Plant Applications, The Institute of Materials, IOM Communications Ltd, 1998
4. T.Kern, M.Staubli : High Temperature Cast Components for Advanced Steam Power Plant, Materials for Advanced Power Engineering 1998
5. Istvan Artinger : Effect of Welding and Ageing on Properties of New 9~12% Steels, Materials for Advanced Power Engineering 1998

Table 1. Chemical composition of 10%Cr casting steel.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb	N
0.10/ 0.16	0.20/ 0.60	0.30/ 1.00	Max 0.02	Max 0.01	0.30/ 0.70	8.50/ 11.0	0.80/ 1.10	0.17/ 0.25	0.05/ 0.10	0.03 0.06

Table 2. The material properties of 10%Cr casting steel.

Heat treatment [1]	Mechanical Properties			
	TS (MPa)	YS (MPa)	EL (%)	HRB
A : 1050°C x 10hrs, FC N : 1080°C x 10hrs, AC T : 720°C x 10hrs, FC	621	500	15	277

1) N : Normalizing, T: Tempering, AC : Air cooling , FC : Furnace cooling

Table 3. Welding sequence of 10%Cr casting steel.

Welding sequence	I.D.
Annealing+NTT+Welding+PWHT(700℃x 4rs)	70N
Annealing+NTT+Welding+PWHT(730℃x 4rs)	73N
Annealing+NTT+Welding+PWHT(760℃x 4rs)	76N
Annealing+Welding+NTT	NTT
Annealing+NTT+Welding	AT

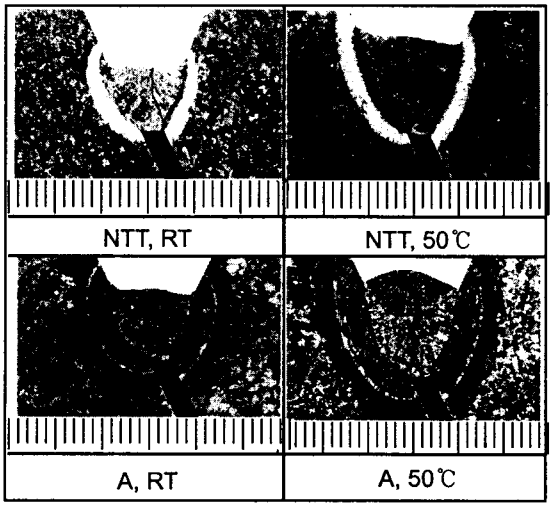

Fig.1 Crack appearance in y-groove weld cracking test

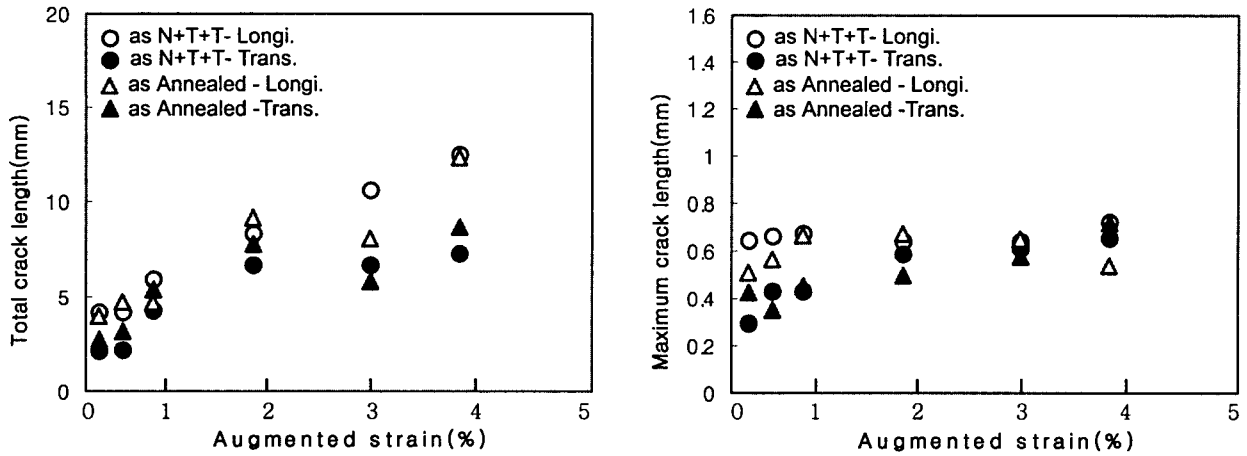

Fig 2. Comparison of Total crack length & Maximum crack length in Varestraint test

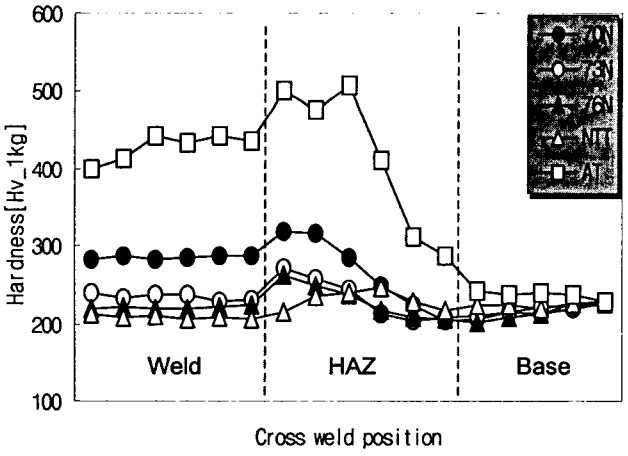

Fig 3. Hardness Profile with PWHT in welded joints.

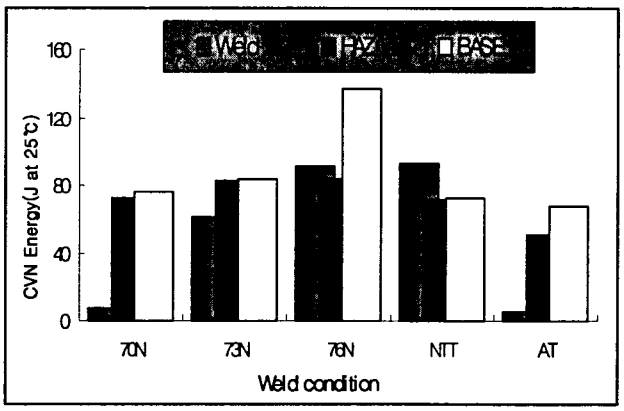

Fig 4. Variation of Charpy impact energy with PWHT in welded joints.