원자력 압력용기용강 SA508Gr.3의 기계적 특성과 템퍼 파라메타에 관한 연구

김병옥^{*†} · 이오연^{**}

^{*}(주)세아베스틸, ^{**}전북대학교 금속공학과

The Study of Nuclear Reactor Pressure Vessel Steel SA508Gr.3 Mechanical Properties and Temper-Parameter

Byoung-Ok Kim^{*†}, Oh-Yeon Lee^{**}

^{*}SeAh Besteel, Gunsan, 573-711, Chon-buk, Korea

^{**}Metallurgy System engineering, Chon-buk National University, Jeonju, 561-756, Korea

Abstract The large forgings used in chemical plants or nuclear power plants are produced by complex heat treatment. because of thickness up to 200~300 mm and weight up to 200~300 ton, setting proper heat treatment cycle is so difficult. In addition, defects of products make companies wasting large money and valuable time. In this study, to reduce try & err, when setting heat treatment of reactor pressure vessel steel SA508Gr.3, carrying out the basic mechanical property test of SA508 Gr.3 and testing hardness of SA508Gr.3 in various tempering temperature. and calculating temper curve with Hollomon-Jaffe parameter.

(Received April 5, 2012; Revised April 16, 2012; Accepted May 13, 2012)

Key words: SA508Gr.3, Hollomon-Jaffe parameter, PWHT

1. 서 론

대형 단강품은 단조 후 Normalizing, Quenching, Tempering, 용접 후 열처리(Post Weld Heat Treatment) 등의 다양한 열처리 공정을 거쳐 제작되고 제품의 크기와 열처리 두께로 인해 상당히 긴 제작 기간이 필요하다.

화공 플랜트 설비나 원자력 발전 설비에 사용되는 Shell, Disk, Head Dome과 같은 대형 단강품은 열처리시 유지시간 설정 기준이 되는 제품 두께가 200 mm 이상 이고 무게가 최대 250~300 ton에 달하기 때문에 적절한 열처리 사이클을 설정하지 못하면 많은 비용과 시간이 소요된다. 또한 일반 규격품 보다는 새로운 열처리 형상, 다양한 중량을 가지고 있으며 사용자 마다 조금씩 다른 물성시편 위치와 물성 Specification을 요구하기 때문에 품질 열처리 많은 시행착오가 수반된다.

따라서 대형 단조품 제작회사에서는 생산하는 단강

품의 열처리시 냉각속도에 따른 기초물성 자료를 미리 확보하는 것이 매우 중요하다.

근래에는 강종 물성을 예측하기 위해서 Jominy Test와 여러 가지 물성예측 프로그램이 사용되기도 하지만 B, Nb, Ti 등의 성분이 첨가된 강의 경우 예측값이 부정확하거나 계산 자체가 불가능한 경우도 많다. 또한 열처리 두께가 200 mm 이상, 환봉의 경우, Φ 1,000 이상의 제품은 질량 효과 때문에 정확한 물성값을 예측하기 어렵다.

이런 문제점을 해결하기 위해 각 강종의 냉각 속도에 따른 Quenching 물성과 Tempering 물성 또는 T.P(Temper Parameter)를 미리 데이터베이스화해 놓으면 강종 성분 설계와 열처리 사이클 설정시 많은 시행착오를 줄일 수 있다.

강의 물성에 영향을 주는 인자로는 Carbon 함량과 냉각속도, 합금원소의 고용 또는 석출강화, 소성변형에 따른 결정립 미세화, 재결정 등이 있고 Tempering 시에 합금원소의 편석, 탄화물의 확산이

[†]Corresponding author. E-mail : kbo100@Seahbesteel.co.kr

영향을 준다[1].

탄화물은 주로 500~600°C에서 생성되는데 이 온도 구간에서 장시간 Tempering시 탄화물의 성장과 Cementite의 확산이 일어나면서 강재의 물성에 많은 영향을 미친다. Tempering시 온도와 유지시간을 조합하여 강재의 물성값의 변화를 나타낸 관계식인 Hollomon-Jaffe Parameter를 이용하면 강재의 경도값을 예측할 수 있다. 강재의 Tempering 정도(H)는 식 (1)와 같이 Tempering 온도 T와 유지시간과 t의 함수로 표현될 수 있다.

$$H = F(T, t) \quad (1)$$

$$H = f(TP)$$

여기서 TP는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$TP = T \times (C + \log t) \quad (2)$$

T: Temperature, t: holding time

경도(H)는 T와 t의 값이 변해도 $T \times (C + \log t)$ 의 값이 일정하다면 같은 Tempering 정도를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 PT와 경도의 관계를 미리 실험에 의해 데이터베이스화 해두면 임의의 T 값과 t 값을 조합하여 강재의 예상 경도값을 계산해낼 수 있다.

상수 C는 Hollomon-Jaffe 상수로 일반적으로 강재의 화학성분에 의해 결정되지만 각각의 온도에서 Tempering을 실시하고 같은 경도값을 갖는 임의의 T 값과 t 값을 식 (3)에 대입하여 구할 수 있다[2, 3].

$$C = \frac{T_1 \log t_1 - T_2 \log t_2}{T_1 - T_2} \quad (3)$$

이 연구에서 원자력 발전 설비의 압력용기강 SA508 Gr.3의 기본적인 열처리 물성과 TP (Temper Parameter)를 구하여 열처리 사이클 설정에 필요한 기초 데이터베이스로 활용하고자 실험을 진행하였다.

2. 실험 방법

시편은 진공 용해한 30 kg 잉곳을 절단한 후 1200°C로 가열하여 $\Phi 32 \times 700$ mm로 단조한 다음 920°C에서 Normalizing 열처리를 실시하여 시편을 준비 하였다. 잉곳의 화학성분은 ASME 규격에 만족하도록 용해를 하였고 충격인성에 가장 큰 영향을 주는 원소로 알려진 P의 경우 실제 제강공정에서 제어 가능한 최소 수준인 0.010 wt% 이하로 규제하였다. Tabel 1에는 실험에 사용한 SA508Gr.3 잉곳의 화학 성분이 나와있다.

열처리 물성을 확인하기 위해 시편을 890°C로 가열하여 Quenching하고 660°C~720°C 온도구간에서 Tempering을 실시한 후 Tempering 온도에 따른 인장강도값을 측정하고, PWHT 전후의 충격인성값의 변화를 측정하기 위해 660°C에서 Tempering만 실시한 시편과 Tempering 후 PWHT를 실시한 시편을 구분하여 충격인성 실험을 진행 하였다.

TP를 구하기 위한 시편은 Normalizing 처리한 시편을 $\Phi 32 \times 40$ mm 절단 후 890°C에서 Quenching 한 후 500°C, 550°C, 600°C, 650°C, 700°C에서 유지시간을 1~80 hr까지 다르게 하여 Tempering을 실시하고, 시편을 절단하여 중심부 경도를 측정하여 시간과 온도에 따른 경도 변화를 관찰 하였다.

Table 2에는 기초물성 시험을 위해 실시한 열처리 사이클과 TP를 구하기 위해 실시한 열처리 사이클이 나와 있다.

각각의 실험 후 시편을 Nital 용액으로 부식시켜 광학현미경과 S.E.M으로 조직을 관찰 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

SA508 Gr.3의 Carbon함량은 강도 확보와 동시에 충격인성, 용접특성을 위해서 0.15~0.27 wt%의 범위에서 첨가하도록 ASME규격에 규정되어 있다. 함유된 화학성분 중 Mn과 Ni는 경화능을 향상 시키고 고용 강화를 위해 1.2~1.5 wt%와 0.4~1.0

Table 1. Chemical composition of the SA508Gr.3 Steel

(Wt %)

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al
Centent	0.22	0.20	1.23	0.007	0.0022	0.86	0.21	0.49	0.010

Table 2. Heat treatment cycle of quenching tempering and PWHT

SA508 Gr.3	Normalizing	Quenching	Tempering	PWHT
Basic Mechanical property	920°C 0.5 hr/inch	890°C 0.5 hr/inch	660~720°C 1 hr/inch	620°C 30 hr
Temper-parameter	920°C 0.5 hr/inch	890°C 0.5 hr/inch	600~700°C 1~80 hr	—

Fig. 1. Optical micrographs of SA508 Gr. 3(a) Quenched and (b) Quenched and Tempered.**Table 3.** Tensile test data of SA508 Gr.3

Tempering temp.	Y. S (MPa)	T. S (MPa)	E. L (%)	ROA (%)
Spec.	≥ 345	550~725	18	38
660°C	548.8	686.5	21.8	71.2
690°C	518.2	651.6	22.3	73.2
720°C	486.1	614.7	23.2	68.6

wt%의 범위로 첨가 되고 있다. 원자력 압력용기용강 SA508Gr.3의 Quenching 후 조직은 Fig. 1(a)에 나와 있듯이 lath와 lath를 따라 Cementite가 존재하는 상부베이 나트 조직을 나타낸다. Fig. 1(b)의 Tempering 후 조직사진으로 Quenching 조직과 큰 차이가 없는 것은 베이 나트 조직은 마르텐사이트 조직에 비해 과포화된 Carbon의 함량이 적기 때문에 Tempering 후의 조직이 Quenching 조직과 비교했을 때 큰 변화가 없었다.

Tabel 3에는 SA508Gr.3의 열처리 후 요구되는 인장 강도값과 실험결과 값이 나와 있다. ASME 규격에 명시되어있는 최소 Tempering 온도값인 650°C 이상 온도에서 Tempering을 실시 했을 때 720°C에서도 Y.S:486.1, T.S:614.7 MPa로 ASME 규격을 만족하는 것으로 나타났다.

원자력 압력용기용강의 경우 제작 단계에서 PWHT

를 포함한 템퍼취성이 발생할 수 있는 500~600°C 온도 구간의 열처리 공정을 거치고 발전소에 설치 후 200~500°C의 온도에서 50년 이상 사용되면서 지속적으로 방사능 조사를 받기 때문에 연성취성 천이 온도가 상승한다. 일반적인 템퍼취성의 원인은 강재에 함유된 P, Sn, Sb, As등의 불순물 원소가 입계에 편석되어 입계의 강도를 저하시키기 때문으로 알려져 있다[4].

이때 불순물 원소의 입계편석은 Si, Mn, Cr, Ni, Mo 등과 상호 작용에 의해 조장되거나 억제된다. 강제중의 P와 친화력을 갖는 원소중 고용 Mo은 Mo-P 화합물을 형성하고 P의 입계편석을 억제하나, Tempering중 고용 Mo가 탄화물에 흡수되어 고갈되면서 다시 방출된 P가 입계에 공편석을 일으켜 P의 입계편석을 조장하는 성질이 있고 Si의 경우 P의 활동도를 증가시킴으로써 입계편석을 증가시키는 것

Fig. 2. Charpy impact test data of SA508 Gr. 3 steel.

Fig. 3. Hardness test data for various tempering temperature and holding time.

Fig. 4. SEM Micrographs of various tempering temperature and holding time (a; as quenched, b; at 500°C 50 hr holding, c; at 600°C 50 hr holding, d; at 700°C 50 hr holding).

으로 알려져 있다[5, 6]. 그러나 압력용기강의 경우 일반적으로 위 언급된 두 원소 이외에도 타 원소들이 2가지 이상 첨가될 뿐만 아니라, 복잡한 열처리 이력까지 원인으로 작용하므로 템퍼취화의 취화기구를 규명하기가 쉽지 않다. Fig. 2에는 PWHT 열처리 전후 시편의 충격인성 시험 값이 나타나 있는데

PWHT 열처리 전후의 충격 인성값은 ASME 규격에서 규정하는 Min. 41J[4.4°C]를 모두 만족시키지만 연성-취성 전이 온도가 약 40°C 상승한 것으로 나타났다.

강종설계와 열처리 사이클 설정에 필요한 Temper-Parameter의 기초 데이터베이스를 구하기

Fig. 5. Distribution of Tempering hardness and P.T with calculated by Constant value C.

위해 실험한 Tempering 온도와 시간에 따른 경도값의 변화는 Fig. 3에 나타나 있다. ASME 규격에 정의된 최소 Tempering 온도인 650°C 이하 온도인 500°C, 550°C에서는 경도의 변화가 거의 일어나지 않았고, 600°C 이상에서는 유지 시간에 따른 경도 감소가 급격하게 나타났다. 700°C에서는 10시간 이후에서는 약 195HB를 유지하면서 더 이상의 경도 감소가 나타나지 않았다. Fig. 4에 나타난 SEM 관찰 결과와 같이 Tempering 온도 상승과 유지 시간이 증가할수록 결정립이 성장하고 탄화물이 구상화 되는 것으로 나타났다. 실험을 통해 얻은 경도값을 식 (3)을 이용하여 상수 C: 14.76를 구하였고 Holloman-Jaffe parameter에 따라 Fig. 5과 같이 SA508 Gr.3 강종의 Temper-parameter curve를 구하였다.

4. 결 론

원자력 압력용기용강 SA508Gr.3의 열처리 조건에

따른 기계적 특성변화와 템퍼 파라메타에 대해 조사한 결과, 실제 열처리 사이클 설정시 필요한 기초 물성값을 다음과 같이 얻었다.

1. 원자력 압력용기강 SA 508Gr.3은 저탄소 Ni-Cr-Mo강으로 Quenching후 조직은 상부 베이나이트 조직을 나타내며 인장강도 시험의 경우 Tempering 온도 660(YS: 548.8 MPa, TS: 686.5 MPa) ~720°C (YS: 486.1 MPa, TS: 614.7 MPa)에서 모두 ASME 규격을 만족하였고 충격인성은 PWHT 전후 연성취성 전이 온도는 약 40°C 상승하였지만 ASME 규격의 Min.41J[4.4°C]을 모두 만족하는 것을 확인하였다.

2. SA 508Gr.3 강종의 Hollomon Temper Parameter의 상수 C는 14.76이고 Tempering 온도 600°C 이상에서는 유지 시간이 증가함에 따라 탄화물의 성장과 구상화가 관찰되었고 경도가 급격하게 감소하였다.

참고문헌

1. H. Bhadeshia and R.Honeycombe : STEELS, 3th ed, Edward Arnold, London, (2006) 153.
2. Nong WAN, Weiha XIONG and Jinping SUO: J. Mater. Sci. Technol., **21**(6) (2005) 803.
3. B. M. Shlyakman, O. N. Yampolskii and D.V. Ratushev: Met. Sci. Heat treat., **52** (2010) 451.
4. C. J. McMahon, JR. E. Furubayshi, H.Ohtani and H. C. Feng: Acta. Metall., **24** (1976) 695.
5. Sang Gyu Park, Min Chul Kim, Bong Snag Lee and Dang Moon Wee : J. Kor. Met. & Mater. **48** (2010) 122.
6. Ph. Dumoulin, M. Guttman, M. Foucault, M. Palmier, M. Wayman and M. Biscondi : J. Mater. Sci. Technol. **14**(1) (1980) 15.