

발전설비 보일러 튜브 용접부의 잔여수명평가 신뢰성 향상을 위한 기계적 물성 변화 연구(SA213-T12)

오 병 진^{*,†} · 장 중 순^{**}

^{*}한전KPS주식회사 솔루션센터, 아주대학교 산업공학과 대학원

^{**}아주대학교 대학원 산업공학과

A Study on Mechanical Properties Changes to Improve the Confidence of Remaining Life Evaluation for the Weldment of Power Plant Boiler Tube(SA213-T12)

Byungjin Oh^{*,†} and Joong Soon Jang^{**}

^{*}KEPCO-KPS Technology solution center, Ajou University, Industrial Engineering, Sungnam 463-726, Korea

^{**}Ajou University, Industrial Engineering, Suwon 443-749, Korea

[†]Corresponding author : obj@kps.co.kr

(Received April 9, 2014 ; Revised June 9, 2014 ; Accepted June 20, 2014)

Abstract

Boiler equipment in power plant is always being operated in harsh conditions and severely exposed to the extreme environment of high temperature. Therefore periodically the state of devices should be checked, diagnosed, and analyzed to ensure the reliability of the equipment. Traditionally, such a diagnosis is based one or two physical properties of the sample taken from the equipment like hardness, microstructure, etc.. However, to enhance the confidence of the diagnosis, it is necessary to synthesize those properties together. This paper is to propose such a synthetic procedure for SA213-T12(1Cr-0.5Mo) which was developed to be used in 565°C below condition. Creep test and accelerated degradation test were performed simultaneously, and the physical properties such as microstructure, tensile strength, yield strength, hardness, and indentation properties were measured. This paper proposes a method of determining the remaining life by quantitative comparison. It will provide the basis of evaluating life assessment more objective and reliable.

Key Words : Life assessment, SA213-T12, Degradation, PHM

1. 서 론

발전설비 중 보일러설비는 보통 고온의 열원과 직접 접촉하기 때문에 항상 열악한 조건과 환경에 노출된 상태로 운전되고 있다. 따라서 주기적으로 기기상태를 점검, 진단, 분석, 평가하여 설비의 신뢰성을 확보할 필요가 있다. 발전소의 주증기 및 고온재열 증기 계통은 통상 500°C~600°C의 높은 온도 범위에서 운영 되고 있어 잦은 손상이 발생되고 있으며 노출 시간에 따른 재

질특성 변화의 정량화된 Data Base(이하 DB)가 필요하다.

본 논문에서는 비교적 DB가 많지 않은 1Cr-0.5Mo강인 A213-T12 (이하 T12) 보일러 튜브 재질을 용접, 가속열화시험을 실시하고 열화등급별 기계적 특성을 취득하여 잔여수명을 정량적이고 좀 더 객관적으로 판단하여 발전설비 압력부의 고장예지 및 건전성관리(PHM : Prognostics and Health Management) 시 신뢰성을 높일 수 있는 있는 근거를 마련하였다.

2. 실험

2.1 시험재 SA213-T12의 특성

2.1.1 저 Cr-Mo 강의 기계적 특성

SA213-T12재료는 통상 565℃ 이하의 온도영역에서 사용되는 재료이다. 저 Cr-Mo 강은 Mo의 첨가에 따라 고온 강도를 향상시키고, Cr에 의하여 내산화성 및 흑연화에 대한 저항성을 향상시킨 것이다. 이 재료들은 고온증기 계통인 주증기, 고온재열, 저온재열 및 추기 계통의 증기에 사용된다. 저 Cr-Mo 합금강 중 사용 빈도가 높은 재료는 T11, T12와 T22이며, 각 등급의 Cr-Mo의 함유량은 각각 T12 : 1Cr- $\frac{1}{2}$ Mo, T11 : 1 $\frac{1}{2}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo, T22 : 2 $\frac{1}{4}$ Cr-1Mo 이다.

2.1.2 시험재료의 각종 특성

시험 신재 튜브에 대하여 각 강종 별로 주요 성분 (Cr, Mo, Mn)함량의 적정성을 확인하기 위하여 EDS 장비를 사용하여 성분 분석을 수행, 확인하였으며 T12의 각종 물성은 다음과 같다(Table 1~4).

Table 1 International Specifications & Peak operating temperature recommendations

ASTM	German	Japanese	O/Temp.
SA213-T12	13CrMo44	STBA22	ASME 649°C

Table 2 Mechanical properties of SA213-T12

ASME Specification	Grade	Product Form	Mechanical properties			
			Tensile Strength Min. (MPa)	Yield Strength Min. (MPa)	Elongation Min. (%)	Hardness Max. (HB/HRB/Hv)
SA-213	T12	Seamless ferritic alloy steel tubes	415	220	30	163/85/170

Table 3 Maximum allowable stress values for metal temperatures

Temp. °C	371	399	427	454	482	510	538	566	593	621	649
Stress (MPa)	109	107	105.5	102.7	100	78	49.6	31	19.3	12.4	7.6

Table 4 Chemical composition of SA213-T12

Spec. & Grade	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
SA213-T12	0.05-0.15	0.30-0.60	0.025 Max.	0.025 Max.	0.5 Max.	0.80-1.25	0.44-0.65

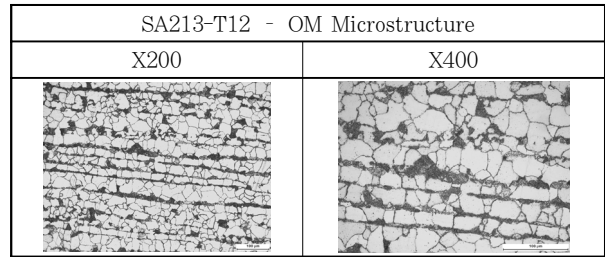


Fig. 1 Microstructure of SA213-T12 (OM image)

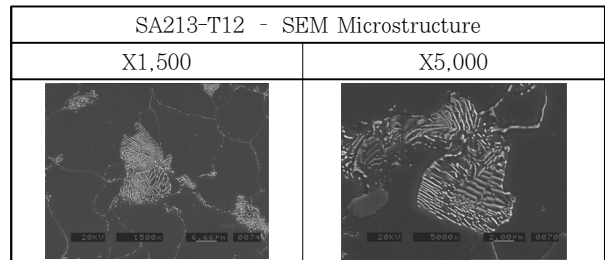


Fig. 2 Microstructure of SA213-T12 (SEM image)

2.1.3 확보된 신재 강종 튜브에 대하여 금속 미세 조직을 광학현미경과 전자주사현미경(SEM)으로 관찰하였다(Fig. 1, 2). 관찰된 미세 조직은 X200, X400, X1,500, X5,000 배율로 촬영하였다.

2.2 가속열화시험

인공열화시험 수행을 위하여 확보된 T12에 대하여 열화시간 및 온도 단계에 따라 시험을 수행하였다. 각 온도별 열화 단계를 Table 5과 같이 9단계로 나누어 시험하였다. 시간 및 온도별로 인공 열화된 각 단계별 시험편에 대하여 금속미세조직 관찰 및 기계적 특성 평가, 분석이 용이하도록 인장시험편, 마운팅 등 시험편을 재가공하였다.

2.3 열화단계별 조직 시험

열화 시험편에 대하여 광학현미경(OM) 및 전자주사

Table 5 Aging times and temperatures for SA213-T12/T23

Material	Temp.(°C)	Step (hr)					
		1	2	3	4	5	
SA213-T12	720 °C	Step 1	1	2	3	4	5
		hr	New-S	3	10	30	100
		Step 6	6	7	8	9	-
		hr	300	1000	1500	2000	-
	740 °C	Step 1	1	2	3	4	5
		hr	New-S	3	10	30	100
		Step 6	6	7	8	9	-
		hr	300	1000	1500	2000	-

Table 6 OM and SEM microstructure images of SA213-T12 on each aging condition

SA213-T12(OM : ×400, SEM : ×1,500)								
OM	3h	10h	30h	100h	300h	1,000h	1,500h	2,000h
740°C								
720°C								
SEM	3h	10h	30h	100h	300h	1,000h	1,500h	2,000h
740°C								
720°C								

현미경(SEM)을 사용하여 금속 미세 조직을 관찰하였다. 광학현미경의 경우, X200 및 X400 배율로 촬영하였으며 전자주사현미경의 경우, X1500, X2500, X5000의 배율로 촬영하였다(Table 6). T12 튜브의 미세조직시험 결과 300h 이후에서 F등급이 나타났으며 기계적 물성값 변화도 조직사진과 유사한 변화특성을 보였다. 열화시간에 따라 재료의 조직이 변화하고 기계적 물성값이 유사하게 감소 변화되는 것을 알 수 있었으며, 시험온도 20°C차이에 따라 열화특성이 크게 달라지는 것을 확인하였다.

2.4 인장시험

각 온도 및 시간에 따라 열화 단계별로 인장시험편을 각 3개씩 가공 제작하여 인장시험을 수행하였다. 단계별 열화 시험에 대하여 인장시험 측정결과 값을 평균하여 기록하였다(Table 7, Fig. 3~6). Table 7과 같이 온도와 시간을 알 수 있을 경우 LM-Parameter를 $[LMP=T(\log tr+C)\times 10^{-3}]$ 산출할 수 있으며 Fig 5 나 Fig 6과 같은 그래프를 그릴 수 있으며 이 값을 통해 각각의 기계적 물성값(인장, 경도, 압입강도)이나 열화등급을 유추할 수 있다. 또한 관심대상 금속의 노출 온도와 사용시간을 알 수 있다면 비교적 간단하게 물성치를 추정할 수도 있다.

Table 7 The results of tensile strength(σ_{ut}) and yield strength(σ_{ys})

SA213-T12		Strength measurement		
Temp.	Time	Ts(σ_{ut}) Avg. (MPa)	Ys(σ_{ys}) Avg. (MPa)	ϵ (%)
720°C 740°C	New-Spe.	569.8	459.1	35.5
	3 hrs	568.4	457.9	31.0
		548.0	431.9	31.1
	10 hrs	548.3	435.4	30.8
		512.5	395.0	33.7
	30 hrs	499.8	379.6	34.0
		441.0	299.5	39.4
	100 hrs	433.2	301.6	39.5
		417.7	294.3	42.3
	300 hrs	411.7	280.6	41.9
		378.0	270.7	47.3
	1000 hrs	345.1	140.6	41.4
		339.2	137.9	47.1
	1500 hrs	343.9	135.9	47.7
		336.9	146.6	46.8
	2000 hrs	349.3	140.0	46.7
337.6		139.7	46.0	

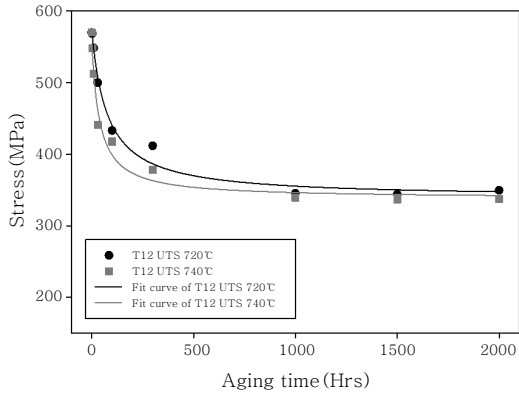


Fig. 3 Tensile strength trend of SA213-T12 on each aging time

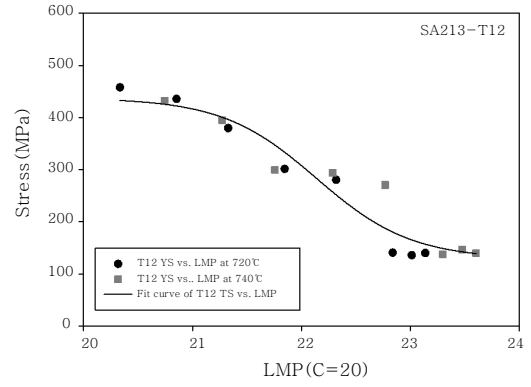


Fig. 6 The relation between yield strength trend and LMP on each aging time

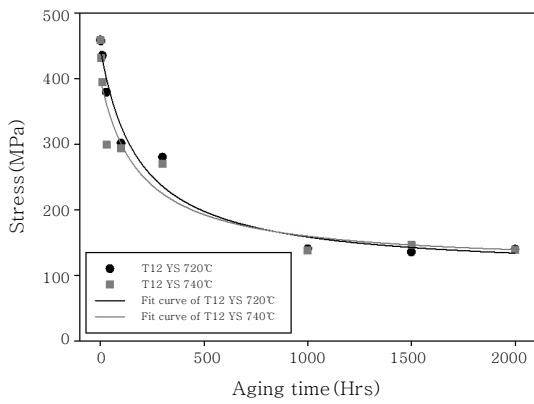


Fig. 4 Yield strength trend of SA213-T12 on each aging time

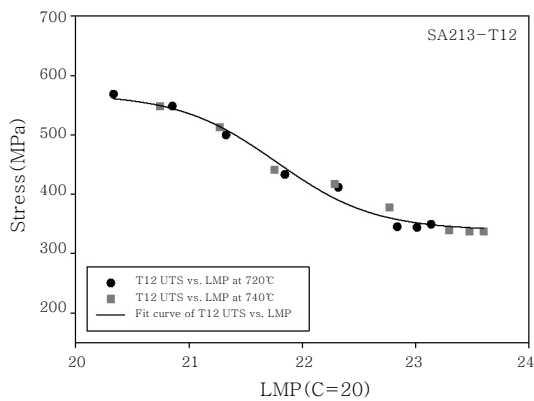


Fig. 5 The relation between tensile strength trend and LMP on each aging time

2.5 경도시험 결과

각 단계별로 열화된 시편에 대하여 경도시험을 실시하였다. 경도는 Rockwell B scale로 측정 하였으며 각 부위에 대하여 3번을 측정 한 후 평균값을 취득하였다(Table 8).

Table 8 Hardness test results on each aging time (SA213-T12, 720°C/740°C)

SA213-T12 HRB		Base metal avg.	Weld joint avg. (WM)	
Temp	Time			
720°C 740°C	New-Spe.	78.1	-	
	3h		74.0	89.6
			74.8	87.9
	10h		72.8	86.7
			71.9	83.5
	30h		72.8	73.6
			68.5	60.0
	100h		64.9	61.1
			68.8	67.9
	300h		69.6	66.2
			50.1	55.7
	1000h		50.0	52.0
			49.7	49.3
	1500h		51.7	51.4
		47.6	55.8	
2000h		50.1	51.0	
		51.4	54.7	

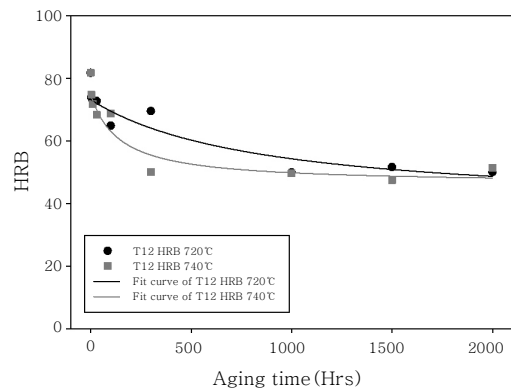


Fig. 7 Hardness trend of SA213-T12 on each aging time

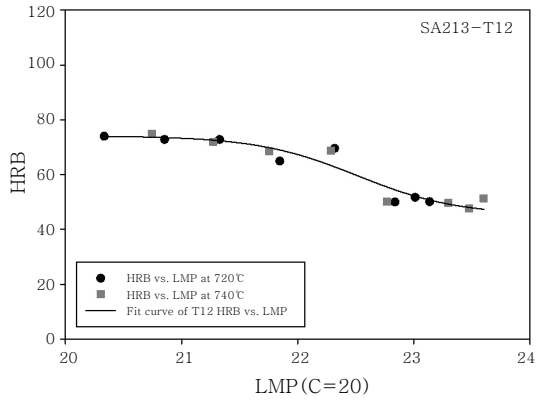


Fig. 8 The relation between hardness trend of T12 and LMP on each aging time

가속열화온도에 따라 경도값이 초기 열화시간에서는 급격히 줄어들지만 장시간 유지하면 값이 초기 값 보다 감소폭이 낮아지는 것을 확인하였다. (Fig. 8)

T12재료에 대한 그래프로 볼 때 열화시간에 따른 경도값의 변화 뿐 만 아니고 열화시간에 따른 경도값과 LMP의 관계도 서로 상관성이 있음을 보여주고 있으나 인장강도값과 LMP의 관계 보다 기울기가 완만함을 보여주고 있다.

2.6 압입시험 결과

압입시험은 재료에 손상 없이 시험하는 비파괴시험 이면서도 그 시험법이 간편해 시험편 채취가 불가능한 현장의 가동 중인 구조물에 유용하게 적용할 수 있는 시험법으로 재료에 가해지는 압입 하중에 따른 압입깊이를 연속적으로 측정하여 압입 하중-변위 곡선을 얻고 이 곡선의 분석을 통해 재료의 기계적 특성을 평가하는 기법으로 경도시험과 유사하나 압입자국을 직접관찰하지 않고 재료의 유동특성, 잔류응력, 파괴인성 등을 측정할 수 있는 시험법이다. Frontics사의 AIS3100을 이용하여 압입시험을 수행하였다(Table 9).

압입인장강도는 앞서 분석한 인장강도물성 변화와 유사한 결과값이 측정되었다. Aging 온도인 720°C, 740°C 모두 압입인장강도값이 초기 aging 시간에서는 급격히 줄어들었다. 반면에 열화시간 300시간 이후에는 초기 시간에 비하여 감소폭이 줄어든 것을 확인할 수 있다 (Fig. 9, 10).

2.7 각종 물성 시험 결과

T12 조직 변화에 따른 기계적 특성의 변화를 측정 분석하였으며 다음과 같이 재질에 대한 특성을 얻을 수 있었다. Table 10은 열화단계별로 720°C와 740°C에

Table 9 Mechanical properties on each aging time (SA213-T12, 720°C/740°C)

SA213-T12		Indentation test strength		
Temp.	Time	ITs Avg. (MPa)	IYs Avg. (MPa)	Work hardening coefficient
720°C 740°C	New-Spe.	572.9	441.4	0.08
	3 hrs	520.3	237.5	0.19
		569.8	305.3	0.13
	10 hrs	500.2	294.8	0.15
		510.8	328.7	0.15
	30 hrs	480.8	387.3	0.11
		450.5	330.0	0.12
	100 hrs	425.4	337.2	0.13
		432.4	307.9	0.14
	300 hrs	407.1	276.8	0.20
		369.4	279.2	0.11
	1000 hrs	357.1	194.7	0.13
		348.4	187.0	0.13
	1500 hrs	360.3	175.7	0.21
343.7		183.6	0.11	
2000 hrs	345.5	189.2	0.13	
	363.4	184.6	0.10	

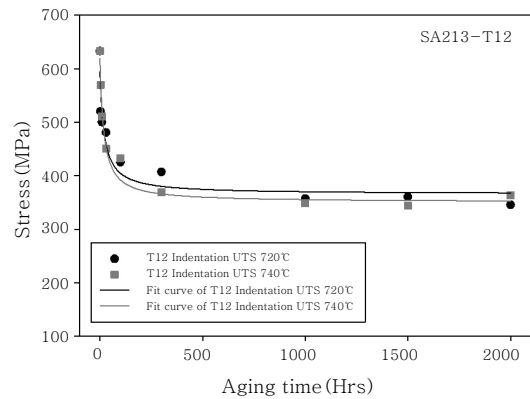


Fig. 9 The Indentation tensile strength of T12 trend on each aging time

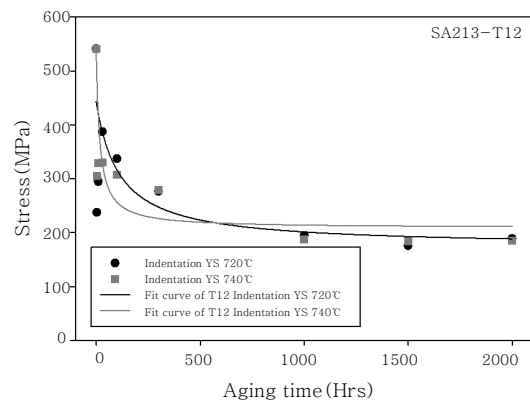


Fig. 10 TIndentation yield strength trend of T12 on each aging time

Table 10 Classification of evaluation result for SA213-T12

Grade	Ts (MPa)	Ys (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HRB)	ITs (MPa)	IYs (MPa)
New	569.8	459.1	35.5	78.1	572.9	441.4
A	558.2	444.9	31.1	74.4	520.3	271.4
B	548.3	435.4	30.8	72.8	500.2	294.8
C	506.2	387.3	33.9	72.4	495.8	358.0
D	437.1	300.6	39.5	66.7	438.0	333.6
E	417.7	294.3	42.3	68.8	432.4	307.9
F	355.2	174.0	45.6	52.3	361.9	208.9

서 각각 조직등급을 분류하고 동일등급의 물성평균을 구하여 기록한 것이며 열화 등급에 따른 각종 기계적 물성을 나타냈다. 본 연구를 통하여 취득 물성에 대한 고장예지 판단의 정량화 측면에서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(가) 인장강도와 항복강도는 열화 정도에 따라 일정하게 감소하고 있어 신재의 물성값을 알면 열화등급을 평가할 수 있다. 경도의 경우 연신율과 경화지수 값 보다 다소 규칙적이다.

(나) 항복비는 감소폭이 적고 불규칙하므로 열화등급을 평가하기 어렵다.

(다) 연신율과 경화지수는 변화폭이 적고 불규칙하여 수명을 정량화하기 어렵다.

(라) 금속온도와 운전시간을 알면 LMP 식을 이용하여 해석적인 방법으로 열화정도를 예측할 수 있다.

3. 결 론

본 연구결과로 SA213-T12의 열화정도에 따른 미세 조직변화에 의한 기계적 물성변화를 이용하여 고장예지 및 잔여 수명을 예측하는데 있어 좀 더 객관적이고 신뢰성 있는 판단을 할 수 있음을 강조한다.

에너지산업 분야의 보일러 튜브에 고장 진단 및 예지 기술(PHM)을 적용하는데 있어서 신뢰성을 향상시키기 위해서는 금속의 조직뿐만 아니

고 조직등급에 따른 경도나 인장물성값 등을 측정하고 서로 비교하여 복합적으로 평가기법을 적용해야 한다는 것을 주장한다.

향후 발전설비의 고온 고압부의 관심재료에 대하여 열화시험과 함께 각종 기계적 물성측정 등 DB 확보가 요구되며 지속적인 연구가 이뤄져야 하겠다.

References

1. Jungki Kim et al : A Study on the Evaluation for In-Service Material Degradation of High Temperature Structural Components by Grain Boundary Etching Method, KSME **15-3** (1991), 898-906 (in Korean)
2. Jongseo Park et al : Standardization of surface replication procedures for life assessment of high temperature facilities, KSME, **24-9** (2000), 2381-2386 (in Korean)
3. Seunghun Nam et al : Evaluation of Toughness Degradation of Cr-Mo-V Steel Using Electric Resistivity, KSME Fall conference book A, Inha University, 2006, 292-297 (in Korean)
4. Y. Watnabe and T. Shoji : The Evaluation of In-service Material Degradation of Low alloy Steels by Electrochemical Method, Met. Trans., **22A**, 2097-2106
5. B. Neubauer and U. Wedel : ASME International Conf. on Advances in Life Prediction Method, Albany, N.Y., 1983, 307-313
6. Byung jin Oh, Joong Soon Jang : A Study on Mechanical Properties Changes to Improve the Confidence of Remaining Life Evaluation for the Weldment of Power Plant Boiler Tube 2013 Spring Annual Meeting of KWJS **58**, 134 (in Korean)
7. Byung jin Oh, Joong Soon Jang : An Accelerated degradation test of parent and weldment tube at boiler in fossil power plant, 2012, IWJC-Korea May 8-11 II-64 (P350)
8. Byung jin Oh, Joong Soon Jang : A Study on Mechanical Properties Changes to Improve the Confidence of Remaining Life Evaluation for the Weldment of Power Plant Boiler Tube(T23), 2013 Journal of KWJS **31-5** (2013) 26-34 (in Korean)
9. Byung jin Oh, Joong Soon Jang : A Study on Mechanical Properties Changes to Improve the Confidence of Remaining Life Evaluation for the Weldment of Power Plant Boiler Tube(T12) Fall Annual Meeting of KWJS, **59**(2013), 167 (in Korean)