KIGAS Vol. 25, No. 5, pp 30~36, 2021
(Journal of the Korean Institute of Gas)
https://doi.org/10.7842/kigas.2021.25.5.30

표면복제를 사용한 mod HP강 개질로 튜브의 잔여수명 평가에 대한 연구

류형기 · Thi Giang Le* · †방효중 · 윤기봉*****
중앙대학교 대학원 기계공학과 석사과정, *중앙대학교 기계공학과 박사 후 연구원,
**중앙대학교 기계공학과 박사과정, ***중앙대학교 기계공학부 교수
(2021년 10월 4일 접수, 2021년 10월 21일 수정, 2021년 10월 22일 채택)

Residual Life Assessment of mod HP Reformer Tubes Using Surface Replication Methods

Hyung Ki Ryu · Thi Giang Le* · †Hyo Jung Bang · Kee Bong Yoon*
Graduate School Chung-Ang University,
**Dept. of Mechanical Engineering Chung-Ang University*
(Received October 4, 2021; Revised October 21, 2021; Accepted October 22, 2021)

요 약

정유 및 석유화학산업의 개질로 튜브에 사용되는 mod HP강에 대한 잔여수명의 예측법을 튜브의 표면 금속조직에 석출된 탄화물의 면적분율에 대한 정량적인 평가를 통해 연구하였다. 표면복제법을 활용한 미세조직 분석을 통하여 탄화물의 면적분율과 잔여수명 사이의 관계를 실험적으로 구하였다. 신재(Virgin)와 950 ℃의 개질로에서 1.8, 6.0, 7.2, 8.5, 9.7 및 16.2년 실제 사용한 튜브들을 광학현미경(OM)을 사용하여 관찰하였으며, 석출물의 면적분율을 Image J 프로그램을 이용한 정량적 이미지 분석에 의해 측정하였다. 석출물의 면적분율이 증가함에 따라 잔여수명이 감소하여 서로 반비례하는 결과를 보여주었다. 이 관계를 사용온도와 수명을 결합한 파라미터인 LMP로 나타내면, 신재에서 LMP 값이 가장 높게 나타났고, 사용시간이 증가할수록 LMP가 감소하여 잔여수명이 줄어 듦을 나타내었다. LMP와 탄화물의 면적분율과의 상관관계를 나타내는 관계식을 도출하였다. 도출한 관계식은 현장에서 잔여수명 평가를 위해 표면복제법 적용으로 면적분율을 측정하여 잔여수명을 평가하는데 사용될 수 있다.

Abstract - Residual life assessment of reformer tubes of mod HP steel used in the refinery and petrochemical industry were investigated by quantitative metallographic evaluation method. Area fractions of precipitated carbides were measured by using surface replication and its relationship with the remaining life of the tube was investigated. The microstructures of the virgin and other tubes were examined using optical microscopy (OM) for service periods of 1.8, 6.0, 7.2, 8.5, 9.7, and 16.2 years at 950 ℃ and the area fractions of the precipitates were measured by image analysis using ImageJ software. As the area fraction of the precipitates increased, the residual life was decreased accordingly. The results showed that the LMP was the highest in the virgin and the LMP decreased as the service time increased and the residual life decreased. A regressional equation showing the relation between the area fraction of carbides and LMP was experimentally derived. The obtained relationship can be used with the surface replication method for on-site residual life assessment.

Key words : mod HP, creep, area fraction, residual life assessment, image analysis, LMP

†Corresponding author:bhj@kgs.or.kr
Copyright ⓒ 2021 by The Korean Institute of Gas

I. 서 론

고온 설비에 주로 사용되는 오스테나이트계 내열강 HP Modified Steel(mod HP)는 고온에서 탄화수소와 증기 혼합물에서 수소가 풍부한 가스를 생산하기 위해 석유화학 플랜트에서 개질로 튜브를 제작하는 데 사용되는 고온 강철 유형 중 하나이다 [1-3]. Mod HP 강철은 900~1050 ℃ 범위의 고온에서 우수한 크리프 저항성과 기계적 특성을 확보하기 위해 HK40에 Nb과 같은 희토류 금속을 첨가하여 개선한 강종이다[3]. 과거에는 개질로 튜브의 소재로 HK-40 합금을 사용했으나 튜브 크기와 두께가 제한되는 이유로 고온 고압 조건에서의 성능 향상에 칫수가 커지는 어려운 문제가 있었다[4]. 이후 신규 개질로 설계가 도입되어 HP 강 및 mod HP 강이 개질로 튜브를 제작하는 데 주로 사용되었다 [5]. Mod HP 강의 크리프 저항성 향상으로 개질로 튜브의 내부 용적이 향상되었으며, 반응 성능이 30~40% 향상되었다. 또한, 튜브 두께를 감소시킬 수 있었고 조기 크리프 손상을 방지할 수 있었다. HK강 튜브의 크리프 손상은 두꺼운 튜브 벽을 가로지르는 큰 온도 구배에 의한 열응력으로 손상이 가속된다고 알려져 있다 [2]. Mod HP 강 소재로 원심주조법에 의해 만든 튜브는 900 ~ 1050 ℃ 고온의 범위에서 우수한 기계적 성능을 보여주고, 두께가 두껍지 않게 제작되면 튜브 내외면의 손상이 유사해지는 경향이 있으므로 손상 탐지가 용이하다.

API(미국석유협회)의 개질로 설계 표준을 기반으로 한 석유화학 개질로 튜브의 정상적인 설계 수명은 100,000 h이다 [5, 6]. 그러나 현장의 운전 조건과 사용의 적절성에 따라 개질로 튜브의 사용수명이 단축되는 경우가 빈번하며, 실제는 30,000 h에서 180,000 h까지 달라질 수도 있다. 평균 설계수명인 100,000 h 보다 일찍 발생하는 파손은 산업계 관심사항이며, 문헌에 자주 보고되어 있다 [6].

고온 부품의 잔여 수명을 직접 측정하기 위해 가장 널리 사용되는 방법 중 하나는 크리프 시험을 수행하는 것이다. 석유화학의 개질로 튜브로 사용하다가 가동이 중지되어 노출된 튜브에서 재료를 떼어낸 후 가속 크리프 시험 조건으로 테스트를 수행하여 개질로 튜브의 크리프 손상을 평가한다 [2,7,12].

정량적인 금속 조직 평가법을 사용하고 손상 매개 변수와 측정된 잔여 수명 사이의 알려진 관계를 적용하여 개질로 튜브의 잔여수명 예측을 위한 크리프 손상의 정량화를 위한 시도는, 특히 사용한 튜브의 내부 표면 근처의 단면 영역에서 여러 연구자들에 의해서 조사된 바 있다. 두께가 두꺼운 HK강의 개질로 튜브에서는 초기의 크리프 손상 단계는 이러한 내부 표면 근처에서 발생하기 때문이다 [6].

사용한 튜브에서 채취한 시편으로 크리프 시험을 통해 직접 크리프 잔여 수명을 측정하는 잔여수명 실측법과 유사하게, 위의 방법은 튜브 샘플링을 통해 내부 표면 근처의 튜브 단면에서 크리프 손상을 평가해야 하는 번거로움이 있다. 또한, mod HP 강 튜브의 경우 튜브의 내면 뿐 아니라 외면에서의 손상도 유사하므로 튜브 외표면에서의 크리프 손상 측정으로 전체 튜브 수명을 비교적 정확하게 평가할 수 있다. 표면복제기법은 노화로 인한 미세구조의 열화와 석출물을 조사하는 신뢰할 만한 비파괴 방법으로 현장 적용성이 높다. 또한, 이 기법은 튜브 샘플링이 필요하지 않고 튜브 외부 표면의 크리프 손상 또는 석출된 탄화물의 특성을 측정하여 정량적인 잔여수명 평가를 한다면 표면복제 방법은 수명평가에 매우 유용한 도구가 될 수 있다.

요약하면, 고온 설비의 잔여수명을 직접 측정하기 위해 가장 널리 사용되는 방법 중 하나는 취외한 시편에서 크리프 시험을 직접 수행하는 것이다. 석유화학 플랜트의 개질로 튜브로 사용하다가 가동이 중지되거나 파손이 발생한 튜브에서 시편을 채취하여 가속열화크리프 시험을 수행하여 소재의 크리프 손상을 평가하는 것이다. 하지만, 크리프 시험을 수행하기 위해서는 현장에서 튜브를 직접 샘플링하여 시편을 가공하는 등의 과정이 복잡하고 공장의 정지기간을 늘려야 하는 어려움이 있다. 반면, 사용중인 설비의 표면을 연마하고 아세테이트

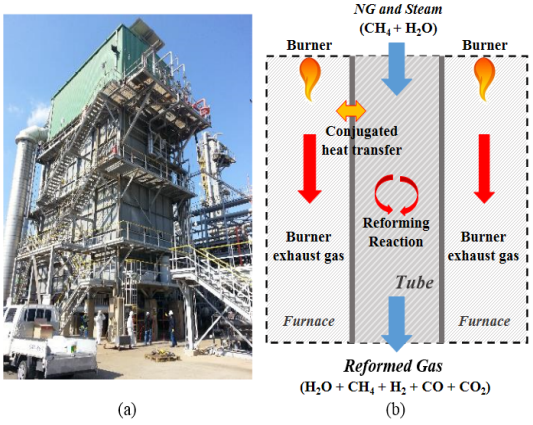

Fig. 1. (a) Overview of reformer tube structure (b) View of tube in reforming furnace.

Table 1. Chemical composition of mod HP steel according to ASTM 608/608M-20 (wt.%)

Material	C	Ni	Cr	Nb	Si	Mn	Mo	P	S	Fe
Mod. HP steel	0.38-0.45	34-37	24-27	0.5-1.5	0.50-1.50	0.50-1.50	0.50	0.03	0.03	Bal.

Fig. 2. Reformer tubes of Mod HP steel.

필름으로 복제하여 광학현미경을 사용해 금속미세조직을 관찰하는 표면복제법을 사용하면 이런 단점을 극복할 수 있다. 사용시간이 경과함에 따라 설비의 금속미세조직의 변화를 관찰하고 분석하여 손상정도를 평가하는데 유용하며, 실용성이 크고 손상의 정도를 비교적 높은 정확도와 정량적으로 수명평가가 가능하기 때문에[8] 이를 개질로 튜브에도 적용할 수 있다.

본 연구에서는 mod HP 강 개질로 튜브의 잔여수명을 예측하기 위해서, 실제 석유화학 플랜트에서 사용된 여러 단계로 노화된 튜브를 샘플링 하여, 튜브 표면에 석출된 탄화물의 면적분율을 측정하고 크리프 시험을 통해 얻은 LMP 변수와의 상관관계를 도출하여 관계식을 찾는 연구를 수행하였다.

Ⅱ. 실험절차

이 연구에서 사용한 개질로 튜브는 오스테나이트계 mod HP를 원심주조방법으로 제조한 것이다 [1, 2]. Mod HP, 즉 HP40Nb의 표준화학성분은 Table 1과 같다. 연구에 사용된 튜브는 개질로에 수직으로 설치된 14 m, 내경은 122.6 ~ 146.6 mm, 튜브 두께는 10.8 ~ 12 mm의 튜브이다 [7,12]. 또한, 튜브는 금속온도 950 ℃에서 사용되도록 설계되었으며 평균 내부압력은 3.3 MPa이고, 설계수명은 100,000 h (11.4년) 이다. Fig. 2에는 이번 연구에 사용한 튜브의 실제 시편사진이다.

사용기간의 함수로서 석출 탄화물의 면적분율을 분석하기 위하여 다양한 사용기간, 즉 0(Virgin), 1.8, 6.0, 7.2, 8.5, 9.7 및 16.2년이 된 개질로 튜브로부터 8개의 시편을 만들었다. 8개의 개질로 튜브에 대한 상세한 사용기간 정보 및 시편의 채취 위치는

Table 2. Detailed information on mod HP steel used for the reformer tubes

Tube No.	Installed	Replaced	Service Period (year)	Location from Bottom in the Furnace (m)
#17-1	2014	2014	0	Outside of furnace
#4	-	-	0	Outside of furnace
#19	2012.03	2013.12	1.8	6~8
#17-2	2008.01	2013.12	6.0	6~8
#56	2008.01	2015.03	7.2	6~8
#53	2005.07	2013.12	8.5	6~8
#52	2005.07	2015.03	9.7	6~8
#26	1997.10	2013.12	16.2	6~8

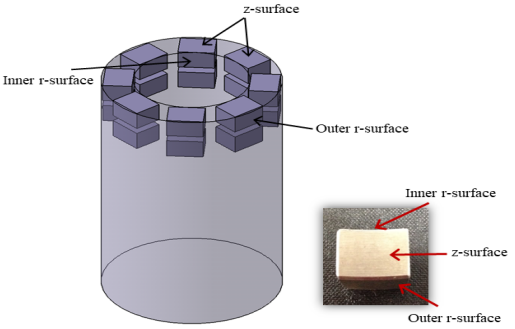

Fig. 3. Specimen geometry for optical microscopy observation.

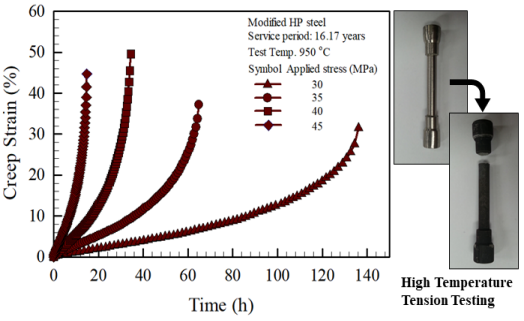

Fig. 4. High temperature creep test result. (service period 16.17 years)

Table 2에 나타내었다.

Fig. 3과 같이 8개의 개질로 튜브에서 ASTM E8 표준에 따라 시편을 가공하였다. 사용온도 950 ℃의 온도 조건, 25 ~ 55 MPa 응력 조건에서 고온인장시험을 실시하였고 잔여 크리프 수명을 측정하

였다 [2,7,11]. 이번 연구에서 사용한 수명 수명 측정값은 40, 45 MPa 응력조건에서 측정한 잔여 크리프 수명값을 이전 연구에서 인용하여 사용하였다. Fig. 4는 16.2년 사용한 튜브의 950 ℃ 온도 조건에서 고온인장 크리프 시험한 결과이다.

샘플링한 튜브의 외표면을 Outer r-surface, 면을 z-surface, 내면을 Inner r-surface로 정의 하였다. 관찰용 시편을 입자 크기가 320 ~ 2,400인 탄화규소 성분의 연마지와 물을 사용 하여 연마하였다. 다이아몬드 연마제와 연마천 6 ㎛, 1 ㎛를 사용하여 광택 작업을 수행 하였으며, 광택 작업을 한 시편은 에탄올 용액에서 초 음파 기계를 사용하여 세척했다.

염산과 질산을 3:1로 혼합한 글리세롤이 포함 된 Glyceregia 식각액을 사용하여 10초 동안 에칭 작업을 하였다. 각 시편의 삼방향의 표면 에 대하여 광학 현미경을 사용하여 50 배율에서 금속 미세조직을 관찰하였다. 관찰 부위가 매우 작은 관계로 대표성을 확보하기 위해 5개의 각각 다른 위치에서 조직을 관찰 하여 측정값을 평균하여 사용하였다. 석출된 탄화물의 면적분율을 분석하기 위하여 정량적 이미지분석 프로그램인 ImageJ를 사용하였다. 석출물의 면적분율은 오스테나이트 기지 내부에 석출물의 양을 면적비로 나타낸 값이다. ImageJ를 사용하면 관찰한 OM 이미지에서 석출물의 면적분율을 정량적으로 측정할 수 있다[9].

Ⅲ. 결과 및 토론

Fig. 5는 0(virgin), 1.8, 6.0, 7.2, 8.5, 9.7, 16.2년 사용한 개질로 튜브의 Outer r-surface의 광학현미경 관찰사진이다. Fig. 5의 (a)(b)는 설비 사용 중 고온의 열열향을 받지 않은 부위의 시편으로 신재에 해당하는 조직이다. 이 시편의 신재 mod HP강의 금속미세조직을 보면 오스테나이트 기지(matrix)에 결정립을 따라 탄화물 이 석출되어 있다. Fig. 5의 (c)~(h)는 고온에서 사용 연수가 증가함에 따라 오스테나이트 기지 내부에 미세한 점 모양의 2차 탄화물이 형성되고 생성된 미세 탄화물은 사용시간이 증가함에 따라 결정립계를 따라 커지고 서로 연결 되고 있는 것을 관찰할 수 있다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 관찰한 OM사진을 이미지 분석 프로그램 ImageJ를 사용하여 변환한 사진이다. 이미지 분석 프로그램을 사용하여 Fig. 5 OM사진은 오스테나이트 기지를 흰색으로, 기지 내부에 석출된 탄화물은 검은색으로 나타내었다. 석출된 탄화물의양과 오스테나이트 기지의 비율을 구분하여 정량적으로 나타내었고, 측정된 5개의 탄화물 면적

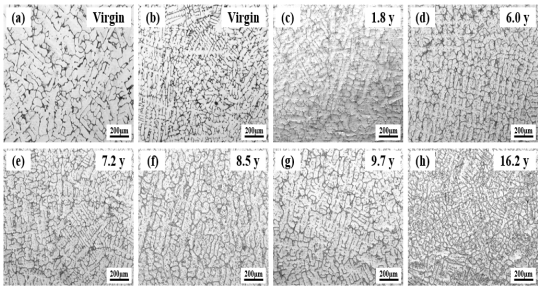

Fig. 5. OM image of precipitates on the outer r-surface of reformer tubes with different serviced periods.

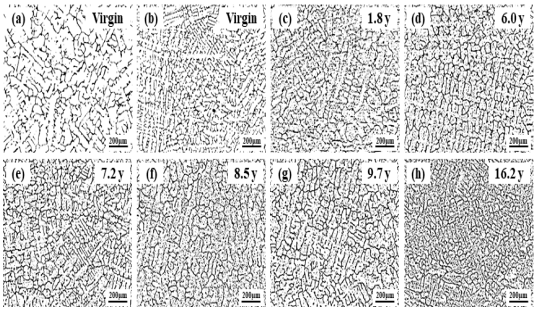

Fig. 6. A photo converted to black and white for quantitative analysis.

분율과 평균값을 Table 3, 4, 5에 나타내었다.

Table 3은 Outer r-surface, Table 4는 z-surface, Table 5는 Inner r-surface의 시험응력 40 MPa일 경우의 석출물의 면적분율과 평균값을 나타내었다. Table 6은 Outer r-surface의 경우 45 MPa 시험응력 조건에서 값을 나타내었다.

사용하지 않은 신재(#17-1, #4)에서 측정한 석출물의 면적분율은 사용재에 비해서 작으며, 사용시간이 증가되거나 재질의 노화가 진행될수록 석출물의 면적분율이 증가하는 경향을 보인다. 고온 크리프 시험은 사용 시간이 다른 8개의 개질로 튜브의 시편을 950 ℃의 온도조건, 40 MPa 응력조건에서 수행하여 측정한 잔여 크리프 수명과 도출한 LMP를 Table 3~5에 나타내었다. 외면에서의 실험결과를 재차 확인하고 비교 · 검증하기 위하여 Outer r-surface의 경우에 동일 온도, 45 MPa 응력 조건에서 잔여 크리프 수명과 LMP를 Table 6에 나타내었다. 고온 크리프시험결과 40, 45 MPa 하중조건 모두 신재(#17-1, #4)에서 가장 긴 잔여 크리프 수명이 나타났고 튜브의 사용 시간이 증가할수록 잔여

Table 3. Results of between LMP and area fraction of carbide according to creep life under 40 MPa load condition of reformer tube at outer r-surface

Tube No.	Serviced period (years)	Residual Creep Life under 40 Mpa (h)	LMP (×10³)	Area Fraction of Precipitate on Outer r-surface (%)					
				1	2	3	4	5	Mean
#17-1	0 (virgin)	225.03	30.88	12.16	12.34	12.37	12.38	13.50	12.55
#4	0 (virgin)	219.87	30.87	15.14	15.45	15.73	15.97	16.00	15.66
#19	1.80	90.17	30.40	17.82	18.69	19.30	19.47	19.68	18.99
#17-2	6.00	47.37	30.06	19.90	20.23	20.31	20.39	20.89	20.34
#56	7.20	32.31	29.85	20.85	21.38	21.51	21.69	21.85	21.46
#53	8.50	34.27	29.88	21.10	21.19	21.30	21.86	22.15	21.52
#52	9.67	35.82	29.91	21.17	21.53	21.98	22.53	22.86	22.01
#26	16.17	34.42	29.89	26.96	27.28	27.64	27.71	27.90	27.50

Table 4. Results of between LMP and area fraction of carbide according to creep life under 40 MPa load condition of reformer tube at z-surface

Tube No.	Serviced period (years)	Residual Creep Life under 40 Mpa (h)	LMP (×10³)	Area Fraction of Precipitate on z-surface (%)					
				1	2	3	4	5	Mean
#17-1	0 (virgin)	225.03	30.88	12.16	12.34	12.37	12.38	13.50	12.55
#4	0 (virgin)	219.87	30.87	15.14	15.45	15.73	15.97	16.00	15.66
#19	1.80	90.17	30.40	16.46	18.11	18.95	16.76	17.76	17.61
#17-2	6.00	47.37	30.06	17.23	18.29	18.50	18.86	17.63	18.10
#56	7.20	32.31	29.85	18.64	19.01	20.19	18.10	19.30	19.05
#53	8.50	34.27	29.88	21.85	20.97	20.99	20.22	21.32	21.07
#52	9.67	35.82	29.91	22.78	22.41	21.93	21.44	21.26	21.96
#26	16.17	34.42	29.89	27.53	27.54	28.22	27.10	27.36	27.55

크리프 수명이 낮게 나타났다. 어느 정도 시간이 경과하면 노화(aging) 속도가 정체되는 경향을 보여주고 있다.

크리프 시험 결과를 바탕으로 시간과 온도의 함수인 LMP 매개변수를 사용하였으며 LMP의 식은 아래와 같다.

$$LMP=T[C+\log(t_r)]$$

LMP 파라미터 식에 사용되는 T는 사용온도 1223K, 재료상수 C=22.9, 응력조건에 따른 크리프 수명을 t_r(h)에 대입하여 LMP매개변수를 도출했다. 잔여 크리프 수명이 길수록 LMP값이 크게 나타났고, 수명이 짧을수록 LMP값은 작게 나타났다.

Table 3~6에 설명한 Outer/Inner r-surface, z-surface의 LMP 계산값과 탄화물의 면적분율과의 상관관계와 관계식을 Fig. 7~10에 나타내었다. 이들의 그래프에서 y축은 사용온도와 잔여수명을 포함한 LMP값, x축은 현장에서 측정하게 되는 개질로의 탄화물 면적분율(%)이다. 따라서 이 관계식을 사용

Table 5. Results of between LMP and area fraction of carbide according to creep life under 40 MPa load condition of reformer tube at inner r-surface

Tube No.	Serviced period (years)	Residual Creep Life under 40 Mpa (h)	LMP (×10³)	Area Fraction of Precipitate on Inner r-surface (%)					
				1	2	3	4	5	Mean
#17-1	0 (virgin)	225.03	30.88	12.16	12.34	12.37	12.38	13.50	12.55
#4	0 (virgin)	219.87	30.87	15.14	15.45	15.73	15.97	16.00	15.66
#19	1.80	90.17	30.40	15.71	16.03	15.23	16.03	16.68	15.94
#17-2	6.00	47.37	30.06	15.98	16.94	16.34	16.40	16.08	16.35
#56	7.20	32.31	29.85	19.46	18.87	21.39	19.04	19.24	19.60
#53	8.50	34.27	29.88	16.10	14.76	17.18	15.17	15.81	15.80
#52	9.67	35.82	29.91	17.68	17.20	17.83	17.11	17.76	17.52
#26	16.17	34.42	29.89	20.95	21.07	21.42	21.97	20.32	21.15

Table 6. Results of between LMP and area fraction of carbide according to creep life under 45 MPa load condition of reformer tube at outer r-surface

Tube No.	Serviced period (years)	Residual Creep Life under 45 Mpa (h)	LMP (×10³)	Area Fraction of Precipitate on Outer r-surface (%)					
				1	2	3	4	5	Mean
#17-1	0 (virgin)	94.48	30.42	12.16	12.34	12.37	12.38	13.50	12.55
#4	0 (virgin)	104.82	30.48	15.14	15.45	15.73	15.97	16.00	15.66
#19	1.80	31.37	29.84	17.82	18.69	19.30	19.47	19.68	18.99
#17-2	6.00	22.63	29.66	19.90	20.23	20.31	20.39	20.89	20.34
#56	7.20	-	-	20.85	21.38	21.51	21.69	21.85	21.46
#53	8.50	20.53	29.61	21.10	21.19	21.30	21.86	22.15	21.52
#52	9.67	-	-	21.17	21.53	21.98	22.53	22.86	22.01
#26	16.17	14.77	29.44	26.96	27.28	27.64	27.71	27.90	27.50

하면, 현장에 측정한 면적분율값으로부터 LMP 값을 평가할 수 있고, 여기에 사용온도 값을 넣으면, 잔여수명, t_r,을 평가할 수 있다.

LMP와 석출물의 면적분율 그래프에서 신재와 사용재의 간격이 넓고 사용기간이 서로 다른 사용재 간의 간격이 좁은 것을 관찰할 수 있다. 이는 설비가 초고온의 환경에서 작동되고 오랜 시간 사용될 때 사용 초기에 노화가 비교적 빠르게 진행되어 잔여수명 단축이 발생하지만, 일정 기간이 지나면 노화 속도도 늦어지고 이에 따른 잔여수명의 단축 속도도 느려지는 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 탄화물 석출은 기본적으로 탄소의 농도 구배에 따라 석출되는 것이 지만 조직 내에서는 탄화물이 석출되는 메커니즘이 다소 복잡해지기 때문에 단순히 설명하기는 쉽지 않다. 따라서, 그래프는 2차 다항식으로 나타낸 결과가 다른 n차 다항식에 비해 오차가 적어서 Fig. 6~10에 탄화물의 면적분율에

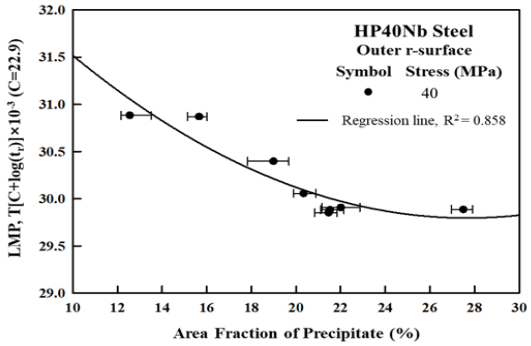

Fig. 7. LMP on the outer r-surface of reformer tube under 40 MPa stress vs. The area fractions of precipitates.

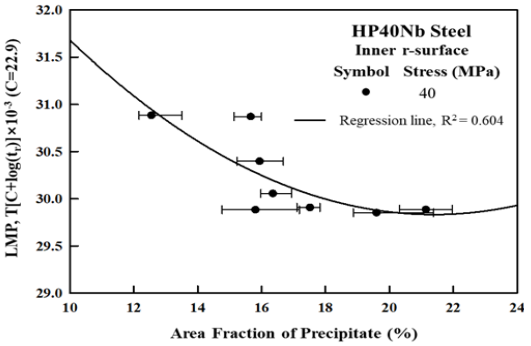

Fig. 9. LMP on the inner r-surface of re former tube under 40 MPa stress vs. The area fractions of precipitates.

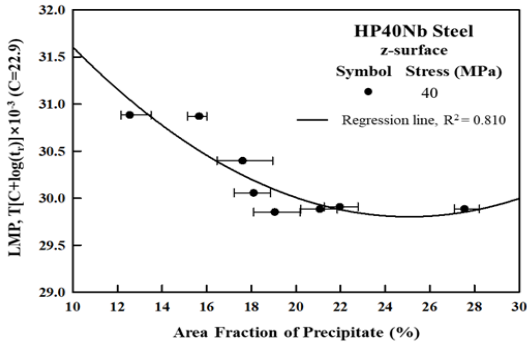

Fig. 8. LMP on the z-surface of reformer tube under 40 MPa stress vs. The area fractions of precipitates.

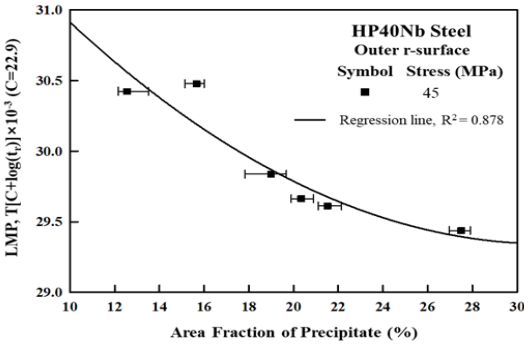

Fig. 10. LMP on the outer r-surface of re former tube under 45 MPa stress vs. The area fractions of precipitates.

따른 LMP의 관계식은 2차 다항식의 관계식으로 회귀선을 나타내었다. 이 관계식 결과, Fig. 7~9에서 보면 Outer r-surface와 z-surface에서 LMP와 측정한 석출물 면적분율의 상관관계 신뢰도(R^2)는 Inner r-surface 보다 높았다. 이는 개질로 튜브가 원심주조방식으로 제작되어 튜브 외면에 비해 내면이 불규칙한 미세조직을 가지기 때문에 Inner r-surface에서 그래프의 신뢰도가 다른 면에 비해 낮게 도출된 것으로 판단된다. 따라서, 잔여 크리프 수명을 측정하기 위해서는 튜브를 절단하지 않고도 측정할 수 있는 Outer r-surface가 신뢰도도 높고 적용도 용이하므로, 개질로 튜브의 수명평가를 위해서는 튜브의 외표면을 표면복제하여 금속미세조직을 관찰하는 것이 실용적이고 효율적이라고 결론지을 수 있다. 실제 석유화학 플랜트에서 수행하는 Turn-around 기간에 개질로 튜브의 외표면을 표면복제하여 탄화물 석출량의 정량적인 탄화물 면적분율을 측정한다면 누적된 데이터의 관계식에 대입하여 LMP를 구할 수 있다. 외표면의 경우 관계식은 크리프 시험 응력이 45 MPa인 경우에도 우수하였음을 확인하였고, 이를 Fig. 10에 나타내었다. 도출한 LMP매개변수를 구성 방정식에 대입하여 사용온도 T(1223K), 재료상수 C(22.9)를 적용하면 잔여 크리프 수명(t_r)을 추정할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

950℃에서 0(virgin), 1.8, 6.0, 7.2, 8.5, 9.7과 16.2년 사용한 mod HP강 개질로 튜브의 금속 미세 조직을 관찰하여 정량적인 탄화물 면적 분율을 측정했고 결론은 다음과 같다.

1) 사용시간이 증가함에 따라 잔여 크리프 수명 과 LMP는 감소하며, 반면에 탄화물 면적분율은 증가하므로 LMP와 탄화물 면적분율의 상관관계로부터 잔여수명을 평가할 수 있다.

2) 개질로 튜브의 Outer r-surface에 대해 탄화물 면적분율과 LMP 관계식이 가장 신뢰도가 높았으며, 이 경우 탄화물 면적분율에 따른 LMP의 관계식을 도출 했다.

3) 석유화학 플랜트의 Turn-around 기간에 현장에서 표면복제법을 사용하여 탄화물의 면적분율을 측정할 수 있고, 측정값에 따른 개질로 튜브의 잔여 크리프 수명을 평가할 수 있는 방법을 제시하였다.

REFERENCES

[1] C. J. Liu and Y. Chen, “Variations of the microstructure and mechanical properties of HP40Nb hydrogen reformer tube with time at elevated temperature”, *Materials and Design*, 32(4), 2507-2512, (2011)

[2] V. H. Dao, J. S. Song, J. Y. Kim, and K. B. Yoon, “Creep deformation characteristics of mi croalloyed HP40Nb steel at 950℃”, *Journal of Mechanical Science and Technology,* 33(10), 4813-4821, (2019)

[3] K. Guan, H. Xu and Z. Wang, “Analysis of failed ethylene cracking tubes”, *Engineering Failure Analysis*, 12(3), 420-431, (2005)

[4] E. Guglielmino, R. Pino, C. Servetto and A. Sili, *Handbook of Materials Failure Analysis with Case Studies from the Chemicals*, Concrete and Power Industries, Elsevier Ltd., 69-91, (2016)

[5] API Standard 530, *Calculation of Heater -Tube Thickness in Petroleum Refineries, American Petroleum Institute*, Washington D.C., USA (2015)

[6] J. M. Gong, S. T. Tu and K. B. Yoon, “Dam age assessment and maintenance strategy of hydrogen reformer furnace tubes”, *Engineering Failure Analysis*, 6(3), 143-153, (1999)

[7] J. M. Yu, V. H. Dao, V. Lok, T. G. Le, and K. B. Yoon, “Asymptotic creep deformation behavior of modified HP steel after long-term service”, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(5), 1997-2009, (2020)

[8] G. Yang, J. K. Lim, K. J. Lee and K. B. Yoon, “A study on improvement of replication method by applying electrolytic polishing technique”, *Proc. of Evaluation, Inspection and Monitoring of Structural Integrity in Fracture Mechanics and Applications*, Hangzhou, Zhejiang Province, China, 553-556, (2008)

[9] J. Bullet, T. Gaujoux, V. Borderie, I. Bloch and L. Laroche, “A reproducible automated seg mentation algorithm for corneal epithelium cell images from in vivo laser scanning confocal microscopy”, *Acta Ophthalmologica*, 92(4), 312-316, (2014)

[10] K. Guan, H. Xu and Z. Wang, “Analysis of failed ethylene cracking tubes”, *Engineering Failure Analysis*, 12(3), 420-431, (2005)

[11] ASTM A608/A608M-20, *Standard Specification for Centrifugally Cast Iron-Chromium-Nickel High-Alloy Tubing for Pressure Application at High Temperatures, ASTM International*, West Conshohocken, PA. (2020)

[12] H. J. Bang, T. g. Le, J. Y.Kim, H.K.Ryu K. B. Yoon, “Quantitative study on area fraction of precipitated carbides of HP40Nb steel as a function of service period”, *Journal of Mechanical Science and Technology,* 35(9), 3781-3792, (2021)