

화력발전소용 0.5Cr 0.5Mo 0.25V 강 곡관배관의 크리프 손상평가

Assessment of Creep Damage on a High Temperature Pipe Bend of 0.5Cr0.5Mo0.25V Ferritic Steel for Thermal Power Plant

현중섭^{1,✉}, 허재실¹, 김봉수¹

Jung Seob Hyun^{1,✉}, Jae Sil Heo¹ and Bong Soo Kim¹

¹ 한국전력공사 전력연구원 수화력발전연구소 (Power Generation Research Laboratory, KEPRI)

✉ Corresponding author: jshyun@kepri.re.kr, Tel: 042-865-5612

Manuscript received: 2009.7.24 / Revised: 2009.8.27 / Accepted: 2010.1.18

Components in thermal power plants are subjected to service conditions under which creep damages take place causing material exhaustion. Comprehensive creep damage investigations have been performed on a 0.5Cr0.5Mo0.25V pipe bend which had been taken out of service after 117,603h and 501 start-ups because of severe cracks. The propagation of creep damage in a long term exposed pipe bend has been analysed by the replication, Indentation and hardness tests. Also, Calculation of creep lifetime has been investigated in order to verify actual lifetime of a damaged pipe bend. By measuring diametrical expansion, Accumulated creep strain and creep strain rate were calculated. Calculated results of creep lifetime on the Larson-Miller Parameter method are good agreement with actual service-exposed hour.

Key Words: Creep Damage (크리프 손상), Microstructural Degradation (금속조직 열화), Creep Strain (크리프 변형률), Hardness (경도), Creep Cavity (크리프 기공)

1. 서론

화력발전소를 비롯한 국내의 발전설비들은 최근 증가된 전력수요와 설비의 효율향상을 위해서 더 높은 이용율과 운전온도를 요구받고 있어 점점 더 가혹한 환경에 노출되고 있다. 또한 신규 건설 부지 확보의 어려움으로 인해 장기사용 되는 발전소가 증가하여 현재는 전체 화력발전소 중 30% 이상이 25년 이상 장기 사용되고 있는 실정이다. 이러한 장기사용 고온 설비들은 운전시간 증가에 따라 지속적으로 크리프(creep) 손상이 누적되어 수명이 단축되게 되므로 정확한 수명을 예측하고자 다양한 평가방법이 개발되고 있다. 특히, 화력발전설비중 고온배관은 보일러에서 발생된 증기를 터빈으로 이송시키는 역할을 하며, 설계조건이 운

전중 500℃ 이상의 고온에서 사용되기 때문에 운전시간에 따른 크리프 손상을 지배적으로 받으며, 특히 분기배관이나 곡관부 등 응력집중부에 손상이 집중되게 된다. 따라서, 이러한 손상평가를 위해 신재 및 사용재의 열화시간에 따른 금속조직 관찰에 의한 열화 평가나, 크리프 변형률 및 응력 계산, 유한요소해석에 의한 크리프 잔여수명 평가 방법이 주로 사용되고 있다.¹⁻⁵

일반적인 크리프 손상은 재료가 고온에서 장시간 동안 일정한 응력을 받으면 미세조직과 함께 기계적인 특성도 변하게 된다. 특히, 미세조직은 운전시간과 작용응력에 따라 크리프 기공(cavity)의 크기와 산술적인 기공 수가 증가하며, 탄화물(carbides)의 크기를 증가시키고, 탄화물 사이의 간격을 크게 하여 경도(hardness) 등의 기계적 특성이

감소하게 한다.¹ 따라서, 현재 현장에서 일반적으로 평가하는 방법으로 장기 사용된 고온배관의 수명을 평가하기 위해 금속조직 표면복제검사(replication)을 통해 미세 조직변화를 평가하거나, 경도측정을 통해 재질 강도변화를 평가함으로써 잔여수명을 평가하고 있다. 그러나, 이러한 배관의 표면 평가방법은 배관의 표면에서만 시험되는 방법으로 정확한 재질의 손상평가를 위해서는 표면 내부에서의 조직변화나 강도변화 등 전체 평가를 통해 표면과 내부의 관계를 규명하여 표면측정을 통한 손상 평가의 정확성 향상이 필요한 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 117,603 운전시간과 501회의 기동정지후 대형 균열이 발견된 곡관배관에 대해 균열방향으로 조직 및 물성변화 평가를 통해 크리프 손상 경향을 분석하고, 크리프 손상평가법인 Larson-Miller Parameter 법을 통해 크리프 수명을 계산함으로써, 화력발전소 고온배관에 많이 사용되는 0.5Cr0.5Mo0.25V 강 곡관배관의 운전중 크리프 손상평가 정확성을 향상시키고자 하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 시편

교체 폐기된 주증기 배관(OD 446.9mm x t52mm)의 설계온도는 540℃, 설계압력은 17.06MPa 이며, 발생한 균열은 수직배관 하부 곡관부의 외곡면 중심을 기준으로 배관의 길이 방향으로 최대 약 1.2m, 두께 방향으로 약 40mm 성장하여 잔여두께가 12mm 정도 남아 있다. 주증기 배관의 재질은 0.5Cr0.5Mo0.25V 강(DIN 17175 14MoV63)으로 화학적 조성과 기계적 물성은 각각 Table 1, 2 와 같다. 재질의 특징으로는 기존 화력발전소용 고온 배관 재질로 많이 사용되는 1Cr0.5Mo, 2.2Cr1Mo 강에 비해 크롬(Cr)의 함량을 줄이고 바나듐(V)을 함유시켜 크리프 강도를 증가시키고자 하였으나, 600℃ 이상의 고온에서 재 가열시 VC(vanadium carbide)가 입계에 석출되고 인성(toughness)을 감소시켜 균열을 발생시키기 때문에 사용재의 용접보수를 어렵게 하는 것으로 알려져 있다.^{5,6} Fig. 1은 주증기 배관라인의 형상과 균열이 발생된 곡관부 위치를 나타내며, Fig. 2는 교체된 곡관부의 균열 및 건전부 등 시험을 위해 3부위(Area 1, 2, 3)를 지정하고 절단된 균열부(Area 1)의 표면 및 단면 모습을 나타낸다.

Table 1 Chemical composition of 14MoV63 steel⁵

DIN	C	Si	Mn	P _{max}	S _{max}	Cr	Mo	V
17175	0.10-0.18	0.15-0.35	0.30-0.60	0.035	0.035	0.30-0.60	0.50-0.65	0.25-0.35

Table 2 Mechanical properties at room temperature⁵

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Longitudinal elongation (%)	Transverse elongation (%)
490-690	365	20	18

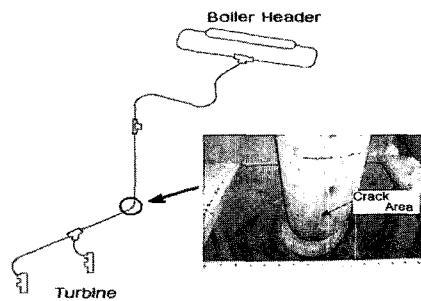


Fig. 1 Drawing of Main steam pipeline and crack damaged location



(a) Area 1, 2, 3 in the elbowed pipe



(b) Surface and cross sectional specimens in the Area 1

Fig. 2 Test positions and sample specimens

2.2 실험방법

균열이 발생된 내면 및 외면 곡관배관의 균열이 없는 부위, 균열부위 및 균열진전에 따른 미세조직 관찰을 위해 곡관배관중 Area 1, 2, 3에 대해 주 균열이 발생된 방향(0°)을 기준으로 원주, 길이 및 두께방향으로 금속조직 표면복제검사를 실시하였다.

기계적 물성 평가를 위해 압입(indentation) 시험과, 경도(hardness)를 측정하였고, 부가적으로 치수측정을 수행하였다. 먼저, 압입시험은 금속재료의 계장화 압입시험(KS B 0950) 장비인 FRONTICS사의 AIS 2000 을 이용하여 주 균열이 발생된 Area 1 을 절단하여 단면의 두께방향으로 인장강도, 항복강도 등을 측정하였다. 다음, 경도측정은 각각 Area 1, 2, 3 에 대해 표면처리후 30mm 간격으로 균열 길이방향과 원주방향으로 비커스(vickers) 및 로크웰(rockwell) 경도값을 측정하였다. 치수측정은 균열의 길이와 깊이, 절단된 배관의 양쪽 끝 직경과 두께를 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정하였다.

Fig. 3 은 곡관배관의 각 시험위치를 나타내며, Fig. 4 는 주 균열이 발생된 Area 1 에서 시편을 절단하여 미세조직 관찰을 위한 제작한 시편이다.

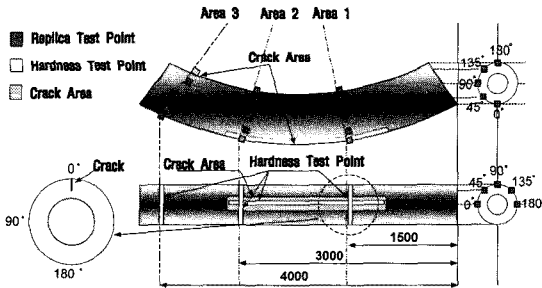


Fig. 3 Measured positions for elbowed pipe

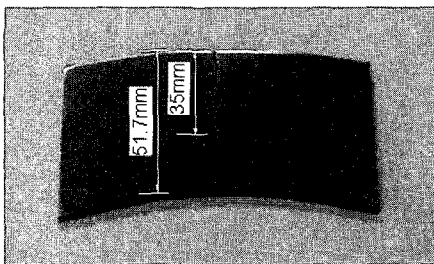


Fig. 4 Test specimen of cracked Area 1

이 전혀 관찰되지 않은 단계를 Class ‘A’, 크리프 기공이 발생되었지만 독립적으로 분포하고 있는 단계를 Class ‘B’, 기공들이 근접하여 연결되어 있는 단계를 Class ‘C’, 그리고 미세균열까지 발전한 단계를 Class ‘D’ 로 분류하였다.

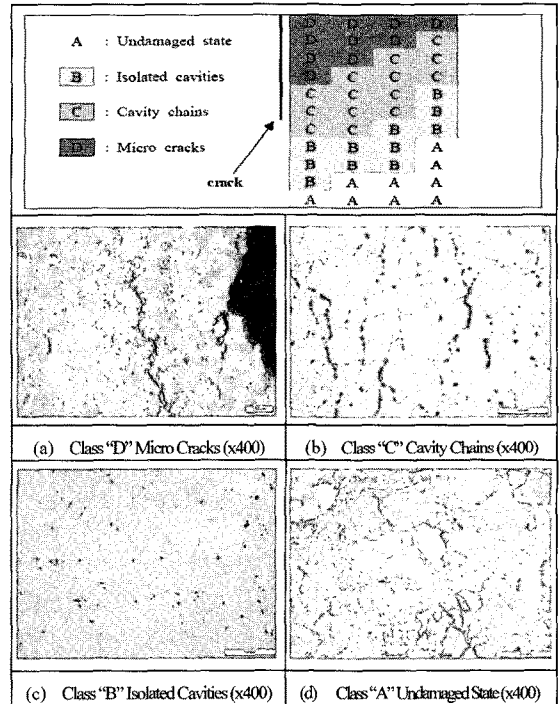


Fig. 5 Damage profile of the crack Area

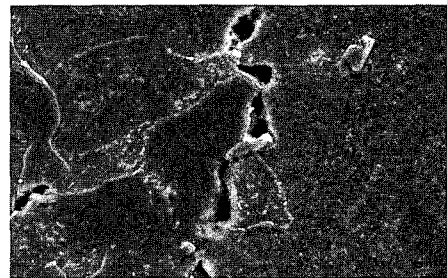


Fig. 6 Creep cavities (SEM, x3000, scale : 10 μm)

3. 실험결과

3.1 미세조직 관찰결과

균열주변의 크리프 손상을 정량적으로 평가하기 위해 이미지 분석을 통해 손상정도를 Neubauer 법에 따라 4 등급으로 분류하였다. 즉, 크리프 기동

Fig. 5 는 시험편의 주 균열을 따라 표면에서 두께방향으로 분석한 미세조직의 분포를 나타낸다. 두께의 약 1/3 까지는 미세균열이 존재했고, 그 아래에 1/3 정도가 연결된 크리프 기공, 나머지 영역에서 독립된 기공, 그리고 배관 내면 약 10% 영역에서만 아직 균열에 의한 크리프 손상을 받지 않

은 것으로 분석되었다. 이러한 균열 분포는 표면에서 주 균열을 중심으로 좌, 우 100mm 까지 미세 균열이 산재되어 있음을 확인하였다.

Fig. 6 은 균열 주변의 크리프 기공과 탄화물을 전자현미경(SEM)으로 관찰한 것으로서, 단독 크리프 기공의 크기는 대략 $30\mu\text{m}^2$ 이고, 탄화물의 경우 약 $20\mu\text{m}^2$ 로서, 고온에서 장시간 사용되어 탄화물이 조대화 되고 탄화물 간격과 크리프 기공의 크기가 커지는 일반적 현상과 유사하게 탄화물과 크리프 기공의 크기가 커지고, 탄화물 간의 간격 또한 멀어짐을 확인할 수 있었다.

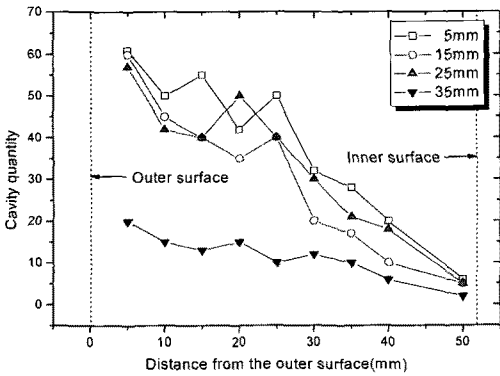


Fig. 7 Cavities distribution near cross-sectional crack

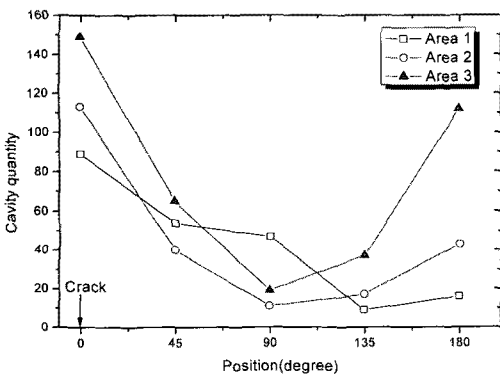


Fig. 8 Cavities distribution over each position

Fig. 7 은 주 균열이 발생된 Area 1 에서 채취한 절단시편에 대해 균열위치로부터 각각 5, 15, 25, 35mm 떨어진 곳에서 배관 표면으로부터 내부 두께방향으로 크리프 기공 수를 분석한 결과이다. 균열에서 25mm 까지는 유사한 분포를 가지나, 그 이상에서는 크리프 기공 수가 현저하게 감소되며, 두께방향으로는 Fig. 5 의 두께방향으로의 등급과

같이 기공 수가 일정하게 감소되고 있다.

Fig. 8 은 각각 Area 1, 2, 3 에서 원주방향으로 외곡면 (extrados, 0°)부터 내곡면(intrados, 180°)까지 45° 간격으로 단위면적당($214,400\mu\text{m}^2$) 크리프 기공 수를 분석한 것이다. 모든 위치에서 기공 수는 외곡면에서 가장 많고, 반대방향으로 갈수록 적어지다가 내곡면에서 다시 증가하고 있다. 이것은 운전중 곡관부에서 발생하는 응력차이가 측면보다는 곡관부의 외곡면과 내곡면에서 가장 큰 응력이 발생되어 나타나는 현상으로 분석되며, 외곡면에서 Area 1 보다 다 Area 2, 3 의 기공 수가 큰 것은 이미 Area 1 에서는 많은 연속 기공들이 주 균열로 성장되었기 때문으로 판단된다. 따라서, 미세조직 분석을 통해 표면 주균열을 중심으로 좌, 우 100mm 까지 미세균열이 존재하고 두께방향으로는 총 두께의 90%까지 크리프 손상을 받으며, 원주방향으로는 응력이 큰 외곡면과 내곡면 중심에서 크리프 손상이 크게 발생함을 알 수 있었다.

3.2 기계적 물성 평가

3.2.1 강도 측정결과

주 균열이 발생된 Area 1 의 절단시편(Fig. 4)에 대해 균열 주변의 강도를 배관 표면에서 내부 두께방향으로 압입시험을 통해 강도를 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 9, 10 과 같다.

Fig. 9 는 압입시험을 통한 항복강도와 인장강도 측정결과를 나타낸다. 항복강도는 표면에서 두께방향으로 70MPa 이상이 감소하나, 인장강도는 20MPa 이내로 적게 감소하는 경향을 나타내고 있다. 시편 제작시 관심부위인 두께방향으로 시편을 제작하여 표면에서의 측정은 불가능하였으나, 두께방향으로의 항복강도 결과로부터 표면의 항복강도는 약 300MPa 정도가 될 것으로 예측된다. 이러한 표면의 항복강도는 Table 2 에서의 상온 항복강도값보다 훨씬 낮은 값으로, 표면열화에 의해 항복강도가 낮아진 것을 알 수 있다.

Fig. 10 은 압입시험을 통한 항복비와 가공경화지수 측정결과를 나타낸다. 항복비는 표면으로 갈수록 낮아지고, 가공경화지수는 약간 높아지는 경향을 보이고 있는데, 항복비가 낮아진다는 것은 항복점과 인장강도 사이의 격차가 더 커짐을 의미한다. 이러한 격차가 커질수록 재료는 동일한 외력에도 훨씬 더 빨리 소성변형을 일으킨다는 것을 의미하며, 가공경화지수가 증가한다는 것은 재질이 단단하고 강해지나, 외부의 저항에는 약해지

특성을 나타내고 있다.

따라서, 본 강도평가를 통해 균열이 표면에서 내부로 진행되면서 균열주위의 항복강도와 항복비는 커지고 인장강도와 가공경화지수는 작아지며, 이러한 특성은 내부 두께방향으로 열화에 의해 강도가 점차 낮아지고 균열이 내부로 진행할수록 성장속도가 더 빨라지는 것을 알 수 있었다.

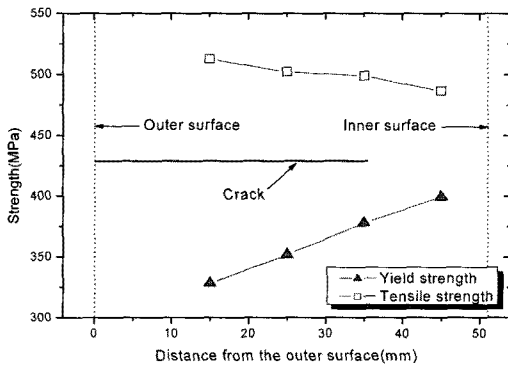


Fig. 9 Yield strength & tensile strength

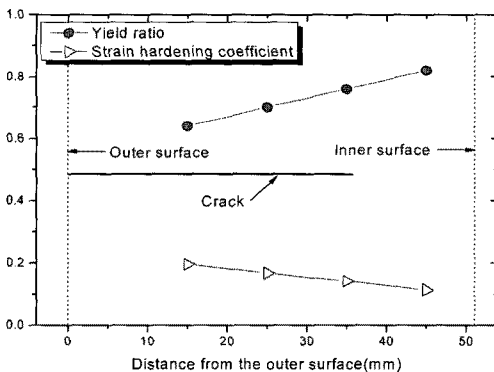


Fig. 10 Yield ratio & strain hardening coefficient

3.2.2 경도 측정결과

경도시험은 재료의 강도를 평가하기 위해 현장에서 쉽게 측정되는 방법으로 많이 사용된다. 현장에서는 이동용 경도측정기인 비커스 경도계를 이용하여 경도를 측정하였으며, 절단된 시편(Fig. 4)에 대해서는 실험실에서 정밀측정이 가능한 로크웰 경도계를 이용하여 경도를 측정하였다.

Fig. 11 은 주 균열이 발생된 외곡면 표면을 따라 주 균열 상부에서 하부(area 1→area 3)에 이르기까지 표면에서의 비커스 경도 측정결과를 나타낸다. 경도값이 균열 상부에서는 150Hv, 균열 하부에서는 120Hv 로 측정되어 주 균열 하부가 더 낮은

경도차이가 발생되었다. 이것은 실제로 Area 1 에 주 균열이 발생되었지만, Area 2 및 특히 Area 3 부위에 더 많은 미세 균열이 수가 많으며, Fig. 8 에서와 같이 크리프 기공 수가 더 많이 분포하는 것으로 보아, 균열의 하부 측이 더 열화가 많이 진행된 것으로 평가된다.

Fig. 12 는 Area 1, 2, 3 에서 원주방향으로 0°에서 180°까지의 경도를 측정된 결과이다. 균열이 발생된 부위(0°)인 외곡면에서는 배관 상부에서 하부로 갈수록(area 1→area 3) 경도가 낮아지고, 내곡면에서는 대체적으로 정반대의 경도 결과를 볼 수 있다. 이렇게 상부에서 하부로 갈수록 원주방향의 100° 부근을 지나가면서 크기가 반대로 되는 현상은 위에서 설명한 배관 상부에서 하부로 갈수록 열화가 심해진다는 것 이외에도, 열화의 방향도 상부에서 하부로 내려갈수록 배관 외곡면에서 내곡면으로 변한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 배관 하부(area 3)에서는 열화의 정도나 균열발생 확률이 배관 외곡면보다 배관 내곡면이 높다고 판단된다. 이것은 방향에 따른 크리프 기공 수를 측정된 Fig. 8 에서의 결과와 동일한 현상이다.

Fig. 13 은 Area 1 에서 채취한 절단시편의 균열의 깊이 방향으로 균열주변에 대해서 경도를 측정된 결과를 나타내는 그래프이다. 경도는 배관 내부에서 높고 표면으로 갈수록 감소됨을 알 수 있다. 이것은 재료의 열화가 배관표면에서 먼저 시작되어 내부로 확산된다는 것을 말해준다.

따라서, 경도측정결과를 종합할 때 주 균열이 발생된 배관상부(area 1)는 외곡면 표면(0°)에서 재질열화가 높고 배관하부(area 3)로 갈수록 내곡면(180°)의 열화가 높은 것으로 평가된다.

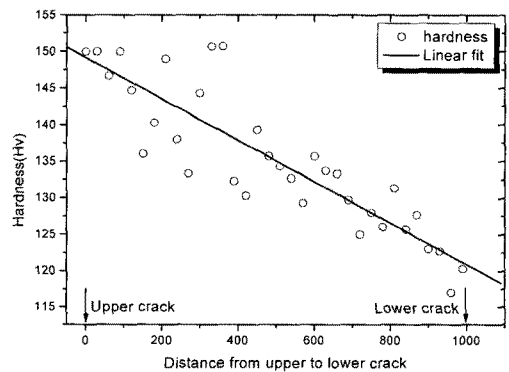


Fig. 11 Hardness distribution from upper to lower crack

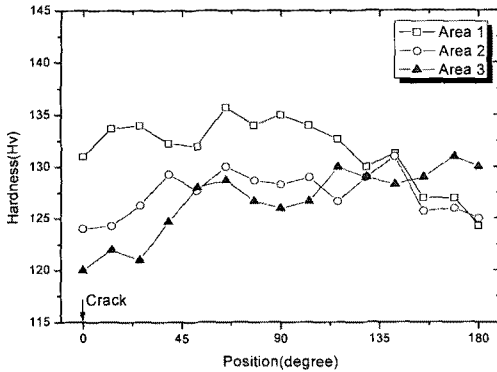


Fig. 12 Hardness distribution over each position

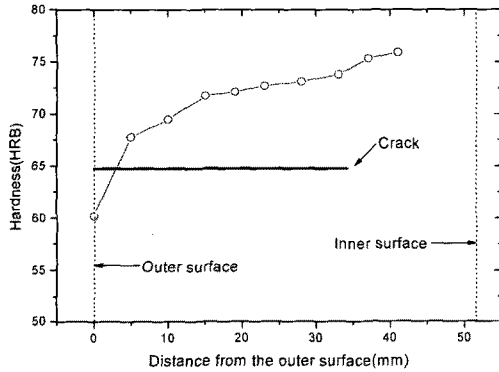


Fig. 13 Hardness distribution through the thickness

3.3 치수 측정결과

Table 3 은 손상된 곡관 배관의 상, 하부에 대해서 원주방향으로의 두께와 평균 직경을 측정할 결과를 나타낸다. 균열이 발생된 부위(0°)의 두께가 상대적으로 감육이 많으나, 설계두께인 52 mm 와 실제 제작 두께와는 차이가 있으므로 두께 감육에 의한 손상은 고려하지 않았다. 측정결과, 곡관배관 상부(area 1)에 비해서 배관 하부(area 3)의 직경이 더 팽창되어 있으며, 이것은 배관 하부가 크리프 손상을 더 많이 받았음을 나타낸다. 이 결과는 Area 1, 2 에 비해 Area 3 이 크리프 기공수가 많은 Fig. 8 이나 경도가 낮은 Fig. 12 와 일치하는 내용으로 분석된다.

Table 3 Measured thickness & Diameter of pipe

Position	Thickness(mm)				Average Diameter (mm)
	0°	90°	180°	270°	
Upper	52.8	56.6	58.9	55.4	455.35
Lower	53.5	54.4	56.9	57.5	456.97

3.4 크리프 수명평가

3.4.1 Larson-Miller Parameter 법에 의한 평가

손상된 곡관배관의 수명이 현재 운전시간에 수명이 소진되어 균열이 발생되었는가를 평가하기 위해 측정된 치수를 이용하여 크리프 수명을 평가하고자 하였다.

크리프 수명평가는 크리프시험 데이터베이스를 이용하여 크리프 수명을 평가하는 Larson-Miller Parameter(LMP)법을 통해 평가하였으며, Fig. 14 는 NRIM 크리프 데이터를 이용하여 LMP 법으로 cueve fitting 한 곡선을 나타낸다.

응력계산은 배관의 후프응력(hoop stress)에 의해 계산되므로, 본 연구에서 배관에 발생된 거시균열은 배관 길이 방향으로, 미세균열, 크리프 기공의 연결방향들도 모두 길이 방향으로 발생되었으므로 후프응력을 식(1)과 같이 적용하여 계산하였다.

$$\sigma = \pi \times (R_o/R_i + 1) / 2 \times (R_o/R_i - 1) = 63.3 \text{ MPa} \quad (1)$$

여기서, σ : Hoop stress, π : Internal pressure, R_o , R_i : Outer, inner radius 를 나타낸다.

이 응력값을 LMP 법 fitting 곡선인 Fig. 14 를 이용하여 설계온도인 540°C에서 계산한 결과, 설계수명은 110,782 시간으로, 실제 운전시간인 117,603 시간과 유사한 결과로 평가되었다.

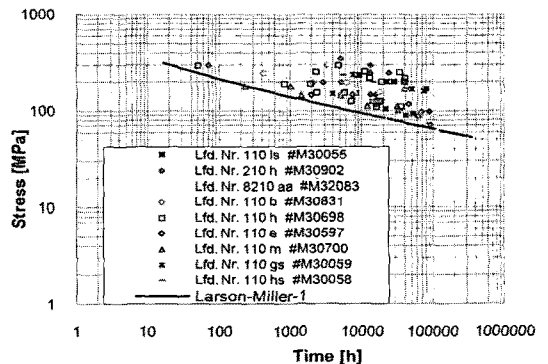


Fig. 14 Creep life results by Larson-Miller Plot

3.4.2 크리프 변형률에 의한 평가

손상된 곡관배관의 상, 하부에서 측정된 두께와 평균직경 데이터를 이용하여 크리프 변형률을 계산하고 타 참고문헌^{7,8}에서 크리프 변형률을 이용한 수명평가 방식을 이용하여 수명을 계산하였다.

먼저, 크리프 변형률은 설계직경을 초기직경

으로 가정하면 현재 팽창된 직경으로부터 식(2)와 같은 크리프 변형이 계산되며, 운전시간으로부터 식(3)과 같은 크리프 변형률이 계산된다.

$$\text{Creep strain}(\epsilon) = (456.2 - 446.9)/446.9 = 0.0207 \quad (2)$$

$$\text{Creep strain rate}(\dot{\epsilon}) = 0.0207/117,630\text{hr} = 1.76 \times 10^{-7}/\text{h} \quad (3)$$

이 결과를 참고문헌에서 계산한 방식을 통해 수명을 계산하였다.

참고문헌⁷의 크리프 변형률과 응력간 관계식 ($\epsilon^{0.25} = 3 \times 10^{-4} \sigma$)에서 이론적인 크리프 변형률은 $1.30 \times 10^{-7}/\text{h}$ 로 크리프 수명은 550 °C에서 76,895 시간이므로, Larson-Miller Parameter를 이용하면 사용 온도 540 °C에서는 144,894 시간이다. 따라서, 크리프 변형률 $1.30 \times 10^{-7}/\text{h}$ 이 실제 측정된 크리프 변형률 $1.76 \times 10^{-7}/\text{h}$ 보다 26% 낮은 값이므로 이를 대수적으로 평가하면 크리프 수명은 107,000 시간으로 평가된다.

참고문헌⁸의 신재와 열화제의 실험에 의한 Larson-Miller Plot을 이용하여, 계산된 Hoop stress로 크리프 수명을 평가하면 110,000 시간으로 평가된다.

따라서, 본 연구에서 후프응력 계산에 의한 LMP 법으로 수명을 계산한 결과, 손상이 발생한 현재 운전시간과 유사한 수명으로 평가되었으며, 치수측정에 의한 크리프 변형률 계산으로 참고문헌의 수명평가방식에 의한 평가에서도 유사한 수명으로 평가됨으로써, 후프응력에 의한 LMP 법과 크리프 변형률계산에 의한 수명평가가 향후 곡관 배관의 수명평가에 유용한 평가방식으로 활용될 것으로 판단된다.

4. 결론

540 °C의 고온에서 117,630 시간 동안 사용되다 대형 균열이 발생되어 교체된 0.5Cr0.5Mo0.25V (DIN 17175 14MoV63)재질의 곡관 배관에 대한 크리프 손상평가를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 균열부위의 미세조직 분석결과, 표면 주 균열을 중심으로 원주방향으로 좌, 우 100mm 까지 미세균열이 존재하고 주 균열 표면으로부터 두께 방향으로 총 두께의 90%까지 크리프 손상을 받으며, 원주방향으로는 응력이 큰 외곡면과 내곡면 중심에서 크리프 손상이 크게 발생된다.

(2) 압입시험결과, 균열이 표면에서 내부로 진행되면서 균열주위의 항복강도와 항복비는 커지고 인장강도와 가공경화지수는 작아지며, 이러한 특성은 내부 두께방향으로 열화에 의해 강도가 점차 낮아지고 균열이 내부로 진행할수록 성장속도는 더 빨라지는 것으로 평가되었다.

(3) 경도시험결과, 곡관배관에서 외곡면 중심은 표면이 재질열화가 높고 중심으로 부터 멀어질수록 내곡면의 열화가 높은 것으로 평가되었다.

(4) 균열손상이 발생한 곡관배관의 강도 평가를 통해 향후 배관표면의 강도 및 경도평가지 표면에서의 항복강도 300 MPa 이하, 경도 150 Hv 또는 80 HRB 이하가 되면 균열이 발생될 확률이 매우 클 것으로 평가되므로, 향후 곡관배관의 손상평가지 유용한 자료로 활용이 가능하다.

(5) 손상된 배관의 치수측정을 통한 크리프 변형률과 후프응력 계산에 의한 LMP 법 평가결과, 실제 운전시간과 유사한 계산결과를 얻었으며, 참고 문헌의 결과와도 유사한 크리프 수명을 얻을 수 있었다. 따라서, 향후 곡관배관의 손상평가지 치수측정에 의한 후프응력과 크리프 변형률 계산 방식으로 수명평가가 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Mustata, R. and Hayhurst, D. R., "Creep Constitutive Equations for a 0.5Cr 0.5Mo 0.25V ferritic Steel in the Temperature Range 565°C-675°C," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, No. 5, pp. 363-372, 2005.
2. Park, K. S., Lee, K. J., Chung, H. S., Kim, J. H., Jung, Y. J. and Endo, T., "Effect of Hardness and Substructure on Long-term Creep Behavior of Mod. 9Cr-1Mo Steel," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 21, No. 2, pp. 168-176, 2004.
3. Cane, B. J., "Remaining Creep Life Estimation by Strain Assessment on Plant," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 10, No. 1, pp. 11-30, 1982.
4. Dobrzanski, J., Zielinski, A. and Krzton, H., "Mechanical Properties and Structure of the Cr-Mo-V Low-alloyed Steel after Long-term Service in Creep Condition," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 39-42,

2007.

5. Zrilic, M. and Aleksic, R., "The Effect of Long Term Exposure to Elevated Temperature on Steam Line Steel Properties," *Thermal Science*, Vol. 7, No. 1, pp. 33-46, 2003.
6. Hide, T. H. and Sun, W., "Effect of Bending Load on the Creep Failure Behaviour of a Pressurised Thick Welled CrMoV Pipe Weldment," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79, pp. 331-339, 2002
7. Singh, R. and Singh, S. R., "Remaining Creep Life Study of Cr-Mo-V Main Steam Pipe Lines," *International Journal of Pressure Vessels & Piping*, Vol. 73, pp. 89-95, 1997.
8. Bendick, W. and Webber, H., "Analysis of Creep Damage and Material Exhaustion on a Pipe Bend," *VGB KRAFTWERKSTECHNIK*, Vol. 69, No. 9, pp. 817-825, 1989.