

特輯 : 구조물 경년열화와 수명평가

고온 증기 파이프의 잔여수명 평가

윤 기 봉*

Remaining Life Assessment of High Temperature Steam Piping

Kee Bong Yoon*

Key Words : Remaining Life Assessment, Main Steam Line, Aging, Degradation, Crack Growth, Creep, Fatigue, Replication, Grain Boundary Etching, Hardness

초 록

최근에 국내 화력발전설비도 사용 기간이 30년을 넘게 됨에 따라, 고온설비의 경년열화도 평가 및 수명예측 기술에 대한 연구가 활발해지고 있다. 본 논문에서는 1965년부터 사용되어 노후된 영월화력발전소 2호기의 주증기 파이프를 대상으로 실시한 열화도 및 수명평가 결과를 보고하였다. 주증기관의 취약부인 맞대기 용접부, 지류 용접부, Y부 및 T부 등의 용접부에 대해 표면복제법, 경도측정법을 사용하여 수명평가를 실시하였으며, 비파괴 검사에 의해 균열이 탐지된 경우에는 수명평가 컴퓨터 코드를 사용하여 균열성장에 의한 잔여수명을 계산하였다. 또한 파이프 모재의 잔여 수명은 해석적 방법에 의해 정량적으로 잔여수명을 계산한 후, 외경 패출량 측정, 입계부식법 등에 의해 재질 열화도를 정성적으로 평가하였다. 본 논문에서 사용한 기법 이외의 방법을 사용하여 수명평가 정확도를 개선하는 방향에 대한 의견도 제시하였다.

Abstract

Recently, more researches have been actively performed for the assessment of material degradation and residual-life of elevated temperature plant components, as some of domestic fossil power plants become older than 30 years. In this paper, results of on-site residual life assessment are reported for main steam pipes of Youngwol power station #2 which have operated since 1965. For critical weld locations such as butt welds, branch welds, Y-sections and a T-section, replication technique and hardness measurement technique were employed for life-assessment. When cracks were detected by conventional NDT tests, crack growth life was calculated using a computer code. On the other hand, for matrix of pipes, residual life was quantitatively estimated by an analytic method and

* 비회원, 중앙대학교 기계설계학과

material degradation was estimated qualitatively using diameter measurement data and grain-boundary etching method. Also, directions on further improvement of on-site life assessment techniques are proposed.

1. 서 론

세계 각 산업국은 공통적으로 대부분의 화력발전 설비들의 사용기간이 오래되어 원래 설계수명을 지나 30~50년 동안 사용되고 있으며 동구권에서는 70년동안 사용하고 있는 경우도 있다. 이러한 노후 발전소를 폐기하고 새로운 설비를 건설하려면 많은 경제적 부담이 따르고, 신축에 따른 부지 확보, 법적절차, 환경규제 등의 문제점 때문에, 기존설비를 폐기하지 않고 효율개선, 공해저감시설 등을 보완하여 수명을 연장하여 사용하는 것이 보편화 되어 있다. 따라서, 노후설비를 안전성 있게 사용하기 위해 보일러, 터빈 및 주증기 파이프 등의 주요요소들의 잔여 수명평가 기술 (residual life assessment technology)에 대한 연구¹⁾가 추진되어 오고 있으며, 국내에서도 한국전력 등의 관련 기관의 연구활동 및 관련 연구진의 학술활동²⁾도 활발하다. 최근에는 비파괴적 기법에 의한 수명평가 방법 연구³⁾, 후속부 수명평가법 연구⁴⁾ 등이 수행되어 국내의 수명평가 기술도 응용단계로 접어들고 있으며, 1993년 부터는 그 동안의 연구 개발로 국내에 축적된 기술을 이용하여, 국내의 노후 화력발전 설비들의 실기 수명평가 프로젝트가 시작되었다.

본 논문에서는 노후 화력발전 설비의 수명평가 첫번째 대상으로 선정된 영월화력 2호기의 주요 요소중 주증기관의 수명평가에 사용된 기법을 소개하고, 평가 결과를 보여줌으로써, 현재 국내에서 연구개발된 수명평가 기술의 한 응용방법을 제시하였다. 또한, 현재 응용되고 있는 실기 수명평가 기술의 개선 방향에 대한 의견을 제시하였다.

2. 진단 대상

영월 화력발전소는 독일의 M.A.N.사에서 제작한 증유/석탄 혼소용 보일러와 50MW 용량의 터빈-발전기로 구성되어 있다. 2호기는 1965년에 제작

되어서 1993년까지 약 181,000시간 사용되었으며, 474회 기동/정지한 이력을 갖고 있다. 운전 초기에는 기저부하용으로 사용되었지만, 최근에는 1주일에 약 1번 정도 기동/정지 하여 변동부하용으로 운전형태가 바뀌었다. 주증기라인 출구의 설계 온도 및 사용온도는 약 515°C이며, 설계압력은 93 kg/cm²이고 실제 사용압력은 약 88 kg/cm² 이었다.

주증기 라인에 Fig.1에 보인 바와 같이 최종 과열기 출구헤더(superheater outlet header)의 양쪽 출구로부터 시작되어서 두개의 관이 보일러 Y부(Y-piece)를 거쳐 한개의 관으로 연결된 후 터빈 Y부에 이르러 다시 두개의 관으로 나누어져 터빈으로 연결된다. 주증기관 라인 중간에는 주스톱밸브와 다수의 지류(branch)가 연결되어 있다. 주증기관은 이음새없는 파이프(seamless pipe)를 맞대기 용접(butt welding)으로 연결하여 제작되었다. 주증기 라인의 개괄도인 Fig.1에 맞대기 용접부와 지류 용접부에서 검사위치를 표시하였다. 주증기관의 주요 사양은 다음과 같다.

재료 24CrMo5 (1Cr-0.5Mo강)

설계온도 515°C

설계압력 106kg/cm² (10.4MPa)

첫수 218 mm외경×19 mm두께(헤더 출구에서 보일러 Y부까지)

283 mm외경×16.5 mm두께(보일러 Y부에서 터빈 Y부까지)

204 mm외경×12 mm두께(터빈 Y부에서 터빈 입구까지)

2.1 주증기관의 손상기구

이음새 없는 파이프로 제작된 주증기관의 손상 유형은 용접부와 모재의 경우가 서로 다르다. 용접부는 모재, 열영향부, 용접재의 물성이 서로 다르므로 크리프 변형량이 서로 일치하지 않아 취약하고, 응력 집중이 발생하는 경우도 많다. 따라서 주증기관의 손상은 용접부에서 제일 먼저 발견되

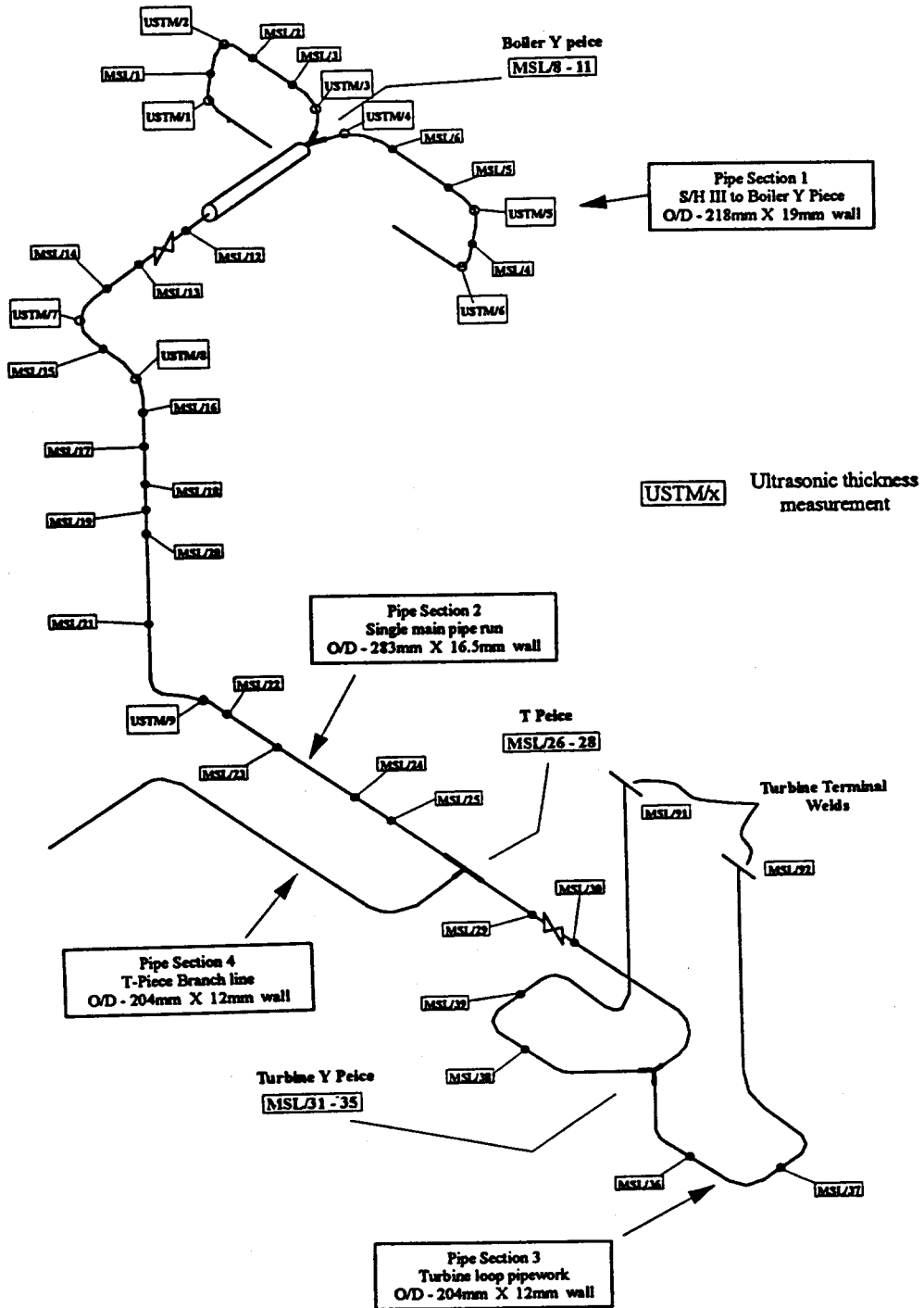


Fig. 1 Schematic arrangement and inspection locations of main steam line

는 것이 일반적이다. 용접부의 손상 유형은 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫째는 원주방향으로 발생한 크리프 손상 및 균열이다. 크리프 기공 생성 또는 이들의 연결에 의한 미소 균열 생성이 용접부의 ICZ(intercritical zone)에 나타날 수 있다. 이 손상은 주증기관에 시스템 응력이 과하게 부하되어 열영향부에 곁힘 응력이 장시간 작용되면서 발생하는 손상 형태이다. 둘째는 길이 방향으로 발생하는 크리프 손상 및 균열이다. 이 손상은 용접부에 주로 발생되며 내압에 의한 원주방향 응력(hoop stress)이 주원인이 되어 발생된다. 이러한 손상은 용접후열처리가 적절하지못해서 용접재의 인성이 낮은데 잔류 응력이 작용하여 사용초기에 발생하기도 한다. 셋째는 피로 또는 크리프-피로 손상이다. 이는 기동 정지가 심한 발전소에서 많이 나타나며 용접부의 노치부에 주로 나타난다. 넷째는 재료 열화 손상이다. 즉, 저합금강을 고온에서 오래 사용하면 금속 조직이 점차 시효(aging)되어 열화 현상이 나타난다. 이때 퍼얼라이트내의 카바이드가 뭉쳐져서 카바이드 간격이 넓어지고, 크기도 커져 재료 강도 및 크리프 저항성이 감소된다. 따라서 경도가 점차 감소하고, 크리프 손상에 취약하게 된다. 이외에도 용접부의 침투불량(lack of penetration), 용융불량(lack of fusion), 응고균열 등과 같이 제작시 발생한 결함으로 부터 손상이 발생 되기도 한다. 용접부의 손상 유형과는 달리 모재의 손상은 제작 결함이 없다면 전적으로 내압에 의해 발생하는 원주방향 응력에 기인하는 크리프 손상과 재료열화 손상이 주로 발생한다. 따라서, 길이 방향의 균열 또는 크리프 변형에 의한 외경 팽출량 측정 등의 관찰로 손상정도를 평가할 수 있다.

2.2 주증기관의 손상측정 부위

이상 설명한 유형의 손상을 탐지하기 위해 Fig. 1의 MSL1-MSL39, MSL91-MSL92의 40곳의 용접부, USTM1-USTM9의 9곳의 굴곡부와 GM1-GM3의 3곳의 모재부에서 측정을 실시하였다. 고온 증기 파이프의 경우 굴곡부에서는 내부 압력에 의한 응력도 커지고, 배관 시스템 응력도 굴곡부에 주로 부하되므로 특히 손상에 취약하다. 이미 외국에서 같은형태의 주증기관에 다수의 굴곡부 파열이 보고 되었으므로, 굴곡부를 표면복제법으로 손상측정하

였다. 주요 측정부위를 요약하면 보일러 Y부, 지류 용접부, 모든 맞대기 용접부, 굴곡부, T부, 터빈 Y부, 터빈이 연결되는 최종 맞대기 용접부 등이다. Y부와 T부의 전 검사위치는 Fig. 2에 표시하였다. Y부의 경우 본 논문에는 일부 측정결과만 나타내었다.

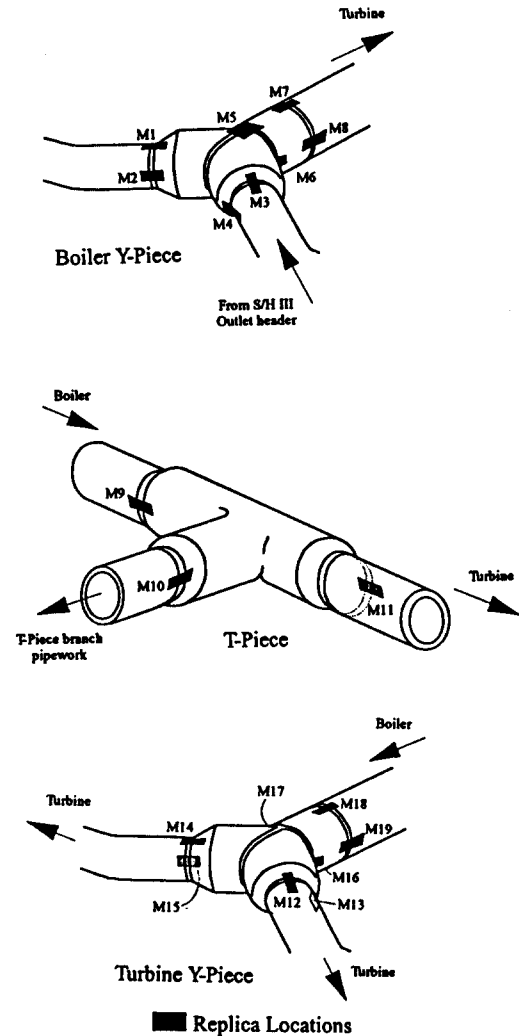


Fig. 2 Replication locations of Y-section and T-section

3. 손상 평가 방법

수명평가를 위한 진단 절차는 3단계로 나뉘어진다. 1단계는 영월화력 주증기관에 대한 설계/운

전 자료의 분석으로 취약 부위를 파악하여 손상기구, 수명 제한요인 및 적용 손상측정방법 등을 결정하는 단계이다. 2단계는 현장에서의 손상측정 및 측정결과에 의해 잔여수명을 평가하는 단계이다. 이외에 상세한 응력해석이 필요하거나, 미소시편을 실기로 부터 채취해 실험실에서의 실험에 의한 수명 평가가 필요한 경우에는 추가 실험/해석에 의한 수명평가인 3단계 평가를 실시한다. 현장진단은 결함탐지를 목적으로 수행하는 재래식 비파괴 검사법인 육안검사(VI, visual inspection), 자분탐상검사(MPI, magnetic particle inspection), 침투탐상검사(PT, penetrant testing), 초음파탐상 검사(UT, ultrasonic test), 방사선 검사(RT, radiographic test)와 재질열화도 및 손상도 검사를 목적으로 수행하는 방법인 표면복제검사법(replication method), 경도측정법(hardness measurement method), 입계부식법(GBEM, grain boundary etching method), 두께측정법(USTM, ultrasonic thickness measurement) 등으로 나뉘어 진다. 진단부위별 적용범위를 Table 1에 보였다.

이상의 방법중 주요 재질열화 검사 방법을 설명하면 다음과 같다.

표면복제법(replication technique) : 표면복제를 위해 이동식 연마시스템을 사용하였다. 표면을 연삭한후, 연마하는데 점차 미세한 연마지(silicon carbide paper)를 사용하여 연마하였으며, 최종 연마시에는 $6\mu\text{m}$ 와 $1\mu\text{m}$ 의 다이아몬드 연마제를 사용하였다. 금속미세조직을 얻기 위해 2% 나이탈액을 사용하여 부식하였다. 미세조직을 복제하는데 셀룰로우스 아세테이트 필름(cellulose acetate film)을 사용하였다. 검사부위마다 나이탈에 부식되는 속도가 조금씩 다르므로 최적 래프리카(replica)를 얻기 위하여 각 부위에서 부식 시간을 달리하여 각각 3종의 래프리카를 얻었다. 채취한 래프리카는 현장에서 이동식 현미경을 사용하여 간이로 관찰하고, 상세 분석은 실험실에서 실시하였다. 래프리카는 대비를 좋게 하기 위하여 금으로 진공 스퍼터 코팅 한 후, 광학현미경 과 전자현미경으로 관찰하였다. 용접부의 표면복제결과 크리프 기공이 발견되면 기공형성 상태를 등급기준에 따라 분류함에 의해 수명을 평가하며, 모재의 경우에는 탄화물 석출 정도를 등급기준에 따라 분류함에 의해 열화도를 평가 하였다. 크리프 기공손상은 손상정도가 심해짐에 따라 A등급에서 E등급까지, 모재의

Table 1. Inspection types at inspection locations(M=magnetic particle inspection, U=ultrasonic test, R=replication, H=hardness, D=dimensional check, G=grain boundary etching method)

Inspection Location	Inspection Type
MSL/1	M
MSL/2	M
MSL/3	M
MSL/4	M
MSL/5	M
MSL/6	M
MSL/7	M
MSL/8	MURHG
MSL/9	MURH
MSL/10	MURH
MSL/11	MURH
MSL/12	M
MSL/14	MURHD
MSL/15	MUD
MSL/16	MD
MSL/17	MD
MSL/18	M
MSL/19	M
MSL/20	M
MSL/21	MD
MSL/22	MD
MSL/23	MD
MSL/24	M
MSL/25	M
MSL/26	MURHG
MSL/27	MURH
MSL/28	MURH
MSL/29	M
MSL/30	M
MSL/31	MURHG
MSL/32	MURH
MSL/33	MURH
MSL/34	MURH
MSL/35	MURH
MSL/36	MD
MSL/37	M
MSL/38	M
MSL/39	M
MSL/91	MURH
MSL/92	MURH

열화 손상은 A등급에서 F등급까지 분류하였다. 크리프 기공 손상의 등급 분류기준을 Fig. 3에 나타내었다. 이때 각 열화등급에 따른 수명소비율을 정량적으로 표시하고자 할 때, 각등급마다 열화정도

가 균일하게 증가한다고 볼수는 없으며 각 단계에서의 수명소비율은 재료에 따라 차이가 나게 된다. 예로써 1Cr-0.5Mo강의 경우 크리프 기공 손상은 수명초기부터 발생하여 수명이 소진될때까지 비교적 균일하게 나타나지만, 2.25Cr-1Mo강에서는 크리프 기공 손상이 수명 말기에 나타나 갑자기 증가하는 것으로 알려져 있다.

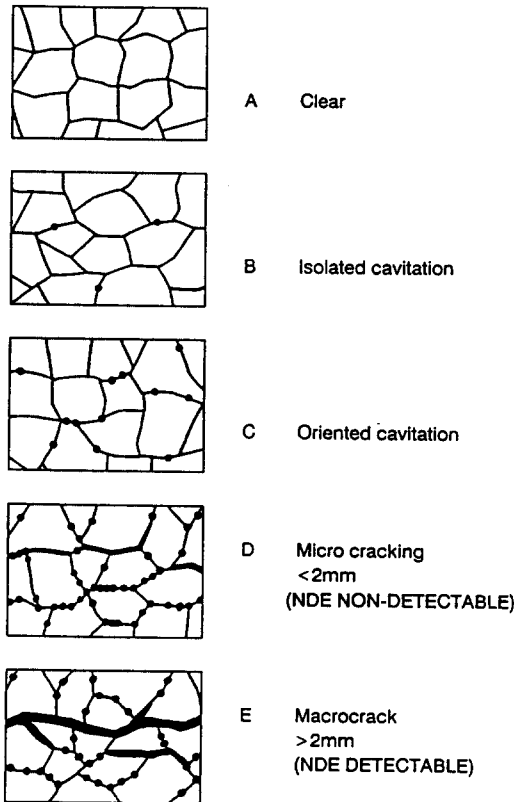


Fig. 3 Creep cavitation damage classification

경도측정법 : 래프리카를 채취한 부위에서 이동식 초음파 경도시험기를 사용하여 모재, 열영향부, 용접재에서 각각 경도측정을 수행하였다. 각 부위에서 적어도 20회 경도측정을 행하였으며, 그 평균값을 구하였다. 경도측정값은 용접부의 이상 유무 판정에 주로 사용되며, 필요한 경우 경도 측정결과를 경도-수명 데이터 베이스에 적용해 수명을 평가하였다⁵⁾.

입계부식법 : 래프리카를 채취할 때와 같은 방법으로 표면을 연마한후 입계부식 표준액인 포화 피크린산 수용액을 사용하여 표준절차에 따라, 5분

및 30분씩 입계 부식시킨후 각각 래프리카를 채취하였다. 채취한 래프리카로부터 부식입계폭, 격자절단비 등을 측정하여 열화도를 평가하였다. 재질의 열화도는 파괴인성값 열화도인 $\Delta FATT$ (fracture appearance transition temperature)로 표시된다⁶⁾.

기타 방법 : 이외에도, 주증기관이 팽출된 경우 측정된 변형률의 정도에 따라 수명을 평가하며, 균열이 탐지된 경우에는 미국 EPRI(Electric Power Research Institute)에서 개발한 컴퓨터 수명평가 코드⁷⁾를 사용하여 균열 성장을 평가에 의한 잔여 수명을 평가했다.

4. 손상측정 결과

1단계 진단 결과 선택된 주요 검사부위의 단열재를 제거한 후, 냉각 상태에서 검사를 실시하였다.

4.1 용접부 손상측정 결과

자분탐상 검사를 모든 주증기관 용접부에 대해 실시하여 균열유무를 탐지하였다. Table 1에 보인 영월 2호기의 검사 부위의 35%에서 표면균열을 발견하였다. 초음파탐상 검사는 보일러 Y부와 터빈 Y부의 용접부에서 표면밀 균열을 탐지하기 위해서, 또한 자분탐상 검사 결과 발견된 균열의 깊이를 측정하기 위해서 실시하였다. 검사 결과 표면밀 균열은 발견되지 않았으며, 측정된 균열의 깊이는 3-5 mm였다. 방사선 검사는 안전 밸브 방출 파이프를 구성하고 있는 주름진 굴곡부에서 균열 또는 부식 손상부를 점검하기 위해 실시하였다. 방사선 검사 결과 손상은 발견되지 않았다.

발견된 균열형상은 길이방향 균열과 원주방향 균열의 2종류로 분류된다. Figure 4는 파이프의 맞대기 용접부에서 관찰되는 파이프의 길이 방향 균열을 나타내며, Fig. 5는 열영향부를 따라 발생한 파이프의 원주 방향 균열을 보여준다. 균열 깊이가 5 mm인 길이방향 균열이 정하중 조건에서 성장할 때 잔여수명을 평가하면 다음과 같다. 식(1)은 탄성-2차 크리프 거동을 나타내는 재료에 균열이 있는 경우에 정하중 조건에서 균열 성장률을 나타내는 Riedel⁸⁾의 모델이다.

$$\frac{da}{dt} = p(C(t))^q \quad (1)$$

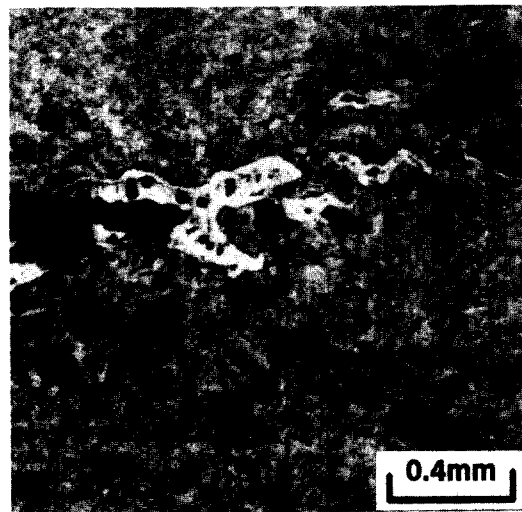


Fig. 4 Axial crack at butt weld in main steam line

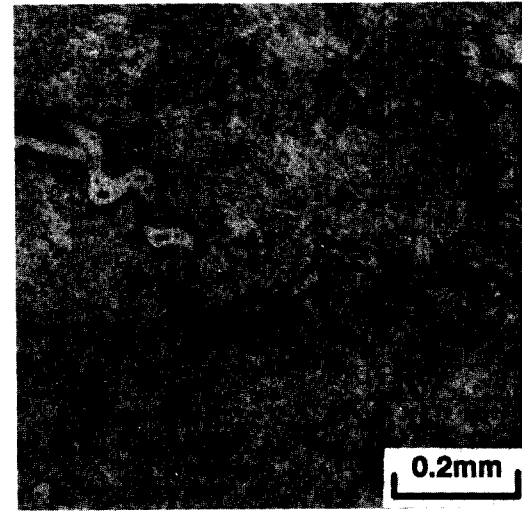


Fig. 5 Circumferential crack at heat affected zone in main steam line

이때 $C(t)$ 는 (2)식으로 계산되며,

$$C(t) = \left(1 + \frac{K^2(1-\nu^2)}{E(n+1)t}\right) C^* \quad (2)$$

E 는 탄성계수, ν 는 프와송비, K 는 응력 확대계수, n 은 크리프 지수, t 는 하중유지시간이며, p 와 q 는 균열성장률을 나타내는 재료상수이다. 이와는 달리 Saxena⁹⁾는 C_1 매개변수를 사용하여 (3)식과 같은 균열성장 모델을 제시하였다. 이때 C_1 는 (4)식으로 표시된다.

$$\frac{da}{dt} = p_1(C_1)q_1 \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{4\alpha\beta\tilde{\gamma}(\theta, n)}{E(n-1)} (1-\nu^2) \frac{K^2}{W} \frac{F'}{F} (EA)^{\frac{2}{n-1}} t^{\frac{n-3}{n-1}} + C \quad (4)$$

단, A 는 크리프 상수, W 는 형상에 따른 길이특성, F, F' 은 무차원함수, $\alpha\beta$ 는 상수이다. 보일러 Y부와 터빈 Y부 사이의 파이프에서와 같이 외경

283 mm, 두께 16.5 mm, 원주방향 응력 83.8MPa인 조건에서 깊이 5 mm인 길이방향 표면균열이 존재할 때 관통균열이 될때까지의 잔여수명을 컴퓨터 코드⁷⁾의 1.25Cr-0.5Mo강 표준 데이터를 사용하여 계산한 결과는 Fig. 6과 같다. Riedel 모델을 사용한 경우에 잔여수명은 1070시간이며 시간-균열깊이 관계를 Fig. 6에 실선으로 나타내었다. Saxena 모델을 사용한 경우의 잔여수명은 597시간이며, 같은 그림에 점선으로 나타냈다. 이해석에서 다음 이유 때문에 평가수명이 실제 잔여 수명보다 매우 짧게 나타났을 것이다. 첫째로, 균열형상은 깊이만 고려되었고 축방향의 길이가 무한히 길다고 가정하여 균열 성장률이 과대평가 되었다. 둘째로, C₁ 계산식에 소성거동이 고려되지 않아¹⁰⁾ 하중이 부가된 초기에 균열 성장률이 과대평가 되었다. 따라서, Fig. 6에 표시된 수명은 매우 보수적으로 평가된 수명이다.

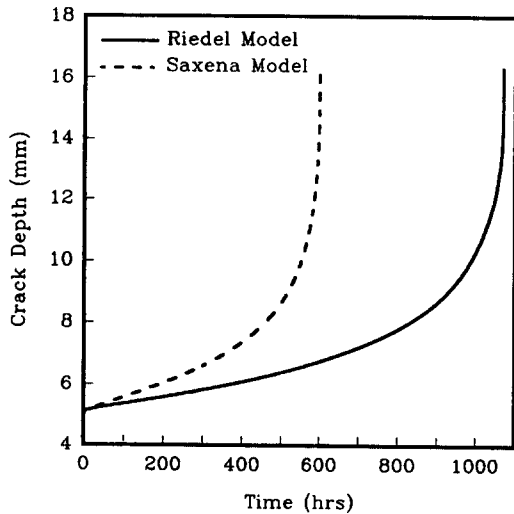


Fig. 6 Predictions of creep crack growth rate using Riedel model and Saxena model

이상의 해석으로 축방향의 표면균열이 관통균열로 성장할 때까지의 잔여수명을 평가하였다. 이외에 균열이 관통된 후에는 누수가 발생할지 아니면 갑작스런 파열로 이어질지에 대한 안전성 해석도 필요하다. J-적분 이론에 근거한 안전성 이론¹¹⁾ (tearing instability theory)을 이용하여 갑작스런 파열이 발생할 때의 임계 균열크기를 평가하였다. J-Handbook에 알려진 식을 이용하고, JIC와 Tmat

값은 코드의 값을 사용하여 계산한 결과 $J)J_{IC}$, $T) T_{mat}$ 의 조건을 만족할 때의 임계 균열 길이는 241 mm이었다. 따라서, 현재 측정된 최대 축방향 균열 길이가 20-60 mm이므로 이균열이 관통되어도 갑작스런 파열보다는 누수가 먼저 일어나므로 파손 양상은 안전하다.

균열이 발생하기전 단계의 누적된 크리프 손상 및 재질열화 손상은 재래식 비파괴 검사법으로는 평가가 어려우므로 표면복제법을 사용하여 진단하였다. 맞대기 용접부, 터빈Y부의 평가결과를 Fig. 7 및 Fig. 8에 보였다. 각 검사부 별로 미세조직 손상도, 크리프 손상도, 측정 경도값, 미세조직 사진을 정리하였다.

Figure 7은 맞대기 용접부의 표면복제 관찰 결과이다. 용접재에서 관찰된 균열은 입계 균열(Fig. 7a)로서 주위에 상당한 크리프 손상(Fig. 7b)과 다수의 미소 균열이 존재하였다. 균열면에는 산화층이 두껍게 형성되어 균열이 오래전에 형성되어 장시간 성장한 것으로 판단된다. Figure 7d의 열영향부나 Fig. 7c의 모재에는 크리프 기공이 발견되지 않아 모재의 크리프 손상은 심하지 않다. Figure 8은 터빈Y부의 한 용접부의 표면복제 결과이다. 파이프 및 Y부의 모재와 열영향부에는 크리프 기공이 발견되지 않았지만, 용접재에서는 길이 방향으로 크리프 기공들이 연결되어 균열로 발전되어 있다. 크리프 기공 및 미소균열은 용접재내에 국한되어 있고, 열영향부나 모재까지 확장되지는 않았다. 모재의 금속 조직은 열화가 상당히 진행된 상태를 나타내었다. 경도 측정값은 관찰된 현상과 일치하는 범위내에 있다.

4.2 모재 손상측정 결과

모재부에 크리프 손상이 누적되는 경우에도 크리프 기공은 수명 후기에만 관찰이 가능하다. 크리프 기공은 관찰되지 않아도 크리프 변형에 의해 외경이 팽출하므로 팽출량을 측정하여 크리프 손상도를 정성적으로 예측할 수 있다. 이러한 주증기관 모재부의 크리프에 의한 팽출량 측정을 위해 두께와 외경의 치수 측정을 실시하여 결과를 Fig. 9 및 Fig. 10에 보여주었다. Figure 9에서 측정부의 두께는 설계 허용값 내에 있었으나, Fig. 10에 보인 측정 외경은 설계 허용값 상한선 보다 컸다. 즉, 내압에 의한 크리프 변형이 누적되어 외경이

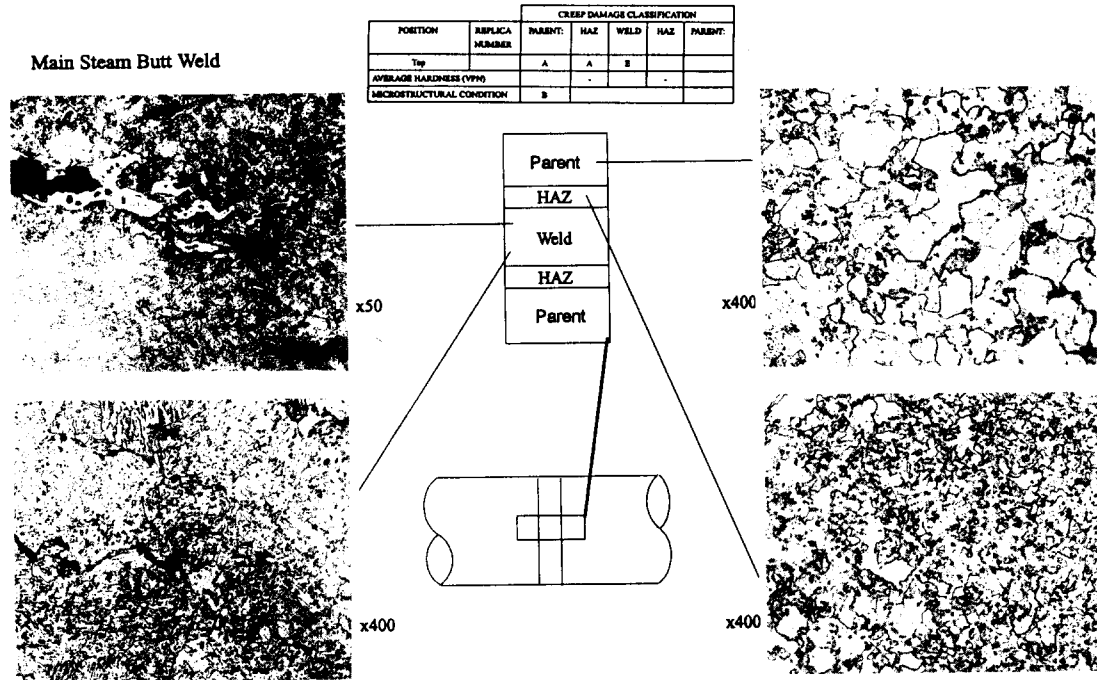


Fig. 7 Results of replica assessment for a butt weld

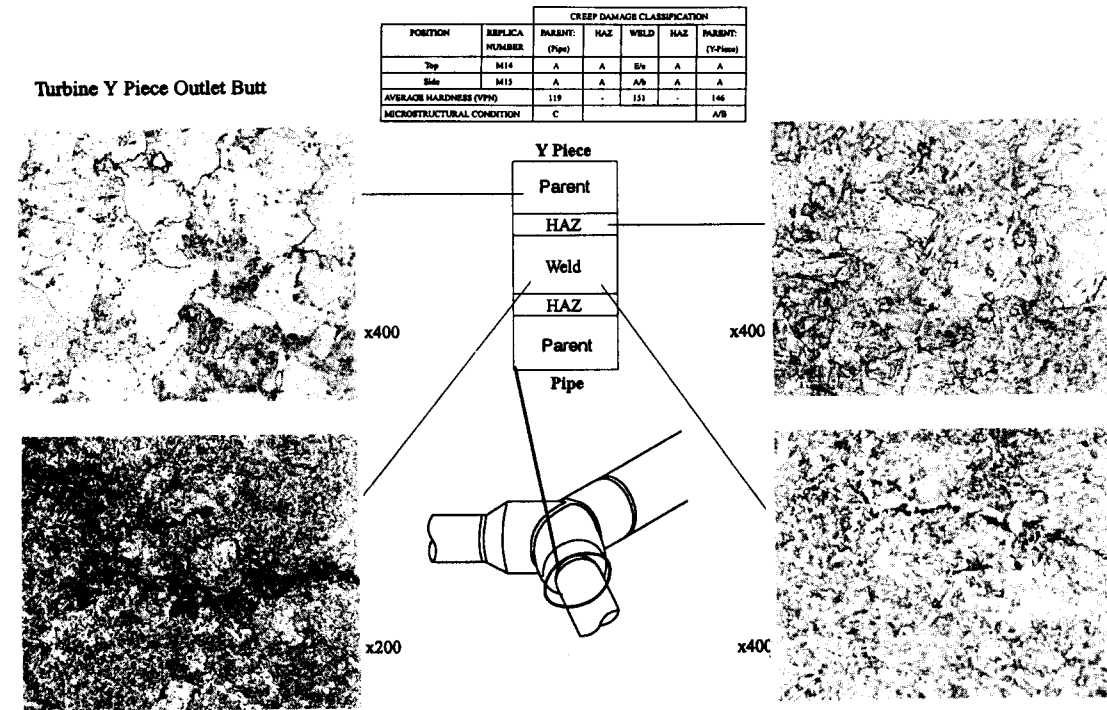


Fig. 8 Results of replica assessment for a weld in Ysection

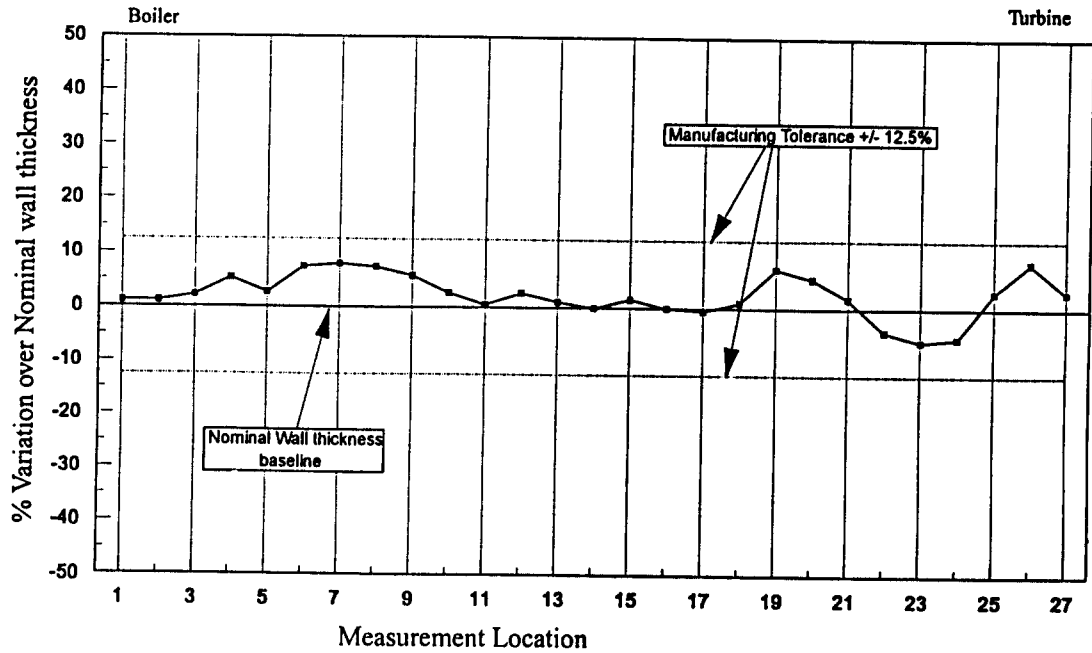


Fig. 9 Results of wall thickness measurement of main steam pipe

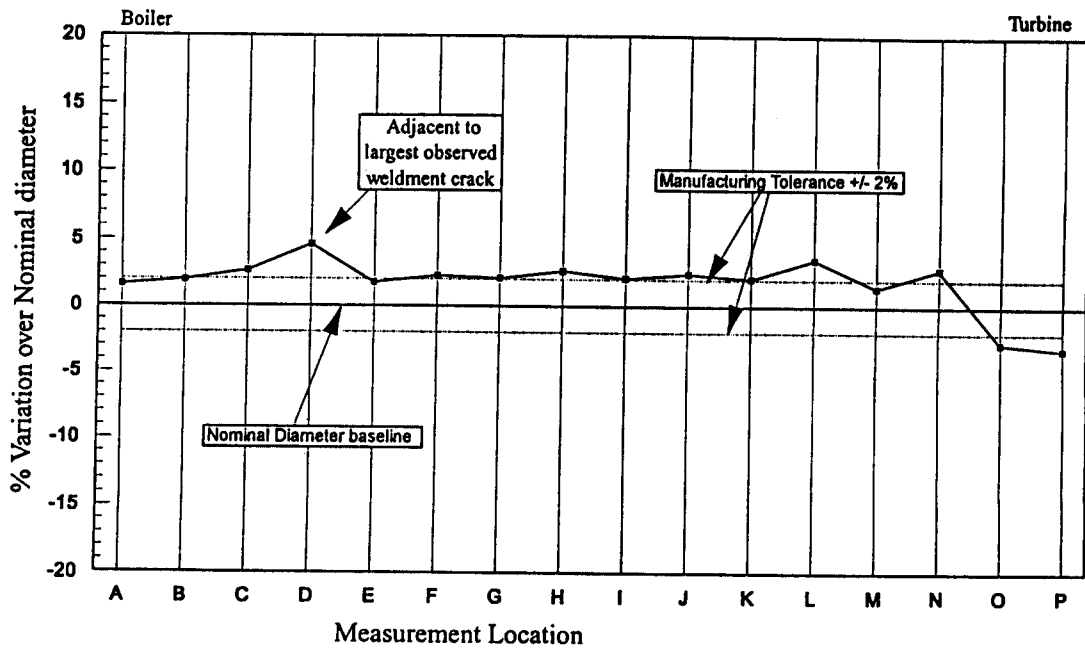
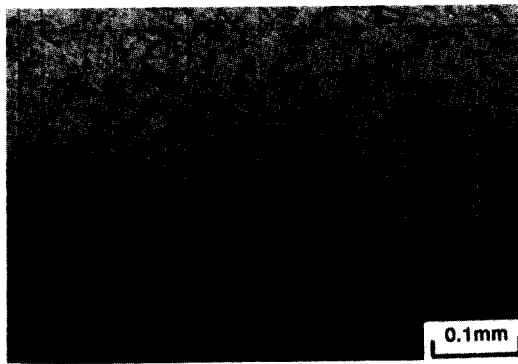


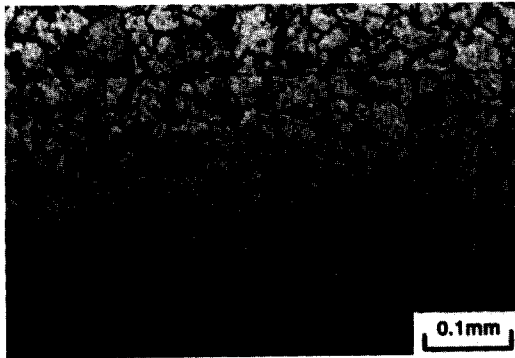
Fig. 10 Results of outside diameter measurement of main steam pipe

켜져있음을 확인할 수 있다. 외경의 팽출은 균열이 탐지된 용접부에서 특히 심하였다.

고온에 장시간 노출되어 시효에 의해 파괴인성도 감소되어 있으리라 추측되어, Y부, T부 등의 모재부 열화도 검사를 입계부식법을 사용하여 실시하였다. 5분 및 30분 입계부식후 측정된 부식폭과 격자절단비는 Table 2에 보여 주었으며, 입계부식후의 래프리카 사진을 Fig. 11에 나타내었다. 측정결과 FATT가 최대 45-65°C로 재료가 매우 열화되어 있는 것을 알 수 있다.



(a). 5 minutes etching, $\Delta FATT=20^\circ C$



(b). 30 minutes etching.

Fig. 11 Pictures of replicas after grain boundary etching

이상 설명한 외경 측정결과 및 입계부식 검사결과 모재의 열화가 상당히 진행된 것으로 판단된다. 따라서, 해석적 방법을 사용하여 정량적으로 평가한 수명을 알아본다. 파이프 내압에 의한 응력은 (5)식으로 계산했다.

$$\sigma_{MDH} = \frac{p(D_o - t)}{2t} \quad (5)$$

Table 2. Measurement results of grain boundary etching method

Description	Etch Width W(μm)	($\Delta FATT$) _{GW} (°C)	Ni/No	($\Delta FATT$) _{CVN} (°C)
Boiler Y-Piece	1	45	-	-
Turbine Y-Piece	1.14	65	0.77	63
T-Piece	0.8	20	0.32	10

이때, σ_{MDH} 는 평균 직경에서의 원주 방향 응력(MPa), D_o 는 외경(mm), t 는 두께(mm), p 는 내압(MPa)이다. Table 3에 주증기관 파이프의 설계 칫수, 실측 칫수와 (5)식으로 계산된 응력을 나타내었다. 설계 칫수에 따라 계산된 원주 방향 응력, σ_{MDH} 은 보일러 Y부와 터빈 Y부 사이의 파이프에서 83.8MPa이었다. 재료 물성의 하한값을 고려하기 위해 평가용 응력(assessment stress), σ_A 는 σ_{MDH} 를 1.25배 하여 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 σ_A 는 105MPa이다. 이 응력값은 1Cr-0.5Mo강의 ISO 과단 테이터를 사용하여 515°C에서 수명을 계산하면 137,000시간이 된다. 현재까지 181,000시간 사용하였으므로 재료물성 하한값을 사용한 계산 결과는 수명이 소진된 것으로 판단된다. 설계값 대신 측정값의 두께 최소값, 외경 최대값을 사용하여 계산하면 최소 수명은 104,000시간이다. 이 계산 결과는 재료물성의 하한값을 사용한 결과이므로 매우 보수적이다. 같은방법으로 재료물성의 하한값 대신 평균값을 사용하여 계산하면 과단수명(t_c)은 194,000시간이 되어 잔여수명은 13,000시간이 된다. 터빈측 주증기관 계산 결과도 이와 유사하게 수명이 소진된 것으로 나타났으며, 보일러측 주증기관 계산 결과는 재료물성 하한값을 사용한 경우에도 상당 시간의 잔여 수명이 남아있는 것으로 판단된다. 계산결과는 Table 3에 보였다.

5. 종합 수명평가

이상 설명한 측정 결과를 종합적으로 고려하여 주증기관 전체의 잔여수명을 평가해보면 다음과 같다. 주증기관 모재의 잔여 크리프 수명은 재료물성의 하한값을 사용하여 계산한 경우 수명이 소진된 것으로 판단되며, 평균 재료물성을 사용한 경우에도 잔여 수명은 13,000시간 밖에 남지 않았다.

Table 3. Residual life assessment results using analytic method

Using design Values

Pipe Section	Outside Diameter	Wall Thickness	σ_{MDH} (MPa)	σ_A (MPa)	t_r (hours)	Life Fraction Consumed
FSOH to Boiler Y Piece	218mm	19mm	56	70	382,000	0.47
Boiler Y Piece to Turbine Y Piece	283mm	16.5mm	83.8	104.75	137,000	1.32
Turbine Y Piece to Turbine Terminal	204mm	12mm	83.4	103.8	139,000	1.3

Using design Values

Pipe Section	Outside Diameter	Wall Thickness	σ_{MDH} (MPa)	σ_A (MPa)	t_r (hours)	Life Fraction Consumed
FSOH to Boiler Y Piece	218mm	18.9mm	56.6	71	369,000	0.49
Boiler Y Piece to Turbine Y Piece	291mm	15.5mm	92	115	104,000	1.74
Turbine Y Piece to Turbine Terminal	212mm	12mm	86.5	108	125,000	1.45

Note - $\sigma_A = 1.25 \times \sigma_{MDH}$

또한, 용접부의 경우 맞대기 용접부의 35%에서 길이 방향 용접부 균열 및 크리프 손상이 발견되었다. 이들의 형상, 방향, 갯수 등으로부터 판단해 볼 때, 이는 내압에 의한 원주 방향 응력 때문에 용접재의 크리프 수명이 다한 것으로 판단된다. 주증기관의 외경 측정 결과 외경이 설계 상한값에 도달해 있으며, 균열이 발생한 부위들에서는 설계 상한값 이상으로 외경이 팽출되어 있는 것이 이를 뒷받침해 준다. 입계부식법 적용결과도 모재 열화가 심한 것으로 나타났다. 용접부의 균열 발생 부위 근처 모재에서 크리프 손상이 발견되지는 않았지만 이는 용접부에 비해 모재의 연성이 크기 때문이다. 보일러 Y부와 헤더 사이의 주증기관은 안전한 것으로 판단된다. 보일러 Y부와 헤더 사이의 잔여수명 계산 결과 최소 잔여수명은 200,000시간이었으며, 발견된 균열도 없었고, 외경 팽출량도 작기 때문이다. 따라서 이부분은 아직 상당량의 잔여수명이 남은 것으로 판단된다.

실기의 측정에 의한 잔여수명 평가를 위해서는 단시간 내에 여러 측정자가 열악한 조건에서 현장 측정을 해야 하는 제한이 있다. 따라서, 측정자에 따른 실험 오차를 최소화 해야하므로, 표준 측정 절차의 수립 및 최적 측정방법에 대한 연구가 필

요하다²⁾. 균열성장에 의한 수명평가의 정확도 개선을 위해서는 유한한 길이를 갖는 표면균열의 성장률을 평가할 수 있고, 재료의 소성거동 및 피로하중을 고려할 수 있는 모델을 이용한 소프트웨어를 사용하여야 한다. 3단계 수명평가를 위해서는 미소시편 채취법 및 이를 사용한 수명평가 기술이 필요하므로 이의 개발이 필요하다. 이상의 수명평가 방법은 이음새 없는 파이프에 대한 것이다. 이음새가 있는 파이프(seam welded pipe)의 경우에는 이음새 부분의 파손이 외국에서 이미 많이 보고되고 있으므로 이 부분의 수명평가에 유의하여야 한다. 이음새의 수명평가는 매우 어려운데 이는 크리프 손상이 용접부두께 중앙부에서 시작되며, 주로 용선(fusion line)을 따라 균열이 전파되다가 균열이 파이프 외부면까지 성장하면 누수가 아닌 갑작스런 파열로 사고가 나기 때문이다. 국내에서도 재열기관(reheat pipe)에 이음새 있는 파이프를 사용하고 있는 발전소가 많으나 아직 잔여수명 및 안전성 평가가 제대로 이루어지고 있지 않으므로 이 부분의 수명평가 실시가 시급한 상태이다.

6. 결론 및 요약

고온 증기 파이프의 잔여수명 평가 절차를 보여 주기 위해 1965년부터 운전하여 181,000시간 사용된 영월화력 2호기의 주증기관 실기에서 잔여수명 평가 결과를 보여주었다. 맞대기 용접부, 지류 용접부, Y부 및 T부 등의 용접부는 표면복제법, 경도측정법을 사용하여 수명진단을 실시하였으며, 비파괴 검사에 의해 균열이 탐지된 경우에는 수명평가 컴퓨터 코드를 사용하여 균열성장에 의한 잔여수명을 계산하였다. 또한, 주증기관 모재의 잔여수명은 외경 팽출량 측정, 입계부식법 등을 사용하여 재질열화도 및 크리프 손상도를 정성적으로 평가한 후, 해석적 방법에 의해 정량적으로 잔여수명을 계산하였다. 진단 결과로 부터 종합적으로 주증기관의 잔여수명을 평가하면, 모재와 용접부 모두 잔여수명이 소진된 것으로 판단되며, 각각 다른 방법으로 평가한 결과가 서로 일치하였다. 고온 파이프 수명평가 기술의 향후 개선 방향에 대한 의견을 제시하였고, 이음새 용접이 있는 재열기관의 수명평가 시급성을 설명하였다.

참 고 문 헌

1. Viswanathan, R., 1989, Damage Mechanisms and Life-Assessment of High Temperature Components, ASM International
2. 경년열화 및 수명평가 연구회, 1993, 제3회 경년열화 및 수명평가 심포지엄 논문집
3. 문한규 등, 1992, 고온 사용설비의 비파괴 진단기술 개발, KRIS-92-063-IR, 한국표준과

학연구원

4. 김건영 등, 1993, 발전소 대형 고온고압설비의 균열 손상해석 기술개발, KRC-90G-J06, 한국전력공사 기술연구원
5. 이해무, 김재철, 1992, "경도측정을 이용한 고온사용설비의 잔여수명 예측", 대한기계학회지 제32권 제4호, pp. 351-357
6. 정세희, 1991, "입계부식법에 의한 플랜트용 고온기기의 경년열화 평가에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 15(3)
7. Dooley, R. B., SLIC2 : Computer Code for Analysis of Steam Line Cracking, Research Project 2596-7, Electric Power Research Institute
8. Riedel, H., 1983, "Crack Tip Stress Fields and Crack Growth under Creep-Fatigue Condition", ASTM STP 803, pp. 505-520
9. Saxena, A. and Han, J., 1986, Evaluation of Crack Tip Parameters for Characterizing Crack Growth Behavior in Creeping Materials, ASTM Task Group Report E 24.08.07/ E24.04.08
10. Yoon, K. B., Saxena, A. and Liaw, P. K., 1993, "Characterization of Creep-Fatigue Crack Growth Behavior under Trapezoidal Waveshape Using C_r -Parameter", International Journal of Fracture, Vol. 59, pp. 95-114
11. Paris, P.C., Tada, H. et.al., 1979, "The Theory of Instability of the Tearing Mode of Elastic-Plastic Crack Growth" ASTM STP 668, pp. 5-36
12. 윤기봉, 1994, 이동식 금속조직 판독시스템 개발 연구 보고서, 과학기술처