

## 표면복제기법을 이용한 고온 설비의 수명평가 현황과 적용사례

### State of the Art in Life Assessment for High Temperature Components Using Replication Method

김덕희\*<sup>†</sup>, 최현선\*\*

Duck-Hee Kim\*<sup>†</sup> and Hyun-Sun Choi\*\*

초 록 발전 및 화학플랜트의 많은 고온 설비는 장시간 운전으로 인해 재질열화 현상이 필연적으로 발생된다. 이러한 고온설비의 건전성 확보와 신뢰성 있는 수명평가를 위해서는 비파괴평가기법인 표면복제시험을 통한 미세조직분석 평가법이 현재까지 유용한 것으로 인식되어왔다. 이러한 표면복제기법은 기존의 평가법과 함께 탄화물평가를 통한 재질열화도 평가 등 새로운 정량적 접근법이 필요하며 다양하게 시도되고 있다. 본 논문에서는 표면복제기법과 관련한 기술개발 현황과 현장 적용사례들을 소개하고, 합리적인 평가결과 여부에 대해 기술하였으며, 현장설비에 대해 표면복제시험 후 미세조직을 분석한 결과 탄화물 평가방법이 정량적으로 유용함을 입증하였다.

주요용어: 표면복제기법, 재질열화, 수명평가, 탄화물 평가법

**Abstract** The power generation and chemical industry have been subjected to further material degradation with long term operations and need to predict the remaining service life of components, such as reformer tube and steam turbine rotor, that have operated at elevated temperatures. As a non-destructive technique, replication method with reliable metallurgical life and microstructural soundness assessment has been recognized with strongly useful method until now. Developments of this method have variously accomplished by new quantitative approach, such as carbide analysis, with A-parameter and grain deformation method. An overview of replication, some new techniques for material degradation and life assessment were introduced in this paper. Also, on-site applications and its reasonableness were described. As a result of having analyzed microstructure by replication method, carbide approach was quantitatively useful to life assessment.

**Keywords:** Replication, Material Degradation, Life Assessment, Carbide Approach

#### 1. 서 론

발전, 석유 및 화학플랜트의 많은 고온 설비는 장시간 운전으로 인해 재질열화(material degradation) 현상이 필연적으로 발생된다. 플랜트와 같은 장치산업 및 발전 플랜트의 경우 특성상 초기투자비가 많이 소요되어 가능한 한 장기간(30년 이상)사용하게

되므로 재질열화 설비가 많아져, 수명을 예측, 적절한 보수관리 및 열화회복 등을 통해 수명을 연장하는 것이 현재의 상황이다[1].

고온 설비의 열화 및 노후화 확인을 위해 적절한 비파괴평가(NDE) 기술과 수명평가를 위한 파괴역학분석(fracture mechanics analysis : FMA)기술이 있다. 고온 설비의 재질열화 상태를 확인하기

위해 정기적으로 적용되는 보수검사(maintenance inspection)와 발전설비에 대한 계획예방정비기간(overhaul period)을 제외하고는 장기간에 걸쳐 계속적으로 운전될 뿐 아니라, 열악한 조건하에서 가동된다. 따라서 가동 중에 부품의 결함발생 혹은 조기 파손의 가능성이 매우 높다. 설비에 따라서는 설계 수명을 초과해도 건전성(integrity)을 확인해 가며 계속해서 사용하고 있다[2]. 이를 위해서 플랜트 기기의 상태를 평가하고 그 유효잔존수명을 결정하는 기술과 방법이 있어야만 된다. 이 기술은 또 새로운 플랜트의 안전성, 가동성 및 신뢰성, 그리고 운전, 보수, 검사에 대해서도 귀중한 정보를 제공한다. 우리나라뿐만 아니라 세계적으로 고온 설비의 잔존수명평가 기술에 대해 활발한 연구개발이 진행 중에 있다.

고온 설비의 건전성을 주기적으로 확보하는데 경제성, 조작성 등이 우수하고 현장 유용성이 검증되어 현재 많이 사용되고 있는 비파괴평가기법 중 하나가 표면복제기법(replication)이다.

본 해설에서는 발전, 석유 및 화학플랜트의 고온 설비의 재질열화 정도를 평가하기 위해 사용되고 있는 표면복제기법이 어떤 식으로 적용되고 있는가에 대한 현황과 관련 기술개발 분석프로그램 및 현장사례 등을 소개하고자 한다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1. 표면복제기법(Replication Method)

고온 설비에 사용되는 재료는 용접성을 높이기 위해 저탄소 내열강을 주로 사용하는데, 이러한 재료는 물성치의 변화가 적기 때문에 많은 경우 금속조직 변화를 관찰하여 손상의 정도를 평가한다. 그러나 이러한 고온, 고압을 받는 발전, 석유화학 설비에서 직접 시료를 채취한다는 것은 매우 어려운 일이며, 이동식 연마기와 현미경을 이용한다 해도 설비 구조의 복잡성 및 여건이 여의치 않아 해상 능력이 떨어지는 경우가 많다. 이러한 이유 때문에 금속조직을 다른 물질에 복제시켜 그 물질을 간접적으로 관찰 분석할 수 있는 기법이 표면복제법이다.

Replica의 채취 및 관찰요령에 대해서는 1974년에 제정된 국제규격 ISO 3057(non-destructive testing metallographic replica techniques of

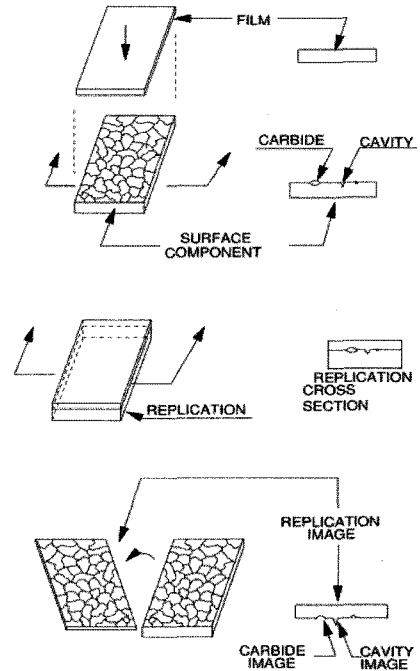


Fig. 1 Principle of replication method

surface examination)이 있으며, 미국의 경우에는 1987년 ASTM ES 12의 긴급 규격이 제정되어 1990년 ASTM E 1351(standard practice for production and evaluation of field metallographic replicas)로 정식 규격화되어 있다.

관찰대상이 되는 표면에 피복시킨 후 그 막을 떼어내어 광학현미경이나, 주사현미경(SEM)으로 관찰하는 것으로 1단계 replica법, 2단계 replica법, 추출 replica법 등으로 구별된다.

1단계 replica법은 떼어낸 막 즉, replica의 요철이 대상표면의 요철과 반대가 되어 나타나는 것으로 개략적으로 Fig. 1에 나타내었다.

2단계 replica법의 경우, 시험편의 요철이 심한 경우나 막을 손상없이 떼어내기 힘든 경우에 플라스틱으로 두꺼운 replica를 만든 후 이로부터 1단계의 replica법과 얇은 replica를 만든다. 이때의 replica의 요철은 시험편 표면과 일치한다. 추출 replica법의 경우, 적당한 부식액으로 기지(matrix)를 먼저 녹여내어 석출물이나 개재물을 약간 돌출하게 하여 replica를 만들고 떼어내기 전에 다시 기지만을 더 부식시켜 석출물이나 개재물이 replica에 붙어서 떨어지도록 하여 이를 분석하는 방법이다.

금속조직검사용으로 사용되는 film은 acetylcellulose

film과 paraffin을 조합한 것으로 0.035, 0.08 mm 두께의 두 종류가 있다. 보통의 경우 0.035 mm를 사용하며, 요철이 심하고 온도가 높아 replica 막이 연화하기 쉬운 경우에는 0.08 mm를 사용한다. acetylcellulose film의 비중은 1.3 흡수율은 24시간 침적시 5%, 최고 사용온도는 100°C, 연소성은 완전성이며, 용재로는 시약 1급 규격이상의 methyl acetate를 사용한다.

Replica 채취 절차는 황삭(rough grinding), 연삭(fine grinding), 연마(polishing), 부식(etching), 건조(drying), replica 채취, 증착 순으로 진행되며, 현장에서 채취된 film은 광학현미경으로 관찰하기도 하고 명암(contrast)을 향상시키기 위하여 증착처리하기도 한다.

2.2. 결정립 변형법에 의한 크리프(Creep) 수명평가

크리프 거동은 Fig. 2와 같이 강종마다 그 특성이 다르기 때문에 이를 염두에 둔 손상진단이 필요하다. 즉, 용접부나 스테인레스강(stainless steel)과 같이 결정립의 강도가 높아 입내 변형이 일어나기 어려운 저연성 재료에서는 입계에 변형이 집중되어 수명의 1/2의 시점부터 기공이 발생하기 때문에 대부분의 기간을 기공을 관찰함으로써 진단할 수 있다. 그러나 보일러 재료의 대부분을 점유하는 Cr-Mo강과 같이 변형되기 쉬운 고연성 재료에서는 기공은 수명말기에 처음 발생되기 때문에 손상 과정의 넓은 범위를 진단하는 방법으로는 부적당하다. 이 때문에 결정립의 변형 정도를 정량화하여 크리프 손상을 진단하는 결정립 변형법이 개발되었다.

이 방법은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 크리프 손상이 진행됨에 따라 페라이트 결정립이 응력 방향으로 변형된다는 사실에 착안한 것으로서 변형을 정량화하는 parameter로서는 결정립의 장경의 방향과 응력방향이 이루는 각도,  $\theta_m$ 을 많이 사용하며, 광학 현미경과 화상처리장치를 이용하여 측정한다.  $\theta_m$ 의 분포의 표준편차인 변형계수,  $S_m$ 은 크리프 손상율과 Fig. 4와 같은 좋은 상관관계가 있기 때문에 신뢰성 높은 평가가 가능하다. 실제 적용에 있어서 응력 방향이 불분명한 경우가 있으나, 응력 방향을 몰라도 각도의 주기성을 고려하여, 최소 표준편차를 구한다면 그것이  $S_m$ 이며 각도 변환량으로부터 실기의 응력 방향을 예측할 수 있다[3].

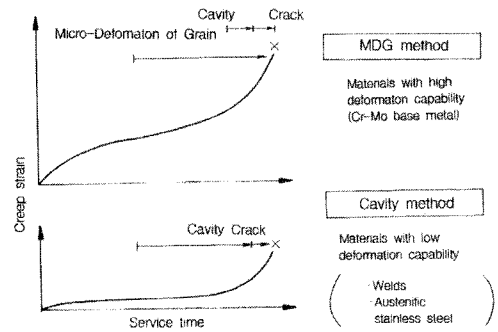


Fig. 2 Difference of creep behavior in different materials

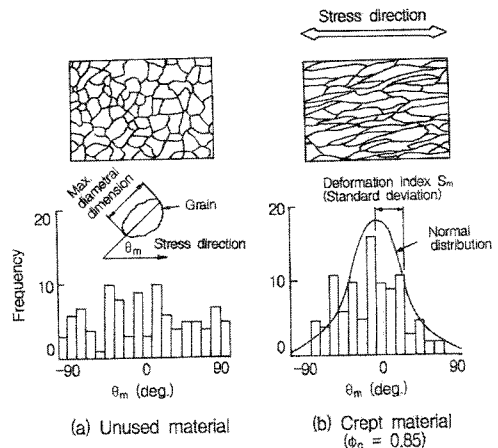


Fig. 3 Shape deviation of grain(2.25Cr-1Mo steel)

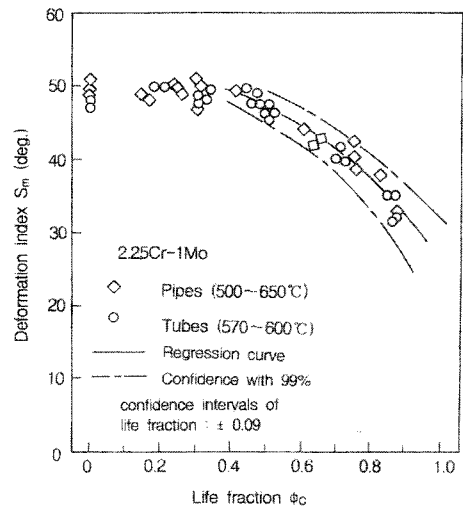


Fig. 4 Creep life versus deformation index (2.25Cr-1Mo steel)

2.3. 크리프 기공(Cavity)에 의한 수명평가

기공을 정량적으로 평가하는 방법은 많이 알려져 있으며, 그 중 A-parameter법은 영국의 ERA, CEGB 및 미국의 EPRI에서 제안된 방법으로 가장 많이 사용하고 있는 방법이다. 평가 대상재의 광학 현미경 조직에 최대 주응력방향으로 직선을 그어 그 직선과 입계와의 교차점( $n_D + n_U$ )에서 점유하고 있는 크리프 기공발생 입계, 즉 손상입계의 비율을 나타낸다.

$$A = \frac{n_D}{n_D + n_U} \tag{1}$$

여기서,  $n_U$ 는 손상받지 않은 결정입계 그리고  $n_D$ 는 손상받은 결정입계이다.

A-parameter를 이용한 잔여 수명평가법은 Cane 등에 의해 제안된 방법[4,5]으로 다음과 같다.

$$t_{rem} = t_{op} \left[ \frac{1}{1 - (1 - A)^9} - 1 \right] \tag{2}$$

여기서,  $A$ 는 크리프 기공발생 입계 비율,  $t_{rem}$ 는 잔여수명 그리고  $t_{op}$ 는 운전시간이다.

$$t_{rem} = t_{op} \left[ \frac{0.51}{A + 0.095} - 1 \right] \tag{3}$$

크리프 수명소비율과 관련된 모든 실험적 A값을 도시하여 일정한 호트러짐 폭(scatter band)을 고려한 것으로 다음과 같다.

2.4. 탄화물 평가에 의한 증기터빈 로터 수명평가

증기터빈 로터의 수명은 탄화물간의 거리, 탄화물 크기 및 탄화물의 형상의 변화와 상관관계가 있고, 이러한 탄화물의 변화량을 image analyzer를 이용하여 정량적으로 계측하고, 계측된 변화량과 로터의 수명과의 관계를 수학적 모델을 구성하여 Fig. 6과 같은 시스템으로 증기터빈 로터의 수명평가가 가능하다.

재료가 열화과정을 거치면 탄화물 입자간 거리가 멀어지게 된다. 준안정상상태(metastable)의 탄화물의 성장은 식(4)과 같은 온도와 시간에 의존하는 함수이고, 열화된 탄화물을 분석하여 상수를 결정하고, 탄화물 입자간 거리와 수명과의 상관관계식을 얻을

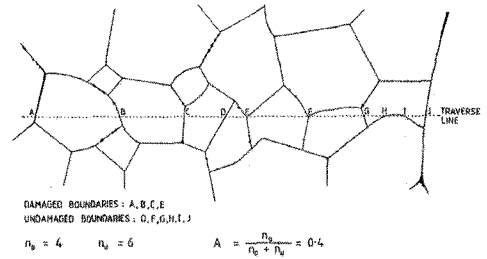


Fig. 5 A-parameter method

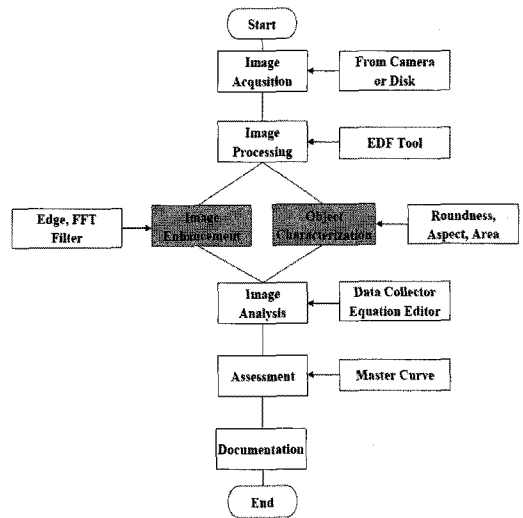


Fig. 6 Configuration of carbide approach program system

수 있다[6].

$$\frac{d\lambda^3}{dt} = C_0 \exp(\beta T) \tag{4}$$

여기서,  $\lambda$ 는 사용 후 입자간 거리,  $\lambda_0$ 는 사용 전 입자간 거리 그리고  $C$ 와  $\beta$ 는 재료상수이다.

시간에 따른 탄화물의 성장은 carbide coarsening model을 이용하여 식(5)와 같이 탄화물입자의 성장 속도식으로 표현가능하다[7].

$$r = kt^{1/2} \tag{5}$$

여기서,  $k$ 는 재료상수이고,  $t$ 는 운전시간이다.

증기터빈 로터는 열화과정을 거치면서 침상(needle type)의  $M_3C$ 가 구상의  $M_{23}C_6$ 와 같은 형태로 변화한다. 재료 내부의 탄화물의 반응은 열화과정 동안 내부에너지가 작아지고, 무질서도가 커지는

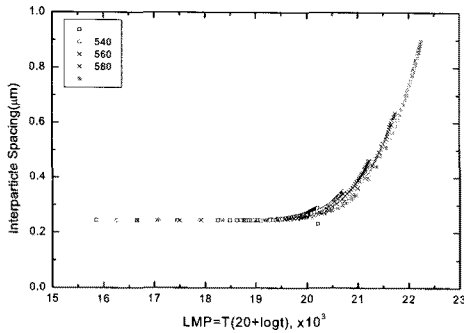


Fig. 7 Relationship between interspacing of carbides & LMP

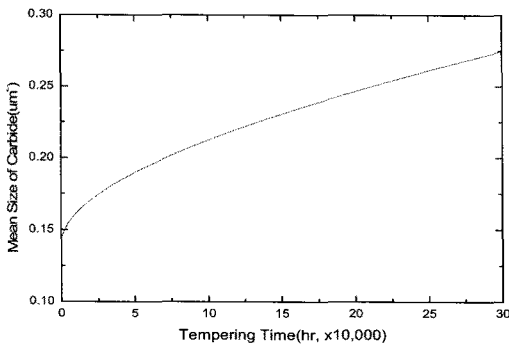


Fig. 8 Relationship between size of carbides & tempering time

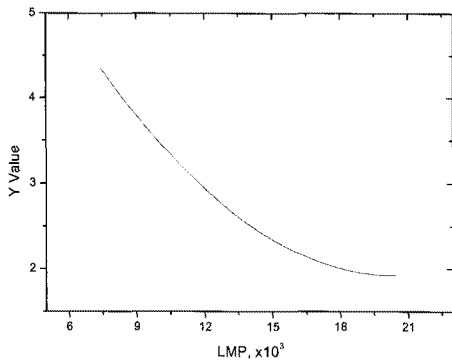


Fig. 9 Relationship between shape parameter & LMP



Fig. 10 Microstructure of reformer tube(as-received)

방향으로 반응하기 때문에 입자의 형상이 복잡함에서 단순함으로 변하게 된다. 이러한 물리적 현상을 정량적으로 평가하기 위해서 취득한 영상을 형상함수(식(6))를 이용하여 입자의 형상을 정의하고, 상관관계를 도출하여 설비의 수명을 평가하였다.  $x$  parameter는 탄화물의 가늘고 찌그러짐을 나타내고,  $y$ 는 탄화물입자 형태의 복잡성을 나타내기 때문에 구상화율(circularity)과 관련된 parameter이다.

$$x = \pi D^2 / (4A) : \text{Degree of elongation} \quad (6)$$

$$y = P^2 / (4A\pi) : \text{Degree of intricacy}$$

여기서,  $A$ 는 입자의 면적( $\mu\text{m}^2$ ),  $D$ 는 주축 길이( $\mu\text{m}$ ) 그리고  $P$ 는 입자 둘레의 길이( $\mu\text{m}$ )를 나타낸다.

모든 크리프 강도가 요구되는 강은 주로 미세하게 분산된 탄화물 입자에 의한 강도에 의존한다. 그리고 일반적으로 그들 사이의 거리가 중요한 요소라고 인식되어 왔다. 탄화물 입자를 전위(dislocation)을 방해하는 개념으로 생각한다면, 그들의 거리가 멀어짐에 따라 크리프 강도가 급격히 낮아지고, 이러한 현상은 적용된 응력에 비례해서 커지게 된다. 고온에서 고체상태 확산이 일어나면, 탄화물입자는 전체적인 표면적을 감소시키기 위해 조대해진다. 그러한 입자의 조대화는 주어진 부피에서 입자의 거리가 증가함으로써 달성된다. 이것은 상대적으로 큰 입자가 작은 입자를 포획하여 성장하고, 따라서 입자의 수가 감소하기 때문이다.

### 3. 표면복제기법 적용사례

#### 3.1. 석유화학플랜트 Reformer Tube

여수지역에서 1995년 6월에 제작되어 운전 중인 reformer tube(ASM A 608, HK 40 : 25Cr-20Ni-0.4C)로 온도(inlet/outlet 555/890°C), 압력(16.6/11.6 kg/cm<sup>2</sup>) 전체길이(12 m)로 단별로 온도 차이가 나는 관계로 구간별로 표면복제기법을 적용하였으며, 미세조직과 탄화물 정보를 취득하여 평가를 하였다.

Fig. 10(a)는 신재 reformer tube의 미세조직으로 오스테나이트기지(matrix)에 원심주조의 수지상(dendrite) 및 결정입계를 따라 공정탄화물(eutectic carbide)가 정출되어 있다. Fig. 11(a)는 사용재 inlet 모세에 해당하는 미세조직으로 미세한 2차 탄

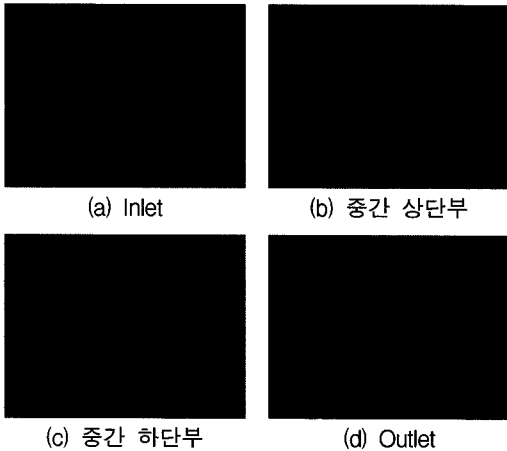


Fig. 11 Comparison of division microstructure (S/D)

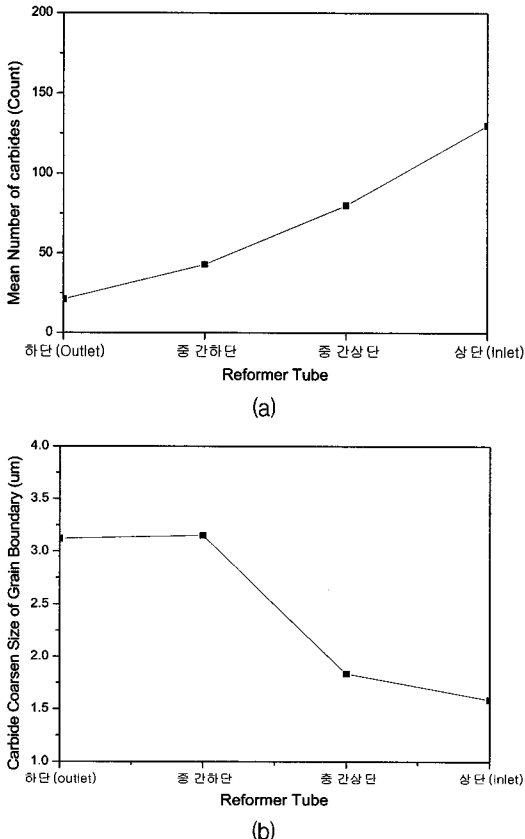


Fig. 12 Carbide change of reformer tube; (a) Mean number of carbide, (b) Carbide coarsen size of grain boundary

화물이 결정입내에 균일하게 석출되어 있고 일부 튜브에서는 2차 탄화물이 결정입계의 1차 공정 탄화물 주변에 집중해서 석출되어 있는 것이 확인되고 있으며, 조대화도 일부 진행되었다.

(b)-(c)는 석출된 2차 탄화물이 입내를 중심으로 석출되어 있고, 공정 탄화물 주위에 PFZ (precipitate free zone)이 관찰되고 있다. (d)는 상단에 비해 고온이므로 기지 조직에 미세하게 석출되었던 2차 탄화물들이 재용해되거나 합체되어 조대화 및 구상 형태로 독립적으로 존재하고 있는 단계를 보여주고 있다.

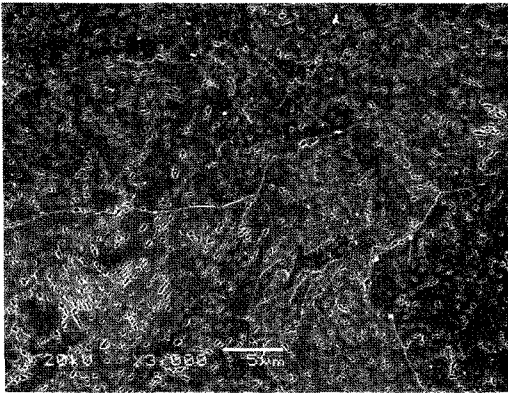
Reformer tube에서 석출 탄화물의 양과 조대화의 경향을 정량적으로 조사하기 위해서 image analyzer (ESCAN 4000) 프로그램을 이용하여 결정립내 2차 탄화물의 수와 및 공정 탄화물의 크기를 측정하여 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 12(a)는 결정립내 석출된 2차 탄화물의 수를 측정한 결과이다. 상단의 inlet 부위의 결정립계에서 석출된 2차 탄화물의 수가 하단의 outlet보다 상대적으로 많은 것을 알 수 있는데 이는 미세하게 석출된 2차 탄화물이 outlet 쪽으로 내려 갈수록 기지조직에 용해되거나 석출되면서 조대화 되기 때문이다. 따라서 outlet 부위에서 탄화물 수가 감소한다는 것은 2차 탄화물이 재용해되거나 점차 조대화 된다는 것을 의미하는데, 재질 열화의 말기 단계에서는 대부분 고용(solid solution)되어 사라지게 된다.

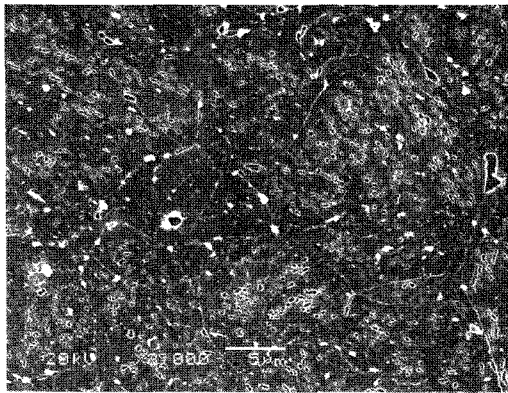
Fig. 12(b)는 공정 탄화물의 크기를 측정하여 나타낸 것이다. 일반적으로 재질 열화가 진행될수록 pearlite 구조의 공정 탄화물은 선형에서 등근 모양으로, 그리고 조대화가 심화되면서 구상화되고, 말기에는 괴상화로 되는 경향을 띠므로 공정 탄화물의 크기와 모양이 재질 열화의 진행을 보여주는 주요 특징이 된다. 결과적으로 상대적으로 고온인 하단부로 갈수록 공정 탄화물이 조대화되고 있음을 알 수 있다.

### 3.2. 화력발전소 증기터빈

사용 중인 화력발전소 고압터빈(사용시간: 175,000, 기동정지횟수 : 2,190회)에 대해서 표면복제기법을 통해 미세조직과 탄화물 정보를 취득하고, 증기터빈 로터의 수명을 평가하였다. Fig. 13는 무용력부위(coupling)와 고용력부위(고압터빈 1단)에서 채취한 레프리카의 전자주사현미경(SEM) 사진이다. 온도와 용력의 영향을 거의 받지 않는 coupling 부위의 미세조직은 전형적인 tempered bainite이다. Binite 형태도 완전하고, 결정립계에 석출된 탄화물



(a) Coupling



(b) Stage 1 of HP turbine

Fig. 13 Microstructure(replica, SEM, X3000)

도 거의 관찰되지 않았다. 그러나 HP 1단 heat groove의 경우 bainite가 대부분 분해되었고, 결정립계와 입내의 탄화물이 구상화되고 매우 조대화되어 있다. 그러나 크리프 기공은 관찰되지 않았다.

Fig. 13을 image analyzer 프로그램을 통해서 일정범위(142 μm x 92 μm)내의 탄화물 크기, 형태 및 분포상태를 정량적으로 분석하였다.

### 3.2.1. 탄화물간 거리

탄화물 분석결과 탄화물 크기가 0.01 μm<sup>2</sup>이상인 경우탄화물 크기에 따른 coupling과 HP 1단의 평균거리의 차는 일정함을 알 수 있었고, 분석결과 탄화물간 거리는 coupling의 경우는 0.694 μm이고, HP 1단은 0.789 μm이었다. 저응력 부위에 비해서 고응력 부위의 탄화물간 거리가 0.095 μm 더 멀어진 것을 확인할 수 있었다.

### 3.2.2. 탄화물 크기

탄화물 크기가 0.01 μm<sup>2</sup>이상인 경우 탄화물은 전체적으로 크기별로 균일하게 분포하고 있으며, 분석결과 탄화물의 평균크기는 coupling의 경우 0.140 μm<sup>2</sup>이고, HP 1단은 0.283 μm<sup>2</sup>이었다. 저응력 부위에 비해서 고응력 부위의 탄화물의 평균크기가 0.143 μm<sup>2</sup> 더 커져 있음이 확인되었다. 즉, 재질열화 초기의 탄화물은 설비가 장시간 고온에서 열화 과정을 거치면서 약 2배 가까이 성장한 것으로 판단된다.

### 3.2.3. 탄화물 형상

탄화물 형상에 대한 식(6) 정의를 이용하여 형상 parameter를 계산한 결과, coupling에서는 36.036이고, HP 1단의 경우는 1.026로 계산되었다. 즉, 고응력 부위는 열화가 진행되면서 상기 3.2.1과 3.2.2항과 같은 결과와 더불어 구상화가 진행되면서 탄화물은 복잡한 형상에서 단순한 형상으로 변형되었음을 의미한다.

### 3.2.4. 수명평가

위의 세가지 분석 결과를 가지고, 탄화물과 증기 터빈 로터 수명의 관계를 통해 구할 수 있는 수명 소비율은 Table 1과 같다. 즉, 평균값을 기준으로 평가할 때, HP 1단 heat groove의 수명소비율은 탄화물간 거리 관점에서는 115.9%이고, 탄화물의 평균크기 관점에서는 110.1%로 평가되었다. 또한 탄화물 형상에 의한 수명소비율은 85.6%로 앞의 두 parameter에 비해서 약간 낮게 평가되었다. 또한 95% 신뢰구간(confidence interval)에서의 수명 소비율은 78.4~125.4%로 평가되었다.

Table 1 Results of life assessment of steam turbine

Method	Carbide image analyzing			Remarks
	Interspacing	Size	Shape	
LF(%)	106.4~	98.7~	78.4~	Confidence Interval 95%
	125.4	121.5	92.8	
	115.9	110.1	85.6	Average

#### 4. 결론

고온 설비의 건전성 확보와 신뢰성 있는 수명평가를 위해 표면복제기법으로 얻어진 탄화물에 대한 분석 및 평가를 통해 설비의 재질열화 정도 및 수명소비율을 결정하는데 보다 정량적이며, 유용한 평가기법인 것으로 확인 되었다.

#### 감사의 글

본 원고 작성에 자료를 제공해 준 한국전력 전력연구원과 피레타(주) 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참고문헌

- [1] 김건영, 기계, 구조물의 경년열화와 수명평가기술, 비파괴검사학회지, Vol. 19, No. 2, pp. 94-109 (1994)
- [2] 박익근, 발전설비의 유지보수와 비파괴검사 현황(I), 비파괴검사학회지, Vol. 24, No. 2, pp. 197-209 (2004)
- [3] 이상국, 발전용 Cr-Mo강의 결정립 변형법 및 초음파법에 의한 열화도 평가 연구, 비파괴검사학회 추계학술대회 논문집, pp. 40-45 (2002)
- [4] B. J. Cane and M. S. Shanmmas, "A method for remanent life estimation by quantitative assessment of creep cavitation on plant," Report TPRD/L/2645/N84, CEGB, (1984)
- [5] M. Shammas et al., "Remaining life of boiler pressure parts, HAZ models," Final Report RP 2253-1, Vol. 2, EPRI, (1988)
- [6] M. C. Askins et al., "Remainin life of boiler pressure part-base material model," Report RP 2253-1, Vol. 3, EPRI, (1988)
- [7] J. M. Brear, et al., "Models for determination of creep curves in low alloy ferritic steels based on carbide coarsening," Report RP 2253-1, Report P2, EPRI, (1984)