

석출물 형상의 디지털 이미지 분석에 의한 가스터빈 핵심부품의 새로운 수명평가기술 개발

장문수 · 안성욱¹*

서경대학교 소프트웨어학과, ¹캐스텍(주) 주조기술연구소
(2007. 11. 21. 접수. 2008. 4. 3. 승인)

Development of a new lifetime prediction method for gas turbine core parts by digital image analysis of precipitates morphology

Moon Soo Chang and Seong Uk An¹*

Department of Computer Science, SeoKyeong University, #16-1, Jungnung-Dong, Seongbuk-Gu, 136-100 Seoul, Korea

¹Foundry Institute, Castec Ltd., 1682-6, Shinil-Dong, Daeduk-Gu, 306-230 Daejeon, Korea

(Received November 21, 2007; Accepted April 3, 2008)

요 약: 1,000°C 이상의 고온에서 수천~수만 rpm으로 작동하는 가스터빈 부품의 수명을 예측하기 위하여 크립파단 실험으로 얻어진 Larson-Miller 크립곡선을 활용하고 있다. 이 방법은 고온에서 시편에 하중을 주어 파단수명을 구하여 크립 파단수명을 온도와 하중의 함수로 나타낸 실험결과 곡선이다. 파손적 실험으로서 오차가 수십배를 상회하여 수명예측이 정확하지 않다. 반면에 본 연구에서는 비 파손적일 뿐 아니라 더 정확한 수명예측이 가능한 방법을 소개하고자 한다. 즉, 1,280°C에서 22,000시간(6,000 기동) 사용되어 폐기된 보령 가스터빈 제1단 단결정 블레이드(버킷)에 국부적으로 polishing한 후, 부식시킨 다음 replica를 떼낸다. 이 replica에 붙은 석출물들은 TEM과 SEM 사진으로 구하여 디지털 이미지하여 크기가 측정된다. 블레이드가 사용 전에 0.45 μm 크기에서 사용 후, 0.6 μm 로 성장하였으나, 추가적으로 약 만여 시간 더 사용할 수 있으며 열처리를 추가하면 이만여 시간 더 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract: To describe the lifetime prediction of gas turbine core parts serviced in some ten thousands rpms at over 1,000°C, the Larson-Miller Creep Curves, which are formed by creep rupture tests as the destructive experiment with parameters of stress and temperature, are used often, but not exact and reliable with errors of over some tens. On the other hand, this study shows a non-destructive method with increased accuracy and reliability. The SEM and TEM specimens were extracted by replica after polishing the local airfoil and root surfaces of the first stage scraped blade (bucket), serviced for 18,000 hours at 1,280°C in Gas Turbines of Boryong. The observed TEM and SEM precipitates were digitalized for calculation of the average size. Here we could find the precipitate size grown from 0.45 μm to 0.6 μm during service and the grown precipitates to be still sound. From these results we could conclude that the scraped blade can be used for ten thousand hours additionally and for twenty thousand hours by additional heat treatments on the scraped blade.

Key words : lifetime, CMSX 4, single crystal blade(bucket), r' precipitate, r' rafting, creep

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)42-935-2211 Fax : +82-(0)42-935-2219

E-mail : suan2001@empal.co.kr

1. 서 론

가스터빈은 항공기와 발전의 핵심모듈로서 터빈 입구온도(TIT : Turbine Inlet Temperature)는 동력의 크기와 효율을 결정한다. 즉, 고성능 고효율 가스터빈 제작을 위하여 TIT 온도를 높이는 기술이 핵심이다. TIT는 1970년대에 1,000°C에 불과 했으나 최근에는 1,650°C로 크게 향상되었으며, 터빈 온도가 100°C 증가함에 따라 출력 약 15%와 4~6%의 에너지 절감효과가 있다. 따라서 가스터빈의 출력은 온도가 높을수록 증가하나, 그 회전체는 고온에서 막대한 하중을 받게 된다. 회전체가 손상이 되면 가스터빈이 폭발하는 사고가 발생한다. 이러한 이유로 가스터빈 블레이드(버켓)인 경우 합금소재와 함께 그 수명예측은 가장 중요한 핵심 기술이다. 수명예측은 현재 크립파단시험, 즉 고온에서 시편에 하중을 가하여 파단되는 시간으로 이루어진 Larson-Miller 크립곡선으로 수명예측을 한다. 즉, 보령 가스터빈의 고압 및 저압 1단 터빈은 각각 197 및 88개의 블레이드로 구성되는데 이중 하

나를 전체를 대표한 크립파단 시간을 Larson-Miller 크립곡선에 적용시켜 수명을 예측하며, 나머지 블레이드들도 동일한 수명을 갖는 것으로 가정한다. 이 방법은 또한 블레이드에서 시편을 채취하여야 하는 파손적 방법으로 블레이드를 재사용할 수 없다. 특히 각 블레이드의 조직과 손상정도가 동일하지 않으므로 수명예측 오차가 수십배 이상이고, 재연성도 없기 때문에 수명평가에 문제가 있다. 블레이드의 수명을 결정하는 인자는 수없이 많으며, 우선 주조공정에서 발생하는 조대한 공정조직이나 밀집된 scripa형의 석출물 등은 주조결함이라 할 수 있다.¹ 특히, 블레이드의 고온강도와 사용온도에 따른 발전사에 고온강도는 r'이라는 석출물이 생성되어 고온강도를 급격히 향상시킨다.² 그러나 이 석출물은 고온에 노출되는 동안 상호반응을 하여 성장하여 가면서 고온강도를 저하시킨다. 이 r' 석출물의 조성은 Ni₃(Al,Ti)이며, 주로 Ni₃Al가 주축을 이룬다. 이러한 석출물 강화 현상에 대하여 Fig. 1에 나타내었다.^{3,4} 좌측 상단의 그림에서 석출물 생성이 됨에 따라 약 20 nm 성장할 때 까지는 강도가

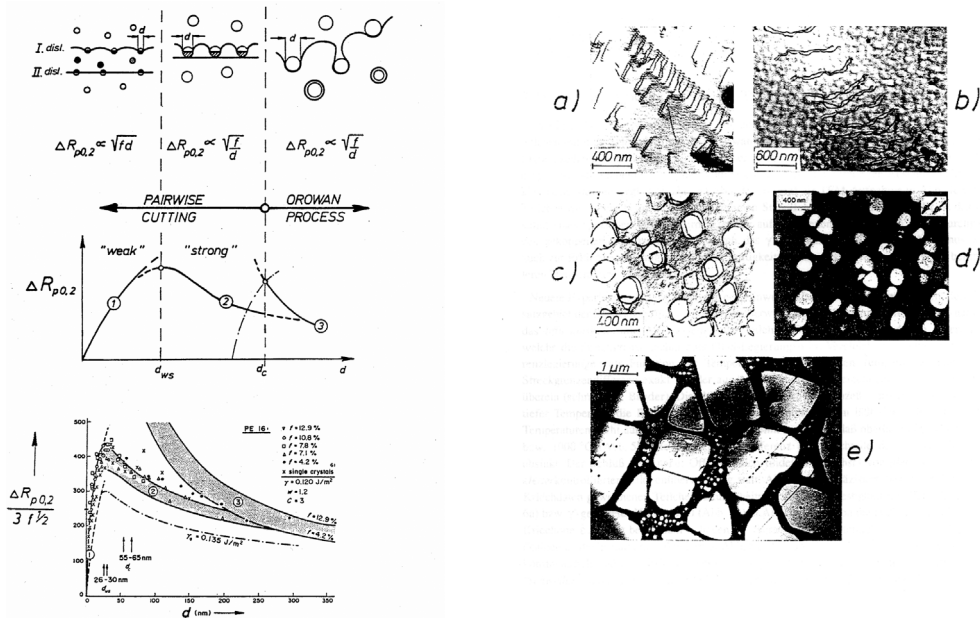


Fig. 1. Mechanism of r' strengthening (left) above : nucleation and development process of r', middle ; Strengthening relations according to the reaction between r' and dislocations and bottom ; summary of strengthening on the r' size. (right) practically observed dislocation structures in the different r' sizes in TEM (Transmission Electron Microscopy).^{3,4} (left) (a) Reaction characters and configurations of dislocations based on theories (b) Theoretical yield strength curve in dependence on r' sizes by r' volume fraction and (c) Comparison of the measured with theoretical values of (b).^{3,4} (right) Direct dislocation reactions with r' in deformed specimen at room temperature; (a) Processes of weakly pushing dislocation pairs in Nimonic PE 16, (b) Strongly reacted dislocation pairs of the tertiary creep in Nimonic 105, (c) Orowan ring on the large r' precipitates crept close to failure in Nimonic 105, (d) Dislocation cutting r' in the tertiary creep in Nimonic 105 and (e) Dislocation cutting the coarse and cuboidal r' in the tertiary creep in IN-100.

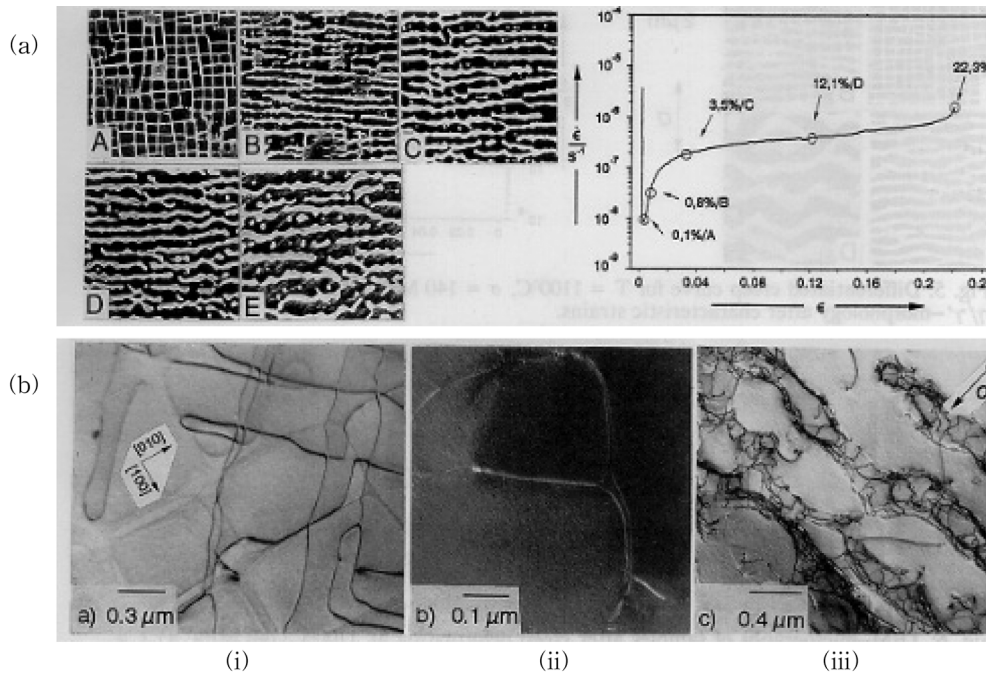


Fig. 2. (above) r' morphology change according to creep deformations in CMSX 4. (A) just after load in creep test, no change of r' structure, (B) r' rafting observed in 0.8%, r' rafting has been started, (C) r' rafting is prematured in 3.9% (bottom) dislocation structures of different strains in TEM observations.⁵ (a) Differentiated creep curve at 950 and 301 MPa. r' morphology changes with the strains during creep. The corresponding SEM-micrographs show r' rafting, of which r' enlarges longitudinal (100)-sections (perpendicular to stress direction). (b) TEM-micrographs of samples after creep deformation of (a). (i, ii) just after creep dislocations are surrounding r' , of which shape is same as before creep and (iii) r' rafting are found in perpendicular to the stress direction, as found in (a).

급격히 증가하나 이들 석출물이 고온에서 상호 반응하여 성장하면서 다시 강도가 완만하게 감소한다. 이 과정을 투과전자현미경으로 관찰하여 오른쪽에 나타내었다. 즉, 고온강도가 높으면 크립강도와 수명이 크게 개선되며, 이의 미세조직 분석결과는 인장강도(Fig. 1)나 크립시험(Fig. 2)에서도 동일하게 발생한다.⁴⁵ 크립이 진행하여 석출물이 생성되는 동안 크립속도가 급격히 감소하며 크립변형이 거의 없다. 이 과정에서 생성된 석출물은 동시에 상호 반응을 하여 성장도 한다. 크립이 진행되는 동안 인장방향의 수직 방향으로 석출물이 성장하는 것을 r' rafting이라 하며(Fig. 2), 모든 유사합금에서 발견된다. 이러한 석출물 특성을 이용하여 본 연구에서는 블레이드를 파괴하지 않고 블레이드 표면조직을 replica 방법으로 채취하여 석출물 이미지를 디지털화하고, 그 크기를 측정하여 석출물 크기변화에 의하여 잔류 수명을 예측할 수 있었다. 특히 본 방법은 블레이드를 손상치 않을 뿐 아니라 각각의 블레이드를 전수검사를 하기 때문에 각각의 블레이드 수명을 정확하게 진단할 수 있다.

2. 이 론

2.1. r' (석출물) Morphology

가스터빈에 사용되는 고온부품들은 일반금속과 달리 고온에서 상온보다 높은 강도를 나타내는 특성이 있다. 이와 같이 고온강도를 가질 수 있는 인자는 Fig. 1과 같이 기지 내에 미세한 2차 r' 이 생성되어(Fig. 1 왼쪽 상단 좌측) 그 결과 고온강도가 급격히 상승하게 된다(왼편 하단 곡선 정점). 이러한 현상은 투과전자현미경에서 우편 상단 좌측과 같이 발견된다. 이어서 석출물들은 균일하게 성장하면서 그 크기가 증가하고 부피분율은 감소하게 되면서 고온강도의 저하를 가지게 된다. 이러한 r' 의 성장은 고온 크립인 경우, 고온 크립은 일정한 인장하중을 받으므로 r' 의 성장이 방향성을 가지게 된다(Fig. 1 참고). 즉, r' 은 크립변형 중, 전형적으로 인장방향의 수직방향으로 성장하는 것이 관찰되는데 이것을 r' rafting이라고 한다. r' 은 고온 인장 하에서 축 방향으로 격자상수가 더 크므로 활성도가 상대적으로 높은 Al 등의 합금원소들이

튀어나와 이동하여 인장축방향의 수직방향으로 확산하여간다. 이것을 r' rafting이라 하고 r' morphology적으로 인장축방향의 수직방향으로 특성 짓는 현상으로 크립수명의 정도를 예측하게 한다.^{5,6} 따라서 본 과제에서는 이와 같은 데이터(크립곡선과 전자현미경 구조 및 조직)를 많이 수집하여 사용 후 폐기 혹은 수리관정을 대기하는 블레이드와 베인 에서 replica로 조직을 발취하여 비 파괴적으로 보다 정확한 방법으로 재사용여부를 진단하며 동시에 수리방법도 제시하고 잔류 수명도 제공할 수 있도록 하고자 한다.

2.2. Larson-Miller Creep Curve(크립곡선)

가스터빈 부품의 잔류수명을 예측하기 위하여 기존에는 Larson Miller 방식⁶이 주로 사용되어져 왔다. Larson-Miller 방식은 시간과 온도를 결합하여 하나의 변수, Larson-Miller parameter(함수)인 T(K+logt)를 제안하였다. 하나의 주어진 재료의 경우 시험 응력을 위의 함수에 대하여 도식한 결과 약간의 이탈된 값들은 있었으나 시간과 온도의 조합에 관계없이 여러 시험 결과가 하나의 연속적인 선을 구성하는 것을 알게 되었다. 이에 대한 여러 종류 재료의 시험결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 사용의 간단함과 안정성 때문에 그동안 수명평가에서 이 식을 많이 사용되어져 왔다. 하지만 Larson-Miller 곡선은 짧은 크립(creep) 시험을 통한 장시간의 크립 수명을 예측한다는 데서 근본적인 문제가 있다. 게다가 이 식은 크립변형에 대한 미세구조의 변화에 대해서는 전혀 고려되지 않았다는 가장 큰 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 Biemann 등⁷이 개선한 Larson-Miller 곡선에 r' 석출물 크기변화에 따른 수명변화를 측정하

여 적용시킴으로서 그 정확도를 더욱 개선시키고자 하였다. 즉, 블레이드의 표면에 replica방법으로 블레이드 표면에 있는 석출물을 채취하고, 본 연구에서 소개되는 디지털 이미지(형상) 분석에 의하여 석출물 크기를 측정하여 잔류 수명을 평가하고자 하였다.

2.3. CMSX 4에 대한 Larson-Miller 함수 분석

Larson-Miller 함수(LMP, P:Parameter)는 Rate process(속도 경과) 이론에 근거하여 크리프 파단강도를 온도와 시간에 매개 변수로 나타내는 것이다.⁷

$$LMP = T \cdot (C + \log t)$$

여기서 T는 절대온도(K), C는 무차원 상수 그리고 t는 파단시간(h)이다. LMP는 각각 다른 온도에서의 실험결과를 하나의 Master Curve로 나타낼 수 있으며, 간단하면서도 편리하기 때문에 상업용 재료의 파단 거동을 특성화하는데 널리 이용되고 있다. 그러나 크립 시험시간을 단축하기 위하여 고온과 높은 응력(stress)에서 구한 크립파단 시간 결과를 크립곡선에 그대로 적용시켜서, 보다 낮은 온도와 응력에서 구한 장시간의 결과를 삽입 할 경우, 크리프 변형 기구의 변화로 인하여 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 일반적으로 합금의 종류에 따라 고유의 상수 C 값을 가지게 된다. 본 연구에서 사용된 CMSX 4의 합금에서는 C 값을 20으로 주어져 위와 같은 그래프를 얻었다.

또한 Larson-Miller 함수와 더불어 가장 많이 사용되고 있는 것이 바로 Sherby-Dorn 함수(SDO)이다. SDP도 역시 LMP와 같이 온도와 파단시간이 주어졌을 때 재료 고유의 활성화 에너지를 구하여 수명예측에 사용되고 있다.

$$\theta = t_B \cdot \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right)$$

함수(θ)는 파단시간(t_B)와 온도(T)에 의해 정해짐을 알 수 있다. 여기서 Q는 활성화 에너지로 CMSX 4의 경우는 586 kJ/mol 값으로 문헌상에 구해져 있다. Table 1은 문헌상에 나타난 CMSX 4의 크립파단 수명 데이터를 정리한 것이다. 이 결과를 기초로 하여 Larson-Miller 함수 값과 Sherby-Dorn 함수 값을 계산하였다.

예를 들어 982°C 온도, 응력(s) 114 MPa, 크립파단 시간 T_B 8,400 시간 조건에서의 LMP와 SDP를 각각 구하면 아래와 같이 된다.

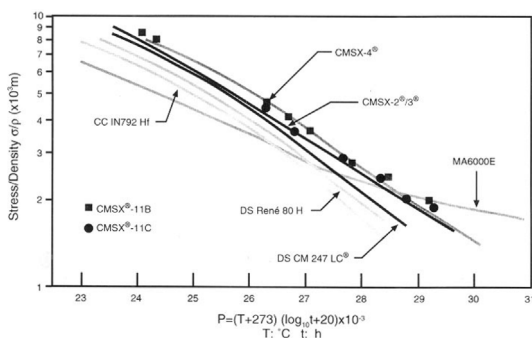


Fig. 3. Larson-Miller Curves on the different typical advanced superalloys.⁶

Larson-Miller 함수

$$p = \frac{273 + 982}{1000}(20 + \log 8400) = 30.03$$

위의 두 함수(계수)는 온도나 응력이 다른 조건에서 크립 시험 결과 값으로 계산하면 일정한 직선을 나타내는데 이 특성을 이용하여 수명을 예측할 수 있다.

CMSX 4 재질의 경우 1,038°C에서 크립 파단시간이 9,340시간일 때 982에서 Larson-Miller 함수식으로 잔류 파단시간이 4,568 day 임을 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} & (982 + 273)[\log t_r^{982\text{CENIGRADE}} + 20] \\ &= (1038 + 273)[\log(9340\text{hrs}) + 20] \\ & \log t_r^{982\text{CENIGRADE}} = 5.0399 \Rightarrow t_r^{982\text{CENIGRADE}} \\ &= 4568\text{days} \end{aligned}$$

여기서 CMSX 4 재질의 고유 활성화 에너지 Q 값은 475 kJ/mol이고 기체상수 R 값은 8.3145 J/k·mol 이다. 그러나, 이 실험식 곡선의 잔류수명(Fig. 3과 Table 1) 계산의 오차는 블레이드 소재의 초기 구조나 결함 등이 정확하게 고려되지 않았기 때문에 2배 이상으로 심하다.

3. 실험방법

1,280°C에서 약 22,000(6,000 기동)시간(EOH : Equivalent Operation Hour) 사용된 보령 가스터빈 저압 제1단 블레이드(버켓)을 Fig. 4에 나타내었다. 보령 가스터빈은 지속적으로 사용하지 않고 주마다 3-7회

Table 1. Data of Lifetime for an typical single crystal superalloy of CMSX 4.⁸

Temperature, °C	Stress, MPa	Creep Rupture time, h
1,038	98	9,340
	100	4,100
	110	2,050
	166	500
1,093	76	7,391
1,121	69	5,603
1,149	41	9,049

Temperature, °C	Stress, MPa	Creep Rupture time, h
982	95	17,016
	114	8,400 9,300 7,300
	124	5,860 6,380 5,454
	138	4,346 3,829 4,647 4,196
	168	1,637 1,603
	240	305 180 110



Fig. 4. Blade (Scrap) of the first stage gas turbine, serviced for 22,000 hours (EOH) at 1,280°C (TIT), in low pressure.

운전을 하며 켜다가 끄는 주기를 1 기동이라 한다. 1 기동마다 터빈 운영시간이 12시간 이하인 경우 1기동 시간은 12시간으로 간주하며 이를 EOH라 한다. 즉, 6,000회 기동을 하고 약 22,000 EOH 사용된 폐기품이다. Fig. 4는 블레이드 실제 모양을 나타내며, 좌측을 root, 우측을 airfoil이라 부른다. airfoil표면의 하얀색은 지르코니아 세라믹 코팅이다.

3.1. Replica 준비 방법

Replica를 준비하기 위해 블레이드의 표면이 깨끗하도록 세척한 후에 Replica를 채취하고자하는 부위에 Fig. 5과 같은 전해에칭 방법을 사용할 경우 시험대상물로부터 석출물을 쉽게 추출이 가능하다. 본 예에서 사용한 조건은 5% H₃PO₄용액에서 4V의 전하를 걸어 1분간 에칭(etching)을 한 것이다. 니켈기 합금은 본 예에서 사용한 용액이 나중에 수명평가를 위한 이미징 처리에 가장 좋은 용액이며, 전하의 양은 시험편의 상태에 따라 다르게 사용할 수 있다.

이와 같이 에칭을 한 후에 몰로 표면을 세척하고,

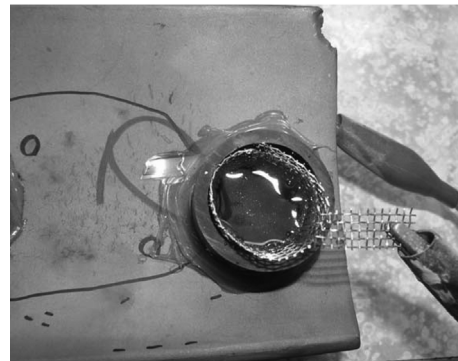


Fig. 5. Electrically Charged Etching Process for Replica.

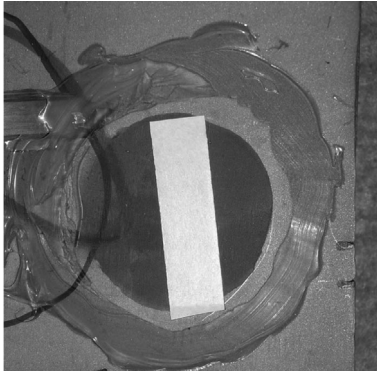


Fig. 6. Carbon Tape on the etched surface after remove of the etching materials.

건조시킨 후 Replica Tape를 에칭 면에 Fig. 6과 같이 부착하여 조직을 추출하게 된다. 사용되는 Film은 전자현미경용 Carbon Tape를 사용할 수 있으며, 이때 시험편으로부터 석출물이 잘 채워지도록 접착 면을 균일한 압력을 가해야하며, 채취 후에는 석출물이 밀리거나 모양이 변할 수 있으므로 과도한 힘을 가해서는 안 된다.

3.2. 프로그램 구현

일반적으로 블레이드의 수명 예측을 위한 석출물 이미지 분석은 실험자가 전자 현미경에서 육안 관찰로 이루어진다. 본 논문에서는 석출물 이미지에 대해서 디지털 이미지 처리를 함으로써 효율적인 육안 관찰이 이루어지게 하고 육안 관찰의 오류를 방지한다. 나아가 자동 수명 예측 시스템의 기초 기술을 개발하였다.

석출물 이미지의 기본적인 구조는 사각형의 석출물 조직이 균일하게 배열되어 있는 격자 무늬를 바탕으

로 한다. 블레이드가 손상될 경우 석출물의 상호 반응으로 조직들이 뭉쳐져서 격자 구조가 흐트러진다.

이미지 분석의 기본 개념은 격자 조직을 자동으로 검출하여 격자의 수와 크기를 찾는 것이다. 격자 조직을 구별하기 위해서는 조직 부분과 경계 부분을 명확하게 구분해야 한다. 그러나 전자 현미경으로부터 입력되는 이미지는 격자의 경계면이 뚜렷하지 않다. 그리고 격자 무늬가 정확하게 축방향과 같은 방향으로 나열되기 어렵기 때문에 축과 경사각을 이루게 된다.

본 논문에서는 Fig. 7과 같은 이미지 처리 과정을 통하여 석출물 이미지를 분석한다. 이 과정들은 입력된 이미지로부터 연속적으로 자동 처리된다. 다음 절에 각 이미지 처리과정을 차례로 기술한다.

3.2.1. 전처리 과정

(1) 기울기 보정

표면전자 현미경(SEM)으로 촬영한 사진의 석출물 배향이 일정한 각도로 기울어져 있을 경우(Fig. 8(a)) 그 기울기를 보정함으로써 이미지 처리에서 오차를 줄이기 위해 구현한 알고리즘이다. 기울기 보정에 대한 알고리즘은 이미지에 원을 80개 그려 원 하나당 서로 다른 각을 가진 180개의 선분을 그어 모든 선분에 대한 픽셀(pixel: 화면상에 나타나는 최소단위의 화소)의 gray값을 추출하여 가장 알맞은 각을 찾는 방법을 사용하였다. 기울기 보정 후 원본이미지는 Fig. 8(c)와 같이 이미지 중심을 기준으로 회전하게 된다.

(2) 이미지 반전

스캐닝된 이미지는 경우에 따라서 흑백이 반전되어 입력되거나 격자무늬의 색이 일반적인 경우와 반대의 색인 경우가 있다. 이러한 이미지들은 전체 이미지의 색을 반전시킴으로써 문제를 해결한다. 이미지 반전

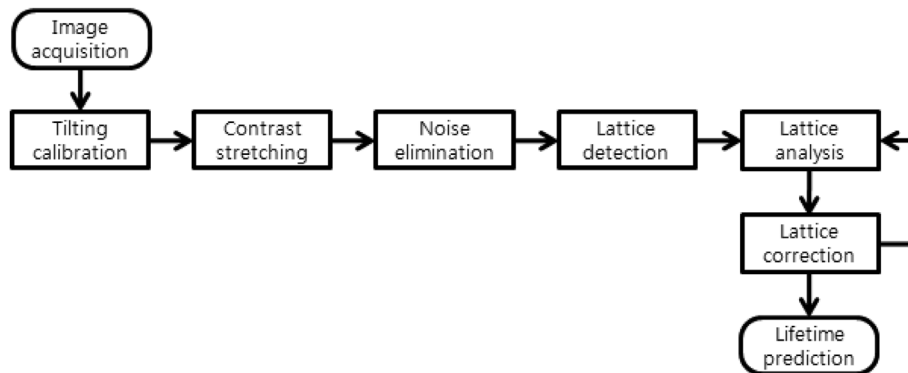


Fig. 7. Process for image analysis.

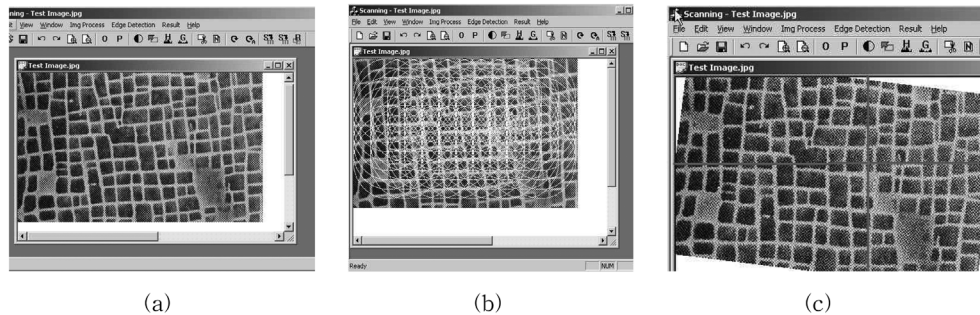


Fig. 8. (a) Original Image by SEM, (b) Image tilting process and (c) Result of tilting calibration.

알고리즘은 이미지의 한 픽셀의 gray값을 최대값인 255에서 뺀 값의 절대값으로 저장하는 방법을 사용하였다. gray값(gray value or gray level)은 이미지의 밝기 정도를 나타내는 값으로써, 색상이 없는 흑백 이미지는 회색으로 밝기 정도가 나타나므로 gray값이라고 한다. 이 gray값은 주로 2의 8제곱인 256단계의 값을 가지는데, 이것은 컴퓨터 저장단위인 바이트(byte)가 이진 값(bit)을 8개 모은 단위이기 때문에 저장과 처리의 편의를 위하여 선택된 값이다.

3.2.2. 이미지 처리

(1) 격자의 이미지 개선

이미지 처리의 성능을 향상시키기 위해서는 석출물 이미지의 격자무늬가 명확하게 나타나야 한다. 격자의 색을 검은색으로 생각하고 격자 사이의 간격(선으로 나타난 부분)의 색을 흰색으로 생각하여 검은색과 흰색의 gray값을 극대화시켜줌으로써 격자와 배경을 명확하게 분리할 수 있다. 이를 위하여 본 논문에서는 HistoUpStretch 알고리즘을 사용한다. HistoUpStretch는 사진 내 픽셀의 최소, 최대값의 비율을 이용하여 고정된 비율로 영상의 밝기를 조절함으로써 이미지의 명암 대비(contrast)를 높인다. 처리 결과는 Fig. 9의 오른쪽 이미지와 같이 선명한 이미지로 나타난다.

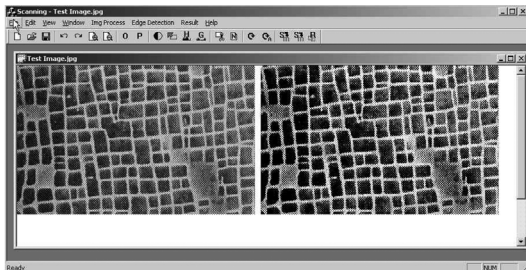


Fig. 9. Image Histo Up Stretch.

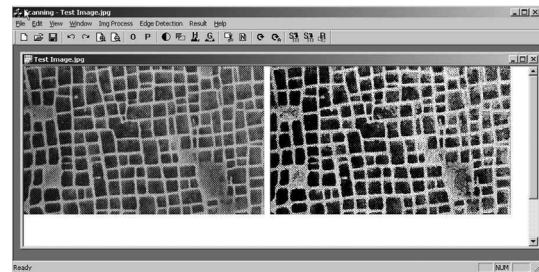


Fig. 10. Noise treatment.

(2) 노이즈 처리

격자의 색은 하나의 격자 내에서도 일정한 색이 아니기 때문에 HistoUpStretch 알고리즘으로 처리한 후에도 격자의 부분이 연하게 나오고 배경에 노이즈가 생기는 문제점이 남는다. 이 문제점들을 해결하기 위하여 격자의 연한 부분은 검정색으로 채워서 격자를 더욱 뚜렷하게 만들고, 중심 픽셀에서 주위에 검정 픽셀이 적으면 그 픽셀은 노이즈라고 간주하여 그 픽셀을 흰색으로 저장하는 방식으로 노이즈를 제거해 준다(Fig. 10).

(4) 격자 추출

노이즈가 제거된 깨끗한 이미지에 대해서 격자들에 대한 정보와 모양을 사용자에게 보여주기 위하여 격자 추출 알고리즘을 구현하여 적용한다. 지금까지 과정으로 처리된 이미지의 격자 테두리는 검은색으로 구성되어 있다. 이미지를 처음부터 검색하여 검정색 픽셀을 찾으면 그 픽셀 주변을 검색하여 배경과의 경계면을 따라가다가 원래 위치로 돌아오게 되면 하나의 격자를 찾은 것으로 간주하고 그 정보들을 격자목록에 저장한다. 격자목록에 저장된 격자 테두리에 대한 정보를 토대로 격자의 가로 세로 면적 비율 등을 계산하여 정보 창에 격자에 대한 정보를 보여주고, 격자의 모양을 빨간색으로 표시하여 사용자의 가시성을

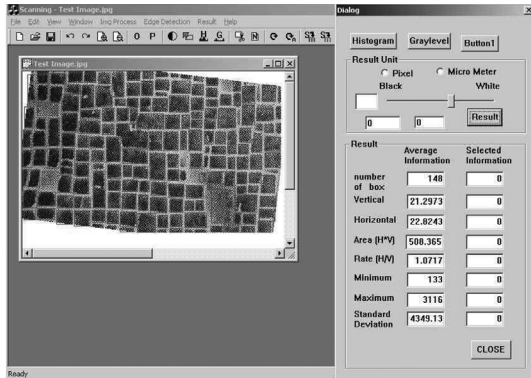


Fig. 11. Image after treatment.

높였다(Fig. 11).

3.2.3. 이미지 후처리 인터페이스

자동으로 처리된 격자 추출 과정은 전문가가 눈으로 확인한 결과에 비하여 오류를 포함한다. 격자추출 후 전문가가 수작업으로 처리 결과를 수정하는데 도움을 주기 위하여 후처리 인터페이스를 구현한다. 사용자가 특정한 격자의 정보를 보고 싶을 때, 원하는 격자를 마우스 왼쪽버튼으로 클릭하면 선택된 격자는 파란색으로 변하고 정보창에 결과가 나타난다. 여러 개의 격자를 선택하고 싶을 때는 컨트롤 키를 누르고 마우스를 클릭하면 여러 개의 격자가 선택이 되고 선택된 격자들의 평균이 정보창에 나타난다. Fig. 12는 여러 개의 격자가 선택된 경우의 화면을 나타내고 있다. 결과 수정 기능에서는 마우스 오른쪽 버튼을 클릭하면 클릭된 격자가 제거됨으로써 잘못 처리된 격자의 수정이 가능하다.

한 이미지에 나타난 모든 사각형의 통계치를 이용

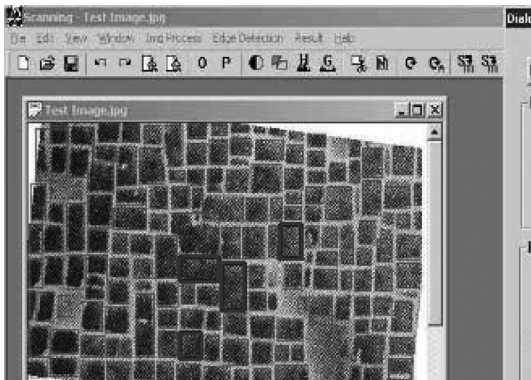


Fig. 12. Selected lattice information.

하여 전체 사각형 수, 평균 사각형 크기, 면적 등의 정보를 추출한다. 그리고 잘못된 이미지 분석 결과가 있을 경우 관찰자가 잘못된 영역을 표시하고 다시 분석하는 과정을 반자동으로 진행한다. 최종적으로 완성된 석출물 이미지로부터 석출물 크기를 측정하여 그 크기의 차이로 블레이드의 잔류수명을 예측하였다.

4. 결과 및 토의

Fig. 13은 Fig. 4의 Airfoil 부분에서 추출된 Replica의 면에 시험편의 모양이 그대로 나온 것을 알 수 있다. Airfoil을 따라 Dendrite(수지상)가 관찰되며, 고배율로 관찰하게 되면, Fig. 14과 같이 석출물을 관찰되며, 석출물들이 상호 반응하여 뭉쳐있는 것들이 발견된다.

Fig. 15는 Fig. 13과 14의 영역을 절단하여 표면연마와 부식을 시킨 후 표면전자현미경에서 관찰한 결

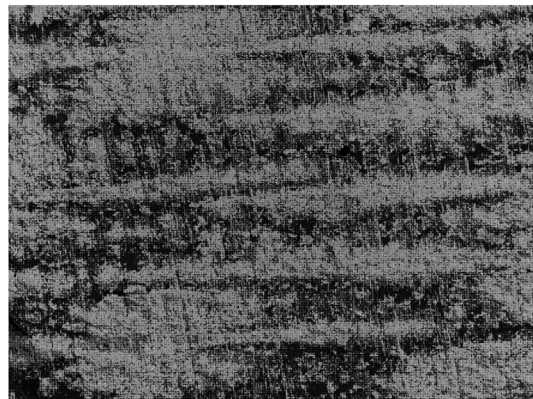


Fig. 13. Airfoil Replica SEM (x 50)

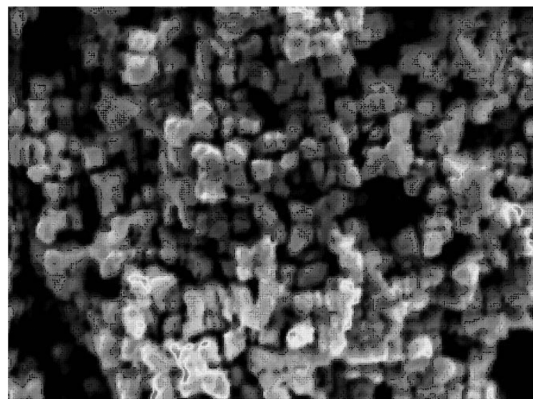


Fig. 14. Airfoil Replica SEM (x 5,000)

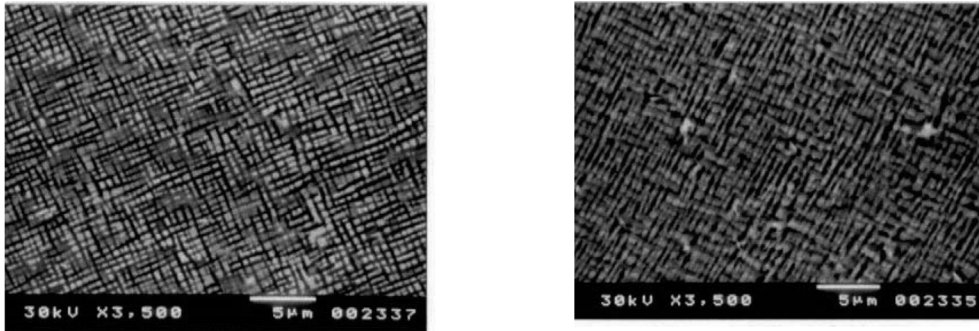


Fig. 15. r' morphology in blade root of Fig. 4 observed by SEM.

과이다. 본 연구에서는 이들 사진에서 석출물의 크기 (이미지)들을 통계학적으로 측정하여 평균크기를 자동적으로 분석하도록 하였다. 석출물의 morphology는 사각형의 모양으로 상호 직각 방향으로 균질하게 배열되어 있으며 그 크기는 약 0.4~0.5 μm 크기를 갖는다. 이 크기가 블레이드가 사용되기 전에 갖는 전형적인 크기이다. Fig. 4와 같이 사용된 블레이드에도 Airfoil 영역의 조직은 변하여도 root 영역은 열과 응력의 영향을 거의 받지 않으므로 사용되지 않은 조직으로 간주한다. 따라서 사용된 블레이드의 조직변화를 재확인하기 위하여 TEM 분석도 하여 그 결과를 Fig. 16의 좌측에 나타내었다.

SEM이나 TEM에서 관찰된 석출물 이미지 분석방법은 Fig. 16의 좌측 석출물 사진을 예로 하여 자세히 설명하였다. 3.2장에서 설명한 바와 같이 석출물 사진을 주사 입력시키고, 석출물 면적을 측정하여 석출물 크기를 통계학적으로 구하였다. 즉, 1,280°C에서 22,000 EOH 사용한 블레이드에서 상대비교를 하기 위하여 블레이드 소재의 변형전 조직을 대신하여 블레이드 root 영역, 그리고 손상정도를 알기 위하여 블

레이드 손상 부위의 영역을 Fig. 16에 나타내었다. Fig. 16에서 좌측사진의 석출물 크기는 r'_0 이고, 우측 사진의 손상된 블레이드 조직의 석출물 크기는 r'_1 : 로서 다음의 공식을 충족한다;

$$r'_0{}^3 - r'_1{}^3 = k \cdot t$$

r'_0, r'_1 : r' size before, after service

k : growing constant, t : time, $k = 2.5 \text{ nm}^3$ at 950°C by experimental result

즉, $r'_0 = 0.45 \mu\text{m}$, $r'_1 = 0.60 \mu\text{m}$ 으로 측정되었으며 이를 앞의 식에 적용시키면 석출물 조직적으로 13,888 EOH 시간 운영된 것으로 계산된다. 보령에서 약 22,000 EOH 사용한 제1단 블레이드(Fig. 4 및 Fig. 16 우측 그림)의 수명은 24,000 EOH로서 폐기가 되어야 한다. 그러나 본 연구에서 석출물 구조로 볼때, 14,000 EOH 사용된 것으로서 이 폐기된 블레이드를 그대로 사용하여도 10,000 EOH를 더 사용할 수 있다. 더 사용할 수 있는 이유는 (1) EOH 시간이 과다하게 잡혀 있고 (2) 본 블레이드 제품의 조직 등으로 판단할 때, 초기에 건전하게 제조된 상태에서 설계보다 덜

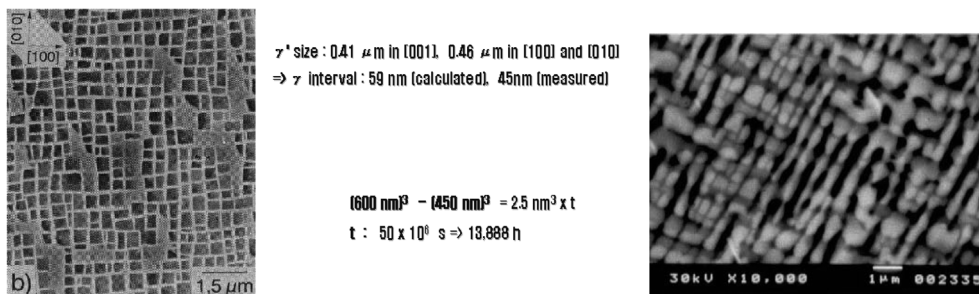


Fig. 16. r' morphology in blade root observed by TEM and SEM : (left) TEM image in blade root and (right) SEM image in airfoil.

가혹하게 사용되어 석출물이 안정되어 회복 가능한 건전한 상태를 유지하고 있다. 이를 고려할 때 (3) 운영온도와 압력이 기존 계획보다 낮은 분위기에서 사용된 것으로 사료된다. 만약 이 폐기된 블레이드를 용체화 및 석출강화 열처리를 하면, 이미 변형된 석출물 조직의 약 80% 이상 회복 가능하므로 그 잔여 수명도 약 2배 이상인 24,000 EOH로 수명 개선도 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 적용하는 방법으로 나머지 블레이드들도 모두 본 연구의 비파괴적인 방법으로 각각의 블레이드들의 수명예측을 하여 블레이드마다 잔여 수명을 예측하여 적절히 재사용할 수 있는 것으로 판단되었다.

5. 결 론

22,000 EOH 사용하여 기 폐기된 가스터빈 블레이드의 표면의 조직(석출물)을 replica법으로 채취하였다. 석출물 사진은 주사되어 본 연구에서 개발한 이미지 분석 프로그램으로 석출물 크기를 통계학적으로 측정하였다. 그 결과 석출물 크기는 0.45 μm 에서 0.60 μm 로 성장하였으며 석출물 조직 변화가 크게 심하지 않으므로 열처리를 통하여 회복이 가능한 조직이다. 이러한 석출물의 크기변화는 가스터빈 사용시간 14,000 EOH로 계산되며, 본 폐기된 블레이드를 10,000 EOH 더 사용해도 됨을 알 수 있었다. 용체화 및 석출강화 열처리를 추가하여 조직을 회복시키면, 본 폐기품의 수명은 20,000 EOH 더 사용할 수 있음을 알 수 있었다. 나머지 블레이드들도 모두 이와 같이 전수 검사하여 재사용할 수 있음을 알 수 있었다. 수명예측을 위하여 보편적으로 사용되던 Larson-Miller 크립곡선은 수명예측의 정확도와 재연성에 대한 신뢰성이 낮으면서 블레이드를 파손하므로 블레이드 재생도 불가능하다. 반면에 본 석출물 분석방법은 비 파괴적인 방법으로 블레이드 전수 검사가 가능하며, 기존 Larson-Miller 크립곡선 방법 보다 정확도와 재연성에 있어서

우수함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산자부의 공통핵심기술개발사업과 한국중부발전(주) 중소기업지원사업과 산업자원부 공통핵심기술개발사업의 지원으로 이루어진 바 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. G. K. Bouse and S. W. K. Shaw, 'Development of Superalloys', *Materials Science and Technology* **3**, 682-700 (1987).
2. R. F. Decker and C. T. Sims, 'The Metallurgy of Nickel-Base Alloys', vol. 2, *The Superalloys*, Ed. C. T. Sims and W. C. Hagel, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 33-77, 1972.
3. L. M. Brown and R. K. Ham, *Strengthening methods in crystals*. Ed. A. Kelly and R. B. Nicholson, Appl. Sci. Publ., London, 1971.
4. W. Huethner and B. Reppich, *Zeitschrift fuer Metallkunde*, **69**, 628-634(1978).
5. Willi Schneider, *Hochtemperaturkriechverhalten und Mikrostruktur der Einkristallinen Nickelbasis-Superlegierung CMSX 4 bei Temperaturen von 800 bis 1,100*, Dissertation, Uni. Erlangen-Nuernberg, 1993.
6. G. L. Erickson, *Invited Paper Presented at the Processing and Design Issues in High Temperature Materials*, Davos, Switzerland, **19**, May 1996.
7. Horst Biermann, Berthold von Grossmann, Thomas Schneider, Hua Feng and Hael Mughrabi, *Superalloys*, Ed.R. D. Kissinger et al., TMS 201-210, 1996.
8. F. R. Larson and J. Miller, *Trans. ASME*, **74**, 765-770(1996).