

컴퓨터 화상처리 기법을 이용한 고온 구조물의 수명평가 연구

김효진*, 정재진*

A Study on Life Assessment for In-Service High-Temperature Components Using Image Processing Technique

Hyo-Jin Kim*, Jae-Jin Jung*

ABSTRACT

The creep life fraction can be evaluated by the degree of grain deformation since the grain of Cr-Mo base metal deforms in the direction of stress. The grain deformation method using image processing technique is developed for life assessment of in-service high-temperature components. The new assessment model of grain deformation method is presented to apply to in-service components and is verified by interrupted creep test for ex-serviced material of 1Cr-0.5Mo steel. The proposed model, which is irrespective of stress direction, is to evaluate mean of the absolute deviation for the measured ratios which are diametrical maximum to minimum dimensions for grains.

Key Words : Creep Life Fraction(크리프 손상율), Life Assessment(수명평가), Grain Deformation Method (결정립변형법), Image Processing(화상처리), Master Curve(마스터 커브)

1. 서론

국내외적으로 고온/고압에서 운전하고 있는 화력발전소를 설계수명 이상으로 사용하기 위한 수명연장에 많은 노력이 이루어지고 있다. 이러한 수명연장에 대한 관심은 설비의 검사(inspection), 모니터링(monitoring) 기술 및 잔여 수명평가 기술의 개발을 선도해왔다. 화력발전설비인 보일러의 헤더와 스팀 파이핑(Steam Piping)은 고온/고압에서 가동되므로 장기간 사용함에 따라 재질열화와 크리프 손상(creep damage)에 의해 파손이 일어나게

된다. 용접부는 크리프 연성(creep ductility)이 모재보다 매우 적어 크리프 소성변형을 감당할 능력이 상대적으로 작으므로 크리프 기공(creep cavitation)이 발생되어 크리프 기공의 성장 그리고 기공간의 합체로 인해 균열이 발생되어 파손이 일어난다. 이러한 용접부의 수명평가 방법으로는 크리프 기공의 분율을 이용한 A-parameter⁽¹⁾와 크리프 기공의 밀도를 이용하는 기공 밀도법⁽²⁾을 주로 사용하고 있다. 반면에, 모재에 있어서의 크리프 손상은 일반적으로 크리프 기공이 생기기 이전에 재질연화(softening)나 변형(header-body swelling)에 의해 발

* 한국중공업(주) 기술연구원

생하며, 크리프 기공이 관찰되는 경우는 오직 높은 국부 응력을 받는 부위이다. 따라서 보일러의 헤더나 튜브재료로 많이 사용되고 있는 Cr-Mo강의 모재부와 같은 고연성 재료에 대한 수명평가 방법으로는 탄화물 구상화(carbide coarsening)에 의한 정성적인 수명평가 방법⁽³⁾과 모재의 결정립변형에 대한 변형분포 정도를 정량화시켜 수명평가를 수행하는 결정립변형법(grain deformation method)이 주로 사용되고 있다⁽⁴⁾.

사용중인 고온 구조물의 비파괴 평가법인 결정립변형법은 결정립의 크기나 변형을 측정함에 있어 육안 판독의 과정이 어려울 뿐만 아니라 번거롭고 측정 과정에서 오차가 발생할 가능성이 높다. 따라서 본 연구에서는 컴퓨터 화상처리(image processing) 기법을 도입하여 측정의 신속함, 정확성 및 객관성을 부여하였으며, 결정립변형법의 새로운 평가 모델을 제안하여 타당성을 확인하였다. 실험은 결정립의 크기나 변형을 측정하기 위하여, 온도와 응력조건에 따라 크리프 시험을 수행하였으며, 500~1,000시간 간격으로 시편을 빼내어 레프리카를 채취하였다. 이러한 작업을 시편이 파단될 때까지 반복하였으며, 채취된 레프리카로 각각의 시간마다 결정립을 측정하고 미세조직과 크리프 손상상태를 관찰하였다.

2. 실험

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 약 180,000시간 사용된 후 폐기된 화력발전소 보일러 과열기 헤더인 1Cr-0.5Mo (13CrMo44)강이다. 폐기되어 재질특성이 열화된 상태인 사용재(ex-serviced material)의 열화된 재료물성을 회복시키기 위해 900°C에서 1시간 불림(normalizing)한 후 700°C에서 3시간 뜨임(tempering)시킨 재료를 신재(virgin material)로 간주하였다. 이때, 재열처리된 재료에 대해 인장강도와 크리프 시험을 수행하였다.

Table 1에서는 사용재와 재열처리재의 항복/인장강도 시험결과를 보여주고 있으며, 이를 1Cr-0.5Mo강(13CrMo44)의 항복/인장강도 요구조건과 비교하고 있다. 장기간 사용한 사용재는 요구조건의 최저치를 겨우 만족시킬 정도로 열화가 진행되었음을 알 수 있고, 재열처리재는 신재로서 필요한 항복/인장강도를 보여주고 있다. 사용재 및 재열처리재의 크리프 파단시험한 결과는 Fig.1에 보인 바와 같다. x축의 Larson Miller 파라미터에서 T는 실험 온도이고 t_r은 크리프 파단시간을 나타낸다. 사

Table 1 Mechanical Properties

Property	Yield Strength(MPa)	Tensile Strength(MPa)	Elongation(%)
Reheat-treated	362.8	541.3	29.3
Ex-serviced	273.6	492.3	33.0
DIN 17175:13CrMo44	275 min.	450 ~ 590	19.0 min

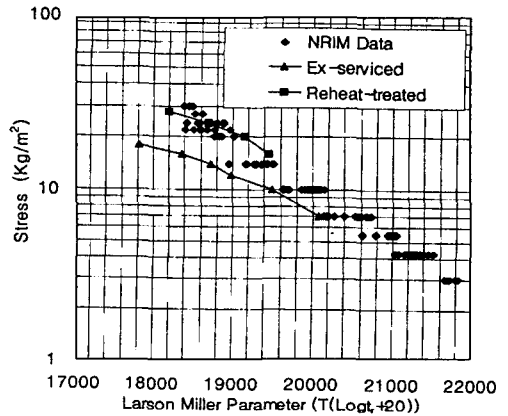


Fig. 1 Creep-rupture strength of reheat-treated and ex-serviced materials

용재의 크리프 강도는 상당히 감소된 것을 보여주고 있으며, 재열처리재는 일본금속재료연구소(NRIM)에서 수행한 신재의 크리프 파단결과⁽⁵⁾와 같은 거동을 보인다. 따라서 재열처리재는 신재로 대신 사용할 수 있음을 확인하였다.

시험편 중간의 레프리케이션(replication) 작업을 원활하게 하기 위하여 측정 부분의 단면을 원형이 아닌 7mm 크기의 정사각형으로 제작하였으며, 시험편의 규격은 표준시험편 규격을 사용하였다.

2.2 실험절차

단축 크리프 시험기에 시편을 고정하여 각각의 온도 및 응력조건에 따라 크리프 시험을 수행하였으며, 500~1,000 시간 간격으로 시편을 빼내어 상온에서 레프리카를 채취하였다. 채취 후 시편을 재 고정하여 크리프 시험을 수행하였으며, 이러한 작업을 시편이 파단될 때까지 반복하였다. 채취된 레프리카로 각각의 시간마다 결정립을 측정하고 미세조직과 크리프 손상상태를 관찰하였다.

3. 화상처리

수많은 결정립의 변형 정도를 측정하고 통계적인 방법으로 처리함에 있어 육안 판독과 수작업에 의존한다는 것은 그 과정이 어려울 뿐만 아니라 번거롭고 측정 과정에서 오차가 발생할 가능성이 매우 높기 때문에 거의 불가능하다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 결정립변형법에 화상처리 기법을 적용하여 신뢰성 있는 데이터 측정은 물론 측정에 객관성을 부여하고자 하였다. 다음은 결정립변형법에 적용한 화상처리에 대한 기본 개념을 간단히 기술하였다.

3.1 화상 입력시스템 및 화상 입력

화상의 입력은 시험편 또는 래프리카(replica)로부터 입력하는 방법과 스캐너를 이용하여 입력하는 방법 등 여러 다양한 방법이 있으며, 본 연구에서는 크립 시험 동안에 채취한 래프리카를 이용한 화상 입력을 사용하였다. 화상처리 시스템은 Fig.2에 보인 바와 같이 현미경과 CCD 카메라와 같은 입력장치와 디지털 영상으로 변환시켜주기 위한 A/D 변환기, 화상 프로그램과 현미경을 조작하기 위한 컨트롤러가 장착된 본체, 그리고 프린터 등과 같은 출력 장치로 구성된다.

크립 시험에 대한 화상의 입력에서 시험편의 결정립 변형 정도는 시험편 각각의 지점에 따라 변형의 정도가 조금씩 달라질 수 있으므로 정확한 데이터 수집을 위해서는 항상 일정한 지점에 대한 화상을 얻어야 한다. 이를 위해서 본 실험에서는 화상처리 프로그램에서 조작이 가능하도록 컨트롤러와 미세 자동 이송 장치가 부착된 현미경을 이용하여 화상을 입력하였다.

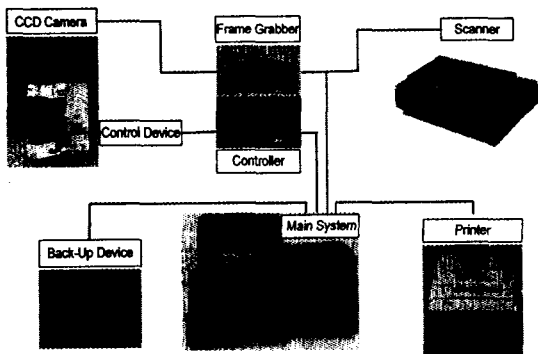


Fig. 2 Configuration of image processing system

3.2 화상 전처리

화상 전처리(early processing)는 CCD 카메라에서 얻어진 디지털 영상을 컴퓨터가 인식하기 쉬운 화상으로 만들어 주는 화상 처리 과정을 말한다. 결정립의 변형을 측정하기 위해서는 먼저 결정립 경계를 명확히 구분할 수 있어야 한다. 다시 말해서 결정립의 경계는 재질, 재질의 열화 정도, 에칭 정도 및 래프리카의 상태 등 여러 요인에 의해 불명확한 경우가 많다. 화상의 명도 변화율을 증가 또는 감소시키는 필터링(filtering)이나 두개의 화상 또는 화상과 상수 사이의 산술 및 논리연산을 하는 오퍼레이션(operation), 또는 배경과 목표물을 구분함으로써 카운팅이나 측정시에 목표물의 추출을 더욱 쉽게 해주는 배경 교정 등 다양한 화상처리 기법을 이용하여 최적의 화상을 얻을 수 있도록 해야 한다. 이러한 화상처리 기법 중 화상처리에 적용한 필터링 기법⁽⁶⁾은 컨볼루션 필터(convolution filter)와 넌컨볼루션 필터(non-convolution filter)로 나뉜다. 이러한 작업은 특정 영역에서 이뤄지는데 이를 네이버후드(neighborhood)라 하며, 일반적으로 3*3, 5*5, 7*7의 크기로 되어있다.

3.3 데이터 측정

본 연구에서 제시한 결정립변형법에서의 데이터 측정은 아래 Fig.3(a)에 보인 바와 같이 전처리 과정을 끝낸 화상에 대해 주응력축을 정하고 이를 기준으로 각각의 결정립에 대한 각도를 측정 하는 방법⁽⁴⁾과 Fig.3(b)에 보인 바와 같이 본 연구에서 제안한 결정립의 최대 지름과 최소 지름과의 비를 측정하는 방법에 대해 적용하였다. 데이터 측정의 일관성을 유지하기 위하여 모든 입력 화상에 대해서 일정한 경계선을 가지는 기준 영역을 적용하였으며, 측정 데이터 처리는 표준편차법과 절대편차 평균법을 적용하였다.

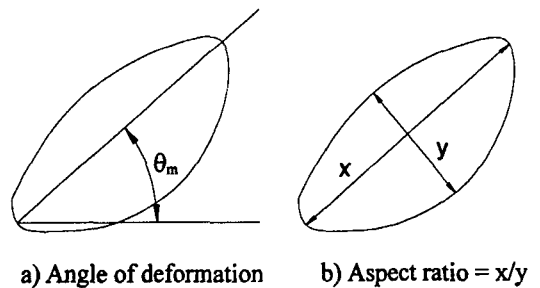


Fig. 3 Measurement of grain deformation

4. 결정립변형법

모재에 있어서의 크리프 손상은 일반적으로 크리프 기공이 생기기 이전에 연화나 변형에 의해 발생하게 되며, 크리프 기공이 관찰되는 경우는 오직 높은 국부 응력을 받는 부위이다. 따라서 보일러의 헤더나 튜브재료로 많이 사용하고 있는 Cr-Mo강의 모재부와 같은 고연성 재료에 대한 수명평가법으로 기공의 정량화법이 아닌 새로운 평가 기법의 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 모재에 대한 새로운 수명평가 기법으로 수명 말기까지 관찰이 가능한 결정립의 변형 정도를 정량화하는 결정립변형법을 도입하였다.

일반적으로 저합금 페라이트 Cr-Mo강 모재부의 미세 조직은 주로 페라이트와 베나이트(또는 퍼얼라이트)로 구성되어 있다. 따라서 항복강도 이하의 일정한 응력과 고온(500°C이상)에서 장기간 유지될 때 크리프 손상이 일어나게 된다. 이러한 크리프 손상은 저연성인 베나이트(또는 퍼얼라이트)에서는 결정립 변형이 일어나지 않고 고연성의 특성을 가진 페라이트는 주응력축의 방향으로 결정립이 변형하게 되어 크리프 수명을 좌우하게 된다. 결정립의 변형정도에 따라 수명소진을 나타낸다. 이러한 페라이트의 결정립 변형정도를 정량화한 것을 결정립변형법이라 한다. 이 방법은 크리프 시험을 통한 마스터 커브의 작성으로 짧은 시간에 좀 더 정확한 수명평가를 할 수 있으며, 평가 모델의 개발을 통하여 그 적용 범위를 넓힐 수 있다. 기존의 평가 모델은 페라이트 결정립이 주응력축에 따라 변형된다는 점에 착안하여 결정립의 최대 반지름과 주응

력축과의 각도 θ_m 을 측정 후 변형각도 θ_m 의 표준편차를 구함으로써 크리프 손상을 평가하는 방법⁽⁴⁾이다.

결정립의 정량화는 Fig.4에 보인 바와 같이 크리프 시편에서 레프리카를 채취한 후 이를 화상처리하는 방법을 본 연구에서 적용하였다. Fig.5은 재열처리재와 크리프 손상이 0.87인 사용재의 화상에 대한 최적의 화상처리 과정을 거친 후 얻은 결정립의 분포를 나타내고 있다. 재열처리재의 경우 결정립의 각도 분포가 산만한 반면, 사용재의 수명 말기에 이르러서는 응력 방향으로 변형되어 주응력축을 중심으로 정규분포를 가진다. 정규분포의 계산은 Fig.6에 보인 바와 같다. 이와 같이 각각의 시편에 대한 결정립변형 분포를 구하고 표준편차를 구

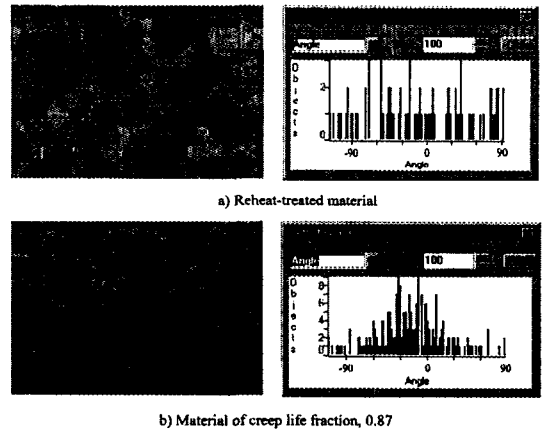


Fig. 5 Distribution of grain deformation using image processing technique

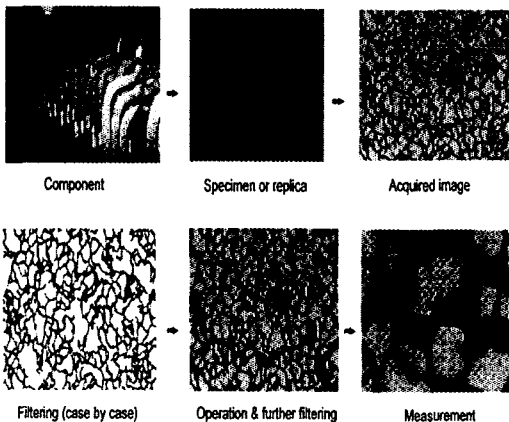


Fig. 4 Measurement procedure of grain deformation

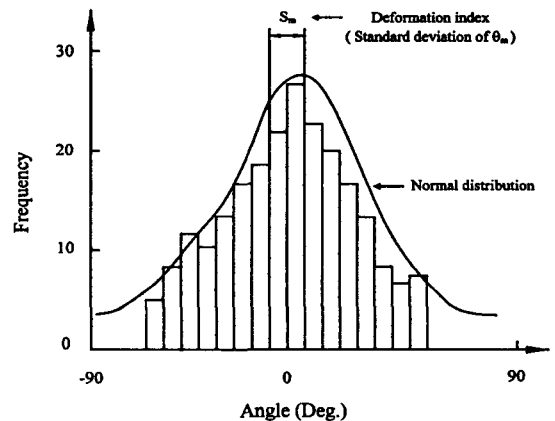


Fig. 6 Distribution of grain deformation

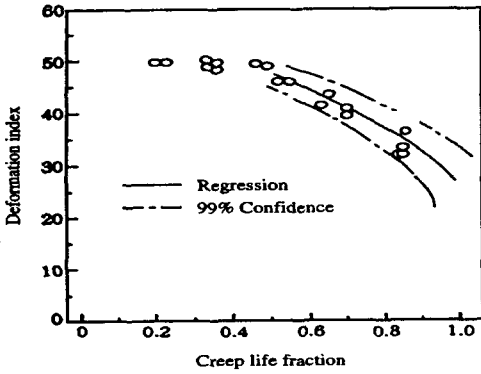


Fig. 7 Relation between creep life fraction and deformation index

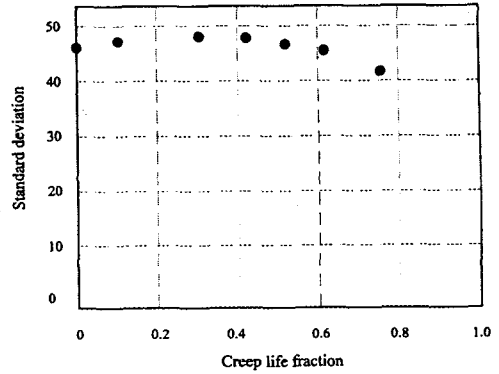


Fig. 9 Distribution of deformation index for creep life fraction of reheat-treated material at 538°C, 16kg/mm²

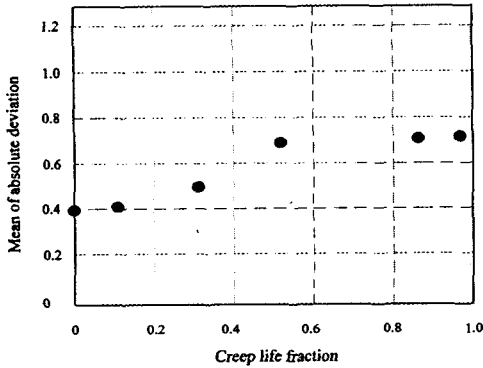


Fig. 8 Distribution of deformation index for creep life fraction of ex-serviced material at 550°C, 14kg/mm²

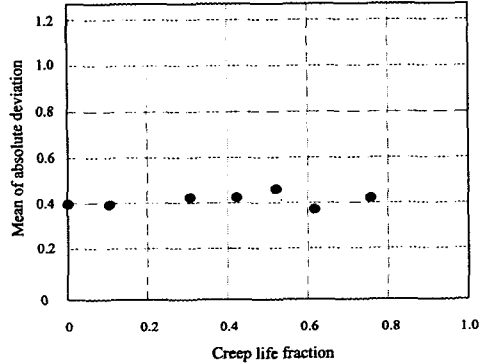


Fig. 10 Distribution of deformation index for creep life fraction of reheat-treated material at 538°C, 16kg/mm²

함으로써 Fig. 7에 보인 바와 같은 마스터 커브⁽⁴⁾를 구할 수 있다. 마스터 커브는 500-650°C, 저응력 조건의 데이터이다.

기존 평가 모델의 경우 실제 구조물에서 주응력축의 결정이라는 선결 과제가 따른다. 이는 많은 오차를 유발할 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 주응력축에 관계 없이 적용할 수 있는 평가 모델을 본 연구에서 제안하였다. 제안한 평가 모델은 페라이트 결정립의 최대 지름과 최소 지름과의 비(aspect-ratio)를 측정하여 절대편차의 평균을 구하는 방법이다. 결정립의 변형을 정량화하는 의미에서는 기존 평가 모델과 같지만 주응력축의 결정이라는 단점을 보완한 방법으로서 페라이트 결정립에 상응하는 타원의 최대 지름과 최소 지름과의 비를 측정하여 절대편차의 평균을 구하는 방법이다. 사용재에 대해 14kg/mm², 550°C에서 크리프 시험한 후 크리프 수명과

결정립의 최대지름과 최소지름과의 비(x/y)에 대한 절대편차의 평균은 Fig. 8에 보인 바와 같다. 초기 결정립의 변형분포는 다소 균일한 양상을 보이지만 수명의 말기에 이르러 변형이 심하게 됨으로써 절대편차가 커진다. 따라서 본 연구에서 제안한 평가 모델은 크리프 수명평가에 적용할 수 있음을 알 수 있다.

5. 적용 결과 및 고찰

재열처리재에 대해 16kg/mm², 538°C에서 크리프 시험한 후 크리프 수명과 모재부의 기존 평가 모델에 의한 결정립변형 정도는 Fig. 9에 보인 바와 같다. Fig. 10에서는 본 연구에서 제안한 절대편차 평균에 의한 결과를 보여주고 있다. 시험전에 표준편차가 46이고, 파손된 뒤에는 41을 보인다. 절대편차의 평균에서는 시험 전에

0.42를 보이고, 파단된 뒤에는 0.44를 보이고 있다. 이상의 결과로 보아 재열처리재의 경우 크리프 수명 초기와 말기의 표준편차에 있어서 큰 변화를 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 절대편차 평균에 의한 결정립 변형법의 적용에서도 마찬가지로 크리프 초기의 0.4~0.6의 절대편차 평균값이 크리프 수명 말기까지 거의 같은 분포를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 이유는 응력이 16kg/mm²로 높고, 상대적으로 온도가 낮아 재질열화가 일어나지 않은 입계파괴가 발생하여 결정립 변형 정도가 매우 낮기 때문이다. 그러므로 재열처리재의 경우에 실제와 유사한 결과를 얻기 위해서는 응력을 낮추고 온도를 높이거나 시험시간을 상당히 길게 한다면 가능할 것으로 사료된다.

사용재에 대해 여러 응력 및 온도 조건에서 크리프 시험한 후 크리프 수명과 모재부의 기존 평가 모델에 의한 결정립 변형 정도는 Fig.11에 보인 바와 같고, 본 연구에

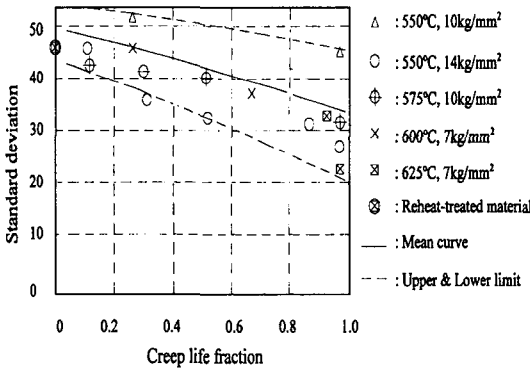


Fig. 11 Distribution of deformation index for creep life fraction of ex-serviced material

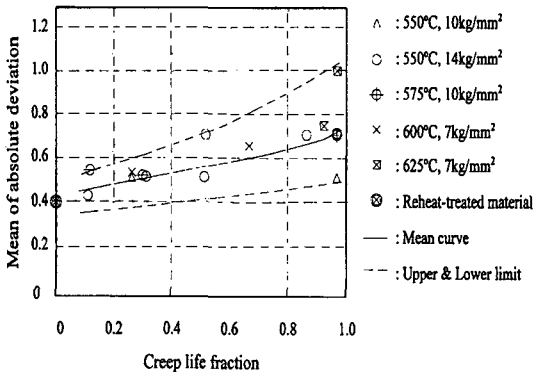


Fig. 12 Distribution of deformation index for creep life fraction of ex-serviced material

서 제안한 평가 모델에 의해서 절대편차 평균으로 환산한 결과는 Fig. 12에 보인 바와 같다. 시험전의 표준편차는 45를 보여주고 있다. 일반적으로 표준편차가 45 정도인 경우에는 결정립이 무질서한 방향으로 존재함을 의미한다. 이와 같이 장기간 사용한 사용재의 경우에 재열처리재와 같이 무질서한 방향을 갖는 이유는 보일러 헤더의 두께가 매우 두껍고 작용 응력이 매우 낮기 때문에 180,000 시간 사용하였음에도 불구하고 방향성을 가지지 않은 것으로 사료된다. 수명말기에는 20~30으로 감소된 것을 보여주고 있다. 또한 절대편차 평균에서도 시험전에는 0.4였고, 수명말기에는 0.7~0.9를 보여주고 있다. 이와 같이 재열처리재에 비해 사용재의 결정립 변형이 현저한 이유는 장기간 사용에 의해 석출물의 응집, 조대화에 따른 석출물 사이의 거리 증대 또는 석출물의 종류 변화에 따른 모재내의 고용원소 저하에 의한 재질열화로 인해 낮은 응력에서도 쉽게 결정립 변형이 일어나기 때문이다. 이상의 결과로 보아 사용재의 경우에는 크리프 수명이 감소됨에 따라 표준편차 및 절대편차 평균이 변하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안한 결정립 변형법의 평가 모델은 크리프 수명 평가에 적용할 수 있음을 확인하였다. 장기간 사용한 사용재의 경우에 있어 Fig. 12에 보인 바와 같이 비교적 낮은 응력과 높은 온도에서 실험한 경우가 실제 발전설비의 크리프 변형 조건과 유사하므로 이들의 변형 거동 조건을 적용하여 마스터 커브를 작성하는 것이 타당하다. 이와 같이 실험을 통해 얻은 마스터 커브를 토대로, 사용 중인 고온 구조물인 파이프 펌프와 헤더 등에 국부 응력을 받는 부분의 손상 평가에 컴퓨터 화상처리 기법을 이용한 결정립 변형법을 적용하면 신속하고 정도가 높은 수명 평가를 할 수 있다. Fig. 9와 11에 보인 바와 같이 기존 평가 모델에 의한 결정립 변형의 측정은 주응력 측을 알 수 있는 단축 크리프 시험 결과 이므로 실험실에서 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 실제 구조물에서는 주응력 측의 결정이라는 선결 과제가 따르며, 이는 많은 오차를 유발할 수 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 주응력 측에 관계없이 적용할 수 있는 평가 모델을 본 연구에서 제안하였다.

6. 결론

본 연구에서는 사용 중인 고온 구조물의 결정립 변형과 크리프 손상과의 관계 특성을 고찰하여 화상처리 기법을 이용한 정량적인 수명 평가를 연구하였으며, 얻어진 결론

을 정리하면 다음과 같다.

(1) 결정립의 크기나 변형을 측정함에 있어 컴퓨터 화상처리 기법을 도입하여 측정의 신속함, 정확성 및 객관성을 부여하였다.

(2) 실제 구조물에서 주응력축에 관계없이 크리프 손상을 평가할 수 있는 결정립변형법의 평가 모델을 개발하여 타당성을 확인하였다.

(3) 사용재에 대하여 결정립변형법을 적용한 결과 수명 평가에 필요한 마스터 커브를 구할 수 있으며, 이 마스터 커브는 실제 발전설비의 운전조건과 유사한 결과이므로 사용중인 발전설비의 수명평가에 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Roberts, B.W., Ellis, F.V. and Henry, J.F., "Remaining-Life Estimation of Boiler Pres-

sure Parts, Volume 4: Metallographic Models for Weld-Heat-Affected Zone," EPRI CS-5588, pp. 37~39, 1989.

2. 문한규, "고온사용설비의 비파괴 진단기술 개발," 한국표준과학 연구원, pp. 99~102, 1993.
3. Roberts, B.W., Avernue, K. and Askins, M.C., "Remaining-Life Estimation of Boiler Pressure Parts, Volume 3: Base Metal Model," EPRI CS-5588, pp. 22~23, 1989.
4. 庄子哲雄, "經年劣化と壽命予測," REALIZE INC., pp. 179~186, 1994.
5. Tanaka, "NRIM Creep Data Sheet," No. 35A, NRIM, pp. 5~9, 1990.
6. Media Cybernetics, "Image-Pro Plus: Reference Manual," 1993.