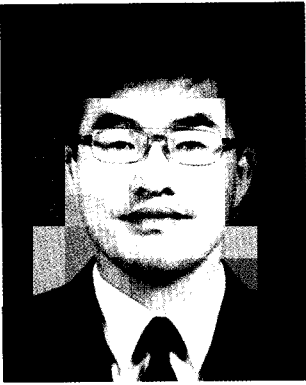


발전설비의 정밀진단 및 수명평가 기술



김 호 진(한국중공업(주) 기술연구원)

- '83 한국항공대학교 항공기계공학과(학사)
- '86 한국과학기술원 기계공학과(석사)
- '94 한국과학기술원 항공우주공학과(박사)
- '86-현재 한국중공업(주) 선임연구원

1. 서 언

국내외적으로 새로운 플랜트의 건설은 부지확보 및 환경문제 등으로 인해 많은 제약이 따른다. 따라서 기존 플랜트의 구조 안전성을 확보하고 설비를 설계수명 이상으로 사용하기 위한 수명연장에 많은 노력이 이루어지고 있다. 이러한 수명연장에 대한 관심은 설비의 검사(inspection), 모니터링(monitoring) 기술 및 잔여수명 평가 기술의 개발을 선도하여 왔다. 전력수요는 산업 발달과 생활 향상으로 인하여 해마다 증가를 보이고 있지만 국내 발전설비는 해마다 노후화가 진행되고 있다. 기력 발전설비중 60% 정도가 이미 가동후 설계기준(크리프 설계기준 10만 시간, 저주기피로 설계기준 : 2,500회)을 초과하는 장기 사용 발전설비이다. 따라서 설비의 구조 안전성을 확보하기 위해서는 적절한 보수 관리와 효율적인 운전이 절대적으로 필요하다. 국내에서도 '93년도 영월화력을 시작으로 터빈/보일러 설비의 정밀진단 및 수명평가를 수행하여, 사전에 설비를 보수하고 일부 시설은 교체하여 수명을 연장시킴으로써 구조 안전성 확보 및 경제적 효과를 거두고 있다.

여기에서는 발전설비의 구조 안전성을 확보하기 위해서, 화력 발전에서 보일러의 주요 설비인 헤더와 튜브, 터빈의 주요 설비인 로타, 블레이드의 정밀진단 및 수명평가 기술과 적용사례를 중심으로 발전설비의 정밀진단과 수명평가의 과정을 기술하고자 한다.

2. 설계개념

발전설비는 수주생산 방식으로 제작되며, 고객

의 요구사양에 따라 최적의 조건으로 제시한 공급자의 보증성능을 기초로 설계에 임하게 된다. 터빈의 경우를 예로 들면, 소용량의 터빈, 즉 선박용이나 펌프 구동용 터빈은 플랜트 전체에서 차지하는 구성 비중이 작고 터빈의 성능보다는 신뢰도에 큰 비중을 둔다. 이러한 용도의 터빈은 모듈 개념으로 설계된다. 플랜트 별로 최적성능을 위한 설계를 수행하는 것이 아니고 신뢰도가 입증된 모델 중에서 적절한 모델을 선정하여 제품을 생산하는 방식을 취한다. 그러나 대용량의 발전용 터빈의 경우에는 터빈의 성능이 발전소의 경제성에 밀접한 관계를 가진다. 따라서 발전설비 공급자는 발전소 건설 시 최신의 기술을 적용한 최적의 성능을 가지는 발전설비를 설계 공급한다.^[1]

3. 정밀진단 및 수명평가 기술

일반적으로 발전설비 사용자는 설비의 수명이 20-30년 이상이라고 생각하고 있다. 그러나 설비의 운전시간이 10년을 초과하면, 설비의 부품중에서 재질열화에 의한 손상사고가 발생하기 시작함을 경험적으로 알 수 있다. 따라서 일정기간마다 설비를 정비함으로써, 설비의 구조 안전성을 확보하고 설비를 설계수명 동안 사용하고 있다. 설비 부품의 수명은 균열이 발생하고 진전하여 최종 파손까지의 시간이다. 균열 생성 시간을 수명으로 간주하는 부품은 저인성 재료, 얇고 응력이 작용한 부품, 고주기피로를 받는 부품 등이며, 보일러 튜브, 터빈 블레이드, 오래된 로타가 이에 해당된다. 균열 진전을 허용하는 부품은 두께가 두껍거나 고인성 재료이며, 보일러 헤더와 요즈음 로타가 이에 해당된다. 따라서 고온과 고압하에서 사용하고 있는 발전설비의 구조 안전성을 확보하고 설비의 설계수명을 연장시키기 위해서는, 수명연장 기술이 필요하다. 수명연장은 균열 생성과 진전의 정밀진단 및 수명평가 기술, 컴퓨터를 이용한 구조해석 기술 등을 종합

적으로 사용하여, 발전설비의 보수/교체/운전 절차를 최적화시킴으로써 가능하다.

3.1 손상 진단 및 평가 기술

설비의 수명은 균열이 발생하고 진전하여 최종 파손까지의 시간이지만, 대부분의 수명은 균열 생성에 소요된다. 발전설비는 고온과 고압하에서 장기간 사용함으로 크리프에 의한 손상과 기동/정지에 따른 피로 손상이 주로 발생하고 있다. 따라서 크리프와 피로 등에 의한 균열 생성까지 설비의 손상 정도를 진단하고 평가하는 기술로는 표면복제법, 결정립변형법, 입계부식법, 경도법, 운전이력에 따른 손상평가법 등이 활용되고 있다.

3.1.1 표면복제법

고온에서 사용하고 있는 보일러 배관 설비의 파손은 주로 용접부에서 크리프에 의해서 발생하고 있다. 용접부는 크리프 연성이 매우 적어 크리프 소성변형을 감당할 능력이 상대적으로 작으므로 크리프 기공의 성장 그리고 기공간의 합체로 인해 균열이 발생되어 파손이 일어난다. 이러한 용접부의 수명평가 방법으로서, 관찰된 크리프 기공을 정량화시켜 수명을 평가한다.

손상 평가 방법에는 먼저 레프리카를 이용하여 관찰된 조직과 표준 손상조직을 비교하여, 손상 정도를 정성적으로 판단하는 조직비대법이 있다. 조직비대법은 기공의 유무, 균열의 발생 상황 등을 고려하여 손상 등급을 분류하는 방법이다. 손상을 정량적으로 평가하는 대표적인 방법인 A파라미터 법에서는 평가 대상체의 현미경 조직에 최대 주응력 방향으로 직선을 그어, 그 직선과 입계의 교차점에서 크리프 기공 발생 입계 즉 손상입계가 점유하고 있는 비율로 A파라미터를 정의하는데 이 값은 잔여수명과 일정한 관계를 갖고 있어 A파라미터를 측정함으로써 잔여수명을 예측할 수 있다.

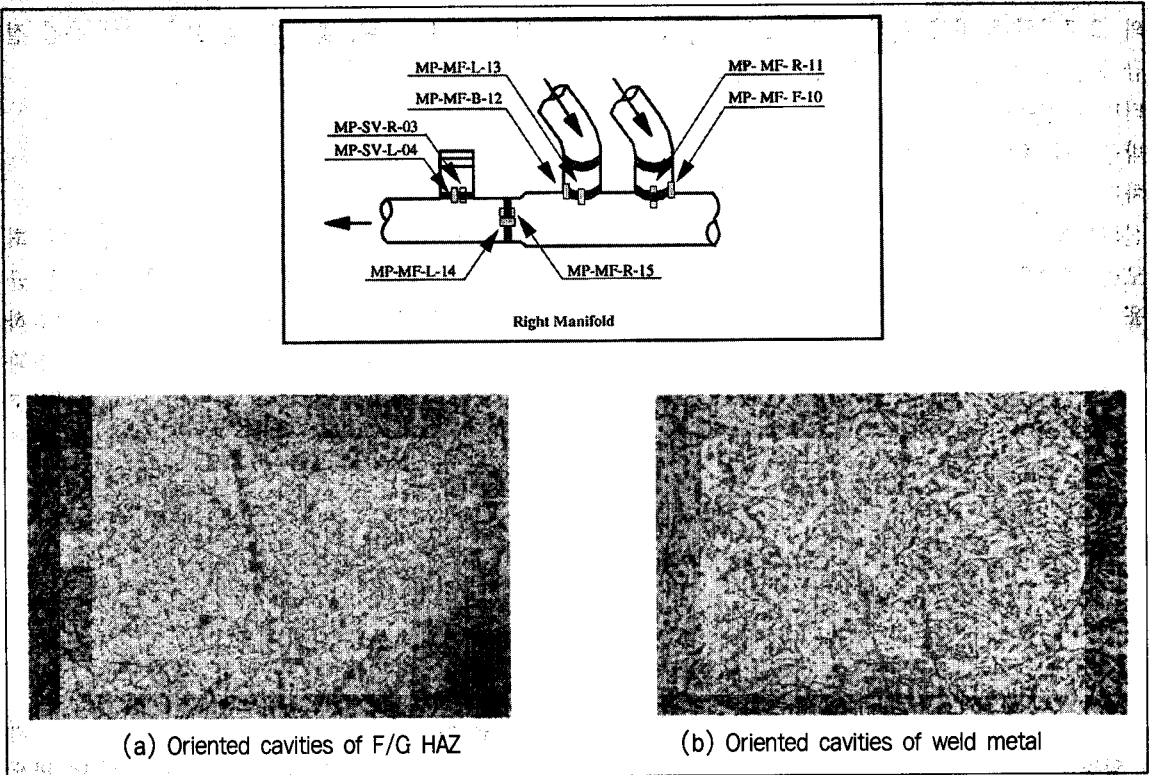


그림 1. Manifold welds of main steam piping of YS #2 boiler

정성적인 손상 분류에 의한 방법과 A파라미터-수명소비율 관계 사이의 상관 관계를 이용하여, 손상 등급과 수명소비율의 관계를 얻을 수 있으므로 그림 1에 보인 바와 같이 손상 등급 판정에 따라 A파라미터를 직접 측정하지 않고도 잔여수명을 평가한다. 그림 1은 레프리카에 의해 YS #2 보일러의 주증기관 파이핑의 관찰된 조직을 보여주고 있으며, 손상 등급의 판정에 의해 수명소진율은 0.5이다. 따라서 25,000시간 사용 후 재검사를 권고하였다.

3.1.2 결정립변형법

모재에 있어서의 크리프 손상은 일반적으로 크리프 기공이 생기기 이전에 재질연화(softening)나 변형(header-body swelling)에 의해 발생하며, 크리프 기공이 관찰되는 경우는 오직 높은 국부 응력을 받는 부위이다. 따라서 고

은 구조물 재료로 많이 사용하고 있는 Cr-Mo강의 모재부와 같은 고연성 재료에 대한 수명평가 방법으로는 탄화물 구상화(carbide coarsening)에 의한 정성적인 수명평가 방법^[2]과 모재의 결정립변형에 대한 변형분포 정도를 정량화시켜 수명평가를 수행하는 결정립변형법(grain deformation method)이 주로 사용되고 있다.^[3]

일반적으로 저합금 페라이트 Cr-Mo강 모재부의 미세조직은 주로 페라이트와 베나이트(또는 퍼얼라이트)로 구성되어 있다. 따라서 항복강도 이하의 일정한 응력과 고온(500°C 이상)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

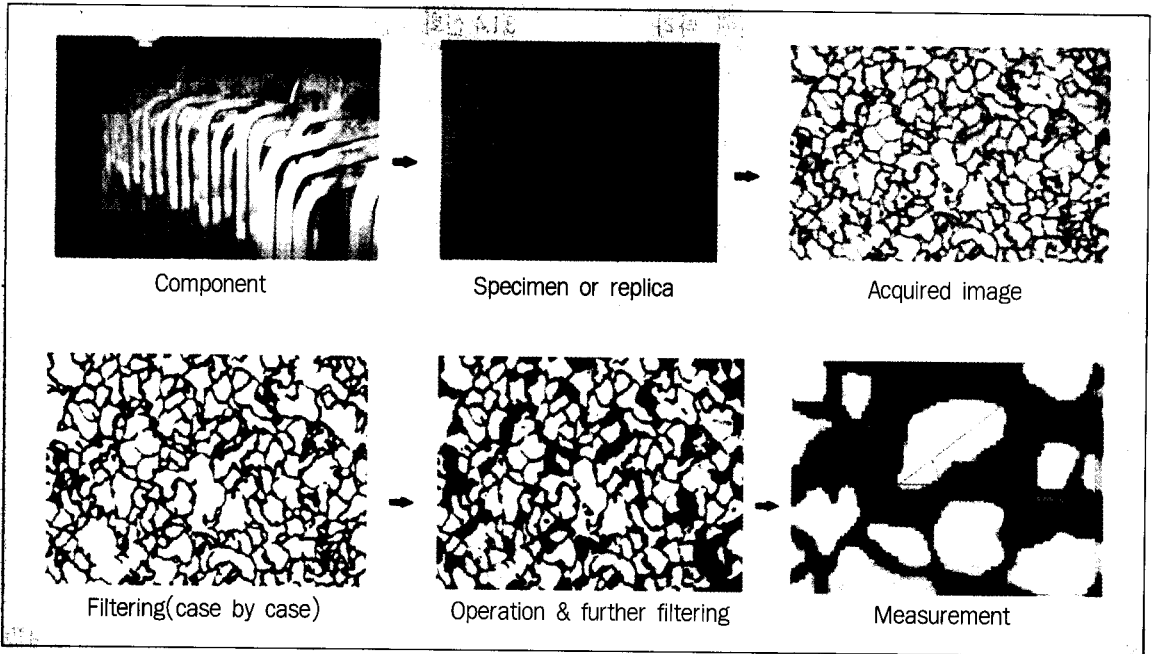


그림 2. Measurement procedure of grain deformation using image processing technique

좌우하게 된다. 결정립의 변형정도에 따라 수명 소진을 나타낸다. 이러한 페라이트의 결정립 변형정도를 정량화한 것을 결정립변형법이라 한다. 이 방법은 크리프시험을 통한 마스터 커브의 작성으로 짧은 시간에 좀 더 정확한 수명평가를 할 수 있으며, 평가 모델의 개발을 통하여 그 적용 범위를 넓힐 수 있다.^[4] 결정립변형법은 결정립의 크기나 변형을 측정함에 있어 육안 판독의 과정이 어려울 뿐만 아니라 번거롭고 측정 과정에서 오차가 발생할 가능성이 높다. 따라서 그림 2에 보인 바와 같이 컴퓨터 화상처리(image processing) 기법을 도입하여 측정의 신속함, 정확성 및 객관성을 부여하고 있다.

3.1.3 입계부식법

입계부식법은 NiCr계, CrMo계 저합금강에 대하여 인의 입계편석과 탄화물의 입계석출량을 평가하기 위한 목적으로 강도 저하에 관련된 특성[파면천이 온도 변화량($\Delta FATT$), 연성-취성 천이 온도 변화량($\Delta DBTT$)]을 결정하기 위해 개

발되었으며, 입계의 부식도와 재질열화도 사이의 일정한 상관관계를 가지고 있어 고온 구조물의 재질열도를 측정할 수 있는 비파괴 평가법이다. 수행방법이 용이하고 재료의 손상을 정기적으로 직접 검출할 수 있으며, 재료 조성상 설계 및 사용조건이 국소적으로 상이한 개소의 재질열화를 평가할 수 있는 잇점이 있다. 특성값의 측정에 있어서 부식폭, 부식깊이 등을 측정하는 경우 측정값이 매우 작아 오차를 수반하는 경우가 많은 단점이 있어 격자절단비를 사용하는 방법이 제시되었다.

충격시험이 끝난 시험편을 대상으로 입계부식 측정을 수행하여, 얻어진 격자절단비와 열화도($\Delta FATT$)는 선형적인 비례관계를 가지고 있음을 확인하였다.^[5] 따라서 이 선도는 사용중인 고온 구조물(1Cr-0.5Mo강)의 입계부식법에 의한 재질열화도 평가를 위한 마스터 커브로 사용할 수 있다.

크리프 파단수명(rupture life, t_r)은 부하된 응력과 온도(T)의 함수이다. 따라서, 응력-파단수

명의 관계도는 크리프 실험 온도조건에 따라 서로 다르게 나타난다. 이때 파단수명 대신 Larson Miller Parameter $LMP = T(20 + \log t_f)$ 를 정의하여 응력-LMP의 관계도를 구하면, 실험온도가 변하여도 한개의 관계선도를 얻을 수 있고, 이 마스터 커브를 크리프 수명예측에 널리 사용하고 있다. 고온 플랜트 요소의 수명소진율은 파단수명에 대한 사용시간의 비율로 나타낸다. 따라서, 수명소진 정도 또는 온도와 사용시간에 따른 재료의 열화정도를 표시할 때에 파단시간(t_f)을 시효열처리 시간(T)으로 대치한 시효 $LMP = T(20 + \log t)$ 를 변수로 사용할 수 있다. 실험에서 측정된 응력에 따른 격자절단비와 시효 LMP를 각 발전소의 과열기 헤더, 주증기관, 재열기 헤더, 재열증기관 등 현장에서 측정된 데이터와 비교 결과는 그림 3에 보인 바와 같다.^[6] 따라서 Cr-Mo강의 격자절단비와 시효LMP의 관계를 이용하면, 사용중인 고온 구조물에 입계부식법을 적용하여 격자절단비를 측정함으로써 재질열화 상태를 평가할 수 있다.

3.1.4 산화스케일 측정에 의한 고온튜브의 수명평가
 화력 발전소 보일러 튜브에서 고온파손은 증기 온도가 약 400°C 이상인 과열기(S/H), 재열기(R/H)에서 발생된다. 튜브의 파손원인은 한가지의 원인이 아니라 복합적인 원인으로 발생하는 경우가 많으며, 고온파손을 분류하면 산화 및 부식에 의한 튜브의 감육, 과열(overheating)에 의한 파손, 재질열화, 그리고 운전중 운전자의 미숙 등에 의해 발생된다. 과열기, 재열기 튜브는 재질열화와 더불어 산화스케일이 튜브의 내/외면에 발생되며, 동시에 부식(corrosion)도 발생된다. 튜브의 내/외면에 발생하는 산화스케일은 튜브가 증기와 반응하여 형성되는 것으로서 산화스케일의 성장은 시간의 제곱근에 비례하는 포물선 형태이고 시간과 온도의 증가에 따라 빠른 속도로 증가한다. 튜브 내부에 산화스케일이 형성되면 증기의 흐름을 방해할 뿐아니라, 산화스케일이 단열효과를 나타내므로 튜브 외부에서 내부로의 열전달을 감소(강에 비해 5%)시키므로 튜브(metal)의 온도를 상승시키는 원인이 된다. 따라

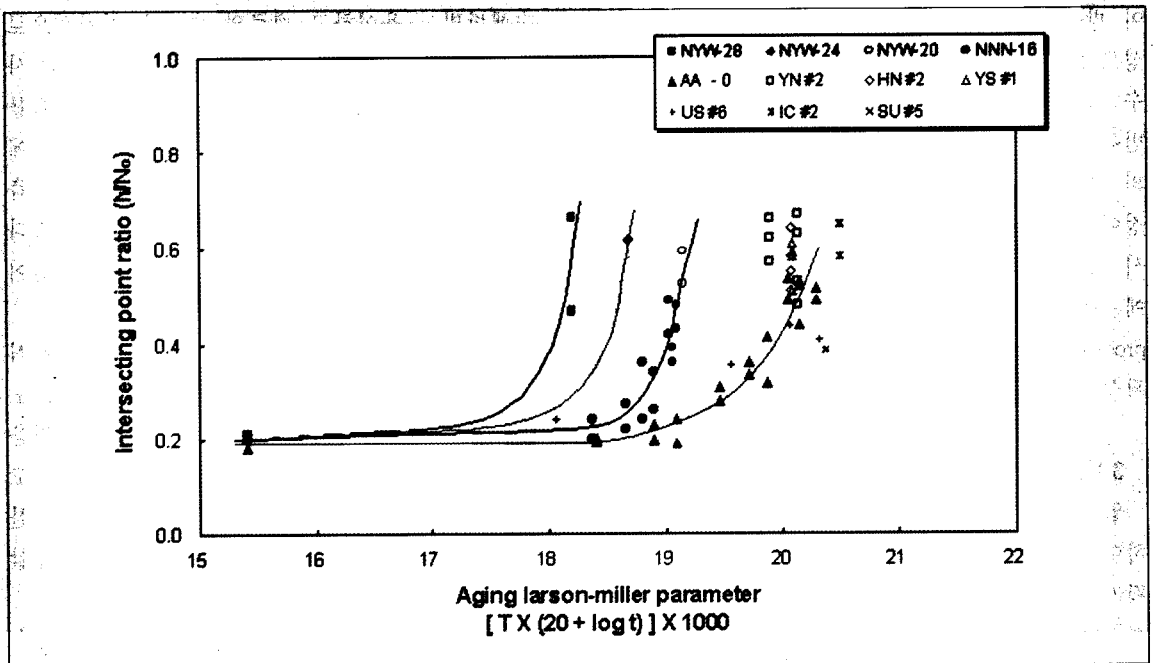


그림 3. Relationship between intersection point ratio and aging Larson-Miller parameter with applied stress

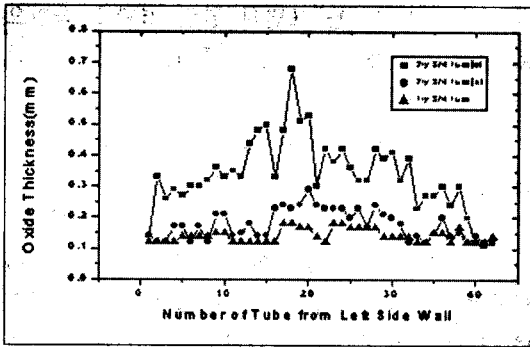


그림 4. Measurement of oxide scale in YD #1 superheater tubes

서 초음파 탐상을 이용하여 튜브의 두께 및 내부에 존재하는 산화 스케일을 측정하여 각각 튜브의 수명평가 및 몬테카르노 해석을 통한 통계적 잔존 수명평가를 실시하고 있다. 그림 4는 과열기 산화스케일 측정 결과를 나타낸 것이다. 산화스케일을 이용한 튜브의 잔존 수명평가에는 산화스케일과 LMP(Lason-Miller Parameter) 관계식을 이용하여 튜브의 가동온도를 구하는 관계식들이 개발되어 사용하고 있으며, 본 평가에서는 프렌치식을 사용하였다.^[7] 입력된 값으로부터 3000 시간 단위로부터 튜브두께(t), 산화스케일 두께(t), LAC 두께(t), 응력(ksi), 크리프 손상정도, 튜브 사용온도(°C)를 계산하고 그림 5에 보인 바와 같이 튜브의 잔여 수명을 계산하였다. 과열기 튜브의 사용온도와 잔존수명을 계산한 결과, 가동중 튜브의 중간부위 온도가 산화스케일의 영향으로 약 47°C가 상승되었음을 확인할 수 있으며, 잔여수명도 상당히 단축됨을 알 수 있다.

3.1.5 운전이력에 따른 손상평가법 및 온라인 모니터링 진단 기술

보일러 고온 취약부는 기동 정지 및 부하변동시 발생하는 열응력에 의해 피로 손상을 받고 정상상태에서는 증기압력, 자중, 열팽창에 의한 굽힘 모멘트에 의해 크리프 손상을 받는다. 따라서 보일러가 운전 중에 받는 손상은 피로 손상과 크리프 손상의 합으로 표시할 수 있다. 손상평가 결과에 따라서 정밀진단 실시 여부를 결정한다.

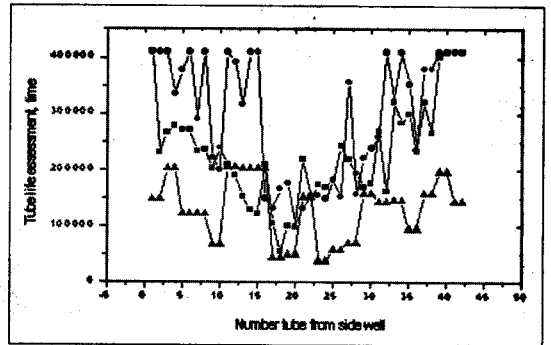


그림 5. Remaining life prediction of YD #1 superheater tubes

재료가 피로 손상과 크리프 손상을 동시에 받을 때 피로 손상과 크리프 손상이 서로 독립적으로 작용하며 손상의 합이 어느 임계점에 도달되었을 때 재료가 파괴된다는 가정 하에서 선형 손상 합산법(linear damage summation method)은 식(1)과 같다.

$$D = d_f + d_c \quad (1)$$

여기서, d_f 는 피로 손상, d_c 는 크리프 손상, D 는 재료에 누적된 손상합이다. 선형 손상 합산법에서는 피로 손상(d_f)은 마이너 법칙(Miner's rule)으로 표시하고 크리프 손상은 로빈슨 법칙(Robinson's rule)으로 표시한다. 마이너는 재료가 다양한 응력의 피로 손상을 받을 경우 피로 손상이 서로 독립적으로 작용한다는 가정으로부터 피로수명식을 제안하였으며, 로빈슨은 재료가 고온에서 다양한 응력의 크리프 손상을 받을 경우 재료에 축적된 총 크리프 손상량이 "1"이 될 때 파단이 발생한다는 크리프 수명식을 제안하였다.

피로 손상과 크리프 손상의 상호작용에 대한 수명소비식은 식(2)과 같다.

$$\sum_{i=1}^k \frac{N_i}{N_f} + \sum_{i=1}^k \frac{t_i}{t_R} = D \quad (2)$$

일반적으로 각 응력수준 사이에 상호작용이 존재하지 않고 순수한 피로만 존재하거나 순수

한 크리프손상만이 존재할 경우에 D 값은 "1"이 된다. 하지만 재질특성에 따라 피로손상과 크리프손상의 상호작용에 의한 D 값은 다르다.^[8-9]

실시간에 따른 운전데이터를 모니터링하는 온라인 모니터링 기술에 손상평가법을 활용함으로써, 실시간에 따른 운전중 진단과 평가를 수행하여, 설비의 보수/교체에 대한 정확한 시기를 결정하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내 발전소에 대해서도 고온 취약부위에 대한 실제 운전 데이터를 모니터링하여 설비의 손상 및 수명평가에 관한 연구를 수행중에 있으며, 관련 데이터 베이스를 구축하고 있다.^[10]

3.2 결함 진단 및 평가

운전이력, 유지 및 검사 기록의 검토, 설계에 따른 성능비교, 화학적인 분석 등을 수행하여 결함의 가능성이 있으면 결함탐상을 위해서 육안검사, 침투탐상검사, 자분탐상검사, 와류탐상검사, 초음파탐상과 같은 비파괴 검사를 실시한다. 설비에서 비파괴적 검사에 의해서 균열을 검출하면, 균열의 제거가 원칙이다. 제거할 수 없는 경우에 균열의 진전성 여부를 확인하고 균열이 임계크기로 될 때까지 허용할 수 있는 운전시간을 계산하여, 균열부품의 교체시기를 결정한다. 균열진전 수명을 계산하기 위해서 파괴역학 해석을 수행한다. 여기에서는 결함의 존재여부가 중요한 회전체인 터빈의 블레이드와 로타를 중심으로 기술하고자 한다.

3.2.1 표면 결함 진단

표면 결함을 탐상하는 방법으로 육안검사, 침투탐상검사, 자분탐상검사, 와류탐상검사를 시행하고 있다. 육안검사는 육안으로 수행하지만 필요에 따라서 확대경, 내시경, 측정 게이지 등을 사용하여 균열, 부식, 칩식 등의 유무를 확인하거나, 크기를 측정한다. 로타 보어 내부에 존재하는 결함은 카메라를 이용하여 검사를 실시한

다. 침투탐상검사는 표면의 열린 결함을 육안으로 쉽게 검사하기 위하여 침투액으로 결함을 나타내는 방법이다.

자분탐상검사는 일반적으로 가장 널리 사용되는 방법으로 자성체에 자장을 유도시키면서 자분을 자화된 부분에 적용시키는 검사법이다. 표면 및 표면직하의 결함이 존재하면 누설자장에 의하여 자분이 모이며 이것을 육안으로 관찰한다. 로타 보어에서는 육안검사와 동시에 수행함으로써 검사의 정확도를 높일 수 있다. 와류탐상검사는 교류가 흐르는 코일을 시험체에 가까이 가져가면 자계의 작용으로 시험체에 발생하는 와전류가 불연속이나 재질 등의 영향으로 변화하는 것을 검출하여 시험체의 불연속을 찾아내거나 재질 등을 검사한다. 와전류는 시험체의 표면근처에 집중되어 유도되므로 탐상시험은 표면근처의 결함만을 검출할 수가 있다.

3.2.2 초음파탐상검사

초음파를 이용하여 주로 펄스 반사법에 의하여 내부 결함을 검출하는 방법이다. 시험체의 표면에 초음파 펄스를 발신하거나 수신할 수 있는 탐촉자를 사용하여 내부에 초음파를 발신한다. 수신될 때까지의 시간으로 부터 결함 위치를 측정하고, 수신된 펄스 파형의 높이로 부터 결함의 크기를 계산한다.

블레이드의 루트부와 테논부에서의 결함 탐상은 검사가 용이하지 못함으로 수직 및 사각 탐상법을 이용하여 탐상을 수행한다. 블레이드의 루트부는 제작사의 설계방식에 따라 그 형상이 매우 복잡하며 검사부위의 제한요건에 따라 검사의 신뢰성 확립에 어려움이 따른다. 그림 6은 가장 많이 장착되어 가동되는 스트래들(straddle) 타입의 검사법이다. 테논부는 그림 7에 보인 바와 같이 평활 및 각진 테논에 따라 상하 좌우로 이동하면서 탐상을 수행하며, 국부수침법에 의한 탐상을 수행함으로써 미세한 결함검출이 가능하다.

자동 초음파탐상검사는 로타의 보어 부분을 자

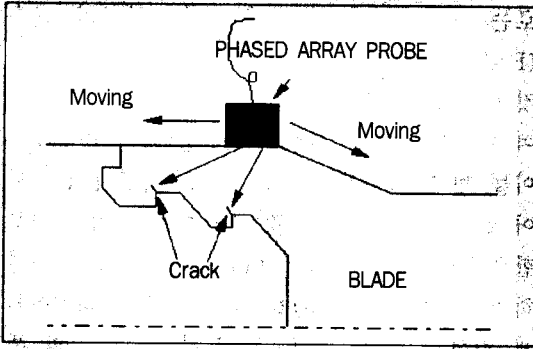


그림 6. Straddle root of blade

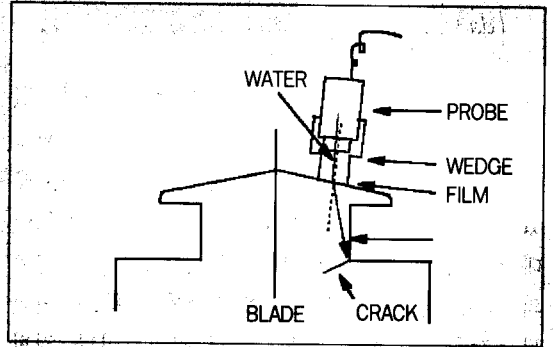


그림 7. Tenon of blade

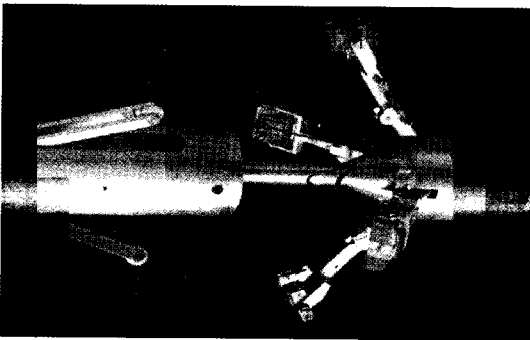


그림 8. Ultrasonic scanner of rotor bore

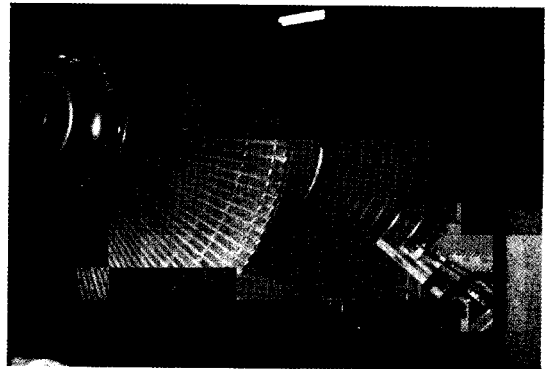


그림 9. Ultrasonic scanner of rotor disk

동 탐상하며, 결합의 위치를 파악하여 A, B, C 스캔으로 데이터의 수집 및 저장이 가능하고 결합해석 수행을 위한 기초자료를 제공한다. 그림 8은 보어 탐상용 스캐너의 형상을 나타내고 있다. 로타 디스크 부위도 고온/고압 환경하에서 운전되므로 고사이클 피로(진동), 크리프, 재결합화에 의해 균열이 발생한다. 자동초음파 탐상장치는 디스크 부분에 발생된 결합탐상 및 결합 위치의 파악이 가능하며, 그림 9에 보인 바와 같이 디스크 양쪽에서 결합 탐상을 수행할 수 있고 탐상시간이 단축되고 검사의 신뢰성이 향상된다.^[11]

3.2.3 잔존수명 평가

설비에서 비파괴적 검사에 의해서 균열을 검출하면, 균열의 제거가 원칙이다. 제거할 수 없는 경우에 균열의 진전성 여부를 확인하고 균열이 임계크기로 될 때까지 허용할 수 있는 운전시간을 계산하여, 균열부품의 교체시기를 결정한다.

다. 균열진전 수명을 계산하기 위해서 파괴역학 해석을 수행한다. 로타에서 균열진전 모델은 손상 메카니즘에 따라서 다음과 같은 모델을 사용한다. 피로, 크리프, 피로-크리프 균열진전 모델들은 보어 근처와 로타의 표면 균열에 적용한다. 응력부식 균열진전 모델은 열박음 디스크의 균열진전 해석에 사용한다.

피로 균열진전 모델은 유지시간(holding time)이 없는 열/기계적 주기에서 낮은 온도나 높은 사이클의 경우 균열의 진전은 일반적으로 피로에 의존한다. 이 경우 균열진전률은 응력강도계수(stress intensity factor)의 최대 범위에 의하여 다음식으로 결정된다.

$$\frac{da}{dN} = \left(\frac{da}{dN} \right)_0 \quad (3)$$

많은 경우에 피로 균열진전은 Paris 법칙으로 표현한다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right) = C_1 \Delta K^p \quad (4)$$

ΔK 는 K 의 ΔK 의 C_1 값을 계산할 수 있다.^[12] 값은 $13\text{MN}/\text{m}^{3/2}$ 보다 크다는 결과를 얻었고, 피로 균열 진전시 온도의 영향도 없다는 것을 알 수 있다. 하지만 290°C 이상의 온도에서는 온도에 대한 영향이 조금 나타나고 있다. $20\text{-}290^\circ\text{C}$ 영역의 데이터를 조합하여 기율기 p 를 구하고, 계산된 p 값을 이용하여 각온도에서 최대값이다. 일반적으로 모든 경우 최소값은 0이다. CrMoV, NiMoV, NiCrMoV 재료의 실험 결과로부터 상온과 $90\text{-}260^\circ\text{C}$ 영역에서 균열이 시작되는 곳에서 크리프 균열 모델은 정상상태의 크리프조건을 받는 경우 균열 선단에서의 응력은 C^* 값에 의하여 결정된다.

$$\frac{da}{dt} = C_3 C^{*m} \quad (5)$$

피로-크리프 균열진전 모델은 위식을 이용하여 크리프와 피로 균열진전을 고려하여 다음과 같이 확대하여 사용한다.

$$\frac{da}{dN} = C_1 \Delta K^p + C_2 \Delta K^{2m} t_h^{1-m} + C_3 C^{*m} t_h \quad (6)$$

응력부식 균열진전 모델은 재료의 템퍼링 온도, Mn의 양, 항복강도, 적용온도의 4가지 지배인자로 구성되어 있고, 다음식으로 표현된다.

$$\ln \frac{a}{t} = 7.01 - \frac{9270}{T} + 0.0337\sigma_y + 4.53\text{Mn} - 0.01277T_T \quad (7)$$

- 위식에서 a/t = 균열진전률 (in/hour)
- T = 절대온도 ($^\circ\text{R}$)
- σ_y = 항복강도
- Mn = Mn의 함량 (질량비)
- T_T = 템퍼링 온도

확률론적 파괴역학 모델은 로타의 신뢰도를 평가하는데 이용한다. 몬테카르노 (Monte Carlo) 모델은 개념적으로는 간단명료하지만 계산적으

로는 집약적이다. 몬테카르노는 임의의 변수 (FATT, K_{IC} , C_1 등)에서 이들의 값을 산출하는 것으로 구성된다. 이것은 임의의 변수값에 대하여 이들이 파단에 이르는 시간을 계산하는 것과 이들 변수 각자가 통계학적으로 어떻게 분포되어 있는지를 유추하는 것이다. 이런 작업을 반복함으로써 파손시간 (t_f , time-to-failure)에 대한 히스토그램 (histogram)을 작성할 수 있다. 이렇게 작성된 히스토그램으로부터 파손시간의 통계학적 분포를 알 수 있고, 로타의 신뢰성을 예측할 수 있다. 균열진전에 의한 로타의 잔존수명 평가의 과정은 그림 10에 보인 바와 같다. 그림 10(a)에 보인 바와 같이 초음파탐상 자동장비로 검출한 결함에 의한, 파손시간의 통계학적 분포는 그림 10(b)에 보인 바와 같이 컴퓨터 프로그램 (SAFER-PC code)에 의해서 산출된다.

3.3 컴퓨터를 이용한 구조해석 기술

설비에 컴퓨터를 이용한 구조해석 기술은 설비의 파손원인을 정량적으로 분석함으로써, 설비의 수명에 영향을 미치는 여러 변수들을 고찰하여 설비의 파손 방지에 기여할 수 있고,^[13] 설계수명의 연장에 활용할 수 있다. 응력해석과 동특성 해석을 위한 유한요소해석 기술은 복잡한 형상과 경계조건에 대한 설비 해석에 효과적인 방법이며, 균열진전 시뮬레이션에는 경계요소해석 기술을 활용하고 있다.

3.3.1 응력해석 및 동특성 해석

블레이드는 복잡한 3차원 형상을 갖고 있으므로 응력해석이 용이하지 않을 뿐 아니라, 로타와 접촉하는 루트부에서 접촉응력에 의한 응력집중 현상 및 주위의 환경에 의한 영향으로 정확한 해석수행에 어려움이 있다. 따라서 지금까지 대부분의 블레이드 파손해석은 금속학적인 분석을 수행하여 파손원인을 정성적으로 규명하고 있다. 따라서 블레이드 파손의 재발을 방지하기 위해

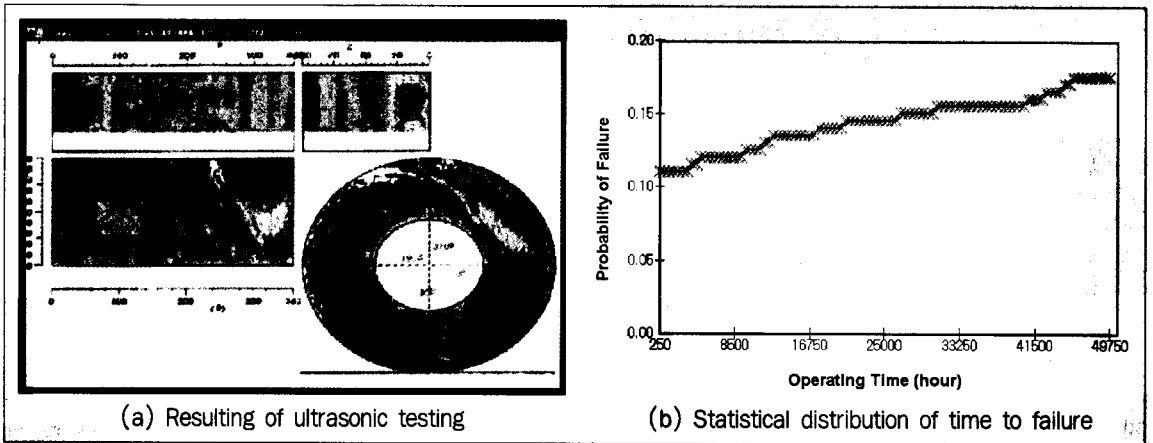


그림 10. Process of remaining life assessment of rotor

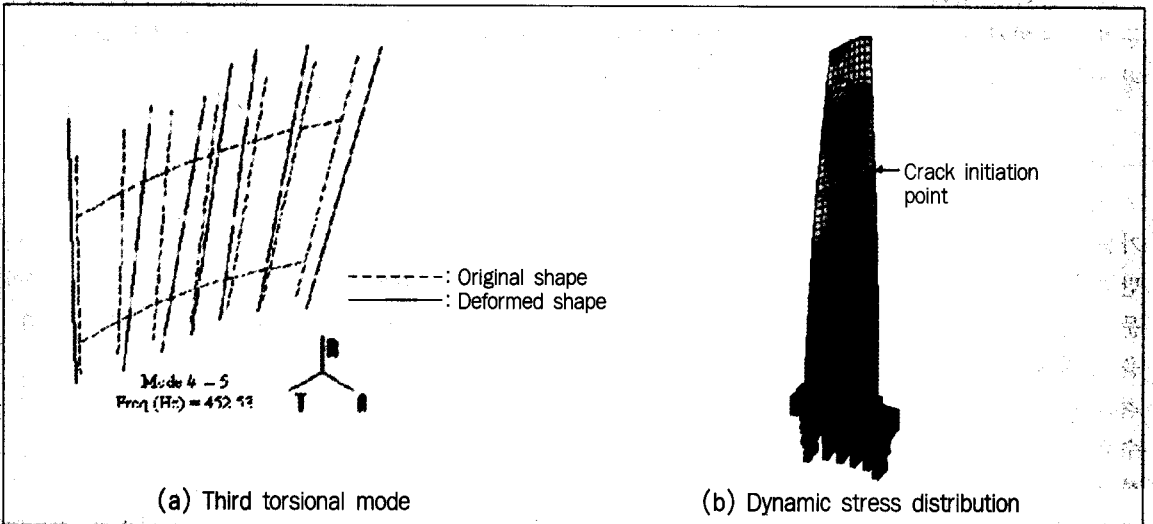


그림 11. Dynamic stress analysis of blade

서는 파손 블레이드에 대한 금속학적인 해석과 병행하여, 그림 11에 보인 바와 같이 블레이드의 응력해석과 동특성 해석을 수행하여 파손원인을 정량적으로 규명함으로써 정확한 파손방지 방법을 제시할 수 있다.

손 과정을 재현함으로써, 파손원인의 정량적인 평가와 설비의 수명연장에 기본 데이터로써, 활용할 수 있다.

3.3.2 균열진전 시뮬레이션

초기 균열 발생 후 균열이 진전하여 파괴에 이르는 과정을 그림 12에 보인 바와 같이 컴퓨터 시뮬레이션을 수행함으로써, 균열 발생시 잔존수명 평가의 정확성을 높일 수 있다. 또한 파

3.4 특수 실험 및 검사기법 개발

발전설비의 손상진단 및 평가의 기술은 래프리카법, 경도법, 입계부식법, 결정립변형법 등을 이용한 크리프 손상에 중점을 두고 평가하고 있다. 그러나 적용기술이 비파괴적이고 간접적인 추정법이므로, 평가결과에는 노력만큼의 신뢰도를 얻

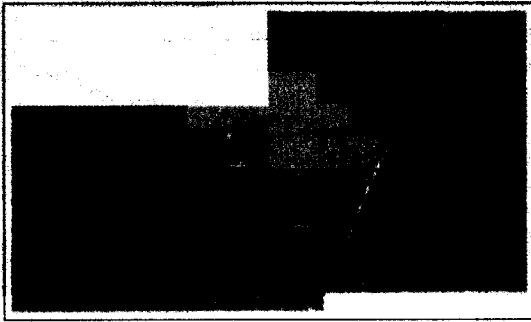


그림 12. Crack growth simulation of blade root

지는 못하고 있다. 이러한 약점을 줄이기 위해 다양한 비파괴적인 시험법들을 개발하고 복합적으로 적용하고 있다. 또한 사용중 재료에 손상을 주지 않으면서 파괴적인 시험법으로 잔여수명을 평가하기 위한 새로운 평가법이 요구되고 있다.

3.4.1 소형편치 및 소형압입시험 기법개발

재료 손상을 평가하기 위한 표준 시험 방법은 가동 중인 기기에 대해서는 표준 시험 조건을 만족할 만큼의 시편을 채취하기가 곤란하기 때문에 적용이 불가능하다. 그러므로 기기에 손상을 주지 않을 수 있을 정도로 소량의 재료를 채취하여 재료의 기계적 성질을 평가하는 연구가 수행되고 있다. 소형 시험법은 표준 시편의 기하학적 형상을 유지하면서 크기만을 소형화한 방법과 기존의 시험 방법을 개선하여 소형시편으로 기계적 성질을 추정하는 연구로 대별된다. 그러나 소형화된 표준시편을 사용하는 방법은 소형화에 한계가 있고 다양한 기계적 성질을 평가할 수가 없다는 단점이 있어 소형편치 시험이나 압입시험 방법의 사용이 확대되고 있다. 소형편치 및 압입시험으로 평가하려는 재료의 기계적 성질은 인장특성, 파괴인성 등이다. 현재는 재료의 진응력-진변형률 곡선을 유도하는 연구에 집중하고 있으며 아울러 파괴인성 평가 방법에 관한 연구도 진행 중이다.^[14] 또한 현장에서 기기에 직접 부착하여 재료의 물성을 평가할 수 있는 연속압입 시험기가 개발 중에 있다.

3.4.2 미소시험편 크리프시험기 개발

이 평가법은 미소 시험편을 이용하여야 가능하며, 시험편을 얻기 위한 샘플링 기법의 개발이 선행되어야 한다. 미소 시험편 크리프 시험기는 시험편의 직경이 작아짐으로써(표점거리 10 mm, 직경 2mm) 레버비(lever ratio)를 이용한 기존의 간접 하중방식과는 달리 시험편에 하중이 직접 가해지는 직접 하중방식(direct loading)이 가능하다. 반면에 시험중 고온산화에 의한 영향이 커질 수 있으므로 시험중에는 진공과 불활성 가스 분위기가 유지되어야 한다. 이러한 적용개념을 바탕으로 미소 시험편 크리프 시험기를 개발하였다. 미소 시험편을 이용한 크리프 시험은 EPRI에서 수행되어 발표된 바 있다. 보고에 의하면 미소 시험편을 이용한 크리프 시험에서 응력범위에 관계없이 훌륭한 재현성을 보였으며, 표준 시험편과도 비교적 잘 일치하는 결과를 얻고 있다. 당사에서는 미소 시험편을 이용한 크리프 시험기를 개발하여 X20 Alloy 및 Cr-Mo강에 대해 크리프 시험을 수행중에 있으며, 향후 보일러의 크리프 수명평가에 적용할 수 있도록 준비중에 있다.

4. 결 언

발전설비의 구조 안전성을 확보하고 설계수명 연장을 위한 정밀진단 방법과 수명평가 기술에 대해서 국내개발 현황과 적용사례를 중심으로 기술하였다. 비파괴기법에 의한 재질열화도 측정의 정확도를 높이기 위한 데이터베이스의 확충, 좀더 정확도가 높은 재질열화도 측정기술과 결합탐상 기술이 필요하며 개발중에 있다. 또한 파손의 재발을 방지하고 설비의 설계수명을 연장하기 위해서는, 금속학적인 파면 분석과 더불어 컴퓨터를 이용한 구조해석 기술에 의한 파손의 정량적인 평가가 필요하다. 즉, 설계 관점에서 접근이 필요하다. 설비의 설계수명 연장비용을 줄이고 구조 안전성을 확보하기 위해서, 국내외에서는 실시간 운전 데이터에 의한 정확한 손상

평가, 확충된 데이터베이스의 전산화, 최적 운전 조건 설정 등의 기술을 종합한 온라인 모니터링 진단 시스템을 개발중에 있다.

참 고 문 헌

- [1] 김효진, "터빈의 설계수명 연장을 위한 수명평가 기술," 대한기계학회 '98년도 춘계 재료 및 파괴부문 학술대회 논문집, pp.5-10, 1998.
- [2] 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.
- [3] Shoji, T., Material Degradation & Life Prediction, REALIZE INC., pp.179-186, 1994.
- [4] 김효진, 정재진, "컴퓨터 화상처리 기법을 이용한 고온 구조물의 수명평가 연구," 한국정밀공학회지, 제15권, 제4호, pp.44-50, 1998.
- [5] 김효진, 박종진, "입계부식법에 의한 사용 중인 고온 구조물의 재질열화도 측정 연구 (1)," 대한기계학회논문집A권, 제22권, 제7호, pp.1148-1158, 1998.
- [6] 김효진, 박종진, "입계부식법에 의한 사용 중인 고온 구조물의 재질열화도 측정 연구 (2)," 대한기계학회논문집A권, 제22권, 제7호, pp.1159-1165, 1998.
- [7] 김효진, 류승우외 3명, "초음파를 이용한 튜브의 잔여수명 평가," 한국비파괴검사학회 '98년도 춘계 학술발표회 논문집, pp.109-116, 1998.
- [8] Viswanathan, R., Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components, ASM International, pp.135, 1989.
- [9] ASME, Case of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Appendix T-1431.
- [10] 김효진, 김형규외 3명, "보일러의 손상평가를 위한 온라인 모니터링 시스템," 대한기계학회 '98년도 춘계 학술대회논문집 B, 1998.
- [11] 김효진, 류승우외 2명, "터빈 로터의 결함 검출 및 평가," 기계저널, 제38권, 제9호, pp.38-43, 1998.
- [12] EPRI, SAFER-PC Users Guide and Technical Reference, pp.513-521, 1995.
- [13] 김효진, 박정용, "증기터빈 블레이드의 파손방지를 위한 동특성 해석," 유체기계저널, 제1권, 제1호, pp.17-23, 1998.
- [14] 천진식, 주철홍, "소형편치시험에 의한 재료 유동응력 결정을 위한 역학적 방법," 한국원자력학회 '98년도 추계 학술발표회 논문집, pp.218, 1998.