| 연 구 자 료 |
| --- |
| 기전연94-8-10 |

# 고온 압력설비의 잔여수명 예측을 위한 측정지침

1994. 9. 30

한국산업안전공단
KOREA INDUSTRIAL SAFETY CORPORATION
산 업 안 전 연 구 원
INDUSTRIAL SAFETY RESEARCH INSTITUTE

# 제 출 문

**한국산업안전공단 이사장 귀하**

본 보고서를 산업재해예방기술의 연구개발 및 보급 사업의 일환으로 수행한 "고온 압력설비의 잔여 수명 예측을 위한 측정지침" 사업의 최종보고서로 제출합니다.

1994. 12. 31

주관연구부서: 산업안전연구원
기계전기연구실

연구수행자: 책임연구원 윤 상건

# 서 문

국내에는 발전용 보일러를 비롯하여 수많은 산업용 압력용기가 가동되고 있으며 최근 설계수명에 임박했거나 경제성을 향상시키기 위해 가혹 운전이 행하여 지고 있는 발전 플랜트와 화학공장 고온설비의 수가 증가 추세에 있습니다. 노동부에서 발표한 1992년도 산업재해통계에 따르면 압력용기와 보일러로 인한 재해자는 200여명에 이르고 있습니다.

본 보고서에서는 구조물의 사용 수명 동안 파괴의 가능성을 극소화할 수 있는 파괴방지요소와 국내에서 화력발전소의 장수명화를 위한 연구 개발 실적 및 비파괴적 재질열화 진단 기술에 대하여 알아 보고, 피로크랙 진전 곡선의 경향, 피로수명의 추정, 재료의 잔여수명예측 및 독일의 관련 연구 현황에 대하여 기술하였습니다. 또한 고온압력설비의 잔여수명 측정법인 표면복제법, 경도측정법, 크리프 가속시험, 전기저항법, 초음파법 등에 대하여 측정방법 위주로 기술하였습니다.

본 보고서에서 잘못된 점이나 미진한 사항이 발견되거나 이 주제에 대한 좋은 의견이 있을 경우 연구자에게 알려주시면 큰 도움이 될 것입니다. 본 지침서가 부족하나마 산업현장에서 널리 활용되어 고온 압력 설비재료의 잔여 수명 예측에 조금이나마 기여할 수 있게 되기를 바랍니다.

1994. 9. 30.

산업안전연구원장

# 목 차

1. 머리말 · · · · · · · · · · · · · · · · · 3

2. 연구 필요성 및 현황 · · · · · · · · 5

2.1 연구 필요성 · · · · · · · · · · · · · · 5

2.2 파괴방지요소 · · · · · · · · · · · · · · 9

2.3 기술개발실적 · · · · · · · · · · · · · 16

3. 재료의 잔여수명예측 · · · · · · · · 20

3.1 피로파괴에의 파괴역학의 적용 · · · · 20

3.2 피로크랙 진전곡선의 경향 · · · · · · 22

3.3 피로수명의 추정 · · · · · · · · · · · 25

3.4 독일의 관련연구 현황 · · · · · · · · · 28

3.5 재료의 잔여수명예측 · · · · · · · · · 33

4. 맺음말 · · · · · · · · · · · · · · 42

5. 참고 자료 · · · · · · · · · · · · · 43

부록: 고온압력설비의 잔여수명 측정지침 · · 46

# 1. 머리말

구조물의 가공, 제작 및 사용중 파괴가 발생되지 않도록 하기 위한 전반적인 대책을 파괴방지대책 (Fracture Control Plan)이라 하며, 이 대책은 1940년대까지는 거의 논의되지 않았다. 이때까지만 하여도 대부분의 구조물이 강도가 낮은 재료로 제작되었으므로 파괴방지대책으로는 설계응력을 감소시키는 것이 고작이었다.

그러나 그 후 구조물의 형상이 복잡하여지고 고강도강이 사용됨에 따라 취성파괴가 발생하여 산업재해가 급격히 증가하였다.

노동부에서 발간한 1992년도 산업재해분석 통계[1]에 따르면 압력용기로 인한 재해자는 136명, 보일러로 인한 재해자는 59명에 이르고 있다. 압력용기로 인한 재해발생 형태는 협착 27명, 무리한 동작 25명, 이상 온도 접촉 20명, 폭발 14명, 충돌 13명, 파열 7명, 낙하 비래 6명, 추락 5명, 전도 4명 등의 순이었다.

또한 보일러로 인한 재해발생형태는 무리한 동작 14명, 이상 온도 접촉 12명, 추락 7명, 폭발 6명, 파열 5명, 충돌 4명, 협착 4명, 전도 3명 등의 순이었다.

이러한 재해발생형태 중에서 무리한 동작, 협착, 이상 온도 접촉 등은 안전 교육을 통하여 사고 방지가 가능하므로 여기서는 파열과 폭발 방지를 위하여, 고온 압력설비의 잔여수명예측을 위한 측정법에 중점을 두고 기술하고자 한다.

최근 설계수명에 임박했거나 경제성을 향상시키기 위해 가혹 운전이 행하여지고 있는 발전 플랜트와 화학공장 고온설비들의 수가 증가 추세에 있다.

이에 따라 설비 노후화의 가속이 예상되고 있어 안전 운전의 측면에서 현 상태 진단 및 잔존수명평가에 관한 연구가 시급한 과제로 대두되고 있는 실정이다.

그 중에서도 고온에서 장시간 운전되어야 하는 화력 발전설비의 잔존수명이 감소하여 감에 따라 당 설비의 점검 지침을 구축하기 위한 각국의 노력이 경주되

고 있으며 일부에서는 나름대로의 독자적인 지침이 완료되어 가고 있다.

국내에서도 전력회사를 비롯하여 각종 화학 플랜트 등에서 근래 들어 크고 작은 파손사고를 경험하고 있으며 사고방지의 측면에서 노후설비 및 가혹환경하에서의 재료의 거동에 관한 관심이 고조되고 있다.[2]

고온 부재에서 가장 일반적이고 직접적인 파손 원인은 크리프형 파손을 들 수 있다. 그러나 고온중 장시간 사용에 의한 재질의 변화 즉 경년열화가 크리프 파손의 가속화 내지는 기계적 성질을 약화시키기 때문에 크리프 파손에 관한 근본적인 연구와 더불어 경년열화의 기구 및 측정법 그리고 데이터의 이용방법에 대한 연구도 동일한 중요성을 갖게 된다.

고강도강의 사용에 따라 증가된 취성파괴는 재료내에 있는 미세한 결함이 균열로 발전하여 일어나는 것으로 밝혀졌으며, 취성파괴를 일으키는 최고온도를 파악하여 이를 참고하여 재료를 사용함으로써 취성파괴를 방지할 수 있다. 그러나 이와 같은 것들은 경험적으로만 설계에 적용시킬 수 있다.

그 후 파괴역학 (Fracture Mechanics) 개념이 도입되어 구조물이 받는 하중, 재료내의 결함 크기 및 재료의 Notch 인성간의 정량적인 해석방법이 개발되어 파괴방지의 새로운 장이 열리게 되었다.

1960년대 이후 경제개발과 더불어 건설된 화력발전소는 장기 사용 및 주기 운전 (Cycling Operation)에 따라 경년열화가 상당히 진행된 상태로 가동되고 있다.

또 설비운용기술도 고장보수 (Failure Maintenance), 예방보수 (Protective Maintenance ) 단계를 거쳐 80년대 후반기부터는 예측보수 (Predictive Maintenance )에 주안점을 두게 되었으며 사회변화에 따른 신규 발전설비의 건설부지확보, 환경 규제의 엄격 등이 당면과제로 대두되었다. 따라서 경년화력의 장수명화, 고효율, 저공해 발전방식의 실용화 등이 현실적인 대책이므로 경년화력의 정밀진단 및 평가기술의 확립이 필요하다.

# 2. 연구 필요성 및 현황

## 2.1 연구 필요성

고온중에서 장시간 가동되어야 하는 화력발전설비 부재에서 가장 문제시되는 파손 기구는 고온 크리프와 저 사이클 피로에 의한 파손을 들 수 있다. 여기서 고온 크리프 파손은 어느 정도의 응력이 작용하는 부재가 용융온도의 40% 이상의 온도에서 장시간 사용될 때 전반적으로 발생되는 것으로 그림 2.1과 같은 과정을 밟아 최종적인 파단에 이르게 된다.

저사이클 피로는 불균일한 구조 형상부에서 그림 2.2와 같은 열응력 분포에 의해 발생되는 게 일반적이다.[3]

이러한 파손기구 때문에 일본의 경우 1987년에 제정된 "사업용 화력발전소의 정기검사지침[4]"을 살펴보면 총운전시간이 10만 시간을 초과하였거나, 총가동회수가 2,500회를 넘는 설비에 대해서 경년열화 설비로 정의하고 엄밀한 정기검사를 행할 것을 의무화하고 있다.

여기서 10만 시간이란 기준은 정성적이지만 파손 및 열화요인이 고온 크리프인 것을 염두에 두었고 가동회수의 기준은 파손요인이 저사이클 피로에 의한 것을 가정했을 때의 값이다.

일반적으로 화력발전 설비중 보일러와 같은 고온부재의 설계응력 산정은 사용조건 즉 연소 및 전열 등을 고려한 후 재료의 물성치를 기준으로 하지만 가장 중요한 기준은 사용 온도에서 10만 시간의 크리프 파단 강도 평균치의 60% 또는 최저치의 80%로 정하고 있다.

물론 크리프 파단시간은 작용응력의 3~5승에 비례하기 때문에 응력을 0.6배 하는 것은 수명을 8배로 늘리는 효과를 갖게 된다. 이와 같은 사실로부터 상기와 같이 10만 시간후 정밀한 점검이 필요하다는 것은 결국 80만 시간의 수명을 기대

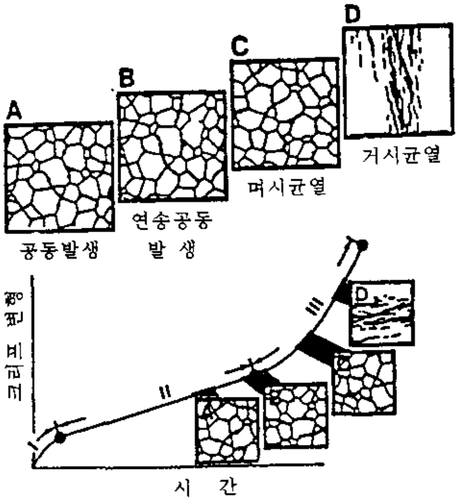



그림 2.1 크리프 변형의 미시적 기구

하면서 10만 시간의 사용을 보증한다는 것을 의미한다.

그러나 사용중의 보일러는 설계시에 고려되었던 온도여유, 재질여유, 형상여유들이 사용중에 일어나는 재질열화 및 연소물질의 침식 등에 의해서 감소되고 결국 설계시 수명은 기대치보다 상당량 저하된다. 파손사고를 가속화시키는 경년적인 재질변화를 정확히 판단한다는 것은 현 상태에서는 어렵고 각종 측정치의 활용에 있어 판단 근거가 수립되어 있지 않은 관계로 설비의 공칭 설계수명이 각 나라마다 다르게 설정되어 있는 것은 특기할 만하다. 예를 들어 일본과 프랑스의 경우는 10년, 미국과 영국이 각각 26만 시간과 35만 시간을 설정해 놓고 있다.

현재 관련 연구의 최대 목적은 경년화력 발전설비의 수명연장에 있고 여기서 이러한 연구의 배경과 필요성으로는 다음과 같은 사항들을 들 수 있다.[5,6]

(1) 충분한 예비 공급력과 낮은 수요증가에 따라 신설 설비의 필요성이 낮다.

(2) 신 설비의 건설 코스트가 높다.

(3) 신설 설비의 환경 규제가 심해지고 있다.

(4) 수명연장된 경년설비에서는 발전코스트가 신설설비보다 10~25% 싸다.

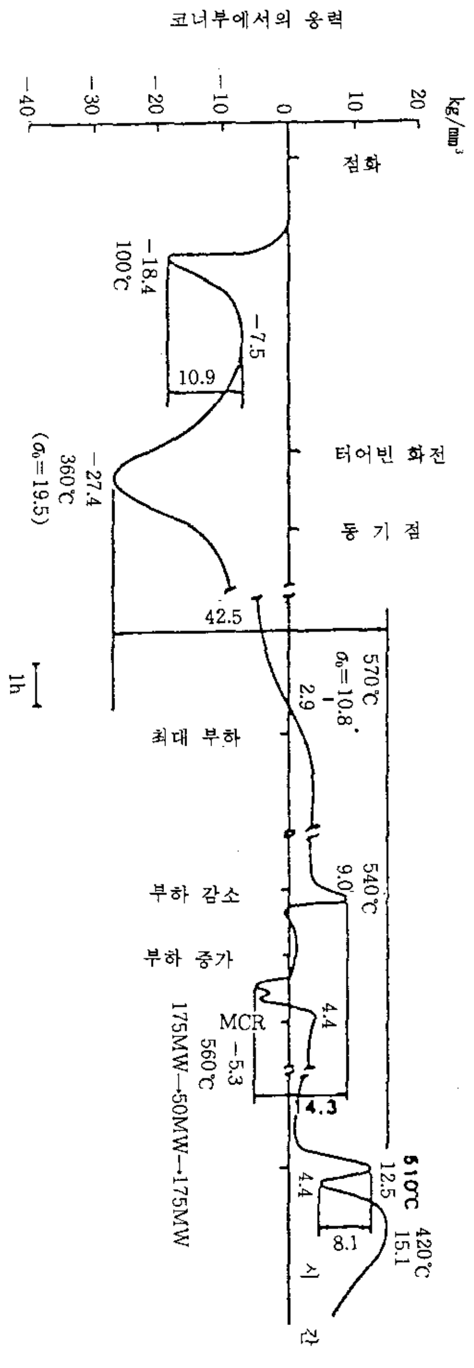



그림 2.2 정지 재가동에 의한 불연속 형상부에서의 열응력 분포예[3]

(5) 각 나라마다 공칭설계수명이 다르다.

결국 설계수명이 넘은 설비에 대하여 보수 및 운전 패턴의 변경 등 여러 각도에서의 보완을 통하여 설비의 전체적 수명연장을 꾀하려 하고 있으며 이같은 목적을 달성하기 위해 행하는 실험항목은

(1) 응력이 집중되는 구조형상이나 초기결함 등을 기점으로 진행하는 크리프/피로 손상

(2) 구조형상이나 초기결함 등에는 무관한 사용온도와 시간에 의존하는 재질열화와 그 측정법의 개발

여기서 크리프에 관한 연구에서는 단시간 시험결과를 이용하여 수명을 예측하기 위한 실험 및 해석적 연구가 주류를 이루고 있다.

또한 재질열화에 관한 연구는 그림 2.3과 같이 재질열화에 의해 변화된 수명을 예측하기 위해 필요한 손상 파라메터의 선정과 손상도와의 관계를 명확히 하기 위한 연구가 활발하다. 그러나 손상 파라메터와 대비되는 손상도는 결국 크리프 수명을 나타내기 때문에 두 영역의 연구는 서로 유기적인 관계를 유지해야 소정의 목적을 달성할 수 있을 것이다.

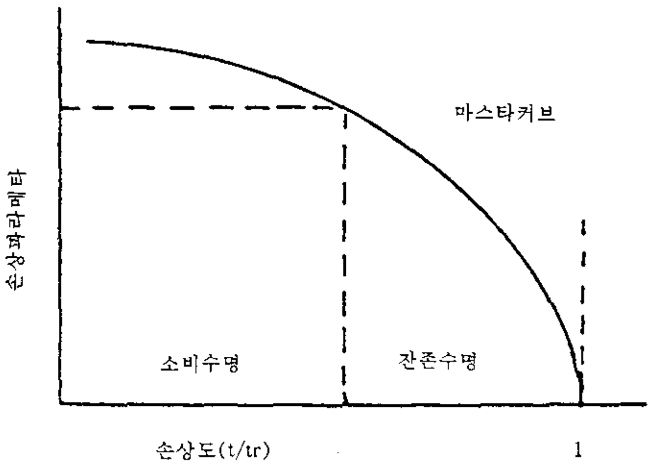



그림 2.3 손상 파라메터에 의한 수명예측의 개념도

## 2.2 파괴방지요소

복잡한 구조물에서 파괴요인을 완전히 제거하는 것은 불가능하지만 구조물의 사용 수명 동안 파괴의 가능성을 극소화할 수 있도록 대책을 세워야 한다.

이러한 대책을 마련하기 위하여는 구조물의 설계, 제작 및 사용 단계에서 여러 요소들을 고려해야 하는데 이 요소들을 파괴방지요소 (Elements of Fracture Control)라 한다.

여기에는 설계, 재료, 품질관리, 사용중 관리 및 파손분석이 있다.

### 2.2.1 설계

구조물을 설계할 때는 수명, 사용하중, 구조물이 받는 열적·화학적 환경, 안전율 등을 고려하여 구조물이 파손될 가능성이 최소가 되고 경제성과 안전성이 높으며 점검 및 보수가 용이하도록 해야 한다.

구조물의 안전성을 높이기 위한 설계방법에는 Safe-Life법과 Fail-Safe법이 있다.

Safe-Life법은 사용중에 결함이 임계크기까지는 성장하지 않도록 설계하는 것이며, Fail-Safe법은 구조물의 일부분이 파손되어도 일정 기간 동안은 전체 구조물이 파괴되지 않아 파손부분의 탐지 및 보수가 가능하도록 설계하는 방법이다.

또한 응력해석, 피로해석, 파괴역학해석을 통하여 응력의 분포와 크기를 결정하고 이를 토대로 강도, 변형, 피로, 파괴, 안전성 등에 대한 설계기준에 맞게 구조물이 설계되었는가를 평가하여야 한다. 해석을 통하여 구조물이 설계기준에 맞게 설계되지 않았다고 평가되면 다시 설계를 하여야 하며 이 작업을 반복하여 설계조건을 만족시켜야 한다.

### 2.2.2 재료

구조물의 파괴저항은 주로 사용재료에 따라 결정된다. 설계시의 재료선택은 강도, 인성, 연성, 가공성, 피로 및 분위기에 의한 영향, 가격 등을 고려하여 최적의 재료를 선택하여야 한다.

설계상에서 선택된 재료를 제작에 실제로 사용할 때는 설계상의 성질을 갖게 하기 위하여 재료의 조달, 열처리, 용접 등의 처리 공정에 대한 규제가 필요하다.

### 2.2.3 품질관리

품질관리는 크게 Incoming Quality Control, In-Plant Quality Control, Exit Quality Control로 분류된다.

품질관리는 치수검사, 비파괴검사, 파괴검사 등을 통하여 실시하며 Exit Quality Control을 할 때는 Proof Testing이나 Verification Testing을 한다. Proof Testing은 압력용기나 Pipe Line과 같은 구조물을 예상사용응력보다 큰 응력을 가하여 안전도를 검사하는 시험을 말하며 Verification Testing이란 구조물 전체에 대한 Accelerated Total - Service - Life - Testing을 하는 것을 말하는데 소형 압력용기나 자동차 등과 같이 동일품이 많고 실물에 실제하중을 가하는 시험으로써 파손이유를 밝힐 수 있을 때만 실시한다.

### 2.2.4 사용중 관리

구조물을 실제로 사용할 때는 계속적인 감시, 정기적인 검사 등을 통하여 손상된 부분을 탐지해 내고 파손이 발생되기 전에 보수하여 제 성능을 발휘할 수 있도록 관리하여야 한다.

예를 들어 국내 화력 발전설비의 현황을 살펴보자.

1992년 10월 1일 현재 운용되고 있는 발전설비의 시설용량은 23,800.1MW이며 이의 전원별 구성은 그림 2.4와 같이 화력발전소 9,912.3MW(41.6%), 원자력발전소 7,615.7MW(32.0%), 내연발전소 3,774.3MW(15.9%), 수력발전소 2,497.8MW(10.5%)로 구성되어 있다. 이들 중 화력발전소를 살펴보면 연료별 구성비는 그림 2.5와 같이 석탄(무연탄 1,020MW, 유연탄 2,680MW)화력이 3,700MW로서 37.3%, 중유(3,274.8MW)와 가스화력(2,937.5MW)이 6,212.3MW로서 62.7%를 차지하고 있으며 경년 현황을 보면 그림 2.6과 같이 20년 이상 운전된 발전소가 호기(UNIT)수로는 19기(43.2%), 설비용량으로는 2,402.3MW(24.2%)를 차지하고 있으며 정밀진단이 필요한 10년 이상 운전된 발전소는 36기(81.3%), 설비용량으로는 6,682.3MW(67.4%)이므로 대부분의 발전소가 경년열화 정밀진단을 필요로 하고 있다.

경년열화 정밀 진단 및 평가 기술의 고도화가 가능하여 정확도가 향상되고

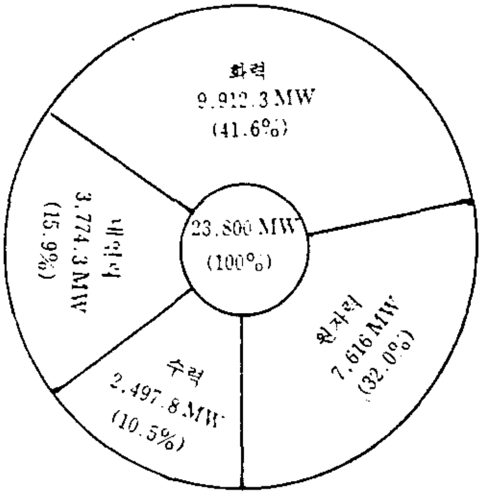



그림 2.4 전원별 구성비

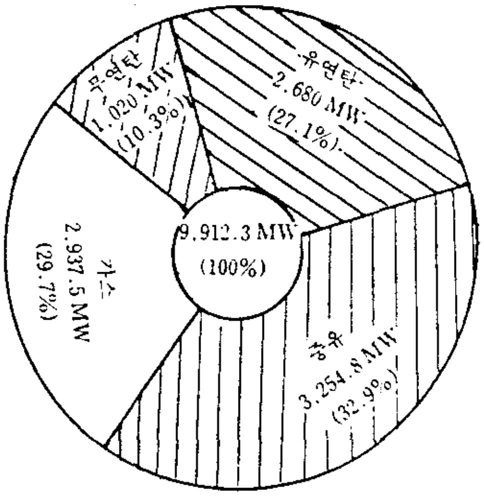



그림 2.5 화력발전소의 연료별 구성비

장수명 기술이 개발된다면 발전설비의 수명은 25년 이상으로 장수명화가 가능하고 이용율도 82.4~90.4%를 유지할 수 있어 투자비의 절감은 물론 전원입지 및 송전선 확보에도 잇점이 크다.

그림 2.7은 발전설비의 장수명화를 위한 기술고도화에 의한 가동률의 변화를 나타내었다.

그러면 경년열화의 기구를 살펴보자.

발전설비와 같은 고온기기에서는 부재에 응력이 작용하지 않아도 재질이 시간이 경과함에 따라서 열화되어 가는 것이 상온기기의 잔존수명평가와 다른 점이다.

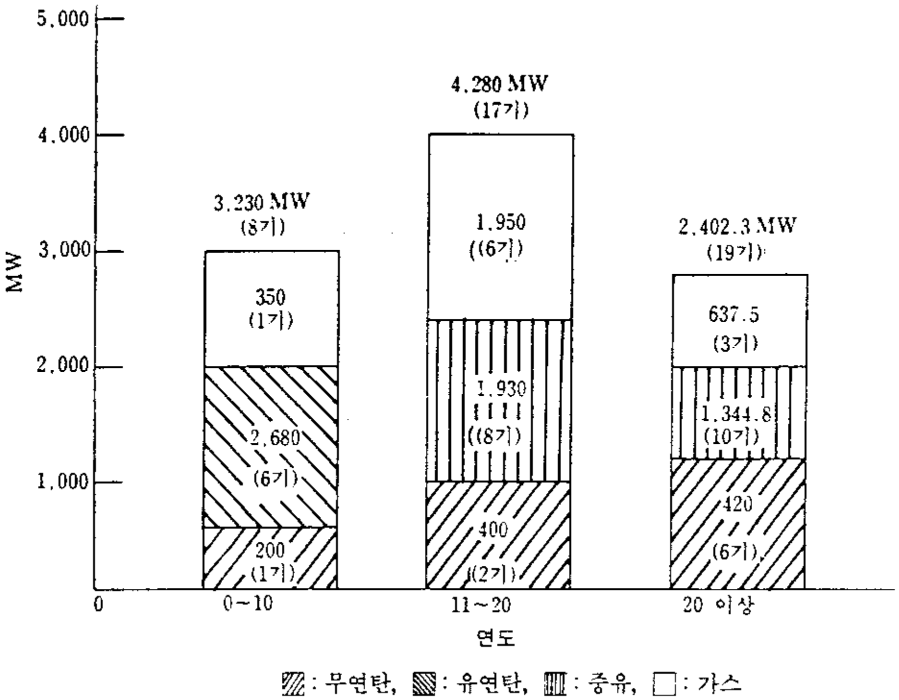



그림 2.6 화력발전소의 경년현황

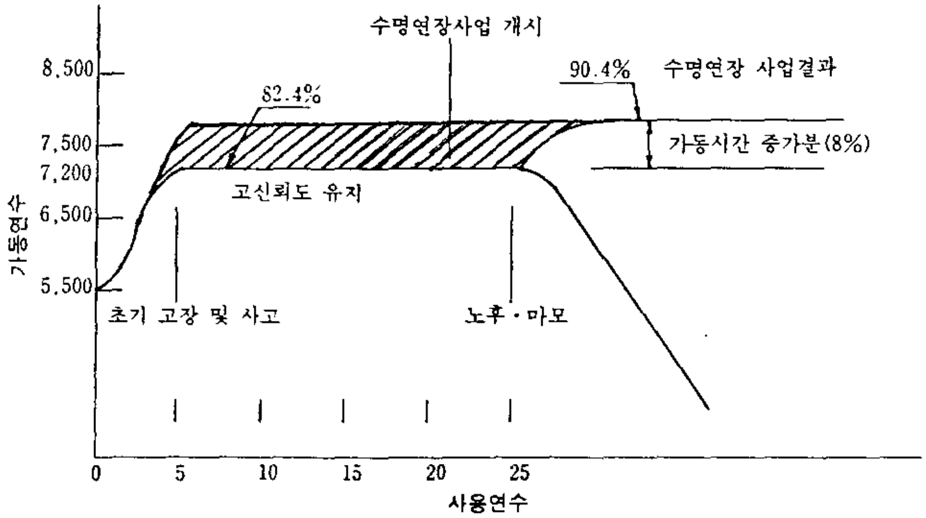



그림 2.7 수명에 따른 가동률의 변화

고온기기의 잔존수명추정은 어느 시점까지의 재료의 내외부에 발생한 재질열화 정도의 계측, 기운전 이력에서 구한 수명소비율 및 운전 예상이력에 기인한 잔존 수명평가라는 두가지 영역으로 나누어진다.

이 두 영역의 상관관계를 그림 2.8에 나타낸다.

고온에서 장시간 사용중 일어나는 재질의 변화를 통틀어 경년열화라 하며 재료 내부에서 일어나는 금속재료의 미세구조 변화와 그것에 기인하는 제반 성질의 변화를 그림 6.14에 나타낸다.[7]

그림 2.9는 외형적 열화의 대표적인 미시기구를 도식적으로 나타낸다.

그림에서 알 수 있듯이 고온기기의 사용중에 생기는 열화는 응력이 원인으로 되는 열화와 열적활성에 의해 발생하는 열화로 나누어진다. 여기서 전자를 기계적 열화라 하고 후자를 조직적열화라 한다.

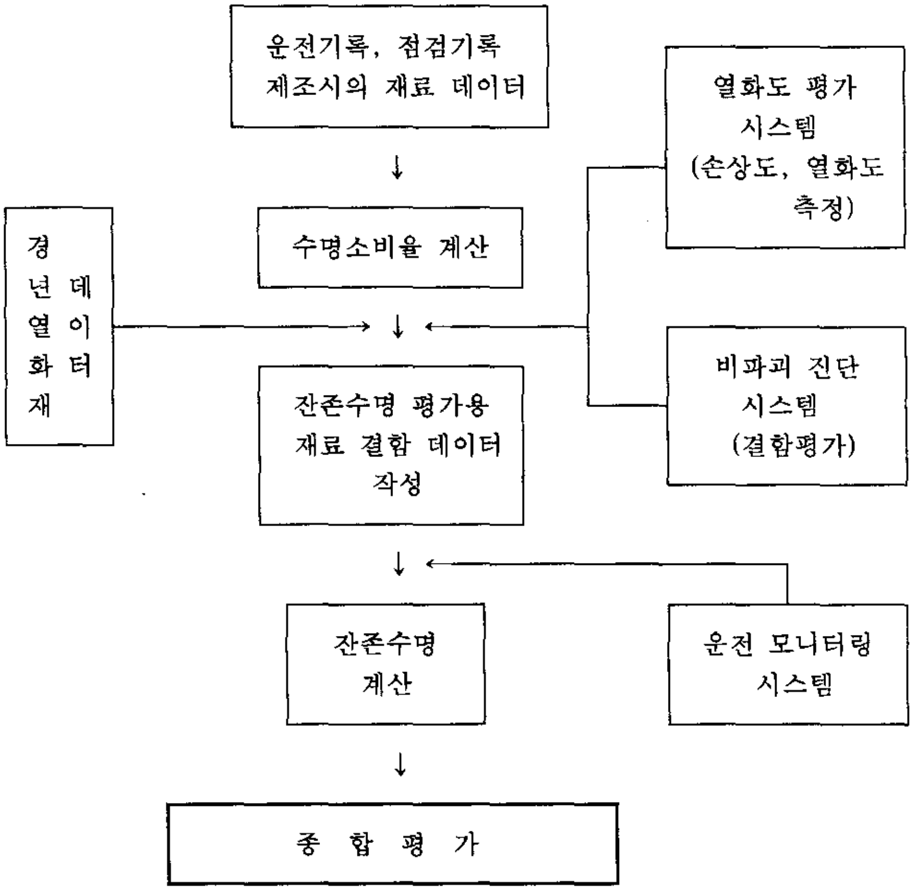



그림 2.8 수명평가에 있어서의 열화도 측정의 위치

조직열화는 그 자체가 진행된다 하더라도 응력이 작용하지 않는 한 파손까지는 도달되지 않으나 조직열화가 부하상태에서 가속된다고 알려져 있으며 설비 수명의 결정에 허용상한치의 감소나 기계적열화 속도 등에 영향을 미치게 된다. 조직열화로서는 탄화물의 생성이나 편석 등에 의한 재료의 연화 또는 취화 그리고 고온부식 등이 있다.

기계적열화는 운전시간과 함께 증가하며 그것이 어느 한계치에 달했을 때 부재의 파손이 일어나고 결국 사용불가능 즉 수명을 다하게 된다. 고온기기에 있어서

기계적열화로서는 변형과 균열 또는 균열의 전단계인 공동(Void) 형성 등을 들 수 있다.

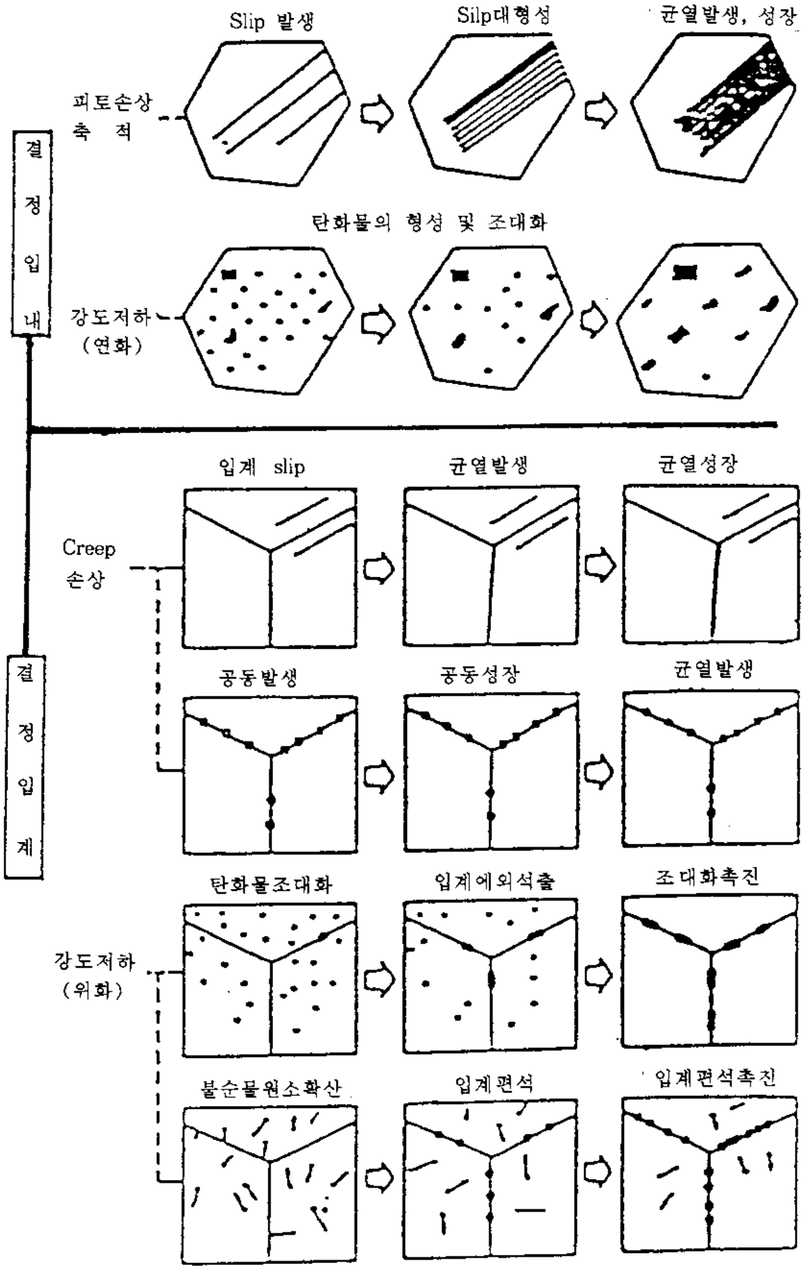



그림 2.9 고온부재에서 관찰되는 각종 경년열화의 모식도

### 2.2.5 파손분석

이상과 같은 여러 요소를 충분히 고려하여도 사용중에 구조물이 파손되는 경우가 있다. 이는 예기치 않았던 설계조건의 변화나 부적절한 사용 등 여러가지 원인 때문이다.

따라서 파손분석을 통하여 파괴원인을 밝혀내고 이와 유사한 구조물을 설계할 때나 사용할 때 이를 반영함으로써 파손을 방지할 수 있다.

## 2.3 기술개발 실적

국내에서 화력발전소의 장수명화를 위한 연구를 시작한 것은 보일러 및 압력용기에서 가장 고장 · 정지가 많이 발생하는 보일러 절연관(Boiler Tube)을 대상으로 1977년에 한전기술연구원(KEPCO R&D Center)과 한국과학기술연구원(KIST)이 공동으로 수행한 것이 그 시초이다.

표 2.1은 1977년부터 시작된 국내의 주요연구과제 추진현황을 나타낸다.

그 후 이를 근거로 보일러 튜브 관리 전산화를 위한 전산시스템 및 미사용강재의 크리프 강도 데이터가 구축되었으며 기저부하 발전소로 건설된 평택 1,2호기가 전력계통의 운용형태의 변화로 주기운전으로 전환됨에 따라 빈번한 기동정지를 하게 되어 그 영향 평가를 위해 터빈 로터, 보일러 후육부(Drum, Header, 고압고온 Pipe 등)의 수명평가를 수행하고 그림 2.10의 RoLPAS(Rotor Life Prediction Analysis System) 및 BoLPAS (Boiler Life Prediction Analysis System)라 명명된 프로그램이 개발되었다.

이 프로그램은 피로 및 크리프에 의한 균열발생시점을 예측하는 데 목적을 두었다.

1991년부터 RoLPAS를 보완하여 균열전파를 예측할 수 있는 프로그램이 개발

되었다.[8]

비파괴적으로 재질열화를 진단하는 기술개발을 위하여 한전기술연구원과 한국표준과학연구원(KRISS)이 공동으로 1990년부터 3년에 걸쳐 "고온 사용설비의 비파괴 재질열화 연구"를 완료하고 1993년 4월에는 1965년에 준공되어 28년간 운전된 영월화력 2호기에 적용하고 실용성 및 정확도의 향상을 위한 방안을 검토중이다.

표 2.2는 국내에서 실기에 적용하고 있는 비파괴적 재질열화 진단기술 내용이다.

표 2.1 주요 연구과제 추진 현황

| 연구 과제 | 기간 | 주요 내용 | 기관 |
|---|---|---|---|
| - 보일러 튜브의 파열사고 대책에 관한 연구 | '77～'79 | - 보일러 튜브의 경년열화 정도를 측정하여 잔존수명예측 | 한전-과기연 |
| - 보일러 튜브의 관리전산화 | '81～'83 | - 보일러 튜브교체시기 판정 시스템 구축 | 한전 |
| - 보일러 튜브용 강재의 크리프 시험 | '83～'85 | - Larson-Miller Parameter 작성을 위한 신재의 크리프 시험 | 한전 |
| - 터빈 로터 수명예측 연구 | '85～'87 | - 운전 유형별 터빈 로터의 수명소비율을 계산하여 수명소비 감소 및 평가 | 한전-과기연 |
| - 보일러 후육부 및 고온 배관계 수명예측 연구 | '88～'91 | - 보일러의 주요부위에 대한 수명소비율을 계산하여 수명평가 | 한전 |
| - 고온사용 설비의 비파괴적 재질열화 진단기술 개발 | '90～'92 | - 보일러 터빈 고온부의 재질열화 진단기술 개발 | 한전-표준연 |

표 2.2 실기 보일러에 적용되고 있는 비파괴적 평가 방법

| 평 가 방 법 | | | 평 가 손 상 | | | | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 크리프 | 피로 | 재질열화 | 재질취성 | |
| 조직검사법 | 결정립변형법 | 크리프에 의한 결정립의 변형정도 (변형 계수) 관찰 | ◎ | - | - | - | - Replica 채취<br>- 화상 해석 |
| | A 변수법 | 관찰 결정립계 총 수에 대한 크리프 기공 발생 입계수의 비(A 변수)조사 | ◎ | - | - | - | - Replica 채취 |
| | 크리프 기공 면적률법 | 관찰면적에 대한 크리프 기공면적의 비 조사 | ◎ | - | - | - | - Replica 채취<br>- 화상 해석 |
| | 크리프 기공 면밀도법 | 단위면적당 크리프 기공의 수 (크리프 기공 면밀도) 관찰 | ◎ | - | - | - | - Replica 채취 |
| | 미시 균열법 | 피로에 의한 미소균열길이(극치통계에 의한 대표최대균열 길이) 평가 | - | ◎ | - | - | - Replica 채취<br>- 화상 해석 |
| | 조직 대비법 | 크리프에 의한 석출물, 탄화물 등의 변화에 착안하여 표준조직과의 대비 또는 변화율 관찰 | ◎ | - | - | - | - Replica 추출<br>- Replica 채취<br>- 미소 시료의 CMA 분석 |
| | 입계 부식법 | 내식성 및 화학부식 특성의 변화에 따른 입계부식량(폭, 길이)을 측정 | - | - | - | ◎ | - 시험적용 중 |
| | 전기 분극법 | 재질열화에 따른 부식속도 (전류 밀도)를 측정 | ◎ | ◎ | ◎ | ◎ | - 시험적용 중 |
| 경 도 측 정 법 | | 크리프에 의한 재질연화에 따라 변화하는 경도 측정 | ◎ | ◎ | - | - | |

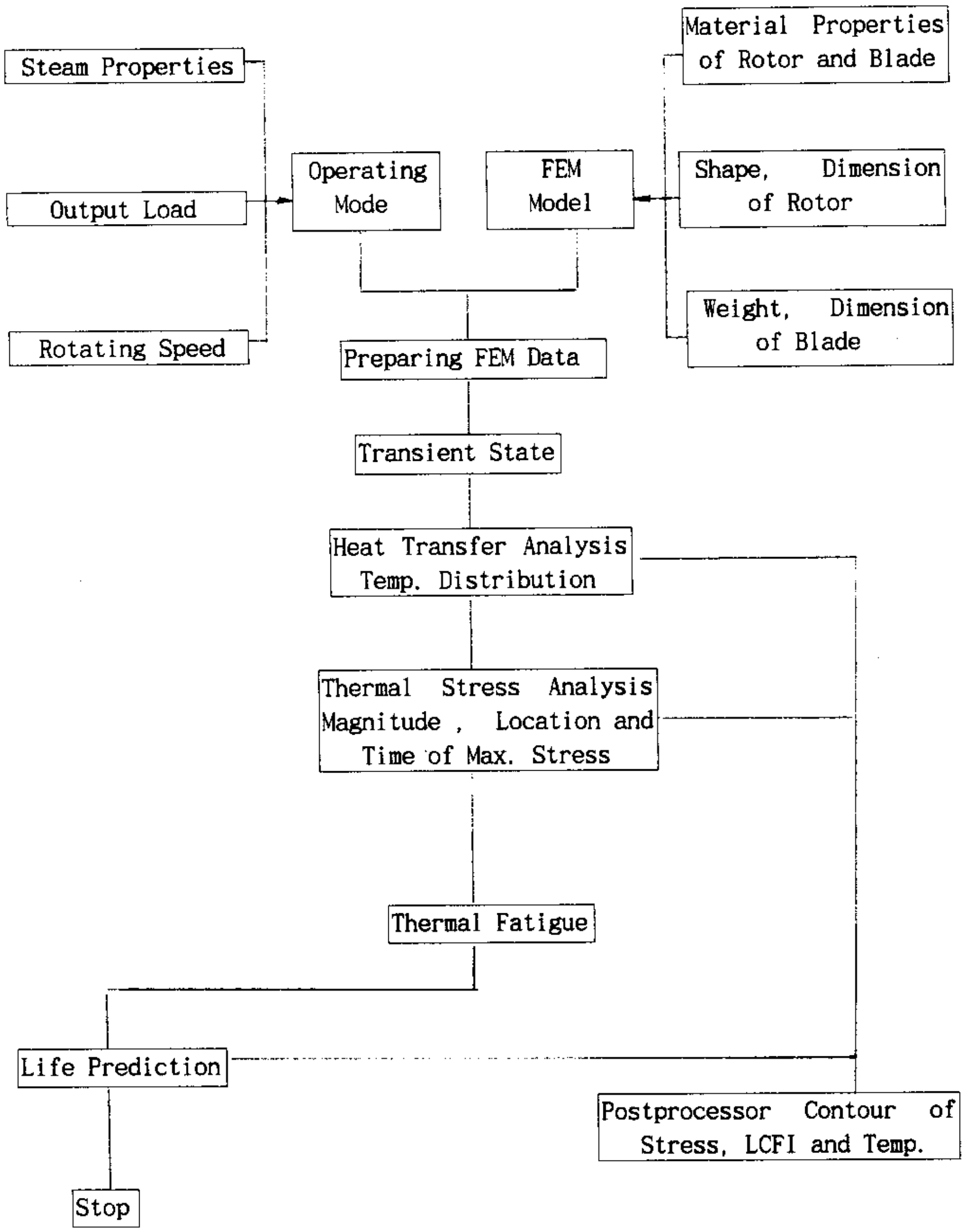


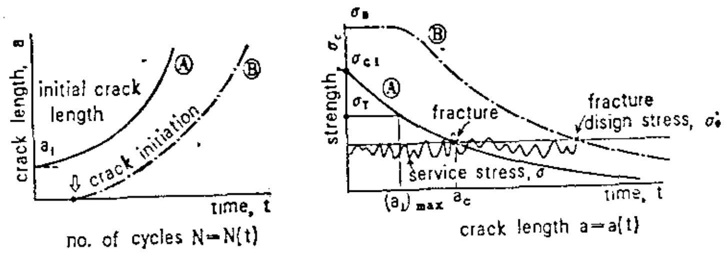

그림 2.10 RoLPAS의 알고리즘 순서도

# 3. 재료의 잔여수명예측

## 3.1 피로파괴에서의 파괴역학의 적용

제조시의 구조물에 존재하는 초기크랙의 치수를 $a_i$라 하면 이것이 사용응력 $\sigma_0$하에서 한계크랙의 치수 $a_c$ 이하인가 아닌가는 수압시험 등의 초기검사 또는 과부하시험에 의해 검사할 수가 있다. 따라서 실용상엔 그림 3.1에 표시한 것과 같은 $a_i$로부터 $a_c$까지 성장하는 과정(Sub-Critical Flaw Growth)을 명백히 하는 것이 중요하다. 이 성장 과정은 반복하중이나 부식성 환경 등의 작용에 의하여 진행된다.

취성파괴가 소규모 항복하에서 일어나는 것은 파괴인성이 낮은 재료나 고장력강 재료에 한정되는 데 반하여 상기의 과정은 공칭응력이 항복점보다 훨씬 낮은 상황 아래에서도 진행한다.




(a) crack growth　　(b) strength variation

그림 3.1 크랙의 존재와 성장에 따른 크기 변화

그림 3.2(a)와 같이 공칭응력 $\sigma$가 변동할 때 주어진 형상, 치수의 크랙선단에서의 응력확대계수 K도 그림 3.2(b)와 같이 거기에 대응하여 시간적 변동을 한다.

또한 응력의 변동폭 $\Delta\sigma$가 일정하여도 크랙길이가 증가하면 그림 3.3에 표시한 바와 같이 K의 변동폭 $\Delta K$는 변화한다. 크랙치수 a의 하중반복수 N에 대한

진전속도 da/dN가 K에 의존하느냐 $\sigma$에 의존하느냐 하는 것은 소규모 항복인 경우는 명백하다.

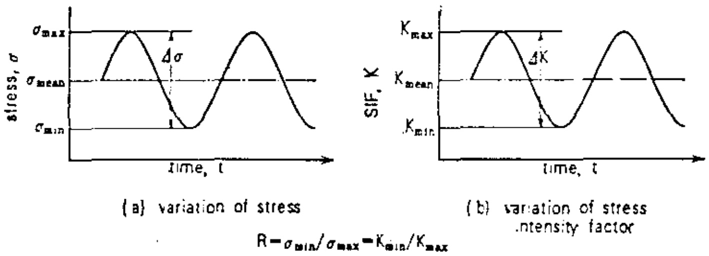



그림 3.2 Stress Intesity Factor의 변화

즉 비부식성 환경중에 피로의 경우는 재료의 손상은 크랙선단의 큰 변형율 영역에 한정되며 또 이 부분의 역학적 조건은 K와 1 대 1의 대응관계가 있으므로 동일한 판 두께 B, 동일한 재료내의 크랙선단에서 응력확대계수의 시간적 변동 K=K(t)가 같으면 크랙진전속도는 서로 같고

$$da/dN = f\{K(t)\} \tag{3.1}$$

의 함수관계가 성립할 것이다.

K가 그림 3.2(b)와 같이 正弦波 형상으로 변화하는 경우 이 시간적 변동을 기술하는 파라메터로서는 반복속도 dN/dt외에는 독립적인 것으로서는 2개(예를 들면 $K_{max}$와 $K_{min}$, $\Delta K$와 응력비 R, $\Delta K$와 $K_{max}$의 조합 등) 뿐이므로 위의 식은 예컨대

$$da/dN = f(\Delta K, R, dN/dt, B) \tag{3.2}$$

로 쓸 수 있을 것이다.

식 (3.2)의 관계를 실험적으로 구하기 위해서는 박판의 경우에는 중앙에 크랙을 갖는 장방형 판의 반복인장, 두꺼운 판의 경우에는 CT 시험편(WOL 시험편) 등이 사용되고 하중의 변동폭 및 R을 일정하게 유지하면서 반복회수 N에 대하여 크랙치수 a=a(N)을 측정하는 것이 보통이다.

많은 a의 값을 토대로 da/dN을 구하고 또 그 때의 $\Delta K$를 계산하여 양자의 관

계를 그려 나가면 1개의 시험편에 의하여 특정한 응력비 R에 관한 그림 3.4와 같은 관계를 얻는다.

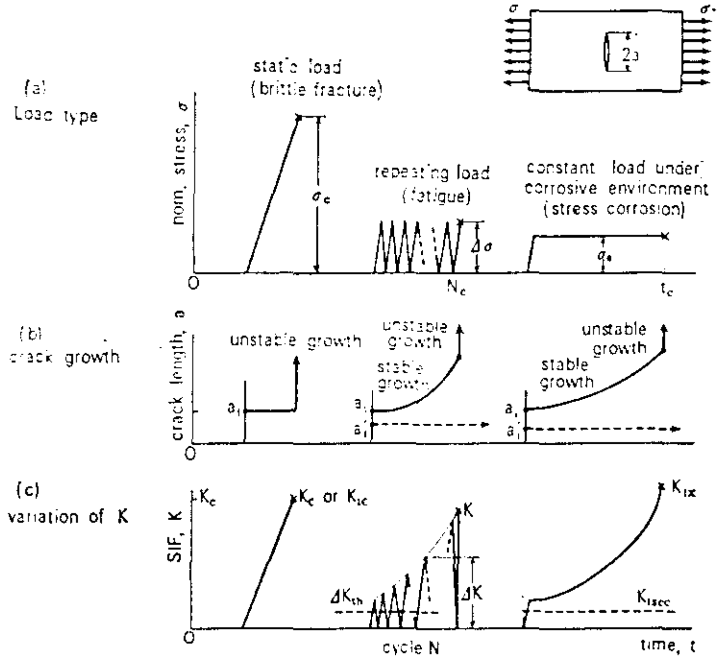



그림 3.3 하중과 파괴의 형태

# 3.2 피로크랙 진전곡선의 경향

이와 같이 얻어지는 피로크랙 진전곡선의 형상은 양 대수 방안지 상에서 대략 그림 3.5와 같은 경향을 나타낸다.

곡선이 일어 선 처음 부분은 초기에 기계가공에 의하여 만든 크랙발생용의 노치의 크기나 작용시키는 하중에 의하여 영향을 받고 또 응력집중을 일으키는 예리한 노치로부터 발생한 크랙은 소성변형에 의한 잔류응력 등으로 인하여 한번 크랙 진전속도가 저하하는 경우도 있고 그림에 파선으로 표시한 바와 같은 거동은 재료

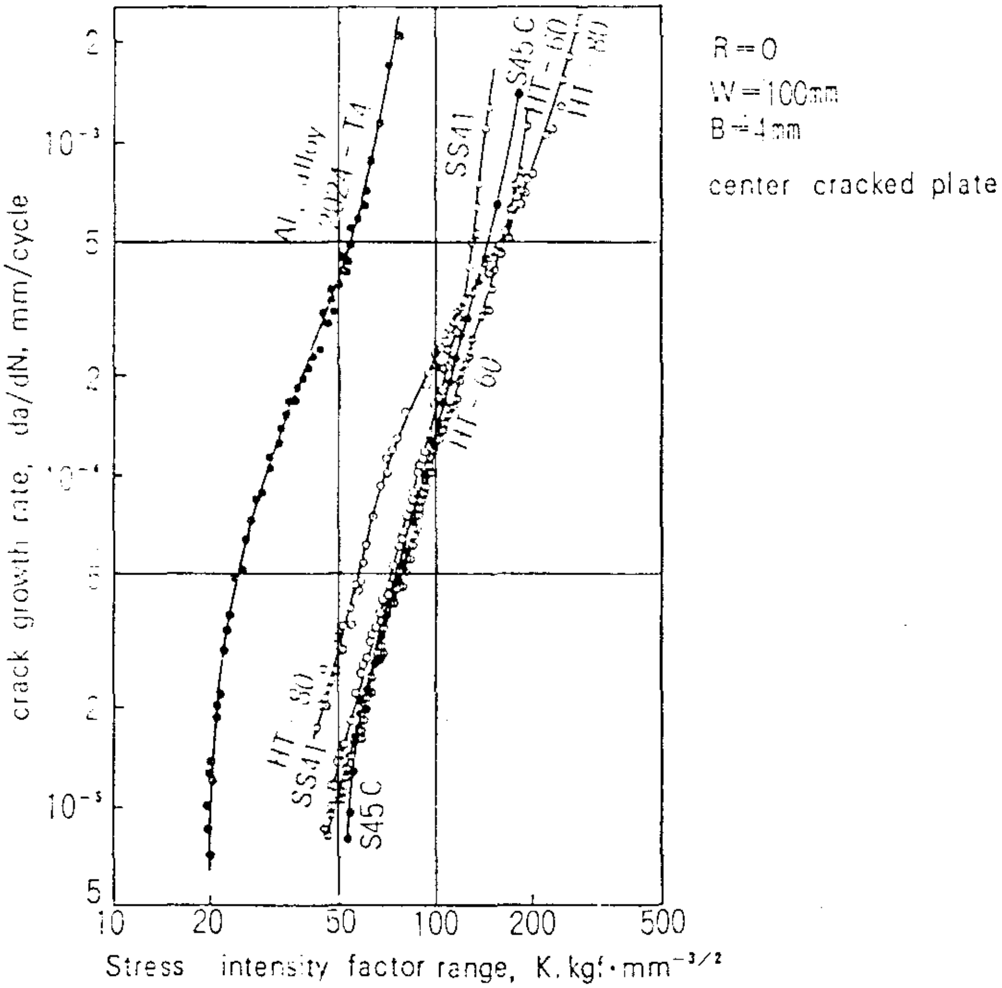



그림 3.4 피로 크랙 성장 데이타

본래의 특성을 나타내지 않고 있는 경우가 있다. 그 이후의 크랙의 진전속도는 꽤 넓은 범위에 걸쳐 직선상이 되는 수가 많고 이 구배를 n이라 하면

$$da/dN = C\Delta K^n \quad (3.3)$$

로 쓸 수 있다.

크랙의 진전속도는 $\Delta$K로서 결정되며 응력비 R나 파형 등의 인자가 끼치는 영향은 부차적으로 위에서 말한 직선부에 한하지 않고

$$da/dN = f(\Delta K) \tag{3.4}$$

라고 근사적으로 나타낼 수도 있다. 응력비나 반복속도, 판두께 등의 영향은 C나 n에 포함시켜서 취급할 수가 있다.

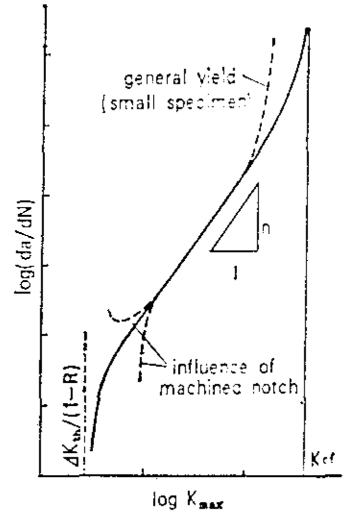



그림 3.5 크랙 성장율 곡선

식 (3.3)의 직선관계는 예를 들면 고장력 알루미늄 합금 7075-T6에서는 da/dN에 대하여 $10^{-8}$~$10^{-2}$in./cycle의 넓은 범위에서 성립하고 있는 예도 있다. n의 값은 재료에 따라 2~8 정도의 범위를 중심으로 하여 여러 가지 값을 취하는 데 최초에 Paris 등[9]은 n=4를 제안하였다.

$\Delta$K 또는 $K_{max}$가 큰 영역이 되면 소형 시험편에서는 전단면의 전면항복이 일어나서 da/dN는 급격히 증가하는데 이 일어서는 점은 시험편 치수에 따라 다르다. 충분히 큰 시험편에서 소규모 항복의 상태가 유지된다면 그림 3.5에 나타난 것과 같이 $K_{max}$가 $K_c$ 또는 이것에 가까운 어느 값 $K_{cf}$에 가까와짐에 따라 급격히 증가

한다. 이 $K_{cf}$는 단 한번의 부하에 의한 불안정파괴의 파괴인성과는 약간 값이 다른 것 같다.[10] 이와 같은 직선부로부터 $K_{cf}$로 점차 가까와지는 특성을 나타내고 또 응력비 R의 영향을 가미한 실험식의 하나의 예로

$$da/dN=C\Delta K^n/\{(1-R)K_{cf}-\Delta K\}=C\Delta K^n/\{(1-R)(K_{cf}-K_{max})\} \qquad (3.5)$$

이 있다.[11]

그림 3.5의 좌단 즉 $\Delta K$가 극히 낮은 부분에 대하여는 $\Delta K$를 점차적으로 감소시키는 시험법 등에 의하여 실험함으로써 크랙진전곡선을 구할 수가 있으나 그림과 같이 $\Delta K$의 감소와 더불어 da/dN가 급속히 작아지는 경향이 있다. 철강 등의 피로한도와 같이 크랙진전의 하한계의 $\Delta K$ 즉 $\Delta K_{th}$(Threshold Stress Intensity Factor for Fatigue Crack Propagation)가 존재하는가 어떤가는 확정적은 아니지만 실용상은 da/dN가 충분히 낮은 값이 되는 $\Delta K$의 값을 $\Delta K_{th}$로 잡고 수명추정에 참고로 하고 있다. $10^{-10}$in/cycle 정도에서도 크랙진행이 관찰되는 예도 있고 또 $10^7$ 정도의 반복회수 동안 정지한 후 다시 진행을 시작한 예도 있다. 1회에 큰 $\Delta K$가 가하여지면 이것에 의하여 발생한 잔류응력으로 인하여 크랙의 진전속도는 저하하고 또 이 정도의 늦은 진전속도의 영역에서는 연속체역학에서 말하는 고응력 부분의 치수와 재료의 미시적 조직이나 내부응력 분포의 치수가 같은 정도가 되고 크랙의 진전은 단속적, 불연속적이 된다.

## 3.3 피로수명의 추정

피로크랙 진전에 관한 실험자료

$$da/dN=f(\Delta K, \text{2차적 인자들}) \qquad (3.6)$$

를 알고 있으면 초기 크랙치수 $a_i$로부터 $a_c$로 성장하기까지의 하중의 반복회수 즉 피로수명 $N_c$는 위의 식을 적분하여

$$N_c=\int dN=\int da/f(\Delta K, \cdot\cdot\cdot) \qquad (3.7)$$

에 의하여 구할 수 있다. 또 $\Delta\sigma$가 일정해도 a에 의하여 $\Delta K$가 변화하는데 일반적으로 부재의 형상이 정하여지면

$$\Delta K=\Delta\sigma\ g(a) \tag{3.8}$$

인 함수 g(a)는 기지이다. 따라서 이의 역함수 $g^{-1}$을 사용하여

$$a=g^{-1}(\Delta K/\Delta\sigma) \tag{3.9}$$

라고 표시가 된다. 따라서 식 (3.8)의 전미분을 택하면

$$d(\Delta K)=\Delta\sigma\ g'(a)da=\Delta\sigma\ g'[g^{-1}(\Delta K/\Delta\sigma)]da \tag{3.10}$$

이므로 식 (3.7)은

$$N_c=\int d(\Delta K)/[f(\Delta K,\cdot\cdot\cdot)\Delta\sigma\ g'\{g^{-1}(\Delta K/\Delta\sigma)\}] \tag{3.11}$$

로 표시할 수가 있다. 단

$$\Delta K_i=\Delta\sigma\ g(a_i),\ \Delta K_c=\Delta\sigma\ g(a_c)$$

이다. 위의 식에서 함수 f 및 $g'[g^{-1}]$은 기지이므로 $N_c$는

$$N_c=h_1(\Delta K_i,\Delta K_c,\Delta\sigma,\ \text{2차적 인자들}) \tag{3.12}$$

또는

$$N_c=h_2(a_i,a_c,\Delta\sigma,\ \text{2차적 인자들}) \tag{3.13}$$

의 형태로 구할 수가 있다. 또한 f($\Delta K$, 2차적 인자들)은 통상적으로 $\Delta K^4$ 정도의 증가함수이므로 $\Delta K$의 작은 부분이 $N_c$에 주로 기여하고 또 이 부분에서는 g(a)는 거의 $\sqrt{a}$에 비례하므로 $g'\{g^{-1}(\Delta K/\Delta\sigma)\}$는 $\Delta\sigma/\Delta K$에 대체로 비례한다. 따라서 $a_i$가 충분히 작은 경우에는 수명 $N_c$는 주로 $\Delta\sigma$와 $\Delta K_i$(또는 $a_i$)에 의하여 결정된다.[12]

식 (3.12) 또는 (3.13)는 주어진 $\Delta\sigma$를 파라메터로 하고 log $N_c$와 $\Delta K_i/\Delta K_c$ 또는 $a_i/a_c$의 관계를 도면에 그리면 보통의 피로설계에 있어서의 SN 곡선과 같은 종류의 곡선을 얻을 수 있고 설계에 사용할 수 있다.[13] 즉 수압시험이나 비파괴시험에 의하여 존재할 수 있는 크랙의 최대 등가치수를 알고 있으면 피로수명 $N_c$의 최소값을 추정할 수 있게 되고 이것과 비교하여 사용기간중 또는 검사간격중에

예상되는 하중 반복회수가 충분히 작게 되도록 설계하면 된다. 또는 반대로 필요한 비파괴검사의 검출 능력, 결함의 허용치수, 소요되는 검사간격 등을 결정할 수 있다.

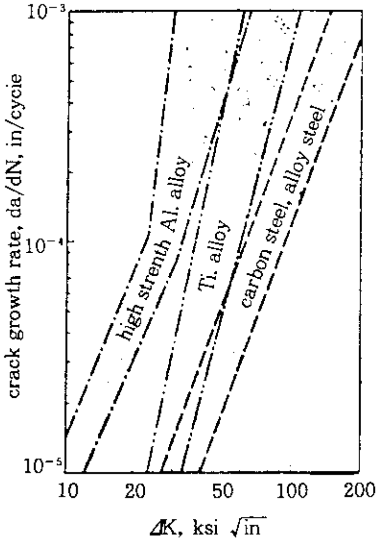



그림 3.6 금속별 피로크랙성장율

그림 3.6은 각종 금속 재료에 대하여 측정된 da/dN의 자료의 분포하는 범위를 나타낸 것이다.[14]

식 (3.3)의 파라메터 C 및 n은 대폭적으로 서로 틀리나 자료가 존재하는 범위는 대략 같은 띠상 영역속에 모여 있다.

이들 3종의 자료를 가로축을 $\Delta K/E$로 하여서 그리면 서로가 대충 겹쳐진다. 이상스럽게도 피로크랙의 진전속도는 재료에 따라서 그다지 변하지 않으며 예를 들면 보통의 탄소강이거나 고장력강이거나 그다지 차이가 없다. 이 경향은 그림 3.6에서도 추측이 된다.

파괴인성이 높은 재료를 선택하여도 $a_c$ 또는 $\Delta K_c$는 $N_c$에 그다지 영향을 주지

않는 것이 된다. 이런 점에서 구조물의 안전성을 높이기 위해서는 $N_c$에 관한 한 $a_i$를 작게 하는 것이 가장 중요하며 이를 위하여 특히 비파괴시험 기술의 향상과 $a_i$가 작게 되는 용접법 등 기타의 제조가공법의 발달이 긴요하다. 또 구조물의 신뢰성 해석에 있어서는 신뢰도에 가장 큰 영향을 끼치는 것이 $a_i$의 확률분포이다.[15]

## 3.4 독일의 관련연구 현황

1994. 6.7부터 6.17까지 11일 동안 독일 출장중 재료연구와 관련하여는 연구소와 발전소 한군데씩을 방문하였다.

먼저 방문한 연구소의 이름은 Forschungszentrum, Jülich(유리히에 있는 연구센터)였다. '89년 이전에는 Kernforschungsanlage(略字 KFA), Jülich 즉 유리히의 핵연구소라 하였기 때문에 현재에도 KFA, Jülich라고도 하였다.

독일의 핵연구소로는 Kernforschungszentrum, Karlsruhe(略字 KFK) 즉 칼스루헤의 핵연구센터가 더 있으며 이들 연구소와 관련있는 재료분야 연구소는 IWE1(Institut für Werkstoffe der Energietechnik Ⅰ; 에너지 시스템에서의 소재 연구소)와 IMF2(Institut für Materialforschung Ⅱ; 재료연구소)가 있다. 동서 독일의 통일로 인한 예산 감소와 핵 확산 금지와 관련된 국제적인 조류에 의해 감축된 KFA, Jülich의 직원은 35여명의 박사급 연구원들을 포함하여 160여명이었다.

그러나 대학 교수 70여명이 이 연구소와 긴밀한 공동 연구 체제를 유지하고 있고 이 교수들이 지도하고 있는 대학원생 400여명이 이 연구소에서 연구조원으로 근무하고 있었다.

방문한 실험실은 만능재료시험기인 인스트론(INSTRON)을 10여대 구비하고 있으면서 타 연구실에서 의뢰하는 각종 재료 실험을 수행하고 있었다.

이 실험실의 협조로 완료된 연구로는

- Bauteilsicherheit bei hohen Temperaturen

즉 고온에서의 Bauteil 안전성 연구인데 여기서 Bauteil은 통(筒), 관(管), 단접(鍛接)해서 이은 자리 부분, 짧은 접합 부분 등을 말한다. 고온 Bauteil에 가해지는 부하(負荷)의 시간, 방법, 종류 등에 대한 영향, 축 하중에서의 크리프(Creep), 크리프 피로 등에 관한 연구이다.

또 다른 연구로는

- Bruchmechanische Untersuchungen an metallischen Werkstoffen und Bauteilen

  즉 금속 소재와 Bauteil에서의 기계적인 파괴 연구,

  이 파괴 연구와 관련하여 KFA에서는 아래와 같은 연구가 수행되었다.

  ○ ASTM-E399에 대한 임계응력확대계수 $K_{IC}$ 결정

  ○ ASTM-E813에 대한 J Integral 실험

  ○ ASTM-E647에 대한 피로 균열 성장 연구

  ○ 높은 온도에서의 Creep 균열 성장 연구

  ○ Creep 균열 성장과 피로 균열 성장 사이의 상호 작용에 관한 연구

또 다른 연구로는

- Mechanische und thermo-mechanische Untersuchungen an Bauteilen

  즉 Bauteil에 관한 기계적인 연구와 열기계적인 연구,

  이 Bauteil 연구와 관련하여 지금까지 수행된 Bauteil 시험의 예는 다음과 같다.

  ○ 700℃까지의 온도에서 고온 합금된 균열있는 Pipe(직경 200mm, 길이 2000mm)의 Bending Test(Creep 균열 성장, 피로 균열 성장)

  ○ 강화 탄소로 된 Pipe(직경 400mm)의 파열 압력 연구

  ○ SiSiC Ceramic으로 된 Pipe(직경 40mm, 길이 1600mm)의 Bending Test(정적, 주기적 시험)

  ○ 1000℃까지의 온도에서 외부 압력하에서 고온합금으로 만든 Pipe의 성

형시간 측정

또 다른 연구로는

- Ein Rechenprogramm zur Phasenbestimmung in Ni-Basislegierungen

  즉 니켈 합금에서의 相 측정을 위한 계산 프로그램에 관한 연구

- Power Plant 고온 재료의 개발 및 평가에 관한 연구

이 연구는 Power Plant 고온 재료의 현미경 조직과 기계적 성질의 상호 영향성을 분석하고, 금속학적 논증을 이용한 재료의 구성 방정식을 세우며, 기계적인 거동을 분석하고 실험적인 검증을 거쳐 설계 기준과 안전율을 구하였다.

균열(직경 100mm× 10mm)이 간 Pipe에 내압과 인장 하중이 걸릴 때 내압 하중하에서 매우 높은 시험 온도 범위안에서 Pipe는 부풀게 되고, 많은 Creep 균열의 생성으로 압력의 균형이 이루어 질 때까지 부풀림은 계속된다.

Creep 균열로 인한 고장 발생은 단축 응력 성분의 관계에 의존한다. Pipe Test는 내압과 인장과의 여러가지 관계 시험에 따라 결과가 달라진다.

방문한 다른 한 곳은 Weisweiler에 있는 증기 가스 - 탈 유황 설계로 된 발전소였다. 대형 난방 장치 법령(GFAVO)의 효력 발생 뒤에 즉시 RWE는 증기 가스 탈 유황 설계 장치(REA)에 갈탄 덩어리(모두 9300MW의 33개 덩어리)를 추후 공급하기로 결정하였다.

Weisweiler 발전소에서는 모두 2100MW의 6개 덩어리로부터 증기 가스는 유황을 빼게 된다. 100MW 씩 2개 덩어리는 늦어도 1993년까지는 사용되지 않았다.

RWE는 갈탄 發電에 대하여 지금까지 아직 운전 경험이 없는 데도 불구하고 석회 세척 방식을 결정했다. 석회 세척 방식을 선택한 이유는 기술적으로 발전된 방식이며 석탄 發電에 있어서는 시험을 마친 방식이라서 그러하며 또한 독일내 판매자가 많기 때문이다.

이 방식의 원리는 간단한데, 증기 가스에 석회유를 튀기게 되며 $SO_2$와 석회로부터 칼슘 아황산염으로 변환이 일어 나고, 산소와의 산화로 인하여 칼슘 황산염

이 생기는 원리이다.

이 발전소에서는 TÜV에서 파견된 검사원들이 재료의 수명 예측 기법을 사용하고 있었으며 그림 3.7은 압력, 양정, 하중 등을 기록한 선도를, 또한 그림 3.8은 검사 부위를 나타낸다.

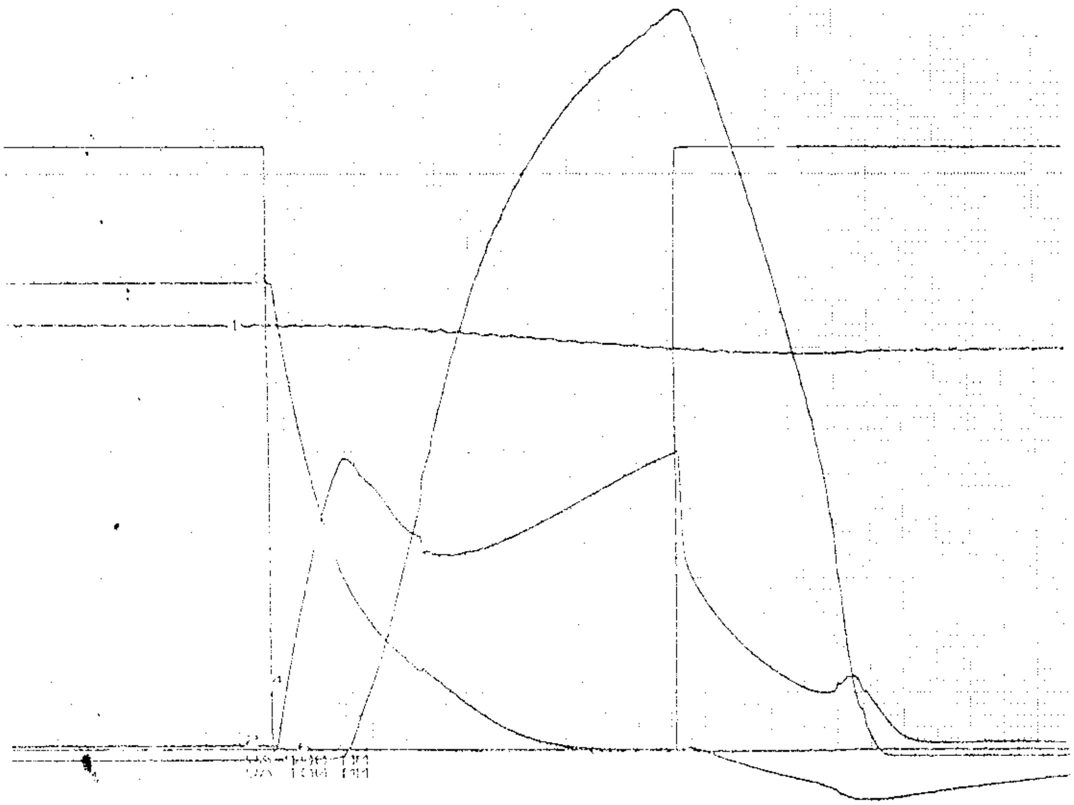


그림 3.7 수명 예측에 쓰이는 압력 양정 하중 선도

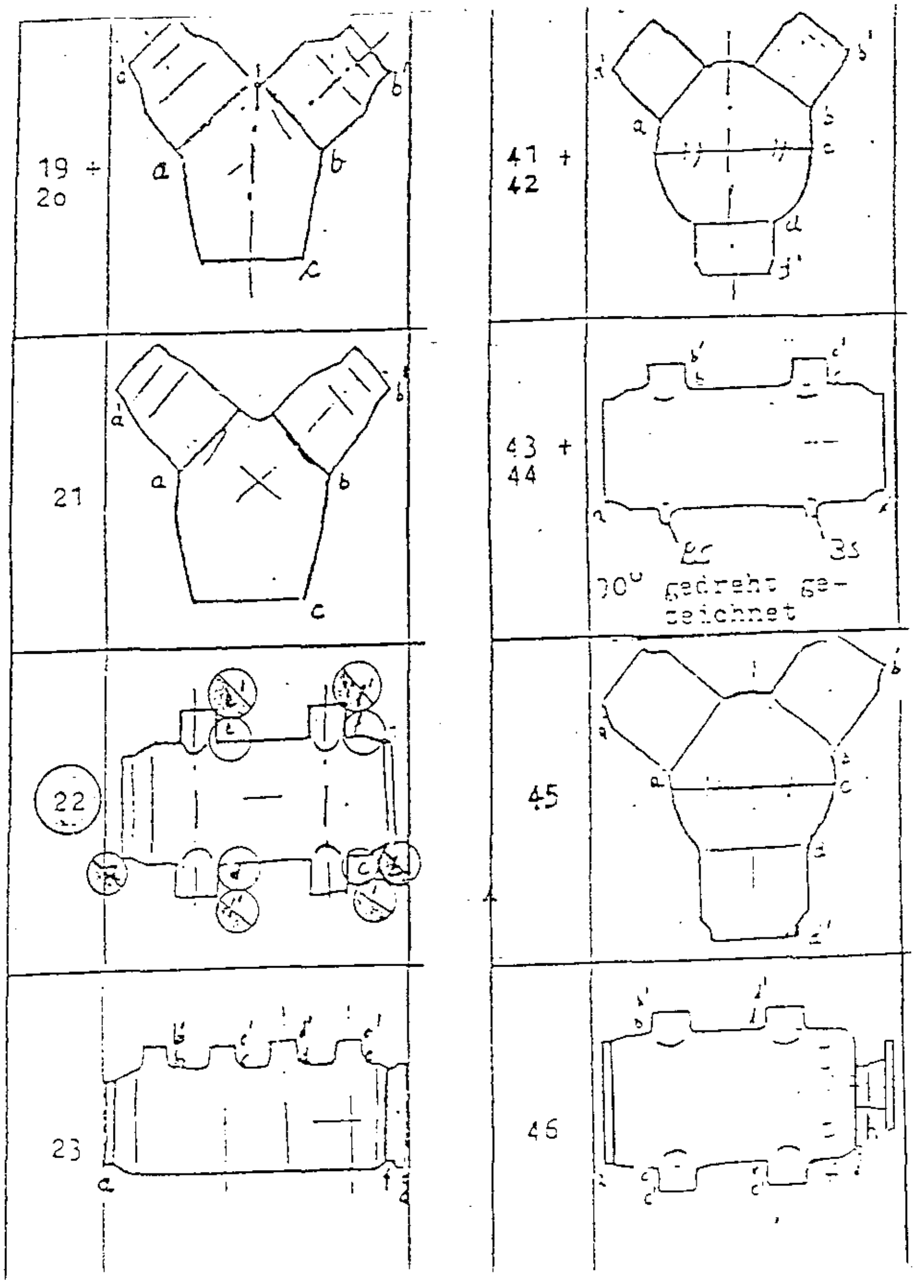



그림 3.8 수명 예측 기법의 사용시 고온재료의 검사 부위

## 3.5 재료의 잔여수명예측

발전소와 같은 장치산업은 내구수명이 길므로 사용중에 발생하는 열화는 필연적인 것이며, 특히 고온, 고압의 부식환경하에서의 설비는 손상이 심하므로 이들 설비의 경년열화의 실체를 충분히 안다는 것은 경년열화의 대책을 수립하는 데 매우 중요하다.

그림 3.9는 고온설비의 경년열화 문제와 배경을 간단히 나타낸 것이다.

### 3.5.1 재료의 경년열화

기계 및 구조물의 열화는 성능 저하와 신뢰성 저하로 대별되며 열화란 廣義로 그림 6.14에서와 같이 장기 사용된 설비 또는 열처리된 설비의 재료가 금속 내부 구조의 변화로 각종 성질이 변하는 현상을 가르키지만 최근에는 사용환경에 따라 그림 3.10과 같이 기계적 성질이 저하하여 손상이 발생하는 것을 의미하기도 한다.

따라서 재료의 열화 즉, 기계적 성질의 변화를 알기 위해서는 전기 화학적 성질의 변화, 전기 자기적 성질의 변화를 비파괴적으로 평가하는 것이 매우 중요하다.

기계장치에서 발생하는 경년열화를 살펴보면, 고온 고압하에서 사용되는 장치는 고온 Creep, 피로 Creep - 피로 및 외부 유입물에 의한 마모, 부식(Corrosion) 등의 손상을 받으므로 그 손상 종류는 사용조건과 재질에 따라 다양하게 발생한다.

따라서 열화는 어떠한 사용조건에서도 발생하는 것이 불가피하므로 이에 대응할 대책은

(1) 사용 조건하에서의 재료를 열화시키는 현상의 규명

(2) 열화 진행 정도의 파악

(3) 열화된 재료의 사용 성능 판단과 사용 가부 결정 등이 중요한 사항이다.

표 3.1은 고온 고압하에서 사용되는 터빈의 각 부품에서 발생하는 경년열화 현상과 수명 소비 요인을 정리한 것이다.

## 3.5.2 경년열화 진단기술

경년열화 진단기술은 간접 평가법인 해석적 평가, 직접 평가법인 비파괴적 평가와 파괴적 평가로 대별된다.

이하에서 각 평가방법에 대하여 살펴 본다.(부록 참조)

(1) 표면복제법

고온 설비에서 많이 발생되는 크리프 손상을 비파괴적으로 검출하는 방법은 물리적 성질의 변화에 착안한 방법과 금속조직학적 변화에 착안한 방법으로 나눌 수 있다. 이 중에서 금속조직학적 방법은 손상을 직접 검출할 수 있어서 실용성이 크고, 높은 정확도의 수명 평가가 가능하기 때문에 많은 관심이 집중되어 왔다.

그러나 대부분의 경우에는 설비로부터의 시험편 채취가 제약을 받기 때문에 이를 해결하기 위한 휴대용 연마기와 현미경이 사용되고 있기는 하지만 해석 능력이 떨어지고, 경우에 따라서는 설비구조상 조직의 직접 관찰이 불가능한 경우도 생긴다는 단점이 있다.

이와 같은 이유 때문에 금속 조직을 다른 물질에 복제(Replica)시켜 그 물질을 실험실로 가져와 물질에 나타난 조직을 간접적으로 관찰, 분석하는 표면복제법을 많이 사용하고 있다.

표면복제법으로 얻은 미세조직을 잔여수명비가 판명된 재료를 기준으로 제작된 표준 조직이나 정량치와 비교하여 손상평가와 잔여수명을 예측하게 된다. 표면복제법은 Replica Film을 관찰 대상이 되는 표면에 피복시킨 후 그 막을 떼어내어 금속현미경이나 전자현미경으로 관찰하는 것이다.

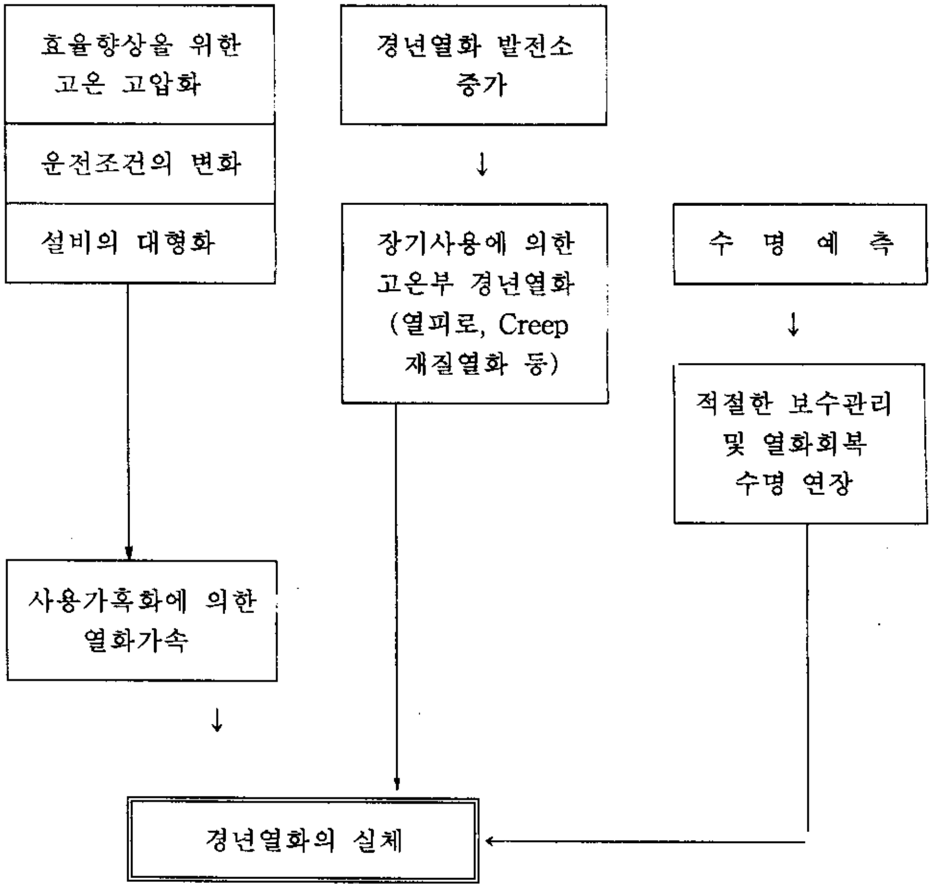



그림 3.9 고온부재 경년열화 문제와 배경

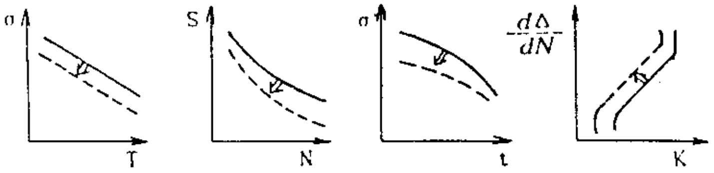



그림 3.10 재료의 경년열화 수정

표 3.1 터빈 부품의 경년열화

| 부품 | 부위 | 경년열화 현상 | | | | 내재결함 | 수명소비요인 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 피로 | 크리프 | 연화 | 취화 | | |
| 고, 중압 로타 | Disc Root | ◎ | | ◎ | | | 피로 |
| | Bore Hole | | | | ◎ | ◎ | 피로·크리프균열 진전 및 취성파괴 |
| | Blade Dovetail | | 일부로타 절결약화 | | | | 크리프 |
| 중앙 토타 | Bore Hole | | | | | ◎ | 피로·균열 진전 및 취성파괴 |
| 고압내부 차실 | 내주면 | | | | ◎ | ◎ | 피로·크리프 |
| | 탭 나사부 | | | | | | 크리프 |
| Nozzle Block | Vane 취부부 | ◎ | | ◎ | | | 피로·크리프 |
| 고중압 동익 | Tenon 및 익근부 | | | ◎ | | | 크리프 |
| 주요 밸브 | 본체 | | | ◎ | | | 피로·크리프 |
| | 탭 나사부 | | ◎ | | | | 크리프 |
| 고온 볼트 | 나사 | | ◎ | ◎ | ◎ | | 피로·크리프 |

- Replica 채취법

- 조직대비법

크리프의 정성적 평가법인 독일의 조직대비법은 손상 등급을 기공과 균열의 상태에 따라 분류하여 각 등급에 대응하는 정기점검 및 보수관리를 행하고 있다. 일본 Mitsubishi에서는 이를 개선하여 금속조직학적 크리프 수명 평가법(MLAS: Mitsubishi Metallurgical Life Assessment)을 개발하여 Cr-Mo 저합금강 HAZ에서의 크리프 손상 진전과 조직 변화의 관계를 크리프 시험 중단재와 실기의 장시간 사용재를 사용조사하여 그림 3.11과 같이 손상인자를 구분하였다.

- 석출물 검사법

(가) 저합금강의 미세조직 변화

2.25 Cr-1Mo강을 템퍼링(Tempering)하거나 고온에서 장시간 사용하면 다음과

같은 탄화물의 석출이 일어난다.

o 베이나이트 :

$$\begin{array}{ccccccc} & & & & M_7C_3 & \rightarrow & M_6C \\ & & & & \uparrow & & \uparrow \\ \varepsilon\text{-탄화물} & + & M_3C & \rightarrow & M_3C + M_2C & \rightarrow & M_{23}C_6 \end{array}$$

o 페라이트 : $M_2C \rightarrow M_6C$

(나) 석출물에 의한 수명평가

2.25Cr - 1Mo강 용접부의 탄화물은 초기에는 $M_{23}C_6$ + $M_7C_3$ 이던 것이 장시간 사용하면 모두 $M_6C$ 가 되는데 수명 소비와 관계있는 탄화물의 변화로는 $M_6C$ 의 석출율과 석출물의 구상화율이 있으며, 이들은 각각 다음과 같이 정의된다.

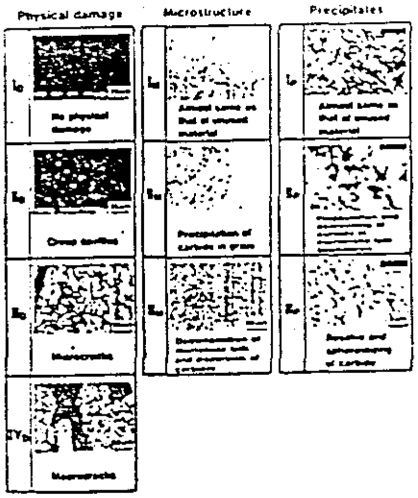



그림 3.11 Cr-Mo강 열영향부의 손상인자 구분

$$M_6C\ 석출율 = \frac{M_6C의\ 수}{전탄화물의\ 수} \times 100\ (\%) \tag{3.14}$$

$$석출물의\ 구상화율 = \frac{석출물의\ 최단축}{석출물의\ 최장축} \times 100\ (\%) \tag{3.15}$$

이를 위하여 Mitsubishi 중공업에서는 초고속 광역 Multi Analyzer(CMA)를 개발하여 원소농도 분포를 Spectrum으로 표시해 이를 해석함으로서 수명 평가에 사용하였다. 즉, 농도 Spectrum의 Peak를 Gauss 분포식으로 근사시켜 계수 $K_1$(Peak 높이) 및 $K_2$(분산도)를 구함으로써 조직을 정량화하였다.

(2) 경도법

고온 설비의 안전성이나 경제적인 운용을 위해서는 설비 구성 재료의 손상을 검출하여 설비의 잔여수명을 평가하는 것이 매우 중요하다. 잔여수명 평가법중에서 비파괴적 방법은 실기를 크게 훼손시키지 않고 손상 사태를 직접적으로 파악할 수 있다는 장점이 있으며, 비교적 손쉽게 단시간 내에 많은 위치를 진단할 수 있고 정기적인 진단도 가능하기 때문에 많은 관심이 집중되고 있다. 비파괴적 손상 검출 방법중에서 경도법은 시험이 간편하고 실용화 가능성이 가장 높은 방법 중의 하나로 알려져 있다.

따라서 현장에서 간단히 측정할 수 있는 방법으로서 경년열화 정도를 측정하는 방법으로서는 대표적인 비파괴 수법이라 할 수 있다. 이 방법은 부재의 현상태를 정성적으로 평가하기에는 가장 적합한 방법으로서 터빈의 재료로 많이 사용되고 있는 Cr-Mo-V강의 수명예측법으로 적용시킨 보고가 있다.[18]

여기서는 경도측정을 이용하여 실기 사용온도 및 시간이 명확한 설비에 대한 크리프 수명예측법이 가능하다.

- 경도 측정을 이용한 재질열화 측정

경도를 알면 재료의 다른 성질, 예를 들면 강도, 내마모성, 변형저항 등을 알 수 있기 때문에 경도값 자체를 알기 위해서, 뿐만 아니라 그 밖의 다른 성질을 추측하기 위해서 경도 시험을 한다.

경도 측정을 하여 잔여수명을 예측하는 경우 경도값 자체를 이용하거나 경년열화에 따른 경도의 감소량 혹은 경도비를 주로 이용한다. 경도 측정을 이용한 고온 사용 설비의 크리프 수명 예측에는 다음과 같은 방법들이 사용되고 있다.

(가) 경도 감소량을 이용하는 경우

(나) 경도 값을 이용하는 경우

(다) 경도비를 이용하는 경우

2.25Cr-1Mo강과 Cr-Mo-V강의 시간·온도·응력변수 G′는 다음과 같다.

$$G' = G + 0.000612(\sigma - 59) \qquad (3.16\ a)$$

$$G' = G + 0.000194(\sigma - 103) \qquad (3.16\ b)$$

종합하여 살펴보면 아래와 같다.

(가) 응력과 LMP(Larson-Miller-Parameter)와의 관계

앞에서 설명하였듯이 현장에서는 휴대용 경도시험기를 사용하기 때문에 측정한 경도 값을 기존의 연화곡선(Softening Curve)에 적용시켜 수명 예측을 하여야 하며 이를 위해서는 그 재료에 대한 크리프 파단 시험 결과를 알고 있어야 한다.

그러나 크리프 파단 시험에는 아주 많은 시간이 필요할 뿐만 아니라 열에 따라서 결과의 흐트러짐도 매우 크기 때문에 많은 결과를 모아 통계 처리한 결과를 사용할 수 밖에 없으므로 일본 금속재료기술연구소(NRIM)에서 시험한 크리프 시험결과(NRIM Creep Data Sheet)를 이용하는 것이 좋다.[42]

(나) 2.25Cr-1Mo강의 경도시험

비커스 경도 시험에는 5kgf의 하중을 사용하였는데 이보다 낮은 하중을 사용할 경우 흐트러짐이 상당히 크게 나타날 수 있기 때문이다.

2.25Cr-1Mo강 원재의 비커스 경도 값은 Hv 150 정도이며, 각 시험 조건에서의 경도값을 이 값으로 표준화한 뒤, 이들을 식 (3.16a)로부터 구한 G′에 대하여 도시하여 그림 3.12에 나타내었다. 그림에서 점선으로 표시된 곡선은 2.25Cr-1Mo강에 대하여 Mitsubishi에서 구한 연화곡선이며 Cr-Mo강에서도 이 연화곡선과 식 (3.16a)를 이용하여 설비의 잔여수명을 추정할 수 있다.

(다) 1Cr-1Mo-0.25V강의 경도시험

1Cr-1Mo-0.25V강을 일반 사용 온도보다도 높고 뜨임 온도보다는 낮은 630℃의 온도에서 각각 227, 453, 682, 933, 1142, 1382, 1598 및 1820 시간 가속 열처리하여 고온 장기 사용재의 미세조직을 시뮬레이션한 예를 보인다. 준비된 시험편은 표면 다듬기를 한 뒤 5kgf로 비커스 경도를 측정한 것이다.

시험에 사용된 1Cr-1Mo-0.25V강 원재의 비커스 경도 값은 Hv 263.9 이었으며, 각 열처리 조건에서의 경도 값을 이 값으로 표준화한 뒤 식 (3.16b)로부터 구한 G′에 대하여 도시하여 그림 3.13에 나타내었다. 그림에서 곡선은 1Cr-1Mo-0.25V강에 대하여 Mitsubishi에서 구한 연화곡선이다.

(3) 크리프 가속시험

- 크리프 가속시험에 의한 열화상태 평가

- 크리프 파단 가속시험

(4) 전기저항법

(5) 초음파법

(6) 전기화학적 방법

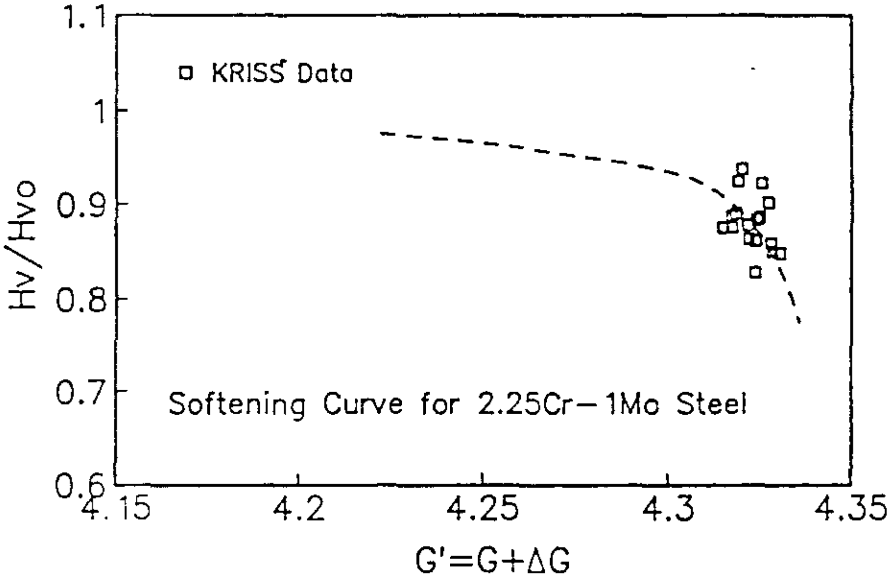



그림 3.12 크리프파단 시험재 및 중단시험재의 G변수에 대한 경도비의 변화 (2.25Cr-1Mo강)

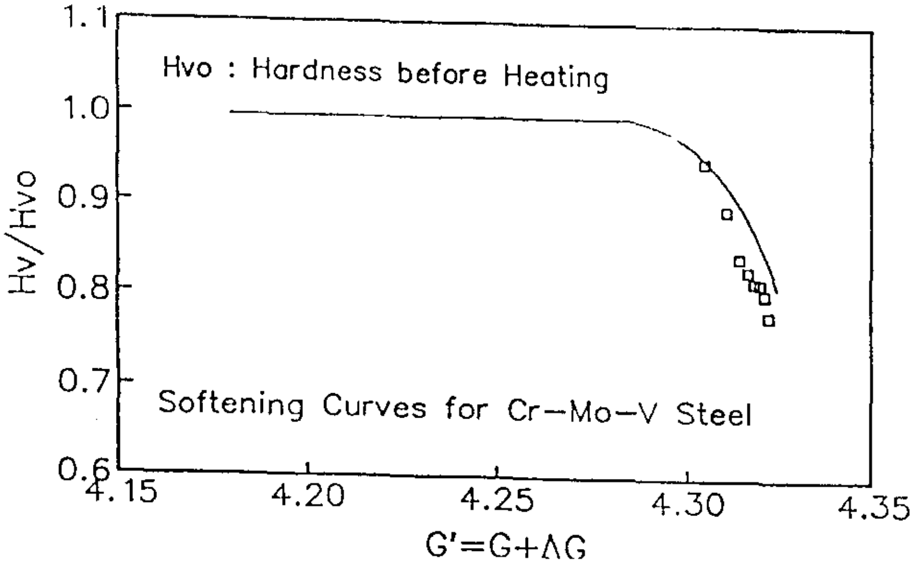



그림 3.13 가속열처리재의 G' 변수에 대한 경도비의 변화(Cr-Mo-V강)

# 4. 맺음말

발전설비를 중심으로 고온부재의 잔존수명 진단을 위한 경년열화도의 측정에 필요한 관련된 연구 현황에 대하여 좁은 범위안에서 개략적으로 기술하였다.

국내의 산업체에서도 현재 이에 관련된 문제점을 제시하고 있고 앞으로 이러한 문제의 발생은 그 빈도와 규모면에서 증가하게 될 것이다.

이에 대비하여 기존 방법의 기술적 터득과 데이터의 축적 그리고 측정정도를 향상시키기 위한 새로운 측정 방법들의 개발이 시급한 실정이다.

정확한 진단과 수명의 예측을 위해선 본 글에서 설명된 각종 측정법들과 짧은 식견으로 여기에 설명되지 못한 금속학적 고찰을 가미한 수 많은 측정법들을 종합적으로 행하여야 할 필요가 있다는 것은 말할 나위도 없다.

특히 경도법에 있어서 현장에서는 휴대용 시험기를 사용하여야 하나 수명평가에는 비커스 경도값을 사용하고 있기 때문에 이들 경도 환산에 대한 데이타 베이스 확충이 시급한 실정이다.

또한 실기 사용부재의 입수, 나름대로의 정보 교환 등 연구 초기 단계에서 부딪치는 수 많은 문제점들을 원활하게 해결하기 위해서는 각 전문분야의 학술적 교류와 더불어 산학연의 공동연구가 절실히 요구된다.

# 5. 참고 자료


[1} 노동부, 산업재해통계, 1992

[2] 김 건영, 보일러의 파손 사례, 대한용접학회 춘계학술대회, 특별강연, 1990

[3] Kitagawa, M., 일본 용접학회지, 제59권 3호 p.190, 1990

[4] 일본 화력발전기술협회, 사업용 화력발전소의 정기검사지침, 1987

[5] Narayanann, T.V. et al., Life Assessment and Extension of Power Plant Components-1989, ASME/JSME Joint Conf. on PVP, Hawaii, 1989

[6] Nitta, 압력기술, 제26권 6호 p.8, 1988

[7] Takahashi, H. and Shoji, T., 화력원자력발전, 제37권, 8호 p.64, 1986

[8] 김 건영, 국내 화력 발전소 보일러 및 압력용기의 현안 과제 및 향후 대책, 대한기계학회지, 제33권 제8호, 1993

[9] Paris, P.c. and Erdogan, F., Trans.ASME, ser.D, 85, p.528, 1963

[10] Yokobori, T. et al., Preprint of JSME, No.750-1, p.31, 1975

[11] Forman, R.G. et al., Trans. ASME, J Basic Eng., 89, D, p.459, 1967

[12] Johnson, H.H. and Paris, P.c., Eng. Fract. Mech., 1, p.3, 1968

[13] Tiffany, C.F., and Masters, J.n., ASTM STP 381, p.249, 1965

[14] Crooker, T.W.,NRL Report, No.7347, 1972

[15] Okamura, H., Watanabe, K. and Naito, Y., Reliabity Approach in Structural Engineering, Maruzen, p.243, 1975

[16] 일본 과학기술청, 구조재료의 신뢰성평가에 관한 보고서, 1987

[17] Cane, B.J. et al., Pro. ASM Seminar on Flow and Fracture at Elevated Temp. p.279, 1983

[18] Kondo, 미쓰비시 중공업 기보, 21, p.389, 1984

[19] Aoki, et al., 화력원자력 발전, 36, p.1068, 1985

[20] Kihara, et al., 재료, 33, p.1103, 1984

[21] Motomatsu, et al., 비파괴검사, 제37권 7호, p.587, 1989

[22] Koban, et al., 일본기계학회 제103회 강습회 교재, p.33, 1989

[23] Kishimoto, 재료, 제39권 442호, p.211, 1990

[24] Shoji, T., JSME Vol.94, No.866, p.52, 1991

[25] 정 회돈, 고온설비의 경년열화와 측정법, 대한기계학회지, 제31권 3호, p.251, 1991

[26] F. Schubert etc, Bauteilsicherheit bei hohen Temperaturen, Kernforschungsanlage Jülich, 1986

[27] Technologie - Transfer - Büro, Bruchmechanische Untersuchungen an metallischen Werkstoffen und Bauteilen, Forschungszentrum Jülich

[28] Technologie - Transfer - Büro, Mechanische und thermo - mechanische Untersuchungen an Bauteilen, Forschungszentrum Jülich

[29] Technologie - Transfer - Büro, PHASCALC, Forschungszentrum Jülich

[30] G. Drucks, Boiler Design in accordance with Technical Codes and Standards, TÜV Rheinland, 1993

[31] TRD 300, Calculation of boiler strength, 1975

[32] TRD 301, Cylindrical shells under internal pressure, 1979

[33] F. J. Adamsky etc., Rißbildungen an kessel internen Komponenten bei langen Betriebszeiten

[34] M. Henrichs etc., Zerstörungsfreie Prüfung an Kriechbeanspruchten Bauteilen - Gegenwärtiger Stand und Zukunftsaussichten -

[35] Kraftwerk Weisweiler Brochure

[36] F. W. Hübuer, Bewertung von Lebensdaueraussagen an kriech - und temperaturwechselbeanspruchten Bauteilen, VGB Kraftwerkstechnik 57 Heft 9, 1977

[37] F. W. Hübner, Einflußgrößen bei Berechnung der Erschöpfung unter einer Zeitstandbeanspruchung, VGB Kraftwerkstechnik 61 Heft 3, 1981

[38] F. W. Hübner, Stand der Technik bei Lebensdauerbetrachtungen, Vortrag an der Tüv Akademie Köln, 1986

[39] 문 한규외, 한국표준연구소, KSRI-ET-66, 1985

[40] 김 상철, 파괴역학, p.120, 1985

[41] 김 재철외, 경도측정을 이용한 고온사용설비의 잔여수명예측, 대한기계학회지, 제32권 제14호, 1992

[42] 김 건영, 경년열화 및 수명평가, 대한기계학회, 피로 및 파괴역학을 고려한 강도설계 기술강연회, p.238, 1983

# 부록: 고온압력설비의 잔여수명 측정지침

재료의 잔여 수명 예측은 그 재료의 경년 열화 진단을 통해 이루어진다.

고온기기의 손상은 기계적열화와 조직적열화로 나누어지며 열화 종류에 따른 그의 측정 및 평가법이 달라진다.

표 6.1에 발전설비중 보일러와 터빈 부재에서 나타나는 열화 손상의 종류 및 영향 그리고 현재 유용하다고 여겨지는 측정방법들이 열거되어 있다.[16](이하 참고문헌의 번호는 본문에 있는 참고문헌의 번호를 각각 나타냄.)

표 6.1 열화도의 측정법

| 손상의 종류 | | 영 향 | 현장 계측 | 실험실 계측 |
|---|---|---|---|---|
| 조 직 변 화 | 미세조직 변화 | 강도저하 | 레프리카법, 전기저항, 초음파법, 열 기전력, 경도측정 | 광학, 전자현미경, X선 회절 |
| | 불순물 입계 편석 입계 부근의 변화 | 취 화, 강도저하 | 레프리카법 | 광학, 전자현미경, 인장시험 |
| 크리프 | 크리프 공동 | 파 괴 | 레프리카 | 현미경, 밀도 |
| | 표면 크랙 | 파 괴 | 육안검사, 과전류 측정, 레프리카법 | 현미경 관찰, 크리프 시험 |
| | 크리프 변형 | 변 형 | 외경측정, 길이변화 측정 | 크리프 시험 |

(주: 고온 설비에서는 조직변화, 크리프에 의한 열화 이외에도 부식이나 산화에 의한 열화도 있으나 본 설명의 범위상 생략 하기로 한다.)

이 표를 살펴보면 측정법은 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

1. 표면복제법
2. 경도측정법
3. 크리프 가속시험
4. 전기저항법

5. 초음파법

6. 전기화학적 방법

이하에서 각 평가방법에 대하여 살펴본다.

# 1. 표면복제법

- 정의: Replica Film을 관찰 대상이 되는 표면에 피복시킨 후 그 막을 떼어 내어 금속현미경이나 전자현미경으로 조직을 관찰하여 그 재료의 경년열화 진단에 이용
- Replica의 채취 및 관찰 요령:
  - ISO 3057(Non-Destructive Testing-Metallographic Replica Techniques of Surface Examination, 1974년 제정)
  - ASTM ES 12(1987년 제정)
  - ASTM E 1351(Standard Practics for Production and Evaluation of Field Metallographic Replica, 1990년 제정)

## 1.1 Replica 채취법

- Replica 막(금속조직 검사용):
  - Acetylcellulose Film과 Paraffine을 조합한 것
  - 0.035mm와 0.08mm 두께의 두 종류
  - Replica 채취면의 요철 정도와 온도 등의 조건에 따라 구별되어 사용
- 용제: Methyl Acetate(시약 1급 규격 이상)를 사용
- Replication 절차: 그림 6.1 참조
  - Grinding, Polishing, Etching, Replication 등의 여러가지 절차를 거쳐서

하나의 Replica가 채취됨

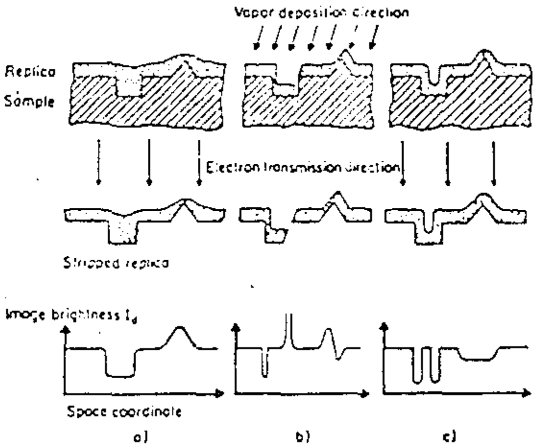



그림 6.1a 1단계 Replica법

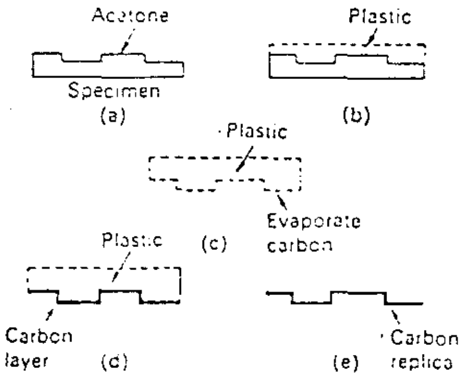



그림 6.1b 2단계 Replica법

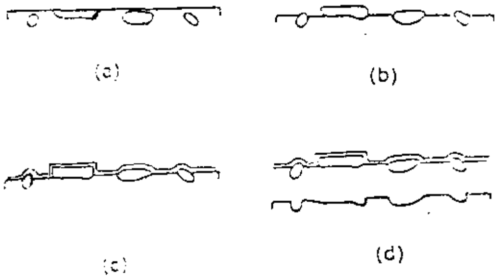



그림 6.1c Replica 채취 절차

- 레프리카법의 종류: 두가지(그림 6.2 참조)

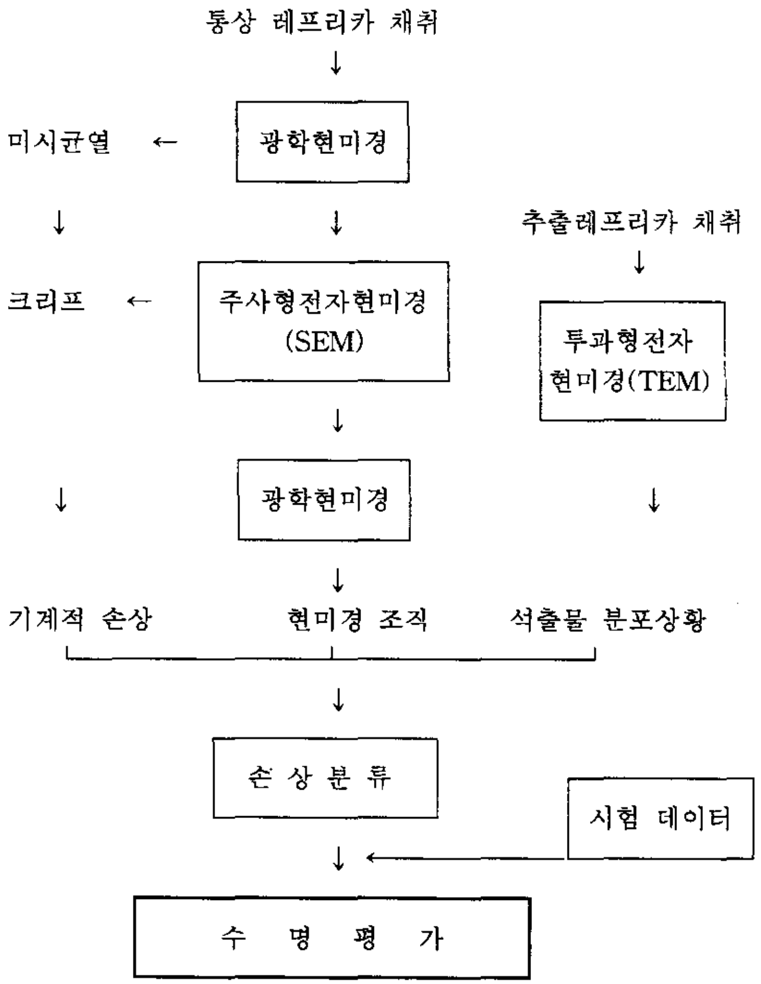



그림 6.2 레프리카법의 종류와 수명평가에의 응용

· 통상 레프리카법: 균열과 크리프 공동(Cavity)을 직접 관찰하기 위함

. 손상 파라메터: A-파라메터법과 면적률법

. A-파라메터법: 영국과 미국 양국에서 제안되어 현재 실기에서 응용되고 있음

. A-파라메터법 정의: 그림 6.3(a) 참조

. A-파라메터와 크리프 손상도와의 관계: 그림 6.3(b) 참조

. 면적률법: 공동이나 특정의 석출상의 면적비를 나타낸 것(스텐리스강 에서의 시그마상의 면적률과 크리프 손상도의 관계가 보고 되고 있음)

· 추출 레프리카법: 재료 내부의 석출물 분석을 행하기 위함

## 1.2 조직대비법

- 종합 손상 구분: 7단계(그림 6.4 참조), 손상인자와 크리프 파단시험 결과로 부터 구한 크리프 파단 수명 소비율을 대비시킴

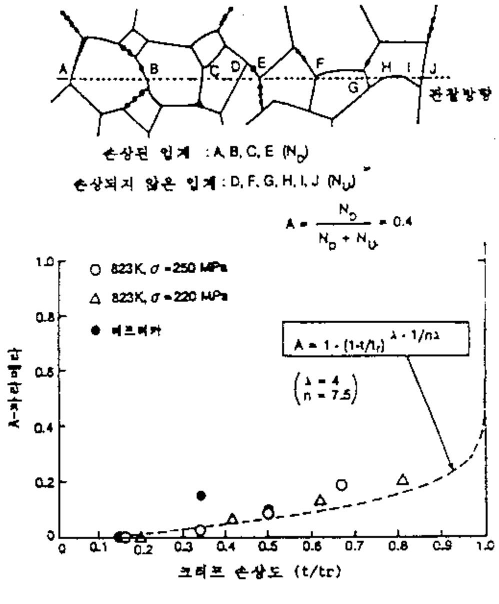


그림 6.3  A-파라메터의 정의와 응용 예[17]

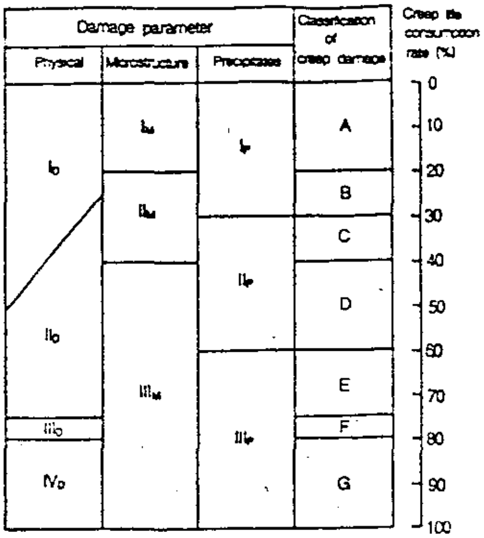



그림 6.4 손상구분과 크리프 파단수명 소비율과의 관계

- 실기에서 응용 예: 일본 Ishikawajima-Harima 중공업
  - 수명 진단부에서 채취한 Replica를 광학현미경으로 관찰하여, 미리 작성된 표준 조직과 비교한 후 조직이 가장 유사한 표준 조직의 TTP(시간-온도 Parameter)로부터 진단부의 수명 소비량을 구함

## 1.3 석출물 검사법

- 저합금강의 수명 평가에 사용됨
  - 이유: 고온에서 장시간 사용할 때 기공 발생 이전에도 탄화물의 크기, 분포, 조성 등의 미세조직의 변화가 선행되어 크리프에 대한 저항성을 감소시키기 때문

(1) 저합금강의 미세조직 변화

- 탄화물의 석출: 2.25 Cr-1Mo강을 템퍼링(Tempering)하거나 고온에서 장시간 사용할 때 일어남
  - 이유: 합금 원소 Cr, Mo, V은 모두 탄화물 안정화 원소로서 $M_{23}C_6$, $M_6C$, $M_2C$와 같은 복잡한 탄화물을 형성하므로 인함

(2) 석출물에 의한 수명평가

- 석출물간 거리: 단위면적 당의 수로부터 식 (6.1)을 이용하여 구함, 이 거리(λ)로는 최인접거리나 평균자유경로가 사용되는데 중심간 최인접거리($\lambda_{NA}$)가 가장 재현성이 좋음

$$(\lambda_{NA}) = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{N_A}\right)^{1/2} \qquad (6.1)$$

- 수명 소비율 추정: 탄화물의 소멸, 생성, 성장 및 조대화와 함께 기지와 석출물로의 배분율이 시간에 따라 변화하므로 이들 원소의 농도분포 변화를 정량화하여 추정(Cr과 Mo의 경우)
- Replica 채취 및 관찰:
  - 발전설비의 경년열화 정도를 파악하여 잔여수명을 예측하는데 있어 수명 평가를 위하여 다음의 두 가지 작업이 가능
  - 복제한 Replica가 실기 사용재의 미세조직을 얼마나 잘 나타내는지를 알기 위하여 실험실에서 SK3 강을 열처리 한 후 강의 미세조직과 복제한 Replica의 미세조직을 비교하여 그 복제 능력을 검정
  - 실기 사용재의 경년열화 손상 정도를 추정하기 위하여 손상 정도를 평가하는 데 필요한 기준 자료를 만듦. 수명 평가에 사용할 기준자료를 만들기 위하여 실험실에서 크리프 가속 시험을 하여, 적당한 소비 수명

에서 시험을 중단하여 미세조직을 채취하고 관찰함

- 2.25Cr-1Mo강의 경우는 문헌에 나와 있는 미세조직과 비교하여 이 방법의 유효성을 검증할 수 있음
- SUS 316 강과 Cr-Mo-0.25V강의 경우는 자료가 많지 않으므로 가속시험에서 얻은 미세조직을 기준 자료로 사용할 수 있음

# 2. 경도측정법

- 경도 측정을 이용한 재질열화 측정 방법임

## 2.1 경도 감소량을 이용하는 경우

- 정의: 손상재와 무부하 가열재와의 경도차 $\Delta Hv$를 구하여 경도 감소량과 크리프 손상과의 관계로부터 크리프 손상량을 추정하는 방법
- 경도차 $\Delta Hv$: 일정한 폭을 갖고 크리프 손상도의 증가에 따라 직선적으로 증가하는 좋은 상관 관계를 나타냄

## 2.2 경도 값을 이용하는 경우

- 잔여수명 예측: 크리프 파단시험 결과와 경도간에는 식 (6.2)와 같은 상관 관계가 있어 실기의 경도를 측정하면 경년열화 후의 크리프 파단시간을 알 수 있어 예측 가능(Cr-Mo-V강의 경우)

$$T(20 + \log t_r) = C(\sigma)Hv + D(\sigma) \qquad (6.2)$$

여기서 T: 절대온도, $t_r$: 크리프 파단시간, $C(\sigma)$와 $D(\sigma)$는 응력 $\sigma$만의 함수

- 실험치 이용 방법:

· 경도를 변수로 하여 크리프 파단 강도와 시간 - 온도 변수(Time Temperature Parameter)의 관계를 실험으로 구함(그림 6.5)

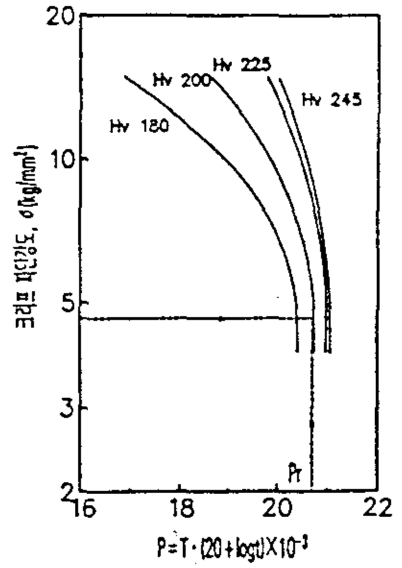



그림 6.5 크리프에 의한 경도값의 변화(Cr-Mo-V강)

· 이를 이용하여 실측 경도 및 사용 응력으로부터 이에 상응하는 Pr을 구하여 잔여수명($L_R$)을 구할 수 있음

· 단점: 이들 방법들은 사용 응력을 알고 있어야만 잔여수명을 예측할 수 있음

## 2.3 경도비를 이용하는 경우

- 경년열화에 의한 경도 저하:

· 단순 가열에 의한 영향과 응력에 의한 영향으로 구분할 수 있음

· 새로운 변수 G 정의(식 6.3)

· 응력이 부가되는 경우에는 그에 의한 영향으로 $\Delta G$ 만큼의 변화가 일어남

$$G = \log T + \log (20+\log t) \tag{6.3}$$

여기서 T : 절대온도, t : 시간

- G 변수를 이용한 잔여수명 예측 방법:

(사용 온도와 사용 시간을 알고 있는 경우)

· 1단계: 손상검출위치와 동은 · 저응력부($\sigma$ < 103 MPa)를 선정하여 경도 측정

· 2단계: 저응력부와 경도 측정 결과로부터 기존의 연화 곡선을 이용하여 원재의 경도($H_{vo}$)를 결정한 뒤(그림 6.6(A))

· 3단계: 평가대상부위의 경도비($H_v/H_{vo}$)로부터 G'을 구하여 $\Delta G$ 계산 (그림 6.6(B))

· 4단계: 기존의 $\Delta G=C_1(\sigma-C_2)$의 관계로부터 $\sigma$를 추정(그림 6.6(C))

· 5단계: $\sigma$와 $T(20 + \log t_r)$의 관계로부터 수명($t_r$)을 구할 수 있으므로 $t_r$과 사용시간($t_c$)으로부터 수명 소비율 $\phi_c$(즉 $t_c/t_r$)를 결정하면 잔여수명($L_R$)은 식 (6.4)으로부터 구할 수 있음(그림 6.6(D))

$$L_R = t_c\ (\phi_c^{-1} - 1) \tag{6.4}$$

- 이 방법: 재질연화와 크리프강도의 직접적인 관계를 이용

- 단점: 이러한 경도측정에 의한 방법은 측정 자체는 매우 용이하나 측정 데이터를 이용하기 위한 평가대상 부재별의 데이터 베이스가 필요하다는 어려움이 있음

# 3. 크리프 가속시험

- 크리프 파단 시험: 크리프 조건하의 재료의 열화상태를 평가하는 매우 일반적인 방법중의 하나
- 수명평가방법:
  - 두께가 얇은 부재의 경우(튜브, 파이프): 실기 사용 부재에서 시험편을 채취한 후 크리프 파단 시험을 통하여 소비된 크리프 수명을 직접 평가할 수 있음
  - 두께가 두꺼운 부재의 경우(터빈 로터 등): 소비 수명과 잔여수명을 예측하기 위하여 균열 성장(Crack Growth)에 대한 분석도 병행되어야 함

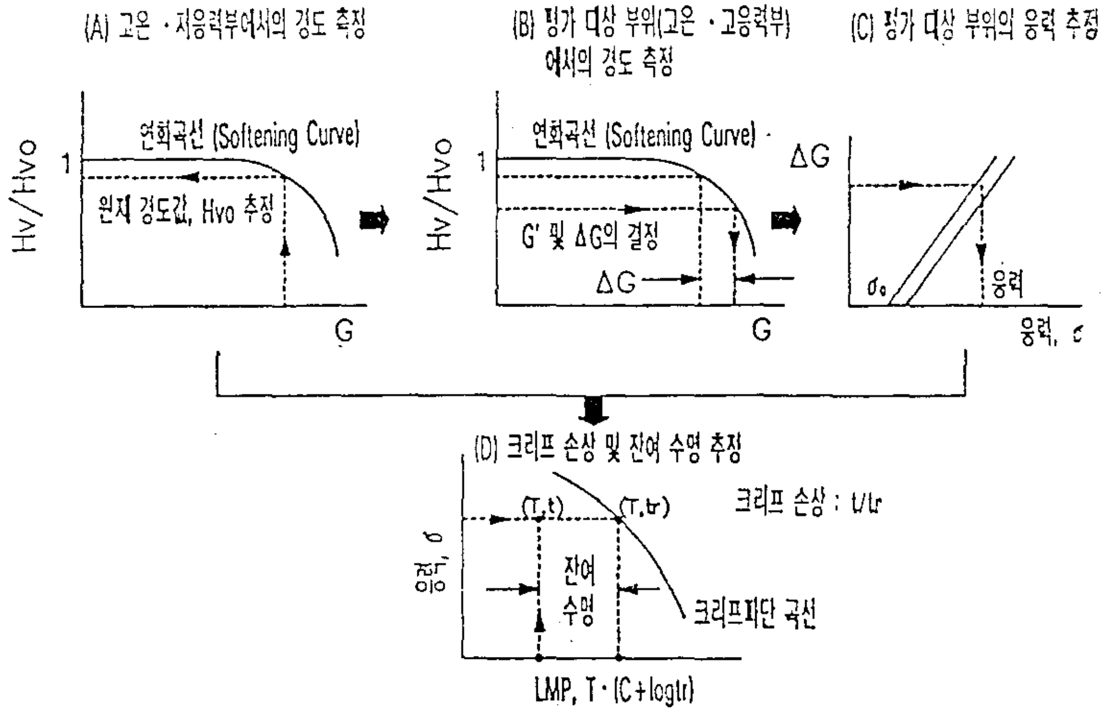



그림 6.6 경도측정을 이용한 크리프 손상과 잔존수명 예측법

· 고온 사용 설비:

잔여수명을 짧은 시간 내에 평가하기 위해서는 평가 대상 기기의 사용 조건보다도 응력이나 온도 또는 두 조건을 모두 증가시킨 가속 조건하에서 크리프 파단 시험을 해야 하며, 수명배분율(Life Fraction Rule)이나 시간·온도 Parameter를 이용하여 가속시험 데이타를 사용 조건으로 외삽하여 수명을 평가함

## 3.1 크리프 가속시험에 의한 열화상태 평가

- 비고: 비파괴법이 현재까지 축적된 손상을 평가하는 방법임에 비하여 실부품에서 크리프 시험편을 채취하여 크리프 파단시험을 하는 방법은 크리프 잔여수명을 평가하는 방법으로서 제안된 것임
- 일반적인 평가법: 가속 조건하에서 사용재의 Single Specimen 파단시험
  · 계산법: 소비수명 배분은 사용재의 파단 시간과 동등한 조건하에서의 미사용재의 파단시간과의 비로서 계산되며 잔여수명 배분은 1에서 소비수명 배분을 뺀 값이 됨
- 다른 평가법: 사용재의 시험 Data Point에서 미사용재 파단 Data선에 평행한 선을 긋고 사용 조건까지 외삽하여 잔여수명을 평가함
  · 계산법:
    . 수명 배분율은 사용재의 Data선이 미사용재의 Data선과 평행하다고 가정하고 있기 때문에 위의 두 방법은 같은 결과를 나타냄
    . 미사용재의 Data는 열처리 조건 등으로 인해 하나의 곡선으로 처리하지 못하기 때문에 ISO Data를 참고 곡선으로 사용하며, 계산하는 데는 최소선이 사용됨
- 문헌에 보고된 대부분의 Data는 응력이 단독으로 변하거나 온도와 응력이

둘다 변하는 시험으로부터 얻어진 것임

- 이러한 Data가 Larson-Miller Parameter를 이용한 선도나 $\log t_r$ - $\log\sigma$ 선도로 그려질 때 사용재의 곡선이 ISO Band의 곡선 아래에 위치하지만 평행하진 않음
- 사용재의 시험결과는 고응력과 낮은 Larson-Miller 값에서 보다도 저응력에서 큰 Larson-Miller 값에서 ISO Data 곡선에 가깝게 그려짐

- 단점: 이러한 제한 때문에 수명 배분율과 관련한 단독 시편의 사용은 부정확함
- Isostress Rupture 시험법:
  - 여러개의 시험편을 사용하여 잔여수명을 추정하는 이 방법은 사용응력과 같은 응력 수준에서 온도만을 높여 행하는 가속 시험법으로 잔여수명을 예측하기 위해서 $\log t_r$ - T 선도를 사용 온도까지 외삽하는 것임
  - 장점: 미사용재의 데이타 베이스를 필요로 하지 않는 잇점이 있고 잔여수명이 데이타로부터 직접 얻어지므로 수명 배분율이 필요치 않음

## 3.2 크리프 파단 가속시험

- 사용 기기: 하중비가 10:1인 지렛대 식의 외팔보 크리프 시험기
- 시험 재료 및 채취 방향:
  - 2.25Cr-1Mo강: 외경 45mm, 두께 8.2mm 강관(길이 방향으로 채취)
  - SUS 316강: 두께 24mm의 판재 (L-T 방향(시험편 길이 방향이 압연방향)으로 채취)
  - Cr-Mo-0.25V강: 직경 450mm, 두께 50mm의 원판형으로 P나 S가 적은 양질의 재료 (C-R 방향(시험편의 길이가 반지름에 접선인 방향)으로 채취)

- 단점: 크리프 파단시험은 많은 시간을 요하는 시험이며, 많은 양의 시험 데이타가 있어야 크리프 파단 곡선을 만들 수 있으므로 국내의 데이타만으로 작성 곤란
  - 방안: 일본 금속재료기술연구소(NRIM)의 크리프 데이타를 이용하여 크리프 파단 곡선을 만들고 실험값을 그림에 함께 나타낼 수 있음
- 응력-파단시간 곡선: 2.25Cr - 1Mo강, SUS 316강, Cr-Mo-0.25V강의 경우 (그림 6.7, 6.8)
  - 시험 결과: 일부 시험조건에서 약간의 오차가 발생하였으나 대체로 NRIM 응력-파단 시간 선도에 잘 일치
  - 크리프 잔여수명을 추정하는데 NRIM data를 사용하는 것이 가능함을 알 수 있음
- 예측방법: 크리프 파단시험을 통해 설비의 잔여수명을 예측하는 몇가지 방법이 있음
  - 크리프 Parameter를 이용하여 잔여수명을 예측: 크리프 파단 Master Curve 필요
    - Larson-Miller Parameter(LMP)를 이용 크리프 파단 Master Curve를 나타냄
    - LMP와 응력과의 관계를 나타내는 주파단 곡선은 3차식 식 (6.5)로 표시
    - 고온 사용설비의 사용온도와 사용응력을 안다면 식 (6.5)를 이용하여 파단 시간을 추정할 수 있고 이 파단시간과 사용시간으로부터 설비의 잔여수명 계산 가능

$$LMP = a_0 + a_1 \log S + a_2 (\log S)^2 + a_3 (\log S)^3 \qquad (6.5)$$

여기서 S는 응력(MPa)이고, $a_0$, $a_1$, $a_2$, $a_3$는 최소자승법에 의한 Regression Coefficient임

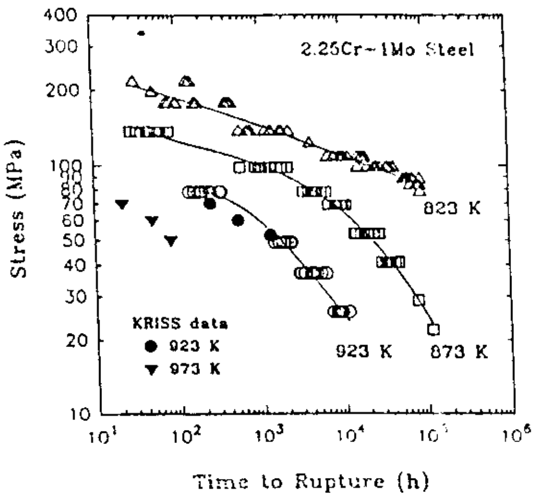



그림 6.7 2.25Cr-1Mo강의 응력 파단시간 곡선

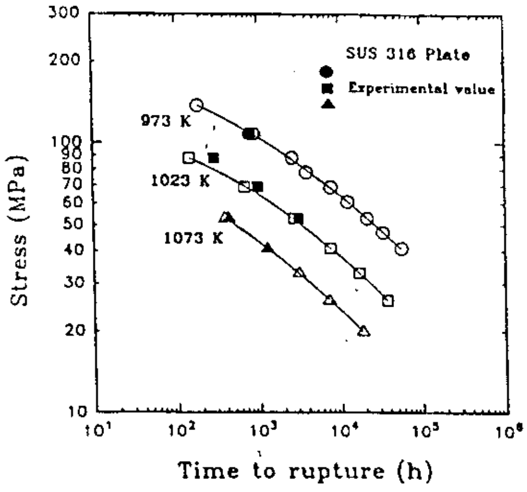



그림 6.8 SUS 316강의 응력 파단시간 곡선

# 4. 전기저항법

- 원리: 고온환경하에서 크리프손상이 증가됨에 따라 탄화물의 조대화 시그마

상의 석출 등의 조직변화가 전기저항의 변화를 야기시킨다는 점에 착안한 방법이며 시험의 원리는 그림 6.9와 같이 단자 A,B에 직류 또는 교류의 전류 I를 공급하고 검출단자 C,D를 이용하여 C,D간의 전기저항의 변화를 전압 V의 변화로서 검출함

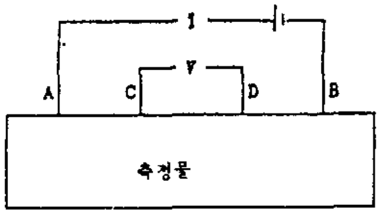



그림 6.9 전기저항 측정시스템

- 평가 파라메터: 전기저항비 $R_\rho$로 표시

  $R_\rho$ = 사용후 부재와 기준재의 저항률비/사용전 부재와 기준재의 저항률비

- 결과: 전기저항비를 수명소비율(t/tr)에 대해 정리(그림 6.10과 6.11)

  Cr-Mo-V강과 오스테나이트계 스텐레스강에 대하여 언어진 결과[19,20]

- t/tr이 0.5이상일 때:
  - Cr-Mo-V강의 경우는 직선관계가 성립하지 않음(그림 6.10)
  - 이유: 크리프 변형과정에서 발생된 공동(Cavity/Void)의 영향
  - 본 실험을 적용시키기 위해서는 전술한 경도실험과 병행할 필요가 있음
- t/tr이 0.2이상일 때:
  - 오스테나이트 스텐레스강의 경우 상관관계를 나타내고 있으며 이는 제3기 크리프 변형개시점과 일치하고 있음(그림 6.11 참조)
- 여기서 t는 부재의 실사용시간, tr은 사용온도하에서의 파단시간을 말함

- 유의점: 본 실험에 있어서는 전류가 통하는 도중 온도가 상승할 염려가 있어 온도상승의 영향을 고려하여야 하고 접촉단자의 확실한 접촉이 중요하며 특정의 t/tr 범위만의 손상도를 반영(그림 6.10, 6.11)하기 때문에 다른 측정법과 병행 · 실시하여야만 오판을 방지할 수 있음

# 5. 초음파법

- 목적: 초음파법은 부식 등에 의한 두께감소를 측정하기 위한 것과 재료 내부의 손상도를 측정하기 위한 두가지 방법으로 이용됨
- 종류: 손상도를 측정하는 데는 주로 음속측정법, 초음파 스펙트로스코프(감쇄)를 이용한 방법들이 있음

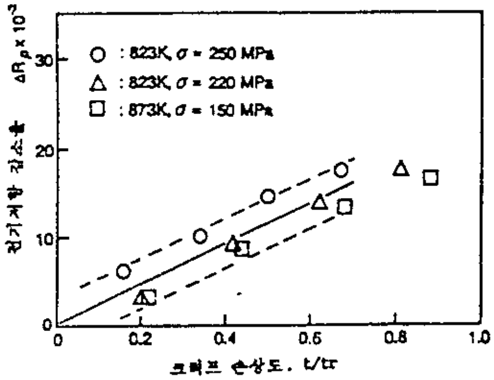



그림 6.10 Cr-Mo-V강의 손상도와 전기저항률의 관계

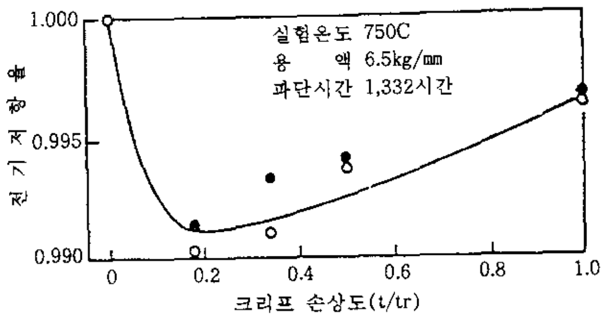



그림 6.11 스텐레스강의 손상도와 전기저항률의 관계

- 음속측정법:
  - 크리프 공동의 생성량의 증가와 더불어 초음파속도가 감소하는 것을 이용하며 제1회 저면 에코와 제2회 저면 에코간의 전파시간을 측정하고 전파거리로부터 전파속도를 구함
  - 크리프 공동의 생성에 의한 밀도변화와 초음파음속의 변화를 나타낸 예로써 밀도가 감소함에 따라 음속도 직선적으로 변함(그림 6.12)[21]
- 초음파 스펙트로스코프법: 재료내의 투과파의 강도를 이용하는 방법
  - 시그마상의 석출량에 따른 초음파의 수신강도 및 주파수의 관계를 나타낸 것으로 시그마상의 증가와 함께 최대 수신 신호의 강도가 전반적으로 고주파수쪽으로 이동하고 있음(그림 6.13)[22,23]
- 기타: 이 외에도 재료의 반대쪽에서 반사되어 오는 신호의 감쇄율 및 그의 주파수 성분의 변화에 의해 결정립경의 변화를 검출하는 방법도 연구되고 있음

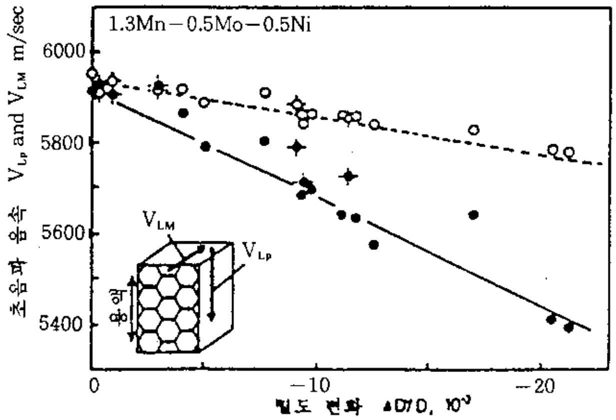



그림 6.12 크리프 공동생성에 의한 재료밀도 변화와 초음파 전파속도의 관계

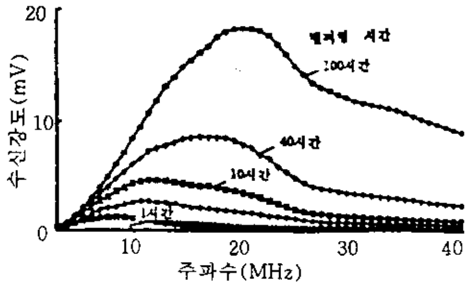



그림 6.13 석출물에 의한 수신초음파의 특성 변화

- 주의점: 초음파법은 탐촉자의 선정이나 피측정체의 크기 및 형상 그리고 탐촉자의 접촉 압력 등이 결과에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 세심한 연구 및 경험이 필요

# 6. 전기화학적 방법

- 정의: 최근 일본에서 정력적으로 행해지고 있는 연구로서 EMAC(Electro Chemical Materials Characterization)라 일컬어짐[24]
- 원리: 손상계측의 기본원리는 미시적 재료의 조직변화를 그림 6.14에 나타난 바와 같이 전기화학적 변화로서 나타낸 것으로 손상의 종류에 따라 적절한 손상검출 용액중에서 분극곡선 또는 전극 임피던스(Impedance) 계측을 통하여 손상도와의 관계를 명확히 하는 것임
- 기타: 현장측정상의 문제를 고려하여 분극곡선 측정시 분극속도의 영향, 표면거칠기의 영향 등에 대한 연구가 필요하다고 여겨짐
- 추후 필요 연구: 이 방법을 현장에 적용시키기 위하여는 현장응용성이 높은 측정시스템의 개발이 필요

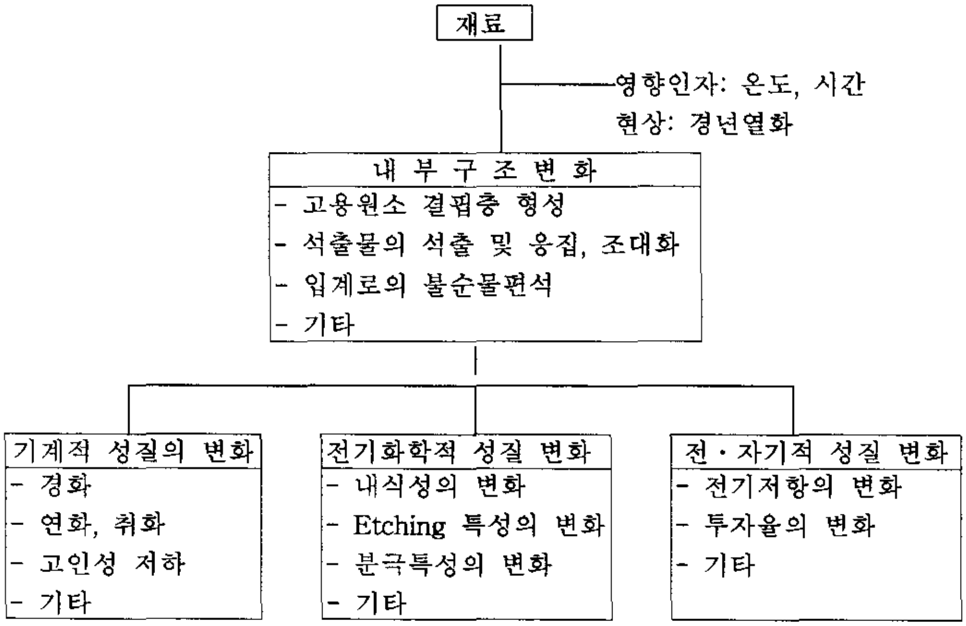



그림 6.14 금속 재료의 내부 구조 변화와 제특성

고온 압력설비의 잔여수명예측을 위한 측정지침 (기전연 94-8-10)

발 행 일 : 1994. 9. 30

발 행 인 : 산업안전연구원장 서 상학

연구수행자 : 책임연구원 윤 상건

발 행 처 : 한국산업안전공단

산업안전연구원

기계전기연구실

주 소 : 인천직할시 북구 구산동 34-4

전 화 : (032)513-0230

(032)502-0031~2

<비매품>