特輯 : 구조물 경년열화와 수명평가

劣化 構造物의 壽命豫測과 그 對策

권 재 도* · 진 영 준**

A Counterplan and Life Prediction of Degradaded Structures

Jae-Do Kwon* and Yeung-Jun Jin**

1. 머 리 말

산업발전과 더불어 1970년대부터 원자력 발전 설비, 고온 고압 용기 등과 같은 기계구조물들이 건설되기 시작하면서 1980년대에 이르러서는 급격히 그 수가 증가되었다. 그림1에 나타낸 바와 같이 고도 급속성장기에 건설하기 시작한 기계 구조물들은 그 사용기간이 길어짐과 더불어 수명상의 문제가 제기되기 시작함에 따라 검사, 보수, 교환, 사용정지, 운전조건의 제한, 재건설, 안전성 및 신뢰성의 검토등을 행하면서 하루라도 더 길게, 더 안전히 그리고 효율좋게 사용하고자 하는 요구가 커져가고 있다.

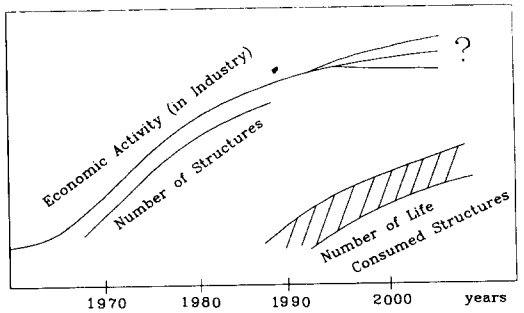


그림 1. 국내 경제활동과 열화된 구조물의 수명예측 필요성

* 정회원, 영남대 공과대학 기계공학과 교수
** 비회원, 영남대 공과대학 기계공학과 강사

그러나 기계 구조물의 수명을 지배하는 인자는 매우 많은 것으로 사료되며, 재료의 사용조건, 사용이력 등 시간과 더불어 재료의 강도 특성이 변화하는 현상, 즉 劣化(degradation)의 영향을 기계 구조물의 壽命豫測 또는 건전성 평가에 어떻게 도입하는가는 중요한 요인으로 생각된다. 그러나 현재까지는 재료의 劣化평가에 관한 연구와 壽命豫測에 관한 연구가 별도로 제한된 범위내에서 수행되어 왔으며 劣化의 영향을 고려한 壽命豫測에 관한 예는 미비한 실정이다. 따라서 本稿에서는 劣化 종류 및 劣化의 평가 방법에 대한 예를 들고, 경연劣化를 고려한 壽命豫測을 수행하기 위해 필요한 요소로 사료되는 劣化의 척도, 劣化가 기계 구조물의 부위에 따라 불규칙적으로 일어나는 열화과정의 불규칙 현상, 劣化영향의 확률론적 특성 및 劣化곡선의 필요성 등에 대해 기술하고, 아울러 그동안 수행된 劣化를 고려한 壽命豫測의 예를 들어보고, 劣化 구조물의 치료 방법 및 그 대책에 대해 언급하고저 한다.

2. 劣化의 종류 및 평가 방법

2.1 열화의 종류

劣化는 장기간 사용에 따라 품질, 성능, 강도등이 저하하는 현상으로 기계 구조물의 壽命豫測 또

는 건전성 평가를 위해서는 매우 중요하다고 생각된다. 현재 재료강도학적 검토 대상이 되는 劣化의 종류[1]는 편의상 다음 3가지로 크게 나눌수 있다. 첫째 재질 劣化, 둘째 부식에 의한 劣化, 세째 破壞破損의 도중단계 등으로 나눌수 있으며, 재질 劣化는 내부까지의 재료의 변화를 동반하는 현상이며, 부식에 의한 劣化는 주로 외부 표면 등과 같은 경계면의 劣化 현상으로 생각되며, 파괴, 파손의 도중단계는 피로, 응력부식 피로, 크리프 및 마모 등과 같은 현상을 들 수 있다. 이상의 3가지 劣化 종류의 대표적인 예를 표 1에 나타내었다.

2.2 기존의 劣化평가 방법

장기간 사용한 기계 구조물에 있어서 劣化 정도의 평가와 잔존 수명을 예측하는 방법으로는 대개 가동중인 기계 구조물에서 시료를 채취하여 Charpy 충격시험, 크립파단 시험이나 피로시험 및 파괴인성치 시험등의 파괴 시험을 행하여 얻어진 특성값과 설계 당시의 新재료의 특성값을 비교하는 것이 전형적인 방법이다. 그러나 가동중인 기계 구조물에서 직접 시료를 채취하여 劣化를 평가하는 것은 기계 구조물의 안전성 및 강도학적 견지에서 손상을 입히는 결과를 초래할 가능성이 있어서 바람직한 방법은 아니다. 따라서 실제로 가동중인 구조물의 조기 손상을 평가 한다는 차원에서 균열과 같은 결함 검출에나 사용되어 왔던 비파괴적 방법에 의한 劣化 평가 방법이 개발되고 있는 실정이다.

표 2[2~7]는 현재까지 여러가지 연구결과로부터 개발된 각종 경년劣化 판정법에 대한 대표적인 예를 나타내었다.

표 1. 각종 劣化의 종류[1]

구 분	종 류
재 질 열 화	템퍼링 취화, 수소 취화, 수소 침식, 크리프 취화, σ상 석출, 탄화물 석출, 침탄, 탈탄, 시효 등
부식에 의한 열화	감육, 공식, 조면화, 틈색부식, 입계부식, 탈성분 부식, 탈성분 침식, 각종 내식성 저하, 산화, 층상부식 등
파괴, 파손과정중의 열화	피로, 응력부식 균열, 부식 피로, 크립, 크립 피로, 열 피로, 국부적과대 변형, 마모 등

표 2. 각종 경년 劣化의 판정법의 대표적인 예[2~7]

종 류	판 정 법
템퍼링 취화	ⓐ. 연성－취성천이온도상승 ⓑ. A.E 계측 ⓒ. AUGER 전자분광 분석에 따른 입계불순물의 측정 ⓓ. 입계부식법 ⓔ. REPLICA법 ⓕ. 전기화학적 방법 ⓖ. 전기 저항법 ⓗ. 초음파 법 ⓘ. 소형펀치법
수 소 취 화	ⓐ. 충격시험에 의한 노치인성 저하 ⓑ. 인장시험에 의한 단면수축률 저하 ⓒ. 현미경에 의한 미소균열의 유무 ⓓ. 진공추출에 의한 수소량측정 ⓔ. 주사전자현미경에 의한 파면해석 ⓕ. 초음파 법 ⓖ. X선 이용
수 소 침 식	ⓐ. 초음파법 ⓑ. 외관검사에 의한 방법 ⓒ. GAS 추출에 의한 메탄 가스 유무 ⓓ. 현미경시험에 의한 탈탄 및 미소균열 유무 ⓔ. 충격시험에 의한 강도 및 연성의 저하
σ 상 취 성	ⓐ. 충격시험에 의한 노치인성의 저하 ⓑ. 경도 상승 ⓒ. 현미경조직 검사 ⓓ. 균열의 유무 ⓔ. 초음파 법 ⓕ. 전기화학적 방법
크리프 취성	ⓐ. 경도의 증가 ⓑ. X선 회절법 ⓒ. 초음파법 ⓓ. 현미경 조직 관찰 ⓔ. 치수변화측정법 ⓕ. 와전류 탐사 ⓖ. 전기저항법
후열처리 취성	ⓐ. 충격치의 저하 ⓑ. 신율의 저하 ⓒ. 연성의 저하
청열(靑熱) 취성	ⓐ. 인장강도의 상승 ⓑ. 경도의 상승 ⓒ. 연성의 저하
탄화물 석출	ⓐ. 현미경 조직 실험 ⓑ. 전기저항법 ⓒ. 전기화학적 방법
침 탄	ⓐ. 현미경 조직 실험 ⓑ. 균열의 유무 ⓒ. 전자기적 방법
탈 탄	ⓐ. 현미경 조직 실험 ⓑ. 균열의 유무
부 식	ⓐ. 외관검사에 의한 방법 ⓑ. 초음파 법 ⓒ. 와전류 탐사

3. 劣化구조물의 壽命豫測시 고려할 사항

3.1 壽命豫測에 필요한 劣化의 척도

현재 사회적으로 요구되어지는 수명 예측에는 다음과 같은 종류를 들 수 있다. (1) 전수명 예측, (2) 잔존 수명 예측(여수명 예측), (3) 잔존 강도 예측 (또는 강도저하 예측), (4) 적정 검사 기간 예측, (또는 다음 검사시기 예측), (5) 신뢰도 예측 또는 고장율 예측등이 그것들이다.

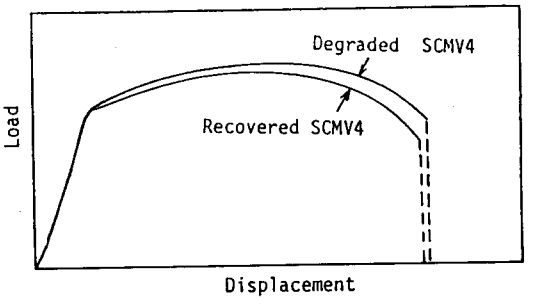
그러나 그 어느 방법을 시도해 보아도 이것에 대한 해답은 劣化의 정도를 나타내는 척도의 필요성이다. 따라서 劣化 대책을 위해서는 시시각각의 劣化의 정도를 나타내는 척도를 아는 것이 중요하다는 것은 말할 필요도 없다.

劣化의 척도를 재료의 강도에 기준을 둔 경우는 인장강도, 항복강도, 연신율, 단면 수축률, 경도, 파괴인성치 및 충격치 등이 있고, 수명 저하율 자체를 劣化라고 할 경우는 피로, 크리프 및 응력 부식 파괴 시험등의 諸 결과등이 있다.

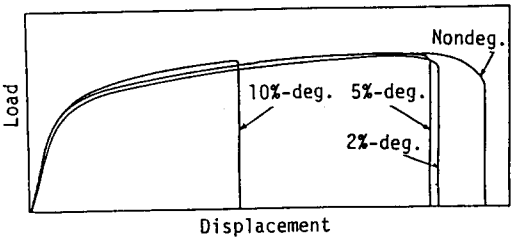
그림 2[10]에서는 템퍼링 취화(temperembrittlement)된 劣化재와 σ-상 劣化재를 인장시험한 결과를 나타낸 것이다. 템퍼링 취화재의 경우는 劣化재와 회복재의 최대 하중 및 파단시 변위가 유사한 경향으로 나타나지만 σ-상 劣化재의 경우는 건전한 재료에 비해 劣化가 진행됨에 따라 최대 하중은 유사하지만, 파단시의 변위는 큰차이가 있으므로 인장시험을 통해 劣化의 척도를 정하기는 어려운 점이 있다. 따라서 劣化에 따른 불안정 파괴의 대책으로서 가장 일반적으로 사용되는 방법은 Charpy 충격치일 것이다. 열화에 따른 Charpy 충격치의 변화정도에 관한 일예를 4절의 그림 5[12]에 나타내었다.

그러나 壽命豫測의 입장에서 생각하면 Charpy 충격치는 일반적인 劣化 척도로 생각하기는 어렵고, 확률적으로 발생하기 어려운 위험한 과대하중이 최초에 발생하기까지의 기간이라는 의미에서 수명의 보정치로서 사용되는 값으로 생각된다.

따라서 장기간 사용한 기계 구조물의 피로 파괴나 환경 파괴에 대해서는 파괴의 진행 속도 또는 파괴의 진행도에 대응하는 별도의 량을 척도로 정하는 것이 바람직스러울 것이다.



(a) 2¼Cr-1Mo강 열화재



(b) σ-상 열화재(스테인레스 강)

그림 2. 2¼Cr-1Mo강 열화재와 σ-상 열화재의 인장시험에 대한 하중-변위선도

3.2 劣化과정의 불규칙성

모든 劣化진행 과정은 일반적으로 일정하지 않고, 공간적으로도 시간적으로도, 변동이 많다. 이와 같은 시간적, 공간적, 불규칙성 및 국소성을 수반한 劣化의 진행을 고려한 수명 예측은 그 해석이 단순하지 않지만 학술적으로는 흥미 있는 문제이기도 하다. 그 현상이 천차 만별이기 때문에 해석 방법도 그 대상에 따라 각각 새로운 제안이나 시도가 되면서 행해질 것으로 생각되어지지만, 기존의 연구결과들은 주로 수명예측과 열화문제는 별개로 해석되어지고 있으며, 이에 대한 예들은(a) 열화 기구 및 파괴 형태[3, 14, 18, 27] (b) 재료표면에 있어 불규칙 분포, 미소균열들의 발생, 성장, 분산 합체에 따른 가속 파괴과정 및 열화과정[12, 13, 20] (c) 부식에 따른 표면형상의 불규칙화에 따라 강도나 수명 저하현상[16]등이 있다.

3.3 확률론적인 劣化 현상

경년 劣化에 의해 재료의 강도나 수명의 저하가

만약 확률론적으로 진행하는 것이라면 수명 예측도 확률론적으로 해결이 가능할 것이다. 이와같이 생각하는 근거의 하나는 劣化된 재료와 劣化되지 않은 재료와의 피로 균열 진전 특성을 비교한 예로서 그림3[8]에 나타낸 바와 같이 劣化된 재료에서는 분명히 Scattering의 분포폭이 넓게 나타난다. 劣化된 재료에는 일반적으로 피로 수명의 Scattering도 크게 되리라고 생각해도 좋을것 같다. 만약 이 추측이 확실하다고 하면 劣化 대책, 특히 여기서는 劣化를 고려한 수명 예측에는 확률 통계적

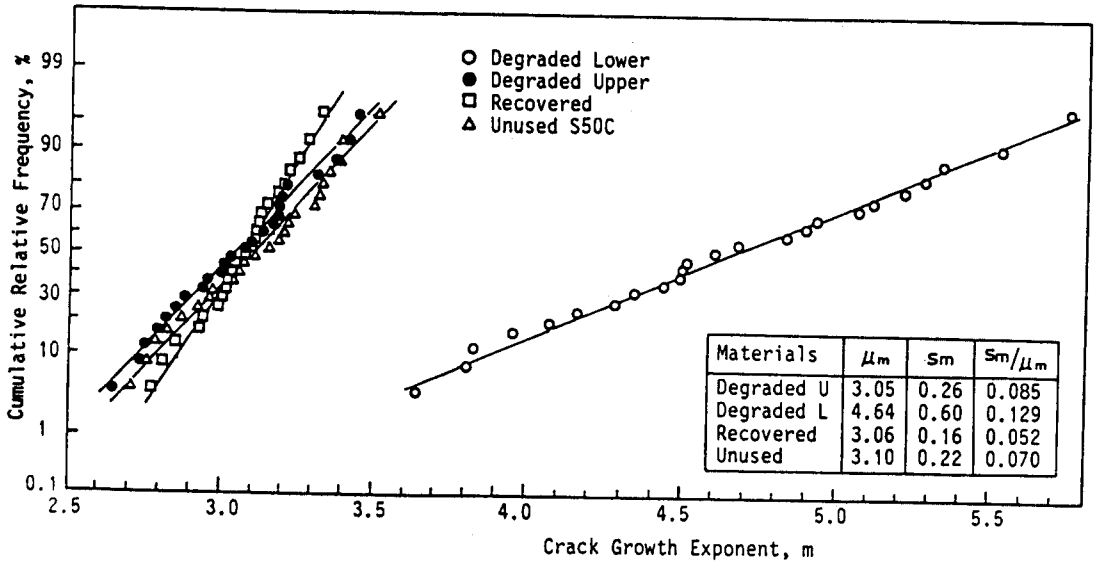


그림 3. 정규분포 확률지상에서 열화재와 회복재의 피로균열 성장 지수 m의 분포

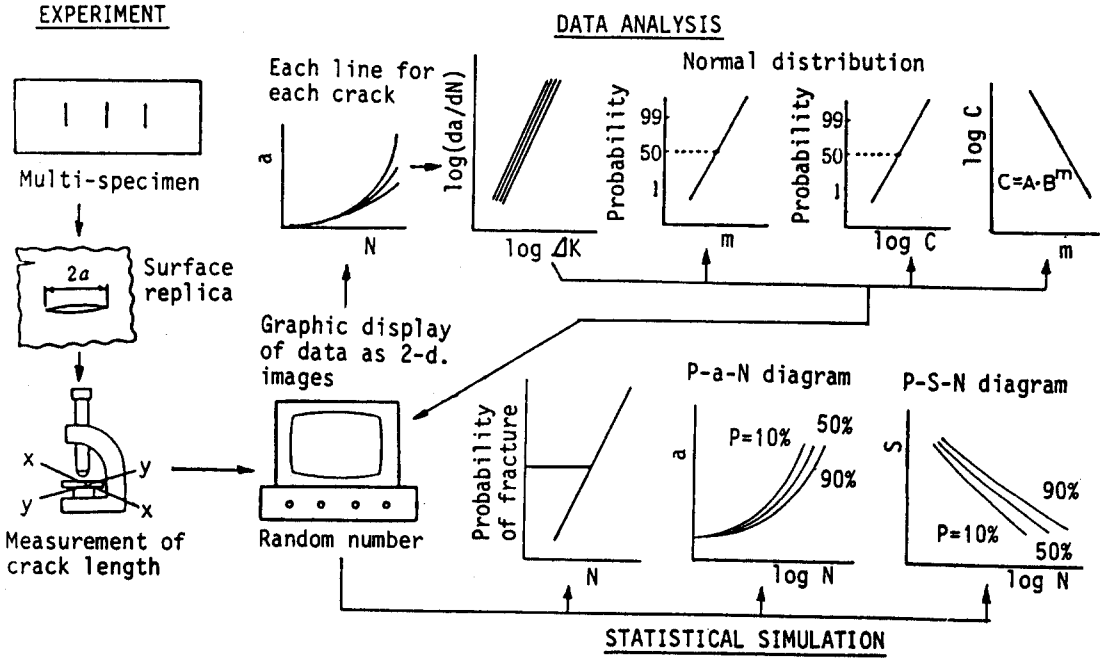


그림 4. 통계적인 피로수명의 예측 방안

방법론의 도입이 필요할 것이다.

劣化를 동반한 파괴과정 또는 劣化에 따른 강도 저하 과정을 확률 과정이라고 해서 해석하는 경우, 우선 두 개의 해결 과제를 제시하고 싶다. 첫째는 劣化재의 파괴 또는 劣化의 영향하에서 파괴에 관한 통계적 데이타를 입수하기 어려운 점이다. 3-2 절에서 언급한 바와 같이 劣化의 진행은 시간적으로도 공간적으로도 일관성 및 균질성이 낮기 때문에 동질의 劣化 시험재를 다수 준비하는것은 일반적으로 어렵고 통계적 데이타를 구하기 위해서는 특별한 궁리가 필요하다. 극히 적은 시험편으로 통계적 데이타를 구한 예의 하나를 그림 4[8]에 나타내었다. 해결과제의 두번째는 확률 과정을 지배하는 주된 확률 변수로는 무엇을 선택하며 확률 과정으로서 어떤 모델을 선정할까 하는점이다. 확률 변수로서는 진행 속도 말고도 개시 조건이나 완료 조건 등을 선택하는것이 가능할 것이다.

3.4 壽命豫測에 사용될 劣化곡선의 缺乏

고온 고압용기, 대형 Plant 설비, 해양구조물, 원자력 발전설비 등과 같이 특수환경에 사용되고 있는 구조물과 기기에 대해서 劣化를 고려한 장기 수명 예측을 할려고 하면 우선, 劣化 곡선의 입수 곤란에 직면한다. 여기에 있어서 劣化 데이타는 정기 검사 등에서 얻는 고립된 데이타들이며, 처음부터 연속적인 劣化곡선을 얻기는 어렵다.

정도 높은 수명 예측을 하기 위해 劣化의 시간적 변화를 나타내는 劣化곡선을 사용하고 싶지만, 불과 1점이나 2점의 일정점을 주어서 이것을 통과하는 곡선을 정하지 않으면 안되는것이 현실이다. 劣化 현상의 진행이 확정론적이고 재현성이 좋은 것이라면 그것도 가능하리라 생각되지만 3-3절에서 언급했듯이 현상 자체가 다양하고 영향 인자도 많은 확률과정으로 가정한 劣化 현상에서는 일반적으로 어렵다고 생각하지 않을수 없다.

4. 劣化를 고려한 壽命豫測의 예

지금까지 劣化평가에 관한 연구결과들은 劣化현상 자체에 관한 연구[2, 6, 11, 13, 17, 18, 28]가 주종을 이루고 있으나, 시간의 변화에 대해 진행하는 劣化현상을 고려한 壽命豫測은 시작단계이며, 이에 대한 연구예를 살펴보면 다음과 같다.

그림5[12]은 석유화학 플렌트의 일부로서 약 430℃ 정도에서 약 60,000여 시간 사용하여 템퍼링 취화된 2¼ Cr-1Mo강 劣化재와 이 재료를 이용하여 600℃에서 1시간 유지시킨 후 급냉시킨 회복재와 모의열화방법인 스텝쿨링법, 10℃/hr 및 30℃/hr 슬로우 쿨링법 등에 따라 劣化도중 단계의 재료를 제작하여 충격실험한 결과를 나타낸 그림이다.

샬피 충격실험을 −70~150℃의 온도 범위에서 수행하였으며, 劣化가 진행됨에 따라 파면천이온도(Ductile-brittle transition temperature,DBTT)가 상승함을 나타내고 있고, 회복재를 기준으로 슬로우 쿨링재, 劣化재 및 스텝쿨링재의 파면천이온도 차이(△DBTT)는 각각 20℃, 105℃ 및 130℃로 증가됨을 관찰할 수 있다. 또한 그림 6에서는 충격시험후 劣化재와 회복재의 파단면을 각각 나타내고 있으며, 劣化재는 입계파면이 주종을 이루고 있고, 회복재

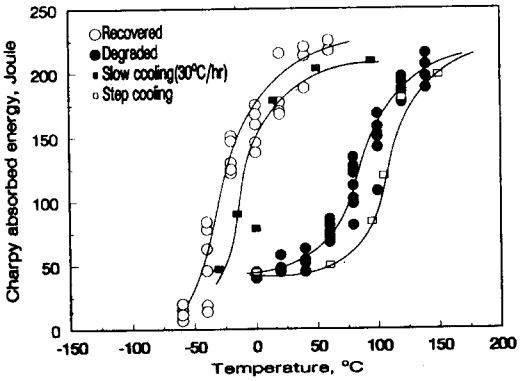
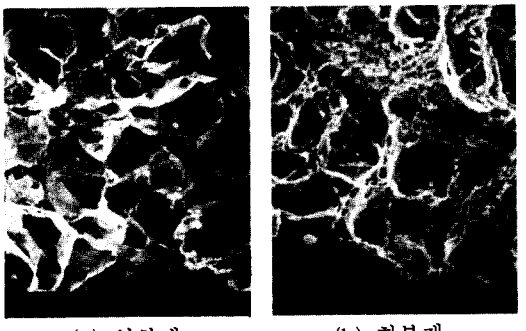


그림 5. 2¼Cr-1Mo강 열화재의 샬피충격 흡수에너지와 온도와의 관계



(a) 열화재 (b) 회복재

그림 6. 상온에서 샬피 충격시험후 열화재와 회복재의 파단면 사진

는 연성파괴가 되어 딤플(dimple)형상의 파면을 나타내고 있으며 아울러 劣化재가 취화되었음을 입증해 주고 있다.

그림 7[8]은 劣化재와 회복재에 대해 다수의 피로 시험을 수행한 후 동일 △K-da/dN 선도상에 플롯트하여 비교한 결과를 나타내고 있으며, 劣化재 및 회복재의 균열진전 속도를 비교해보면 劣化재의 균열 진전 속도가 회복재 보다 빨라진다는 것을 통계적으로 알 수 있다.

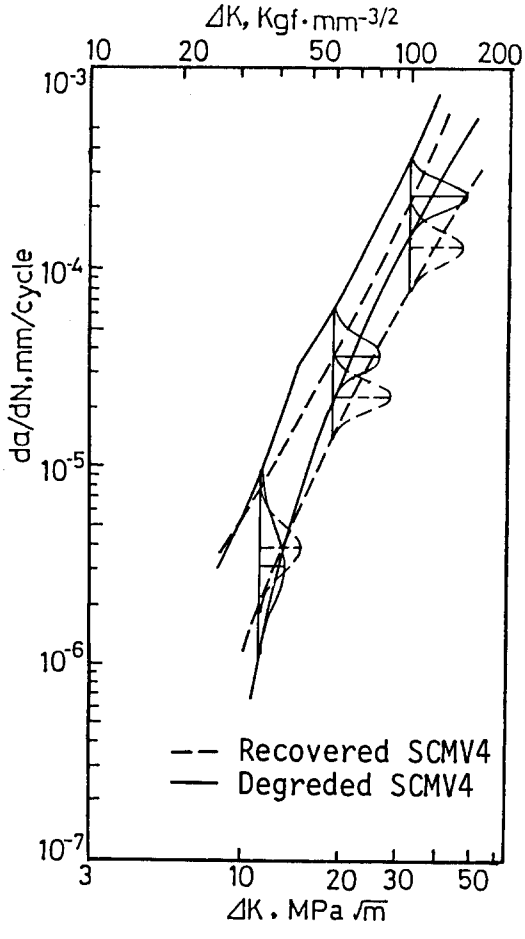


그림 7. 2¼Cr-1Mo강 열화재와 회복재의 △K-da/dN 관계

그림 8[9]은 劣化재와 회복재를 파괴인성실험(J_{IC}) 결과를 나타낸 것으로 동 그림에서는 각 시험편의 파단후의 단면 사진을 넣어 비교하였다. R곡선법에 따라서 탄소성 파괴인성치 J_{IC}의 값을 결정하여 비교해 본 결과 劣化재의 파괴인성치가 회복재에 비해 크게 저하되는 것을 알 수 있고, 재질 劣化된 균열재의 변형에 대한 저항은 회복재 보다 작은 것으로 나타났다.

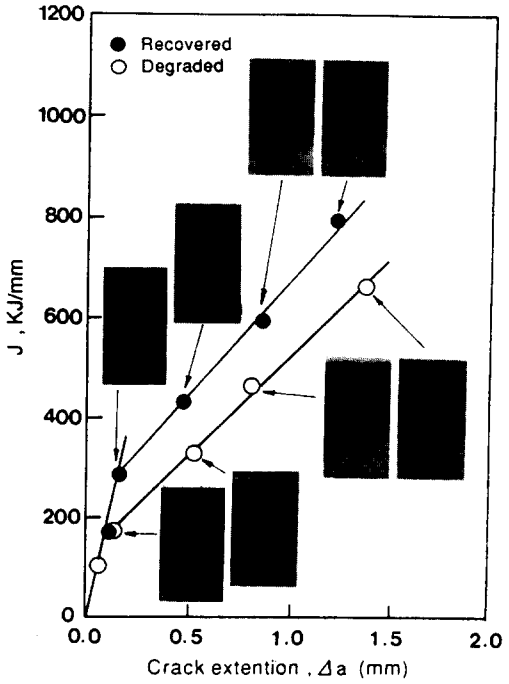
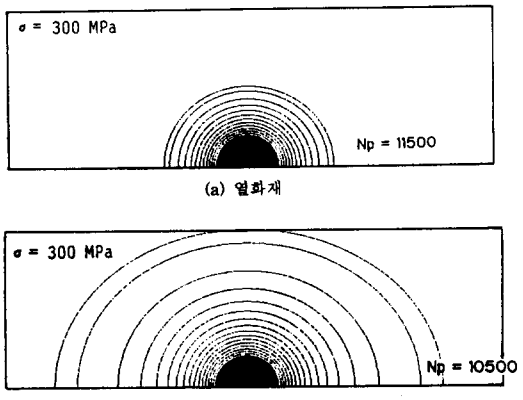


그림 8. 열화재와 건전재에 대한 J_{IC} 파괴인성치 실험 결과

그림 9(a) 및 (b)[9]는 각각 劣化재 및 회복재에 대해서 이상에서 언급한 실험 결과 얻은 재료의 물성치(피로 균열 진전 특성 및 파괴인성치)를 사용하여 3차원 표면 균열의 아스펙트비 a/c=1.0로 가정하고, σ=300 MPa 응력 레벨에서 표면 균열 진전 과정을 컴퓨터 시뮬레이션한 결과를 나타내었다. 여기서 Np는 파단시의 최종 반복횟수를 나타낸다. 이 결과 동일형상, 동일하중 조건의 표면균열이라도 재질이 劣化됨에 따라 최종 파단시의 균열의 크기에는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 劣化재의 경우 파괴인성치로부터 구한 한계 균열의 길이가 적기 때문에 균열이 판두께를 관통하지 않고 11,500 사이클 반복시 파단되는 반면에 회복재는 동일 응력레벨이라도 판두께를 균열이 관통한 후에 파단되는 것을 알 수 있다.

이는 LBB(leak before break)관점에서 생각한다

면 회복재의 경우 사고 발생전에 누설 현상이 생겨 큰 사고 발생의 예방이 가능하리라 판단된다.



· 그림 9. 열화재와 회복재의 표면균열 진전 시뮬레이션

또한 특수환경에 사용되는 구조물이 부식에 의한 劣化의 영향을 살펴 보기 위해 인공해수중에 시험편을 침적시켜 일정기간마다 표면 조도계를 이용하여 표면형상을 측정한 결과를 그림 10 (a)[16]에 나타내었고, 그림 10(b)는 (a)의 부식형상의 표면 고저차를 나타내고 있으며 중앙부의 검은 실선은 동시험편으로 피로 시험을 수행한 결과 피로

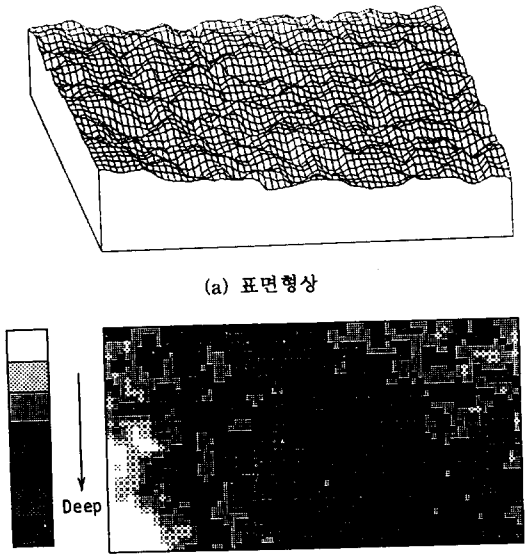


그림 10. 부식부의 표면형상과 부식깊이

균열이 발생, 진전하여 파단된 부위을 나타내며, 파단부위는 부식깊이가 깊은 부분에서 일어남을 알 수 있다. 한편 측정된 부식깊이에 관한 데이타를 확률지상에 통계처리하여 비교한 결과 부식기간이 길어짐에 따라 부식 피트가 깊어짐을 알수 있다. 그림11[16]는 부식피트와 파단수명과의 관계를 나타낸 결과이며, 이런 부식 피트에 응력 집중 현상이 발생하여 구조물의 수명을 저하시키는 것으로 생각된다.

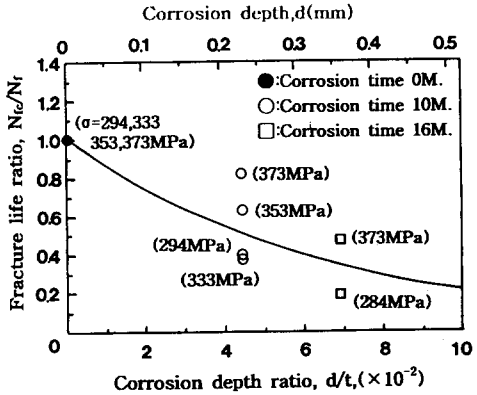


그림 11. 부식재의 파단 수명비와 부식깊이와의 관계

5. 劣化의 대책

기존의 열화 대책으로는 열화정도가 확인되면 해당부위를 교체 및 보수하는 방법이 일반적이다. 그러나 열화의 척도를 확실히 할 경우에는 잔존수명의 예측 및 열화의 치료방법의 개발등이 시도될 수 있을 것이다. 열화의 척도를 확인하기 위해서는 감시 시험편에 의한 방법 및 환경인자의 감시방법들을 들 수 있다. 그러나 본절에서는 열화의 치료방법에 대해 언급하고자 한다.

기존의 장기간 사용된 劣化재를(temperembrittlement) 회복(치료)시키는 방법으로는 실험실의 전기로에서 열처리하는 방법을 이용하지만, 劣化현상은 구조물의 전체적으로 발생하는 것 보다는 주로 국부적으로 발생하게 된다. 이런 경우는 대상재료가 작을 경우에는 劣化의 치료가 가능하지만 실제 가동중인 구조물에 적용하기는 상당히 어려운 실정이며, 이런 문제를 해결하기 위해 여러 분야에서 많은 관심의 대상이 되고 있다.

劣化를 회복하기 위한 연구의 일환으로 레이저 빔의 고온의 열원을 이용하여 劣化의 치료방법을 시도한 바가 있으며, 이들의 결과을 살펴 보면 다음과 같다.

먼저 劣化치료 방법으로 레이저 빔을 이용한 이유는 레이저 빔은 원하는 부분의 국부적인 열처리가 가능하며, 입열량이 낮아 부품의 열변형이 적고, 광학적인 방법을 써서 종래의 기술로는 접근불가능한 부분을 처리 할수 있으며, 또한 자체적인 급냉에 의해 다른 냉각제가 필요없어 불순물의 혼입을 막을 수 있는 여러가지 장점을 가지고 있으며, 특히, 레이저 빔은 대기중에서 조작이 가능하여 생산라인에 적용하기에 많은 유리한 점을 가지고 있기 때문이다.

레이저 빔 조사에 의한 劣化치료의 가능성을 검증하기 위해 그림5에서 사용한 동일 재료인 Cr-Mo강 劣化재에 레이저 빔을 조사하여 피로시험과 전기화학적 분극(electrochemical potentialkinetic reactivation, EPR) 시험을 수행하였다.

劣化재에 레이저 빔을 조사한 후 조직을 비교해 본 결과 그림12[24]에 나타낸 바와 같이 劣化재는 페라이트 및 펄라이트 형상을 띄고 있는 반면에 레이저 빔의 열원의 영향을 받은 HAZ 부분은 마르텐 사이트 형상이 나타내고 있으나 열영향을 받지 않은 부분에서는 劣化재의 원래의 조직을 그대로 유지함을 알 수 있었다. HAZ 부분에서는 고온의 열원의 영향에 의해 조직이 마르텐사이트로 변하면서 부피의 팽창과 함께 압축잔류응력이 발생하였으며 이런 잔류응력들은 균열의 진전을 지연시키는 역할을 하게 된다. 그림 13[24]는 劣化재, 회복재 및 레이저 빔 조사재를 동일조건에서 피로시험을 행한 결과 레이저 빔 조사재는 劣化재에 비해 균열진전 속도가 지연되는 것을 알 수 있다.

또한 레이저 빔 조사가 내식성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 전기화학적 분극 시험을 통하여 부식거동을 관찰한 결과를 그림 14[25]에 나타내었다. 부동태 영역에서 전류의 변화량(△Ip)을 비교하여 보면 劣化재에 비해 레이저 빔 조사재의 전류 변화량이 작게 나타났으나 피팅 발생점을 비교하여 보면 레이저 빔 조사 조건에 따라 개악되는 경우도 있었다. 따라서 레이저 빔 조사시 적절한 조건만 찾을 수 있을 경우는 내식성 향상이 가능하리라고 판단된다.

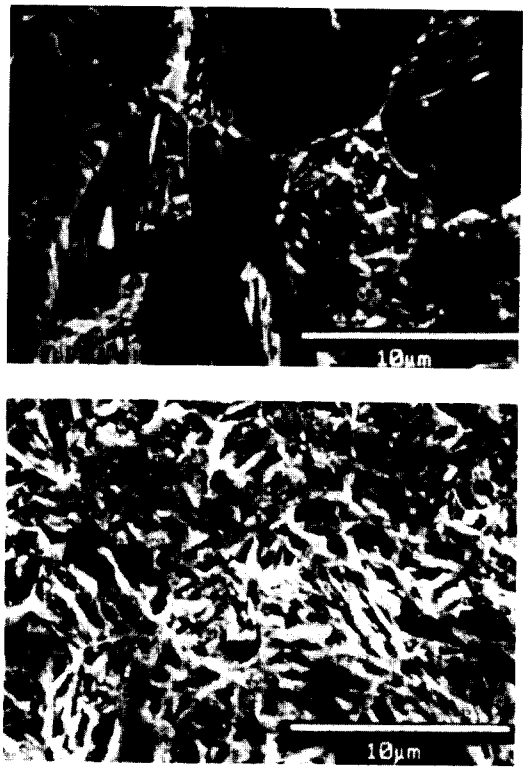


그림 12. 2¼Cr-1Mo강 열화재에 레이저 빔 조사후 열영향부와 모재의 조직

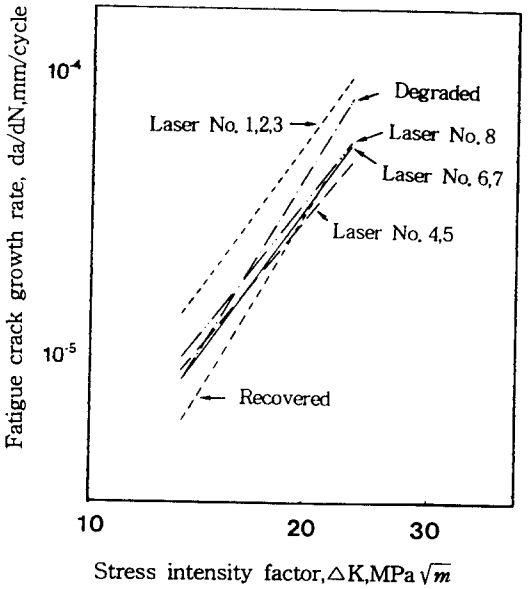


그림 13. 열화재와 레이저 빔 조사재의 △K-da/dN관계

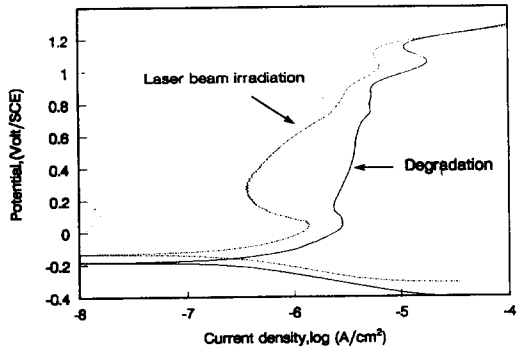


그림 14. 열화재와 레이저 빔 조사재의 전기화학적 분극시험 결과

6. 맺음말

본 고에서는 경년열화의 종류, 열화의 판정방법 등에 관한 일반사항과 열화 및 수명예측 문제를 해결하기 위한 문제점등을 기술하였고, 그 동안 연구되어진 열화 현상에 의한 재료강도의 저하 현상을 설명하였다.

또한 열화현상은 비파괴 판정만으로 수명예측이 어려우므로 시간에 따라 진행하는 열화의 진행곡선이 반드시 필요할 것이다. 이와같이 열화진행 정도를 추정하기 위해 열화재의 가속제작 방법과 레이저 빔의 고온의 열원을 이용한 열화 치료 가능성을 제시하였다.

아울러 열화치료에 대해 정도높은 방법에 제시된다면 기존 기계구조물을 안전하고, 지속적으로 사용하여 경제적인 손실을 줄일 수 있을것으로 기대한다.

참 고 문 헌

1. 北川英夫 : "劣化問題の現象と問題點" 日本金屬學會, 第 58卷, 第 8號(1986), pp.30－34
2. W.E.Erwin, J.G. Keer : "The Use of Quenched and Tempered 2¼ Cr-1Mo Steel for Thick Wall Reacter Vessels in Petroleum Refinery Processes", Welding Research Councile Bulletine(1982), 275
3. 김정기, 정세희등 : "소형펀치법에 의한 발전용 증기관의 경년재질열화 평가에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제15권, 제5호, pp 1665－1673
4. Iwadate,T., Karaushi,T., Watanabe,J., : "Prediction of Fracture Toughness KIC OF 2¼ Cr- Mo Pressure Steels from Charpy V-Notched test Results", ASTM STP 631(1977), pp. 493－506
5. 勝亦, 高田, 平野 : "壓力容器用鋼の燒きもと" しせ"い性" 壓力技術 第 19卷 3號(1984), pp. 120－124
6. Susumu Sawada, Tateo Ohhashi, Juro Watanabe : "Temper Embrittlement Characterstics of 2¼ Cr-1Mo Steel used in Hydrogenation Unlits for 30000 and 60000 hour at about 660 to 840°F", ASME/MPC(1978), pp. 167－186
7. 高野正義, 串田進一 : "壓力用器用 厚肉 3.5 Ni-Cr-Mo 鍛鋼品の燒もどし ぜえ性" JHPI, Vol. 23, No. 5(1985), pp. 223－230
8. H.Kitagawa, J.D.Kwon, etc : "Fatigue Crack growth Life Prediction of Cr-Mo steel Degraded in Long Service", J of JSME, AVol(1986), 52－480, pp. 1749－1756
9. 권재도 : "장기 사용 Cr-Mo강 열화재의 파괴인성 평가와 수명예측" 대한 기계학회논문집 제16권, 제8호(1992), pp. 1421－1428
10. T.Shimazaki : Master's thesis, Yokohama National Univ(1986)
11. C.J.McMahon, Jr : "Temper Brittleness-Interpretion Review", ASTM STP 407(1968), pp. 127－166
12. 권재도, 진영준 등 : "다단계 모의 열화재의 재료강도 평가와 수명예측", 대한기계학회논문집 제17권, 제9호(1993), pp. 2271－2279
13. Yoshitaka Iwabuchi, Nobuo Chiba, and Takashi Hatano : "Estimation of Long-Term Degradation of Cr-Mo-V Steel Castings". Material, Vol. 35－390(1993), pp. 52－57
14. 김건영, 하정수등 : "화력발전용 보일러 튜브의 수명평가", MDLP, Vol.1(1991), pp. 45－54
15. S.T.Rolfe, J.M.Barsom : "Correlation Between KIC and Charpy V-Notch Test Result in the Transition Temperature Range", ASTM STP 446(1970), pp. 281－302
16. Jae-do Kwon, Yeung-jun Jin etc : "Life Prediction and Fatigue Strength Evaluation for the Artifical Corrosion Materials" ,Fracture and Strength 93,

Ibaraki, JAPAN(1993)
17. S.Takayama : "The Calculation of Transition Temperature Changes in Steels due to Temper Embrittlement", Metallurgical Trans.A. Vol.11A (1980), pp. 1513－1530
18. Jin Yu et al : "The Effect of Composition and Carbide Precipitation on Temper Embrittlement of 2.25Cr-1Mo steel", Metallurgical Trans.A. Vol. 11A(1980), pp. 277－289
19. 權在度, 中憎根佑司, 北川英夫 : "長期使用 劣化材の 信賴性工學的疲勞壽命 豫測" 日本材料學會論文集, 第36卷, 第408號(1989), pp. 927－933
20. K.D.Challenger, A.K.Miller : "An Explanation for the Hold Perid on the Elevated Temperature Fatigue Behavior of 2¼ Cr-1Mo steel", Tran of ASME, Vol.103(1982), pp. 7－14
21. J.D.Kwon : "Life Prediction and Evaluation of Fracture Toughness in the 2¼ Cr-1Mo Degraded Materials", MDLP. Vol.1(1991), pp. 86－104
22. 村上賀國 : "壓力容器用 Cr-Mo 鋼の燒屯脆性に關する研究"(1983), pp. 69－115
23. H.Erhart et al : Metal Science. Vol.15, pp. (1981) 401－413
24. 권재도, 진영준 등 : "레이저 빔 조사에 의한 압력용기용강의 피로강도 향상 방법 개발" 대한기계학회 논문집 제18권 2호(1994), pp. 519－528
25. 권재도, 진영준, 장순식, "레이저 빔 조사에 의한 열화재의 내식성 향상 방법 개발" 대한기계학회 추계학술대회 논문집(1994), pp. 84－89
26. Li Changchun, Zhou Yawen, Li Xiping and Li Guangxia : "A Fatigue Damage Evolution Law for Laser Beam Irradiated Cylindrical Specimens" Int J Fatigue 11 No.3(1947), pp. 183－186
27. McLean, D. and Northcott. L : "Micro-Examination and Electrode potential Measurement of Temper-Brittle steel", Tran. American Socity for Metal, Vol.39(1947), pp. 109－138
28. 윤기봉 등 : "고온에서 하중유지기의 균열성장에 주기적 과하중의 영향" MDLP, Vol.2(1992), pp. 193－216