

기기구조물의 劣化와 인간의 老化

서 창 민

Degradation of Structure and Machinery, and Senescence of a Human Being

Chang-Min Suh



●서창민(경북대 기계공학과)
●1946년생.
●피로 파괴역학을 전공하며, 표면균열, 고온피로, 크리프 및 열화에 관하여 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

산업혁명 이후 20세기에 들어서 비약적인 산업발달은 인간과 기계를 불가분의 관계로 형성시켜왔다. 그러나 인간이 기기구조물을 인간생활 중심으로 제작하여 사용해 오는 과정에서 많은 문제점이 발생하게 되었다. 그 중 각종산업 구조물의 노후화로 인한 대형사고의 발생가능성, 특히 노후설비의 유지, 보수대책이 점점 문제화되고 있어, 이에 열화(degradation)에 관한 연구가 활발하게 추진되고 있다.

그럼 열화란 무엇인가? 열화란 넓은 뜻에서 사용된 재료의 각종 성질의 저하를 말하는데 사실 기기구조물에서의 열화형태는 사용환경에 따라 구조재의 필요한 성질인 강도 및 연성의 저하, 피로 크리프, 부식 및 마멸로 인해 발생하는 손상을 말한다.

이러한 열화는 철강재뿐만 아니라 옛부터 재료로 널리 사용된 목재에도 생겼다. 목재의 열화를 방지하기 위한 것은 근대인뿐만

아니라, 지금부터 4500년 전 고대 이집트인은 사원(寺院)의 석재 건축의 받침목이나 목관(木棺)은 역청물질로 방부처리를 하였다. 또 그리스시대에는 주피터신상과 같은 신상등을 보존하기 위하여 정유로 도포하기도 하고 구멍을 만들어 흐르게도 하였다.⁽¹⁾

최근, 설계수명에 임박했거나, 경제성을 향상시키기 위해 가혹한 운전상태하에 있는 발전 플랜트나 화학공장 등과 같은 고온 설비들의 수가 증가추세에 있다. 이에 따라 설비 노후화의 가속이 예상되고 있어 안전운전의 측면에서 상태진단 및 잔존수명 평가에 관한 연구가 시급한 과제로 대두되고 있는 실정이다. 그 중에서도 고온에서 장시간 운전되어야 하는 화력발전설비의 잔존수명이 감소되어 감에 따라 각 설비의 점검 지침을 구축하기 위한 각국의 노력이 집중되고 있으며 일부에서는 나름대로의 독자적인 지침이 완료되어 가고 있다.^(2,3,7)

이와 같은 기기구조물과 같이 인간도 태어나서 죽을 때까지 일정기간을 지나면 점차 노화되어간다. 물론 개개인의 생활방식, 음

식물 섭취상태, 운동정도 및 체력관리 등에 따라서 다소의 노화되는 과정의 정도 차이는 있겠지만 궁극적으로 누구나가 노화(senescence)현상을 겪는 것이다.

위와 같이 인간의 노화와 기기구조물의 열화는 그 변천과정이 같은 맥락에서 다루어질 수 있을 것으로 생각된다. 본 연구에서는 현대와 같이 고령화되어가는 사회의 문제점인 노화현상과 인간생활을 윤택하게 해주는 기기구조물의 열화(특히 고온 설비를 중심으로)에 대해 설명하고 서로간의 특성을 비교 검토하고자 한다.

2. 열화와 노화의 비교 필요성

인간은 과학문명을 발달시켜오는 과정에서 끊임없이 인간의 욕구에 최대한 잘 부응하는 기기구조물을 만들려고 노력해 왔다. 즉 보다 편리하고 안전한 자동차, 보다 인간처럼 사고가 가능한 컴퓨터, 보다 오랫동안 사용할 수 있고 각종 성질이 사용환경에 따라 적응이 가능하며 균열, 부식, 감육 등의 손상 등에 견고한 기기구조물의 제작에 심혈을 기울여 왔다.

그러나 아무리 정밀하고 세심한 고려에 의해 만들어진 구조물일지라도 설계시 고려되지 않은 결함(缺陷, defect)이 제작 및 운전 중에 발생하게 되므로 수명단축, 기능저하, 돌발적인 파괴사고 등 여러가지 문제점을 야기시킬 수 있다. 따라서 서론에서 밝혔듯이 인간의 복지를 위한 기기구조물이 되기 위하여 다음과 같은 중요한 현안을 연구 처리하여 그 대책을 마련함으로써 산업사회의 안전성을 고려해야 할 것이다.⁽⁴⁾

① 운전경과 연수의 증대, ② 설비의 대형화, ③ 효율향상을 위한 열기계의 고온·고압화, ④ 운전조건의 변화, ⑤ 설계 및 제작시 예상하지 못했던 열화 등에 의한 경년적인 손상의 진행, ⑥ 사용조건하에서 사용재료의 열화현상 판정, ⑦ 열화의 정도 파악,

⑧ 열화된 기기구조물의 사용성능 판단과 사용가부 결정 등과 같은 중요한 현안을 처리하여 산업사회의 안전성을 고려해야 할 것이다.

사실 인간도 엄밀하게 말해서 그 생리학적 구조면상에서만 고찰해 본다면 이 세상에 존재하는 그 어떠한 기계보다도 완벽하게 잘 구성되어진 하나의 고도화된 정밀기계라 할 수 있다. 따라서 기기구조물의 열화와 인간의 노화현상을 공학적인 측면에서 규명함으로써 유용한 정보를 얻을 수 있을 것이며 이에 얻어진 자료들이 실제 기기구조물의 설계 및 제작과 인간생활을 위하여 반영될 수 있다면 이것은 귀중한 데이터(data)라 하지 않을 수 없겠다. 이에 구조물의 열화와 인간노화의 메카니즘을 서로 비교 고찰해 보기로 한다.

3. 열화와 노화의 메카니즘

3.1 열화 및 노화의 원인

(1) 기기구조물의 관점

발전소, 정유 및 화학공장과 같은 고온하에서 기기구조물등을 작동시키는 설비시스템은 고온이라는 특수성과 아울러 시스템 작동상 불가피한 불규칙적인 변동하중과 주변의 부식환경 조건 등에 노출되어 있다. 이와 더불어 작은 응력하에서도 설비시스템을 구성하고 있는 재질의 내부조직은 변화하면서 점진적인 열화현상을 나타내게 된다.

이러한 재질의 열화현상은 고온하에서 원자들의 활발한 거동, 공동(vacancy) 또는 전위(dislocation) 등의 증식과 입자나 입계 등의 조대화에 따른 물질내 결함의 연속적인 축적현상이 진행되기 때문이다.

이때 가장 문제시 되는 파손기구는 크리프(creep)와 저사이클 피로(low cycle fatigue)에 의한 파손(damage)을 들 수 있다. 여기서, 크리프에 의한 파손은 어떤 레벨 이상의 응력이 작용하는 부재가 용융온도의 40% 이

상의 온도에서 장시간 사용될 때 전반적으로 발생하는 것이다.

즉 미소공동이 국부적으로 발생하고 이 공동은 점차 확대되면서 그 수가 증가하여 미소균열(micro crack)을 형성하게 되고 이것이 거시균열(macro crack)로 성장하면서 파단(fracture)에 달하게 되는 것이다. 저사이클 피로는 불균일한 구조형상부에서 열응력의 불균일한 분포에 의해 발생하는 것이 일반적이다.

일반적으로 보일러와 같은 고온기기의 설계응력의 산정은 사용조건 즉 연소 및 전열 등을 고려한 후, 재료의 물성치를 기준으로 하지만 가장 중요한 기준은 사용 온도에서 10만 시간의 크리프 파단강도의 평균치의 60% 또는 최저치의 80%로 정하고 있다.⁽³⁾

현재 기계구조물의 열화에 관련된 연구의 최대목적은 다음과 같은 연구의 배경과 필요성으로 갱년기에 달한 화력발전 설비의 수명연장에 있다.

- ① 충분한 예비 공급력과 낮은 수요증가에 따라 신설 설비의 필요성이 낮다.
- ② 신설비의 건설 코스트가 높다.

- ③ 신설비의 환경규제가 심해지고 있다.
- ④ 수명연장된 경년설비에서는 발전 코스트가 신설설비보다 10~25% 싸다.
- ⑤ 각 나라마다 공칭설계 수명이 다르다.

그러나 설계시에 고려되었던 온도여유, 재질여유, 형상여유 등이 사용중에 일어나는 재질열화 및 연소물질의 침식 등에 의해서 나날이 감소되므로 실제 사용 가능한 수명은 설계시 수명보다 상당량 감소되며 경우에 따라서는 불의의 사고를 맞게 된다.

위와 같은 공동, 균열과 같은 결함이 오랜 동안 축적되면 재료의 특성인 크리프강도, 고온피로강도 등이 현저하게 저하되는 경년 열화현상이 나타나게 된다. 이러한 부재에 대해 운전조건이 바뀌는 경우 즉 피로하중 조건이 첨가될 때 피로수명예측(prediction of fatigue life)은 상당한 위험성을 부담하게 된다.

그림 1은 지금까지 설명한 고온에 있어서의 부재의 제반 성질변화를 나타내고 있다. 고온기기 구조물의 사용중에 생기는 열화는 부하응력이 원인으로 되는 열화 즉 기계적 열화와 열적활성에 의해 발생하는 열화 즉

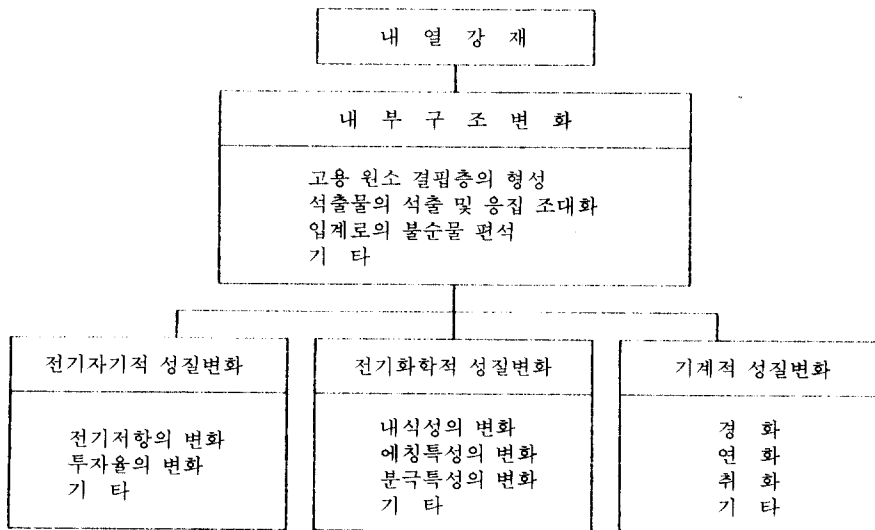


그림 1 고온에 있어서의 부재의 제반 성질변화

조직적 열화로 나눈다. 조직적 열화가 진행되더라도 응력이 작용하지 않는 한 재료는 파손까지는 도달되지 않으나 설비수명의 결정에 허용 상한치의 감소나 기계적 열화, 속도 등에 영향을 미치게 된다. 조직열화로서는 탄화물의 생성이나 편석 등에 의한 재료의 연화 또는 취화(brittleness) 그리고 고온 부식 등이 있다.

기계적 열화는 운전시간과 함께 증가하며 어느 한계치에 달했을때 부재의 파손이 일어나며 사용불가, 즉 수명을 다하게 된다. 고온기기에 있어서 기계적 열화로서는 변형과 균열 또는 균열의 전단계인 공동(void)형성 등을 들 수 있다.

이 밖에 구조물 및 재질 열화의 원인들을 알아보면 재료 및 구조물의 피로손상, 부식 손상(응력부식, 균열 및 부식피로), 외부단면의 감소에 의한 손상, 균열이나 기공(cavity)에 의한 손상, 미세구조의 열화에 의한 손상, 산화에 의한 손상(내부산화, 외부산화), 입계편석에 의한 손상, 마모 등에 의한 손상 등을 들 수 있다. 이러한 열화는 앞서도 언급했듯이 재료조직의 강도저하 및 재료의 취화, 구조물의 변형 등을 유발하며 궁극적으로 파괴를 일으키는 주요 원인이 된다.

(2) 인간의 관점

국제적으로 고령화라고 하는 것은 65세 이하의 고령자가 인구의 7% 이상을 차지할 때를 말한다. 노화는 세포 안에서 퇴행성 변화들이 일어나고 환경에 적응하는 능력과 불리한 조건들을 이겨내는 활동능력 및 예비력 등이 계속 낮아지는 과정으로서 생식기 이후 또는 성숙기 이후 일어나는 개체의 전반적인 변화를 지칭하고 있다.

즉 출생과 발육을 거쳐서 생식을 완료한 생물의 개체는 노쇠기에 들어가게 되는데 그때에는 신체를 구성하는 세포의 수가 감소되며 세포중에 포함된 수분량도 적어져서 개체 세포의 활동력이 쇠퇴하게 된다. 또한 이러

한 노화는 구조 및 기능의 변화를 총칭하는 것으로서 시간의 경과에 따라 일어나는 부가역적 퇴행성의 성질을 가진 것이라 말할 수 있다. 노화의 정의는 다음과 같이 크게 세 가지로 구분된다.⁽⁵⁾

- ① 수정에서 죽음까지의 생체의 변화(가령 현상 : aging)
- ② 성숙기 이후의 생체의 변화(노화 : senescence)

즉 노화는 환경에 대한 적응력의 저하를 가져다 주는 것으로 환경적 응력(stress)에 이기지 못하고 죽음의 확률이 늘어나는 현상이다. 여기에서 부응하는 첫번째 관심은 산업화사회가 발전함에 따른 노화과정에 대한 생물학적, 생리학적 및 의학적 접근이라 할 수 있다. 유전세포의 감퇴, 면역체계의 혼란, 생리학적 균형파괴 등 영양과 섭생들의 의학적, 영양학적 주제들이 커다란 연구의 주류를 이루고 있는 것이 현실이다.

두번째 관심은 노령기에 나타나기 쉬운 우울성 경향과 노인성 치매와 같은 정신건강 문제가 크게 부각되고 있다. 노화에 따라 지능, 판단력 등이 급격히 쇠퇴하며 노령에 따른 만성적질환, 통제능력의 상실 등이 그것들이다.

노화현상은 생물의 종류에 따라서 다종다양한 것으로 알려져 있으나 개체간에 있어서 차이가 크게 나타나며, 자연현상을 극복하는 인간에 있어서는 기능의 저하를 인공적으로 보충(補足)하는 수단이 있어서 유해성의 비중도 다른 동물과는 크게 다르다. 특히 인간에게는 주위의 사회적 환경도 노화에 차이를 미치는 큰 요인이 되고 있다.

1) 예비력의 저하

신체의 각 기능에는 운동이나 위기적 상황에 처할 때 발휘되는 최대의 능력이 있다. 최대능력과 일상활동에 필요한 능력과의 차이를 예비력(豫備力)이라고 말하는데, 노화는 이 예비력을 저하시킨다.

2) 방위반응의 저하

위험에 직면하였을 때에 대피하는 동작과, 병원체의 침입에 대한 백혈구의 방위활동 및 면역반응의 작용이 활발하지 못하게 된다. 이러한 결과는 질병에 대한 저항력의 감퇴를 나타낸다.

3) 회복력의 저하

조직에 상처가 생기거나 피로해 졌을 때 또는 질병으로 인하여 기능이 상실되었을 때 생체는 원래의 상태로 되돌아가려는 자연 회복력을 가지고 있다. 그런데 노화는 자연적으로 회복하는 기능을 저하시킨다. 같은 정도의 상처를 받았을 때에나 운동에 의한 피로시에도 노인은 젊었을 때보다 회복하는데 더 많은 시간이 걸리게 된다.

4) 적응력의 저하

생체는 생활하고 있는 주위환경의 변화에 대해서 적응하도록 노력할 뿐만 아니라 생명을 유지하면서 활동을 순조롭게 전개하도록 노력한다. 이 능력을 적응력이라고 말하는데, 노화는 이러한 적응능력을 저하시켜 노인의 경우에는 변화에 적응하면서 자기를 바꾸어 가는 것이 잘 안 되게 된다.

이상과 같은 여러가지의 능력 저하와 체중, 키 등이 감소하는 체계적인 변화에 의해서 생명의 유지는 점차 어렵게 된다고 할 수 있다.

(3) 열화와 노화에 대한 비교 및 고찰

(1)과 (2)항에서 설명한 것을 종합해 볼 때 기기구조물의 열화와 인간의 노화는 각각의 기능이 시간에 따라 점차 저하함에 있어 상호 많은 유사점이 있음을 알 수 있다. 즉 세월이 흐를수록 기기구조물이나 인간은 다 같이 각종 여러가지의 요인으로 말미암아 구조물은 열화로, 인간은 노화에 기인하여 각각의 그 생명을 다하는 것이다.

그러나 이러한 열화나 노화는 어떠한 구조물이나 인간에게 있어도 필연적으로 찾아오는 원하지 않는 결과이지만 주기적인 점검과 진단에 따라, 즉 관리하는 방법이나 각종보수 및 진단 등과 같은 노력을 기울이지 않은

경우에 비해 각각의 기능과 수명이나 생명을 훨씬 효율적으로 연장시킬 수 있다는 것은 주지의 사실이다. 따라서 이 글에서 이런 노력과 시도를 포함한 것들에 대하여 계속해서 살펴보도록 하겠다.

3.2 열화와 노화의 평가 및 방법

(1) 열화의 측정법

3.1의 (1)항에서 언급했듯이 고온 기기구조물의 손상은 크게 기계적 열화와 조직적 열화로 나누어지며 그들 열화 종류와 그 정도에 따른 측정 및 평가법이 달라지게 된다. 가장 널리 쓰이는 측정법으로는 다음과 같은 것들을 들 수 있다.

1) 경도 측정법

이 방법은 경년열화 정도를 현장에서 가장 간단히 측정할 수 있는 방법으로서 대표적인 비파괴검사법(NDI; non-destructive inspection)에 속한다. 이 방법은 부재의 현상태를 정성적으로 평가하기에는 가장 적합한 방법으로서, 터빈의 재료로 많이 사용되는 CrMo-V강의 수명예측법으로 적용시킨 보고가 있다.⁽⁷⁾

2) 전기 저항법

이 방법은 고온환경하에서 크리프손상이 증가됨에 따라 탄화물의 조대화, 시그마상의 석출 등의 조직변화가 전기저항의 변화를 야기시킨다는 점에 주목한 시험방법이다.

3) 초음파법

초음파법도 NDI법의 하나로서 부식 등에 의한 두께감소를 측정하기 위한 것과 재료내부의 손상도를 측정하기 위하여 이용된다. 손상도를 측정하는데 있어서는 주로 음속측정법, 초음파 스펙트로 스코프를 이용한 방법들이 알려져 있다. 음속측정법은 크리프 공동의 생성량의 증가와 더불어 초음파 속도가 감소하는 것을 이용하는 것으로서 제1회 저면 에코(echo)와 제2회 저면 에코간의 전파시간을 측정하고 전파거리로부터 전파속도를 구하게 되어있다.

4) 레플리카(Replica)법

현재 가장 널리 사용되고 비교적 체계적이고 표준화가 시도된 방법이다. 이 방법은 크리프손상을 받고 있는 재료의 입내에 생성되는 미소기공(cavity) 관찰, 0.1mm 이하의 미소균열 조사에 대해서는 표준화가 되어 있다. 독일에서는 각 상태에 따른 폐기 여부의 결정, 정기적으로 비파괴 검사를 하는 기간의 설정, 손상단계의 판단기준 등이 규격화 되어 있다.

5) 전기 화학적방법

이 방법은 최근들어 일본, 도호쿠 대학에서 행하고 있는 연구로서 EMAC(electro chemical materials characterization)라는 새로운 용어로 명칭되어진 방법이다. 이 방법은 미시적 재료의 조직변화를 전기화학적 변화로써 나타낸 것으로 손상의 종류에 따라 적절한 손상검출 용액중에서 분극곡선 또는 전극 임피던스(impedence) 측정을 통하여 손상도와의 관계를 명확하게 하는 것이다.

6) 입계 부식법(GEM; grain boundary etching method)

고온부재를 장시간 사용할 때 재료의 입계에 인, 주석, 망간 등 불순물이 편석되는데 이를 피크린산 포화수용액으로 부식시키면 입계의 부식도와 입계 편석량 사이에는 일정한 상관관계가 있음을 응용하여 재질의 열화상태를 평가하고자 하는 것이 입계부식법이다.

즉, 잘 연마된 실부재를 특정의 부식액으로 에칭시킨 후 취화된 조직입계의 폭과 깊이를 측정하여 손상도와의 관계를 밝히는 것이다. 정성적인 평가법이지만, 간단히 측정할 수 있다는 점과 정밀검사의 필요성을 판가름하는 데에는 매우 유용한 방법으로 여겨지며 실제 현장응용의 예도 보고되고 있다.

7) 기타의 방법

크리프 파단시험법, 소형편치시험법으로 발전용 증기관의 경년재질열화평가에 관한 연구가 사용한 예가 있음.⁽⁷⁾

(2) 인체의 건강상태 진단

1) 수명의 한계

동물의 종류에 따라 수명이 각기 다르나, 일반적으로 장수하는 동물은 몸이 크고 성숙하는데까지 걸리는 시간이 길다. 코끼리의 체중은 약 3.800 kg이며 수명은 약 100년이다. 개의 경우는 약 10 kg의 체중으로 수명은 10년 정도이다. 몸무게와 수명간의 관계에 있어서 인간은 예외이다. 왜냐하면 인간은 발달된 대뇌기질을 가지고 있고 고도의 기술을 개발하고 또한 복잡한 사회를 만들어 자연환경을 극복해 왔다는데 있다. 인간의 수명한계에 관해서는 많은 학설이 있으나, 110세에서 120세 정도가 정설로 되어 왔다.

2) 대표적인 노화의 발생설에 대해서 정리하면 다음과 같다.⁽⁶⁾

(a) 소모설

물체는 장기간 사용하면 고장이 나거나 닳게 되어 적어지기도 한다. 이와 같이 장기간의 생활에서 생체의 심신이 소모되는 것이 노화라고 하는 설이다. 그러나 생물은 무생물과는 달라 소모에 대해서 보수, 재생을 반복할 수 있는데 소모가 이러한 보수, 재생의 기능범위를 초과하여서 회복이 어려워지는 단계에까지 도달한 상태를 노화라고 말한다.

(b) 대사산물침착설

세포의 신진대사 결과 세포내와 세포간질에서 발생한 불용성 산물이 침착해서 세포의 대사기능에 장애를 주고 또한 세포를 노화에 이르게 하는 설이다. 이러한 산물의 대표적인 것이 lipofuscin이라고 불리는 소모색소로 때로는 조직량의 30%에 이르는 경우도 있다. 그러나 이 소모색소의 생성기전 및 정확한 장애작용은 아직 불명확하며 색소 침착은 노년기 이전부터 일어나는 것으로 이것이 절대적으로 노화의 원인이라고 생각하기는 어렵다.

(c) 스트레스설

노화라고 하는 것은 개체가 생애기간에서 받은 스트레스의 축적에 의해서, 태어나면서부터 가지고 있던 적응작용을 위하여 에너지

를 소비해버림에 따라 수명이 단축된다는 설이다. 그러나 수명의 단축은 노화와 동일하지 않다. 스트레스와 상관없는 노화도 있으며, 특정한 스트레스가 아닌 일반적인 스트레스로는 수명의 단축이 일어나지 않는다는 실험보고도 있어 스트레스만으로 노화를 설명하기에는 무리가 있다.

(d) 결합조직설

생체내의 결합조직은 식물의 뿌리와 같이 생활에 필요한 영양물질을 모세혈관 및 임파선을 통해서 실질세포에 운반시키는 기능을 가지고 있다. 결합조직에서의 혈류량은 청년기부터 감소되기 시작하고 그에 따라 임파계도 점차 퇴행하여 물질의 교류기능이 저하되어 결국 생체의 영향저하를 가져다 주어 노화에 이르게 한다는 설이다.

(e) 돌연변이설

돌연변이는 체세포와 생식세포의 2개 세포에서 일어난다. 수만개의 이르는 인간의 유전자는 46개의 염색체 내에 존재하고 있는데, 이 유전자는 어떤 작은 염색체 1개에도 수백개 이상이 포함되어 있다. 유전자 가운데 1~2개에만 이상이 생겨도 유전에 영향을 준다. 더구나 1개의 염색체에 이상이 생기면 그 영향은 대단히 크다. 돌연변이설은 체세포내의 염색체에 무엇인가 돌연변이가 일어나는 경우에 노화가 생긴다는 설로 많은 학자들의 지지를 받고 있는 설이다. 염색체의 이상이 가령(aging)과 더불어 증가한다는 것과, 수명이 짧은 동물에서 염색체의 이상이 많다는 것은 널리 알려져 있는 사실이기 때문이다.

(f) 자기면역설

일반적으로 면역반응은 이물질의 단백질과 조직이 항원이 되어서 면역반응을 일으키는 것을 가리키는데 고유의 세포가 항원이 되어 체내에서 면역현상을 일으키는 것을 자기면역설이라고 한다. 세포의 돌연변이 또는 다른 원인으로 유전자가 변화하게 되면 다양한 면역반응이 일어난다.

자기면역설은 자기 면역반응이 생체에 불리한 결과를 주어 노화를 불러 일으킨다는 설이다. 머리가 하얗게 되는 백모화 및 치아 탈락을 자기면역설로 설명할 수 있다고 하는 주장도 있다. 그러나 자기 면역질환이 여자에게 많은데도 불구하고 여자가 장수하는 사실을 보면 의문의 여지가 많은 설이다.

이상과 같이 노화는 대단히 복잡한 과정을 가진 현상이다. 위의 대표적인 노화에 관한 학설들은 모두 노화의 본질에 가까운 것이나, 단독으로 노화를 설명해줄 수 못하고 있다. 이 분야에 관한 연구는 현재 급속한 발전을 보여주고 있어 가까운 장래에 보다 명확한 이론이 대두될 것으로 보인다.

3) 기능면에서의 변화

(a) 가령(加齡, aging)과 잠재력

인간이 일을 수행할 수 있는 능력을 일의 잠재력(work potential)이라고 말하는데, 일의 종류에 따라서 능력이 높아지는 연령은 각각 다르다. 일을 수행하는 능력이 최고조에 도달하는 연령은 음악이 25~29세, 물리학이 30~39세, 문학과 기술에서는 35~39세, 의학은 40~44세, 정치가는 50~54세로 말하고 있다.⁽⁵⁾

이와 같이 일의 종류에 따라서 절정에 이르는 연령이 각각 다른 것은 생리적인 기능의 상태와 지식, 경험의 축적이 크게 작용하기 때문이다. 일의 잠재력은 그림 2에서 보여주는 바와 같이 젊은시절에서부터 점차 상

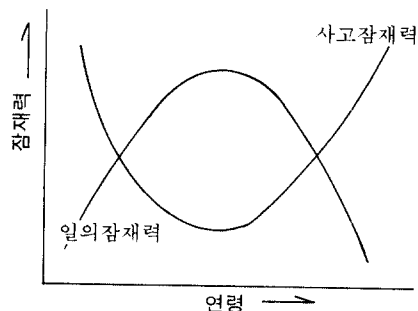


그림 2 잠재력의 연령변화

승하기 시작하여 중·장년기에 이르러서 절정에 도달하며, 그 후에는 가령과 더불어 감소하지만 사고잠재력은 오히려 가령과 더불어 증가함을 알 수 있다.

(b) 가령과 생리적 기능

종합적인 생리기능은 20대까지 상승을 계속하다가 그 후부터는 저하하게 된다고 한다. 생리기능이 감퇴하는 노화의 속도는 성장기에 성장하는 속도의 약 1/6에 해당한다. 그러나 각각의 생리기능의 저하는 동일하지 않다. 일찍이 현저한 저하를 보이는 기능도 있으며 고령에 달해서 처음으로 저하하기 시작하는 기능도 있다. 표 1에 나타난 바와 같이 시각과 청각 기능이 가장 일찍 노화의 영향을 받으며 그 후는 점차 단순한 운동의 기

능이 저하하며 최후에는 근육의 협조응(協調應) 및 보행의 복잡한 통제조절을 필요로 하는 기능이 노화에 의해서 저하된다.

인간이 자신의 노화를 느끼게 되는 최초의 현상은 눈의 원근조절능력의 저하현상으로 40세 전후부터 자각하기 시작하며 50세 전후에 가장 저하된다. 이는 노화에 의해서 수정체가 경화(硬化)하여 조절이 쇠퇴하는 것으로 되어 있는데 그림 3에서 보여준 바와 같이 수정체의 조절을 맡은 모양체근의 위축에 의해서 조절이 저하된다. 즉, 감각기의 기능 저하는 조기의 가령변화를 보기 위한 민감한 변수로 여겨지고 있다.

그림 4의 근육의 힘, 즉 근력(筋力)은 20~65세에서는 유의한 변화가 없다고 하고 있

표 1 연령별 생리적 기능의 감소

연 령	유의한 차이를 가져다주는 기능
35~39	원거리시력, 근거리시력, 청력, flicker치
40~44	눈의 굴절력, 단백질, 최저혈압, 출생회수
45~49	좌우의 쥐는힘(악력), 반응시간, 보행속도, 손바닥 피부의 전기 저항
50~54	수면시간, 야뇨회수, 최고혈압
55~59	등의 근력(허리근육의 힘)
60~64	피부의 탄성
65~69	없다
70~74	근육의 협조응, 보형편차, 손바닥의 동통인내시간

주) 20~24의 연령계층을 기준으로 한 것이다. 표본은 농촌의 남녀 100명

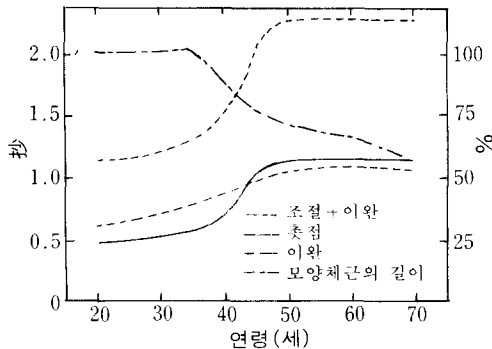


그림 3 눈의 근절력의 변화
*모양체근의 길이는 20세를 100으로 한 %이다.

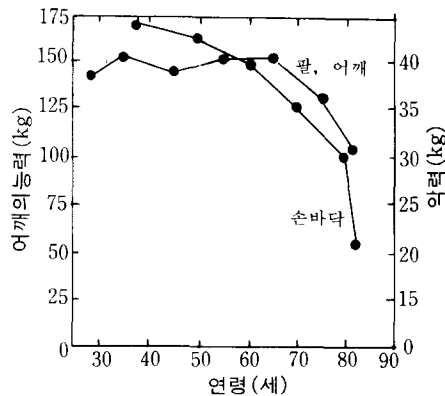


그림 4 근력의 가령에 따른 변화

으나 근육의 종류에 따라서 다르게 나타나고 있다. 가장 현저한 저하가 나타나는 것은 손바닥 근육의 힘으로 악력(握力)은 20세부터 누진적으로 저하가 진행되어 50세에서는 유의한 감소를 나타낸다.

그림 5과 같이 몇 명의 연구자에 의해서 발표된 신체의 각기 다른 기능의 가령에 의한 변화를 가지고 30세의 추정치를 100으로 하여 정리하였다.⁽⁵⁾ 이 자료에 의하면 신경이 정보를 전달하는 속도(신경전도속도), 신체의 안정상태에서 측정하는 생명유지에 필요한 에너지 대사량(기초대사율)과 세포내에 포함된 수분량(세포의 수분함수량)은 고령자에게는 약 20% 정도 가깝게 감소하고 있다. 또한 체 표면적당 심박출량인 심계수는 심기능의 종합지수로 사용되는데 이것 또한 고령자에게서는 약 40% 정도 감소하고 있다. 폐의 기능중 폐활량은 고령자에게서 약 40% 정도 감소하며, 일정시간 최고로 노력해서 환기가 가능한 양(최대환기량)은 약 60% 정도의 감소를 보인다.

폐의 기능과 함께 가령에 의해서 현저히 저하하는 신기능(腎機能) 가운데에는 사구체에서 혈액성분이 요성분으로 이행하는 비율(사구체여과율)과 신장을 흐르는 혈액량(신장혈류량)이 50% 가량 감소하는 것으로 나타나고 있다. 저녁 취침에서 아침 기상까지의 야간 배뇨회수는 문진으로 평가할 수 있는 간단한 노화지표이다.

그림 6에 의하면 야간배뇨 회수가 4회 이상이 되는 경우는 남성에 있어서는 60대 9.6%, 70대 14.9%, 80대 19.4%, 여성에 있어서는 60대 6.5%, 70대 13.9%, 80대 18.7%로 남성이 여성보다 많으나 가령과 더불어 여성이 남성보다 더 현저하게 증가함을 알 수 있다.

4) 노화예방과 그 대책

이상과 같이 노화현상이 생긴 고령자는 작업상 문제점으로 기초적 생리기능(회복력) 약화, 감각기능(시력, 청력, 촉각) 약화, 사

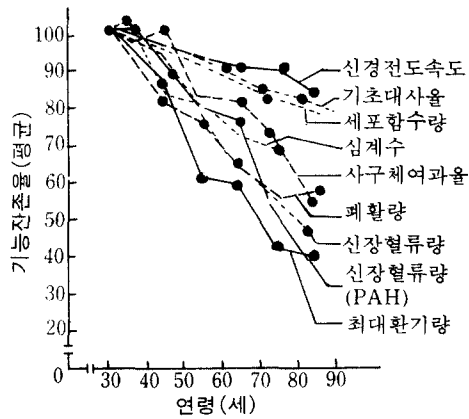


그림 5 가령에 따른 각종 기능저하

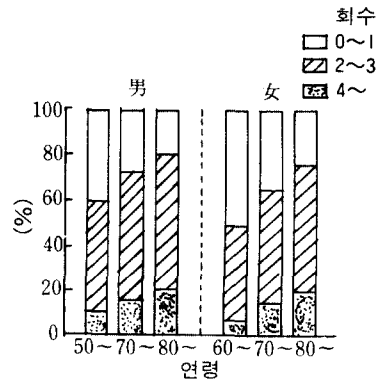


그림 6 야간 배뇨 빈도의 변화

고능력(판단력, 학습능력, 기억력, 비교판단력)의 저하, 처리기능(작업속도, 민감성, 정확성, 평형감각)의 저하 등을 들고 있다.⁽⁶⁾

그러면 고령자의 에너지를 어떻게 발휘시키는가? 이것이 기술, 시스템, 경영이다. 고령자 위주의 직장을 적극적으로 개척하는 것이 필요한 반면, 고령자 예비군은 기력과 체력을 키워서 사회적으로 통용되는 기술사 및 중소기업 진단사 등의 전문기술, 세무사, 회계사 등의 자격을 획득하는 것이 사회 현신에 필요한 것이다.⁽⁶⁾

물론 노화현상은 개인차가 크며 유전적 영향도 있지만 요인이 크게 작용하며, 과로,

음식물, 영양, 음주, 생활양식, 질병감염, 운동량, 활동량 등에 따라 영향을 받게 된다. 따라서 생활방법의 개선으로 노화예방이 어느 정도 가능하다고 본다. 예를 들면 정기적인 건강진단, 식사조절, 강한 육체노동과 감정적 자극의 감소, 적당한 운동, 취미생활, 여행, 휴식 등의 활동이 필요하다.

(3) 기기구조물의 수명예측과 인간의 건강 상태

기기구조물의 잔존수명을 예측, 평가한다는 것은 공업재료의 각종성질의 사용환경에 따라 변화하는 현상을 규명하고 이들 성질변화에 따라 구조물의 열화상태와 어떠한 결함이 어떻게 잔존하며 구조물의 안전운전과 경제성에 어떻게 영향을 주는가를 예측평가하는 기술이다.

기기구조물의 수명을 정의하는 데는 크게 공업적 수명과 재료적수명으로 나눌 수 있다. 전자는 간단한 보수작업으로 기능회복을 기대할 수 없을 정도로 손상이 진행되었거나 일시적인 기능회복을 기대할 수는 있으나 항구적이 아니고 보수를 반복할 필요가 있다고 예정되며 그 이점이 작다고 판단되는 설비수명을 일컫는다.

이에 반해 재료적 수명은 균열이 발생, 성장하여 한계치수에 달했을 때 그 수명치라고 평가하고 재료강도 및 연성의 저하가 진행하여 구조재료로서 만족하지 못할 때의 수명을 말한다. 따라서 잔존수명의 예측 및 평가 기술의 대상이 되는 것은 재료적 수명이며 균열발생 전과 및 강도, 연성저하가 그 내용이다.

수명(열화)예측 기술은 일반적으로 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 하나는 재료의 표준 물성치와 운전이력을 근거로 균열의 발생과 거동을 해석에 의해 산출하는 간접평가법이며, 또 하나는 사용중인 설비로부터 얻어진 실상태의 자료로부터 수명을 예측하는 직접 평가법(비파괴법 또는 파괴법)이 있는데 최근 비파괴적 방법의 연구가 활발히 수행되

어 생산시설과 모든 기기구조물을 포함하는 광범위한 산업활동에 적용확대되고 있다.

실제로 고온에서는 상온의 피로손상에 추가로 크리프 및 분위기손상을 받기 때문에 피로수명이 상온에 비해 상당히 감소한다. 특히 발전설비와 같은 고온기기에서 부재에 응력이 작용하지 않아도 재질이 시간이 경과함에 따라 열화되어 가는 것이 상온기기의 잔존수명 평가와 다른 점이다. 고온기기의 잔존수명 추정에는 어느 시점까지 재료의 내외부에 발생한 재질열화 정도의 계측, 그리고 기온전 이력에서 구한 수명소비율 및 운전예상이력에 기인한 잔존수명평가라는 두 가지 영역에서 나누어진다. 이 두 영역의 상관관계는 그림 7과 같다.

위와 같이 수명예측 및 평가기술은 특정한 학문적 분야가 아니고 보전 및 신뢰성공학을 근거로 하여 각종분야를 종합하여 설비를 얼마나 신뢰성있고 경제적으로 운영하느냐 하는데 주 목적을 두는 것이다. 즉 일반적으로 기기구조물의 고장 및 열화현상을 예측하고 여기에 대책을 세우는 기술이라고 말할 수 있으므로 종종 사람을 다루는 의학과 비유하여 설명하면 이해가 쉬워진다.

비파괴 검사법을 통한 기기구조물의 상태 진단기술은 각종 첨단 의료장비를 이용하여 인체의 결함상태를 측정하는 것에 비유되며 기기구조물의 파괴해석기술은 사후에 사인을 규명하기 위한 부검수술에 비유된다. 또 기기구조물의 수명예측 기술은 첨단의료장비와 전자현미경을 이용한 병원의 종합검진을 총합한 전문의의 판정경험과 예지를 필요로 하는 기술이라 할 수 있겠다.

이상에서 알아본 바와 같이 구조물의 열화상태를 측정하고 수명을 예측하는 것은 일련의 전문의들이 담당환자들의 건강상태를 여러가지 방법으로 조사하고 그 자료를 근거로 대상이 된 환자의 여명을 추정하는 것과 흡사하다고 하겠다. 다만 전자는 공학자들의 기기구조물에 대한 평가이고 후자는 전문의

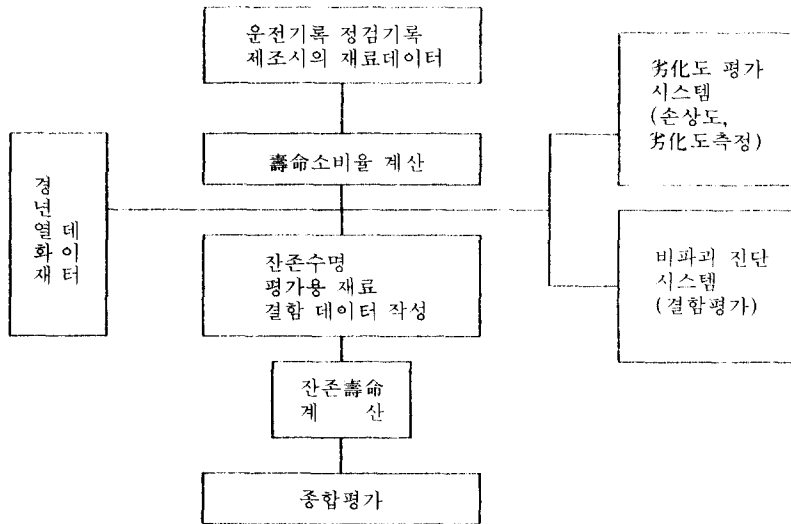


그림 7 수명평가에 있어서의 열화도 측정의 시기

들의 인간에 대한 조치일 따름이다.

그러나 무엇보다도 중요한 것은 일단 설계 제작된 기기구조물로 소기의 목적을 달성 하면서 최대한 사용기간을 연장시키는 것은 그 운전 책임을 담당하는 인간이다. 또한 첫 울음과 함께 모체로부터 태어난 인간이 그 생명을 다할 때까지 생존기간을 건강하게 유지시키는 것은 자기자신이 인내, 노력, 정기적인 검진과 전문의의 상담에 의한 것이라 하겠다.

따라서 우리가 이러한 열화 및 노화의 현상을 미연에 방지하고 최대한 지연시키기 위해 연구, 노력을 해야 하는 것은 너무도 당연한 것이다.

3.3 열화의 방지책과 노화의 억제책

위의 설명과 같이 과학문명의 발달과 더불어 인간의 생활영역에는 화력발전설비나 석유화학설비 등과 같이 고온·고압하의 장시간의 운전이력을 갖는 설비가 나날이 증가하고 있으며 이들 고온, 고압설비의 부재는 고온역에서 장시간 사용된 결과 파괴인성(fracture toughness)이 현저히 저하하는 재

질열화 현상이 문제로 되고 있다. 이들 장치의 안정성에는 극히 위험한 상황을 초래할 수도 있다는 것은 자명한 사실이다.

따라서 우리는 이러한 열화의 방지책에 대한 확립을 위한 기초단계로서 첫째, 구조부재의 열화현상을 파악하는 손상 평가기술의 개발과 또한 기기구조물의 파손방지 및 수명 예측, 평가기술은 학문적으로나 산업분야에서나 종합적이라는 사실을 깊이 인식하고 제작자, 설계자, 사용자, 연구자, 기술자 등이 서로 긴밀한 협력체제를 구축하여 지속적으로 설계, 운전, 시험, 검사, 보수 등 각자의 전문분야를 조화있게 연구개발하여 항상 열화의 상태를 체크하여 발견된 열화재료는 열처리나 기타 적당한 방법으로 원래의 상태로 회복시키는 것이 최상의 열화방지책이라 하겠다.

이와 마찬가지로 인간의 노화현상 역시 유전적요인 등의 개인적인 차이가 크지만 환경적 요인이 크게 작용하며 과로, 음식물, 영양, 음주, 생활양식, 질병감염, 운동량, 활동량 등에 의하여 크게 영향을 받게 된다. 따라서 자신의 생활방법의 개선으로 노화현

상을 지연시킬 수 있다고 본다. 즉 항상 정신적으로 흥분이나 당황하지 말고 마음을 안정시키며 정기적인 건강진단, 식사조절, 심한 피로와 감정적 자극의 감소, 적당한 운동 및 취미생활, 여유있는 휴식 등의 활동이 최상의 방지책이라 하겠다.

3.4 사후처리

3.3에서는 열화와 노화를 방지하기 위해서는 철저한 관리시스템의 필요성을 강력히 요구하였다. 그러나 아무리 인간의 늙음이나 기기구조물의 노후현상을 미연에 방지하려 하여도 우리 인간이 영원히 젊음을 유지할 수 없듯이 기계설비 또한 열화현상을 100% 방지하는 것은 불가능하다. 만약 예기치 않은 돌연적인 사고로 말미암아 구조물의 파괴를 유발하였을 경우는 어떻게 할 것인가!

어제까지 건강했던 사람이 갑자기 사망하게 되는 경우를 흔히 볼 수 있다. 그러한 경우에 주위 가족들이나 친지 등은 의료진들에게 의뢰하여 정확한 사인규명을 위해 첨단 의료 기술을 이용하여 부검이나 검시 등으로 그 원인을 알아내고 그와 유사한 또 다른 불행을 막기 위한 자구적인 노력과 그 자료를 데이터 베이스(data base)화시키는 것이 무

엇보다 중요할 것이다.

기기구조물에서도 비단 열화에 의한 파괴뿐만 아니라 역사적으로 적지 않은 돌연적인 파괴사고를 위시한 많은 누출사고 및 손상사고의 사례를 미래의 관리체계와 설계 자료로 이용하기 위해 데이터 베이스화시킴과 정보교환이 절실할 것이다. 이렇게 함으로써 이와 유사한 불행한 경우를 최대한 줄일 수 있을 것이다.

따라서 불행하게 이러한 사고를 당했을 때는 지금까지 설명하고 열거한 각종 지식을 총동원하여 철저한 원인분석을 실시한 자료를 저장시키고 지금까지의 과학지식의 범위 밖의 내용이라면 세심한 실험연구를 통하여 이후 그와 유사한 사고는 물론이거니와 그외의 다른 파괴까지도 감지해낼 수 있는 새로운 방법과 노하우(know-how)가 축적되도록 전문가 간의 산, 학, 연구소 간의 많은 노력과 협력이 필요하겠다.

4. 맺음말

각종 기기구조물이나 인간은 세월이 흐를수록 원래 그들이 가지고 있는 최적의 상태에서 점차로 열화 및 노화되어 간다. 이와

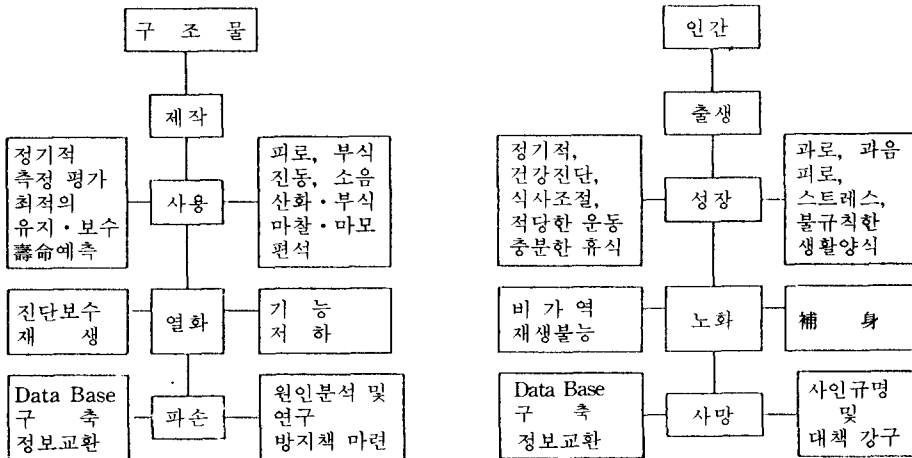


그림 8 기기구조물과 인간의 최종비교

더불어 가혹한 주변환경이나 무리한 작동 및 활동으로 인한 피로, 관리 및 유지의 소홀함 등과 같은 이유가 열화 및 노화현상을 더욱 가속화시키고 있다. 그림 8에 서로간의 연관성을 정리하여 나타내고 있다.

특히 막대한 자금으로 여러가지 목적으로 설비된 기계구조물이 노후화되어감에 따라 유지, 검사 및 보수의 허로 인한 대형사고의 결과는 국가경제뿐만 아니라 수많은 인명의 위험이 뒤따르므로 그것들의 방지책으로는 정확한 수명예측을 위한 기술적 터득과 더불어 데이터의 축적, 신뢰성 있는 평가방법들의 개발에 관한 투자와 연구가 시급한 실정이며, 인체의 노화에 대해서도 인적자원의 관리면에서 투자와 연구가 긴요하다는 것은 설명의 여지가 없다.

이러한 목적을 위해서는 각 전문분야의 학술적 교류와 더불어 산·학·연의 공동연구를 통한 지속적 연구노력이 계속되어야 할 것이다.

참고문헌

(1) Nishimoto, K., 1979, "Wood Deteriora-

tion and Its Prevention," Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 28, pp. 1022~1028.

(2) 권재도, 1991, "재질열화가 표면균열진전에 미치는 영향과 수명예측에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 제31권, pp. 921~927.

(3) 정희돈, 1991, "고온설비의 경년 열화와 측정법, 대한기계학회지," 제31권, pp. 251~260.

(4) 김건영, 1990, "기계장치의 잔존수명예측 및 평가," 대한기계학회지, 제30권, pp. 163~171.

(5) 조유향 편저, 1989, "노인보건," 현문사.

(6) 에수트란트, 로 다알, (김진원 역), 1982, "운동생리학," 학문사.

(7) 과학기술처, 1991, "시험평가 기술개발 (고온 사용설비 파괴방지 기술개발)," KSRI-91-88-IR.

(8) Ozaki, S., 1979, "Mature-Engineering in Machinery Industry," Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 82, pp. 514~520. 