

KOSHA GUIDE

M - 146 - 2012

고령화 설비의 손상평가와  
수명예측에 관한 기술지침

2012. 6.

한국산업안전보건공단

## 안전보건기술지침의 개요

- 작성자 : 한국산업안전보건공단
- 개정자 : 안전연구실
  
- 제 · 개정경과
  - 1998년 7월 기계안전분야 기준제정위원회 심의
  - 1998년 9월 총괄기준제정위원회 심의
  - 2012년 4월 기계안전분야 기준제정위원회 심의(개정)
  
- 관련규격 및 자료
  - 신판 비파괴검사공학(일, 산보출판)
  - 미국석유협회규격 (API 510 : Pressure Vessel Inspection Code)
  
- 관련 법규 · 규칙 · 고시 등
  - 산업안전보건 기준에 관한 규칙 제2편 제1장 제1절 제91조(고장난 기계의 정비 등)
  
- 기술지침의 적용 및 문의

이 기술지침에 대한 의견 또는 문의는 한국산업안전보건공단 홈페이지 안전보건기술지침 소관 분야별 문의처 안내를 참고하시기 바랍니다.

공표일자 : 2012년 6 월 20 일

제 정 자 : 한국산업안전보건공단 이사장

## 고령화 설비의 손상평가와 수명예측에 관한 기술지침

### 1. 목 적

이 지침은 산업안전보건기준에 관한 규칙(이하 “안전보건규칙”이라 한다) 제2편 제1장 제1절 제91조(고장난 기계의 정비 등)의 규정에 따라 공장에서 오랜 기간 사용되고 있는 설비의 안전성·신뢰성을 확보하기 위하여 손상을 평가하고, 설비의 수명을 예측하기 위한 지침을 제시하여 설비의 고령화로 인한 중대산업사고를 예방함을 목적으로 한다.

### 2. 적용범위

이 기술지침은 고령화 설비중 압력용기, 회전기계 및 배관 등에 적용한다.

### 3. 용어의 정의

(1) 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다.

- (가) “고령화 설비”란 누계운전시간이 10만 시간 이상 경과하였거나 기동·정지회수가 2500회 이상인 설비를 말한다.
- (나) “경년손상”이란 해가 거듭되면서 발생하는 손상으로, 재료가 고온에서 장시간 가열 및 담금질 등에 의하여 재료 전체의 특성이 변화하고, 특히 파괴인성 및 충격 에너지의 변화로 인하여 취성이 현저하게 나타나는 현상을 말한다.
- (다) “열시효취화”란 운전온도 300℃의 비크리이프 영역에서 장시간 가열에 의한 취화를 말한다.
- (라) “크리이프(CREEP)”란 일정온도에서 일정한 하중이 작용하는 경우에 시간의 경과에 따라 재료의 변형이 증가하는 현상을 말한다.

(2) 그 밖에 이 지침에서 사용하는 용어의 정의는 이 지침에 특별한 규정이 있는 경우를 제외하고는 산업안전보건법, 같은 법 시행령, 같은 법 시행규칙, 안전보건규칙 및 고용노동부 고시에서 정하는 바에 의한다.

## 4. 설비수명 일반

- 4.1 고령화 설비를 본래의 수명한도까지만 사용하지 않고, 가능한 한 수명연장을 도모하여 설비의 안전성, 신뢰성을 확보할 수 있는 방법을 이 지침에서 한 예로 제시한다.
- 4.2 현실적으로 장치·기기의 설계 수명은 30 ~ 40년이 채택되고 있으나 설비의 정확한 보수, 교체를 위하여 정기 검사시 마다 손상평가를 실시하고 남은 수명을 예측한다.
- 4.3 설비가 매 정기검사에서 이전의 검사결과와 거의 동일한 형태의 성능이 보증되면 높은 안전성 및 신뢰성이 유지된다고 할 수 있으나, 해가 거듭되면서 손상에 의한 장치·기기의 수명이 단축되므로, 사전에 보수 및 교체를 철저히 실시한다.
- 4.4 경년손상의 검출·평가는 가능한 한 설비에 손상을 주지 않도록 하기 위하여 비파괴 검사방법을 채택한다.
- 4.5 고령화 설비의 보수관리를 위하여는 발전소, 화학공장, 석유정제공장 등의 장치 및 기기에 사용되는 재료에 관하여 손상의 실태와 비파괴 검사, 평가의 방법, 그리고 남은수명예측의 방법을 제시한다.

## 5. 수명의 지배인자

- 5.1 설비의 수명예측은 최초 설계시뿐만 아니라, 사용기간 중에도 지속적으로 실시하여 최신의 발전된 기술을 도입하여 예측의 정확도를 기하여야 한다.
- 5.2 재료의 결함과 경년손상이 수명의 지배인자이다. 현재 설치된 기기에는 결함이 없는 것이 원칙이나, 공업재료는 대개 비금속 개재물, 편석 등의 재료결함을 내포하고 있으며, 기기의 사용기간 중에도 부식피트, 마멸, 피로균열, 응력 부식균열 등의 결함이 발생하고, 또한 그 결함은 재료결함 및 제조시의 결함을 시작점으로 하여 진전된다는 사실을 주지하여야 한다.

5.3 모든 결함을 파악하여 수명예측을 하는 것은 거의 불가능하므로, 일반적으로 설계시에는 결함을 고려하지 않는 것을 원칙으로 한다. 설계시의 수명예측은 재료 및 구조가 건전하다는 것을 전제로 한다.

5.4 피로 및 응력부식균열은 국소파괴현상이며, 재료 전체가 손상을 받지 않고 일부 구역에서 균열이 발생, 진전되어 파괴에 이른다.

5.5 온도 이력에 직접 관련되지 않는 경년손상으로는 수소취화 등이 있으며 그 특징은 다음과 같다.

- (1) 해가 거듭되면서 재료 전체의 취화가 진행된다.
- (2) 반드시 균열을 수반하지는 않는다.
- (3) 부하응력과 취화를 가속하는 경우가 있다.
- (4) 다른 요인으로 균열이 발생하는 경우에는 취화가 한계결함치수의 현저한 감소를 가져온다.

5.6 실제로 경년손상이 문제가 되는 것은 피로 및 응력부식균열 등의 복합 효과이다. 크리이프의 경우에는 기공이 발생, 성장하여 재료 전체의 손상에 부가하여 국부적으로 균열이 발생하여 진전된다.

5.7 경년손상은 좁은 의미에서 재료 전체의 취화이며, 넓은 의미에서 균열을 수반하는 현상을 포함하는 것으로 전자는 경년열화, 후자는 경년손상으로 구분한다.

## 6. 경년손상

### 6.1 경년손상의 실태

6.1.1 경년손상은 재료의 사용환경, 특히 온도에 따라 달라지는데 한 예를 들면, 경수로 압력용기, 노심 구조물 및 배관에서 문제가 되는 경년손상을 <표 1>에 나타낸다.

- (1) 2상스테인리스강의 475℃취화는 크롬, 리튬 같은 미세 체심입방격자상이 페라이트상 및 오스테나이트/페라이트 결정 입계에 석출하는 것이 주된 원인이다.
- (2) 경수로의 운전온도(300℃)에 가까운 온도 범위에서 2상스테인리스강은 열시효에 의해 인성이 저하된다. 강종의 탄소함유량과 질소함유량이 영향을 미친다.

<표 1> 경수로 압력용기, 노심 구조물 및 배관의 경년손상

현 상	내 용
2상스테인리스강의 475℃취화	크롬 리튬 미세 체심입방격자상의 석출
2상스테인리스강의 열시효(300℃)	탄소, 질소 함유량의 영향
저합금 페라이트강의 담금질 취화	인(P), 주석(Sn)의 입계편석
저합금 페라이트강의 열시효(300℃)	인성저하는 현저하지 않음
페라이트계 스테인리스강의 취화	원자 빈 공간, 기공생성
오스테나이트계 스테인리스강의 응력부식균열	크롬카바이드의 오스테나이트/페라이트 입계 석출
배관용접부위 틈새부식	응력부식균열의 기점
배관의 침식/부식	-

- (3) 저합금페라이트강의 담금질 취화는, 합금원소인 Mn과 Si, 불순물인 P와 Sn이 악영향을 미친다. P의 편석은 Cr, Mn, Si에 의해 촉진되며, Sn의 편석은 Ni에 의해 촉진되어 입자경계가 취화된다. 담금질 취화를 발생시키는 열시효 온도/시간의 관계는 활성화 과정이며, 활성화에너지에 의하여 취화 예측이 가능하다.
- (4) 운전온도 부근의 범위에서, 저합금 페라이트강은 장시간의 열시효에 의해 인성이 약간 저하하지만, 압력용기의 건전성에 큰 영향을 미치지 않는다.

- (5) 페라이트계 스테인리스강의 취화는 가장 중요한 경년손상이므로 인성의 저하에 관한 정량적인 평가 기법이 확립되어 있다.
- (6) 오스테나이트계 스테인리스강의 입계형응력부식균열은 매트릭스 중에 충분한 페라이트가 존재하는 경우에 오스테나이트/페라이트 결정 입계에 크롬카바이드가 석출되어 생긴다. 이에 관해서는 합금중의 페라이트량, 페라이트 결정 입자의 크기와 분포, 탄소량에 영향을 받는다.
- (7) 틈새부식은 응력부식균열의 발생점이 됨으로 중요하다. 응력부식균열에서 틈새(CLEVIS)의 형성은 재료의 예민화에 직접적인 영향을 미치므로 배관을 설치할 때는 용접 시공관리를 철저히 하여 틈새를 최소화 한다.
- (8) 배관의 침식 및 부식은 살 두께 감소에 의한 손상이 문제가 되는 경우가 많으므로, 이것을 방지하기 위하여는 수질관리, 내식성이 높은 재료의 사용, 저 유속 및 적절한 배관 경로를 고려한다.

6.1.2 발전소, 화학공장, 석유정제공장 등의 장치, 기기에서 종종 문제시되고 있는 경년손상을 <표 2>에서 보여준다.

<표 2> 기기, 사용재료와 주요 경년손상

기기	사용재료	경년손상
석유정제 개질로 반응관	내열주강(HK40 등)	크리이프손상
에틸렌제조 분해로관	내열주강(HK40 등)	침탄
압력용기	저합금강(Cr-Mo)	담금질취화, 크리이프 손상, 수소취화
증기터빈 로터	저합금강(Cr-Mo-V)	크리이프손상, 담금질취화
가열로관 압력관	저합금강	크리이프손상, 담금질취화
	오스테나이트계 스테인리스강	크리이프손상, $\sigma$ 상석출취화
고온·고압 수소장치	탄소강, 저합금강	수소취화
	마르텐사이트계 스테인리스강	수소취화

6.1.3 각종 플랜트에서 가장 중요한 압력용기는 Cr-Mo계를 중심으로 한 저합금강이 주로 사용된다. 저합금강에 대한 대표적인 경년손상의 종류별 기구, 영향인자와 대책은 <표 3>과 같다.

6.1.4 열시효 취화, 담금질 취화의 어느 경우에 취화가 발생하는 온도는 특별하게 정해지지 않으며, 가열온도와 가열시간이 달라지면, 취화의 기구와 취화의 정도는 변화한다.

<표 3> 저합금강의 경년손상

(1) 가열취화(고온 장시간 가열에 의한 취화)	
기구	(a) 제2상 입자의 석출(벽개파괴) (b) 구 오스테나이트 입계의 불순원소계의 편석(입계파괴)
영향인자	화학적분, 열처리, 사용환경(온도, 시간, 응력, 분위기) 취화계수 $J = (P+Sn) (Si+Mn) \times 10^4$ (wt. %)
대책	취화감소(불순물 원소 감소, 과열방지, 냉각속도 증대) 탈취화열처리에 의한 인성 회복 비파괴평가와 남은수명예측(파괴역학)
(2) 크리이프 손상(피로 · 크리이프 손상을 포함)	
기구	(a) 크리이프 기공(입계파괴, 저연성) (b) 크리이프 변형(입내파괴, 고연성)
영향인자	화학적분, 용접열영향부, 사용환경(온도(T), 시간(t), 응력, 분위기) 라슨 · 미라 변수 $P = T (15 + \log t) \times 10^{-3}$
대책	비파괴평가(변형, 정도, 레프리카(REPLICA)를 포함)와 남은수명예측(크리이프 파단수명, 피로수명) * 레프리카(REPLICA) : 전자현미경에 의한 시료작성법
(3) 수소취화	
기구	(a) 수소취화(고강도강, 응력과 침입 수소의 상호 작용에 의한 균열 생성) (b) 수소유기균열(저강도강, 고수소농도, 개재물 중심에 기공의 생성, 내압 상승으로 균열이 생성) (c) 수소침식(침입수소가 고용탄소 및 탄화물과 화학반응, 메탄을 생성, 입계에 기공, 균열이 생성)
영향인자	화학적분, 강도수준, 사용환경(온도, 시간, 응력, 분위기)
대책	탈수소공정, 수소환경의 차단, 용접후열처리, 비파괴평가와 남은수명예측(파괴역학)



## 6.2 경년손상의 비파괴검사·평가기법

### 6.2.1 일반사항

- (1) 경년손상은 기공 및 미세균열의 생성, 제2상 입자의 석출, 불순물 원소의 편석 등으로 인한 재료 내부의 조직변화이다. 전형적인 경년손상에 관하여 발생하는 조직변화와 특성치수의 순서를 <표 4>에서 보여준다.

<표 4> 경년손상에 의해 발생하는 조직변화와 특성치수의 순서

경년손상	조직변화	특성치수
가열취화	석출	10 $\mu$ m
	편석	0.01 $\mu$ m
크리이프손상	기공	50 $\mu$ m
수소취화	미세균열	10 $\mu$ m

- (2) 경년손상에 의한 검출대상의 치수는 매우 작으나 조직변화는 재료 전체 또는 입계 등의 일부 지역에 불균일하게 분포하고, 해가 거듭되면서 치수와 밀도가 증대한다. 치수와 밀도의 절대치의 검출은 오히려 결함의 감시, 균열 진전의 연속감시(모니터링)를 통하여 할 수 있다.
- (3) 결함의 검출에 사용되는 방법에는 방사선, 초음파, 전자기 이외에도 전기화학, 기타 방법(변형, 경도, 레프리카)이 있다.
- (4) 경년손상의 비파괴검사에 사용되는 검출기술, 검사기법과 적용대상 예를 <표 5>에서 보여준다.

<표 5> 경년손상의 비파괴 검사법

검사기술의 종류	검출기법	적용대상(예)
방사선	X선회절 X선 광전자분광 양전자소멸	크리이프 손상 가열취화 수소취화
초음파	음 속 감 쇠 주파수 노이즈	수소취화, 크리이프 손상 수소취화, 크리이프 손상 σ상취화, 크리이프 손상 수소취화, 크리이프 손상
전자기	전기저항 와 전 류 잔류자기밀도	크리이프 손상 가열취화 가열취화
전기화학	분극최소전류밀도	가열취화, 크리이프 손상
기 타	변 형 경 도 레프리카(REPLICA)	크리이프 손상 크리이프 손상 크리이프 손상

## 6.2.2 방사선

- (1) 일반적으로 결함검출에 사용하는 방사선의 투과·흡수법은 경년손상의 검출에 모두 적용되지는 않으며 X선 회절곡선의 반값 폭의 측정이 피로수명의 예측에 적용되지만, 동일한 방법을 사용하여 크리이프 수명예측을 할 수 있다.
- (2) 방사선에 의한 기기 분석법으로는 특히 표면 근방의 분석에 X선 광전자분광법이 사용되고 가열취화의 검출에도 적용할 수 있다. 양전자소멸법은 양전자 빔에 의한 금속중의 이온과의 상호작용을 이용하여 수소취화의 검출에 적용한다.

### 6.2.3 초음파 검사

초음파는 경년손상의 검출에 가장 유용한 기술이나 초음파는 재료 속을 종파·횡파·표면파·판파 등으로써 통과한다. 통과할 때의 음속·감쇠·주파수분석·노이즈분석 등을 이용하여 경년손상을 검출하는 방법은 다음과 같다.

#### (1) 음속

① 무방등질의 무한 매체 중에 초음파종파 및 횡파의 음속은 다음 식으로 주어진다.

$$V_L = \sqrt{\frac{1-v}{(1+v)(1-2v)}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_T = \sqrt{\frac{1}{2(1+v)}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2)$$

여기서,  $V_L$  : 초음파종파  
 $V_T$  : 초음파횡파  
 $v$  : 포아슨비  
 $\rho$  : 평균밀도

체적함유율의 구상개재물이 산발적으로 분포하는 경우에, 재료의 평균 탄성계수는 등가개재물법에 의해 해석이 가능하다. 즉 개재물이 빈 경우, 평균종탄성계수와 평균밀도는 다음 식이 된다.

$$E = (1 - CV_f)E_o \quad (3)$$

$$\rho = (1 - V_f)\rho_o \quad (4)$$

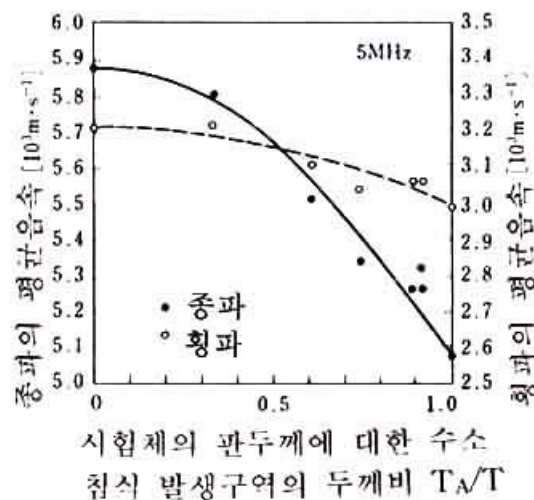
여기서,  $E$  : 평균종탄성계수  
 $C$  :  $\frac{15(1-v)}{7-5v}$   
 $\rho$  : 평균밀도  
 $V_f$  : 체적함유율  
 $E_o$  :  $V_f$  가 0인 경우의 평균종탄성계수  
 $\rho_o$  :  $V_f$  가 0인 경우의 평균밀도

식(3)과 (식4)를 각각 식(1)과 식(2)에 대입하면, 빈곳이 산발적으로 분포하는 경우의 음속  $V_L$ ,  $V_T$ 가 얻어진다.  $V_f = 0$ 인 경우의 음속을  $V_{LO}$ 로 하면, 임의의  $V_f$ 의 경우인 음속  $V_L$ 의 변화율  $\Delta V_L/V_L$ 은 다음 식이 된다( $V_T$ 에 관해서도 동일).

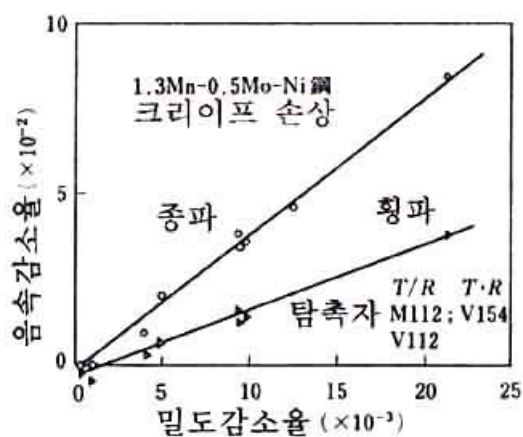
$$\frac{\Delta V_L}{V_L} = \frac{V_L - V_{LO}}{V_{LO}} = \sqrt{\frac{1 - CV_f}{1 - V_f}} - 1 \quad (5)$$

여기서,  $v=0.3$ 이면,  $C=1.9$ 이다.  $V_f$ 가 증가하면  $V_L$ 은 감소하고,  $\Delta V_L$ 은 음(-)이 된다. 이를테면,  $V_f = 10\%$ 로 하면,  $\Delta V_L = -5\%$ 가 얻어진다. 이상의 원리에 의해, 경년손상을 음속변화에서 검출할 수 있다.

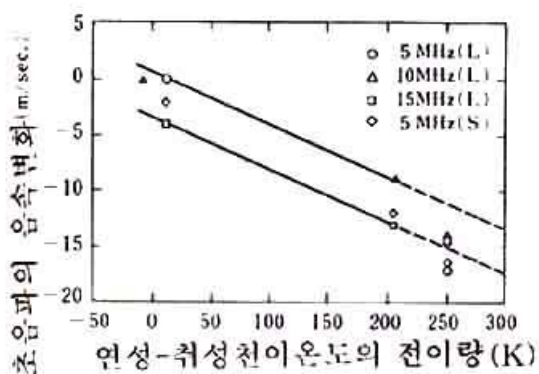
- ② 음속변화에 의한 경년손상의 검출은 수소취화, 크리이프손상 등에 적용된다. 수소침식에 의한 음속변화를 [그림 1]에서 크리이프손상에 의한 음속 감소율과 밀도감소율의 상관 관계를 [그림 2]에서 그리고 중성자 조사 취화에 의한 음속변화를 [그림 3]에서 보여준다.
- ③ 종파, 횡파의 음속변화에서 직접 경년손상을 검출하는 것은 측정의 정밀도면에서 용이하지 않으므로, 종파와 횡파의 음속비, 종파와 횡파의 음속이방성을 이용하는 방법을 채택한다.



[그림 1] 탄소강의 수소침식에 의한 초음파의 음속변화



[그림 2] 저합금강의 크리이프 손상에 의한 음속감소율과 밀도감소율의 상관관계



[그림 3] 초음파의 음속변화와 연성-취성 전이온도의 전이량 상관관계(저합금강)

## (2) 감쇠

- ① 초음파는 재료 속을 통과 시에 강도가 감소한다. 즉 초음파종파가 시험편을 통과하면, 음압은 다음 식에서 알 수 있듯이  $P_0$ 에서  $P$ 로 감쇠한다.

$$P = P_0 \exp(1 - \alpha B) \quad (6)$$

여기서, P : 감쇠후 음압  
 $P_o$  : 감쇠전 음압  
 B : 시험편 두께  
 $\alpha$  : 감쇠계수

대부분의 경우에 식(6)을 변형해서 다음 식으로 표시한다.

$$\alpha = -\frac{20}{B} \log_{10} \frac{P}{P_o} = \frac{20}{B} \log_{10} \frac{P_o}{P} \quad (7)$$

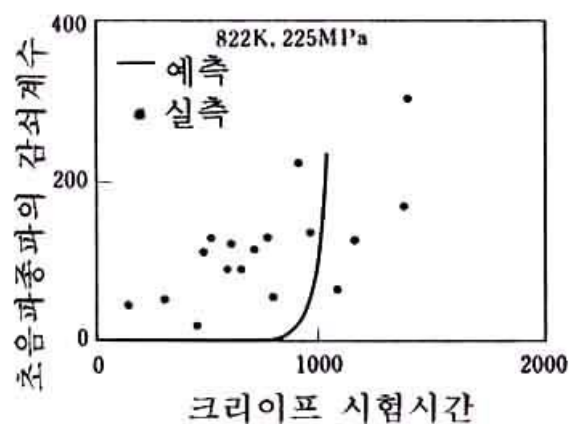
② 구상개재물(빈 공간)이 산발적으로 분포하는 경우에 산란이론에는 다중 산란 무시의 가정을 하고서, 감쇠계수를 해석한 결과는 다음 식이 된다.

$$\alpha = -\frac{1}{2B} \ell n(1 - \frac{\gamma}{V} V_f B) \quad (8)$$

여기서,  $\alpha$  : 감쇠계수  
 B : 시험편 두께  
 $V_f$  : 빈 공간의 체적함유율  
 $\gamma$  : 빈 공간의 산란단면적  
 V : 단일 빈 공간의 체적

식(7)과 식(8)의 비교에서 알 수 있듯이  $V_f$ 의 증가에 따라  $\alpha$ 는 증대하고, P는 감소한다. 이상의 원리에 의해 경년손상이 감쇠로부터 검출이 가능하다.

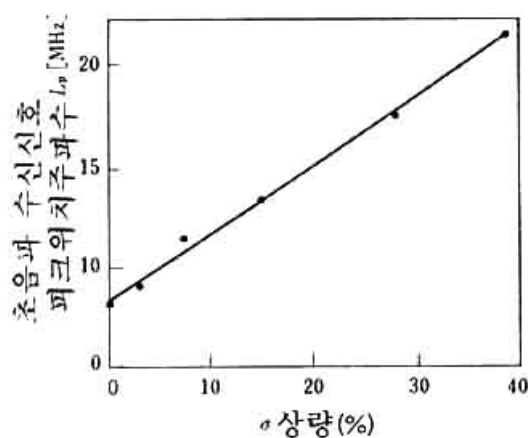
③ 감쇠에 의한 경년손상의 검출은 수소취화, 크리이프 손상 등에 적용된다. Ni-Cr-Mo강에 관해서 크리이프 손상의 검출 예를 [그림 4]에서 보여준다.



[그림 4] 초음파 종파의 감쇠계수와 크리이프 시험시간의 관계

### (3) 주파수 분석

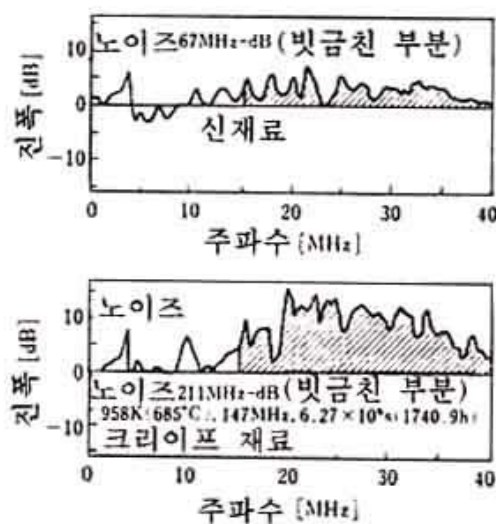
- ① 초음파의 저면 반사 진폭 · 주파수 관계를 분석하면, 경년손상의 검출이 가능하다. 크기가 작은 기공 및 미세균열은 주로 고주파 성분의 진폭을 저하시키지만, 저주파 성분의 진폭에는 영향을 미치지 않는다.
- ② 주파수 분석에 의한 경년손상의 검출은, 2상 스테인리스강의  $\sigma$ 상 석출 취화, 크리이프손상 등에 적용된다. 피크주파수와  $\sigma$ 상 석출량의 상관 관계를 [그림 5]에 보여준다.



[그림 5] 2상스테인리스강의 초음파의 피크주파수와  $\sigma$ 상 석출량의 상관관계

## (4) 노이즈 분석

- ① 초음파는 재료 속을 통과할 때에 산란하고, 후방산란파 노이즈(구상에코)가 되 돌아온다. 일반적으로 기공 및 미세균열이 존재하면 산란이 현저하게 발생하고 노이즈가 증대한다. 분석방법은 주파수 분석의 경우와 같은 형태로써 노이즈 분석에 의한 경년손상의 검출은 수소취화, 크리이프 손상 등에 적용된다. 크리이프 손상에 의한 노이즈 분석의 예를 [그림 6]에 보여준다.



[그림 6] 크리이프 손상에 의한 초음파의 노이즈 분석의 예  
(보일러 강판, STS 321H)

## 6.2.4 전자기에 의한 검출

재료의 전기·자기적 특성은 기공 및 미세균열이 없다 하더라도 성분 및 조직에 의해 민감하게 변화하므로, 경년손상의 고감도 검출이 가능하다. 전기적 방법으로는 전기적 저항법이, 자기적 방법으로는 바루크하우젠·노이즈법이 널리 사용된다. 이외에도 와전류(전자유도)법과, 잔류자기밀도법이 사용된다.

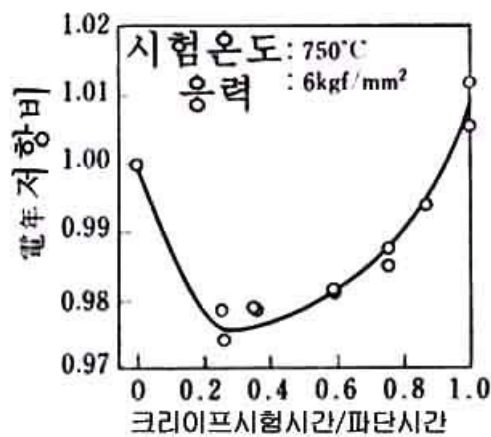
- (1) 전기저항은 전위 차를 측정하므로 전위차법이라고 부른다. 직류를 사용하



는 전위차법은 균열진전의 연속감시(모니터링)에 널리 쓰인다. 균열진전에 따라 단면적이 감소하는 결과가 되어 전기저항(전기저항율)은 커지게 된다.

- (2) 교류를 사용하는 전위차법은 특히 고감도이므로 균열진전 이전의 현상(전위밀도 및 기공의 체적함유율의 증대 등)을 검출할 수 있다. 교류전위차법에 의한 경년손상의 검출은 주로 크리이프 손상에 적용된다.

STS 304에 적용하는 예를 [그림 7]에 보여준다.



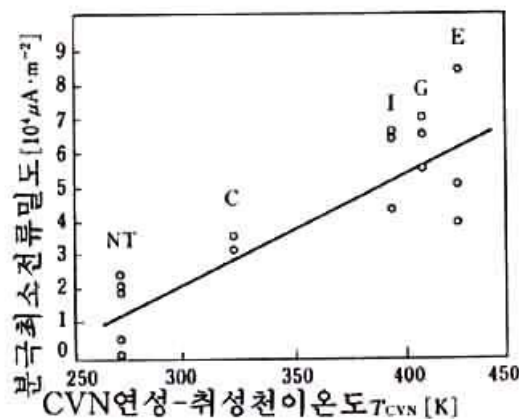
[그림 7] 전기저항비와 크리이프 시험시간/파단시간의 관계

- (3) 위의 [그림 7]에서 종축은 시험 전 후에 걸리는 전기저항율의 비, 횡축은 시험시간과 파단시간의 비이다. 전기저항율은 일단 감소해서 최소 값을 나타낸 후에 증대한다. 전기저항법은 연속감시(모니터링)가 가능하다는 이점을 갖고 있으므로 크리이프 수명의 정량적인 예측에 적용된다.

### 6.2.5 전기화학적 검출

- (1) 전기화학법은, 부식연속감시에 널리 쓰인다. 특히 오스테나이트계 스테인리스강의 입계형 응력부식균열에 대한 예민화 정도를 검출하기 위하여, 치오시안산칼륨을 포함한 황산용액 중에서 재활성화 시키고, 분극시험을 실시하는 전기화학적 재활성화법이 사용된다.

- (2) 이것을 가열취화의 검출에 적용한 것이 분극최소전류밀도법이고, 분극최소전류밀도는 샤르피 충격시험의 연성 - 취성전이온도의 상승에 따라 증대하는 한 예를 [그림 8]에서 보여준다.



[그림 8] 템퍼링 취화에 의한 분극최소전류밀도와 연성 · 취성전이온도의 상관관계

## 6.2.6 기타 경년손상의 검출

### (1) 변형

보일러의 압력관 및 석유정제플랜트의 개질로 반응관 등, 바깥 지름의 계측이 비교적 용이한 경우에는, 해를 거듭하면서 변경계측을 실시하여 크리이프 변형의 예측이 어느 정도 가능하므로 관의 교체 및 노의 운전관리를 한다.

### (2) 경도

크리이프 손상에 의해 재료는 연화하지만, 응력이 높으면 현저히 연화한다. Cr - Mo - V 강에 관하여, 시험전후의 경도비 G의 저하는 다음 식

의 온도  $T(^{\circ}\text{C})$ , 시간 및 응력의 척도로써 표시할 수 있다.

$$G = \log [ T (20 + \log t) ] + 0.00195(0 - 10.3)\sigma \quad (9)$$

위 식을 사용하여, 사용온도, 시간은 이미 알고 있지만, 사용전 경도가 불분명한 발전소의 증기터빈로터의 크리이프 손상을 라슨·미라 파라미터를 사용하여 추정할 수 있다.

### (3) 레프리카(REPLICA)

- ① 현장에서 실제 기기의 표면에서 레프리카를 채용하면, 실험실에서의 상세한 현미경 관찰이 가능하며 레프리카를 정기적으로 채취하고 경년손상을 추적하여 남은 수명을 예측할 수 있다.
- ② 납(P)과 주석(Sn) 등의 불순물원소의 입계편석을 검출하기 위하여, 입계부식흡폭(깊이)의 측정이 적용된다. 이것도 넓은 의미에서 레프리카법의 일종이다.

## 7. 수명예측의 기법

### 7.1 기법적용 일반

- 7.1.1 파괴역학의 방법을 사용하여 균열의 진전을 정량적으로 예측할 수 있는 결함평가를 실시하고 결함평가와 경년손상평가를 종합적으로 판단하면 기기의 수명을 정확히 예측할 수 있다.
- 7.1.2 수명예측은 설계시뿐만 아니라, 제조후, 사용전 및 사용기간 중 검사 시에 실시하여야 한다. 특히 사용기간 중 검사시의 결함평가, 경년손상평가에 의해 매 검사 시에 남은 수명을 정확히 예측하는 것이 남은수명예측이다.
- 7.1.3 파괴역학에 의한 결함평가의 방법은 확립된 ① 하중조건, ② 결함의 종류, 현상, 치수 및 범위, ③ 파괴의 종류와 재료의 파괴저항 등 3가지 인자정보

를 활용하고 비파괴검사로써 검출한 결함의 평가 결과를 이용하여 수명예측을 실시한다.

7.1.4 설계하중조건은 명백하지만, 사용중의 실제 하중조건은 불분명한 경우가 많다. 이 경우에는, 실제 하중조건을 대신하여, 설계하중조건을 사용할 수 없으므로 가능한 한 실제 하중을 확인하여야 한다. 그리고 하중의 크기뿐만 아니라 이력(파형, 빈도, 조업회수, 유지시간 등)에 관한 정보를 남은수명예측을 위하여 준비한다.

7.1.5 비파괴검사의 검출능력과 검출정밀도를 고려하고, 먼저 검출 결함의 치수로부터 실제 결함치수를 추정한다. 검출결함을 제거한 후에 남은 결함에 대해서, 검출능력, 검출정밀도를 고려하여 실제 결함치수를 확정적으로 결정한다.

## 7.2 피로수명예측 절차

이 절차는 반복하중을 받는 재료에 작용하는 응력이 재료의 탄성영역 이내에서 일반적으로 균열이 발생하지 않고 피로에 이르는 경우에 주로 적용한다.

(1) 재료가 어떤 응력 범위의 반복하중을 받을 때에 파단되는 회수를 도식화한 S-N선도를 작성한다.

- ① 피로시험을 통하여 시편의 S-N선도 작성(X축은 응력반복수, Y축은 피로강도).
- ② 구조물의 특성을 고려하여 시편데이터를 보정한 구조물의 S-N선도 작성.

(2) 구조물에 작용하는 응력이력데이터를 구한다.

- ① 구조물의 유한요소법에 의한 구조해석 실시.
- ② 실제 가동조건하에서 응력측정.

(3) 응력이력에서 반복사이클 수를 파악한다.

- ① 산(PEAK) 수.
- ② 수준 횡단(LEVEL CROSSING) 수.
- ③ 범위 쌍(RANGE PAIR) 수.

(4) S-N선도에서 피로수명을 예측한다.

- ① 마이너의 규칙(MINER'S RULE)을 이용.
- ② 누적피로 손상 계산.

### 7.3 남은수명 예측절차

#### 7.3.1 피로

- (1) 피로의 경우에 균열의 발생, 국소진전과 경년손상은 독립적으로 진행된다. 피로균열 진전속도  $da/dN$ 은 응력확대계수범위  $\Delta K$ 를 사용하여 다음 식으로 구한다.

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m, \Delta K = \alpha \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

여기서,  $m$ 과  $C$ 는 정수,  $\alpha$ 는 균열의 형상계수,  $\Delta \sigma$ 는 응력범위이다. 식(10)을 사용중의 부하이력에 따라 적분하면, 검출결함범  $a_o$ 부터 임의 균열치수  $a$ 까지 균열진전수명  $N$ 을 예측할 수 있다.

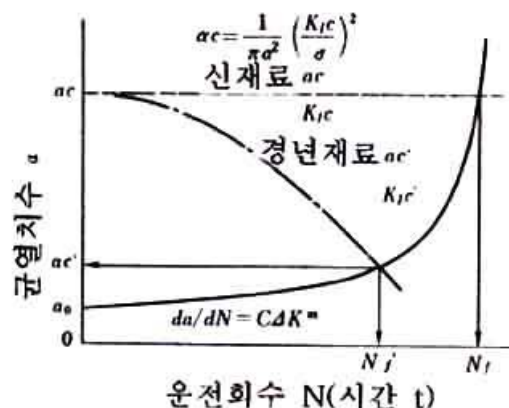
- (2) 부하이력을 무시할 수 있는 경우에는 변동응력의 응력빈도분포에서 다음 식의 등가응력범위를 산출하고, 식(10)에 사용할 수 있다.

$$\Delta \sigma_{eq} = \left( \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_i^m \frac{n_i}{\sum n_i} \right)^{1/m} \quad (11)$$

이 경우( $\Delta \sigma$ 일정), 식(10)을 검출결함치수  $a_o$ 부터 임의 균열치수  $a$ 까지 적분하면, 다음 식  $\Delta \sigma - N$  관계가 얻어진다.

$$\Delta \sigma^m N = \frac{2}{(m-2)C\alpha^m \pi^{m/2}} \left[ \frac{1}{a_o^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a^{(m-2)/2}} \right] \quad (12)$$

$\Delta \sigma$ 가 일정한 경우  $a - N$  곡선을 [그림 9]에 보여준다.



[그림 9] 경년손상에 따른 파괴인성의 저하와 남은 수명의 감소

사용기간중에 검출이 가능하므로 균열의 진전을 비파괴측정을 실시하여 연속 모니터링 하고, 위의  $a - N$  곡선과 비교하면, 수명예측의 정밀도를 점검한다.

- (3) 임의 균열치수  $a$ 를 한계균열치수  $a_c$ 로 택하면, 남은 수명이 얻어진다.  $a_c$ 는 사용중의 최대부하에 대해서 응력확대계수  $K, J$  적분 혹은 실단면응력이 한계치(파괴인성 혹은 소성파괴응력)에 달하는  $a$ 의 값이다. 소규모 항목의 경우, 위 식의 한계균열치수  $a_c$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$a_c = \frac{1}{\pi \alpha^2} \left( \frac{K_{IC}}{\sigma_{\max}} \right)^2 \quad (13)$$

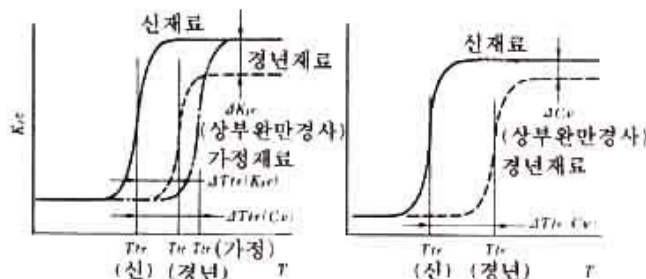
여기서,  $K_{IC}$  : 평면변형 파괴인성  
 $\sigma_{\max}$  : 최대응력

- (4) [그림 9]의 한계균열치수  $a_c$  - 시간  $t$  곡선(1점 채선)을 참조해서, 경년열화에 의해 파괴인성이 저하하면 한계균열치수가 감소하고 남은 수명이 단축되고, 또한 사용기간중에 내압시험의 실시로 인하여 취성파괴를 일으킬 위험성이 크다.
- (5) 평면변형파괴인성  $K_{IC}$ 를 얻기 위하여, 파괴인성시험을 실시하는 것은 번거로운 일이고, 또 시험편 치수의 제한으로 인하여 실시할 수 없는 경우가 많다. [그림 10]을 참조해서, 파괴인성  $K_{IC}$ 의 연성 - 취성전이온도(FATT)의 전이량  $\Delta T_{tr}(K_{IC})$ 가, 샤르피 충격에너지 -  $C_v$ 의  $\Delta T_{tr}(C_v)$ 과 동등한 것으로 가정한다( $K_{IC} - T$  곡선을  $\Delta T_{tr}(C_v)$  만큼 평행이동). 경년손상의 비파괴검사·평가의 방법으로써  $\Delta T_{tr}(C_v)$ 이 추정 가능하면, 남은수명예측이 가능하다.
- (6) 원자로 압력용기에서 거론되는 것 중에서 가장 가혹한 부하는 가압열충격(PTS)이다. 압력용기 강용접금속의 경년열화(중성자 조사취화)는 파괴인성  $K_{IC}$ 의 천이온도의 상승  $\Delta T(^{\circ}C)$ 로 평가되며, 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta T = [CF]f^{(0.24 - 0.091 \log f)}$$

$$CF = 27 - 23Si - 58Ni + 290\sqrt{Cu \cdot Ni} \quad (14)$$

여기서,  $f$ 는 중성자조사량( $\times 10^{19}n/cm^2$ ,  $E > 1MeV$ ), Si, Ni, Cu는 각 화학원소의 함유량(중량%)이다.



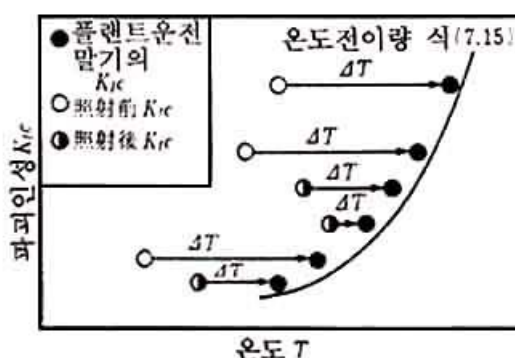
[그림 10] 파괴인성  $K_{IC}$ 와 샤르피충격에너지의 연성·취성전이온도 전이량 관련

(7) 압력용기강(모재, 용접금속)을 50년간 사용한 후 경년열화한  $K_{IC}$ (Kgf/mm<sup>3/2</sup>)의 하한포락선으로 다음 식이 사용된다.

$$K_{IC} = 65 + 419 \exp \{0.0161(T - 125)\} \quad (15)$$

여기서, T(℃) : 사용온도

위에서 거론된 가압열충격(PTS) 사상과 결함치수에 대한 응력확대계수 K는 식(15)의  $K_{IC}$ 를 초과하지 않는다. [그림 11]을 참조해서 플랜트의 운전말기의 f에서 식(14)를 사용하여  $\Delta T$  만큼 평행 이동시킨 후에 그 값이 식(15)의  $K_{IC}$  이상임을 확인하면, PTS 사상에 대한 구조건전성이 보증된다. 이 절차에 의하여 플랜트 운전 말기의 구체적인 수명을 예측한다.



[그림 11] 플랜트 운전말기의 수명예측

### 7.3.2 크리이프(피로 · 크리이프)

(1) 변동응력의 크리이프의 경우에 크리이프 손상  $D_c$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$D_c = \sum \frac{t_i}{t_{ir}} \leq 1 \quad (16)$$



여기서,  $t_i$  : 각 응력의 부하시간  
 $t_{ir}$  : 각 응력에서의 크리이프 파단수명

(2) 경년손상의 비파괴검출·평가방법을 사용하여  $D_c$ (소비한 수명)를 추정할 수 있으면, 남은 수명( $1-D_c$ )을 예측할 수 있다. 일정 응력의 피로·크리이프의 경우에는 피로·크리이프손상의 허용 값이 재료, 환경에 따라 달라지게 되는데 1보다 작은 값이 된다.

(3) 소비한 수명은 경년손상의 비파괴검사·평가 방법을 사용하여 추정이 가능하며, 남은 수명은 허용 값에서 소비한 수명의 값을 빼어 예측한다.

#### 7.4 가속시험의 평가

(1) 기기 혹은 재료를 실제 조건 및 실제 환경에서 시험할 수 있으면 가장 이상적이나 대부분의 경우에 이것은 시간적, 경제적으로 불가능하게 된다. 가속시험은 재료를 높은 중성자 속에 조사하면서 환경 및 하중조건을 엄격히 한 후에 짧은 시간 내에 파괴시켜 그 결과의 적정 여부를 점검하거나, 실제 조건 및 실제 환경에서 수명을 예측한다.

(2) 가속시험에서 생기는 파괴현상이 실제조건 및 실제환경과 다르면, 예측이 잘못된 것이며 설정 수명도 잘못된 것으로 판단한다.

(3) 가속의 유무에 관계없이 특별히 파괴현상이 동일하게 발생한 경우에는 가속율의 설정과 실제 조건 및 실제 환경에서의 수명예측은 비교적 용이하다. 실제 조건 및 실제 환경에서 파괴현상을 특별히 가정할 수 없는데도 불구하고 가속시험을 실시하는 것은 모순이며, 이런 경우에 유일한 기술적 판단 기준은 유사 기기의 파괴사고 경험을 적용한다.