

압력용기강의 경년열화 평가와 그 대책

권재도

영남대학교 공과대학 기계설계학과 교수



● 1950년생.
● 파괴역학을 전공하였으며, 기계구조물의 장기사용에 의한 재질 열화와 수명예측 방법론의 개발과 확률론적 피로수명 예측방법 등에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

고도급속 성장기에 건설하기 시작한 고온·고압용기, 원자력 발전설비 등과 같은 기계구조물들은 그 사용 기간이 길어짐과 더불어 수명상의 문제가 제기되기 시작할 것이며, 이에 따라 검사, 보수, 교환, 사용정지, 운전조건외 제한, 재건설, 안정성 및 신뢰성의 검토 등, 기존 기계구조물들을 하루라도 더 길게, 더 안전히, 그리고 더욱 효율적으로 사용하고자 하는 요구가 커져갈 것으로 생각된다.

그러나 기계구조물의 수명을 지배하는 인자는 매우 많은 것으로 사료되며, 재료의 사용조건, 사용 이력 등 시간과 더불어 재료의 강도 특성이 변화하는 현상 즉 열화(劣化, degradation)의 영향을 기계구조물의 수명 평가에 어떻게 도입해 가는가 하는 것은 중요한 요인으로 생각된다.

따라서 이 글에서는 열화의 종류에 대해서 열거해 보고, 이와 같은 열화를 평가할 수 있는 대표적 방법을 소개하고, 특히 고온·고압용기에서 자주 발생하는 소둔취화(T.E. : temper embrittlement)에 의한 열화기구와 열화에 영향을 미치는 각종 화학 성분의 영향을 설명하며, 열화를 판정할 수 있는 열화의 파라미터와 샤피(Charpy)의 충격치, 피로균열의 진전속도 및 파괴 인성치에 미치는 재질열화의 영

향에 대한 필자의 연구예를 소개하고, 이와 같은 재료 강도저하를 고려한 열화된 기계구조물의 수명예측방법과 열화의 대책 등에 대해서 설명하고자 한다.

2. 열화의 종류 및 평가방법

열화(劣化; degradation)는 장기 사용에 따라 품질, 성능, 강도 등이 저하하는 현상으로 기계구조물의 수명예측 또는 건전성 평가를 위해서는 매우 중요한 현상으로 생각된다. 현재 재료강도학적 검토 대상이 되는 열화의 종류⁽¹⁾는 편의상 다음 세 가지로 크게 나눌 수 있다. ① 재료열화, ② 부식에 의한 열화, ③ 파괴손상의 도중 단계 등으로 나눌 수 있으며, 재질열화는 내부까지의 재료의 변화를 동반하는 현상이며 부식열화는 주로 외부 표면 등과 같은 경계면 현상으로 생각되며, 파괴, 손상의 도중 단계는 피로, 응력부실패로, 부실패로, 크립 및 마모 등과 같은 현상을 들 수 있다.

이상의 세 가지 종류의 열화 중 재질열화의 대표적인 예와 부식열화의 대표적 예를 표 1과 2에 나타내어 보았다.

현재 열화의 평가(검지)방법으로 열화가 균열 또는 감육의 형태로 나타나는 경우에는 비파괴적인 수법에 의해 쉽게 평가할 수가 있다.

그러나 재료 내부까지 변화하는 재질열화에 대한 검지 방법은 그 평가 방법이 쉬운 것만은

표 1 각종재질 열화의 예

- (1) 소둔취화(temper embrittlement)
- (2) 수소취화(hydrogen embrittlement)
- (3) 수소침식(hydrogen attack)
- (4) 크립취화(creep embrittlement)
- (5) σ 상석출(σ -phase precipitation)
- (6) 탄화물석출(carbide precipitation)
- (7) 침탄(cementation)
- (8) 탈탄(decarburization)
- (9) 후 열처리 취성과 SR크랙(post-heat treatment and SR cracks)
- (10) 청열취성(blue brittleness)
- (11) 적열취성(red brittleness)
- (12) 백열취성(white brittleness)
- (13) 475°C 취성(475°C brittleness)
- (14) 베나듐 취성(vanadium attack)
- (15) 유화물 침식 또는 기타 Hot Corrosion (sulphide attack or order hot corrosion)
- (16) 가공경화(work hardening)
- (17) 가공연화(work softening)
- (18) 용융금속 접촉취화 (melt metal embrittlement)
- (19) 도금취성(plating brittleness)
- (20) 시효(aging)
- (21) 수소유기 균열 (hydrogen induced cracking)
- (22) 유황 편석(sulphur segregation)
- (23) 비금속 개재물(non-metallic inclusion)
- (24) 자연(환경) 열화(natural degradation)
- (25) 가성취화(caustic embrittlement)
- (26) 오브레이 박리(overlay separation)
- (27) 중성자조사취화 (irradiation embrittlement)
- (28) fish eye and shutter crack
- (29) 잔류응력 발생(residual stress)
- (30) 고온유화 (high temperature sulphidation)
- (31) 할로젠화(halogenation)

표 2 부식에 의한 열화의 예

- (1) 감육(thinning thickness reduction)
- (2) 공식(pitting)
- (3) 조면화(roughening)
- (4) 틈새 부식(crevice corrosion)
- (5) 입계 부식(intergranular corrosion)
- (6) 탈성분 부식(de-element corrosion)
- (7) 탈성분 침식(cavitation erosion)
- (8) 각종내식성 저하 (reduction of corrosion-resistance)
- (9) 산화(oxidation)
- (10) 층상 부식(lamellar corrosion)
- (11) 갈바니 부식(galvanic corrosion)
- (12) 저온 부식(low-temperature corrosion)

여기서 나타낸 각종 판정 방법에 대해서는 1991년 대한기계학회 파괴역학을 이용한 압력 용기의 건전성 평가 특집호에 소개된 바가 있으므로 여기서는 생략코자 한다.

3. 압력용기강의 열화 기구 정의^(3,18)

고온에서 사용된 압력용기 재료에는 사용 온도가 취화온도역을 포함하는 경우 충격치가 현저하게 저하되는 경년열화 문제가 생긴다. 압력 용기의 제조 사용에 따른 실제적인 면의 T.E의 문제점은 다음 두 가지로 대별된다.

1) 제조과정에서 소둔 열처리 또는 열처리 온도로부터 냉각 중의 취화

2) T.E 온도 범위에서 장시간 사용에 따른 취화

전자는 주로 Ni-Cr계 또는 Ni-Cr-Mo계 고강도강의 취화경향이 현저한 재료에 있어서의 문제이며 고강도강의 특성을 살리면서 응력제거 소둔처리에 따른 인성 열화를 어떻게 해서 콘트롤(control)할가에 관심이 집중되어 왔다. 그렇지만 압력용기용 고온재료로서의 고온강도와 내수소성의 관점에서부터 넓게 쓰이고 있는

아니나, 현재까지의 여러 가지의 연구를 통하여 얻은 각종 열화판정 방법의 대표적인 예와 문제점^(2~7)을 표 3에 나타내었다.

Cr-Mo강은 T.E의 감수성이 비교적 적고, 위 나는 경우가 있어, 압력용기의 안전성을 고려
 와 같은 제조 과정에서의 문제가 되지 않는 반 하기 위해 매우 중요한 점이 있다.
 면, 장시간 사용에 따른 취화가 현저하게 나타 이와 같은 T.E현상을 일으키는 대상 재료로

표 3 각종 경년열화의 판정법과 문제점

종 류	판 정 법	문 제 점
소둔취화	a. 연성-취성천이온도상승 b.A.E 계측 c. AUGER 전자분광 분석에 따른 입계불순물의 측정 d. 입계부식법 e. REPLICA법 f. 전기화학적 방법 g. 전기 저항법 h. 초음파법	비파괴검사법의 확립이 필요
수소취화	a. 충격시험에 의한 노치인성 저하 b. 인장시험에 의한 단면수축률 저하 c. 현미경에 의한 미소균열의 유무 d. 진공추출에 의한 수소량측정 e. 주사전자현미경에 의한 파면해석 f. 초음파 법 g. X선 이용	a,b,d는 모두 파괴시험으로 재료로부터 시험편채취가 필요하다. 이 때 수소가 방 출되는 것에 주의가 필요하 다.
수소침식	a. 초음파법 b. 외관검사에 의한 방법 c. Gas 추출에 의한 메탄 가스 유무 d. 현미경시험에 의한 탈탄 및 미소균열 유무 e. 충격시험에 의한 강도 및 연성의 저하	
σ 상취성	a. 충격시험에 의한 노치인성의 저하 b. 경도 상승 c. 현미경조직 검사 d. 균열의 유무 e. 초음파법 f. 전기화학적 방법	
크립취화	a. 경도의 증가 b. X선 회절법 c. 초음파법 d. 현미경 조직 관찰 e. 치수변화측정법 f. 완전류 탐사 g. 전기저항법	
후열처리 취성	a. 충격치의 저하 b. 신율의 저하 c. 연성의 저하	
청열(靑熱)취성	a. 인장강도의 상승 b. 경도의 상승 c. 연성의 저하	실온에서의 실험으로 특성 을 파악할 수 없음
탄화물의 석출	a. 현미경 조직 실험 b. 전기저항법 c. 전기화학적 방법	
침 탄	a. 현미경 조직 실험 b. 균열의 유무 c. 전자기적 방법	
탈 탄	a. 현미경 조직 실험 b. 균열의 유무	
부 식	a. 외관검사에 의한 방법 b. 초음파법 c. 완전류 탐사	

는 저합금강의 침상조직재(마르텐사이트 및 베 나이트)에서 문제로 나타난다. 조직적으로는 P, Sn, As, Sb 등의 불순물 원소가 어느 정도 이상 포함되어 있는 경우에 생긴다. 취화역은 300~600°C의 온도 범위에서 장시간 유지한 후 서냉할 경우 생긴다. 취화현상은 파괴인성치의 저하로써 나타나며, 통상은 충격시험에 있어서 천이온도의 상승으로 파악할 수 있다.

파괴형태는 입계 파괴 형태가 나타나며 그 정도에 따라서 취화도가 강하게 나타난다. 입계 파괴에 있어서 총칙적으로는 결정 입도가 클수록 파괴저항이 적어져서 T.E도 강하게 나타났다.

또한 등 취화 곡선으로 나타나는 평행 가역적 성질이 이 현상의 본질이다. 또 취화 온도역 이상의 온도에서는 단시간에 취화가 회복되는 특성이 있다.

취화에 대한 기구로서는 아직까지 명확히 알려진 바는 없으나 최근 Auger분석 등의 표면 분석 기술의 발달에 따라 입계 탄화물 석출설, Mc Lean 등의 평행 편석설 등이 제안되고 있으며, T.E의 기본적 특성을 평행 편석설에 따라 보다 잘 설명이 되는 것이 현시점에서 일반적 사항이다.

4. 압력용기강의 열화에 미치는 각종 요인

4.1 각종 압력용기강의 소둔취화(T.E) 감수성^(8,9)

현재 사용되고 있는 압력용기강은 그 용도나 사용조건에 따라 몇 개의 강으로 나눌 수 있다. 즉, 탄소강, Mo강, Cr-Mo강, Ni-Cr-Mo강, Mn-Mo강, Mn-Mo-Ni강 등이 있다.

탄소강은 T.E 감수성이 없는 것으로 알려져 있으며 Cr-Mo강에는 고온 강도 내수소 침식성을 기준으로 하여 Cr-Mo 함유량이 서로 다른 수 종류의 강이 있다. 특히, Cr-Mo강은 T.E 온도역에서 장시간 사용되는 재료이므로 다른 종류의 강에 비해 상세히 조사되어 있다.

그림 1은 각종 압력용기강의 T.E 감수성을 나타낸 것으로 여기서 vT_{75} 는 파면천이온도를 나타낸다. 이 결과로부터 알 수 있는 것은 1/2 Mo강과 Mn-Mo강은 T.E 감수성이 나타나지 않는다. 그러나 Mn-Mo-Ni강은 약간의 T.E 감수성이 나타난다. 이와 같은 강은 통상 초기 Ferrite 주체의 조직으로 사용된다는 것과 T.E를 억제하는 적당한 Mo을 함유하고 있

강종류	ASTM	취화 처리전의 $vT_{75}(^{\circ}C)$					취화량 ($^{\circ}C$)			
		-120	-80	-40	0	40	0	40	80	120
0.5 Mn	A204Gr. C									
1.3 Mn-0.5 Mo	A533Gr. A									
1.3Mn-0.5Mo-0.5Ni	A533Gr. B									
1.25Cr-0.5Mo	A387Gr. 11									
2.25Cr-1Mo	A387Gr. 22									
	A542									
3Cr - 1Mo	A387Gr. 21									
5Cr-0.5Mo	A387Gr. 5									
3.5Ni-Cr-Mo	A543									
2.25Cr-1Mo	A336Cl. F22									
3Cr-1Mo	A336Cl. F21									
5Cr-0.5Mo	A336Cl. F5a									
9Cr-1Mo	A182Gr. F9									
0.5Ni-Cr-Mo	A508Cl. 4									

그림 1 각종압력용기강의 소둔취화(T.E)의 감수성

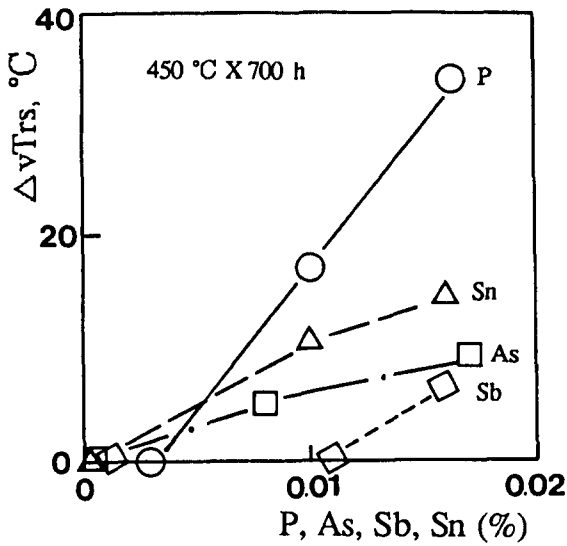


그림 2 2 1/4Cr-1 Mo강의 소둔취화(T.E)에 미치는 불순물 원소의 영향

는 것이 T.E 감수성을 낮게 하는 원인으로 생각된다.

Cr-Mo강 중에는 2¹/₄Cr-1Mo강, 3Cr-1Mo강의 T.E 감수성이 높고, 1¹/₄Cr-¹/₂Mo강 및 5Cr-¹/₂Mo강 및 9Cr-1Mo강에는 T.E는 거의 나타나지 않는다. 2¹/₄Cr-1Mo강 및 3Cr-1Mo강의 T.E 감수성은 높지만 현재에는 화학성분의 조정에 따라 사용상 문제 없는 성능의 재료가 얻어지고 있다. 반면, Ni-Cr-Mo강은 T.E 감수성은 매우 높게 나타나며, 2¹/₄Cr-1Mo강이나, 3Cr-1Mo강보다 크다. 이것은 조직이 베나이트 주체의 조직인 것과 T.E를 촉진하는 Ni-Cr이 다량 함유되어 있기 때문으로 생각된다.

그러나 Ni-Cr-Mo강은 보통 소둔 취화 온도 역보다도 낮은 온도에서 사용되는 경우가 많기 때문에 압력용기 사용중의 취화 보다는 용기

표 4 소둔취화(T.E) 가수성에 미치는 화학성분의 영향

성분	영향
불순물원소 P, Sb Sn, As	2 ¹ / ₄ Cr-1Mo 강에 있어서 P, Sb, Sn, 및 As의 단독 첨가에 의한 T.E에 미치는 영향을 조사한 결과 P가 가장 감수성을 증가시키는 원소이며 Sn이 그 다음이고 Sb 및 As의 기여도는 매우 적음(그림 2참조)
Si	Si는 단독으로 취화를 유기하지 않고, P에 의한 취화를 촉진시킴
Mn	Cr-Mo강의 T.E를 촉진
Cu	0.2%까지 Cu첨가시 Cu는 T.E를 증대시킴
Ni	0.3%까지 Ni 첨가시 거의 영향이 없음
Cr	Cr량의 증가에 따라 T.E 감수성은 증가함
Mo	0.5~0.7%의 Mo 첨가시 취화 감수성이 최저이며, 그 보다 적거나 많아도 취화 촉진 효과가 큼
C	C량(0.085-0.167%)의 영향은 Si, Mn의 약 3배 정도의 취화 촉진 효과가 큼
S	S량이 증가하면 T.E 감수성은 저하함
V	T.E 감수성은 거의 변화하지 않음
Nb	T.E 감수성은 거의 변화하지 않음
Al	0.01-0.03% 첨가로 T.E감수성이 가장 적게 나타남
As	As의 증가에 따라 미소하게 T.E 감수성이 증가함

제작시 용접 열처리 온도로부터 서냉중 취화가 문제로 대두된다.

4.2 소둔(T.E) 감수성에 미치는 각종

요인^(3,6,7)

그림 2는 1/4Cr-1Mo 강에 있어서 소둔 취하에 영향을 주는 P, Sb, Sn, As을 나타낸다. 또한 각종 화학성분도 T.E의 감수성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로 표 4에는 T.E 감수성에 미치는 각종 화학성분의 영향을 나타낸 것이다.

4.3 취화 계수

T.E는 많은 원소의 영향을 받는다. 이와 같은 원소의 효과를 하나의 계수로 정리함으로써 강조적으로부터 T.E 감수성 평가를 해 보고자 하는 시도가 Cr-Mo강에 대해 활발히 연구되어 왔다.

표 5에는 Cr-Mo강의 T.E 감수성을 나타내기 위한 계수(parameter)을 열거한 것으로 여러 종류의 계수 중 J-factor가 가장 많이 쓰이고 있는 편이다.

표 5 Cr-Mo강의 소둔취화(T.E) 감수성을 나타내는 변수

소둔취화(T.E) 계수	원소단위
$X = (10P + 5Sb + 4Sn + As) \times 10^{-2}$	ppm
$Y = (10P + 5Sn + Sb + As) \times 10^{-2}$	ppm
$J = (Si + Mn) (P + Sn) \times 10^4$	wt%
$(Si + Mn) X$	wt%
	(X는 ppm)
$K = (2Si + Mn) X$	wt%
	(X는 ppm)
$(4Si + Mn) Y$	wt%
	(X는 ppm)
$(Si + Mn + Cu + Ni) Y$	wt%
	(Y는 ppm)
Si + Mn	wt%
Mn + Si + 20Sn	wt%
10Sb + 8P + 4Sn + As	wt%

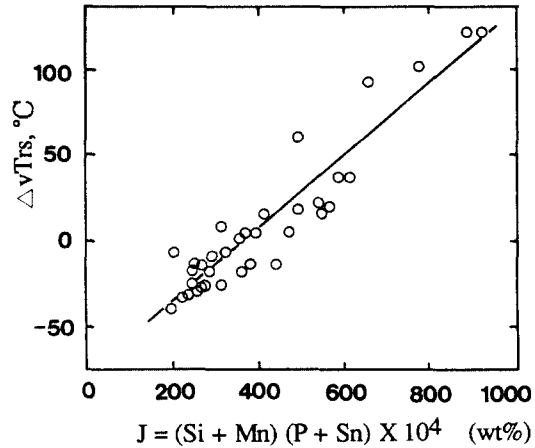


그림 3 Cr-Mo강의 J-factor와 ΔvTrs 사이의 관계

따라서 그림 3에는 J-factor와 ΔvTrs 사이의 관계를 나타낸 것으로 J-factor가 커지면 ΔvTrs는 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

5. 열화재의 강도저하와 수명예측

5.1 T.E에 의한 열화가 재료강도에 미치는 영향^(10~13)

필자 등은 그 동안 재질열화와 수명예측을 위한 연구의 일환으로 고온·고압용 재료로 사용되는 2/4Cr-1Mo강이 실제 플랜트에서 약 400~500°C의 온도 범위에서 약 60,000시간 정도 사

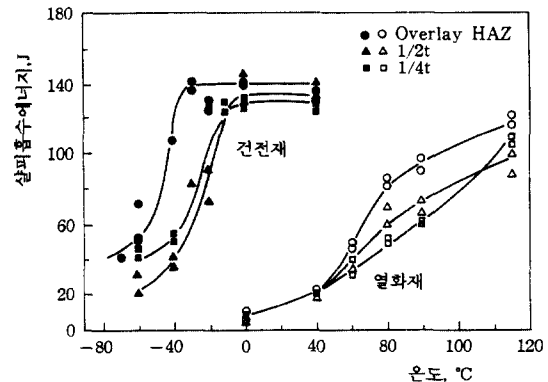
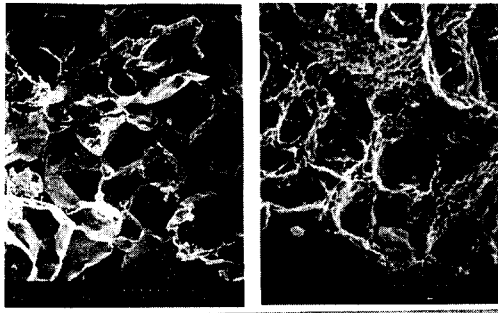


그림 4 열화재와 전전재의 상피충격흡수에너지와 온도사이의 관계



열화재

건전재

그림 5 열화재와 건전재의 상온에서 살피충격파면의 전자현미경사진

용된 재료를 열화재 (degraded materials)로 사용하고, 상기 재료를 650°C에서 1시간 보존 후 급냉시켜 충격치를 회복한 재료를 건전재

(recovered material)라고 명명해서 두 재료의 살피충격시험을 행한 결과 흡수 에너지와 온도 사이의 관계를 그림 4에 나타내었다. 두 재료의 충격치를 상온에서 비교하면 현저한 차이가 나타남을 알 수 있다. 또한 파면전이 온도 (FATT : fracture appearance transition temperature)는 재료열화에 따라 약 120°C 정도 이동함을 알 수 있다.

아울러 열화재와 건전재의 상온에서 충격 파면의 전자 현미경 사진의 일 예를 그림 5에 나타내었다. 사진에서 보듯이 열화재의 경우 입계 파면이 주종을 이루나 건전재의 경우 딩플 (dimple) 파면이 주종을 이루어 양 파면 사이에 큰 차이가 있음을 알 수 있다.

열화재와 건전재의 피로 균열 진전 실험을 수행한 결과로부터 ΔK - da/dN 선도를 구해 본

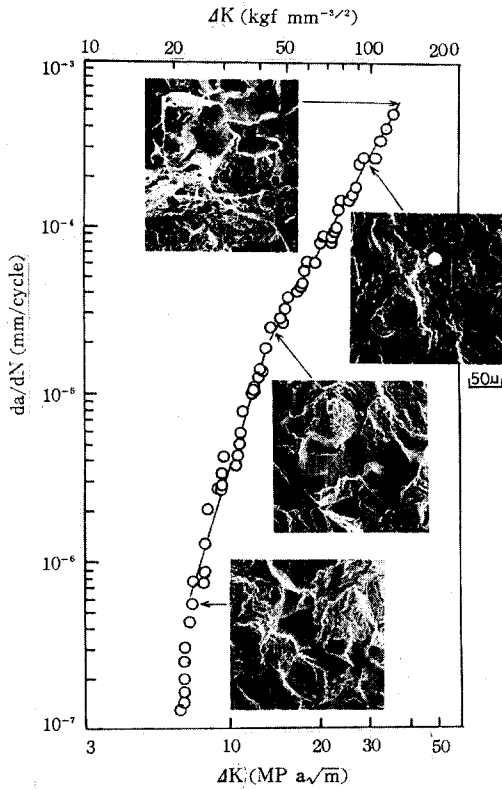


그림 6 열화재의 ΔK - da/dN 선도

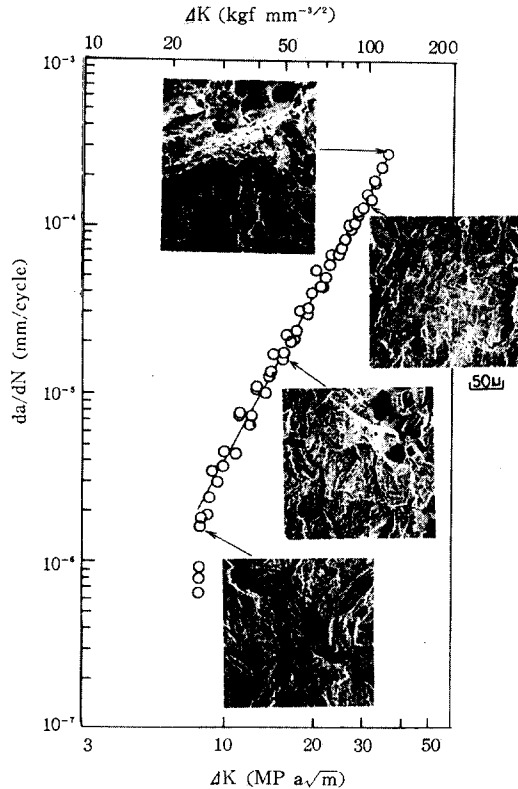


그림 7 건전재의 ΔK - da/dN 선도

예를 그림 6 및 7에 나타내었다. 여기서 그림 6은 열화재에 대해 그림 7은 건전재에 대해 $\Delta K-da/dN$ 의 관계를 나타낸 것이다. 동 그림내에는 피로 파면의 전자 현미경 사진도 아울러 수록해 놓았다. 건전재의 경우 실험 데이터는 거의 직선으로 나타났으나 열화재의 경우 1회 굽은 부분이 존재해서 상·하부가 각각 다른 직선으로 나타나며, 균열 전진 속도도 열화재의 경우가 건전재보다 더 빠르게 나타났다.

아울러 열화재와 건전재에 대해 탄소성 파괴 인성 즉, J_{Ic} 실험을 수행하여 J_{Ic} 의 값을 비교해 본 것이 그림 8이다. 이 그림으로부터 J_{Ic} 의 값은 건전재의 경우 284KJ, 열화재의 경우 157KJ로서 탄소성 파괴 인성치 J_{Ic} 는 재질 열화에 따라 약 1/2 정도 저하하는 것을 알 수 있다.

5.2 열화된 압력용기의 수명예측 방법

5.1의 실험결과에서 얻은 열화재와 건전재의 재료강도에 관한 데이터를 이용한 통계적 수명 예측 방법의 일 예를 그림 9에 나타내었으며 그 과정은 다음과 같다.

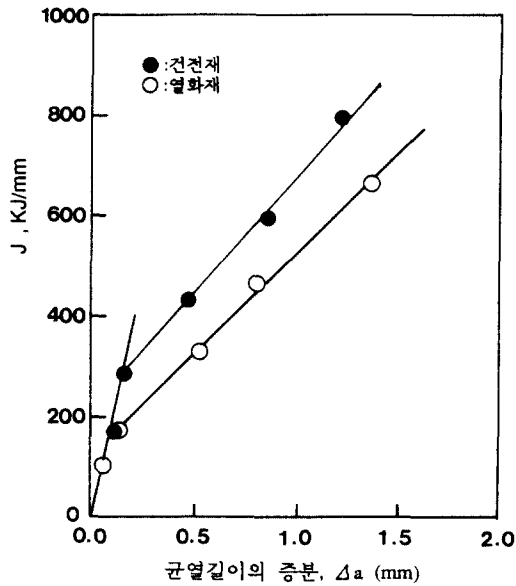


그림 8 열화재와 건전재에 대한 J_{Ic} 파괴인성치 실험결과

1) 비파괴검사에서 검출된 결함을 기준으로 하여 결함검출능력이나 검출하지 못할 확률을 고려하여 실제의 결함치수를 예측한다.

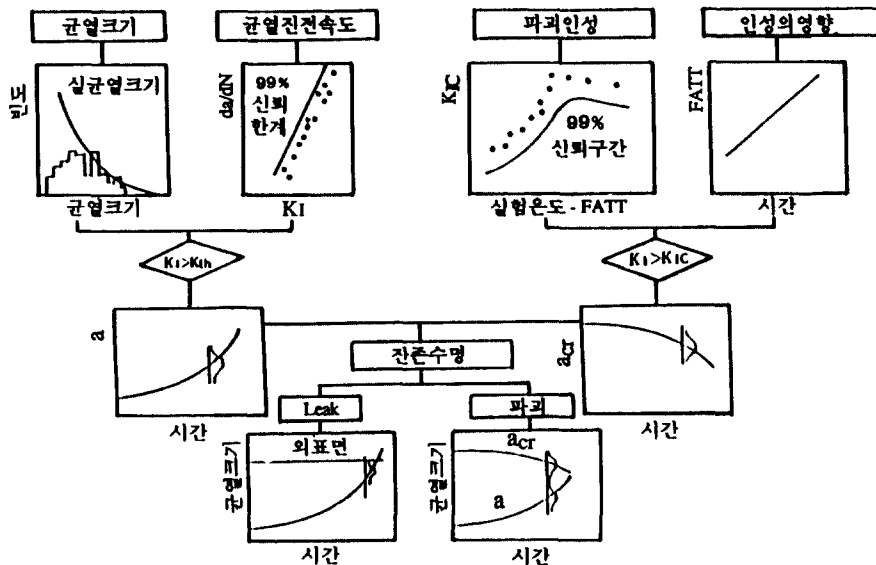


그림 9 통계학적 기계구조물의 수명예측방법

2) 예측된 결함치수에 대한 응력확대계수 K_I 을 계산한다.

3) J-factor와 FATT 사이의 관계를 사용하여 열화의 정도(FATT)를 추정하여 하한계 응력확대계수 K_{Ih} 을 추정한다.

4) 얻어진 K_I 값과 K_{Ih} 의 값을 비교하여 $K_I \geq K_{Ih}$ 을 만족하는 결함만을 진전결함으로 판정한다.

5) 진전결함에 대해 균열치수와 경과 시간과의 관계에서 얻어지는 균열 진전곡선을 구한다.

6) K_{Ic} 와 온도 사이의 주곡선(master curve)과 FATT와 가동시간과의 관계를 사용해서 파괴인성 K_{Ic} 과 가동시간과의 관계를 구한다.

7) 얻어진 파괴 인성치 K_{Ic} 와 가동시간과의 관계에서 한계 균열의 길이 a_{cr} 과 가동시간의 관계선도를 구한다.

8) 먼저 얻은 균열성장 곡선과 한계균열의 치수 또한 압력 용기의 외표면 치수와의 교점이 압력용기의 잔존수명이 된다.

6. 경년열화의 대책

이상에서 언급한 바와 같이 재료의 비파괴적인 열화판정방법은 여러 가지로 연구되어 있으나, 실제 열화가 되었을 경우 재료강도가 어느 정도 저하하는가에 대한 지식이 있어야 잔존수명예측이나 건전성 평가가 가능할 것이다. 따라서 열화에 따른 재료강도 평가를 하기 위해 열화 도중 단계의 재료의 제작방법이나 열화의 감시방법, 열화의 치료방법 등에 대해 설명코자 한다.

6.1 열화재의 실험실에서 가속 제작법

재질열화가 재료 강도에 미치는 영향을 평가하기 위해서는 열화재의 입수가 필요하나 기계구조물을 파손시키지 않으면 얻기 어려운 점이 있어서 실험실에서 열화재의 제작이 필요하다. 따라서 다음에 그 몇 가지 방법을 소개코자 한다.

(1) 등은 취화 처리법

소정의 온도에서 장시간 유지해서 인성의 변화를 관찰하는 방법으로 온도 및 시간의 영향을 정량적으로 파악하는 것이 가능해 취화 거동의 고찰에는 불가결의 방법이다.

그러나 압력용기 강재 등은 비교적 취화 감수성이 작은 강종으로 평가에는 3~5만 시간의 장시간이 요하기 때문에 간단하지 않다.

(2) 슬로우 콜링(Slow Colling)

이 방법은 열처리에 따라 열화 도중 단계를 제작하는 방안으로서 660°C에서 약 30분 정도 유지시킨 후 30°C/hr로 서냉시키는 방법이다. 이때 냉각속도를 조정함에 따라 여러 단계의 열화 도중 단계의 시료 제작이 가능할 것이다.

(3) 스텝 콜링(Step Colling)

T.E 감수성을 조사하기 위해 취화 실험법으로서 스텝 콜링 처리가 요구되는 경우가 많이 있다. 이 방법은 T.E로 가속시키기 위해 600~300°C의 취화온도 영역에서 단계적으로 냉각하는 방법으로서 그 온도 및 시간을 조합시키는 방법에 따라 GE서냉형, GE노냉형, SOCIAL형 및 CALTEEX형 등의 방법이 제안되어 있으나 각 방법 사이에는 취화량이 ±1°C 정도로 나타나서 별 차이가 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

스텝 콜링의 대표적인 사이클을 그림 10에 나타내었다.

6.2 감시 시험편에 의한 방법

열화 손상을 받은 기계구조물과 동일한 환경

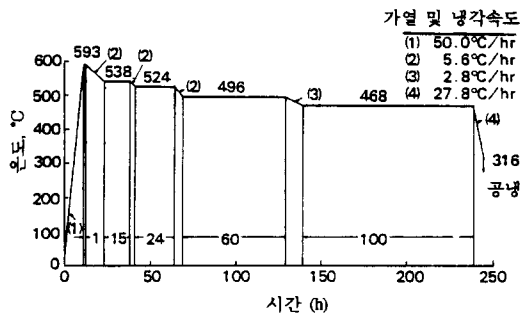


그림 10 스텝 콜링(step cooling)의 대표적인 예

하에 예비 시험재료를 삽입하였다가 정기적으로 꺼내서 재료 시험을 수행함에 따라 열화의 정도를 감시 평가하는 방법을 들 수 있다.

이 방법은 직접 열화도를 감시할 수 있는 이점이 있지만 시간이 많이 걸리고 비용이 많이 든다.

6.3 환경 인자를 감시하는 방법

장치 재료의 열화 특성과 밀접한 관계가 있는 환경인자의 양을 연속적으로 모니터링하는 방법에 따라 재료의 손상 예측에 유용할 것으로 생각된다.

6.4 열화의 치료 방법의 개발

각종 기계 구조물 등의 열화 정도를 파악한 후 열화를 치료할 수 있는 방법이 개발된다면 기계 구조물의 건전성 평가 및 안전 사용을 위해서는 매우 중요하고도 유용한 방법이 될 것이다. 이 방법에 대해서는 아직 국제적으로도 연구된 바 없으나, 필자의 연구실에서 이제 연구를 시작한 단계이므로 구체적인 언급을 할 수 없음을 유감으로 생각하나 조만간 그 방법을 제시할 수 있을 것으로 생각한다.

7. 맺음말

이 글에서는 재료의 경년열화의 종류, 판정 방법 등에 관한 일반사항을 기술하고 고온·고압용기의 경년열화현상의 대표적인 예인 T.E의 기구와 T.E감수성에 미치는 화학성분의 영향에 대해 설명하였다. 아울러 필자가 그 동안 연구해온 T.E에 의한 재료강도저하를 설명하고 수명예측을 행할 수 있는 방법을 설명하였다.

끝으로 열화의 비파괴 판정만으로 수명예측이 어려우므로 시간에 따른 열화 정도를 파악할 수 있는 재료강도의 주곡선을 만들어야 할 것이다. 이와 같은 실험을 하기 위해 열화재의 가속제작방법과 열화치료대책 등에 대해 설명하였다.

앞으로 국내에서는 열화에 대한 재료강도의 주곡선이 많이 얻어져서 기계 구조물의 수명예측이 정확하게 이루어질 날이 올 것을 기대한다.

참고문헌

- (1) 北川英夫, 1986, “劣化 問題の 現状と 問題點,” 金屬, 第58-8, pp. 30~34.
- (2) Takeharu, W., 1985, “Deterioration of Material Used in Chemeical Equipment after Long Term Service,” 壓力技術, 第22卷, 第6號.
- (3) 高壓カス協會, 1985, “高溫 高壓 下で, 使用される 壓力容器 破壊防止.”
- (4) 日本機械學會, 1985, RC-65 フラシト壽命の 豫測と豫知研究報告書.
- (5) Sawada, S., Ohhashi, T. and Watanabe, J., 1978, “Temper Embrittlement Characteristics of 2 1/4Cr-1Mo Steel Used in Hydrogenation Units for 30000 and 60000 Hour at About 660 to 840°F,” ASME/MPC, pp. 167~186.
- (6) Iwadate, T., Karaushi, T. and Watanabe, J., 1977, “Prediction of Frature Toughness K_{IC} OF 2 1/4Cr-1Mo Pressure Steels Form Charpy V-Nothche Results,” ASTM STP-631, pp. 493~506.
- (7) Erwin, W.E. and Kerr, J.G., 1982, “The Use of Quenched and Tempered 2 1/4 Cr-1 Mo Steel for Thick Wall Reactor Vessels in Petroleum Refinery Process,” Welding Reserch Councile Bulletine 275, New York.
- (8) 勝, 高田, 平野, 1981, “壓力容器用鋼野焼きもと”しせ“い性” 壓力技術 第19卷, 3號, p. 120
- (9) McMahon, C.J. and Jr., J., 1967, “Temper Brittleness -An Interpretive Review,” ASTM STP No. 407.
- (10) 北川英夫, 權在度, 島崎鋼, 1986, “長期

- 使用 クロムモリブデン鋼劣化材の 疲勞龜裂 進展壽命豫測,” 日本機械學會論文集, A, 第 52~480, pp. 1749~1756
- (11) 權在度, 中曾根 祐司, 北川英夫, 1987, “長期使用 劣化材의 信賴性 工學的 疲勞 壽命 豫測,” 材料, 第26卷, 408號, pp. 927~933.
- (12) 권재도, 1989, “재질열화가 표면크랙진전에 미치는 영향과 수명예측에 관한 연구,” 대한기계학회 논문집, 제13-5, pp. 921~927.
- (13) Kwon, J.D., 1991, “Life Prediction and Evaluation of Fracture Toughness in the 2 1/4Cr-1Mo Degraded Materials,” MDLP, pp. 86~104.
- (14) Iwadate, T., et al, 1985, “Tran of ASME Jour. of Pressure Vessel Technology,” Vol. 107, p. 230.
- (15) Erwin, W.E. and Keer, J.G., 1982 “The Use of Quenched and Tempered 2 1/4 Cr-1 Mo Steel for Thick Wall Reactor Vessels in Petroleum Refinery Processes,” Welding Research Council Bulletin 275.
- (16) 村上賀國, 1983, “壓力容器厚肉3Ni-Cr-Mo鍛鋼品の焼もどしぜい性壓力容器に關する研究,” 第23卷, 第5號, pp. 43~84.
- (17) Yoshitaka, I., Nobuo, C. and Takashi H., 1983, “Estimation of Long-Term Degradation of Cr-Mo-V Steel Castings,” 材料, 第 35卷, pp. 52~57. 