

기계 · 구조물의 경년열화와 수명평가기술

Material Degradation and Life Assessment in Mechanical Equipment and Structure

김 건 영*
 K. Y. Kim*

초 록 플랜트와 같은 장치산업은 내구성 구조물이므로 사용중에 열화가 발생하는 것은 필연적이다. 특히 고온, 고압의 부식환경하에서 사용되는 설비는 손상이 심하므로 가동중에 돌발적인 고장이 발생하여 플랜트의 가동을 중지하거나 파손 사고가 일어나 생산손실은 물론 경우에 따라서는 안전사고의 발생, 환경오염 등 사회적인 문제를 일으키므로 이들 설비의 경년열화 실체를 충분히 이해하고 대책을 수립하는 것은 대단히 중요하다. 따라서 본고에서는 장치산업에서 발생하는 열화 현상(재료의 연화, 경화 및 취화, 크리프, 피로, 부식, 마모 등)중 손상의 주류를 이루는 연화, 경화 및 취화, 크리프, 피로에 대하여 기본적인 손상기구(damage mechanism)와 비파괴적 진단 및 평가 방법에 주안점을 두어, 현재 국내의 각종 플랜트 진단에 실용화된 기술을 해설하여 이 분야에 종사하는 관계자 여러분의 이해에 조금이라도 기여코자 한다.

1. 서 론

고온 · 고압설비의 열화진단 및 수명평가기술은 발전 플랜트 설비를 대상으로 기술이 개발되어 왔지만 석유, 화학 플랜트 설비에서의 이들 기술은 발전 플랜트의 보일러 및 압력용기, 배관, 열교환기, 증기터빈 등과 유사하므로 이들 적용기술을 바탕으로 이해할 수 있다.

발전 플랜트 설비에서 경년열화가 문제가 된 배경은 (1) 효율향상을 위해서는 사용중기의 고온 · 고압화와 설비의 대형화가 필연적이며 (2) 수효변동에 따라 발전량이 신속하게 변동하여야 하므로 변압운전(pressure sliding operating) 등 운전여건의 가혹함도 피할 수 없는 것이 현실이기 때문이다.

또한 발전 플랜트는 장치산업의 특성상 초기 투자비가 많이 소요되어 가능한 한 장기간(30년 이상) 사용하게 되므로 경년열화 설비가 많아져, 수명을 예측, 적절한 보수관리 및 열화회복 등을 통해 수명을 연장하는 것이 현재의 상황이다. 우리나라의 화력발전 플랜트를 보면 1998년 말 현재, 10년 이상 장기사용된 설비가 전체의 65.5% 이상이며, 공업화가 일찍이 가져온 일본의 경우는 15년 이상된 화력발전 플랜트가 72.0%에

달하고 있으며, 누적운전시간으로도 설계수명(10만 시간)을 넘는, 이른바 노후화력설비가 63.0%나 된다.

더욱이 최근에는 전력수요의 기저부하(base load) 부담을 원자력 발전 플랜트가 담당하게 되어 화력 발전 플랜트는 변동부하(cyclic load) 운전으로 매일심야정지기동(DSS: daily start-shut down), 주말정지기동(WSS: weekly start-shut down) 등 빈번한 기동 · 정지와 부하 변동으로 피로하중의 증가 등 더욱 가혹한 운전조건에 직면하고 있다.

이 때문에 노후화력 플랜트의 성능 · 신뢰성 유지가 현안 과제이므로 화력 플랜트중 가장 사용환경이 가혹한 고온 · 고압설비에서 발생하는 경년열화기구와 비파괴적 진단기술 및 수명평가기술에 대하여 살펴보는 것은 대단히 의미가 크다.

2. 본 론

기계 및 구조물의 열화는 성능저하와 신뢰성 저하로 대별되나 본고에서는 재질열화에 의한 신뢰성 저하에 주안점을 둔다. 열화란 넓은 의미로 Fig. 1에서와 같이 장기사용된 설비 또는 열처리된 설비에서는 재료가 내

부구조의 변화로 전기화학적 성질, 기계적 성질 및 전기, 자기적 성질이 변하는 현상을 가리키지만 최근에는 사용환경에 따라 기계적 성질(인장강도, 피로강도, 크리프 강도 및 파괴인성)이 저하하여 손상이 발생하는 것을 의미하기도 한다.

따라서 재료의 열화 즉, 기계적 성질 변화를 알기 위해서는 전기화학적 성질의 변화, 전자기적 성질의 변화를 비파괴적으로 평가하는 것이 매우 중요하다.

2. 1. 기계·설비의 경년열화와 손상

기계·설비중 보일러에서 발생하는 경년열화를 살펴 보면, 고온·고압하에서 장기간 사용되면 고온 크리프, 피로, 크리프·피로 및 마모(erosion) 부식(corrosion) 등의 손상을 받으며 그 손상의 발생형태는 사용 조건과 재질에 따라 단독 또는 여러 원인이 복합적으로 작용하여 다양한 양상으로 나타난다.

따라서 열화는 어떠한 사용환경에서도 발생할 수 있으므로 이의 대응 대책은

- (1) 사용환경하에서 재료가 열화되는 현상 기구 규명
- (2) 열화의 진행정도 파악
- (3) 열화된 재료의 사용성능 판단과 사용 가부 결정 등이 중요한 사안이다.

Table 1은 화력발전용 주요 고온고압 설비에서 발생하는 경년열화 요인과 진단기법을 정리한 것이다.

Table 1 화력발전용 주요 설비의 경년열화 요인과 진단법

	대 상 부 위	열 화 요 인	진 단 기 법		
			1	2	3
보일러 설비	• 보일러 관 - 화로 중발관 - 과열기관 - 재열기관	고온 크리프	파괴 검사	조직 검사	조직 검사
	• 보일러 stub - 중발 stub - 과열기 stub - 재열기 stub - (고온 부위)	고온 크리프	경도 측정	조직 검사	파괴 검사
	• Reader-stub부위 (고온력 작용부)	저주기 피로	경도 측정	응력 해석	파괴 검사 조직 검사
터빈 설비	• 터빈 casing	고온 크리프 저주기 피로	경도 측정	조직검사 응력해석	파괴 검사
	• 터빈 rotor	고온 크리프 저주기 피로	응력해석	경도측정	조직 검사
	• 터빈 blade	고온 크리프	손상량측정		
발전기	• 발전기 rotor • Wedge	저주기 피로 저주기 피로	경도측정 조직검사	조직검사 응력해석	파괴검사
	• Eng ring	응력 부식 균 열	조직검사		
	• 발전기 고정자	온도 누적 부하 변동 기동 정지	적류시험 (성극지수)	교류시험	

2. 2. 비파괴적 경년열화 진단기술

경년열화 진단기술은 파괴적 방법, 비파괴적 방법과 해석적 방법으로 대별하며 해석적 방법을 비파괴적 방법의 하나로 간주하기도 한다. Fig. 2는 플랜트의 정밀 진단 및 수명평가 업무의 흐름도로서 이들 기술은 독자적으로 또는 상호보완적으로 연계되어 이용, 신뢰성을 확보한다.

비파괴적 평가는 대상부위를 외부에서 진단하는 방법이 기 때문에 장소가 협소하거나 기기내부는 평가가 곤란하다는 단점이 있지만 파괴적 평가에 비하면 효율적, 경제적이며 정기적인 모니터링이 가능하다는 장점이 있다. 일반적으로 파괴적 방법은 적용할 수 있는 경우가 적기 때문에 비파괴적 평가가 잔존수명 평가에 유용한 방법이 된다.

비파괴적 평가법은 물리적 성질의 변화에 착안하는 방법과 금속조직 변화에 착안하는 방법으로 나눌 수 있다. 이 중에서 금속조직학적 방법은 손상을 직접 검출할 수 있다는 장점이 있어 실용성이 크고, 높은 정확도의 수명평가가 가능하지만 대부분의 경우 설비에서 직접 현미경으로 조직관찰이 어려우므로 간접 방법인 표면복제법이 많이 이용되며 물리적 성질의 측정 방법은 경도법, 전기화학 측정법 등이 실용화되어 있으므로 이들에 대하여 설명한다.

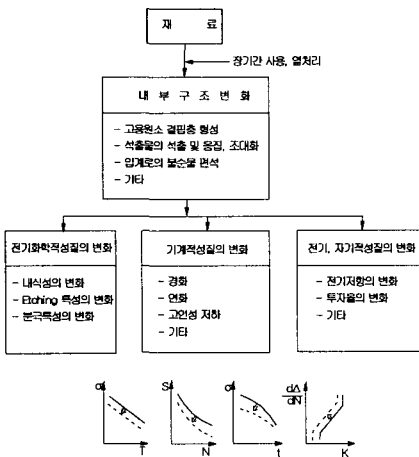


Fig. 1 금속재료의 내부구조 변화와 각종 성질 변화

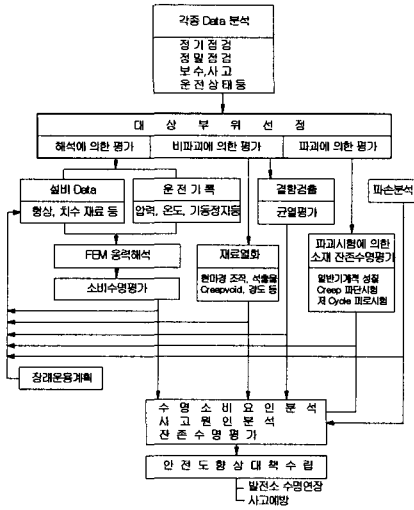


Fig. 2 경년열화 및 수명평가기술의 구성과 흐름도

2.2.1. 표면복제법(Replica Method) : 크리프 수명 진단법

1) 개요

금속조직검사법의 단점인 적용개소의 제약을 보완한 것으로서 레플리카 필름을 부식시킨 대상부위의 표면에 피복한 후 금속조직이 복제된 필름을 실험실로 가져와 광학현미경이나 전자현미경으로 조직, 추출물 등을 관찰, 분석하는 비파괴적 방법이다.

레플리카 채취 및 관찰요령에 대해서는 1974년에 제정된 국제규격 ISO 3057 (Non-Destructive Testing-Metallographic Replica Techniques of Surface Examination)이 있으며, 미국의 경우에는 1987년에 ASTM ES 12의 긴급규격이 제정되어 1990년에 ASTM E 1351(Standard Practice for Production and Evaluation of Field Metallographic Replicas)로 정식 규격화 되었다.

2) 채취법

금속조직 검사용으로 시판되고 있는 레플리카 필름은 acetylcellulose와 paraffine을 조합한 것으로 0.035mm와 0.008mm두께의 두 종류가 있다. 이들은 레플리카 채취면의 요철 정도와 온도 등의 조건에 따라 구별하여 사용한다. 요철이 심하고 온도가 높아 레플리카 필름이 연화되기 쉬운 경우에는 두꺼운 것을

사용한다.

용제로는 시약 1급 규격 이상의 methyl acetate를 사용한다. Fig. 3과 같이 1단계, 2단계 레플리카 및 추출 레플리카의 3종류가 있으며 레플리카 채취 절차는 황삭(rough grinding)→연삭(fine grinding)→연마(polishing)→부식(etching)→건조(drying)→레플리카 채취→(증착)→레플리카 glass slide에 부착→레플리카 관찰의 순서로 진행하며, 현장에서 채취된 레플리카는 직접 광학현미경으로 관찰하기도 하고, 명암(contrast)을 향상시키기 위하여 증착처리하기도 한다. 또한 레플리카를 glass slide에 부착시키기 전에 검은 페인트나 잉크로 색칠하여 명암을 향상시키기도 한다. 광학현미경 관찰시의 증착재료는 알루미늄이나 크롬이 적당하지만 전자현미경 관찰시에는 도전성과

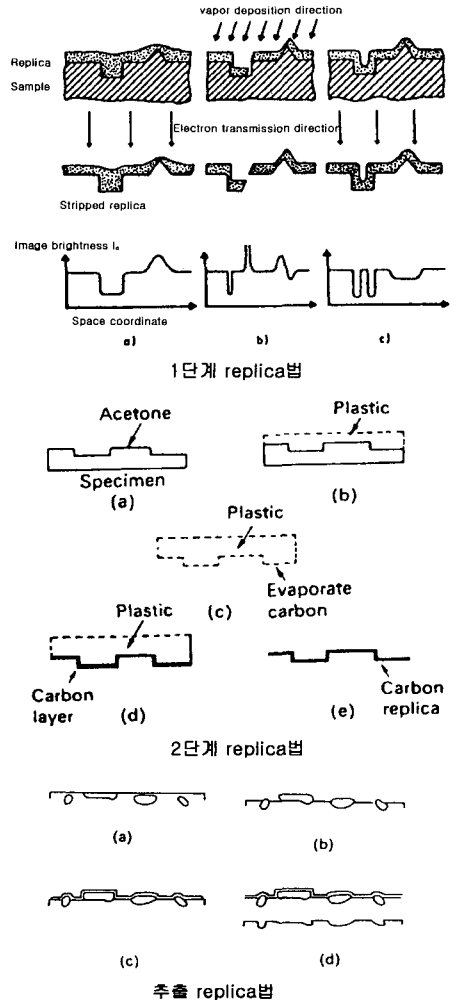


Fig. 3 레플리카의 종류 및 채취방법

2차 전자의 반사효율관점에서 구리를 사용하는 것이 바람직하다.

광학현미경 조직은 1000배 정도의 관찰이 가능하나, 통상 500배 이하로 관찰한다. 크리프 기공은 큰 경우나 연결된 경우에는 광학현미경으로 관찰이 가능하나 수 마이크로(micron) 이하의 단독기공은 전자현미경이 아니면 관찰이 어렵다. 전자현미경에 의한 관찰배율은 최고 5000배 정도까지 고배율로 관찰하는 것이 바람직하다.

3) 재질열화 평가법

(1) 조직대비법

레플리카를 이용하여 관찰된 조직과 표준조직을 비교하여, 손상정도를 판단하는 가장 기본적인 방법으로 독일을 비롯한 유럽에서 먼저 개발하여 사용하여 왔으며, 그후 일본의 미시비시중공업에서는 이를 개선한 금속조직학적 크리프 수명 평가법(MLAS : mitsubishi metallurgical life assessment)을 개발, 손상정도가 큰 용접부나 응력집중부의 재질평가에 적용하고 있다. 크리프기공의 정성적 평가인 독일의 조직대비법은 Fig. 4과 같이 기공과 균열상태에 따라 분류하여 각 등급에 대응하는 정기점검 및 보수관리를 하고 있다. 일본 미시비시에서는 Cr-Mo저합금강의 용접열영향부(HAZ)에서의 크리프 손상의 진전과 조직변화관계를 크리프시험 중단재와 실기의 장시간 사용재를 사용, 조사하여 Fig. 5(a)와 같이 손상인자를 구분하였다. 즉, 기계적 손상은 크리프기공, 미시균열, 균열의 유무에 따라 4단계로, 현미경 조직과 석출물의 분포 상황은 손상의 진전에 따라 각각 3단계로 분류하였다. 이와 같은

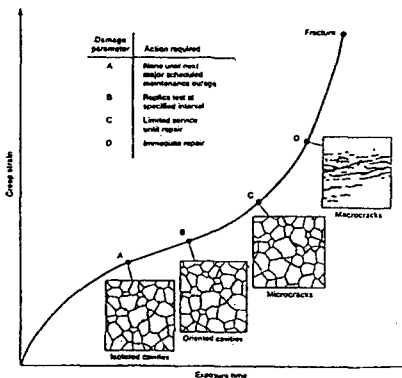
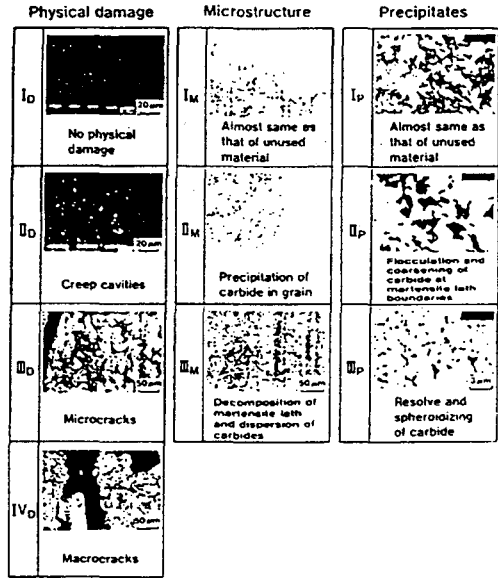


Fig. 4 독일의 레플리카를 이용한 크리프 수명평가

손상인자와 크리프 파단 시험결과로부터 구한 크리프 파단 수명소비율을 대비시켜 Fig. 5(b)에서와 같이 종합손상구분을 7단계로 하여 크리프 파단 수명소비율을 추정한다.

이외에도 일본 이시가와지마-하리마중공업의 온도-



(a)

손상 Parameter			손상의 분류	Creep 수명 소비율
기계적	미세조직	석출물		
손상없음 (I _D)	미사용재와 거의 동일 (I _M)	미사용재와 거의 동일 (I _P)	A	0
			B	10
기 공 (II _D)	입내탄화물 석출 (II _M)	마르텐사이트 등의 응집 및 조대화 (II _P)	C	20
			D	30
			E	40
미소균열 (III _D)	재용해 및 구상화 (III _P)	마르텐사이트의 분해 및 탄화물 분산 (III _M)	F	50
G			60	
거시균열 (IV _D)				70
				80
				90
				100

(b)

Fig. 5 일본 미시비시의 Cr-Mo강 열영향 부의 손상인자 (a)와 수명소비율의 관계(b)

시간변수(TTP)와 조직대비법 등이 있으나 위의 2방법이 가장 많이 사용되고 있다.

(2) 기공정량화법

앞에 설명한 독일의 조직대비법이나 일본의 MLAS 법은 기공의 유무, 균열의 발생상황 등을 고려하여 손상등급을 분류하는 정성적 내지 반정량적 방법이나 기공정량화법은 레플리카나 시료를 채취하여 밀도변화를 측정하는 방법이다. 기공이 생성되면 부피가 증가하여 밀도가 감소하기 때문에 미사용재 등 건전재의 밀도(D)와 손상재의 상대밀도변화량(ΔD)를 측정하여 $\Delta D/D$ 를 구하는 비교방법으로 무응력하에서 동일한 사용 이력을 갖는 단순가열재도 필요하다.

평가법으로는 Table 2과 같이 면적율법, 면밀도법, 기공크기법, 생성입계율법(A 파라미터법)이 있다.

(2.1) 면적율법

일본 히타치에서 개발한 방법으로 관찰된 면적에 대한 기공의 면적비를 이용하여 손상을 평가하는 방법이다. Fig. 6은 2.25Cr-1Mo강 용접부에 대한 평가 예이다.

(2.2) 면밀도법

크리프 기공의 수를 주사전자현미경을 이용하여 단위 면적당의 수를 측정하여, 면밀도(X_v)를 다음식으로 표시한다.

$$X_v = n_v / a \text{ (mm}^{-2}\text{)} \dots\dots\dots (1)$$

여기서 n_v 는 기공수, a는 측정면적이다. 이경우의 평가선도를 Fig. 7에 나타낸다. 이 방법은 수명 후반의 평가방법임을 알 수 있다.

(2.3) 생성 입계율법 (A 파라미터법)

A 파라미터법은 영국의 ERA, CEGB 및 미국의 EPRI에서 제안한 Fig. 8과 같이, 평가 대상재의 광학 현미경 또는 주사 전자 현미경 조직에 최대 주응력 방

Table 2 기공정량화 평가법

평가인자	평가 방법	비 고
면적율	생성된 기공의 비율 = 전 격자점 중심의 수 / 총 격자점수 × 시야수	격자(보통 20×20사용)를 시야 상에 놓고 측정
면밀도	단위 면적당의 기공 수 = 기공의 총 수 / 1시야의 면적 × 시야수	단위 입계 길이 당의 기공 수를 구하기도 한다.
크 기	평균크기 = 기공 직경의 총합 / 기공의 총 수	최대 크기를 구하기도 한다.
생성입계율	기공이 생성된 입계의 비율 = 기공을 포함한 입계의 수 / 전입계의수	A Parameter

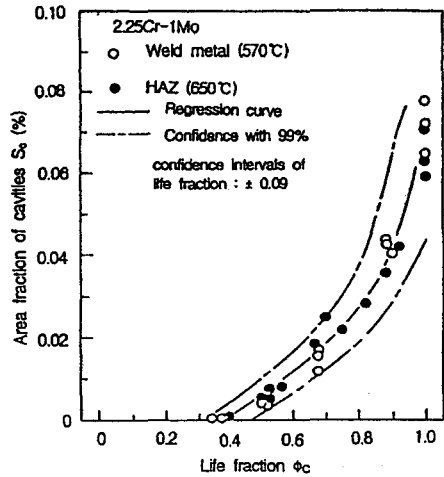


Fig. 6 기공의 면적율과 크리프 손상율과의 관계 (2.25Cr-1Mo강 HAZ)

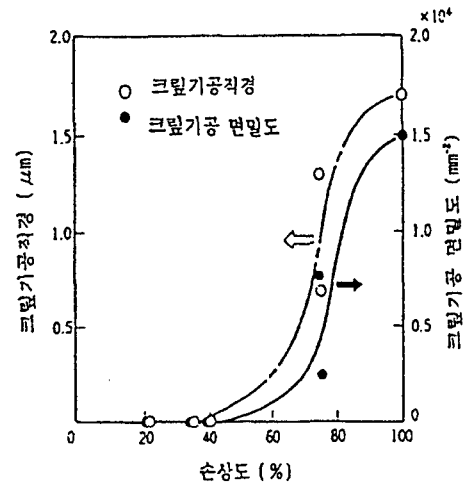


Fig. 7 크리프 기공의 면밀도 및 직경과 크리프 손상율과의 관계

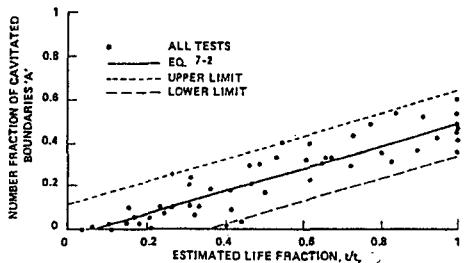


Fig. 8 A 파라미터의 측정법 및 크리프 파단 수명 소비율과의 관계

향으로 직선을 그어 그 직선과 입계와의 교차점(n_D+n_U)에서 점유하고 있는 크리프 기공 발생 입계 즉, 손상입계(n_D)의 비율을 A 파라미터라고 정의한다.

$$A = n_D / (n_D + n_U) \dots\dots\dots (2)$$

그 외 발생기공의 초수와 기공직경의 총합비를 즉 평균 크기를 구하거나 최대크기를 구하는 방법도 있다.

(3) 결정립 변형법 크리프

거동은 Fig. 9와 같이 강종마다 그 특성이 다르기 때문에 이를 고려한 손상진단도 가능하다. 즉, 용접부나 스텐레스강과 같이 결정립의 강도가 커 입내변형이 일어나기 어려운 저연성 재료에서는 입계에 변형이 집중되어 수명의 약 1/2 시점부터 기공이 발생하기 때문에 대부분의 기간을 기공을 관찰하므로써 진단할 수 있다. 그러나 고온·고압부 재료중 가장 많이 사용되는 Cr-Mo강과 같이 결정립이 변형되기 쉬운 고연성 재료에서는 기공은 수명말기에 처음 발생하기 때문에 손상과정의 넓은 범위를 진단하는 방법으로는 부적당하다. 이 때문에 일본의 히타치의 이시가와시마-하리마에서는 결정립의 변형 정도를 정량화하여 크리프 손상을 진단하는 결정립 변형법을 개발하였다.

이 방법은 Fig. 10에서와 같이 크리프 손상이 진행됨에 따라 웨라이트 결정립이 응력방향으로 변형된다는 사실에 착안한 것으로서 변형을 정량화하는 파라미터로서는 결정립의 장경방향과 응력방향인 이루는 각도(θ_m)를 많이 사용하며, 광학현미경과 화상처리장치를 이용하여 측정한다. θ_m 의 분포의 표준편차인 변형계수(S_m)은 크리프 손상율과 Fig. 11와 같이 좋은 상관관계를

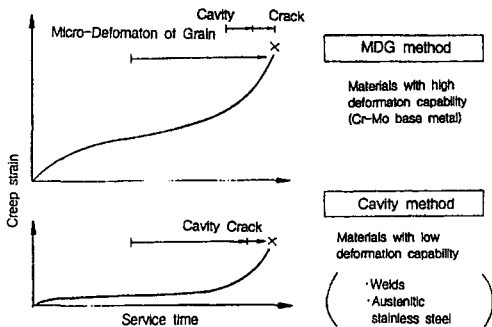


Fig. 9 재질에 따른 크리프 거동의 차이

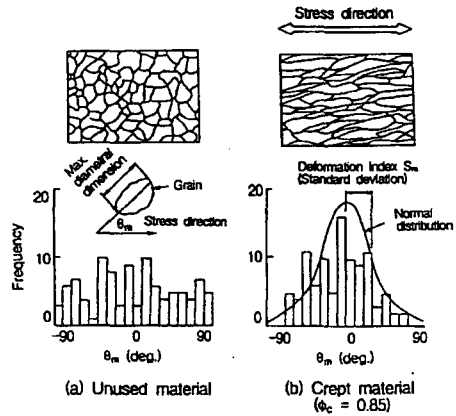


Fig. 10 결정립의 형상 변화 (2.25Cr-1Mo강)

가지고 있기 때문에 전도 높은 진단을 할 수 있다. 실기에서는 응력방향이 불분명한 경우가 있으나, 응력방향을 몰라도 각도의 주기성을 고려하여 최소의 표준편차를 구한다면 각도 변환량으로부터 실기의 응력방향을 예측할 수도 있다. 한편 일본의 이시가와시마-하리마에서는 변형을 정량화하는 파라미터로서 Fere경비(장경/단경)를 사용하기도 한다.

(4) 석출물 검사법

저합금강은 고온에서 장시간 사용할 때 기공 발생 이전에도 탄화물의 크기, 분포, 조성 등의 미세조직 변화

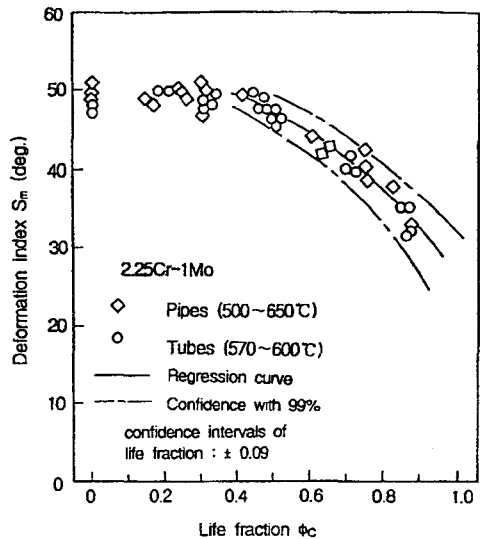


Fig. 11 변형계수와 크리프 손상율과의 관계 (2.25Cr-1Mo강)

가 선행되어 크리프에 대한 저항성을 감소시키기 때문에 수명평가를 위한 한 방법으로 이용되고 있다.

(4.1) 저합금강의 미세조직 변화

합금 원소 Cr, Mo, V는 모두 탄화물 안정화 원소로서 $M_{23}C_6$, M_6C , M_2C 와 같은 복잡한 탄화물을 형성하는데 다음과 같이 크게 3종류로 구분한다.

Class I : 입방정계, $M_{23}C_6$, M_6C

(예 : $Cr_{23}C_6$, Fe_4Mo_2C)

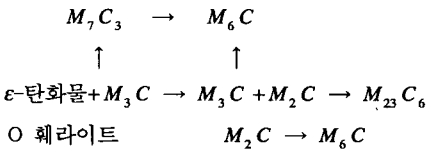
Class II : (조밀)육방정계, MC, M_2C

(예 : MoC, Mo_2C)

Class III : 사방정계, M_3C (예 : Fe_3C)

2.25Cr-1Mo강을 소려(tempering)하거나 고온에서 장시간 사용하면 다음과 같은 탄화물의 석출이 일어난다.

○ 베이나이트



즉, 처음에 생긴, 준평형상태의 탄화물은 M_3C 와 M_2C 는 반응을 거쳐 평형상태의 탄화물인 M_6C 가 된다.

1.25Cr-1Mo강의 경우 초기 탄화물은 M_3C 이며, 장시간 사용하면 M_2C 와 M_7C_3 가 나타난다. 2.25Cr-1Mo강보다 Cr과 Mo의 함유량이 낮기 때문에 $M_{23}C_6$ 는 나타나지 않는다. 0.5Cr-0.5Mo-0.5V강의 경우 M_3C (cementite lamellar)는 M_3C 내의 Fe가 Cr과 Mn으로 서서히 대체되어 결국 $M_{23}C_6$ 이 되며, 동시에 Mo_2C 가 세멘타이트나 V_4C_3 에 생성되어 H-탄화물이 형성된다.

(4.2) 석출물에 의한 평가

석출물간 거리(λ)로는 최근접거리나 평균자유경로가 사용되는데 중심간 최근접거리(λ_{nn})가 가장 재현성이 좋은 것으로 보고되어 있다. 또한 석출물간 거리는 단위면적당 수로부터 아래식을 이용하여 구하기도 한다.

$$\lambda_{nn} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{N_A} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

Fig. 12는 수명소비율과 석출물간의 거리관계를 나타낸 것으로 석출물간 거리에 의한 수명평가가 가능함을 알 수 있다. 2.25Cr-1Mo강 용접부의 탄화물은 초기에는 $M_{23}C_6 + M_7C_3$ 이던 것이 장시간 사용하면 모두 M_6C 가 되는데 수명소비율과 관계있는 탄화물의 변화로는 M_6C 의 석출율과 탄화물의 구상화율이 있으며, 이들은 각각 다음과 같이 정의된다.

$$M_6C \text{ 석출율} = \frac{M_6C \text{ 수}}{\text{전탄화물 수}} \times 100(\%) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{석출물의 구상화} = \frac{\text{석출물의 최단축}}{\text{석출물의 최장축}} \times 100(\%) \cdot (5)$$

M_6C 석출물과 탄화물의 구상화율, 구상화율과 크리프파단 수명 소비율의 관계가 각각 Fig. 13 및 Fig. 14에 나타나 있다.

한편 $M_{23}C_6$ 와 M_7C_3 는 주로 Cr탄화물이고, M_6C 는 주로 Mo탄화물이므로 Cr과 Mo는 이들 탄화물의

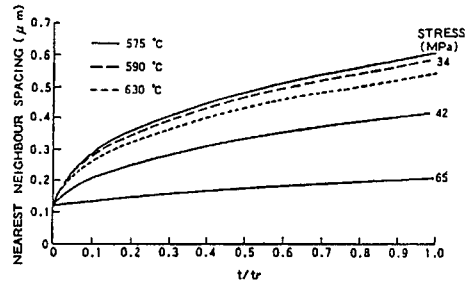


Fig. 12 석출물간 거리에 의한 수명평 방법

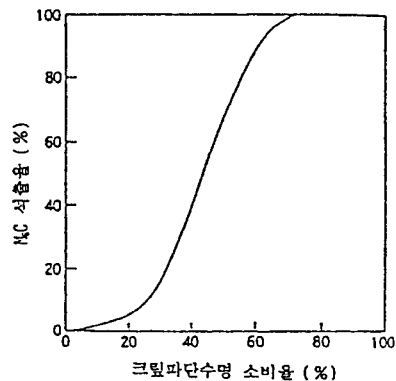


Fig. 13 석출물과 크리프 파단 수명소비율과의 관계 (2.25Cr-1Mo강, HAZ)

소멸, 생성, 성장 및 조대화와 함께 기지의 석출물로서 배분율이 시간에 따라 변화한다. 따라서 이들 원소의 농도분포변화를 정량화하여 수명소비율을 추정할 수 있다. 이를 위하여 미시비시중공업에서는 초고속광역 multi-analyser(CMA)를 개발하여 Fig. 15과 같이 원소농도분포를 스펙트럼으로 표시해 이를 해석함으로써 수명평가에 사용하였다. 즉 농도스펙트럼의 피크를 Gauss분포식으로 근사시켜 계수 K_1 (피크 높이) 및 K_2 (분산도)를 구함으로써 조직을 정량화하였다.

Fig. 15는 CMA농도 스펙트럼해석법에 의한 손상 평가의 예를 나타낸 것이다.

(5) 입계부식법(Grain Boundary Etching Method)

입계부식법은 내식성 및 화학부식특성에 크게 관여하는 불순물인 인, 주석, 망간(Cr-Mo강에서는 주로 P)의 입계편석량을 간접적으로 검출하는 방법으로 재질열화중 취화(인성저하)를 평가하는 방법이다. 이 방법은 오래 전부터 저합금강의 뜨임취화(temper embrittlement)검출에 이용되어 왔으며, 불순물의 입계편석량의 검출은 부식액의 종류, 농도, 부식조건 및 부식시간 등에 의존하므로 현장 실기의 적용성 등을 고려, 부식온도는 상온(25℃)를 기준으로 부식시간을 몇단계로 구분하여 시험한 후 최적조건에서 레플리카를 채취하여 광학현미경을 이용, 표면거칠기, 입계의 폭, 깊이, 격자절단비 등을 측정한다. 평가법으로는 패턴분류법, 입계의 부식폭 및 부식깊이 측정법, 격자절단비 측정법이 있다.

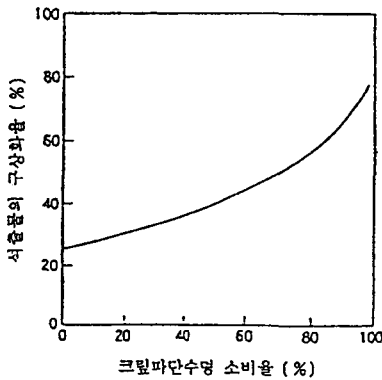
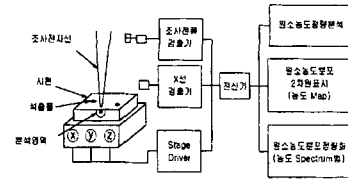


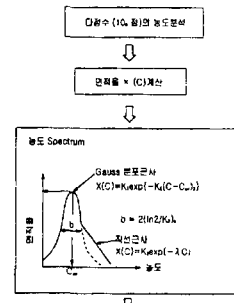
Fig. 14 석출물과 구상화율과 크리프 파단 수명소비율과의 관계 (2.25Cr-1Mo강, HAZ)

(5.1) 패턴 분류법

이 방법은 표준부식액에 의한 부식정도를 정량화하기 이전에 시행하는 정성적인 평가법으로 실험실에서 미리 준비한 열화진행정도 기준사진과 비교하는 것으로서 개략적인 열화도를 판별할 수 있다. Fig. 16은 Cr-Mo강의 재질열화도에 따른 입계부식정도의 차이를 정성적으로 나타낸다.



(1) CMA의 원리



(2) 농도 Spectrum 법

Fig. 15 CMA에 의한 조직정량 분석법

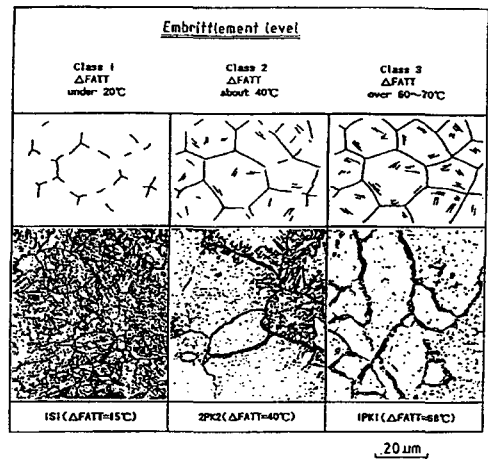


Fig. 16 패턴분류에 의한 입계부식의 취화 등급

(5.2) 입계부식폭 및 부식깊이법

Fig. 17(a)는 Cr-Mo강의 재질열화도와 입계부식 폭과의 관계를 (b)는 부식깊이와의 관계를 나타낸 것이다. Fig. 17을 보면 재질열화도와 입계부식폭 및 깊이 사이에는 양호한 관계를 가지고 있다. 입계부식폭과 재질열화와의 상관관계를 레플리카를 관찰하여 최소자승법으로 구하면 다음식과 같다.

Cr-Mo 강 :

$$(\Delta FATT)_{CVN} [^{\circ}C] = 98.498A^2 - 42.671A - 6.161 \dots (6)$$

Cr-Mo-V 강 : $(\Delta FATT)_{CVN} [^{\circ}C]$

$$= 142.78A^2 - 48.756A \dots (7)$$

탄소 강 : $(\Delta FATT)_{SP} [^{\circ}C] = 36.583A - 32.4 \dots (8)$

(5.3) 격자절단비법

입계부식폭이나 입계부식깊이가 재질열화도와 상관 관계를 가지고 있으나 부식된 입계의 폭과 깊이를 측정 하는데는 상당한 숙련을 필요로 한다.

그러나 Fig. 16에서와 같이 동일한 부식조건에서도 열화도의 차에 따라 입계형성에 차이가 있음을 알 수 있다. 이에 착안하여 Fig. 18에서와 같이 일정 부식 시간에 나타난 입계를 정량화하기 위하여 현미경 관찰에서 일정면적 위에 출현한 입계와 미리정한 일정한 간격

의 격자와 교차되는 입계의 수, 즉 격자절단비(N_i/N_o)를 도입하였다. 여기서 N_o 는 나이탈(nital)부식에 의한 입계와 격자의 교차수이며, N_i 는 피크린산 표준부식액으로 일정시간 부식에 의한 입계의 교차수이다. 격자절단비와 재질열화와의 상관관계를 레플리카를 관찰하여 최소자승법으로 구하면 다음식과 같다.

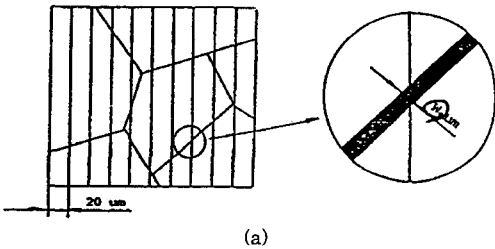
$$\text{Cr-Mo 강 : } (\Delta FATT)_{CVN} [^{\circ}C] = 121.01C - 26.305 \dots (9)$$

$$\text{Cr-Mo-V 강 : } (\Delta FATT)_{CVN} [^{\circ}C] = 261.01C^2 - 63.06 \dots (10)$$

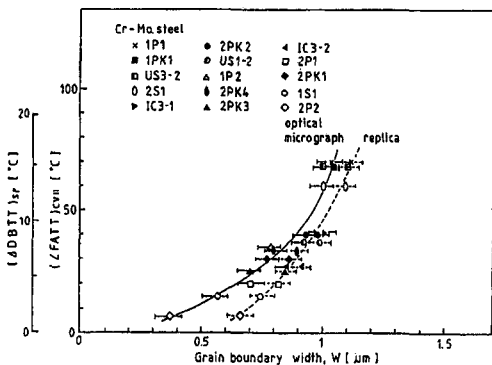
$$\text{탄소강 : } (\Delta FATT)_{SP} [^{\circ}C] = 54.331A - 29.945 \dots (11)$$

2.2.2. 경도법

재질열화진단의 비파괴적 손상검출방법 중에서 경도법은 시험이 간편하고 실용화 가능성이 가장 높은 방법

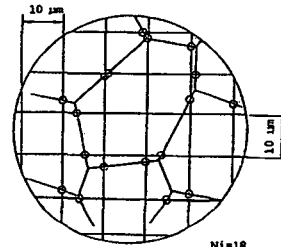


(a)

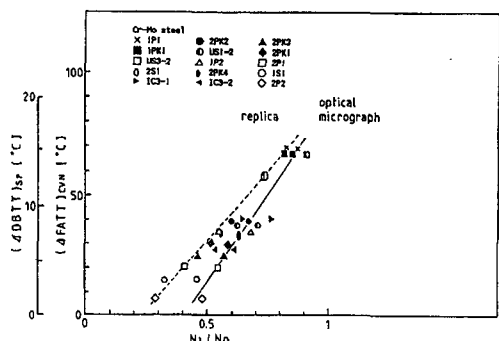


(b)

Fig. 17 입계의 부식폭 및 깊이에 의한 취화 평가



(a)



(b)

Fig. 18 격자 절단비에 의한 취화평가

중의 하나이다.

경도를 알면 재료의 강도, 내마모성, 변형저항 등을 알 수 있을 뿐만 아니라 Larson-Miller변위법에 의해 사용재의 온도추정도 가능하다.

또한 사용재와 미사용재의 경도비로부터 재료의 취화 정도를 평가할 수도 있다.

1) 경도측정에 의한 크리프 손상 예측

(1) 경도감소량에 의한 방법

손상재와 무부하 가열재와의 온도차 ΔH_V 를 구하여 Fig. 19와 같이 경도감소량과 크리프손상량과의 관계로부터 크리프 수명소비를 추정하는 방법이다. 경도차

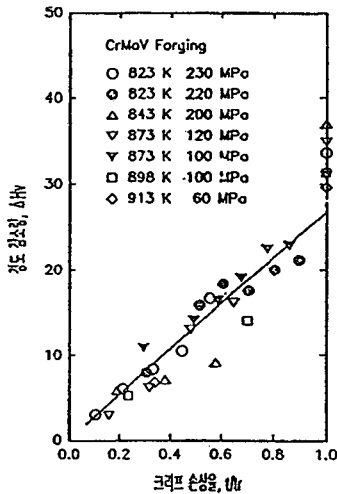


Fig. 19 경도감소량(ΔH_V)과 크리프 손상율(t/t_r)의 관계 (Cr-Mo-V단조강)

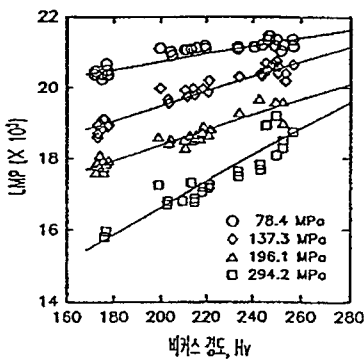


Fig. 20 LMP와 비커스경도(H_v)와의 관계(Cr-Mo-V 단조강)

ΔH_V 는 크리프 손상도의 증가에 따라 일정한 폭을 가지고 직선적으로 증가하는 좋은 상관관계를 나타낸다.

(2) 경도값에 의한 방법

크리프 파단결과와 경도간에는 Fig. 20와 같은 관계가 있으며 이는 아래와 같은 식으로 근사시킬 수 있다.

$$T(20 + \log t_r) = C(\sigma)H_v + D(\sigma) \dots\dots\dots (12)$$

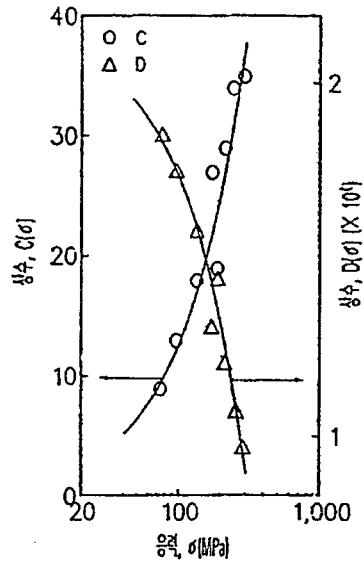


Fig. 21 LMP와 비커스경도값(H_v)와의 관계에서의 $C(\sigma)$ 와 $D(\sigma)$ 의 응력 의존성(Cr-Mo-V단조강)

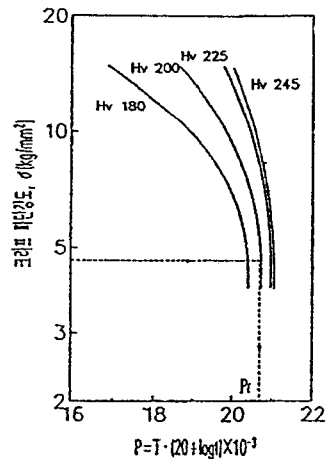


Fig. 22 크리프에 의한 경도값의 변화(Cr-Mo-V단조강)

여기서 T 는 절대온도(°K), t_c 은 크리프 파단시간, $C(\sigma)$ 와 $D(\sigma)$ 는 응력 σ 만의 함수이며 $C(\sigma)$ 와 $D(\sigma)$ 를 응력에 대하여 도시한 Fig. 21로부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$C(\sigma) = C_1 + C_2 \log \sigma + C_3 (\log \sigma)^2 \dots\dots\dots (13)$$

$$D(\sigma) = D_1 + D_2 \log \sigma + D_3 (\log \sigma)^2 \dots\dots\dots (14)$$

여기서 C_i 와 D_i ($i=1, 2, 3$)는 재료상수이다. 따라서 실기의 경도를 측정하면 경년열화 후의 크리프 파단시간을 알 수 있어 잔존수명을 예측할 수 있다.

Fig. 22은 경도를 변수로 하여 크리프 파단강도와 TTP(time-temperature-parameter)의 관계를 실험적으로 구한 것이다. 이를 이용하여 실험경도 및 사용응력으로부터 이에 상응하는 P_r 을 구하여 아래 식으로부터 사용온도(T)에서의 잔존수명을 구할 수 있다.

$$L_R = 10^{P_r/T-C} \dots\dots\dots (15)$$

그러나 이 방법은 사용응력을 알고 있어야만 잔존수명을 예측할 수 있다는 단점이 있다.

(3) 경도비에 의한 방법

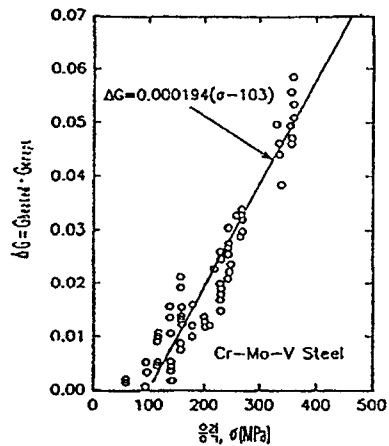
경년열화에 의한 경도저하는 단순가열에 의한 영향과 응력에 의한 영향으로 구분할 수 있으므로 TTP를 이용한 새로운 변수(G)를 다음과 같이 정의하여 응력이 부

가되는 경우 그에 대한 영향으로 G 만큼 변화가 일어난다.

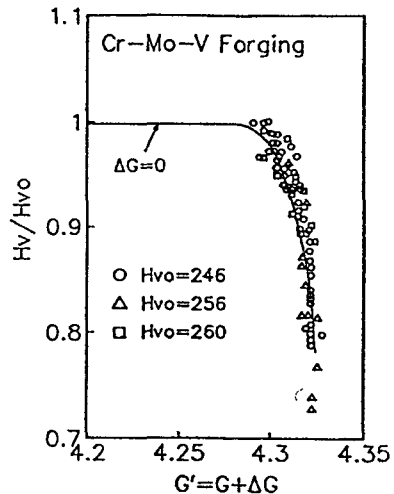
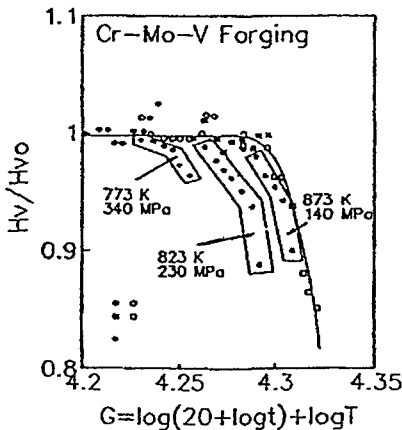
$$\Delta G = \log T + \log(20 + \log t) \dots\dots\dots (16)$$

여기서 T 는 사용온도(°K), t 는 시간이다. 무부하 장시간 가열재와 여러 응력하에서 크리프 시험한 시험재의 경도(H_v)를 미사용재의 경도(H_{v0})로 표준화하여 G 에 대하여 도시하면 Fig. 23의 결과를 얻는다.

이로부터 동일한 H_v/H_{v0} 에서 가열재의 G 값과 크



(a)



(b)

Fig. 23 무부하 장시간 가열재와 크리프 시험재의 G 변수에 대한 경도비의 변화 (Cr-Mo-V 강)

Fig. 24 크리프 응력과 ΔG 와의 관계 (Cr-Mo-V 강)

리프 시험재의 G값과의 차(ΔG)를 구하여 시험응력에 대하여 도시하면 Fig. 24(a)와 같이 양자간에는 직선 관계가 성립한다.

$$\Delta G = 0.000194(\sigma - 103) \dots\dots\dots (17)$$

σ의 단위는 MPa이다.

결국 경도변화(연화)는 아래 식을 이용하여 Fig. 24(b)와 같이 온도 · 응력 · 시간 변수, G'으로 정리할 수 있다.

$$G' = G + 0.000194(\sigma - 103) \quad (\sigma \geq 103\text{MPa}) \dots\dots\dots (18)$$

$$G' = G \quad (\sigma < 103\text{MPa}) \dots\dots\dots (19)$$

사용온도와 사용시간을 알고 있을 경우, G변수를 이용하여 잔존수명을 예측하는 방법을 Fig. 25에 개략적으로 나타낸다. 먼저 손상검출위치(고온 · 응력부)와 등온 · 저응력부(σ < 103MPa)를 선정하여 경도를 측정한다.

Fig. 25(A)와 같이 저응력부의 경도측정 결과로부터 기존의 연화곡선을 이용하여 미사용재의 경도(H_{w0})를 결정한 뒤 평가대상부위의 경도비(H_v/H_{w0})로부터 G'을 구하여 ΔG를 계산[Fig. 25(B)]하고, ΔG = G₁(σ - C)의 관계[Fig. 25(C)]로부터 σ를 추정한다. σ와 T(20 + log t_r)의 관계(기지의 그리프 데이터)로부터 수명(t_r)을 구할 수 있으므로 t_c과 사용시간(t_c)로부터 수명소비율(φ_c) 즉 t_c/t_r를 결정하면 잔존수명(L_R)은 다음식으로 구할 수 있다[Fig. 25(D)]

$$L_R = t_c \cdot (\phi_c^{-1} - 1) \dots\dots\dots (20)$$

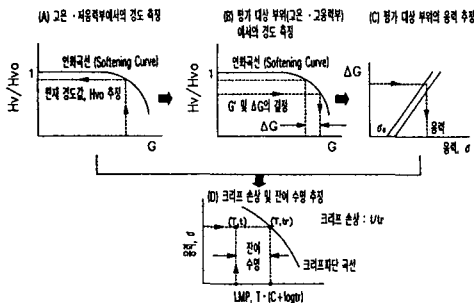


Fig. 25 경도측정을 이용한 크리프 손상과 잔존수명예측법

이와 같이 사용온도와 사용시간을 알고 있을 경우 미사용재의 경도와 사용응력을 추정할 수 있고 미사용재의 경도값과 사용시간을 알고 있을 경우 사용온도와 사용응력을 추정할 수 있다는 장점이 있다.

2) 경도측정을 이용한 피로손상 예측

(1) 경도값에 의한 방법

저주기 피로의 경우 가해진 변형을 범위(Δε)와 균열 생성시까지의 반복횟수(N_c)사이에는 아래와 같은 식으로 표시된다.

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p = k_1 N_c^{a_1} + k_2 N_c^{a_2} \dots\dots\dots (21)$$

여기서 Δε_e는 탄성변형을 범위이고 Δε_p는 소성변형을 범위이며 k₁, a₁, k₂, a₂는 재료상수이다. log k₁과 a₁은 Fig. 26과 같이 경도값과 직선적인 관계가 있어 식 9같이 표시된다.

$$\log k_1 = E \cdot Hv + F \dots\dots\dots (22)$$

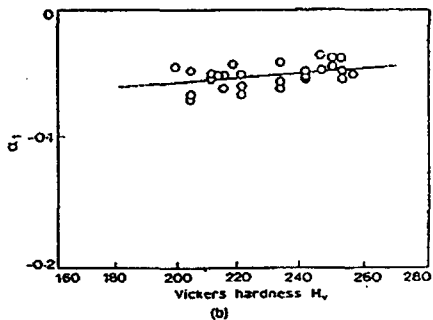
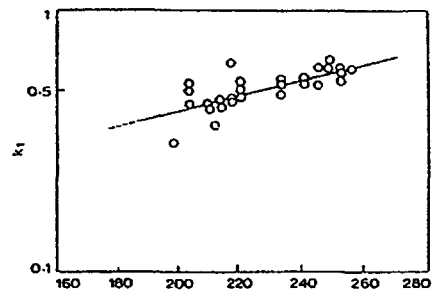


Fig. 26 경도와 저주기 피로 성질과의 관계 (Cr-Mo-V 단조강, 온도 : 566℃)

$$a_1 = G \cdot Hv + H \dots\dots\dots (23)$$

(2) 경도비에 의한 방법

그러나 k_2 와 a_2 는 경도와 무관한 재료상수이므로 경도 측정으로부터 추정된 N_c 와 $\Delta\epsilon_f$ 와의 상관관계는 저주기 피로시험으로부터 구한 실험값이다.

또한 σ_{yd} (0.02% offset cycle yield strength)는 Fig. 27와 같이 Hv와 직선적인 상관관계가 있으며 이는 식 10으로 표시할 수 있다.

$$\sigma_{yd} = I \cdot Hv + J \dots\dots\dots (24)$$

여기서 I와 J는 재료상수이다.

Fig. 28은 고온저주기 피로시, (열화재의 경도)/(시효재의 경도)의 비와 수명소비율의 관계를 나타낸 것으로 이 관계를 이용하여 경도 측정 결과로부터 잔존수명을 용이하게 구할 수 있다. 시효재의 경도값은 크리프 경도와 마찬가지로 진단대상부와 온도는 같으나 응력이 낮은 곳에서의 경도 측정값을 사용한다.

Fig. 29는 경도비와 수명소비율과의 관계를 나타낸 예이다. 그러나 앞의 경우와 달리 진단 대상부의 경도를 미사용재의 경도로 표준화하였다는데 주목할 필요가 있다. Fig. 29에서 수명소비율에 대한 경도비의 변화는 식 (25)로 표시한다.

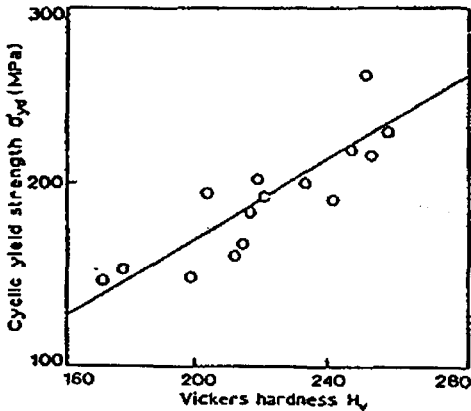


Fig. 27 경도와 σ_{yd} 와의 관계(Cr-Mo-V 단조강 온도 : 566°C)

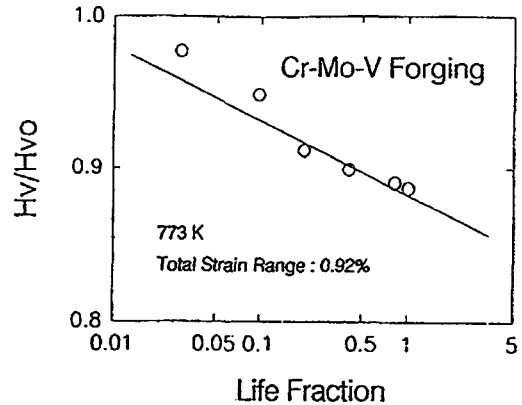


Fig. 29 고온저주기 피로에 의한 경도비의 변화 (Cr-Mo-V강)

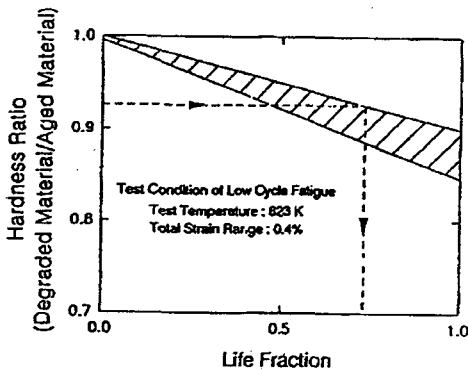


Fig. 28 고온저주기 피로에 의한 경도비의 변화(Cr-Mo-V강)

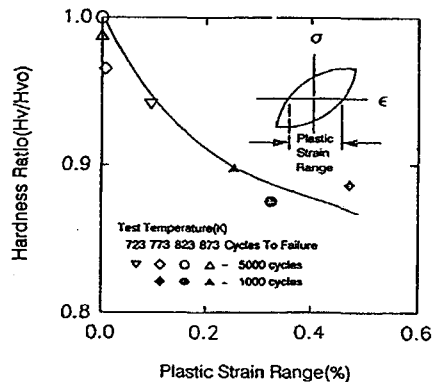


Fig. 30 고온저주기 피로시의 $\Delta\epsilon_f$ 와 경도비의 상관관계

$$H_v/H_{v0} = A + B \log(N/N_0) \dots\dots\dots (25)$$

여기서 H_{v0} 는 미사용재의 경도이며 N 은 반복횟수, N_0 는 파단시간까지의 반복횟수이며 A 와 B 는 상수이다. Fig. 30은 소성변형을 범위와 파단시의 경도비의 관계를 나타낸 것으로서, 상수 A 와 B 는 소성변형을 범위로 표시하고 있음을 알 수 있다.

2.2.3. 전기화학측정법

경년열화가 발생하면 금속재료의 부식특성이 변한다는 것에 근거하여 부식속도를 측정하는 방법으로 교류이용법인 AC Impedance법과 직류법이 있으며, 고온·고압설비에 활용되는 방법은 후자로서 세계적으로 일본에서 주로 개발되어 실용화하고 있다. 재료의 측정파라미터로는 I_p (양극 활성화 peak전류밀도), I_p (재부동태화 전류밀도), ΔI_p (부동태화 후의 peak전류밀도) 등이 있으며, 보통 미사용재와 사용재의 측정값의 비 또는 차와 경도변화, 충격치 변화, Larson-Miller Parameter, FATT, 온도 등과의 상관관계로부터 손상정도를 분석한다.

1) 양극 활성화 peak전류밀도(I_p) 측정법

일반적으로 철(Fe), 크롬(Cr), 니켈(Ni), 티타늄(Ti) 등의 원소를 포함하고 있는 합금들 사이에는 전위-전류밀도 곡선에서와 같이

- 전위전극을 양극방향으로 이동시킴에 따라 부식 또는 용해가 지수함수적으로 증가하는 활성화 영역

- 용해속도가 낮고 일정한 영역 즉 전위를 증가시켜도 전류밀도가 변하지않는 부동태 영역
- 양극전위가 상당히 클때 부동태 파괴되어 용해가 다시 일어나는 과부동태 영역으로 나눌 수 있다.

I_p 는 어떤 특정 전해액에서 특정 석출물의 선택적 용해에 기인되며 I_p 의 크기는 석출물의 양 및 분포와 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 오스테나이트계 스텐레스강의 σ 상 취화나 12Cr강의 탄화물 유기 취화를 각각 평가하기 위하여 준비된 마스터 곡선(master curve)을 이용하여 측정된 I_p 로 부터 CVN충격치나 upper shelf energy비를 추정할 수 있다. Fig. 31은 표준화된 양극활성화 peak전류와 파괴전이온도차($\Delta FATT$)의 관계이다.

2) 재부동태화 전류밀도(I_r) 측정법

오스테나이트 스텐레스강관 등은 보일러 튜브와 같이 고온에서 사용시 입계에 크롬을 주성분으로 하는 석출물이 생성, 조대화되어 입계근방에 크롬결핍층이 생긴다. 이와 같이 크롬농도감소에 의한 내식성 저하와 Cr-Mo-V강과 같은 저합금강의 불순물의 입계편석에 의한 재료열화를 측정하는데 I_r 을 이용하며 I_r 은 역분극 후 나타나는 최소전류밀도(재부동태화 전류밀도)로 정의 된다.

이 방법에 사용되는 전해액으로서는 오스테나이트 스텐레스강의 경우 $H_2SO_4 + KCN$, Cr-Mo-V강의 경우는 피크린산(picric acid)을 사용한다. 미사용재의

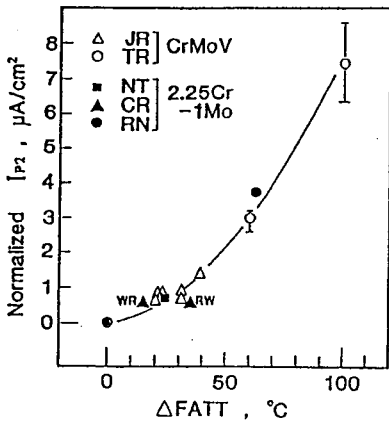


Fig. 31 표준화된 I_{p2} 와 $\Delta FATT$ 의 관계 F

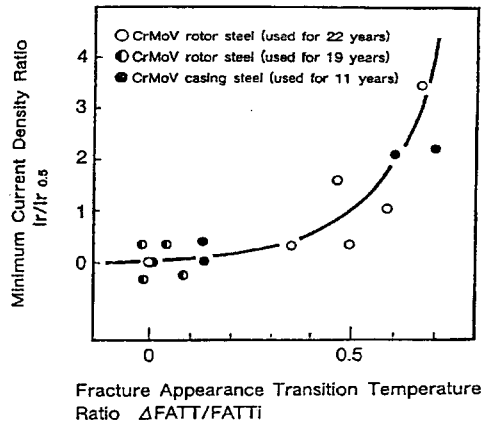


Fig. 32 I_r 과 $\Delta FATT$ 의 관계

FATT에 대한 Δ FATT의 비와 의 관계를 이용하여 손상정도를 분석할 수 있다. Fig. 324는 Ir과 Δ FATT/FATT의 관계를 나타낸 것이다.

3) 부동태화 후의 peak전류밀도(Δ Ip) 측정법

Cr-Mo강이 열화되어 연화되거나 크리프 강도가 저하되는 것은 고용되어 있던 Mo의 양의 감소와 미세하게 분산되어 있는 침상탄화물의 조대화에 의해 생긴다. 분극시험에서 측정대상이 되는 탄화물은 M_6C 이다.

이 방법에서는 자연전위로부터 시편이 부동태가 되는 전위까지 양분극시켜, 약 5분간 유지한 후 다시 자연전위까지 음분극 시키는데, 부동태화 시킨 후 첫번째 peak의 전류밀도가 탄화물의 양과 상관관계가 있는 것으로 알려져 있다.

계측된 Δ Ip로 부터 연화량을 추정할 수 있으며, Δ Ip와 Δ FATT와의 상관관계를 이용하여 탄화물 유기취화에 대한 연성-취성전이온도의 상승량을 추정할 수 있다.

3. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이 각종 플랜트 설비의 경년 열화진단기술은 장족의 발전을 하여 실플랜트에서 괄목할만한 실적을 이룩하였으나 장기 운용된 각종 플랜트의 (1) 한주기 무고장 운전(one cycle trouble free operation), (2) 장주기 보전검사(long term maintenance), (3) 수명연장(life extension)위해서는 예측정비(predictive maintenance)를 위한 수명평가기술의 확립이 필수적이다. 그 중에서도 특히 비파괴진단기술은 적용의 편리성, 경제성, 신뢰성면에서 가장 효과적인 방법이라고 할 수 있으나 현재로서는 연구개발이 미흡한 실정이다.

따라서 앞으로의 과제는 설비특성, 사용환경 및 손상 기구에 따른 잔존수명 진단 기술 및 장비 개발, 손상평가기준의 데이터 베이스 구축, 해석기술의 정도 향상 등이 수행해야 할 현안 과제이며, 이와 더불어 각각의 방법의 특징을 살린 잔존수명 평가시스템의 체계화도 필수적이다. 그외에 표준사양서 및 지침을 작성하여 보급, on-line monitoring system개발도 빼놓을 수 없는 중요한 과제일 것이다.

참고문헌

- [1] 増山不二光, 西村直彦, "金屬組織學的クリープ壽命評價法(MLAS)の開発", 金屬學會會報, Vol. 27, No. 4, pp. 287-289, (1988)
- [2]. B. Neubauer and U. Wedel, "Restlife estimation of creeping components by means of replicas", ASME Int. Conf. on Advances in Life Prediction Methods, Albany, N.Y., pp. 307-313, (1983)
- [3] CRIEPI, "Results of the non-destructive evaluation round robin test(II)", The Third CRIEPI-EPRI Workshop on Fossil Power Plants, Tokyo, Japan, pp. 1-19, (1989)
- [4] 村田 外, "タービン設備の余壽命診断と耐方向上対策", 火力原子力発電, Vol. 40, No. 397, pp. 1170-1217, (1989)
- [5] K. Kimura, K. Fujiyama and M. muramatsu, "Creep and fatigue life prediction based on the non-destructive assessment of material degradation for steam turbine rotors", High Temperature Creep Fatigue, Elsevier Applied Science Publishers, Barking, U.K., pp. 247-270, (1988)
- [6] K. Kimura, K. Fujiyama, F. Ishii and M. Muramatsu, "Effect of material degradation of creep properties and life estimation", Int. Conf. on Creep, Tokyo, Japan, pp. 343-348, (1986)
- [7] 後藤徹, "Cr-Mo-V 鍛鋼部材のクリープ損傷の非破壊検出", 材料, Vol. 32, No. 356, pp. 563-568, (1983)
- [8] 祐川正之, "Cr-Mo-V 高温材料の非破壊手法によるクリープ損傷評価", 壓力技術, Vol. 26, No. 6, pp. 361-367, (1988)
- [9] Y. Watanabe and T. Shoji, "The evaluation of in-service materials degradation of low-alloy steels by the electrochemical method", metallurgical Transactions, Vol. 22A, No. 9, pp. 2097-2106, (1991)

- [10] K. Fujiyama, K. Kimura, M. Muramatsu, H. Kashiwys, E. Tsunoda, S. Ayano and H. Aoki, "Life diagnosis experience and system technology for steam turbine components", Paper 2.1.3, Intern. Conf. on Life Assessment and Extension, Hague, Netherlands, pp. 20-30, (1988)
- [11] 森田益未, "最近の余壽命診断技術", 配管技術, Vol. 30, No. 6, pp. 135-143, (1988)
- [12] K. Akiyama, T. Shiota, H. Ikawa, K. Kawamoto, T. Goto and H. Karato, "Life assessment of turbine components by integrated techniques", Proc. of APC, Chicago, pp. 98-105, (1987)
- [13] M. F. Ashby, A First Report on Deformation Mechanism Maps, Acta Met., Vol 20, pp. 887-895, (1972)
- [14] F. E. Asbury and G. Willoughby, in creep strength in steel and high temperature alloys, the Metals Society, London, pp. 122, (1974)
- [15] R. W. Bailey, Creep relationships and their application to pipes, tubes and cylindrical parts under international pressure, Proc. Inst. Mech. Eng., Vol 164, pp. 324, (1956)
- [16] S. R. Paterson, T. W. Rettig and K. J. Clark, Creep damage and remaining life assessment of superheater and reheater tubes, in Life Extension and assessment of fossil power plants, R. B. Dooley and R. Viswanathan, Ed., EPRI CS5208, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, pp. 455-474, (1986)
- [17] C. A. Schulte, Predicting creep deflections of plastic beams, Proc. ASTM, Vol. 60, pp. 895-904, (1960)
- [18] F. R. Larson and J. Miller : Trans. ASME 74, pp. 765, (1952)
- [19] R. L. Orr, O. D. Sherby and J. E. Dorn : Trans. ASM 46, pp. 113, (1954)
- [20] S. S. Manson and A. M. Haferd, NACA, TM 2890, (1953)
- [21] A. Chitty and D. Duval, Joint International conf. on Creep, pp. 4, (1963)
- [22] G. Murry, Joint Int. Conf. on Creep, pp. 6-87, (1963)
- [23] R. V. Hart : Metals Technology, Vol. 3, pp. 1, (1976)
- [24] B. J. Cane and M. I. Manning, CEGB CERL Memoranda LM/MATS/407, (1981)
- [25] R. J. Fields, T. Weerasooriya, and M. F. Ashby, Metallurgical Trans. A, Vol. 11A, pp. 341-345, (1980)
- [26] "NRIM CREEP DATA SHEET No.3B", National Research Institute for Metals, (1986)
- [27] "NRIM CREEP DATA SHEET No.14B", National Research Institute for Metals, (1988)
- [28] "NRIM CREEP DATA SHEET No.9B", National Research Institute for Metals, (1990)
- [29] K. Kuwahara et. al., "Durable life evaluation of boiler tube used for a long time", 電力中央研究所報告, Vol. 205, No. 19, pp. 1-117