

# 破面解析과 그 應用(Ⅲ)

徐昌敏·金楨圭

<慶北大 機械工學科·漢陽大 機械設計學科>

## 4.4. 疲勞破壞

構造物은 각각의 기능·구조·사용환경·온도 영향에 의하여 發生하는 파괴손상의 종류·형식은 多種多樣하지만, 실구조물에 가장 높은 빈도로 생기는 것은 피로균열손상이다. 그 하나의 예로, 건설기계, 운반기계, 제철기계, 선박구조, 내연기관, 압력용기등 많은 예가 조사되어 보고된 예를 원인별로 分類하면 표1과 같다.

표 1 각종 구조물에 생긴 파괴의 종류

종 류	건 수	비 율(%)
피 로	28	65
자 굴	10	23.3
열 피 로	2	4.7
응력부식파손	2	4.7
용 접 파 손	1	2.3

즉 다종다양한 종류의 破壞中에 疲勞破壞가 압도적으로 많고 파손원인의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 최근 기계설계에 있어 安全率을 낮게 취하고 기계장치의 效率을 높이고, 高速化시킴으로써 생길 가능성이 큰 疲勞破壞 防止를 위한 설계의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 그러므로 피로파괴에 대한 추정평가법 및 방지책이 많이 연구되고 있고, 구조물의 피로파괴 손상에 대한 破面解析(fractography)에 관한 研究도 더욱 많은 관심의 대상이 되고 있다.

破壞樣式과 파단면에 남은 파면형태 사이에 밀접한 關係가 존재한다면 파단면의 관찰에 의

한 파면해석은 파괴사고의 원인구명에 대하여 유력한 道具가 되고 파괴진행시의 상태에 관한 정보를 얻을 수 있어 事故解析이 可能하게 될 것이다. 오늘날 破面解析에는 高倍率의 전자현미경이 사용되므로 보다 엄밀하게 파괴성장 과정을 논의할 수 있게 되고, 破面解析學으로서 材料強度學의 一分野를 형성하게 되었다.

본 강좌에서는 疲勞破壞에 관하여 크게 두가지로 나누어서 설명한다. 첫째 疲勞現象에 의하여 생기는 疲勞破面形態 및 轉位組織에 관하여 설명하고 그 다음에는 疲勞균열의 생성기구에 관하여 피로균열의 각 단계별로 설명하고 破面의 특성에 관하여 파괴역학적인 수법도 사용하여 설명한다.

### (1) 疲勞破面形態와 轉位組織

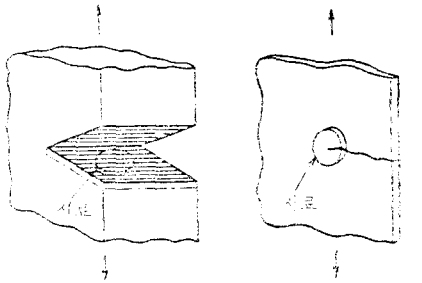
피로균열의 발생 및 성장은 역학적 조건, 분위기뿐만 아니라, 금속재료의 미세조직에도 지배되므로 균열선단 및 파면하에 형성된 전위조직 및 피로손상을 破面형태와 연관시켜 관찰함으로써 피로균열의 성장기구를 규명할 수 있을 것이다.

轉位組織의 관찰에는 에칭과 광학현미경 혹은 전자현미경을 병용하는 방법과 X선에 의한 방법등이 있다. 그러나 투과전자현미경에 의한 조직의 직접적인 관찰에서 보다 좋은 현상의 관찰이 가능하므로 電子線이 투과 가능한 薄膜을 제작해야 한다. 그러나 균열 및 요철을 가진 薄膜을 제작하는 어렵기 때문에 잘못 제작된 시료에

■ 講 座

서는 잘못된 현상을 관찰하게되어 誤報를 얻게 된다.

破面形態와 轉位組織을 관찰하기 위한 시료제작법으로는 그림 41 과 같은 두가지 방법이 있다



(a) 파면하 (b) 균열선단 포함  
그림 41 박막 시료 제작법

그림 41(a)와 같이 비교적 평탄한 破面下를 관찰할 경우에는 투명한 고분자막으로 파면위를 보호한 후 밀면에서 제트식으로 전해 연마시켜 薄膜의 시료를 제작한다.

그림 41(b)와 같이 균열선단과 그 근방의 조직을 관찰할 경우에는 균열의 開口量이 큰 경우에는 균열선단을 도금시켜 전해연마의 손실을 방지해야 한다. 이 시료에서는 균열선단 및 파면상하의 형상과 균열선단의 거리에 대응하는 전위조직의 변화에 관한 정보를 얻을 수 있다.

(가) 제 1 단계 균열

부재의 표면층에서 인장응력의 방향과 약 45°를 이루는 슬립선에서 최대전단 응력에 가까운 슬립면에 따라 성장하므로 파면은 相 혹은 結晶粒에 대응하는 파셀(facet)을 나타내고, 파셀의 내부도 슬립면 분리의 흔적으로 평탄하거나 稜線模樣으로 관찰되는 경우가 많다. 제 1 단계균열의 파면형태의 예를 그림 42에 나타낸다.

높은 응력하에서 피로된 鐵의 균열근방의 전위조직을 그림 43에 나타낸다. 피로균열은 슬립면인 (011)에 따라 있어 슬립에 의하여 균열이 성장했음을 알 수 있다. 균열은 양측면의 셀(cell)의 콘트라스트 및 셀벽이 잘 대응하는 것이 많으므로 균열은 벌써 형성된 셀을 관통하여 성장하고 있는 것이다. 이와같은 전단형 균열도 상

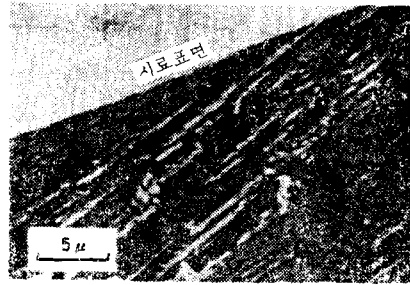


그림 42 α 鐵의 제 1 단계 파면형태

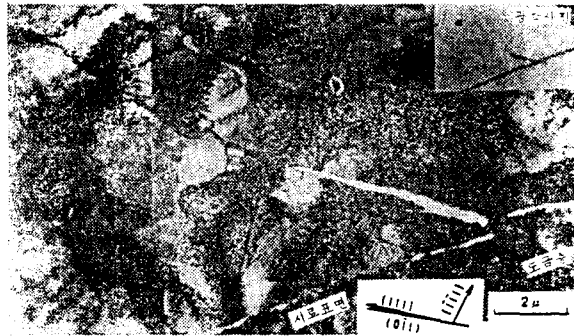


그림 43 제 1 단계 균열선단 근방의 셀조직(철, 높은 응력, 종단면, 오른쪽 위는 광학현미경 사진)

당히 길면 선단 혹은 파면에서의 거리와 더불어 셀크기가 크게 됨을 알 수 있다.

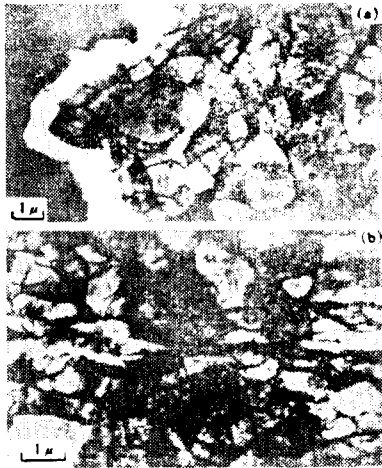
일반적으로 균일한 응력하에서 피로된 경우에 생기는 응력 혹은 스트레인의 진폭과 셀의 크기 사이에는 1대1의 대응관계가 있고 진폭이 클수록 셀의 크기가 작다. 이와같이 제 1 단계 균열의 선단근방 및 破面下組織은 재료 및 응력 진폭에 의하여 다른 양상을 나타내지만, 균열길이 비교적 짧은 때에는 거의 차이가 없으므로 균열접근 혹은 통과등에 의하여 그다지 변화하지 않는 것으로 생각된다.

(나) 제 2 단계 균열

引張應力の 방향과 수직선에 따라 균열이 성장하는 단계로 각 결정립의 방향에 크게 의존하고, 破面은 결정립의 슬립면에 따라서 각각 다른 형태를 나타낸다. 제 1 단계와 제 2 단계의 전이영역의 파면에는 입내 및 입계파면의 파셀이

관찰된다. 입내파면에는 요철 및 평평한 면에 미세한 슬립선 혹은 스트라이에이션 모양이 관찰된다. 한편 입계 파면은 粒內破面에 비하여 상당히 평활하지만 슬립선을 동반하고 있다.

철에서 성장한 균열과 전위조직에 관한 사진을 그림 44에 나타낸다. 그림 44(a)는 破面下의 사진을 나타내고 그림 44(b)는 균열선단 근방의 고밀도의 전위의 형성을 나타낸다. 이와같은 관계는 單結晶인 순동(그림 45)에서도 알 수 있으며, 균열선단에서는 셀의 크기가 작아지고 선단에서 멀어지면 셀의 크기가 커짐을 알 수 있다.



(a) 破面下의 조직 (b) 균열선단 근방의 조직  
그림 44 철의 제 2 단계 초기의 전위조직 사진

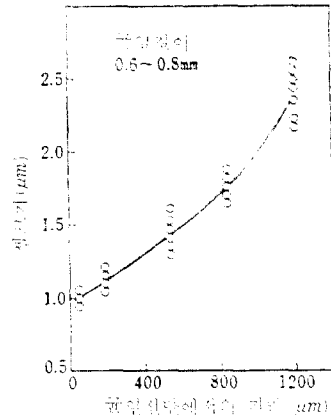
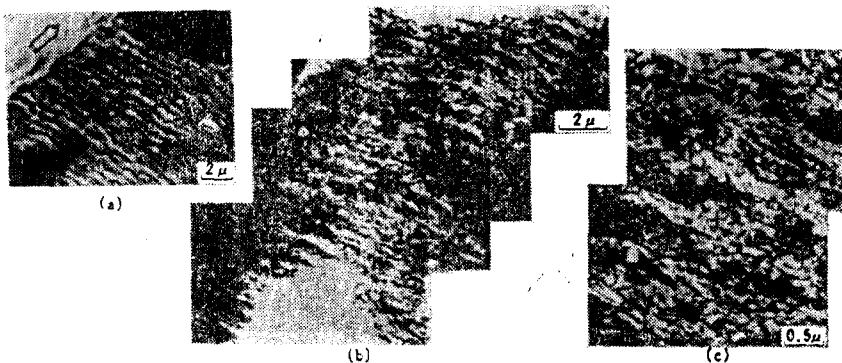


그림 45 균열선단의 거리에 따른 셀크기의 변화 (순동의 단결정)

위에서 설명한 제 2 단계의 초기를 지나면 응력사이클과 1대 1에 대응하는 스트라이에이션의 파면이 관찰되며, 이 방향은 초기단계와 같이 특징의 결정방위와 관계한 것도 있지만 비교적 성장속도가 빠른 영역에서는 그다지 관계가 적다. 예로서 銅의 피로 파단면상의 스트라이에이션과 파면조직과의 대응을 그림 46에 나타낸다. 그림 46에서 화살표는 균열성장 방향을 나타낸다. 사진 (a)는 스트라이에이션을 나타내고 사진 (b)는 파면하의 전위조직을 사진 (c)는 사진 (b)의 확대사진이다.

이와같이 스트라이에이션의 생성기구는 轉位



(a) 스트라이에이션 (b) 파면하의 전위조직 (c) (b)의 확대사진  
그림 46 α 황동의 제 2 단계 파단면상의 형태(화살표는 균열성장 방향)

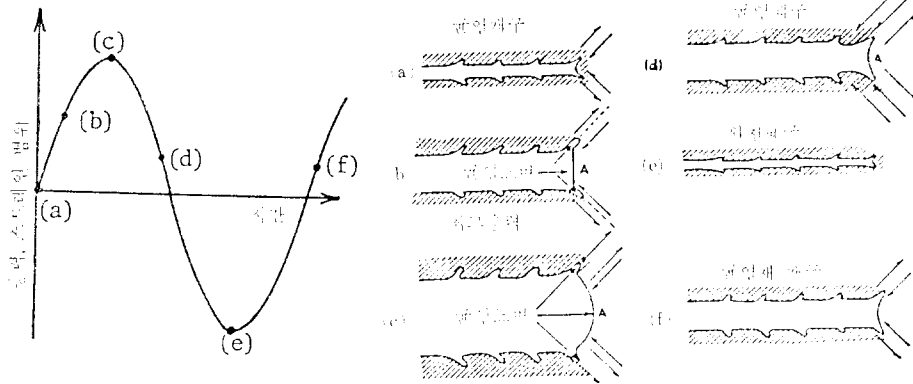


그림 47 塑性鈍化再銳化過程

운동에 의한 모델 및 설명으로는 설명할 수 없을 것이다. 따라서 이것에 대하여 여러 學說이 발표되어 있지만 Laird-Smith에 의한 塑性鈍化再銳化過程<sup>(1)</sup> (plastic blunting and reshaping process)에 가까운 기구가 가장 신뢰받고 있다. 이는 균열선단에 생기는 슬립에 의한 塑性鈍화와 再銳화의 반복작용에 의하여 塑性流動이 생긴 결과로 말미암아 스트라이에이션이 생긴다는 것이며 그림 47에 그 개요를 그림으로 나타낸다.

(2) 疲勞균열의 破壞機構

Forsyth는 슬립선중에 슬립면에 따라서 완만하게 성장하는 것을 제 1 단계라 하고, 그 후 슬립면에 따르지 않고 주응력 축에 직각인 방향으로 성장하는 것을 제 2 단계라 불렀다. 그림 48에는 Forsyth<sup>(2)</sup>가 석출경화된 알루미늄 합금을 사용하여 연구·발표한 피로균열성장과정의 양상을 나타낸다.

슬립선과 제 1 단계균열을 엄밀하게 구별함은

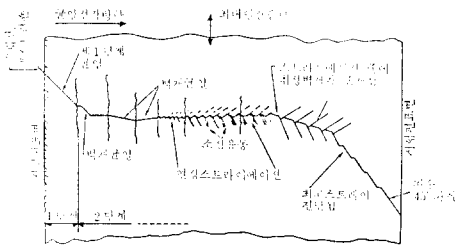


그림 48 疲勞균열 成長過程의 全體的 樣相

대단히 어렵고, Laird<sup>(3,4)</sup>들은 제 1 단계의 균열 성장과 제 2 단계의 균열성장은 기구상으로는 큰 차이가 없다고 생각하고 있다. 이와같이 제 1 단계와 제 2 단계에 관한 모델은 대표적으로 제 1 단계에 Schijve 모델<sup>(4)</sup>, 제 1 단계에서 제 2 단계로의 천이기구에 관한 小林<sup>(5)</sup>의 모델과 제 2 단계의 피로균열성장에 대한 Laird-Smith 모델<sup>(1)</sup>이 널리 인정되고 있다. 그림 49에는 피로파괴 과정을 모델화 시켰으며, 제 1 단계는 모드 II의 성분을 필요로 함에 반하여 제 2 단계는 거의 완전한 모드 I로 되어 있다.

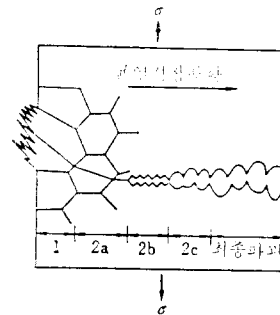


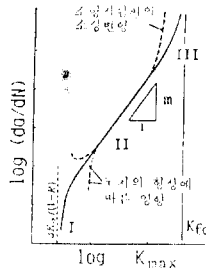
그림 49 피로파괴과정의 모델

위에서 설명한 바와 같이 表面에 발생한 슬립 선을 피로파괴의 核으로 생각하는 것에 반하여 介在物균열(inclusion cracks)이라 부르는 것이 있다. 이것은 특히 협의의 介在物균열과 劈開형 균열(cleavage type cracks)로 분류된다<sup>(7)</sup>. 이 개재물균열은 材料母相이 각종 기구로 강화된

高强度 재료의 경우에 현저하다<sup>(6)</sup>.

제 2 단계의 피로균열 성장과정은 破面樣相에서 조직의 흔적이 나타나는 제 2a 단계, 스트라이에이션이 형성되는 제 2b 단계, 딥플(dimple)을 수반하는 微小空洞의 合體, 劈開, 結晶粒界의 擬脆性과파등의 靜的破壞와 비슷한 파괴양식이 지배적인 제 2c 단계로 분류되는 경우가 있다.

그림 50에는 피로균열성장 곡선상에서 세 영역을 분류하고 각각의 특성을 설명하고 있다. 일반적으로 위의 세가지 단계의 천이가 생기는 경우도 있지만 재료 및 시험조건에 따라 변하는 경우도 많다. 이와같이 파괴 기구의 천이에 따라 균열성장 속도에도 차이가 생기는 예를 그림 51에 나타낸다. 이 그림은 韌性이 다른 강에



제 1 영역(제 2a 단계, 불연속 성장기구)  
 지배인자: 1. 미시조직 2. 평균응력 3. 환경  
 제 2 영역(제 2b 단계, 연속 성장기구)  
 지배인자: 1. 미시조직 2. 평균응력 3. 환경  
 제 3 영역(제 2c 단계, 정적파괴기구)  
 지배인자: 1. 미시조직 2. 평균응력 3. 두께  
 지배인자: 4. 환경

그림 50 피로균열 성장곡선상의 세 영역의 특성

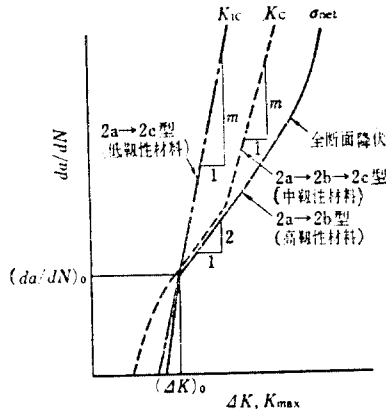


그림 51 각 단계에 따른 균열성장 특성의 비교

대하여 균열성장 과정의 천이와 성장특성의 대응을 나타낸다.

종래에 조직민감성은 주로 피로강도, 혹은 피로균열발생에 관련된 것이었으나 피로파괴도 금속재료의 組織에 대단히 敏感하다. 이와같이 피로균열성장 저항도 조직민감성을 나타내는 것은 당연하며 파괴기구와 관련해서 그 중요성이 강조되고 있고 破面解析面에도 중요하다. 이와같이 슬립선의 발생 미소피로 균열의 발생 및 초기 성장에 관한 연구의 중요성이 인식되어 현재에도 연구가 수행되어 성과를 올리고 있다.

(가) 제 1 단계 균열

재료표면에 반복소성슬립이 생기면서, 표면의 요철은 크게 되고 슬립면 분리에 의하여 내부쪽으로 intrusion에 의한 應力集中이 생겨 산화·흡착에 의하여 新生面을 만들어 초기균열이 생성되며 이 기구를 그림 52에 나타낸다.

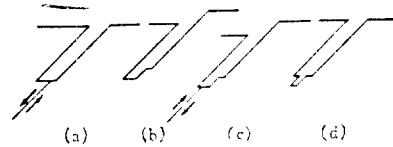


그림 52 제 1 단계의 균열성장기구

표면노치의 형성 및 제 1 단계 균열성장은 표면조직중에 가장 약하고 슬립되기 쉬운 방위로, 또는 크기가 큰 결정입 혹은 結晶粒界에 우선적으로 생기는 경우가 많다. 結晶塑性의 입장에서 보면 이 초기균열은 잔존슬립밴드(persistent slip band) 및 extrusion-intrusion 등으로 불리진다. 균열전파는 슬립면에 한정되므로 파면은 파셀을 나타내고, 내부도 슬립면 분리의 흔적을 나타내는 평탄 혹은 능선모양으로 된다(그림 42). 즉 제 1 단계의 파면양상은 조직민감성이 크다.

(나) 제 2a 단계 균열

제 1 단계 균열이 성장하여 균열면과 교차하는 슬립면이 작용할 경우, 균열은 균열선단에서 그림 53과 같이 두개의 슬립면을 분할하는 방향으로 성장한다. 이 방향은 최대 인장응력 방향에 거의 수직한 방향으로 변화하며, 이 이후는 제 2b 단계라 한다. 낮은 응력하에서는 제 2a 단

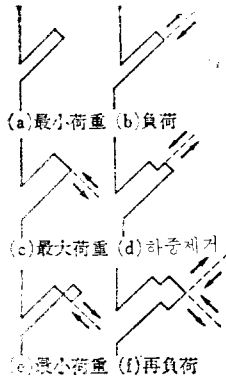
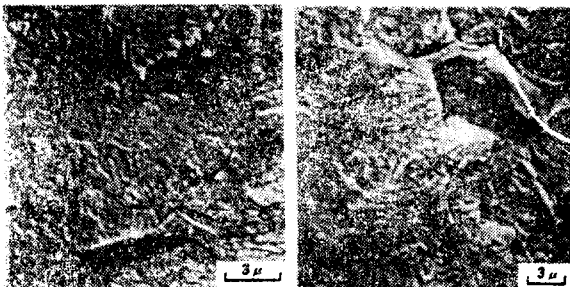


그림 53 제 1 단계에서 제 2 단계의 찢이기구

제가 존재하지만 높은 응력하에서는 제 1 단계에서 제 2 단계로 찢이가 생긴다. 그리고 제 1 단계의 파셀크기 및 제 2a 단계의 破面率은 응력이 낮을수록 증대하고 全壽命에 있어 이 단계가 차지하는 비율은 대단히 높다.

제 2a 단계의 파면양상은 제 1 단계와 유사하며 粒內파셀이 많다. 그러나, 거시적인 파면은 지그자그(zigzag)로 불연속적인 성장을 하게 되며 이것은 일시적인 균열성장 정지기간의 존재를 의미한다. 또한 페라이트(ferrite) 結晶粒界파셀도 많이 관찰되며 결정입계가 명확하지 않은 高强度鋼에 있어서도 이와같은 파셀이 생기고, 균열성장은 組織의 흔적이 명확하게 나타나는 특징이 있으며 또한 구오오스테나이트 結晶粒界파셀을 관찰할 수 있다. 그림 54에 高强度鋼에 대한 破面樣相의 예를 나타낸다.



(a) 조직의 흔적 (b) 입계파피  
그림 54 高强度鋼 SK 5의 제 2a 단계의 파면양상

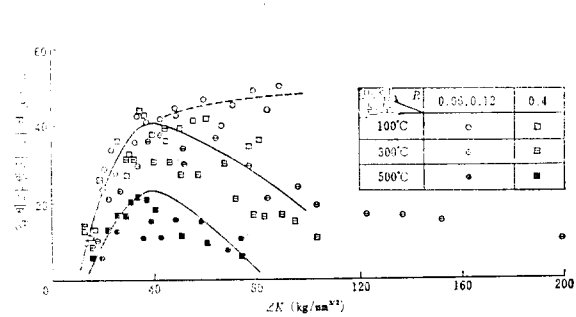


그림 55 高强度鋼 4340(SNCM 439)의 구오오스테나이트 粒界파셀의 파면율과  $\Delta K$ 와의 관계

그림 55에는 입계파셀의 파면율이 應力擴大係數範圍  $\Delta K$ 에 의존한다는 것을 破壞力學의 인견지에서 조사하여 나타내고 있다. 이 그림에서 粒界파셀의 破面率은 下限界應力擴大係數範圍  $\Delta K_{th}$  근방에서는 거의 0에 해당하지만,  $\Delta K$ 의 증가와 함께 增大해서 최대치를 나타낸 후 점차  $\Delta K$ 의 증가와 함께 減少한다. 즉 제 2a 단계에서 제 2b 단계로의 찢이점은  $\Delta K$ 치의 최대치 근방으로 보아도 된다. 應力比 R을 0.06, 0.12 및 0.4로 변화시켜 얻은 결과에 의하면 粒界파셀의 破面率은 최대응력 확대계수  $K_{max}$ 보다도  $\Delta K$ 에 의존함을 나타낸다.

또한 粒界파셀의 破面率과 반복塑性域 크기  $R_p$ 의 依存性과의 관계를 그림 56에 나타내며 균열성장속도  $da/dN$ 의 존재성과의 관계를 그림 57에 나타내고 있다. 입계파셀의 破面率이 最

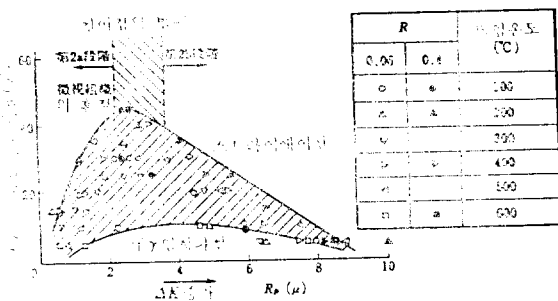


그림 56 高强度鋼 10 B 35의 구오오스테나이트 粒界파셀의 파면율과 반복소성역 크기  $R_p$ 와의 관계

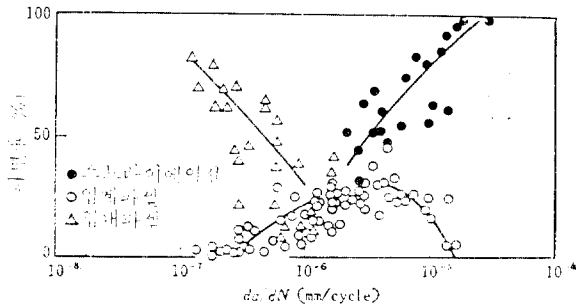
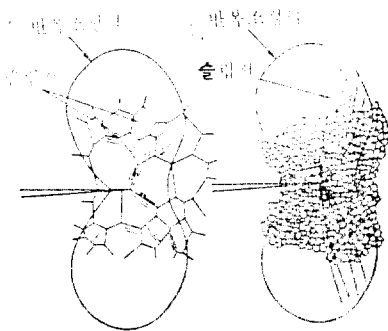


그림 57 연강의 페라이트 粒內파셀, 粒界파셀 및 스트라이에이션 파면율과  $da/dN$ 와의 관계

大値를 나타내는  $\Delta K$ 의 값은 페라이트강은 30  $kg/mm^{3/2}$ , 高强度鋼은 40  $kg/mm^{3/2}$  정도이다. 또 이 값에 대응하는 반복소성역 크기  $R_p$ 를 정의하면 式 (16)과 같다.

$$R_p = \frac{2}{5.6\pi} \left( \frac{\Delta K}{2\sigma_{yp}} \right)^2 \quad (16)$$

이때  $R_p$ 의 결정입경  $D$ 에 대한 비를 계산하면 페라이트강은  $R_p/D=1\sim3^{(8)}$ , 고강도강은  $R_p/D=0.2\sim0.8^{(9)}$ 로 되었다. 따라서 그림 58와 같이 입계파셀의 출현은 반복소성역의 내부에서의 粒界디프럼에 대한 拘束이 가져온 결과로 볼 수 있다.



(a) 第2a階段 (b) 第2b階段

그림 58 반복소성역 내부에서의 입계의 슬립에 대한 구속

이와같은 제 2a 단계 및 제 2b 단계로의 천이 영역에 있어서 입계파셀의 출현은 破壞事故의 破面解析에 있어서 귀중한 자료로 되며, 鋼의

의 재료에서는 粒界파셀의 破面率은 낮다.

(다) 제 2b 단계 균열

제 2b 단계의 破面解析의 특색은 그림 11 및 그림 46(a)와 같은 스트라이에이션 모양이다. 파면해석에 의한 정보중 定量的으로 취급되는 것은 疲勞破面の 줄무늬인 스트라이에이션 간격  $p(\mu m/cycle)$ 으로 巨視的 測定에 의한 표면균열 성장 속도  $da/dN$  혹은 균열깊이 성장속도  $db/dN$ 와 좋은 대응을 나타내고  $\Delta K$ 와는

$$p=c(\Delta K)^m \quad (17)$$

인 관계를 가진다는 것이다. 반복하중 1 사이클과 스트라이에이션 간격이 대응하므로 파면해석에서 얻어진 微視的 疲勞균열성장속도와 破壞力學的 파라메타와의 연구도 활발하다.

그림 59의 일베(Ti-6Al-4V)와 같이 스트라

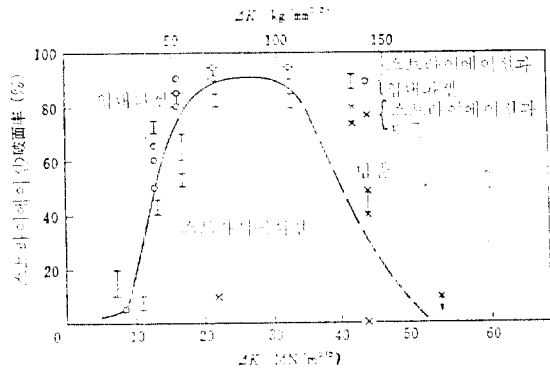


그림 59 스트라이에이션의 파면율(Ti-6Al-4V)

이에이션 모양이 점하는 파면율은 어떤 범위에서는 거의 100%이며, 대개 50%를 기준으로 해서 스트라이에이션이 지배적인 영역이 제 2b 단계로 定義될 수 있다. 이 줄무늬는 그림 47과 같이 균열전단의 塑性鈍화와 再鈍화의 反復에 의하여 생성가능하며 제 2a 단계와 달리 균열전단에서는 連續體力學에서 기대되는 塑性流動이 생긴 결과이므로 줄무늬상에는 微視組織의 흔적이 없고 組織에는 敏感하지 않다.

이상적인 균열의 선단개구변위 CTOD는

$$CTOD = (1-\nu^2) \frac{K_I^2}{2E\sigma_{yp}} \quad (18)$$

로 주어지며, 그림 60과 같이 제 2b 단계의

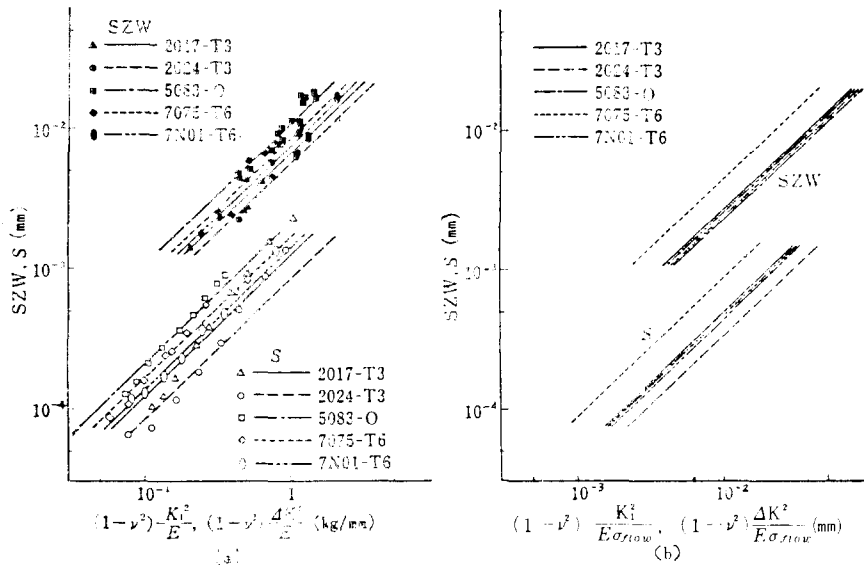


그림 60 각종 알루미늄 합금에 있어 스트라이에이션 간격 S와 스트레치존 폭 SZW의 비교

$da/dN$ (=줄무늬 간격,  $S=CTOD/2$ )는 應力比  $R=0$ 의 경우에 식 (19)로 표시된다.

$$da/dN = S = 9.4(1-\nu^2) \left( \frac{\Delta K}{E} \right)^2 \quad (19)$$

그림 60처럼 CTOD는 스트레치존(stretch zone)폭에서 얻은 결과에 의하면 이상균열의 개구 변위에 있어서는 식 (19)와 비슷한 식 (20)이 성립한다.

$$CTOD = 2SZW = 2 \times 89(1-\nu^2) \left( \frac{K_I}{E} \right)^2 \quad (20)$$

즉 식 (18) 및 식 (19)는 균열성장특성의 영 계수  $E$ 의 의존성은 균열선단소성분화에 기인한다. 그러나 식 (19)와 식 (20)의 비교에서 같은  $K_I$  값에 대하여 피로균열은 이상균열의 1/10 정도 밖에 開口 혹은 성장하지 않음을 알 수 있다. 이 차이는 피로균열이 가지는 균열개구효과인 Elber 효과에 기인하고 있으며 균열성장속도에 미치는 응력비  $R$ 의 영향도 균열開口 효과에 크게 영향을 받는다.

(라) 제 2c 단계 균열

제 2c 단계는 微小空洞의 合體, 劈開, 粒界破壞 등의 정적파괴와 유사한 파괴기구의 특징을 나타내며 이와같은 파괴기구하의 균열성장속도

는 현저히 加速된다. 제 2a 단계의 입계파셀에는 슬립모양이 관찰되지만 제 2c 단계의 입계파셀은 擬脆性破壞 혹은 덩플의 양상을 나타낸다.

高强度鋼 4340(SNCM 439)의 파괴역학적 파괴기구를 그림 61에 나타낸다. 低溫뜨임 영역에 있어서 평면스트레인 破壞靱性  $K_{Ic}$ 의 低下에 대응해서  $\Delta K$ 의 증가와 더불어 덩플 및 粒界破壞가 지배적인 파괴기구로 된다. 더우기 덩플 및 입계파괴의 파면율은  $\Delta K$ 의 증가와 더불어 증대한다. 그림 55에 나타낸 100°C 뜨임제의 입

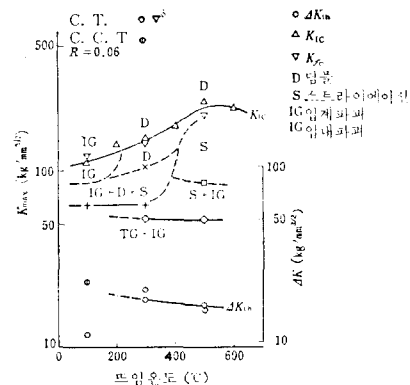


그림 61 高强度鋼 4340의 파괴역학적 파괴기구도



계 파괴의 파면율이 이 경우에 대응하고 있다.

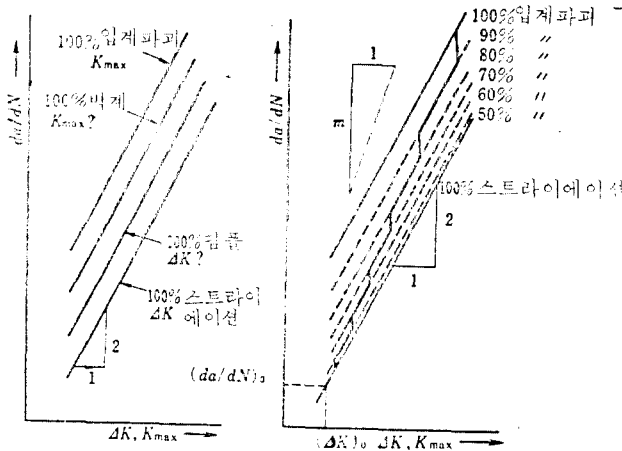
제 2c 단계에 지배적인 파괴기구에 의한 균열 성장속도의 대소관계를 그림 62(a)에 모델로 나타낸다. 이와같이 그림 62(a)의 모델에 나타낸 파면율의 변화를 반영하면 그림 62(b)와 같이 균열성장속도가 가속됨을 알 수 있다.

파괴기구의 차이 및 파면율의 변화는 조직변

화와 밀접한 관계가 있기 때문에 제 2a 단계와 제 2c 단계는 뚜렷한 조직감각성을 나타낸다. 또한 알루미늄합금에 대해서 介在物 自身 혹은 주위의 재료의 취성적인 파괴의 개제에 의하여, 균열 성장속도가 가속되는 결과를 그림 63에 나타낸다.

(마) 疲勞破面の 전자현미경 사진에

그림 64는 알루미늄합금(2017-T4)의 환상노



(a) 균열전파 속도와 파괴기구의 관계  
(b) 균열전파 속도와 파면율의 관계(예: 입계 파괴)

그림 62 제 2c 단계에 있어 균열성장속도에 미치는 파괴기구 및 파면율의 영향

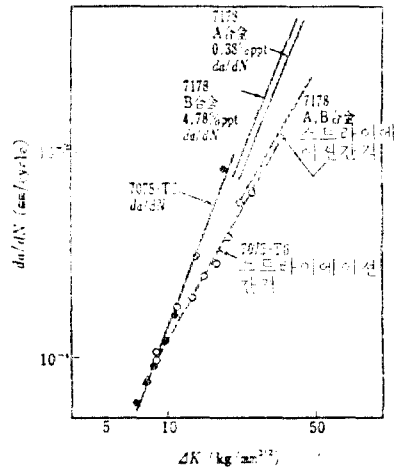
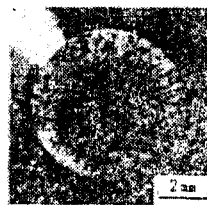


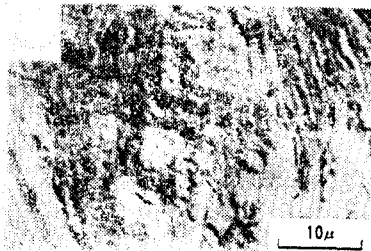
그림 63 제 2c 단계의 균열성장속도에 미치는 계 물의 영향(Al 합금)



(a) 마이크로사진



→타이어트래 (c) 파면주변부(피로된부분)



→ 노치필면 (b) 노치부 근처



(d) 최종파단부

그림 64 저사이클 피로파면의 사진(2017-T4 Al 합금에 환상 노치제로 인장암속피로시험)

講 座

치재의 저사이클 인장압축피로 파면의 예이다. (a)는 파면의 마이크로사진, (b)는 노치부근 (c)는 노치부에서 약 200  $\mu\text{m}$  内部로 들어간 곳 (d)는 최종 파단부의 사진이다. 노치부 부근을 나타내는 사진 (b)는 無特徵의 파면으로 제 1 단계를 나타내고 오른쪽 위에서는 줄무늬 같은 부분이 제 2 단계의 개시점으로 생각된다. 사진 (c)는 명확한 스트라이에이션 및 타이어 트랙(tire track)(왼쪽 아래쪽)이 관찰된다. 이와같이 제 2 단계의 특징은 줄무늬가 있고, 그 경계부의 경사면에는 타이어 트랙이 있는 경우가 많다. 최종 파단부는 사진 (d)와 같이 靜引張破面과 같은 딥플파면이다.

그림 65는 템퍼칼러한 회전굽힘 피로시험편(작은 인공 피트재이며 軟鋼)의 사진이다. SEM에 의하여 파단면의 관찰을 실시한 곳을 깊이

b와 표면질이 2a의 성장곡선에 화살표로 나타낸다. (a)는 피트저면의 균열발생상태를 나타내며, 전단에 의한 제 1 단계의 無特徵破面을 나타낸다. (b), (c)는 不明確한 줄무늬이고 (d), (e)는 軟鋼에서 자주 관찰되는 延性 줄무늬 즉 스트라이에이션이라고 생각되지만, 알루미늄합금의 경우에 비하여 명료하지 않고, 不規則적인 줄무늬가 破面의 대부분을 점하고 있다. (e), (f)에서는 부분적으로 介在物이 관찰된다. (g)는 表面에서 약 3.62mm 떨어진 곳으로 靜引張破壞의 특징인 작은 딥플과 큰 딥플을 함유한 파면이다.

이상 최근의 파괴역학적 취급의 진보와 破面解析的 지식을 종합해서 피로균열성장을 지배하는 역학 및 재료인자의 관련성을 설명하였다. 대부분의 경우 조직의 영향은  $\Delta K$  레벨에 따라 다르고 아주 역의 영향을 나타낸 것도 있다. 이러한 여러 사항을 잘 파악함으로써 피로파괴방지를 위한 실제에 이용함과 동시에 破壞事故의 파괴원인 규명에 破面解析이 유용함을 입증하게 된다.

참 고 문 헌

- (1) C. Laird and G. C. Smith; Phil. Mag., 7 p. 847. 1962
- (2) P.J.E. Forsyth; ACTA Met., 11 p. 703. 1963
- (3) C. Laird; ASTM STP 415 p. 131. 1967
- (4) J. Schijve; NCR-TRM 2122. Nat. Aerospace Lab, Amsterdam, April 1964
- (5) 小林 외 1 ; 材料, 25-276 p. 881. 1971
- (6) 田中, 船橋 ; Trans, of JSME, 43-366 p. 389. 1977
- (7) J.C. Grosskreutz; ASTM STP 495 p. 5. 1971
- (8) 增田, 西島 ; 材料, 27 p. 59. 1978
- (9) R.J. Cooke et. al; Engng. Fracture Mech., 7 p. 69. 1975

(다음호에 계속)

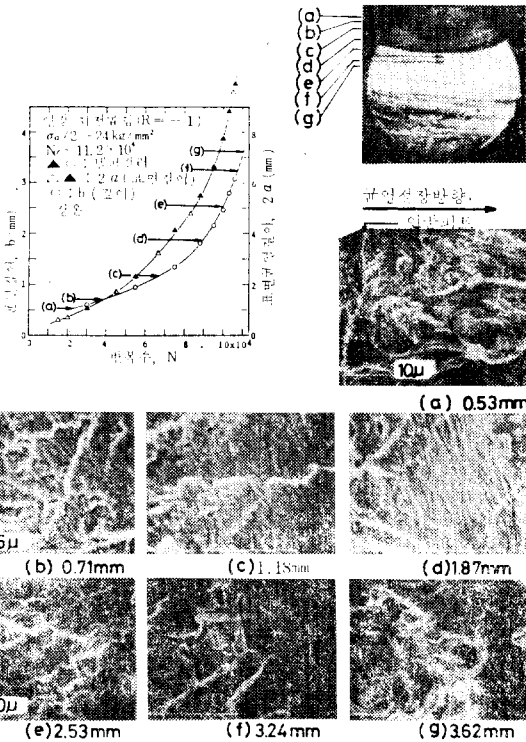


그림 65 고사이클피로파면의 사진(연강의 작은 표면 노치재로 회전굽힘 피로시험)