

## 파괴기구와 미시적 파면(III) : 피로파면

강 정 윤

### Fracture Mechanism and Micro-Practography : Fatigue Fractured Surface

Chung-Yun Kang

#### 5. 피로파괴(Fatigue fracture)

재료에 단순 인장시험에 의해 구한 항복강도의 2/3의 축응력을 부가하면, 소성변형과 파괴는 일어나지 않지만, 상당한 사이클로 반복하여 부가하면, 파괴가 일어난다. 이것을 피로파괴라고 한다. 대부분의 구조물이나 기계부품은 재료의 항복응력 이하의 반복하중을 받으면서 작동되므로, 피로파괴가 자주 발생한다. 일반적으로 피로파괴에서 응력의 레벨은 거시적으로 소성변형을 일으키는 데에 필요한 응력 이하이다. 그러나 표면 불균질성, 미세조직 양상 등으로 인하여 국소적인 미소응력이 항복강도를 넘기 때문에, 반복피로하중이 부가되면, 국소적으로 소성변형이 일어난다. 아주 깨끗하게 연마된 자유표면에서 국부적 소성변형으로 슬립대(slip band) 혹은 슬립선(slip line)을 관찰할 수 있다. 때에 따라서는 이 소성변형 부위가 피로균열을 일으킬 크기에 달하는 수가 있다. 그림 1은 연강의 피로시험편( $\pm 130\text{N/mm}^2$ , 525,000사이클)에 형성된 변형대를 나타낸 것이다. 일반적으로 이 국소 변형은 하중 부가에 의해서 생긴 인장응력에 대해 거의  $45^\circ$ 의 전단응력과 관계된다.

어떤 합금은 소성변형 개시 단계에서 그림 2와 같이 슬립에 의해 표면에 요철이 생기고, 이 흠이 균열 핵으로 작용한다. 그림 3은 Al합금을 피로시험 초기단계에

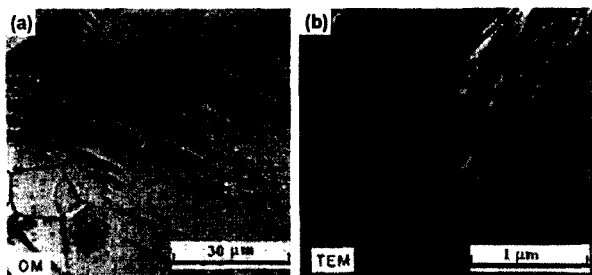


그림 1 연강의 피로하중으로 형성된 변형대 (a)광학현미경 조직 (b)TEM조직(레프리카)

서 국부적인 소성변형으로 발생한 흠의 예를 나타낸 것으로, 이러한 표면의 불균질성은 피로균열의 원인이 된다.

대부분 경우 피로파괴 과정은 2단계로 분류된다. 피로균열이 발생하여, 초기 전파단계를 1단계라고 하고, 균열이 전파되는 단계를 2단계라고 한다. 그림 4는 피로균열의 형성과정을 모식적으로 나타낸 것이다. 일반적인 기계부품의 표면은 거칠기 때문에, 피로균열은 불균질한 부위 또는 결함 부위에서 발생한다. 피로균열의 핵생성 기구는 그림 2에 나타낸 바와 같이 슬립에 의해서 발생한다. 피로균열은 일정 결정면에 따라서 형성되지만, 입계와 같은 불연속 부분에서 그림 3, 4와 같이 그 방향이 변화한다.

그림 5는 Al합금 피로시험편에서 초기 피로균열 부

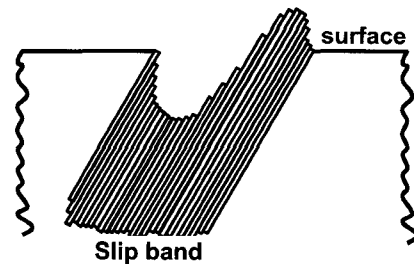


그림 2 피로시험 초기단계에서 슬립에 의해 발생한 요철의 모식도

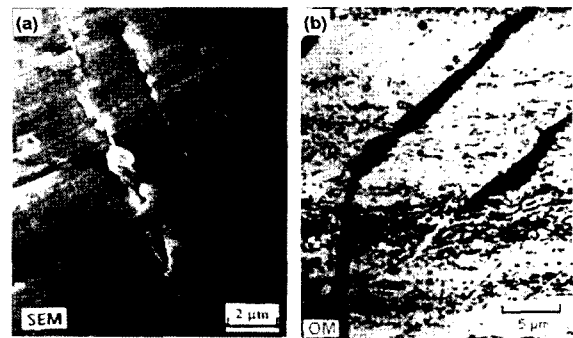


그림 3 피로시험 초기단계에서 슬립에 의해 발생한 흠 (a) Al합금 (b)순 Al

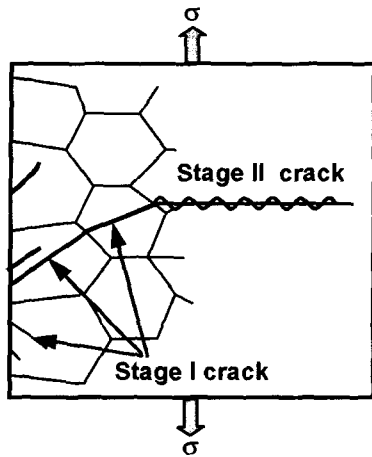


그림 4 피로하중에서 균열의 형성 및 성장과정의 모식도

위의 파면을 나타낸 것이다. 일반적으로 1단계의 파면은 아주 매끄럽고, 모난 모양이고, 스트라이에이션(striation)은 나타나지 않는다. 1단계 피로는 저응력 고사이클 피로에서 관찰되지만, 고응력 저사이클 피로에서 관찰되지 않는다. 특히 1단계는 균열전파의 전과정 중에서 아주 일부분에 지나지 않기 때문에, 거시적 관찰로부터 파괴의 원인을 추정하기 위하여, 균열 근방의 파면을 신중히 검토할 필요가 있다.

1단계에서 균열이 표면으로부터 아주 짧은 거리로 전진한 후, 2단계에서는 별도의 기구에 의해서 전파가 시작된다. 이때 피로균열은 그림 4에 나타낸 바와 같이 인장응력에 수직 방향으로 전파되며, 특히 반복 사이클 중에서 인장응력이 부과되는 동안에 전파된다.

그림 6은 V노치 균열시험편의 노치 부근을 연마한 후, 피로균열 성장과정을 SEM 내에서 in-suit으로 관찰한 것이다. (a)는 응력사이클을 나타낸 것이고, (b)는 2회 인장 사이클 동안 시료 측면의 연속사진이다. 인장응력이 부과 시(1→2)에 균열이 열리고, 압축응력 시(3→4)에 폐쇄되고, 인장을 반복한 경우(5→6)에 다시 균열이 열리면서, 크게 성장한다. 또한 연마면에 슬립대가 형성되고, 균열의 열림이 슬립대와 상관관계가



그림 5 Al합금의 피로시험에서 초기 균열 부위의 파면 양상. (a) SEM, (b)TEM

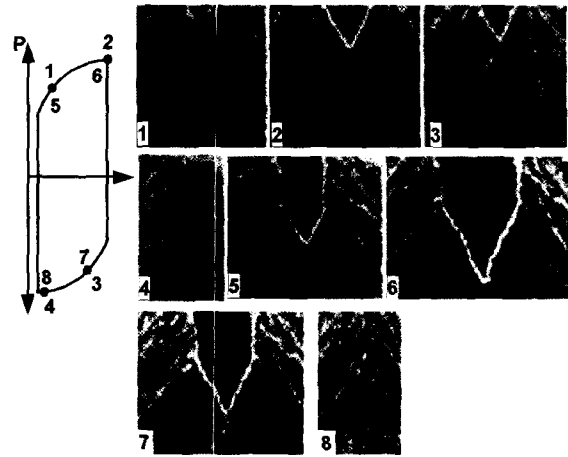


그림 6 주사전자현미경 내의 피로사이클 과정에서 in-suit 방법으로 관찰한 피로균열 성장의 미세구조

있음을 알 수 있다.

균열의 성장은 그림 7과 같이 광학현미경으로 관찰할 수 있고, 균열은 사이클 수가 증가함에 따라서 응력의 수직방향으로 전진한다.

2단계 피로균열이 전파될 때에 전진하는 균열의 열림과 닫힘에 의해서 침하와 융기한 영역이 파면에 남는다. 그 예를 그림 8에 나타내었고, 이 모양을 스트라이에이션(striation)이라고 하며, 미시적 관찰에서 나타나는 피로균열 파면의 가장 일반적인 특징이다. 스트라이에이션 형성의 미시적 기구는 명확하지 않다. 그러나 그림 9는 스트라이에이션 형성기구를 모식적으로 나타낸 것으로, 스트라이에이션이 슬립면 기구(slip plane mechanism)에 의해서 형성되어진다는 제안이다. 즉, 인장에 의한 균열의 열림과 압축에 의한 균열의 닫힘과 잘 대응된다. 각 스트라이에이션은 1회 사이클 중에 균

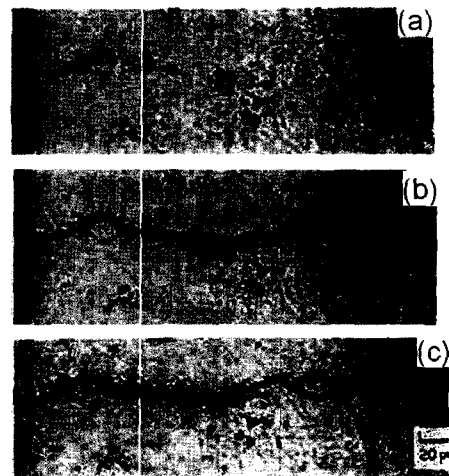


그림 7 피로시험 과정 중 피로시험편의 표면을 광학현미경으로 측정된 균열 길이 변화. (a) 96.000회, (b) 96.400회 (c) 96.800회

열의 성장에 따른 것이다.

스트라이에이션은 균열전파 방향에 수직으로 배열되지만, 국부응력이 변동되거나, 재료 내에 결함 혹은 불균질성이 존재하는 경우에 균열전파 방향이 국부적으로 변화하여 스트라이에이션의 방향이 변화한다. 그림 10에 그 일 예를 나타낸다. 물론 균열 이동의 총체적인 방향은 거시적인 균열 전파 방향과 동일하다.

스트라이에이션의 간격은 1사이클 당 균열 전진거리와 대응되며, 다양한 인자에 의해 영향을 받는다. 그 중에서 가장 큰 영향은 응력의 크기이다. 그림 11은 부가응력의 변화에 따른 스트라이에이션 간격의 변화를 나타낸 것이다. 응력이 높을수록, 스트라이에이션의 간격이 넓어진다. 또한 부가하는 최고하중이 일정한 경우, 균열이 성장함에 따라서 시편의 실제 단면적이 감소하므로, 주어진 응력이 증가하게 되어 스트라이에이션의

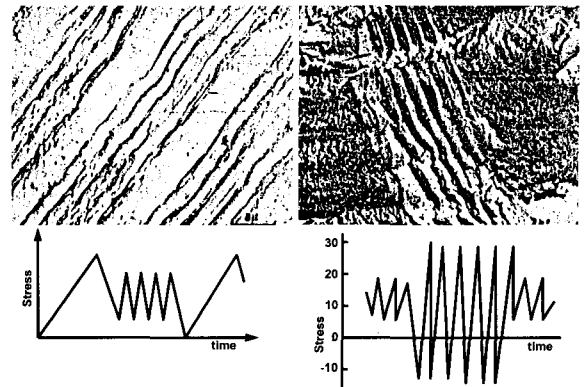


그림 11 피로사이클과 스트라이에이션 간격과의 상관관계

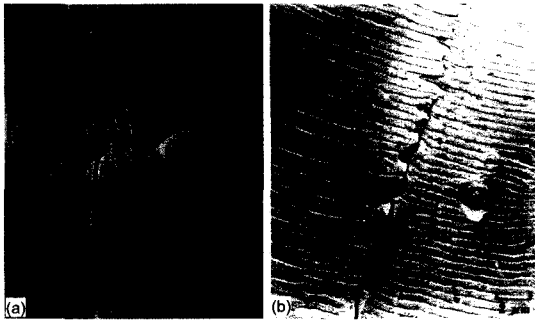
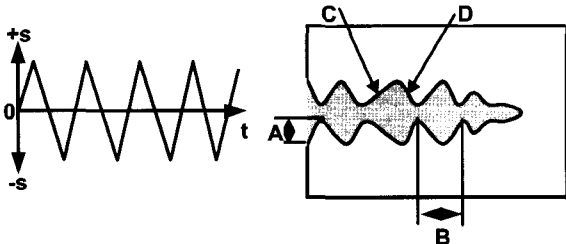


그림 8 피로파면 특징인 스트라이에이션(striation)



그림 12 불균일 한 하중에 의한 스트라이에이션 간격 변화 현상



A : depth, B : one cycle, C: smooth trailing edge, D: slip step on leading edge

그림 9 2단계 피로에서 스트라이에이션 형성기구를 나타낸 모식도

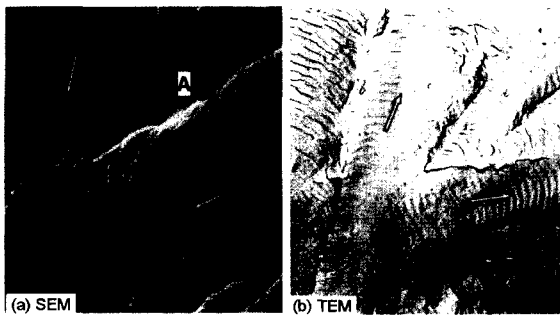


그림 10 스트라이에이션 배열과 균열성장방향과의 관계

간격이 변화한다. 따라서 균열의 전파거리는 피로파괴 과정을 이해하는 데에 중요한 단서가 된다. 사이클의 진동수는 간격에 미치는 영향이 아주 적다. 때에 따라서 그림 12와 같이 매우 짧은 거리 내에서 간격이 급격히 변화하는 경우가 있다. 이것은 경사진 표면에서 균열 전파에 따른 국부 응력조건과 균열방향이 변화하기 때문이다. 특히 불균일한 반복하중 사이클에서는 스트라이에이션이 형성되지 않는다.

재료 내에 조대한 제 2상의 입자와 개재물은 국부적인 균열 성장속도를 변화시키고, 그로 인해 스트라이에이션 간격도 변화한다. 피로균열이 조대한 입자에 접근하였을 때, 만약 입자가 그대로 존재하면, 균열 성장속도가 그림 13(a)와 같이 간단히 억제되지만, 입자가 쪼개어진다면, 그림 13(b)와 같이 가속된다. 그러나 양쪽 모두 균열 성장속도는 입자 근처에서만 변화하여, 전체 균열 성장속도에는 크게 영향을 미치지 못한다. 저사이클(고응력) 피로의 경우, 균열 선단에 아주 큰 소성영역이 존재하면, 전진하는 균열 바로 앞에서 입자의 벽개 또는 기지와 분리된다. 사실상 벽개 또는 분리된 입자는 입자와 균열 사이에 티어(tear) 또

는 전단 파괴를 촉진하는 균열 또는 보이드로서 거동한다. 아주 미세한 입자들은 그림 13(c)에서 나타나듯이 스트라이에이션 간격이나 균열 성장속도에 영향을 미치지 못한다.

저사이클, 고변위 피로파괴에서는 그림 14와 같은 타이어 자국의 파면이 자주 보이는 데, 이것을 타이어 트랙(tire track)이라고 한다. 타이어트랙은 피로 사이클에서 균열이 닫히는 사이클 동안, 입자 혹은 용기된 부분이 다른 한 쪽 파면 안으로 주기적으로 압입되어 형성된다. 타이어 자국의 방향과 트랙 내의 간격 변화는 피로과정 동안 발생한 전단 하중의 측면 이동과 같은 변위 형태를 나타낸다. 스트라이에이션이 없는 피로파면에서 타이어트랙은 저사이클(고응력)에 의해 파괴가 일어나는 것을 시사하므로, 타이어트랙은 피로해석에 중요한 파면 양상이다.

피로파면은 재료에 따라서 다른 양상을 나타내는 경

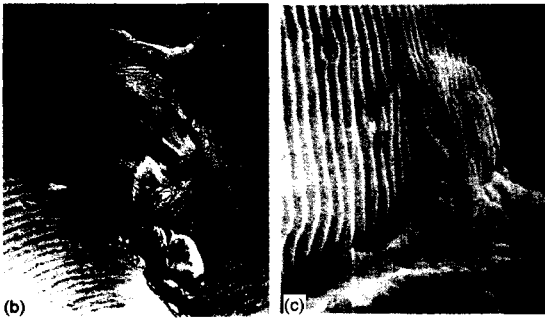


그림 13 피로균열 전파과정에서 입자의 영향 (a) 국부 지체 (b) 국부 가속 (c) 영향 없음



그림 14 피로 파면의 타이어 트랙(Tire track)

우가 많다. 피로파면의 양상은 재료, 형상 및 제조방법 등에 영향을 받는다. 예를 들면 고강도강에서는 피로균열 초기 발생영역이 그림 15 (a)와 같이 불규칙적인 구조를 나타내고, Ni기 초내열 단조합금에서는 (b)와 같이 모가난 형태를 나타낸다. 역시 재료에 따라서 빠른 균열성장 영역에서의 파면형상도 영향을 받는다. 아주 연질 혹은 매우 경한 재료에서는 피로 스트라이에이션이 그림 16과 같이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 반면에 적당한 경도와 강도를 가진 합금에서는 스트라이에이션이 뚜렷하게 보이는 경향이 있다.

또한, 외부 환경은 역시 피로파괴 양상에 영향을 강하게 미친다. 그림 17은 어닐링 된 302 스테인리스강의 실온(a)과 427°C(b)에서 피로파괴된 파면을 비교한 것이다. 고온에서 파괴된 파면은 평편한 취성 양상

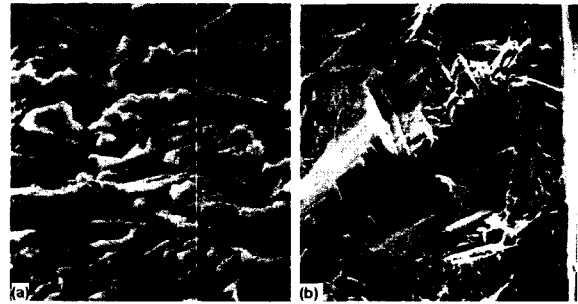


그림 15 피로 균열 시점에서 파면 양상. (a) 불규칙적 파면(고강도강), (b) 각진 모양(Ni기 초내열 단조합금)

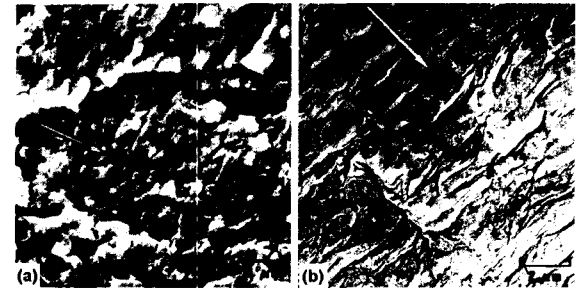


그림 16 약하게 형성된 스트라이에이션. (a) 300M 합금강 (b) Al100 Al합금

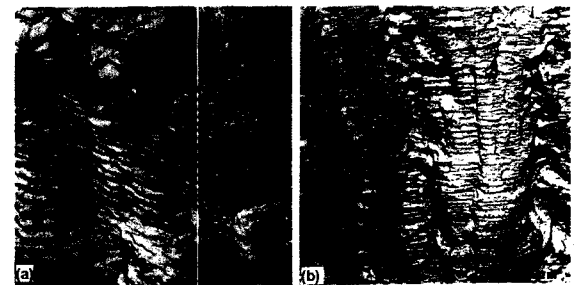


그림 17 어닐링된 302 스테인리스강에서 스트라이에이션에 미치는 온도의 영향. (a) 연성 스트라이에이션(실온) (b) 취성 스트라이에이션(427°C)

을 나타내는 스트라이에이션이 나타나는 것이 특징이다.

가스 분위기에 따라서도 피로파면의 양상은 변화한다. 그림 18은 Ti합금을 He과 H<sub>2</sub> 분위기에서 피로시험한 결과로서, 헬륨분위기에서는 정상적인 스트라이에이션이 나타나지만, 수소분위기에서 피로균열이 전파되는 과정에 그림 18과 같이 주기적인 2차 균열이 뚜렷하게 나타나는 것이 특징이다.

한편 2차 균열의 형성기구는 명확하지 않다. 경우에 따라서는 피로균열이 국부 소성변형을 수반하면서 전파되지 않고, 그림 19와 같이 벽개에 의해 전파하여 파괴되는 경우도 있으므로, 파면양상과 반복부하의 상관관계를 파악하기가 어려울 경우도 있다. 또한 피로균열이 그림 20과 같이 결정입계로 전파하는 경우도 있다.

그림 20은 봉화처리한 Cr강에서 피로파면 (a) 균열이 우측에서 입계로 좌측에서 입내로 전파, (b) (a)의 중심부를 확대 대부분의 경우 피로파괴에는 스트라이에이션이 형성되지만, 판별하기 힘들거나, 형성되지 않는 경우도 있다. 주로 복잡한 미세조직을 가지는 재료에서 많이 나타난다. 그림 21은 4140강을 400℃에서 템퍼링한 강의 피로파면을 나타낸 것으로, (b)는 (a)를 확대한 사진이다. 템퍼링 처리에 의해 페라이트 중에 단

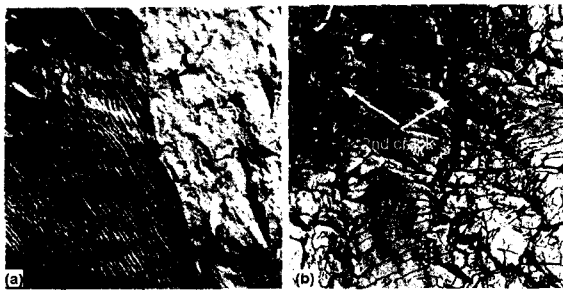


그림 18 스트라이에이션 형상에 미치는 분위기의 영향 (Ti합금), (a) He gas (b) H<sub>2</sub> gas

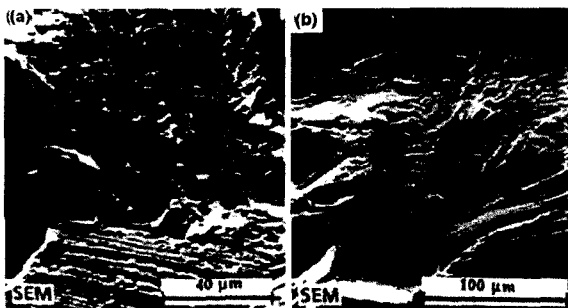


그림 19 벽개면 위에 취성균열 전파에 의해서 나타난 피로균열 (Si 박판, 실온)

화물이 분산되어 있으므로, 스트라이에이션 나타나지 않고, 덩플 형상과 유사한 파면을 나타낸다. 또한 스트라이에이션 형상이 잘 보이지 않거나, 애매모호 하여 관찰하기 힘든 파면의 예를 나타낸다. 따라서 스트라이에이션이 없다고 피로파괴가 아니라고 단정할 수 없다.

피로균열 전파의 최종단계인 3단계에서는 과부하에 의해서 파괴된다. 2단계에서 생긴 균열은 남아 있는 부분이 다음 사이클 또는 수 사이클의 하중을 견딜 수 없을 때까지 전파된다. 그 후에 순간적으로 파괴가 일어나고, 소성변형이 그다지 일어나지 않는다. 파면의 양상은 일반적으로 덩플 혹은 벽개 파괴기구에 의해 좌우된다. 일반적으로 3단계는 다른 단계와 구별이 용이하다.

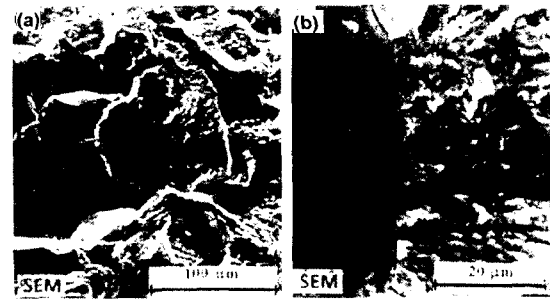


그림 20 봉화처리한 Cr강에서 피로파면 (a) 균열이 우측에서 입계로 좌측에서 입내로 전파, (b) (a)의 중심부를 확대

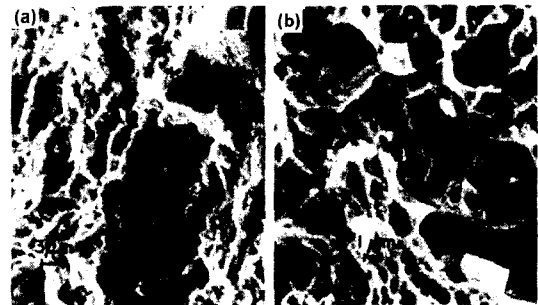


그림 21 스트라이에이션이 보이지 않는 피로파면 400℃ 템퍼링한 4140강.  $\Delta K = 21\text{MN/m}^{3/2}$



- 강정윤(姜晶允)
- 1953년생
- 부산대학교 재료공학부
- 접합공학, 제면미세조직제어
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr