

## Fractography의 기초 및 기술 - (1)

韓 昌 錫

호서대학교 국방과학기술학과

### The Basis and Technique of Fractography - (1)

Chang-Suk Han

Dept. of Defense Science & Technology, Hoseo University,  
165 Sechul-Ri, Baebang-Myun, Asan City, Chungnam 336-795, Korea

#### 1. 파단면 관찰(Fractography)이란?

Fractography란 파단면의 조사로부터 파괴기구에 관한 식별이나 파괴·파손사고의 해석을 하는 것으로, 육안이나 광학현미경을 이용한 관찰은 이전부터 행하여 온 것이지만, 최근 전자현미경이 파단면 관찰에 응용되는 것에 따라 종래보다도 훨씬 많은 정밀한 정보를 얻을 수 있게 되었으며, 매우 중요한 위치를 차지하게 되었다.

Fractography는 파괴사고에 대한 원인규명에 있어서, 파괴가 발생한 현장의 귀중한 증거를 제시하여 주는 것은 당연하지만, 파괴기구의 연구에 대해서도 균열진전을 3차원적으로 파악하는 귀중한 수단을 제공하여 준다. 여러 가지 조건하의 파단면 특징에 대해서는 상당한 정보가 축적되어 있으며, 정성적인 검토에 대해서도 상당량 축적되어 있다. 또한, 화상처리기술을 응용한 정량적인 해석 혹은 파단면에 대한 진단 등도 수록되어 있으며, 상기한 여러 가지 혁신적 관찰수단의 등장과 함께 이 방면의 연구가 활발한 진전을 할 것이라고 생각된다.

#### 2. Fractography 기술

##### 2.1 파단면의 보존과 청정화

파단면으로부터 얻을 수 있는 파괴에 관한 정보의 정확도는, 파단면이 파괴될 당시의 상태 그대로 보존될 수 있을까에 의존한다. 파단면이 손상을 받는 원인으로서는 우선, 기계적인 원인을 들 수 있다. 부분적

인 파괴 시, 파단면끼리의 충돌은 피할 수 없지만, 파단면의 보존에 있어서는 기계적인 손상을 받지 않게 주의하여야만 한다. 한편, 부식환경이나 고온하에서 파괴된 파단면이나 파단면의 보존상태가 좋지 않아 부식된 파단면에 대해서는 파단면의 녹을 제거하여야 한다. 건조환경하에서 보존된 시료에서도, 장시간 경과하면 공기산화에 의하여 파단면상에 부식생성물이 발생하여 상태가 변화하는 것에 주의하여야 한다. 파단면의 녹을 제거하는 방법을 분류하면 다음과 같다.

- blank replica법; plastic replica를 반복하는 방법으로, 적색 녹  $Fe(OH)_3$ 에는 효과가 있지만, 흑색 녹( $Fe_3O_4$ )과 같이 밀착성이 높은 녹에는 적합하지 않다.
- 초음파 세정법; 계면활성제 등 여러 가지 종류의 용매 중에서 할 수 있으며, 파단면을 손상시키지 않는다. 또한, 후술하는 화학적 녹 제거법과 병용하면 더욱더 큰 효과를 얻을 수 있다.
- 산 세정법; 탄소강이나 저합금강 등에 대해서는 10%  $H_2SO_4$  + 네오레스틴 + 초음파세정을 하고, stainless강, Ti, Al 합금 등 내식성금속에 대해서는 ETA(ethylene diamine tetra-acetic acid disodium salt) 0.1~0.2%wt 수용액이 효과가 있다.

##### 2.2 거시적 관찰기술

육안, lupe, 실체현미경에 의한 저배율의 거시적 관찰은, 파괴 기점위치의 파악이나 균열의 성장경로,

균열형상, 최종파괴부의 크기 판정 등에 효과가 있으며, 반대로 고배율에서 이와 같은 관찰은 부적합한 경우가 많다.

### 2.3 전자현미경 Fractography 기술

파단면에 대한 고배율관찰에 대해서는, 투과전자현미경(TEM)과 주사전자현미경(SEM)이 이용된다. TEM은 분해능이 우수한 반면, replica 제작이 필요하기 때문에 요철이 심한 파단면에서는 표면 요철을 충분히 전사할 수 없으며, replica 붕괴에 의한 요철 정도의 감소나 파단면 형상과는 무관한 인위적인 형태를 발생시킬 가능성이 있다. 또, 최저 관찰배율이 약 500 정도로 높으며, 거시적 파단면을 관찰하기에는 어려움이 있다.

한편, SEM은 replica를 사용하지 않고 파단면을 직접 관찰할 수 있으며, 관찰배율의 범위가 넓어(20~300,000배) macro부터 micro까지 연속하여 관찰할 수 있으며, panorama 사진, matching 관찰, 요철이 심한 파단면의 stereo 관찰 등을 용이하게 할 수 있는 장점이 있기 때문에, fractography라고 하면 SEM 관찰을 의미하는 경우가 많다. SEM의 분해능은 TEM에 비하여 뒤떨어지지만, 냉음극선계방사형 전자총을 이용한 SEM은 종래의 열전자방사형 전자총을 사용한 것에 비해서 분해능이 훨씬 향상되었다.

파단면의 특징은 모양뿐만 아니라 요철의 정도를 포함하여 파악하여야 하며, 그렇게 하기 위해서는 파단면의 입체관찰이 필요하다. 파단면의 입체상을 얻기 위해서는 시료를 교대로 각도  $\theta$  만큼 회전시켜서 2장의 stereo 사진을 촬영하고, stereo 안경을 이용하여 관찰한다. 이 경우, 입체감은 파단면의 경사각에 의해서 변화하기 때문에, 다음 식에 의하여 요철의 높이( $h$ )를 산출하여 실제의 요철 정도를 파악하여야 한다.

$$h = (I / \sin \theta) - (I / \tan \theta)$$

여기에서,  $I$ ,  $I'$ 는 기준화상, 경사화상 상에서 회전축에 직각으로 된 기준점으로부터 각 점의 거리,  $\theta$ 는 회전각이다.

### 2.4 화상처리용 Fractography

최근, 컴퓨터의 hardware, software의 급속한 발

진 및 보급과 함께, fractography 해석에 대해서도 화상처리기술이 응용되고 있으며, 종래의 육안판단으로는 알 수 없었던 정보추출이 가능하게 되었다. 화상처리 fractography에 의한 파단면 해석은 i) 2차원 처리와 ii) 3차원 처리로 크게 나누어진다. 2차원 처리는 texture에 의한 파단면 형상의 분류와 그것에 의한 영역분할(예를 들어, 입계·입내 파면율의 측정) 혹은 striation 간격의 측정 등을 2차원 투영 평면상에서 평가하는 것이다.

한편, 3차원 처리란, stereo 화상을 이용하여 입체 형상을 재구축하고, 그 입체형상을 해석대상으로 하는 것이다. 3차원 형상을 정량적으로 측정할 수 있다면, 조감도에 의한 파단면 등의 직접관찰이 가능할 뿐만 아니라 종래에는 거의 이용할 수 없었던 높이 방향의 정보에 대한 신속한 양적 처리를 가능하게 할 수 있기 때문에 파단면 해석방법을 fractography에 제공할 수 있다.

#### 2.4.1 Striation 간격의 자동측정

피로파괴의 대표적인 기구인 striation 간격의 측정은 사고해석 등에서 중요하게 이용되고 있으며, 그 간격분포에 대한 통계적 성질의 검증은 공학적으로도 유용성이 있을 뿐만 아니라, 미시적 파괴기구해명에 대해서도 유용하다. 여기에서는, edge·선 검출에 의한 방법과 texture 해석에 의한 방법에 대하여 기술 하겠다.

##### (1) Edge·선 검출에 의한 방법

그림 1에 해석에 이용한 striation 사진의 예를 나타내었다. 그림에서 검은 사각형의 부분을  $100 \times 200$  화소[농도 level 8 bit(256계조)]로 입력하였다. 그림 2에 해석에 대한 flow chart를 나타내었다. Striation에 대응하는 선 검출법은 (i) 국소적 조작으로 edge·선의 후보점(edge요소)을 검출하는 처리, (ii) (i)에서 얻은 요소 map으로부터 매끄러운 선 출력을 얻는 처리로 크게 구분할 수 있다. 여기에서 edge·선 요소의 검출에는, edge·선 부분은 화상농도가 급격하게 변화하는 부분에 대응하고 있기 때문에 농도변화율을 얻는 가장 기본적인 공간미분에 의한 방법을 이용하였다.

다음으로, 이 edge 강도 map으로부터 striation에

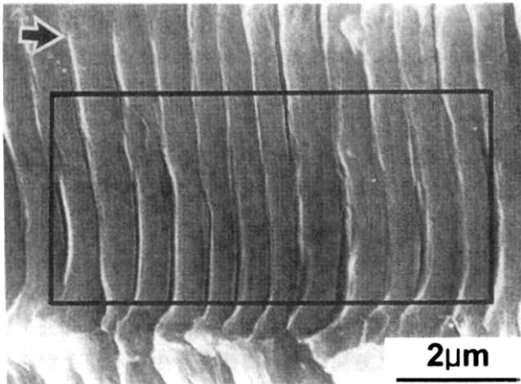


그림 1. Striation의 SEM 사진(Al합금,  $da/dN=7.9 \times 10^{-7}$  m/c, 화살표는 균열진전방향을 나타냄).

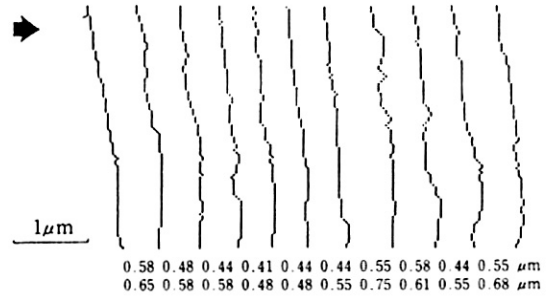


그림 3. 그림 1의 Striation 결과.

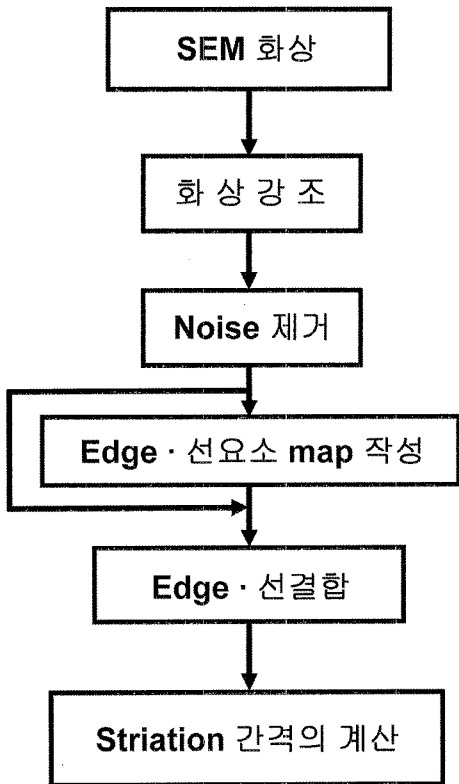


그림 2. Striation 간격 측정 flow chart.

대응한 edge · 선 요소를 결합할 필요가 있지만, striation은 ① 중단하기도 하며, 교차 혹은 분리되지 않는 1개의 연속선으로 된다, ② 전체적으로 서로 평행관계에 있다는 것을 제한조건으로서 이용하는 것에 의하여 추출선을 얻는다. 그림 1의 처리결과를

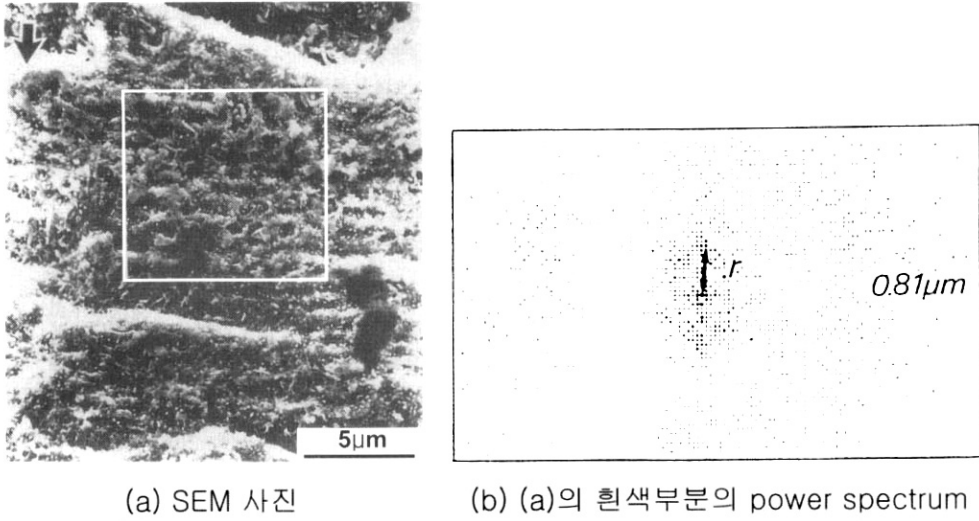
그림 3에 나타낸 것과 같이 충분히 정밀한 striation을 추출할 수 있다. 이상은 비교적 명료한 striation의 예이었지만, 선명하지 않은 striation의 경우는 濃淡畫像을 edge 강도 map으로서 이용할지, 혹은 다음 항에서 기술할 texture 해석에 의한 방법이 적용된다. 상기한 바와 같이, striation 간격의 최소값과 최대값을 구한 예를 그림 3에 나타내었다. Striation 간격의 평균값은 0.54 μm이며, 종래의 결과와 일치한다.

여기에서 서술한 edge · 선 검출에 의한 방법은, 영역검출에 대해서도 유용하며, 예를 들어 부식피로 · SCC 균열발생의 기점이 되는 부식 pit의 추출과 극한값 통계해석을 할 수 있다.

(2) Texture 해석에 의한 방법

부식환경에서의 striation 관찰, 특히 고온고압수환경과 같은 경우에는, 표면에 단단한 산화물 피막이 고착되어 있다. 따라서, 파단면 형상 관찰은 막 제거 처리를 하면 초기에는 가능하지만, 선명하지 않은 striation 모양 밖에 얻을 수 없다[그림 4(a)]. 이와 같은 경우에는 이전에 기술하였던 edge · 선 검출에 의한 방법으로는 striation 추출은 어려우며, 파단면 texture의 주기성을 조사하는 방법이 효과가 있다.

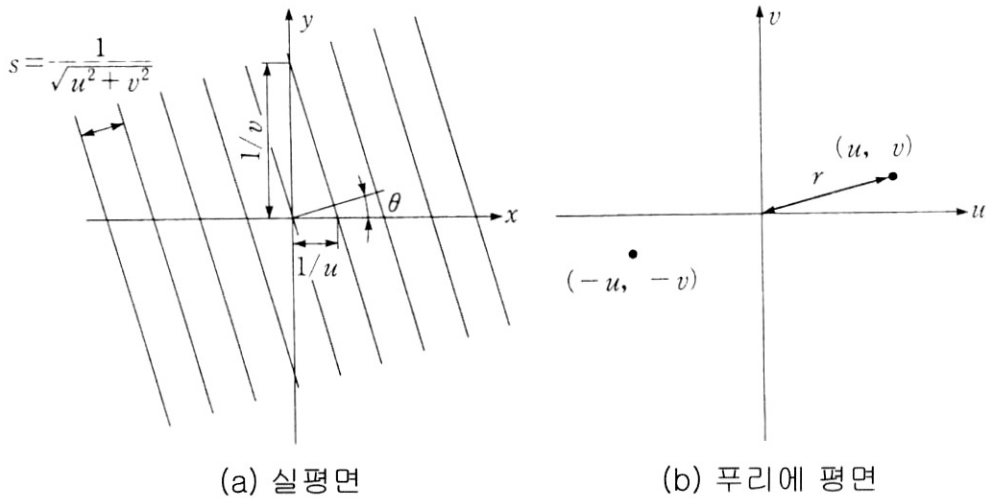
Texture의 주기성을 조사하는 방법은 다수 보고되어 있지만, 이 경우에는 2차원 푸리에변환을 한 후, power-spectrum의 강도분포를 조사하는 방법이 효과가 있다. 즉, striation과 같이 주기적인 모양[그림 5(a)]에 푸리에변환을 시키면, 푸리에 평면에서는 원점에 대해서 점대칭의 위치에 에너지성분이 집중하기 때문에 [그림 5(b)], 이 위치를 검출하는 것에 의하여 방향 · 주기가 동시에 측정하는 것이 가능하다. 즉,



(a) SEM 사진

(b) (a)의 흰색부분의 power spectrum

그림 4. A533B의 고온·고압수(BWR 모의환경)에서 CF 파단면(흰색 테두리 해석범위,  $da/dN=1.0 \times 10^{-6}$  m/c).



(a) 실평면

(b) 푸리에 평면

그림 5. Striation의 푸리에 변환.

striation 간격을  $s$ , 경사를  $\theta$ , power spectrum면 위에 에너지가 집중한 점의 좌표를  $(u, v)$ 라고 하면,  $s$  및  $\theta$ 는

$$\theta = \tan^{-1}(u/v) \quad s = 1 / \sqrt{u^2 + v^2} \quad (1)$$

으로 나타낼 수 있다. 즉, striation 간격  $s$ 는 power-spectrum면 위의 에너지 집중점과 원점의 거리  $r$ 의 역수로 주어진다.

그림 4(b)에 그림 4(a)의 화상 power-spectrum을 구한 결과를 나타내었다. 가장 강한 주기성은 그림

중에 나타낸 거리  $r$ 이며, 이것에 의하여 계산된 간격은  $s = 0.81 \mu\text{m}$ 이다. 이것은 거시적 균열진전속도  $da/dN = 1.0 \times 10^{-6} \text{m/cycle} (= 1.0 \mu\text{m/cycle})$ 와 거의 일치하는 점으로부터 푸리에 power-spectrum면으로부터 얻은  $0.81 \mu\text{m}$ 의 규칙성은 striation 간격이라고 할 수 있다.

### 2.4.2 3차원 형상의 재구축과 응용

#### (1) 3차원 형상의 재구축법

파단면의 입체상을 관찰하기 위해서는, 우선 시료

를 어느 정도의 각도  $\theta$  만큼 회전시켜 2장의 stereo 사진을 촬영한다. 다음으로, 이 2장의 사진을 펼쳐놓고 stereo 안경을 이용하여 우측의 사진은 우측의 눈으로, 또, 좌측의 사진은 좌측의 눈으로 살펴보고, 2장의 사진의 대칭점이 완전하게 하나의 점으로 밖에 보이지 않을 때에 입체감을 얻을 수 있다. 2장의 stereo 사진이 대응하는 동일점이 결정되면, 기하학

적 관계로부터 각점의 기준점으로부터의 높이  $h$ 는 위의 식(1)에 의해 계산할 수 있다.

그림 6에 3차원 형상 재구축 flow chart를 나타내었다. 컴퓨터를 사용하여 처리를 할 때에도 그림 6에 나타낸 것과 같이, 2장의 화상으로부터 형성되는 1 set의 stereo 화상간의 대응점탐색처리와 그 결과로부터 얻어진 상대적인 위치의 편차에 의해 높이를 계산하는 처리로 크게 나눌 수 있다.

1 set의 stereo 화상에서, 시료를 경사지게 하지 않고 촬영한 것을 기준화상, 경사지게 하여 촬영한 것을 경사화상이라고 한다[그림 7]. 경사화상은 기준화상에 대하여, 그림 7에 나타낸 직교좌표계의  $y$ 축과 평행한 축을 회전축으로서 시료를 경사지게 한 것( $\theta = 8^\circ$ )이다.

2장의 화상의 대응점을 탐색하기 위해서는, 기준화상 중에 창 영역을 설정하고, 이 창 영역으로부터 얻은 template를 경사화상과 합쳐서 최상의 중첩이 되는 영역을 찾으면 된다. 이 경우, 경사화상을 확실하게 탐색하는 것은 시간과 계산 cost가 소요되기 때문에, 경사화상의 대응점이 존재한다고 예상되는 점을 중심으로, 창 영역 보다 큰 탐색영역을 설정하여, 이 안에서 최상으로 중첩되는 점을 탐색하는 방법이 효율적이다.

이 중첩에 대한 평가에는, SSDA(Sequential Similarity Detection Algorithm)법과 상호상관계수가 자주 사용된다. SSDA법은 template를 경사화상에 중첩시켰을 때에, 각 화소 차의 절대값의 합  $R_s$ 를

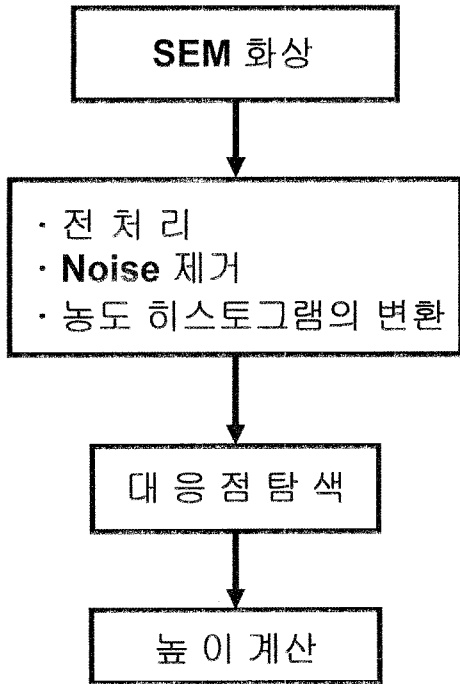


그림 6. 3차원 형상 재구축 flow chart.

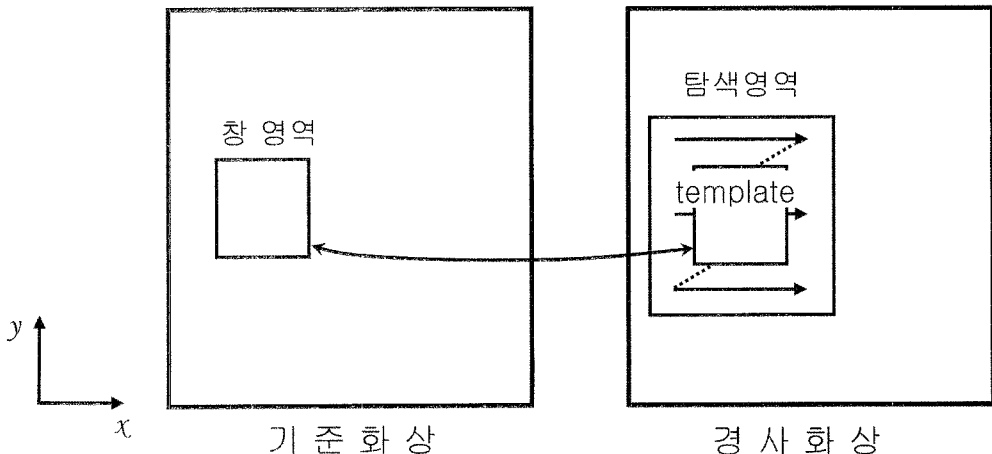


그림 7. 대응점 탐색 방법.

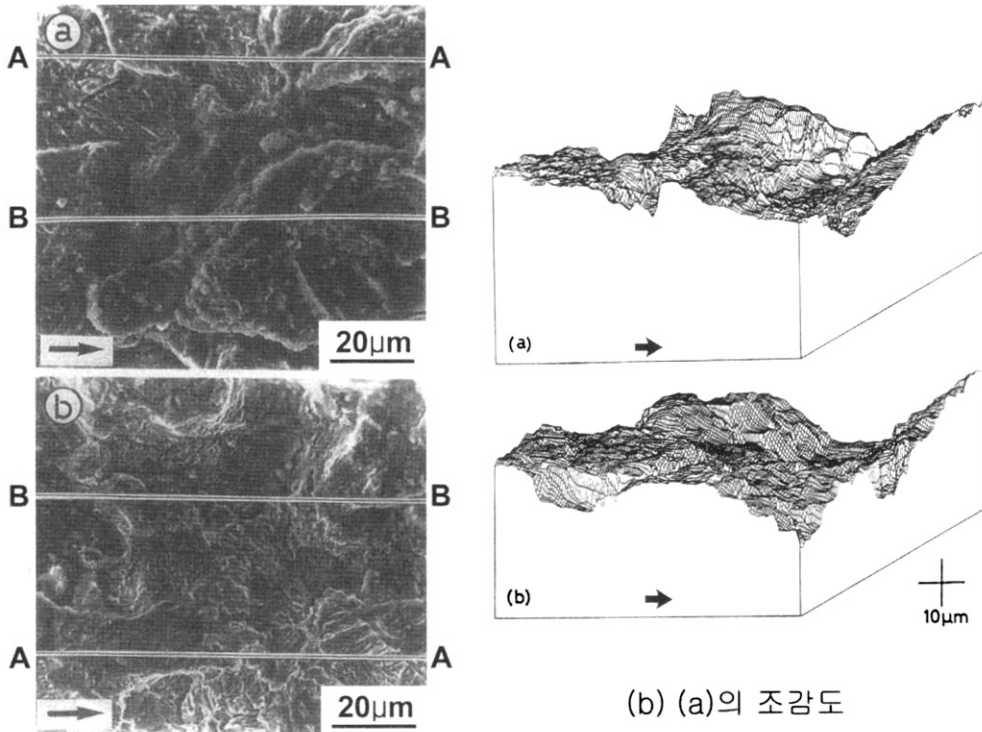
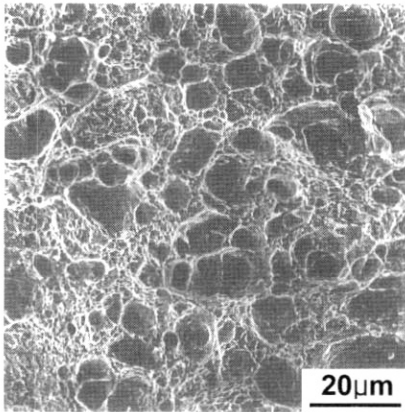


그림 8. HT80강의 인공해수중의 CF matching 파단면.

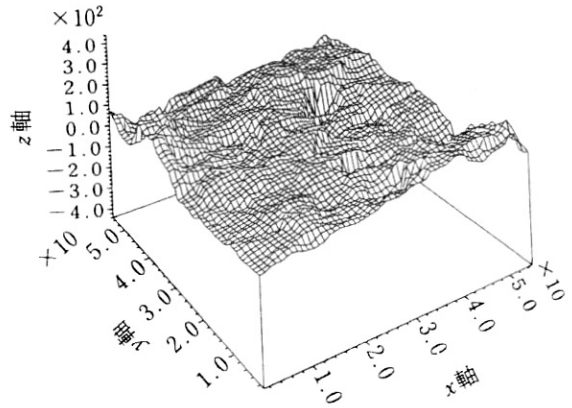
mismatching의 측정정도로 한 것이다. 즉, template를 탐색영역 안에서 순차적으로 이동시켰을 때,  $R_c$ 가 최소값이 되는 곳을 대응점으로 보는 것이다. 한편, 상호상관법(相互相關法)은 mismatching의 측정정도로써 상호상관계수  $R_c$ 를 이용한 것이다.  $R_c$ 는 중첩시킨 영역이 완전하게 동일한 경우는 1.0이 되지만, stereo 사진에서는 시료를 경사시키기 때문에 대응점 사이의  $R_c$ 는 반드시 1.0이 되지 않지만, 1.0에 가까운 값( $R_c \sim 0.8$ )으로 되는 것이 예상된다. 따라서, 상호상관법에서는  $R_c$ 가 최대값으로 될 때를 대응점으로 본다. SSDA법은, 양 화상 사이의 가감산만으로 계산할 수 있으며, 상호상관법에 비하여 처리속도가 빠른 것이 특징이다. 3차원 형상해석에 있어서는, 대응영역탐색이 처리시간의 대부분을 차지하며, 더구나 이후의 높이계산의 정밀도를 결정하기 위하여 계산 cost와 정밀도의 균형에 의해 SSDA법과 상호상관법 중에서 어느 한가지 방법을 선택할 필요가 있다.

(2) 3차원 형상의 재구축 예와 응용

고장력강 HT80을 인공해수 중에서 자연부식조건으로 부식시킨 부식피로 파단면의 matching 사진과 3차원 조감도를 그림 8에 나타내었다. 이 상하 파단면의 3차원 형상을 이용하여, matching 상하 파단면의 위치를 합쳐 평행도를 구한 다음, 상하 파단면을 평행하게 다가가는 균열폐구(龜裂閉口) 재현 simulation을 하였다. 이 simulation에서, 상하 파단면이 어떠한 1점에서 처음으로 접촉한 때를  $D = 0.0 \mu\text{m}$ 로 하고, 특히,  $D = 5 \mu\text{m}$  접근시켰을 때의 파단면 접촉 상황을 그림 9에 나타내었다. 그림 9는 부식생성물이 파단면에 부착하는 것이 그다지 보이지 않는 A-A 단면과 부식생성물이 현저하게 부착되어 있는 B-B 단면의 파단면 접촉 모양을 나타낸 것이며, 부식생성물이 부착되어 있는 부분에는 망으로서 표시하였다. 이 그림으로부터 부식생성물이 부착되어 있는 B-B단면에서, 우선, 파단면 접촉, 즉, 최초 균열폐구가 발생한 것을 알 수 있다.



(a) SEM 사진.



(b) (a)의 조감도.

그림 10. Charpy 충격시험에 의한 HT80강의 dimple 파면.

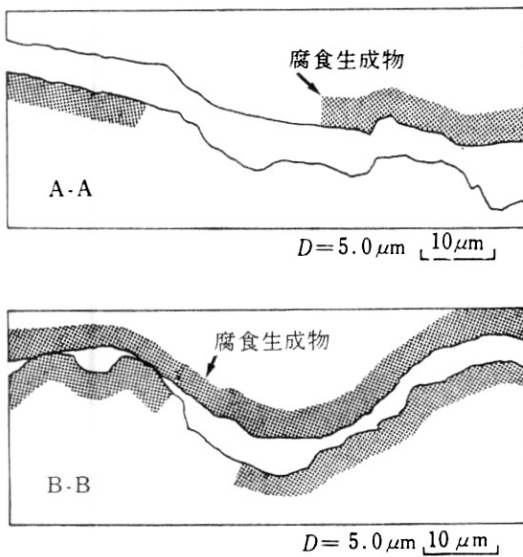


그림 9. 그림 8의 matching 파단면을 이용한 균열 simulation.

고장력강 HT80에 대한 charpy 충격시험의 dimple 파면과 그것에 대한 조감도를 그림 10에 나타내었다. Charpy 시험편이 연성과파괴 할 때는 dimple 파면을 나타내지만, 재료의 연성과 dimple 직경 사이에는 일반적인 관계는 없다. Dimple 깊이가 연성과 관계가 있다고 하지만, dimple 깊이를 구하기 위해서는 파단면에 대한 3차원적인 평가가 필요하다. SGV42

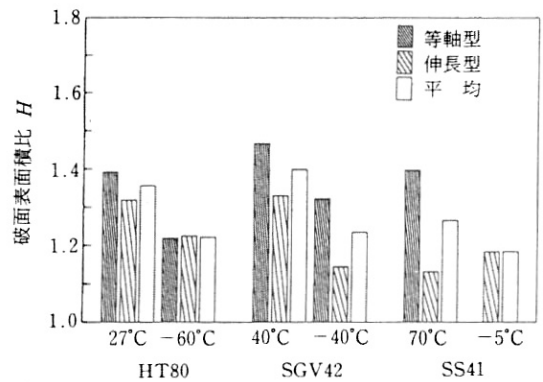


그림 11. HT80강, SGV42강, SS41강의 여러 온도에서의 파면 표면적비.

강, SS41강에 대해서도 같은 양상의 조감도를 구하여, 그 조감도를 3각형 요소로 구한 실제의 표면적을 파단면의 촬영면적으로 나눈 값을 표면적비(H)라 하고, 표면적비(H)와 charpy 시험온도의 관계를 구하였다. 결과를 그림 11에 나타낸 것과 같이, 동일한 강 종류의 비교하면, 등축형, 신장형 dimple과 관계없이 어떠한 강 종류에 있어서도 시험온도가 높고, 흡수 에너지가 큰 쪽이 H는 크다는 것을 알 수 있다.

주사형 probe 현미경(SPM) fractography, 초음파 현미경 fractography 및 fractography의 기초지식에 대해서는 다음호에 기술하겠다.