

## 일축압축상태의 석고 실험체에서 발생하는 날개크랙과 이차크랙에 대한 미시적 관측

### A Micro-observation on the Wing and Secondary Cracks Developed in Gypsum Blocks Subjected to Uniaxial Compression

사 공 명\* Sagong, Myung

#### Abstract

Wing and secondary cracks are unique types of cracks observed in rock masses subjected to uniaxial and biaxial compressive loading conditions. In this study, morphological features of wing and secondary cracks developed in gypsum specimens are investigated in the macro and micro scales. Along the path of wing crack, microtensile cracks are observed. Microtensile cracks coalesce with pores and show branch phenomenon. From the onset of the wing crack, multiple initiations of microtensile cracks are observed. Microtensile cracks show tortuous propagation paths and relatively constant aperture of the cracks during the propagation. It is shown that microtensile cracks propagate by splitting failure. At the micro scale, microfaults are observed in the path of the secondary cracks. Along the path of the secondary cracks, separation of grains and conglomerate grains, oblique microfaults, and irregular aperture of microfault are observed. These features show that the secondary cracks are produced in shear mode. The measured sizes of fracture process zone across the propagation direction near the tip of wing and secondary cracks range from  $10 \mu\text{m}$  to  $20 \mu\text{m}$  for wing cracks and from  $100 \mu\text{m}$  to  $200 \mu\text{m}$  for secondary cracks, respectively.

#### 요 지

날개크랙과 이차크랙은 암석의 일축압축 및 이축압축 조건에서 관측되는 특정한 형태의 크랙이다. 본 연구에서는 석고로 제작된 실험체내에 발생하는 날개크랙과 이차크랙의 형태적 측면을 미시적 및 거시적 관점에서 관측하였다. 날개크랙의 진행방향을 따라 미소인장크랙이 관측되었으며 미소인장크랙은 공극간의 연결과 분지현상을 통하여 진전되었다. 날개크랙의 개시점에서 다중의 미소인장크랙의 개시가 관측되었으며 미소인장크랙은 굴곡진 진행을 보인다. 또한 이차크랙과는 달리 미소인장크랙은 상대적으로 일정한 크랙의 틈을 보이며 인장에 의한 할렬파괴에 의해 진행되는 것으로 나타났다. 이차크랙의 미시적 관측에서는 미소파쇄대가 관측되었다. 이차크랙의 파괴구간 내에서는 입자 및 집괴의 분리, 경사진 미소파쇄대의 형성 및 불규칙한 크기의 틈을 가진 미소파쇄대가 관측되었다. 이러한 결과는 이차크랙이 전단에 의해 형성됨을 보이고 있다. 날개크랙과 이차크랙은 서로 다른 크기의 파괴진행구간을 보이고 있으며 각각의 크랙의 진행 방향에 직각방향으로 측정된 파괴진행구간의 폭은 날개크랙의 경우  $10 \mu\text{m}$ 에서  $20 \mu\text{m}$  정도이며 이차크랙은  $100 \mu\text{m}$ 에서  $200 \mu\text{m}$  정도이다.

**Keywords :** Coalescence, Microfaults, Microtensile crack, Secondary crack, Wing crack

\* 정희원, 포항산업과학연구원 강구조연구소 토목구조연구팀 선임연구원 (Member, Associate Researcher, Civil Engrg. Research Team, Steel Structure Research Lab, Research Institute of Industrial Science & Technology (RIST), sagong@rist.re.kr)

## 1. 서론

자연상태에 존재하는 대다수의 암반은 비등방, 비균질 상태로서 여러 공학적 성질이 흩과는 상당히 다르다. 그 중에서 암반의 공학적 거동에 가장 큰 영향을 미치는 요소가 불연속면의 유무이다. 절리, 층리, 엽리, 파쇄대 등의 존재는 암반내 연약대를 생성하며 터널이나 기초와 같은 지반구조물의 건설로 인하여 불연속면에서부터 시작되는 파괴를 유발할 수 있다. 불연속면의 존재는 암반내 복잡한 응력분포를 유발하며 불연속면의 선단부로부터 응력집중 현상을 유발한다. 특히 크랙(폭/길이)의 비가 적은 형태의 불연속면의 형태인 경우 선단부에서 발생하는 응력집중은 더욱 두드러지게 되며 이로 인하여 새로운 크랙의 발전이 가능하며 이와 같은 새로운 크랙은 결국 전체 파괴면의 일부를 생성하게 된다 (Einstein 등(1993), Goodman과 Kieffer(2000)).

이같이 응력에 의해서 유도된 크랙에 대한 연구는 상당히 많이 진행되어 왔다(Barquins와 Petit(1992), Brace와 Bombolakis(1963), Hoek과 Bieniawski(1984), Lajtai(1974), Peng과 Johnson(1974)). 하지만 대부분의 경우가 거시적인 관점에서의 실험으로서 그 결과 관측된 크랙은 최대 주응력방향(일축압축의 경우 재하방향)과 평행하게 진행되는 인장크랙의 형태로 나타났다. 이러한 결과는 크랙의 진행은 최대압축응력 방향으로 진행되는 결과를 재 확인시켜주나 자연상태에서 넓게 분포하고 있는 불연속면의 존재로 인한 응력의 이방성의 결과를 고려하지는 못하고 있다.

크랙형태로 존재하는 불연속면의 경우 그 주변에서 발생하는 응력분포는 인장 및 압축으로 구분할 수 있다 (Bobet(2000)). 서로 다른 두 종류의 응력분포 특성으로 인하여 불연속면에서는 두 가지 형태의 크랙이 관측된다 (Sagong과 Bobet(2002)). 관측되는 두 가지 형태의 크랙이란 날개크랙(wing crack)과 이차크랙(secondary crack)으로서 본 연구에서 집중적으로 다루고자 하는 형태의 크랙이다. 날개크랙은 인장응력이 분포되는 영역에서 관측되었으며 이차크랙은 압축응력이 주로 분포하는 부분에서 관측되었다.

날개크랙의 경우에는 파괴역학에서 사용하는 몇 가지 이론을 도입하여 개시응력 및 진행방향에 대한 규범들이 제시되었으며 이러한 규범을 기준으로 작성한 프로그램의 해석 결과는 실험과 비슷한 날개크랙의 개시응력 및 진행방향을 보이고 있다. 하지만 이차크랙의 경우 자체

한 발생원리에 대한 이해가 부족한 실정이어서 보다 근본적인 시도가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 불연속면을 가진 실험체에 하중을 가하여 날개크랙 및 이차크랙을 발생시킨 후 진전된 날개크랙과 이차크랙의 시편을 준비하여 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscopy)을 이용한 관측을 통하여 날개크랙과 이차크랙의 생성 원리를 이해하고자 한다.

주사전자현미경은 반사전자(backscattered electrons)와 이차전자(secondary electrons)를 통해서 반사전자이미지(BEI, Backscattered Electrons Image)와 이차전자이미지(SEI, Secondary Electrons Image)를 생성한다. 주로 반사전자에 의해서 형성된 이미지는 미소크랙과 공극의 형상 및 분포를 보다 잘 나타내며 이차전자에 의해서 얻어진 이미지는 크랙면의 입체적 형태를 나타내는데 보다 용이하게 사용된다. 따라서 본 연구에서는 두 종류의 이미지를 혼용하여 날개크랙과 이차크랙의 형상에 대하여 다루고자 한다.

## 2. 실험체 및 실험시편 제작

기술의 편의를 위하여 실험체는 직육면체의 석고 실험체를 나타내기로 하며 실험시편은 실험체에서 날개크랙 및 이차크랙이 발견된 일부를 절삭한 부분을 지칭하기로 한다. 본 연구를 수행하기 위하여 개방형의 불연속면들을 간직한 직육면체형의 실험체를 제작하여, 일축압축상태 하에서 균열을 진전시켜 날개크랙과 이차크랙이 발생한 상태에서 하중을 중지하였다. 주사전자현미경 관측을 위하여 실험시편은 실험체의 일부 중 날개크랙 및 이차크랙이 관측된 부분을 기계톱을 이용하여 절삭하여 제조되었다. 자세한 실험체의 제작 및 실험시편의 제작과 실험방법은 아래와 같다.

실험체 제작을 위하여 사용한 재료는 석고분말(US Gypsum Company에서 생산한 Hydrocal B-11)과 규조토(Picher Minerals Inc.에서 생산한 Celatom) 그리고 물을 사용하였으며 실험체 성형을 위하여 사용한 각 재료의 중량비는 물/석고=0.4, 물/규조토=35.0로 하였다. 물, 규조토, 석고의 배합으로 적당한 소성을 나타내는 혼합재료를 성형틀에 부어 가로 203.2mm, 세로 101.6mm, 폭 30mm의 크기를 가진 실험체를 제작하였다. 직육면체형의 실험체내에 존재하는 개방형의 불연속면을 생성하기 위해서는 폭 12.7mm, 틈 0.1mm의 철재세편을 성형틀 안에 미리 설치한 후 혼합재료를 부었다. 철재세편은 혼

합재료가 틀에 부어진 후 24시간이 지난 후에 제거 되었으며 철제세편이 제거된 실험체는 규조탄화물(silicon carbide)을 이용하여 보다 매끄러운 표면을 만들기 위하여 표면처리 되었다. 이러한 과정은 실험체의 표면 관측 시 해상도를 높이기 위해서 반드시 필요한 작업이다. 이와같은 과정을 통하여 생성된 실험체는 오븐에 일정한 온도(40℃)와 시간(4일)동안 양생 되었으며 실험체가 일정한 상태를 유지하기 위하여 각 재료의 양과 제작절차는 엄격히 지켜졌다.

실험시편은 앞서 언급한 바와 같이 일축압축하중을 가하여 날개크랙과 이차크랙이 생성, 진전된 상태에서 하중을 제거한 후 관측대상 부분을 기계톱으로 절단하여 제작되었다. 절단과정에서 발생하여 시편 표면에 잔존하는 잔류물은 압축공기의 분사를 통하여 제거 되었으며 정리된 실험시편은 5.8nm 두께의 팔라듐(palladium)으로 코팅 된 후 주사전자현미경 챔버내에 안치되었다.

### 3. 실험체 표면의 관찰

#### 3.1 실험체의 초기 상태

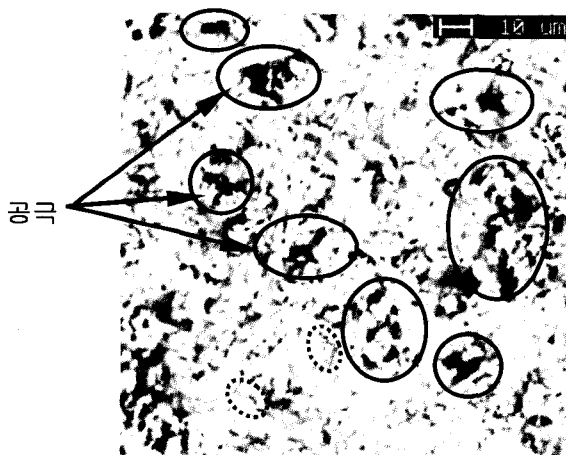
하중을 가하지 않은 상태에서의 석고는 다공질의 물체로서 다양한 크기의 공극을 가진다. 대부분의 공극들은 각 재료들을 혼합할 때 주입된 공기가 양생과정에서 건조상태가 됨으로 인하여 발생된다. 그림 1(a)는 반사전자에 의해서 얻어진 이미지로서 석고내에서 생성되는 공극의 사이즈와 형태를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 하중을 가하지 않은 상태에서 공극의 크기

는 1~10 μm 정도이며 모양은 다소 불규칙한 형태를 띠고있다. 그림 1(a)에는 나타나지 않지만 석고시편의 표면에서는 100 μm 크기의 분하구 모양의 공극이 발견되었는데 이는 실험체 제작시 내부에 있는 공기를 제거하기 위하여 소성상태의 혼합체를 진동시키는 과정에서 혼합체 내부에 존재하는 공기가 혼합체 표면으로 이동하여 양생되는 과정에서 남겨진 기포가 분하구 모양의 공극을 생성한 것으로 판단된다. 그림 1(b)의 경우는 이차전자이미지(SEI)로서 석고입자의 형태를 뚜렷이 보이고 있다. 입자의 크기는 10 μm에서 20 μm 정도이며 그 형상은 판형에 가깝다. 이러한 판형의 입자간 부착력의 증가에 의해 고형화 된 석고 실험체의 압축강도 또한 증가하게 된다.

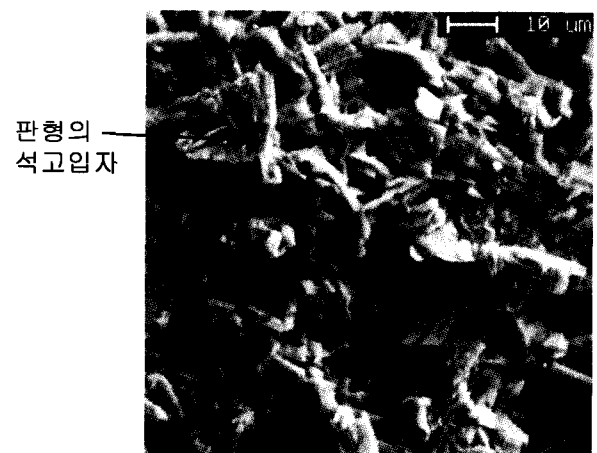
#### 3.2 날개크랙

다중의 불연속면을 가진 석고 실험체를 제작하여 일축압축 상태에서 하중을 가할 경우 관측되는 날개크랙과 이차크랙의 진행방향 및 개시점은 그림 2에 나타난 바와 같다. 날개크랙의 진행방향은 최대압축응력과 동일한 방향(재하방향)으로서 선단부 혹은 선단부 근처에서 발생하며 완만한 진행을 보인다.

각각의 크랙에 대해서 자세히 살펴보면, 저배율의 관측시 날개크랙은 그림 2에서와 같이 단일의 연속적인 크랙의 진전으로 관측되었다. 하지만 고배율의 관측에서는 다중의 크랙이 그림 3과 같이 관측되었으며 이러한 크랙을 미소인장크랙이라고 칭하기로 한다. 이러한 관측결과는 Zhao 등(1993)의 관측결과와 유사한 형태로



(a) 반사전자이미지 (BEI, Backscattered Electrons Image)



(b) 이차전자이미지 (SEI, Secondary Electrons Image)

그림 1. 하중을 가하지 않은 상태에서의 석고 실험체

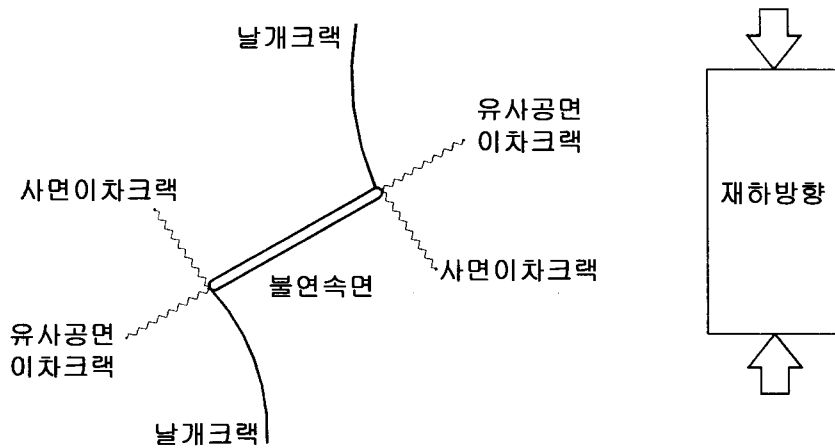


그림 2. 일축압축조건의 석고 실험체내에서 관측된 크랙의 형태

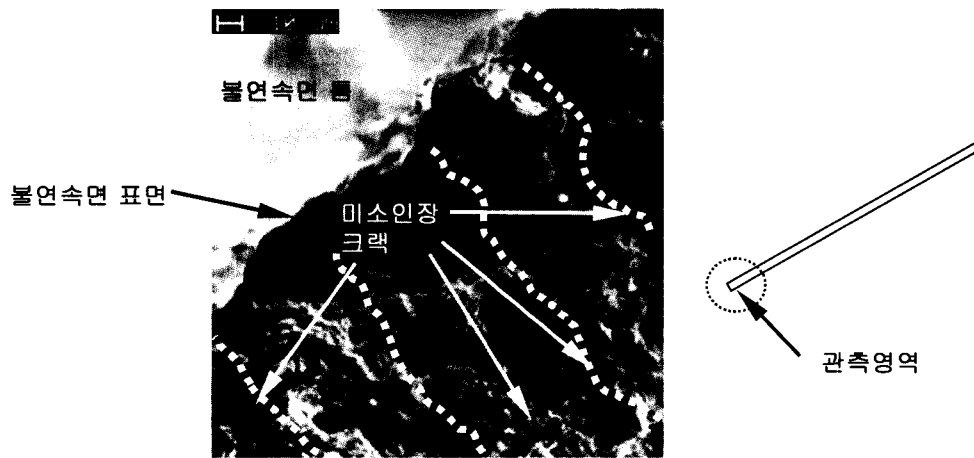


그림 3. 날개크랙 개시점에서의 미소인장크랙

서 날개크랙의 개시부가 크랙의 선단부에 비해 보다 많은 손상이 발생함을 보여주고 있다.

그림 4의 날개크랙은 일정길이 이상 진전된 상태에서 크랙의 선단부 근처에서 관측된 것으로서 날개크랙을 구성하는 미소인장크랙은 공극간의 연결을 통하여 진행되며 분지(branching)현상을 보이기도 한다. 분지현상은 이방성의 재료, 예를 들어서 콘크리트와 같은 재료에서 주로 관측된다(Van Mier(1997)). 여기서 주목할 만한 사항은 미소인장크랙의 진행으로 인하여 공극의 할렬(splitting)이 관측되었으며 석고입자의 분리나 회전등은 전혀 관측되지 않았다는 점이다. 이러한 점은 이차크랙과 구별되는 특징으로서 날개크랙이 인장에 의해서 생성되고 있음을 나타내는 증거이다. 날개크랙은 선단부로 갈수록 그 틈은 점점 더 좁아지며 크랙의 진행 또한 불규칙해 진다.

새로운 크랙의 개시는 불연속면 선단부에서 손상(damage)과 더불어 파괴진행구간(FPZ, Fracture Process

Zone)의 형성을 수반하게 된다. 그림 4의 경우를 살펴보면 날개크랙의 진행으로 인해서 관측되는 파괴진행구간은 다른 암석에 비해 상당히 작다. Labuz 등(1987)에 의하면 파괴진행구간의 크기는 암석을 구성하는 입자

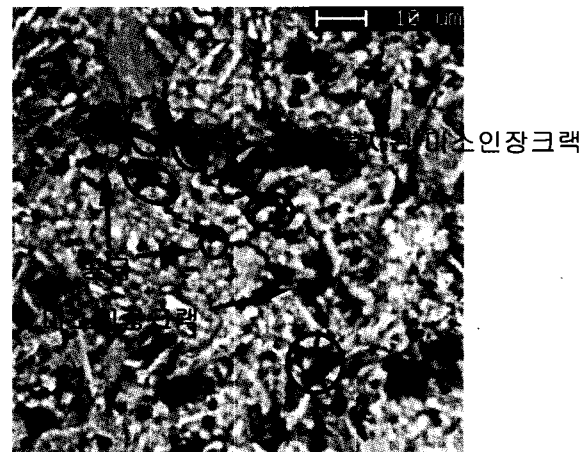


그림 4. 날개크랙의 선단부에서 관측된 미소인장크랙 (연결 및 분지)

의 크기에 영향을 받는 것으로 관측되었다. 따라서 암석의 종류에 따라서 파괴진행구간의 크기는 다를 것으로 예측된다. Labuz 등(1987)에 의하면 화강암의 경우 파괴진행구간의 크기는 40mm에서 90mm로 관측되었다. 그림 4에 의하면 날개크랙의 진행으로 인해 관측되는 파괴진행구간은 미소인장크랙이 분지되면서 진행되는 구간으로 볼 수 있으므로 대략  $10\mu\text{m}$ 에서  $20\mu\text{m}$ 를 날개크랙의 파괴진행구간의 폭으로 간주 할 수 있다.

### 3.3 이차크랙

다중의 불연속면들이 날개크랙과 이차크랙에 의하여 연결될 경우 관측되는 이차크랙의 종류로서는 유사공면이차크랙과 사면이차크랙이 있다(Sagong과 Bobet (2002)). 유사공면이차크랙의 경우 진행방향이 선존하는 불연속면의 방향과 유사하나 사면이차크랙은 불연속면과 일정한 각도를 유지한 상태에서 진행하며 진행방향은 날개크랙과 반대 방향이다. 대부분의 이차크랙의 개시는 불연속면의 선단부에서 관측되었으며 타 불연속면과의 연결이 없는 한 이차크랙의 진전은 개시점 근처로 제한되었다. 그림 5는 유사공면이차크랙의 진행을 나타내고 있으며 날개크랙과 다른 특징을 보이고 있다.

날개크랙 내에서 미소인장크랙이 발견된 것과 유사하게 이차크랙 내에서는 미소파쇄대(microfault)가 관측되었다. 미소파쇄대란 미소인장크랙과 달리 진행하는 크랙의 틈이 불규칙하며 아래에서 기술될 복잡한 파괴양상을 나타내는 크랙의 형태로 정의한다. 그림 5를 살펴보면 이차크랙의 진행과 날개크랙의 진행상에는 큰 차이를 보이고 있는데 가장 두드러진 차이중의 하나는

공극의 압축 파괴이다. 미소파쇄대의 진전은 석고내에 존재하는 공극을 압축 및 전단 파괴시키며 공극 주변부의 파괴로 인하여 주변부의 석고입자의 분리를 유발한다. 이러한 상태는 그림 6의 개념도에서 확인할 수 있다. 그림 6은 그림 5에서 나타난 공극의 압축 파괴를 재현한 스케치이다. 그림 6에서 확인되는 바와 같이 날개크랙과 달리 이차크랙의 발생영역에서는 압축이 주변에 작용하게 되므로 분리된 입자는 이차크랙의 진행 구간내에서 존재하게 된다. 또한 관측된 손상영역은 날개크랙에 비하여 상대적으로 넓은 것으로 관측되었다. 그림 5에서 손상이 발생한 폭은 약  $100\mu\text{m}$ 에서  $200\mu\text{m}$  정도로서 이러한 폭은 날개크랙의 10배에 해당한다. 이러한 결과는 이차크랙의 진행은 구속압이 작용하는 곳에서 발생하기 때문에 이차크랙 주변의 손상영역은 날개크랙에 비하여 더욱 넓은 것으로 판단된다.

그림 5는 두개의 불연속면을 가진 실험체에 하중을 가하여 이차크랙이 개시점 부근까지 진행한 후 제하한 상태에서 관측한 것이다. 제하로 인하여 불연속면간의 연결(coalescence)은 이루어지지 않았으며 발생된 전단 변형은 전체 실험체의 전지에서 미미하다고 할 수 있다. 이러한 모습은 초기 이차크랙의 발생 형태를 보여주고 있으나 실제 이차크랙이 진행되어 불연속면간의 연결이 발생할 경우의 파괴진행 메커니즘이 그림 5에서 관측된 메커니즘과 동일할 것인지는 확실하지 않다. 이 같은 의문점에 대한 해답은 그림 7에서 확인 할 수가 있다.

유사공면이차크랙이 상당히 진행되며 표면분락이 발생한 경우는 과도한 전단변위가 발생한 상태로서 이러한 경우 유사공면이차크랙의 표면은 그림 7과 같다. 그림 7(a)에서 유사공면이차크랙은 대각선 방향으로 진행

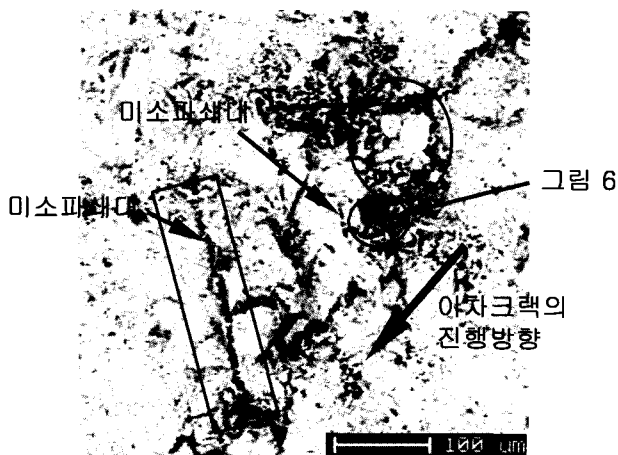


그림 5. 유사공면이차크랙 진행 양상

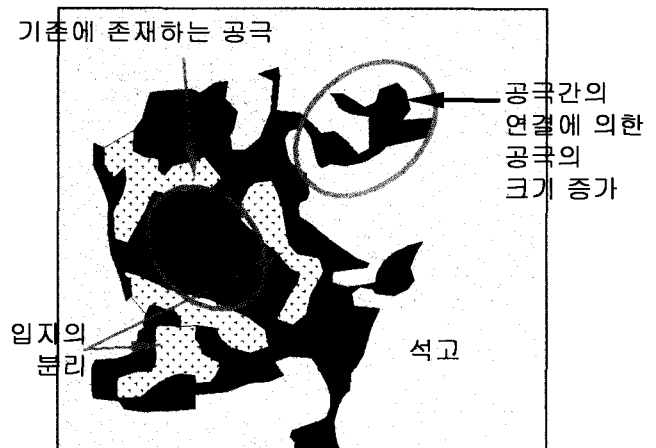
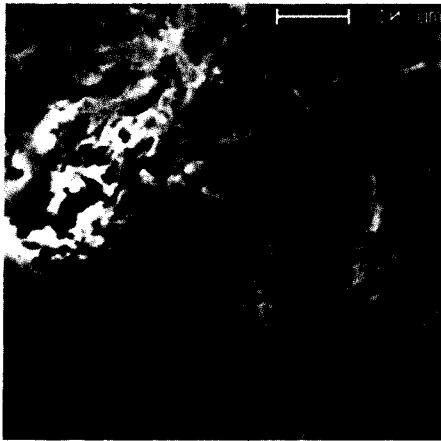
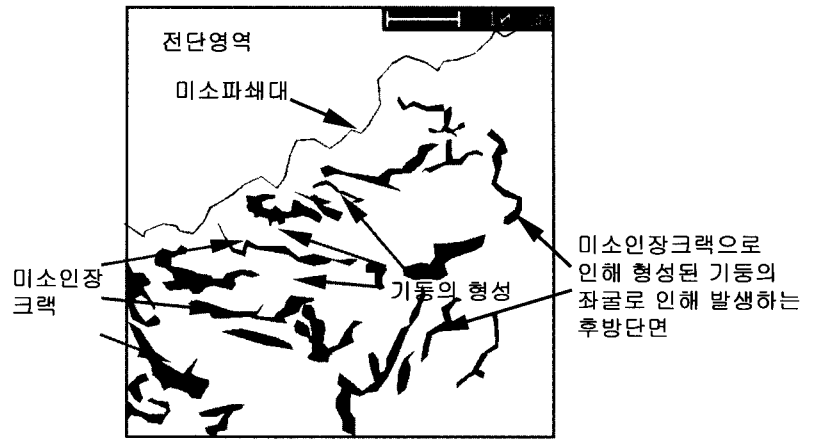


그림 6. 공극의 파괴 및 입자의 분리를 나타내는 미소파쇄대의 개략도



(a) 과도한 전단으로 인한 유사공면이차크랙 및 미소인장크랙의 생성



(b) 그림 (a)의 개략도

그림 7. 유사공면이차크랙 주변부내의 미소인장크랙

된 상태이며 이에 일정한 각을 이룬 방향으로 인장크랙이 발달되어 있음을 관측할 수 있다. 이러한 모습은 그림 7(b)에서 개략적인 스케치로 나타내고 있다. 또한 이것은 그림 5에서 관측되었던 압축 및 전단에 의한 공극의 파괴와는 또 다른 형상이다. 인장크랙의 발달에 의한 전단파괴는 Peng과 Johnson(1972)에 의한 삼축압축실험에서도 관측된 바 있다. 그림 5와 그림 7의 차이는 두 그림에 대한 관측시점과 지점이 다르므로 인해 발생하는 것으로 판단된다. 그림 5는 미소 전단변형이 발생된 상태이며 관측지점은 이차크랙의 진행 중심부이다. 따라서 충분한 구속력이 작용하는 상태일 것이다. 이에 반해 그림 7은 이차크랙이 충분히 발생된 상태이며 관측부는 이차크랙의 진행중심부에서 떨어진 주변부이다. 따라서 작용되는 구속압은 크랙의 중심부에 비해 다소 적을 것으로 예측된다.

그림 7에서 관측된 인장크랙은 석고입자의 경계면을 따라 발생하며 이러한 인장크랙은 짧은 기둥을 형성한다. 부분적으로 형성된 기둥은 전단에 의해서 좌굴되는 양상을 보이며 최종적으로는 불규칙한 후방단면을 형성한다. 이러한 결과는 이차크랙의 표면은 모가 난 입자로 구성되는 파괴면으로 형성될 것으로 예측되며 이것은 이차크랙의 파괴면에 대한 관측에서 확인 될 수 있다.

#### 4. 파괴면에 대한 관측

본 절은 실험시편의 파괴면에 대한 기술로서 그림 8과 9는 날개크랙의 불규칙한 파괴면과 진행 양상을 나타내고 있다. 그림 8에서는 날개크랙의 표면에서 다종의 불규칙한 홈이 관측되고 있다. 이와같이 불규칙한 파괴면이 발생하는 이유는 그림 9에서 관측할 수 있듯이 날

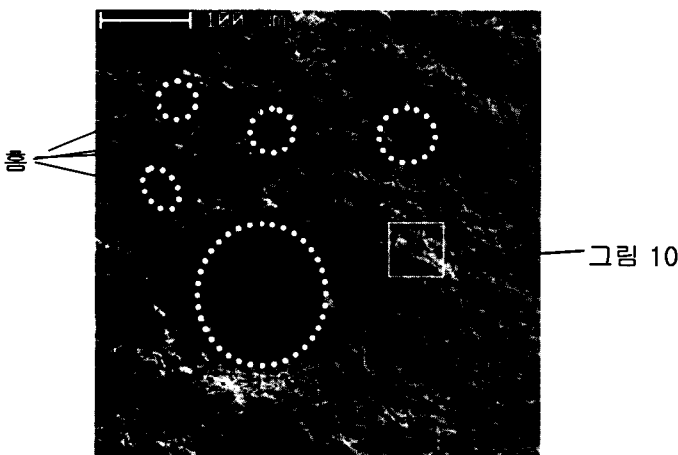


그림 8. 날개크랙의 파괴면

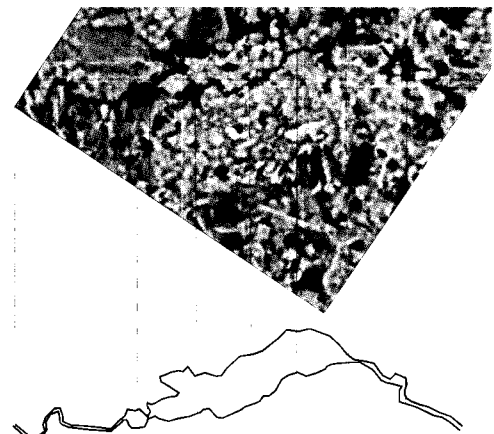


그림 9. 불규칙한 날개크랙의 진행



그림 10. 입자의 경계면 및 입자를 통과한 진행을 보이는 날개크랙의 표면

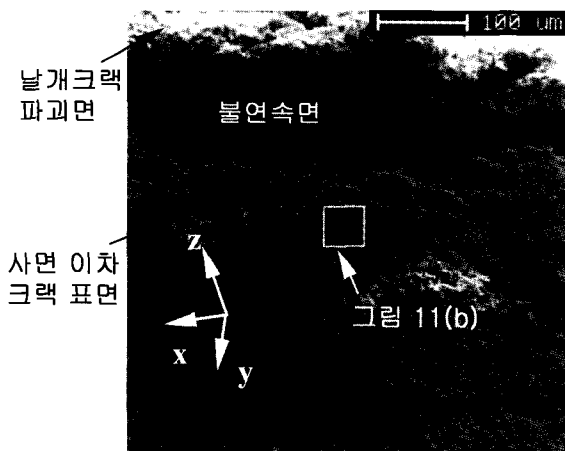
개크랙의 진행은 공극간의 연결 및 분지현상을 통해서 진행되므로 날개크랙의 표면이 다소 불규칙하게 나타나는 것으로 판단된다. 결국 날개크랙의 표면은 선존하는 공극의 크기와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

그림 10은 그림 8의 한 부분을 확대하여 나타낸 것이다. 그림 10에서 관측되듯이 날개크랙 표면에는 손상되지 않은 입자와 손상된 입자가 공존해 있다. 이러한 결론은 날개크랙의 진행이 공극간의 연결 및 분지현상에 의해서 진행되는 과정에서 입자의 표면을 따라 그리고 입자를 통과하면서 진행되는 것임을 나타낸다.

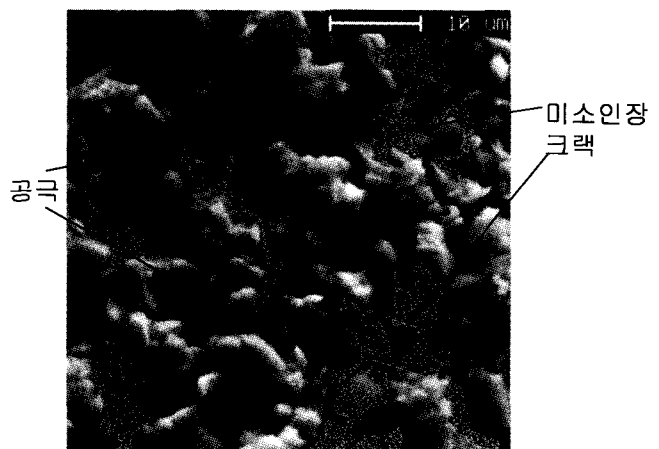
그림 11은 사면이차크랙의 파괴면을 나타낸 것으로서 그림 11(a)의 상단에서 보이는 날개크랙의 표면과 사면이차크랙의 표면이 서로 다름을 알 수 있다. 사면이차크랙의 경우 그림 11(a)에서 모가 난 작은 입자들이 사면이차크랙의 표면을 형성하고 있음을 알 수 있다. 이

러한 점은 그림 11(b)에서도 확인 할 수 있는데 이 같은 형상은 그림 7에서 언급한 바와 같이 전단으로 인해 생성된 짧은 기둥들이 좌굴 후 후단부에서 연결면을 생성하며 연결된 부분은 불규칙한 단면으로 남게 됨을 나타내고 있다.

그림 11(b)에서는 사면이차크랙의 표면에서 공극과 공극을 연결하는 미소인장크랙이 발견되었다. 이러한 관측은 그림 11(a)에서 x 방향으로의 인장에 의해서만 발생 가능 한 것으로서 x 방향은 실험체의 두께 방향이다 이외 y 방향은 사면이차크랙의 진행 방향이며 z 방향은 사면이차크랙 표면에 수직한 방향이다. 일축압축실험 중 이차크랙의 진행의 법선방향 즉 그림 11(a)에서 z 방향으로의 들뜸(dilation)이 관측된 바 있다. 이러한 들뜸현상은 절리면의 전단시 일반적으로 관측되는 현상이다. 하지만 그림 11(b)에서 보여지는 미소인장크랙은 사면이차크랙의 진행방향(y)과 직각인 방향(x)으로의 들뜸 현상의 가능성을 제시하고 있다. 결론적으로 불연속면을 가진 실험체의 일축압축실험에서 세가지 서로 다른 파괴모드가 관측된 것으로 사료된다. 예를 들면 날개크랙의 경우 인장모드 (Mode I), 이차크랙의 경우 평면내 전단모드 (Mode II), 그리고 그림 11(b)에서 보여진 사면이차크랙상의 미소인장크랙은 평면을 벗어나는 전단모드 (Mode III)이다. 이러한 관측이 단순 전단이 한 방향이 아닌 양방향으로의 들뜸현상을 보이는 과정인지에 대해서는 보다 체계적이고 자세한 연구가 뒤따라야 할 것이다. 결론적으로 실험체의 표면과 크랙의 파괴면을 관측한 바에 의하면 날개크랙과 이차크랙은 각각 인장과 전단에 의해 생성됨을 알 수 있다.



(a) 사면이차크랙의 표면



(b) 사면이차크랙의 표면 (고배율)

그림 11. 사면이차크랙의 파괴면

## 5. 결론

본 연구에서는 불연속면간의 연결을 유도하는 날개크랙과 이차크랙의 파괴 시편에 대한 관측을 수행하였으며 관측 결과 두 크랙의 생성 및 진행은 큰 차이를 보이며 관측된 특징은 다음과 같다.

- (1) 크랙의 진행에 따라 수반되는 손상영역의 폭은 크랙의 종류에 따라 다르게 관측되었다. 석고의 경우 날개크랙의 진행방향에 수직인 방향으로 측정된 손상영역의 폭은 약  $10\mu\text{m}$ 에서  $20\mu\text{m}$  정도이며 이차크랙의 경우  $100\mu\text{m}$ 에서  $200\mu\text{m}$ 의 범위이다.
- (2) 날개크랙의 경우 거시적인 측면에서 관찰된 바와 달리 날개크랙의 개시점에서는 한개의 크랙이 아닌 다중의 미소인장크랙이 관측되었으며 관측된 미소인장크랙은 분지현상과 공극간의 연결을 통하여 진전한다.
- (3) 날개크랙의 파괴면을 살펴보면 크랙의 진행이 입자의 경계와 입자내의 파괴를 유발하면서 발생함을 알 수 있다. 날개크랙의 표면은 불규칙하며 다양한 크기의 홈이 존재하는데 이러한 홈의 생성은 선존하는 다양한 크기의 공극과 그것들의 할렬파괴로 인해 발생 하는 것이며 날개크랙의 불규칙한 단면은 미소인장크랙의 분지 및 공극간의 연결에 의한 것이다. 따라서 날개크랙은 인장크랙이라 할 수 있다.
- (4) 이차크랙의 진행은 미소파쇄대를 형성하며 미소파쇄대 내에서는 공극의 파괴, 공극 주변부에서 입자의 분리가 관측되었다. 분리된 입자는 이차크랙의 진행구간 내에 위치해 있으며 파괴된 공극은 인접해 있는 공극간의 연결을 통하여 미소파쇄대의 진행을 보인다.
- (5) 이차크랙이 상당히 진행된 구간에서는 전단방향과 일정한 각을 이루는 방향으로 미소인장크랙의 발달이 관측되었으며 발달한 미소인장크랙은 다중의 짧은 기둥을 생성하였다. 생성된 기둥은 과도한 전단으로 인해 좌굴되면서 불규칙한 표면의 후방단면을 생성한다. 이러한 불규칙한 면은 불규칙한 이차크랙의 표면을 생성한다.
- (6) 사면이차크랙의 표면을 관측한 결과 사면이차크랙의 진행과 동일한 방향으로 미소인장크랙이 발견되었으며 이러한 관측은 일축압축 상태에서 불연속면을 가진 암석의 파괴는 세가지 다른 모드(Mode I,

II, III)의 파괴 양상을 나타낼 수도 있는 것으로 판단된다. 하지만 이에 대한 보다 체계적인 관측이 필요한 사항이다. 이상의 관측을 통해서 이차크랙은 전단에 의해서 발생하는 크랙임을 알 수 있다.

암반에서 발생 가능한 두 가지 형태의 크랙에 대한 미시적 관측을 하였으며 본 연구결과는 날개크랙 및 이차크랙의 생성을 밝힘으로서 향후 전산해석 등을 통하여 날개크랙 및 이차크랙의 생성에 대한 파괴규준을 정립하는데 이용이 될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. Barquins, M. and Petit, J. -P.(1992), "Kinetic Instabilities During the Propagation of a Branch Crack: Effects of Loading Conditions and Internal Pressure", *Journal of Structural Geology*, Vol.14(8/9), pp.893-903.
2. Bobet, A.(2000), "The Initiation of Secondary Cracks In Compression", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.66(2), pp. 187-219.
3. Brace, W. F. and Bombolakis, E. G.(1963), "A Note on Brittle Crack Growth in Compression", *Journal of Geophysical Research*, Vol.68(2), pp.3709-3480.
4. Einstein, H. H., Veneziano, D., Baecher, G. B. and O'Reilly, K. J.(1993), "The Effect of Discontinuity Persistence on Rock Slope Stability", *International Journal of Rock mechanics and Mining Science*, Vol.20(5), pp.227-236.
5. Goodman, R. E. and Kieffer, D. S.(2000), "Behavior of Rock in Slopes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, Vol.126(8), pp.675-684.
6. Hoek, S. and Bieniawski, Z.T.(1984), "Brittle Fracture Propagation in Rock Under Compression", *International Journal of Fracture*, Vol.26 pp.276-294.
7. Labuz, J. F., Shah, S. P. and Dowding, C. H.(1987), "The Fracture Process Zone in Granite: Evidence and Effect", *International Journal of Rock mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract*, Vol.24, No.4, pp.235-246.
8. Lajtai, E.Z.(1974), "Brittle Fracture in Compression", *International Journal of Fracture*, Vol.10, No.4, pp.525-536.
9. Peng, S. and Johnson, A. M.(1972), "Crack Growth and Faulting in Cylindrical Specimens of Chelmsford Granite", *International Journal of Rock mechanics and Mining Science*, Vol.9, pp.37-86.
10. Sagong, M. and Bobet, A.(2002), "Coalescence of Multiple Flaws in a Rock-Model Material in Uniaxial Compression", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 39, pp.229-241.
11. Van Mier, J. G. M.(1997), *Fracture Processes of Concrete: Assessment of Material Parameters for Fracture Models*. CRC Press, USA.
12. Zhao, Y., Huang, J. and Wang, R.(1993), "Real-time SEM Observations of the Microfracturing Process in Rock During a Compression Test", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract*, Vol.30, No.6, pp.643-652.

(접수일자 2002. 12. 18, 심사완료일 2003. 3. 30)