

## 화강암에 대한 워터젯 파쇄 메커니즘에 관한 연구

### A Study on Waterjet Fracture Mechanism for Granitic Rocks

오태민<sup>1)</sup>, Tae-Min Oh, 조계춘<sup>2)</sup>, Gye-Chun Cho

<sup>1)</sup> 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.

<sup>2)</sup> 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology.

**SYNOPSIS** : Waterjet is a very useful technology for rock excavation because of low level noise and vibration during breaking rocks. To accurately predict the volume and shape excavated by the waterjet, it is important to understand waterjet fracture mechanisms. There have been various theoretical assumptions and approaches in the literature. In this study, waterjet mechanisms are classified into three standards: a mechanism scale, theoretical assumption for a target material, and jet phase. In addition, through a waterjet experimental study for weathered and intact granitic rocks, a fracture shape is observed and analyzed on comparison with the previous mechanisms. As a result, best waterjet mechanisms are selected to explain the fracture pattern of the granitic rocks.

**Keywords** : Waterjet, Fracture mechanism, Weathered rock, Intact rock, Crack

## 1. 서론

워터젯을 이용한 취성재료의 절삭이나 천공은 세라믹의 정밀가공부터 암석에서의 대량 파쇄까지 다양한 응용이 가능하다. 도심지에서 워터젯 암반파쇄는 기존의 지반굴착공법보다 소음과 진동레벨이 낮고 물을 이용한 친환경공법이 가능하기 때문에 민원저감형 공법으로 활용될 수 있다. 지반굴착 활용시 정확한 파쇄량과 파쇄형태를 예측하기 위해서는 국내 실정에 맞는 워터젯 파쇄 메커니즘 연구는 필수적이다. 본 연구에서는 워터젯 천공 메커니즘을 기본으로 하여 수압과 연마제에 의한 파쇄를 설명하였다. 워터젯 천공 메커니즘은 젯(jet)의 구성물질과 대상재료의 성질에 따라 다르게 해석된다. 기본적인 워터젯 천공 메커니즘은 고압의 물이 작은구멍의 오리피스를 통하여 분사시키고 고속의 수류가 발생하는 것에서 시작된다. 모래와 같이 입자로 구성된 물질에서는 수류에 의해 내부공극에 압력이 발생되어 입자가 떨어져 나가게 된다(Crow, 1973; Rehbinder, 1976). 반면에, 암석과 같이 입자의 결합력이 강한 재료의 경우에는 물에서 가속된 연마제의 직접적 타격으로 대상물질 표면에 미소크랙의 발생과 전파로 파쇄된다(Sheldon and Finnie, 1966; Evans et al., 1978; Ritter, 1985). 본 연구에서는 국내 화강 풍화암과 신선암을 대상으로 워터젯 천공실험을 실시하여 절리의 유무에 따라 천공 파쇄형상을 관찰하였다. 또한 기존에 연구된 다양한 메커니즘을 비교 분석하여, 문헌연구와 실험결과를 바탕으로 국내 암석특성에 가장 적합한 워터젯 천공 메커니즘을 고찰하고자 한다.

## 2. 워터젯 파쇄 메커니즘 분류

### 2.1 메커니즘 분류기준

메커니즘을 분석하기 위해 기존에 연구된 다양한 워터젯 파쇄 모델들을 아래의 기준으로 분류하였다.

- 메커니즘 발생 스케일
- 워터젯 상(phase) 상태
- 대상재료의 가정상태

워터젯을 이용한 파쇄는 힘을 가하는 젯(jet)부분과 파쇄대상인 암석으로 나누어 생각할 수 있다. 본 연구에서는 먼저 전체적인 메커니즘의 발생 스케일을 고려하여 분류하고, 가해지는 물질의 상태(jet phase)와 대상물질의 상태를 기준으로 분류하였다.

표 1. 워터젯 파쇄 메커니즘의 분류

| Model name                  | Mechanism scale | Theoretical assumption for target material           | Jet phase | Ref.  |
|-----------------------------|-----------------|--|-----------|---|
| Conical crack model         | Micro mechanism | Compressive stress distribution (consider intact)    | 2 phases  | Sheldon and Finnie, 1966  |
| Lateral crack model         | Micro mechanism | Compressive stress distribution (consider intact)    | 2 phases  | Evans et al., 1978<br>Wiederhorn and Ruff, 1979                 |
| Intergranular crack model   | Micro mechanism | Crack extension to the joint parts (consider cracks) | 2 phases  | Ritter, 1985  |
| Mixed damage model          | Micro mechanism | Crack extension to the joint parts (consider cracks) | 2 phases  | Zeng and Kim, 1996  |
| Step formation model        | Macro mechanism | Compressive stress distribution (consider intact)    | 2 phases  | Hashish,1984<br>Paul et al., 1998<br>Momber and Kovacevic, 1998 |
| Two-stage impact zone model | Macro mechanism | Compressive stress distribution (consider intact)    | 2 phases  | Zeng and Kim, 1992  |
| Powell and Simpson's model  | Macro mechanism | Compressive stress distribution (consider intact)    | 1 phase   | Powell and Simpson, 1969  |
| Foreman and Secor's model   | Macro mechanism | Crack extension to the joint parts (consider cracks) | 1 phase   | Foreman and Secor, 1973   |
| Crow's model                | Micro mechanism | Crack extension to the joint parts (consider cracks) | 1 phase   | Crow, 1973  |
| Rehbinder's model           | Micro mechanism | Crack extension to the joint parts (consider cracks) | 1 phase   | Rehbinder, 1976   |

## 2.2 메커니즘 분류

워터젯 메커니즘 스케일은 워터젯에 의한 입자의 이탈과 미소크랙의 발생을 중심으로 하는 micro-scale 메커니즘과 cm단위의 수준에서 파쇄형태와 원인을 설명하는 macro-scale 메커니즘으로 나누어 설명할 수 있다. 일반적으로 micro-scale 메커니즘은 미소크랙의 발생과 전파로 파쇄를 설명하는 반면에, macro-scale 메커니즘은 직접충격을 받아 파쇄되는 부분과 간접충격을 받은 부분으로 나누어 파쇄를 설명한다.

워터젯 상(phase) 상태의 경우, 젯(jet)이 순수 워터젯과 같이 액체상태만 고려되는 하나의 상(phase)인지, 액체와 고체입자(연마제)를 고려한 두개의 상(phase) 상태인가는 파쇄메커니즘을 설명하는데 매우 중요한 요인이다. 왜냐하면 하나의 상(phase)에서는 순수 물입자에 의한 파쇄가 일어나지만, 두개의 상(phase)에서는 고압 수류에 의한 가속이 붙은 연마제 입자에 의한 파쇄가 지배적이기 때문이다. 일반적으로 상(phase) 상태가 증가하면 워터젯 파쇄력이 증가하는 것으로 알려져 있다(Summers, 1995).

대상재료의 이론적 가정상태는 크게 대상물질의 미소크랙 존재유무에 따라 나눌 수 있다. 미소크랙의 가정은 워터젯 파쇄시 크랙의 확장과 전파에 의해 파쇄가 설명될 수 있다. 반면에 크랙을 가정하지 않는 경우, 워터젯에 의해 대상재료 내에서 압축 탄성과 전파에 의한 파쇄로 설명된다. 메커니즘 발생 스케일, 워터젯의 상(phase) 상태, 그리고 대상물질의 이론적 가정상태에 따라 분류한 결과는 표 1과 같다.

## 3. 워터젯 파쇄 메커니즘 비교 분석

### 3.1 실내실험 결과분석

#### 3.1.1 실험 방법

국내에 적합한 메커니즘을 선정하기 위해서 화강 풍화암(weathered rock)과 신선암(intact rock)을 대상으로 워터젯 천공실험을 실시하였다. 워터젯 천공실험을 위해 토출압력은 약 240MPa로 하고 젯(jet) 노출시간은 30초로 하였다. 연마제는 입자크기가 0.3mm이하이고 강도가 강한 석류석을 사용하였다. 워터젯 천공중 파쇄 형상을 관찰함으로써 절리가 발달된 풍화암에서의 파쇄메커니즘과 신선암(일축압축강도: 100MPa)에서의 파쇄 메커니즘을 비교 분석하였다.

#### 3.1.2 실험 결과 및 분석

화강암과 같은 취성재료는 기존에 존재하는 미소 크랙에서 파괴가 발생한다고 알려져 있다. Foreman and Secor(1973)은 표면의 미소 크랙에서 절리가 발달함을 실험적으로 확인하였다. 미소크랙이 워터젯 파쇄 메커니즘에서 중요한 요인이 되기 때문에, 취성재료에서 크랙의 발생과 확장은 2가지 경우로 나누어 생각할 수 있다. 먼저 풍화암과 같이 절리가 발달한 물질의 경우, 그림 1과 같이 연마제 충격에 의한 효과보다는 수압이 절리의 내벽에 작용함으로 파쇄가 일어남을 확인 할 수 있었다. 실험결과 풍화암의 파쇄범위는 천공 목표지역에서 벗어나 절리를 따라 파쇄되는 패턴을 보였다. 워터젯에서 수압에 의한 파괴는 Griffith theory에 의해 절리의 확장으로 해석 가능하다(Powell and Simpson, 1969; Foreman and Secor, 1973).

화강 신선암의 경우 파쇄범위는 천공 목표지역에서 벗어나지 않고 원뿔형으로 파쇄가 일어남을 확인하였다. 관찰결과, 파쇄된 천공부분 주위에서 추가적인 크랙은 발견되지 않고 천공 내부의 표면은 매끈하게 연마되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 수압에 의한 효과보다는 연마제의 연속적인 충격에 의해 표면부터 파쇄가 일어남을 보여준다(그림 2 참조).



그림 1. 풍화암 파쇄형태

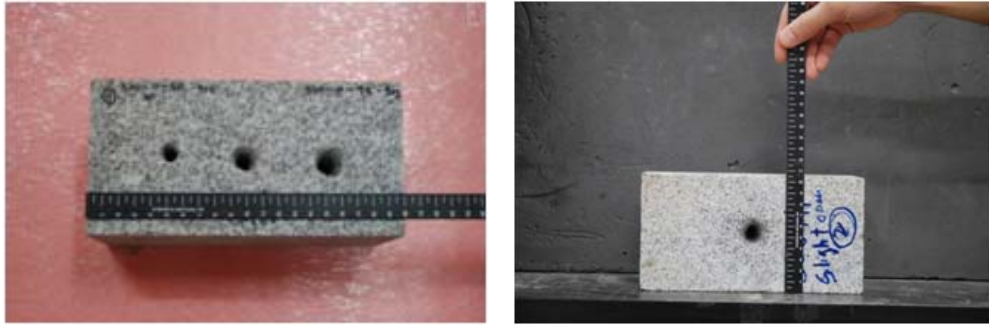


그림 2. 신선암 파쇄형태

### 3.2 메커니즘 비교 분석

워터젯 파쇄 메커니즘은 크게 4가지로 요약할 수 있다. 수압에 의한 입자 이탈로 설명되는 Granular escape mechanism, 수압에 의해 응력이 전파되고 크랙이 확장되어 파괴가 일어나는 Crack extension mechanism, 연마제의 충격에 의해 크랙이 발생되고 micro-scale에서 파괴가 일어나는 Crack propagation mechanism, 그리고 macro-scale에서 연마제의 충격을 직접과 간접적 파쇄로 나누어 설명하는 Step formation mechanism이 있다. 각각의 메커니즘에 따른 워터젯 파쇄모델들의 분류와 비교는 표 2에 정리되어 있다.

표 2. 워터젯 파쇄 메커니즘의 비교

|                 | By fluid force   | By abrasive attack   |
|-----------------|--|--|
| Micro mechanism | <b>Granular Escape Mechanism</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Crow's model</li> <li>▪ Rehbider's model</li> </ul>                        | <b>Crack Propagation Mechanism</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Conical crack model</li> <li>▪ Lateral crack model</li> <li>▪ Intergranular crack model</li> <li>▪ Mixed damage model</li> </ul> |
| Macro mechanism | <b>Crack Extension Mechanism</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Powell and Simpson's model</li> <li>▪ Foreman and Secor's model</li> </ul> | <b>Step Formation Mechanism</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Step formation model</li> <li>▪ Two stage impact zone model</li> </ul>  |

화강 풍화암 파쇄 분석결과, 기존의 미소크랙을 따라 큰 절리가 발달함을 확인하였다. 이것은 연마제 효과보다는 워터젯 수압이 크랙에 작용되어 확장되는 Crack extension mechanism이 파쇄 메커니즘으로 적합하다는 것을 보여준다. 수압에 의한 크랙의 확장은 Powell and simpson(1969)이 제시한 모델과 Foreman and Secor(1973)이 제시한 모델이 있다. 특히 Foreman and Secor(1973)은 Powell and simpson(1969)이 워터젯 응력전파 이론을 바탕으로 내부 공극수압 증가에 의한 크랙 확장을 반영하였기 때문에 공극이 큰 암석에서 적용 가능할 것으로 판단되어 진다.

화강 신선암 파쇄 분석결과, 워터젯 수압에 의한 주변의 추가적인 크랙의 확장은 관찰되지 않았다. 다만 천공 목표지역 내에서만 파쇄가 일어난 것을 확인하였다. 이것은 연마제 충격에 의한 취성재료 파괴를 보여 준다. 연마제에 의한 파쇄 메커니즘 중 Step formation mechanism은 주로 노즐이 이동하는 절삭의 경우 적용이 가능하다. 왜냐하면 간접충격은 노즐이 이동하면서 연마제의 입사각이 굴절되어 일어나기 때문이다. 신선한 화강암의 경우 연마제에 의한 Crack formation mechanism이 적합하다고 판단된다. 고체입자의 충격에 의한 크랙 형상은 conical crack, lateral crack, 그리고 intergranular crack으로 고려될 수 있다. 워터젯이 두 개의 상(phase)이상인 경우, 크랙의 생성과 발달은 하나의 메커니즘으로 국한되어 있지 않기 때문에 복합적인 크랙 형상을 고려하여야 하겠다(Zeng and Kim, 1996).

#### 4. 결론

워터젯 파쇄 메커니즘을 메커니즘 발생 스케일, 워터젯 상(phase) 상태, 그리고 대상재료의 이론적 가정상태를 기준으로 분류하고 분석하였다. 기존 메커니즘 분석결과와 실내 워터젯 천공 파쇄형태를 관찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 워터젯 파쇄 메커니즘은 크게 Granular escape mechanism, Crack extension mechanism, Crack propagation, 그리고 Step formation mechanism으로 정의될 수 있다.
- (2) 풍화암의 워터젯 천공파쇄 메커니즘은 Crack extension mechanism을 따르는 것으로 판단된다.
- (3) 신선암의 워터젯 천공파쇄 메커니즘은 Crack propagation mechanism을 따르는 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 07첨단도시개발사업(과제번호:07 도시재생B03)의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. Crow, S. C.(1973), "A theory of hydraulic rock cutting", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.10, pp.567-584.
2. Evans, A. G., Gulden W. E., and Rosenblatt, M.(1978), "Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime", *Proc. R. Soc. London. Series. A.* Vol.361, No.1706, pp.343-365.
3. Foreman, S. E. and Secor, G. A. (1973) "The mechanics of rock failure due to water jet impact", *Proc. 6th Conf. on Drilling and Rock Mech.*, Society of Petroleum Engineers, Austin, SPE 4247.
4. Hashish, M.(1984), "A modelling study of metal cutting with abrasive waterjets", *J. Eng. Mater. Technol.*, Vol.106, pp.88-100.
5. Momber, A. W. and Kovacevic, R.(1998), *Principles of Abrasive Water Jet Machining*, Springer-Verlag, London.
6. Paul, S., Hoogstrate, A. M., van Luttervelt, C. A., and Kales, J. J.(1998), "Energy partitioning in elasto-plastic impact by sharp abrasive particles in the abrasive water jet machining of brittle

- materials", *J. Mater. Proc. Technol.*, Vol.73, pp.200-205.
7. Powell, J. H. and Simpson, S. P.(1969) "Theoretical study of the mechanical effects of jets impinging on a semi-infinite elastic solid", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.6 pp.353-364.
  8. Rehbinder, G.(1976), "Some aspects of the mechanism of erosion of rock with a high speed water jet", *Proc. 3rd Int. Conf. Jet Cutting Technol.*, Chicago, paper E1, pp.11-20.
  9. Ritter, J. E.(1985), "Erosion damage in structural ceramics", *Mater. Sci. Eng.*, Vol.71, pp.195-201.
  10. Sheldon, G. L. and Finnie, I.(1966), "The mechanism of material removal in the erosion cutting brittle material", *Wear*, Vol.66, pp.393-400.
  11. Summers, D. A.(1995), *Waterjetting Technology*, Chapman & Hall, London.
  12. Wiederhorn, S. M. and Ruff, A. W.(1979), "Erosion by solid particle impact", *Treatise on Material Science and Technology*, Vol.16, pp.69.
  13. Zeng, J. and Kim, T. J.(1992), "Development of abrasive waterjet kerf cutting model for brittle materials", *Proc. 11th Int. Conf. Jet Cutting Technol.*, St. Andrews, pp483-501.
  14. Zeng, J. and Kim, T.(1996), "An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting", *Wear*, Vol.193, pp.207-217.