

## 신선한 화강암 절리면에서 약액에 의한 전단강도의 변화에 대한 연구

A Study on the Effects of Chemical Grout  
on the Shear Strength of Fresh Granite Joints

鄭 亨 植\* · 李 承 浩\*\*  
Chung, Hyung Sik · Lee, Seung Ho

### Abstract

This study was aimed to see the effect of chemical grout on fresh granite joint shear strength. The grouting chemical used in this study was composed of 25% water glass. Direct shear tests were performed on the chemical filled joints, which had been made artificially with granite. The test results show that chemical grouted rock joints have markedly reduced shear strength comparing with the ungrouted fresh joints and they sheared within chemical grout before the rock to rock contact had been established, while the ungrouted joint sheared between rock surfaces from the beginning of shear deformation.

With chemical grouted joints the shear stress slowly reached its maximum without showing distinct peak shear strength.

Therefore the shear stiffness of joints were decreased with increasing thickness of grout, but the shear strain at failure was increased with it.

### 要 旨

신선한 화강암의 절리면에 물유리계 용액형 약액이 충전되었을 때 이 충전 물질이 전단강도에 미치는 영향에 대해 평가해 보고자 하였다. 충전물질은 25% 물유리계 용액형 약액을 사용하였으며, 사용된 시료는 균일한 거칠기의 절리면을 가지는 화강암 시편을 제작하여 Hoek에 의해 만들어진 현장, 또는 실내에서 쓰이는 직접전단시험기를 사용하여 실험하였다.

충전되지 않은 불연속면에서의 전단강도는 직접적으로 암석과 암석의 접촉면에서 발생하게 되고, 약액으로 충전된 불연속면에서의 전단응력-변형곡선은 암석과 암석이 직접 접촉하기 전에 충전물질의 변형이 발생한 다음 암석과 암석이 암석의 접촉면에서 전단파괴가 발생하게 된다. 따라서 최대전단강도에

\*正會員 · 漢陽大學校 工科大学 土木學科 教授

\*\*正會員 · 漢陽大學校 大學院 土木學科 博士課程

이를 때의 변위는 약액으로 충전되었을 때 더 커지게 됨을 알 수 있었다. 임의의 수직하중하에서 수평하중이 증가하게 되면 충전되지 않은 불연속면에서는 빠르게 최대전단강도에 도달하게 되며 그 이후 잔류전단강도로 떨어지게 된다. 그러나, 충전된 불연속면에서는 내부마찰각이 감소되고, 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이는 거의 없었다. 또한 충전두께가 커질수록 단위전단강성(unit shear stiffness,  $K_s$ )값도 감소되는 것을 알 수 있었다.

.....

## 1. 서 론

근래의 모든 기초토목공사에서는 암반층에서 암반사면과 같은 안정해석문제에 봉착하게 되는 경우가 많다. 이러한 암반층에서 사면의 안정과 강도는 불연속면에서의 강도와 직접적으로 연관되어 있으며 따라서 이를 다루는 공학도에게는 암반의 불연속면에 관한 자료를 얻는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 아주 적은 전단강도의 변화도 사면의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 그런데, 지하철 공사현장에서와 같이 굴착 과정중 대수층에서 발생하는 급작스런 누수를 방지할 목적으로 약액 그라우팅(grouting)을 하고 있는데 고결된 약액겔(gel)은 절리면에서 충전물질(filling material)의 역할을 하게 될 것이다.

따라서 암석 균열면에서의 전단강도 값의 변화는 필연적이며 이 전단강도값의 변화정도를 구명하는 것은 중요한 문제이다. 암석 균열면에서의 전단강도는 Barton에 의해 제안된 다음과 같은 형태의 경험식이 가장 널리 적용된다.

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi + JRC \log_{10} \sigma_1 / \sigma_n)$$

여기서,  $\sigma_n$  = 수직응력

$\phi$  = 내부마찰각

JRC = joint roughness coefficient

$\sigma_1$  = 균열면 표면의 일축압축강도

윗 식에서 보듯이 전단강도는 절리면 거칠기의 정도를 나타내는 JRC값과 절리면 표면의 일축압축강도에 의해서 영향을 받게 된다.

아주 낮은 수직응력 하에서는 전단시 암석과 암석의 접촉부분이 거친 표면 위로 올라 타기 때문에 거칠기 정도에 큰 영향을 받지만 큰 수직응력하에서는 암석과 암석의 접촉부가 파괴되기 때문에 절리면 표면부분의 일축 압축강도에 더 큰 영향을 받게 된다.

JRC값은 Barton과 Choubey에 의해 상세히 정

의<sup>(1)</sup>되었는데 완만한 것에서 매우 거친 것까지 0~20사이의 값을 가지게 된다.

일축압축강도는 슈미트 함마(Schmit hammer)의 반발값으로 Miller<sup>(2)</sup>에 의한 도표로 구할 수 있다.

한편 충전물질이 불연속면의 모든 부분을 채우고 있을 때는 불연속면에서의 암석과 암석부분에서가 아니라 충전물질내에서 일축압축강도가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 직접 전단기를 사용하여 거칠기 높이(a)에 대한 평균 충전 두께(f)의 비를 변화시키면서 실시한 실험 결과들을 서로 비교 분석하여 최대전단강도, 잔류전단강도, 수평변위, 유한요소 해석에 특히 필요한 암반 균열면에서의 단위 전단강성  $k_0$ (unit shear stiffness), 마찰각들에 대하여 암반균열면에 약액이 충전되었을 경우 충전두께의 변화에 따라 각 요소에 미치는 영향에 대하여 알아보려고 하였다.

## 2 실 험

### 2.1 시료제작

본 연구에 사용된 시료는 수락산 근처 자연상태의 균열면을 가진 신선한 암을 채취하여 전단상자(shear box)에 알맞은 크기로 암석 절단기로 잘라낸 다음 정, 망치등을 이용하여 실제 현장에서의 절리면처럼 거칠은 표면과 sliding이 일어날 수 있는 방향을 가지도록 조심스럽게 제작한 것으로<sup>(3)</sup> 조립입자는 심성암이며 석영, 백운모, 장석등 산성 광물이 80% 이상, 흑운모가 약 15% 정도인 화강암이다. 암석표면의 거칠기는 전단시 일어날 방향으로 참빛모양의 측정기(needle profilometer)로 측정하였고 대부분 시료의 JRC값이 10정도를 가지고 있었다. 트레이싱용지를 이용해서 단면형상을 표시하였고 求積機를 이용하여 암석시편의 단면적을 구하였다.

표 1. 암석시편의 단면적

시료 No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
단면적(cm <sup>2</sup> )	67	78	72	64	80	76	75	69	72	75	81	79

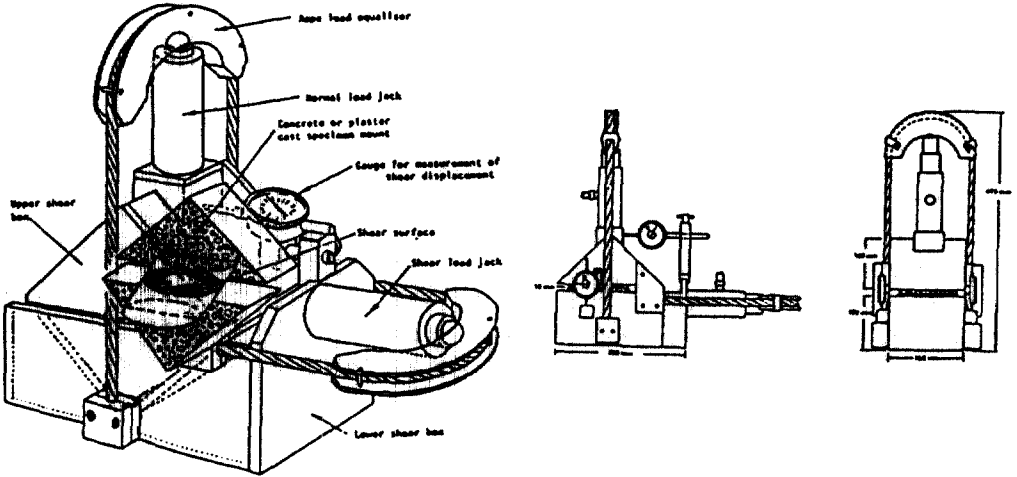


그림 1. Portable Shear Machine

## 22 실험장치

본 연구에 사용된 직접전단시험기<sup>(6)</sup>는 영국 Imperial college에서 만들어 졌으며, 아래, 위 두개의 전단상자로 되어 있는 전단장치를 이용하였고 (그림 1), 암석시편이 튀어나오는 면은 14cm의 입방체에 맞게 고안되었다. 수직하중과 전단하중을 전달하는 방법은 Hoek교수에 의해 제안된 부드러운 철사 로우프(wire rope)를 사용하는 유압작기방식(hydraulic system)을 채택하였고 철사 로우프의 반작용으로 힘을 전달하는 동안 시편의 회전(rotation)을 전혀 구속하지 않아 실제적으로 현장에서의 거동과 거의 비슷한 값을 얻어낼 수 있다. 수직하중을 전달하는 철사로우프와 전단하중을 전달하는 수평 램(lateral ram)은 아래 상자에 붙어 있고 전단하중을 전달하는 철사로우프와 수직하중을 전달하는 수직램은 위 상자에 붙어 있다. 전단되는 동안 변위와 팽창(dilation)을 측정하는 다이얼 게이지(dial gauge)를 부착하였으며 램은 최대 하중을 약 4ton까지 가할 수 있고 로우프와 램이 붙은 위 상자의 하중은 약 20kg이다. 또한 전단상자와 같은 크기로 실험용 암석시편을 만들 수 있도록 10mm아크릴 판으로 만든 몰드가 있다.

## 23 실험방법

암석시편을 전단시험기에 정착시키기 위해서 아크릴 몰드에 구리스를 바른 후 시멘트풀을 채워 넣고 채취한 암석시편의 절리면 부분이 시멘트풀 표면보다 0.65cm정도 노출되게 하고 표시된 전단방향과 일치되게 고정시킨후 시멘트 풀을 약 48시간 양생시킨다. 나머지 한부분의 암석 시편의 절리면이 아래 몰드부분에 들어가도록 뒤집어서 시멘트 풀로 잘 채워 넣고, 볼트와 너트를 고정시킨다. 시멘트풀이 충분한 강도를 갖도록 양생시키며 같은 순서를 반복하여 필요한 만큼의 암석시편을 제작한다.

다음 완성된 암석시편을 자연상태와 같이 절리면이 잘 맞물리게 전단상자 내에 설치하고 수직 잭(jack)에 힘을 가하여 수직하중( $\sigma_n$ )을 상부 전단상자의 램을 통해 임의의 수직하중이 되었을 때 수평 잭에 하중을 가하여 전단을 시작한다. 또한 전단변형속도는 가급적 2mm/min이 유지되도록 하였고 전단 시험을 실시하면서 임의의 수직하중( $\sigma_n$ )을 일정하게 유지하였다.

전단변위(U)가 증가함에 따라 전단응력이 증가하여 최대를 이룰 때 최대 전단강도( $\tau_p$ )값이 나타나

고 절리면이 파괴되면서 전단응력은 감소하여 일정한 최소값(잔류전단강도,  $\tau_r$ )에 접근한다. 잔류전단강도에 이를 때 까지의 임의의 수직하중에 따른 수평변위와 전단강도의 변화를 세밀히 측정하고 기록한다. 이러한 과정을 수직하중을 변화시키면서 보통 3~5회 정도로 실험을 반복한다.

다음으로 충전효과를 보기 위해서 충전두께(filing thickness)를 변화시키면서 전단실험을 실시하였다. 충전두께(f)는 약 0.5a(a: 거칠기 높이) 정도와 1.5a정도 2가지로 하였다. 충전물질로는 일반 지하철굴사 현장에서 급작스런 누수에 사용하는 몰유리계 용액형 약액으로 약액의 농도는 25%이고 고결시간은 6초인 것을 사용하였다<sup>(6)</sup>. f=0.5a인 경우 암석시편 한쪽을 아래 전단상자에 위치시킨 후 A액(몰유리수용액)과 B액(경화제 수용액)을 혼합시킨 다음 즉시 균열면 표면에 얇게 바르고 고결시간이 경과되기 전에 윗 암석시편을 위 아래 균열면에 잘맞게 올려 놓고 윗 전단상자를 조심스럽게 올려 놓은 후 실험을 실시하였다. f=1.5a인 경우는 테이프를 균열면 주위로 필요한 두께만큼 올라오게 붙인후 A액과 B액을 섞어 부은 다음 고결될 때까지 잘 저어 어느정도 고결이 완료된 상태에서 윗 암석시편을 균열면에 잘 맞게 올려 놓는다. 수직응력을 계산할 때 윗 전단상자의 무게와 암석시편의 무게도 고려했다. 큰 변위가 일어났을 때 감소된 접촉면적으로 인한 응력 변화는 joint area diagram을 사용해서 계산하였다<sup>(6)</sup>.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 충전되지 않은 화강암 절리면의 전단강도 분석

그림 2는 실험 암석시편의 거칠기 형태(roughness profile)이며 JRC는 10정도이다. 거칠기 형태의 측정은 미리 표시해 둔 전단방향으로 참빛 모양의 측정기(needle profilometer)를 사용하였다. 표

2는 얻어진  $\sigma_n$ 와  $\tau$ 값을 암석 절리면에서의 일축압축강도로 나눈 도표이다.

암석의 일축압축강도에 비해 낮은 수직응력 범위 내에서 실험이 실시되었음을 알 수 있으며 표 2의 수직응력 범위내에서 전단변형이 진행되는 동안 절리면의 거칠기로 인한 팽창(dilation)이 거의 모든 암석시편에서 발생하였고 절리면의 거칠기의 파괴가 발생한 것은 발견할 수 없었다. 즉, 암석시편들은 서로의 거칠은 암석표면을 올라타면서 전단하중을 발생시켰다. 그림 3은 임의의 수직 하중의 변화에 따른 전단응력과 수평변위와의 관계이다. 전단강도가 최대(peak)점에 이를 때까지 빠르게 강도가 증가함을 알 수 있었고 최대전단강도에 대한 잔류전단강도의 차이는 낮은 수직하중에서 높은 수직하중으로 증가함에 따라서 증가하고 있는 것을 알 수 있었다.

일반적인 전단변형과 전단응력 곡선은 그림 4처럼 탄성영역, 최고 전단강도, 잔류전단강도의 세 부분으로 나타내어질 수 있으며 단위전단강성( $K_s$ )<sup>(7)</sup>은 탄성영역의 경사이므로 그림 3에서  $K_s$ 값을 구할 수 있으며  $K_s$ 값은 원점에서 최고점까지 割線으로 구한 평균으로 하였다. 수직응력이 커짐에 따라  $K_s$ 값은 현저하게 증가함을 알 수 있었다. 또한 그림 3에서 수직하중이 커짐에 따라 최대전단강도일때의 변위는 거의 비슷하게 나

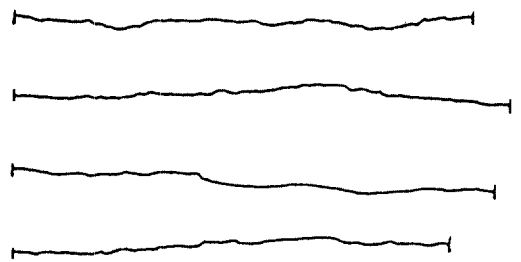


그림 2. 실험암석시편의 Roughness Profile

표 2.  $\sigma_n/\sigma_1 - \tau/\sigma_1$ 의 관계

시료 번호	$\sigma_1$ (kg/cm <sup>2</sup> ) 암석의 강도	$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n/\sigma_1$	$\tau/\sigma_1$
1	1430.2	24.1	31.2	0.017	0.022
2	1395.4	45.2	59.4	0.032	0.042
3	1432.6	75.4	94.1	0.052	0.066
4	1400.6	124.3	150.1	0.089	0.017

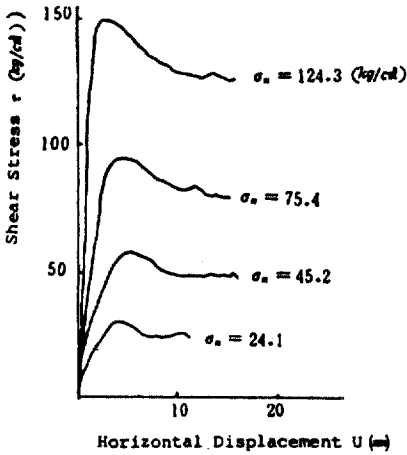


그림 3 충전되지 않았을 때의 변형-응력곡선

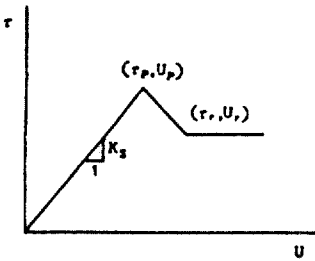


그림 4 일정한 수직응력하에서 전단변형시의 Parameter

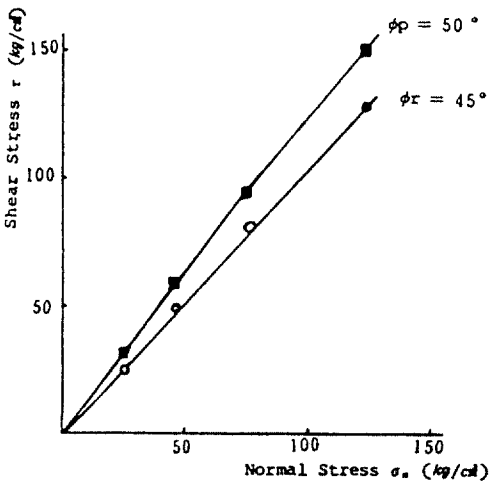


그림 5 충전되지 않을 때의 잔류 및 최대전단강도

타났고 그림 5는 수직응력( $\sigma$ )과 최대 및 잔류전단강도( $\tau_p, \tau_r$ )와의 관계 그림이며 그림에 나타난 바와 같이 점착력은 거의 존재하지 않으며 내부 마찰각은 수직응력이  $75\text{kg/cm}^2$  범위까지는  $52^\circ$ 를 나타냈고,  $75\text{kg/cm}^2$ 에서  $150\text{kg/cm}^2$ 의 범위에서는  $49^\circ$ 의 값을 나타냈고 평균값은 약  $50^\circ$ 를 나타냈다. 또한 잔류 전단강도와 수직응력과의 관계에서 나타난 잔류마찰각은  $45^\circ$ 의 값이 얻어졌다.

### 3.2 충전된 화강암 절리면에서의 전단강도 분석

그림 6은 물유리계 약액으로 충전된 시료의 거칠기 높이(a)를 가진 형태를 나타낸 그림이며 JRC는 10정도이다. 그림 7은 물유리계 약액이 평균 총 전폭  $f=0.5a$ 일때와  $f=1.5a$ 로 충전되었을 때 전단하중과 수평변위와의 관계를 나타낸 그림이다. 충전되지 않았을 경우보다 최고점에 이를 때까지의 강도는 완만하게 증가하였으며 특히  $f=1.5a$ 일 때는 더 완만하게 나타났다. 최대전단강도에 이를 때의 변위는 충전두께( $f$ )가 커질수록 더 증가하는 경향을 보였으며  $f=1.5a$ 일 때의 경우는 최대전단강도와 잔류전단강도와와의 차이는 거의 없었다.

그림 7에서와 같이 변위가 발생하는 초기 부분에서는 약액의 변형이 먼저 일어나기 때문에 충전되지 않았을 경우처럼 곧바로 전단응력이 증가하지 않으면 약액두께가 커질수록 이러한 경향은 커지게 된다. 따라서 충전된 암석의 불연속면에서의 단위 전단강성( $K_s$ )값을 구할 때는 경사가 크게 커지는 부분에서 최대점까지의 활선으로 구한 평균값으로 하

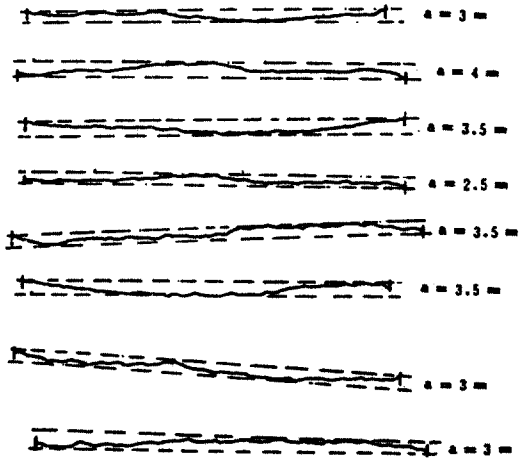


그림 6. Roughness profile과 거칠기의 평균높이(a)

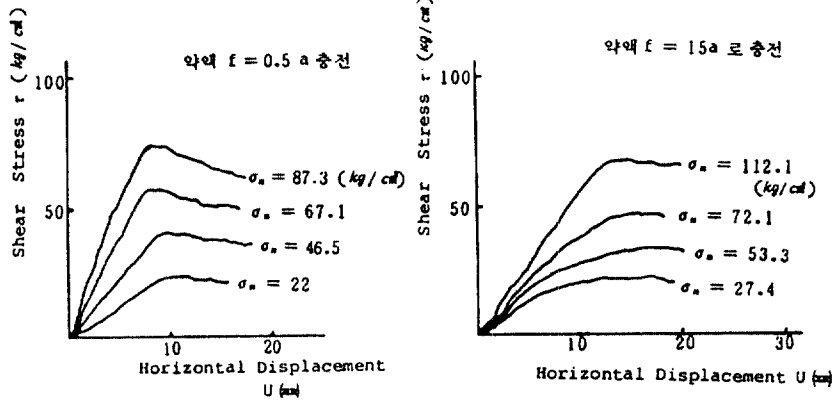


그림 7. 약액으로 충전되었을 경우의 변형-응력곡선

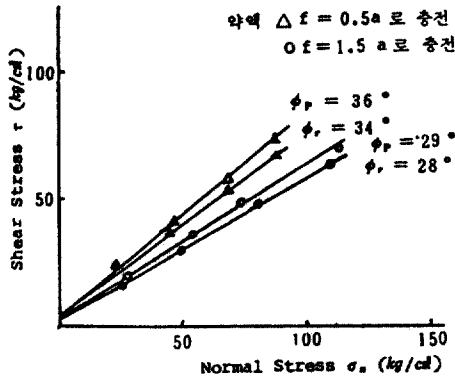


그림 8. 약액으로 충전되었을 경우 수직응력과 전단응력의 관계

였다. 이 결과 단위전단강성( $K_s$ )은 약액으로 충전되지 않았을 때보다 감소함을 나타내는데, 특히 수직하중이 작을수록, 충전두께가 커질수록 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 8은 충전두께 0.5a와 1.5a로 약액충전하여 전단시험한 결과이다. 충전두께( $f$ )가 0.5a에서 1.5a로 증가되면 마찰각은  $6\sim 7^\circ$  정도 감소하는 것으로 나타났다. 충전두께( $f$ )가 0.5a로 충전되었을 때 최대 마찰각은  $36^\circ$ 이며 잔류 마찰각은  $34^\circ$ 로  $2^\circ$ 의 차이를 나타냈고 충전폭( $f$ )이 1.5a로 충전되었을 때 최대마찰각은  $29^\circ$ 이며 잔류마찰각은  $28^\circ$ 로  $1^\circ$  차이를 보였다. 전단 변형이 진행되는 동안 낮은 수직응력하에서는 절리면의 거칠기로 인한 팽창(dilation)이 발생하였으며 충전두께( $f$ )가 0.5a인 경우의 높은 수직응력하에서와 충전두께( $f$ )가 1.5a인 경우는 거칠기 표면중

가장 거친 부분의 끝에서 미세한 파괴가 일어났다.

### 3.3 전단시험 결과의 분석

신선한 화강암의 절리면이 물유리계 약액으로 충전되었을 때 최대전단강도, 잔류전단강도, 수평수직 변위, 단위전단강성( $K_s$ ), 마찰각 등에서 충전되지 않았을 경우와 비교해 볼 때 상당한 변화가 발생했다. 또한 충전두께의 변화에 따라서도 위의 특성들의 변화가 있었다. 충전되지 않았을 경우와 충전되었을 경우에서 전단응력과 변위와의 관계는 그림 3과 그림 7에서 충전되지 않을 경우 변위가 일정한 값에 이르면 전단응력은 더 이상 증가하지 않고 감소하여 잔류전단응력의 값으로 나타남을 보였다. 반면 충전된 경우에는 최대전단강도에 도달할 때까지의 변위량이 충전되지 않았을 경우와 비교할 때 크게 나타났고 충전두께가 커질수록 변위량은 상당히 증가함을 나타냈다. 또한 충전두께가 커질수록 최대전단강도에 대한 잔류전단강도의 차이는 별로 없는 것으로 나타났다.

그림 9는 충전되지 않았을 경우와 충전된 경우의 최대 내부마찰력과 잔류마찰각 값의 변화에 대해 나타낸 것이다. 약액으로 충전되지 않았을 경우 최대 마찰각값은  $50^\circ$ 로 잔류 마찰각과의 차이가  $5^\circ$  정도를 나타냈다. 그러나 약액으로 충전하여 약액두께가 커질수록 최대마찰각과 잔류마찰각의 차이는 작아지는 경향을 보였다.

또한 충전되지 않은 경우와 0.5a로 충전하였을 경우의 최대 마찰각의 차이는 약  $14^\circ$  정도를 보이고 있으며 0.5a로 충전한 경우와 1.5a로 충전한 경우

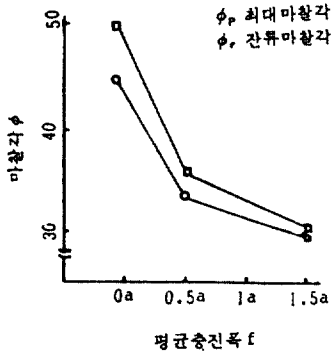


그림 9. 약액두께에 따른 Peak, 잔류마찰각의 변화

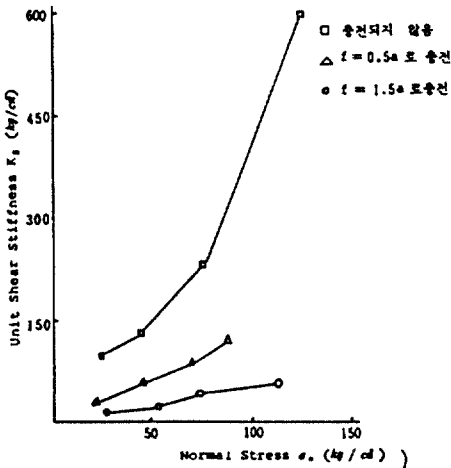


그림 10. 약액에 의한 Unit Shear Stiffness( $K_s$ )의 변화

를 비교해 보면 약 7° 정도의 차이를 보이고 있어 약액 두께가 커질수록 최대마찰각과 잔류마찰각과의 관계와 비슷하게 마찰각의 차이는 작아지는 경향을 알 수 있었다. 단위 전단 강성( $k_s$ )도 그림 10에 나타나듯이 충전두께가 커질수록 작아지는 경향을 보인다. 약액의 충전으로 점착력(c)이 발생하나 이는 전단강도에서 아주 미세한 값을 나타냄으로 무시하였다.

#### 4. 결 론

신선한 화강암의 절리면에서 약액 충전에 의한 전단강도의 변화를 규명하기 위하여 충전물질을 포함하지 않는 절리면과 충전물질을 포함하는 절리면을 가진 암석시편으로 직접전단시험을 각각 실시하

고 서로 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 충전된 절리면에서의 마찰각은 충전되지 않았을 때보다 훨씬 감소하였고 충전물질의 두께가 커짐에 따라 더욱 감소하게 된다.

(2) 충전되지 않은 절리면에서의 전단응력-변형곡선은 직접적으로 암석과 암석의 접촉면에서 발생하게 되고, 약액으로 충전된 절리면에서의 전단응력-변형은 먼저 암석과 암석이 직접 접촉하기 전에 충전물질의 변형이 일어난 다음 암석과 암석의 접촉면에서 전단과파가 발생하게 된다. 따라서 최대전단강도에 이를 때의 변위는 약액으로 충전되었을 때 더 커지게 된다.

(3) 임의의 수직하중하에서 전단시 수평하중이 증가 하게 되면 전단응력은 충전되지 않은 절리면에서는 빠르게 최대 전단강도에 도달하게 되며 그 이후 잔류전단강도로 줄게된다. 그러나 충전된 절리면에서는 특히 충전두께가 클수록 아주 완만한 경사로 최대전단강도에 도달하게 되며 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이는 거의 없다.

(4) 수직하중이 클수록 단위전단당성( $K_s$ ) 값은 커지고, 충전두께가 커질수록 단위전단당성( $K_s$ ) 값은 작아지게 된다.

(5) 현장의 암반굴착공사에서 급작스런 누수를 차단하기 위하여, 고결시간이 빠른 물유리계약액으로 그라우팅을 할 때 절리면의 전단강도 특성을 악화시킬 수 있다는 것이 본 연구결과로 나타났으므로 이에 대하여 충분히 고려한 후 실시하여야 한다.

#### 참 고 문 헌

1. Barton and Choubey, "Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities," Rock Characterization Testing and Monitoring, IMRRM Suggested Method, 1981, 9. 29.
2. Deere, D. U. and Miller, R. P. "Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock," Technical Report No. AFNL-TR-65-116 AIR Force Weapons Lab. 1966.
3. 건설부, 암석과 암반(기초, 응용편) 1979, p. 41 ~43.
4. E. Hoek, "Rock Slope Engineering," 1981, 3rd, pp.

92~97.

5. 정형식, 유재일, “물유리계 약액 고결토의 전단 저항특성” 대한토질공학회지, 제 4 권, 제 2 호, 1988, pp. 45~50.
6. Duncan, N.; Engineering Geology and Rock Mechanics, Vol. 2, Leonard Hill, London, pp. 35~49,

1969.

7. Goodman, R.E., R. Taylor and T. Brekke; A Model for the mechanics of jointed rock; J. ASCE, Vol. 94, SM3, pp. 637~659, 1968.

(接受: 1990. 5. 11)