

## 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 암석절리의 역학적 특성 변화

김태혁<sup>1)</sup> · 이정인<sup>2)</sup>

### The Effect of Cement Milk Grouting on the Deformation Behavior of Artificial Rock Joints

Tae-Hyok Kim, Chung-In Lee

**ABSTRACT** Grouting has been practiced as a reliable technique to improve the mechanical properties of rock mass. But, the study of ground improvement by grouting is rare especially in jointed rock mass. In this study, joint compression test and direct shear test were performed on pure rock joint and cement milk grouted rock joint to examine the grouting effect on the property of rock joint. In the pure rock joint compression test, joint closure varied non-linearly with normal stress. But after cement milk grouting, the normal deformation characteristics of the joint was linear at the low normal stress level. As normal stress increased, deformation of the sample rapidly increased due to the stress concentration at the joint asperities. Peak shear strength of the grouted joint in low normal stress was higher than that of non-grouted joint due to the cohesion, decreased exponentially as the grout thickness increased. Thus after cement milk grouting, the failure envelope modified to a curve that has cohesion due to grout material hydration with decreased friction angle. Shear stiffness and peak dilation angle of the grouted joint decreased as the grout thickness increased. The peak shear strength from the direct shear test on grouted rock joint was represented by an empirical equation as a function of grout thickness and roughness mean amplitude.

**Key words** : cement milk grouting, joint, jointed rock mass, joint normal compression test, direct shear test

**초 록** : 본 연구에서는 주입에 의한 암석절리면의 수직압축특성과 전단특성의 변화를 규명하기 위하여 신선한 인공절리에 대하여 시멘트현탁액을 주입한 후, 절리압축시험과 직접전단시험을 실시하였다. 시멘트현탁액을 주입한 맞물린 단일암석절리의 수직압축시험결과, 주입전 비선형적이었던 절리의 수직응력-수직변형곡선은 선형적으로 바뀌었으며 2 MPa까지의 수직변형은 주입전의 1/10정도로 감소하였다. 시멘트현탁액 주입후 신선한 단일암석절리에 대한 직접전단시험결과, 파괴포락선은 1 MPa 내외의 점착력과 주입전보다 낮은 마찰각을 가지는 것으로 나타났으며, 주입두께가 커질수록 마찰각은 더 낮아지는 것으로 나타났다. 잔류전단강도는 주입두께와의 상관성을 확인할 수 없었으나, 전단강성과 최대팽창각은 주입두께가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 주입두께에 대한 전단특성들의 감소현상들은 주입재에 의한 절리면 유효거칠기의 감소효과로부터 발생한 것으로 판단되며 직접전단시험에서 얻어진 최대전단강도를 주입두께대 거칠기평균진폭비를 포함한 경험식으로 나타내었다.

**핵심어** : 시멘트현탁액 주입, 절리, 불연속암반, 수직압축시험, 직접전단시험,

## 1. 서 론

지하구조물이 건설되는 현지암반의 역학적 거동은 암반내 존재하는 균열, 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면의 기하학적 형태와 역학적 성질에 크게 좌우된다. 그러므로 이러한 불연속면은 암반구조물의 안정성에 큰 영향을 미치게 되며, 불연속면을 포함한 암반구조물의 보강을 위하여 여러 공법들이 적용되고 있다. 이러한 보강공법중 주입공법은 파쇄대 등 불연속면이 발달한 암반을 대상으

로 최근 그 적용사례가 증가하고 있다. 주입공법은 유럽에서 개발되어 미국과 일본 등에서 발전되었으며, 국내에도 광업분야에서는 오래전부터 도입되어 사용되어 왔으나 토목분야에서는 1980년대부터 지하철공사 및 도심지 기초굴착현장을 중심으로 차수 및 보강책으로 적용되었고<sup>1)</sup>,

1) 정희원, 대본엔지니어링 터널팀 과장  
2) 정희원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수  
원고접수일 : 1999년 12월 16일  
원고심사완료일 : 2000년 3월 28일

근래에는 폐광지역상부면의 지반침하방지를 위해서도 쓰이고 있다<sup>2)</sup>.

암반내에서 주입재는 토사지반에서와는 달리 절리면을 따라 맥상으로 주입되며 그 결과 암반내 불연속면의 특성을 변화시키게 된다. 그러므로 주입후 암반의 변형특성은 주입재가 주입되는 절리의 방향, 절리의 특성, 그리고 현지암반의 응력상태에 따라 달라지게 되며, 주입에 의한 보강효과를 정확히 평가하기 위해서는 암반내 불연속면의 특성과 주입재의 특성이 암반의 변형거동에 미치는 영향을 규명하여야 한다. 그러나 현재까지 현장에서 적용되고 있는 주입공법은 시공자의 경험에 주로 의존하고 있으며, 그 효과에 대한 검증도 현장에서의 탄성과속도측정이나, 투수시험을 통하여 평가하고 있다.

주입에 의한 암반의 역학적 보강효과에 대한 연구는 토사지반에 비하여 미비한 형편이며, 대부분의 연구결과는 주로 단일 불연속면을 주입재로 충전시켜 주입후 역학적특성변화, 특히 전단강도의 증가를 관찰한 연구와 주입 후 현장에서 파악된 사례중심의 연구가 대부분을 차지하고 있다<sup>34)</sup>. Natau등<sup>5)</sup>은 폴리우레탄(polyurethane)과 규산염(silicate)를 주입한 단일절리면 시료에서 주입 전후의 전단강도, 점착력, 마찰각등의 변화를 관찰하였으며, Szwedzicki<sup>6)</sup>는 우레탄(urethane)을 주입한 세일절리면에 대한 전단시험을 통해 보강효과를 연구하였다. 또한 Srivastava등<sup>7)</sup>은 시멘트현탁액을 충전한 절리면시료에 대하여 삼축시험을 실시하여 절리면 경사와 봉압, 주입 두께에 대한 변형거동을 관찰하였다. 국내에서도 정형식과 이승호<sup>8)</sup>가 단일절리면의 LW주입후 전단강도, 전단강성의 변화를 관찰하여 주입두께가 커짐에 따라 전단특성들이 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보고하였다. 이러한 연구결과들을 종합해보면 주입후 암반에서도 토사지반과 유사하게 절리면 마찰각의 증가효과보다는 점착력의 증가효과가 현저하게 나타나는 것으로 보고되고 있다. 그러나

현재까지의 연구결과들에서 주입재가 주입되는 암반의 절리특성과의 관계에 대한 정량적 접근방법은 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 현탁액 주입에 의한 절리암반의 보강효과를 규명하기 위해 시멘트와 마이크로시멘트 현탁액을 주입한 신선한 단일암석절리에 대한 수직압축시험을 실시하여 주입전후 암석절리의 수직변형특성에 대하여 고찰하였다. 또한 수직압축시험과 더불어 절리면의 수직응력, 거절기, 강도, 기본마찰각 등의 조건을 달리한 단일 암석절리 및 동일한 거절기를 가지는 에폭시모형절리에 대한 전단시험을 실시하여, 이로부터 시멘트현탁액주입후 절리의 전단변형특성에 대하여 조사하였다.

## 2. 시료 및 시험조건

### 2.1 시료의 특성

직접전단시험과 수직압축시험에 사용한 암석시료는 재료의 균일성, 일축압축강도, 다양한 절리면거절기의 형성이 가능할 것인지의 여부를 고려하여 선택하였다. 이 연구에서는 석재로 사용되고 있는 균질한 화성암인 황등화강암과 재료의 강도가 비교적 작은 변성암인 여산대리석을 암석시료로 이용하였다.

대상암석시료의 물리적, 역학적특성을 파악하기 위하여 실험실에서 각종 시험을 실시하였으며, 그 결과는 Table 1에 제시되어 있다. 각 시험값은 5번의 시험에서 얻은 평균값을 나타낸 것으로 화강암의 경우 일축압축강도가 148 MPa, 대리석이 70.6 MPa로 나타나 화강암의 일축압축강도가 대리석의 약 2.1배로 나타났다.

본 연구에서는 보강을 목적으로 하는 암반주입공법에 가장 많이 사용되고 있는 평균입경이 17.1  $\mu\text{m}$ 인 일반 포틀랜드시멘트(쌍용시멘트 KSL5201-1종)와 평균입경이 4.2  $\mu\text{m}$ 인 마이크로시멘트(쌍용시멘트 Micem 8000)를

Table 1. Physical and mechanical properties of sample material

Property	Granite	Marble	Cement	Microcement	Epoxy Resin
Specific Gravity	2.72	2.76	1.87	1.47	1.63
P wave Velocity(m/sec)	3,650	3,080	3,150	2,590	2,560
S wave Velocity(m/sec)	1,970	1,710	1,350	1,140	1,180
Uniaxial Compression Strength(MPa)	148	71	25	10	100
Tensile Strength(MPa)	13.7	15.6	2.9	1.1	20.2
Young's Modulus(GPa)	54	48	10	5.7	5.5
Poisson's Ratio	0.29	0.31	0.30	0.29	0.36



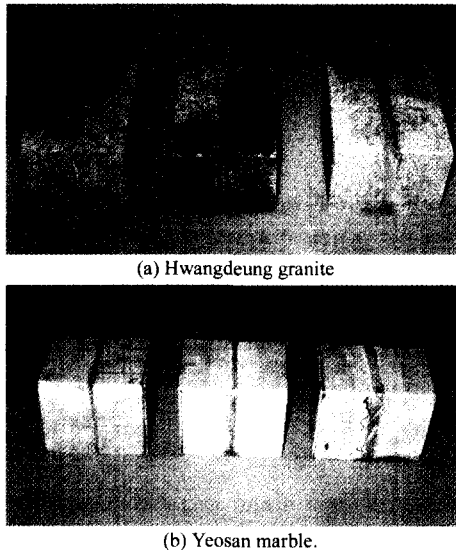


Fig. 2. Specimen for joint compression test and direct shear test.

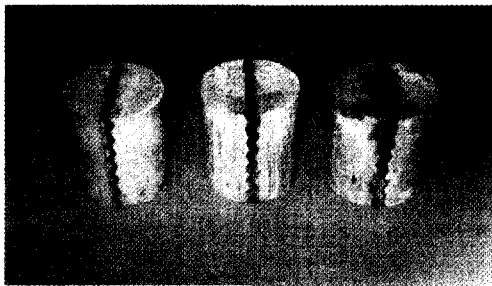


Fig. 3. Model joint specimens made by epoxy resin.

섬씨24도에서 28일간 수증양생후, 전단시험을 실시하여 주입후 절리면의 전단특성변화를 주입하지 않은 시료의 결과와 비교하였다. 본 시험에서는 0.2 MPa부터 4 MPa 까지 6가지 단계로 수직응력을 변화시켜 직접전단시험을 수행하였으며, 주입하지 않은 시료에 대하여 화강암 15회, 대리석 11회, 주입후 시료에 대하여는 화강암 59회, 대리석 34회의 직접전단시험을 실시하였다.

### 3. 실험장치 및 실험방법

#### 3.1 레이저 센서를 이용한 절리 거칠기 형상측정

본 연구에서는 절리면의 거칠기와 평균진폭의 측정을 위해서 레이저 변위계를 이용한 절리면거칠기측정기를 사용하였고, 전체적인 모습은 Fig. 4와 같다.



Fig. 4. A general view of coordinate measuring machine.

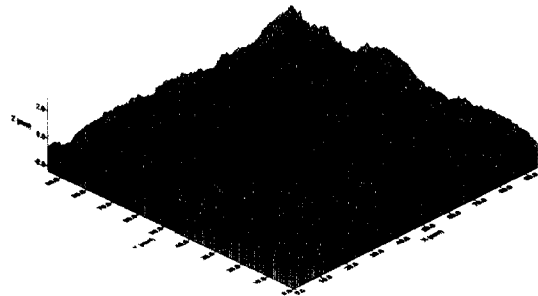


Fig. 5. Measured roughness characteristics for Yeosan marble specimen.

Fig. 5는 이렇게 측정된 대표적인 대리석절리면의 형상으로 평균거칠각은 18°로 측정되었다. 본 연구에서는 시료당 전단방향에 평행한 3개의 측선을 정하여 거칠기 단면형상을 측정하였다. 또한 거칠기 파라미터에 대한 Lee 등<sup>1)</sup>의 연구결과를 이용하여 절리면거칠기 파라미터로는 평균거칠각을 기본해석파라미터로 결정하였다. 이와같 측정된 거칠기 형상을 이용하여 국제암반역학회(ISRM)에서 제시한 방법<sup>2)</sup>으로 절리면의 거칠기 평균진폭을 측정하여 주입두께를 정규화(normalize) 시켰다.

#### 3.2 절리수직압축시험

본 연구에서는 절리수직압축시험에 일본 Shimadzu사의 만능재료시험기를 이용하였다. 이 시험기는 최대 200톤 까지 하중을 가할 수 있는 시험기로 여기에 시편의 변위와 하중측정을 위하여 측정시스템인 System 5000을 사용하였다.

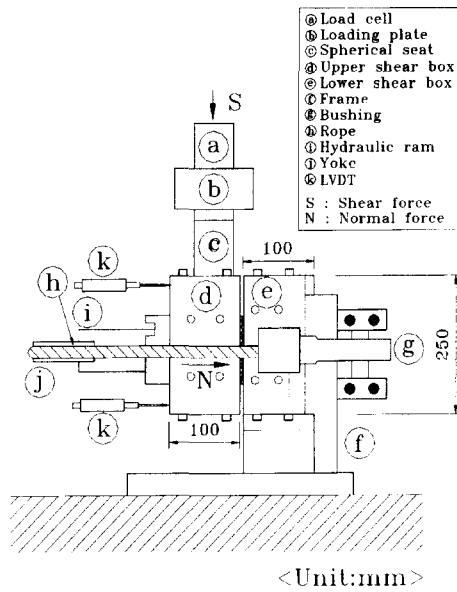


Fig. 6. Schematic diagram of direct shear test apparatus.

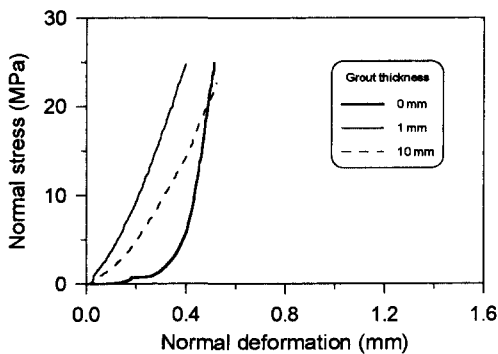


Fig. 7. Normal stress-normal deformation curve for a flat grouted joint specimen in Hwangdeung granite.

3.3 절리직접전단시험

본 연구에서는 직접전단시험에 일본 Shimadzu사의 만능재료시험기를 이용하도록 제작된 일면직접전단시험기를 사용하였다. 시험편에 대한 전단하중은 만능재료시험기를 이용하여 재하하였으며, 하중이 정확히 전달되도록 압축기의 가압판과 전단상자 사이에 구좌(spherical seat)를 설치하였다. Fig. 6은 일면직접전단시험기의 개략도이다.

4. 절리수직압축시험 결과

4.1 편평한 절리의 주입후 압축특성

Fig. 7은 주입전후의 편평한 화강암 절리시료의 수직

응력에 대한 수직변형을 나타낸 것이다. 그림에서 주입전 시료의 수직압축특성은 초기에는 변형량이 비선형적으로 증가하다가 수직응력이 5 MPa이후에는 선형적인 거동을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 하중이 가해지지 않을 때는 닫혀 있지 않은 절리가 초기하중에 의해 닫히고, 하중이 증가함에 따라 절리가 완전히 밀착되어 절리에 의하여 만들어진 변형이 없어지게 되어 신선압과 비슷한 거동을 보이기 때문이다. 이에 반해 시멘트현탁액이 주입된 시료의 변형곡선을 살펴보면 수직응력-수직변형곡선이 초기하중부터 선형적으로 바뀐 것을 확인할 수 있다. 주입두께가 10 mm로 비교적 두꺼울 경우, 동일응력에 대한 수직변형량이 많아져 곡선의 기울기가 낮아진 것으로 나타났으며, 이러한 현상은 절리면 사이에 주입된 주입재의 두께가 커짐으로 인하여 주입재의 변형이 커져 발생하는 현상으로 판단된다. 대리석시료에서도 이와 비슷한 현상이 나타났으나, 주입재의 두께가 10 mm인 경우 시료중 주입재측면이 일부 파괴되어 수직응력 20 MPa정도 부터는 수직응력-수직변위곡선이 비선형적으로 나타났다.

4.2 주입두께에 따른 거친절리의 압축특성

Fig. 8는 주입 전후, 맞물린 거친절리의 수직변형특성을 나타낸 그림이다. 이 그림에서 주입전 절리의 변형특성은 편평한 절리와 비슷하게 가압초기에는 변형량이 증가하다가 수직응력이 커짐에 따라 최대압착량으로 수렴함을 확인할 수 있다. 주입두께가 1 mm인 경우에는 시험 초기에 약간의 비선형구간이 존재하나 수직응력이 1 MPa이상에서는 거의 선형으로 변형하는 것으로 나타났으며 동일수직응력에 대하여 주입전 절리면의 변형보다는 훨씬 적은 변형량을 나타내었다. 그러나 이러한 주입후

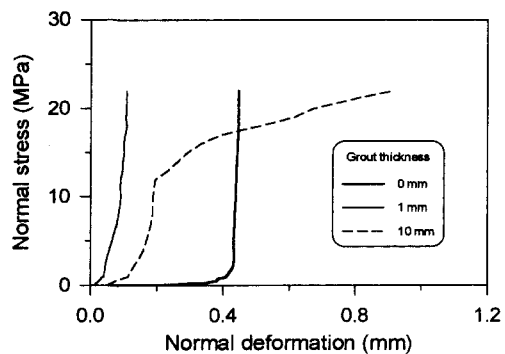


Fig. 8. Normal stress-normal deformation curve for a rough grouted joint specimen in Hwangdeung granite (mated).

절리시료의 수직변형특성을 주입재의 변형곡선과 비교하면 주입재의 변형보다 큰 변형이 발생된 것을 확인할 수 있는데, 이러한 경향은 주입재의 수화시 절리면거칠기로 인해 미세한 공극이 발생하여 이의 압축으로부터 절리면의 수직변형량이 주입재의 수직변형량보다 크게 나타난 것으로 판단된다. 주입두께가 10 mm인 시료의 변형곡선은 초기에는 비교적 선형으로 나타나지만 수직응력이 10 MPa 이상에서는 상당한 변형이 발생하여 주입전 절리의 변형량보다도 큰 변형이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 주입재의 강도가 암석의 강도에 비해 상당히 작고, 절리면의 거칠기에서 응력집중현상이 발생하여 주입재시료의 급격한 파괴가 일어나므로 나타나는 현상으로 판단된다. 이러한 결과로부터 주입후 거친절리의 수직압축특성은 주입재의 절리면과의 접촉도, 주입재자체의 수직압축특성과 절리거칠기에 따른 응력집중도에 직접적으로 영향을 받는 것으로 판단된다.

Fig. 9는 1 mm 엷물린 절리의 주입전후 수직변형특성을 나타낸 그림이다. 시험결과 20 MPa까지의 주입전 절리시료의 수직변형은 맞물린 절리시료의 1.8배 정도로 크게 나타났는데 이는 절리의 돌출부의 불일치로 절리의 틈이 맞물린 절리보다 훨씬 크기 때문에 판단된다. 그러나 그 변형형태는 맞물린 절리의 경우와 유사하며 맞물린 절리의 경우와 마찬가지로 쌍곡선함수의 근사식으로 표현될 수 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>11)</sup> 주입후 절리의 특성을 살펴보면 주입두께가 1 mm인 경우와 10 mm인 경우 모두에서 응력이 낮은 부분에서는 비교적 선형적인 곡선형태가 나타나지만, 수직응력이 10 MP 정도에서부터 변형이 크게 나타나 곡선의 기울기가 상당히 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 맞물린 시료에서와 마찬가지로

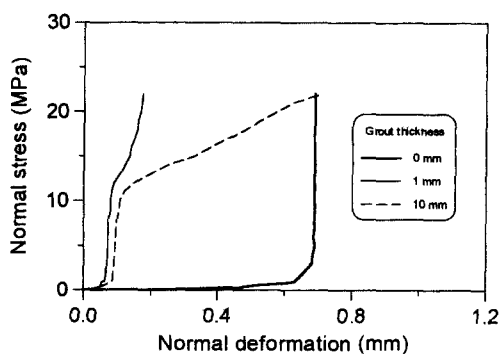


Fig. 9. Normal stress-normal deformation curve for a rough grouted joint specimen in Hwangdeung granite (1mm unmatred).

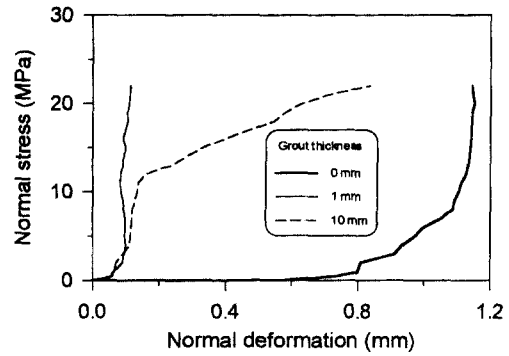


Fig. 10. Normal stress-normal deformation curve for a rough grouted joint specimen in Hwangdeung granite (4 mm unmatred).

지로 주입재시료의 급격한 파괴가 주원인으로 판단된다.

다음 Fig. 10은 4 mm 엷물린 절리시료의 변형곡선이다. 이 시료에서는 수직응력의 증가에 따라 계속적인 절리 돌출부의 파괴가 관찰되었으며, 이는 엷물림이 커서 절리면의 돌출부가 압축응력에 의해 파괴되기 때문에 일차재하시 상당한 양의 영구변형이 발생하였음을 확인할 수 있다. 그러나 1 mm 두께로 주입을 실시한 후 시료의 변형곡선은 다소 계산값의 편차가 있으나, 맞물린 절리와 마찬가지로 초기상태를 제외하고는 비교적 선형을 나타내는 것으로 확인되었다. 이는 절리의 엷물린 돌출부를 주입재가 충전하여 엷물린 효과를 없애기 때문인 것으로 판단된다. 주입두께가 10 mm인 경우에는 앞선 1 mm 엷물린시료의 결과와 마찬가지로 절리의 돌출부로 인한 주입재의 급격한 파괴로 말미암아 8 MPa 정도에서부터 변형곡선의 기울기가 급격하게 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과들로부터 주입후 거친 절리의 수직압축특성은 수직응력이 작은 초기단계에서는 비교적 선형적인 변형을 나타내나 국부적인 주입재의 파괴로 주입재의 압축량보다는 더 큰 변형을 보였다. 또한 수직응력이 커짐에 따라 절리면 거칠기에 따른 응력의 집중현상으로 인해 급격한 주입재의 파괴가 발생하여 비선형적인 변형거동이 나타났다. 암반공학자가 마주치는 대부분의 절리에 작용하는 최대 유효수직응력은 0.1~2 MPa로 비교적 작은 범위에 있다는 Barton & Choubey<sup>12)</sup>의 연구결과를 고려하면 실제 현장에서의 주입에 의한 절리의 수직변형억제효과는 크게 나타날 것으로 판단된다. 각 시료에 대해 2 MPa까지의 수직강성을 구한 결과, 주입후 절리의 수직강성은 20~60 MPa/mm로 주입전 절리의 10배 정도로 커지는 것으로 나타났으며, 이러한 결과들로 볼 때, 대부분의 변

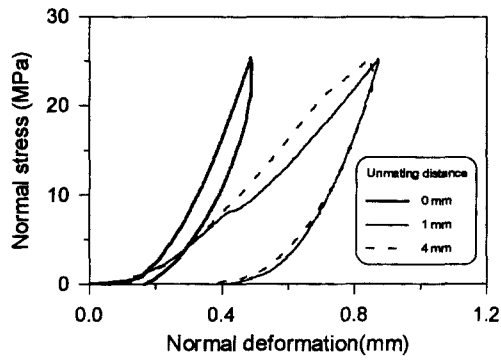


Fig. 11. Normal stress-normal deformation curve for a rough grouted joint specimen in Hwangdeung granite.

형이 불연속면의 수직변형에 의해 발생하는 층상압반에서 주입재에 의한 변형억제효과가 크게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

4.3 엇물림에 따른 거친절리의 주입후 압축특성

Fig. 11은 비슷한 거칠기를 가지는 절리의 엇물림정도를 달리하여 마이크로시멘트 현탁액 1 mm 주입후 수직응력에 대한 수직변형을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 엇물림정도에 따른 특징적인 관계는 나타나지 않았으나, 절리가 맞물린 경우보다 엇물린 경우가 수직응력에 대한 변형이 큰 현상이 나타났다. 이는 절리가 엇물림에 따라 절리 돌출부에서 응력집중현상이 심화되어 주입재의 국부적인 파괴가 더 크게 일어나기 때문으로 판단되며, 이러한 현상은 엇물렸을 경우의 1차재하에 따른 영구변형이 크게 나타나는 것으로 확인할 수 있다. 1 차 하중에 따른 영구변형은 맞물린 절리의 경우 0.16 mm, 1 mm 엇물린 절리의 경우 0.40 mm, 4 mm 엇물린 경우 0.39 mm로 나타났다.

이러한 현상은 대리석에 대한 시험결과에서도 비슷하게 나타났다. 대리석의 경우, 엇물린 절리의 변형이 화강암에 비하여 다소 작게 나타났으나 변형양상은 화강암의 경우와 마찬가지로 엇물린 경우가 수직변형이 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

5. 모형절리 및 암석-주입재 접촉면 전단시험결과

5.1 모형절리의 주입후 전단특성

모형절리에 대한 마이크로시멘트 주입후 전단시험결과, 대부분의 파괴가 주입재사이에서 발생하는 것으로 나타났

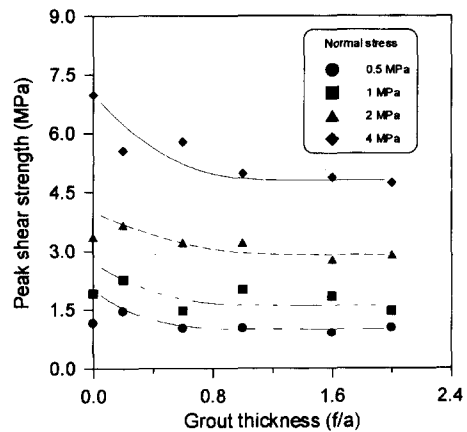


Fig. 12. Effect of grout thickness on the peak shear strength of model joint.

다. Fig. 12는 주입두께대 거칠기평균진폭비( $f/a$ )에 대한 최대전단강도의 변화 양상으로 절리내 주입된 주입재는 충전된 절리면의 전단거동과 유사한 전단거동을 나타내나 수직응력이 특정수직응력이하이고 주입두께가 작을 경우에는 주입재의 수화현상으로부터 발생한 주입재와 절리 간의 점착력 때문에 주입전 절리의 최대전단강도보다 큰 최대전단강도를 갖는 것으로 나타났다. 이로부터 절리내에 주입된 주입재는 점착력을 갖는 충전물의 역할을 하며 주입두께대 거칠기평균진폭비와 강도특성은 지수함수적인 감소양상을 보이는 것으로 판단된다. 또한 최대전단강도의 감소현상은 주입두께가 평균진폭의 2배정도일때 수렴하는 것으로 나타났다.

Fig. 13은  $f/a$ 에 대한 잔류전단강도의 변화양상으로 일

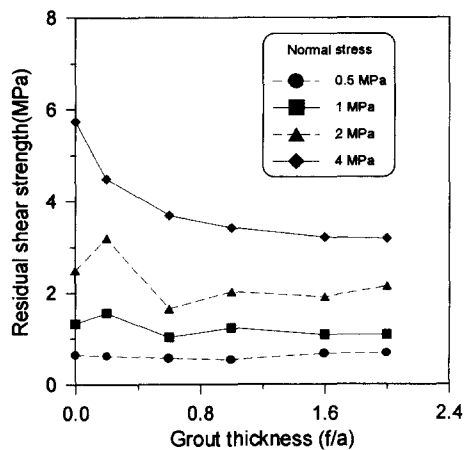


Fig. 13. Effect of grout thickness on the residual shear strength of model joint.

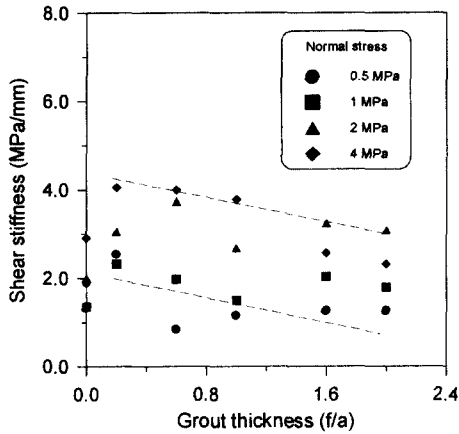


Fig. 14. Effect of grout thickness on the shear stiffness of model joint.

반적인 충전물의 경우와 비슷하게 주입두께가 커질수록 최소수렴값으로 감소하는 현상을 나타내었으며 이러한 현상은 수직응력의 크기가 클수록 더욱 크게 나타났다. 이는 수직응력이 커지면 시험조건등의 외부요인보다 재료자체의 강도, 절리면 거칠기등과 같은 내부요인에 의해 전단강도값이 지배되므로 비교적 양호한 결과가 산출되는 것으로 판단된다.

Fig. 14는  $f/a$ 에 대한 전단강성의 변화양상으로 최대전단강도나 잔류전단강도와 달리 주입두께에 대한 지수함수적인 감소현상은 나타나지 않았다. 그러나 모든 수직응력 조건에서  $f/a$ 가 0.2인 경우에는 주입후의 절리면 전단강성이 주입전 보다 크게 나타났으며 주입두께가 커질수록 약간 감소하는 것으로 나타났다. 이로부터 절리면간극이

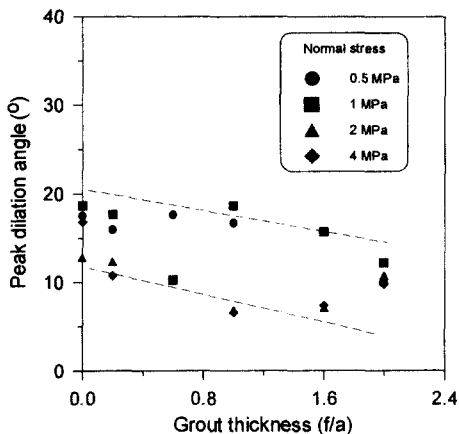


Fig. 15. Effect of grout thickness on the dilation angle of model joint.

작은 ( $f/a < 0.2$ ) 압반에서는 주입재의 수화현상으로부터 발생되는 점착력으로 인해 주입전에 비해 절리면 전단강성이 증가하는 것으로 판단된다.

Fig. 15는  $f/a$ 에 대한 최대팽창각의 관계로 전체적으로  $f/a$ 가 커질수록 최대팽창각이 작아짐을 알 수 있다. 이는 충전된 절리면에 대한 Papaliangas<sup>13)</sup>의 연구결과와 유사한 결과로서 절리간극에 주입된 주입재는 점착력을 가진 충전물의 역할을 하는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 16은 수직응력에 대한 최대전단강도를 나타낸 것으로 동일수직응력조건에서 주입두께에 따라 최대전단강도가 작아짐을 확인할 수 있다. 실험조건중  $f/a$ 가 2로 가장 큰 경우 마찰각은 48도로 나타났으며  $f/a$ 가 가장 작은 0.2의 경우에는 54도로 나타났다. 이러한 결과로부터 주입후 절리면의 파괴식에서 주입두께에 따라 점착력은 거의 비슷하게 나타나나 주입두께가 커질수록 마찰각은 작아지는 것으로 판단할 수 있으며, 이로부터 주입후 절리면의 새로운 파괴식 제시가능성을 확인하였다.

### 5.2 암석-주입재 접촉면의 전단특성

주입후 절리면에 전단력이 작용하게 되면, 대부분의 파괴가 절리면과 절리에 주입된 주입재사이에서 발생하는 것으로 나타남에 따라, 본 연구에서는 편평한 암석과 주입재 접촉면에 대한 전단시험을 실시하여 접촉면의 기본적마찰특성과 주입후 절리면의 강도특성과의 연관성을 찾고자 하였다. 암석과 주입재의 편평한 접촉면의 마찰각은 경험적인 절리의 파괴식으로 가장 많이 적용되는 Barton의 식에서 기본마찰각의 성질을 지닌 값으로 주입재와 절리면의 기본적 마찰특성을 나타내는 값으로 판단된다.

시험결과 편평한 화강암절리와 시멘트접촉면의 점착력과 마찰각은 1.85 MPa와 26.9도로 나타났으며 마이크로

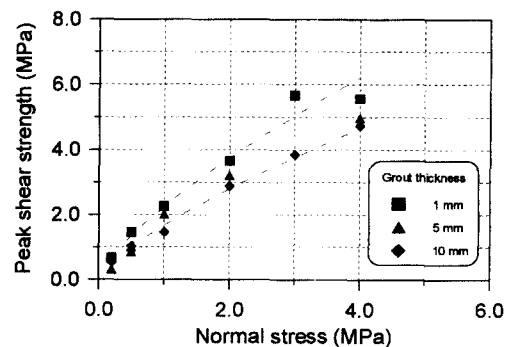


Fig. 16. Relationship between peak shear strength and normal stress of model joint



시멘트의 경우에는 접촉면의 점착력과 마찰각이 2.19 MPa와 32.9도로 나타났다. 이렇게 마이크로 시멘트와 절리면사이의 마찰각이 시멘트에 비하여 크게 나타나는 것은 암석과 주입재의 접촉면에서 주입재의 성질이 접촉면의 기본적인 마찰특성에 큰 영향을 미치기 때문으로 판단된다. 또한 시멘트와 편평한 대리석접촉면의 점착력과 마찰각은 1.44 MPa와 20.8도로 나타났다. 점착력은 화강암시료와의 접촉면보다 대리석시료와의 접촉면에서 작게 나왔는데 이는 시험조건 및 조성광물이 주입재의 수화과정과 관계가 있음을 나타내는 것이다. 대리석절리와 마이크로 시멘트접촉면의 점착력과 마찰각은 1.72 MPa와 32.7도로 나타났다.

### 6. 단일 암석절리의 주입후 전단특성변화

#### 6.1 수직응력과 전단특성의 관계

Fig. 17과 Fig. 18은 주입전후 화강암절리와 대리석절리의 전단변형특성을 구한 것이다. 그림에서 전체적인 전단변형곡선의 모양은 주입전후 별로 변화가 없으나, 수직응력이 작을 경우에는 주입후 최대전단강도가 주입전 최대전단강도보다 크게 나타나다가 수직응력 커짐에 따라 주입후 변형곡선은 최대전단강도와 잔류전단강도차이가

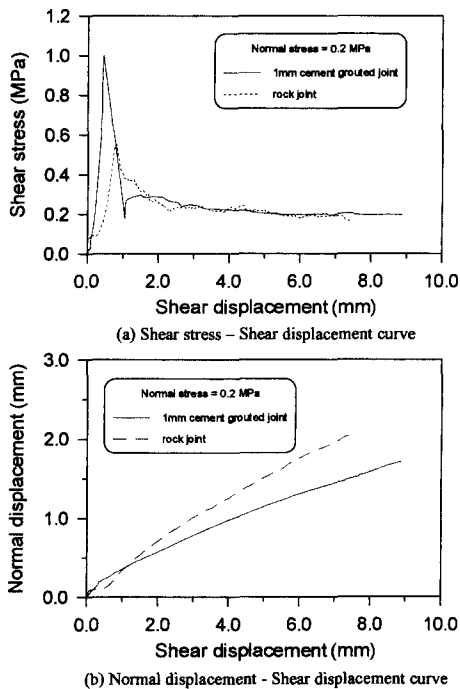


Fig. 17. Shear deformation curve for Hwangdeung granite.

별로 나타나지 않고 주입전에 비하여 최대전단강도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이는 수직응력이 낮을 때에는 주입재의 수화현상으로부터 발생하는 점착력으로 인해 전단강도가 증가하지만 주입후 절리의 마찰성분이 주입재의 영향으로 감소하기 때문에 수직응력이 높을 때에는 전단강도가 낮아지는 것으로 판단된다.

Fig. 19는 주입을 실시한 화강암과 대리석 시료의 전단시험후 파괴면을 보여주고 있다. 여기에서 시료의 파괴는 대부분 주입재와 암석사이의 접촉면에서 발생한 사실을 확인할 수 있으며, 또한 파괴된 일부 거칠면 사이에 주입재가 남아있어 주입재가 절리면의 유효거칠기를 감소시키는 역할을 함을 보여주고 있다.

시험결과, 주입후 단일절리의 파괴포락선은 1 MPa내외의 점착력과 40도이내의 마찰각을 가지는 것으로 나타났으며, 이를 시멘트의 점착력과 최대마찰각 1.89 MPa, 43도, 마이크로 시멘트의 점착력과 최대마찰각 1.2 MPa와 49도와 비교하면, 점착력과 최대마찰각모두가 주입재 자체의 결과보다 낮은 값으로, 주입후 절리면의 파괴가 주입재가 아닌 주입재와 절리면사이 접촉면에서 발생하는 현상을 뒷받침하고 있다. 이러한 현상은 충전된 불연속면의 마찰거동이 충전재와 암석사이 경계면의 전단거동에 지배된다는 연구결과<sup>13,14)</sup>와 거의 유사한 결과로, 주입후

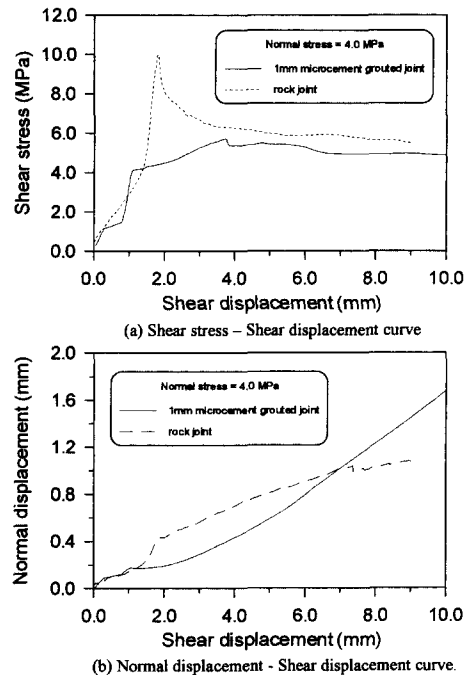


Fig. 18. Shear deformation curve for Yeosan marble

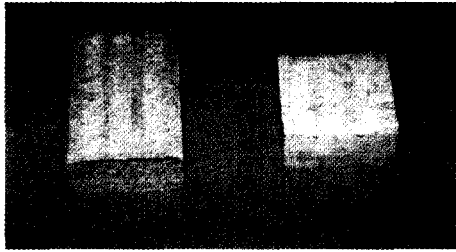


Fig. 19. Sheared plane of the rock joint specimens.

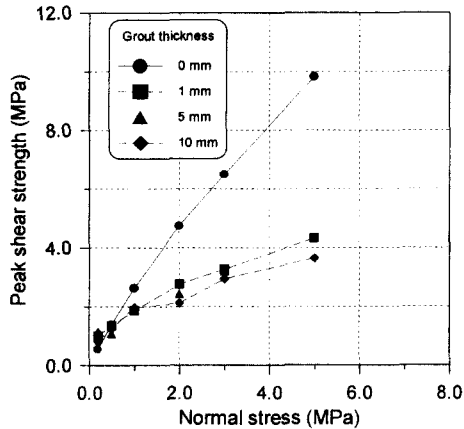


Fig. 20. Relationship between peak shear strength and normal stress of cement grouted granite joint.

장 큰 영향을 받음을 의미한다.

Fig. 20은 화강암절리의 시멘트주입후 절리의 최대전단강도를 도식한 그림으로 주입전 절리의 전단특성은 주입후 0.9 MPa정도의 점착력을 가지는 곡선형태의 파괴식으로 변한 것을 확인할 수 있는데, 이러한 현상은 주입재의 수화현상으로부터 발생한 주입재와 절리면사이의 접촉면 점착력에 의해 일어난 현상으로 주입재의 주입두께와는 상관성이 별로 없고 거의 비슷한 것으로 나타났다. 또한 주입두께가 커질수록 수직응력에 대한 곡선의 기울기가 작아지는 현상, 즉 주입두께가 클수록 주입후 절리면의 최대전단강도가 일반적으로 작아지는 현상이 나타났는데, 이는 주입후 절리면에서 발생하는 마찰력의 대부분이 주입재와 절리와의 접촉면에서 발생하며 주입재의 강도가 절리면의 강도보다 매우 적으므로, 절리면의 마찰각에 영향을 주는 절리면압축강도가 주입재의 강도특성으로 변하기 때문으로 판단된다. 또한 주입후 절리면의 마찰각은 주입재 자체의 마찰각보다는 작게 나타났으며, 이러한 마찰각의 감소현상은 충전두께가 증가할수록, 수직

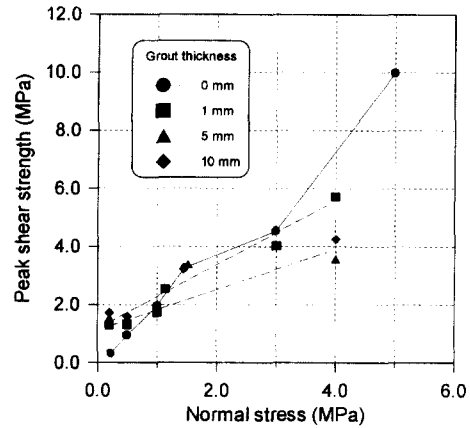


Fig. 21. Relationship between peak shear strength and normal stress of microcement grouted marble joint.

응력이 클수록 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 암반절리면의 간극이 작고 작용하는 수직응력의 크기가 작을 경우에 주입에 의한 보강효과는 크게 나타나는 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 21은 시멘트현탁액 주입후 대리석 시료의 전단변형거동을 구한 곡선이다. 대리석시료의 압축강도는 70.6 MPa로서 화강암의 약 1/2정도 수준으로 시료의 강도가 주입후 절리면 전단거동변화에 어떠한 영향을 주는지에 대하여 연구해보고자 했다. 그러나 대리석의 경우에도 암석시료의 압축강도가 주입재의 압축강도보다 매우 크므로, 전체적인 경향이 화강암과 유사하게 나타났다. 시험결과 수직응력이 작을 경우에는 주입후 최대전단강도가 주입전 최대전단강도보다 크게 나타나다가 점차 수직응력이 커짐에 따라 최대전단강도가 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과로써 시멘트 주입후 대리석의 전단특성 또한 주입후 평균 1.5 MPa정도의 점착력을 가지는 곡선형태의 파괴식으로 변한 것을 확인할 수 있으나 최대전단강도의 분산이 화강암에 비하여 크게 나타났다. 마이크로시멘트를 주입한 경우의 대리석절리면의 파괴포락선은 화강암에 비하여 다소 분산이 심하나 전체적인 경향은 화강암과 거의 유사하게 나타났으며, 점착력은 평균 1.1 MPa로 나타났다. 시멘트와 마이크로 시멘트 모두에서 대리석절리의 점착력이 화강암절리의 점착력에 비하여 상대적으로 크게 나타났는데, 이는 주입재에 의한 점착력이 주입된 절리면의 광물조성과 관련이 있음을 암시하는 결과이다. 또한 대리석의 경우 전체적으로 모든 상수들이 화강암에 비하여 분산되어 나타나고 있는데, 이러한 결과는 전단시

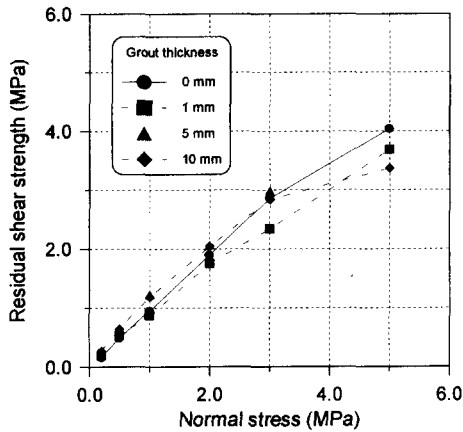


Fig. 22. Relationship between residual shear strength and normal stress of cement grouted granite joint.

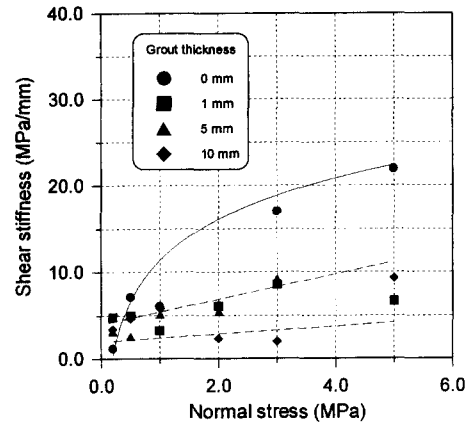


Fig. 23. Relationship between shear stiffness and normal stress of cement grouted granite joint

접촉면적이 작아지면 절리면 상태나 시험조건의 작은 변동에도 전단변형특성이 큰 영향을 받을 수 있으므로, 측정값의 산포도가 크게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 22은 시멘트주입후 절리면 잔류전단강도에 대한 시험결과이다. 주입후 절리의 잔류전단강도는 주입두께와는 별로 상관성이 없는 것으로 나타났다. 주입후 시편에 대한 전단시험에서 전단변형은 주입재와 절리면의 접촉면에서 발생하기 때문에 실험에서 구해지는 실제 잔류전단강도 또한 이 접촉면의 잔류전단강도로 볼 수 있으므로, 전단 파괴후 절리면의 잔류전단강도는 주입두께보다는 파괴후 접촉면의 거칠기특성등 다른 시험조건이 더 큰 역할을 하는 것으로 판단된다. 마이크로시멘트를 주입한 절리의 잔류전단강도도 시멘트를 주입한 경우와 비슷하게 주입두께와의 경향성을 확인할 수 없었다. 수직응력에 따른 잔류전단강도의 증가현상은 대리석의 경우에도 화강암과 마찬가지로 나타났으며, 주입두께에 대한 특정한 경향성도 확인할 수 없었고, 시험결과 분산도 상당히 크게 나타났다.

Fig. 23은 주입후 화강암 절리면의 전단강성을 나타낸 것이다. 시험결과 시멘트와 마이크로시멘트 모두에서 수직응력이 0.2 MPa로 매우 작을 경우에만 전단강성의 증가가 관찰되었으며 0.2 MPa보다 클 경우에는 주입전시료의 전단강성이 더 크게 나타났다. 이러한 결과는 주입에 의한 최대전단강도의 증가가 수직응력이 작을 경우에만 나타난 것과 거의 유사한 결과로서, 이로부터 주입된 암반에서는 전단강성의 증가효과보다는 수직강성의 증가에 의한 효과가 더 큰 것으로 판단할 수 있다. 주입후에

도 일반적인 절리면의 특성과 마찬가지로 수직응력이 증가하면 전단강성이 증가하는 것으로 나타났으나 그 증가량은 수직응력에 대한 주입전 암석절리면의 증가량보다는 작은 것으로 나타났다. 이를 수직압축시험결과와 비교하면, 절리를 따라 백상주입된 주입재는 절리면의 전단변형 억제효과보다는 수직변형의 억제에 직접적인 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 대리석의 경우에는 주입후 절리면전단강성과 수직응력의 관계는 시험값의 분산이 크게 나타나 직접적인 상관성을 확인할 수 없었다. 이는 최대전단강도와 마찬가지로 대리석의 시편크기가 화강암에 비하여 작고, 전단면의 접촉이 국부적으로 발생하여 편차가 크게 나타난 것으로 판단된다.

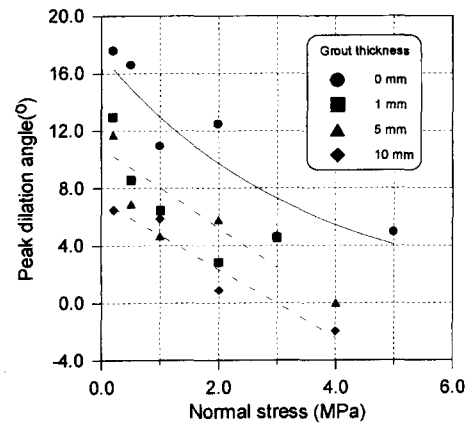


Fig. 24. Relationship between peak dilation angle and normal stress of microcement grouted granite joint.

Fig. 24는 마이크로시멘트주입후 절리면의 최대팽창각과 수직응력의 관계를 도시한 것이다. 주입하지 않은 절리면의 경우와 마찬가지로 수직응력이 증가함에 따라 최대팽창각이 지수함수적으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 주입두께가 증가함에 따라 최대팽창각도 감소하는 것을 확인할 수 있다. 주입두께에 따라 팽창각이 감소하는 현상은 충전절리면의 시험결과와 거의 유사한 결과로 절리간극내 주입된 주입재가 충전물의 역할을 함을 의미하며 주입재에 의한 유효거칠기의 감소효과로부터 발생한 것으로 판단된다. 이는 전단시험후 시료의 거 면사이에 주입재가 남아있는 현상으로부터 확인할 수 있으며, 주입재가 충전재와 마찬가지로 절리면의 유효거칠기를 감소시키는 역할을 함을 의미한다. 대리석의 경우에서도 화강암의 경우와 거의 유사하게 수직응력이 감소함에 따라 팽창각이 감소하는 현상이 나타났으나 전단강성의 경우와 마찬가지로 분산이 심하게 나타났다.

6.2 주입두께와 전단특성의 관계

절리내 주입된 주입재의 특성은 점착력을 갖는 충전물의 역할을 하는 것으로 나타났으므로 본 연구에서는 비교적 시험값의 분산이 적은 화강암시료에 대하여 주입두께대 절리면평균진폭비에 대한 전단특성의 관계로부터 새로운 파괴식을 유추하고자 하였다.

Fig. 25는 화강암절리의 마이크로시멘트 주입후 주입두께에 대한 최대전단강도를 그린 그림이다. 화강암절리의 경우 모형절리와 마찬가지로 수직응력에 작을 때는 주입전 절리면의 최대전단강도보다 큰 주입후 최대전단강도가 나타나다가, 주입두께가 커질수록 최대전단강도가

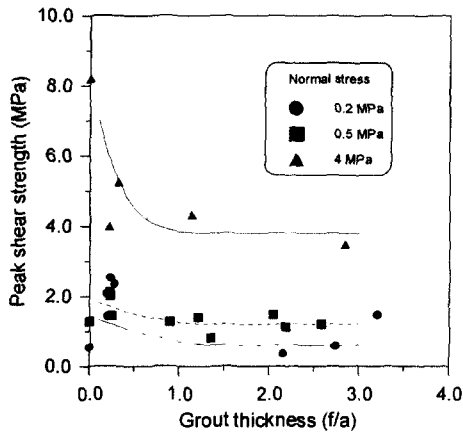


Fig. 25. Effect of grout thickness on the peak shear strength of microcement grouted granite joint.

감소하였으며, 수직응력이 클 경우에는 주입후의 최대전단강도는 지수함수적으로 감소되는 현상이 나타났다. 수직응력이 작을 경우 최대전단강도가 주입전보다 주입후에 크게 나타나는 현상은 주입재의 수화현상으로부터 생긴 점착력으로 인하여 발생하는 것으로 판단되며, 시험결과 주입두께대 거칠기평균진폭의 비가 1.5정도에서부터 수렴되는 현상이 나타났다. 시멘트주입후의 결과도 마이크로시멘트의 결과와 유사하며, 마이크로 시멘트의 수화과정과 재료의 특성이 거의 시멘트와 유사하기 때문에 전체적인 전단변형특성은 시멘트와 비슷한 결과를 나타내었다.

Fig. 26부터 Fig. 28까지는 마이크로시멘트 주입후 실시한 전단시험결과로서, 주입두께와 잔류전단강도, 전단강성, 최대팽창각의 관계를 나타낸 것이다. 잔류전단강도는 앞선 수직응력과 관계에서 살펴본바와 같이 직접적인

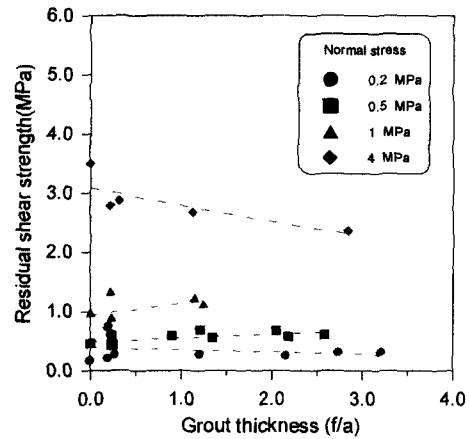


Fig. 26. Effect of grout thickness on the residual shear strength of microcement grouted granite joint.

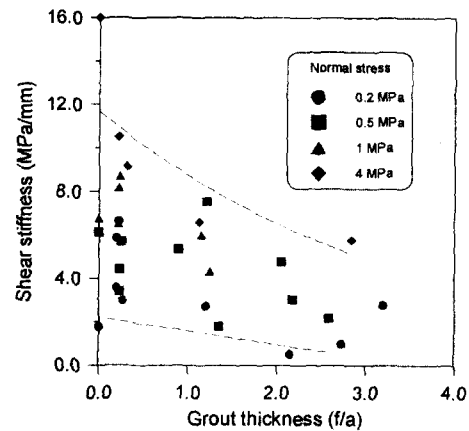


Fig. 27. Effect of grout thickness on the shear stiffness of microcement grouted granite joint.

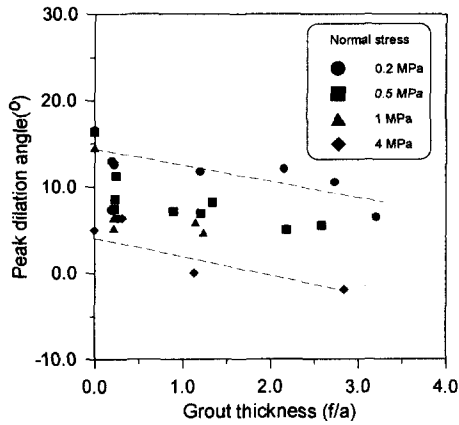


Fig. 28. Effect of grout thickness on the peak dilation angle of microcement grouted granite joint.

주입두께와의 관계를 확인할 수 없었으나 전단강성은 주입두께가 증가할수록 분산은 심하나 감소하는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 일반적으로 전단강성이 최대전단강도와 직접적인 상관성을 가지고 있으므로 주입두께가 증가할수록 최대전단강도가 작아지는 현상이 반영된 것으로 판단된다. 최대팽창각의 경우에도 주입두께가 커질수록 거의 선형적 감소하는 것으로 나타나 모형절리의 시험결과와 거의 유사한 경향을 나타내었다. 이는 주입재의 두께가 거칠기평균진폭보다 큰 경우에는 전단변형이 발생한다고 해도 암석과 암석사이에서 파괴면이 형성되지는 않으며 주입재와 암석사이에서 파괴면이 형성되어 전단변형에 의해 파괴된 주입재가 암석의 거친면 사이에 끼어 실제적으로 거칠기의 감소효과를 나타내게 되기 때문이다. 그러므로 절리면내에 주입된 주입두께가 커지고 수직응력이 커질수록 팽창각도 감소하는 것으로 판단된다.

6.3 주입후 암석절리의 전단파괴식

본 연구에서는 주입후 절리면의 직접전단시험으로부터 얻어진 변형특성으로부터 충전절리면에서 사용하는 주입두께대 거칠기평균진폭비의 개념을 도입하여 절리면의 파괴식으로 가장 많이 적용되고 있는 Barton의 식을 기초로 주입후 절리면의 최대전단강도식을 유도하였다. 주입후 절리면의 파괴는 주입재에서 발생되었으므로, 주입후 절리면의 파괴식에서는 Barton식에서 사용되는 절리면압축강도가 주입재의 강도로 바뀌게 되며 기본마찰각도 주입재와 편평한 절리면시료의 접촉면에 대한 전단강도시험에서 구한 마찰각으로 바뀌게 된다. 또한 전단면에 주입

재의 수화현상으로 인한 점착력이 파괴식에 고려해야 하며, 실제 접촉면의 유효거칠기를 감소시키는 인자로 작용하는 것으로 판단되는 주입두께대 절리면평균진폭의 비를 고려하여 Barton의 식에 팽창각의 감쇠를 보정하는 항을 첨가하여야 한다. 이로부터 주입후 절리면의 최대전단강도에 대한 다음과 같은 경험식을 유도하였다.

$$\tau_p = c_i + \sigma_n \tan \left[ \phi_{bi} + \alpha \frac{A}{F} \log(GCS/\sigma_n) \right]$$

여기서

$c_i$  = 절리면과 주입재 접촉면의 점착력

$\sigma_n$  = 절리면에 작용하는 수직응력

$\phi_{bi}$  = 편평한 절리와 주입재 사이의 접촉면마찰각

F = 주입두께와 관련된 팽창 감쇠함수

GCS = 주입재의 단축압축강도

$\alpha$  = 시험상수

(절리면 거칠기 및 절리면압축강도와 관련된 보정상수)

A = 절리면 거칠기 파라미터

(본 연구에서는 평균거칠기  $i_{ave}$ )

일반적으로 팽창각의 감쇠는 주입두께가 두꺼울수록 커지게 되며, 이에따라 Fig. 29에서는 주입두께에 대한 팽창각성분의 감소현상으로부터 유효거칠기감쇠함수를 유추해 보았다.

팽창각의 감쇠함수가  $\exp(f/a)$ 로 해석되었을 경우, 다른 함수에 비하여 팽창성분의 감소양상이 시험결과와 유사함을 확인할 수 있으며 이로부터 충전두께에 따른 거칠기감쇠함수를 주입두께의 지수함수식으로 표현할 수 있는 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 주입두께와 팽창각의 관계를 지수함수의 역으로 고려하여 팽창각의

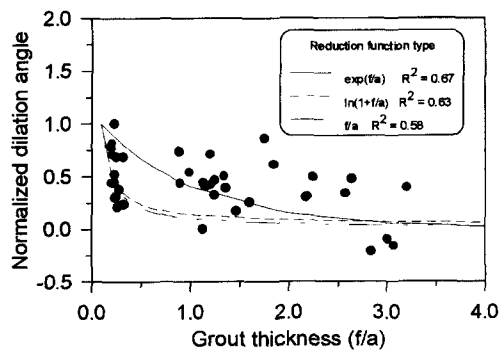


Fig. 29. Comparison of function type for dilation component.

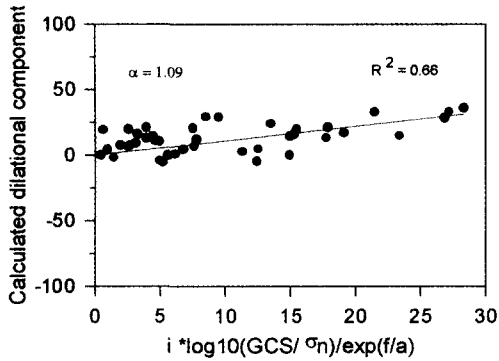


Fig. 30. Comparison of calculated and measured dilation component.

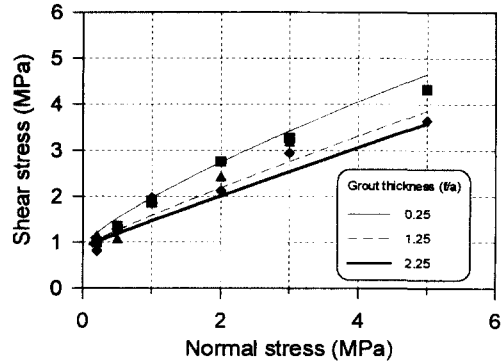


Fig. 32. Failure envelope calculated by suggested empirical equation compared with the measured values.

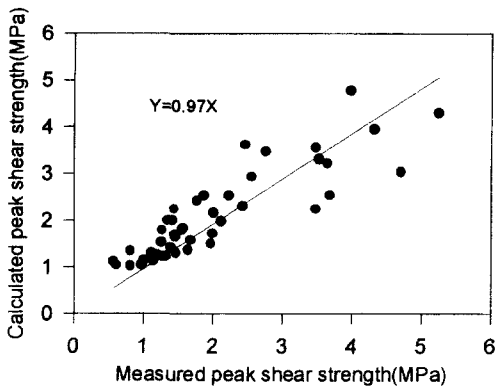


Fig. 31. Peak shear strength calculated by suggested empirical equation compared with the measured values (Hwangdeung granite).

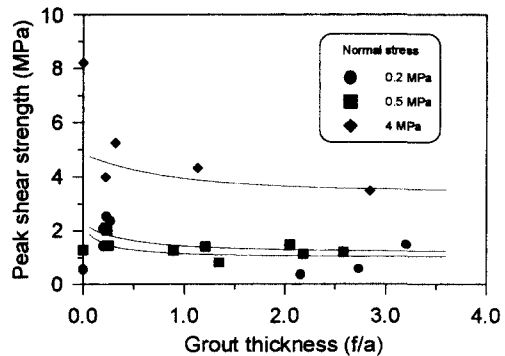


Fig. 33. Comparison of calculated peak shear strength of cement grouted joint with the measured values ( $i_{ave} = 17, \alpha = 1.09$ ).

감쇠함수를 주입두께대 절리면평균진폭비의 지수함수로 표시하였다. 식에서 시험상수  $\alpha$ 는  $\log(\sigma_g/\sigma_n) * A/F$ 과  $[\tan^{-1}((\tau-C)/\sigma_n) - \phi_g]$ 의 관계에서 구한 직선의 기울기로 결정한다. Fig. 30은 화강암에 대한 시험상수를 구한 예로서, 시험상수  $\alpha$ 는 1.09로 나타났다.

Fig. 31에서는 이렇게 구한 화강암 전체시료에 대한 시험결과와 식으로부터 구한 최대전단강도값을 비교한 그림이다. 제시된 전단강도경험식이 시험결과를 비교적 양호하게 나타내는 것을 확인 할 수 있지만, 수직응력이 낮은 경우에는 계산값이 약간 크게 나타나는 경향이 있다.

Fig. 32에서는 식으로부터 유도된 주입후 절리면의 파괴식을 수직응력에 대하여 도시하였다. 이 곡선은 실제 시험결과와 거의 유사하게 나타나나 수직응력이 높고 주입두께가 작은 부분에서는 계산값과 실험값이 약간 차이가 나는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 절리면의 거칠기가 비슷한 시편을 이용하여 같은 두께로 주입하였다고

해도 실제시편의 주입두께대 절리면평균진폭비는 차이가 있으며 이러한 차이로부터 시험결과와의 오차가 발생하는 것으로 판단된다. 대리석시료에 대한 분석결과 대리석시료의  $\alpha$ 값은 1.25로 나타났으며, 이 수치는 대리석과 화강암의 압축강도차이와 거칠기파라미터를 보정하는 보정값의 기능을 한다.

상기 제시된 식으로부터 평균거 각을 17로 가정하고 마이크로 시멘트현탁액을 주입한 :침강암시료의 주입두께에 대한 최대전단강도는 Fig. 33과 같이 나타났다. 이 그림에서, 제시된 파괴식으로 구한 곡선을 실험결과와 비교하면 약간의 차이를 보여주고 있으나, 거의 유사한 거동을 나타내는 것으로 계산되었으며, 이 차이는 시험결과에 적용한 절리면의 거칠기가 각 시료마다 약간씩 틀리기 때문에 일어난 현상으로 판단된다.

일반적으로 충전된 절리면의 파괴식은 주입두께대 절

리면평균진폭비의 쌍곡선함수식이나 지수함수식으로 표현되고 있는데, 본 연구결과로 제시된 파괴식에 의한 변형곡선의 전체적인 형상을 주입두께대 절리면평균진폭비로 표시한 시험결과와 비교해보면 거의 유사하게 나타나고 있으므로 이 파괴식은 주입후 절리면의 파괴식으로 적용 가능한 것으로 판단된다.

본 연구에서 얻어진 시험결과는 암석시료의 압축강도가 주입재의 강도보다 매우 큰 경우로, 암반내 절리면이 풍화되지 않은 신선한 경우에 적용될 수 있으며, 따라서 향후 절리압축강도가 주입재의 압축강도보다 작은 경우에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 주입후 절리면의 전단특성이 주입재의 특성에 직접적인 영향을 받으므로 주입재의 특성과 주입후 절리의 전단거동과의 관계에 대한 연구가 이루어져야 하며, 절리간극이 매우 작은 경우에 대한 부가적인 연구가 이루어지면 보다 정확한 주입후 절리의 파괴식을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

## 7. 결 론

본 연구에서는 주입에 의한 암석절리면의 수직압축특성과 전단특성의 변화를 규명하기 위하여 신선한 암석절리에 시멘트현탁액주입을 실시한 후, 절리압축시험과 직접전단시험을 실시하였다. 이상의 연구에서 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 시멘트현탁액을 주입한 절리의 수직압축시험결과, 수직응력이 작은 초기단계에서는 비교적 선형적인 변형을 나타내었으나 수직응력이 커짐에 따라 수직변형이 급격하게 증가하였다. 이러한 현상은 절리의 엷물림 정도와는 관계없이 비슷하게 나타났으며, 주입후 수직응력 2 MPa까지의 수직변형량은 주입전의 1/10 정도로 감소하였다.

2) 절리의 엷물림 정도를 달리하여 마이크로시멘트 현탁액을 1 mm 주입한 후 수직압축곡선을 구한 결과, 절리가 맞물린 경우보다 엷물린 경우에 수직응력에 대한 변형이 크게 발생함을 확인하였다.

3) 모형절리에 대한 주입후 절리면의 전단시험결과, 주입두께대 거질기평균진폭비( $f/a$ )에 대한 최대전단강도의 변화양상은 점토광물등으로 충전된 절리면의 전단거동과 유사한 전단거동을 나타내었다. 그러나 수직응력과 주입두께가 작을 경우에는 주입재의 수화로부터 발생한 점착력에 의해 주입전보다 주입후 절리의 최대전단강도가 크게 나타났다. 주입후 잔류전단강도는 주입두께가 커질수록

감소하였으며, 전단강성과 최대팽창각 또한 감소하는 것으로 나타났다.

4) 주입후 절리전단시험결과, 절리면의 파괴는 대부분 주입재와 절리면사이 접촉면에서 발생하였다. 주입후 최대전단강도는 수직응력이 작을 경우 주입전보다 크게 나타나다가 수직응력이 점차 커짐에 따라 주입전에 비해 작아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 주입전 절리의 전단파괴식은 주입후 1 MPa내외의 점착력을 가지는 곡선형태의 파괴식으로 변화하였으며 주입두께가 커질수록 주입후 절리면의 최대전단강도가 작아지는 것으로 나타났다.

5) 주입후 단일암석절리의 전단강성은 수직응력이 0.2 MPa인 경우, 주입전보다 크게 나타났으나 수직응력이 0.5 MPa 이상에서는 주입전보다 작아지는 것으로 나타났다. 또한 주입후 최대팽창각은 주입전 절리면에서의 결과와 유사하게 수직응력이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났다.

6) 주입후 단일암석절리의 최대전단강도는 주입두께가 커질수록 작아져 일정값에 수렴하는 경향을 나타내었으나, 잔류전단강도는 주입두께와의 상관성을 확인할 수 없었다. 또한 전단강성과 최대팽창각은 분산은 심하나 주입두께가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다.

7) 주입후 절리면의 최대전단강도에 대한 다음과 같은 경험식을 유도하였다.

$$\tau_p = c_i + \sigma_n \tan \left[ \phi_{bi} + \alpha \frac{A}{F} \log(GCS/\sigma_n) \right]$$

본 연구결과는 절리간극이 비교적 크고 절리면이 신선한 경우에 해당되므로, 절리압축강도가 주입재의 압축강도보다 작은 경우 및 절리간극이 매우 작은 경우에 대하여는 향후 추가연구가 수행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

1. 대우건설기술연구소, 1988, 지반개량을 위한 그라우팅공법에 관한 연구, 142-170.
2. 석탄산업합리화사업단, 1997, 폐광지역 지반침하 메커니즘 및 집하방지 공법에 관한 연구, 106-282.
3. Raymond J. Kriezek and Cumaraswamy Vipulanandan, 1985, Evaluation of Adhesion in Chemically Grouted Geomaterials, ASTM Journal, 8. 4, 184-190.
4. Cheng Y., 1987, New Development in Seam Treatment of Feitsui Arch Dam Foundation, Proc. of 6th Int. Cong. on Rock Mechanics, Montreal, Vol. 1, 319-326.
5. Natau O., Mutschler Th. and Stech H. J., 1995, Experimental Quantification of the Stabilizing Effect of

Polyurethane and Silicate Resins, Proc. of 8th Int. Cong. on Rock Mechanics, 645-651.

6. Szwedzicki T., 1990, Mechanical Properties of Strengthened Rock Joint, Proc. of Mechanics of jointed and faulted rock, 905-911.
7. Srivastava R.K., Jalota A. V. and Amir A.A.A., 1990, Shear Behaviour of Cement Grout Filled Artificially Created Planer Joint, Proc. of Rock Joints, 309-315.
8. 정형식, 이승호, 1990, 신선한 화강암 절리면에서 약액에 의한 전단강도의 변화에 대한 연구, 대한토목학회 논문집, 10. 3, 99-106.
9. Lee S.D., Lee C.I., Park Y., 1997, Characterization of Joint Profiles and Their Roughness Parameters, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 34. 3-4, paper No. 174.
10. ISRM Commission on Testing Methods, 1981, Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Mass, Rock Characterization Testing and Monitoring, Pergamon Press, 3-52.
11. Bandis S.C., 1990, Mechanical Properties of Rock Joint, Proc. of the Int. Conf. on Rock Joints, 125-140.
12. Barton N. and Choubey V., 1977, The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mech. 10, 1-54,
13. Papaliangas T., Hencher S.R., Lumsden A.C. and Manolopoulou S., 1993, The Effect of Frictional Fill Thickness on the Shear Strength of Rock Discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30. 2, 81-91.
14. Phien-wei N., Shrestha U.B. and Rantucci G., 1990, Effect of Infill Thickness on Shear Behavior of Rock Joints, Proc. of the Int. Conf on Rock Joint, 289-294.

**김 태 혁**



1992년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1994년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 02-3485-3535  
 E-mail : shykth@unitel.co.kr  
 현 재 (주)대본엔지니어링 터널팀 과장

**이 정 인**



1963년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사  
 1965년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사  
 1974년 일본 동북대학 대학원 자원공학과, 공학박사

TEL : 02-880-8708  
 E-mail : cilee@plaza.snu.ac.kr  
 현 재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 교수