

절리 암반물성의 크기효과 및 그 적용에 관한 연구

A Study on Scale Effects in Jointed Rock Mass Properties,
and Their Application

김 창 용*1
Kim, Chang-Yong
문 현 구*2
Moon, Hyun-Koo

Abstract

This study has the assumption that scale effects in rock mass properties are attributed to the discontinuous and inhomogeneous nature of rock masses. In order to escape the general equivalent material approach applied to the concept of representative volume element, this study presents the new method considering irregular joint geometry and arbitrary numbers of joint and arbitrary joint orientations. Based on the theoretical approach, this theory is applied to a real engineering project. Showing the property variations with varying size of rock mass element, various numerical experiments about scale effect are conducted.

Particularly, to prove the adequacy of the verification process in scale effect with numerical method, and to investigate the detailed source of scale effect, 4 models with increasing number of joints are tested. On the basis of the experimental results, the test results of scale effects in 3-D rock mass are presented. From these experiments the effects of the mechanical properties of rock joints on the scale effects in rock mass strength and elastic constants are discussed. To verify the mechanism of scale effects in jointed rock mass, two models with different joint geometries are studied.

요 지

본 논문은 절리 암반물성의 크기효과가 암반의 불균질성 및 불연속성에 기인한다고 가정하였다. 이를 위해 대표체적요소의 개념이 적용되는 일반적인 등가물성이론을 탈피하여 불규칙적인 절리기하와 임의의 절리수 및 임의의 절리 방향성을 고려할 수 있는 등가물성이론에 대해서 연구하였다. 이론적인 연구를 바탕으로 이 이론을 실제 문제에 적용한 결과 암반요소의 크기에 따라 달라지는 물성 변화를 관찰하고, 크기효과에 관한 여러 가지 연구를 수행하였다.

특히, 수치해석적인 방법으로 크기효과를 증명하는 과정의 타당성을 입증하고, 크기효과의 구

*1 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

*2 정희원, 한양대학교 공과대학 지구환경건설공학부 부교수

체적인 원인을 알아보기 위해서 4개의 모델에 대해서 전산실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 증명된 내용을 토대로 실제 3차원 구조물을 대상으로 크기효과 실험을 수행하였다. 이 실험 과정에서 절리의 여러 역학적인 성질들이 암반강도 및 탄성계수의 크기효과에 미치는 영향을 관찰해 보았다. 또 크기효과가 특정 절리구조에서 발생하는 것이 아니고 절리를 포함하는 모든 경우에서 발생됨을 증명하기 위해 절리 구조가 다른 두 모델을 대상으로 크기효과 실험을 수행하였다.

Keywords : Scale effect, Representative volume element, Equivalent properties

1. 서론

공학적인 측면에서 관찰 대상의 크기에 따라 달라지는 물리적인 특성을 통상 치수효과 또는 크기효과(scale effect)라는 개념으로 표현한다. 이 크기효과는 여러 가지 원인으로 설명될 수 있지만 암반을 대상으로 할 때, 가장 크게 영향을 미치는 요인으로는 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면의 존재로 인한 암반의 불균질성과 불연속성을 들 수 있다. 기계 재료 및 금속 재료와 같이 가공시 재료의 균질성과 연속성이 보장되는 경우와는 달리 암반은 생성 당시의 구조적 및 물리적 조건 때문에 수 많은 불연속면을 포함하고 있다. 많은 연구자들에 의해서 대상 암반의 크기변화가 물성 변화와 어떤 연관성이 있다는 관점에서 연구가 계속 진행되고 있다(문현구, 1991; Amadei, 1981; Duncan, 1968).

한편, 실제 공학적인 스케일의 현장 암반 물성을 예측 또는 측정하기 위한 여러 가지 방법과 실험이 시도되고 있다. 현장암반의 물성을 예측하기 위한 방법으로는 크게 세가지가 있을 수 있다. 첫째는 현장의 여러 지점에서 그리고 여러 방향에서 채취된 시편들을 실험실에서 시험하여 이들의 통계적인 수치를 암반의 물성으로 사용하는 방법이 있을 수 있다. 이 방법은 자료의 수가 아주 많을 경우에 암반 전체를 평균적인 물성으로 대표할 수는 있다는 장점이 있지만, 하나의 통계적인 물성치로 실제 암반의 거동을 예측한다는 것은 현실적으로 불가능하다. 둘째 방법은 현장암반을 직접 실험하는

방법이다. 이 방법은 실험대상 암반에 대해서는 암반물성을 정확하게 측정할 수 있지만, 암반을 대상으로 직접 실험한다는 것이 무척 힘들고 또 비용이 많이 들게 된다. 또한 대상 영역이 넓어질 경우 그에 따라 암반물성도 변하게 되고, 한 지역에서 측정된 수치를 다른 지역에 적용한다는 것이 어렵기 때문에 모든 경우를 실험해야 한다는 단점이 있다. 셋째는 위와 같은 실험적인 방법의 단점을 보완하고, 간편한 몇가지 실험 결과로부터 암반물성을 예측할 수 있는 방법으로서 등가물성이론을 들 수 있다(Moon, 1987). 이 방법은 현장에서 채취된 절리와 암석 시편을 이용하여 실험실에서 이들 각 암반 구성 성분의 물리적인 특성(절리의 수직 및 전단강성을, 점착력, 마찰각 등)을 측정할 수 있다면 전체 암반의 역학적인 성질들을 예측할 수 있는 방법이다. 이 방법은 암반물성에 영향을 미치는 여러 요인 중 절리가 미치는 영향을 가장 크게 보기 때문에 절리의 기하학적 및 역학적 특성 변화를 충분히 고려할 수 있는 이론이다. 따라서 절리의 수와 절리구조 변화에 관계없이 암반의 물성을 예측할 수 있다는 장점이 있다. 암반물성의 측면에서 이러한 여러 방법들은 각각 크기효과를 보여주고 있다. 첫째 실험실 시험의 경우 현장에서 채취된 시편을 크기 별로 분류한 결과 시편의 크기가 커질 수록 물성이 감소한다는 여러 실험 결과가 보고된 바 있다(Exadaktylos, 1993; Ringstad, 1993). 둘째 현장실험의 경우는 실제로 여러 지역에서 수행된 현장 실험결과 자료를 기준으로 실험 대상의 크기 별로 분류한 결과

크기효과가 관찰되었다는 보고도 있었다(He, 1993). 셋째 등가이론에서의 크기효과는 절리와 같은 불연속면에 암반의 이방성 및 불균질성에 원인을 두고 있다는 의견이 지배적이다(Moon, 1993).

등가물성이론에서 각 절리의 역학적 특성들은 실험실에서 절리시편을 시험함으로써 구할 수 있다. 또 절리 사이에 존재하는 암석물성도 실험실 시험으로부터 구할 수 있다. 각 암반 구성 성분들의 역학적 특성이 결정되면 대상 암반의 역학적 특성이 결정될 수 있다. 결정된 암반의 평균적인 물성이 암반요소 각각에 적용될 경우 이를 대표체적요소(RVE: representative volume element)라고 하고 이 때는 암반 전체를 등가 균질체로 가정하게 되어 전혀 크기효과를 관찰할 수 없다. 그러나 실제 현장 암반은 어느 정도의 크기효과를 항상 포함하고 있고, 지역 혹은 위치에 따라서 물성을 달리하게 된다. 따라서 이런 측면을 고려해서 암반물성을 예측하는 방법으로는 실제 절리구조의 불연속성과 불균질성을 고려할 수 있는 이론이 되어야 한다.

본 연구에서는 위와 같은 가정을 고려하기 위해서 불규칙적이고 비주기적인 절리기하와 임의의 절리 방향성 및 갭수를 고려할 수 있는 등가 이론을 연구하고 이를 실제 절리 암반 모델에 적용시켜 보았다. 특히 이 과정에서 요소의 크기에 따라 달라지는 물성 변화를 관찰하고, 이 크기효과에 대해서 중점적으로 연구하였다. 먼저 여러 문헌을 참고로 크기효과의 발생 원인(source mechanism)에 대해서 검토해 보았다. 또한 이 이론을 실제 모델에 적용하기 전에 수치해석적인 측면에서 암반물성의 크기효과를 증명할 수 있는 모델을 설정하고, 이 모델을 대상으로 여러 가지 크기효과 원인에 대한 수치해석적 실험을 수행하였다. 특히 이 실험에서는 통계적 분석의 편의성을 위해서 크기가 동일한 블럭을 일정한 수 만큼 분할하여 각 블럭의 평균 물성치를 구하고 이를 이용해 크기효과를 증명하고자 하였다. 증명된 수치해석

적 크기효과를 기반으로 실제 현장에서 측정된 절리 구조를 재현하여 실험하였다. 먼저 절리 암반의 물성에 영향을 미치는 여러 변수들의 변화가 크기효과에 미치는 영향을 관찰하기 위해서 여러 실험을 수행하였다. 그리고 크기효과가 어느 특정한 절리 구조에 의해 생기는 것이 아니라 일반적인 절리 구조에 의해서 생김을 증명하기 위해서 두 가지 서로 다른 절리 구조를 대상으로 크기효과에 관한 실험을 수행하였다.

2. 크기효과의 원인

절리 암반의 물성에 있어 크기효과의 원인을 암반의 불연속성과 불균질성으로 가정할 경우는 암반내에 포함되는 균열과 절리의 영향을 고려할 수 있는 이론이 필요하다. 이러한 관점에서는 다음과 같은 5개 그룹으로 문헌을 분류할 수 있다(Moon & Kim, 1993).

1) Walsh(1965), Walsh와 Brace(1967), Horii와 Nemat-Nasser(1983), Kemeny와 Cook(1986)등의 연구에 따르면, 균열을 포함하고 있는 물체의 탄성계수 및 강도는 균열 밀도가 증가할 수록 감소한다는 결과를 제시하였다. 따라서 균열밀도가 암석시편의 크기가 증가할 수록 커지면, 전체 물성은 크기효과를 보이게 된다는 것이다. 이러한 이론적인 내용은 Exadaktylos와 Tsoutrelis(1993)의 인공절리면을 갖는 대리석 시편에 대한 단축 압축 강도 실험과 Ringstad(1993)의 hollow cylinder 실험에 의해서 크기효과가 증명된 바 있다.

2) Glucklich와 Cohen(1967, 1968), Einstein(1970)은 크기효과를 설명하기 위해서 균열진전의 에너지개념을 적용하였다. 요점은 불안정 균열진전은 변형률에너지를 많이 포함할 수 있는 큰 시편에서 일어나기 쉬운 반면 안정 균열진전은 시편 크기와 무관하다는 것이다. 기존의 균열이나 단단한 입자에 의해서 생기는 운동에너지는 균열성장을 가속시키고, 파괴응력을 낮추는 효과를 일으킨다. 따라서 크기에

따라 균열 밀도변화가 없더라도 균열을 포함하는 암석의 크기가 증가하면 강도는 감소한다.

3) Brown(1971)과 Pariseau(1979)는 시험편의 응력구배와 응력 불균질성이 크기효과를 일으킨다는 견해를 제시했다. 암석 자체를 실험실에서 실험할 경우 암석과 시험기 철판 사이의 직경 및 물성이 일치하지 않기 때문에 응력 불균질성이 생긴다는 것이다. 이러한 응력 불균질성은 암석 자체가 균질할지라도 크기효과를 일으키게 된다.

4) Bandis(1980), Harrison과 Goodfellow(1993)는 절리의 전단강도와 변형특성에서의 크기효과를 연구하였다. 그 결과 크기효과는 모델의 크기가 커짐에 따라 표면돌기(asperity)의 크기 변화와 절리의 거칠기와 같은 절리 표면의 형태학적인 특성 변화에 기인한다는 결론을 얻었다. 상대적으로 평평한 절리의 거동이 실제로는 크기효과와 무관하다는 것이 특징적인 내용이다. Archambault(1993)에 따르면 암반의 전단강도는 시험이 커짐에 따라 절리면의 파손이 많아지고 이는 상대적으로 암반의 응력구배가 적어짐에 따라 전단강도가 낮아지는 크기효과를 보인다는 결론을 얻었다.

5) Duncan과 Goodman(1968), Singh(1973), Amadei와 Goodman(1981)은 직교 절리군을 갖는 암반에 대한 등가 탄성계수를 구하였다. 암반물성이 암석물성과 다른 변수는 절리간격, 빈도 및 각 절리의 수직 및 전단강성율이다. 총상암반의 등가 탄성계수는 Salamon(1968), Gerrard(1982 a)등에 의해 연구되었고, 이 때 암반은 등가균질체로 간주하였다. Gerrard(1982 b)는 3개의 직교절리군을 갖는 암반에 이 등가물성이론을 적용하였다. 이 때 절리를 일정한 두께를 갖는 암층으로 간주하였다. 따라서 절리의 탄성특성과 상대적 절리 두께가 암반물성을 변화시킬 수 있는 주요 변수가 된다.

따라서, 균열 및 절리 밀도 그리고 절리의 표면특성이 암석의 크기에 따라 변하기 때문에 균열을 포함하는 암석이나 절리 암반에서 크기

효과가 존재하게 된다. 그러나 주어진 균열 및 절리기하와 물성에 대해서, 등가물성측면의 접근은 크기효과와는 관계없게 된다. 이는 대상체가 등가균질체로 바뀌기 때문이다. 대표체적요소(RVE) 개념이 이 등가물성측면의 근간이 되는 가정이다. 이는 전체 암반이 동일한 RVE로 구성된다는 것이다. 일단 RVE의 물성이 결정되면, 이는 크기효과를 보이지 않는 전체 물성을 대표하게 된다. 절리 암반에서는 이러한 RVE개념이 규칙적이고 주기적인 절리 구조나 완전 무작위적인 구조로 표현되지만 이러한 접근 방법은 암반물성의 크기효과와는 무관한 결과를 초래하게 됨으로서 실제적인 절리 구조와 암반의 불균질성을 표현하기 위해서는 불규칙적이고 비주기적인 절리 기하와 임의의 방향성과 갯수를 고려할 수 있는 등가물성이론이 필요하다.

본 연구에서는 등가물성에 대한 새로운 이론적 배경을 설명하고 위의 문헌에 제시된 여러 측면의 내용 중 크기효과가 절리의 방향성, 밀도, 빈도, 요소의 크기, 절리의 특성등과 같은 변수에 의해서 어떤 영향을 받는지에 대해서 여러 각도의 연구를 시도하였다. 또한 관찰된 크기효과와 원인에 대해서도 고려해 보았다.

3. 이론적 고찰

3.1 탄성특성

만약 대상 암반이 절리와 암석 등 N개의 구성성분으로 이루어져 있으면, 응력과 변형률 전체 평균은 Hill의 정의에 의해서 각 상(phase)의 체적분율과 국부평균응력과 변형률로 표현될 수 있다(He, 1993).

$$\{\sigma\} = \sum f^{(p)} \{\sigma^{(p)}\}, \text{ 그리고 } \{\epsilon\} = \sum f^{(p)} \{\epsilon^{(p)}\} \quad (1)$$

여기서, f 는 각 상(p)의 체적분율, $\sigma^{(p)}$ 와 $\epsilon^{(p)}$ 는 각 상(p)에서의 국부평균응력 및 변형률을 나타내고, Σ 는 물체내의 모든 상의 합을 나타낸다. Hooke버치에 따라 국부평균응력과 변형률사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\{\varepsilon^{(p)}\} = [M^{(p)}]\{\sigma^{(p)}\} \quad (2)$$

여기서, $[M^{(p)}]$ 는 6×6 의 국부 compliance 행렬이다. 절리를 암석에 포함된 연약층으로 간주한다. 국부평균응력 및 변형률은 다음과 같은 응력과 변형률의 전체 평균 및 편차로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \{\sigma^{(p)}\} &= \{\sigma\} + \{\delta\sigma^{(p)}\} \\ \{\varepsilon^{(p)}\} &= \{\varepsilon\} + \{\delta\varepsilon^{(p)}\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\{\delta\sigma^{(p)}\}$, $\{\delta\varepsilon^{(p)}\}$ 는 6×1 의 응력 및 변형률 편차행렬이다. 비록 편차성분은 모두 미지의 값이지만, 문제를 풀 수 있는 두가지의 중요한 특성을 갖는다.

1) 3개의 응력 편차(절리면의 수직 방향으로 한개의 수직과 두개의 전단 성분)는 힘평형조건에 의해 사라지게 된다. 3개의 변형률 성분 중, 절리면과 평행한 방향에서 2개의 수직성분과 한개의 전단 성분은 변위 경계조건에서 변형률 적합조건에 의해서 사라지게 된다.

2) 6개의 편차성분이 미지수로 남게 되지만, 그들을 대상체 전체에 평균할 경우 사라지게 된다. 만약 2축이 절리평면과 수직이면, 1), 2)는 다음과 같은 6개의 식으로 구어진다.

$$\begin{aligned} \sum f^{(p)} \delta\sigma_1^{(p)} &= 0, \quad \sum f^{(p)} \delta\sigma_3^{(p)} = 0 \\ \sum f^{(p)} \delta\tau_{13}^{(p)} &= 0, \quad \sum f^{(p)} \delta\varepsilon_2^{(p)} = 0 \\ \sum f^{(p)} \delta\gamma_{12}^{(p)} &= 0, \quad \sum f^{(p)} \delta\gamma_{23}^{(p)} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

식(2), (3)이 6개의 미지 편차를 구하기 위해 사용된다. 식(4)는 전체응력, 변형률 평균 사이의 관계를 구하기 위해 사용된다. 이렇게 해서 1개의 절리를 갖는 암반의 compliance를 구하게 된다. 자세한 과정은 Moon(1987)의 논문에 유도되어 있다. 암반이 상이한 방향성을 갖는 여러 절리를 포함할 경우는 원하는 구조가 재현될 때까지 순차적인 방법으로 삽입, 회전하여 분석한다. 이 때 등가 탄성계수행렬은 새로운 절리가 삽입될 때마다 달라진다.

이론을 증명하기 위해서 문헌구(1990)의 논문에서 제시된 불연속 절리 구조를 대상으로 실험하였다. 이 모델은 $5m \times 5m$ 영역에 총 186개의 절리를 포함하고 있다. 절리의 두께는 $1cm$ 이고 주향은 Z축과 일치하도록 가정하였다. 이

들 절리는 총 4개의 절리군으로 나뉘어져 있고, 탄성특성은 $E=65GPa$, $G=27GPa$, $\nu=0.2$ 로 사암의 물성을 사용하였다(그림 1). 암반의 탄성특성은 먼저 (2), (3), (4), (1)순으로 삽입하여 분석하였다. 그림 2는 절리의 shear stiffness변화에 따른 암반의 등가 전단강성률

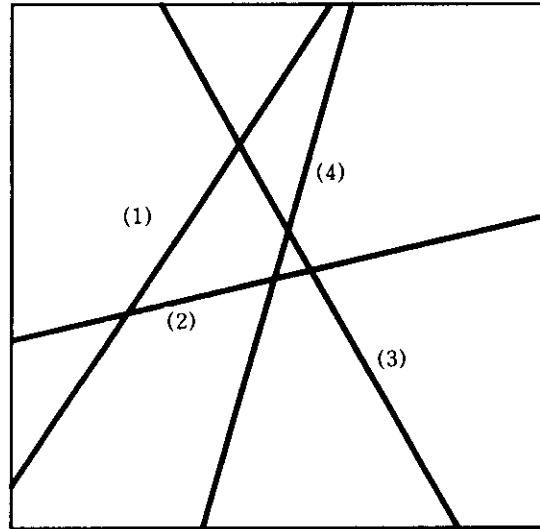


그림 1. 4개의 주 절리군을 포함하는 암반

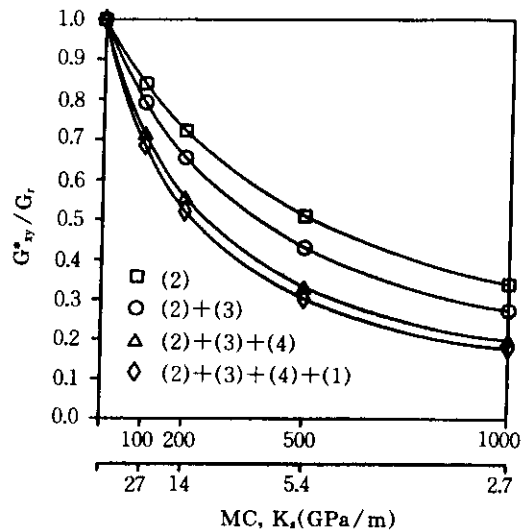


그림 2. 탄성대비(MC)에 따른 절리암반의 등가 전단강성률의 변화

의 변화를 보여주고 있다. 암반이 2번 절리군만을 포함할 경우 등가 전단강성율은 암석전단강성률의 84%에서 34%까지 떨어졌다. 등가 전단강성율의 범위는 절리가 모델에 계속 중첩될 수록 감소하는 경향을 보였다. 최종 186개 절리를 포함할 경우 절리의 shear stiffness에 따라 등가 전단강성율은 18%~68%까지로 감소하였다. 이 실험 결과 영율과 같은 다른 등가 탄성계수들도 비슷한 경향을 보여주었다. 영율의 경우 암석의 20%까지 감소되었다. 결과적으로 2번 절리군에 의해서 이방성이 가장 두드러지게 나타남을 알 수 있었다.

3.2 강도특성

규칙성과 주기성이 없는 절리암반의 경우에 여러 절리들에 의한 이방축의 결정은 매우 어렵다. 이런 상황에서 이방성 파괴조건식은 무의미하게 된다. 이방성 파괴조건식을 사용할 수 있는 방법은 사용자가 설정한 좌표계에서 암반강도를 결정하는 것이다. 이 방법은 응력이 계산되는 모든 체적 요소 각각에 대해서 강도가 계산되어야 한다는 단점이 있다. 만약 절리암반이 수치해석을 위해서 여러 크기의 요소로 나뉘면, 9개 강도 성분은 각기 다른 방향성과 물성을 갖는 각 요소에 대해서 측정되어야 한다(문현구, 1993).

일반적으로 암반의 강도에 영향을 미치는 요인으로는 점착력, 마찰각, 불연속 절리의 방향성 등을 들 수 있다. 먼저 절리의 점착력은 절리의 거칠기, 표면돌기, 충전재, 암교(rock bridge) 등과 같은 요인에 의해 영향을 받는다. 암교의 영향을 고려한 분리도(degree of separation, k)의 개념은 다음과 같은 식으로 쓸 수 있다(Lajtai, 1969).

$$\begin{aligned} 1) \quad k=1 : c_j &= c, \\ 2) \quad 0 \leq k < 1 : c_j &= (1-k)R_0. \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, c_j 는 절리점착력, c_s 는 외견점착력, k 는 분리도로서 R_0 는 암석 및 암교의 전단강도이다. 두번째로 절리 마찰각은 암석 구성광물

의 마찰특성과 절리면의 거칠기 및 강도로 표현할 수 있다(He, 1993).

$$\phi_j = \phi_0 + JRC \log(JCS/\sigma_n) \quad (6)$$

여기서, ϕ_j 는 절리 마찰각, ϕ_0 는 기본 마찰각, JRC는 거칠음 계수, JCS는 절리벽의 압축강도로 쓸 수 있다. 세번째로 절리 방향성은 주향과 경사로 정의된다. 3차원에서 절리 평면식은 다음과 같이 정의한다.

$$(x-x_0) + (y-y_0)\sin\alpha_j\sin\beta_j - (z-z_0)\cos\alpha_j\cos\beta_j = 0 \quad (7)$$

여기서, x축은 수직하방, y축은 정북, z축은 정동, 주향 α_j , 경사 β_j 이고 (x_0, y_0, z_0) 는 절리가 측정되는 지점의 좌표이다. 먼저 (7)번 식을 이용해서 분석하고자 하는 영역에 포함된 절리가 전체 절리 자료로부터 분리되고, 각 절리 암반요소에 포함되는 절리수와 방향성을 결정한다. 일단 절리의 점착력과 마찰각, 방향성이 결정되면, 각 암반요소의 강도가 절리 혹은 암석에서의 파괴가능성을 고려해서 구해지게 된다. 일반적으로 암반요소의 파괴강도를 결정하기 위해서는 다음과 같은 3가지 파괴 양상을 따르게 된다(김창용, 1991).

1) 절리면의 마찰 미끄러짐파괴, $\tau_j = c_j + \sigma_j \tan\phi_j$

2) 절리면의 인장파괴, $\sigma_j = T_j$

3) 절리 이외 암석부분의 파괴

여기서, j 는 j 번째 절리를 나타내고, T_j 는 j 번째 절리의 인장강도이다. 직교좌표계에서 절리면 위에 작용하는 전단응력 τ_j 와 수직응력 σ_j 는 암반에 작용하는 응력 상태와 절리의 주향, 경사로 표현될 수 있다. 위의 파괴조건식에 이 값들을 대입하여 각 방향별로 그리고 성분별로 강도를 구하게 된다. j 개의 절리를 분석할 경우, 단축 압축, 인장, 순수 전단강도는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} C_x &= c_j/\zeta_x, \quad C_z = c_j/\zeta_z, \\ T_x &= T_j/\lambda_x, \quad T_y = T_j/\lambda_y, \quad T_z = T_j/\lambda_z, \\ R_{xy} &= \min\{c_j\omega_1, T_j/\omega_1\}, \\ R_{yz} &= \min\{c_j\omega_2, T_j/\omega_2\}, \end{aligned}$$

$$R_{xx} = \min\{c, \omega_3, T_j / \omega_3\}, \quad (8)$$

여기서, $\min\{\}$ 은 $\{\}$ 값 중에서 최소치를 의미하며 λ, ω, ζ 는 김창용(1991)의 논문에 구체적으로 제시되어 있다. 이 강도 이론을 적용하기 위해서 2개의 교차 절리를 갖는 3차원 절리 암반을 가정하였다. 1번 절리는 주향은 고정되어 있고 경사가 45°이고, 2번 절리는 주향과 경사가 모두 0°에서 90°까지 변화된다. 두 절리 모두 마찰각은 39°, $k=0.972$ 로서 점착력이 0.61 MPa인 절리를 가정하였다. 암반의 9개 강도 성분중 xy면에 생기는 전단강도 R_{xy} 에 대한 결과를 나타낸 것이 그림 3이다. 곡선부분은 2번 절리의 파괴에 의한 전단강도의 감소치를 나타낸다. 그 외의 평면부분은 1번 절리에 의해서 암반 강도가 저하되는 경향을 보여준다. 이 실험 결과처럼 방향성에 의존하는 암반 강도는 취약절리의 영향으로 절리가 계속 중첩될 수록 강도가 낮아진다. 이는 앞서 탄성특성 이

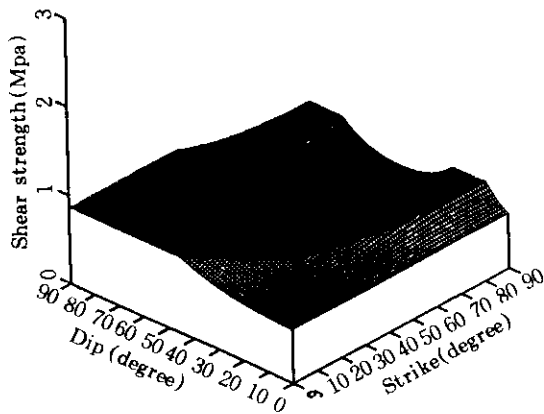


그림 3. 주향 및 경사 변화에 따른 절리 암반의 등가 전단강도 변화

론에서와 같은 경향을 보여준다.

4. 수치해석적 크기효과

임의의 방향성과 수를 갖는 암반요소 각각의 탄성계수와 강도를 구하는 이 방법을 실측자료를 바탕으로 한 암반구조물에 적용하기 위한 전단계로서 몇가지 전산실험을 통해서 이 방법의 타당성을 검토하고자 한다. 또한 크기효과 의 여러 원인에 대한 간단한 모델실험을 통해서 수치해석적인 방법의 적용가능성을 타진하고자 한다. 이를 위해서 10m×10m×10m 정육면체 영역에 분포하는 22개의 절리를 가정하였고, 암석 및 절리 물성은 표 1의 일반적인 편마암 물성을 사용하였다(Moon & Kim, 1993).

이와 같은 물성을 갖는 암반을 대상으로 크기효과를 관찰하기 위해서는 암반을 일정 크기의 블록으로 나누어야 한다. 이는 암반물성의 통계적 처리의 용이성을 고려한 것으로서 이때 각 요소에 포함될 수 있는 절리수의 전체 평균 및 암반물성의 전체 평균은 통계적인 의미를 갖는 수치가 된다. 총 4개의 블록 모델을 구성하였고, 각각의 한번의 분할수가 각각 5, 10, 15, 20인 경우를 가정하였다.

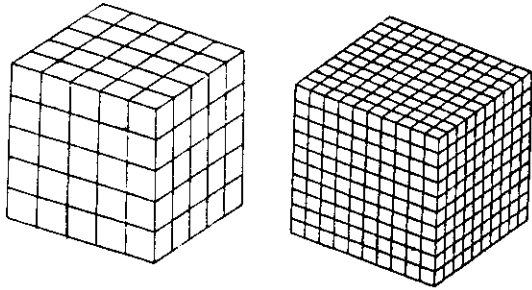
4.1 암반 요소 크기의 영향

본 연구에 사용된 10m×10m×10m 영역의 암반을 동일한 요소군으로 분할할 경우에 암반 물성의 전체적인 변화와 절리 밀도변화가 크기 효과에 미치는 영향을 보고자 한다. 그림 4와 같이 총 4개의 모델을 구성하였고, 각 모델마다 22개 절리 통과에 의한 각 요소에서의 평균 절리 밀도, 절리 통과요소수 등은 표 2와 같다.

표 1. 편마암 암반에서 신전암과 절리의 역학적 특성(Moon & Kim, 1993)

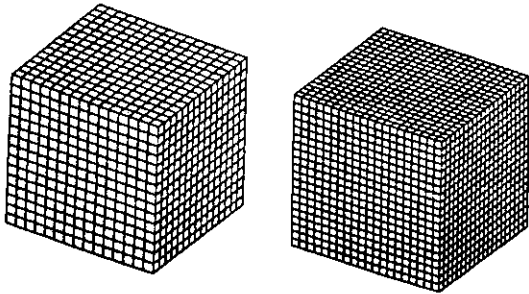
	E(GPa)	G(GPa)	ν	C(MPa)	T(MPa)	R(MPa)	c_j (MPa)	ϕ_j	t_j (cm)
암석	56.3	23.1	0.22	118.8	11.9	21.7	-	-	-
절리	0.056	0.023	0.22	-	-	-	0.61	39°	1

표에서 알 수 있듯이 요소수의 증가 즉 분할 수가 증가할 수록 요소의 단위체적과 평균절리 밀도는 다음과 같이 점점 감소하는 관계를 이루고 있다(그림 5).



(a) 5 blocks

(b) 10 blocks



(c) 15 blocks

(d) 20 blocks

그림 4. 크기 효과 실험을 위한 3차원 암반 분할 모델

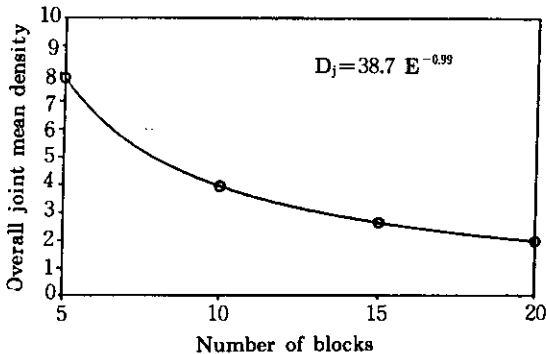


그림 5. 절리 암반 분할수와 전체 절리 평균밀도와의 관계

표 2. 절리 암반의 기하학적 특성

등분수	총요소수	요소단위 체적(m³)	절리통과 요소수	평균절리 밀도
5	125	8	125	7.84
10	1000	1	970	3.94
15	3375	0.296	3068	2.64
20	8000	0.125	6658	1.98

$$\begin{aligned}
 V &= 1000E^{-3} \\
 D_j &= 38.7E^{-0.99} \\
 D_j &= 3.9V^{-0.33}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

여기서, D_j : 단위요소의 평균절리밀도, E : 분할수, V : 단위요소의 체적이다. 위에서 알 수 있듯이 단위요소의 체적이 증가할 수록 즉 분할 요소수가 감소할 수록 평균절리밀도는 증가함을 알 수 있다. 따라서 앞서 크기효과의 원인에 대해서 얘기한 대로 요소의 체적이 커질 수록 평균절리 밀도가 증가하고, 밀도증가는 암반물성을 감소시켜 결국은 크기효과를 보이게 된다는 결론을 얻게 된다. 여기서는 4가지 모델에 대해서 개개 요소의 물성을 아래와 같이 산술 평균하여 그 결과를 분할수 및 단위체적과의 관계로 나타내었다.

$$K_a = \frac{\sum K_i}{n} \quad (i=1 \sim 3) \tag{10}$$

여기서, K_a : 전체 평균 물성치

K_i : i 번째 요소의 물성치

n : 총 요소수

그림 6 및 그림 7은 각각 등분수 및 체적과 전체 평균물성치와의 관계를 나타내고 있다. 모델에서 전면을 각각 5, 10, 15, 20로 분할할 경우 이 분할수와 전체 평균물성치는 선형적인 비례관계를 나타내고 있었다. 즉 분할 수가 많아지면 많아질수록 절리가 포함되지 않는 요소수도 증가하게 되고 전체 평균물성을 유도할 경우 점차 그 값이 증가하게 된다. 분할시 단위체적요소의 체적과 전체 평균물성 사이에는 그

립과 같은 멱함수 관계로 물성이 감소함을 알 수 있다. 즉 암반물성은 절리의 밀도가 감소함에 따라 감소하게 되어 결과적으로는 크기효과를 일으킨다는 것이다. 이와 같은 결과는 실제 현장에서 채취한 시편으로 물성실험을 할 경우가 시편의 크기가 물성 변화에 큰 영향을 줄 수 있으므로 적절한 시편 크기의 선택이 필요함을 시사해 주는 예이다.

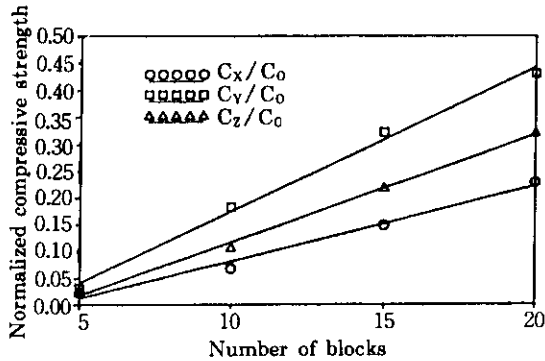


그림 6. 절리 암반 분할수와 정규 압축강도와의 관계

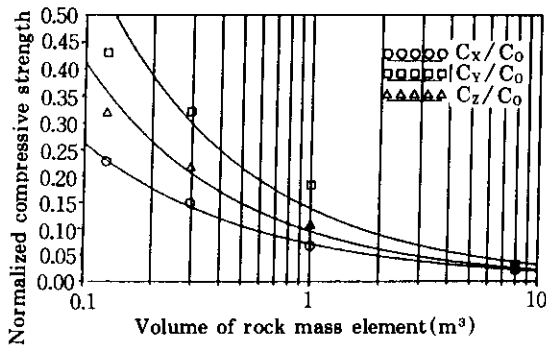


그림 7. 단위 체적요소와 정규 압축강도와의 관계

4.2 분석 영역의 변화에 의한 크기효과

주어진 4개의 모델을 대상으로 그림 8과 같이 임의의 영역에 포함된 모든 요소의 물성을 산술평균을 한다. 이 영역을 계속 확장할 경우 과연 암반물성은 어떠한 경향을 보이게 될 것인가에 대해서 알아보려고 하였다. 이 실험 방법은 실제 크기효과를 관찰하고자 하는 대상체를 직접 영역을 분할하여 대상영역이 커짐에

따라 영역에 포함되는 절리수 및 절리의 기하학적 특수성이 크기효과에 미치는 영향을 관찰하는 과정과도 같다.

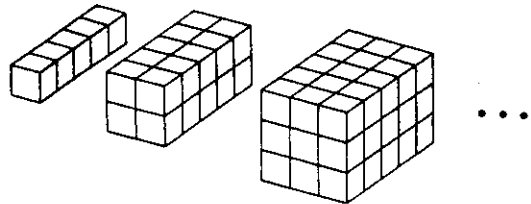


그림 8. 절리 암반 크기효과 실험을 위한 암반 분할 개념도

총 4개의 모델을 대상으로 했고, 각 경우마다 총 영역분할수는 5, 10, 15, 20개의 영역을 분할하여 각 영역의 물성을 아래와 같은 식으로 산술평균한다.

$$K_o = \frac{\sum K_i}{n} \quad (i=1 \sim n) \quad (11)$$

여기서, K_o : 영역 전체 평균 물성치

K_i : 영역의 i 번째 요소의 물성치

n : 영역 전체의 총 요소수

그림 9는 수직하방의 압축강도(C_z)에 대한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보면 등분수가 증가할 수록 물성변화폭이 더 커짐을 알 수 있다. 분할수가 5, 10, 15, 20일 때 각각의 변화폭은 2.17%~2.22%, 5.7%~12%, 12.6%~34.8%, 20%~36.6%이다. 대체적으로 멱함수적인

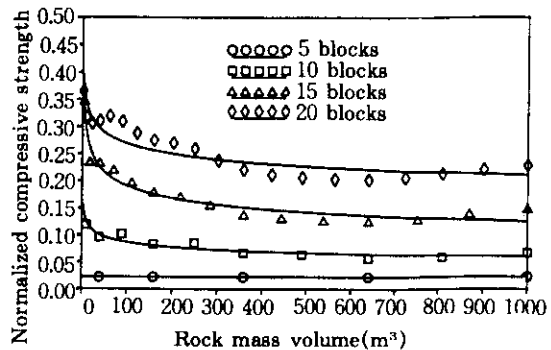


그림 9. 절리 암반 분할수에 따른 정규 압축강도와 암반 체적과의 관계

크기효과를 보여주고 있다. 특이할 만한 것은 분할수가 5인 경우는 거의 크기효과에 대한 영향을 볼 수 없었다. 이는 이 때의 단위체적요소의 평균 물성은 크기에 영향이 거의 없는 대표체적요소의 개념으로 설명될 수 있다. 즉 절리의 분포특성이 5등분할을 할 경우에는 평균적으로 암반에 일정한 영향을 미치고 있다는 결론을 얻을 수 있다.

분할수가 증가할 수록 크기효과의 경향은 뚜렷하게 나타나고, 구해진 적합함수에 대해서 분할수가 커질수록 분산도가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 이러한 결과는 전체적으로 절리의 분포특성에 기인한 결과라고 볼 수 있다. 이러한 경향은 인장 및 전단강도 그리고 영율 및 전단강성률에서도 볼 수 있었다.

4.3 절리 구조 변화에 의한 크기효과

절리 구조 변화가 암반물성의 크기효과에 미치는 영향을 보기 위해서 그림 10과 같은 4개의 절리구조를 가정한 실험을 수행하였다. 여기서는 분할수에 상관없이 일정한 분할수 모델(15 등분)을 대상으로 실험하였다. 각 절리구조는 5, 10, 16, 22개의 절리를 포함하고 있고, 절리를 계속 중첩시켜서 최종 22개 절리 구조를 형성하였다. 실험 방법은 4.2에서와 같고, 단지 절리수를 변화시켜서 실험한 내용이 차이가 있다.

그림 11은 각 방향의 압축강도의 전체 평균을 절리수와 대비시켜서 나타낸 것이다. 절리수가 많아질 수록 전체 평균물성이 떨어지는 경향은 일치한다. 그러나 이중에 어떤 경우는 절리수가 증가해도 변화가 없는 경우가 있다. 즉 절리수가 5개에서 10개로 증가할 경우가 10개에서 16개, 16개에서 22개로 증가할 경우에 비해서 물성 감소폭이 급격하게 나타난다. 이는 취약 절리들이 10개모델 내에 많이 포함되어 있기 때문에 상대적으로 물성 감소폭이 크게 나타나는 것이다. 또한 압축강도(C_z)의 경우는 절리들이 거의 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 인장 및 전단

강도에서도 볼 수 있었다.

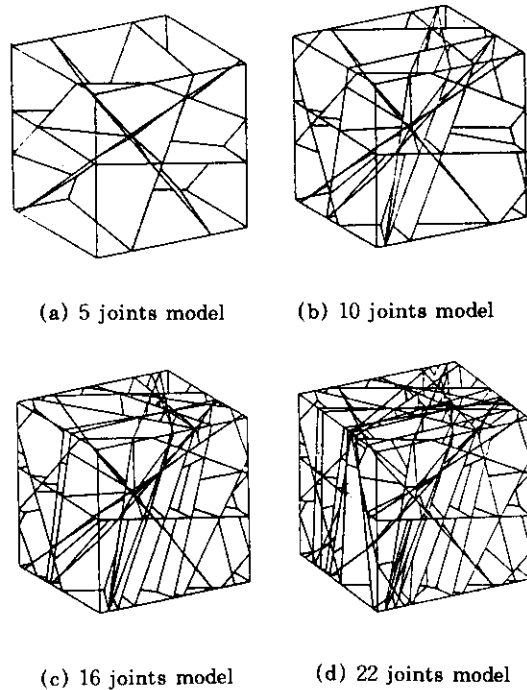


그림 10. 절리수를 변화시킨 암반 모델

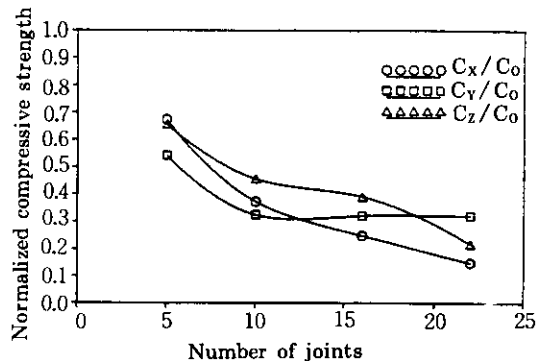


그림 11. 절리수 증가에 따른 평균 정규 압축강도의 변화

대체적으로 압축강도의 경우는 암석물성의 67%~15%, 인장강도는 78%~25%, 전단강도의 경우는 56%~15%까지 감소함을 알 수 있었다. 그림 12는 압축강도(C_x)에 대한 절리수 변화에 의한 크기효과를 나타낸 것이다. 앞서

예측한대로 5개의 절리에서 10개로 증가할 경우가 그 폭이 큰 차이를 보임을 알 수 있었다. 각 경우마다 물성변화폭을 보면 각각 81%~67%, 54%~36%, 35%~24%, 35%~15%로 나타난다. 결론적으로 절리수가 많아질 수록 크기효과는 더 크게 나타나고, 물성 변화폭이 더 크게 나타난다.

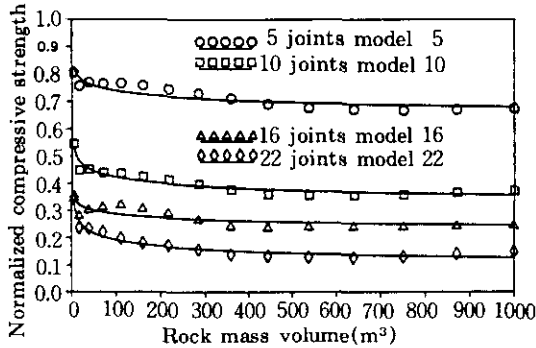


그림 12. 절리수 증가에 따른 절리 암반 체적과 정규 압축강도와의 관계

5. 적용 및 고찰

등가물성을 측정할 수 있는 이론적인 내용과 크기효과에 관한 수치해석적 모델 개발을 바탕으로 본 연구에서는 김창용(1991)의 논문에서 모델로 채택한 3차원 구조물을 대상으로 본 이론을 적용하고, 그 결과로부터 크기효과를 관찰하고자 하였다. 특히 실제 암반의 절리 구조를 달리했을 때 암반의 크기효과에 대한 영향을 평가해 보고, 암반물성에 영향을 미치는 여러 변수들이 크기효과에 미치는 영향에 대해서 연구하고자 한다.

5.1 크기효과 관찰 배경

본 연구에서 대상으로 채택한 3차원 구조물은 총 4466개의 유한요소로 구성되어 있고, 이는 319개의 2차원 유한요소망을 공동축방향(Z축 방향)으로 동일하게 14슬랩을 연장하여 구성된 모델이다. 따라서 319개의 2차원 유한요

소는 각기 상이한 면적을 갖고 있기 때문에 크기 별로 분류하여 물성과 크기와의 관계로부터 크기효과를 증명하고자 한다. 그림 13은 이 과정을 설명하기 위해서 한개의 2차원 유한요소를 연장하여 공동 연장방향으로 14개의 3차원 유한요소를 만든 것이다. 그림에서 검게 색칠된 부분이 절리부분에 해당한다. 이론에서 각 절리가 암반요소를 통과하는가 판단되면 절리의 영향을 고려한 요소물성이 산출된다. 절리가 통과되지 않은 요소는 암석물성을 취하게 된다. 이와 같은 방법으로 대상으로 하는 편마암 암반의 4368개 유한요소 물성을 2차원 요소인 312개의 물성으로 평균하게 된다. 이 요소군의 평균 물성은 다음과 같이 결정된다.

$$K_a = \frac{\sum K_i}{14} \quad (i=1 \sim 14) \quad (12)$$

여기서, K_a : 요소의 평균물성

K_i : 각 슬랩별 요소의 물성

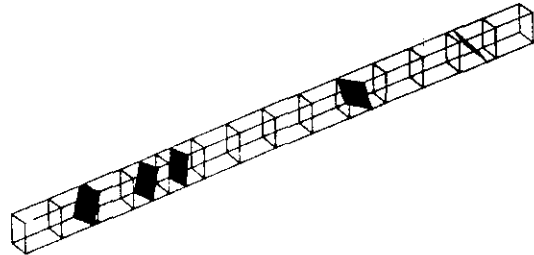


그림 13. 3차원 수평 요소를 통과하는 절리 형상

그림에서 알 수 있듯이 절리가 통과되는 요소가 많을 수록 요소의 평균물성은 점차 감소하게 된다. 또한 요소의 크기가 커질 수록 취약 절리를 포함할 확률이 커지게 된다. 현장의 거대한 암반블럭의 물성을 예측하기 위해서는 크기를 고려하지 않는 이론이 가능하다면 실험을 통해서 이 암반의 물성을 예측할 수 있다. 그러나 현실적으로 이러한 크기의 암반블럭을 실험한다는 것은 불가능하다. 가능하다면 지표면에서 여러 개의 시추공을 뚫어 각 시추공을 몇 개의 시편으로 제작하여 실험해 봄으로써 통계적

으로 이 암반블럭의 물성을 예측할 수 있다. 물론 전지역을 모두 시추할 수 없으므로 임의의 영역을 선택적으로 시추할 수 밖에 없다. 또한 한 시추공에서 생성된 core는 몇 개의 시편으로 구분하여 실험해야 한다. 결과적으로 각 시편을 산술평균한 결과가 전체 암반물성을 대표한다고 가정할 수 밖에는 없다. 본 연구에서 사용된 방법이 바로 이 과정과 동일하다. 단 요소의 크기가 일정치 않고 크기 별로 분류된다는 점이 다르고, 전체 영역을 대상으로 한다는 점이 다르다. 그 외의 조건은 동일하다고 볼 수 있다.

이런 내용을 기반으로 먼저 11개 절리구조를 가정한 암반요소의 체적과 요소에 포함된 절리수의 관계를 보면 그림 14와 같다. 이는 그림 13에서 처럼 각 column 요소에 포함되는 절리수를 합산하고, 총 312개의 column요소의 체적과 절리수와의 관계로 유도한 결과이다. 3차원 요소의 체적은 $0.5\text{m}^3 \sim 6800\text{m}^3$ 으로 체적이 증가할 수록 절리 빈도는 역함수 관계를 이루며 증가함을 알 수 있다. 즉 이론에서 예측했던 대로 절리수가 많을 수록 물성이 감소하게 되고 또한 체적이 증가할 수록 절리수가 많아지기

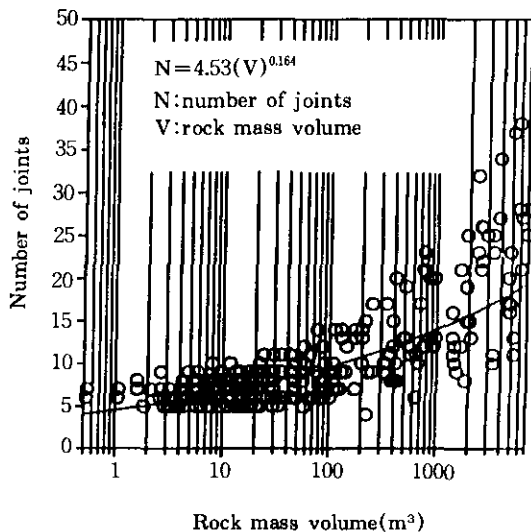


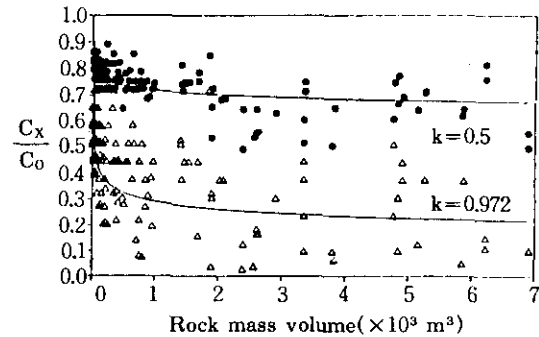
그림 14. 절리 암반 요소의 체적과 요소를 통과하는 절리수와의 관계

때문에 결과적으로 암반물성의 크기효과를 관찰할 수 있는 가능성이 생기게 된다.

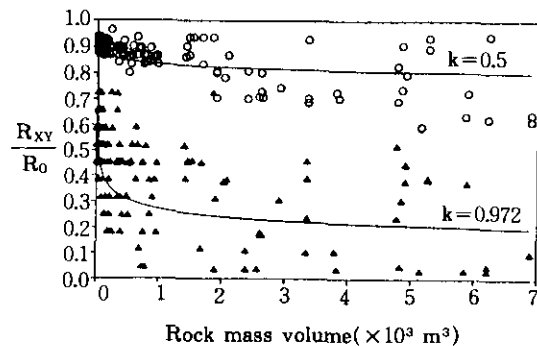
5.2 변수 변화에 의한 크기효과

5.2.1 암반 강도의 크기효과

통상 강도변수로 명명되는 절리의 점착력과 절리 마찰각 변화가 암반강도의 크기효과에 미치는 영향을 보기 위해서 다음과 같은 두가지 실험을 하였다. 첫번째 실험은 절리 마찰각을 문헌에 보고된 평균치 39° 로 하고, 점착력은 절리의 단속성의 영향을 주기 위해 분리도 k 를 0.5, 0.97로 변화시켰다. 두번째 실험은 점착력을 문헌에 보고된 평균치인 0.6MPa 로 하고, 마찰각을 문헌에 보고된 하한, 상한치인 56° ,



(a) Compressive strength



(b) Shear strength

그림 15. 절리 분리도 변화에 따른 암반 요소의 체적과 강도와의 관계

19°를 사용하였다. 암석강도는 표 1과 같은 편마암 물성에 해당한다.

(1) 절리 점착력 변화

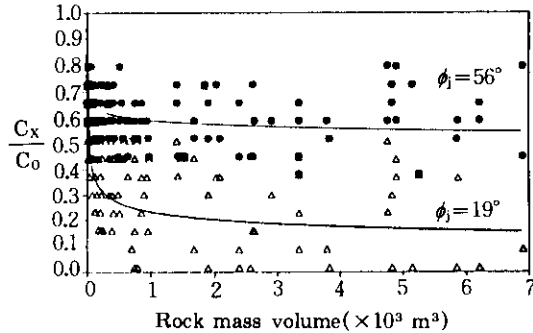
점착력의 증가, 즉 절리 분리도의 감소는 절리의 영향보다 절리로 구획되는 신선암 부분인 암교(rock bridge)의 영향이 커지게 된다. 암반의 크기효과가 절리에 기인한다고 할 경우 절리의 영향이 감소됨으로 전체적인 물성은 높아지고, 상대적으로 크기효과가 약해진다. 즉 절리의 영향이 커지면 커질 수록 암반의 크기효과는 더 크게 나타난다. 그림 15(a),(b)는 분리도가 각각 0.5, 0.97일 경우의 압축강도와 전단강도의 크기효과에 대한 결과이다. 분리도가 0.5일 경우보다 0.97일 경우가 자료의 분산도가 더 크게 나타났고 전체적인 수치가 더 높게 나타났다. 312개 자료를 멱함수의 형태로 적합시킨 결과 압축강도는 각각 암석강도의 67%, 21%까지 감소함을 알 수 있었다. 전단강도의 경우는 각각 80%, 20%까지 감소함을 알 수 있었다.

(2) 절리 마찰각 변화

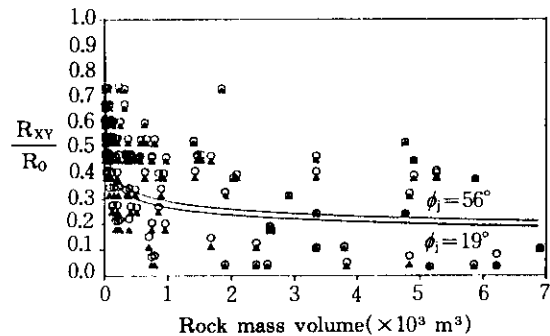
마찰각의 증가는 방향성에 따른 암반강도의 변화폭을 줄여주기 때문에 임의의 방향성을 갖는 다수의 절리가 존재할 경우 절리의 영향을 적게 받게 됨으로 전체 암반강도 평균치를 상승시키는 역할을 한다. 마찰각 변화는 절리의 미끄러짐 파괴 강도를 결정하는 인자이기 때문에 인장강도에는 거의 영향을 미치지 않는다. 따라서 마찰각의 증가는 절리의 영향을 감소시켜서 암반 강도의 크기효과를 완화시키는 작용을 한다.

그림 16(a),(b)는 마찰각이 56°, 19°인 경우의 압축강도와 전단강도의 크기효과에 대한 결과이다. 그림 16(a)에서 압축강도는 마찰각이 56°인 경우보다 19°인 경우가 강도가 더 낮게 나타났고 크기효과가 더 두드러지게 나타났다. 반면 전단강도의 경우는 두 경우가 거의 비슷한 결과를 보였다. 이는 마찰각 변화가 전단강도 결정에 크게 영향을 미치지 못하고 있음을

나타낸다. 즉 인장파괴에 의해 전단강도가 결정되었음을 나타낸다. 압축강도는 암석강도의 최대 55%, 16%까지 저하되었고, 전단강도는 암석강도의 최대 21%, 19%까지 감소함을 알 수 있었다.



(a) Compressive strength



(b) Shear strength

그림 16. 마찰각 변화에 따른 암반 요소의 체적과 강도와의 관계

5.2.2 암반 탄성계수의 크기효과

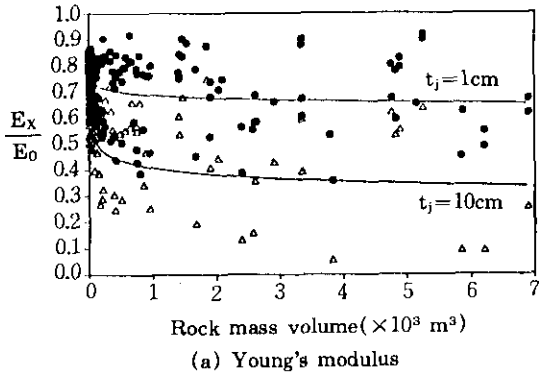
이론에 의하면 절리암반의 탄성계수는 절리의 밀도 및 주변 암석과의 물성차이에 의해서 영향을 받는다. 절리암반의 탄성계수를 결정하는 이들 두가지 요소의 변화를 통한 탄성계수의 크기효과를 보기 위해 다음과 같은 두가지 실험을 수행하였다. 첫번째 실험은 절리와 암석의 물성차이 즉 탄성대비를 10⁴으로 고정시키고, 절리의 두께를 1cm, 10cm로 변화시켰다.

두번째 실험은 절리두께를 1cm로 고정시킨 상태에서 절리와 암석과의 물성차이인 탄성대비를 10^4 , 10^6 로 변화시켰다. 역시 여기에 사용된 암석 물성은 표 1과 같다,

(1) 절리 두께 변화

절리 두께 증가는 암반 탄성계수에 절리의 영향을 증폭시키는 결과를 가져오고, 대체적으로 절리의 두께 증가는 탄성계수의 불균질성 및 크기효과를 가중시키는 결과를 나타낸다.

그림 17(a),(b)는 절리 두께가 각각 1cm, 10cm인 경우의 영률과 전단강성률의 크기효과를 나타낸다. 영률의 경우 절리 두께가 1cm인 경우보다는 10cm인 경우가 탄성계수 저하율이 더 크게 나타났고 불균질성 즉 자료의 분산도가 더 크게 나타났다. 전단강성률의 경우도



(a) Young's modulus

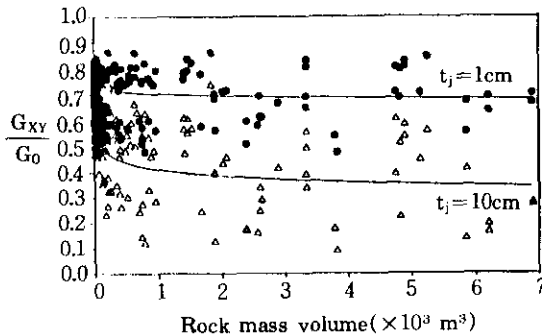
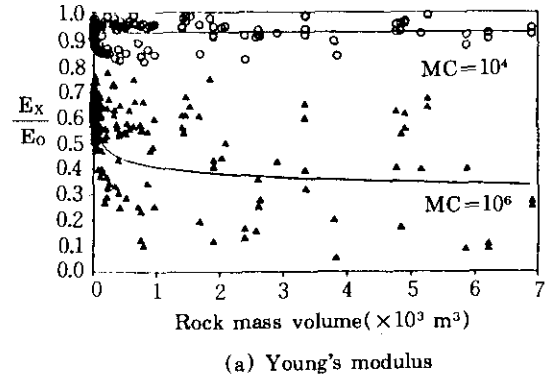


그림 17. 절리 두께 변화에 따른 암반 요소의 체적과 탄성계수와의 관계

1cm인 경우보다는 10cm인 경우가 탄성계수가 더 큰 저하를 보였고, 자료의 분산도 역시 크게 나타났다. 영률의 경우 암석영률의 최대 65%, 34%까지 저하되고, 전단강성률은 69%, 35%까지 감소한다.

(2) 절리와 암석의 물성차이의 변화

절리와 암석의 물성차이, 즉 탄성대비(MC : Modulus Contrast)의 증가는 역시 절리의 영향이 더 크게 반영되기 때문에 탄성계수의 불균질성 및 크기효과를 가중시키게 된다. 탄성대비는 10^4 , 10^6 으로 하였다. 이는 암석물성이 절리물성보다 10^4 , 10^6 배로 큼을 나타낸다. 앞서 절리 두께와 마찬가지로 절리와 암석 사이의 물성차이가 커질 수록 즉 탄성대비가 증가할 수록 체적 증가에 따른 탄성계수의 급격한 변화 양상을 볼 수 있었다.



(a) Young's modulus

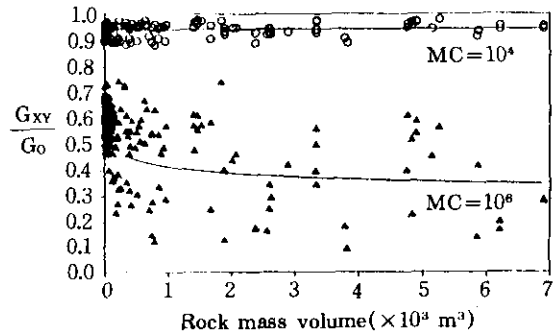


그림 18. 탄성대비 변화에 따른 암반 요소의 체적과 탄성계수와의 관계

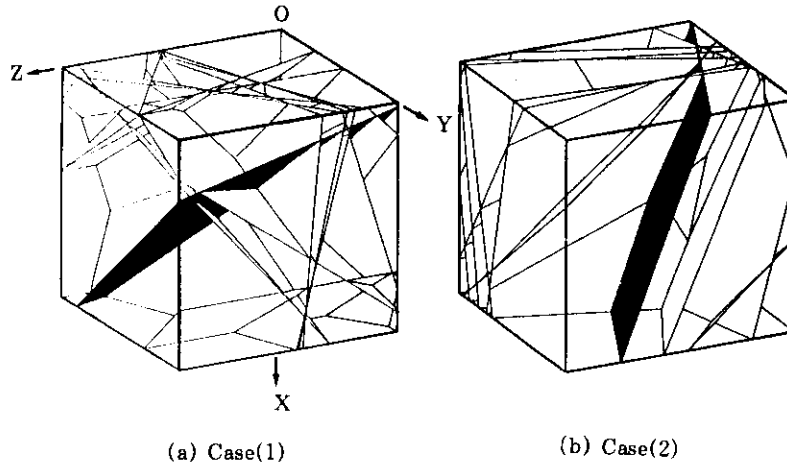


그림 19. 서로 다른 절리 구조를 갖는 암반 모델

그림 18(a),(b)는 탄성대비가 10^4 , 10^6 인 경우로 영율과 전단강성률의 크기효과에 관한 결과이다. 영율의 경우 탄성대비가 10^4 인 경우는 거의 크기효과에 영향을 받지 않는 반면 10^6 인 경우는 훨씬 불균질성이 심하고 크기효과도 두드러지게 보였다. 전단강성률도 탄성대비 10^4 인 경우는 크기효과를 거의 볼 수 없었고, 10^6 인 경우는 그 영향을 볼 수 있었다. 영율의 경우는 암석영율의 최대 93%, 34%까지 감소하였고, 전단강성률은 94%, 35%로 비슷한 경향을 보여 주었다.

5.3 현장 절리 구조의 변화에 의한 크기효과

본 실험은 크기효과가 특정한 절리 구조에 의해서 생기는 것이 아니라 어떠한 형태의 절리 구조에서도 생성가능성이 있음을 입증하기 위한 실험이다. 그림 19는 두 개의 절리 모델을 나타낸 것으로서 11개의 절리 구조를 갖는 Case(1)과 12개의 절리를 포함하는 Case(2)이다. 실험의 일관성을 위해서 두 경우 모두 절리는 연속한 것으로 가정하고, 두께를 1cm로 하였다. 또한 절리의 탄성계수인 영율과 전단강성률은 각각 5.6MPa, 2.3MPa이고 강도변수인

점착력과 내부마찰각은 각각 문헌 평균치인 6MPa과 39° 를 사용하였다(문현구, 1993).

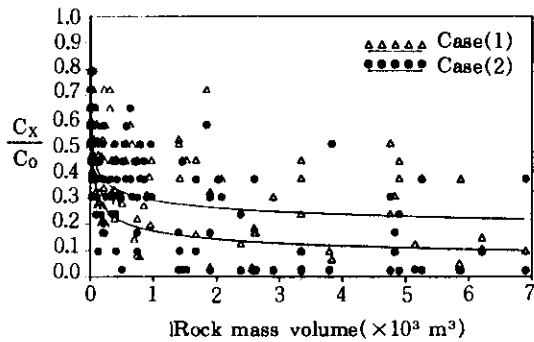
Case(1), Case(2)의 압축강도를 C_x , 전단강도 R_{xy} 를 비교한 결과가 그림 20(a),(b)이다. 각각의 적합결과 도출된 식은 다음과 같다.

표 3. 절리 암반 강도에 대한 적합식

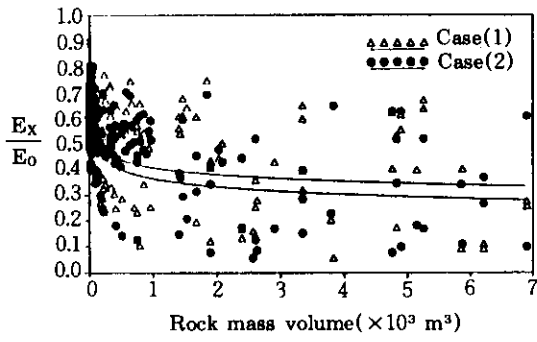
	Case(1)	Case(2)
압축강도	$C_x=0.86(C_0)(V)^{-0.1565}$	$C_x=1.23(C_0)(V)^{-0.2864}$
전단강도	$R_{xy}=0.90(R_0)(V)^{-0.1712}$	$R_{xy}=1.19(R_0)(V)^{-0.2857}$

압축강도, 전단강도 모두 Case(1)에 비해 Case(2)가 크기효과 정도를 나타내는 지수가 더 커지게 되어 전반적으로 크기효과가 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 그 차이는 크지 않으며 두 경우 모두 자료의 분산도가 거의 비슷한 정도를 나타내고 있다. 압축강도의 경우는 Case(1), Case(2) 각각 암석강도의 최대 22%, 10%까지 떨어졌고, 전단강도의 경우는 20%, 11%까지 감소하였다.

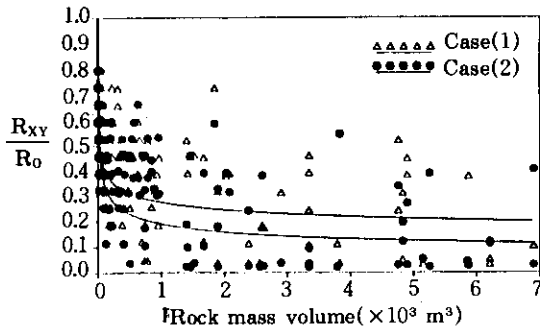
그림 21(a),(b)는 Case(1), Case(2)의 영율 E_x , 전단강성률 G_{xy} 를 비교한 결과이다. 자료를 선형적방법에 의해 적합 시킨 결과 표4와 같은 식을 얻을 수 있었다.



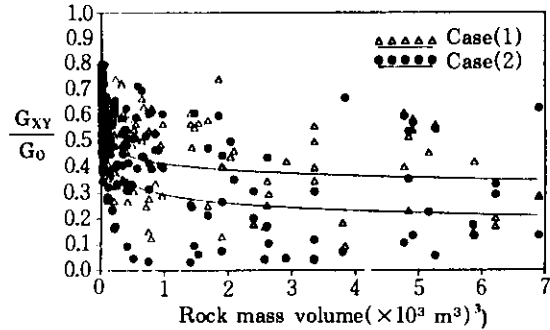
(a) Compressive strength



(a) Young's modulus



(b) Shear strength



(b) Shear modulus

그림 20. 절리 암반 체적과 강도와의 관계

그림 21. 절리 암반 체적과 탄성계수와의 관계

표 4. 절리 암반 탄성계수에 대한 적합식

	Case(1)	Case(2)
영율	$E_x = 0.81(E_0)(V)^{-0.0996}$	$C_x = 0.91(C_0)(V)^{-0.132}$
전단강성률	$G_{xy} = 0.06(G_0)(V)^{-0.0889}$	$G_{xy} = 0.96(G_0)(V)^{-0.171}$

강도와 마찬가지로 탄성계수에 있어서도 Case(1)에 비해 Case(2)가 크기효과가 더 크게 나타남을 알 수 있다. 역시 분산도는 비슷하다. 영율의 경우는 Case(1), Case(2) 각각 암석영율의 최대 34%, 28%까지 감소하였고, 전단강성률의 경우는 암석전단강성률의 최대 35%, 21%까지 감소함을 알 수 있었다. 이 외에 여러 방향의 물성도 비슷한 경향성을 보였다.

이와 같이 절리 기하를 달리하는 두 경우의

크기효과 분석결과 비슷한 분산도를 갖지만 Case(2)가 Case(1)에 비해 모든 물성치가 더 낮게 나타남을 알 수 있었다. 결과적으로 절리 암반의 크기효과는 특정한 절리기하로부터 생기는 것이 아니라 절리를 포함하는 암반이면 어느 경우든 크기효과를 볼 수 있다는 것이다. 또 크기효과의 정도에 있어서는 절리 구조특성이 영향을 미칠 수 있다는 결론을 얻었다. 즉 상대적으로 취약한 절리구조 포함하는 암반이 그렇지 않은 암반에 비해 크기효과가 더 크게 나타날 수 있다는 것이다.

6. 결 론

본 연구는 절리암반의 불균질성과 불연속성

을 평가할 수 있는 등가물성이론에 대해서 연구하였다. 그리고 이 이론을 실제 문제에 적용시켜서 암반물성의 크기효과가 어떠한 원인에 의해서 생기고 어느 정도 생기는지를 수치해석적인 방법으로 알아보려고 하였다. 또한 절리의 역학적 성질들이 암반의 크기효과에 미치는 영향을 보기 위해서 여러 가지 연구를 수행하였다. 이와 같은 연구과정 중 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 등가물성이론 적용 결과, 다수 절리를 포함하는 암반의 탄성계수와 강도는 절리가 단계적으로 중첩될 경우 점차 낮아져 최종적으로 가장 취약한 절리의 영향을 가장 크게 받게 됨을 확인할 수 있었다.
- 2) 수치해석적인 크기효과의 타당성을 검토하기 위한 모델 실험 결과, 첫째 요소의 체적이 커질수록 요소에 포함된 평균 절리 밀도는 증가하고, 이 절리 밀도증가는 이론에서 예측한 대로 암반의 물성을 감소시키는 역할을 하고 결과적으로 크기효과를 일으키게 됨을 알 수 있었다. 둘째 임의의 수로 대상영역을 분할하여 실험한 결과 요소의 크기가 어느 시점에 도달하면 크기효과를 볼수 없는 대표체적요소 개념을 증명할 수 있다. 셋째, 절리 구조 변화에 의한 크기효과 실험 결과 절리수가 많아지면 많아질수록 크기효과는 더 크게 나타남을 알 수 있었다.
- 3) 등가이론을 실제 암반에 적용한 결과, 절리 암반요소의 물성은 체적이 감소함에 따라 포함된 절리수가 적어져 결국 암석 물성에 접근하게 되고, 체적이 커질수록 절리수도 많아지고 상대적으로 취약 절리 통과확률이 커져 암석물성과 큰 차이를 보이게 된다.
- 4) 암반 강도의 크기효과 실험 결과, 절리의 점착력 감소 즉 분리도 증가 및 절리 마찰각 감소에 의해 암반물성과 불균질성이 커지고 크기효과도 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 또 마찰각보다는 점착력 변화에

의해서 암반물성의 불균질성 및 크기효과가 더 크게 나타났다.

- 5) 암반 탄성계수의 크기효과에 대한 실험결과, 절리 두께가 커질수록 그리고 절리와 암석의 물성차이가 커질수록 탄성계수의 불균질성 및 크기효과가 가중되는 결과를 나타내었다. 탄성 계수의 경우는 절리 두께 변화보다는 물성차이가 커질수록 암반물성의 불균질성과 크기효과가 증폭되는 결과를 나타냈다.
- 6) 현장 절리 구조변화에 대한 크기효과 실험결과, 절리암반의 크기효과는 특정한 절리 구조에 의해서 생기는 것이 아니라 절리를 포함하면 어느 경우든 크기효과를 관찰할 수 있다는 결론을 얻을 수 있었다. 특히, 절리수가 많아지거나 취약 절리를 포함할 경우 크기효과가 더 두드러지게 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김창용(1991), 불연속 암반의 강도특성과 지하양수발전소 설계에의 적용, 석사학위논문, 한양대학교 대학원, pp. 101
2. 문현구(1990), "불연속 암반의 역학적 특성에 관한 연구-절리의 stiffness 밀도 및 경사가 암반의 Young율에 미치는 영향", 한국자원공학회지, Vol.27, pp.77~87
3. 문현구(1993), "3차원 절리암반의 강도특성에 관한 이론적 수치해석적 연구", 한국자원공학회지, Vol.30, pp. 133~146
4. 문현구, 김선홍, 김창용(1991), "불연속 암반의 탄소성 특성과 이를 이용한 전산모델 연구", 한국자원공학회지, Vol.28, No.3, pp. 227~236
5. Amadei, B., and Goodman, R. E.(1981), "A 3-D constitutive relation for fractured rock masses". *Proc. Int. Symp. Mech. Behavior Structured Media.* pp. 249~268
6. Bandis, S.(1980), Experimental studies of scale effects on shear strength, and deformation of rock joints, Ph.D. thesis. University of Leeds.

7. Barton, N.(1976), "Rock mechanics review : The shear strength of rock and rock joints", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 13, pp.255~279
8. Duncan, J. M., and Goodman, R. E.(1968), *Finite element analyses of slopes in jointed rock*. U.S. Army Corps Engineers Report S-68-3.
9. Exadaktylos, G. E., and Tsoutrelis, C. E. (1993), "Scale effect on rock mass strength and stability", *Scale Effects in Rock Masses 93*, Pinto da Cunha(ed), pp. 101~110
10. Glucklich, J., and Cohen, L. J.(1968), "Size as a factor in the brittle-ductile transition and the strength of some materials", *Int. J. Fracture Mech.* pp. 278~289
11. He, J.(1993), "A case review of the deformation modulus of rock mass", *Scale effect in Rock Masses 93*, Pinto da Cunha(ed), pp. 93~99
12. Horri, H., and Nemat-Nasser, S.(1983), "Overall moduli of solids with microcracks", *J. Mech. Phys. Solids*. Vol.31, pp. 155~171
13. Lajtai, E. Z.(1969), "Strength of discontinuous rocks in direct shear", *Geotechnique*, Vol. 19, No. 2, pp. 218~233
14. Moon, H. K.(1987), Elastic moduli of well jointed rock masses. Ph.D. thesis. University of Utah.
15. Moon, H. K., and Kim, C. Y.(1993), "Scale effect in the elastic moduli and strength of jointed rockmasses", *Scale Effects in Rock Masses 93*, Pinto da Cunha(ed), pp. 39~48
16. Ringstad, C., Addis, M. A., Brevik, I., and Santarelli, F. J.(1993), "Scale effects in hollow cylinder tests", *Scale Effects in Rock Masses 93*, Pinto da Cunha(ed), pp. 75~80
17. Pariseau, W. G.(1979), "A finite element approach to strain softening and size effects in rock mechanics", *Proc. 3rd Int. Conf. Numer. Mech. Geomech.* pp. 545~558
18. Walsh, J. B.(1965), "The effect of cracks on the uniaxial elastic compression of rocks", *J. Geophys. Res.* Vol. 70, pp. 399~411
(접수일자 1997. 10. 30)