

그라우팅 강화터널의 설계 특성치 산정에 관한 연구

Estimation of the Anisotropic Material Properties
of Rock Masses with Permeation Grouting

이 준 석 (한국철도기술연구원, 책임연구원), 방 춘 석, 최 일 윤, 엄 주 환 (한국철도기술연구원)

Abstract

The Grout-reinforcement technique which is widely used during the excavation of a shallow or an endangered tunnel can be classified into a couple of groups according to the properties and injection methods of the grout. The reinforcement design will, therefore, take a different approach based on the grouting method under consideration. However, the injection procedure is mainly performed by the experience of the foreman rather than engineering judgement; specifically the permeation grouting through the rock joints and its reinforcement effect is not fully understood during the design stage.

In this study, the anisotropic material properties of the grout-reinforced rock masses are derived from the concept of composite materials and the effect of intact rock, vertical grouting and permeation grouting is, therefore, fully accounted for. Through the parametric studies on

the characteristics of rock joints, intact rock and grouting materials, various case studies have been considered. The results, illustrated via the design charts, can be directly used during the reinforcement design.

연약지반 및 토피가 낮은 구간을 통과하는 터널에 대한 보강공법중 그라우팅 고결공법은 시공방법 및 특성에 따라 여러 가지로 분류할 수 있으며 이에 대한 설계방법 또한 달라진다. 그러나 현실적으로 이에 대한 이론적 바탕 없이 경험에 의한 시공이 이루어지고 있는 실정이며 특히 암반 절리를 통한 침투 그라우팅에 따른 암반의 강화효과에 대하여는 설계기법 개발이 미진한 실정이다.

본 연구에서는 복합체역학 및 분산형 절리모형을 이용하여 절리가 없는 신선암, 수직 그라우트재 및 침투 그라우트재로 이루어진 복합체의 구성방정식을 유도한 후 실제 암반의 종류에 따른 강화암반의 설계특성치, 즉 비등방 물성치를 산출하였다. 또한 매개변수 해석을 통하여 강화암반의 물성변화를 파악하였으며 이를 통하여 FLAC 등 상용프로그램을 이용한 보강설계시 적용할 수 있는 설계특성치를 제안하였다.

1. 서론

도로나 철도터널의 시공시 터널 상부의 지질이 연약하거나 토피가 낮아 아칭효과를 충분히 발휘할 수 없는 경우, 혹은 터널 인근으로 다른 구조물이 통과하거나 기초구조물이 있는 때에는, 터널의 보강이 필연적으로 수반되어야 한다. 터널의 보강은 여러 가지 방법에 의해 수행될 수 있으나 공학적인 보강설계 방법은 아직까지 미약한 실정이며 단순화한 경험공식 혹은 실험식에 의한 특정 압반의 강화효과 분석이 행해져 왔다 [1],[2].

본 연구에서는 국내에서 터널의 보강설계 방법으로 널리 사용되고 있는 약액 주입공법, 특히 시멘트 그라우팅 공법의 설계특성치에 대하여 논의하였다. 본 연구를 통해 제안한 각종 설계도표들은 실제 보강설계시 직접 적용이 가능할 것으로 판단되며 현장 실험을 통하여 이의 효용성에 대하여 검증할 수 있을 것이나 본 연구에서는 제외하였으며 추후 다른 곳에서 논의하기로 한다.

그라우팅 강화터널의 해석방법에 대하여는 이미 참고문헌 [3] 및 [4]를 통하여 압밀그라우팅 (compaction or consolidation grouting)과 침투그라우팅 (permeation or penetration grouting)의 역학적 성질을 규명한 바 있으나 본 연구에서는 압밀 및 침투그라우팅이 동시에 행하여지는 경우에 대한 설계특성치, 즉 비등방 물성 (anisotropic material properties)을 이용한 원지반의 강화효과를 정량적으로 표현하였으며 이를 설계과정에서 직접 사용할 수 있도록 도표화하였다. 특히 우리 나라에서 터널의 설계시 흔히 사용되는 FLAC [5]의 입력데이터를 도출함으로써 현장에서 비교적 손쉽게 적용 가능하도록 하였다. 한편 그라우트재를 포함한 원지반의 탄소성 해석 기법은 설계시에 직접 필요한 과정은 아니나 강화지반의 역학적 성질 및 응력상태를 규명하는데 필요한 요소라 할 수 있다. 이에 대하여는 참고문헌

[6] 및 [7]에서 언급한 바 있으며 본 연구에서는 제외하였다.

다음에서는 시멘트 그라우팅으로 강화된 터널 주변의 거동을 파악하기 위하여 절리를 포함하지 않은 신선암, 보링공을 통한 (수직)그라우트재 및 절리면의 침투 그라우트재 등의 3가지 구성체를 고려하였으며, 특히 절리군이 2개인 경우를 포함한 강화지반의 구성방정식을 유도한 후 설계특성치를 산정하기 위하여 제안한 모델을 이용한 매개변수 연구를 수행하였다.

2. 그라우팅 강화암반의 모형화

주입공법에 의한 원지반의 강화효과를 분석하기 위하여 다음과 같은 가정을 도입한다. 즉,

- (1)압반내 절리군은 일정한 방향성에 의해 구분되며 각 절리군의 Persistency는 100%이다. 또한 System 그라우팅에 의해 침투 주입재는 절리내에 완전히 충전된다.
- (2)절리의 두께(Thickness)는 절리의 간격(Spacing)에 비해 무시할 수 있을 정도로 얇다.
- (3)그라우트재 주입후 암반과 그라우트재는 완전히 부착된다.
- (4)해석의 간편함을 유지하기 위하여 절리의 주향(Strike)은 그림 1의 Z축과 평행하다

고 가정한다. 이를 이용하여 두 개의 절리군을 포함한 암반에 대해 보강 그라우팅을 실시한 경우, 강화암반의 비등방성 물성을 도출한다. 한편 고려 대상인 터널 주변의 암반은 그림 1과 같이 원지반(절리를 포함하지 않은 신선암), 수직보링공을 통한 그라우트재 및 절리군을 따른 침투 그라우트재 등 3가지 다른 속성을 지닌 복합재료로 구성되어 있다고 가정한다.

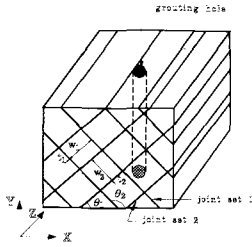


Fig. 1. Jointed Rock Masses with Permeation Grouting

2.1. 수직그라우팅에 의한 암반강화의 모형화

그림 2(b)와 같이 침투그라우팅을 실시하기 위하여 터널 주변에 주입공을 시추하고 수직 그라우트재를 주입하면 강화된 암반의 응력 및 변형률은 식(1)과 표시된다.

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}^{(1)} &= \{\dot{\sigma}_x^{(1)}, \dot{\sigma}_y^{(1)}, \dot{\sigma}_z^{(1)}, \dot{\tau}_{xy}^{(1)}, \dot{\tau}_{yz}^{(1)}, \dot{\tau}_{zx}^{(1)}\}^T \\ \dot{\epsilon}^{(1)} &= \{\dot{\epsilon}_x^{(1)}, \dot{\epsilon}_y^{(1)}, \dot{\epsilon}_z^{(1)}, \dot{\gamma}_{xy}^{(1)}, \dot{\gamma}_{yz}^{(1)}, \dot{\gamma}_{zx}^{(1)}\}^T \end{aligned} \quad (1)$$

한편 강화암반의 응력 및 변형률은 원지반과 수직그라우트재에 의해 다음 식과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}^{(1)} &= \mu_r \dot{\sigma}_r + \mu_g \dot{\sigma}_g \\ \dot{\epsilon}^{(1)} &= \mu_r \dot{\epsilon}_r + \mu_g \dot{\epsilon}_g \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 μ_r, μ_g 는 각각 원지반 및 그라우트재의 체적비이고 원지반 및 그라우트재의 물성이 균질, 등방하다고 가정하면 복합체역학을 이용하여 식 (3)과 같이 강화암반의 구성방정식 및 원지반과 그라우트재의 구조관계식(structural relationship)을 유도할 수 있다.

$$\dot{\sigma}^{(1)} = [D^{(1)}] \dot{\epsilon}^{(1)} \quad (3)$$

식(3)을 유도하는 데 있어서 변형률 에너지법을 이용한 방법은 참고문헌 [4]를 참조할 수 있고 평균장 이론(mean field theory)을 이용한 방법은 참고문헌 [8]에 자세히 기술하였다.

2.2. 절리군에 대한 침투주입의 모형화

비교적 높은 주입압에 의한 수직 그라우팅의 경우, 기본 가정에 의해 절리군내로 주입재가 침투하게 되고 결국 절리내 공극을 완전히 충전하게 된다. 본 연구에서는 참고문헌 [4]에서 시도된 바 있는 침투주입의 모형화 과정을 절리군이 2개인 좀더 일반적인 경우에 대하여 확장하였다. 그림 2(d)와 같이 절리군이 2개인 경우에 대한 침투주입의 경우, 전체 강화암반의 비등방 물성은 다음과 같이 유도할 수 있다.

두 번째 절리군을 따른 국부좌표계를 x_2-y_2 로 표기하고 절리군에 대한 침투주입후 전체 복합체의 응력/변형률을 다음 식과 같이 표기하면

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}^{(3)} &= \{\dot{\sigma}_x^{(3)}, \dot{\sigma}_y^{(3)}, \dot{\sigma}_z^{(3)}, \dot{\sigma}_{xy}^{(3)}, \dot{\sigma}_{yz}^{(3)}, \dot{\sigma}_{zx}^{(3)}\}^T \\ \dot{\epsilon}^{(3)} &= \{\dot{\epsilon}_x^{(3)}, \dot{\epsilon}_y^{(3)}, \dot{\epsilon}_z^{(3)}, \dot{\gamma}_{xy}^{(3)}, \dot{\gamma}_{yz}^{(3)}, \dot{\gamma}_{zx}^{(3)}\}^T \end{aligned} \quad (4)$$

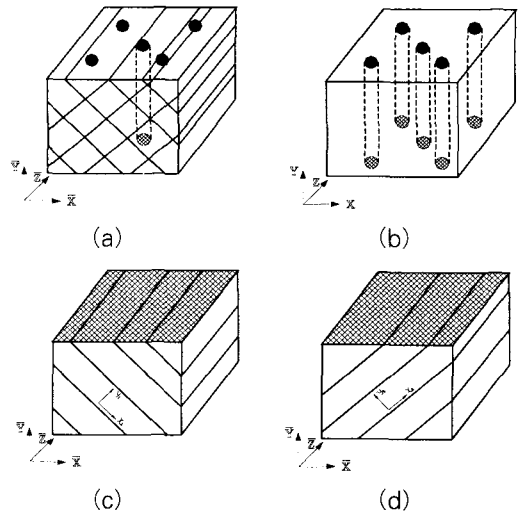


Fig. 2. Modeling of Jointed Rock Masses with Permeation Grouting.

- (a) Model
- (b) Case 1 : intact rock+grouting
- (c) Case 2 : Case1+joint set 1
- (d) Case 3 : Case2+joint set 2

복합체 이론에 따른 평균 응력/변형률은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}^{(3)} &= \mu_2 \dot{\sigma}^{(2)} + \mu_3 \dot{\sigma}^{j2} \\ \dot{\epsilon}^{(3)} &= \mu_2 \dot{\epsilon}^{(2)} + \mu_3 \dot{\epsilon}^{j2} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, 윗 첨자 2는 그림 2(c)와 같이 수직그라우팅과 절리군 1에 의한 복합체의 성질을 나타내며 이는 참고문헌 [4]에서 기술한 바와 같으며 $j2$ 는 두 번째 절리군을 의미한다. 한편 체적비 μ_2, μ_3 는 식(6)과 같으며

$$\begin{aligned} \mu_2 &= \frac{w_2}{w_2 + t_2} ; \quad \mu_3 = \frac{t_2}{w_2 + t_2} \\ \mu_2 + \mu_3 &= 1 \end{aligned} \quad (6)$$

w_2 및 t_2 는 각각 두 번째 절리군의 간격 및 두께를 나타내고 일반적으로 $t_2 \ll w_2$ 이므로 식(9)는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mu_2 \approx 1 ; \quad \mu_3 \approx \frac{t_2}{w_2} \quad (7)$$

이제 칩투재에 의해 암반과 절리면이 완전히 부착되어 있다고 가정하면 절리 경계면을 따른 적합방정식 및 평형방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_x^{(3)} &= \dot{\epsilon}_x^{(2)} = \dot{\epsilon}_x^{j2}, \quad \dot{\epsilon}_z^{(3)} = \dot{\epsilon}_z^{(2)} \\ &= \dot{\epsilon}_z^{j2}, \quad \dot{\gamma}_{zx}^{(3)} = \dot{\gamma}_{zx}^{(2)} = \dot{\gamma}_{zx}^{j2} \\ \dot{\sigma}_y^{(3)} &= \dot{\sigma}_y^{(2)} = \dot{\sigma}_y^{j2}, \quad \dot{\tau}_{xy}^{(3)} = \dot{\tau}_{xy}^{(2)} \\ &= \dot{\tau}_{xy}^{j2}, \quad \dot{\tau}_{yz}^{(3)} = \dot{\tau}_{yz}^{(2)} = \dot{\tau}_{yz}^{j2} \end{aligned} \quad (8)$$

전술한 바와 같이 $t_2 \ll w_2$ 의 관계가 성립한다면 두께가 매우 얇은 절리내 그라우트재에 대하여 다음과 같은 속도 불연속계 (Velocity discontinuity)를 도입할 수 있다.

$$\dot{g}^{j2} = \{ \dot{g}_y^{j2}, \dot{g}_x^{j2}, \dot{g}_z^{j2} \}^T \quad (9)$$

여기서 \dot{g}_y^{j2} 및 $\dot{g}_x^{j2}, \dot{g}_z^{j2}$ 는 수직 및 전단방향 속도 불연속계를 의미하며 이를 이용하면 칩투주입재의 구성방정식은 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\dot{\sigma}^{j2} = [K^{j2}] \dot{g}^{j2} \quad (10)$$

및

$$[K^{j2}] = \begin{bmatrix} K_{11}^{j2} & K_{12}^{j2} & K_{13}^{j2} \\ K_{21}^{j2} & K_{22}^{j2} & K_{23}^{j2} \\ K_{31}^{j2} & K_{32}^{j2} & K_{33}^{j2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서 칩투 주입재가 탄성적으로 거동한다면 K_{11}^{j2} 및 K_{22}^{j2}, K_{33}^{j2} 는 각각 수직 및 전단강성도를 의미하고 대각선 외의 항들은 무시할 수 있으며 일반적으로 $K_{11}^{j2} = K_N^{j2}, K_{22}^{j2} = K_{33}^{j2} = K_S^{j2}$ 로 표기한다. 한편, 수직 그라우팅 및 첫 번째 절리군에 대한 칩투 주입재 강화지반의 구성방정식은 국부좌표계로 변환된 후 $[\bar{D}]^{(2)}$ 와 같이 표기하기로 한다.

식(3), (8) 및 (10)을 이용하면 다음 식을 유도할 수 있다. 즉,

$$[\delta] \dot{\epsilon}^{(3)} \approx [\delta] \dot{\epsilon}^{(2)} + \frac{1}{w_1} \dot{g}^{j2} \quad (12)$$

여기서,

$$[\delta] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

이며, 식(5)로부터

$$[\delta] \dot{\epsilon}^{(2)} = [A^{(2)}] \dot{\epsilon}^{(3)} + [B^{(2)}] \dot{g}^{j2} \quad (14)$$

와 같이 쓸 수 있으며 식(12) 및 (14)로부터

$$[\delta] \dot{\epsilon}^{(2)} = [S^{(2)}] \dot{\epsilon}^{(2)} \quad (15)$$

로 되며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon}^{(2)} = [S_1^{(2)}] \dot{\epsilon}^{(3)} \quad (16)$$

마지막으로 절리면의 침투 주입재를 포함한 강화암반의 구성방정식은 다음 식으로부터 유도할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}^{(3)} &= \mu_2 \dot{\sigma}^{(2)} + \mu_3 \dot{\sigma}^{j2} \\ &\approx \dot{\sigma}^{(2)} + \frac{t_2}{w_2} \dot{\sigma}^{j2} \end{aligned} \quad (17)$$

으로 되고 $t_2 \ll w_2$ 이므로 식(16)으로부터

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}^{(3)} &\approx \dot{\sigma}^{(2)} = [\bar{D}^{(2)}][S_1^{(2)}] \dot{\epsilon}^{(3)} \\ &= [\bar{D}^{(3)}] \dot{\epsilon}^{(3)} \end{aligned} \quad (18)$$

여기서, 국부좌표계에서의 구성방정식은

$$[D_i^{(3)}] = [\bar{D}^{(2)}][S_1^{(2)}] \quad (19)$$

이고 전체좌표계로 치환한 경우에는

$$\bar{\sigma}^{(3)} = [T_{\theta_2}]^{-1} \dot{\sigma}^{(3)} \quad ; \quad \bar{\epsilon}^{(3)} = [T_{1, \theta_2}]^{-1} \dot{\epsilon}^{(3)} \quad (20)$$

의 관계가 성립하므로

$$\bar{\sigma}^{(3)} = [\bar{D}^{(3)}] \bar{\epsilon}^{(3)} \quad (21)$$

와 같이 쓸 수 있고

$$\begin{aligned} [\bar{D}^{(3)}] &= [T_{\theta_2}]^{-1} [D_i^{(3)}] [T_{1, \theta_2}] \\ &= [T_{\theta_2}]^{-1} [\bar{D}^{(2)}] [S_1^{(2)}] [T_{1, \theta_2}] \end{aligned} \quad (22)$$

와 같이 되며 $[T_{\theta_2}]$ 및 $[T_{1, \theta_2}]$ 은 크기가 6×6 인 변환행렬을 의미한다. 참고문헌 [2]에 나타난 결과를 종합하면 식 (22)의 전체좌표계에 대한 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} [\bar{D}^{(3)}] &= [D^{(w)}] [T_{\theta_1}]^T [S_1^{(1)}] [T_{1, \theta_1}] \\ &\quad [T_{\theta_2}]^T [S_1^{(2)}] [T_{1, \theta_2}] \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 θ_1 은 첫 번째 절리군의 dip 각도를 의미하며 일반적으로 식(23)은 크기가 6×6 인 행렬식으로 표현된다. 그러나 주향이 Z축과 평행하다면 식(23)은 monoclinic 성질을 내포하게 되어 크기가 4×4 인 full 행렬과 크기가 2인 두개의 sub 행렬로 표현된다. 이때, dip 각도가 0° 혹은 90° 인 경우에는 크기가 3×3 인 full 행렬과 크기가 3인 대각선 행렬로 단순화 된다.

3. 그라우팅 강화암반의 설계특성치 도출방법

절리를 포함한 암반에 대한 수직 및 침투 그라우팅 전후의 강화효과를 분석하기 위하여는 전체 좌표계 혹은 국부좌표계에 대한 구성방정식을 검토하여 강화물성에 대한 도표를 작성함으로써 비교하는 방법이 있다. 절리군이 하나인 경우에는 다음에 제시하는 방법에 의해 원지반의 강화효과를 정량적으로 비교·분석할 수 있으나 절리군이 두 개 이상인 경우에 대하여는 직접적인 비교가 사실상 불가능하다. 그러나 이 경우에도 이상적인 절리 분포를 고려하면 강화효과를 간접적으로 비교·분석할 수 있다.

절리를 포함한 암반에 대해 수직그라우팅을 시공하여 강화된 복합체의 구조관계식, 식(3), 에서 얻어진 $[D^{(1)}]$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[D^{(1)}] = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & S_{24} & 0 & 0 \\ & & S_{33} & S_{34} & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ & & & & S_{55} & S_{56} \\ \text{sym.} & & & & & S_{66} \end{pmatrix} \quad (24)$$

식(24)는 앞서 논의한 바와 같이 절리의 주향이 Z축과 평행하다는 가정에 근거한 Monoclinic 물성을 의미하며 만일 절리의 dip 각도가 0° 혹은 90° 라면 식(24)는 다음 식과 같이 간편화 된다.

$$[D^{(1)}] = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ & & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & S_{44} & 0 & 0 \\ & & & & S_{55} & 0 \\ \text{sym.} & & & & & S_{66} \end{pmatrix} \quad (25)$$

식(25)의 경우는 직교이방성 물성을 나타내며 강화압반의 물성은 Hooke의 법칙을 이용함으로써 손쉽게 유도할 수 있다.

절리군에 침투주입재가 고결한 복합체의 구성 방정식, 식(21), 의 전체좌표계에서의 $[\bar{D}^{(3)}]$ 도 식(24)와 같은 형식으로 표현된다. 이를 Lekhnitskii [9]의 직교 이방성 탄성체이론을 이용하면 국부좌표에서의 설계특성치를 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{\cos^4\theta}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - 2\frac{\nu_{12}}{E_1}\right) \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{\sin^4\theta}{E_2} \\ S_{22} &= \frac{\sin^4\theta}{E_1} + \left(\frac{1}{G_{12}} - 2\frac{\nu_{12}}{E_1}\right) \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{\cos^4\theta}{E_2} \\ S_{33} &= \frac{1}{E_3} \\ S_{44} &= 4\left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}}\right) \sin^2\theta \cos^2\theta \\ &\quad + \frac{1}{G_{12}} \\ S_{12} &= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} + \frac{2\nu_{12}}{E_1} - \frac{1}{G_{12}}\right) \sin^2\theta \cos^2\theta + \frac{\nu_{12}}{E_1} \\ S_{13} &= -\left(\frac{\nu_{23}}{E_2} \sin^2\theta + \frac{\nu_{31}}{E_3} \cos^2\theta\right) \end{aligned}$$

$$S_{14} = \left[2\left(\frac{\sin^2\theta}{E_2} - \frac{\cos^2\theta}{E_1}\right) + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right) (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \right] \sin\theta \cos\theta$$

$$S_{23} = -\left(\frac{\nu_{23}}{E_2} \cos^2\theta + \frac{\nu_{31}}{E_3} \sin^2\theta\right)$$

$$S_{24} = \left[2\left(\frac{\cos^2\theta}{E_2} - \frac{\sin^2\theta}{E_1}\right) + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right) (\cos^2\theta - \sin^2\theta) \right] \sin\theta \cos\theta$$

$$S_{34} = 2\left(\frac{\nu_{31}}{E_3} - \frac{\nu_{23}}{E_2}\right) \sin\theta \cos\theta$$

$$S_{55} = \frac{\cos^2\theta}{G_{23}} + \frac{\sin^2\theta}{G_{13}}$$

$$S_{66} = \frac{\sin^2\theta}{G_{23}} + \frac{\cos^2\theta}{G_{13}}$$

$$S_{56} = \left(\frac{1}{G_{23}} + \frac{1}{G_{13}}\right) \sin\theta \cos\theta \quad (26)$$

여기서 한가지 유의할 사항은 참고문헌 [9]에서 사용된 국부좌표계의 물성은 직교 이방성 성질을 내포하고 있으며 따라서 본 연구에서와 같이 Monoclinic 성질을 갖는 강화압반의 경우, 직접 적용하기에는 어려움이 있다. 그러나 다음 장에서 설명하는 바와 같이 일반적인 경우 큰 무리없이 적용할 수 있다.

4. 설계특성치 산정을 위한 매개변수 해석

본 장에서는 앞서 제안한 수직 및 침투그라우팅의 모형을 통하여 절리면을 포함한 암반에 그라우팅을 실시한 경우, 원지반의 강성변화와 침투그라우팅의 주입효과 및 절리면의 방향 등에 따른 강화압반의 물성변화를 살펴보기로 한다. 이를 위하여 표 1과 같이 절리군이 하나이고 침투그라우팅만 고려한 경우와 수직그라우팅 및 침투그라우팅을 함께 고려한 경우에 대하여 해석을 실시하였으며,

Table 1 : Parametric Studies used in the Analysis

CASE	Vertical grouting	Penetration grouting	No. of joint sets (°)	Joint Spacing w_j (m)	Volume ratio H_g (%)	Joint Stiffness K_n, K_s
1	No	Yes	1 (0, 30, 60, 90)	0.1	10	Varied
2	Yes	Yes	1 (0, 30, 60, 90)	0.1	10	Fixed
3	Yes	Yes	1 (0, 90)	0.1~0.5	10	Fixed
4	Yes	Yes	1 (0, 90)	0.1	10~30	Fixed
5	Yes	Yes	2 (0 & 90)	0.1~0.5	10	Fixed
6	Yes	Yes	2 (0 & 90)	0.1	10~30	Fixed

Table 2 : Material Properties of Intact Rock and Joint

	Young's modulus E_r (GPa)	Poisson's ratio ν_r	Tensile strength $\sigma_{t,r}$ (MPa)	Compressive strength $\sigma_{c,r}$ (MPa)	Joint stiffness $K_{n,r}$ (MN/m)	Joint stiffness $K_{s,r}$ (MN/m)
Dolerite	78.0	0.15	17.3	165.0	13,400	1,500
Slate	66.0	0.15	14.9	159.0	12,700	1,400
Limestone	49.0	0.15	10.6	152.0	8,500	1,300
Siltstone	28.5	0.15	6.3	84.0	7,000	1,200
Sandstone	24.0	0.15	5.1	78.0	3,100	1,000
weathered rock	0.7	0.30	-	-	3,100	1,000

Table 3 : Material Properties of Cement Grout

Young's modulus, E_g	30 GPa	Normal stiffness, $K_{N,g}$	32 GPa/m
Poisson's ratio, ν_g	0.17	Shear stiffness, $K_{S,g}$	12 GPa/m
Cohesion, C_g	0.9 MPa	Tensile strength, $\sigma_{t,g}$	0.5 MPa
Friction angle, ϕ_g	30°	Joint thickness, t_j	1 mm

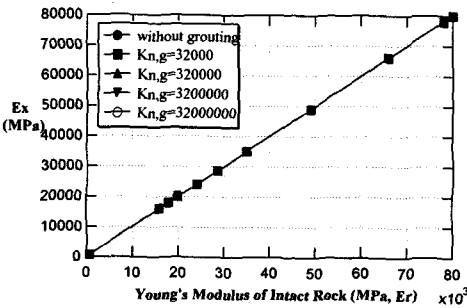
절리군이 두 개인 경우 수직그라우팅과 침투그라우팅에 의한 원지반의 물성변화에 대하여 고찰하였다. 수직그라우트재의 체적비는 10%로 가정하였고 절리면의 간격은 0.1m로 정하여 일반적인 추이를 고찰하였으며 매개변수 해석을 통하여 이들의 영향을 조사하였다.

본 연구에서 사용된 원지반 및 절리면의 물성값은 표 2와 같고 ([10] [11]), 탄성계수는 절리면을 포함하지 않은 신선암의 값을 의미하며 풍화암의 물성은 전형적인 값을 취하였으며 절리면의 강성은 사암의 값을 사용하였다.

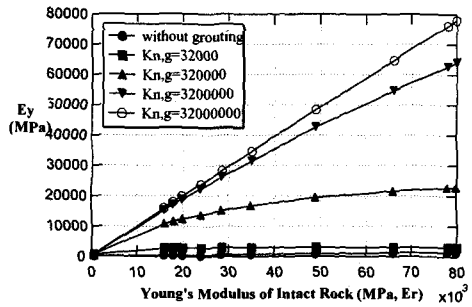
한편, 그라우트재의 물성은 표 3과 같으며 초미립자 시멘트 (Superfine cement) 그라우트재의 물성

값(Ata 등 [12]; Widmann [13])을 적용하였다.

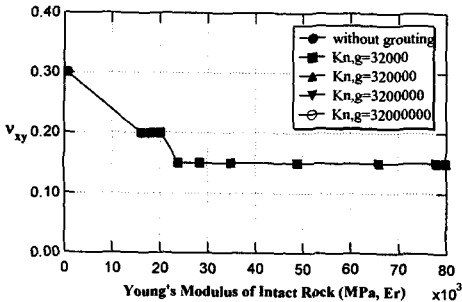
Case 1은 해석의 간편함을 위하여 이상화한 경우로서, 한 방향의 절리군을 포함한 원지반에 대하여 수직 그라우트재의 영향은 무시하고 침투 그라우트재만 주입된 상태를 고려하였으며 그라우트재의 수직강성과 전단강성을 변화시키면서 원지반과 강화 암반의 물성을 절리면의 방향을 주축으로 하는 국부좌표계에서 비교하였다. 수직 그라우팅의 영향을 무시하는 경우, 국부좌표계에서는 절리면의 dip 각도에 무관하게 동일한 직교 이방성 물성값을 얻을 수 있으나 실제 그라우트재의 수직 및 전단강성을 정확히 산정하기 위하여는 참고문헌 [4]에서 고려한 바 있는 이론적인 기법을 사용하거나 실험을 통해 확인하여야 한다. 또한 그라우트재



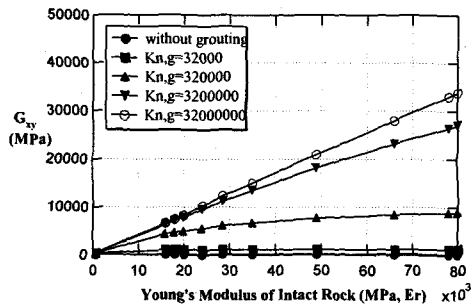
(a) Elastic Modulus E_x in local coord. system



(b) Elastic Modulus E_y in local coord. system



(c) Poisson's Ratio ν_{xy} in local coord. system



(d) Shear Modulus G_{xy} in local coord. system

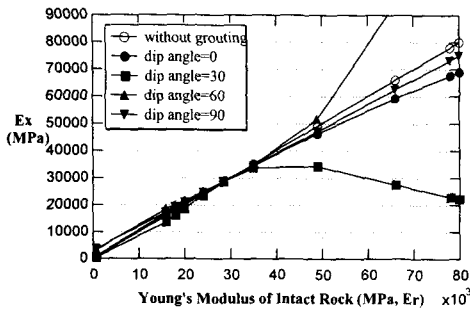
Fig. 3. Material Properties according to the Variation of Grout Stiffness
(Vertical grouting is not accounted for. : 1 set of joints)

의 강성도는 원지반의 물성과 밀접한 관계가 있으나 실험을 통해 규명된 바는 없으며 따라서 본 연구에서는 원지반의 물성과 관계없이 일정한 값을 적용하여 이들의 영향을 조사하였다.

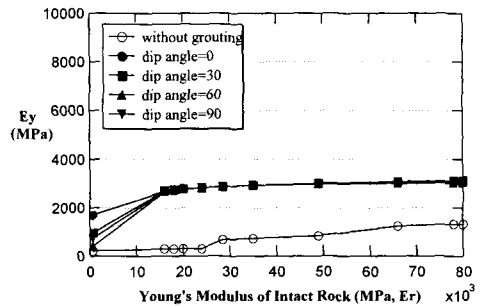
해석결과 강화 암반의 강성도 변화는 그림 3에서 알 수 있듯이 절리면 방향의 탄성계수 E_x 의 경우 그라우트재의 강성에 관계없이 신선암의 탄성계수와 같으며, 절리면에 수직인 방향의 탄성계수와 전단탄성계수는 그라우트재의 수직 및 전단강성이 증가할수록 증가하는 경향을 보인다. 한편 절리면을 포함한 원지반의 강성은 절리면에 수직인 방향의 취약성 때문에 풍화암(weathered rock)인 경우 신선암에 비하여 약 3배 정도, 현무암 (dolerite)인 경우 약 10배 가량 감소하며 침투 그라우팅에 의

해 원지반의 강성이 증가함을 알 수 있다. 그러나 절리면에 침투된 그라우트재의 수직 및 전단강성도 값을 과도하게 가정한 경우라도 신선암의 강성을 초과할 수는 없으며 이는 전체좌표계에서 산정한 강성값이 아니라 절리면 방향을 주축으로 고려한 국부좌표계에서의 물성값으로 표현하였고 또한 수직 그라우트재의 영향을 고려하지 않았기 때문인 것으로 판단된다.

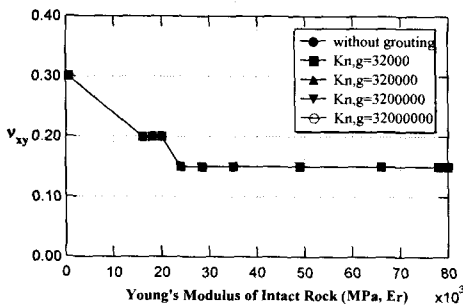
Case 2는 절리군 1개를 포함한 원지반에 있어서 수직 그라우트재와 침투 그라우트재를 함께 고려한 경우로서 절리군의 방향에 따른 국부좌표계에서의 복합체 물성값을 그림 4에 도시하였으며 dip 각도가 0° 혹은 90° 가 아닌 경우에는 Lekhnitskii의 직교 이방성 탄성체이론을 이용하



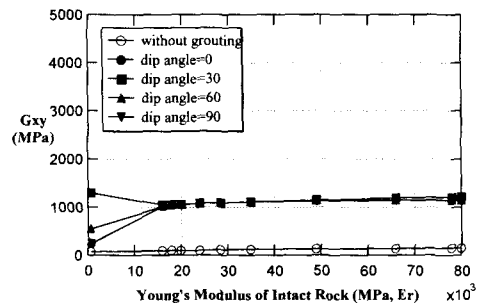
(a) Elastic Modulus E_x in local coord. system



(b) Elastic Modulus E_y in local coord. system



(c) Poisson's Ratio ν_{xy} in local coord. system



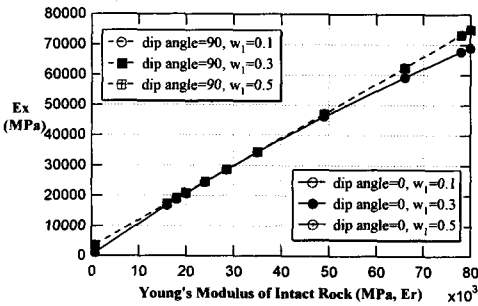
(d) Shear Modulus G_{xy} in local coord. system

Fig. 4. Material Properties according to the Variation of Dip Angle (1 set of joints)

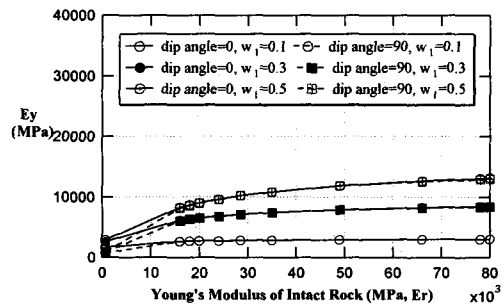
여 응력-변형을 관계식에서 복합체의 물성을 도출하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 dip 각도의 변화에 따라 일정한 물성변화의 추이를 구해내는 것은 어렵다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 Lekhnitskii의 이론은 국부좌표계에서의 직교이방성 물성을 전체좌표계에서 고려한 Monoclinic 물성에 국한하여 적용 가능하므로 절리면의 방향에 따른 경향을 도출할 수는 없다. 그러나 원지반의 물성이 풍화암 혹은 연암인 경우에는 그림 4의 도표를 큰 무리없이 사용할 수 있음을 알 수 있다. 실제 보강설계에 있어서 일반적인 dip 각도의 경우는 그림 4의 도표중 0° 및 90°의 값을 보강법에 의해 산출할 수 있을 것으로 판단된다. 한편 수직 그라우트재와 침투 그라우트재를 동시에 고려한 경우, 수직 그라우트재의 영향이 가장 크게 되는

dip 각도, 즉 90°의 탄성계수가 다른 각도에 대한 탄성계수보다 크게 된다.

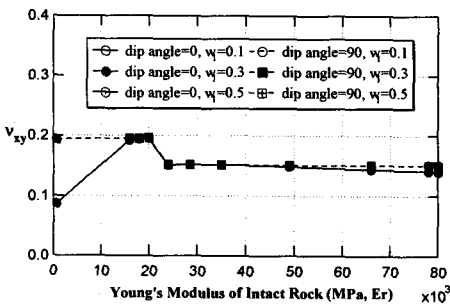
Case 3에서는 절리군의 간격을 변화시켰을 때 산정되는 탄성계수의 변화를 검토하였으며 이를 그림 5에 도시하였다. 절리면의 dip 각도가 0°, 90°인 경우 모두 절리면 방향의 탄성계수는 절리의 간격에 관계없이 일정한 값을 나타내며 이는 그림 3의 결과와 같은 맥락에서 이해될 수 있다. 반면에 dip 각도가 0°인 경우보다 90°인 경우의 E_x 가 다소 크게 나타나고 있는데 이는 수직 그라우팅의 영향을 크게 받기 때문으로 사료된다. 한편 E_y 및 G_{xy} 의 경우는 절리 간격이 넓어질수록 그 값이 증가하는 경향을 보인다.



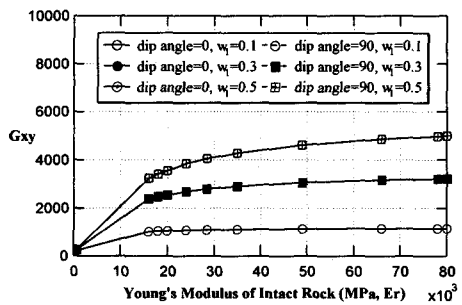
(a) Elastic Modulus E_x in local coord. system



(b) Elastic Modulus E_y in local coord. system



(c) Poisson's Ratio ν_{xy} in local coord. system



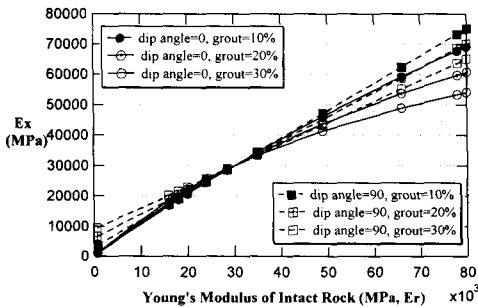
(d) Shear Modulus G_{xy} in local coord. system

Fig. 5. Material Properties according to the Variation of Joint Spacing (1 set of joints)

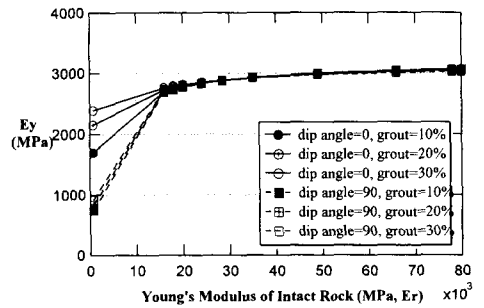
Case 4는 한 개의 절리군에 대한 그라우팅 주입재의 양을 증가시킨 경우에 대하여 고찰하였다. 이론적으로는 기본가정에서 언급한 바와 같이 주입재가 완전히 충전되는 경우에 대하여만 고려하였으므로 주입재의 양은 일정하다고 할 수 있다. 그러나 신선암의 공극 등에 충전되는 경우 등을 고려한다면 주입재의 변화량에 대한 매개변수 해석을 고려할 필요가 있다. 그림 6은 그라우트재의 체적비에 따른 각종 탄성계수의 변화량을 도시하였으며 원지반이 풍화암 혹은 연암인 경우에는 탄성계수가 증가하나 경암부인 경우에는 오히려 감소하는 경향을 보여준다. 이는 그라우트재의 물성인 원지반의 물성보다 작음에에서 기인하는 현상이며 실제 현장에서는 경암부에 그라우팅을 적용하는 경우는 극히 드문점을 감안할 때 다소 이론적인 값

이라 할 수 있다.

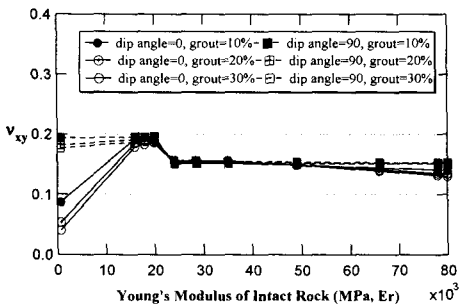
마지막으로 두 개의 직교하는 절리군에 대한 그라우팅 효과를 분석한 도표를 그림 7 및 그림 8에 도시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 절리군의 dip 각도가 특수한 경우를 제외하고는 국부좌표계에서 직교 이방성 물성을 도출하는 것은 현실적으로 곤란하고 다만 전체좌표계에서 물성을 도시하는 방법이 있으나 이를 공학적으로 판단하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 절리군간의 사이각이 90°이고 절리군의 dip 각이 0° 및 90°인 경우에 국한하여 검토하였다. Case 5는 두 절리군의 절리 간격이 동시에 변화하는 경우에 대한 각종 탄성계수의 변화 추이를 고려하였으며 이를 그림 7에 나타내었다. 한편 강화효과를 정량적으로 분석



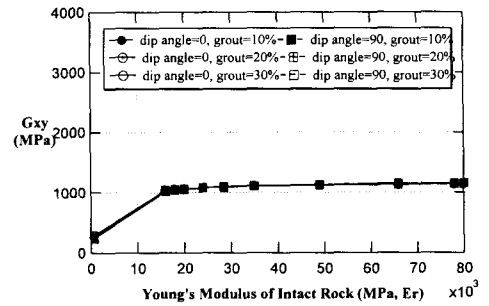
(a) Elastic Modulus E_x in local coord. system



(b) Elastic Modulus E_y in local coord. system



(c) Poisson's Ratio ν_{xy} in local coord. system



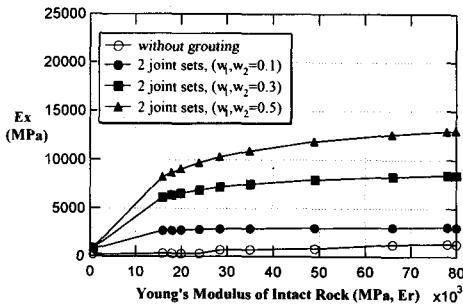
(d) Shear Modulus G_{xy} in local coord. system

Fig. 6. Material Properties according to the Variation of Volume Ratio, μ_g (1 set of joints)

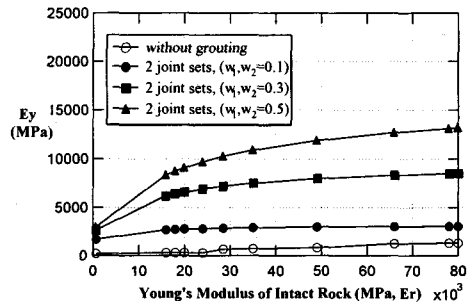
하기 위하여 절리 간격이 0.1m 이고 그라우팅 주입이 없는 경우도 함께 도시하였으며 이 결과 그라우팅 주입에 의해 각종 탄성계수가 2배이상 증가하는 경향을 보인다. Case 6은 두 개의 절리군에 대한 주입비를 증가시킨 경우에 대한 각종 탄성계수의 변화량을 검토하였으며 이를 그림 8에 나타내었다. 이 결과, 그림 6에서와 마찬가지로 풍화암의 경우만 주입비에 영향을 받고 나머지 경우에는 주입비와 크게 무관함을 알 수 있다. 그림 7 및 8의 각종 탄성계수는 전체좌표계에 대한 값들이며 따라서 풍화암의 경우, 수직 그라우팅의 영향이 가장 크게 작용하는 E_y 값이 비교적 크게 증가하는 경향을 보인다. 여기서 한가지 특기할 만한 사항은 절리군의 사이각이 90° 인 경우, 그림 7 및 8의 E_x 와 E_y 값으로부터 임의의 dip 각에 대한 각종 탄

성계수를 유추할 수 있으며 실질적으로는 풍화암의 경우를 제외하고는 이들 도표의 값을 그대로 적용할 수도 있을 것으로 판단된다.

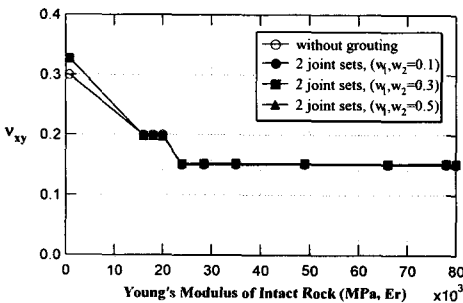
매개변수 해석에 관한 자세한 사항은 참고문헌 [14]에 수록하였으며 본 연구에서 제안한 모형에 대한 실제 적용예를 함께 수록하였다. 본 연구를 통하여 도출한 각종 비등방 물성값은 터널해석 및 설계 프로그램에 직접 적용될 수 있을 것으로 판단되며 추후 Monoclinic 제약조건을 완화한 설계도표들이 개발될 수 있을 것으로 사료된다.



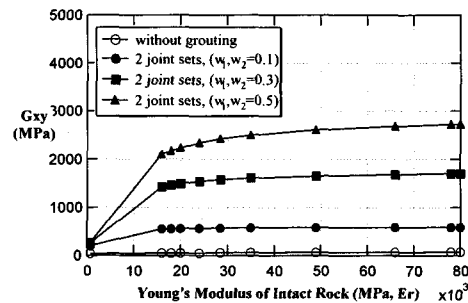
(a) Elastic Modulus E_x in global coord. system



(b) Elastic Modulus E_y in global coord. system

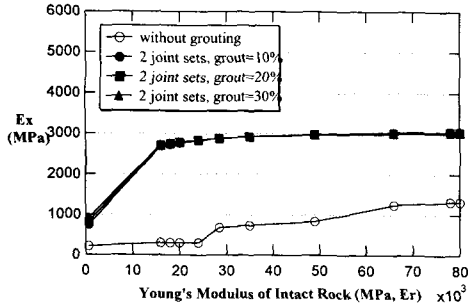


(c) Poisson's Ratio ν_{xy} in global coord. system

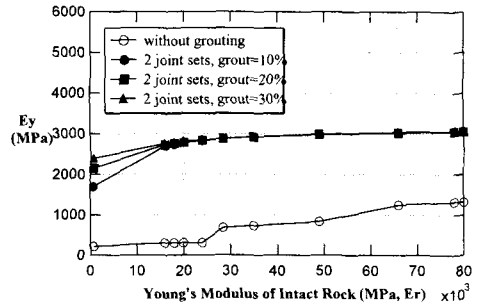


(d) Shear Modulus G_{xy} in global coord. system

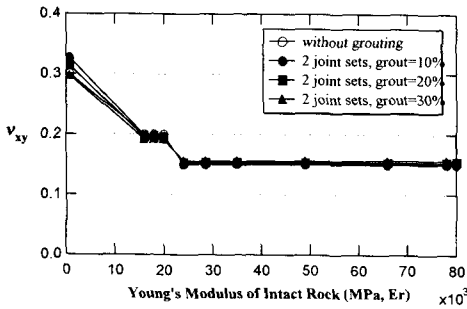
Fig. 7. Material Properties according to the Joints Spacing (2 set of joints)



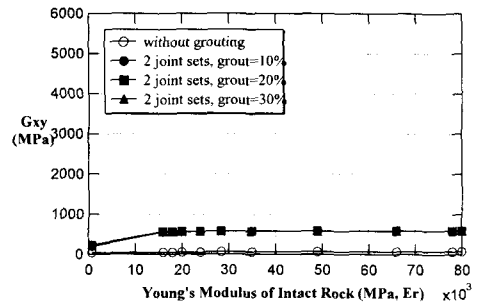
(a) Elastic Modulus E_x in global coord. system



(b) Elastic Modulus E_y in global coord. system



(c) Poisson's Ratio ν_{xy} in global coord. system



(d) Shear Modulus G_{xy} in global coord. system

Fig. 8. Material Properties according to the Variation of Volume Ratio, μ_g (2 set of joints)

5. 결론

본 연구에서는 절리군을 포함한 연약지반 혹은 암반의 강화를 위하여 흔히 적용되는 침투 그라우팅에 대한 설계기법을 개발하기 위하여 복합체 역학 및 분산형 절리모형을 응용한 강화암반의 구성방정식을 도출하였으며 매개변수연구를 통하여 실제 거동에 부합하는 강화 암반의 물성을 산정하였다. 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 침투 그라우팅에 의한 강화암반의 비등방성 물성을 도출하기 위하여 신선암, 수직 그라우트재 및 침투 그라우트재 등을 고려한 구성방정식을 유도하였다. 이 구성방정식은 신선암 및 그라우트재의 물성뿐만 아니라 그라우팅 주입비, 절리의 간격 및 dip 각도의 함수로 표현된다.

(2) 절리군이 1개인 경우, 임의의 dip 각도에 대한 비등방 물성을 도출하기 위하여 Lekhnitskii의 직교 이방성 탄성체이론을 도입한 결과 일정한 변화의 추이를 발견하지는 못하였다. 따라서 본 연구에서는 특정한 dip 각도에 대한 결과로부터 임의의 각에 대한 값을 보간법에 의해 도출할 수 있도록 각종 계수들을 도표화하였다.

(3) 절리군이 2개인 경우, dip 각이 0° 및 90° 이고 사이각 역시 90° 인 경우에 국한하여 강화 암반의 각종 탄성계수를 도출하였으며 풍화암인 경우를 제외하고는 임의의 dip 각에 대하여도 그림 7 및 8의 도표를 적용할 수 있음을 보였다.

본 연구에서 제안한 각종 도표들은 실제 그라우팅 공법을 적용하는 현장에서 현장실험을 통하여 검증할 수 있으며 이는 다른 곳에서 자세히 언급하고자 한다.

참고문헌

1. J. H. Schmertmann & J. F. Henry, "A Design Theory for Compaction Grouting" *Proc. Grouting, Soil Improvement & Geosynthetics*, ASCE, pp.215-228, 1992.
2. K. Kikuchi, Y. Mito & T. Adachi, "Case Study on the Mechanical Improvement of Rock Masses by Grouting" *Proc. Rock Foun.*, Tokyo, pp.393-397, 1995.
3. 이준석, "그라우팅 및 강관다단 공법에 의한 터널의 보강효과에 관한 연구", **대한토목학회논문집**, Vol. 17-III, pp.629-639, 1997.
4. 이준석, 방춘석, 엄주환, 최일윤, "암반절리 내 그라우트재의 침투 및 보강효과에 관한 연구", **대한토목학회논문집**, Vol. 18-III, pp.425-433, 1998.
5. Itasca Consulting Group, Inc, "FLAC : Fast Lagrangian Analysis of Continua", ver. 3.3, 1996.
6. 이준석, 방춘석, 엄주환, "그라우팅 보강터널의 탄소성해석에 관한 연구", **대한토목학회 논문집**, Vol. 17-III, pp.531-539, 1997.
7. 이준석, "복합 항복함수를 이용한 그라우팅 강화터널의 탄소성해석에 관한 연구",

대한토목학회논문집, Vol. 18-III, pp.207-215, 1998.

8. J. S. Lee, "Elasto-plastic Analysis of Tunnel Structures Reinforced with Compaction Grouting", *Can. Geotech. J.*, submitted, 1998.
9. S. G. Lekhnitskii, *Theory of Elasticity of a Anisotropic Elastic Body*, Holden-Day, Inc., 1963
10. S. C. Bandis, A. C. Lumsden & N. R. Barton, "Fundamentals of Rock Joint Deformation", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, vol. 20, pp.249-268, 1983.
11. J. A. Franklin & M. B. Dusseault, *Rock Engineering*, McGraw-Hill, 1989.
12. A. Ata & C. Vipulanandan, "Cohesive and Adhesive Properties of Silicate Grout on Grouted-Sand Behavior", *J. Geotech. & Geoenv. Eng.*, vol. 124, pp. 38-44, 1998.
13. R. Widmann, *et. al.*, "International Society for Rock Mechanics Commission on Rock Grouting", *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, vol. 33, pp.803-847, 1996.
14. 이준석 외, "고속철도 터널의 보강설계에 관한 연구 (II)" 철도기술연구원 연차보고서, 1998.