

# 침투 및 할렬주입에 의한 지반보강 효과에 관한 연구

## Analysis of ground reinforcement effect using fracturing grouting

이준석\*<sup>1</sup>, 이인모<sup>2</sup>, 정형식<sup>3</sup>, 이대수<sup>4</sup>

Lee, J. S. · Lee, I. M. · Chung, H. S. · Lee, D. S.

### Abstract

A practical modeling approach has been proposed in this study to better understand the behavior of penetration grouting which is normally applied to the jointed rock masses to increase the bearing capacity and to reduce the ground water flow into the tunnel. Based on Bingham model together with a steady-state flow of the grout, penetration model is simulated in the commercial package called UDEC and, injection pressure as well as joint thickness are found to be the main parameters to determine the range of grout spread. Another numerical model on fracturing grouting is also suggested and, in this case, the tensile strength as well as cohesion of the rock masses are proven to be the major factors to decide the fracturing mechanism of the rock masses. The reinforcement effect of the grout-reinforced rock masses is calculated from the suggested algorithm on orthotropic material model and it is found that the directional stiffness of reinforced rock masses is increased up to 3 to 4 times compared with original jointed rock masses. Future work will be concentrated on the water control around the tunnel by the grout injection and a model test will also be performed to verify the suggested methods developed in this study.

**Keywords:** Fracturing grouting, grout-reinforced foundation, grout penetration

### 요 지

본 연구에서는 절리를 포함한 터널주변 암반의 안전성 강화 및 지하수 유입 억제공으로 사용되는 침투그라우팅에 대한 모형화 기법을 제시하고 관련 매개변수 해석을 실시하였다. Bingham 모형을 적용한 시멘트 그라우팅재는 정상류 흐름으로 가정하여 해석의 편의를 도모하였으며 UDEC을 이용한 해석결과, 절리의 두께 및 주입압이 침투그라우팅에 의한 확산범위를 결정짓는 주요 변수임을 확인하였다. 침투그라우팅 모형을 근간으로 할렬그라우팅 해석을 위한 수치모형을 제안하였으며 암반의 인장강도와 점착력이 할렬의 주요변수임을 입증하였다. 한편, 주입후 지반보강효과를 정량적으로 검토하기 위하여 직교 이방성 물성을 계산할 수 있는 알고리즘을 제시하였으며 이 결과 주입후 약 3~4배 정도의 강성도 증진효과를 확인하였다. 향후 본 연구결과는 그라우팅재 주입에 의한 투수계수 저감효과 혹은 지하수 억제공법 등의 설계기법에 적용될 수 있으며 관련 실험도 수행될 예정이다.

**주요어:** 할렬그라우팅, 그라우팅 강화지반, 그라우팅재의 침투

\*1 정희일, KRRI (jslee@krri.re.kr)

2 정희일, 고려대학교 토목환경공학과 교수

3 정희일, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

4 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

## 1. 서론

일반적으로 연약지반내 지하구조물 및 터널 등의 시공 시에는 주변 지반의 강화를 위하여 다양한 주입공법을 고려하며 공기 및 공사비를 절감할 수 있는 다양한 공법들이 적용되고 있다. 이 중, 토사 및 풍화토 지반의 경우에는 주로 압밀 그라우팅 (consolidation grouting) 개념 (이준석 등, 2001)이 적용될 수 있고 절리가 발달한 풍화암 지대에는 침투그라우팅 (penetration grouting) 설계이론 (Lee 등, 2000)을 고려할 수 있다. 한편 기존 절리를 통해 그라우팅재가 침투하는 경우, 주변 지반이 연약하거나 상대적으로 고압의 주입압을 적용하면 절리 끝부분이 파쇄되거나 (fracturing grouting) 새로운 절리가 발생 (이준석 등, 1999) 할 수 있다. 종래의 경험에 따르면 풍화암대 이상의 경우, 할렬파쇄 (hydraulic fracturing)를 방지할 수 있을 정도의 주입압을 적용하는 방안이 최적 대안인 것으로 알려져 있으나 일부 연약 지반의 경우에는 할렬주입에 의한 지반강화 및 underpinning 효과도 기대할 수 있는 것으로 보고되고 있으며 따라서 본 연구에서는 주입압에 의한 절리내 침투주입 및 절리면의 파쇄와 이에 따른 지반 보강효과에 대하여 논의하였다.

절리를 포함한 암반 시추공내 주입압에 따른 주변 지반의 거동분석 및 주입재의 흐름은 Santarelli 등 (1992)에 의해 시도된 바 있다. 이들은 개별요소법 (Discrete Element Model)을 이용하여 주입재의 밀도에 따른 침투영역을 조사하였으며 절리의 확장폭에 대한 매개변수 해석을 함께 수행하여 절리의 방향성에 대한 영향을 검토하였다. 한편 Advani 등 (1997)은 3차원 유한요소법을 이용하여 주입재의 압력을 고려한 절리선단의 응력집중계수를 산정하였으며 이로부터 그라우팅재 주입에 따른 할렬의 가능성을 파악하였다. Atkinson & Thiercelin (1997)은 시추공 주변 절리의 침투압에 따른 인장 및 전단파괴에 대하여 정성적 연구를 수행하였다. 이 결과, 절리내 주입압에 의한 인장 및 전단균열의 크기를 산정하였으며 이를 도표화하였다. Bryant 등 (2003)은 주입에 의한 할렬파괴 조건을 제시하고 주입압에 의한 절리의 성장조건을 제시한 바 있다.

이와는 별도로 할렬을 고려하지 않은 암반내 침투 그라

우팅재의 보강효과는 Lee 등 (2000)에 의해 조사된 바 있다. 이 경우, 절리는 persistency가 100%인 무한면으로 간주하였으며 주입재로 인한 보강효과를 정량적, 실험적으로 분석하였다. 또한 Yang 등 (2002)은 stochastic geometry 이론에 기초한 절리군을 생성한 후 Bingham 모형에 의한 주입재의 침투깊이를 수치적으로 계산한 바 있으며 관련 경험식을 제안하였다. Zhang 등 (1999)은 개별요소법을 이용하여 시추공주변 절리의 파괴양상을 분석하였으며 초기지압과 절리패턴이 주요 변수임을 입증하였고 Chen 등 (2003)에 의해 확인된 바 있다.

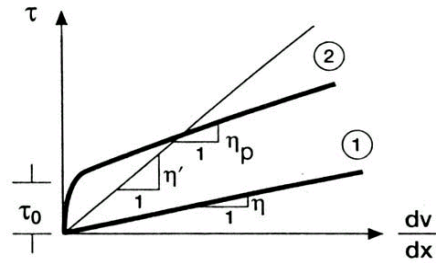
다음에서는 절리를 포함한 주입공 주변의 그라우팅 강화효과에 대하여 논의하였다. 이를 위하여 개별요소법을 이용하여 이상적인 절리군을 생성하고 주입에 따른 그라우팅재의 침투효과를 고찰하였으며 이를 이용하여 그라우팅재의 고결에 따른 지반의 강화효과를 정량적으로 분석하였다. 또한 주입압에 의한 절리선단의 할렬 가능성을 파악할 수 있는 수치적 해석기법을 제시하였다. 이를 바탕으로 향후에는 그라우팅재의 주입압에 따른 원지반의 할렬과 이를 통한 주입 등 coupling 효과분석이 수행될 수 있을 것이며 관련 실험도 수행될 예정이다.

## 2. 그라우팅재의 암반절리내 침투이론

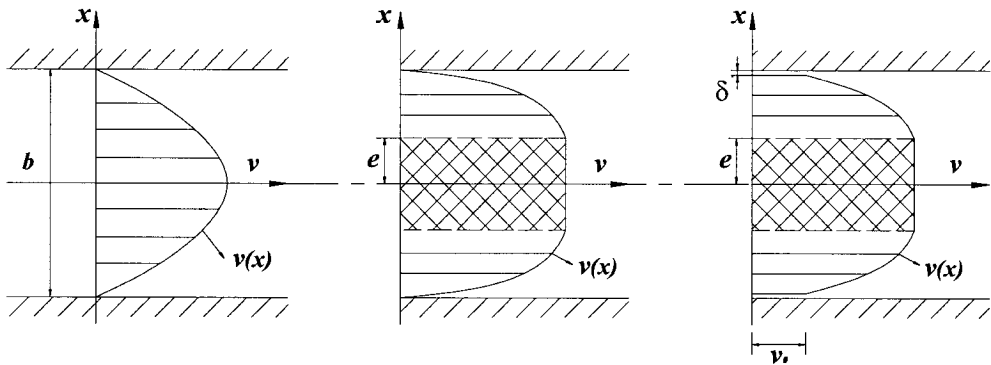
일반적으로 절리내 침투주입은 주입재의 입경이 암반내 절리폭의 1/3이하인 경우에 가능한 것으로 알려져 있으며 특히 보통시멘트는 절리내 투수계수가  $10^{-4}$  cm/sec 이하에서는 주입이 불가능하나 마이크로 시멘트를 적용하는 경우에는  $10^{-6}$  cm/sec까지도 가능한 것으로 보고되고 있다. 다음에서는 절리내 그라우팅재의 침투와 관련한 기존 이론을 살펴보고 할렬 기준에 대해 언급하였으며 주입후 지반보강 효과에 대하여 기술하였다.

### 2.1 암반절리내 그라우팅재의 주입기구

지반 보강 및 차수효과를 위한 그라우팅재는 시멘트 및 물을 위주로 급결제 및 유동화제 등의 화학적 재료를 혼합하여 주입하게 된다. 시멘트 계열의 그라우팅재는



(a) 전단응력과 전단속도의 관계 (Lombardi, 2003)



(b) Newton 모형

(c) Bingham 모형

(d) 일반적인 경우

그림 1. 암반절리내 그라우팅재의 흐름모형

지하수 흐름과 같은 고전적인 Newton의 흐름법칙을 따르지 않는 것으로 알려져 있으며 Bingham 모형이 현실적인 것으로 보고되고 있다 (Widmann 외, 1996). 즉, 그림 1(a)에서와 같이

$$\tau_N = \eta \frac{dv}{dx} \quad (1)$$

$$\tau_B = \eta_p \frac{dv}{dx} + \tau_o = \eta' \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

와 같으며 여기서, 식 (1) 및 식 (2)의  $\tau_N$  및  $\tau_B$ 는 각각 Newton 및 Bingham 모형에 의한 전단응력을 나타내고  $\tau_o$ 는 그라우팅재의 항복강도 혹은 점착력을 의미하며  $\frac{dv}{dx}$ 는 전단속도이다. 한편 그림 1(a)의 동적 점성도  $\eta$  (①)는 Bingham 모형의 경우 소성 점성도 (plastic viscosity)  $\eta_p$  (②)로 표현되며 식 (2)와 같이 겉보기 점성도 (apparent viscosity)  $\eta$ 로 다시 쓸 수 있다. 한편 소성 점성도  $\eta_p$ 는 다음과 같이 시간의 함수로 표현

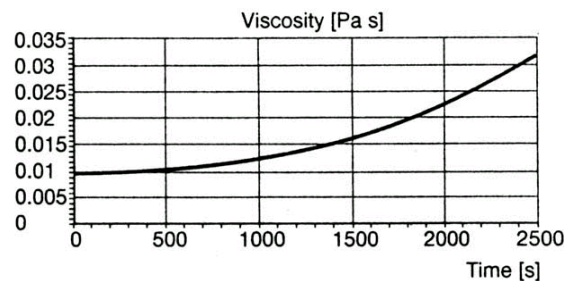


그림 2. 시간에 따른 소성 점성도의 변화 예

할 수 있으며 (Yang 등, 2002)

$$\eta_p = \eta_{p0} \exp(\alpha t) \quad (3)$$

여기서  $\alpha$ 는 재료상수이고 전형적인 형상은 그림 2에 나타난 바와 같다. 또한 Shroff & Shah (1993)는 소성 점성도에 대하여 다음과 같은 경험공식을 제안한 바 있다.

$$\eta_p = \frac{\text{shear stress } s}{\text{shear rate } D} = \frac{s}{D^n} = \exp(0.013) \frac{(S)^{0.355}}{D} \quad (4)$$

식 (2) 및 Amadei & Savage (2001)로부터 정상류 (steady flow)로 가정한 그라우팅재의 평균 유속은

$$\bar{v} = \frac{gb^2}{12\eta} J + \frac{\tau_o^3}{3\eta b \rho_g \gamma_g^2 J^2} - \frac{\tau_o b}{4\rho_g \eta} \quad (5)$$

와 같다. 위 식에서  $g$  및  $b$ 는 각각 증력가속도 및 절리의 두께를 의미하며, 편의상 점성도  $\eta$ 는 소성 점성도  $\eta_p$ 와 같고 아래첨자  $g$ 는 그라우팅재를 나타낸다. 한편  $J$ 는 그라우팅재의 주입압 구배 (grout pressure gradient)로서 다음과 같이 표현된다.

$$J = \frac{\partial p}{\partial x} \quad (6)$$

여기서  $p$ 는 주입압을 의미하며 식 (5)에서  $\gamma_g$  및  $\rho_g$ 는 그라우팅재의 단위중량 및 밀도를 나타낸다. 마지막으로 그라우팅재의 유량은

$$q = \frac{gb^3}{12\eta} J + \frac{\tau_o^3}{3\eta \rho_g \gamma_g^2 J^2} - \frac{\tau_o b^2}{4\rho_g \eta} \quad (7)$$

와 같으며 식 (7)의 우변 첫 항은 Newton 모형에 의한 유량에 해당한다. 절리면의 거칠기를 고려한 경우는 Amadei & Savage (2001)에 의해 유도된 바 있으며 관내 흐름에 대한 경우는 Buckingham의 식 (Wilkinson, 1960)으로 변환될 수 있다. 절리면을 따른 투수계수  $k_j$ 는

$$k_j = \frac{1}{12\eta} \quad (8)$$

와 같다.

한편 암반절리내 그라우팅재의 최대 확산반경은

$$R_{\max} = \frac{p_{\max} b}{2\tau_o} = h \frac{b}{2C_r} = hf \quad (9)$$

와 같고 (Lombardi, 2003) 여기서

$$C_r = \frac{\tau_o}{\delta}, \quad h = \frac{p_{\max}}{\delta}, \quad f = \frac{b}{2C_r} \quad (10)$$

와 같으며  $\delta$ 는 그림 1의 활동층 두께 (sliding layer thickness)를 의미한다. 식 (9)에서 알 수 있는 바와 같이 확산반경은 그라우팅재의 주입압, 절리의 두께 및 항복강도 등에 영향을 받는다.

## 2.2 할렬주입 기구

앞서 언급한 바와 같이 할렬주입은 두 가지 측면에서 고려할 수 있다. 즉, 충격도 및 풍화암 등 비교적 강도가 낮은 지반 조건하에서는 고압 주입에 의한 주입공 주위의 신규 할렬 (hydraulic fracturing) 기구를 가정할 수 있으며 이는 이준석 등 (1999)에서 이미 다룬 바 있다. 한편, 기존 절리면을 따른 할렬 주입 (hydro-jacking)은 기존 절리의 폭을 확장시키고 절리면 선단의 파괴를 야기시켜 주변 지반을 강화 혹은 약화시킬 수도 있으며 본 연구에서는 그라우팅 주입압에 의한 기존 절리의 거동에 대하여 중점적으로 고려하였다. 일반적으로 주입공 주변의 할렬주입 조건,  $P_f$ 는

$$P_f = \sigma_v \nu (1 + \sin \phi) \quad (11)$$

와 같이 쓸 수 있다 (Shroff & Shah, 1993). 여기서,  $\sigma_v$ ,  $\nu$ , 및  $\phi$ 는 각각 유효 수직응력, 포아송 비 및 내부 마찰각을 의미한다. 한편 Cambefort (1977)는 다음과 같은 경험 공식을 제안한 바 있다.

$$P_f = \frac{q}{2\pi k_j} \frac{\gamma_g \eta}{b \eta_w} \ln \frac{R}{R'} \quad (12)$$

여기서,  $\eta_w$ ,  $R$  및  $R'$ 은 각각 지하수의 점성계수, 그라우팅재의 확산반경 및 주입공의 반경을 나타낸다.

본 연구에서는 주입압에 의한 기존 절리의 발달을 모사하기 위하여 고전적인 탄소성 해석기법을 적용하였다. 이를 위하여 그림 3과 같은 Mohr-Coulomb 항복기준을 원암 및 절리면에 각각 적용하였으며 비연관 (non-associated) 흐름법칙을 함께 고려할 수도 있다. 그림 3에서  $C$  및  $\sigma_0$ 는 각각 점착력과 인장강도를 의미하고 아래첨자  $i$  및  $j$ 는 절리가 없는 암석 및 절리를 의미한다. 한편 그라우팅재의 주입에 따라 절리면의 내부 마찰각은 원지반의 내부 마찰각보다 작게 되는 경향이 있음

며 dilatancy 각의 경우도 유사한 경향을 나타낼 수 있다 (Swedenborg & Dahlstrom, 2003). 따라서 그라우팅 주입에 의한 절리면의 발달 및 이에 따른 주입효과 등을 복합적으로 판단할 수 있으며 주입후 지반 보강 혹은 열화현상을 규명할 수도 있다.

### 2.3 주입후 지반보강 효과분석

절리면을 따른 그라우팅재의 주입후에는 원지반의 강화효과와 차수효과를 기대할 수 있다. 본 절에서는 주입후 강화효과 분석을 위한 기법을 제시하고 다음 장에서 이를 수치적으로 검증하였다. Lee 등 (2000)에 의하면 침투그라우팅에 의한 지반 보강효과는 절리면의 성질 및 주입량 등의 함수로 표현할 수 있고 실험 및 역해석 결과 풍화암의 경우, 절리면의 강성도가 약 6배 정도 증가하는 것으로 예상하였다.

Lee 등 (2000)의 결과중 본 연구에서는 주입공내 그라우팅재 고결에 의한 강화효과는 미약한 것으로 가정하고 주입공에서 주변 절리내로 주입되는 그라우팅재에 의한 효과만을 고려하면 다음과 같은 강화지반의 구성방정식을 유도할 수 있다.

$$\overline{\sigma}^{(2)} = [D^{(2)}] \overline{\epsilon}^{(2)} \quad (13)$$

여기서, 전체좌표계 및 rate 형태로 표현된 응력/변형률의 윗첨자 (2)는 절리군의 수가 2개임을 나타내며 강성도 행렬  $D^{(2)}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

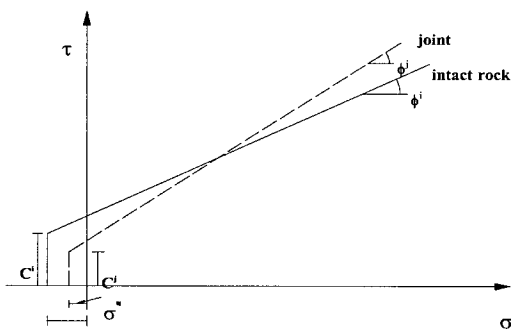


그림 3. 원지반 및 절리의 탄소성 해석모형

$$[D^{(2)}] = [D][T_{\theta_1}]^T [S_1^{(1)}][T_{1,\theta_1}][T_{\theta_2}]^T [S_1^{(2)}][T_{1,\theta_2}] \quad (14)$$

여기서, 행렬  $D$ ,  $T$  및  $S_1$ 은 각각 절리를 포함하지 않은 암반의 구성방정식, 절리 좌표계의 변환과 관련한 항 및 각 절리군의 구조관계식이고, 자세한 내용은 Lee 등 (2000) 및 다음의 그림 4를 참조할 수 있다. 식 (14)를 유도하기 위해서는 그라우팅재가 절리내에 완전히 충전되고 원지반과 완전 부착되어 있으며 절리의 두께는 충전대상 원지반에 비해 무시할 수 있을 정도로 얇다는 가정을 적용하였으며 절리의 dip angle은  $90^\circ$ 인 경우로 한정하였다.

### 3. 수치해석 예

본 장에서는 그라우팅재 주입에 의한 암반의 물성 혹은 투수성 변화를 고찰하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 이를 위하여 개별요소법을 이용한 상용 프로그램 (UDEC 3.0, Itasca)을 채택하였으며 매개변수 해석에 의한 침투 및 할렬그라우팅의 주입기구에 대하여 논의하였다. 표 1 및 표 2는 각각 전형적인 사암 및 풍화된 사암절리에 대한 물성이며 그림 5는 해석에 사용된 시추공 주변의 형상이다. 한편 절리의 점착력 및 내부마찰각은 실험결과를 바탕으로 (Hassani & Scoble, 1985) 각각 17 MPa 및  $35^\circ$ 로 가정한 후 매개변수 해석을 통하여 이

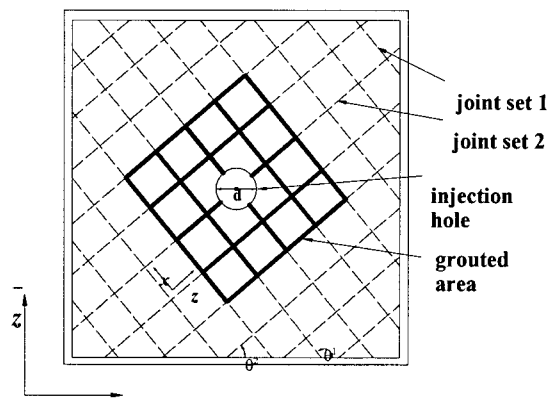


그림 4. 절리군을 포함한 시추공 주변의 기하학적 형상

표 1. 사암의 물성 (Goodman, 1989)

탄성계수	19.2GPa	점착력	27.2MPa
포아송비	0.38	내부마찰각	27.8°
말 토	2.65g/cm <sup>3</sup>	1축 압축강도	73.8MPa

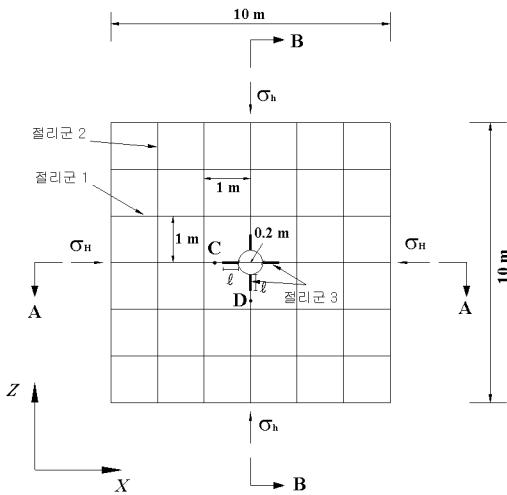
표 2. 사암 절리의 물성 (Bandis 등, 1983)

수직강성도	3.1GPa/m	지열상태의 절리두께	0.0001m
전단강성도	1.0GPa/m		
절리 투수계수	8.3Pa <sup>-1</sup> sec <sup>-1</sup>	압축시 최종절리두께	0.00005m

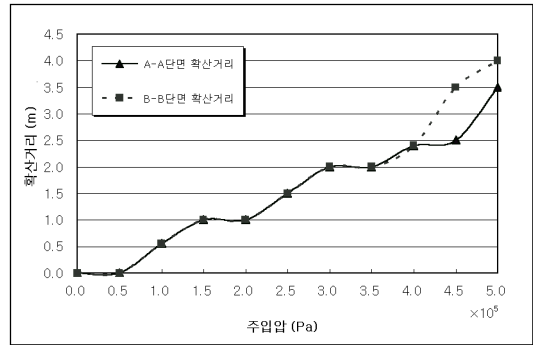
들의 영향을 검토하였다. 그라우팅재의 경우에는 밀도와 점착력에 대한 정보가 필요하며 Yang 등 (2002)의 자료를 기초로 각각 1.4g/cm<sup>3</sup> 및 14Pa로 가정하였다.

### 3.1 침투그라우팅 모형해석 예

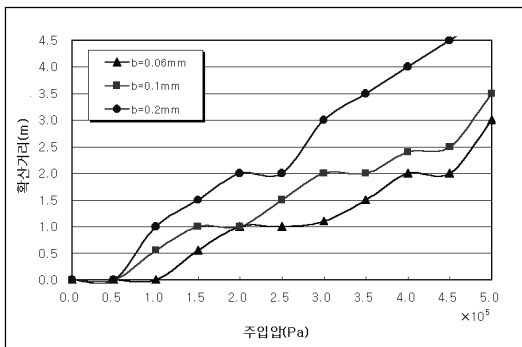
침투 그라우팅 모형을 재현하기 위하여 그림 5(a)의 절리군 1 및 2를 고려하고 주입압을 상승시켜 시추공 주변의 변화 양상을 살펴보았다. 이를 위해 각 절리군은 간격이 1m로 일정하고 persistency는 100%인 것으로 가정하였다. 시추공 주변의 초기응력,  $\sigma_H$  및  $\sigma_h$ 는 모두  $2.6 \times 10^5$  Pa로 가정하였으며 이 때 단면 A-A 및 B-B를



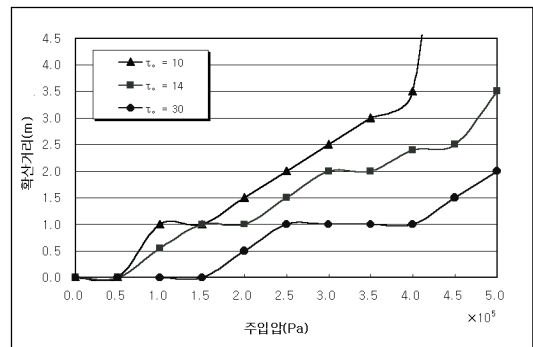
(a) 수치해석 모형 (UDEC)



(b) 주입압에 따른 확산거리 산정



(c) 절리두께에 따른 확산거리 산정



(d) 주입재의 항복강도에 따른 확산거리 산정

그림 5. 침투그라우팅 모형에 대한 수치해석 결과

따르는 주입재의 확산거리를 측정하였다. 이를 위하여 그라우팅재는 Bingham 모형을 적용하였으며 그 결과 그림 5(b)와 같이 주입압이 매우 높은 경우가 아닌 때에는 대칭인 형태의 확산분포를 얻을 수 있다. 한편 그림 5(c)와 같이 기존 절리의 폭,  $b$ 가 클수록 확산거리가 늘어나게 되고, 주입재의 점착력 혹은 항복강도,  $\tau_0$ 가 증가할수록 그림 5(d)와 같이 확산거리가 짧아짐을 알 수 있다. 그림 6은 그림 5(b)의 확산거리를 단계별로 표현하였으며 주입압이  $5 \times 10^5 \text{Pa}$  이 넘는 경우에는 주변 절리내로 그라우팅재가 침투하는 양상을 보인다.

실제 현장에 있어서는 주입재의 확산거리를 그림 5(a)와 같이 5m까지 고려하는 경우는 드물고 약 1~1.5m

간격으로 천공하여 중첩효과 및 주변 절리 충전효과를 도모하게 된다. 한편 식 (9)에서 알 수 있는 바와 같이 정상류 흐름으로 가정한 그라우팅재의 주입범위는 절리의 투수계수와는 관계없고 실제 매개변수 해석결과도 주입범위와 투수계수와는 무관함을 알 수 있다.

### 3.2 할렬그라우팅 모형해석 예

할렬 그라우팅 모형을 모사하기 위하여 그림 5(a)의 절리군 3을 고려하였다. 이 경우, 절리군 3은 시추공 주위의  $0^\circ$  및  $90^\circ$ 의 방향성을 갖는 비연속 절리로 가정하였으며 주입압을 상승시켜 시추공 주변의 변화 양상을

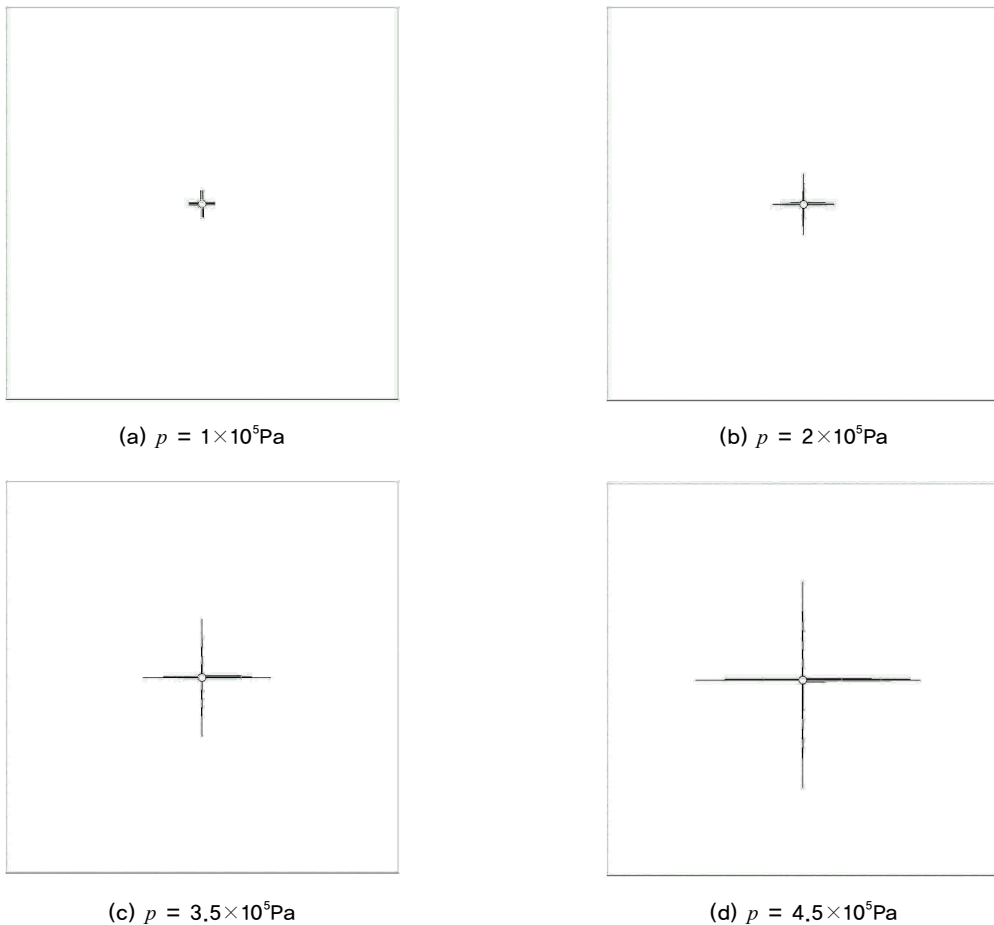


그림 6. 그라우팅재의 확산형태

살펴보았다. 그러나 UDEC의 특성상 절리군 3만을 따로 모형화할 수 있는 방안은 없으므로 전체 지반을 다수의 블록으로 나누고 그림 5(a)와 같이 임의의 절리군 1 및 2를 다시 도입한 후 이 절리군의 성질은 원지반의 물성과 동일한 것으로 가정하였다. 절리군 1 및 2의 강성을 계산하기 위하여 Lee & Pande (1999)의 근사 이론을 적용한 후 다음과 같은 관계식을 사용하였다.

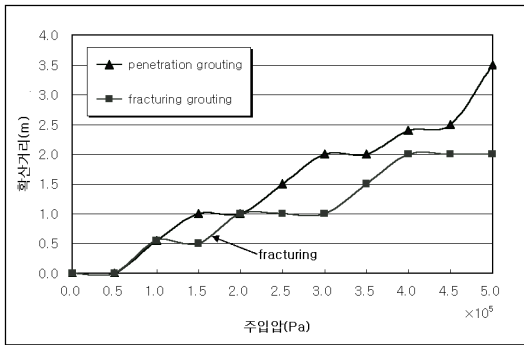
$$K_N = \frac{E_j(1 - \nu_j)}{t_j(1 + \nu_j)(1 - 2\nu_j)} \quad (15)$$

$$K_S = \frac{E_j}{2t_j(1 + \nu_j)}$$

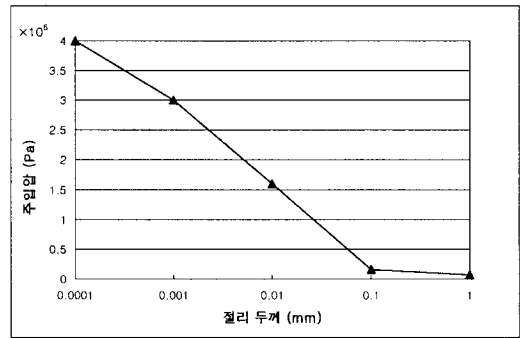
식 (15)는 절리의 탄성계수  $E_j$  및 포아송비  $\nu_j$ 와 절리의 두께  $t_j$ 를 알고 있을 때 적용하는 근사식으로서 본 연구에서는 원지반의 탄성계수 및 포아송비를 적용하였

고 절리의 두께는 표 2의 값을 사용하였으며 이들 강성의 영향은 매개변수 해석을 통하여 따로 기술하였다.

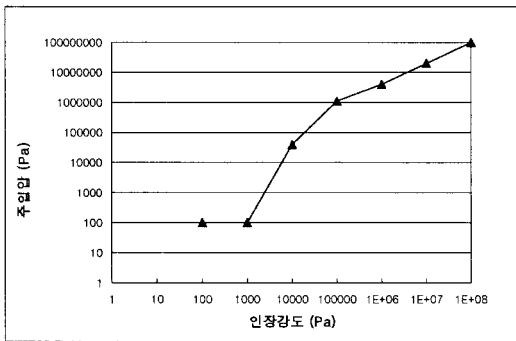
절리군 3의 길이  $l$ 을 0.5m로 가정한 경우에 대한 해석결과는 그림 7과 같다. 이 중, 그림 7(a)는 그림 5의 침투그라우팅에 대한 입력 물성 및 기하학적 조건을 동일하게 사용하고 단지 그림 5의 절리군을 주입공 주변 0.5m에 한정시킨 결과이다. 그림 7(a)에서 알 수 있는 바와 같이 할렬은 주입압이  $1.6 \times 10^5$  Pa에 도달하였을 때 발생하였으며 이후 그라우팅재의 확산거리는 침투주입에 비해 훨씬 짧은 것으로 파악되었다. 여기서 한가지 유의할 사항은 UDEC 프로그램내에서 할렬그라우팅 모형을 구현하기 위해서 절리군 1 및 2를 도입하였으므로 실제로는 할렬보다 절리군 1 및 2를 통한 침투주입이 이루어지며 상기 주입압은 침투주입압이라 할 수 있다. 따라서, 가상의 절리군 1 및 2의 절리폭이 0인 경우를 가정



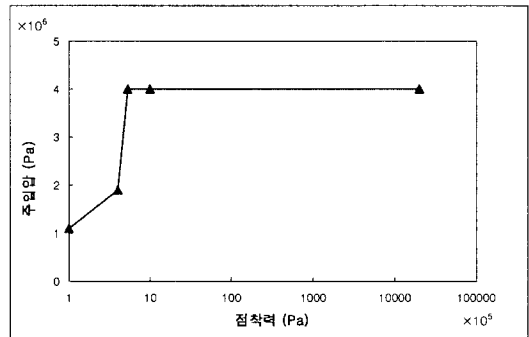
(a) 할렬주입압의 산정



(b) 절리두께에 따른 할렬주입압의 변화



(c) 인장강도에 따른 할렬주입압의 변화



(d) 점착력에 따른 할렬주입압의 변화

그림 7. 할렬그라우팅 모형에 대한 수치해석 결과



하면 실제와 매우 유사한 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상할 수 있으나 식 (15)의 값이 결정되지 않으므로 0에 근접한 값을 가정하였다. 그림 7(b)는 절리군 1 및 2의 절리두께에 따라 할렬주입이 시작되는 한계 주입압의 변화를 나타낸다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 할렬주입이 시작되는 시점은 절리의 두께와 매우 밀접한 관계가 있으며 절리두께가 0.0001mm 이하인 경우에는 한계주입압의 차이가 없는 것으로 파악되었고 따라서 이 절리 두께를 적용하면 UDEC을 이용한 모형화 과정에서의 오류를 제거할 수 있다.

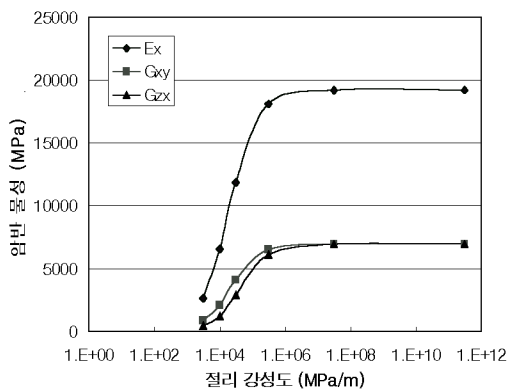
그림 7(c)에는 암반의 인장강도에 따라 할렬이 시작되는 한계주입압의 변화를 나타내었다. 이 때 절리군 1 및 2의 절리두께는 위에서 제안한 바와 같이 0.0001mm를 적용하였으며 그림에서 알 수 있는 바와 같이 일정한 일축인장강도 이하에서는 원암이 파쇄되는 현상이 발생하며 인장강도가 증가할수록 절리군 3의 끝단에서 절리가 벌어지는 현상, 즉 할렬이 발생하고 할렬된 통로를 따라 주입이 이루어지게 된다. 마지막으로 그림 7(d)에는 암반의 점착력에 따른 할렬의 가능성을 살펴보았다. 즉, 암반의 점착력이 할렬기구인 경우에는 점착력이 증가함에 따라 한계주입압도 증가하게 되나 점착력보다 인장강도가 할렬기구가 되는 경우에는 점착력의 증가와 관계없이 인장강도에 의한 할렬이 발생하게 된다. 이는 그림 3에 따라 점착력이 인장강도  $\times \tan$  (내부마찰각) 보다 크거나 작음에 따라 파쇄기구의 차이가 발생하는 것과 같다.

이 밖에 할렬주입의 매개변수로는 내부마찰각을 고려할 수 있으나 영향은 미미한 것으로 파악되었으며 투수계수의 경우에는 할렬기구와는 무관하다. 또한 초기응력 및 절리군 3의 길이, 주입공의 기하학적 형상 등을 고려한 매개변수 해석을 수행할 수 있으며 이는 다른 곳에서 다루기로 한다.

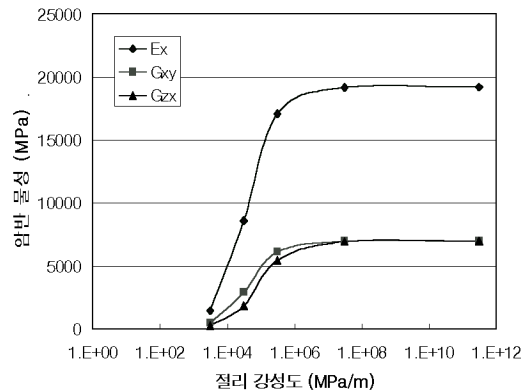
### 3.3 주입후 지반보강 효과분석 예

그라우팅재 주입후 지반보강 효과를 정량적으로 분석하기 위하여 그림 4에서 절리군이 2개인 경우를 가정하고 식 (14)를 이용하여 그라우팅 전후 지반물성의 변화를 살펴보았다. 이 경우, 그림 4에서  $\theta_1$  및  $\theta_2$ 는  $0^\circ$  및  $90^\circ$ 로 정하고 각각의 dip angle은  $90^\circ$ 로 가정하였다. 수치 해석을 위하여 적용한 암반 및 절리의 물성은 표 1 및 표 2의 내용과 동일하며 절리군의 간격이 변화할 때 전체 직교 이방성 물성의 변화를 살펴보았다. 여기서, 주입공 내 그라우팅재 고결에 의한 지반물성의 변화는 무시하였으며 여러 주입공에 의한 중첩효과를 고려하여 그라우팅재는 각 절리군내로 완전히 침투된 것으로 가정하였다. 따라서 X 및 Z 방향 탄성계수,  $E_x$  및  $E_z$ 는 동일하고 그라우팅재의 물성에 따라 변화하게 되나 주입방향 탄성계수  $E_y$ 는 그라우팅재의 물성과 관계없이 원암의 탄성계수인 19,000MPa과 같다.

그림 8(a)는 절리군의 간격이 1m인 경우, 절리의 강성



(a) 절리간격 1.0m



(b) 절리간격 0.5m

그림 8. 그라우팅 주입후 암반물성 변화

도에 따른 지반물성의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 절리군내에 그라우팅재가 침투하지 않은 원지반의 경우, 즉 절리의 수직 강성도가 3,100 MPa/m인 경우, 절리를 포함한 암반의 물성은  $E_x$ 는 약 2,700MPa 정도로 저하하고 전단탄성계수의 경우도 유사한 비율로 저하된다. 한편 그라우팅재의 강성이 충분히 커서 절리군의 영향을 무시할 수 있을 상황을 가정하여 절리면의 강성도를 증가시키는 경우에는 절리를 포함하지 않은 사암의 탄성계수와 같게 될 것이고 이는 그림 8(a)에서 절리의 강성도를  $3.1 \times 10^7$ MPa 이상으로 증가시킨 경우에 해당한다. 이를 할렬그라우팅의 한계 주입압과 연계시키면 절리의 두께가 0.0001mm에 해당하는 강성도와 같고 따라서 암반의 할렬조건과 같게 되어 본 연구에서 제안한 비등방 물성 산출과정의 적합성을 확인할 수 있다.

절리군의 간격이 0.5m인 경우의 직교 이방성 물성은 그림 8(b)에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 절리의 강성도가 작은 경우에는 절리간격이 1.0m인 경우에 비해 직교이방성 물성이 작음을 알 수 있으나 앞서 언급한 바와 같이 절리의 강성도가  $3.1 \times 10^7$ MPa인 경우와 같이 일정수준에 다다르면 절리군의 간격과 관계없이 일정한 값을 나타내게 된다.

한편 그라우팅 주입진후에 대한 현장 비파괴실험 결과 (Lee 등, 2000)에 따르면 주입후 절리면의 강성도는 약 6배 정도 증가하는 것으로 파악되었다. 따라서 그림 8을 이용하여 직교 이방성 물성,  $E_x$ 의 변화량을 살펴보면 절리간격이 1.0m인 경우에는 약 3.5배, 절리간격이 0.5m인 경우에는 약 4.3배의 증가를 예상할 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 상용프로그램을 이용하여 침투 및 할렬 그라우팅 주입과정을 모사하고 주입후 지반보강효과에 대하여 논의하였다. 주입과정에 대한 수치해석과 더불어 매개변수 해석을 같이 수행하였으며 주입후 지반보강효과를 정량적으로 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 침투그라우팅 과정을 모사하기 위하여 Bingham 모델을 도입하고 주입압에 따른 주입재의 확산현상을 모형화하였다. 매개변수 해석을 통하여 절리의 두께 및 그라우팅재의 항복강도가 그라우팅재의 확산을 좌우하는 주요 변수임을 입증하였으며, 식 (9)에서 알 수 있는 바와 같이 암반 절리의 투수계수는 주입범위를 결정하는 주요변수가 아님을 확인하였다.
2. 할렬그라우팅 과정을 모사하기 위하여 원지반 및 절리에 대하여 고전적인 탄소성 해석모형을 도입하고 할렬의 여부를 조사하였다. 이 결과 주어진 기하학적 형상과 초기응력하에서는 암반의 인장강도 및 점착력이 주요 변수임을 알 수 있다. 한편 UDEC 프로그램 내에서 할렬그라우팅을 모사하기 위하여 가상의 절리군을 도입하였으며, 절리의 두께가 0.0001mm이하인 경우 원지반과 유사한 거동을 하는 것을 알 수 있었다.
3. 침투 및 할렬그라우팅 후 원지반의 보강효과를 검증하기 위하여 그라우팅 주입지반의 직교이방성 물성을 도출하였다. 이 결과, 그라우팅에 의한 절리면의 강성도가 6배 정도 증가한다면 (Lee 등, 2000) 이로 인한 직교 이방성 물성은 약 3.5~4.3배 증가하는 것을 알 수 있었다.

향후에는 본 연구를 통하여 획득한 각종 수치해석 결과를 입증하기 위한 모형실험을 수행할 예정이며 이를 통하여 지반보강 및 차수효과에 대한 이론적 접근을 시도할 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문은 한국전력공사의 연구비 지원에 따른 연구결과의 일부이며 한국전력공사의 지원에 심심한 사의를 표하는 바입니다.

## 참고문헌

1. 이준석, 최알윤, 방춘석 (1999), “그라우팅 주입압에 의한 시추공의 파괴에 관한 연구”, *태한토목학회논문집*, Vol. 19, pp. 457- 466.
2. 이준석, 방춘석, 최알윤, 엄주환 (2001), “비등방 항복함수를 적용한 강회지반의 탄소상해석(I)”, *태한토목학회논문집*, Vol. 21, pp. 197- 205.
3. Amadei, B. & Savage, W. Z. (2001), “An analytical solution for transient flow of Bingham viscoplastic materials in rock fractures”, *I. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 38, pp. 285- 296.
4. Advani, S. H., et al. (1997), “Consequences of fluids lag in three- dimensional hydraulic fractures”, *I. J. Num. & Anal. Meth. Geomech.*, Vol. 21, pp. 229- 240.
5. Atkinson. C. & Thiercelin, M. (1997), “Pressurization of a fractured wellbore”, *I. J. Fracture*, Vol. 83, pp. 243- 273.
6. Bandis, S. C., Lumsden, A. C. & Barton, N. R. (1983), “Fundamentals of rock joint deformation”, *I. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 20, pp. 249- 268.
7. Bryant, S. L. Paruchuri, R. K. & Saripalli K. P. (2003), “Flow and solute transport around injection wells through a single, growing fracture”, *Adv. Water Res.*, Vol. 26, pp. 803- 813.
8. Cambefort, H. (1977), “The principles and applications of grouting”, *Q. J. Eng. Geol.*, Vol. 10, pp. 57- 95.
9. Chen, X, Tan, C. P. & Detournay, C. (2003), “A study on wellbore stability in fractured rock masses with impact of mud infiltration”, *J. Pet. Sci. & Eng.*, Vol. 38, pp. 145- 154.
10. Goodman, R. E. (1989), *Introduction to rock mechanics*, Wiley.
11. Hassani, F. P. & Scoble, M. J. (1985), “Frictional mechanism and properties of rock discontinuities”, *Proc. Fundamentals of rock joint*, Sweden, pp. 185- 196.
12. Itasca Co. (1996), *Universal Distinct Element Code*, Ver. 3.0.
13. Lee, J. S., Bang, C. S., Mok, Y. J. & Joh, S. H. (2000), “Numerical and experimental analysis of penetration grouting in jointed rock masses”, *I. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 37, pp. 1027- 1037.
14. Lee, J. S. & Pande, G. N. (1999), “A new joint element for the analysis of media having discrete discontinuities”, *Mechanics of Cohesive Frict. Mat.*, Vol. 4, pp. 487- 504.
15. Lombardi, G. (2003), “Grouting of rock masses, Proc., 3rd I. Conf. Grouting & ground treatment”, New Orleans, pp. 164- 197.
16. Lombardi, G. (1985), “The role of cohesion in cement grouting of rock”, *Commission Int. Des Grands Barrages*, Q.58, R.13, Lausanne, pp. 235- 261.
17. Santarell, F. J., Dahren, D., Baroudi, H. & Sliman, K. B. (1992), “Mechanisms of borehole instability in heavily fractured rock media”, *I. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 29, pp. 457- 467.
18. Shroff, A. V. & Shah, D. L. (1993), “Grouting technology in tunnelling and dam construction”, Balkema.
19. Swedenborg, S. & Dahlstrom, L- O. (2003), “Rock mechanics effects of cement grouting in hard rock masses”, *Proc.*, 3rd I. Conf. Grouting & ground treatment, New Orleans, pp. 1089- 1102.
20. Widmann, R., et al. (1996), “ISRM Commission on rock grouting”, *I. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, Vol. 33, pp. 803- 847.
21. Wilkinson, W. L. (1960), *Non-Newtonian fluids: Fluid mechanics, mixing and heat transfer*, Pergamon Press.
22. Yang, M. J., et al. (2002), “Prediction of grout penetration in fractured rocks by numerical simulation”, *Can. Geotech. J.*, Vol. 39, pp. 1384- 1394.
23. Zhang, X, Last, N, Powrie, W. & Harkness, R. (1999), “Numerical modelling of wellbore behaviour in fractured rock masses”, *J. Pet. Sci. & Eng.*, Vol. 23, pp. 95- 115.



**이준석**

KRRI  
jslee@krri.re.kr



**이인모**

고려대학교 토목환경공학과 교수  
inmolee@korea.ac.kr



**정형식**

한양대학교 공과대학 토목공학과 교수  
chunghs@ihanyang.ac.kr



**이대수**

한국전력공사 전력연구원 책임연구원  
dslee@kepri.re.kr

---