

지하저장공동에서의 콘크리트 플러그의 역학적 및 수리적 거동에 관한 수치해석적 연구

박병기¹⁾ · 이희근²⁾ · 전석원²⁾ · 박의섭³⁾

Numerical Analysis of the Mechanical and Hydraulic behavior of Concrete Plug in Underground Storage Cavern

Byung-Ki Park, Hi-Keun Lee, Seok-won Jeon and Eui-Seop Park

ABSTRACT The concrete plug in an underground cavern prevents the stored product (oil, gas, etc) from leaking and the excessive inflow of underground water, so it plays an important role in construction and operation of the storage cavern. Additionally, it should maintain its stability under every possible loading condition. Once the plug is constructed, the cavern is isolated from the external access. Therefore, mechanical and hydraulic consideration should be made in construction to fulfill its function. Therefore, in this study, numerical analyses were conducted to study the optimal shape and thickness of the plug with respect to the various conditions of installation depth, the shape of the plug, in-situ stress ratio (K), the condition of rock-plug interface, and the effect of Excavation Damaged Zone (EDZ). This paper also presents the effect of slot depth on the hydraulic behavior of the plug. These analyses were carried out by using the 2-dimensional finite difference code, rm FLAC, and the 3D code, rm FLAC^{3D}

Key words : Concrete Plug, Finite Difference Method, Tensile Stress, Displacement, Interface, EDZ

초 록 : 지하저장공동에 설치되는 콘크리트 플러그는 가능한 모든 하중조건에 대해 안정하게 유지됨은 물론 저장된 유류의 외부 유출과 지하수의 과다 유입을 방지하는 기능을 수행하여야 하므로 지하 유류비축기지의 건설 및 운영 단계에서 매우 중요한 역할을 한다. 플러그가 시공되고 나면 외부와의 접촉이 모두 차단되게 되므로 플러그가 그 기능을 제대로 발휘하기 위해서는 설계단계에서부터 역학적 및 수리적 고려가 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 2차원 및 3차원 유한 차분 프로그램인 FLAC과 FLAC^{3D}를 사용하여 플러그에 대한 역학적 및 수리적 해석을 실시하였다. 먼저 축압계수의 변화, 심도의 변화, 플러그의 형상변화, 압반과 콘크리트 접촉면의 상태변화, 굴착손상권의 발생 등 다양한 조건 하에서 플러그의 거동 변화에 대한 역학적 해석을 실시하였으며, 2차원 해석조건과 동일한 조건을 가진 3차원 모델을 구성하여 그 결과를 2차원 해석과 비교, 검토하였다. 또한 플러그의 썸기깊이 변화에 따른 수리해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다.

핵심어 : 콘크리트 플러그, 유한차분법, 인장응력, 변위, 인터페이스, 굴착손상권

1. 서 론

지하 유류비축기지(원유, LPG 등)의 건설시 저장공동의 굴착과 그 외 각종 설비공사가 완료되면 지하저장공동과 지상을 연결하는 진입터널 및 수갱에 콘크리트 구조체인 플러그(plug)가 설치된다. 진입터널 및 수갱에 설치되는 콘크리트 플러그는 플러그를 중심으로 해서 터널 내부 쪽에서 발생하는 압력이나 외부에서 발생하는 모든 압력에 대해 역학적으로 안정할 수 있도록 설계되어야 한다. 플러그는 저장된 유류의 외부 유출을 방지하고 동

시에 지하수의 과다 유입을 방지하는 기능을 하므로 유류비축기지의 건설 및 운영 단계에서 매우 중요한 역할을 한다. 일단 플러그가 시공되고 나면 외부와의 접촉은 모두 차단되게 되므로 플러그가 그 기능을 제대로 발휘하기 위해서는 시공시 역학적 및 수리적으로 신중한 고

1) 학생회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

2) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

3) 정회원, 서울대학교 지구환경시스템공학부

원고 접수일 : 2000년 7월 31일

원고 심사 완료일 : 2000년 8월 10일

려가 필요하며 이와 동시에 경제적인 설계, 시공을 위해서는 주위 암반의 거동 양상을 고려하여 플러그의 형상이나 두께 등에 대한 종합적인 검토가 필요하다.

플러그에 관한 최근의 연구들은 대부분 핵폐기물 처분 프로젝트에서 핵종의 유동을 억제하기 위한 기밀성 측면에 초점을 맞추어 이루어지고 있으며 다양한 조건 하에서 플러그와 주위암반의 역학적 거동양상을 규명한 연구 사례는 드물다.

이에 본 연구에서는 현지 응력상태 및 침도의 변화에 따른 플러그의 최적형상 결정 및 경제적인 플러그의 두께 산정에 대해 검토해 보았고 수갱의 굴착으로 인해 발생하는 굴착손상권이 플러그의 거동에 미치는 영향에 관해서 수치적으로 해석하였다. 그리고 2차원적인 수치해석과 3차원 수치해석의 비교를 통해 시간적, 경제적으로 유리한 2차원 해석의 타당성에 대해 검토하였다. 또한 굴착손상권의 발생으로 인한 수리적인 거동의 변화에 대해서도 고찰해 보았다. 본 연구에서는 2차원 및 3차원 유한차분해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)과 FLAC^{3D}를 사용하여 해석을 수행하였다.

2. 암반 및 플러그 구조체의 2차원 역학적 해석

본 연구에서는 암반 및 플러그 구조체의 거동 해석을 위해 1999년 초에 건설완료된 평택 LPG 기지를 해석 대상으로 선정하였다. 다양한 조건의 변화에 따른 플러그의 역학적인 안정성을 검토하기 위해 수갱 플러그의 형상과 축압계수 및 플러그의 설치심도 등을 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 또한 플러그와 암반의 접촉면에서 인

터페이스의 영향에 대해 고려하였고 굴착의 영향에 따른 플러그의 거동변화에 대해서도 검토해 보았다.

2.1 해석 조건

2.1.1 해석모델의 구성 및 입력조건

해석을 위해 플러그와 저장공동을 포함하는 2차원 축대칭 모델을 구성하였고 해석모델의 초기조건 및 경계조건이 Fig. 1에 도시되어 있다. 해석모델의 상하경계는 지하 50 m~200 m, 좌우의 폭은 50 m이며 모델의 상부에

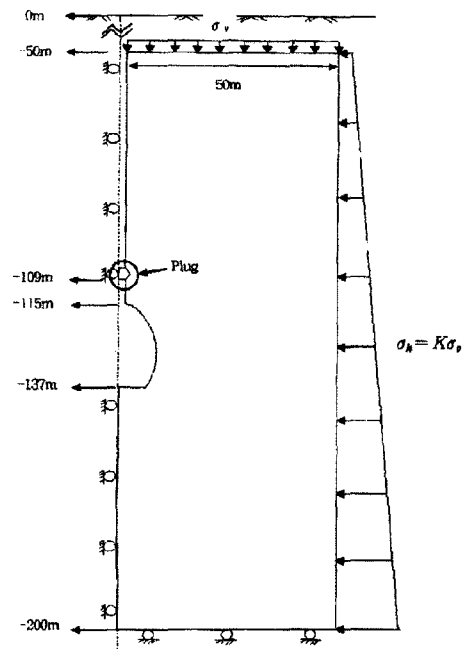


Fig. 1. Initial, boundary condition and model configuration

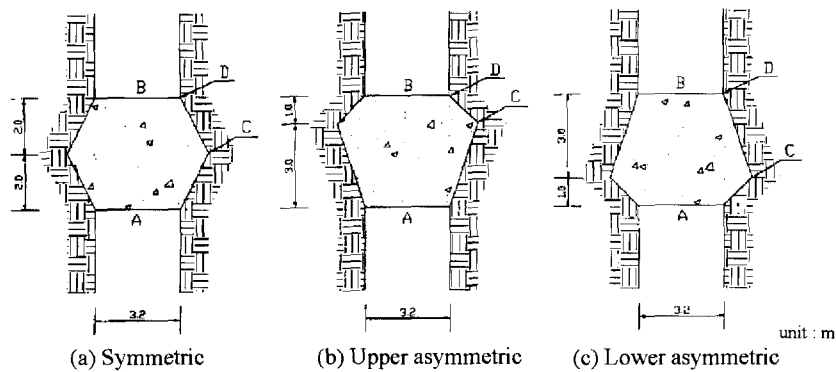


Fig. 2. Plug shapes and analysis points

Table 1. Material properties of the rock mass and concrete

Material	Rock mass	Concrete
Density (kg/m ³)	2500	2300
Young's modulus (GPa)	17.8	35
Poisson's ratio	0.2	0.25
Cohesion (MPa)	4.3	-
Friction angle (°)	35	-

서는 토피만큼의 상재하중이 작용하고 있다. Fig. 2(a)~(c)는 해석에 사용된 각각의 플러그 형상으로서 순서대로 대칭형, 상부비대칭형, 하부비대칭형의 형상을 나타내며 해석지점이 표시되어 있다.

Table 1은 현장지질조사자료와 문헌^{1,2)}을 바탕으로 해석에 사용된 입력물성치이다. 암반은 Mohr-Coulomb 탄소성 거동을 따르는 것으로, 콘크리트는 탄성체로 가정하였으며 FLAC의 특성상 콘크리트의 마찰각과 접착력은 포기하지 않았다. 전단변형계수(Shear modulus) G와 체적변형계수(Bulk modulus) K는 영률(E)과 포아송비(ν)를 이용하여 다음 식에 의해 구해진다.

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2)$$

2.1.2 하중조건

지하공동내 설치되는 콘크리트 플러그의 설계시 고려하여야 할 상부 및 하부 방향으로의 하중 종류는 다음과 같다.

- 플러그 자중
 - 플러그 상부에서 작용하는 벤토나이트 자중
 - 플러그 상부에서 작용하는 수압
 - 수갱에 설치되는 배관기 자중 및 배관 내부의 액체하중
 - 저장공동 내부의 저장 압력
 - 저장공동 내부에서 폭발시 발생하는 순간 폭발압력
- 이러한 하중들의 조합중 수갱 플러그에서는 수갱에 물이 채워지고 공동이 대기압 상태일 때 가장 위험하다. 저장공동 내에 가스가 없고 수두가 일정할 경우 플러그에 작용하는 압력은 다음과 같다¹⁾.

P(저장공동 방향으로 작용하는 힘)

$$\begin{aligned}
 &= (\text{벤토나이트 하중}) + (\text{플러그자중}) + (\text{배관기하중}) \\
 &\quad + (\text{수두}) - (\text{대기압}) \\
 &= Pt + Pp + Pg + \gamma h - \text{대기압} \\
 &= 1.2 + 1.125 + 2.839 + 10.935 - 0 \\
 &= 16.099(\text{kg/cm}^2)
 \end{aligned}$$

따라서, 본 해석에서는 16 kg/cm²의 압력을 플러그 상부에 적용하였으며 플러그와 암반의 상부접촉면에 침투수압이 작용한다고 가정한 경우, 추가로 11 kg/cm²의 압력을 접촉면에 적용하였다.

2.1.3 해석단계

해석의 단계는 실제 플러그의 시공절차와 동일하게 하였고 세부순서가 아래에 제시된 바와 같다. 수갱이나 공동이 굴착되고 나서는 응력과 변위가 수렴할 때까지 충분한 시간이 지난 뒤에 다음 단계로 넘어가도록 하였다. 암반과 콘크리트의 접촉면에 인터페이스를 고려한 해석에서는 콘크리트-암반의 상부 접촉면에서 인장응력이 발생됨으로 인해, 침투수압이 적용된 STEP 4를 추가시켰다.

- (1) STEP 1 : 수갱, 플러그, 공동 굴착
- (2) STEP 2 : 플러그 시공
- (3) STEP 3 : 플러그 상부하중(수압) 재하
- (4) STEP 4 : 플러그와 암반의 접촉면에 침투수압 적용

2.2 안정성 평가방법

2.2.1 안정성 평가기준

암반 및 플러그 구조체에서 역학적 안정성 평가의 기준으로는 각 재료의 압축, 인장응력 및 변위가 허용기준을 초과하지 않는지 여부와 인장응력이 발생하는 영역의 범위, 그리고 소성영역의 발생여부 등이 있다. 본 연구에서는 허용응력 설계법을 바탕으로 각 재료의 안정성을 평가하였으며 그 기준치들은 실제시공자료^{3,5)}에 의하면 다음과 같다.

- (1) 콘크리트 플러그

$$\text{허용압축응력 } \sigma_{ca} = 0.4 \times \sigma_{ck} = 120 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{허용인장응력 } \sigma_{ba} = 0.4 \times \sqrt{\sigma_{ck}} = 6.93 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{허용변위 } y_a = l/360 \sim 0.89 \text{ cm}$$

- (2) 암반

$$\text{허용압축강도 } \sigma_{ra} = 0.4 \times \sigma_r = 400 \text{ kg/cm}^2$$

여기서, σ_{ck} 는 콘크리트의 일축압축강도, l 은 플러그의 한 변의 길이이고 σ_r 은 암반의 압축강도이다.

2.2.2 플러그의 두께산정방법

플러그의 안정한 두께는 다음의 절차와 같이 시행착오

과정을 거쳐 산정하였다.

첫째, 축압계수별, 형상별로 모델을 구성한 뒤 임의의 두께를 가진 플러그를 설치한다.

둘째, 초기조건 및 경계조건을 부여하고 해석을 수행한다.

셋째, 해석결과 플러그나 암반에서 응력 혹은 변위가 허용기준치를 초과하는 영역이 발생하게되면 다시 플러그 두께를 보강하고 허용기준치를 만족할 때까지 해석을 다시 수행한다.

플러그 두께의 하한값은 실제 시공 경험들을 바탕으로 수리적 기밀성 유지를 위해 3 m로 결정하였다.

2.3 축압계수와 심도 및 플러그의 형상을 고려한 해석

2.3.1 입력변수

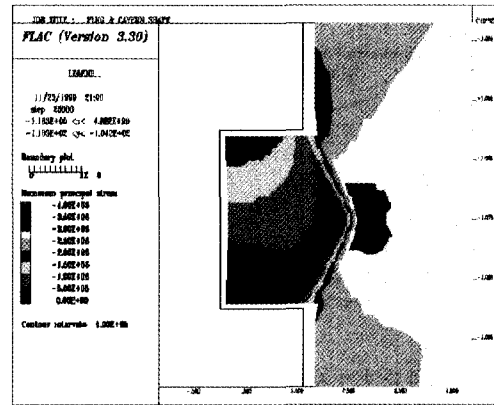
본 해석에서는 축압계수, 심도 그리고 플러그의 형상 등 세가지 변수들을 변화시켜가며 플러그의 거동을 검토하였다. 대칭형, 상부비대칭형, 하부비대칭형의 세가지 플러그 형상을 대상으로 축압계수(K)는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0의 순으로 변화시켰으며 심도는 100 m, 200 m, 500 m, 1000 m로 변화시켜가며 해석을 수행하였다.

2.3.2 해석결과

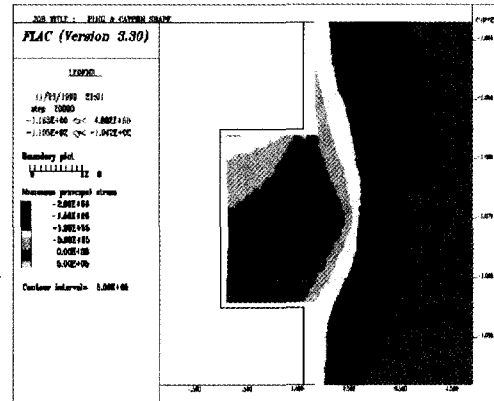
전체적으로 볼 때 암반에 작용하는 압축응력은 C점에서, 플러그에 작용하는 압축응력은 B점에서, 인장응력은 A점에서 가장 크게 나타났으며 수직 하향의 변위는 B점에서 가장 큰 값을 보였다. 플러그에 발생되는 변위는 모든 해석의 경우에 대해 허용기준에 훨씬 못 미치는 값을 나타내었다.

축압계수의 변화에 따른 해석결과 비교적 얇은 심도(100~200 m)에 플러그가 설치되는 경우에는 축압계수의 변화에 관계없이 발생하는 응력 및 변위의 크기가 비슷하였으며 플러그의 형상에 따른 편차 역시 심하지 않았다.

그러나 지하 심부에 설치되는 경우에는 대체로 축압계수가 증가할수록 더 안정한 경향을 보였다. 하지만 K 값이 2.0이고 심도가 1000 m 정도 되는 지역에서는 플러그에 상당한 압축응력이 작용하게 되므로 플러그 설치 시 많은 고려가 필요하며, 가능하다면 이러한 조건을 가진 지역에서의 저장시설 설치의 피하는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 이러한 조건을 가진 지역을 제외한 모든 지역에서 암반 및 콘크리트에 작용하는 압축응력은 모두 허용응력에 훨씬 못 미치는 안정한 값을 가지는 반



(a) Maximum principal stress



(b) Minimum principal stress

Fig. 3. Contour of the principal stresses for the symmetric shape (when K=1.0, depth=100 m)

면 구조물의 특성상 인장응력의 발생은 구조물의 안정성에 중대한 영향을 미치므로 안정성 평가시에 콘크리트 플러그의 하부에 발생하는 인장응력의 크기 및 그 영역에 주안점을 두었다.

Fig. 3은 대칭형 모델에 있어서 플러그에 작용하는 최대, 최소주응력의 등가선 그래프이다. 압축응력은 플러그 췌기의 인접 암반에서 집중되는 경향을 보이며, 인장응력은 플러그의 하부 중앙지점을 중심으로 분포함을 알 수 있다. 다른 형상의 모델에서도 응력의 분포양상은 비슷하게 나타난다. Fig. 4는 K값의 변화에 따라 플러그 하부에 발생하는 최대 인장응력의 크기 및 변위를 나타낸다. 형상별로 약간의 응력값의 차이는 있으나 설계에 영향을 미칠만큼의 큰 차이는 발생하지 않았다. Table 2는 조건의 변화에 따라 안정한 최소 플러그 두께 및 발생 인장응력의 크기를 나타낸다.

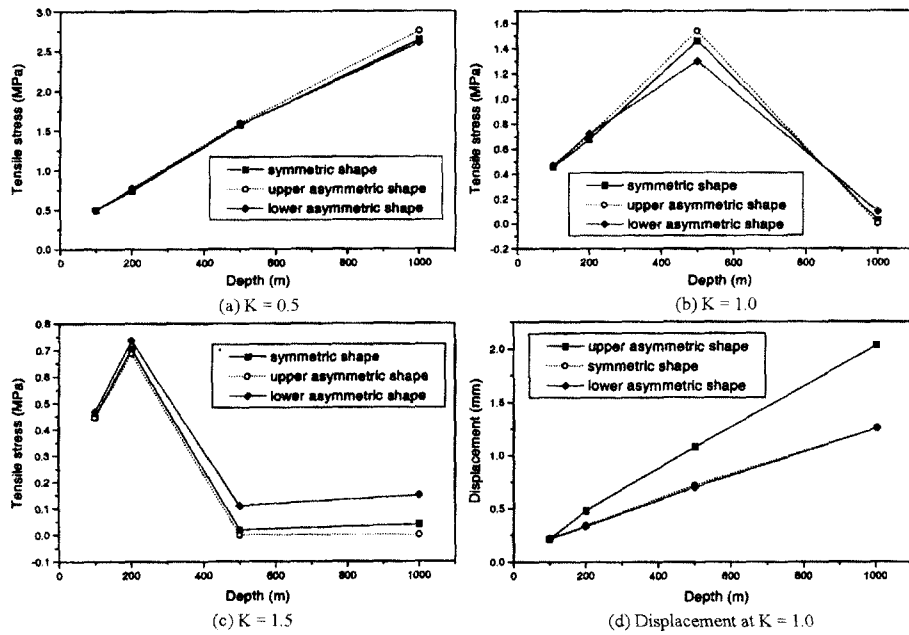


Fig. 4. Maximum tensile stress and displacement of plug with respect to depth and K value

Table 2. Stable plug thickness and the maximum tensile stress occurred in the plug at different values of K and depth (symmetric shape)

		K			
Depth		0.5	1.0	1.5	2.0
100 m	Thickness (m)	3	3	3	3
	Tensile stress (MPa)	0.495	0.458	0.448	0.447
200 m	Thickness (m)	3.5	3	3.5	3.5
	Tensile stress (MPa)	0.548	0.677	0.52	0.52
500 m	Thickness (m)	4.5	4.5	3	3
	Tensile stress (MPa)	0.65	0.62	0.02	0.03
1000 m	Thickness (m)	5	3	3	-
	Tensile stress (MPa)	0.62	0.03	0.04	

2.4 인터페이스 요소를 고려한 해석

2.4.1 입력변수 및 해석조건

본 해석에서 콘크리트 플러그와 암반의 접촉면은 인터페이스(interface) 요소를 사용하여 결합하였고 아래 식에 제시된 Mohr-Coulomb 전단 파괴거동을 따르는 것으로 가정하였다.

$$F_{smax} = cL + \tan\phi F_n \tag{3}$$

여기서, c는 점착력, L은 유효 접촉길이, ϕ 는 접촉면의 마찰각이고 F_{smax} 는 최대 전단력, F_n 은 접촉면에 수직

한 방향의 힘이다.

암반과 콘크리트 플러그의 접촉거동을 고려하기 위해서는 해석모델의 인터페이스에 전단강성(k_s) 및 수직강성(k_n)과 점착력, 마찰각 등에 대한 적절한 입력변수가 주어져야 한다. 전단강성 k_s 는 통상 $0.1 \sim 0.9 k_n$ 을 사용하나 일반적으로 수치해석시 $0.5 k_n$ 을 사용한다. 이 경우 계수는 두 접촉면 사이에 미끄러짐이 존재하는 경우 0.1에 가깝고, 맞물림 효과가 있는 경우 0.9에 가까운 값을 사용한다. 즉, TBM 굴착이나 제어발파로 굴착했을 경우 0.1에 가까운 계수를 사용하고 일반 발파굴착 시에는 0.9

Table 3. Material properties for interface analysis

Interface condition	Rough	Intermediate	Smooth
	Properties		
Normal stiffness (GPa/m)	20	20	20
Shear stiffness (GPa/m)	20	10	2
Cohesion (MPa)		2	
Friction angle (°)		30	

에 가까운 계수를 사용한다. 본 연구에서는 여러 문헌들(6-8)을 참고하여 접촉면의 입력변수들을 Table 3와 같이 정하였다.

2.4.2 해석결과

플러그의 상부에만 수압을 작용시킨 단계에서는(STEP 3) 앞서 인터페이스 요소를 고려하지 않은 해석과 비교해 전체적으로 큰 차이는 없었다. 인터페이스 요소를 고려하지 않은 해석에서 A지점(Fig. 2 참조)에서 발생하는 인장응력의 크기는 인터페이스 요소를 고려한 해석에서 거친 접촉면과 매끄러운 접촉면의 대략 중간정도의 값을 나타내었다. 한편 접촉면의 상부에 침투수압이 적용된 STEP 4에서는, 각 지점에서 발생하는 변위가 증가하는 경향을 보였다. 응력의 경우, A지점에서의 인장응력은 대체로 증가하였는데 이는 접촉면의 상태가 거칠수록, 하부비대칭형보다는 상부비대칭 혹은 대칭형에서, 심도가 얇은 곳보다는 깊은 곳에서 뚜렷하였다.

암반과 플러그의 접촉면에 침투수압이 적용되기 전 단계(STEP 3)의 경우, 플러그 하부에서 발생하는 인장응력의 크기는 하부비대칭형, 대칭형, 상부비대칭형의 순으로 나타났으나 침투수압이 접촉면 상부에 적용된 뒤(STEP 4)에는 그와 반대로 하부비대칭형상에서 가장 작게 나타났다. 이는 하부비대칭형상에서는 침투수압을

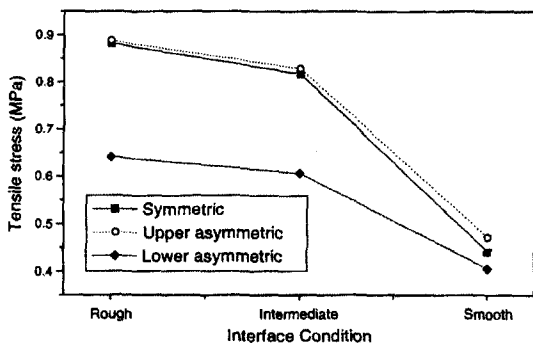


Fig. 5. Tensile stress with respect to interface condition (when K=1.0, depth=100 m)

받는 접촉 상부면이 다른 형상에 비해 수직에 가까우므로 침투수압이 측압의 작용을 하기 때문인 것으로 판단된다.

암반과 콘크리트 플러그의 접촉면은 그 상태가 매끄러울수록 더 많은 변위를 허용하게 되어 플러그에 발생하는 인장응력의 크기와 범위를 현저히 감소시켰다. 발생변위는 해석한 모든 경우에 대해서 1 mm 이내로 나타나 허용기준을 충분히 만족하였다.

Fig. 5는 심도 100 m에 설치된 플러그의 접촉면 상태에 따른 형상별 인장응력의 크기를 나타낸다.

2.5 굴착손상권을 고려한 해석

2.5.1 해석조건

터널이나 지하지장공동 등을 굴착하는 경우 발파로 인해 주위 암반에 손상이 발생하여 공동 주위 암반의 강도, 밀도, 공극율, 내부마찰각, 수리전도도 등의 변화와 응력재분배가 발생한다. 발파에 의한 굴착손상권(EDZ)의 예측 기준은 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 탄성계수의 변화를 손상권 평가의 지표로 삼았다. 탄성계수의 경우 공에 인접한 지점에서 원 암반의 20%까지 감소하고, 손상의 깊이는 폭약의 종류에 따라 다르나 대략 0.3~1.0 m 정도인 것으로 보고된 바 있다⁹⁾. 이를 근거로 본 해석에서는 암반손상이 발생하지 않았을 때의 탄성계수를 100%로 하고 암반손상의 정도에 따라 각각 원 암반 탄성계수의 80%, 60%, 40%, 20%로 탄성계수를 변화시켜가며 해석을 수행하였고 굴착손상권의 범위는 수평에서 반경방향으로 1 m로 가정하였다.

2.5.2 해석결과

탄성계수가 원암반의 20%로 감소한 경우 플러그의 하부에 발생하는 인장응력이 6% 정도 증가한 반면 변위는 43% 정도 증가하였다. 따라서 손상도의 증가는 응력보다 변위에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 한편 암반에 작용하는 압축응력은 손상정도에 상관없이 거의 일정한 값을 나타내었다. Fig. 6은 굴착손상에 따른 인장응력 및 변위의 증가양상을 나타낸다.

Fig. 7은 접촉면의 상태와 손상정도의 변화에 따른 인장응력의 발생결과를 나타낸다. 탄성계수가 20%로 감소된 경우 대칭형상의 인장응력은 거친접촉면일 때 2%, 매끄러운 접촉면일 때 30% 정도 증가하였으나 그 값은 여전히 매끄러운 접촉면일때가 훨씬 작은 것으로 나타났다. 변위는 접촉면의 상태에 따라 15~40% 증가하였으나 역시 허용기준에는 미치지 않는 작은 값을 보였다.

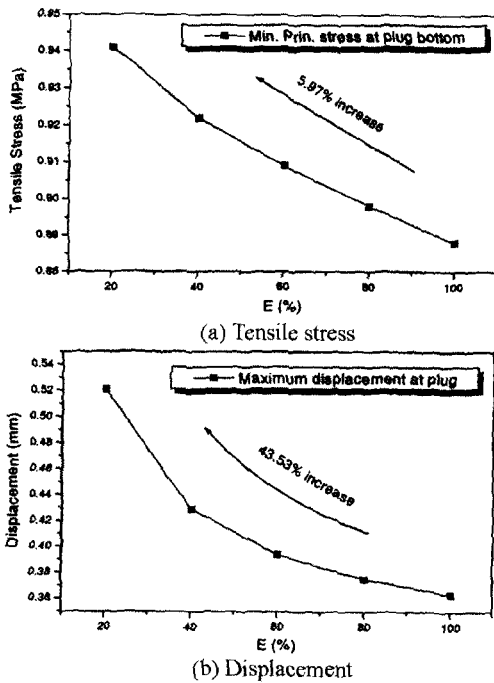


Fig. 6. Variation of stress and displacement according to the decrease of elastic modulus (for upper asymmetric shape, $K=1.0$, depth=100 m)

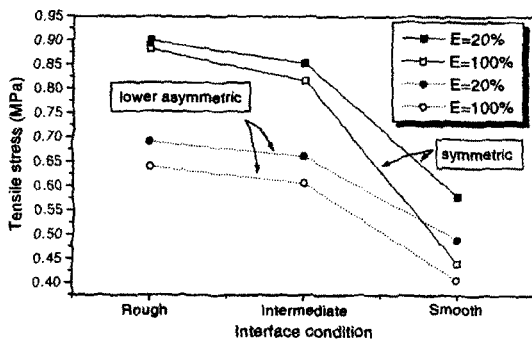


Fig. 7. Tensile stress at different conditions of interface and degree of damage

3. 암-플러그 구조체의 3차원 해석 및 2차원 결과의 비교검토

지반공학적인 문제에 있어 3차원 해석은 2차원 해석에 비해 모델의 구성이 매우 복잡하고 해의 수렴에 걸리는 시간도 훨씬 길어 비경제적인 방법이다. 그러나 지하 유류비축기지는 대규모공동을 포함한 3차원 입체구조로 건설되며 수갱 및 진입터널 등을 포함하므로 단순한 2차원

구조로 모델을 구성하기에는 다소 무리가 따른다. 따라서 본 해석에서는 수갱, 플러그 및 저장공동을 묘사하는 3차원 구조로 모델을 구성하고 그 결과를 2차원 해석결과와 비교해 보았다.

해석에 사용한 프로그램은 3차원 유한 차분해석 프로그램인 FLAC^{3D}이다. 이 프로그램은 운동방정식을 기초로 하여 토질, 암반 등의 지반공학적인 문제를 풀기 위해 개발된 프로그램으로써 대변형 모드를 통한 토질 및 연암 등의 소성유동을 해석할 수 있으며, 다양한 구성방정식과 파괴론을 수용할 수 있어 실제상황에 적용할 수 있다⁽⁶⁾.

3.1 해석조건

3차원 해석은 크게 공동 및 수갱의 굴착, 플러그 설치, 수압 적용의 3단계로 나누어 실시하였고 응력과 변위가 충분히 수렴한 뒤 다음 단계의 해석이 실시되도록 하였다. 수갱 및 공동의 반지름, 공동의 높이 등 해석에 사용된 모델의 조건은 2차원 해석시와 같고 초기조건 및 경계조건도 2차원 해석시와 같게 하였다. 또한 3차원 해석에 사용된 물성치들도 2차원 해석에 사용된 수치와 동일하게 하여 2차원 해석결과와의 비교가 용이하게 하였다. 한편, 암반-콘크리트 접촉면의 상태는 $k_n = k_t$ 인 거친 접촉면을 기준으로 하였고 플러그의 형상은 대칭형, 두께는 3 m, 설치위치는 플러그 하부를 기준으로 지하 109 m에 설치되는 것으로 하였으며 축압계수 K 가 1인 경우를 대상으로 해석하였다.

암반은 수갱 주위의 굴착손상을 받은 부분과 그렇지 않은 부분으로 구분하였고 각각의 암반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델로, 콘크리트 플러그는 탄성 모델로 해석하였다. Fig. 8(a)는 본 연구에서 구성한 3차원 해석모델로써

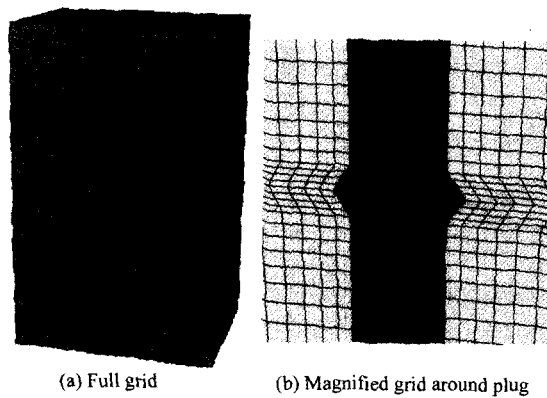


Fig. 8. 3D finite differential mesh

터널 축방향으로 40 m, 수갱방향으로 65 m, 그리고 대칭면에 수직인 방향이 30 m인 단면을 설정하였다. Fig. 8(b)는 플러그 주위를 확대한 그림으로써 수갱 주위에서 반경방향으로 1 m 이내의 암반을 굴착순상권으로 고려하였으며 해석지점이 도시되어 있다.

3.2 해석결과 및 비교검토

플러그 허부에서 발생하는 인장응력의 최대값은 0.66 MPa 정도로 나타나 2차원 해석에서의 0.67 MPa 과 비슷하게 나타났고 암반에 작용하는 압축응력의 경우는 3.7 MPa로 나타나 2차원에서의 4.4 MPa에 비해 응력집중이 심하지 않은 것으로 판명되었다. 응력 분포나 전체적인 발생양상은 2차원 해석과 유사한 것으로 나타났다.

Fig. 9는 시간단계별 변위의 변화를 나타내는 그래프이다. 변위의 번호는 Fig. 8(b)에서 표시된 위치를 나타낸다. 변위의 최대값은 0.45 mm로 나타나 2차원 해석에서의 변위인 0.33 mm 보다 다소 높게 나타났다.

다시 말해, 3차원 해석에서의 응력은 2차원 해석에 비해 다소 작은 값을 나타내었고 변위는 약간 증가하였다. 3차원 해석에 의한 변위의 증가량은 미미하여 플러그의 성능 수행에 별 영향을 미치지 못할 것으로 판단되는 반면 인장응력의 경우 2차원 해석이 더 안전측(conservative) 있으므로, 2차원 해석으로서 더욱 안전율을 확보할 수 있으리라 판단된다.

4. 플러그 주위 암반에서의 수리 거동 해석

지하 유류저장공동은 단면이 400 m²에서 600 m², 총

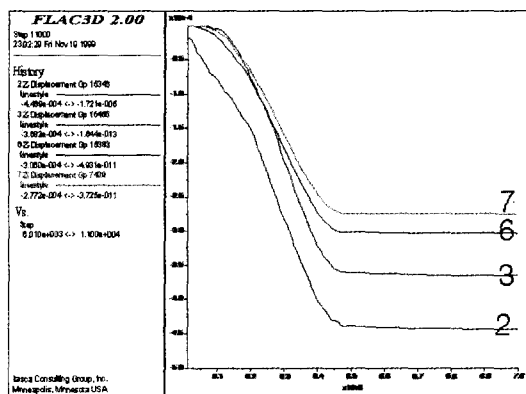


Fig. 9. Vertical displacement of each point according to excavation step

길이는 수백m에 이르는 대규모 복수공동으로써 건설시에는 역학적 안정성에 대한 연구와 함께 저장물의 유출을 방지하기 위한 수리학적 연구가 필요하다. 저장 공동의 기밀성을 유지하기 위해서는 유류의 기화압력보다 높은 지하수압을 유지시킴으로써 저장물이 공동 외부로 누출되는 것을 방지해야 한다. 이를 위해서는 우선 공동과 수갱의 굴착으로 인한 인접 암반의 투수계수 변화에 대한 고려가 필요하다.

공동의 굴착으로 인한 공동주위 암반의 투수계수에 영향을 미치는 중요한 요소는 발파에 의한 균열의 생성과 공동 주위의 응력재배치 현상이라고 할 수 있다. Kelsall, Pusch 등은 발파공의 인접 암반에서 10²-10⁴배까지 투수계수가 증가한다고 보고하였다^{11,12}. 한편 암반내 지하수의 유동해석은 다양한 길이와 방향의 절리 중에서 지하수 흐름의 연결 통로가 되는 개별 절리를 모델화하는 방법과 절리의 통계적인 처리에 의해서 평균적인 투수계수를 설정한 뒤 절리 암반을 등가 다공질 매체로 모델화하는 방법이 있다. 유류비축기지과 같은 광역지역을 해석하는 경우 개별절리를 고려하는 것이 몹시 어려우므로 후자의 경우를 택하는 것이 보다 용이한 방법이라 판단된다.

4.1 해석모델의 구성 및 해석조건

본 수리해석을 위해 굴착순상권을 포함하는 모델을 구성하였으며, 굴착순상권에서의 투수계수를 교란되지 않은 원암반 투수계수의 100배 값으로 결정하였다. Table 4는 수리해석에서 사용된 입력치들로서 현장 시험에서의 결과와 문헌들^{1,13}을 참고하여 결정하였다.

Fig. 10은 해석에 위해 구성한 모델을 나타낸다. 기본적인 모델은 역학적 해석에 사용된 모델과 같으나 플러그의 췌기 깊이에 따라 세 가지 경우로 구분하였다. (a)는 플러그의 췌기가 굴착순상권의 범위 내에 있는 경우(췌기

Table 4. Input parameters for FDM hydraulic analysis

Water	Density		1000 kg/m ³
	Bulk modulus		2×10 ⁹ Pa
Permeability	Rock mass	Moderate	1×10 ⁻⁸ m/sec
		EDZ	1×10 ⁻⁶ m/sec
Concrete			1×10 ⁻⁸ m/sec
Porosity	Rock mass	Moderate	1 %
		EDZ	10 %
	Concrete		10 %

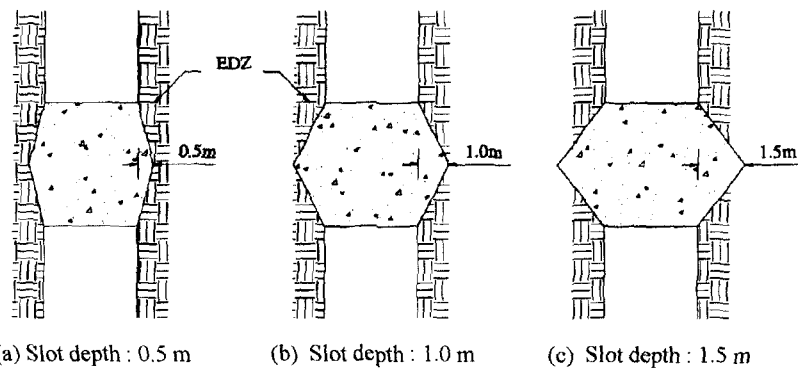


Fig. 10. Model configuration for hydraulic analysis (EDZ=1 m)

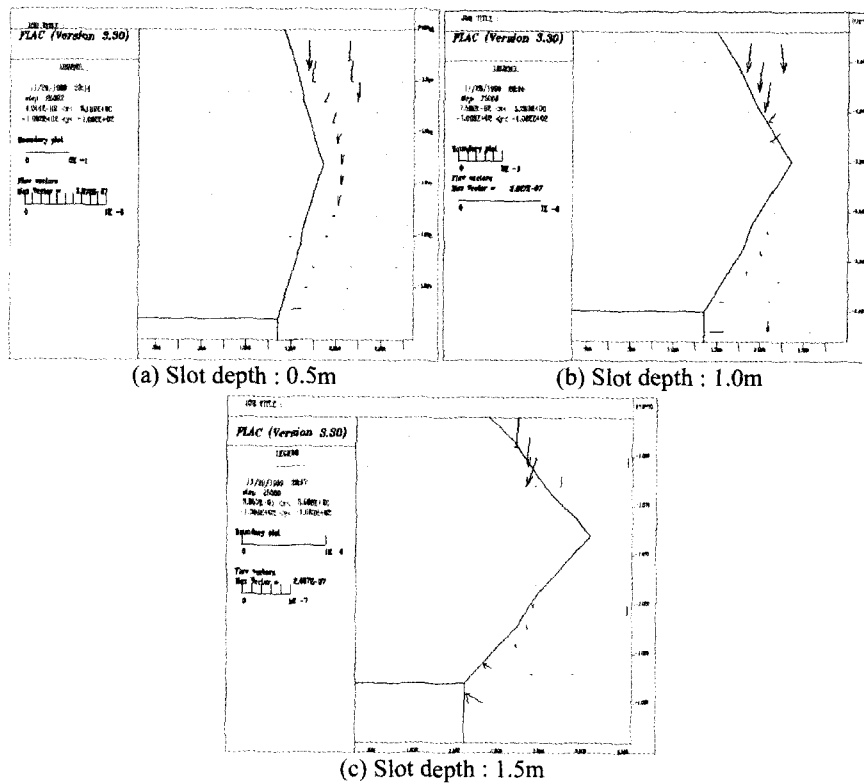


Fig. 11. Specific discharge vector around plug (EDZ=1 m)

깊이 0.5 m), (b)는 썰기와 굴착손상권의 범위가 같은 경우(썰기깊이 1.0 m), 그리고 (c)는 썰기가 굴착손상권의 범위를 넘어선 경우(썰기깊이 1.5 m)이며 모든 경우에서 굴착손상권의 범위는 1 m이다.

플러그 상부 수층은 물로 가득 채워져 있고 해석모델의 경계는 지하수로 포화되어 있다고 가정하였다. 해석단계는 굴착후 충분한 변위가 발생하여 수렴이 되고 난 뒤

플러그를 설치하고, 그 후 수압이 작용할 때 수리거동이 발생하도록 하였다. 나머지 조건은 역학적인 해석에서의 조건과 동일하다.

4.2 해석결과 및 고찰

본 수리해석에서는 공동 내부로의 총유입량 같은 절대적인 값을 결정하여 이를 수리적 안정성의 판단기준으로

삼기에는 무리가 있다고 판단하여 플러그의 썩기깊이 변화에 따른 수리거동양상 변화를 상대적인 관점에서 비교, 분석하였다. 수갱에 채워진 물은 투수계수가 주위의 암반에 비해 현저히 높은 굴착손상권을 통해 이동하려는 경향을 보였으나 플러그 썩기의 굴착 깊이에 따라 썩기 상·하 부분에서 유량의 차이가 많이 발생하였다. 썩기의 깊이가 굴착손상권의 범위와 같은 경우(b)에는 썩기 침단의 상·하부에서 유량차이가 1/10 정도 되었고, 썩기의 깊이가 굴착손상권의 범위를 넘어선 경우(c)에는 썩기 침단 하부에서의 유량감소가 더욱 현저하여 거의 1/100 정도 수준까지 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 플러그의 설치시 썩기의 깊이를 굴착손상권의 범위보다 깊게 하는 것이 공동의 기밀성 유지에 효과적일 것으로 판단된다. 한편, 썩기의 깊이가 증가할수록 썩기 침단 윗부분에서의 유량은 조금씩 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 11(a)~(c)는 각각 썩기가 굴착손상권의 범위내에 있는 경우, 굴착손상권에 맞닿아 있는 경우, 굴착손상권의 범위를 벗어나 있는 경우의 비유량벡터(specific discharge vector)를 도시하고 있으며 썩기의 깊이에 따라 단위면적당 유량의 변화 양상이 나타나 있다. 비유량벡터는 단위면적당 단위시간에 통과하는 유량을 말하며 $[L/T]$ 의 차원을 가진다.

5. 결 론

본 연구에서는 지하저장공동 내에 설치되는 콘크리트 플러그의 역학적 및 수리적 거동해석을 다양한 조건하에서 실시하였다. 이 연구에서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 100 m, 200 m의 비교적 얇은 심도에 플러그가 설치되는 경우 축압계수와 플러그 형상에 따른 응력 및 변위의 편차가 심하지 않았다. 그러나 심도 500 m나 1000 m에서는 대체로 축압계수가 증가할수록 더 안정한 경향을 보였다.
- 2) 암반과 플러그의 접촉면에 인터페이스 요소를 고려한 해석에서 침투수압이 접촉면 상부에 적용된 뒤(STEP 4)에는 하부비대칭형상에서 인장응력의 크기와 범위가 가장 작게 나타났다.
- 3) 암반과 콘크리트 플러그의 접촉면은 그 상태가 매끄러울수록 더 많은 변위를 허용하게 되어 플러그에 발생하는 인장응력의 크기와 범위를 감소시켰고 그에 따라 안정한 플러그의 두께가 감소하게 되었다. 발생변위는 접

촉면의 상태가 매끄럽더라도 1 mm 이내로 나타나 허용 기준을 충분히 만족하였다.

4) 굴착으로 인해 수갱주위의 암반이 손상을 받은 경우 손상 정도에 따라 인장응력은 최대 6%, 변위는 최대 43% 증가하였다.

5) 2차원 해석에서의 조건과 동일한 조건을 가진 3차원 모델을 구성하고 그 결과를 2차원 해석과 비교한 결과 3차원 해석에서는 썩기인접 암반에서의 압축응력과 플러그 하부에서의 인장응력이 조금 작게 나타났으며 최대변위는 다소 크게 나타났다. 그러나 변위는 두 해석 모두 허용변위량에 훨씬 못 미치는 작은 값을 가지므로 2차원 해석에 의한 플러그 두께산정 결과로서 충분한 안전율을 확보할 수 있으리라 판단된다.

6) 플러그 썩기의 깊이에 따른 수리해석 결과 플러그 썩기가 굴착손상권을 벗어나 있는 경우에는 썩기가 굴착손상권의 경계와 맞닿아 있는 경우에 비해 유량이 약 10 배 정도 감소하였으며 썩기가 굴착손상권 내에 있는 경우에 비해서는 유량이 약 100배 정도 감소하였다.

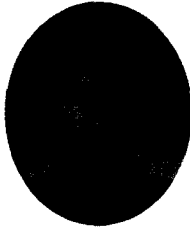
참 고 문 헌

1. SK건설, 1998, 팽택 LPG기지 건설사업 구조해석 및 수리계산서
2. 심현진, 1999, 암석 및 콘크리트의 압축변형거동과 미소파괴율 측정에 관한 연구, 공학석사 학위논문, 서울대학교 대학원
3. 이형원, 배정식, 1999, 지하 유류비축기지의 설계, 터널 분야 박사학위 논문발표회 논문집, 209-258.
4. LG ENC, 1998, Y-2 LPG 지하저장시설 보고서, 52-66.
5. 벽산엔지니어링(주), 1995, U2E project 구조계산서 (shaft plug).
6. Kodikara J. K. and I. W. Johnston, 1994, Shear behaviour of irregular triangular rock-concrete joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 31.4, 313-322.
7. 김태혁, 1999, 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 절리 암반의 역학적특성 변화에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원.
8. 이대혁, 1998, 모형 실험 및 수치해석에 의한 터널 복공의 역학적 거동 및 균열 특성에 관한 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교 대학원.
9. 건설교통부, 1999, 터널발파 설계 자동화 프로그램의 개발에 관한 연구.
10. Itasca Consulting Group, Inc., 1997, FLAC3Dmanual.
11. Kelsall P. C., Case J. B., Chabannes C. R., 1984, Evaluation of excavation-induced changes in rock permeability, Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 21.3, 123-135.

12. Pusch, R., 1989, Alteration of the hydraulic conductivity of rock by tunnel excavation, *Int. Rock Mech.*

Min. Sci. & Geomech. Abstr. 26.1, 79-83.
13. Itasca Consulting Group, Inc., 1995, *rm FLAC manual.*

박 병 기



1998년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사

Tel : 02-880-7230

E-mail : pbk@rockeng.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정

이 희 근



1970년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1973년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1977년 일본 교오또대학(京都大學) 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 02-880-7222

E-mail : irram@plaza.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

전 석 원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
1991년 미국 캘리포니아 주립대학, 공학석사
1991년 미국 아리조나 주립대학, 공학박사

Tel : 02-880-8807

E-mail : sjeon@rockeng.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수

박 의 섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
1991년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
2000년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

Tel : 02-880-8701(518)

E-mail : espark@rockeng.snu.ac.kr

현재 서울대학교 지구환경시스템공학부
