

## 해저터널의 2차원 수리-역학적 연계해석을 통한 연속체와 불연속체의 수치해석적 비교연구

유광호(수원대학교 토목공학과 교수)

이동훈, 김은혜(수원대학교 토목공학과 석사과정)

### 1. 서론

불연속면이 발달한 암반 내에서 터널을 굴착하는 경우 암반블록 보다 암반 내 불연속면이 낮은 강도 특성 및 높은 투수성을 가짐으로써 암반의 역학적, 수리적 거동을 좌우하기 때문에 불연속면을 고려한 터널의 역학적 안정성을 검토하는 것이 중요하다. 따라서 절리 암반에 굴착되는 터널의 안정성을 현실적으로 검토하기 위해서는 절리에 의한 영향을 고려하여 해석을 수행해야 한다.

기존의 연구에 따르면 장석부 등(2001)은 절리 암반내에서 터널의 안정성 평가를 위해 개별요소 모델링 방법에 대한 연구를 수행한 바 있다. 연구에 따르면 개별요소해석에 있어서 기본적으로 고려하여야 할 주요 문제들에 대해 고찰하고 기본적인 해석기준을 제안하였다. 터널설계단계에서 지나치게 복잡한 개별요소모델을 이용한 터널안정해석은 불확실하기 때문에 모델방법을 단순화하여 결과간의 상관성을 분석하는 것이 바람직하다고 하였다. 김치환(2000)은 개별요소법에 의한 터널의 안정성 해석에 있어서 설계정수를 결정하는 방법에 대해 기술한 바 있으며, 이성규 등(2001)에 의하면 개별요소법을 이용한 터널의 안정성 해석에 있어 Barton-Bandis 절리 모델과 Mohr-Coulomb 절리 모델의 해석 결과를 비교하였다. 그리고 주어진 응력 조건과 터널 형상에 따른 암반의 변형 거동을 규명하기위해 불연속체 해석과 연속체 해석 결과를 비교하였다. Barton-Bandis 모델을 이용한 방법에서는 연속체 해석과 불연속체 해석의 결과가 차이가 없었으며 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 방법에서는 해석의 결과가 차이를 보인다는 것을 연구한 바 있다. 그러나 위에서 소개한 연구는 역학적인 측면에서 수행된 연구였으며 해저터널에서 반드시 고려되어야 할 수리적인 측면의 연구는 수행되지 않았다.

해저터널, 유류비축기지와 같이 지하 심부 암반에 건설되는 지하공동의 경우는 주위 환경이 주로 견고한 암반으로 이루어져 있으므로 암반자체의 투수성보다는 현지 암반에 존재하는 불연속면의 상호연결성에 영향을 받게 된다. 불연속면 내를 흐르는 지하수는 간극수압으로 인해 암반의 응력 분포에 영향을 주며, 역으로 암반에서의 응력 조건으로 인해 절리를 역학적으로 변형시킴으로써 절리 내 지하수 거동에도 영향을 미치므로 수리적(hydraulic) - 역학적(mechanical) 연계해석이 필요하다.

유광호(2008)는 해저 터널의 안전율을 정량적으로 산정하기 위해 2차원 연속체에 대해 수리-역학적 연계해석 시 유도배수 모델링 방법을 비교·분석하였다. 수치해석 시 터널 내부로 유입되는 지하수를 유도 배수하는 방법으로 슛크리트 수리특성을 조절하는 유도배수 방

법과 집수정의 펌핑을 통한 유도배수 방법을 고려하여 민감도 분석으로 수행하였고, 연구 결과 해저터널의 수리-역학적 연계해석 시 집수정 펌핑을 이용한 유도배수 방법을 사용하는 것이 터널의 안정성을 검토하는 데에 보다 신뢰성이 높다는 결과를 도출한 바 있다. 그러나 이 연구는 연속체 모델에만 국한된 것으로 불연속체 모델에서도 적용이 될 수 있는지에 대한 연구는 수행되지 않았다.

김택곤(1994)에 의하면 불연속 암반내 지하수 유동과 공동거동의 상호작용에 관한 수치해석적 연구를 수행한 바 있다. 이 논문에 따르면 동일한 지하수위 조건에서 연계해석과 비연계해석을 수행하여 응력조건과 절리의 방향성에 따른 절리 거동을 비교하였으며 지하수위가 높은 심부 암반의 경우 절리거동에 의한 지하수 상태가 달라지므로 연계해석이 필요하다고 하였다.

따라서, 본 연구에서는 가정된 해저터널을 대상으로 터널의 안정성을 정확히 검토하기 위해 수리-역학적 연계해석을 실시하였으며 FLAC 해석 및 UDEC 해석 결과를 비교하였다. 이를 위해 불연속체 모델에 등가 연속체 모델을 이용하여 1등급 암반, 슛크리트 두께, 측압계수, 집수정 펌핑의 유무에 대하여 각각의 조건으로 수치해석을 실시하고, 결과를 비교·분석하였다.

## 2. 2차원 연계해석

### 2.1 개요

해저터널의 경우 굴착으로 인해 터널 주변 지반의 응력이 변하고 동시에 간극수압을 변화시켜 지반의 유효응력이 감소하게 된다. 이로 인해 터널주변 지반의 하중지지력이 감소하고 아울러서 흙의 체적이 변하여 지반변형이 증가한다. 또한, 불연속면 내를 흐르는 지하수의 경우에도 간극수압으로 인한 유효응력이 암반의 응력 분포에 영향을 주며, 반대로 암반에서의 응력조건으로 인해 절리를 역학적으로 변형시킴으로써 절리 내 지하수 거동에도 영향을 미친다. 이러한 경우 터널 및 주변지반의 거동을 규명하기 위해서는 수리적(hydraulic) 측면과 역학적(mechanical) 측면이 고려된 수리-역학적 연계해석이 요구된다.

2차원 연속체 연계해석을 위해 사용된 프로그램은 FLAC-2D ver. 5.0(Itasca Consulting Group Inc., 2005)이며 안전을 산정을 위해 내장언어인 FISH로 별도의 루틴을 작성하여 사용하였다. 그리고 불연속체 해석을 위해서 암반블록과 절리의 상호작용을 해석을 할 수 있는 개별요소해석 프로그램인 UDEC(Universal Distinct Element Code)-2D ver. 4.0(Itasca Consulting Group Inc., 2004)을 사용하여 FLAC 해석과 동일한 해석 조건을 적용하여 그 결과를 비교하였다.

FLAC 해석과 UDEC 해석의 비교를 위해 각각의 조건에 따라 1등급 암반, 슛크리트 두께는 30cm, 45cm, 60cm(3 가지), 집수정 펌핑을 하지 않을 때와 펌핑을 할 때로 나누었으며 측압계수는 1.0, 2.0, 3.0의 3가지 조건에 대해 총 18가지에 대한 수치해석을 실시하였다. 2차원 해석에서 3차원적 터널 시공과정을 모사하기위해 하중분배개념을 도입하여 해석을 수행하였다. 굴착하중은 유사한 시공환경에서의 자료를 고려하여 굴착단계 2일, 연성(soft) 슛크리트 단계 8일, 경성(hard) 슛크리트 단계 20일 가량이 소요되는 것으로 가정하였다. 굴착단계(터널굴착 - 연성스�크리트 타설 - 경성스�크리트 타설)별 하중 분담율을 60%-20%-20%로 가정하였다.

## 2.2 연계해석 모델링 방법

해저터널을 대상으로 그림 1의 (a)와 같이 FLAC 해석과 UDEC 해석의 경우 동일한 단면조건으로 수심이 60m, 토피가 100m인 직경 10m의 원형터널을 사용하였으며 터널 중심으로부터 외부경계까지의 거리는 터널 직경의 5배인 50m로 하였다. 터널 축을 중심으로 좌·우 대칭경계 조건을 적용하여 반단면 해석을 수행하였으며 깊이 방향으로는 지표면 이하 영역만을 고려하여 모델링 하였다. 즉, 지하수면과 토피고 50m는 해석영역에 포함하지 않았으며, 단지 지하수면이 일정하게 유지된다는 가정 하에 해석 상부 경계면에 작용하는 수압과 토압을 상재하중으로 처리하였다. UDEC 해석 시 해석속도를 높이기 위해 그림 1의 (b)와 같이 터널 굴착 시 영향을 미칠 수 있는 영역을 터널 직경의 1D로 하여 이 영역내에서는 불연속면의 절리 간격을 1m로 이 영역 밖은 3m로 절리를 생성하여 수치해석을 실시하였다.

터널의 인버트부 하단에 위치한 집수정을 통해 FLAC 해석은 주변 암반의 투수계수보다 높은 값을 주어 펌핑 효과를 주는 동시에 지하수를 유도 배수하였다. 그러나 UDEC 해석 시 암반블록은 불투수성으로 가정하고 불연속면의 절리에 투수율을 적용하여 지하수를 유도 배수하였다.

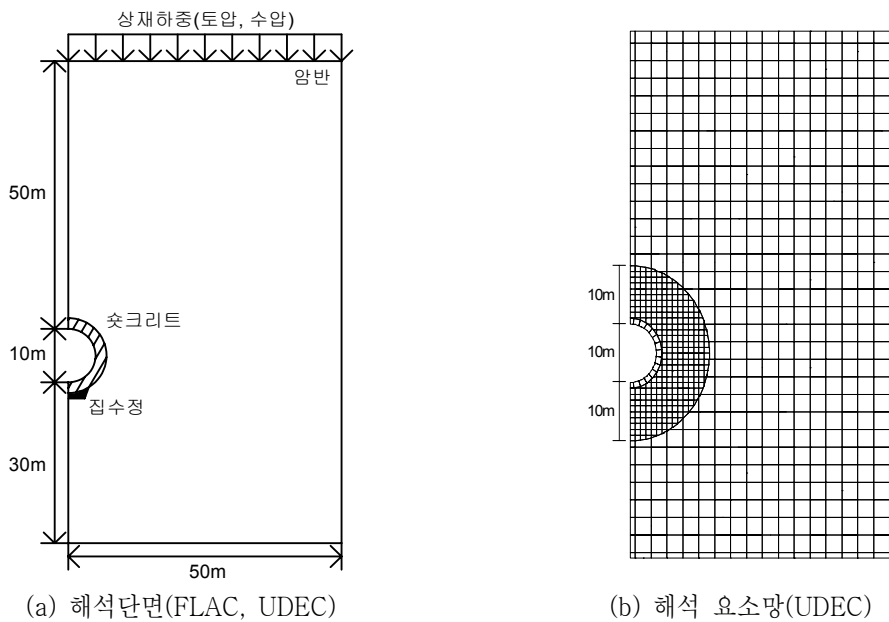
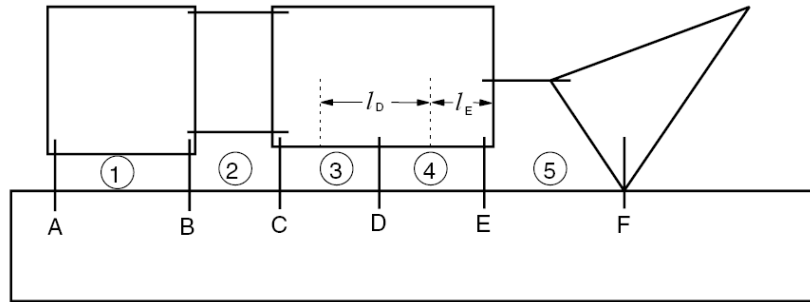


그림 1. 해석단면 개요도

## 2.3 불연속체의 수리거동

개별요소법에서 수치적인 유동해석은 그림 2와 같은 유동경로 구조(domain structure)를 이용한다. 블록들이 밀접하게 연결되어 있으면 유동경로망(domain network)을 구성하게 되고, 이곳에서는 각자 일정한 압력을 가진 지하수로 채워져 있으며, 접촉면(contacts)을 통해서 인접 부근과 왕래하게 된다고 가정한다.



A ... F ... Contact Points  
 ① ... ⑤ ... Domains

그림 2. 흐름과 domain 사이에서 절리의 흐름 모델

그림 2에서 ①~⑤까지가 유동경로(domain)이며, 이 중 ①, ③, ④는 절리, ②는 두 절리의 교차점 그리고 유동경로 ⑤는 간극공간(void space)을 나타낸다. 이 때 유동경로는 다시 개별 블록사이에 역학적 상호 작용력이 가해지는 접촉면(contacts)으로 분리할 수 있으며 이는 그림에서 A~F 구간이다. 변형 가능한 블록(fully deformable block)들은 다시 삼각형 요소의 요소망(mesh)으로 세분화되기 때문에 절점(grid point)은 블록의 가장자리나 모서리를 따라 존재한다. 수압은 중력을 고려하지 않는 경우는 각 유동경로 내에서 일정하나, 대부분의 경우는 중력을 고려하므로 수리구배(hydraulic gradient)에 따라 선형적으로 변하며 이 때 유동경로 수압(domain pressure)은 유동경로의 중심값으로 정의된다. 유동은 인접한 유동경로 사이에 압력의 차이가 존재하게 되면 발생하며 유량(flow rate)은 블록이 접촉하는 양식에 따라 다음과 같은 두 가지 방법으로 계산된다.

첫째, 그림 2에서 F와 같이 정점 접촉(point-contact)상태인 모서리와 가장자리(corner-edge) 접촉의 경우 또는 모서리와 모서리(corner-corner) 접촉의 경우 수압이  $p_1$ 에서  $p_2$ 로 변한다면 유량은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$q = -k_c \Delta p \quad \text{식 (1)}$$

단,  $k_c$  = 정점 접촉 투수계수 요소

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1)$$

$\rho_w$  = 유체 밀도

$g$  = 중력가속도

$y_1, y_2$  = 유동경로 중심의 좌표

둘째, 가장자리와 가장자리의 접촉 (edge-edge contact)의 경우, 그림 2의  $l_D$ ,  $l_E$ 와 같은 접촉 길이 (contact length)가 정의된다. 접촉 길이는 접촉면에서 좌우 인접 접촉면의 중심 거리의 합으로 표현된다. 절리를 평행한 두 평판으로 가정하고, 절리의 틈새(aperture)을  $a$

라 하고 Darcy 법칙을 따른다고 하면 유량은 일반적으로 ‘삼승법칙’(cubic law)이 성립하는 것으로 알려져 있다.

$$q = k_j a^3 \frac{\Delta p}{l} \quad \text{식 (2)}$$

$k_j$  는 이론적으로  $1/12\mu$ 을 갖는 절리의 투수율(joint permeability factor)

$\mu$  는 유체의 동점성계수

$a$  는 접촉면의 수리틈새(contact hydraulic aperture)

$l$  는 domain 사이의 접촉면의 길이

지하수 유동경로인 절리의 수리 틈새는 일반적으로 아래와 같이 주어진다.

$$a = a_0 + u_n \quad \text{식 (3)}$$

$a_0$  = 수직응력이 0일 때의 절리 틈새

$u_n$  = 절리의 수직변위 (틈새가 벌어질 때가 +)

여기서, 절리 틈새가 변할 수 있는 최소값( $a_{res}$ )이 정의되며, 이 값 이하의 절리 틈새에서는 어떠한 역학적 균열 폐쇄(mechanical closure)도 접촉면의 투수계수(contact permeability)에 영향을 주지 못한다. 그림 3과 같이 절리의 수직응력과 절리 틈새의 상호관계가 가장 단순하게 나타난다.

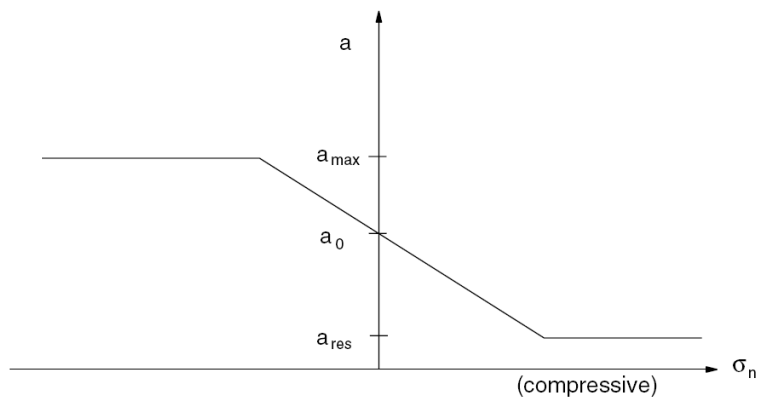
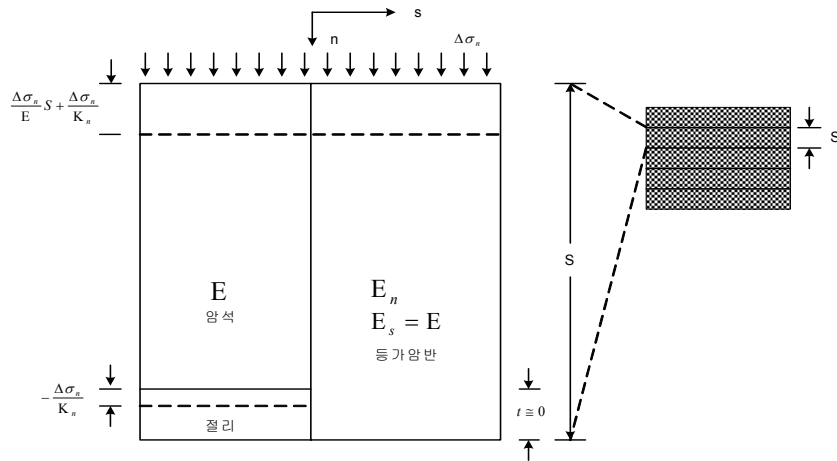


그림 3. UDEC에서 수리 틈새와 절리 수직응력과의 관계

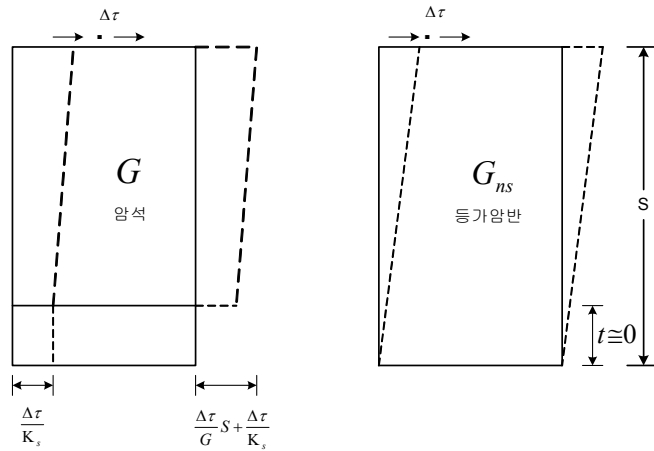
### 3. 불연속면 해석을 위한 등가 연속체 모델

이인모(2001)에 의하면 1개(set)의 불연속면군(discontinuity set)을 갖고 있는 암반의 경우, 암석과 불연속면을 따로 고려하지 않고, 두 효과를 동시에 고려한 등가 연속체모형을

만들 수 있다. 이 경우의 등가모델은 가로축 등방(transversely isotropic)모델로 귀착된다. 그림 4와 같이 간격이  $S$ 인 불연속면이 반복적으로 나타나는 암반이 있다고 가정하면 암반 블록과 불연속면의 정수값을 나타낼 수 있다. 암반블록의 경우 탄성계수( $E$ ), 전단계수( $G$ ), 포아송비( $\mu$ )로 나타내며 불연속면의 경우 수직강성계수( $K_n$ ), 전단강성계수( $K_s$ )로 나타낼 수 있다.



(a) 수직응력



(b) 전단응력

그림 4. 등가모델의 개요

탄성계수( $E$ )의 경우 그림 4의 (a)에서  $s$ 축 방향의 탄성계수  $E_s$ 는  $E$ 와 같으므로  $E_s = E$ 와 같이 쓸 수 있다. 한편,  $n$ 축 방향의 등가탄성계수  $E_n$ 은 수직응력  $\Delta\sigma_n$ 이 작용될 때의 총 수직변위는 암반블록에서의 수직변위와 불연속면에서의 수직변위를 합한 것과 같다는 조건으로 유도된 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$\frac{1}{E_n} = \frac{1}{E} + \frac{1}{K_n \cdot S} \quad \text{식 (4)}$$

포아송비( $\mu$ )의 경우,  $s$ 축 방향에 수직응력을 가할 때  $n$ 축 방향의 변형률을 나타내는 포아송비  $\mu_{sn}$ 은  $\mu$ 와 같으므로  $\mu_{sn}=\mu$  으로 쓸 수 있다. 한편,  $n$ 축 방향에 수직응력을 가할 때  $s$ 축 방향의 변형률을 나타내는  $\mu_{ns}$ 는 수직방향의 탄성계수  $\frac{E_n}{E}$ 에 비례하므로 식 (5)과 같다.

$$\mu_{sn} = \frac{E_n}{E} \mu \quad \text{식 (5)}$$

전단계수의 경우 그림 4의 (b)에서 등가전단계수  $G_{ns}$ 는 전단응력  $\Delta\tau$ 가 작용될 때의 전단변위는 암반블록에서의 전단변위와 불연속면에서의 전단변위를 합한 것과 같다는 가정 하에 식 (6)으로부터 구할 수 있다.

$$\frac{1}{G_{ns}} = \frac{1}{G} + \frac{1}{K_s \cdot S} \quad \text{식 (6)}$$

#### 4. 연계해석을 위한 강도정수

수치해석에서 사용된 FLAC 해석과 UDEC 해석 시의 등가암반 및 암반블록의 강도정수는 표 1과 같이 단위중량, 마찰각, 점착력, 인장력, 간극률, 포아송비는 동일하게 적용하였으며 등가암반 및 암반블록의 투수계수( $k$ )와 탄성계수( $E$ )는 다른 값을 사용하였다. 동일한 조건으로써의 FLAC 해석과 UDEC 해석의 비교를 위해 3장에서 서술된 식 (4)와 식 (6)을 이용하여 등가암반의 탄성계수( $E_n$ )와 전단계수( $G_{ns}$ )를 이용하여 암반블록의 탄성계수( $E$ )와 전단계수( $G$ )를 산정하였다. 암반블록의 탄성계수는 절리의 수직강성과 같고( $E=K_n$ ), 전단계수는 절리의 전단강성과 같다( $G=K_s$ )라고 가정하였으며 절리의 간격( $S$ )은 1m로 가정하였다. 등가암반의 탄성계수( $E_n$ )에 34.12GPa와 등가암반의 전단계수( $G_{ns}$ )에 14.21GPa를 적용하여 암반블록의 탄성계수( $E=68.24$ GPa)와 전단계수( $G=28.42$ GPa)를 산정하여 수치해석을 실시하였다.

표 1. 수치해석에 사용된 1등급 등가암반 및 암반블록의 강도정수

구 분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	마찰각 (deg)	점착력 (MPa)	인장력 (MPa)	간극률	투수계수( $k$ )	탄성계수 (GPa)	전단계수 (GPa)	포아송비
FLAC해석 (등가암반)	26	45	1.0	0.5	0.20	$1.22 \times 10^{-5}$ cm/s	34.12	14.21	0.2
UDEC해석 (암반블록)						0			

또한, UDEC 해석 시 필요한 절리의 강도정수를 표 2와 같이 정리하였으며 절리의 요소에는 수직강성( $K_n$ ), 전단강성( $K_s$ ), 절리면의 마찰각( $\phi_j$ ), 절리면의 점착력( $c_j$ ), 절리면의 인장강도( $t_j$ )가 사용되며 수치해석을 위해 사용된 절리의 강도정수 중 마찰각, 점착력, 인장강

도, 초기절리 틈새, 잔류절리 틈새의 강도정수는 가정하였다. 여기서, 초기절리 틈새와 잔류절리 틈새는 수리해석을 위해 수직응력이 0인 초기의 절리 틈새(aperture with zero normal stress ;  $a_{zero}$ )와 수직응력이 가장 클 경우에 더 이상 절리의 틈새가 줄어들지 않는 절리의 잔여 크기(residual aperture ;  $a_{res}$ )로 구분된다. 절리의 투수율( $k_j$ )은 물의 동점성계수( $\mu$ )를  $10^{-3}Pa \cdot sec$ 로 가정하여 식 (7)과 같이 산정하여  $83.3 Pa^{-1}sec^{-1}$ 을 적용하여 암반의 절리를 통해 지하수의 흐름을 유도하였다.

$$k_j = \frac{1}{12\mu} = 83.3 Pa^{-1}sec^{-1} \quad \text{식 (7)}$$

표 2. 불연속체 해석 시의 절리강도정수

수직강성 ( $K_n$ )	전단강성 ( $K_s$ )	마찰각 ( $\phi_j$ )	점착력 ( $c_j$ )	인장력 ( $t_j$ )	투수율 ( $k_j$ )	$a_{zero}$	$a_{res}$
68.24GPa	28.42GPa	45°	1.0MPa	0.5MPa	$83.3 Pa^{-1}sec^{-1}$	0.07mm	0.025mm

수치해석에 사용된 터널의 지보재인 슛크리트의 강도정수를 표 3과 같이 정리하였다. 슛크리트의 탄성계수는 굴착단계에 따른 연성(soft) 슛크리트 단계와 경성(hard) 슛크리트 단계로 나누어 표와 같이 탄성계수를 산정하였고, 슛크리트의 허용압축응력과 허용인장응력을 초과하면 지보재가 파괴되는 것으로 간주하였다.

표 3. 지보재(스utc리트)의 강도정수

스utc리트 두께 (cm)	탄성계수 (GPa)		포아송비	허용인장응력 (MPa)	허용압축응력 (MPa)
	soft	hard			
30	3	30	0.25	0.89	12.36
45					
60					

## 5. 연속체와 불연속체 연계해석의 결과 비교

안전율과 슛크리트 두께의 관계를 FLAC 해석과 UDEC 해석으로 구분하여 그림 5와 같이 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 집수정 펌핑의 유무에 따른 안전율의 변화는 미미하였으며 FLAC 해석의 경우 슛크리트 두께가 증가함에 따라 안전율이 증가하지만 UDEC 해석에서는 슛크리트 두께가 안전율에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났다. 또한, FLAC 해석이 UDEC 해석보다 안전율이 높게 나타나는데 이는 그림 6에서 보는 바와 같이 FLAC 해석 시 터널 배면에 작용하는 간극수압(평균 약 0.38MPa)보다 UDEC 해석 시의 터널 배면에 작용하는 간극수압(평균 약 1.28MPa)이 더 높기 때문에 FLAC 해석의 안전율이 더 높



은 것으로 판단된다.

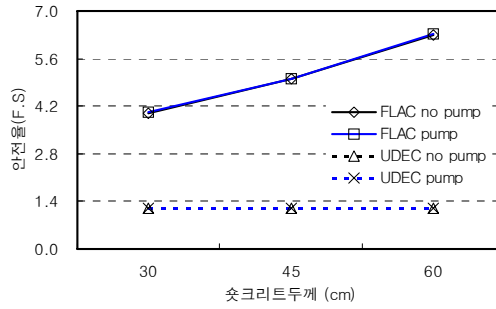
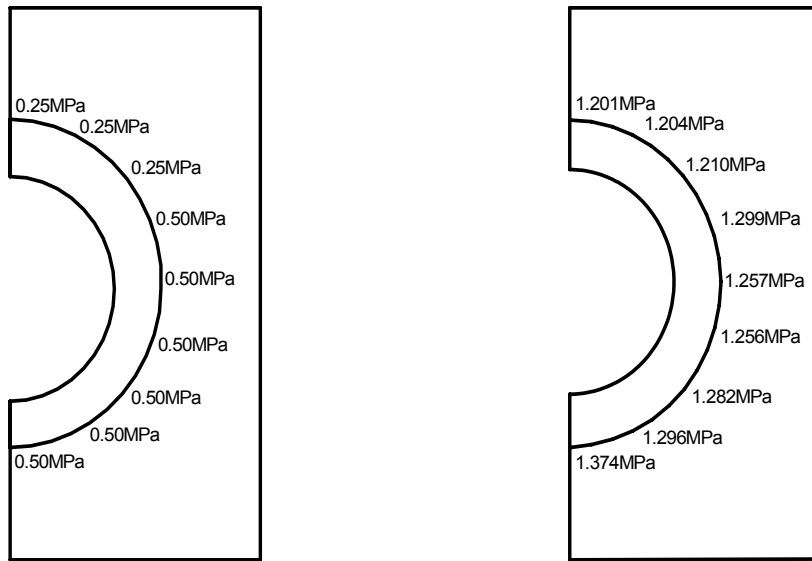


그림 5. 안전율과 슛크리트 두께와의 관계



(a) FLAC 해석( $K_0=1.0$ , no pumping)

(b) UDEC 해석( $K_0=1.0$ , no pumping)

그림 6. 터널주변에 작용하는 간극수압(반경=6m 지점)

천단변위와 슛크리트 두께의 관계를 그림 7과 같이 측압에 따라 나타냈다. 그림 7의 (a)는 측압계수가 1.0일 때의 천단변위를 FLAC 해석과 UDEC 해석으로 구분하였으며 그림에서 알 수 있듯이 슛크리트 두께가 증가할수록 천단변위는 미미하게 감소하는 것으로 나타났다. 또한, UDEC 해석이 FLAC 해석보다 천단변위가 큰 것으로 나타났으며 FLAC 해석의 경우 집수정 펌핑의 유무와 관계없이 비슷한 천단변위량을 나타냈으나 UDEC 해석은 집수정 펌핑의 유무에 따라 약 0.03cm정도 차이가 나는 것으로 나타났다.

그림 7의 (b)는 측압계수가 3.0일 때의 천단변위를 FLAC 해석과 UDEC 해석으로 나타낸 것이다. 슛크리트 두께에 따른 변화는 거의 없었고 FLAC 해석이 UDEC 해석보다 높은 것으로 나타났다.

위의 결과를 볼 때 전체적으로 측압계수 1.0에서의 천단변위가 측압계수 3.0일 때의 천단변위보다 크게 나타나는데 이는 측압이 증가할수록 수평응력이 커짐으로써 측벽부의 변위가 증가하여 상대적으로 천단부의 변위가 작게 나타나는 것으로 판단된다.

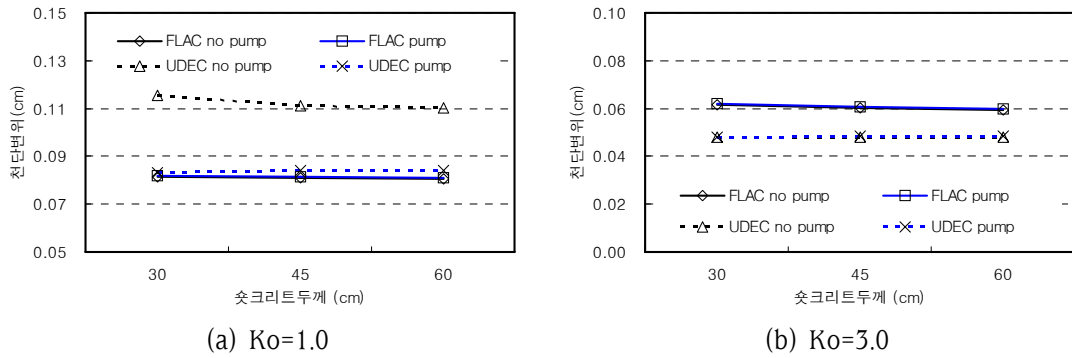


그림 7. 천단변위와 슛크리트 두께와의 관계

힘응력과 슛크리트 두께와의 관계를 그림 8과 같이 FLAC 해석과 UDEC 해석으로 구분하여 나타냈다. 그림 8의 (a)에서 보는 바와 같이 슛크리트 두께가 증가할수록 최대힘응력은 감소하는 것으로 나타났으며 FLAC 해석이 UDEC 해석 보다 슛크리트의 힘응력이 큰 것으로 나타났다. 그러나 두가지 해석 모두 지보재의 파괴기준인 슛크리트 허용압축응력(12.36MPa)을 초과하지 않아 지보재가 안정한 것으로 나타났다. 그림 8의 (b)와 같이 FLAC 해석의 경우 인장응력(-)이 발생하지 않았으나 UDEC 해석의 경우 인장응력이 발생한 것으로 나타났다. 이는 FLAC 해석에서는 터널 주변 암반의 거동이 연속적이지만 불연속체의 경우 터널 주변의 크기가 다른 암반 블록들의 이동으로 인해 응력이 집중되어 인장응력이 발생하는 것으로 판단된다. 슛크리트의 파괴 기준인 허용인장응력인 0.89MPa 보다 낮아 파괴는 일어나지 않은 것으로 나타났다.

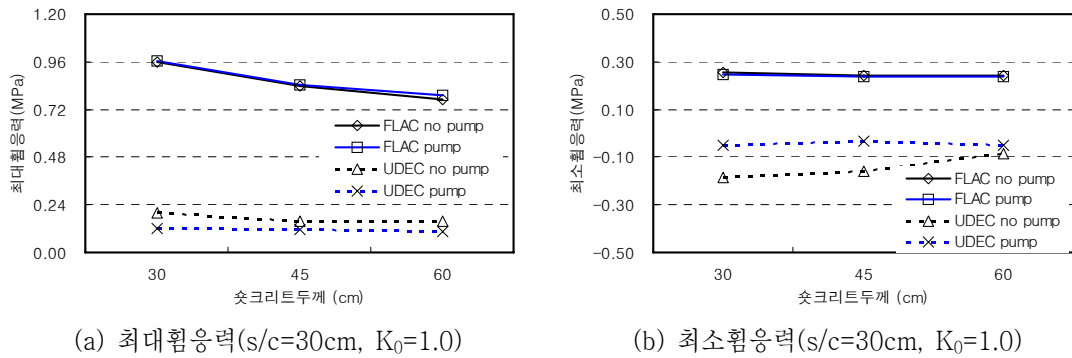
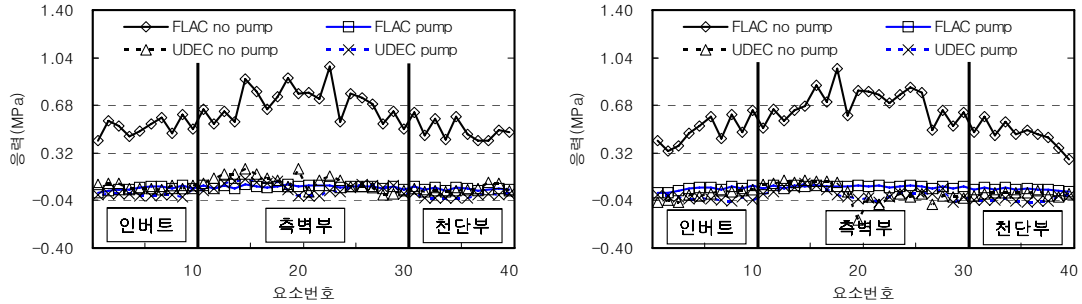


그림 8. 슛크리트 두께와 힘응력과의 관계

스�크리트 두께 30cm, 축압계수 1.0일 때의 슛크리트에 발생하는 힘응력 분포를 그림 9와 같이 나타내었다. 그림 9의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 FLAC 해석에서 집수정 펌핑을 하지 않는 경우가 집수정 펌핑을 하는 경우보다 슛크리트의 힘응력이 크게 나타났으나 UDEC 해석의 경우 집수정 펌핑에 의한 응력차이는 미미한 것으로 나타났다. 한편 펌핑하지 않는 경우에 있어서 FLAC 해석 보다 UDEC 해석에서 힘응력이 작게 나타났는데, 이는 연성 및 경성 슛크리트 타설 후 발생한 굴착면 주변의 최대변위가 FLAC 해석 시에는 0.35mm (총

변위 0.80mm)로서 0.31mm (총변위 1.15mm)가 발생한 UDEC 해석의 경우보다 크게 발생하여 상대적으로 큰 휨응력이 발생한 것으로 판단된다.



(a) 최대휨응력( $s/c=30\text{cm}$ ,  $K_0=1.0$ ) (b) 최소휨응력( $s/c=30\text{cm}$ ,  $K_0=1.0$ )

그림 9. 숏크리트의 휨응력 분포

총유입량과 숏크리트 두께와의 관계를 그림 12와 같이 나타내었으며 FLAC 해석의 경우 암반에 수리물성을 주어 유도 배수하였고 UDEC 해석의 경우 암반 블록에는 투수계수를 주지 않고 절리에 투수율을 주어 유도 배수되도록 하였다. 총유입량의 산정은 숏크리트 유입량과 펌프 유입량의 합으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 총 유입량은 숏크리트 두께에 의한 영향은 없는 것으로 나타났으며 집수정 펌핑을 하는 경우 FLAC 해석이 UDEC 해석 보다 총 유입량이 높은 것으로 나타났다. 그러나 UDEC 해석의 경우 가정한 절리의 틈새 간격이 유입량 산정에 영향을 미치므로 유입량 산정 시 유의해야 할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

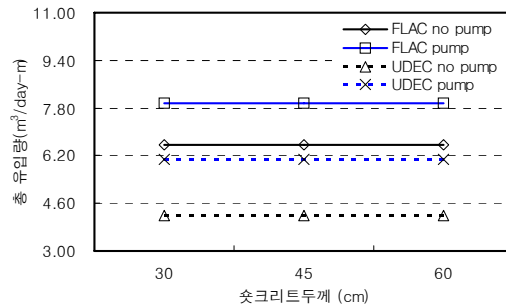


그림 12. 유입량과 숏크리트 두께와의 관계

## 6. 결론

해저터널을 대상으로 수리-역학적 연계해석을 통한 연속체와 불연속체의 수치해석적 비교 연구하기 위해 1등급 암반을 대상으로 숏크리트 두께를 30cm, 45cm, 60cm으로 증가시켜 측압에 따라 안전율, 천단변위, 응력, 유입량을 산정한 결과 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

집수정 펌핑에 의한 안전율의 변화는 미미하였으며 연속체의 터널 배면에 작용하는 간극

수압보다 UDEC 해석의 터널 배면에 작용하는 간극수압이 더 높게 작용하기 때문에 FLAC 해석이 불연속체의 해석보다 안전율이 높게 나타나는 것으로 판단된다.

천단변위는 숏크리트의 두께에 따른 영향은 거의 없었으나 측압이 증가함에 따라 천단변위가 감소하는데 이는 수평응력이 수직응력보다 커짐으로 상대적으로 측벽부의 변위가 커지고 천단부의 변위가 감소하기 때문이다.

두께가 증가할수록 숏크리트의 최대휨응력은 감소하는 것으로 나타났으며 FLAC 해석이 UDEC 해석 보다 터널주변의 휨응력이 컸으며 FLAC 해석의 경우 인장응력(-)이 발생하지 않았으나 UDEC 해석의 경우 인장응력이 발생한 것으로 나타났다. 이는 FLAC 해석에서는 터널 주변에 작용하는 암반의 거동이 일정한데 비해 UDEC 해석의 경우 터널 주변의 암반 블록들의 이동으로 인해 숏크리트의 특정 위치에 휨응력이 집중되어 내부에 인장응력이 발생하는 것으로 판단된다.

위 결과들을 종합적으로 판단해 볼 때 FLAC 해석 보다 UDEC 해석에서 안전율이 작게 산정되었지만 천단변위, 응력, 총 유입량에서 FLAC 해석과 같은 경향을 나타내 해저터널의 연계해석 시 사용된 안정성 평가 방법이 UDEC 해석에서도 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 UDEC 해석 시 가정한 암반블록의 강도정수, 절리의 틈새, 투수율에 대한 정확한 가정이 이루어진다면 좀 더 정확한 연계해석이 이루어 질 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2007년도 첨단 도시개발사업(과제번호 : 05-건설핵심 D10-01, 과제명 : 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원되었기에 관계자분들에게 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김택근, 1994, 불연속면 암반내 지하수유동과 공동거동의 상호작용에 관한 수치해석적 연구, 석사학위논문, 서울대학교 대학원, 97p.
2. 김치환, 2000, 개별요소법에 의한 터널 안정성 해석에 있어 설계정수의 결정, 터널과 지하공간, Vol. 10, pp. 278~290.
3. 이성규, 김치환, 2001, 개별요소법을 이용한 터널 안정성 해석에 있어 Barton-Bandis 절리모델과 Mohr-Coulomb 절리 모델의 비교, 한국터널공학회 논문집, Vol. 11, No. 2, pp. 167~173.
4. 이인모, 2001, 암반역학의 원리, 새론, pp. 207~209.
5. 유광호, 2008, 이차원 수리-역학적 연계해석 시 유도배수 모델링 방법에 따른 수치해석적 비교연구, 한국터널공학회 논문집, Vol. 10, No. 1, pp. 91~104.
6. 장석부, 허도학, 2001, 절리암반내 터널의 안정성 평가를 위한 개별요소 모델링에 대한 고찰, 한국터널공학회 논문집, Vol. 3, No. 2, pp. 3~12.
7. Itasca Consulting Group, Inc., 2004, Universal Distinct Element Code 2D, Ver. 4.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.

8. Itasca Consulting Group, Inc., 2005, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver. 5.0, Itasca Consulting Group, Minnesota, USA.