수치해석에 의한 침하관련 핵심변수 산정 및 가중치 결정

박의섭, 천대성, 정용복, 신희순 (한국지질자원연구원)
최성웅 (강원대학교)

1. 서론

지반 침하량 및 침하범위에 영향을 미치는 요소는 채굴적 형상과 측압계수 외에 채굴적을 포함한 대상지반의 특성을 거론할 수 있다. 지반 특성으로는 암반의 변형계수와 암반강도정수가 포함되며, 지반 내에 존재하는 불연속면의 특성과 관련해서 불연속면의 점착력 및 마찰각, 그리고 수직강성과 전단강성을 들 수 있다. 또한 지반내의 지하수 상태 역시 침하에 영향을 미치는 요소이다. 일반적으로 유한차분법을 이용한 연속체 암반 모델링의 경우엔 지반물성치가 가장 중요한 입력요소이므로, 지반물성치의 변화에 따른 지반침하량 및 침하영향범위이 일정한 경향을 나타내는 반면, 개별요소법을 이용한 불연속체 암반모델링의 경우엔 지반물성치 이외에 불연속면 등의 불연속면의 분포상태 또한 중요한 입력요소 이므로, 지반침하 모델링을 통하여 침하량 및 침하영향범위를 파악하는 것보다는 주로 채굴적으로 인한 암반블록의 국부적인 미끄러짐 또는 붕락 거동을 파악하는데 널리 사용되고 있다.

따라서, 본 연구에서는 연속체 및 불연속체의 지반정수가 침하량뿐만 아니라 침하거동에 미치는 영향을 파악하고자, 일반적인 기하형상을 갖는 대표 채굴적에 대해 연속체 해석코드인 FLAC과 불연속체 해석코드인 UDEC을 사용하여 전산해석을 수행하였다. 연속체 해석의 경우엔 지반의 물성(암반변형계수 및 암반강도정수)과 지하수위의 영향을 평가하고자 하였으며, 불연속체 해석의 경우엔 신선암의 물성보다는 불연속면에 관련된 물성을 대상으로 개별요소법에 사용되는 불연속체 입력물성치들이 불연속암반의 침하거동에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하고자 하였다. 따라서, 특정한 지역의 불연속면 특성을 입력자료로 사용하기보다는 일반적인 물성을 기준으로 각각의 입력자료의 민감도를 파악하였다. 이를 통하여 어떠한 지반정수가 지반침하에 가장 큰 영향을 미치는지를 분석하고, 각각의 지반정수에 대한 가중치를 결정하고자 하였다.

2. 침하영향변수 검토

침하영향변수를 크게 지반물성, 지하수 및 불연속면의 상태로 크게 구분하여, 각 항목에 대하여 구체적으로 살펴보고자 하였다.

2.1 지반물성

가. 암반변형계수

암반은 수많은 불연속면와 층리 등의 불연속면을 포함하고 있기 때문에 단순히 실험실 시험만으로는 실제적인 암반물성을 구할 수 없다. 이를 보완하기 위하여 암반물성을 산정하는 각종 경험식이 제안되었다. 지금까지 여러 연구자들에 의해 제안된 변형계수의 간접적인 계산법들은 경험적 암반분류법인 RMR 및 Q 시스템 등을 이용하며, 또한 실험실에서 구한 신선암의 일축압축강도 및 탄성계수를 사용하는 경우도 있다. 이러한 경험식을 정리하면 표 1과 같다. 본 연구에서는 암반변형계수 산정을 위해 RMR을 기준으로 Bieniawski(1978)와 Serafim & Pereira(1983)의 제안식을 이용하였다.

표 1. 암반변형계수를 결정하기 위한 여러 경험적 방법

Author	Empirical equations
Bieniawski(1978)	$E_m = 2RMR - 100$, for RMR>50
Serafim & Pereira(1983)	$E_m = 10^{(RMR-10)/40}$, for RMR<50
김교원 (1993)	$E_m = 0.3e^{0.07RMR}$
Barton (1995)	$E_m = 10 \times Q_c^{1/3}$
Aydan (1997)	$E_m = 0.0097RMR^{3.54}$ (MPa)
Hoek & Brown(1998)	$E_m = \sqrt{\sigma_{ci}/100} \times 10^{(GSI-10)/40}$, for σci<100 (MPa)
Ramamurthy(1986)	$E_{RM} = E_R e^{(0.0217RMR-2.17)}$ (MPa) for 수평층
	$E_{RM} = E_R e^{(0.0564RMR-5.64)}$ (MPa) for 30~45°경사층

나. 암반강도정수(c_m, ϕ_m)

암반강도정수인 점착력(c_m) 및 내부마찰각(ϕ_m)을 결정하는 제안식들은 경험적 암반분류법인 RMR을 사용하는 것이 일반적이며, 최근에 Hoek & Brown(2002)이 Hoek-Brown 파괴조건식으로부터 Mohr-Coulomb 파괴조건식의 계수인 점착력 및 내부마찰각을 구하는 식을 제안하였다. 이는 대상지역 암반으로부터 구한 σci, mi 및 GSI를 이 식의 입력자료로 대입하여 구하는 것으로써, 이 때 입력치를 정규분포로 가정하여 Monte-Carlo 기법을 도입하여 변형계수, 점착력 및 내부마찰각을 하나의 값이 아닌 평균과 표준편차를 가지는 정규분포로 구하는 방법을 추가적으로 제안하였다.

표 2는 암반강도정수의 결정에 사용되는 여러 경험식들을 표시한 것이다. 이러한 경험적 제안식들은 적용기준이 다르고 계산된 값의 차이가 심하므로, 어느 하나의 제안식을 적용하기 보다는 현장시험결과로부터 변형계수를 추정하는데 참고자료로 활용하는 것이 바람직하다. 그러나 본 연구에서는 암반 점착력 및 내부마찰각 산정에 널리 사용되는 Trueman(1988)이 제안한 식을 이용하였다.

표 2. 암반 점착력과 마찰각 산정을 위한 여러 경험식

Author	Empirical equations
Bieniawski (1989)	$C_m = 0.005RMR,\ \phi_m = 0.5RMR + 5$
Barton(2002)	$C_m = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{1}{SRF} \times \frac{\sigma_c}{100},\ \phi_m = tan^{-1}\left(\frac{J_r}{J_a} \times J_w\right)$
Trueman (1988)	$C_m = 0.25\exp(0.05RMR),\ \phi_m = 0.5RMR + 5$
김교원 (1993)	$C_m = 200\mathrm{Exp}(0.08RMR),\ \phi_m = 0.25RMR + 27.5$

다. Poisson's ratio

포아송 비(Poisson's ratio)는 축방향의 변형률과 그 직각 방향의 변형률의 비를 말하며, 이는 물질에 따라 일정하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nu = \frac{\triangle\epsilon_l}{\triangle\epsilon_a} \tag{1}$$

여기서, ϵ_a : 가압방향의 변형률, 즉 일축압축시험에서 축방향변형률,

ϵ_l : 횡방향 변형률이다.

표 3은 여러 암석의 대략적인 포아송 비를 나타낸 것이다. 일반적으로 화성암이나 화강암에 비하여 퇴적암(석회암, 사암)들의 포아송 비가 다소 높게 나타나며, 때론 0.3 이상의 값을 보여주기도 한다.

표 3. 여러 암석의 포아송 비

암석명	포아송 비
화성암	0.10 - 0.20
화강암	0.15 - 0.25
석회암	0.15 - 0.30
사 암	0.25 - 0.35

2.2 지하수 영향

침하에 영향을 미치는 요소로 지하수에 대한 인자를 빼놓을 수 없다. 지하공동내의 습기는 암석의 강도와 변형특성을 변화시키고, 지질구조적 취약부인 단층파쇄대에서의 지하수는 지반강도를 저하시키는 요인으로 작용한다. 공동 내부의 습기는 지하수 혹은 지표수 침투작용에 의해 유입되며 광산의 가동 시에는 배수나 환기에 의하여 어느 정도 통제가 가능하나 폐광이후에는 습도의 증가로 장기적으로 지표가 변형된다.

공동 내 습기에 의한 암반의 포화상태에 따른 암반의 강도저하가 지반의 안전성에 미치는 영향을 파악하기 위해 지반의 강도가 25%, 50% 저하된 경우에 대한 침하모델링 수행이 요구된다. 일반적으로 강도가 저하됨에 따라 채굴적 상부에 인장응력대가 증가하며, 소성영역도 확장되는 것으로 보고되고 있다. 또한 암석의 공극 내에 존재하는 지하수는 유효응력을 유발하며 그와 동시에 부력을 형성하므로 지하수위에 따라 암반의 변형특성의 변화가 발생하여 침하에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

2.3 불연속면의 영향

마지막으로 침하에 영향을 미치는 요소로는 암반 내 존재하는 불연속면을 무시할 수가 없다. 암반 내 불연속면의 존재로 인하여 채굴적 내부로 암석블록이 탈락되거나, 불연속면을 따라 발생하는 미끄러짐으로 인하여 암석블록간의 벌어짐이 발생하기도 한다. 이러한 불연속면의 역학적 거동은 대상암반의 안정성을 저하시키는 한편, 함몰이 발생되어 채굴적 내부로 떨어지는 암석블록에 의해 새로운 공극을 형성하여 붕락이전의 체적보다 커지게 된다.

또한, 신선한 암반 내에 존재하는 불연속면으로 인하여 전반적인 지반강도가 저하되고, 지반의 변형특성이 변화됨에 따라 지반침하의 거동에도 영향을 미치게 된다.

2.4 침하영향요소 분류

위에서 살펴본 바와 같이 침하모델링에서 침하량 및 침하범위 등에 영향을 미치는 지반물성과 관련된 변수를 정리하면 다음과 같다.

a) 암반의 변형계수(E_m)
b) 암반의 포아송 비(υ_m)
c) 암반의 점착력(c_m)
d) 암반의 내부마찰각(ϕ_m)
e) 암반 밀도(ρ)
f) 암반 내 지하수위
g) 불연속면의 점착력(c_j)

h) 불연속면의 마찰각(ϕ_j)

i) 불연속면의 수직강성(k_n)

j) 불연속면의 전단강성(k_s)

이들 영향요소 중 암반밀도의 경우 일반적으로 암반상태에 상관없이 큰 차이가 없는 점을 고려하여 2,400kg/cm^3으로 고정하였으며, 암반의 변형계수, 포아송 비, 내부마찰각, 점착력 및 암반내 지하수위는 연속체 해석코드인 FLAC에서, 불연속면면의 점착력, 마찰각, 수직강성 및 전단강성은 불연속체 해석코드인 UDEC에서 일반적인 채굴적 형상을 대상으로 각 영향요소별로 변수 값을 변화시켜며 전산해석을 수행하였다. 이러한 영향요소별 민감도 해석을 통하여 각 요소들이 침하거동에 미치는 영향정도를 검토하였다.

3. 수치해석에 의한 침하거동 분석

3.1 연속체 해석

가. 해석조건

(1) 해석단면

연속체 해석시 사용되는 암반물성이 침하량 및 침하범위에 미치는 영향을 파악하기 위해 앞 장에서와 같이 국내 폐광지역의 지질단면을 토대로 가상적인 해석영역을 설정하였다. 수평 채굴적의 변화에 대한 영향을 고려하여, 해석영역은 수직방향의 변위를 충분히 반영할 수 있도록 채굴적에 대해 대칭형상으로 폭 250m, 높이는 300m의 요소망으로 구성하였으며, 채굴적 높이는 2.5m, 채굴적의 상부토피는 200m, 측압계수(K)는 1.0을 사용하였다.

(2) 입력 물성

본 연구에서는 지반거동해석에 널리 사용되는 탄소성 해석을 위하여 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며, 입력물성치의 산정은 RMR 값을 기준으로 암반변형계수는 Bieniawski (1978)과 Serafim & Pereira(1983)의 제안식으로, 암반강도정수는 Trueman(1988)의 제안식에 의해 결정하였다. 포아송 비는 암석의 일반적 범위(0.20~0.35)내에서 선정하였다. 지하수위는 지표에서부터 해석영역까지 50m단위로 설정하였으며 밀도는 1,000kg/cm^3으로 설정하였다. 표 4는 기본모델의 입력값과 각 영향요소에 따른 입력값을 나타낸 것이다.

표 4. 전산해석에 사용된 입력값

영향요소	E_m(GPa)	v	c_m(MPa)	ϕ_m(°)	지하수위(m)
기본모델	20	0.22	1	30	-
입력값	80	0.2	22.6	50	0
	60	0.23	13.7	45	-50
	40	0.26	8.3	40	-100
	20	0.29	5.1	35	-150
	2.8	0.32	3.1	30	-200
	2.2	0.35	1.9	25	-250
	1.7		1.2		
	1.3		0.7		

나. 해석결과

침하모델링해석을 위하여 표 4에서 제시한 값을 근거로 각각의 영향요소를 변화시키면서 최대침하량($S_{\max}$) 및 침하영향범위에 대한 변화를 파악하였다. 침하영향범위는 지표면에서 1cm이상의 수직변위가 발생한 지점을 기준으로 설정하였다. 다양한 지반물성의 변화에 따른 침하영향범위를 구별할 수 있는 영향요소로는 암반변형계수가 있었으며, 그 이외의 영향요소 변화로는 1cm이상의 수직변위가 발생하지 않아 침하영향범위에 대한 해석에선 제외하였다. 침하발생 계측지점은 채굴적 중앙 직상부 지표를 기준으로 하였다.

(1) 암반변형계수(E_m)의 변화에 따른 침하

기본모델을 기준으로, 다른 지반물성은 일정하게 유지한 채 암반변형계수의 변화에 따른 침하량에 대한 영향을 검토하였다. 그림 1은 침하가 발생된 trough 중앙에서부터 거리가 증가함에 따라 발생한 침하곡선을 보여준다.

암반변형계수가 1.3GPa에서 80GPa까지 변함에 따라 최대침하량($S_{\max}$)은 74mm에서 1.2mm까지 감소하는 경향을 보여주어, 암반변형계수가 클수록 침하량은 감소함을 알 수 있었다. 특히 RMR 값 50을 기준으로 그 차이가 크게 나타났다. 이의 원인으로 암반변형계수를 산정하는 제안식에서 RMR값 50을 기준으로 적용식이 달라짐에 따라 RMR값이 50보다 낮은 암반의 경우 변형계수가 훨씬 작게 산정되어 동일한 하중조건에 대해서 더 큰 변형이 일어나기 때문이다.

그림 2는 암반변형계수의 변화에 따른 최대침하량의 변화를 보여준다. 암반변형계수의 변화에 따라 최대침하량이 지수적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 RMR값이 50을 경계로 보다 뚜렷하게 구분되며, E_m 값이 10GPa이하에서는 최대침하량의 변화량이 매우 크게 나타나, 암반변형계수가 낮을수록 최대 침하량에 더 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 이는 log-log 그래프인 그림 3에서 더 뚜렷하게 나타난다.

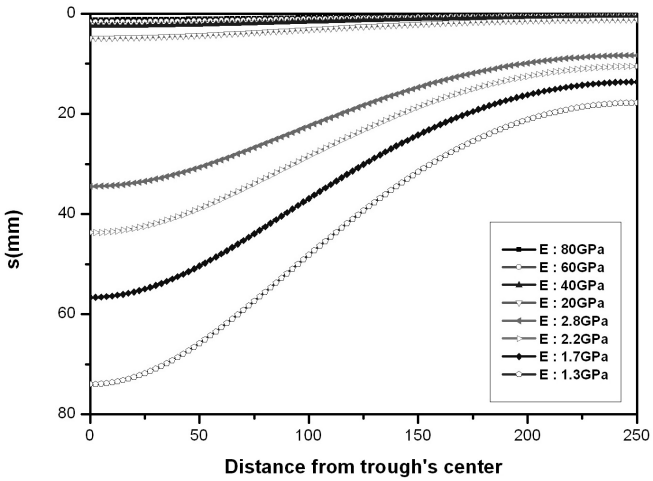

그림 1. 암반변형계수의 변화에 따른 지표침하곡선

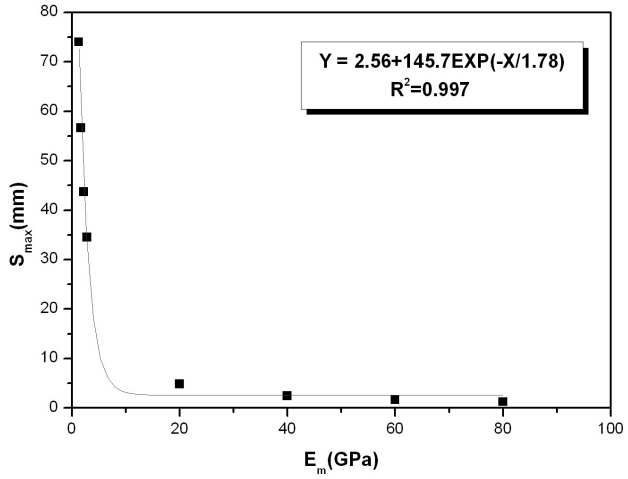

그림 2. 암반변형계수의 변화에 따른 최대침하량

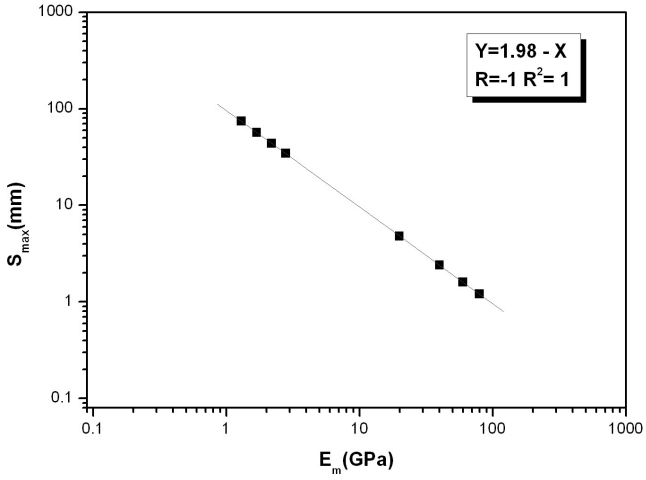

그림 3. 암반변형계수의 변화에 따른 최대침하량

(2) 포아송 비의 변화에 따른 침하곡선

기본모델을 기준으로 포아송 비를 변화시키면서 침하량에 대한 영향을 검토하였다(그림 4 참조). 포아송 비가 0.2에서 0.35까지 변함에 따라 최대침하량(S_{max})은 4.5mm에서 4.85mm까지 발생하여 거의 변화가 없는 것으로 나타났으나, 포아송 비가 클수록 미약하나마 침하량은 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 일정 하중이 작용할 때 총 변형량 중에서 수평방향의 변형이 충분히 발생하여 그와 반대로 수직변형이 상대적으로 작아지기 때문이다.

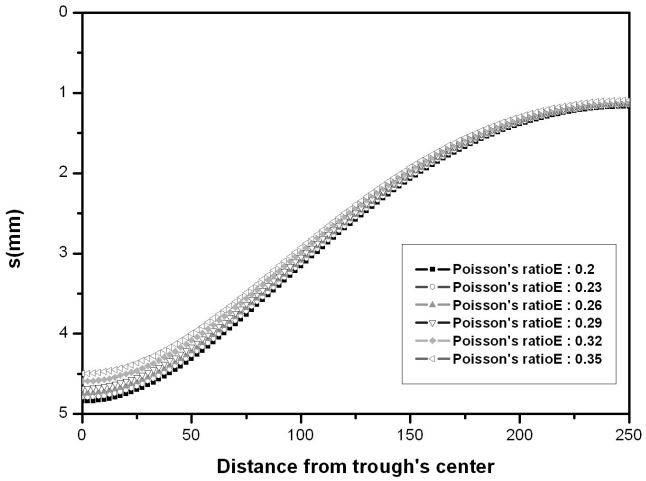

그림 4. 포아송 비의 변화에 따른 지표침하곡선

그림 5는 포아송 비의 변화에 따른 최대침하량의 변화를 나타낸 것이다. 포아송비의 변화에 따라 최대침하량이 선형적으로 감소하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 암석에서 포아송 비의 범위가 0.1에서 0.4내에 존재한다는 사실을 감안할 때, 포아송 비의 기울기가 대략 2.3정도로 크더라도 실제 침하량의 차이는 1mm 이내 범위를 갖는다. 이로부터, 암반의 포아송 비는 침하량 및 침하영향범위에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

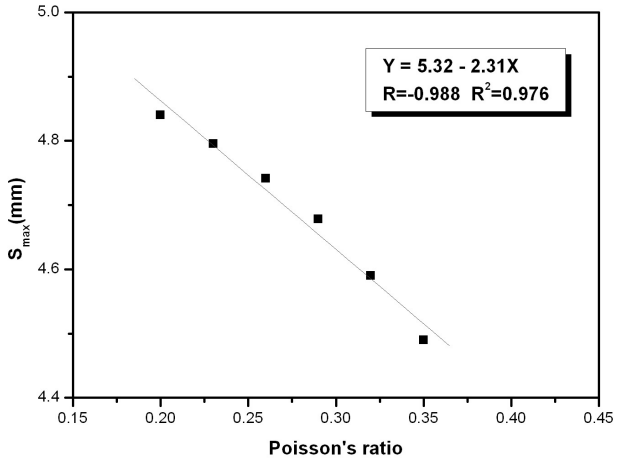

그림 5. 포아송 비의 변화에 따른 최대침하량

(3) 점착력의 변화에 따른 침하곡선

기본모델을 기준으로 점착력(Cohesion)을 변화시키면서 침하량에 대한 영향을 검토하였다(그림 6 참조). 점착력이 0.7MPa에서 22.6MPa까지 변함에 따라 최대침하량($S_{\max}$)은 4.3mm에서 4.9mm까지로 거의 변화가 없는 것으로 나타났으나, 점착력이 클수록 침하량은 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 탄소성 해석에 사용되는 Mohr-Coulomb모델에서 점착력이 클수록 같은 응력조건에서 소성영역이 덜 발생하기 때문에 그에 따른 침하량의 변화가 감소하기 때문인 것으로 여겨진다. 1~2MPa의 점착력을 가지는 암반에서는 그 이상의 점착력을 갖는 암반에 비해 침하량이 다소 많았으나, 침하량의 절대적인 차이는 1mm 이내로 나타났다.

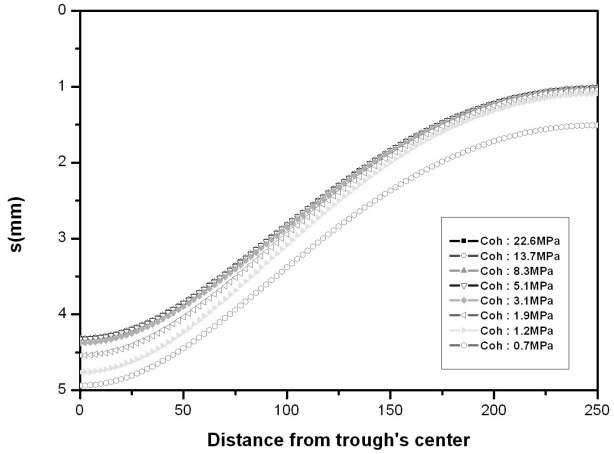

그림 6. 점착력의 변화에 따른 지표침하곡선

그림 7은 점착력의 변화에 따른 최대침하량의 변화를 보여준다. 암반변형계수와 마찬가지로 점착력의 변화에 따라 최대침하량이 지수적으로 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 점착력과 최대침하량의 관계는 log-log 그래프에서도 지수적으로 표현되었다. 이는 점착력의 변화에 따라 최대침하량의 변화가 지수적으로 움직이기 하나, 그 변화폭이 매우 작은 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 그림에서 보여주듯이 대략 5 MPa 이상의 점착력을 가지는 암반에서는 발생된 침하량의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

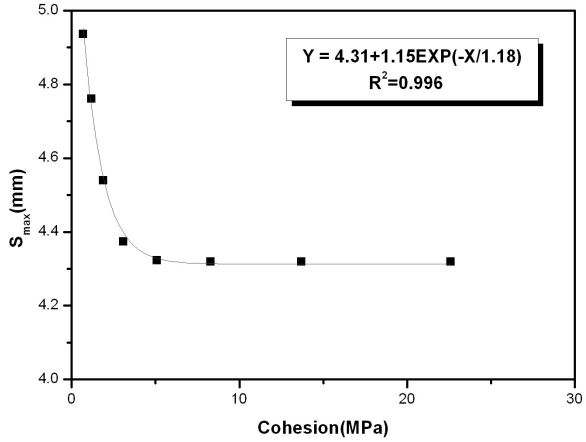

그림 7. 점착력의 변화에 따른 최대침하량

(4) 내부마찰각의 변화에 따른 침하곡선

기본모델을 기준으로 내부마찰각(Friction angle)을 변화시키면서 침하량에 대한 영향을 검토하였다(그림 8 참조). 내부마찰각이 25° 에서 50° 까지 증가함에 따라 최대침하량(S_{max})은 4.4mm에서 5mm까지로 거의 변화가 없는 것으로 나타났으나, 점착력이 클수록 미약하나마 침하량은 감소하는 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다. 이는 점착력과 마찬가지로 Mohr-Coulomb모델에서 내부마찰각이 클수록 같은 응력조건에서 소성영역이 덜 발생하기 때문에 그에 따른 침하량의 변화가 감소하기 때문인 것으로 여겨진다.

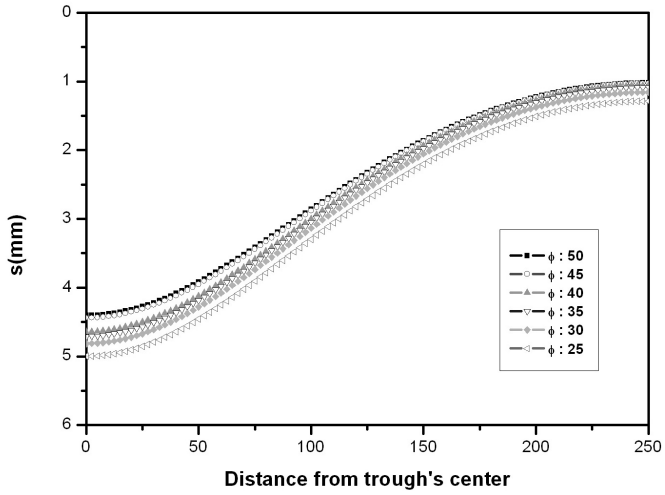

그림 8. 내부마찰각의 변화에 따른 지표침하곡선

그림 9는 내부마찰각의 변화에 따른 최대침하량의 변화를 보여준다. 포아송비와 같이 내부마찰각의 변화에 따라 최대침하량이 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 그러나 기울기가 0.024로서 마찰각의 변화에 비해 상대적으로 침하량의 변화는 미미하다.

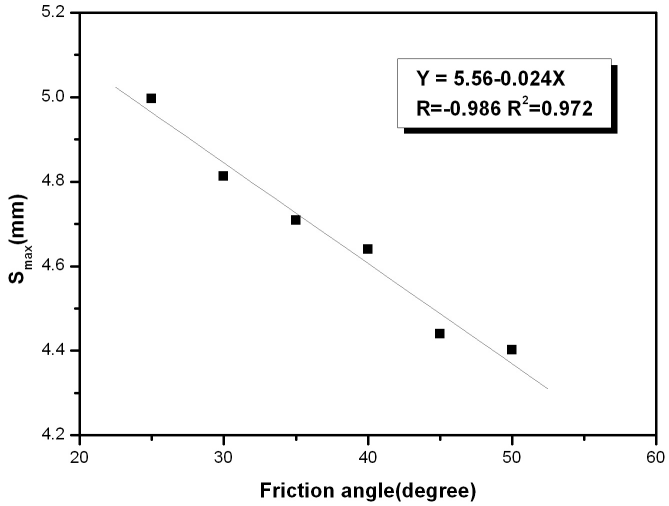

그림 9. 내부마찰각의 변화에 따른 최대침하량

(5) 지하수위의 변화에 따른 침하곡선

기본모델을 기준으로 지하수의 영향을 고려하여 침하량에 대한 영향을 검토하였다. 지하수의 영향은 지하수위를 입력자료로 대입함으로써 반영하였다.

그림 10은 지하수가 없는 경우에서부터 지하수위가 지표면, 그리고 지하 50m에서 250m까지 변화할 때의 침하곡선을 나타낸다. 최대침하량은 2.8mm에서 4.8mm까지 변하였으며, 지하수위가 낮을수록 침하량이 증가하였으며, 채굴적이 위치한 심도 200m에 지하수위가 위치한 경우와 250m, 그리고 지하수위가 없는 경우 거의 동일한 침하상태를 나타냈다. 이는 지하수의 부력에 의한 영향으로 침하량이 감소한 것으로 판단된다.

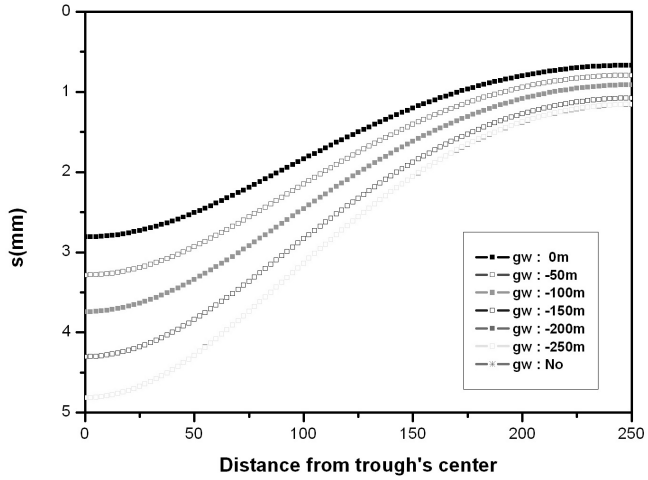

그림 10. 지하수위의 변화에 따른 지표침하곡선

그림 11은 지하수위의 변화에 따른 최대침하량의 변화를 보여준다. 지하수위가 낮아짐에 따라 최대침하량이 선형적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 회귀곡선의 기울기가 내부마찰각과 같이 0.01로 작을 값을 가지나 내부마찰각이 일정 범위내에 존재하는 것과 반대로 지하수위는 채굴적의 깊이와 관계가 있으므로 작은 기울기값에 비해 영향정도가 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 채굴적 이하의 심도에 지하수위가 위치하는 경우 최대침하량은 거의 동일한 값을 갖는다. 이는 지표에서의 수직변위가 채굴적의 존재에 의해 영향을 받으며, 그 이하에서의 물성의 변화는 지표에서의 수직변위, 즉 침하량에 큰 영향이 없음을 알 수 있다.

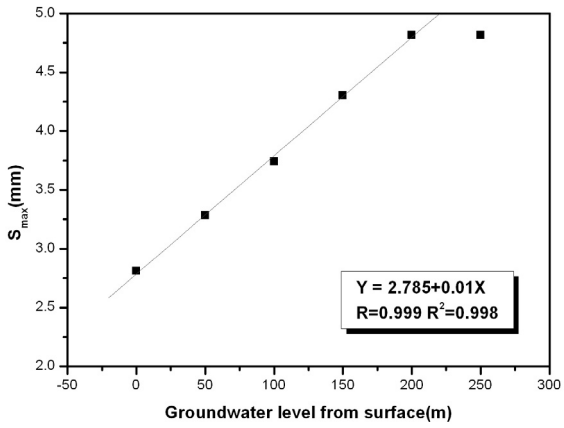

그림 11. 지하수위의 변화에 따른 최대침하량

3.2 불연속체 해석

가. 해석조건

(1) 해석모델

모델설정은 현지반의 지질 및 지형 모델링, 입력자료의 선정, 그리고 초기조건 및 경계조건의 설정으로 이루어진다. 본 불연속체 수치해석은 연속체 모델에서 사용된 것과 동일하게 특정한 지역의 단면이 아닌, 이상적인 2차원 단면에 대하여 수행되었다.

(2) 경계조건 및 초기조건

블록과 요소망의 좌우경계에서는 수평방향 변위 구속, 요소망의 하부경계는 수평 및 수직방향 변위를 구속하였다. 침하해석에서 중요한 결과물인 지표면의 침하량 및 침하범위를 구하기 위해 요소망의 상부경계는 지표면까지 반영하는 것으로 하였다. 또한 현지응력조건을 반영하기 위하여 측압계수 K=1.0을 사용하였다.

(3) 입력자료의 선정

불연속체 암반 모델링을 위한 UDEC 해석에서 요구되는 역학적 물성은 크게 신선암과 불연속면의 물성으로 나눌 수 있다. 신선암은 연속체 암반 모델링에서 사용되는 것과 동일한 물성자료를 사용하였기에, 본 연구에서는 이에 대한 민감도 분석은 제외하는 것으로 하였다. 불연속체 암반 모델링에서 특히 중요한 불연속면의 물성은 크게 불연속면의 강성(수직 및 전단)과 불연속면의 파괴기준에 사용되는 입력자료인 점착력과 내부마찰각 등이다.

불연속체 해석에서의 입력물성이 불연속체 암반의 침하거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 불연속면형상은 일정하게 유지하기 위하여 2개의 연속적인 불연속면(45° 와 135°)이 10m 간격으로 암반 내에 존재하는 것으로 가정하였다.

표 5는 불연속체 해석에 사용된 신선암 및 불연속면면의 기본적인 물성값을 나타낸 것이다. 불연속면 각각의 물성치의 변화는 다음의 각 항목에서 상세히 소개하였다.

표 5. 불연속체 해석에 사용된 신선암 및 불연속면의 물성

물성	신선암	불연속면
단위중량	2400 kg/m^3	-
변형계수	20 GPa	-
포아송 비	0.22	-
내부마찰각	30°	30°
점착력	1.0 MPa	0.1 MPa
불연속면 수직강성	-	1.0e10 N/m
불연속면 전단강성	-	1.0e10 N/m

나. 해석결과

불연속체 암반 모델링에서 침하거동에 영향을 미치는 불연속면 입력변수들의 민감도를 분석하기 위하여, 불연속면 수직 및 전단강성, 마찰각 및 점착강도를 각각 변화시키면서 불연속체 해석을 실시하였다.

(1) 불연속면 수직강성 변화에 따른 침하

불연속면 수직강성의 변화량이 불연속체 침하량에 미치는 영향을 파악하고자, 수직강성 10GPa/m를 기준으로 5배, 10배 및 50배로 증가시켜가면서 해석을 실시하였다. 이때 불연속면에 관련된 다른 입력변수들은 모두 일정한 값을 사용하였다.

다음 표 6은 불연속면 수직강성 변화에 따른 채굴적에서 발생된 최대 변위량을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 수직강성이 10GPa/m에서 500GPa/m까지 변함에 따라 최대변위량은 0.3254m에서 0.01436m로 감소하는 것으로 나타났으며, 수직강성이 클수록 최대변위량은 감소하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

표 6. 수직강성 변화에 따른 최대변위량

J_{KN} (GPa/m)	10	50	100	500	비고
최대변위량(m)	0.3254	0.0958	0.0963	0.01436	

(2) 불연속면 전단강성의 변화에 따른 침하

불연속면 수직강성의 변화량이 불연속체 침하량에 미치는 영향을 파악하고자, 수직강성과 마찬가지로 전단강성을 10GPa/m를 기준으로 5배, 10배, 및 50배로 증가시켜가면서 해석을 실시하였다. 이때 불연속면면에 관련된 다른 입력변수들은 모두 일정한 값을 사용하였다.

아래 표 7은 불연속면면 전단강성 변화에 따른 채굴적에서 발생된 최대 변위량을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 전단강성이 10GPa/m에서 500GPa/m까지 증가함에 따라 최대변위량은 0.3254m에서 0.01436m로 감소하는 것으로 나타나, 전단강성이 클수록 최대변위량은 감소하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 불연속면면 수직강성의 변화에 따른 영향과 동일한 것으로 나타났다. 이는 수직강성 및 전단강성 모두 불연속면의 변형과 관계있는 변수이기 때문에, 해석상에 사용된 2개군의 불연속면들이 수평면에 대하여 45° 의 각도로써 서로 직교하게 존재함에 따라 발생한 현상으로 여겨진다.

표 7. 전단강성 변화에 따른 최대변위량

J_{KS} (GPa/m)	10	50	100	500	비고
최대변위량(m)	0.3254	0.0958	0.0963	0.01436	

(3) 불연속면 점착력 변화에 따른 침하

불연속면의 점착력을 0.1, 1, 10 및 100 MPa로 변화시키면서 해석을 실시하였다. 아래 표

8은 불연속면 점착력 변화에 따른 채굴적에서 발생된 최대 변위량을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 점착력이 0.1MPa에서 100MPa까지 증가함에 따라 최대변위량은 0.3254m에서 0.1902m로 감소하는 것으로 나타나, 점착력이 클수록 최대변위량은 감소하는 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다. 이는 불연속면면의 점착력이 암반블록의 파괴에 밀접한 영향을 미치기 때문에 점착력이 커질수록 암반블록의 탈락현상이 줄어들기 때문에 발생한 것으로 여겨진다.

표 8. 점착력 변화에 따른 최대변위량

J_cohesion (MPa)	0.1	1	10	100	비고
최대변위량(m)	0.3254	0.3186	0.2016	0.1902	

(4) 불연속면 마찰각의 변화에 따른 침하

불연속면의 마찰각은 통상적인 마찰각의 범위인 30, 40, 50, 60 및 70° 에 대하여 해석을 실시하였다. 아래 표 9는 불연속면면의 마찰각 변화에 따른 채굴적에서 발생된 최대 변위량을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 마찰각이 30° 에서 70° 까지 변화함에도 불구하고, 최대변위량은 마찰각의 증가와 무관하게 증가하거나 감소하는 경향을 보여주고 있어, 불연속면면의 내부마찰각이 최대변위량이 미치는 영향이 다른 변수와는 다름을 알 수 있었다. 이러한 현상은 신선암의 내부 마찰각이 60° 임을 감안할 때, 연속체 모델링과는 달리 불연속체 모델링의 특성상 신선암의 내부마찰각보다 낮은 마찰각을 갖는 암반블록의 국부적인 미끄러짐 또는 탈락이 최대 변위량으로 표현됨에 따라 발생된 현상으로 여겨진다.

표 9. 마찰각 변화에 따른 최대변위량

J_friction (deg)	30	40	50	60	70	비고
최대변위량(m)	0.3254	0.3484	0.3568	0.3556	0.2391	

(5) 불연속면 간격의 변화에 따른 침하곡선

불연속면 간격이 침하에 미치는 영향을 파악하고자 불연속면간격을 5m, 10m, 15m, 20m, 및 30m로 변화하면서 해석을 실시하였다. 아래 표 10은 불연속면 간격의 변화에 따른 채굴적에서 발생된 최대 변위량을 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 불연속면간격이 10m에서 30m까지 변화함에 따라, 최대변위량은 감소하는 경향을 보이고 있으나, 불연속면간격 15m에서 다소 낮은 변위량을 보여주기도 하였다. 이 또한 불연속면면의 내부마찰각과 마찬가지로 불연속면간격의 영향보다는 불연속면형상에 의하여 발생된 국부적인 불안정 암반블록으로 인한 영향으로 여겨진다.

표 10. 불연속면 간격변화에 따른 최대변위량

J_spacing (m)	10	15	20	30	비고
최대변위량(m)	0.3254	0.2144	0.3033	0.2057	

4. 지반정수의 가중치 결정

4.1 지반물성 및 지하수위에 대한 가중치 산정

연속체 침하모델링에 있어 침하량에 영향을 주는 주요 요소에 대해 기본모델의 입력값을 기준으로 각 요소들의 입력값을 변화시키면서 전산해석을 수행하였다. 전산해석결과를 종합해볼 때, 침하모델링에 영향을 미치는 주요 요소들의 중요도는 다음 순서로 결정될 수 있다.

암반변형계수 > 지하수위 > 점착력, 내부마찰각 > 포아송 비

각 영향요소의 변화에 따른 침하량의 변화에 대한 가중치를 산정하기 위해 영향요소가 가질 수 있는 최대값을 기준으로 정규화된 곡선을 나타내었다(그림 12~17 참조). RMR값이 100일 때를 기준으로 각 지반물성들의 최대값을 살펴보면 암반변형계수, 점착력 및 마찰각은 각각 100GPa, 37.1MPa 및 55° 로 계산되었다. 포아송 비의 경우 완전 탄성체에서의 값인 0.5를, 지하수위는 채굴적의 심도(본 연구에서는 200m)로 결정하였다.

암반변형계수는 최대값이 100인 관계로 그래프 형상의 변화는 없으나 회귀식에서의 상수는 다르게 나타난다.

점착력과 내부마찰각은 Mohr-Coulomb 파괴식의 변수로써 소성영역의 발생과 관련이 있으며, 암반 내에 발생하는 소성영역의 범위가 지표의 수직변위에 영향을 미치기 때문에, 그림 6과 8에서 보는 바와 같이 두 물성의 변화에 따라 비슷한 침하량의 변화를 보인다. 따라서 점착력과 내부마찰각에 의한 침하 영향은 동일한 것으로 간주하여도 무리가 없을 것으로 판단된다. 점착력은 그림 15와 같이 음지수곡선으로 회귀되나 내부마찰각은 그림 16과 같이 선형식으로 회귀된다.

이 두 요소를 기준으로 다른 요소에 대한 가중치를 산정하면, 포아송 비의 경우 내부마찰각과 같이 선형회귀가 가능하며 선형회귀의 기울기가 -1.16.으로 내부마찰각의 약 89%에 해당한다. 또한 포아송 비의 변화에 따른 침하량은 약 5mm로 내부마찰각의 71%에 해당한다. 기울기와 침하량 차이의 절대값은 서로 영향을 미치는 요소이므로 포아송 비의 가중치는 내부마찰각에 대해 $(0.89\times0.71)\fallingdotseq0.6$에 해당한다고 할 수 있다. 내부마찰각을 기준을 지하수위에 적용하면 지하수위의 선형회귀 기울기는 2.01로서 내부마찰각의 155%, 침하량은 25mm로 357%에 해당한다. 따라서 지하수위의 가중치는 내부마찰각에 대해 $(1.55\times3.57)\fallingdotseq5.5$에 해당한다. 암반변형계수는 음지수곡선으로 회귀되어 점착력을 기준으로 가중치를 산정하면 암반변형계수의 지수함수의 계수가 점착력에 비해 12450%에 해당한다. 음지수함수의 경우 선

형회귀와 달리 함수 내에 절대량을 포함하기 때문에 가중치 산정에 침하량의 차이를 사용하지 않았다. 따라서 암반변형계수의 가중치는 점착력에 대해 124.5에 해당한다.

이렇게 산출된 각 영향요소에 대한 가중치는 아래와 같다.

a) 점착력, 내부마찰각 : 0.75
b) 포아송 비 : 0.38
c) 지하수위 : 4.12
d) 암반변형계수 : 93.38

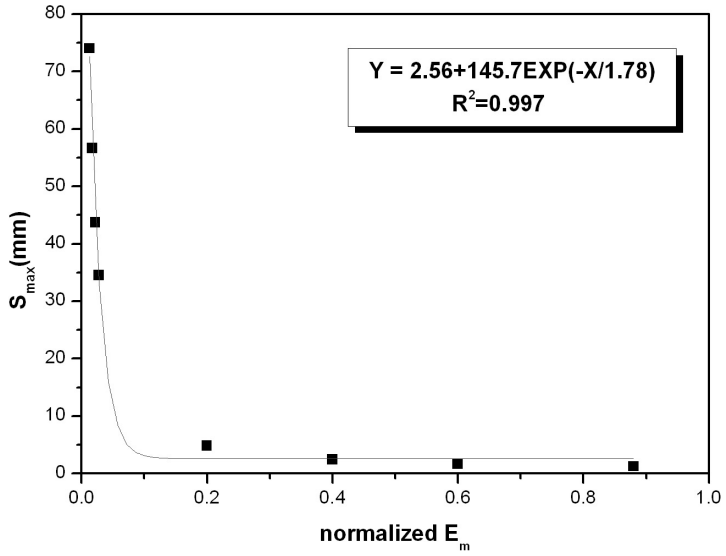

그림 12. 정규화된 암반변형계수의 변화에 따른 최대침하량

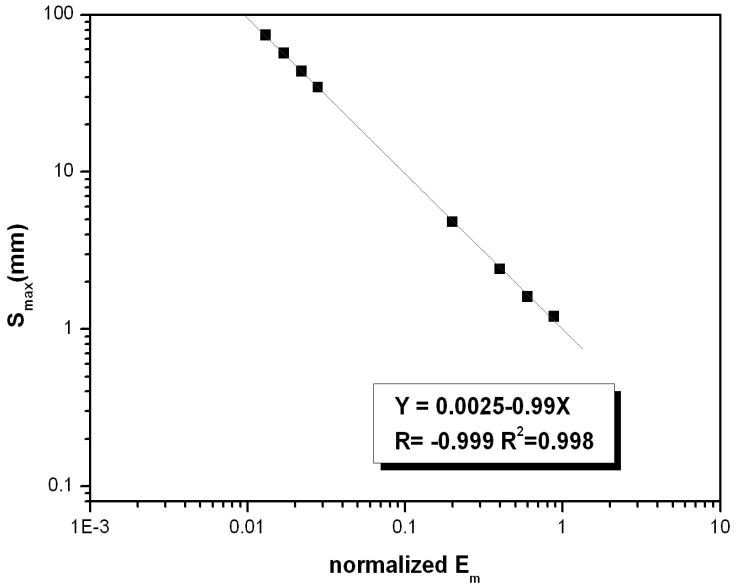

그림 13. 정규화된 암반변형계수의 변화에 따른 최대침하량(log-log)

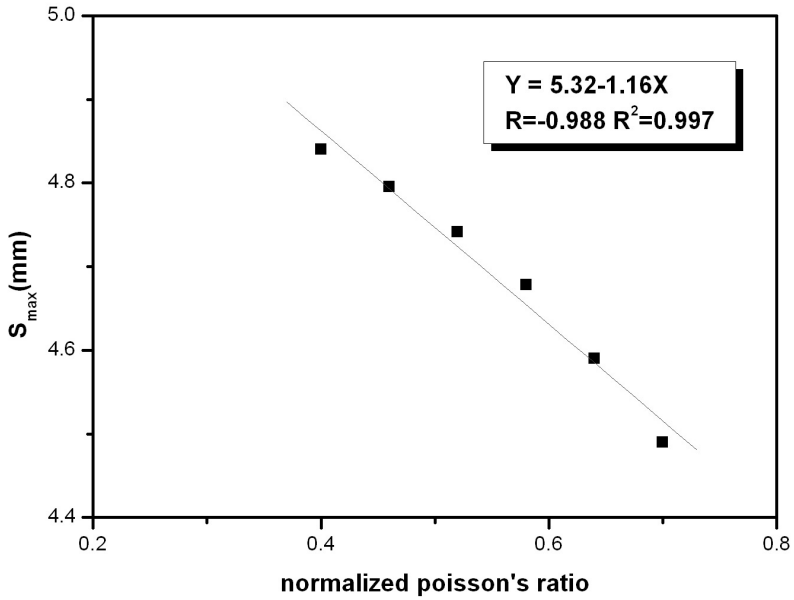

그림 14. 정규화된 포아송 비의 변화에 따른 최대침하량

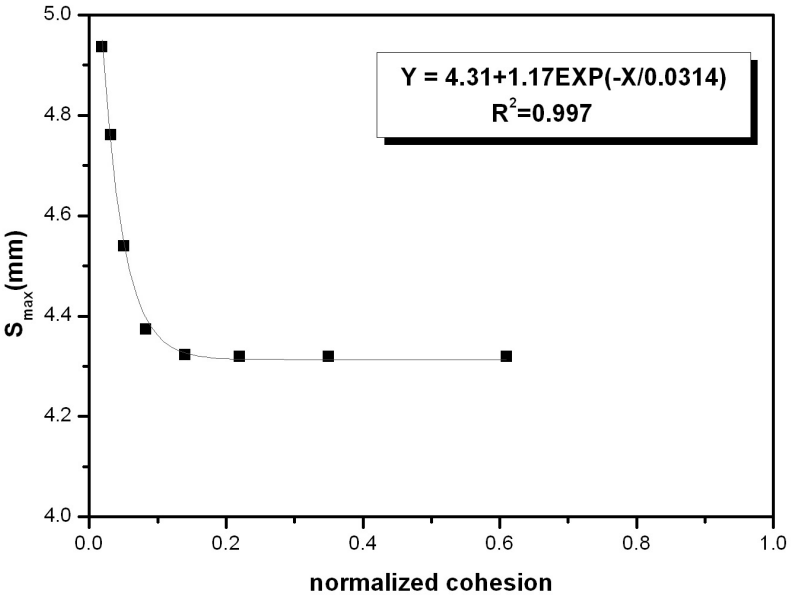

그림 15. 정규화된 점착력의 변화에 따른 최대침하량

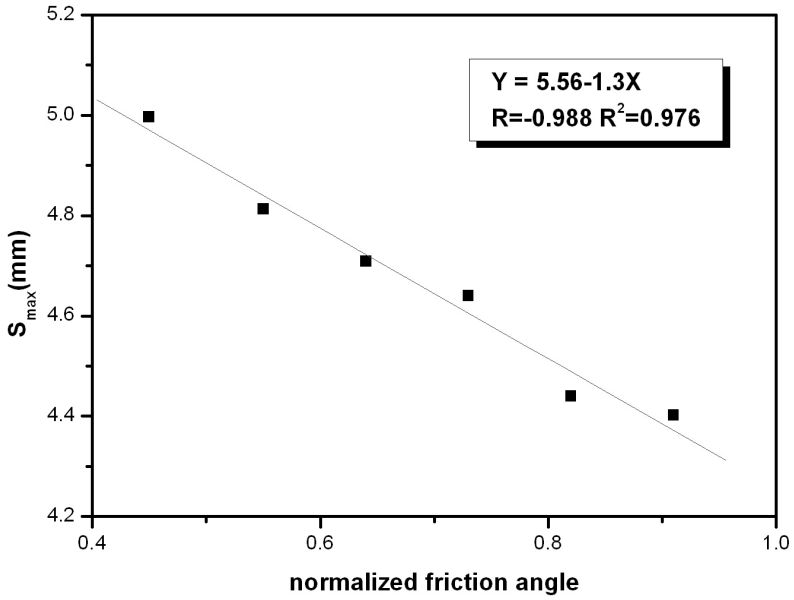

그림 16. 정규화된 내부마찰각의 변화에 따른 최대침하량

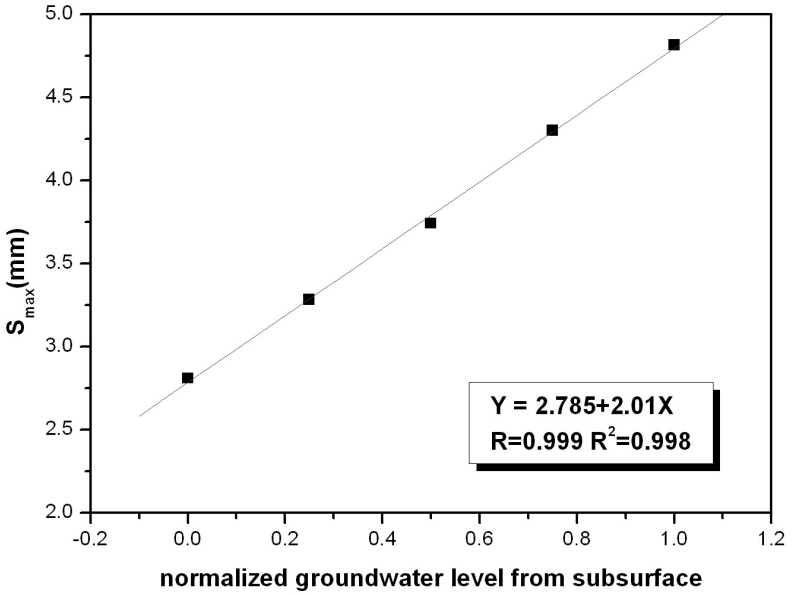

그림 17. 정규화된 지하수위의 변화에 따른 최대침하

4.2 불연속면 물성 변화에 따른 가중치 산정

불연속면 물성의 변화에 따른 UDEC 해석결과를 종합해 볼 때, 연속체 해석에서 지반물성치가 침하거동에 미치는 영향에 비하여 상당히 다른 양상을 보여줌을 알 수 있었다. 하지만, 불연속면면의 물성 중에서 침하거동에 영향을 미치는 정도를 다음 순서로 정할 수 있다.

불연속면의 강성(수직 및 전단강성) > 점착력 > 내부마찰각

일반적으로 불연속면의 수직 및 전단강성은 하중에 대한 변형율의 관계로 표현되기 때문에 침하모델링에서 침하량 크기를 결정하는데 중요한 요소라고 볼 수 있다. 또한 불연속면의 점착력은 불연속면의 파괴를 결정하는 Mohr-Coulomb 파괴식의 변수이므로, 점착력은 침하량의 크기에도 영향을 미치지만 주로 암반블록의 미끄러짐이나 탈락을 결정하는데 더 큰 영향을 미친다. 불연속면의 내부마찰각은 점착력과 마찬가지로 불연속면간의 파괴를 결정하는 변수이지만, 불연속면의 점착력에 비하여 영향이 낮다고 할 수 있다.

앞에서 언급한 불연속면의 물성은 아니지만 불연속암반의 침하거동에 영향을 미치는 요인으로 불연속면의 간격 또한 무시할 수 없다. 불연속면의 간격은 채굴적의 폭과 밀접한 관계를 가지면서, 전반적인 침하거동을 지배하는 요소로 작용하게 된다. 즉, 불연속면의 간격이 채굴적보다 아주 작은 경우엔 채굴적내로 떨어지는 암반블록이 많아지고 이로 인하여 채굴적 상부로의 점진적인 암반블록의 탈락을 유발하게 된다.

한편, 불연속면의 물성변화에 따른 침하거동해석결과, 물성변화가 일어났음에도 불구하고 침하양상이 일정한 경향을 보이지 않는 것은 암반 내에 존재하는 불연속면들의 기하학적인 형상으로 인한 것으로 여겨진다. 왜냐하면, 암반 내 불연속면들이 낮은 물성을 갖고 있다할지라도 불연속면들의 기하학적 형상이 채굴적 주변에서 암반블록을 형성하지 않는다면 연속체 거동을 보이는 것으로 간주할 수 있다. 특히 암반블록과 채굴적의 기하학적인 형상관계는 3차원적으로 고려되어야 하나, 2차원 해석의 한계로 인하여 불연속면방향이 제대로 반영되지 못하는 한계점이 있다.

이러한 점들을 감안하면, 향후 연구에서는 대상지역의 불연속면조사를 통하여 3차원 개별 불연속면망을 형성하고 이로부터 2차원 불연속면 트레이스망을 다양한 방향에 대하여 구한 후, 불연속체 모델링을 수행할 필요가 있다.

5. 결론

연속체 및 불연속체 수치해석을 통하여 침하관련 핵심지반정수를 산정하고, 이를 근거로 가중치를 분석하였다.

1) 연속체 해석의 결과, 암반변형계수 > 지하수위 > 점착력 및 내부마찰각 > 포아송비의 순으로 핵심지반정수의 중요성이 평가되었다.

2) 각각의 가중치는 암반변형계수가 93.38, 지하수위가 4.12, 점착력 및 내부마찰각이 0.75이며 포아송비는 0.38로 나타났다.

3) 불연속체 해석의 결과, 불연속면의 수직 및 전단강성 > 점착력 > 내부마찰각의 순으로 핵심지반정수의 중요성이 평가되었다.

이러한 결과는 수치해석에 의한 것을 기준으로 한 것이므로, 해석기법의 한계 및 해석상의 가정으로 인하여 고려되지 못한 변수들이 존재할 수도 있다. 따라서 다양한 현장자료와의 비교 검증을 통하여 이를 보완할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 2005년도 건설핵심기술연구개발사업 (과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술개발)에 의하여 연구비가 지원된 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 이정인, 문현구 외, 1997, 탄광지역 지반침하 메카니즘 및 침하 방지공법에 관한 연구, 석탄산업합리화사업단 연구보고서, 292p.
2. 한국건설기술연구원, 1985, “지반침하 방지공법에 관한 연구”, pp. 1~70.
3. 한국자원연구소 연구보고서, 1998, 지반침하 안정성 평가기법 및 대책연구, KR-98(C)-47
4. 한국지반공학회, 1997, 지반공학시리즈 6 - 연약지반, 구미서관, p.521
5. 한국지질자원연구원 연구보고서, 2001, 지반침하 안정성 평가기법 및 대책연구, KR-01
6. Choi S.O. et al., 2004, Development of the Techniques for Reducing the National Disaster caused by Ground Subsidence, project no. M1-0324-00-0013-03-B31-00-005-00, Ministry of Science and Technology of Korea, 232p.
7. KIGAM report, 1993, Study on the stability diagnosis and evaluation for the Boopyung mine area, 284p.