

지반침하 거동특성 분석을 위한 임반의 부피팽창률에 관한 연구 II

이승중¹⁾, 정용복^{2)*}, 최성웅³⁾

A Study on the Volumetric Expansion Ratio of Rock Mass for Subsidence Behavior Analysis II

Seung-Joong Lee, Yong-Bok Jung, Sung O. Choi

Abstract The volumetric expansion ratio of rock mass on the subsidence occurrence area can explain why the depth of the surface subsidence is lower than the height of an opening; it is because the empty space of the gangway is filled with the broken rock. But, until now, when the surface subsidence mechanism is studied without consideration of the volumetric expansion ratio, it is usually overlooked that the amount of subsidence occurrence can be overestimated. Therefore, in this study, the authors researched the subsidence occurrence mechanism with a new theoretical approaching method. The volumetric expansion ratio obtained from this method has been applied to the numerical simulations. The authors adopted the UDEC(Universal Distinct Element Code) for their discontinuum numerical analysis, because this program has an advantage for analyzing the behavior of rock discontinuities.

Key words Volumetric expansion ratio, Subsidence, Numerical analysis

초 록 지반침하 지역의 지표침하량은 지하 채굴적의 높이보다 작은 것으로 분석되고 있다. 이러한 원인은 암반의 부피팽창률이며 아직까지 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부피팽창률 산정을 위해 3차원 입체 모델을 이용하여 지표침하량과 침하영향범위를 고려한 이론식을 유도하였다. 또한 수치해석 시 부피팽창률의 적용성 검토를 위하여 개별요소 프로그램인 UDEC(Universal Distinct Element Code)을 이용하여 측압계수의 변화에 따른 지표침하의 변화 양상과 접착력의 변화에 따른 부피팽창률의 변화 양상을 분석하였다.

핵심어 부피팽창률, 지반침하, 수치해석

1. 서 론

지반침하 현상의 발생은 도로 및 철도 등 국가 기간망과 산림 및 주택 등 주민시설의 안정성에 큰 위협 요소로 작용하고 있으며, 국민의 생활 안전을 위협하고 있다. 이러한 지반침하발생의 원인은 광산의 지하갱도 및 지하채굴적의 함몰에 의한 것으로 채굴적의 심도, 채굴적의 폭, 채굴적 상반의 강도, 보안광주의 강도, 측압계수 등 여러 가지 지반침하 발생요소들이 그동안의

활발한 연구로 분석되었고(최성웅 외, 2005), 이를 활용하여 지반침하의 유형별 분석과 대처방안 수립에 대하여 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 분석된 요인들을 활용하여 지반침하예측에 관한 연구가 진행 되고 있지만, 보다 정확한 지반침하예측을 위해서는 지반침하 거동특성에 관한 연구가 필요하다.

지반침하 거동특성 중 본 연구에서 다루고자 하는 임반의 부피팽창률은 지표침하량이 채굴적의 높이보다 작은 이유를 설명할 수 있다(Karfakis, 1993). 그 이유는 붕괴가 채굴적 상부에서부터 지표까지 전이되면서 파괴된 암석이 지하 채굴적을 채우고, 이와 동시에 형성되는 공극으로 인하여 파괴영역의 부피가 증가하기 때문에 지표침하량이 채굴적의 높이보다 작게 나타나는 것이다. 하지만 그동안 제시된 부피팽창률은 화약발파에 의한 현장측정치이기 때문에 지반침하지역에 그대로 사용하기에는 무리가 있다(이희중 외, 2008). 또한

¹⁾ 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 석사과정

²⁾ 한국지질지원연구원 지반안전연구부 선임연구원

³⁾ 강원대학교 공과대학 지구시스템공학과 교수

* 교신저자 : ybjung@kigam.re.kr

접수일 : 2008년 11월 3일

심사 완료일 : 2008년 12월 16일

게재 확정일 : 2008년 12월 18일

지금까지 지반침하량 산정을 위하여 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)과 같은 연속체해석 프로그램을 이용하였지만, 연속체해석은 불연속체 해석과 달리 개별 블록에 의한 침하양상과 공극에 의한 부피팽창률을 분석하기 어렵기 때문에 침하량이 실제보다 과하게 해석되었다.

본 연구에서는 보다 정확한 부피팽창률 산정을 위하여 침하영향범위와 침하량을 함께 고려할 수 있도록 3차원 입체모델을 이용하여 부피팽창률 이론식을 유도하였으며, 부피팽창률 분석을 위해 UDEC을 이용하여 측압계수의 변화에 따른 침하양상과 블록거동에 따른 부피팽창률을 분석하였다.

2. 이론적 고찰

지반침하의 일반적인 현상은 천정부의 파괴가 일어난 후 붕괴가 점차 상부로 진행된다가 자립이 가능한 지층을 만나거나, 파괴된 암석들의 부피팽창에 의해 중단되

기도 하지만, 붕괴가 점차 상부로 진행된다면 지표까지 영향을 미치지 때문에 지반침하가 발생하게 된다. 이때 파쇄암이 쌓여 형성되는 파쇄층의 높이, 즉 파쇄암의 부피팽창률은 공동 직상반의 강도, 채굴적의 심도, 채굴적의 규모 등에 따라 달라질 수 있지만, 침하가 발생되어 지표까지 영향을 미칠 경우 침하형태에 따른 영향범위와 침하량도 함께 고려한 계산이 필요하다.

부피팽창률은 Fig. 1과 같이 붕괴 전 상반의 부피와 붕괴 후 공극을 포함한 최종 부피와의 관계를 통하여 식 (1)과 같이 이론적으로 정의 할 수 있으며, 김병찬외(2001)는 일정한 채굴고와 부피팽창률의 변화에 따른 봉락고를 계산하기 위하여 파쇄암이 쌓이는 여러 가지 형태를 단순화시켜 봉락대의 형상의 차이에 의한 부피팽창률과 봉락고의 관계를 제시하였다(Fig. 2).

$$B = \frac{V_f - V_i}{V_i} = \frac{(V_s + V_v) - V_s}{V_s} = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

여기서, B 는 부피팽창률, V_f 는 최종붕괴 후 부피, V_i 는 붕괴 전 부피, V_v 는 채굴공동의 체적, V_s 는 붕괴될 상반의 부피이다.

Fig. 2의 이론적 모델들은 공동의 제한된 부피에서 붕괴될 암반의 부피팽창률을 통하여 봉락고를 계산하기 위한 함몰형 침하의 이상적인 모델들이다. 하지만 이 모델들은 암중별 부피팽창률을 이용하여 지하 채굴적에서 지표까지 전이되는 봉락고를 계산할 수 있지만, 지표에서부터 지하 채굴적으로 침하되는 지표침하깊이와 지표에 나타나는 침하영향범위에 대한 계산은 고려되지 않았다. 또한 암중별 부피팽창률은 채굴적 상반의 구성 암종과 불연속면 등 현장 조건에 따라서 달라질

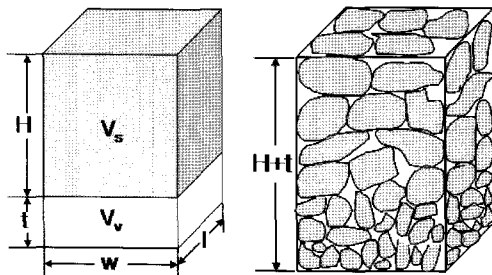


Fig. 1. Schematic diagram of volumetric expansion ratio model for square column(H : height of overburden to be collapsed, t : height of an opening, w : width of an opening, l : length of an opening)

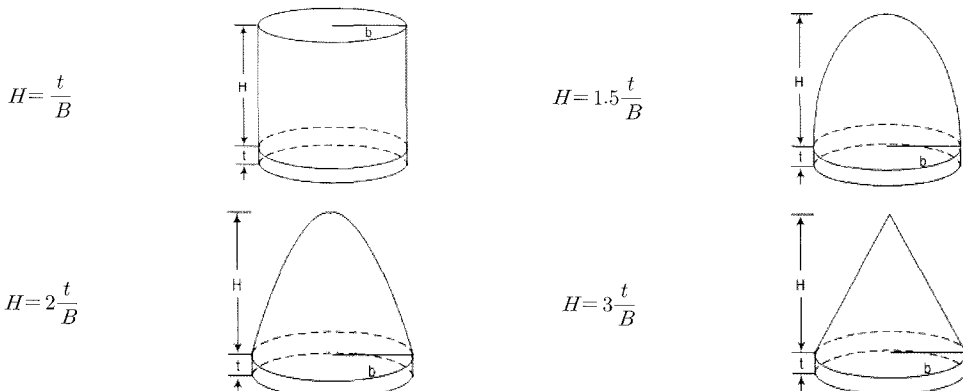


Fig. 2. Relationship between volumetric expansion ratio and height of overburden to be collapsed with variation of collapsed shape (H : height of overburden to be collapsed, t : height of an opening, B : volumetric expansion ratio)

수 있기 때문에 정확한 값을 산정한다는 것은 어렵다. 따라서 침하지역을 이루는 각 구성 압중에 대한 부피팽창률 분석도 중요하지만, 현장조건에 따라 전체적인 부피팽창률이 달라지기 때문에 침하영향범위와 지표침하량을 고려한 침하지역 전체에 대한 분석이 필요하다.

Fig. 3은 이에 대한 분석을 위한 3차원 입체모델로서 Fig. 3.(a)는 침하영향범위가 공동의 폭보다 작게 발생할 경우의 모델이고 Fig. 3.(b)는 공동의 폭보다 크게 발생할 경우의 모델이다. 이 모델을 이용하여 침하영향범위와 지표침하깊이를 고려한 부피팽창률 계산식을 유도하기 위해 지표면을 기준 한 직각좌표계를 이용하였다. 지표면을 기준으로 하였기 때문에 지표침하깊이와 공동의 심도는 음수 값으로 정하였다. 따라서 침하영향범위의 중심을 y축, 지표면을 x축으로 정하여 침하영향반경(r)과 공동상부에서 지표까지 이루는 각(θ)을 각각 식 (2), (3)과 같이 유도하였다. 또한 y축을 기준으로 회전체의 부피를 적분하여 붕괴 전 부피(V_i)와 최종붕괴 후 부피(V_f)에 대한 식을 유도하였다(식 (4), (5)). 그리고 식 (4), (5)를 이용하여 부피팽창률 산정식과 지표침하량 산정식을 유도하였다(식 (6), (7)).

$$r = w - d \cot \theta \tag{2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{-d}{r-w} \right) \tag{3}$$

$$V_i = - \frac{\pi}{3 \tan^2 \theta} d \{ (d)^2 + 3r \tan \theta (d + r \tan \theta) \} \tag{4}$$

$$V_f = - \frac{\pi}{3 \tan^2 \theta} (s-d) \{ (s-d)^2 + 3(s+r \tan \theta)(d+r \tan \theta) \} + \pi w^2 \tag{5}$$

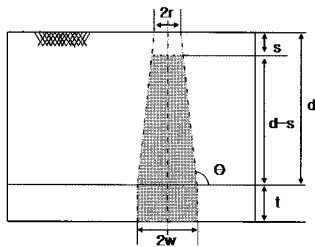
$$B = \frac{V_f - V_i}{V_i} = - \frac{(s-d) \{ (s-d)^2 + 3(s+r \tan \theta)(d+r \tan \theta) \} + 3tw^2 \tan^2 \theta}{d \{ d^2 + 3r \tan \theta (d+r \tan \theta) \}} - 1 \tag{6}$$

$$s = - \sqrt[3]{Bd \{ d^2 + 3r \tan \theta (d+r \tan \theta) \} - (r \tan \theta)^3 + 3tw^2 \tan^2 \theta} - r \tan \theta \tag{7}$$

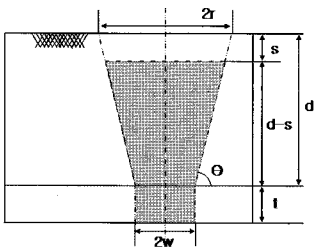
여기서, θ 는 공동의 상부와 침하영향반경이 이루는 각, d 는 채굴공동의 심도, r 은 침하영향반경, w 는 채굴공동의 반경, s 는 지표침하깊이, t 는 채굴고이다(단, $d < 0, s < 0, w \neq r$).

침하가 공동상부에서부터 지표까지 전이되어 침하량이 0 m를 나타낸다고 할 때, 일정심도, 일정규모를 갖는 공동에 대한 부피팽창률은 붕괴될 상반의 부피에 대하여 가장 많이 발생할 수 있는 최대치이다.

예를 들어 지표까지 침하가 발생되었지만 침하량이 거의 나타나지 않았을 때($s=0$ m) 공동의 규모가 $w=10$ m, $t=8$ m이고 심도가 $d=20$ m라면, 침하영향반경(r)의 변화에 따라 발생할 수 있는 최대 부피팽창률의 변화는



(a) A model in case that the subsidence influence radius is smaller than the radius of the gangway ($w > r$)



(b) A model in case that the subsidence influence radius is larger than the radius of the gangway ($w < r$)

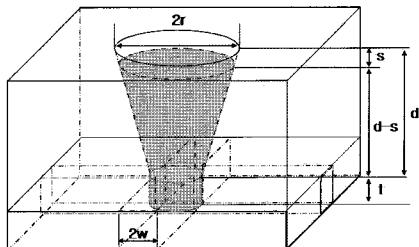
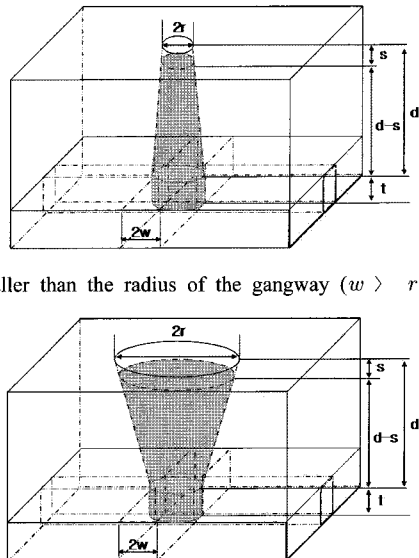


Fig. 3. Models of volumetric expansion ratio considering the subsidence influence zone and the depth of the surface subsidence (d : depth from the surface to the gangway, t : height of an opening, w : the radius of the gangway, r : the subsidence influence radius, θ : the angle between the upper part of the gangway and the surface end part of subsidence, s : subsidence)

Fig. 4와 같으며 침하영향반경이 증가할수록 붕괴 될 상반의 부피(V_i)와 최종 붕괴 후의 부피(V_f)는 증가 하지만, 침하가 발생할 수 있는 부피 즉, 공동의 부피가 일정하기 때문에 최대 부피팽창률이 점차 작아지는 경향을 알 수 있다. 지표침하가 0.8 m 발생하였을 때도 마찬가지로 유사한 경향을 보이지만 침하량의 부피는 영

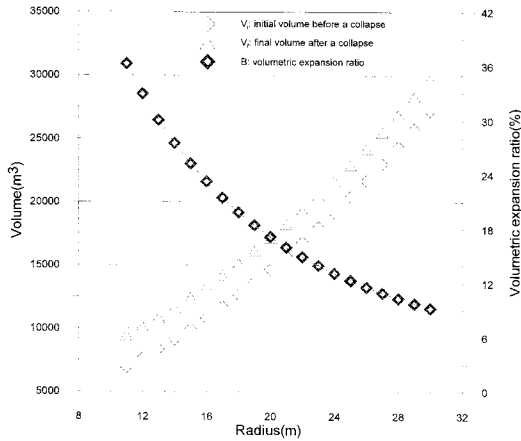


Fig. 4. Trend of the opening volume and/or the volumetric expansion ratio w.r.t. the subsidence influence radius (when $s=0.0$ m, $d=-20$ m, $w=10$ m, $t=8$ m)

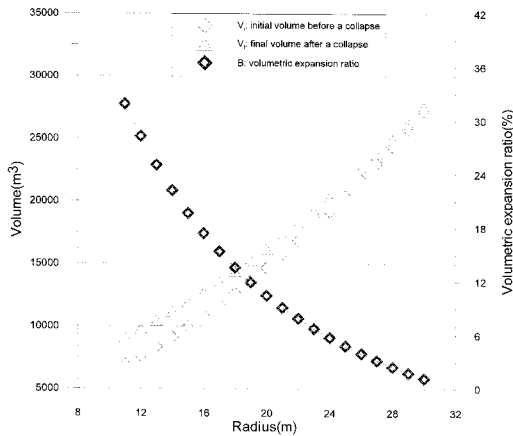


Fig. 5. Trend of the opening volume and/or the volumetric expansion ratio w.r.t. the subsidence influence radius (when $s=-0.8$ m, $d=-20$ m, $w=10$ m, $t=8$ m)

향반경이 증가함에 따라 점차 증가하여 공동의 부피와 비슷해지기 때문에 0.8 m의 침하량을 갖는 최대 부피팽창률은 붕괴 전 부피(V_i)와 최종 붕괴 후의 부피(V_f)가 점차 같아지며 0에 가까운 값을 나타낸다(Fig. 5).

결과적으로 일정규모를 갖는 공동은 침하영향반경이 증가함에 따라 발생할 수 있는 최대 부피팽창률은 점차 감소되는 것을 유도한 식을 이용하여 분석할 수 있었다. 하지만 유도된 식들은 암반의 물성이나 역학적 거동을 고려하지 못한 한계를 갖고 있으나 지반침하영향반경과 지표침하깊이 그리고 부피팽창률과의 관계를 이론적으로 분석했다는 것에 큰 의미를 두었다.

3. 수치해석

국내의 대부분의 지반침하는 급경사의 불규칙적인 단층을 대상으로 위경사승 봉락법과 중단채굴법 등의 채탄법을 적용함으로써 지표에서의 침하 범위는 비교적 좁은 범위에 국한되는 특성을 보이나, 일단 침하가 발생하면 침하량이 매우 크고 침하 곡선도 불연속한 함몰 침하의 형태를 보인다. 또한 폐광지역에서 발생하는 침하현상은 채광이 끝난 후 지지력을 상실했을 때 발생하므로 점진적이고도 복합적인 진행과정을 거쳐 일어난다(석탄산업합리화사업단, 1997). 이에 대하여 본 연구에서는 수학적 모델을 통하여 접근해보고자 개별요소 프로그램인 UDEC(Universal Distinct Element Code)을 이용하여 불연속체 모델에 의한 해석을 실시하였다.

해석모델은 서로 직교하는 수직과 수평절리를 생성하여 절리의 규칙성을 두었으며 정사각형 블록으로 단순화시켰다. 봉락되는 블록에 의해 발생하는 공극의 부피는 부피팽창률에 영향을 미치기 때문에 이를 파악하기 위하여 탄성해석을 실시하였다. 또한 지표침하발생의 과정, 즉 지하채굴 → 공동형성 → 천반함몰 → 침하전이 → 지표침하의 과정을 수치해석적으로 모사하기 위해서는 다른 어떠한 외부 조건 없이 중력의 작용에 의해서만 천반이 함몰되는 과정을 모사할 필요가 있다. 따라서 공동 상부 암반 블록들의 자유낙하현상을 효과적으로 표현하기 위해 Table 1에서 나타낸 바와 같이 블록간의 점착력을 0.03~0.06 MPa 수준으로 매우 낮게 설정하

Table 1. Input data of joint property for K-ratio analysis

	Normal stiffness (MPa/m)	Shear stiffness (MPa/m)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
Region 1	15	35	0.030	7.2
Region 2	20	40	0.040	5.6
Region 3	25	45	0.060	8.0

였다(이희중 외, 2008). 여기서 제시된 블록간의 점착력은 현장 조사에 의한 값이라기보다는 수치해석적 표현을 위한 값을 밝혀둔다.

3.1 축압계수의 변화에 따른 침하양상

앞에서 언급된 내용에서처럼 지표침하의 발생과정을 외부의 조건 없이 중력의 작용에 의해서만 블록이 붕락되는 현상을 모사하기 위해 Table 1과 같이 입력되는 변수들의 낮은 물성치와 축압계수의 영향에 따른 블록의 거동과 침하양상을 분석해 보고자 축압계수를 1.5, 1.0, 0.8, 0.6으로 변화를 주어 해석을 실시하였다.

본 해석을 위하여 Fig. 6의 모델과 같이 채굴적의 심도 25 m, 채굴적의 높이 2 m, 폭 6 m, 블록의 한 변의 길이 0.5 m로 일정하게 유지시켰으며 해석에 사용된 압반의 입력 물성은 Table 2와 같다.

해석결과, Fig. 7.(b)~(d)에서 확인할 수 있듯이 축압계수 0.6, 0.8 및 1.0에서는 일반적인 함몰형 침하양상을 나타내었으나, 축압계수 1.5의 해석결과는 공동 직상부 지표지점의 주변 압반이 밀려 올라오는 현상이 발

생되었다(Fig. 7.(a)). Fig. 8은 해석결과 중 축압계수 1.5의 각 지점 즉, 공동 바닥(his 1)에서부터 직상부 지표지점(his 5)까지 5개의 지점을 정하여 수직변위를 측정하는 결과이다. his 1(depth: 22 m)은 공동의 바닥부이

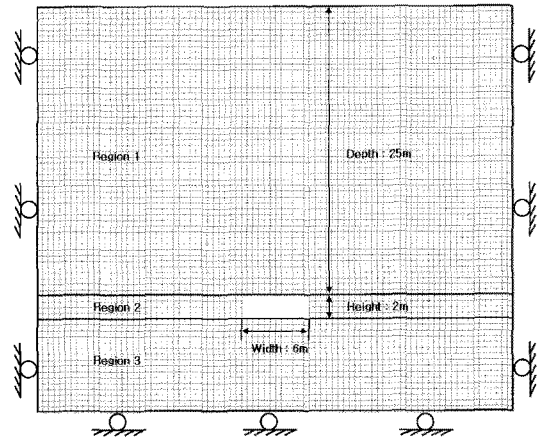
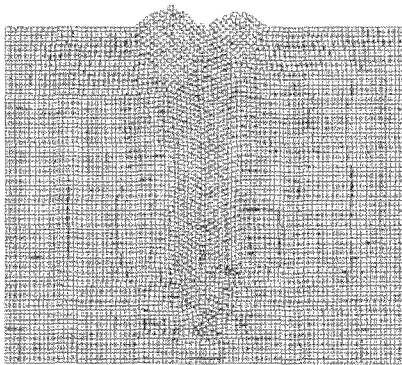
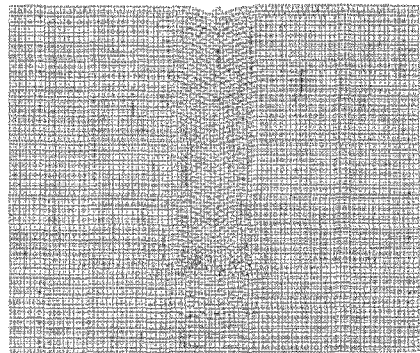


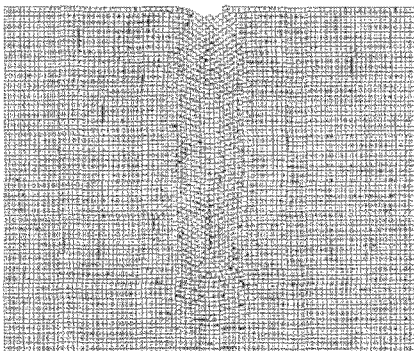
Fig. 6. Numerical model for K-ratio analysis (42×35 m)



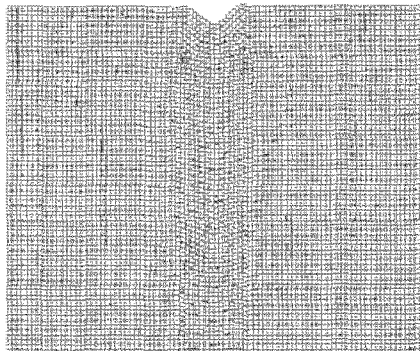
(a) K-ratio=1.5



(b) K-ratio=1.0



(c) K-ratio=0.8



(d) K-ratio=0.6

Fig. 7. Results of K-ratio analysis

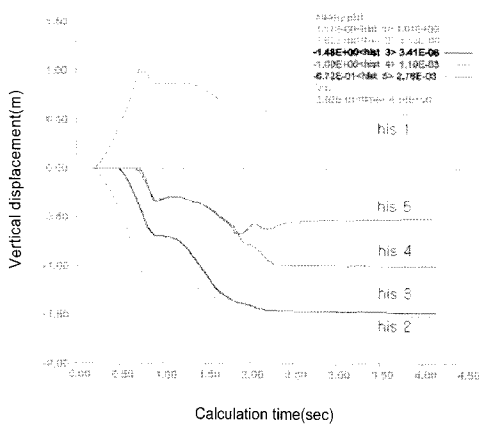


Fig. 8. Vertical displacement to each depth (K=1.5 - 378520 cycle) (hist 1: depth-22m, hist 2: depth-20m, hist 3: depth-9m, hist 4: depth-4m, hist 5: depth-0m)

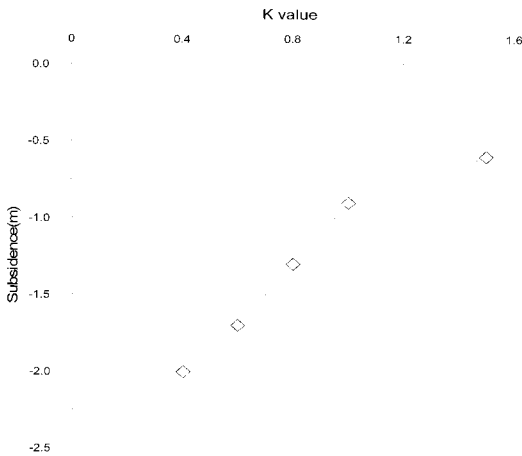


Fig. 9. Subsidence developed with the change of each K-ratio

며 히빙현상(heaving)으로 인하여 최종수직변위가 약 0.5 m 증가하였고, hist 5는 공동 직상부 지표지점으로 최종수직변위가 약 0.6 m 감소되어 침하가 발생되었다. 앞에서 분석된 축압계수 1.5의 침하양상과 수직변위의 해석결과를 종합해 보면, 공동 직상부 지표지점의 최종 수직변위는 감소하여 침하를 나타내지만(Fig. 8), 침하양상의 결과는 직상부 지표지점의 주변 암반이 밀려 올라와 침하보다 히빙현상이 발생하였다(Fig. 7.(a)). 이러한 원인은 지하공동으로 인하여 공동 직상부 지표지점의 침하가 발생한 것으로 분석할 수 있으며, 입력된 질리의 낮은 물성 값으로 인하여 높은 수평응력에 의해 공동 직상부 지표지점 부근의 암반이 밀려 올라온 것으로 분석할 수 있다. 또한 Fig. 7.(b)~(d)의 침하양상의 결과로부터 축압계수가 낮아짐에 따라 지표침하량이 점차 증가하는 경향을 분석할 수 있었다.

본 연구에서는 Fig. 9에 나타난 축압계수의 변화에 따른 지표침하량이 축압계수 1.0이하부터 일정하게 감소하는 경향이 분석되었으므로, 블록의 거동에 따른 부피 팽창률 분석을 위해 축압계수를 1.0으로 정하여 해석을 수행하였다.

3.2 블록 거동에 따른 부피팽창률

불연속체해석에서 특히 중요한 불연속면의 물성은 불연속면의 강성(수직 및 전단)과 불연속면의 파괴기준에 사용되는 입력자료인 점착력과 내부마찰각 등이다. 본 해석에서 암반자체의 물성은 축압계수에 의한 해석에 사용된 물성과 동일한 값을 사용하였고(Table 2), 블록의 순차적인 붕락을 유도하기 위하여 Table 3과 같이 공동 상부지층에 대하여 형성되는 수평과 수직질리의 수직강성 값과 전단강성 값의 차이를 두었으며, 파괴기

Table 2. Input data of rock mass property

	Density(kg/m ³)	Young's modulus(MPa)	Poisson's ratio
Region 1	2000	62,000	0.29
Region 2		56,000	0.28
Region 3		67,000	0.28

Table 3. Input data of joint property

		Normal stiffness (MPa/m)	Shear stiffness (MPa/m)	Cohesion (MPa)	Friction angle(°)
Region 1	Horizontal joint	15	35	0.030	10.8
	Vertical joint	5	25	0.030	10.8
Region 2		40	40	0.040	11.4
Region 3		45	45	0.060	12.0

준과 관련된 점착력을 점차 높여 봉락의 거동을 분석하였다. 해석모델은 Fig. 10과 같이 20 m 심도에 10 m의 폭을 갖는 공동으로서, 블록의 봉락에 의한 부피팽창률의 영향을 분석하기 위해 지표침하 발생 시 최대 부피팽창률이 40%가 될 수 있도록 공동의 높이를 8 m로 설정하였으며 블록의 크기에 의한 영향도 함께 분석해 보고자 블록 한번의 길이를 1 m와 2 m로 나누어 해석을 수행하였다.

해석결과 Fig. 11과 같이 점착력의 변화에 따른 침하양상을 파악할 수 있었다. 1 m블록과 2 m블록 모두 점착력이 증가할수록 침하량은 작아지는 경향을 보이지만, 점착력 0.11 MPa에서부터 2 m블록은 봉락이 전혀 발생되지 않았다. 이것은 블록의 크기에 따른 크기효과(scale effect)에 의한 것으로 1 m블록보다 블록의 거동이 제한된 공동의 폭 내에서 원활하지 못한 것으로 분석할 수 있다.

1 m블록의 경우 점착력 0.11 MPa까지는 지표침하가 발생되었지만, 0.13 MPa에서는 블록의 봉락이 중단되고 응력아치가 형성되어 상반이 안정되었기 때문에 지표침하가 발생되지 않았다. 실제로 그동안 조사된 바에 의하면 국내 대부분의 침하 우려지역은 이와 같은 경우가 많은 것으로 보고되고 있다. 이 경우 공동 상부지반이 충분한 지지력을 갖고 있을 때, 즉 본 연구에서처럼 점착력이 충분히 높다하더라도 공동 상부에 구조물이나 다른 영향 요소들에 의해 수직응력이 증가 된다면 침하가 발생되어 상당히 위험할 것으로 판단된다.

Fig. 11의 해석된 결과로부터, 지표에서부터 블록의 봉락으로 형성된 영역까지의 부피를 이차원 해석인 것을 감안하여 침하단면적이 모두 동일하다고 할 때, 침하된 부피를 Fig. 12와 같이 산정하였다. 산정된 침하량의 부피, 공동의 부피 그리고 봉락된 상반의 부피로부터 점착력의 변화에 따른 부피팽창률을 계산하였다(Table 4, Fig. 13). 점착력이 낮을수록 블록간의 분리 거동이

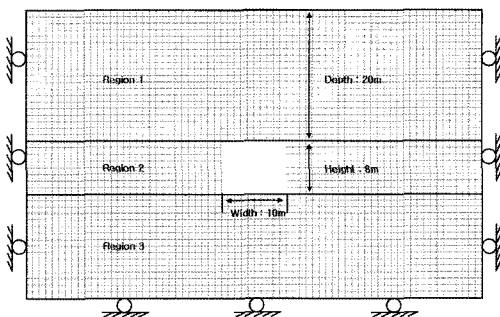


Fig. 10. Numerical model for the volumetric expansion ratio analysis (70×44 m)

활발히 이루어져 침하량이 더 크게 발생한 것을 분석할 수 있었고, 결과적으로 일정하게 유지시킨 변수들(jkn: 수직강성, jks: 전단강성, jfric: 마찰각)의 물성값에서는 점착력 0.11MPa이상부터 블록간의 분리 거동이 활발히 발생하지 못하여 침하가 발생하지 않은 것을 파악할 수 있었다. 또한 점착력 0.13 MPa에서 1 m블록은 봉락이 중단되었지만 공동 상반의 봉락된 블록의 부피와 블록이 쌓여 형성된 파쇄체의 부피로부터 계산된 부피팽창률은 49.36%를 나타냈다.

본 수치해석에서는 블록의 형태와 크기를 단일화시켜 블록의 거동에 따른 부피팽창률의 변화를 분석하기 위해 점착력을 점차 높여 해석을 수행하였다. 그 결과 불연속면의 파괴기준 변수인 점착력에 의하여 부피팽창률의 변화가 발생한 것을 분석할 수 있었다. 불연속체 해석 코드인 UDEC을 이용하여 부피팽창률을 고려한 침하해석을 할 경우, 블록의 거동에 영향을 미치는 변수를 고려하여 현장 조건에 맞도록 절리군의 분포 형태를 세분화 시키고 블록의 분리 거동을 분석한다면, 지반침하 위험지역에 대하여 침하량과 침하범위 뿐만 아니라 침하예측도 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 지표침하량이 채굴고의 높이보다 적게 나타나는 원인이 되는 암반의 부피팽창률에 대하여 이론적 고찰과 개별요소법을 이용한 수치해석을 실시하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 이론적으로 침하양상에 따른 침하영향범위와 침하량 분석을 함께 고려할 수 있도록 3차원 입체모델을 이용하여 부피팽창률과 침하량에 관한 식을 유도하였다. 이 식을 이용하여 임의의 입체모델을 분석한 결과, 일정 규모의 부피를 갖는 공동에 대하여 침하 영향반경이 증가함에 따라 붕괴될 수 있는 상반의 부피가 증가하기 때문에 발생할 수 있는 최대 부피팽창률이 감소되는 것을 분석할 수 있었다.
2. 측압계수의 변화에 따른 수치해석결과, 블록의 거동과 지반침하의 양상은 낮은 절리물성값으로 인하여 측압계수의 변화양상에 지배적으로 영향을 받는 것으로 나타났다. 실제 지반침하 발생지역의 경우, 암반의 파쇄현상에 따른 응력의 이완으로 인해 측압계수가 원지반에 비해 낮은 값을 보이는 것으로 보고되고 있으므로, 블록의 거동과 밀접한 관련이 있는 측압계수의 선정에 더욱 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.

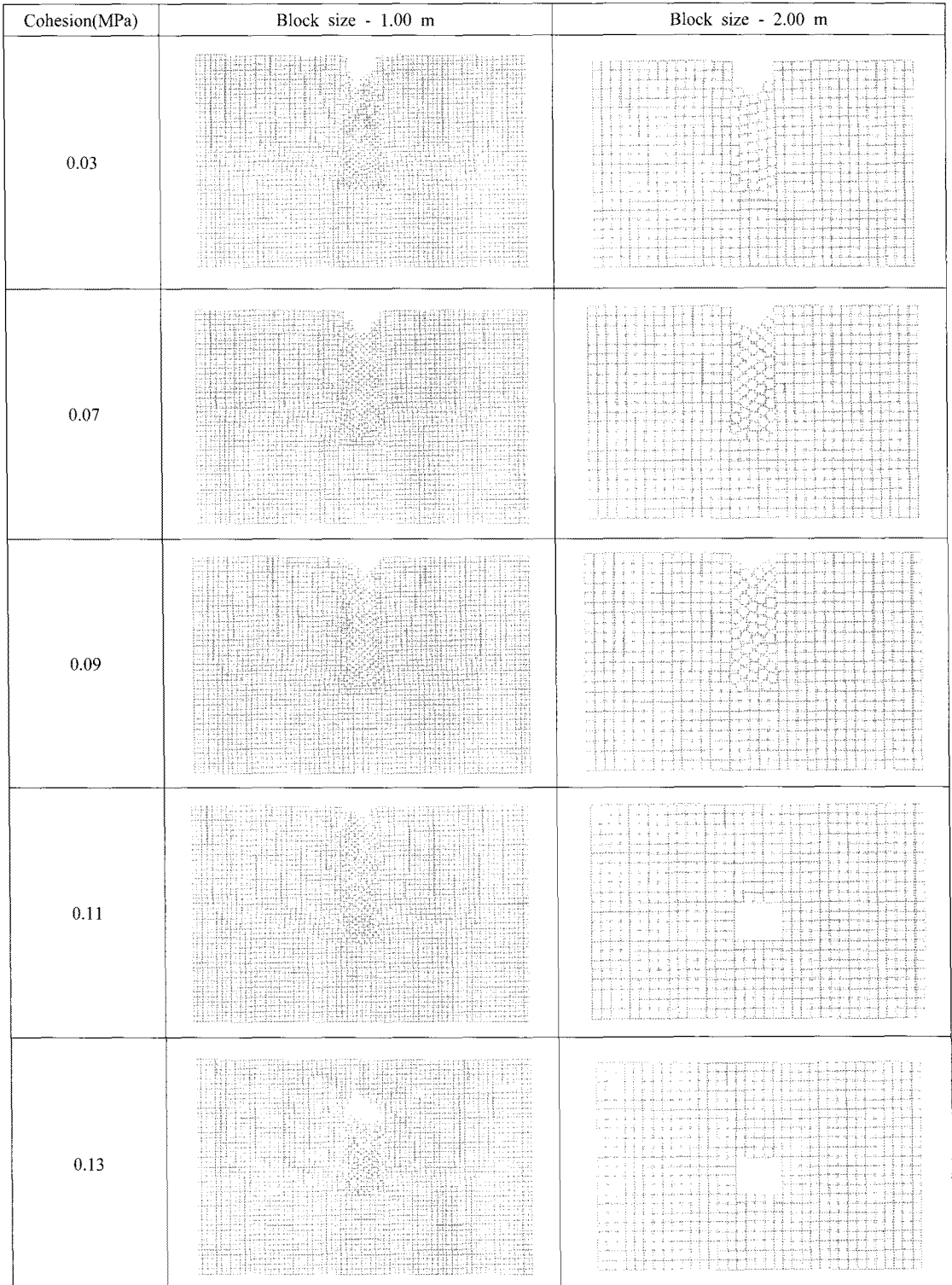


Fig. 11. The subsidence developed with the change of each joint cohesion

Cohesion(MPa)	Block size - 1.00m	Block size - 2.00m
0.03	47.56	51.25
0.07	24.95	34.36
0.09	16.82	22.97
0.11	8.45	-
0.13	34.21	-

Fig. 12. The subsidence volume developed with the change of each joint cohesion

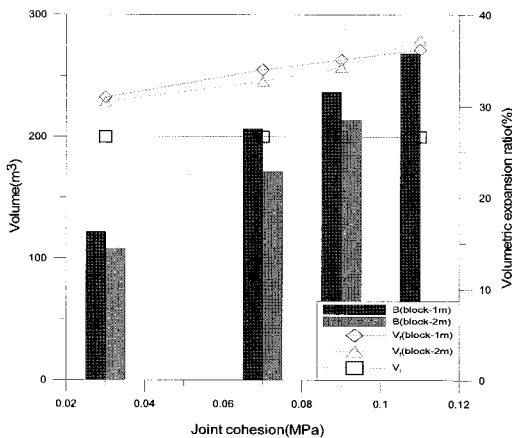


Fig. 13. Relationship between volume and volumetric expansion ratio according to the variation of cohesion (B: volumetric expansion ratio, V_i: initial volume of before a collapse, V_f: final volume of after a collapse)

3. 블록 거동에 따른 부피팽창률에 관한 해석결과, 일정하게 유지시킨 변수에서 점착력의 증가에 따라 침

하량이 점차 감소하는 것을 분석할 수 있었고, 결과적으로 부피팽창률이 점차 감소되어 발생할 수 있는 최대 부피팽창률과 점차 비슷해지는 경향이 분석되었다. 또한 1 m 블록의 해석 결과 중, 점착력 0.13 MPa의 경우 블록의 붕락이 중단되고 상부 지반이 안정화 되었지만, 실제로 이러한 경우 공동 상부에 수직응력을 증가시킬 수 있는 구조물이나 다른 요소들이 첨가된다면 지반침하발생의 가능성은 높아질 것으로 판단된다. 따라서 불연속체 해석 시 현장조건에 맞는 세부적인 절리 형성과 불연속면의 파괴기준인 점착력과 내부마찰각을 고려한 부피팽창률의 연구가 지속적으로 수행된다면, 현장에 가까운 침하량 산정이 가능할 것이다.

본 연구에서는 부피팽창률에 대한 이론적 고찰과 블록의 거동에 따른 부피팽창률의 변화 양상을 수치해석적으로 분석해 보았지만, 이는 경향분석에 따른 정성적인 결과일 것이다. 따라서 지반침하우려지역에 대한 불

Table 4. Volumetric expansion ratio developed with the change of each joint cohesion

Cohesion(MPa)	Block size(m)	$V_i(m^3)$	$V_o(m^3)$	$V_{ss}(m^3)$	$V_f(m^3)$	B(%)
0.03	1.00	200.00	80.00	47.56	232.44	16.22
	2.00			51.25	228.75	14.38
0.07	1.00	200.00	80.00	24.95	255.05	27.53
	2.00			34.36	245.64	22.82
0.09	1.00	200.00	80.00	16.82	263.18	31.59
	2.00			22.97	257.03	28.52
0.11	1.00	200.00	80.00	8.45	271.55	35.78
	2.00			-	-	-
0.13	1.00	111.00	80.00	34.21	165.79	49.36
	2.00			-	-	-

* V_i : the initial volume before a collapse

V_o : the volume of an opening

V_{ss} : the volume of a subsidence

V_f : the final volume after a collapse

B : the volumetric expansion ratio

연속면의 분포 양상 및 암반의 물리적 특성을 조사, 분석하여 현장특성을 반영한 실질적인 자료를 수치해석에 대입한다면, 지반침하발생 여부를 사전에 예측할 수 있는 능동적인 대책 마련이 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 '지질재해 피해평가기술 및 대응기술 실용화 사업' 과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. 김병찬, 문현구, 2001, 광산침하 기구 및 침하 예측에 관한 이론적 연구, 한국자원공학회지, Vol.38, No.3, pp.188-201.

2. 석탄산업합리화사업단, 1997, 폐광지역 지반침하 및 침하 방지 공법에 관한 연구, 기술총서, No.6, 292p.

3. 이희중, 정용복, 최성용, 2008, 지반침하 거동특성 분석을 위한 암반의 부피팽창률에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제18권 제1호, pp.33-43.

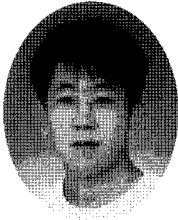
4. 이희중, 정용복, 최성용, 2008, 암반 부피팽창률 분석을 위한 실내실험과 수치해석에 관한 연구, 한국지구시스템공학회 제91회 추계학술발표회 논문집, 한국지구시스템공학회, pp.201-204.

5. 최성용, 전양수, 박의섭, 정용복, 천대성, 2005, 지반침하 메커니즘 분석 및 평가 프로그램 개발, 터널과 지하공간, 한국암반공학회지, 제15권 제3호, pp.195-212.

6. Itasca, 2002, FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) Example Applications 7. pp.1-20.

7. Itasca, 2004, UDEC(Universal Distinct Element Code) User's Manual 3. pp.117-120.

8. Karfakis, M. G., 1993, Comprehensive Rock Engineering, Vol.5-I, Pergamon, pp.451-476.



이 승 중
2007년 강원대학교 지구시스템공학과
공학사

Tel: 033-256-6256
E-mail: lhj3601@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 지구시스템공학과 석사
과정



정 용 복
1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2000년 서울대학교 대학원 지구환경
시스템 공학부 공학박사

Tel: 042-868-3097
E-mail: ybjung@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원



최 성 응
1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1994년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사

Tel: 033-250-6253
E-mail: choiso@kangwon.ac.kr
현재 강원대학교 공과대학 지구시스템
공학과 교수