

굴착영향을 고려한 지하공동의 탄소성해석

Elasto-Plastic Analysis of Underground Openings Considering the Effect of Excavation

최 규 섭 (Kyu Sub Choi)
김 대 홍 (Dae Hong Kim)
황 신 일 (Shin Il Hwang)
심 재 구 (Jae Gu Shim)

한국전력공사 원자력환경기술원
한국전력공사 원자력환경기술원
한국전력공사 원자력환경기술원
한국전력공사 원자력환경기술원

요약/ABSTRACT

지하공동의 거동은 굴착전에 암반에 존재하는 초기응력의 크기와 굴착에 따른 공동주변에서의 응력재분배에 많은 영향을 받는다. 암반과 같은 탄소성 재료인 경우 굴착으로 인한 공동주변의 거동은 응력경로의 영향을 받기 때문에 굴착방법과 순서 등에 따라 해석결과는 달라지게 된다. 따라서 지하 원자력발전소, 방사성폐기물 영구처분시설, 원유비축시설 등과 같은 대단면을 갖는 지하공동을 보다 합리적으로 설계하기 위해서는 해석과정에 굴착으로 인한 영향을 반영하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 굴착으로 인한 응력변화를 파악하기 위해서 유한요소법과 개별요소법에 의한 수치해석을 각각 수행하였다. 해석결과를 분석한 후 합리적인 굴착단면형상, 굴착방법 및 순서, 지보효과, 다공동 굴착시 인접공동의 굴착으로 인한 영향 등을 검토하였다.

주요어 : 지하공동, 탄소성, 유한요소, 개별요소, 굴착, 수치해석

The behavior of the underground opening depends mainly on the magnitude of the initial stress existing before excavation and on the stress redistribution due to the excavation. In the case of elasto-plastic materials such as rock mass, as the structural behavior of surrounded opening due to excavation depends on the stress path, methods and sequence of excavation have influences on the results of numerical analysis. Therefore, in order to design underground openings with large cross-section such as underground nuclear power plants, radioactive waste disposal caverns, oil storage caverns, and so on more reasonably it is desirable to consider the effect of the excavation sequence in the analysis. In this paper, the underground structure is analyzed using the finite element method and

the distinct element methods with a view to review the the effect of the excavation sequence. Based on the results of the analysis the followings are discussed : influence of excavation shape and sequence, effect of structural reinforcements, influence of multi caverns.

Key Words : Underground Opening, Elastoplastic, Finite Element, Distinct Element, Excavation, Numerical Analysis

서 론

지하암반공동은 지상의 활용공간부족을 극복하거나, 원활한 교통수단의 확보를 위해서 또는 인간 생태계로부터 특별한 격리보관이 요구되는 시설의 건설을 위해서 최근 널리 활용되고 있다. 지하암반 공동을 굴착할 경우, 건설기간동안은 물론 건설후 운영기간에도 공동주변의 공학적인 안전성은 필수적으로 확보되어야 한다. 이를 위해서는 계획단계에서 충분한 지질조사가 선행되어야 하며, 지질조건과 구조물의 기능과 목적에 적합한 공동의 단면형상과 굴착 및 지보방법 등이 선정되어야 할 것이다.

암반의 굴착이란 평형상태이던 구조체의 일부분을 제거함으로써 발생하는 구조물의 기하학적인 변화를 의미한다. 지하암반내에 공동을 굴착할 경우 기존의 평형에너지가 파괴되기 때문에 새로운 평형상태를 유지하기 위하여 굴착된 공동주변에는 에너지의 재분배현상이 발생한다. 이러한 에너지의 재분배과정에서 공동주변에는 응력집중, 이완, 또는 불연속면을 따른 암반의 분리, 미끄러짐 등의 현상이 발생한다. 일반적으로 지하암반구조물의 파괴모드에 대한 평가는 굴착후 수반되는 초기응력의 이완현상으로부터 파악될 수 있다. 대규모단면을 갖는 암반공동의 경우 흔히 장기간 단계적굴착작업에 의하여 건설되고 있기 때문에 초기응력의 이완은 굴착단계별로 진행된다. 따라서 공동의 안정성평가를 위한 수치모형화작업은 굴착전 암반체에서의 잠재응력상태를 파악하기 위한 초기과정(initial phase), 공동굴착과 지보과정을 포함한 건설과정(construction phase), 그리고 완공후 운영과정(operation phase)의 3단계로 나누어 수행하는 것이 바람직하다.

본 연구에서는 지하암반공동의 건설과정에서 발생하는 공동주변에서의 거동을 정량적으로 검토하

기 위하여 굴착영향을 고려한 구조해석을 수행하였다. 해석은 크게 두가지 경우 즉, 유한요소모델을 사용하는 경우와 개별요소모델을 사용하는 경우에 대하여 수행하였다. 유한요소모델을 사용한 해석에서는 굴착방법과 순서, 지보유무에 따른 공동주변에서의 거동변화를 파악하였으며, 개별요소모델을 사용한 해석에서는 가상의 불연속면이 존재하는 다공동해석모델에 대하여 굴착순서에 따른 거동변화 및 인접공동의 굴착으로 인한 영향 등을 검토하였다. 해석시 암반체는 탄소성체로 가정하였으며, 항복모델은 취성재료의 거동을 비교적 합리적으로 표현할 수 있는 Drucker-Prager모델과 Mohr-Coulomb모델을 사용하였다.

굴착으로 인한 공동주변의 응력분포

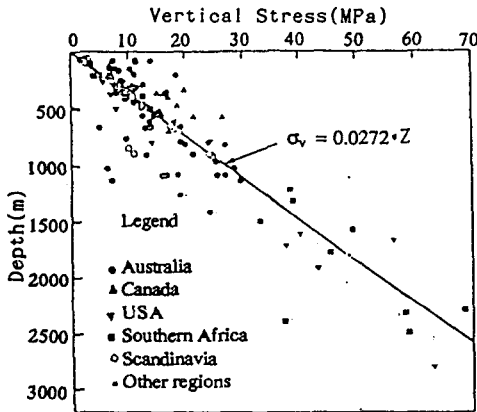
굴착전 지하암반의 초기응력

암반의 초기응력은 교란되지 않은 현장암반의 응력으로서 인위적인 변형이 가해지기 이전에 암반내에 존재하는 자연상태의 응력(Stagg and Zienkiewicz, 1974)으로 정의된다. 굴착이전의 단계에서 초기응력분포를 파악하는 것은 굴착후 암반공동의 파괴양상을 예측하거나, 설계단계에서 암반구조물의 동굴형상과 시설배치의 선정을 위해서, 또는 인접동굴간 거리산정, 굴착방법과 공법의 선정, 지진의 잠재위험평가를 위해서 활용되기 때문에 지하공동의 안전성향상을 위해서 매우 중요한 작업이라 할 수 있다. 그러나 초기응력은 암석의 생성과정과 생성이후의 모든 지질작용, 지각운동, 불연속면의 분포, 암반의 변형특성 뿐만 아니라 암반내의 수분, 지열, 구성광물간의 결속력 등에 따라서 그 크기와 방향이 달라지기 때문에 이들 값을 정량적으로 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 작업이라 할 수 있다. 탄성체역학의 고전적인 이론(Terzaghi and Richard, 1952)에 의하면, 초기응력의 연직성분

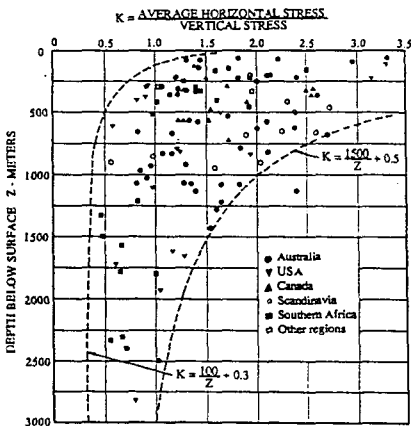
굴착영향을 고려한 지하공동의 탄소성해석

은 재하된 암반의 증량에 비례하며, 수평성분은 암반상태에 따라 결정되는 측압계수와 수직응력성분의 곱에 비례하는 것으로 알려져 있으나, 극경암을 제외한 대부분의 암반은 탄소성체 거동을 하기 때문에 이들 이론식을 적용하는데는 많은 문제점이 있다. 따라서 현장암반의 초기응력을 보다 정확하게 산정하기 위해서는 현장측정결과를 이용하는 것이 바람직하다. 현재 세계 여러 지역을 대상으로 많은 학자들이 현장시험들을 통하여 제안한 초기응력분포는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. Fig. 1의 (a)는 초기응력의 연직성분을 나타낸 것으로서 대체적

으로 상재된 암반의 단위증량에 비례하는 경향을 보여주고 있다. 그러나 초기응력의 수평성분은 심도증가에 따라 비선형적인 분포를 보여주고 있으며, 동일한 심도에서도 상한치와 하한치의 범위가 크게 존재함을 알 수 있다(Fig. 1(b) 참조). 즉 수평성분의 평균치는 대략 1000m이내의 심도에서는 대체적으로 연직성분보다 더 큰 값을 보여주고 있으며, 1000~1500m의 범위에서는 연직성분의 크기와 수평성분의 크기가 유사한 정수압(hydrostatic pressure)상태의 응력장을 보여주고 있다. 또한 1500m이하의 심도에서는 수평성분이 수직성분보다 작게 나타나고 있다.



(a) Vertical stress



(b) Horizontal stress

Fig. 1. Initial stress of rock mass with depth.

굴착후 공동주변의 응력분포

굴착후에 발생하는 공동주변에서의 응력은 굴착하고자 하는 공동의 형상과 크기, 암반특성, 굴착전 초기응력의 상태 등과 밀접한 관계가 있다. 공동의 크기는 주로 구조물의 설계목표와 기능, 설계수명 등과 같은 요인들을 고려하여 결정하며, 공동의 형상은 일반적으로 불연속면의 공간적인 분포와 지질 조건, 구조적인 안정성, 시공성, 경제성 등과 같은 요인들을 고려하여 결정한다. 지하공동에 대한 설계작업은 굴착이전단계에서 수행되고 있기 때문에 굴착후 공동주변의 응력변화를 예측하는 것은 매우 중요한 작업이라 할 수 있다. 수치해석적인 방법에 의하여 암반공동을 설계하는 경우 암반을 어떠한 재료로 취급할 것인가에 따라 공동주변거동은 많은 차이를 보여준다.

암반체를 탄성체로 취급하여 해석하는 경우는 지반상태가 매우 양호한 극경암에서 불연속면의 존재가 뚜렷하지 않은 경우에 주로 사용한다. 또한 그외의 경우일지라도 암반구조물의 전반적인 거동 파악을 위해서 또는 합리적인 해석영역의 결정 등을 위해서 해석의 예비단계로 사용할 수 있다. 암반을 탄성체로 취급하였을 경우, 굴착후 공동주변의 응력분포에 관한 이론적인 연구는 많은 학자들에 의하여 제시된 바 있다(Obert and Duvall, 1967, Greenspan, 1944). 이들은 초기응력장내에 적절한 가정을 도입하여 평형방정식과 적합방정식을 구성하고, 경계조건식을 도입함으로써 여러형태의 공동에 대하여 굴착후 발생하는 응력분포에 대한 이론해를 제시하였다.

지반상태가 매우 양호한 극경암을 제외한 대부분의 암반은 굴착후 굴착부주변에서 발생한 응력이 암석의 강도보다 크게 되면 암석을 파손시키고, 공동주변에 응력의 이완대를 형성하게 된다. 여기서 공동주변에서의 이완영역이란 굴착후 공동주변암반에 발생한 응력이 탄성한도를 벗어난 영역을 의미하며, 이 영역 내에서의 응력과 변형 등은 소성이론에 의하여 예측이 가능하다. 소성이론은 지반에 발생한 응력의 항복기준과 항복이후의 응력과 변형의 거동양상에 따라 소성흐름법칙과 변형경화법칙이 적용가능하다. 취성체의 특성이 뚜렷한 암반의 경우에는 재료간의 마찰을 고려하여야 하기 때문에 최대전단응력의 크기는 수직응력에 비례하며, 이에 따라 항복기준과 소성흐름 거동특성이 응력텐서의 1차불변량크기에 좌우된다(Ghaboussi and Ranken, 1974). 그러나 금속성재료의 함유량이 많아 연성체의 거동을 나타내는 암반의 경우에는 항복기준과 소성흐름 거동특성이 응력텐서의 1차불변량크기에 무관하여 최대전단응력은 일정한 경향을 보여준다. 일반적으로 토사나 암반과 같이 마찰성이 있는 취성재료의 경우에는 Drucker-Prager 항복기준과 Mohr-Coulomb 항복기준이 적합한 것으로 알려져 있고, 마찰을 무시할 수 있는 연성재료의 경우에는 Von-Mises 항복기준과 Tresca 항복기준이 적합한 것으로 알려져 있다(Fairhurst, 1965).

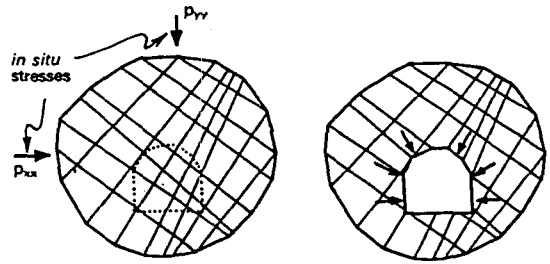
굴착후 발생하는 암반체의 거동양상은 암반체의 재료모델에 따라 많은 차이를 보여주기 때문에 보다 정확한 현장조사 및 실내시험으로부터 합리적인 모델을 선정하여야 한다. 탄소성암반체에서 공동의 형상이 복잡하거나 공동주변에 불연속면의 영향이 뚜렷한 경우에는 하중증가에 따른 변위의 거동양상은 매우 복잡하게 나타나므로 암반재료의 하중에 따른 변위의 구성관계를 적절한 시험으로부터 정의한 후 이를 해석에 반영하는 것이 바람직하다.

공동굴착의 수치모형화

암반공동의 구조거동은 공동굴착의 순서와 건설방법에 따라 크게 달라질 것이다. 특히 굴착후 공동주위에는 항복응력의 발생이 예상되고, Creep 현상과 같이 시간에 따른 변형이 계속적으로 발생할 것으로 예상되는 지역에서는 그 영향이 큰 것으로

알려져 있다((Ghaboussi and Ranken, 1974).

유한요소법이나 개별요소법과 같은 수치해석방법을 사용하여 암반공동의 굴착단계별 해석을 수행하는 방법은 Fig. 2에 나타낸 바와 같다(Lemos, 1987). 굴착전 초기응력상태에서 해석영역내의 응력을 계산한 후(Fig. 2(a)) 적절한 경계조건을 다시 도입한 다음 굴착에 따른 불평형력(unbalanced force)의 발생과 이로 인한 변형 및 응력의 재분포를 산정하게 된다(Fig. 2(b)). 이 방법은 지반문제의 해석에 널리 사용되고 있는 유한요소법에 의한 전산코드 Mr. SOIL과 개별요소법에 의한 UDEC 등에서도 널리 사용되고 있다.



(a) Pre-excavation stage (b) Immediately after excavation
Fig. 2. The change of initial stress during excavation.

Fig. 3은 암반공동의 굴착을 3단계로 나누어 시행하는 경우 굴착단면의 경계에 설치되는 Shotcrete에 단계별로 발생하는 응력변화를 보여주고 있다(Wittke, 1977). 그림에서 (a)는 1단계굴착을 수행한 직후를 보여주고 있으며, (b)는 굴착으로 인한 응력이완이 모두 끝난 후 Shotcrete를 설치한 상황을 나타낸 것이다. 이때 추가적인 변형이 없으므로 Shotcrete에는 응력이 발생하지 않는다. (c)는 다시 2단계굴착을 수행한 직후를 나타내고 있으며, (d)는 2단계굴착단면에 Shotcrete를 설치한 상황을 보여준 것이다. 이때에는 (c)과정의 굴착으로 인해 (b)과정에서 설치한 Shotcrete에는 응력이 발생하게 되지만 (d)과정에서 설치한 Shotcrete에는 응력이 발생하지 않는다. 즉 (b)과정에서 설치한 Shotcrete는 지보효과를 발휘하고 있음을 알 수 있다. 같은 방법으로 3단계굴착직후와 Shotcrete설치에 대한 과정은 (e)와 (f)에 나타낸 바와 같다. 따라서 전단

면 굴착후 100%의 응력이완이 끝난다음 지보를 한 경우 보강재의 효과는 전혀발휘되지 못하나 단계적 굴착에 의한 효과는 크게 나타남을 알 수 있다.

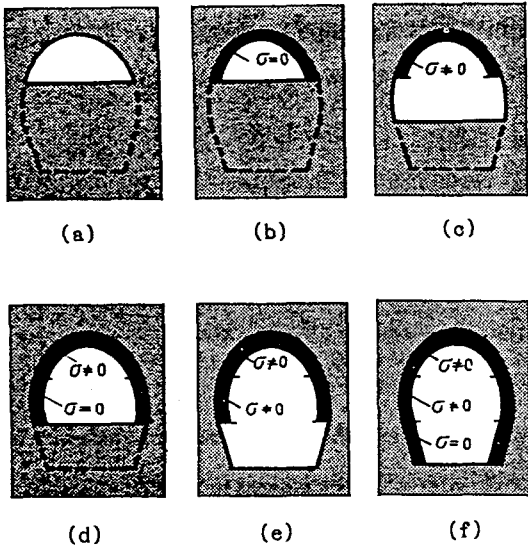


Fig. 3. Stress change around cavern during excavation and reinforcement.

굴착영향을 고려한 암반동굴의 구조해석

본 논문에서는 굴착으로 인하여 발생하는 공동 주변에서의 거동변화를 정량적으로 검토하기 위하여 유한요소모델과 개별요소모델을 사용하여 지하 암반공동의 구조해석을 수행하였다. 해석에 고려된 암반동굴은 한국원자력연구소와 스웨덴 SKB가 공동으로 연구한 “중·저준위 방사성폐기물 영구처분 시설개념설정” 보고서(과학기술처, 1990)에서 제시된 여러 공동형태중에서 가장 큰 단면을 택하였으며, 재료특성은 지하원유비축시설의 현장시험결과를 이용하였다.

공동주변 암반은 탄소성체로 가정하였으며, 해석 영역의 크기는 굴착에 따른 공동주변에서의 응력변화를 충분히 나타낼 수 있도록 상하경계를 공동높이의 6배, 좌우경계를 공동폭의 10배로 고려하였다. 또한 해석모델은 대상구조물의 대칭성을 고려하여 전체 해석영역의 절반을 모형화하였다.

유한요소해석

굴착으로 인한 동굴주변의 거동을 파악하기 위하여 해석에 사용된 공동의 해석모델은 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 동굴심도는 지표면으로부터 동굴정점까지 대략 150m로 가정하였으며 대상암반은 불연속면이 없는 결정질 화강암류로 가정하고 초기 응력은 수직성분의 경우 암반의 자중을 그대로 적용하였다. 초기응력의 산정후 굴착면에 해당하는 요소들을 단계적으로 제거하므로써 굴착영향을 고려하였고 원거리의 영향을 보다 합리적으로 표현하기 위해 해석모델측면에서의 수평변위와 상하면에서의 수직변위를 구속시켰다. 이때, 암반재료는 Drucker-Prager의 항복기준을 적용하였고 굴착과정에서 사용한 보강재의 배치와 재료특성은 국내에서 실제 건설된 바 있는 측정치를 이용하였다 (Table 1 참조).

Table 1. Material properties of rock, joint and reinforcement.

Material properties	Rock	Joints	Reinforcements	
			rock bolt	shotcrete
Young's modulus (t/m ²)	3.3×10 ⁶		21.1	3.0
Poisson's ratio	0.24			
Cohesion(t/m ²)	330	256.0		
friction angle(°)	40	27		
Unit weight(t/m ³)	2.68			
Stress ratio(K)	1.5			
Cross sectional area (x10 ⁻⁴ m ²)			4.91	1100.00
Weight per unit length(x10 ⁻³ t/m)			3.54	231.00
Moment of inertia(x10 ⁻⁴ m ⁴)				111.00
Normal stiffness (x10 ⁵ t/m ²)		5.0		
Horizontal stiffness (x10 ⁵ t/m ²)		5.0		

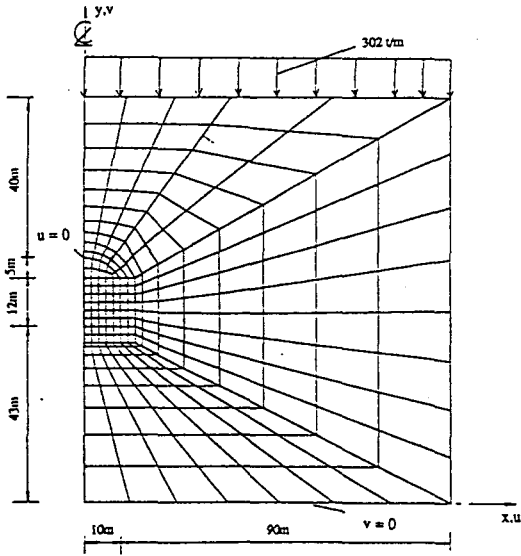


Fig. 4. A finite element analysis model.

Fig. 4에 제시된 해석모델에 대하여 굴착영향을 파악하기 위한 수치해석은 크게 두 경우에 대하여 수행하였다. 첫 번째 해석은 두가지 단면형태로 3단계굴착을 실시할 경우의 각각에 대하여 공동주변에서 발생한 변위를 비교하였고, 두 번째 해석에서는 공동의 전단면굴착후 보강유무에 따른 거동변화를 검토하였다.

첫 번째 해석시 고려한 3단계굴착의 두가지 단면형태는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 그림에서 Type I은 위에서부터 차례로 3단계굴착을 수행하는 경우를 나타낸 것이고, Type II는 Gallery부분은 Type I과 동일하게 굴착하고, Bench부분은 수평방향으로 굴착하는 경우를 나타낸 것이다. 두 경우에 대한 각각의 구조해석결과로부터 구한 공동주변에서 발생한 단계별 굴착시의 변위분포는 Fig. 6에 나타낸 바와 같다. 그림에서 알수 있듯이 Type I의 변형형상은 중심수직축을 기준으로 대칭인 반면에 Type II의 변형형상은 비대칭현상을 보여주고 있으며, 최종굴착후인 3단계에서의 변형형상은 그다지 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 또한 Type II의 경우 2단계에서 Type I에 비해 공동정점에서의 수직변위가 크게 발생하였다. 이것은 Type I굴착의 경우에는 공동주변의 압축응력이 아아치의 수평반력

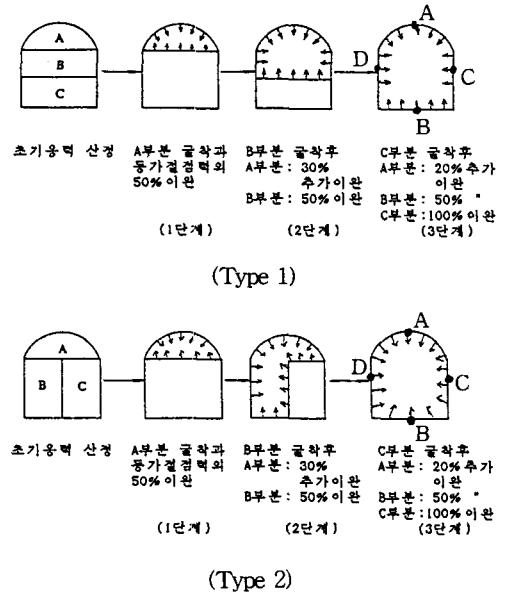


Fig. 5. Two different types of excavation sequence.

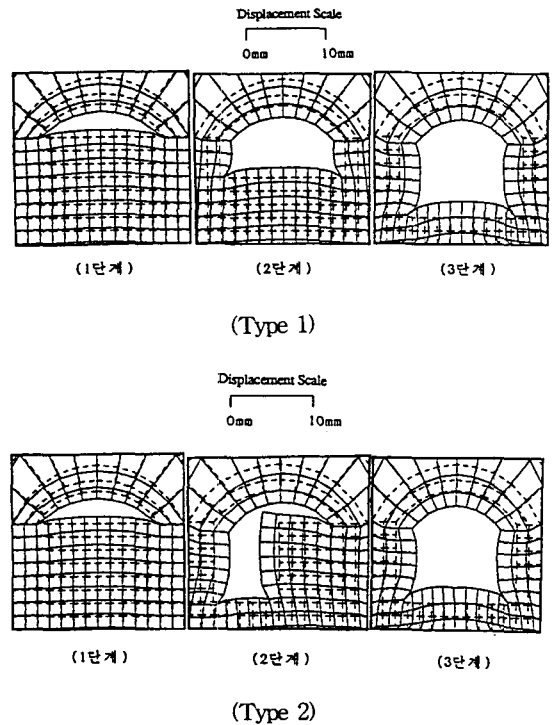


Fig. 6. Deformation shape after each excavation step.

과 같은 작용을 하여 굴착단면상부에 축방향응력을 증가시키는 대신에 휨모멘트를 감소시킴으로서 변위를 작게 발생시키기 때문이다. Table 2는 공동의 최종굴착직후 굴착단면 주요지점에서의 변위값을 나타낸 것이다. 탄성 해석을 수행할 경우 최종굴착후의 해석결과는 응력경로에 무관하기 때문에 두 해석결과가 동일하게 되지만 탄소성해석의 경우에는 최종결과는 응력경로의 영향을 받게 되어 두 경우의 해석결과는 서로 다른 값을 보여주고 있다. 본 예제의 경우 공동의 저변중앙점에서의 수직변위를 제외하고는 전반적으로 Type II의 변위가 Type I의 변위에 비하여 크게 발생며 비대칭형상을 나타내고 있다. 따라서 최종굴착후에 발생하는 변위로부터 Type I의 굴착이 Type II의 굴착에 비하여 비교적 유리함을 알 수 있다.

Table 2. Analysis results of cavern with two different shapes in excavation steps ($\times 10^{-4}m$).

Displ. Excavation	Vertical Displ.		Horizontal Displ.	
	A	B	C	D
Type I	-20.35	21.28	-28.81	-28.81
Type II	-20.39	20.77	-29.06	-29.14

두 번째 해석에서는 지보재의 효과를 파악하기 위하여 첫 번째 해석시 고려한 공동에 대하여 전단면 굴착후 지보재의 설치유무에 따른 거동변화를 검토하였다. 해석에 고려된 지보재와 지보방법은 Fig. 7에 나타낸 바와 같다.

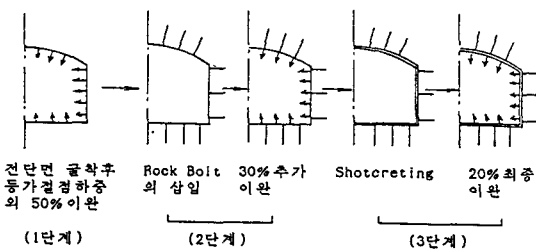


Fig. 7. Reinforcement procedure in full-face excavation.

즉 전단면굴착후 전체응력의 50%이완이 발생한 상태에서 Rockbolt를 삽입하고, Rockbolt의 설치후 30%의 추가이완이 발생한 상태에서 Shotcrete를 타설하는 것으로 가정하였다. 이러한 해석과정을 통하여 계산된 공동주변에서의 변위는 지보재를 설치하였을 경우가 무지보의 경우보다 대략 2.0%정도 작은 값을 나타내는 대신 압축응력은 더 크게 발생되었으며 지보재의 설치유무에 관계없이 공동의 측벽에서 가장 큰 값을 보여주었다. 측벽에서의 변위가 동굴정점이나 저변에서의 변위에 비하여 크게 발생하는 것은 해석모델에 작용하는 초기응력의 수평성분이 수직성분에 비하여 1.5배 크게 작용되기 때문인 것으로 판단된다(Table 3 참조).

Table 3. Influence of structural reinforcement around cavern($\times 10^{-4}m$).

Displ. Reinforcement	Vertical Displ.		Horizontal Displ.	
	A	B	C	D
Without	-20.57	21.51	-29.01	-29.01
With	-20.31	21.29	-28.89	-28.89

개별요소해석

불연속면이 존재하는 암반내에 한 개의 공동을 굴착한후 기존공동으로부터 수평방향으로 20m만큼 떨어진 위치에 또 다른 공동을 좌우에 한 개씩 추가굴착하였을 경우 굴착순서의 고려유무에 따른 기존 공동의 거동변화를 검토하였다. 공동주변의 불연속면분포와 특성값은 캐나다 Ontario주의 Fraser 광산주변 불연속면분포(Board, 1989)를 참조하여 Fig. 8과 같이 고려하였다(Table 1 참조). 이때 초기응력의 계산과정은 유한요소해석의 경우와 동일한 방법을 사용하였다. 또한 암석과 불연속면 재료에 대한 구성관계식은 Mohr-Coulomb항복기준에 따르는 것으로 가정하였다. 암석내에서의 변형은 완전변형가능한 블럭으로, 불연속면의 거동은 블럭과 블럭의 변과 변사이의 접촉(edge-to-edge contact)으로 각각 모형화하였다. 해석영역을 미세한 유한차분요소를 사용하여 분할한 해석모델은 Fig. 9와 같고, 개별요소해석프로그램인 UDEC을 사용하여 다음 두가지 경우에 대하여 해석을 수행

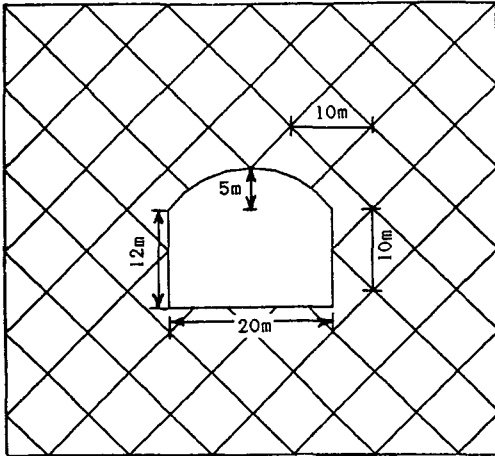


Fig. 8. Cavern structure with discontinuities.

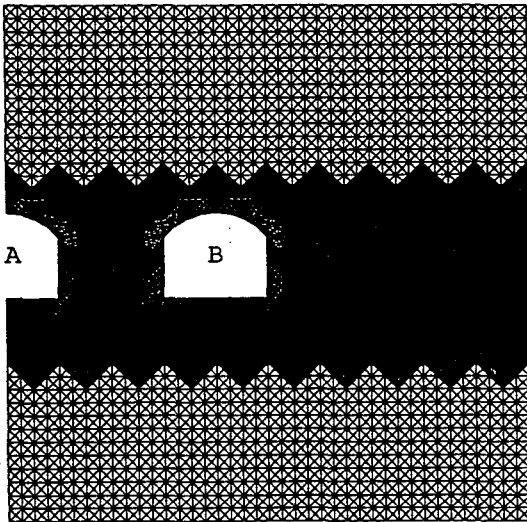


Fig. 9. A distinct element analysis model.

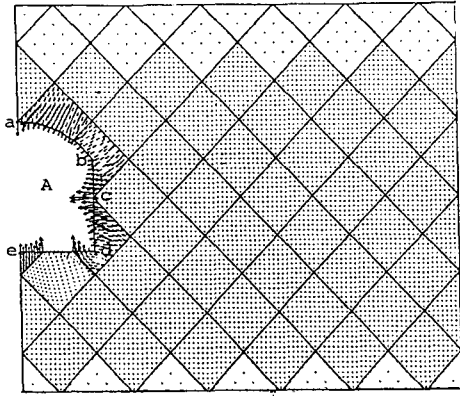
하였다.

첫 번째 해석에서는 중앙의 공동을 굴착하고, 좌우측의 공동을 나중에 굴착하는 경우(A공동굴착후 B공동굴착; case1)이고, 두 번째 해석에서는 세 개의 공동을 모두 굴착할 경우(A와 B공동의 동시굴착; case2)의 해석이다. 각 경우의 해석시 한 개의 공동은 전단면으로 굴착하는 것으로 가정하였고, 굴착후에는 공동주변의 응력이 100%이완되는 것으로 가정하였다.

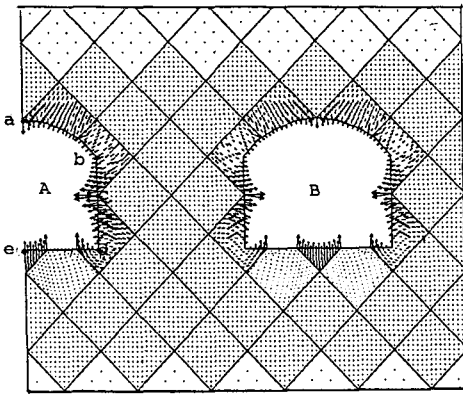
본 예제의 구조해석으로부터 구한 다공동굴착시 굴착순서의 고려유무에 따른 공동주변에서의 변위는 Table 4와 Fig. 10에 나타내었다. 그림과 표에서 알 수 있는 바와 같이 공동주변에서의 변위형태와 방향은 굴착순서의 고려유무에 관계없이 유사함을 보여주고 있으며 크기만 미소한 차이를 보여주었다. 다공동굴착의 경우 공동주변에서 발생한 변위는 단일공동의 굴착시 발생하는 변위보다 더 작은 값을 보여주었다. 이것은 수평변위의 경우 원거리(far field) 영향이 인접공동으로 인해 감소되기 때문이며 정점에서의 수직변위의 경우 점선방향의 압축응력이 인접공동의 영향으로 증가되어 변위의 발생을 억제하기 때문이다. 즉 초기응력의 수평성분과 수직성분의 비(K)를 1.5로 작용시킴으로써 공동측벽에서는 응력이완이, 정점에서는 응력집중이 발생함을 알 수 있다. 아울러 K값이 1보다 작을 경우 위의 경우와 반대현상이 일어나며 이때 정점에서의 수직변위는 다공동일 때 더 크게 발생한다. 또한 다공동굴착시 굴착순서를 고려한 공동주변에서의 변위는 case2의 결과가 case1의 결과보다 대략 1% 정도 큰 값을 보여주었다. A공동굴착후 B공동을 굴착하는 경우 A공동 굴착에 따른 응력의 재분배는 이미 끝난 상태이나 B공동의 굴착으로 인해 A공동은 추가적인 영향을 받게 된다. 표의 결과를 살펴보면 세 경우모두 중앙공동의 좌우측벽면과 불연속면이 만나는 c점에서 변위가 가장 큰 값을 보여주고 있다. 이 점에서의 수평변위는 공동정점에서의 수직변위보다 대략 1.7배 정도 크며, 공동저변과 불연속면이 만나는 점에서의 수직변위보다 대략 1.3배정도 큰 값을 보여주었다.

Table 4. Analysis results considering excavation sequence($\times 10^{-4}m$).

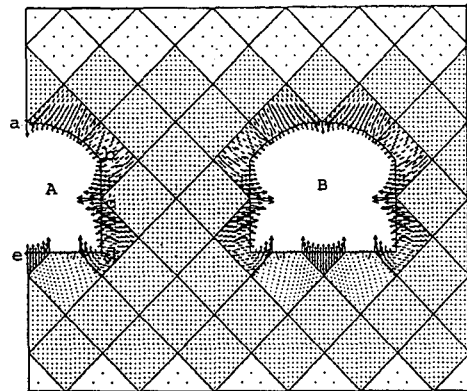
Types Disp. node	Types			
	Only A cavern excavation	B cavern excavation after A cavern	A and B caverns simultaneously	
Vert. Displ.	a	-65.3	-62.6	-63.4
	b	-8.3	-7.7	-7.8
	c	-15.2	-15.0	-15.1
	e	37.4	35.1	35.7
Hori. Displ.	b	-20.4	-19.1	-19.4
	c	-110.8	-106.1	-107.4



(a) only A cavern excavation



(b) B cavern excavation after A cavern



(c) A and B cavern excavation simultaneously

Fig. 10. Displacement vectors around caverns.

마지막으로 굴착후 공동주변에서 발생하는 소성영역을 검토하였다. 앞에서 살펴본 변위의 경우와 마찬가지로 동굴주변에 발생하는 소성영역도 두 경우가 거의 유사한 결과를 보여주었다. A공동과 B공동의 동시굴착후 공동주변에서 발생하는 소성영역은 Fig. 11에 대표적으로 나타내었다. 그림에서

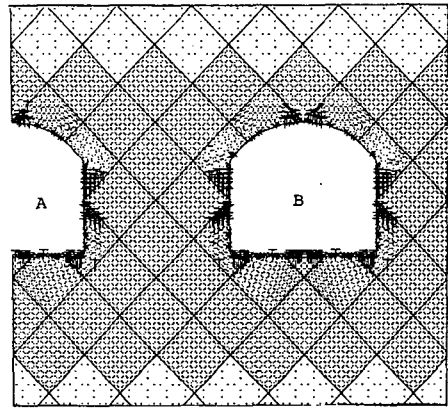


Fig. 11. Yield zone around cavern.

T는 인장에 의한 항복영역을 나타낸 것이고, x는 압축에 의한 항복영역을 나타낸 것이다. 그림에서 알수 있는 바와 같이 인장에 의한 항복영역은 벽체와 불연속면이 만나는 부분에서 가장 넓게 분포하며 공동의 정점과 저면에서도 부분적으로 발생하였다. 압축에 의한 항복은 굴착면 주위, 특히 코너부분에 국부적으로 나타났다. 이러한 경향은 암반의 불연속면에서 인장력에 대한 저항이 매우 작기 때문이다. 즉, 굴착후 공동방향으로 변형이 발생하면 공동에 인접한 블록은 불연속면을 따라서 미끄러짐이 발생하며 불연속면주변에서는 변위의 증가로 인한 인장항복이 발생한다. 이상에서 살펴본 바와 같이 다공동굴착시 인접공동의 영향은 굴착방법 및 순서에 크지 않음을 알 수 있다.

결론

본 연구에서는 지하암반공동의 굴착에 따른 거동변화를 살펴보았다. 이를 위하여 굴착전 지하암반 내에서의 초기응력분포와 굴착후 공동주변의 응력변화를 검토하고 이에 대한 수치모형화과정에 대

해서도 논하였다. 이를 토대로 유한요소법과 개별 요소법에 의한 탄소성해석을 수행하였으며 굴착방법과 순서, 지보유무에 따른 공동주변에서의 거동 변화 및 인접공동의 굴착으로 인한 영향 등을 검토하였다. 본 연구의 주요수행결과는 다음과 같다.

1. 굴착후 공동주변에서 발생하는 변위와 응력은 탄소성체압반의 경우 응력경로의 영향을 받기 때문에 단계별 굴착단면의 형상에 따라서 서로 다른 값을 보여준다. 본 예제의 경우 최종굴착후에 발생하는 공동주변의 변위는 수직단계별굴착(Type I)이 수직 및 수평조합단계굴착(Type II)의 경우보다 더 작은 값을 보여주었다.

2. 전단면굴착후 공동주변에서의 거동은 보강의 유무에 따라 서로 다른 양상을 보여주었다. 본 예제의 경우 공동주변에서의 변위는 지보를 수행하였을 경우가 무지보의 경우보다 대략 2.0%정도 더 작은 값을 보여주었다.

3. 다공동굴착의 경우 공동주변에서의 변위와 응력은 굴착순서에 따라서 달라진다. 본 예제의 경우 굴착순서를 고려하였을 경우가 무시하였을 경우보다 공동주변의 변위는 대략 1%정도 작게 발생하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 굴착후 공동주변의 거동은 굴착단면, 굴착순서, 지보방법 등에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 따라서 지하공동을 보다 안전하고 경제적인 설계를 위해서는 해석과정에 굴착 영향을 반영하여 굴착 및 지보계획을 수립함이 타당할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

Board, M., 1989, UDEC(Universal Distinct Element Code) Version ICG 1.5, Itasca Consulting Group, Inc., NUREG/CR-5429, Vol. 1.

Bray, J.W., 1967, A Study of jointed and fractured rock-part II: Theory of limiting equilibrium, Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol. V, No. 4, 197-216.

Century Research Center, 1988, MR. SOIL User's Manual, Japan.

Fairhurst, C., 1965, Measurement of in-situ stresses with particular reference to hydraulic

fracturing, Rock Mechanics and Engineering Geology, Vol. II, 129-147.

Fara, H.D. and Wright, F.D., 1963, Plastic and elastic Stresses around a circular shaft in a hydrostatic stress field, Trans. AIME, Vol. 226, 319-320.

Ghaboussi, J. and Ranken, R.E., 1974, Tunnel design considerations: Analysis of medium-support interaction, Report No. UIUL-ENG 74-2032, Univ. of Illinois, Urbana.

Greenspan, M., 1944, Effect of a small hole on the stresses in a uniformly loaded plate, Quarterly Applied Math. Vol.2, 60-71.

Lemos, J.V., 1987, A distinct element model for dynamic analysis of jointed rock with application to dam foundation and fault motion, Ph.D. Sissertation, Univ. of Minnesota, 1987.

Obert. L. and Duvall, W.I., 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley and Sons Press, New York.

Stagg. K.G. and Zienkiewicz, O.C., 1974, Rock mechanics in engineering problems, 3rd ed., John Wiley and Sons Press, New York.

Wittke, W., 1977, New design concept for underground openings in rock, Finite Elements in Geomechanics, John Wiley and Sons, New York.

최 규섭, 김 대홍, 1992, 굴착영향을 고려한 지하공동의 구조거동연구, 한국전산구조공학회 봄학술발표회 논문집, 111-114.

한국원자력연구소, 1990, 중·저준위 방사성폐기물 영구 처분시설 개념설정, KAERI II/RR-4/ 90, 과학기술처.

최규섭, 김대홍, 황신일, 심재구
대전광역시 유성우체국 사서함 149호
한국전력공사 원자력환경기술원 305-600
TEL : 042) 870-0274 FAX : 042) 861-4824
e-mail : netdh@dava.kepco.co.kr