

석탄층 하반갱도 주위암반의 변형특성 및 변형계수 결정연구

이현주¹⁾, 김영식¹⁾, 정소걸¹⁾, 양형식²⁾

Deformation Characteristics and Determination of Deformation Modulus
of Rocks around the Lower Gangway during Coal Mining Operation

Hyun-Joo Lee, Young-Sik Kim, So-Keul Chung, Hyung-Sik Yang

ABSTRACT

The cavities formed by the excavation of coal seam cause unstable state within rock body, leading to large displacement around adjacent roadway. This displacement brings the closure of roadway and deformation of support. Therefore, it is necessary to understand and predict the deformation characteristics of roadway while coal seam is under excavation.

In this study, the observed displacements are compared with the calculated ones through the analysis using Linear Boundary Element Method under the elastostatic conditions, in order to determine the virgin stress state and deformation modulus which affect the deformation characteristics.

1. 서 론

지하 심부에서 채탄작업에 따라 공동(채굴적)이 형성되면, 지하 암반의 평형상태가 교란

되어 암반내의 응력과 변위조건에 변화를 가져와 공동 주위에 위치한 암반이 불안정한 상태에 놓이게 되어 변형거동이 일어난다. 이러한

* 1992년 11월 접수

1) 정회원, 한국자원연구소 자원개발연구부

2) 정회원, 전남대학교 자원공학과 부교수

변형거동은 갱도단면축소 및 지보변형으로 나타나 작업장 상태와 작업환경 및 작업조건에 영향을 주므로 전산모델링 등을 통하여 이를 규명하고 예측할 필요가 있다.

암반거동의 전산모델링에 이용되는 경계요소법은 1) 심부갱도와 같은 무한 또는 반무한 매질에 대한 현실적인 모델링이 가능하고, 2) 전산해석을 하기 위한 입력준비가 간단하며, 3) 내부점에 대한 응력 및 변위를 정확히 선택, 계산할 수 있고, 4) 응력 집중영역에 대하여 비교적 정확한 해석결과를 유도할 수 있어 유한요소법에 비해 상대적인 장점을 지니고 있다.¹⁾

이들 연구에서는 실험실 시험내지 현장계측을 통해 암반의 역학적 특성(탄성계수, 포아송비, 강도, 내부마찰각, 파괴조건계수, 변형률 연화계수 등)과 암반에 작용하고 있는 초기응력을 구하여 해석을 위한 입력자료로 이용하고 있다. 이 경우 이를 적절히 보정하여 해석에 이용하나, 계산된 해석치와 현장계측을 통한 실측치는 차이를 보이게 되는데, 이는 실험실 및 현장시험에서 측정된 암반의 물성과 초기지압 등이 주로 측정지점 주위의 국부적인 영역에 대한 측정결과이고, 암반에 발달한 절리, 파쇄대, 단층대 등 불연속면의 영향과 암반의 불균질성, 이방성 등 암반 고유 특성에 기인하는 영향을 정확히 고려할 수 없기 때문이다.

이러한 관점에서 실측 변위에서 응력, 변형계수 등을 역산하여 해석초기에 이용된 물성치를 보정한 후 응력해석에 이용하는 연구가 진행되고 있다. 이때 역산된 변형계수는 실험실에서 구한 탄성계수와는 차이가 있는 것으로, 현지암반에 여러 형태로 내재된 취약개소를 포함하는 거시적인 암반 고유 특성은 물론, 지질학적 특성과 지하구조물이 지닌 기하학적 특성 등을 나타내는 총체적 성격을 갖는다.^{2, 3)}

암반은 불균질성, 불연속성, 이방성, 비선형성의 문제를 포함하고 있어 점탄소성적(粘彈塑性的)으로 해석되어야 하지만, 균질성, 등방성, 선형성을 지닌 것으로 한정하여 탄성적으로 해석할 수 있다.

본 연구에서는 채탄작업 진행에 따른 심부하반갱도 주위암반의 변형특성을 계측한 결과를 탄성해석 결과와 비교하여 초기지압조건과 변형계수를 결정하고자 하였다.

2. 선형 경계요소법

경계요소법은 정의역(domain)의 경계만을 요소분할하여 경계조건에 대한 해석적 해를 적분하여 근사해를 구하는 방법으로 핵함수가 복잡하기는 하나 미지수의 수가 타방법들보다 적고 입력자료도 단순하며 정밀도도 높다.⁴⁾ 또한 정의역의 경계외에도 응력집중부를 부분적으로 분할, 영역적분하여 비선형문제에도 적용하고 있다.

특히 무한 또는 반무한 매질내의 공동문제에 대하여 우수한 해석능력이 있으므로 암반구조물의 해석에 적합하다. 그런데 지하공동과 같은 지하구조물 주위의 암반내에는 일반적으로 초기응력과 함께 중력과 같은 물체력이 작용한다. 그러므로 영역내부의 분할에 의한 영역적분의 방법은 경계요소법의 간략성을 손상시키며 일부분만을 분할하는 경우에는 정밀도가 떨어진다.

본 연구에서는 선형경계요소를 사용한 직접법 경계요소해석 프로그램^{4, 5)}을 이용하여 초기응력을 고려한 지하 갱도의 탄성해석에 이용하였다.

2.1 선형경계요소

경계조건은 함수의 형태로 주어지는 경우가

일반적이다. 상수로 주어지더라도 경계의 형태에 의하여 비상수화하는 경우도 많으므로 이러한 조건을 충실히 반영하기 위하여 요소를 세분화하거나 조건의 함수성을 반영할 수 있어야 한다. 선형요소는 후자의 가장 간단한 것으로서 정도와 간략성을 희생하지 않으면서도 다양한 구조를 표현할 수 있다.

요소내 임의점의 변수를 절점치로 표시하려 할 때 선형보간함수(linear interpolation function) ϕ_1, ϕ_2 를 채택하여 변위(U)와 하중(P)을 나타내면

$$\begin{aligned} U(\zeta) &= \phi_1 U_1 + \phi_2 U_2 = [\phi_1 \phi_2] \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} \\ P(\zeta) &= [\phi_1 \phi_2] \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (1)$$

로 되며 이때 보간함수는

$$\begin{aligned} \phi_1 &= \frac{1}{2}(1-\zeta) \\ \phi_2 &= \frac{1}{2}(1+\zeta) \end{aligned} \quad (2)$$

이다. 그러므로 경계적분은

$$\int_{\Gamma} U \cdot P \times d\Gamma = \int_{\Gamma} [\phi_1 \phi_2] \cdot P \times d\Gamma \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix} = [h^1_{ij} \ h^2_{ij}] \begin{Bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\int_{\Gamma} P \cdot U \times d\Gamma = [g^1_{ij} \ g^2_{ij}] \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{Bmatrix}$$

로 쓸 수 있으므로 행렬식

$$\mathbf{Hu} = \mathbf{Gp} + \mathbf{B}$$

로 전환된다. 여기서, $h^1_{ij}, h^2_{ij}, g^1_{ij}, g^2_{ij}$ 는 절점1, 2에 대한 \mathbf{H} 와 \mathbf{G} 의 요소행렬들이다.

2.2 초기응력의 고려

초기응력이나 물체력이 있는 경우 경계요소 해석의 기본식은 영역적분을 포함하게 된다. 특히

$$\int_{\Omega} \sigma_{jk}^0 \varepsilon^*_{jk} d\Omega \quad (4)$$

항은 σ_{jk}^0 가 기지수이나 ε^*_{jk} 라는 새로운 핵함수가 필요하고 또 영역전부를 분할해야하는 번거로움이 있다.

그런데 초기응력은 전영역에서 같다고 했을 때에 공동문제의 경우에는 무공동상태의 전영역에 대한 변형 및 응력에 공동으로 인한 자유면의 반력으로 변형 및 응력을 더해줌으로써 영역적분을 생략할 수 있다. 즉

$$\sigma^i_{ij} = [\sigma_{ij}]_w + [\sigma^0_{ij}]_i \quad (5)$$

와 같이 된다. 여기서 $[\sigma_{ij}]_w$ 는 균질 무한 탄성 매질에서의 초기응력장이며 $[\sigma^0_{ij}]_i$ 는 초기응력에 해당하는 반력을 자유면에 가하였을 때 발생하는 유기응력이다.

반력의 경계조건은 힘이므로

$$P_i = n_j \sigma_{ij} \quad (6)$$

에 의해 응력을 변환시킨다. 여기서 n_j 는 자유면의 외향법선이 계의 축과 이루는 방향여현이다. 선형요소의 경우에는 자유면을 원활한 것으로 가정하여 인접한 요소의 법선평균을 취한다. 원활하지 않은 경우에는 중복점을 이용하여 처리하였다.

3. 현장계측

3.1 계측지점

삼적탄좌는 삼적탄전의 중심부에 위치하고 있으며 서부에 함백산 대단층이 발달해 있고, 동서방향의 축을 갖는 대향사 구조를 이루고 있다. 남익부의 대체적인 주향은 N70W~N80W이며, 경사는 40~48°, 평균탄폭은 본층 1.8m, 하층 1.2m로, 비교적 탄층이 규칙적인 편이며 탄층은 북으로 경사져 있다.

계측을 실시한 지점은 이 백운산 대향사의 남익부에 해당되는 550ML 동부 1크로스 우하

반갱과 0코스 좌하반갱이며, 이 지점들은 각각 해수면 기준 565~615m, 560~610m이고, 지표로부터는 635~685m, 705~755m 하부에 위치하고 있으며, 평균탄폭은 각각 4m, 3.7m, 탄층경사는 42°, 68°이며, 포켓형을 이룬다 (Fig.1).

한개 편의 수직고는 50m이고, 계측이 진행된 곳은 중단 위경사식 붕락채탄법(中段 僞傾斜式 崩落採炭法)을 적용하고 있다. 중단은 경사에 따라 3~4개로 구성하며, 보통 중단에서 탄층을 따라 연층을 좌우로 100m정도 개설한 후(연층개설이 곤란한 경우는 바로) 탄승을 올려 붕락채탄을 한다. 채수율은 평균 60~70%이고, 잔탄은 불규칙하게 채굴적에 남게 된다.

운반갱도의 규격은 3.6m×3.0m이며, 주로 GI-100에 의한 철재 arch지보로 보강되어 있고, 갱도주위암반의 암종은 사암과 셰일(shale)이 호층을 이루고 있다.

3.2 계측결과 및 검토

가. 550ML 동부 1코스 우하반측 운반갱도

채탄작업의 진행에 따른 갱도주위 암반의 변형상태를 측정하기 위해 550ML 동부 1코스 우하반측 운반갱도에는 2개의 측정단면을 선정하여 Fig.2와 같이 2개의 방향(탄층방향으로 50°상향과 탄층에 평행한 방향으로 40°상향)으로 3개의 서로 길이가 다른(1m, 2m, 3m) 일점지중변위계(rod extensometer)를 설치하여 각 측정점간의 상대변위를 측정하였다. 또한 4개의 측정단면을 설정하고, 각 측정단면마다 5개의 측정점을 설정하여 내공변위계(tape extensometer)를 이용하여 갱도벽면에 고정된 각 측정점간의 상대변위를 장기간 측정하였다.

암반내부의 변위측정결과와 갱도주위의 이완대와 파쇄된 암반의 거동 및 범위에 대한 정보를 제공한다. 전반적으로 2중단 채굴시까지는 큰 변화가 없으나, 갱도 직상부까지 구성된 3

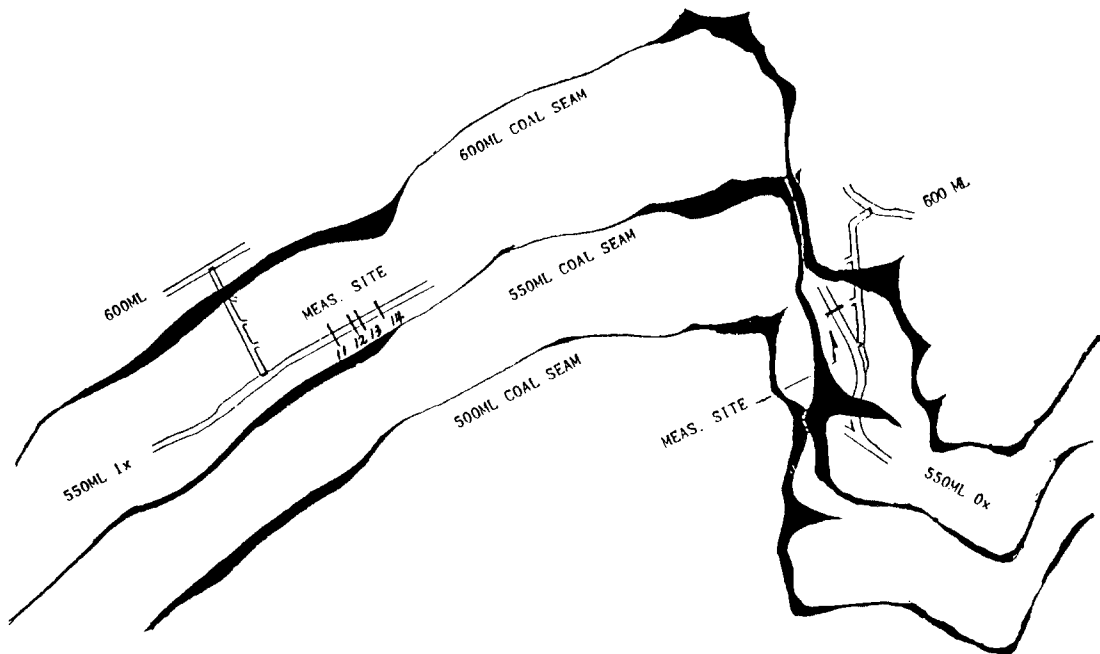


Fig.1 Plan view of coal seam.

중단과 측면에 있게 되는 하단을 채굴할 때 하부 갱도에 큰 영향을 나타냈다. 갱도주위의 암반내 변형은 시간의 경과에 따른 점진적인 변형보다는 직상부나 주위에 새로운 공동형성이 암반내 변형에 보다 큰 요인이 되고 있음을 알 수 있다.

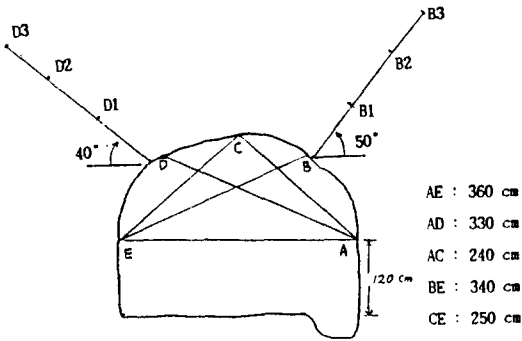


Fig.2 Measuring section(550ML 1 cross).

계측지점에서의 변위에서 벽면의 변화를 재구성하여 보면 부분적인 분리가 불연속적으로 일어남을 볼 수 있다(Fig.3). 이러한 분리는 곧바로 갱도의 단면변형에 나타나므로, 안전조업면에서 절리, 층리 등과 같은 불연속면의 경향과 함께 주의깊게 살필 필요가 있다. 측정된 변위가 벽면에서 내부점까지의 상대변위이고, 지중변위계의 길이가 3m까지이며, 채굴적이 갱도보다 상대적으로 훨씬 더 크므로, 전체적인 변화를 알기 위해서는 깊이에 따른 암반내부의 변화와 갱도단면의 변형, 채굴적에서의 변형이 함께 고려되어야 한다.

Fig.4는 AE의 중점과 AE의 방향을 고정하여 갱도단면변형을 재구성한 것이다. 여기에다 갱도 정점인 C점의 이동(Fig.5)을 고려하면 전체적인 경향을 잘 알 수 있다. 채굴적이 다가옴에 따라 채굴적쪽으로 갱도단면이 기울어진 형태가 되는 것을 볼 수 있다. B방향에서 갱도쪽으로 크게 이완이 일어남을 볼 때 기울어지는

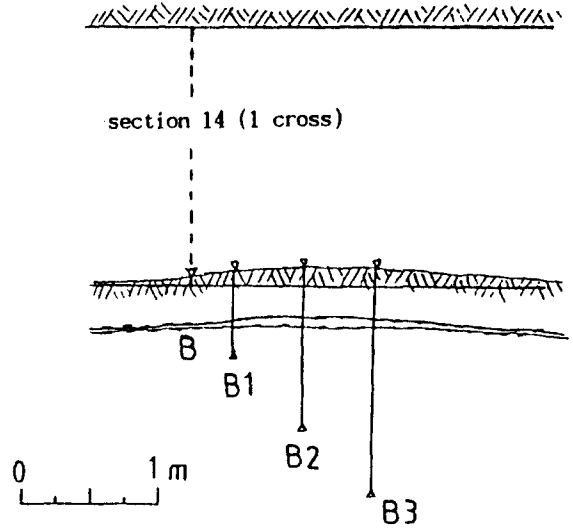


Fig.3 Deformation behavior in measuring section(Wall).

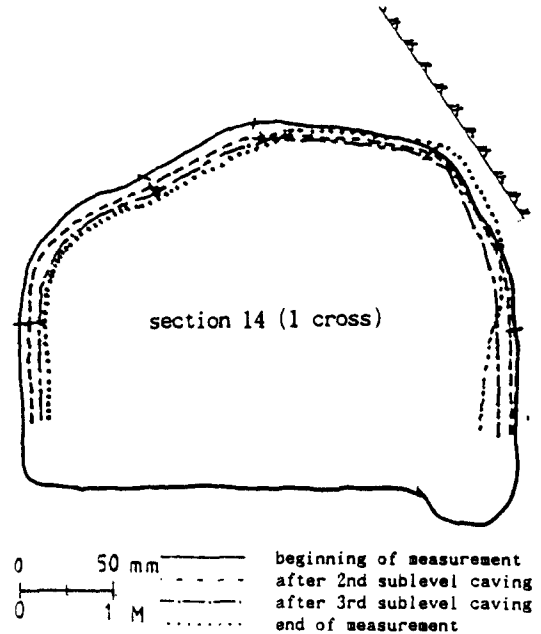


Fig.4 Deformation behavior in measuring section(Face).

경향이 더 큼을 추정할 수 있다. 채굴에 따라 일어나는 변위의 변화를 살펴보면, 이러한 변화는 중단이 채굴되어 채굴면이 상부로 지나가는 시점에서 크게 나타났다가 점차 줄어들었다.

상부 탄층의 채굴로 암반내 공동이 형성되어 지압의 재배치와 암반의 변형으로 암반내에 위치하는 하반운반강의 절대위치의 변화를 파악하기 위해 채굴영향권 밖의 견고한 암반중에 기점을 설정하고 레이저를 이용한 정밀 트랜짓(transit)을 사용하여 갱도의 절대위치가 측정되었다.

각 단면의 위치를 고려하여 계측시작부터 3중단 채굴완료시까지 변화를 보면 채굴적 방향으로 50° 내외, 약 120mm의 이동을 보였다(Fig. 5). 이러한 현상은 암반이 미시적으로는 갱도 주위에서 소성적 변형을 일으키지만 거시적으로는 하나의 탄성체로서 암반내 공동형성에 의한 지압재배치에 의해 갱도를 포함한 탄성거동을 일으켜 갱도의 절대위치이동을 일으키는 것으로 해석할 수 있다. 여기서 세 단면의 위치 이동량이 조금씩 다른 것은 채굴적이 통과하는 시간차와 최하단 연층의 채준에 의한 연층의 접근으로 같은 수준에서의 공동형성으로 인해 암반변형이 일어나는 과정의 차에 의한 것으로 추정된다.

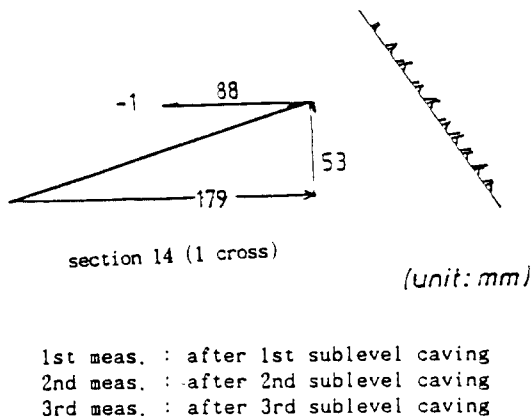


Fig. 5 Absolute displacement in the position of measuring section.

시간 및 채굴진행에 따른 변형거동으로 정점이 하향으로 움직임을 고려하더라도, 정점에서 갱도내부로의 변화량에 비해서는 훨씬 큰 값이며, 갱도단면변형의 다른 구간 값보다도 훨씬 크다.

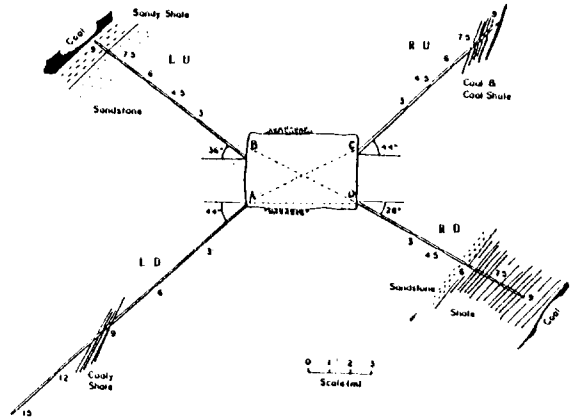


Fig.6 Measuring section(550ML 0 cross).

나. 550ML 동부 0크로스 좌하반측 운반갱도 동부 0크로스 좌하반강의 하반운반갱도에서는 다점 지중변위계(Multi-Point Borehole Extensometer)를 설치하여(길이 3m, 4.5m, 6m, 7.5m, 9m), 하반갱도 주위암반의 내부변위를 측정하였고, MPBX가 설치된 단면에 3개의 측정점을 설치하여 내공변위계를 이용하여 갱도단면변형을 측정하였다(Fig.6).

채탄작업은 1중단 채굴이 완료되기 전에 2중단의 채굴이 병행되었고, 1크로스 우하반강과는 달리 중단에서 바로 위경사 탄층으로 채굴이 이루어졌다. 2중단 채굴완료시(164일차)까지 계측이 이루어졌고, 최종 변위의 계측은 이후 10개월후(459일차)에 행해졌다.

계측결과를 검토해보면, 갱도 벽면에서 3m 이후의 구간은 최종 변위의 크기가 2중단의 채굴이 끝난 후에 계측된 변위와 거의 같게 나타난다. 이로 미루어 볼때, 채굴이후에는 0~3m

구간에서 변위(갱도 벽면의 이완)가 대부분 일어났다.

채탄작업이 진행되면서 나타나는 변위의 변화를 채탄작업이 끝난 후의 최종변위의 변화와 비교하면, 갱도가 채굴적 방향으로 크게 밀려듦을 알 수 있다. 탄층에 가장 인접한 방향에서는 심한 불규칙성을 보인다. 이는 채탄작업이 진행됨에 따라 측정암반에 균열이 발생하고, 이러한 균열의 개폐가 반복됨에 따라 비롯하는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 1크로스의 B방향과 유사한 양상을 나타냄을 알 수 있다(Fig.7).

채굴진행에 따라 시기와 각 구간별로 변위의 증감이 달라지며 이는 어느 한 구간의 변위의

증감이 인접구간의 변위에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

이러한 변화는 갱도 벽면을 기준한 것이므로 갱도 단면변형과 함께 해석되어야 하며, MPBX의 지중변위계가 경사지는 정도를 측정한다면 갱도주위암반의 거동을 파악하는데 도움이 될 것이다.

Fig.8은 채굴작업 진행에 따른 하반갱도의 단면변형 양상을 나타낸다. MPBX의 LU와 RD방향의 변위와 비교하면 BD방향의 변화가 거의 없게 나타나는 것은, 0~3m구간에서는 갱도 내부로의 변위가 발생하나 전체적으로 채굴적방향의 이동이 일어나기 때문이다.

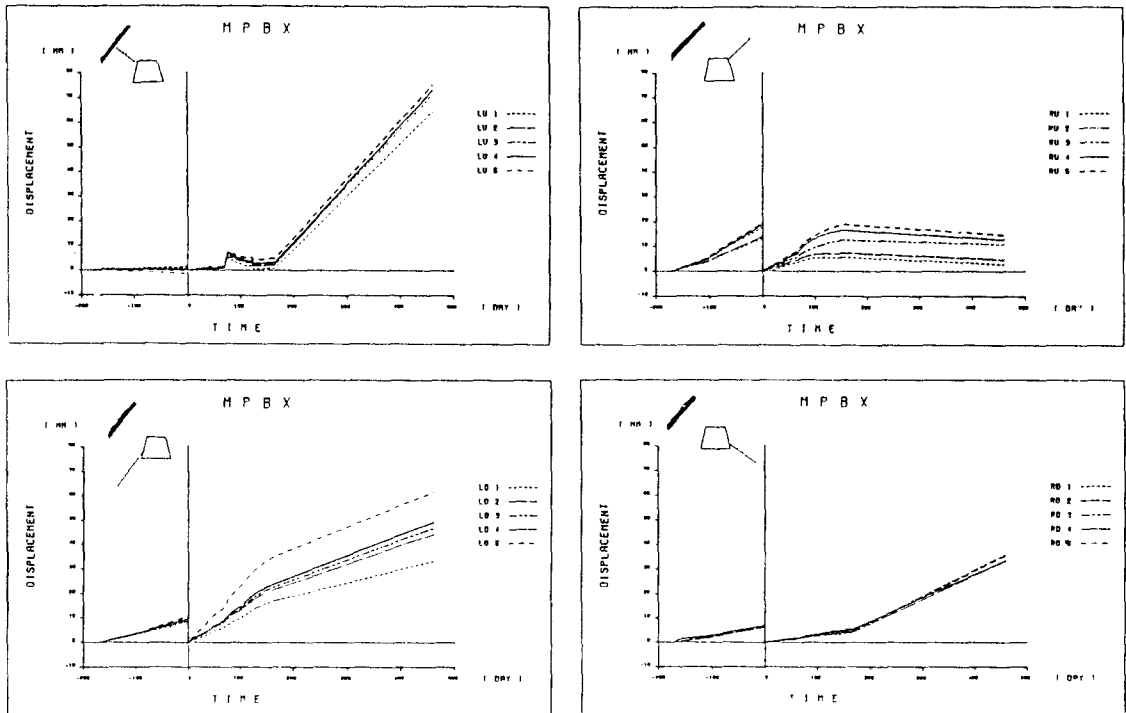


Fig.7 Rock displacement around gangway with time(Observed).

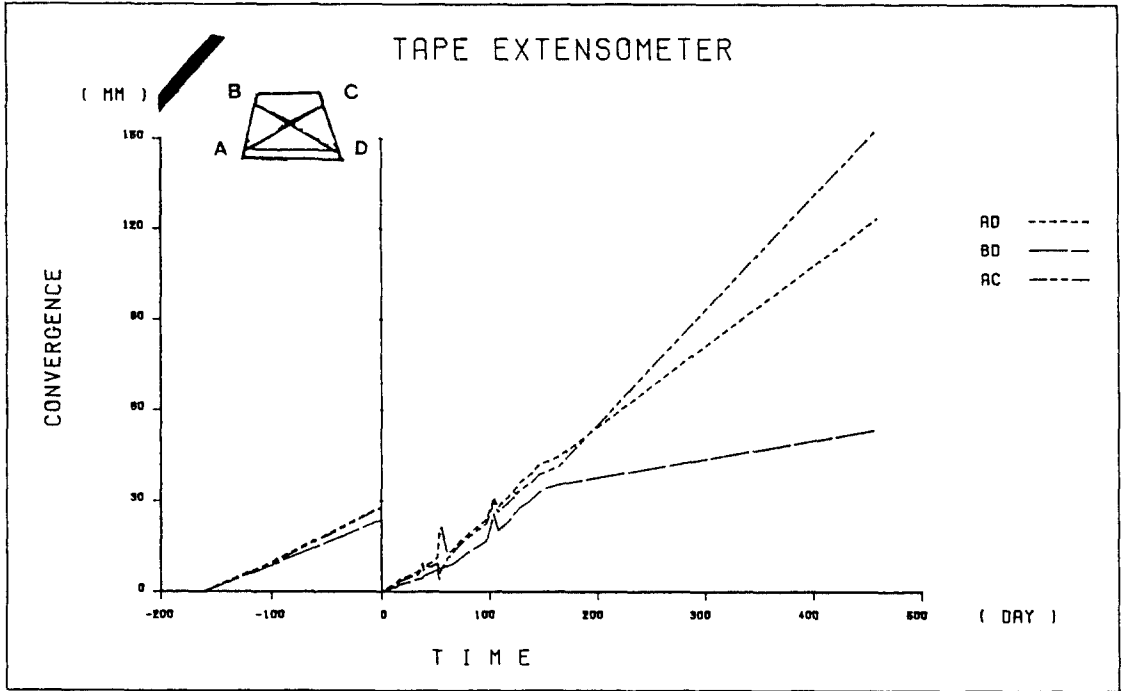


Fig.8 Tunnel closure with time(Observed).

Fig.9는 갱도단면변형 및 MPBX계측결과를 비교하여, 각각 2중단과 하단의 채탄이 완료된 후의 갱도 및 주변암반의 거동을 LD의 15m지점과 LD방향을 고정하여 재구성한 것이다. MPBX의 각 방향의 각도 또한 고정하였고 갱도의 절대이동은 고려하지 않았다. 변화양상은 채굴적 방향으로 단면이 기울어진 모습을 보인다. 2중단 채굴이 끝나면 대체적으로 갱도내부로 변위가 발생하고 채굴적방향의 RU방향은 채굴적 방향인 상향으로 변위가 발생함을 볼 수 있다.

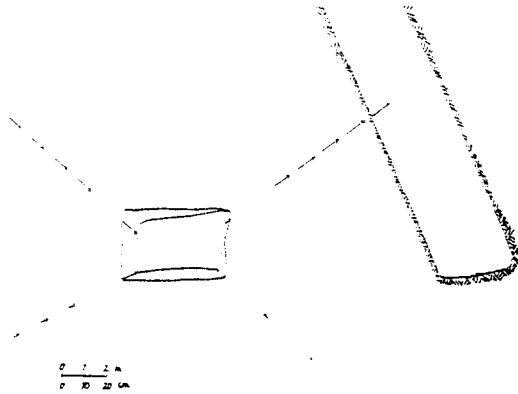
벽면과 상하방향의 이완을 고려하지 않고 단면축소를 계산해 보면, 2중단 채탄완료후 약 1.5%, 3중단이 완료되고 10개월 후 약 4.5%로 나타났다. 채굴적과 거의 만나는 LU 5(갱도 벽에서 9m 지점, 550ML의 갱도 바닥에서 8m 상부)의 변위는 약 12cm로 계산되었고 2중단

채굴적후의 값과 비교할 때, 하단(3중단)의 채굴이 끝난 후에 갱도가 채굴적쪽으로 이동됨을



$\frac{1}{10} = \frac{2}{20 \text{ cm}}$

(a) after 2nd sublevel caving



(b) after 3rd sublevel caving

Fig.9 Deformation behavior around the lower gangway during coal mining operation(Observed).

나타낸다. 이때 LD방향의 끝점과 각각의 방향을 고정하여 계산된 값이므로 실제 이동은 더 크게 나타날 것이다.

4. 선형 경계요소법을 이용한 2차원 탄성 해석

4.1 입력 자료의 선정

탄성 선형 경계요소해석을 하기 위해 필요한 물성치는 탄성계수(영률), 포아송비이다. 암반의 탄성계수는 상하반을 이루는 사암 $4.4 \pm 2.8 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 셰일 $3.6 \pm 1.9 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$, 석탄 $0.01 \pm 0.008 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 이나 해석에서는 모두 동일하게 사암으로 가정하였고, 포아송비는 사암이 0.18 ± 0.08 , 셰일이 0.27 ± 0.09 , 석탄이 0.31 ± 0.04 임을 고려하여 0.24로 하였다.

초기지압은 삼척탄좌의 550ML 동부 5크로스(심도 625m지점)에서 계측된 값($\sigma_v = -176.1 \text{kg/cm}^2$, $\sigma_H = -85.1 \text{kg/cm}^2$)에서는 K_0 는 0.483으로 산정되었으나^{6, 7)} 이를 다른 연구자

들에 의해 제시된 제안식에 의하여 구한 계산치와 비교해 보면^{8, 9)} 수직응력의 경우에는 그 비가 0.95~1.36으로 다른 지역과 비슷한 수직응력을 받고 있음을 알 수 있고, 수평응력의 경우에는 그 비가 0.24~0.61로 다른 지역에 비해 매우 낮은 수평응력이 작용하고 있는 것으로 나타났다.

전산해석에 입력되는 초기지압의 수직응력 성분은 상기 계측치와 동일한 값을 적용하여 해당 심도로 보정하여(밀도 : 2.69) 1크로스는 -192.3kg/cm^2 , 0크로스는 -211.1kg/cm^2 로 하였고, 수평응력과 수직응력의 비인 K_0 를 0.1~2.0까지 변화시키면서 측정치와 비교하여 결정하였다.

4.2 해석방법

전절에서 구한 입력자료를 기초로 두 계측지점에 대하여 초기응력법에 의한 선형경계요소법을 이용하여 재굴단계별로 2차원 탄성 전산

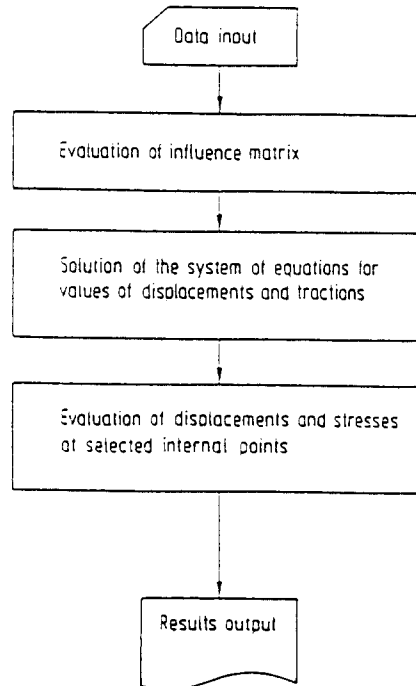


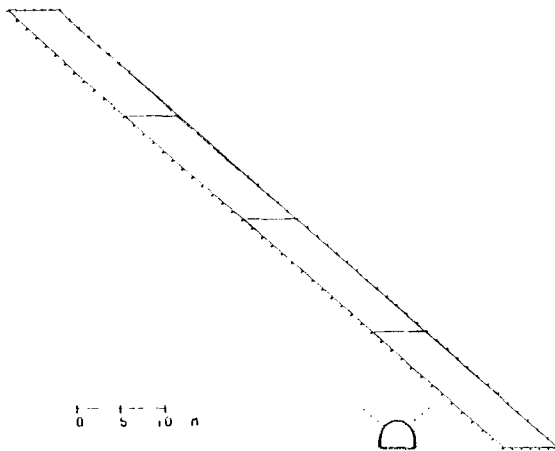
Fig.10 Flow chart of LBEM.

해석을 실시하였다. Fig.10은 프로그램의 순서도이다.

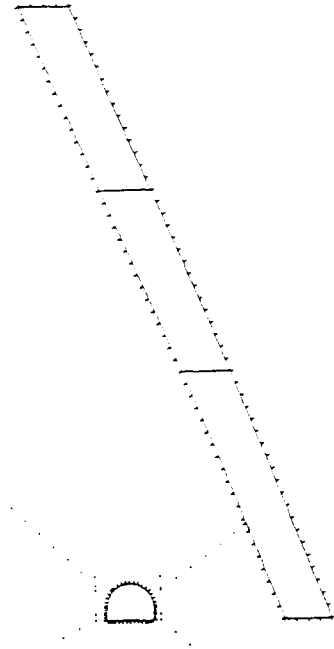
요소망의 구성은 먼저 1크로스 우하반갱의 계측단면을 단순화시켜 탄폭 4.0m, 경사 42°, 갱도벽에서 탄층까지의 거리 10m, 갱도 규격은 3.6×3.0m(arch형)로 하였으며 각각 12, 12, 13, 13m의 4개 중단으로 나누어 요소망을 구성하였고 계측지점의 지중변위계와 내공변위계의 측점을 절점 및 내부점에 포함시켜 계측결과와 비교할 수 있게 하였다(Fig.11). 그림에서 짧은 실선은 절점의 위치와 응력방향을 나타내며 예각의 부분은 이중점으로 처리하였다.

다음으로 0크로스 좌하반갱에서는 탄폭 3.7m, 경사 68°, 갱도벽에서 탄층까지의 거리 13.5m, 갱도 규격은 3.6×3.0m(arch형)로 하였으며 각각 15, 15, 20m의 3개 중단으로 나누어 요소망을 구성하였고 계측지점의 MPBX와 내공변위계의 측점을 내부점에 포함시켜 계측결과와 비교할 수 있게 하였다.

해석순서는 하반갱도를 굴착하고 이어서 1, 2, 3, 4중단의 순서로 채굴이 진행되는 것으로 하였다. 하반의 운반갱도와 채굴로 인한 채굴



(a) 550ML 1X



(b) 550ML 0X

Fig.11 Nodes, elements and internal points for LBEM.

적만을 해석에 포함시켰고, 상부 갱도 및 암승, 600ML 이상의 공동은 해석에서 배제하였으며, 채굴적은 봉락되지 않고 유지되는 것으로 가정하였다.

5. 변형계수의 결정

5.1 K_0 의 결정

갱도의 거동은 지압조건에 큰 영향을 받으며, 채굴적과의 상대적 크기, 위치에 따라 변화하게 된다. 해석시에도 이러한 지압조건이 달라지면 큰 영향을 받게되므로 현장에서 지압측정이 필요하게 된다.

적절한 지압조건을 찾기 위하여, 우선 탄성계수를 실험실 측정치의 1/10인 $4.0 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$ 로 하고, 수직응력은 측정치를 기준으로 해당지역

의 심도로 보정하였고, 수평응력을 구하기 위해 K_0 를 0에서 2.0까지 0.25씩 증가하면서, 1크로스 우하반경에서 계측된 갱도변형의 모습과 절대이동의 경향을 비교하여 해석치와 유사한 관계를 갖는 K_0 를 구하고자 하였다(Fig. 12).

지압조건에 따른 변화는 K_0 가 증가하면서 단면은 좌우에서 축소되며, 갱도 이동방향은 조금씩 하향으로 움직여가는 경향을 나타낸다.

이를 상부채굴에 의한 갱도의 이동 및 갱도 단면변형의 계측치(Fig.5)와 비교하여, 50°의 이동방향을 나타내는 $K_0=1.0$ 으로 결정하였다. 이값은 초기지압 측정치의 약 2배이고, 이때 이동거리는 측정치의 1/4로 나타난다.

5.2 변형계수의 결정

앞에서 결정된 초기지압조건을 적용하여 현장조건에 적절한 변형계수를 찾기 위하여 각 단면에서 측정된 갱도단면변형의 계측치의 평균과 전산해석치를 채굴단계별로 비교하였고,

계측시기와 해석단계를 고려하여 최종변위는 30일의 시간차를 주었다(Fig.13). 그림에서 $-Q$ 는 계측치이고 $-C$ 는 해석치를 가리킨다. 3중단 완료시에 각 방향별로 변위를 비교해 보면, AE는 계측치의 1/2, AD와 AC는 반대방향이고, BE는 1/3, CE는 1/9로 나타났다. 3중단완료시에 탄성해석결과 D방향에서 상부채굴적 방향으로 변위가 나타나나, 계측결과에서는 이러한 경향이 나타나지 않는다.

3중단과 하단의 작업이 비슷한 시기에 이루어졌고, 하단에서는 협탄층과 만나 그 변화가 계측결과에 분명하게 크게 두드러지지 않는 점과, Fig.3~Fig.4에서 나타나듯 최종변위는 내부 균열에 의해 크게 달라지는 점을 고려하여, 계측결과와 해석결과가 유사한 경향을 보이는 AE변위를 기준으로 하여 변형계수를 실험실 측정치의 1/20인 $2 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$ 로 결정하였다.

다른 방향에서는 해석치가 계측치보다 크게

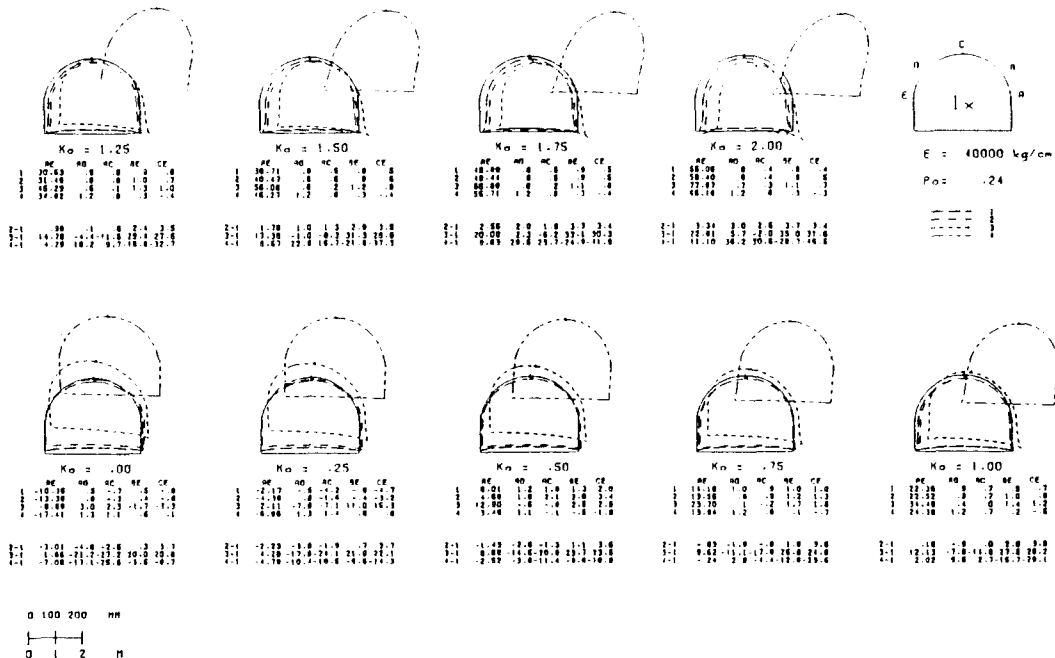


Fig.12 Face closure and absolute displacement with K_0 (Calculated).

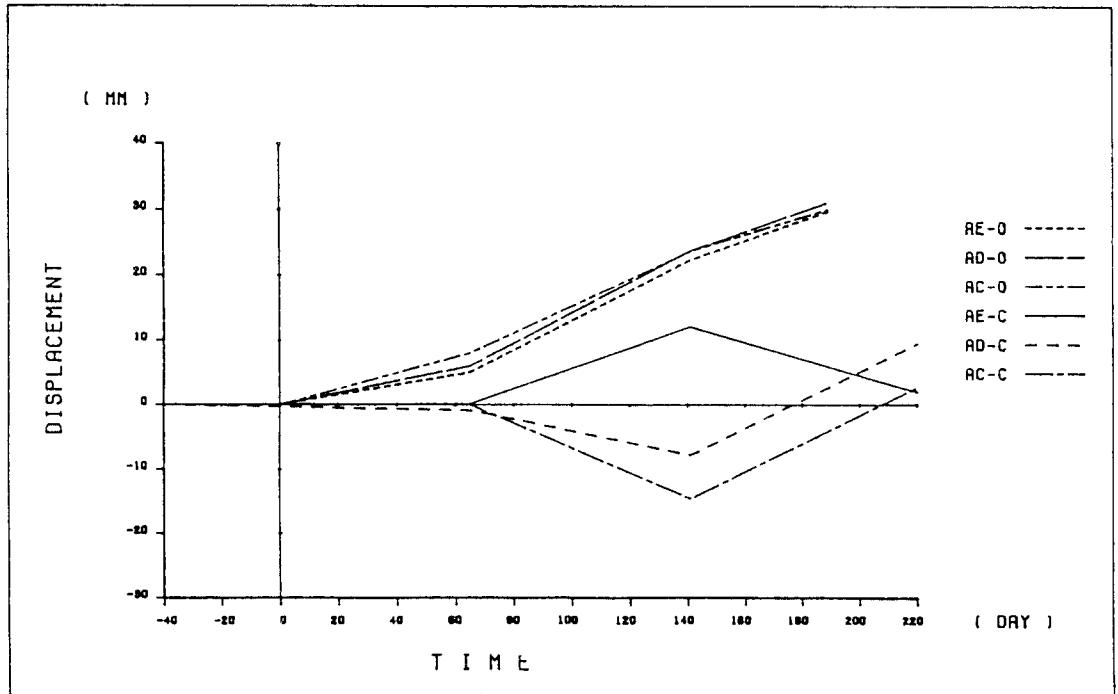


Fig.13 Data comparison for the determination of deformation modulus.

나타나나 탄성해석인 점과 측정부근의 이완에 의해 변위가 증감됨을 고려하면 될 것이다.

5.3 해석결과의 검토

위에서 구한 초기지압조건과 변형계수를 이용하여 0크로스의 경우에 해석한 결과는 Fig. 14와 같다. 채탄완료시 채굴적 쪽으로 30° 상향 300mm의 이동이 나타나고, 채굴적 면에 위치한 측정에서는 520mm로 계측치(Fig.9)와 비교할 때 4배 정도로 나타났다. 이는 계측결과로부터 갱도변형을 재구성할 때 방향과 끝점을 고정한 측정에서 나타나는 변화가 반영된 것으로 판단된다.

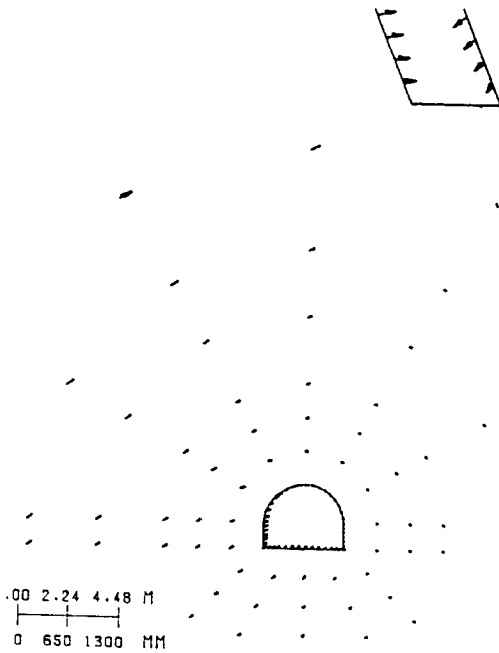
6. 결 론

본 연구에서는 삼척탄좌 정암광업소 550ML에 위치한 하부 운반갱도에서 측정된 채탄에 따른 갱도단면변형과 암반내부변위의 계측결과

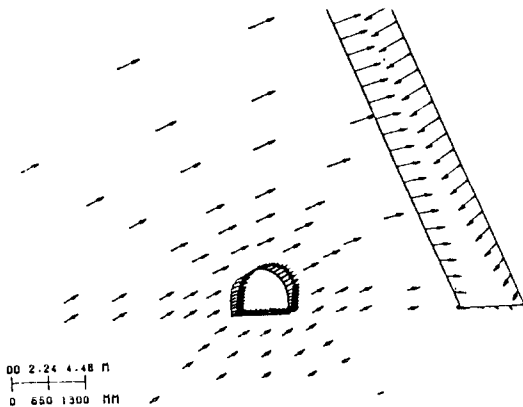
를 검토하고, 이중 동부 1크로스의 결과를 기초로 선형경계요소법을 이용하여 탄성해석을 실시하여 적절한 초기지압조건과 변형계수를 결정하였고, 결정된 값을 이용하여 인접한 동부 0크로스의 작업개소에 대한 해석에 적용하여 계측결과와 비교하였다.

이를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 계측결과를 검토한 결과, 채탄작업이 진행되어 채굴적이 형성됨에 따라 갱도를 포함하는 암반자체가 채굴적 방향으로 이동하는 경향을 보이는데, 이 경향은 초기지압 조건, 갱도와 채굴적간의 거리, 탄폭, 탄층경사 등에 의해 결정되며, 갱도단면 변형 경향에 직접적 영향을 주는 요인이다. 또한 갱도벽면에서 근접한 구간(0~3m)에서 큰 변위가 나타나며, 이 구간



(a) after 2nd sublevel caving



(b) after 3rd sublevel caving

Fig.14 Deformation behavior around the lower gangway during coal mining operation(Calculated).

에서 발생하는 균열은 갱도단면변형의 측정에 직접적인 큰 영향을 준다. 따라서 갱도단면변형을 계측 및 해석할 때에는, 갱도벽면에 근접한 일부 영역에서 일어나는 이완과 균열로 인한 변위와 채굴적 형성에 따른 갱도주위암반의 이동 등을 고려해야만 한다.

2) 계측된 변형계수를 이용하여 선형 경계요소법을 이용한 해석치를 갱도절대이동의 계측치와 비교하여 초기지압조건을 결정할 수 있었고, 여기서 결정된 초기지압 조건으로 재해석한 결과와 계측치를 비교하여 암반의 변형계수를 결정할 수 있었다.

차후에 파괴이후의 소성거동과 절리등의 불연속면을 고려하여 해석한다면 보다 적합한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 김호영, 경계요소법을 이용한 지하구조물의 응력해석연구, 과학기술처, KR-89-(B)-47, 1989, 147p.
- 2) 김치환, 현장계측치의 역해석에 의한 지하공동 주위암반의 응력해석 및 변형거동에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 1990, 167p.
- 3) 이희근, 경계요소법에 의한 현지암반탄성계수의 산정 및 암반거동해석에 관한 연구, 대한광산학회지, vol 23, 1986, p161-171.
- 4) 양형식, 암반구조물의 설계를 위한 수치해석의 기초연구, 서울대학교 박사학위논문, 1987, 130p.
- 5) Brebbia, C.A., The Boundary Element Method for Engineers, Pentech press, 1984, London, 189p.
- 6) 김인기 외, 심부석탄자원 개발을 위한 암반

- 12) 이현주, 운반갱도의 변형특성 및 변형계수 결정 연구. 전남대학교 석사학위논문, 1992, 72p.
- 13) Vlokh, N.P., Zoubkov, A.V. and Shoupletsov, Yu.P., Determination of stress and strain modulus in a rock mass by an experimental analytical method, 2nd Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, Balkema, 1988, Rotterdam, p. 1105-1112.
- 14) Brebbia, C.A., Telles, J.C.F. and Wrobel, L.C., Boundary Element Techniques, Springer-Verlag, 1984, Berlin, 464p.
- 15) Farahmand, D., Boundary Element Method for Evaluating Stability of Underground Opening in Rocks, Large Rock Caverns. Proceedings of the Int. Symp. B2.10, Pergamon Press, 1986, p. 1047-1053, Helsinki.
- 거동 및 지압조정연구(I), (II), (III), 과학기술처, KR-91(T)-19, 1989~1991.
- 7) 김영구, 중단봉락식 채굴진행에 따른 채굴적주위의 응력분포 및 변형거동에 관한 수치해석적 연구, 서울대학교 석사학위논문, 1990, 93p.
- 8) 송원경, 권광수, 국내 주요 탄전지역에서의 초기지압 측정에 관한 연구, 대한광산학회지, vol 25, 1988, p393-397.
- 9) 임한욱, 이주영, 삼척탄전지역 석탄광에서의 암반응력측정에 관한 연구, 대한광산학회지, vol 25, 1988, p301-308.
- 10) 이희근, 양형식, 경계요소법에 의한 암반 거동의 실험 및 수치해석적 연구(I), 대한광산학회지, vol 25, 1988, p31-40.
- 11) 김호영, 과지압 암반내 갱도의 변형거동과 지보설계에 관한 연구, 서울대학교 박사학위논문, 1989, 150p.