KSRM Spring '96 National Conference
29-30 March, 1996/Kangwon National University/KOREA

터널 주변지반에 발생하는 2차지압 현장계측 연구

A Study on the Measurement of the Induced Stress at around Tunnel

이 태 노[1], 임 한 욱[2]
1) LG 건설 기술연구소 과장
2) 강원대학교 자원공학과 교수

---

1. 서 론

최근들어 지하공간 활용에 대한 필요성이 강하게 대두되면서 지하암반 굴착공사가 매우 활발하게 진행되고 있다. 오래전부터 공사되었던 지하철 및 산악터널 뿐만 아니라 오늘날에는 지하암반의 특수성을 이용한 지하공간 사업 즉, 지하양수 발전소, 핵폐기물 저장소, 유류 비축기지 등이 건설중에 있으며, 지하공간과 관련된 대형 프로젝트가 구상되고 있다. 이러한 지하공간 개발이 활성화됨에 따라 지하암반의 붕괴 및 변형에 대한 안정성을 확인할 수 있는 계측기술이 새로운 분야로 부각되기 시작 하였으며 많은 현장시험과 학문적 연구가 수행되고 있다. 그러나 국내에서의 현장계측은 특수한 경우(시험연구 등)를 제외하고는 계측값 변화의 근본적인 원인규명과 분석이 이루어지지 못하고 있다. 실제 국내 터널공사장에서 수행되고 있는 계측은 단면의 변형상태와 건설현장의 주변 구조물 영향평가를 위한 피상적인 계측수행에 불과하다. 그러나 이러한 변형상태와 영향평가를 근본적으로 해결하고 해석하기 위해서는 터널 및 공동 주변에 존재하는 암반의 역학적 특성을 파악하지 않고는 불가능하다. 이러한 암반의 역학적 특성중 암반변형 원인규명과 지보재의 적정성을 평가하는데 절대적으로 필요한 요소는 암반을 굴착후 발생되는 2차지압의 형태와 크기이다. 지하암반내에 터널 등의 공동을 형성 시키면 평형상태의 응력장이 교란되면서 2차지압이 부가되어 주변암반은 불안정한 상태로 존재하게 된다. 이렇게 암반내에 부가되는 2차지압은 탄성체 암반내에서는 탄성에너지 상태로 축적되어 암석의 고유강도를 초과하게 될 경우 엄청난 에너지를 방출하면서 암반돌출(Rock Burst)현상으로 파괴되며, 지표부근 및 탄소성체 암반에서는 취약구간에서 하중으로 작용하여 기 시공된 지보재의 지보력을 상실시키면서 결국 붕괴되고 만다. 따라서 본 연구는 진동현 응력계를 사용하여 터널 및 공동의 변형과 파괴의 주 원인이되는 2차지압의 시간 함수적 크기와 암반조건에 따른 계측값 변화를 측정 하였으며, 지중변위와의 상관관계를 분석 하였다.

2. 진동현 응력계 원리 및 구조

굴착이 진행되면서 터널 주변암반에 발생하는 2차지압의 크기를 측정하기 위해서 사용된

계측기는 측정오차가 전혀없고 설치가 용이할뿐만 아니라 충전식 이동판독기(Readout Box)로 계측값을 측정하는 진동현 응력계(Vibrating Wire Stressmeter)를 사용 하였으며 이러한 진동현 응력계의 원리 및 구조는 다음과 같다.

2.1 진동현 응력계의 원리

진동현(Vibrating wire type) 게이지는 진동하는 현을 응용하여 제작된 것인데, 당초 진동현의 원리를 이용하여 변형을 측정하는 기술은 1930 년에 프랑스의 Telemac 과 독일의 Maihak 에 의해서 개발되었다. 현재는 보다 더 개량된 방법이 미국 등을 비롯한 많은 국가에서 이 진동현을 적용한 게이지를 제작하여 사용하고 있는데 원리는 다음과 같다.

게이지 몸체 양끝에 고정되어 있는 현(Wire)이 팽팽하게 당겨진 상태로 장력을 받게되면 현은 진동하게 되는데 이때 진동수는 식(2.1)과 같이 표시된다.

$$f=\frac{1}{2L}\times\frac{\sqrt{\sigma g}}{\sqrt{\gamma}} \qquad : (2.1)$$

여기서, f : Frequency of the wire

L : Length of the wire

σ: Tensile stress of the wire

γ: Density of the wire

g : Gravitational constant

진동현 스트레인 게이지는 현의 길이와 비중이 일정하도록 제작되므로 진동수는 현의 인장응력의 제곱근에 비례한다.

$$f\propto\sqrt{\sigma} \qquad : (2.2)$$

응력과 변형율은 탄성적으로 비례하기 때문에 변형율은 진동수의 제곱에 비례한다. Geokon 사의 진동현 스트레인 게이지에 대해서는 식(2.3)의 관계식이 성립된다.

$$\varepsilon_w = \frac{f^2}{a}\times 10^{-3} \qquad : (2.3)$$

여기서, ε_w : microstrain of the wire

(1 microstrain = 10^{-6} strain)

f : Frequency (Hz)

a : Gage calibration factor

본 연구에 사용된 Geokon 사의 이동판독기(GK-403)와 게이지는 단축방향에서만 응력값을 감지할 수 있도록 제작되었는데, 공내에 설치된 게이지의 케이블을 이동판독기 몸체에 부착된 케이블과 연결시켜 게이지내에 설치된 현의 진동 주파수를 응력값으로 변환시키고 식(2.4)에 의해서 공내에서 발생하는 2차응력값을 구하게 된다.

$$\sigma = (R_1 - R_0) \times G \qquad : (2.4)$$

σ : Stress (Kg/㎠)

R_1 : Reading at subsequent stress (Kg/㎠)

R_0 : Initial reading at zero stress (Kg/㎠)

G : Gage calibration factor

여기에서 G(Gage calibration factor) 값은 게이지가 감응하는 감도지수로서 암석의 탄성계수값에 따라 달라지는 계수이다. (Geokon, 1993) 따라서 진동현 게이지를 설치하는 암반의 탄성계수를 구한 후 이에 상응하는 게이지 감도지수(G)를 구하면 된다. 또한 Hast(1958)는 이동판독기를 사용하여 단축방향만을 측정할 수 있는 진동현 응력계(Stressmeter)를 2축응력으로 적용할 수 있는 식을 제안하였다. 암반중에 천공된 공의 반경방향의 변형율 U 와 공의 평면내에 존재하는 2개의 주응력 사이에는 평면응력상태(Plane stress condition)에서 식(2.5)와 같은 관계가 성립된다. (Obert, Duvall, 1967)

$$U=\frac{d}{E}[(\sigma_1+\sigma_2)+2(\sigma_1-\sigma_2)\cos 2\theta] \qquad : (2.5)$$

σ_1, σ_2 : Principle stress in the plane of the borehole

θ : Angle measured counterclockwise from the direction of σ_1

E : Elastic modulus

d : Diameter of the borehole

진동현 응력계에서 측정된 응력값이 게이지가 설치되지 않았을 경우에 발생하는 반경방향 변형값에 비례한다고 가정하면 d/E 는 암석 변형계수와 게이지의 변형계수 사이의 관계요소에 의하여 대체될 수 있다.

임의의 방향(θ)에서 그 응력의 크기(σ_r)는 식(2.5)로 부터 식(2.6)으로 변환될 수 있다.

$$\sigma_r=\frac{1}{3}[(\sigma_1+\sigma_2)+2(\sigma_1-\sigma_2)\cos 2\theta \qquad : (2.6)$$

(θ 는 σ_1 으로 부터 반시계 방향으로 측정된 각)

위의 관계식과 서로 다른 45° 방향으로 각 공에서 측정된 3개의 단축응력 변화의 측정값을 이용하여 σ_1, σ_2 등 2차 주응력의 크기와 각 θ 가 식(2.7)과 같이 구해진다.

$$\sigma_1 = \frac{3}{2}a + \frac{3}{4}b$$

$$\sigma_2 = \frac{3}{2}a - \frac{3}{4}b \qquad : (2.7)$$

$$\theta = \frac{1}{2}\sin^{-1} \times \frac{a - \sigma_{45}}{b}$$

여기서,

$$a = \frac{\sigma_0 + \sigma_{90}}{2}$$

$$b = \sqrt{(\sigma_{45} - a)^2 + (\sigma_0 - a)^2}$$

각 θ 를 결정하는데 있어서 4 방향 각도의 위치가 서로 다를 때의 부등식은 식(2.8)와 같다.

$\sigma_{45} < a$ 이고 $\sigma_0 > 90$ 일 경우 $0 < \theta < 45$

$\sigma_{45} < a$ 이고 $\sigma_0 > 90$ 일 경우 $45 < \theta < 90$: (2.8)

$\sigma_{45} < a$ 이고 $\sigma_0 > 90$ 일 경우 $90 < \theta < 135$

$\sigma_{45} < a$ 이고 $\sigma_0 > 90$ 일 경우 $135 < \theta < 180$

주) θ 는 σ_0 으로 부터 시계방향으로 측정된 값임

(이값은 σ_1 으로 부터 반시계방향으로 측정된 값과 같음)

2.2 진동현 응력계의 구조

본 연구에 사용된 진동현 응력계(Vibrating wire stressmeter)의 주요 구성요소는 Fig2.1와 같이 크게 진동현식 변환기(Vibrating wire transducer), 이동식 판독기(Readout box), 설치장비(Setting tools & Installation rods)로 구성된다. 이 진동현 응력계는 복잡한 암질조건과 계측방향에 따라 다양하게 응력변화를 측정할 수 있도록 여러 형태로 제작되어 있다.

진동현 응력계 게이지의 몸체는 Wedge, Platen, Ring 으로 구성되어 있는데 정교하게 열처리된 스테인레스 금속으로 만들어 졌으며 일축방향으로만 지압 측정이 가능하며, 게이지 내부구조와 작동원리를 살펴보면 다음과 같다.

게이지의 몸체안에는 직경이 0.23mm(0.009inch)인 금속성 철선이 Proving ring 의 양쪽으로 장력을 강하게 받은 상태로 설치되어 있는데 이때 지압의 영향으로 게이지 몸체에 압력이 가

해지면 몸체가 변형 되어 철선의 장력상태가 변화되면서 높은 탄성응력을 받고 있는 코일을 진동시킨다. 이 진동은 전자코일을 통해서 이동판독기에 감지된다.

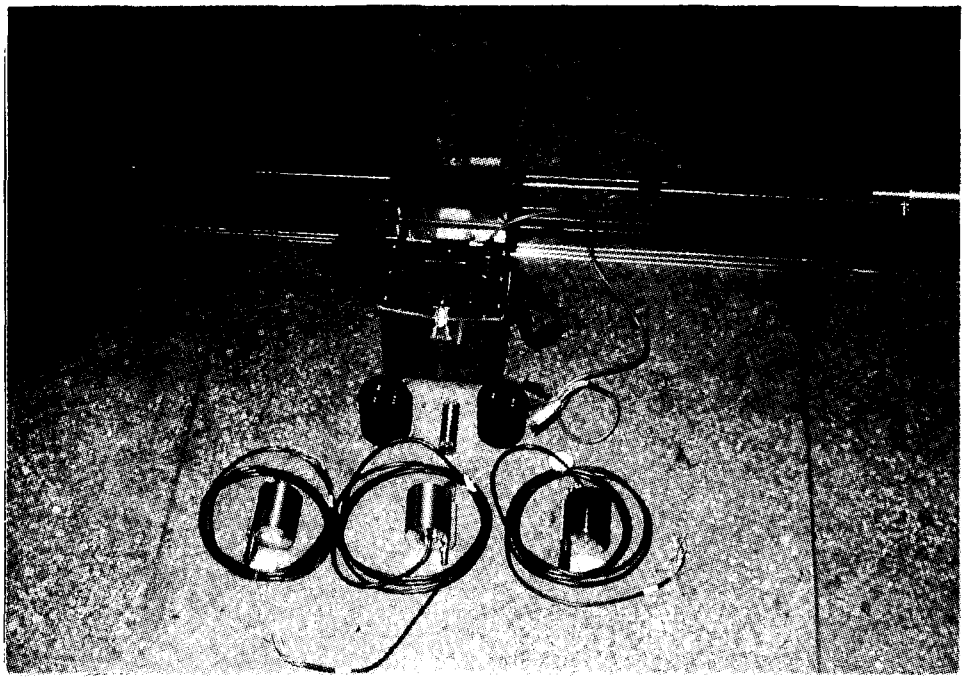

Fig. 2.1 A view of vibrating wire stressmeter

3. 현지암반 2차지압 측정

본 연구는 암석의 특성과 심도에따라 변화되는 2차지압의 크기를 분석하기 위해서 경동탄광 황조사갱 1편 신리연락갱과 삼척탄좌 450갱 서부 1크로스 갱도를 연구대상 구간으로 선정하고 이 지역의 지질 및 암반상태를 조사 하였으며 2차지압에 영향을 미치는 암석의 물성값을 분석 하였다. 또한 정확한 2차지압의 크기변화를 관찰하기 위해 굴착 막장면이 형성됨과 동시에 계측기를 설치한후 초기값을 측정 하였다.

3.1 연구대상 구간의 지질 및 암반구조

2차지압계가 설치된 구간의 지질과 암반상태는 경동탄광의 경우 평안계 함백산층 및 장성층 지질로 구성되어 있으며 담회색 중립내지 조립사암과 흑색세일의 호층으로 구성되어 있다. 갱도 진행면 일부 구간에서는 층상단층을 따라 맥암이 관입되기도 했으며 이러한 층상단층의 영향으로 주위암반의 파쇄가 심한편이다.

계측기가 설치된 터널 막장면은 3 - 4종의 암석이 다양 복잡하게 나타나 있는데 좌측천반 및 아치부분에 존재하는 조립 사암대는 절리군이 규칙적인 배열로 2개군 이하로 나타나고 있으나 좌측천반 및 아치부에서는 세일의 영향으로 판상의 절리층이 일정하게 20 - 50 cm 간격으로 형성되어 있다. 대체적으로 터널 중앙부의 상단에서는 절리발달이 전혀 없거나 일정하게

나타나 있으며 절리면이 신선하게 보호되어 있는 편이다. 계측기 설치구간 암반의 주 절리군 방향은 갱도 굴진진행 방향과 수직방향 형태로 배열되어 있으며 경사는 거의 수평에 가까운 판상으로 존재한다. 그러나 중앙부에서 나타나는 세일층은 굴진방향으로 약 10 °-15 ° 의 경사를 이루고 있다. 지하수 상태는 육안으로 확인할 수 있을정도의 유출은 없으나 사질층으로 충진된 절리면에서는 소량의 지하수가 젖어 있음을 알 수 있다. 또한 삼척탄좌 연구대상 구간의 지질은 조선계의 대석회암통을 기저로 평안계의 홍점통, 사동통, 고방산통 및 녹암통 순으로 구성되어 있다. 계측기 설치지점인 서부 1크로스는 상반갱도로서 사동통 사암과 세일로 복잡한 지질구조를 보이며 간헐적으로 탄층이 협재하기도 한다. 계측기는 사질세일대에 설치 되었는데 굴착면의 절리간격은 30 cm 이내로 비교적 좁게 분포하고 있다. 절리군은 2-3 개로 존재하고 절리면의 주향은 N10 - 20° W로 거의 굴착 진행방향과 동일방향으로 발달되어 있으며, 경사각은 대체적으로 30 - 40° 로 형성되어 있다. 또한 절리의 틈은 1 ㎜ 이내로 매우 압밀되어 있으며 그 절리면의 굴곡현상은 거의 나타나지 않고 있다. 표 3.1은 연구대상 구간의 암반 역학적 특성을 분석한 결과표이다.

3.1 The mechanical properties of rock types at test site

Items	Test Site Mines	
	Kyung Dong	Sam Tan
Depth(Surface↔Site)	380 m	400 m
Drift Size	5.3m×4.5m	5.2m×5.0m
Rock Type	Coal Shale	Sandy Shale
Uniaxial comp. strength	540-790kg/cm^2	950-1100kg/cm^2
Young's modulus	3.3 ×10^5 kg/cm^2	4.9 ×10^5 kg/cm^2
Classification of Rock Mass		
· R.M.R	25	25 - 40
· Q-System	0.73	0.3 - 1.2

3.2 계측기 설치 및 측정방법

암반중에 갱도가 형성되면 갱도 주변암반에서 발생되는 응력의 재배치 현상에 따른 응력교란으로 갱도단면에 가해지는 하중변화가 생긴다. 이렇게 존재하는 2차지압을 측정하기 위해서 게이지를 갱도단면 중심점에서 수직방향, 45° 방향의 갱도 아치부, 그리고 측벽에 직각방향 3곳에 설치하였다. 본 연구를 수행할 목적으로 설치된 진동현 응력계는 EX size 로서 점보드릴의 38mm 비트를 이용하여 천공장이 3.0m 가 되도록 천공한 후 게이지를 공내에 삽입하였다.

게이지의 직경은 29mm 이지만 Wedge 를 잡아당겨 Platen 과 Proving ring 을 완벽하게 공내에 고정시키기 위해서는 천공경이 1.450 inch 에서 1.545 inch 사이로 유지 되어야 한다. 이러한 공경을 정확히 유지하기 위해서 공경확인용 게이지(GO, NO - GO Gauge)를 사용하여 센서를 설치하기 전에 반드시 공경의 정밀도를 확인하였다. 게이지 설치는 먼저 3/4" 의 Setting tools 와 함께 게이지를 공내에 삽입하고 1/4" 의 Installation rod 와 함마를 사용하여 게이지를 공벽에 압착시켰다. 게이지를 완전히 공내에 설치한 후에 게이지의 4가닥 케이블을 이동판독기에 연결한후 작동 스위치를 판넬상에 표시되어 있는 "F" 위치에 놓고 초기값을 측정하였다. 또한 갱도를 진행시킨후 암반에 발생되는 2차지압 변동상태와 비교분석하기 위해서 2차지압 측정공에 인접(50cm)해서 지중변위 측정볼트를 설치하였다. 설치지점은 가장 많은 변형이 예상되는 갱도의 좌측 아치부로 하였으며 설치 방향은 갱도 중심선에서 45° 방향으로 하였다.

본 연구에 사용된 지중변위 측정볼트는 4 지점에 센서가 부착된 3m 용 다측점 지중변위계로서 센서와 센서 사이의 간격이 0.75m 로 되어 있는 앙카식 측정기이다. 지중변위 측정기가 암벽면과 완전히 정착될 수 있도록 시멘트 모르타르를 공내에 주입시킨후 계측기를 삽입시켜 공벽과 접착시켰다.

4. 계측결과 분석 및 고찰

연구대상 구간의 2차지압 초기값과 변화량을 정확히 측정하기 위해서 모든 계측기를 막장면에서 가장 가까운 지점에 설치 하였다. 또한 2차지압계의 설치심도는 가능한 무지보상태의 지압변화를 분석하기 위해서 암반보강용으로 설치된 2.4 m 용 Rock Bolt 의 직접적인 영향을 받지않는 지점인 3m 깊이의 암반중에 매설 하였으며, 계측값의 비교분석을 위해서 지중변위계는 3 m 용 Rod 를 사용하여 2차지압계에 근접시켜 설치 하였다. 계측값은 진동현 응력계의 경우 계측기를 암반에 설치한 즉시 측정한값을 초기값으로 하였고 지중변위계는 시멘트 모르타르의 경화시간을 고려해서 계측기 설치후 1일이 경과한후에 측정된값을 초기값으로 하였다. 계측빈도는 계측기를 설치한후 일주일 동안은 매일 측정 하였으며 일주일에서 3주일까지는 2-3일에 한 번씩, 3주일째 이후에는 주 1회씩 계측 하였다. 특히 삼척탄좌 경우에는 연층갱도 굴진이 시작되는 30일 째부터는 암반의 응력 및 거동현상이 심할것으로 예상되어 수시로 변화상태를 관찰 하였다.

4.1 2차지압과 지중변위 변화추이

계측기가 설치된 구간의 암질은 사질세일과 탄질세일로 구성되어 있기 때문에 천공후 계측기를 설치하기 까지 공 보호에 많은 어려움을 겪을 정도로 지압증가와 변형이 초기에 많이 발생 하였다. Fig. 4.1 은 경동탄광에서 3개월동안 측정된 2차지압 변화값을 그래프로 작성한 것인데, 게이지 설치한 후 초기에는 아치부 지점에서 다른 지점과는 달리 많은 지압변화 현상

이 나타났다. 이러한 현상은 계측기 설치지점의 암질이 천반부 및 측벽의 암질과 다르고 아치부에 설치된 게이지와 강하게 밀착되어 있는 공벽의 외적영향과 계측기 설치지점이 막장에서 1.5m 후방에 위치하기 때문에 순간적인 발파영향으로 이완된 암반이 사하중으로 작용하여 게이지에 가압된 것으로 추측된다. 2차지압 변화가 심하게 나타나는 천반부와 아치부에서는 지압변화가 완전히 수렴되었다고 생각되는 90일째에 2차응력값이 천반부, 아치부, 측벽부에서 각각 60 kg/cm^2, 73.5 kg/cm^2, 20.1 kg/cm^2 으로 나타나고 있으며 천반부와 측벽부에서는 인장응력이, 아치부에서는 압축응력이 발생되고 있다. 그러나 측벽부에서는 거의 변화를 나타내지 않을 정도로 아주 미약하게 인장응력이 발생되고 있어 터널 바닥에서의 반팽현상도 나타나지 않을 것으로 판단된다. 천반부의 2차지압 거동은 초기값 측정일로 부터 5일간은 평균 3.6 $kg/cm^2/day$ 의 크기로, 5일 부터 20일째 까지는 거의 1~2 $kg/cm^2/day$ 로 응력변화가 나타나다가 그후 안정상태로 유지되고 있음을 알 수 있다. 즉 20일째는 진동현 응력계 게이지를 매설한 지점으로 부터 굴진막장까지의 거리가 약 40m 로 직접적인 발파진동 영향권에서 벗어났을 뿐만아니라 록 볼트 시공으로 인한 암반의 재응력배치가 이루어져 갱도가 안정상태로 유지되고 있다고 볼 수 있다.

Fig. 4.2 은 좌측 아치부에 설치된 지중변위계의 계측 그라프이다. 본 연구에 사용된 계측기는 다측점 로드(4 Points rod)로서 심도별 지중변위를 계측할 수 있기 때문에 이완영역의 한계선과 균열 및 절리발생 구간을 정확히 측정할 수 있다.

지중변위 계측값이 각 측점 모두에서 초기에 많은 변위량 교란이 나타나고 있다. 이것은 센서로드가 지중변위 볼트의 각 측점(3m, 2.25m, 1.5m, 0.75m)에 고정되어 있기 때문에 각 측점별 암반과 지중변위 볼트가 시멘트 모르타르로 완전히 접착된 후 응력 및 하중의 재배치로 인

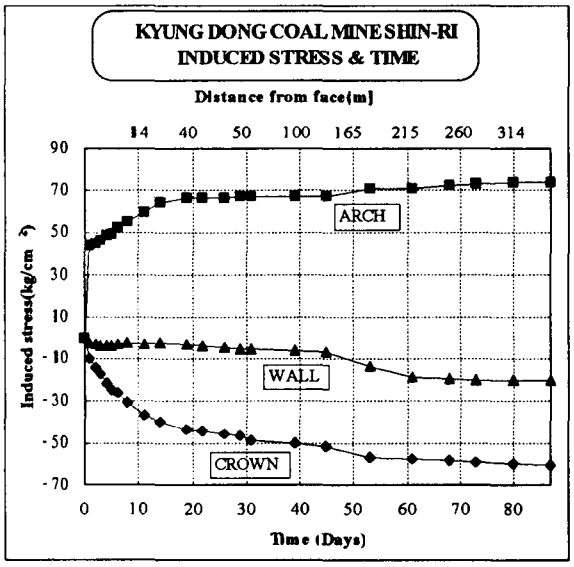

Fig4.1 The relationship between induced stress & time(Kyung Dong Mine)

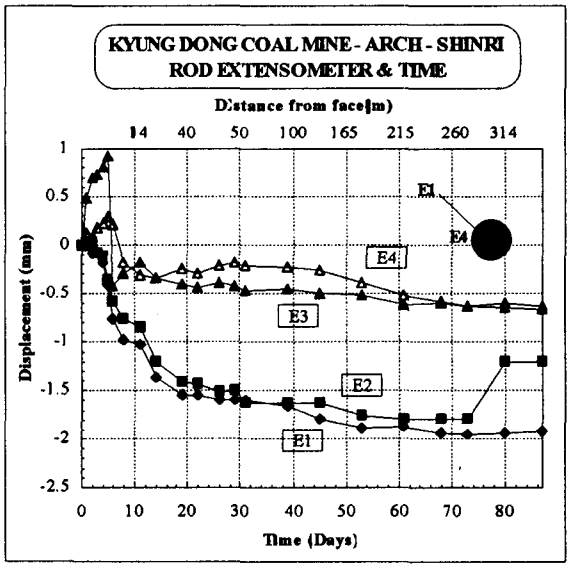

Fig4.2 The relationship between Rod extensometer & time(Kyung Dong)

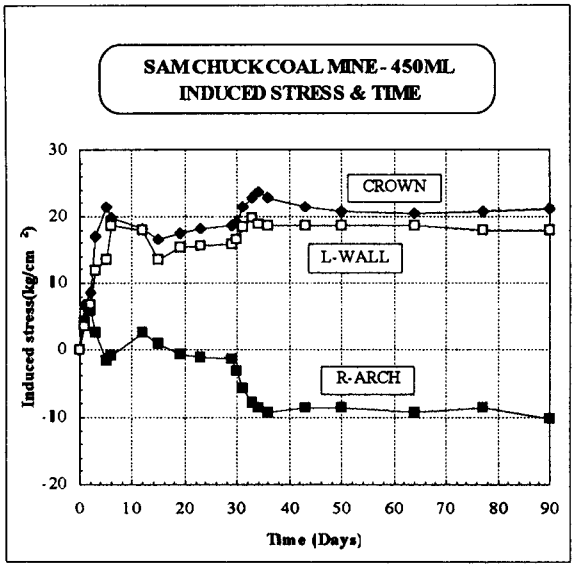

Fig4.3 The relationship between induced stress & time (Sam Tan)

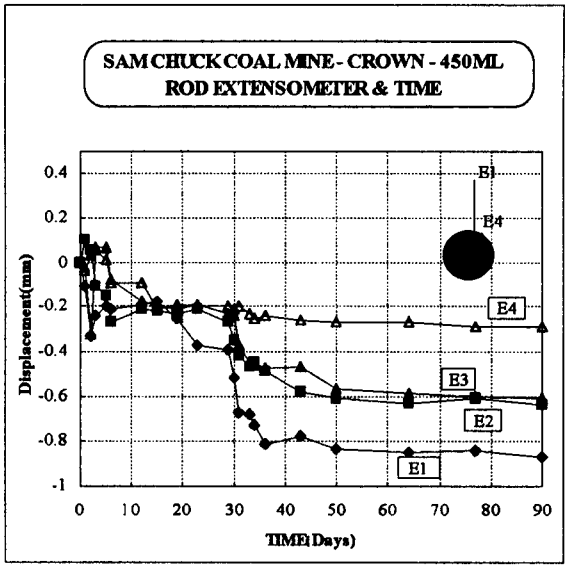

Fig4.4 The relationship between Rod extensometer & time (Sam Tan, Crown)

한 암반의 수평, 수직이동에 따른 순간적인 변동치라고 볼 수 있다. 그러나 초기치 측정일로부터 5일째 부터는 약 0.1 - 0.2 mm/day 정도로 일정한 변형량으로 증가하였으며 20일째 부터는 변형량이 아주 적은 양으로 나타나고 있는데, 이 결과는 2차지압크기 변화상태와 매우 유사하게 변화되고 있음을 알 수 있다. 지중변위량은 심도 3m(E_1) 지점과 2.25m(E_2) 지점에서 많이 일어나고 있으며 1.5m(E_3)와 0.75m(E_4) 지점에서는 아주 미약하게 나타나는데, 이러한 변화로 볼때 E_2 와 E_3 구간에서 이완대 영역이 형성되고 있음이 짐작된다.

Fig 4.3은 삼척탄좌 450갱 연구구간에서 측정된 2차지압 결과 그라프인데 경동탄광에서 나타난값의 변화와는 달리 아치부에서 10.2 Kg/cm^2 크기의 인장응력이, 그리고 천반의 경우 21.1 Kg/cm^2, 측벽은 17.9Kg/cm^2 의 압축응력이 발생하였다. 게이지를 설치한후 5일 동안은 천반과 측벽에서 4 - 8Kg/cm^2/day의 크기로 많은 지압변화 현상이 발생 하다가 6일째부터 수렴되기 시작 하였다. 이는 계측기 설치지점으로부터 막장이 멀어졌을 뿐만 아니라 착탄된후 굴진을 중단했기 때문으로 보인다. 또한 계측이 시작된 30일 후에는 다시 2차적인 지압변화가 발생되었는데 이것은 작업이 중단 되었던 착탄지점을 2.4 × 2.4 m 의 크기로 연층굴진이 진행되었으며 채탄작업이 이루어졌기 때문이다. 즉, 아치부와 측벽부에서 약 2 Kg/cm^2 /day 의 크기로 증가하다가 다시 6일째부터 수렴되었는데 1차적인 지압이 발생되었을 때보다 4 - 8 Kg/cm^2 정도의 추가지압이 발생되었다. 그러나 굴진진행 방향의 지압상태가 측정될 수 있도록 설치된 천반부에서는 채탄작업이 이루어지는 동안 2차적인 지압이 크게 증가하다가 6일째부터 1차적으로 발생되었던 지압의 크기로 되돌아 가다가 약 12일 째부터 수렴되기 시작하였으나 1차때 발생된 지압보다 최종적으로 2 - 3 Kg/cm^{2}정도 증가 되었다. Fig 4.4와 Fig 4.5 는 천반 및 아치부에서 측정된 지중변위 계측 그라프이다. 지중변위의 계측값은 경동탄광에서와 마찬가지로 첫날부터 6일째까지는 변위발생에 따른 교란이 크게 일어나고 있음을 알 수 있다. 또한 천반

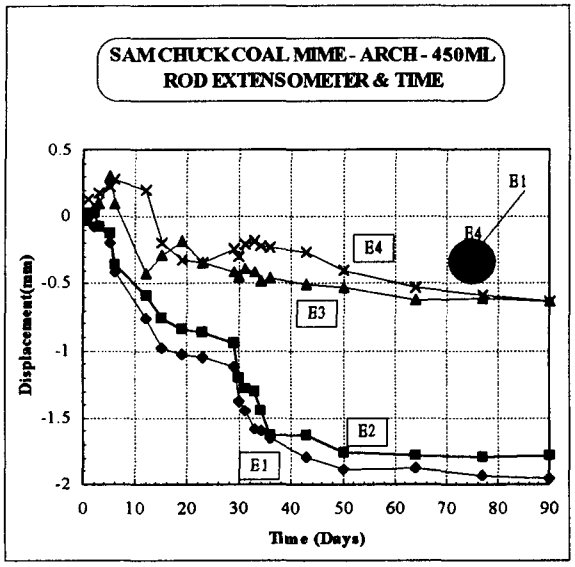

Fig4.5 The relationship between Rod extensometer & time (Sam Tan, Arch)

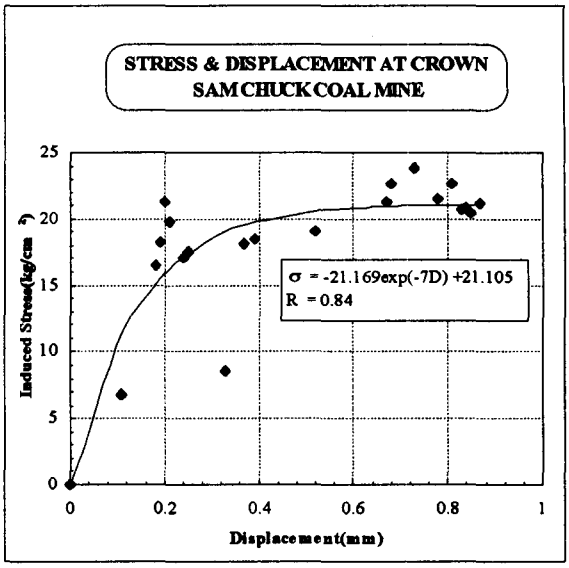

Fig4.6 The relationship between induced stress & displacement (Kyung Dong)

부에서는 연층굴진 작업으로 변위발생량이 0.1 - 0.2 mm/day 로 나타나다가 약 6일째부터 수렴되기 시작했으며 아치부에서 굴진 작업중에는 0.05 mm/day 그리고 연층굴진시에는 0.2 mm/day 의 크기로 변위량이 증가하다가 계측기 설치후 36일째부터 수렴되기 시작했다.

4.2 계측결과의 비교분석

본 연구는 계측기별 측정치의 변동상태를 비교분석하고 상호 관련성을 측정하기 위해서 서로 비슷한 조건하에서 이루어졌는데 약 90일간에 걸쳐 측정된 계측값은 시간별, 거리별로 2차 지압과 지중변위량 증가가 서로 공통적인 관계를 가지고 발생되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 암반내 불연속면이나 지각변동이 없는 매질에서의 이론적 1차지압의 수직응력 크기는 지표심도와 암반의 자중에 의해 결정되지만 2차지압은 지표심도보다는 암석의 역학적 특성과 암질상태에 따라 변화 된다는 것이 계측결과 어느정도 입증되었다.

즉, 탄층에 인접해있는 탄질세일층에 계측기를 설치한 경동탄광의 경우 아치부에서 73.5 Kg/cm^2 2차지압의 크기가 발생한 반면 비교적 단단한 암석층으로 구성된 삼척탄좌의 상반층 암반에 설치된 2차지압계에서는 천반부에서 경동탄광의 1/3 수준인 21.1 Kg/cm^2값이 발생 되었다. 이때 2차지압계와 인접해서 설치된 지중변위 측정값도 경동탄광의 경우 최대 1.91 mm 의 변위량이 발생 하였으며 삼척탄좌에서는 0.87 mm 이 발생 하였다. 이와같은 계측값의 비교는 동일심도에 매설된 계측기의 센서에서 감지된 값을 대상으로 분석되었는데 2차지압과 지중변위값의 상관관계를 분석한 결과 Fig4.6, 4.7, 4.8 와 같으며, 상관계수(r) 가 식 4.1 과 같이 0.84 - 0.97 로써 매우높은 신뢰도를 보이고 있다.

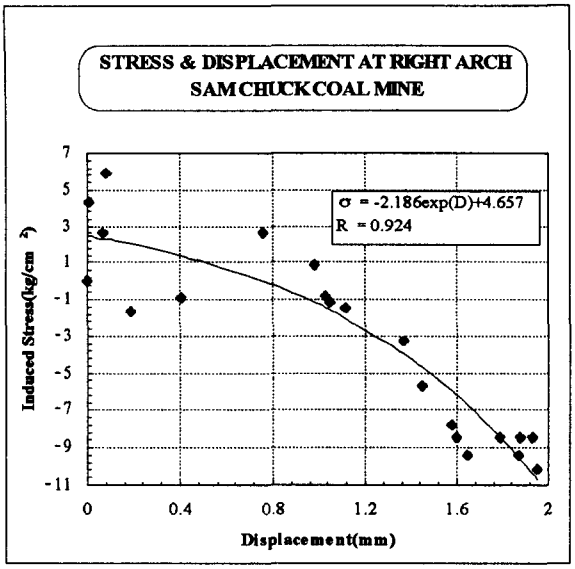

Fig4.7 The relationship between induced stress & displacement (Sam Tan, Crown)

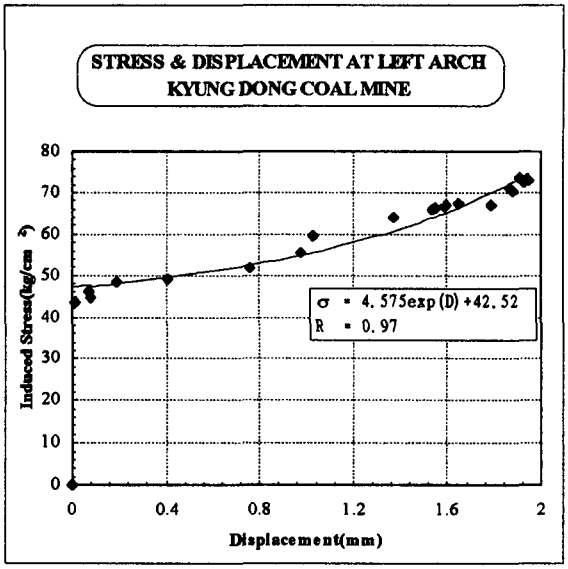

Fig4.8 The relationship between induced stress & displacement (Sam Tan, Arch)

· Left Arch (Kyung Dong Mine)

$$\sigma = 4.575\exp(D) + 42.52 \quad (r = 0.97)$$

· Right Arch (Sam Tan Mine)

$$\sigma = -2.186\exp(D) + 4.657 \quad (r = 0.924) \qquad (4.1)$$

· Crown (Sam Tan Mine)

$$\sigma = -21.169\exp(-7D) + 21.105 \quad (r = 0.84)$$

또한 2차지압과 지중변위값은 계측이 시작된 초기일로부터 5일간은 계측 그라프에서 나타났듯이 심한 계측값 교란이 발생 하였는데 이는 막장면과 가까운 거리로 인하여 발파진동 영향을 받았을 뿐만 아니라 암반에 공동형성으로 인한 주변지반의 응력 재배치 현상으로 보인다. 그러나 이러한 변화는 5일째 까지 계속되다가 10일째(계측기 설치지점에서 14m 구간) 부터는 서서히 수렴되기 시작하여 20일째 부터(계측기 설치지점에서 40m 구간)는 안정상태로 전환되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 암반중에 공동이 형성될 경우 공동 주변암반에 발생되는 2차지압의 크기변화와 지중변위와의 관계를 분석하기 위해서 약 90일간에 걸쳐 2개의 탄광에서 수행되었는데 본 연구를 종합해볼 때 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

1) 암반중에 굴착된 갱도의 주변암반에 발생되는 2차지압의 응력분포는 위치(천반, 아치, 측

벽)에 따라 압축응력과 인장응력으로 발생되며, 2차지압의 크기는 암석의 역학적 성질과 암반상태에 많은 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

2) 막장면에서 10 m 이내의 암반은 발파와 굴착작업의 영향으로 지압과 변위량의 증가와 교란이 심하기 때문에 갱도단면 변화상태를 수시로 관찰해야 하며 암반을 보강하기 위해서는 Rock Bolt 와 같은 능동적 지보재를 사용하는 것이 바람직하다.

3) 굴착된 갱도 주변 암반에서의 2차지압 크기는 지중변위 변화량과 상관관계 분석결과 매우 높은 신뢰도를 가지고 비례적 관계로 변화되기 때문에 지중변위량 측정으로 2차지압 크기를 어느정도 추정할 수 있을 것으로 보인다.

4) 각종 계측기에 수집된 측정값이 막장면으로부터 40 m 이상의 지점에서는 계측값이 수렴되어 암반이 매우 안정상태로 유지되고 있다고 판단되기 때문에, 막장면으로부터 40 m 이상의 지점에서 계측값이 계속적으로 증가하던가 또는 불규칙적으로 변동될 경우에는 추가적인 보강조치를 강구해야 할것이다.

참 고 문 헌

1. Bieniawski. Z. T, Rock mechanics design in mining & tunnelling, A. A Balkema, 1984, pp. 138~143.
2. Brady B. H. G, E. T Brown, Rock mechanics for underground mining, George allen & unwin Ltd, 1985, pp. 245~251, 461~471.
3. Hast N, The measurement of rock pressure in mines, 1958.
4. Obert Leonard, Wilbur I. Duvall, Rock mechanics & the design of struct ures in rock, John Wiley & Sons Inc. 1967. pp. 492~499.
5. Peng Syd S, Coal mine ground control, John Wiley & Sons Inc., 1978, pp. 379~382.
6. Sellers. J. B, The measurement of stress changes in rock using the vibrating wire stressmeter international Sympo on FMRM, Zurich, 1977.
7. Stephansson Ove, Rock bolting, A. A Balkema, 1984. pp. 295~311.
8. Stillborg Bengt, Professional users handbook for rock bolting, Trans Tech, 1986, pp. 31 - 34.
9. 김인기 외, 심부석탄자원 개발을 위한 암반거동 및 지압조정연구, 과학기술처, 1989, pp. 204 - 222.
10. 김호영, 과지압 암반내 갱도의 변형거동과 지보설계에 관한 연구, 서울대학교 공학박사 학위논문, 1989. pp. 26.
11. 서영호, 연약암반에 굴착되는 N. A. T. M 터널의 변형거동과 보강설계, 서울대학교 공학박사

학위논문, 1993. pp. 21~25, 33.

12. 이정인 외, Rock bolt 지보기술 광산적용 시험연구, 대한광업진흥공사, 1986. pp. 101~112, 148~156.

13. 이태노, 임한욱, 석탄광 연암층내 대규격 갱도 보강을 위한 SWELLEX 및 SWELLEX Cable Bolt 의 현장 적용 시험에 관한 연구, 한국암반역학회지, 제3권, 1993. pp. 2, 5~6.

14. 이태노, 경동탄광 지보재 개선을 위한 Rock Bolt 현장시험과 변형계측 및 해석, 탄광기계화 기술세미나 보고서, 한국자원연구소, 1993.

15. 임한욱, 이상은, 연약암반내 터널 보갱법 설계를 위한 2차응력 및 변위계측에 관한연구, 한국암반역학회, 제4권, 1994. pp. 298 - 304.