

지하공간 굴착에 따른 수직파이프 구조물의 안정성해석

김 종 우

Stability Analysis of Vertical Pipeline Subjected to Underground Excavation

Jong Woo Kim

ABSTRACT Deformation behavior and stability of vertical pipeline subjected to underground excavation have been studied by means of numerical analysis. Vertical ground displacements cause the pipe to be compressed, while horizontal ones cause it to be bent. In that reason the vertical pipeline meets with the induced compressive stress and bending stress. In addition horizontal rock stress subjected to underground excavation may press the tube in its radial direction and it finally produces the tangential stress of pipe. In this study active gas well system is considered as an example of vertical pipelines. Factor analysis has been conducted which has great influence on the pipeline behavior. Three case studies are investigated which have the different pillar widths and gas well locations in pillar. For example, where overburden depth is 237.5 m and thickness of coal seam is 2.5 m, chain pillar of 45.8 m width in the 3-entry longwall system is proved to maintain safely the outer casing of gas well which is made of API-55 steel, 10 $\frac{3}{4}$ in. diameter and 0.4 in. thickness. Finally an active gas well which was broken by longwall mining is analyzed, where the induced shear stress turn out to exceed the allowable stress of steel.

Key word : Underground excavation, Mining, Deformation, Case study, Gas, Analytical methods

초 록 : 본 연구에서는 지하공간의 굴착에 따른 수직파이프 구조물의 변형거동 및 안정성을 수치해석적으로 검토하였다. 지반의 수직거동은 파이프의 압축변형 및 압축응력을 발생시키며, 수평거동은 파이프의 굴곡변형 및 휨응력을 발생시킨다. 또한, 지반의 수평응력은 파이프를 압착시켜 접선응력을 발생시킨다. 본 연구의 해석대상 구조물은 지하 천연가스의 생산정으로서, 인접 지반의 굴착이 파이프에 미치는 영향과 최대 영향 요소를 고찰하였다. 이를 위해 보안탄주의 폭과 가스생산정의 위치가 서로 다른 세 가지 사례를 해석하고 비교하였다. 두께 2.5 m인 탄층이 심도 237.5 m에 위치할 때 45.8 m 폭의 보안탄주는 외경 10 $\frac{3}{4}$ in., 두께 0.4 in.인 API-55 강철 파이프 구조물을 안전하게 보호할 수 있다. 또한, 실제로 파괴가 발생한 가스생산정을 검토한 결과, 발생된 전단응력이 강철 재료의 허용응력을 초과하였다.

핵심어 : 지하굴착, 채광, 변형, 사례, 가스, 해석적 방법

1. 서 론

임의의 지하 암반은 초기응력에 의해 평형상태에 놓여 있다. 이러한 암반 내에 공동이 굴착되면 응력재분배가 발생하여 초기응력 평형상태에서 2차 응력 평형상태로 전이하게 된다. 응력전이에 따른 지반의 변형거동은 굴착 공동 주위에 위치한 기존 시설물의 안정성에 영향을 미친다. 특히, 파이프 구조물은 지반거동에 의해 큰 영향을 받는 대표적인 선형 구조물이다.

파이프 구조물은 수평 및 수직 파이프로 대별된다. 수평파이프는 물, 가스, 기름 등의 수송과 전기선, 통신선

등의 매설을 위해 설치되며 강철, 주철, 알루미늄, 철근 콘크리트, 플라스틱 등의 다양한 재료로써 시공된다. 이에 비해 수직파이프는 지하수, 천연가스, 원유, 지열 에너지 개발 등을 위해 설치되며 주로 강철 재료로써 시공된다.

수평파이프는 일반적으로 정역학적인 해석과 유한요소 해석을 이용하여 설계되는데, 파이프 상부의 토피 및 차

1) 정회원, 청주대학교 지구환경시스템공학과 부교수
접수일 : 2000년 10월 20일
심사완료일 : 2000년 11월 15일

량하중 등이 주된 외력조건으로 고려된다. Marston-Spangler 방법을 비롯한 여러 가지 설계법이 제안되어 있으며, 국내에서도 이를 이용한 사례연구가 실시된 바 있다(옥치남 등, 1989). 또한, 김형식 등(1998)은 지반침하에 따른 수평 천연가스 배관의 안정성을 해석적으로 연구하였으며, Peng(1988)은 장벽식 채탄광산 상부에 위치한 수평파이프의 응력분포 및 안정성을 연구하였다. 이에 비해 수직파이프의 설계 및 안정성 해석에 관한 연구는 매우 미진한 상태이다. 국내의 경우 수많은 수직파이프가 운영 중에 있으며 이들은 지반침하의 위협에 노출되어 있음을 간과해서는 안된다.

본 연구에서는 지하공간의 굴착에 따른 수직파이프 구조물의 안정성을 수치해석을 통해 검토하였다. 해석 대상 구조물은 지하 천연가스의 생산정으로서, 가스부존 지층의 상부에 석탄층이 있는 경우 이 석탄층의 개발 및 지하굴착으로 인해 발생하는 지반의 변형거동 및 응력변화가 수직파이프의 안정성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 보안탄주와 가스생산정

2.1 보안탄주

천연가스 부존지층이 석탄층 하부에 존재할 경우 상부에 위치한 석탄층의 개발은 가스생산정의 안정성에 큰 영향을 준다. 즉, 석탄층의 점진적인 개발 및 회수로 인하여 암반내에는 공동이 발생하며 이로 인한 응력재분배의 영향으로 석탄층을 관통하여 수직으로 설치된 가스생산정은 응력의 변화를 겪게 된다. 수직파이프 구조물의 일종인 가스생산정을 안전하게 보호하기 위한 가장 기본적인 방법은 석탄층의 개발범위를 한정하여 보안탄주를 설정하는 것으로, 이는 석탄층 상부의 지표 구조물 보호를 위한 보안탄주의 개념과 유사하다. Fig. 1은 주방식

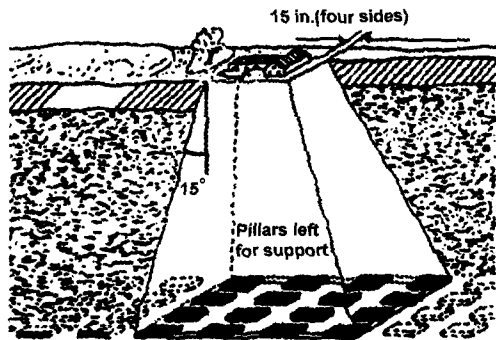


Fig. 1. Method of supporting a house (Peng, 1994).

Table 1. Regulation of pillar area for protecting active gas well.

| Cover (ft) | Req'd solid pillar area (ft ²) | Req'd additional pillar area (solid or split) (ft ²) | Total area bearing surface required (ft ²) |
|------------|--|--|--|
| 0-149 | 3600 | - | 3600 |
| 150-249 | 5625 | - | 5625 |
| 250-349 | 10000 | - | 10000 |
| 350-449 | 10000 | 5600 | 15600 |
| 450-549 | 10000 | 13000 | 23000 |
| 550-649 | 10000 | 22000 | 32000 |
| over 650 | 10000 | 30000 | 40000 |

채굴 석탄광산에 대한 미국 펜실베이니아주의 지표구조물 보호용 보안탄주의 규격을 나타낸 것이다.

미국 동부의 피츠버그 탄층지역은 하부에 천연가스 지층을 가진 경우가 많아 가스생산정 보호용 보안탄주의 규격이 석탄개발업자와 가스생산업자 사이의 중요한 쟁점이 되고 있다. 미국 펜실베이니아주 광무성은 25년간의 경험을 토대로 하여 주방식 채굴 석탄광산에 대한 가스생산정 보호용 보안탄주의 규격을 제안하였으며(DMMI, 1957), 이를 요약하면 Table 1과 같다. Table 1에서 보안탄주의 크기는 피복암반의 두께와 관련하며, 심도 650 ft 이상인 석탄층의 경우 보안탄주는 최소한 40,000 ft²의 면적을 가지도록 되어있다. 또한, 이를 장벽식 채굴법으로 확대 적용하고 있으며, 예를 들어 심도 650 ft 이상인 석탄층의 경우 연속지주(chain pillar)의 폭은 200 ft 이상이 되도록 규정하고 있다.

이러한 명확한 규정에도 불구하고 석탄업자들은 보안탄주의 규격을 축소하려는 노력을 계속하고 있다. 실제로 이 규정은 제안된 지 40년 이상이나 되었고 그동안 개발 및 지보방법이 발전하였기 때문에 제고의 소지는 있는 것으로 생각된다. 또한, 이 규정은 단순히 과거의 경험만을 토대로 만들어진 것이므로, 최근 암반구조물의 안정성 해석에 널리 사용되고 있는 수치해석기법을 적용하는 시도가 필요하다.

2.2 가스생산정

가스생산정은 가스생산관, 공벽보호관(casing), 정두연결장치 등으로 구성된다. 공벽보호관은 직경과 두께가 다른 여러 가지 규격의 강철 파이프로서 내부의 가스생산관을 보호하는 역할을 한다. 공벽보호관의 직경, 두께,

Table 2. Minimum yielding stress of steel casings based on API Standards.

| API grade | Minimum yielding stress | |
|-----------|-------------------------|-----------------------|
| | (psi) | (kg/cm ²) |
| F-25 | 25,000 | 1,750 |
| H-40 | 40,000 | 2,800 |
| J-55 | 55,000 | 3,850 |
| K-55 | 55,000 | 3,850 |
| C-75 | 75,000 | 5,250 |
| L-80 | 80,000 | 5,600 |
| N-80 | 80,000 | 5,600 |
| C-90 | 90,000 | 6,300 |
| C-95 | 95,000 | 6,650 |
| P-110 | 110,000 | 7,700 |

수량은 생산관의 심도, 지압조건 등에 따라 상이하하며 파이프들 사이 및 시추공 사이에는 시멘트가 주입되어 접착된다. Table 2는 공벽보호관으로 사용되는 강철재료의 API품위를 나타낸 것이다(강주명, 1991).

표에서 강도가 가장 작은 F-25 강철의 경우 최소항복 강도 즉, 허용응력은 1750 kg/cm²이고 탄성계수는 2.1×10⁶ kg/cm²이므로 허용변형률은 833×10⁻⁶이 된다. 즉, 이 재료에 이 보다 큰 변형률이 발생하면 파이프는 소성 변형을 할 것으로 기대된다.

공벽보호관의 파괴유형은 인장에 의한 몸체 및 연결부의 절단, 내부압에 의한 파열, 외부압에 의한 압착 등이 있다. 가스층 상부의 석탄층에 대한 장벽식 채굴작업으로 인하여 연속지주의 응력은 증가하게 되며, 이는 지주내에 설치된 공벽보호관에 작용하는 외부압을 증가시키게 된다. 한편, 공벽보호관의 압착저항은 외부압 이외에도 파이프의 외경 대 두께의 비, 파이프의 재질 등에 의해 좌우된다.

3. 안정성 해석

3.1 해석 대상

Fig. 2는 4개의 진입갱도(entry)를 가진 장벽식 채탄광산의 연속지주 중앙부에 위치한 가스생산정을 나타낸 것이다. Fig. 2(a)는 평면도로서 연속지주의 좌우에 각각 1번, 2번 패널이 있다. Fig. 2(b)는 단면도로서 탄층두께는 8 ft이고 각 진입갱도의 폭은 20 ft이다. 지주는 총 3개로서 가스생산정이 있는 중앙지주의 폭은 100 ft이고

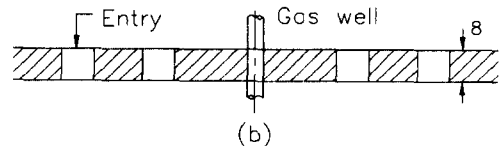
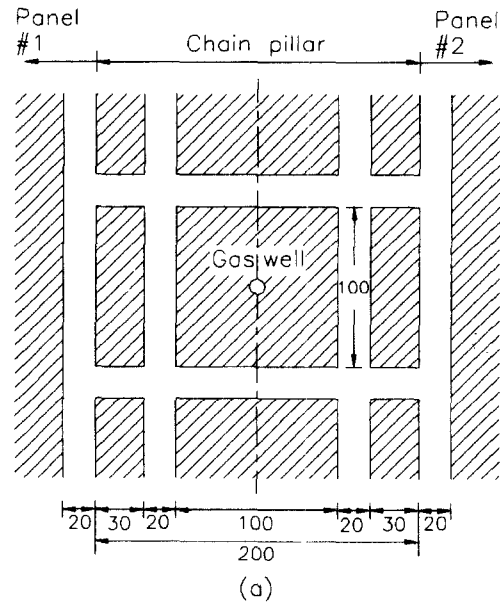


Fig. 2. View of chain pillar system with 4 entries (Unit:ft).

보안탄주 전체 폭은 200 ft이다. 이는 탄층 심도가 650 ft 이상일 경우에 대한 DMMI의 보안탄주 규정을 만족하는 것이다.

본 연구에서는 Fig. 2와 같은 탄층이 심도 237.5 m (780 ft)에 위치할 경우에 대하여, 좌우 패널을 굴착함에 따라 발생하는 지반거동 및 유도응력을 FLAC 해석을 통하여 구하였으며, 발생된 변위 및 응력이 수직파이프 구조물의 안정성에 미치는 영향을 고찰하였다. FLAC은 유한차분법을 이용한 상용프로그램으로서 국내외에서 널리 사용되고 있으며, 해석의 보편성을 위하여 본 논문에서는 영국단위 대신에 상용공학단위를 사용하기로 한다.

한편, 가스생산정은 중앙지주의 중심부에 위치하는 것으로 하였다. 공벽보호관으로는 실제로 여러 가지 규격의 파이프가 사용되고 있으나, 본 해석 대상 지역에서 널리 사용되고 있는 외경 10³/₄ in., 두께 0.4 in., API J-55 강철 파이프를 최외각 공벽보호관으로 고려하였다. 이 파이프의 허용응력은 Table 2에서 3850 kg/cm²이고 탄성계수를 고려하면 허용변형률은 1833×10⁻⁶이다.

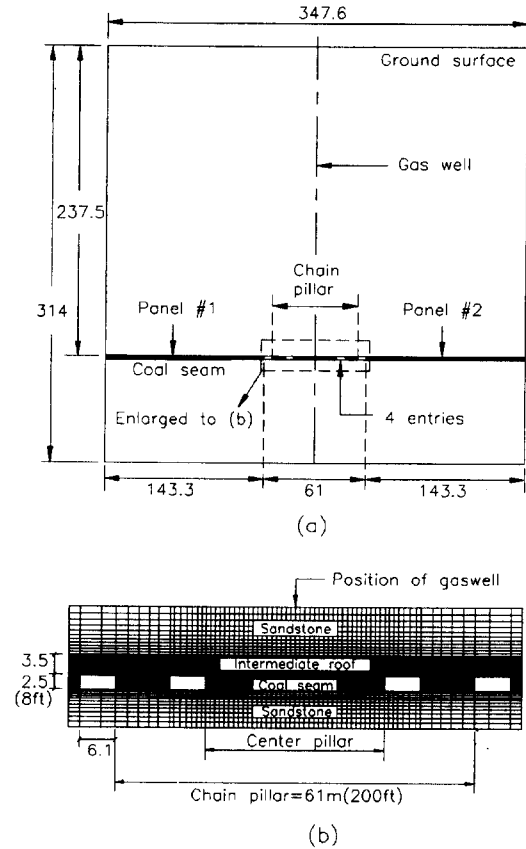


Fig. 3. Region of numerical analysis (Unit:m)

3.2 해석과정

Fig. 3(a)는 수직단면도로서 해석대상 영역을 나타낸 것으로 크기는 347.6m×314m이다. 해석영역의 좌우경계는 수평변위만 구속하고 수직변위를 허용하도록 하였다. 따라서 이 두 경계는 각각 1, 2번 패널의 중심부에 해당되며, 패널의 폭은 각각 286.6m(940ft)가 된다. 또한, 해석영역의 하부경계는 수직 및 수평변위를 모두 구속하였다.

Fig. 3(b)는 전체 요소망 중에서 보안탄주 주변을 발췌하여 나타낸 것으로서, 중앙지주의 폭은 30.5m(100ft)이

고 보안탄주의 전체 폭은 61m(200ft)이다. 2.5m(8ft) 두께의 탄층 상부에는 연약한 지층(intermediate roof)이 3.5m 두께로 분포하는 것으로 하였다. Table 3은 각 지층의 물성으로서 피츠버그 탄층 주변의 암반에 대한 여러 실험자료를 근거로 가정된 것이다. 또한, 상기 지역은 초기응력의 측압계수가 매우 다양하게 측정되는 곳이지만, 해석의 단순화를 기하기 위하여 측압계수를 0.8로 가정하였다.

한편, 지반 굴착순서는 장벽식 채탄의 과정을 그대로 묘사하였는데, 먼저 4개의 진입갱도를 굴착하고, 다음으로 1번 패널과 2번 패널을 순서대로 굴착하는 것으로 하였다. 여기서, 굴착공동은 채굴적(gob)의 물성으로 대체된다. 한편 폭 6.1m(20ft)인 진입갱도에는 통상 4개의 록볼트가 시공되나, 파이프 구조물이 위치한 중앙지주의 응력상태를 최대한 불리하게 하기 위하여 록볼트는 설치되지 않는 것으로 하였다.

3.3 파이프 축방향 해석

장벽식 채탄에 따른 지반 변형거동은 수직파이프의 안정성에 영향을 준다. 시추공과 공벽보호관이 시멘트로 완전 접착되었으므로 지반거동이 직접적으로 공벽보호관에 전달되는 것으로 가정할 수 있으며, 이때 수직거동은 공벽보호관에 압축변형을 유발하며 수평거동은 굴곡변형을 발생시킨다.

3.3.1 압축변형

Fig. 4는 FLAC 해석의 결과로서 공벽보호관이 위치하는 중앙지주의 중심선을 따라 발생한 수직변위를 굴착단계별로 나타낸 것이다. 수직변위는 굴착단계에 따라 약간씩 증가한다. 예를 들어, 중앙지주 상부지표면의 침하량은 진입갱도 굴착시에는 약 0.5mm, 1번 패널 굴착시에는 약 3.2mm, 마지막으로 2번 패널 굴착시에는 약 5.7mm로 나타났다.

한편, Fig. 4와 같이 계산된 절점 수직변위를 이용하여 탄층 주변 공벽보호관의 압축변형률을 구한 것이 Fig. 5에 제시되어 있다. 석탄의 탄성계수가 다른 지층보

Table 3. Mechanical properties of rocks.

| Material | Density (g/cm ³) | Young's Modulus (×10 ³ MPa) | Poisson's ratio | Friction angle(°) | Cohesion (MPa) | Tensile strength (MPa) |
|-------------------|------------------------------|--|-----------------|-------------------|----------------|------------------------|
| Sandstone | 2.7 | 20 | 0.2 | 40 | 27 | 10 |
| Intermediate roof | 2.6 | 3.0 | 0.3 | 28 | 9 | 4 |
| Coal | 1.24 | 1.5 | 0.3 | 23 | 9 | 4 |
| Gob | 1.24 | 0.6 | 0.4 | 5 | 0 | 0 |

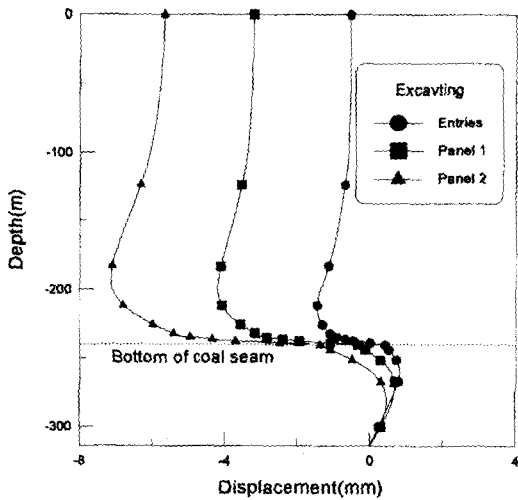


Fig. 4. Vertical displacement along the gas well.

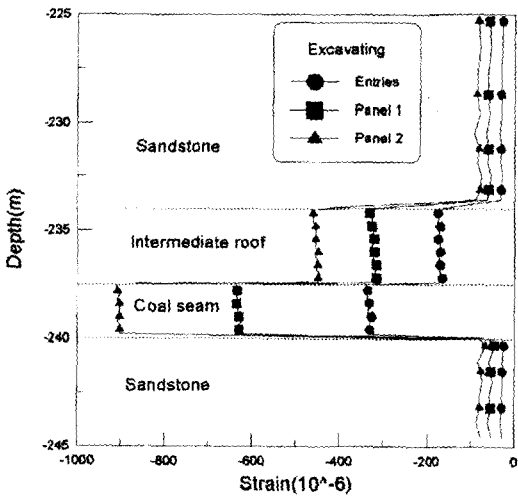


Fig. 5. Axial strain along the gas well.

다 작기 때문에 탄층의 변형률이 가장 크게 나타났으며 굴착단계에 따라 변형률은 증가하였다. 여기서, 최대변형률은 900×10^{-6} 이며, 이는 허용변형률의 49%정도의 수준이다. 또한, 이를 파이프의 압축응력으로 환산하면 1890 kg/cm^2 이 된다.

3.3.2 굴곡변형

지반의 수평저동에 의해 파이프는 굴곡 변형된다. 요소방이 중앙지주의 중심선에 대해 대칭적인 형태를 이루기 때문에 수평변위는 수직변위에 비하여 매우 작게 나타났다. Fig. 6은 중앙지주의 중심선을 따라 발생한 수평변위를 나타낸 것이다. 이 중심선은 4개 진입경도의 한

가운데 위치하므로 대칭성에 의하여 진입경도 굴착시에는 변위가 거의 생기지 않는데 비하여, 1번 패널이 굴착되었을 때 최대 0.52 mm의 변위가 발생하였다. 그러나 연이어 반대편의 2번 패널이 굴착되면 다시 대칭성에 의하여 변위가 0.11 mm로 감소되었다.

이러한 수평변위는 파이프의 굴곡변형을 발생시키는데, 굴곡의 정도는 곡률 k로써 표시되며 다음과 같이 계산된다(Kovari, 1977, 김종우, 1994).

$$k = \frac{8}{L^3} f \tag{1}$$

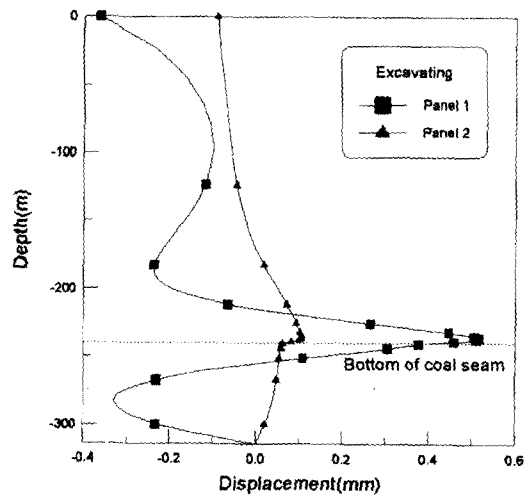


Fig. 6. Horizontal displacement along the gas well.

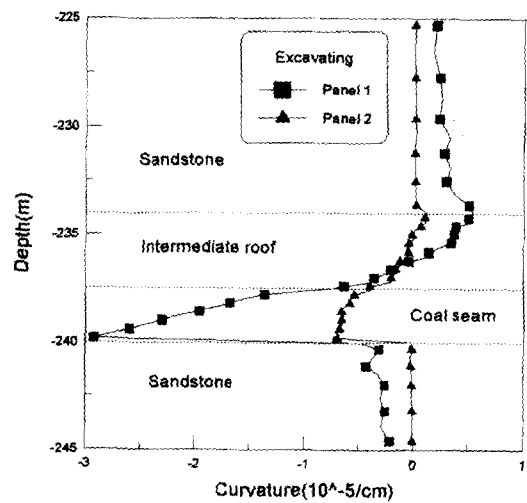


Fig. 7. Curvature distribution along the gas well.

여기서 L 은 두 측정점 사이의 거리이고 f 는 두 측정점 사이의 곡률거리 변화량이다. 한편, Fig. 7은 (1)식을 이용하여 구해진 것으로, 중앙지주의 중심선을 따라 발생한 곡률의 분포를 나타낸 것이다. 최대 곡률은 최대 수평변위가 발생한 시점인 1번 패널 굴착시에 나타났으며, 구체적으로는 탄층과 하반의 경계지점에서 발생한 $-2.9 \times 10^{-5}(1/cm)$ 이다. 한편, 곡률에 의한 휨응력은 다음과 같다(Timoshenko, 1972).

$$\sigma_b = Eky \tag{2}$$

여기서 E 는 영률이고 y 는 중립축으로부터의 거리이다. 따라서, 최대 휨응력은 다음과 같으며, 여기서 D 는 파이프의 외경이다.

$$\sigma_{b,max} = \frac{EkD}{2} \tag{3}$$

이제 최외각 공벽보호관으로 외경 10¼ in.인 강철 파이프를 고려한다면, 상기의 최대곡률과 (3)식으로부터 파이프의 최대 휨응력은 831 kg/cm^2 로 계산된다. 이는 공벽보호관 허용응력의 22%정도의 작은 수준이며, 이러한 거동은 파이프가 중앙지주 및 보호탄주의 중심부에 위치하기 때문으로 생각된다. 그러나 최근에 주로 사용되는 3개 진입압도 시스템(3-entry system)에서는 공벽보호관이 이와 같은 대형 중심에 위치할 수 없으므로 굴곡변형이 파이프의 안정성에 미치는 영향은 더욱 커질 것으로 기대된다.

한편, 파이프의 압축변형과 굴곡변형을 중첩의 원리에 의하여 동시에 고려하면, 파이프의 단면에 작용하는 최대 수직합응력은 압축응력으로서 2721 kg/cm^2 로 계산된다.

3.4 파이프 가로방향 해석

공벽보호관 주변압반의 수평응력은 파이프의 단면을 가로지르는 방향으로 작용하여 공벽보호관을 압착하는 역할을 한다. 본 연구에서는 공벽보호관이 위치하는 중앙지주의 중심선을 따라 발생하는 수평응력의 크기를 FLAC

Table 4. Maximum horizontal stress along the gas well around coal seam.

| Excavating step | Initial | Entries | Panel #1 | Panel #2 |
|------------------------------|---------|---------|----------|----------|
| Stress (kg/cm ²) | 42 | 58 | 63 | 69 |

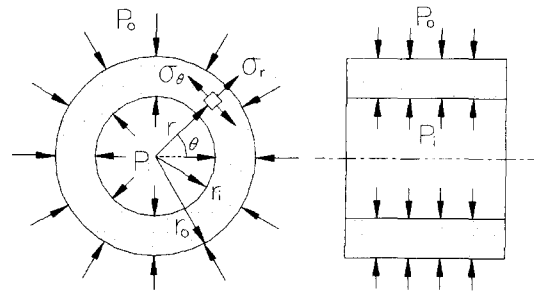


Fig. 8. Stress condition of gas well by section.

해석을 통해 조사하였다. 이때 탄층 주변의 최대 수평응력은 탄층과 하반의 경계지점에서 발생하였으며, 굴착단계에 따라 응력은 증가하였다. 최대수평응력의 크기는 Table 4와 같다.

수평응력이 공벽보호관의 안정성에 미치는 영향을 고려할 때 Fig. 8과 같은 후속원통이론을 도입할 수 있다. 여기서 σ_r 은 파이프의 반경방향 응력이고 σ_θ 는 접선방향 응력으로서 다음과 같다(Duvall, 1967).

$$\sigma_r = \frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} + \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \tag{4}$$

$$\sigma_\theta = -\frac{r_i^2 r_o^2 (P_o - P_i)}{(r_o^2 - r_i^2) r^2} + \frac{P_i r_i^2 - P_o r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} \tag{5}$$

여기서, r_o : 파이프의 외반경

r_i : 파이프의 내반경

P_o : 파이프의 외부압력

P_i : 파이프의 내부압력

공벽보호관 주위에 과도한 외부압력이 작용하면 파이프는 압착 파괴될 수 있다. 만약 공벽보호관 내부의 압력(P_i)을 무시한다면 최대응력은 파이프 내벽($r = r_i$)에서 발생하는 접선응력으로서 다음과 같다.

$$\sigma_{\theta,max} = \frac{2r_o^2}{r_o^2 - r_i^2} P_o \tag{6}$$

한편, 공벽보호관의 압착저항은 지반의 외부압력 이외에도 파이프의 외경 대 두께의 비, 파이프의 재질 등에 의해 좌우되는 복잡한 문제이므로, 이를 간단히 하기 위해 본 연구에서 고려된 외경 10¼ in., 두께 0.4 in., API J-55 강철 파이프에 대해서만 해석하기로 한다. 즉, 이 수치 자료들과 Table 4의 최대 수평응력인 69 kg/cm^2 를 (6)식에 대입하면 최대 접선응력은 963 kg/cm^2 로 계

산된다. 이는 허용응력의 약 25%에 해당한다.

한편, 위의 접선응력은 공벽보호관과 시추공벽을 접착하는 시멘트의 접착강도를 초과할 수 있다. 만약 시멘트가 파괴된다면 파괴지점의 공벽보호관은 공벽과 분리되며, 특히 시멘트의 파괴가 점진적으로 진행하여 공벽보호관이 완전 분리된다면, 파이프의 자중으로 인해 편칭 파괴가 발생할 가능성도 있다. 그러나, 이는 가장 불리한 조건을 가정한 것이며, 이에 관한 보다 자세한 연구가 요망된다.

3.5 종합 해석

Fig. 9(a)는 수직파이프의 내벽에 위치한 미소요소를 나타낸 것이며, Fig. 9(b)는 미소요소에 작용하는 응력을 나타낸 것이다. 여기서 xy평면상의 수직응력 σ_n 은 압축 응력으로서 3.3절의 파이프 축방향 해석으로부터 구해진 최대 수직합응력에 해당되며 2721 kg/cm²이다. 또한, xz 평면상에 작용하는 σ_θ 는 인장응력으로서 지반의 수평응력에 기인하여 발생된 것이며, 3.4절에 의하면 963 kg/cm²이다. 한편, 공벽보호관 내부의 압력을 무시하였으므로 yz평면상의 응력은 0이다. 따라서, 이 요소는 Fig. 9(c)와 같이 yz면에 대한 평면응력상태로 간주할 수 있다.

이 요소내의 θ 각도에 위치한 면에서 발생하는 수직응

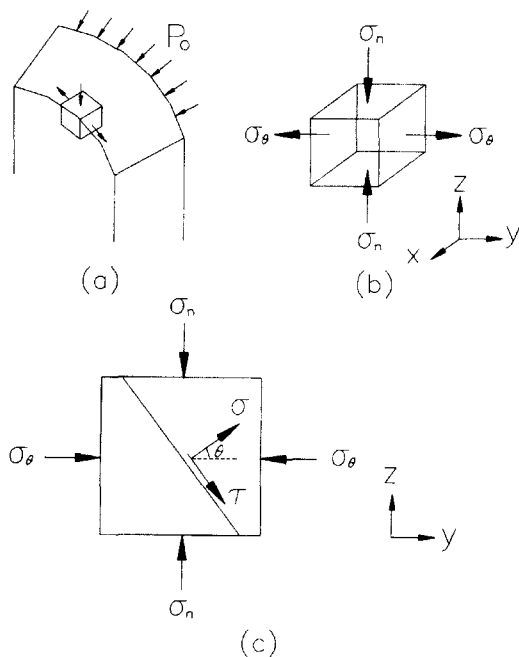


Fig. 9. Stress condition of an gas well element.

력(σ)과 전단응력(τ)은 다음과 같은 탄성학의 기본 원리로부터 구해질 수 있다.

$$\sigma = \frac{\sigma_\theta + \sigma_n}{2} + \frac{\sigma_\theta - \sigma_n}{2} \cos 2\theta \quad (7)$$

$$\tau = \frac{\sigma_\theta - \sigma_n}{2} \sin 2\theta \quad (8)$$

이를 이용하여 이 요소의 최대주응력 및 최소주응력을 구하면 각각 2721 kg/cm²(압축), 963 kg/cm²(인장)이며, 이 최대주응력은 본 연구에서 고려된 강철재료 허용응력 3850 kg/cm²의 71%에 해당한다.

한편, 강철재료의 전단강도는 항복강도와 일반적으로 다음의 관계가 있다.

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

이에 의하면 API J-55강철의 경우 허용응력은 3850 kg/cm²이므로 전단허용응력은 2223 kg/cm²이 된다. 이제 (8)식을 이용하여 임의의 면에서 발생하는 전단응력의 최대값을 구해보면 1842 kg/cm²이 계산된다. 이는 허용치의 약 83%에 해당되는 것이다.

따라서, 이상의 해석으로 인하여 본 연구에서 고려된 수직파이프는 안정상태에 있는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 강철재료로서 Table 2에 나타난 최하등급인 API F-25를 사용하거나 두께가 얇은 파이프를 사용한다면 안정성이 결여될 것이다.

4. 비대칭 굴착공동의 영향

4.1 해석 대상

3절에서 언급한 바와 같이 폭 200 ft의 보안탄주는 가스생산정을 안정하게 유지하는 것으로 판단된다. 따라서, 보안탄주의 규격은 좀더 작게 조정되어도 가능할 것으로 생각된다. 한편, 최근에 주로 사용되고 있는 3-entry system에서는 진입개도가 3개이고 지주가 2개이므로 굴착공동이 파이프를 중심으로 비대칭적으로 위치하게 된다.

본 연구에서는 이러한 3-entry system에 대한 수직파이프의 안정성을 검토하기 위하여 3절과 유사한 해석을 실시하였다. 즉, Fig. 3과 같은 해석 영역의 일부를 수정하여 새로운 요소망을 구성하였는데, Fig. 10은 이 중에서 연속지주 부근을 발체하여 나타낸 것이다. 여기서 가스생산정이 위치한 중앙지주의 폭은 30.5 m로 Fig. 3(b)와 동일한 반면에 보안탄주의 전체 폭은 45.8 m(150 ft)

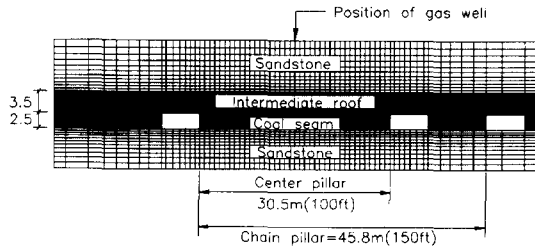


Fig. 10. Selected FD elements around coal seam.

이다. 또한 가스생산정은 3절과 마찬가지로 중앙지주의 중심선상에 위치한다.

4.2 안정성 해석

본 해석의 주요 결과를 요약하여 제시하면 다음과 같다. 단, 파이프는 3절과 동일한 재료 및 규격을 가진 것으로 고려하였다.

(1) 파이프 축방향 해석

- 최대수직변형률: 1030×10^{-6}
→ 최대수직응력: 2163 kg/cm^2
- 최대곡률: -4.2×10^{-5}
→ 최대휨응력: 1204 kg/cm^2
- ∴ 최대합응력(σ_n): 3367 kg/cm^2 (압축)

(2) 파이프 가로방향 해석

- 최대수평응력: 70 kg/cm^2
→ 최대접선응력(σ_θ): 977 kg/cm^2 (인장)

(3) 종합해석

- 최대수응력: 3367 kg/cm^2
→ 허용응력의 87%
- 최대전단응력: 2172 kg/cm^2
→ 허용응력의 98%

이상과 같이 폭 150 ft의 보안탄주도 가스생산정을 안정하게 유지할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 지반의 강도 불확실성, 불연속면 등 현지 암반의 제반성질을 감안할 때 이 규격의 보안탄주가 수직파이프의 안정을 명백히 보장한다고 확인할 수는 없는 것으로 생각된다.

5. 파괴 사례

5.1 사례 내용

Fig. 11은 미국 ○○탄광의 연속지주 내에 위치한 가스생산정을 나타낸 것이다. 이 광산은 3-entry system

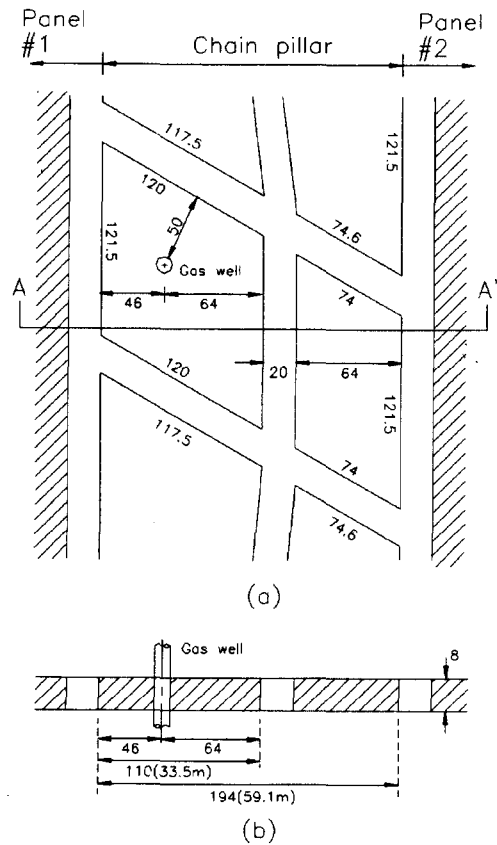


Fig. 11. View of 3-entry system of the case study (Unit.ft).

을 적용하며, 진입갱도의 크기, 탄층두께, 패널 폭, 지층 분포상황 등은 3절과 동일하다. 중앙지주의 폭은 33.5 m (110 ft)이며 보안탄주의 전체폭은 59.1 m (194 ft)이다. 이 가스생산정은 Fig. 11과 같이 중앙지주의 한가운데 위치한 것이 아니라 1번 패널쪽으로 약간 치우쳐 있었다.

가스생산정에서 생산관의 직경은 3 in.이고 심도는 916 m (3004 ft)이다. 이는 6¼ in., 8¼ in., 10¼ in. 직경의 공벽보호관에 의해 서로 다른 심도로써 차례로 둘러싸여 보호되었다. 최외각 공벽보호관은 직경 10¼ in.로서 탄층 하부 약 5.2 m (17 ft) 지점까지 설치되었다. 생산정의 위치에서 탄층의 심도는 3절과 동일한 237.5 m (780 ft)이다.

이 가스생산정은 장벽식 채탄작업을 실시하던 중에 파괴되었으며, 파괴이후 시추공카메라를 이용하여 조사한 결과 파괴지점은 탄층의 직하부 내지는 최외각 공벽보호관의 끝단이었다.

5.2 안정성 해석

본 연구에서는 이 가스생산정의 안정성을 검토하기 위해 3절과 유사한 해석을 실시하였다. 본 해석의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 파이프 축방향 해석
 - 최대수직변형률: 905×10^{-6}
 - 최대수직응력: 1901 kg/cm^2
 - 최대곡률: -5.7×10^{-5}
 - 최대휨응력: 1634 kg/cm^2
 - ∴ 최대합응력(σ_n): 3535 kg/cm^2 (압축)
- (2) 파이프 가로방향 해석
 - 최대수평응력: 69 kg/cm^2
 - 최대접선응력(σ_θ): 963 kg/cm^2 (인장)
- (3) 종합해석
 - 최대주응력: 3535 kg/cm^2
 - 허용응력의 92%
 - 최대전단응력: 2249 kg/cm^2
 - 허용응력의 101%

이상의 해석 결과를 보면 탄층의 직하부 지점에 위치한 파이프의 내벽단면에서 발생한 최대전단응력 2249 kg/cm^2 는 파이프 재료의 전단허용응력 2223 kg/cm^2 를 초과하게 된다. 따라서 이 파이프는 파괴되었던 것으로 생각된다.

6. 영향요소의 비교

수직 파이프의 역학적 안정에 영향을 미치는 요소로서는 지반의 수직거동, 수평거동, 수평응력 등이 있다. 지반의 수직거동은 파이프의 압축변형 및 압축응력을 발생시키며, 수평거동은 파이프의 굽곡변형 및 휨응력을 발생시킨다. 이 응력들은 중첩의 원리에 의하여 파이프의 단면에 대한 수직합응력으로서 작용한다. 또한, 지반의 수평응력은 파이프를 압착시켜 접선응력을 발생시킨다.

Table 5는 3, 4, 5절에서 각각 수행한 세 가지 해석의 결과를 비교한 것이다. 세 가지 사례는 보안탄주의 규격 및 가스생산정의 위치만 서로 다를뿐 제반사항은 모두 같다. 세 가지 사례 중에서 파괴가 일어난 것은 3번 경우이다. Table 5에서 가장 주목해야 할 것은 파이프의 곡률에 의해 발생한 응력이다. 즉, 다른 응력성분은 세 가지 사례에 대해 거의 비슷한 반면에 3번 경우의 휨응력은 상대적으로 매우 크다.

Fig. 12는 세 가지 사례에 대한 곡률분포를 비교한 것으로 3번 경우에서 최대 곡률이 나타남을 볼 수 있다. 이는 파이프가 중앙지주의 중심부에 위치하지 않기 때문에 일어난 것으로 판단되는데, 이로 인해 3번 경우는 보안탄주의 폭이 2번 경우에 비하여 매우 큼에도 불구하고 파이프의 파괴를 초래한 것으로 생각된다. 따라서, 파이프의 역학적 안정성을 최대한 높이기 위해서는 파이프를 보안탄주의 중심부에 위치시켜야 함을 알 수 있다. 또한, 2

Table 5. Comparison of three case studies.

| Case No. | 1 | 2 | 3 |
|--|----------------------------|-----------------|----------------|
| Description | Longwall system 4-entry | 3-entry | 3-entry |
| Width of chain pillar | 61 m(200 ft) | 45.8 m(150 ft) | 59.1 m(194 ft) |
| Width of center pillar | 30.5 m(100 ft) | 30.5 m(100 ft) | 33.5 m(110 ft) |
| Gas well location in pillar | center | center | not center |
| Normal stress (σ_n) ¹⁾ | Calculated by axial strain | 1890 | 2163 |
| | Calculated by curvature | 831 | 1204 |
| | Sum ²⁾ | 2721 | 3367 |
| Tangential stress ³⁾ (°) | 963 | 977 | 963 |
| Maximum principal stress | 2721(71%) ⁴⁾ | 3367(87%) | 3535(92%) |
| Maximum shear stress | 1842(83%) | 2172(98%) | 2249(101%) |
| Results | stable | possibly stable | failure |
| Reference | chapter 3 | chapter 4 | chapter 5 |

1) Unit of all stresses is kg/cm^2 .
 2) The induced normal stresses are compressive.
 3) The induced tangential stresses are tensile.
 4) Numerical values in % are the percent to the allowable stresses

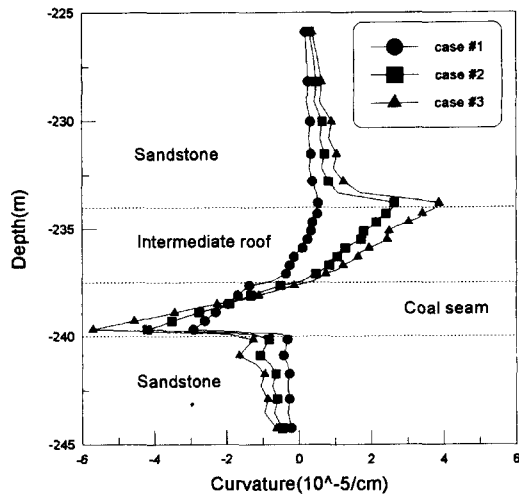


Fig. 12. Curvature distribution in three case studies when panel #1 is excavated.

변 경우의 안정성을 감안하면, 파이프의 위치설정이 완벽하다는 조건하에서 보안탄주의 폭은 200 ft보다 약간 감소되어도 가능할 것으로 생각된다. 그러나 본 해석은 파이프의 제원을 특정시켰으므로 일반적인 적용을 위해서는 보다 자세한 연구가 필요하다.

7. 결 론

본 연구에서는 지하공간의 굴착에 따른 수직파이프 구조물의 변형거동 및 안정성을 세 가지 사례에 대해 수치해석적으로 검토하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

1. 지반의 수직거동은 파이프의 압축변형 및 압축응력을 발생시키며, 수평거동은 파이프의 굴곡변형 및 휨응력을 발생시킨다. 또한, 지반의 수평응력은 파이프를 압착시켜 접선응력을 발생시킨다.
2. 탄층 심도가 237.5 m(780 ft)일 때, 4개의 진입갱도를 가진 장벽식 채탄광산에서 폭 61 m(200 ft)인 연속지주는 중앙에 위치한 가스생산정을 안전하게 보호한다. 또한, 폭 45.8 m(150 ft)인 연속지주를 가진 3개 진입갱도 시스템일 경우에도 발생응력은 허용응력 내에 존재한다.
3. 실제로 파괴가 발생한 가스생산정의 안정성을 검토한 결과, 발생된 전단응력이 강철 재료의 허용응력을 초

과하였다.

4. 세 가지 사례를 비교하여 파이프의 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 고찰하였는데, 이는 지반의 수평거동에 따른 휨응력으로 나타났다.

5. 본 연구에서는 파이프의 제원을 특정시켰으므로 보안탄주의 규격제정 및 일반적인 적용을 위해서는 보다 자세한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 하반기 한국과학재단 해외 Post-Doc. 지원사업에 의하여 연구되었으며, 연구비를 지원해 준 한국과학재단에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 옥치남, 잔성교, 장기태, 1989, 매설흡관의 설계허중 결정에 관한 연구, 대한토질공학회, 5.2, 19-32.
2. 김형식, 김우식, 방인완, 오규환, 홍성호, 1998, 매설 천연가스배관의 지반침하에 의한 응력분석, 산업안전학회지, 13.2, 54-64.
3. 강주명, 1991, 석유시추공학, 서울대학교 출판부.
4. 김종우, 이희근, 1994, 심부갱도내 철재지보의 변형거동과 지보허중결정에 관한 연구, 한국자원공학회지, 31.1, 60-69.
5. 대한건축학회, 1983, 강구조 계산규준 및 해석, 9p.
6. Peng, S.S. and Luo, Y., 1988, Determination of stress field in buried thin pipelines resulting from ground subsidence due to longwall mining, Mining science and technology, Vol. 6, 205-216.
7. Dept. of Mines and Mineral Industries(DMMI), 1957, Gas well study, Pennsylvania, USA.
8. Peng, S.S. and Luo, Y., 1994, A new method for designing support area to protect surface structures over underground coal mining areas, Society for mining, metallurgy and exploration, Transactions, Vol. 294, 1927-1932.
9. Kovari, K., Amstad Ch. and Fritz, P., 1977, Integrated measuring technique for rock pressure determination, Int. Sympo. on Field Measurements in Rock Mechanics, Zurich, 289-316.
10. Timoshenko, S.P. and Gear, J.M., 1972, Mechanics of Materials, Litton Educational Publishing, Inc., 291p.
11. Obert, L. and Duvall, W.I., 1967, Rock mechanics and the design of structures in rock, John Wiley & Sons, 109p.

김 종 우



1986년 서울대학교 자원공학과, 공
학사

1988년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학석사

1993년 서울대학교 대학원 자원공
학과, 공학박사

Tel

E-mail : jwkim@chongju.ac.kr

현재 청주대학교 지구환경시스템공학부 부교수
