

원형공동의 점진적인 붕락에 따른 지표침하특성

지정배¹⁾ · 김종우²⁾

Surface Subsidence according to Progressive Collapse of Circular opening

Jeoung Bae Jee¹⁾ and Jong Woo Kim²⁾

ABSTRACT In order to investigate the effect of progressive collapse of underground circular opening on surface subsidence, laboratory model tests were performed. The modelling materials were sand which has been used as KS standard. Six test models which had respectively different depths of openings were produced. Surface subsidence and horizontal displacements were measured according to progressive collapse of underground opening. Some subsidence prediction method such as NCB method, profile function method and influence function method were considered to predict the subsidence of sand models. The profile function method approximated by Gaussian error function was finally suggested as the most appropriate to sand models.

Key words : subsidence, models, laboratory tests, underground excavation, analytical methods

초 록 : 이 연구에서는 지하공동의 점진적인 붕락이 지표침하에 미치는 영향을 조사하기 위하여, 주문진산 표준사를 이용하여 모형지반을 구성하였으며, 공동의 심도를 달리하는 6가지 모델에 대하여 실내 모형실험을 실시하였다. 여기서 공동의 심도와 붕락구간의 크기에 따른 침하발생양상을 조사하였다. 또한 NCB 방법, 지수함수를 이용한 윤곽함수법, 영향함수법 등의 침하예측방법을 이용하여 모형실험으로부터 측정된 수직 및 수평변위를 해석하였으며, 모래지반에 적합한 침하예측방법을 제안하였다.

핵심어 : 지반침하, 모델, 실험실실험, 지하굴착, 해석적 방법

1. 서 론

지하공간의 굴착으로 인하여 지표면에 나타나는 직접적인 환경문제 중의 하나는 지표 침하현상이며, 이는 광산 지역과 터널공사 지역에서 흔히 발생된다. 광산 지역의 지표침하는 대개 대규모로 나타나는데, 특히 지하자원을 개발한 후 그 채굴공간을 그대로 방치하는 붕락식 채굴법을 적용할 경우 공동 상부지반의 자중에 의한 점진적인 붕락으로 인해 지표침하가 발생된다. 국내 석탄광산은 대부분 붕락식 채굴법을 사용하였으며 그 결과 강원도 고한, 태백, 함백 등지에서 지표침하 현상이 발생되었다. 또한, 1987년 석탄 합리화 조치 이후 수많은 폐광이 발생하였으며 이들 지역에서 점진적인 침하현상이 계속적으로 발생하고 있는 실정이다.

한편, 도시 지역의 도로 및 지하철 터널 건설에 따른 지표침하는 그 크기와 영향 범위는 비교적 작지만 터널의 상부에 위치한 구조물의 안정성에 큰 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어 1993년 부산 구포 지역의 터널 건설현

장에서 발생한 갑작스런 지표침하는 상부 구조물인 철도를 파괴시켜 수많은 인명피해를 유발시킨 바 있다.

지표침하는 지하공동의 형태, 심도, 굴착방법, 지보방법 그리고 주변지반의 지질 및 지하수 조건 등 여러 가지 영향변수를 가지고 있으므로 이를 정확히 예측하는 것은 매우 어렵다. 현재 널리 사용되는 침하 예측방법으로는 현장계측에 의한 경험적인 방법, 윤곽함수와 영향함수를 이용하는 방법, 모형실험을 통한 방법, 수치해석에 의한 방법 등이 있다.

영국 석탄위원회(NCB)에서 제안한 경험적인 방법은 세계적으로 널리 사용되며 국내에서도 이회근(1983), 한봉태(1983) 등에 의해 소개된 바 있다. Peck(1969)과 Peng(1981)은 지하공동 굴착에 따른 지표침하를 예측하기 위해 각각 서로 다른 지수함수를 이용한 윤곽함수를

1)정회원, 청주대학교 대학원 지구환경시스템공학과

2)정회원, 청주대학교 지구환경시스템공학과 조교수

원고 접수일 : 1999년 12월 20일

원고 심사 완료일 : 2000년 2월 15일

제안하였으며, Knothe(1957)은 미소요소 굴착 개념에 근거를 둔 영향함수법을 제안하였다. 한편, 모형실험에 의한 방법은 침하현상을 육안으로 직접 확인할 수 있는 장점이 있지만 모형지반 제작 및 측정에 따른 실험비용이 많이 들며 현지지반을 그대로 모델링하기가 어렵다. 또한 최근 사용이 늘고 있는 수치해석 방법 역시 지반 구성모델의 개연성, 입력치의 불확실성 등과 같은 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 지하공동의 점진적인 붕락이 지표침하에 미치는 영향을 조사하였다. 이를 위해 주문진산 표준사를 이용하여 모형지반을 구성하였으며, 공동의 심도를 달리하는 6가지 모델에 대하여 실내 모형실험을 실시하였다. 또한 모형실험으로부터 직접 측정된 수직 및 수평변위를 여러 가지 침하예측 방법에 적용하여 최적의 예측방법을 제안하였다.

2. 일반사항

2.1 침하유형

지표침하는 크게 연속형 침하와 불연속형 침하로 대별된다. 연속형 침하의 대표적인 형태는 골형(trough) 침하로서, 넓은 지역에 걸쳐 완만한 경사의 침하곡선을 발생시킨다. 일반적으로 공동의 크기가 심도의 30%~60% 이상이면 공동 상부의 지반은 즉시 붕괴하여 골형 침하의 형태를 나타낸다고 알려져 있으나, 이는 상부 지반의 역학적 특성에 크게 좌우된다.

Table 1은 공동의 형태에 따른 골형 침하의 평면적 모양을 나타낸 것이다. 여기서 W_c 는 임계폭(critical width)으로서, 지하공동의 크기(공동의 폭, W 또는 공동의 길이, L)를 증가시켜도 최대침하량이 더 이상 증가되지 않을 때의 공동 폭의 임계값을 나타낸다. Fig. 1은 Table 1에서 나타난 모서리가 둥근 직사각형 침하분지의 형태를

Table 1. Plane shapes of subsidence basin over a single opening

Opening type	Size	Shape
Square	$L \leq W_c$	Circular
	$L > W_c$	Square with rounded corners
Rectangular	$L \leq W_c$	Elliptical
	$W \leq W_c, L > W_c$	Rectangular with rounded corners
	$W > W_c, L > W_c$	Rectangular with rounded corners

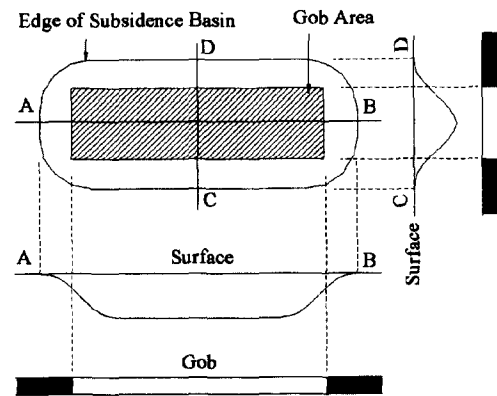


Fig. 1. Surface subsidence basin in super-critical condition(Peng and Chiang, 1984)

그림으로 나타낸 것이다(Peng, 1993).

한편, 불연속형 침하는 일부 지표구간이 지하로 함몰할 때 나타나며 흔히 함몰 침하로 불린다. 이는 골형 침하에 비해 침하량 및 경사가 커서 지표 구조물에 심각한 피해를 줄 수 있으며 예측이 곤란하다. 국내의 경우 폐탄광 지역에서 몇 건의 함몰 침하가 발생한 것으로 보고되고 있다(이정인, 1997).

2.2 침하곡선의 형태와 특징

일반적으로 침하를 결정하는 다섯 가지 요소는 다음과 같다.

- 침하(S) 및 수평변위(U) : 임의 지표지점의 수직방향 변위 및 수평방향 변위
- 경사(g) 및 변형률(ϵ) : 인접한 두 지표지점에서 지점간 거리에 대한 침하의 차 및 수평변위의 차
- 곡률(k) : 인접한 두 지표지점에서 지점간 거리에 대한 경사의 차이들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$g = \frac{dS}{dx} \tag{1}$$

$$\epsilon = \frac{dU}{dx} \tag{2}$$

$$k = \frac{dg}{dx} = \frac{d^2S}{dx^2} \tag{3}$$

골형 침하의 경우 공동의 중심부에서 최대침하량이 발생하고 여기서 멀어질수록 침하량은 점차 작아져 침하곡선은 마치 분지의 형태를 나타낸다. 공동의 크기가 임계

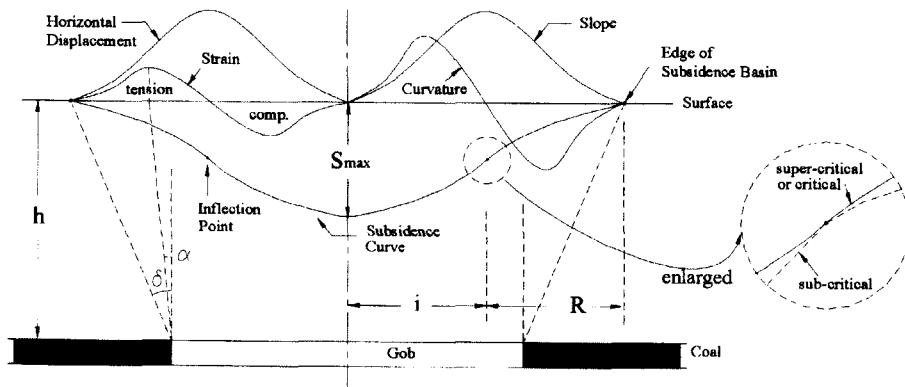


Fig. 2. The components of ground movement over critical width of extraction

폭보다 클 경우를 임계이상(super-critical) 조건이라고 하며, 그 반대 경우를 임계이하(sub-critical) 조건이라고 한다. 공동의 크기가 임계폭과 같은 임계 조건의 공동에 대한 일반적인 횡단면 침하곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 침하곡선의 형태가 공동중심부를 경계로 대칭인 점을 감안하여 Fig. 2의 우측 부분은 경사 및 곡률 곡선을 나타내었고, 좌측 부분은 수평변위 및 변형률 곡선을 함께 나타내었다.

임계 및 임계이하 조건일 경우 최대침하량(S_{max})은 공동 중심부 한 점에서만 나타나는데 비해, 임계이상 조건일 경우에는 공동 중심부 부근에 침하량이 일정한 구간이 존재한다. 또한, Fig. 2의 우측 확대 그림과 같이 침하곡선의 곡선부분은 임계 및 임계이상의 조건일 경우에는 변곡점을 경계로 대칭적인 모양을 보이며, 임계이하의 조건에서는 비대칭 모양을 보인다.

한편, Fig. 2에서 사용된 용어들에 대한 정의 및 설명은 다음과 같다.

▷ 침하분지 경계(edge of subsidence basin):

이는 침하 발생지역의 경계 지점으로서 침하가 종료되는 지표지점이다. 여기서 침하가 완전히 0이 되는 지점을 찾는 것이 현실적으로 어렵다는 점에 주의할 필요가 있다. 즉, 계측기 오차, 측정자 오차 등을 감안하여 계측기 오차한계의 2배 값을 나타내는 지점을 침하분지 경계로 정의하거나 또는 최대침하량(S_{max})의 5%에 해당되는 침하량이 발생하는 지점을 침하분지 경계로 정의하는 등의 방법이 제안되어 왔다. 또한 최근 계측기의 발달에 힘입어 Peng (1997)은 0.6% S_{max} 지점을 침하분지 경계로 정의하였다.

▷ 영향각각(angle of draw, δ):

채굴공동 경계와 침하분지 경계를 이은 직선이 수직선과 이루는 각으로서, 침하 발생지역의 범위를 결정한다.

▷ 변곡점(inflexion point):

침하곡선의 형태가 볼록에서 오목한 형태로 바뀌는 지점으로서, 여기서 침하곡선의 경사는 최대가 되며 곡률과 변형률은 0이 된다.

▷ 파괴각(angle of break, α):

채굴공동 경계와 최대 인장변형률이 발생하는 지표 지점을 이은 직선이 수직선과 이루는 각으로서, 이 지표지점은 인장균열이 발생할 가능성이 큰 지점에 해당한다.

▷ 주영향 반경(radius of major influence, R):

변곡점과 침하분지 경계사이의 수평거리를 주영향 반경이라고 하며, 이는 동적 침하가 발생하여 영향을 미치는 영역(주영향 영역)의 크기를 결정한다.

2.3 침하영향요소

석탄채굴에 따른 지표침하에 관한 기존의 연구성과들에 의하면 침하에 영향을 미치는 요소는 다음과 같다 (Peng, 1993).

▷ 탄층 두께

탄층이 두꺼울수록 침하는 크다

▷ 암반 물성

주변암반이 강할수록 침하는 작고 침하곡선은 완만해지며 영향면적은 커진다.

▷ 공동 크기

공동의 폭이 임계폭보다 작을 경우 공동의 크기가

커질수록 침하는 증가한다.

▷심도

공동의 심도가 증가할수록 침하는 작아지고 침하곡선은 완만해진다.

▷지형

경사진 지표면일수록 침하는 증가하며, 특히 수평변위는 크게 증가한다.

이외에도 지반의 함수율, 불연속면의 분포, 지보 방법, 탄층 경사 등을 영향요소로 들 수 있다. 한편, Peck(1969)은 실드터널 굴착의 침하 사례조사에서 사질 지반보다는 점토질 지반에서 침하영역의 범위가 크며, 특히 사질 지반에서는 상대밀도가 클수록 침하영역이 커진다고 보고하였다.

3. 침하예측이론

3.1 NCB의 경험적 방법

장벽식 채탄법은 일정한 탄폭을 가진 수평 탄층에 적합한 것으로서 이때 발생하는 지표침하는 대부분 예측이 가능하다. NCB는 영국의 주요 탄전지역에 대해 1950년부터 1965년 사이에 수많은 침하측정자료들을 수집하였으며 이를 이용하여 1975년에 침하관련 지침서를 발간하였다. 이에 따르면 채굴대상 석탄의 탄폭과 심도가 주어지면 침하의 크기 및 범위를 단순한 계산과 작도에 의해 결정할 수 있다.

이 방법은 현재에도 세계적으로 널리 사용되고 있는데, Liu(1981), Karmis(1985), Luo(1989) 등은 NCB 법을 개선하기 위하여 암반의 종류 및 강도 등을 감안하는 개선안을 제안하기도 하였다.

한편, 이 방법은 장벽식 채탄법을 사용할 때에 적용될 수 있는 것으로서 급경사 탄층에 대해 위경사승봉락법 또는 중단봉락법을 적용하는 국내 탄광에 이 방법을 그대로 적용할 수는 없을 것으로 생각된다.

3.2 윤곽함수법

측정된 침하자료들을 특정한 수학적 함수에 적합시킴으로써 침하곡선을 단순화할 수 있다. 이때 이 함수를 윤곽함수(profile function)라고 한다. 이와 같이 횡단면 침하곡선을 하나의 함수로 정의하고, 또 함수를 구성하는 계수들을 적절히 구하고 나면 측정자료들로부터 비교적 정확히 침하를 예측할 수 있다. 현재까지 전세계 주요 탄전에 대해 경험적으로 구해진 윤곽함수는 20개 이상이

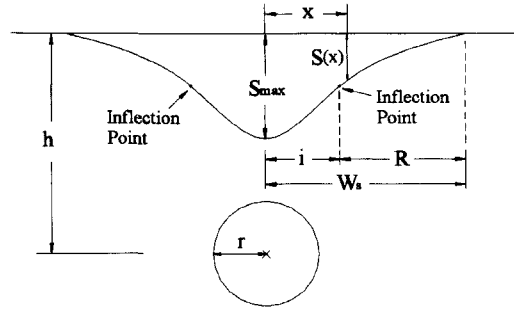


Fig. 3. Shape of subsidence basin as approximated by Gaussian error function

나 된다(Peng, 1993). 그러나 이 방법은 개별적인 장소에 따른 영향이 크고 임계이상 조건일 경우 좋지 않은 결과를 낼 수 있는 단점이 있다.

Peck(1969)은 연약지반내 터널굴착에 대한 침하 사례조사들로부터 침하곡선의 형태가 대부분의 경우 Fig. 3과 같은 가우스 오차함수와 근접하다고 하였다. 이 곡선의 방정식은 다음과 같다.

$$S(x) = S_{max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \quad (4)$$

여기서, S(x) : 어느 지표지점에서의 침하량

S_{max} : 터널 중심선에서의 최대 침하량

x : 터널 중심선으로부터 수평거리

i : 터널 중심선으로부터 변곡점까지 수평거리

Whittaker(1989)에 의하면 이 윤곽함수는 당초 Martos(1958)에 의해 Hungarian profile function이라는 이름으로 광산지역에 대해 제안되었던 것이다. Peck(1969)은 이를 터널 분야에 적용하였고, 그 이후로 Peck의 학문적 지명도에 따라 터널 분야에서 이 윤곽함수가 널리 사용되고 있다고 생각된다.

한편, 횡단면 침하곡선이 원래 지표면과 이루는 면적은 (4)식을 적분함으로써 구해진다.

$$Area = \sqrt{2\pi}iS_{max} \quad (5)$$

(4)식을 이용하여 침하예측을 하기 위해서는 먼저 상수 i를 결정해야 하는데, 이는 (5)식으로부터 구해질 수 있다. 한편, 침하에 따른 지표면의 경사와 곡률은 각각 (1), (3)식에 의해 다음과 같이 표시된다.

$$g(x) = S(x) \cdot \left(-\frac{x}{i^2}\right) \quad (6)$$

$$k(x) = S(x) \cdot \left(\frac{x^2 - i^2}{i^4} \right) \quad (7)$$

여기서 경사가 최대가 되는 지점은 (6)식을 미분하여 구해지며, 곡률이 최대가 되는 지점은 (7)식을 미분하여 구해진다. 실제로 이들 지점은 각각 $x=i$, $x=\sqrt{3}i$ 이다.

한편, Peng(1981)은 여러 가지 문헌조사로부터 다음과 같은 지수함수를 새로운 윤곽함수로 제안하였다.

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-c\left(\frac{x}{W_s}\right)^d\right) \quad (8)$$

여기서 W_s 는 Fig. 3과 같이 공동 중심과 침하분지 경계사이의 거리로서 침하분지의 폭의 절반에 해당하며, c , d 는 회귀분석으로부터 구해지는 상수이다. (8)식을 변형하면 다음과 같다.

$$\ln\left(-\ln\left(\frac{S(x)}{S_{\max}}\right)\right) = \ln c + d \ln\left(\frac{x}{W_s}\right) \quad (9)$$

$$\text{여기서, } Y = \ln\left(-\ln\left(\frac{S(x)}{S_{\max}}\right)\right)$$

$$X = \ln\left(\frac{x}{W_s}\right)$$

라고 두면 (9)식은 다음과 같은 1차 함수로 표시되며, 이때 $A = \ln c$, $B = d$ 이다.

$$Y = AX+B \quad (10)$$

이를 이용하여 회귀분석을 실시하면 회귀 결정계수 (R^2)와 c , d 값을 구할 수 있으며, (8)식에 의해 침하량 $S(x)$ 를 예측할 수 있다.

한편, (1), (3)식에 의해 지표면의 경사와 곡률 곡선을 각각 구하면 다음과 같다.

$$g(x) = S(x) \cdot \left(-\frac{cd}{W_s} \left(\frac{x}{W_s}\right)^{d-1} \right) \quad (11)$$

$$k(x) = g(x) \cdot \left(\frac{d-1}{x} - \frac{cd}{W_s} \left(\frac{x}{W_s}\right)^{d-1} \right) \quad (12)$$

3.3 영향함수법

Knothe(1957)과 Litwinski(1957)은 미소요소 굴착 개념과 중첩의 원리를 이용한 침하예측 방법을 동시에 제안하였다. Fig. 4는 심도 h 에 위치한 미소요소 dA 를 굴착하였을 때 이에 따른 지표면의 영향을 함수관계로 표시한 것으로서, 미소요소의 직상부 지표면에 가장 큰 영향이 미치고 여기서 멀어질수록 영향값은 작아진다.

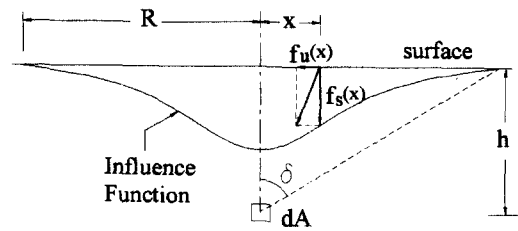


Fig. 4. An Example of influence function

Knothe는 여러 가지 사례조사로부터 이 함수가 대부분 가우스 함수의 형태임을 보였다.

영향함수에 의한 침하 예측방법은 침하, 경사, 곡률 이외에도 수평변위, 변형률 등을 모두 구할 수 있는 수학적 모델이지만, 공동과 지표면 사이의 지반이 침하 후에도 체적변화가 없어야 한다는 가정과 복잡한 수치적분의 과정을 포함하고 있는 단점이 있다. 그러나 최근 컴퓨터의 발달로 인해 사용이 증가되고 있으며, Luo(1989)는 이 방법과 최소자승법을 이용한 프로그램을 개발하기도 하였다.

최근 영향함수법에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며 여러 가지 영향함수가 제안되고 있다. Knothe의 확률적 영향함수를 근거로 하여 장벽식 석탄개발에 대해 가장 널리 사용되는 침하 영향함수는 다음과 같다(Peng, 1993, Fig. 4 참고).

$$f_u(x) = \frac{S_{\max}}{R} \cdot \exp\left(-\pi\left(\frac{x}{R}\right)^2\right) \quad (13)$$

여기서, x : 미소요소와 침하계산지점사이의 수평거리
 R : 주영향반경

한편, 초점 이론(focal point theory)에 의하면 수평변위의 영향함수는 다음과 같다.

$$f_u(x) = \frac{2\pi S_{\max}}{Rh} \cdot x \cdot \exp\left(-\pi\left(\frac{x}{R}\right)^2\right) \quad (14)$$

다음으로 중첩의 원리를 고려하면 어느 지표지점에서 의 침하 및 수평변위는 각각 (13), (14)식을 적분하여 구해질 수 있다.

$$S(x) = \frac{S_{\max}}{R} \int_a^b \exp\left(-\pi\left(\frac{x}{R}\right)^2\right) dx \quad (15)$$

$$U(x) = \frac{2\pi S_{\max}}{Rh} \int_a^b x \cdot \exp\left(-\pi\left(\frac{x}{R}\right)^2\right) dx \quad (16)$$

여기서 적분구간 a , b 는 굴착공동의 좌우 경계 좌표로

서 x 가 국부좌표계인 반면에 a, b 는 전체좌표계에 의한 것임에 주의할 필요가 있다. 한편, Peng(1993)은 적분구간을 결정할 때 공동경계와 변곡점 사이의 거리를 고려하는 방법을 제시하기도 하였다. 또한, 이 관계식들은 모두 횡단면 침하곡선에 대한 것이며, 평면적 영향함수에 대해서는 설명을 생략한다.

한편, (15), (16)식은 이론해가 구해지지 않는 적분형태이므로 수치적분 과정을 도입해야 하며, 이때 다음과 같은 Simpson 법칙을 사용할 수 있다.

$$F = \frac{\Delta x}{3} (f_0 + 4 \sum f_{\text{odd}} + 2 \sum f_{\text{even}} + f_n) \quad (17)$$

또한, 경사, 변형률, 곡률에 대한 관계식은 각각 (1), (2), (3)식을 이용하여 (13), (14)식으로부터 구해질 수 있다.

한편, 장벽식 석탄광산은 지하 수평 탄층을 넓은 범위로 굴착하는 것이므로 원형터널 굴착과는 개념이 다르다. Knothe(1957)은 원형터널을 굴착할 때 발생하는 횡단면 침하량에 대한 영향함수로서 다음을 제시하였다.

$$f_w(x) = \frac{w_0}{R} \cdot \exp\left(-\pi \left(\frac{x}{R}\right)^2\right) \quad (18)$$

여기서, w_0 는 침하곡선이 지표면과 이루는 면적을 터널직경으로 나눈 값이다.

4. 실험장치 및 방법

4.1 실험장치와 실험모델

본 연구에서는 지하공동의 점진적인 붕락이 지표침하에 미치는 영향을 조사하기 위하여 주문진산 표준사를 이용한 실내 모형실험을 실시하였다. 이를 위해 두께 5 mm 인 투명 아크릴 판을 사용하여 가로 800 mm, 세로 600 mm, 높이 600 mm 인 토조를 제작하였다. 여기에 모래를 일정한 상대밀도를 가지도록 하여 채워 넣었으며 토조 측면에는 외경 114 mm 인 PVC 파이프 2개를 모형체 내에 수평으로 설치하였다. 한편, 공동의 점진적 붕락을 재현하기 위해 설치된 2개의 파이프 중 한 개는 고정시켰으며 다른 한 개는 수평이동이 가능하도록 하였다. Fig. 5는 실험장치를 나타낸 것이다.

본 실험의 모형지반으로 사용된 시료는 공기 건조된 주문진산 표준사로서 입도분포가 좋은 균등한 중립질 모래이다. 이를 실험 재료로 선정하 이유는 일반적으로 사

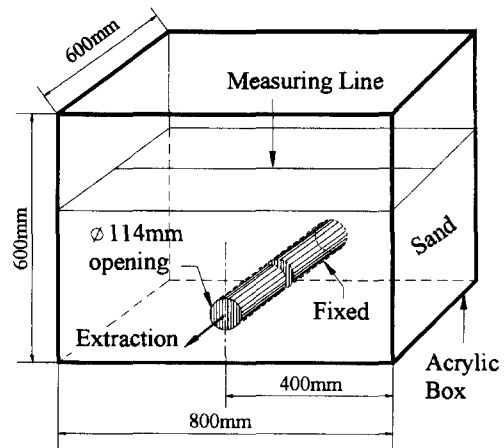


Fig. 5. Model test apparatus

Table 2. Properties of modelling material

Properties	Values	
Specific gravity	2.6	
Dry density(g/cm ³)	γ_{dmin}	1.384
	γ_{dmax}	1.682
Friction angle(°)	at Dr = 50%	38.8
	at Dr = 60%	41.5
	at Dr = 70%	42.3

질지반에서 침하의 피해가 크며, 이 모래시료에 대해서는 국내에서 물성 실험이 비교적 많이 이루어져 있기 때문이다. Table 2는 이 시료의 기본 물성을 나타낸 것이다 (조영복, 1995).

한편, 본 실험의 모형지반을 제작할 때 상대밀도를 일정하게 조절하기 위해서 강사법을 사용하였으며, 제작된 모형체의 상대밀도는 56.6%이고, 건조단위중량은 1.53 g/cm³이다.

또한, 본 연구에서는 굴착되는 공동의 심도가 지표면

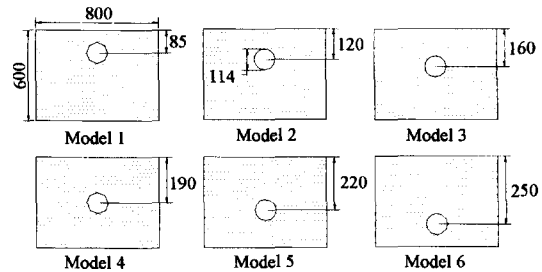


Fig. 6. Six different types of test models (Unit : mm)

의 침하에 미치는 영향을 조사하기 위해 Fig. 6과 같은 6가지 실험모델을 구성하고 각 모델별로 점진적 붕락 실험을 수행하였다. 각 모델의 심도는 1번 모델의 경우 85 mm이고, 2번은 120 mm, 3번은 160 mm, 4번은 190 mm, 5번은 220 mm, 6번은 250 mm 이다.

4.2 실험방법

제작된 6가지 모델에 대하여 각각 모형체내에 삽입된 PVC 파이프를 수평방향으로 2 cm 씩 단계적으로 뽑아냄으로써, 공동의 점진적 붕락에 따른 침하를 유도하였으며, 이때 발생하는 지표면의 횡단면 침하량을 단계별로 측정하였다. 각 단계별 인발 후 붕락에 따른 변위가 더 이상 일어나지 않을 때까지 충분한 시간이 경과한 후에 침하를 측정하였으며, 각 모델의 최대 인발 길이는 140 mm 이다. 한편, PVC 파이프 내부는 석고와 모래의 혼합물로 채워 넣어졌고, 파이프를 인발할 때 기계장치 대신에 인력을 사용하였으며, 이에 따라 인발력을 미세하게 조절하지는 못하였지만 실험중 모래가 급작스럽게 거동하지 않도록 최대한 주의하여 실험을 실시하였다.

침하량을 측정하기 위해 특수 고안된 측정침이 사용되었는데 이는 토조의 상부면에 위치한 고정 막대기에 실로 연결되었다. 측정은 10 mm 간격으로 공동 축에 수직 방향인 측정선을 따라 배치하였으며 침하곡선의 대칭성을 감안하여 공동의 우측 반 횡단면에 대해서만 측정을 실시하였다.

한편, 지표면의 수평변위를 측정하기 위하여 염색된 모래를 사용하였다. 즉, 당초 모형지반을 제작할 때 지표면에 염색된 모래를 공동 축 방향으로 띠 모양으로 배치하고, 침하에 따라 발생하는 염색 모래의 수평방향 변위



Fig. 7. Subsidence and horizontal displacement with measuring device

를 버어니어 캘리퍼스도 직접 측정하였다. Fig. 7은 침하 종료 후의 사진으로서 이동된 염색 모래와 측정침의 모습을 보여준다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 모델별 침하발생양상

6가지 실험모델에 대하여 원형공동의 붕락길이를 2 cm 씩 증가시킬 때 발생하는 횡단면 지표침하를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 횡축은 공동 중심으로부터의 수평거리이며, Fig. 8의 모든 침하곡선은 대칭성에 의하여 공동의 우측 부분만이 도시되었다. Fig. 8(a)의 모델 1의 경우 붕락길이 2 cm 일 때 발생된 최대침하량은 공동 중심부의 상부지표면에서 16.5 mm이고, 붕락길이를 10 cm 로 하였을 때 최대침하량은 65 mm 이다. 모델 1에서 붕락길이를 10 cm 이상으로 증가시켜도 측정선상 침하량의 변화는 발생하지 않았다.

한편, Fig. 8(b), (c), (d), (e), (f)는 각각 모델 2, 3, 4, 5, 6의 실험결과이다. 공동의 심도가 가장 큰 모델 6의 경우 붕락길이가 10 cm 일 때 최대침하량은 42.5 mm 이고 14 cm 붕락 후에는 59 mm로 증가되었다.

한편, 대부분의 침하곡선은 공동중심부에서 최대침하가 일어나고 여기서 멀어질수록 점차 작아지는 골형 침하의 형태를 나타내었다. 그러나 몇몇 경우는 다른 양상을 보이기도 하였는데, 예를 들어 모델 6에서 붕락길이가 2 cm 일 때는 공동중심으로부터 어느 정도 떨어진 지점에서 최대침하량이 나타나기도 하였다. 이는 공동의 심도에 비해 붕락구간이 매우 짧기 때문에 발생한 실험 오차로 생각된다.

5.2 붕락길이 및 심도가 침하에 미치는 영향

실제로 붕락길이가 증가된다는 것은 지하공동이 점진적으로 파괴되어 붕락하는 공동의 구간이 커진다는 것을 의미한다. Fig. 9는 붕락길이에 따른 모델별 최대침하량의 변화를 나타낸 것이다. 붕락길이가 커지면 최대침하량은 증가하는데, 일정 이상의 붕락길이가 되면 그 증가량은 다소 줄어들어 어느 값에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 즉, 수평 지하 공동의 붕락이 계속적으로 진행되어도 이에 따른 지표면의 최대침하량은 어느 최대값을 가지게 된다. 이는 장벽식 채탄에서 임계이상 조건의 경우와 유사하며, 이 최대값은 지반의 구성물질, 상대밀도, 지질구조 등에 기인할 것으로 생각된다.

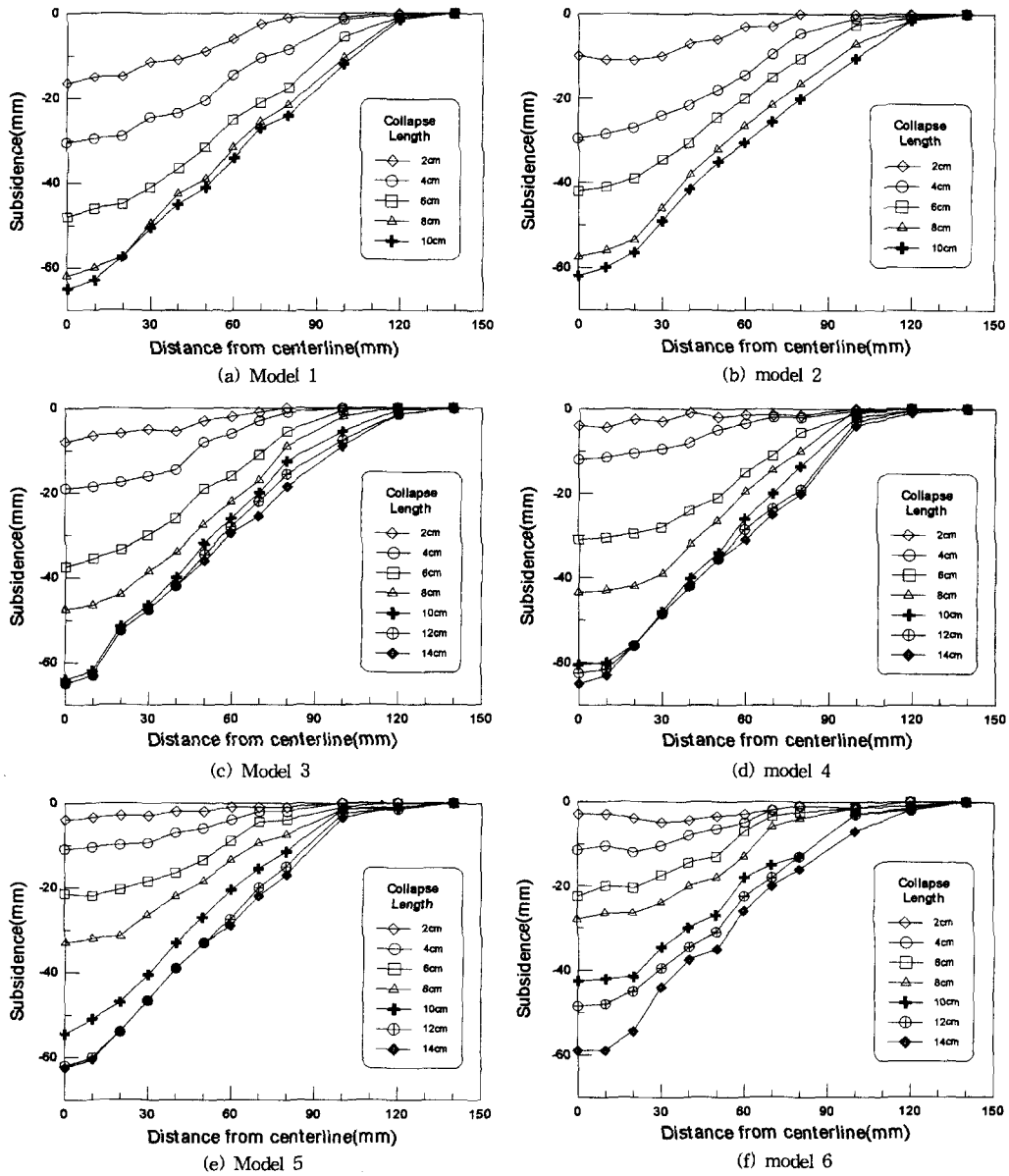


Fig. 8. Subsidence profiles according to collapse length

한편, Fig. 8의 침하곡선들이 지표면과 이루는 면적 즉, 침하분지의 단면적을 계산하여 이를 붕락길이에 대해 나타내면 Fig. 10과 같다. 작은 심도의 공동일수록 침하분지의 단면적은 크게 나타났는데, 이는 붕락 후 모래 입자의 재배치 과정과 관련한 것이다. 한편, 붕락되는 원형공동은 지름이 114 mm 이므로 단면적은 102 cm²에 해당한다. 만약 실험재료 모래가 이상적인 입도분포를 가진다면 이 면적들은 원형공동의 단면적에 수렴할 것이다.

또한, Fig. 10을 Fig. 9와 비교하면 이들이 매우 유사함을 알 수 있다. 즉, 사질지반에서 최대침하량은 침하분지의 단면적과 밀접한 관계를 가진다.

Fig. 11은 붕락길이가 8 cm 일 때 6가지 모델들의 침하곡선을 나타낸 것이다. 심도가 큰 공동일수록 침하량은 작고 침하분지의 면적도 작게 나타났다. 또한, Fig. 12는 공동 심도에 따른 최대침하량의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 횡축은 공동의 심도를 공동 직경으로 나누어 무

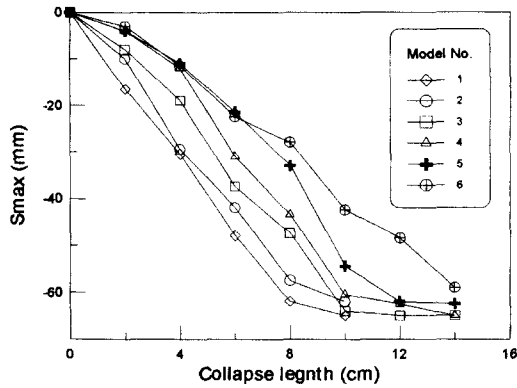


Fig. 9. Variation of maximum subsidence with collapse length

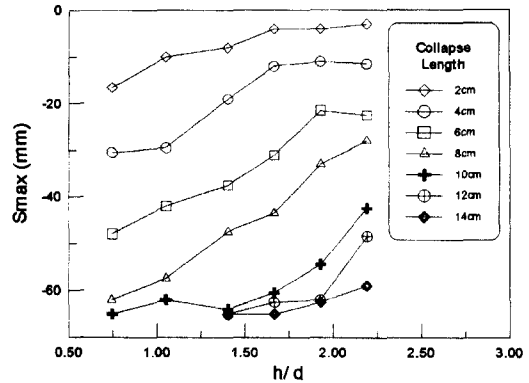


Fig. 12. Variation of maximum subsidence with opening depth

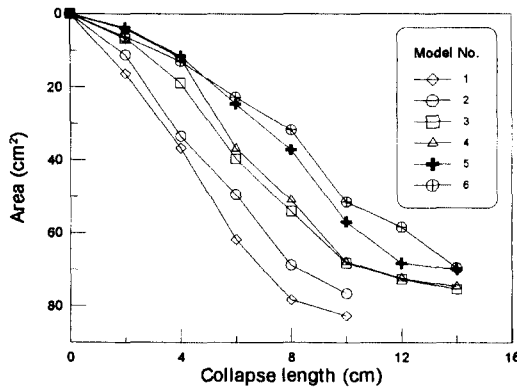


Fig. 10. Variation of subsidence basin area with collapse length

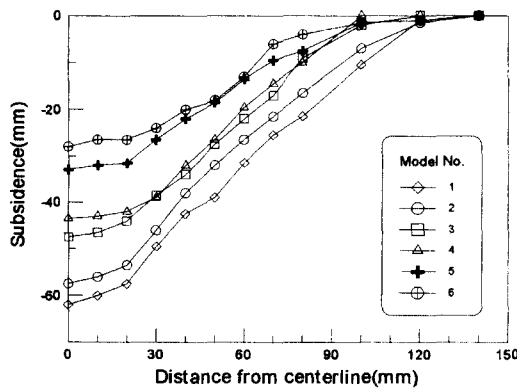


Fig. 11. Subsidence profiles when collapse length is 8 cm

차원화 하였다. 붕락길이가 증가할수록 최대침하량은 증가하며, 공동의 심도가 증가할수록 최대침하량은 감소하

는 것을 볼 수 있다. 한편, 장벽식 채탄의 침하에 대한 많은 현장 측정 연구에서 채굴공동의 심도가 증가할수록 최대침하량은 감소한다고 알려져 있는데, 이는 본 실험의 결과와 일치한다.

5.3 침하예측이론의 적용

Fig. 8에 나타난 총 38개의 침하곡선에 대하여 NCB 방법, 윤곽함수법, 영향함수법 등을 적용하여 발생 침하를 분석하였다. 이 중에서 NCB 방법에 의해 예측된 침하량은 실험결과와 상당한 차이를 나타내었는데, 이는 NCB 방법이 직사각형 수평탄층의 개발에 적용되는 것임에 비해 본 실험은 지하 원형공동이 붕락되는 것이기 때문인 것으로 생각된다.

다음으로 (4)식 및 (8)식의 윤곽함수 그리고 (18)식의 영향함수에 의해 각각 침하를 분석하였다. Fig. 13은 실측 침하와 예측 침하를 비교한 것으로 조사된 38개 침하곡선 중에서 대표적인 예로서, 심도 160 mm 인 3번 모델의 붕락길이 14 cm 일 경우에 대한 것이다. 또한, 그림에서 각 측정점에서의 실측치와 예측치 사이의 오차를 함께 나타내었다. 이 경우의 오차에 대해 구체적으로 언급하면, 침하 예측식으로 (4)식을 적용했을 때 측정점에서의 최대오차는 6.7 mm, 측정오차들의 표준편차는 3.4 mm 이고, (8)식을 적용하면 최대오차 4.8 mm, 표준편차 2.6 mm이며, (18)식을 적용하면 최대오차 5.9 mm, 표준편차 3.1 mm 이었다.

한편, 각 측정점에서의 오차값들을 각 침하곡선에서의 최대침하량으로 나누어 % 단위로 나타내면 모든 모델들에 대해 일반화된 오차분석을 수행할 수 있다. Table 3 은 측정된 총 38개 침하곡선에 대해 위의 3가지 방법으

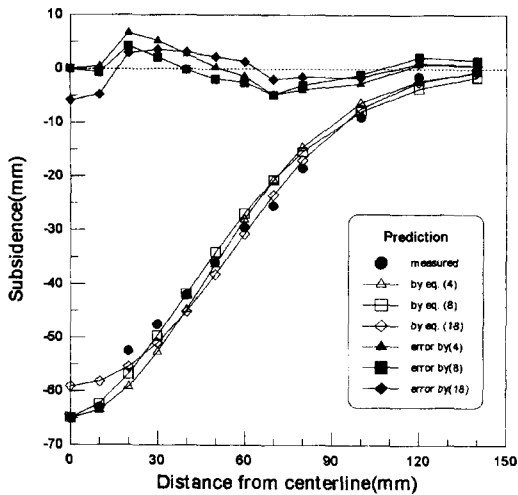


Fig. 13. Comparison of subsidence profiles of model #3 when collapse length is 14 cm

Table 3. Results of error analyses

Prediction method	Maximum error at measuring points (%)	Standard deviation of errors (%)
eq. (4)	10.9	5.5
eq. (8)	13.3	6.0
eq. (18)	14.7	7.5

로 각각 침하 예측을 실시하고 난 후, 그 예측치들과 실측치 사이의 오차 분석을 수행한 결과로서 38개 사례의 평균값을 나타낸 것이다. Table 3에서 (4)식을 침하예측식으로 적용하였을 때 가장 적합도가 높게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 (4)식을 기본 침하예측식으로 하여 침하에 따른 경사 및 곡률을 검토하였다.

5.4 경사 및 곡률

Fig. 14는 Fig. 13에서 나타낸 바 있는 3번 모델의 붕락길이 14 cm 일 때에 대하여 (6)식과 (7)식을 사용하여 구해진 경사곡선 및 곡률곡선을 나타낸 것이다. 여기서 경사는 침하곡선이 수평선과 이루는 각도를 도 단위로 표시하였다. 경사는 공동중심선으로부터 46.3 mm 인 지점에서 최대를 나타내며, 곡률은 80.2 mm 인 지점에서 최대값을 나타내었다. 경사가 최대인 지점은 침하곡선에서의 변곡점이며 Fig. 3의 i로 그 위치가 표시된다.

한편, 침하로 인해 발생하는 피해 중에서 가장 큰 문제는 지표 및 지중 구조물의 안정성이 저하되는 것이다. 일반적으로 경사는 높고 길쭉한 구조물, 또 곡률은 높고 큰 구조물의 안정성에 영향을 미친다(Peng, 1993). 그러

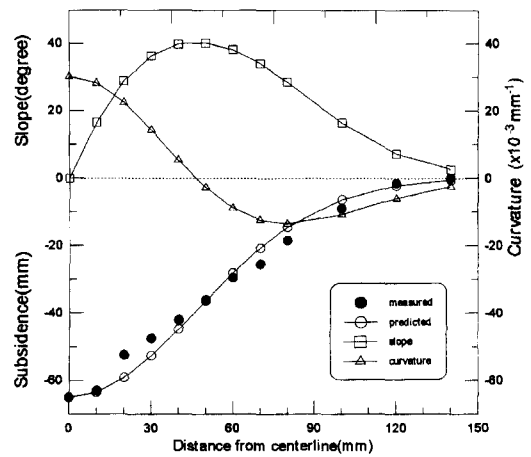


Fig. 14. Slope, Curvature and subsidence profiles of model #3 when collapse length is 14 cm

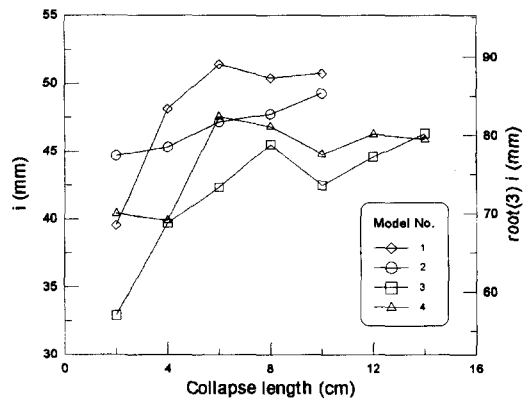


Fig. 15. Location of inflection points and maximum curvature points

나 대부분의 지표 구조물은 변형률에 가장 민감하다. 특히 기초가 부실한 블록 구조물은 지표면에 약간의 인장 변형률이 발생하여도 그 안정성이 크게 떨어진다. 한편 곡률은 변형률과 비례하므로 최대 곡률이 나타나는 지점은 최대 인장변형률의 지점과 일치한다. (7)식에 의해 최대곡률 지점은 공동중심선으로부터 $\sqrt{3} i$ 만큼 떨어진 지점이다.

Fig. 15는 4가지 모델의 변곡점 및 최대곡률 지점의 위치를 나타낸 것으로서, i는 공동중심선으로부터의 변곡점까지의 수평거리이다. 여기서 붕락길이가 증가됨에 따라 변곡점 및 최대곡률 지점은 공동중심으로부터 멀어지고 있음을 볼 수 있는데, 이는 지하공동이 점진적으로 붕락함에 따라 침하 피해영역이 커지고 있음을 암시한다.

한편, 여러 연구자들은 각기 다른 사례조사들로부터 i 가 터널의 심도(h) 및 반경(r)과 관련한다고 하였다. 이들은 다음의 관계식을 제시하였다.

$$\frac{i}{r} = a \left(\frac{h}{2r} \right)^n \quad (19)$$

여기서 a , n 는 지반특성과 관련하는 상수로서, Attewell (1977)은 각각 1, 1을, Schmidt(1977)는 1, 0.8을, Sagaseta (1986)은 1.5, 1을 보고하였다(Schlosser, 1987). 즉, 심도가 깊은 공동일수록 i 는 증가하며 그 정도는 지반의 역학적 성질과 관련한다. 그러나 본 실험에서는 이와 부합하지 않는 결과가 얻어졌는데, 이는 본 실험이 실제지반과는 다른 강사법에 의한 느슨한 모래지반에 대해 실시되었기 때문이라고 생각된다.

5.4 수평변위 및 변형률

본 실험에서는 지표면의 수평변위를 측정하기 위해 염색된 모래를 이용하였다. Fig. 16은 심도 250 mm 인 6번 모델의 붕락길이 14 cm 일 때 측정된 수평변위를 나타낸 것이다. 한편, 수평변위는 (16)식을 사용하여 예측될 수 있는데, 계산된 최대수평변위는 공동중심선으로부터 60 mm 떨어진 지점에서 약 21.7 mm 인데 비해, 측정된 것은 65 mm 지점에서 63 mm 이었다. 이와 같이 측정 변위가 예측치보다 크게 나타난 것은 측정 오차 이외에도 본 실험의 지반 재료가 구형의 모래입자이므로 입자간의 상대적인 변위가 크게 나타났다고 생각된다. 그러나 본 실험의 측정치에서 최대 수평변위가 발생된 지

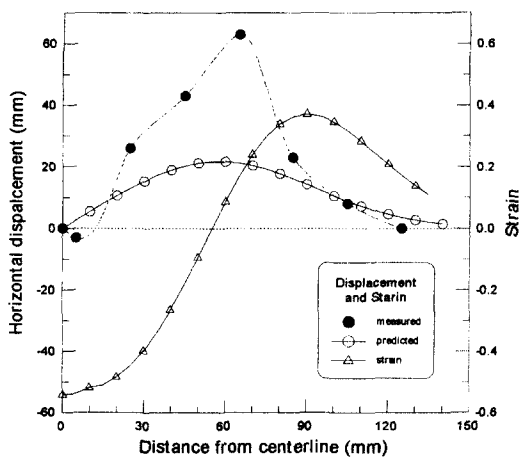


Fig. 16. Distribution of horizontal displacement and strain of model #6 when collapse length is 14 cm

점 및 그 변위양상은 예측치와 정성적으로 부합한다. 한편, 본 실험을 참고로 하여, 향후 보다 개선된 측정방법이 개발되기를 기대한다.

또한, 계산된 수평변위를 (2)식에 적용하면 지표면의 변형률을 구할 수 있으며, Fig. 16에 구해진 변형률을 함께 나타내었다. 공동중심부의 상부 지표면은 압축변형률을 나타내고 여기서 점차 멀어지면 인장변형률을 나타낸다. 또한, 중심선으로부터 90 mm 떨어진 지점에서 최대 인장변형률이 발생하였다.

5.5 침하예측방법에 대한 제언

본 연구에서는 NCB의 경험적 방법, (4)식의 윤곽함수법, (8)식의 윤곽함수법 그리고 영향함수법 등을 모형실험 결과에 대해 적용하고 서로 비교하였다. 전술한 Table 3은 그 요약 결과라고 할 수 있으며, (4)식의 윤곽함수가 가장 적합한 것으로 나타났다. 그러나 Table 3은 38개 측정사례의 평균값이었는데 유의할 필요가 있다. 예를 들면, Fig. 13에 나타낸 모델의 침하 측정치는 (4)식이 아니라 (8)식의 윤곽함수에 더 적합하였다.

실제로, (4)식의 윤곽함수는 변수가 S_{max} 와 i 2개인 반면에 (8)식의 윤곽함수는 S_{max} , W_s , c , d 등 4개이다. 즉, (8)식은 적합도를 보다 높이기 위해 개발된 것으로 계산량이 많아지는 단점이 있으나, 골형 내지는 함몰 침하에도 적용이 가능하다.

그러나 본 실험과 같은 모래지반에 대해서는 (4)식의 윤곽함수에 의해 침하예측을 하면 계산 절차가 간단하며 그 결과의 신뢰성도 큰 것으로 나타났다. 한편, 다음의 경우에는 다른 방법이 더 우수할 수도 있을 것으로 생각된다.

- ▷임계이하조건의 공동에 대해 침하분지의 형태가 아래로 뾰족할 경우 : (8)식의 윤곽함수법이 우수
- ▷임계이상조건으로 공동의 형태가 넓은 직사각형일 때 : NCB 방법 또는 영향함수법을 적용
- ▷수평변위의 예측할 때 : 영향함수법을 적용

6. 결 론

본 연구에서는 모래지반내 심도가 서로 다른 6가지 실험모델에 대하여 원형공동을 점진적으로 붕락시킬 때 발생하는 횡단면 지표 침하를 조사하였다. 본 연구에서 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 총 38개의 침하곡선에서 대부분은 공동중심부에서

최대침하가 일어나고 여기서 멀어질수록 점차 작아지는 골형 침하의 형태를 나타내었다.

2) 모래지반에서 최대침하량은 침하분지의 단면적과 밀접한 관계를 가진다.

3) 봉락길이가 증가할수록 최대침하량은 증가하며, 공동의 심도가 증가할수록 최대침하량은 감소한다.

4) 봉락길이가 증가됨에 따라 변곡점 및 최대곡률 지점은 공동중심으로부터 멀어지며, 따라서 지하공동이 점진적으로 봉락함에 따라 침하 피해영역은 커진다.


5) 조사된 4가지 침하예측방법 중에서 본 실험의 결과는 (4)식의 율곡함수와 가장 적합하였다.

6) 수평변위 및 변형률을 영향함수법으로 예측하였으며 그 결과는 실험결과와 정성적으로 부합하였다.

참 고 문 헌

1. Knothe S., 1957, Observations of surface movements under influence of mining and their theoretical interpretation, Proc. Eur. Congr, Ground movement, U.K. 210-218.
2. Litwiniszyn J., 1957, The theories and model research of movement of ground masses, Proc. Eur. Congr, Ground movement, U.K. 203-209.
3. Luo Y., 1989, An integrated computer model for predicting

- surface subsidence due to underground coal mining (CISPM), PhD dissertation, West Virginia University.
4. NCB, 1975, Subsidence Engineers' Handbook(2nd Ed.), National Coal Board Mining Department.
5. Peck R.B., 1969, Deep excavations and tunnelling in soft ground. Proc. 7th ICSMFE, Mexico, State-of-the-art Report, 225-290.
6. Peng S.S. *et al.*, 1997, Subsidence parameters-Their definition and determination, SME-Transaction, 300, 60-65.
7. Peng S.S., 1993, Surface subsidence engineering, SME-AIME.
8. Peng S.S., Cheng S.L., 1981, Predicting surface subsidence for damage prevention, Coal mining and processing, 84-95.
9. Whittaker B.N., Pye J.H., 1977, Ground movements associated with the near surface construction operations of a mine drift in coal measures strata. Int. J. Rock. Mech., 14, 67-75.
10. Whittaker B.N., Reddish D.J., 1989, Subsidence, Elsevier.
11. 이정인 외, 1997, 폐광지역 지반침하 메카니즘 및 침하 방지 공법에 관한 연구, 석탄합리화사업단. 1-85.
12. 이희근, 고헌제, 양형식, 1983, 지표침하해석에 관한 기초적 연구, 대한광산학회지, 20, 24-31.
13. 조영목, 1995, 사질토의 응력-변형 거동에 관한 비선형 구성모델의 적용, 강원대학교 석사학위논문.
14. 한봉태, 이희근, 1983, 채굴적에 의한 지반침하의 모형 실험 및 예상 계산의 수치해석에 관한 연구, 대한광산학회지, 20, 145-152.



지 정 배

1997년 청주대학교 이공대학 자원공학과, 공학사
 1999년 청주대학교 대학원 자원공학과, 공학석사

TEL : 0431-259-3076
 E-mail : jbcos@lycos.co.kr
 현 재 농촌기반공사 근무



김 종 우

1986년 서울대학교 공과대학 자원공학과, 공학사
 1988년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학석사
 1993년 서울대학교 대학원 자원공학과, 공학박사

TEL : 0431-229-8471
 E-mail : jwkim@alpha94.chongju.ac.kr
 현 재 청주대학교 지구환경시스템공학과 조교수