

## 터널 굴착에 의한 지중 매설관의 손상평가 Damage Assessment of Buried Pipelines Due to Tunnelling

유충식<sup>1)</sup>, Choong-Sik Yoo, 윤호석<sup>2)</sup>, Hyo-Seok Yoon

<sup>1)</sup> 성균관대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

<sup>2)</sup> 성균관대학교 토목공학과 박사수료, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Sungkyunkwan Univ.

**개요(SYNOPSIS) :** Ground movements are inevitably caused by tunnel construction in soft ground. In the design and construction of tunnels in urban areas, the potential effects of buried pipelines by ground movements are one of the important design considerations. Generally, the most common modes of failure of buried pipelines due to ground movements are tensile fracture of main pipelines, rotation angle and pull-out displacement at joints. In the parametric study, a wide range of conditions were considered, including tunnel diameter( $D$ ), tunnel depth( $Z_0$ ), volume loss( $V_l$ ) and inflection point( $i$ ). Based on this results, design charts, which are applicable to assess potential damage of buried pipelines associated ground movements due to tunnelling, are developed.

**주요어(Key words) :** ground movement, volume loss, tunnel depth, inflection point, buried pipelines

### 1. 서 론

대부분 산업시설의 건설과 더불어 상하수도관, 가스관, 송유관, 통신 케이블관 등과 같은 지중 매설관로는 반드시 수반하여야 하는 시설물로서 인간의 문화생활을 영위하는데 중요한 역할을 담당하고 있다. 이러한 지중 매설관로는 지반에 매설되어 있어 이상징후를 발견할 수 있는 정기검사도 쉽지 않을 뿐만 아니라 파손여부를 쉽게 관측하기가 어렵고 수리 및 보수도 쉽지않아 다른 구조물에 비해 그 중요성이 적었던 것이 사실이다. 또한 이와 같은 지중 매설관로는 도심지 지하터파기 공사나 지하철 터널 공사로 인한 관로 파손시 문화생활의 불편뿐만 아니라 도심지 교통흐름에 막대한 지장을 초래하며 심지어 대형사고로 이어질 수도 있는 실정이다.

실제로 최근, 도심지 가스관로의 폭발로 인한 대형참사와 상수도관로의 파열로 인한 누수, 오수관로 파손에 따른 지반오염 등과 같은 지중 매설관로의 피해사례가 보고되고 있으며, 현재 국내의 경우 대부분 인접 터널굴착 공사로 인해 발생하는 매설관로의 변형 파손에 대한 영향 검토를 설계시 고려하지 않고 있다. 상기와 같은 이유로, 인접한 터널굴착 공사로 인한 기존 매설관로에 미치는 영향이나 손상유무, 매설관로의 안전성에 대한 사회적 인식과 필요성이 대두되고 있으며 특히, 도심지 터널시공시 굴착으로 인한 지반거동을 평가하고 이를 토대로 기존 매설관로에 대한 손상평가를 위해 체계적이고 과학적인 시공관리가 요구되고 있다.

따라서 본 연구에서는 터널굴착에 따른 지반거동으로부터 기존 매설관로의 잠재적 손상을 평가할 수 있는 반 경험적 방법의 적용성을 검토하고, 설계시 활용할 수 있는 설계도표를 개발하기 위해 터널의 지하조건 및 시공조건(지반손실)에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

## 2. 터널시공으로 인한 매설관 손상평가 기법

### 2.1 지반거동 예측

#### 2.1.1 횡단면 지표침하

Peck (1969)은 1969년 제7차 국제 토질 및 기초공학 학술회의(ICSMFE)에서 지표면의 침하형상은 그림 1에서 보이는 가우스 오차함수 또는 정규분포곡선의 형상을 따른다고 보고하였으며 횡단면 지표침하곡선으로서 식 (1)를 제시하였다.

$$S_v = S_{max} \exp \left[ -\frac{x^2}{2i^2} \right] \quad (1)$$

여기서  $\delta_{max}$ 는 최대 침하량이며  $i$ 는 침하형상곡선에서의 변곡점(inflection point)을 나타낸다. 침하영역내에 위치하는 주변 구조물 및 매설물의 구조적 손상여부는 절대적인 침하량 보다는 수평변형율에 좌우되며 따라서 침하영역내에서의 상대적인 위치가 매우 중요한 인자로 작용한다. 그림 2는 식 (1)의 침하곡선 특성을 나타내는 각종 파라메타를 보여주고 있으며 이는 구조물의 손상평가에 매우 중요한 평가항목으로 사용된다.

한편, 그림 3은 터널굴착에 따른 지반거동이 주변 구조물의 손상평가지 매우 중요하게 작용함을 나타낸 것으로서 임의지점에서의 수평변위  $S_h$ 는 변위가 터널의 중심을 향한다고 가정할 경우 식 (2)으로 표현할 수 있는데 여기서,  $y$ 와  $Z_0$ 는 각각 횡단면상의 임의의 거리와 터널심도를, 그리고  $S_v$ 는 지표침하량을 의미한다.

$$S_h = \frac{y}{Z_0} S_v \quad (2)$$

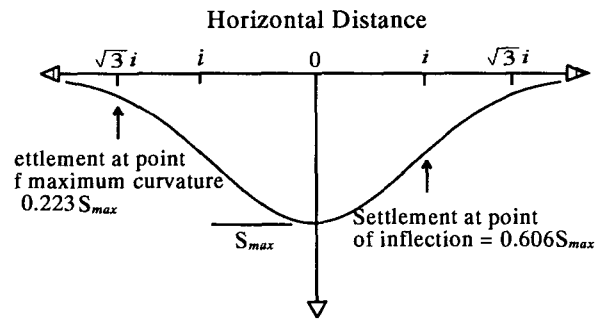


그림 1. 가우스 정규분포 곡선

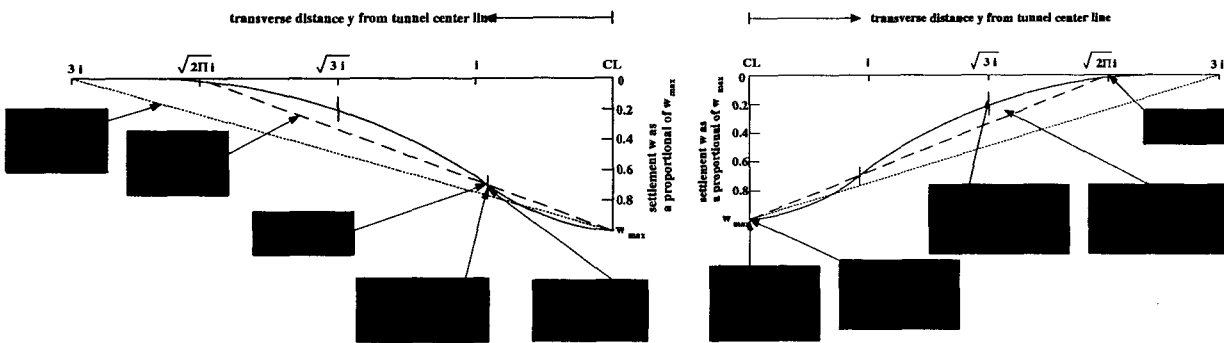


그림 2. 횡단면 지표침하곡선 특성

한편, 수평변형율은 식(2)에 식(1)를 대입하여  $y$ 에 대하여 미분함으로써 식 (3)과 같이 얻을 수 있다.

$$\epsilon_h = \frac{dS_h}{dy} = \epsilon_h = \frac{S_v}{Z_0} \left[ 1 - \left( \frac{y}{i} \right)^2 \right] \quad (3)$$

지표침하곡선의 특성은 변곡점( $i$ )에 많은 영향을 받으며 이로 인해 주변 구조물 및 매설관의 손상정도가 달리 평가될 수 있다. 이와 같은 변곡점( $i$ )는 터널의 기하학적 제원, 지반특성, 지반손실량 및 터널 시공방법 등 다양한 영향인자로부터 결정되며 침하곡선의 침하영역 폭 산정에 지대한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다. 따라서 Peck(1969)은 터널 심도 및 지반조건 등에 따라 침하트래프의 형상이 달리 나타난다는 점에 주목하여 변곡점과 관련된 관계식을 제시하였으며, 그 후 O'Reilly와 New(1982) 등

을 비롯한 많은 연구자들이 변곡점 산정과 관련된 관계식을 제안하였다. 상기 연구자에 의해 제안된 변곡점( $i$ )를 결정하는 대표적인 산정식은 표 1과 같다.

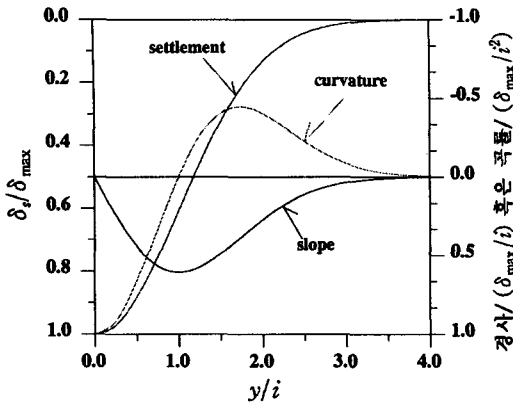


그림 3. 횡단면 침하 트라프

표 1. 대표적인 변곡점( $i$ ) 제안식

제안자	제안식	비고
Peck(1969)	$\frac{i}{R} = (\frac{z_0}{D})^n$	$n=0.8$
O'Reilly and New(1982)	$i = K \cdot Z_0$	$K=0.25$ (모래) $K=0.50$ (점토)
Atkinson and Potts(1977)	$\frac{i}{R} = C_1(z_0/D) + C_2$	$C_1=0.75$ , $C_2=0.125$ (사질토)
Mair 등(1993)	$i = z_0 \left[ 0.175 + 0.325 \left( 1 - \frac{z_p}{z_0} \right) \right]$	$Z_p$ : 매설관 심도 $Z_0$ : 터널심도

### 2.1.2 종단면 지표침하

종단면 지표침하형상은 터널 굴착시 체적변형이 발생하지 않는다는 가정하에 그림 4에서 제시된 바와 같이 Attewell과 Woodman (1982)이 제안한 누적확률함수(cumulative probability function)의 형태를 따르는 것으로 알려져 있다. 누적확률함수는 식 (4)와 같이 표현되는데 여기서  $V_s$  는 터널굴진방향의 단위길이당 대상 횡단면 지표침하형상곡선의 체적이며  $y_i$  와  $y_f$  는 각각 원점으로부터 터널굴착이 시작되는 시점 및 막장부의 거리를 의미한다. 또한 식 (4)의 함수  $G$  는 식 (5)와 같이 표현되며, 표준확률표에서 그 값을 결정할 수 있다. 한편, 누적확률함수의 특성상 막장에서의 침하량은 최종침하량의 50%가 발생하게 되므로 이를 현장문제에 적용할 경우에는 침하곡선의 수평이동이 필요하다.

$$S(x)_y = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi i^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right) \left[ G\left(\frac{y-y_i}{i}\right) - G\left(\frac{y-y_f}{i}\right) \right] \quad (4)$$

$$G(a) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^a \exp\left(-\frac{\beta^2}{2}\right) d\beta \quad (5)$$

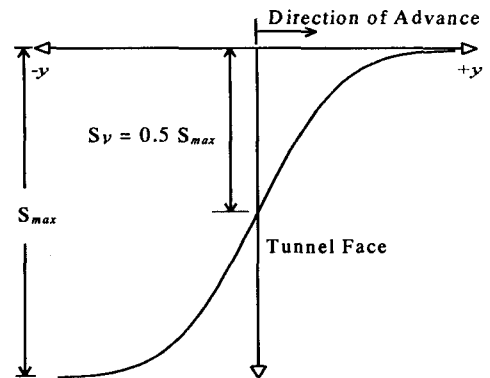


그림 4. 누적확률 함수곡선

## 2.2 지반거동으로 인한 매설관 손상평가

지반거동으로 인한 매설관의 손상평가를 위해서는 연결부 회전각( $\theta$ )와 인발변위( $R$ ) 그리고 매설관에 발생하는 최대 인장변형률( $\epsilon_p$ )이 검토되어야 한다. 본 절에서는 Mair 등(1996)이 제시한 지표침하곡선을 이용한 매설관 손상평가 방법을 기술하였다.

### 2.2.1 연결부 회전각 및 인발변위

Mair 등(1996)은 지중 매설관로의 경우, 매설관의 실제 연결부 위치를 알 수 없기 때문에 각 연결부 위치를 최악의 상태로 가정하여 회전각( $\theta$ )에 대해 식(6a)와 (6b)와 같이 표현하였고 Attewell 등(1986)은 표 2와 같이, 지반 거동의 영향을 받기쉬운 지중 매설관로에 대한 지침을 다음과 같이 제시하였다.

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left( \frac{S_{v \max}}{\sqrt{2\pi} i} \right) \quad (6a)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left( 0.4 \frac{S_{v \max}}{i} \right) \quad (6b)$$

식(6a)는 지중 매설관이 터널 굴진방향과 교차된 경우이고 식(6b)는 터널방향과 평행한 경우이다.

또한 최대 인발변위( $R$ )에 대해서는 종·횡방향 모두에 대해, 터널굴착으로 인한 수평방향 지반움직임의 최대 예측값과 같다고 전제하여 연결부 상태가 가장 불량한 경우를 가정한 것으로 식(7)과 같이 표현하였다.

$$S_H = \frac{y}{Z_0 - Z_p} S_v \quad (7)$$

### 2.2.2 매설관 변형을

상기절에서 언급하였듯이, 터널굴착에 따른 지반거동은 가우스 정규분포곡선으로 가정하여 평가할 수 있으며 횡단면 침하 트라프의 특성곡선으로부터 sagging 영역에서의 최대곡률( $d^2S_v/dy^2$ ) 발생지점인 중앙부와 hogging 영역에서의 최대곡률 및 수평 인장변형을 발생지점인  $\sqrt{3}i$ 에서 최대 인장변형을 식(8) 및 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$\frac{d^2S_v(y=0)}{dy^2} = \frac{S_{v \max}}{i^2} \quad (8)$$

$$\frac{d^2S_v(y=\sqrt{3}i)}{dy^2} = 0.446 \frac{S_{v \max}}{i^2} \quad (9a)$$

$$\frac{dS_h(y=\sqrt{3}i)}{dy} = 0.446 \frac{S_{v \max}}{Z_0 - Z_p} \quad (9b)$$

매설관로에 가장 많이 사용되어 온 주철관은 터널굴착으로 야기되는 인장변형을 증가에 상당히 민감한 재료로서, 전체 인장변형율은 곡률에 의한 휨변형율과 축변형율을 성분으로 구분할 수 있다. 대부분의 경우, 제조사에서 표기한 주철관 허용 변형율의 범위는 4,000-6,000  $\mu\epsilon$  이나 파열시 변형을 값은 구조 품질에 따라 상당히 달라질 수 있다. 한편 Attewell 등(1986)은 표 3과 같이, 설계에 적용할 수 있는 허용 변형율의 기준을 제시하였으나 정상적인 관로와는 달리 노후화된 관로의 경우 지반 거동으로 인한 추가 변형율에 대해서는 표 4와 같이 보다 보수적인 허용 한계를 적용할 필요가 있다고 제시하였다.

표 3. 전형적인 설계 변형율

구 분	설계 변형율( $\mu\epsilon$ )	
	인장	압축
pit 주철관	370	1550
spun 주철관	430-490	1770-2040
연성관	820	1020

표 4. 추천 허용 변형율

구 분	허용 변형율( $\mu\epsilon$ )	
	인장	압축
pit 주철관 spun 주철관	100	1200
연성관	500	700

## 3. 매개변수 연구

본 연구에서는 앞서 제시한 터널시공으로 인한 지중매설관 손상평가 방법의 적용성을 검토하고 설계시 활용될 수 있는 설계도표를 개발하기 위해 터널의 기하조건과 시공조건(지반손실)에 대한 매개변수 연구를 수행하였다.

### 3.1 제한 사항

매개변수 연구에서는 터널의 직경( $D$ )와 토피고( $Z_0$ ), 지반손실량( $V_i$ ) 그리고 변곡점( $i$ )을 주 변수로 채택하여 다양한 경우에 대한 검토를 수행하였으며, 그 결과를 토대로 터널의 기하조건 및 지반손실량

표 2. 허용 연결부 회전각 및 인발변위

구 분	회전각, $\theta$ (degree)	인발변위, $R$ (mm)
과거 누수경험이 있는 가스관의 연결부	none	none
정상적인 가스관의 연결부	1.0	10
상수관의 연결부	1.5	15
가스 또는 상수관의 고무 개스켓 연결부	2.5	25

을 토대로 설계도표의 작성이 가능하도록 하였다. 한편, 터널시공시 지중매설관의 손상 정도는 지반 굴착시 발생하는 3차원적 변위에 의해 발생하는 휨(bending), 전단(shear), 그리고 비틀림(torsion) 등의 변형에 의해 좌우되며 터널 굴진축에 대한 횡단면 변위 뿐만 아니라 종방향 변위에 의해서도 발생된다. 따라서 엄밀한 검토를 위해서는 횡단면 뿐만 아니라 터널 굴진 방향과 평행한 종방향 변위에 대한 검토 또한 수행되어야 하나 일반적으로 종방향 변위 보다는 횡방향 변위가 더 큰 영향을 미친다는 연구 결과(Taylor 등 1996)에 근거하여 횡단면에 대한 검토만을 수행하였다.

### 3.2 검토 조건

표 5는 본 연구에서의 검토 조건 및 채택한 변수를 나타내고 있다. 기하조건은 대부분의 매설관로가 지표하부 1.0-2.0 m의 범위에 시공한다는 점을 감안하여 매설관의 심도( $Z_p$ )는 1.0 및 2.0 m로 가정하였고 한편 직경( $D$ )가 10 m인 원형터널이 매설관 하부로 굴착된다고 가정한 후, 터널심도( $Z_0$ )를 10, 20, 30, 40 m로 변화시켜 가면서 매개변수 연구를 수행하였다. 또한 터널 시공방법에 따라 지반손실량( $V_i$ )이 0.5-3.0%의 범위로 발생한다는 점을 고려하여 표 5와 같이 지반손실량을 0.5, 1.0, 2.0, 3.0%로 변화시켰으며 변곡점의 영향을 살펴보기 위해 표 1에 제시된 제안식에 따른 손상평가 결과를 검토하였다.

표 5. 해석에 사용된 변수

구분		Case
기하조건	$Z_0/D$	1.0, 2.0, 3.0, 4.0
	$Z_p/Z_0$	0.025, 0.033, 0.05, 0.1
시공조건	$V_i$	0.5, 1.0, 2.0, 3.0

## 4. 결과분석 및 고찰

### 4.1 지반손실량의 영향

터널 시공시 지중매설관 손상 평가 결과에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 지표침하량이라고 할 수 있으며 이는 손상 평가시 요구되는 지반손실량( $V_i$ )로 반영된다. 본 절에서는 지반손실량의 영향 검토를 위해 표 1의 대표적인 변곡점( $i$ ) 제안식중 Mair 등(1993)이 제시한 식을 이용하였다. 그림 5는  $Z_0/D=2.0$ 의 경우에 있어서 지반손실량에 따른 연결부 회전각( $\theta$ ) 및 인발변위( $R$ ), 매설관에 발생하는 최대 인장변형율( $\epsilon_p$ )의 변화 경향을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 지반손실량이 증가함에 따라 회전각 및 인발변위, 최대 인장변형율 모두 선형적으로 현저히 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 결과는 지반손실량이 매설관의 변형을 증가에 큰 영향을 미치고 있음을 나타내기 때문에 터널 시공방법에 따른 적절한 지반손실량 산정이 요구된다 하겠다.

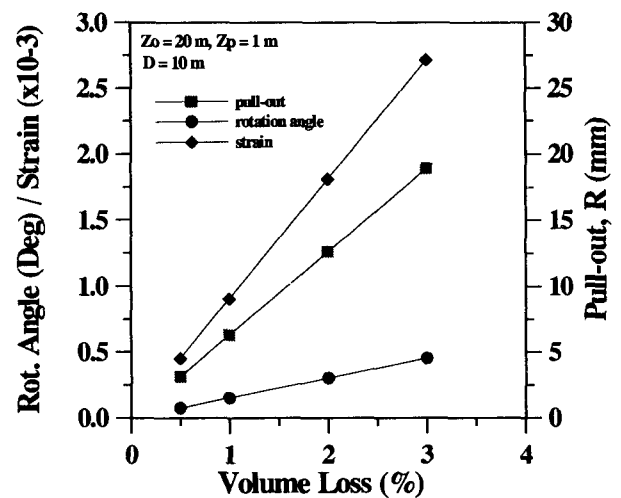


그림 5. 지반손실량에 따른 변화경향( $Z_0/D=2$ )

### 4.2 토피고의 영향

본 절에서는 터널 토피고가 매설관에 미치는 영향을 검토하기 위해 매설관 심도( $Z_p$ )와 지반손실량( $V_i$ )을 1 m와 2%로 고정시킨 후, 직경( $D$ )가 10 m인 원형터널의 토피고를 변화시켜 가면서 매설관의 연결부 회전각 및 인발변위, 최대 인장변형율의 변화경향을 검토하였다. 그림 6~8은 회전각 및 인발변위, 최대 인장변형율의 토피고에 따른 영향을 도시한 것으로서 보이는 바와 같이,  $Z_0/D < 2$  이하에서

매설관에 발생하는 회전각 및 인발변위, 변형율 모두 급격한 증가 경향을 관찰할 수 있었다. 또한  $Z_0/D > 2.0$  이상에서는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타내고 있고 있어, 매설관의 손상평가가 인자인 회전각 및 인발변위, 인장변형율 모두 토피고의 변화에 따른 각각의 임계기준( $\theta_{lim}$ ,  $R_{lim}$ ,  $\epsilon_{plim}$ )이 존재하는 것으로 나타나 일정심도 이하에서는 매설관의 손상영향을 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

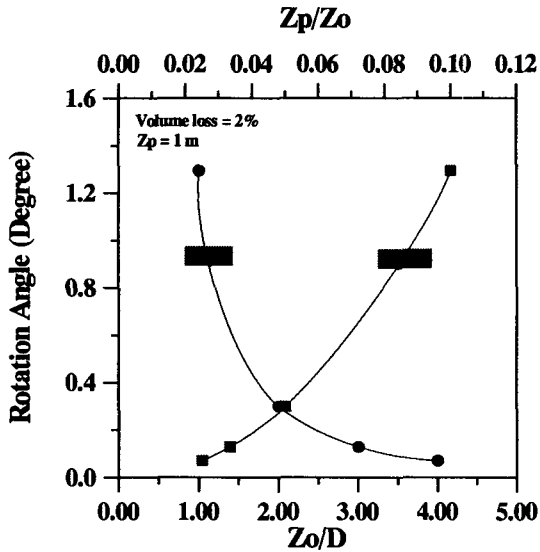


그림 6. 토피고에 따른  $\theta$ 의 변화경향

한편, 매설관 및 터널 깊이비( $Z_p/Z_0$ )에 따른 매설관의 회전각과 인발변위, 최대 인장변형율의 변화경향은 보이는 바와 같이,  $Z_p/Z_0 > 0.05$ 에서는 매설관의 손상 영향인자들의 크기가 급격히 증가함을 관찰할 수 있는 반면,  $Z_p/Z_0 < 0.05$ 에서는 손상 영향인자 크기의 감소폭이 점차 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 매설관 손상평가 영향인자에 대한  $Z_0/D$  및  $Z_p/Z_0$ 의 변화경향을 비교한 결과, 터널심도가 깊어짐에 따라 회전각 및 인장변형율의 크기가 점차 감소하여 어느 일정한 값으로 수렴하는 경향을 동일하게 나타낸 반면, 인발변위는  $Z_p/Z_0$ 의 경우 터널심도가 깊어짐에 따라 선형적으로 감소하는 경향을 관찰할 수 있다.

### 4.3 변곡점의 영향

매설관 손상평가지 평가결과는 침하형상곡선에서의 변곡점에 많은 영향을 받는다. 한편, 앞서 언급한 바와 같이 지금까지 변곡점 산정에 관한 다양한 식이 제시되어 왔으나 아직 까지 일반화된 수식이 제시되지 않고 있는 실정이다. 본 연구에서는 침하곡선의 형상을 결정하는 변곡점이 매설관 손상평가 결과에 미치는 영향을 고찰하기 위해 표 1에 나타난 대표적인 변곡점 산정식을 적용하여, 이에 대한 검토를 수행하였다. 그림 9와 10은 지반손실량에 따른 매설관 연결부의 회전각( $\theta$ )와 변형율( $\epsilon_p$ )의 변화경향을 도시하였다. 보이는 바와 같이, 회전각과 변형율은 적용하는 변곡점 산정식에 따라 상당한 차이를 보이고 있으며 O'Reilly와 New(1982)의 제안식이 가장 보수적인 결과를 도출시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 지반거동에 의한 매설관 손상평가 결과가 변곡점의 위치산정에 큰 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다. 알아본 바와 같이 터널시공으로 인한 지중매설관의 손상정도는 변곡점의 위치에 좌우되는 침하곡선의 형상에 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 따라서 지중매설관 손상평가 기법을

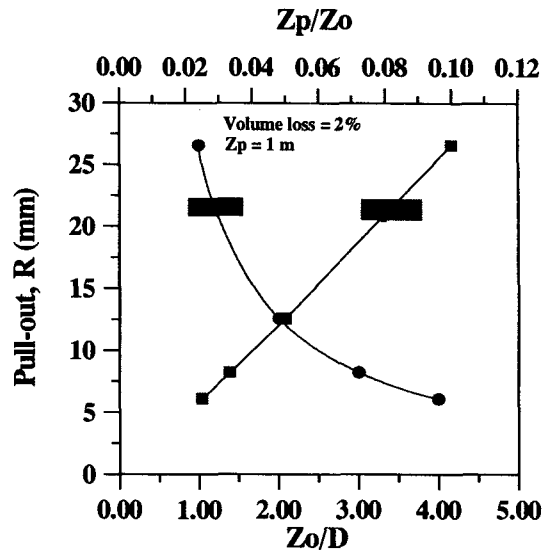


그림 7. 토피고에 따른  $R$ 의 변화경향

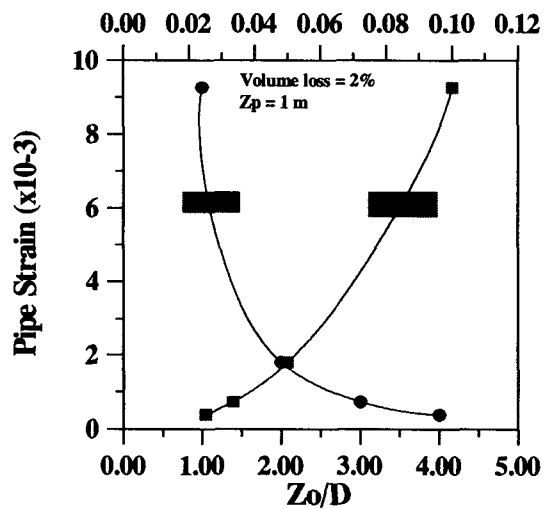


그림 8. 토피고에 따른  $\epsilon_p$ 의 변화경향

우리 나라 환경여건에 보다 효율적으로 적용하기 위해서는 우리 나라 지반특성 및 시공환경이 고려된 변곡점 산정식의 개발에 관한 연구가 요구된다고 하겠다.

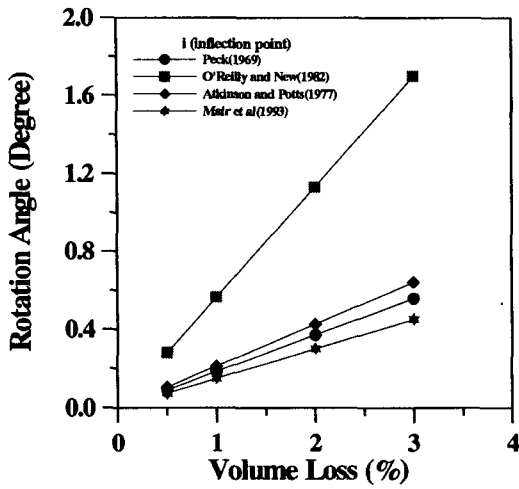


그림 9. 지반손실량에 따른  $\theta$ 의 변화

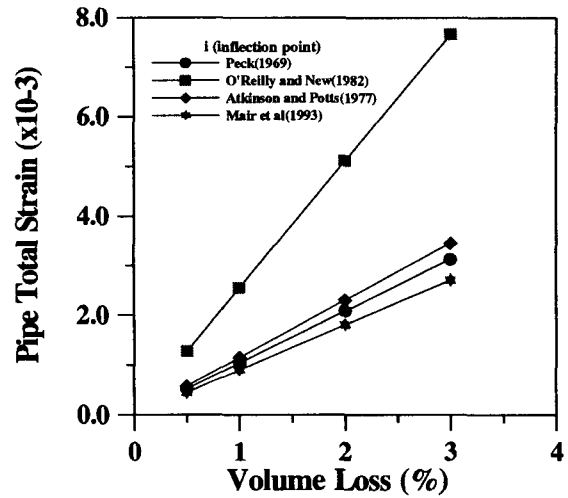


그림 10. 지반손실량에 따른  $\epsilon_p$ 의 변화

## 5. 설계도표

상기 결과로부터 매설관에 발생 가능한 손상을 평가할 수 있는 간편한 도표를 제시하였다. 일반적으로 매설관 손상요인이 연결부의 회전각,  $\theta$ 와 인발변위,  $R$  그리고 침하곡선상에서의 hogging 곡률과 인장변형율이 최대가 되는  $\sqrt{3i}$  지점의 합으로 나타내는 최대 인장변형율인 점을 감안하여 표 2와 4에 제시된 허용한계를 기준으로 매설관의 손상 유무를 평가할 수 있도록 하였다. 그림 11~13은 토피고에 따른 매설관 손상 영향인자인 회전각, 인발변위, 변형율의 변화경향을 지반손실량의 크기에 따라 도시한 것으로서 설계자가 설계도표에서 직접 각 영향인자에 대한 임계값을 산정할 수 있도록 제시하였다.

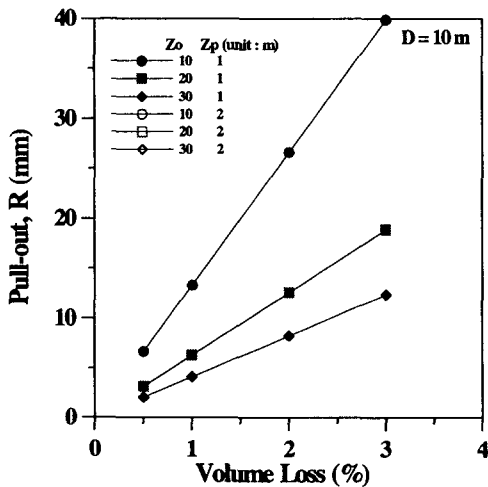


그림 12. 토피고에 따른  $R$ 의 변화

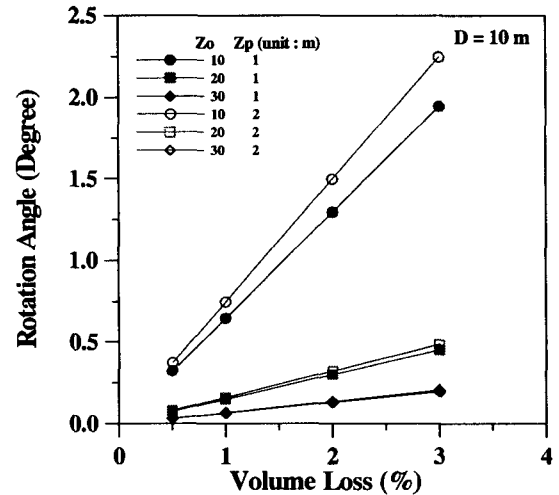


그림 11. 토피고에 따른  $\theta$ 의 변화

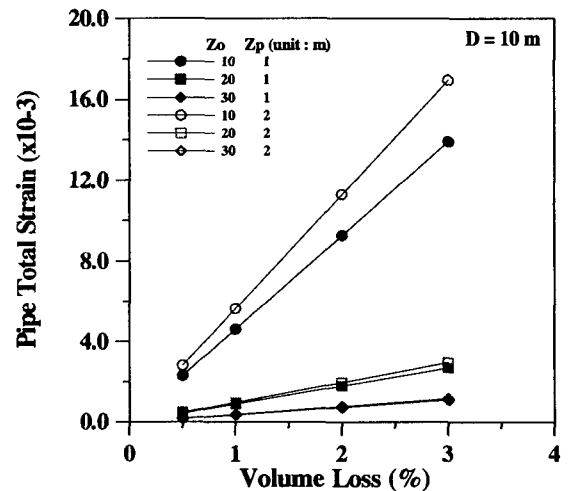


그림 13. 토피고에 따른  $\epsilon_p$ 의 변화

매설관의 심도가 1.0~2.0 m인 점을 감안하여  $Z_p = 1.0$  및 2.0 m 경우에 대해 회전각, 인발변위, 변형율의 크기를 토피교의 변화에 따라 도시하였다. 보이는 바와 같이, 회전각과 최대 인장변형율의 경우 터널직경 및 지반손실량이 동일한 조건에서 매설관 심도( $Z_p$ )가 1.0 m일 때 보다 2.0 m 에 존재할 시 더 큰 회전각 및 인장변형율이 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 특히  $Z_0 < 20$  m 에서는 지반손실량에 따라 급격한 증가경향을 나타내는 반면,  $Z_0 > 20$  m 에서는 증가폭이 둔화되는 경향을 나타내고 있다. 한편 매설관에 발생하는 인발변위에 있어서, 매설관 심도에 따른 크기 차이가 거의 없는 것으로 나타나 회전각 및 인장변형율에 비해 영향정도가 미미한 것으로 나타나고 있다.

## 6. 결 론

터널 시공으로 인한 지중매설관 손상평가 방법의 적용성 검토를 위한 매개변수 연구결과로부터 다음과 같은 종합적인 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 터널굴착에 따른 지중 매설관의 손상 영향인자인 연결부 회전각( $\theta$ ) 및 인발변위( $R$ ) 그리고 인장변형율( $\epsilon_p$ )의 크기를 지반손실량의 변화에 따라 검토한 결과, 지반손실량이 증가할수록 매설관의 손상 영향인자 모두 선형적으로 현저히 증가하는 경향을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 터널 시공방법에 따른 적절한 지반손실량 산정이 요구된다 하겠다.
- 2) 또한 매설관에 발생하는 회전각 및 인발변위, 변형율이  $Z_0/D < 2$  에서 급격히 증가하는 경향을 관찰할 수 있는 반면,  $Z_0/D > 2$ 에서는 일정한 값으로 수렴하는 경향을 나타내고 있어 터널심도가 일정깊이 이하에서는 매설관의 손상영향을 무시할 수 있을것으로 판단된다.
- 3) 표 1에 제시된 대표적인 변곡점( $i$ ) 산정식을 이용하여 매설관의 회전각, 인발변위, 변형율을 검토한 결과 변곡점( $i$ )에 따라 회전각 및 변형율은 심한 차이를 보이고 있는 반면, 인발변위는 거의 동일한 수치를 나타내고 있어 국내 여건에 맞는 변곡점 산정식 개발에 관한 연구가 요구된다 하겠다.
- 4) 상기 연구결과로부터 매설관의 잠재적 손상을 평가할 수 있는 간편한 설계도표를 제시하여 실무에서 손쉽게 매설관의 손상유무를 판단할 수 있게 하였으며 설계자가 설계도표로부터 직접 각 매설관 손상 영향인자에 대한 임계값을 산정할 수 있게 함으로써 설계 적용시 실질적인 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. Attewell, P.B. and Woodman, J.P. (1982) Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil. *Ground Engineering*, Vol.15, No.8, pp. 13-22.
2. Attewell, P.B., Yeates, J. and Selby, A.R. (1986) Soil Movements Induced by Tunnelling and their Effects on Pipelines and Structures. *Blacki and Son Ltd.*, London.
3. Bracegirdle, A. Mair, R.J., Nyren, R.J., and Taylor, R.N. (1996) A methodology for evaluating potential damage to cast iron pipes induced bu tunnelling. *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam.
4. O'Reilly, M.P. and New, B.M. (1982) Settlements above tunnels in the United Kindom-their magnitude and prediction. *Proc. Tunnelling '82, Inst. Mining & Metallurgy*, London, pp. 173-188
5. Peck, R.B. (1969) Deep excavations and tunnelling in soft ground, SOA Report, 7th Int. Conf. SMFE, Mexico City, State of the Art Volume pp. 225-290