

터널시공에 따른 지반거동에 의한 지중매설관 손상 평가

Damage Assessment of Buried Pipelines due to Tunneling-Induced Ground Movements

유 충 식* Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents a damage assessment method for buried pipelines subjected to tunneling-induced ground movements. The damage assessment method was developed using the green field ground movement characteristics. A parametric study was performed on a wide range of boundary conditions including volume loss, tunnel cover depth, and burial depth of pipeline. The results of the parametric study indicate that the location of inflection point significantly affects the results of damage assessment, suggesting the need for developing a more rational method for estimating the location of inflection point for a given tunneling project. Such a method should take into consideration of the site specific ground and construction conditions. Furthermore, it appears that the degree of damage significantly increases when the ratio of tunnel depth to diameter becomes less than 2.5, and that the pipe tensile strain generally governs the allowable maximum volume loss for a given condition regardless of pipe material and joint types. The results of the parametric study are presented in forms of design charts which can be readily used for various conditions encountered in practices.

요 지

본 고에서는 도심지 터널의 과학적인 설계/시공을 위한 요소기술 확보의 일환으로 기존의 연구자들이 제시한 손상 평가 기법을 토대로 터널굴착에 따른 지중매설관 손상여부의 예비평가를 위한 평가기법을 제시하였다. 제시된 기법을 토대로 다양한 경우에 대한 매개변수 연구를 수행한 결과 지반침하곡선의 경사 및 곡률 등 침하곡선의 제반특성에 기반을 둔 본 연구에서 개발된 손상평가기법의 평가결과는 변곡점의 위치에 많은 영향을 받는 것으로 나타났으며, 따라서 현장 특유의 지반특성 및 시공조건이 반영된 변곡점 산정식의 개발을 위한 지속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다. 아울러서 터널심도가 터널직경의 2.5배 이하인 경우 손상도가 현저히 증가하며, 전반적으로 관의 재질이나 조인트의 형식에 관계없이 관체의 인장변형률이 손상여부를 결정짓는 인자인 것으로 나타났다. 본 연구에서 얻어진 결과를 종합하여 터널과 매설관의 상대적 위치 및 지반손실량에 따라 매설관의 손상정도를 정량적으로 평가할 수 있는 설계도표를 제시하였다.

Keywords : Buried pipeline, Damage assessment, Lifeline, Settlement trough, Tunneling

1. 서 론

도심지 인구증가에 따른 산업기반시설의 확충과 더불어 시공되는 상·하수도관, 가스관, 통신 케이블관

등과 같은 지중 매설관로는 Lifeline(생명선)으로 불릴 만큼 현대인이 문화생활을 영위하는데 반드시 필요한 시설물로 간주된다. 이러한 지중 매설관로는 접근이 용이하지 않으므로 정기적인 점검을 통해 상태를 파악

* 정희원, 성균관대학교 건축·조경 및 토목공학부 부교수

하여 파손여부를 평가하는데 많은 어려움이 있으며 유지보수가 용이하지 않아 손상이 발생한 경우에도 장기간 방치되고 있는 실정이다. 일반적으로 도심지 지중 매설관로의 대표적인 손상원인으로는 부식과 외부하중으로 인한 충격, 그리고 지반의 부등침하 등을 들 수 있으며, 특히 도심지에서의 각종 건물공사를 위해 수행되는 지하굴착, 그리고 통신구, 전력구, 지하철 등의 터널공사로 인한 지반거동은 기 손상된 매설관에 추가적인 응력을 유발시켜 경우에 따라서 매설관의 파열을 가져오는 매설관 손상의 주된 원인으로 부각되고 있다.

지반굴착으로 인해 발생하는 지중매설관의 손상은 파손 혹은 누수 등 즉각적인 피해의 형태로 나타나기도 하며 관의 파괴로 이어지지 않더라도 관체의 응력증가를 야기시켜 내구성을 저하시키는 원인을 제공한다. 일반적으로 매설관의 내구연한은 운영 중에 발생하는 응력수준과 부식정도에 달려있다고 할 수 있으며, 따라서 지반의 부등침하로 인해 매설관에 부과되는 응력증가는 향후 외부 환경변화로 인해 발생하는 추가적인 응력증가와 복합적으로 작용하여 매설관에 치명적인 손상을 야기시킬 수 있다.

매설관의 손상여부를 평가하기 위해서는 관의 용도를 고려하여 손상한계를 설정하여야 한다. 즉, 가스관의 손상으로 인해 가스가 유출될 경우 막대한 경제적 손실 및 인명 손실이 발생할 수 있으므로 허용손상한계를 높게 설정할 필요가 있으며 상수관로의 손상으로 인한 누수 또한 경우에 따라서는 주변 지반의 세립분을 유실시켜 주변의 도로 및 건물의 침하를 유발시키는 등 주변 환경에 막대한 영향을 미칠 수 있으므로 허용손상한계를 엄격히 적용하여야 한다. 이러한 맥락에서 매설관 운영자가 손상에 대한 위협도를 감지할 수 있는 경우에는 손상발생후 보수하는 수동적인 대처보다는 손상을 저감시키기 위한 대책을 마련하는 등 보다 적극적인 대처가 요구된다.

터널굴착에 따른 지중 매설관의 손상평가에 대한 연구는 주로 영국과 미국에서 활발히 수행되어 왔으며 대표적인 연구로는 미국에서 수행된 O'Rourke와 Trautman (1982)의 연구와 영국에서 수행된 Leach(1984), Attewell 등(1986), Bracegirdle 등(1996)의 연구를 들 수 있으며, 이들은 주로 지반침하곡선의 특성을 토대로 매설관에 대한 손상평가 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 도심지 터널의 과학적인 설계/시공에 관련된 요소기술 확보의 일환으로 터널굴착으로 인한 지반거동 특성을 고찰

하고 앞서 언급한 연구자들이 제시한 손상평가 기법을 토대로 지중매설관 손상여부의 예비평가지 적용할 수 있는 평가기법을 제시하였다. 한편, 제시된 기법을 이용하여 다양한 경우에 대한 매개변수 연구를 수행하고 그 결과를 설계도표의 형식으로 제시하였다.

2. 지반거동 평가

터널굴착에 따른 지중매설관의 거동은 지반굴착에 따라 발생하는 침하량의 크기 및 분포 특성과 매우 밀접한 관계가 있으며, 따라서 매설관의 손상평가를 위해서는 지반거동 특성에 관한 이해가 요구된다. 본 절에서는 터널굴착에 따른 지표침하특성을 고찰하였다.

2.1 침하특성 곡선

2.2.1 횡단면 지표침하

Peck(1969)은 모래지반 및 점토지반 등 다양한 지반에서 시공된 터널 계측자료의 분석결과를 토대로 터널 굴진축과 직교하는 횡단면에서의 지표침하는 그림 1과 같은 정규확률분포(normal probability distribution)의 형태를 따른다고 보고하고 식 (1)을 횡단면 지표침하형상 곡선으로 제안한 바 있으며, Attewell과 Farmer(1974), Glossop과 Farmer(1977), Attewell 등(1978) 많은 연구자들은 점토지반에서 얻어진 계측결과와의 비교를 토대로 식 (1)의 타당성을 확인한 바 있다.

$$w = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \quad (1)$$

여기서 V_s 는 단위길이당 침하트라프의 체적으로서 $V_s = \sqrt{2\pi} i w_{max}$ 로 근사화 할 수 있으며, w_{max} 와 i 는 각각 침하곡선에서의 최대 침하량과 변곡점(inflection point)을 의미한다. 한편, w_{max} 와 i 는 각각 정규분포에서의 평균점

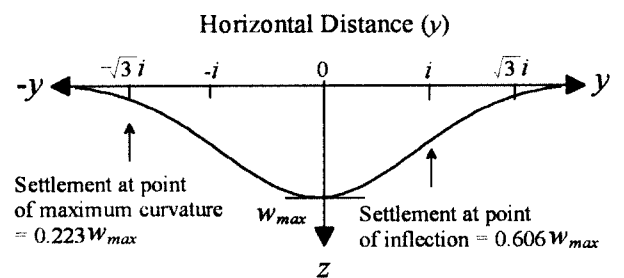


그림 1. 횡단면 지표침하곡선(가우스 정규분포함수)

(mean point)과 표준편차(standard deviation)를 나타내는 확률적 의미를 갖고 있다.

2.1.2 중단면 지표침하

식 (1)과 같이 횡단면 지표침하곡선은 터널이 관통한 후 터널막장 후방에 형성된 평면변형 단면에서의 지표 침하를 평가하는데 활용할 수 있다. 터널굴착에 따른 지반변위는 터널막장 전방에서부터 발생하여 막장이 통과한 후 수렴하는 경향을 나타내므로 주변 구조물 및 매설관로는 터널 시공 중에 3차원적인 동적 변형 파동(dynamic wave of deformation)을 경험하게 된다. 이러한 맥락에서 횡단면 지표침하곡선은 터널굴착으로 인한 주변 지반의 거동을 평가하는데 필요한 정보의 일부에 지나지 않는다고 할 수 있으며, 주변 구조물 및 매설관에 미치는 3차원적인 영향을 평가하기 위해서는 터널 축과 평행한 중단면 침하에 대한 평가가 수반되어야 한다.

Attewell과 Woodman(1982)은 터널 굴착시 지반의 체적변형이 발생하지 않으며 횡단면 침하형상이 식 (1)로 제시되는 정규확률분포를 따른다는 가정을 토대로 식 (2)와 같은 누적확률함수(cumulative probability function)로 표현되는 중단면 지표침하곡선을 제안하였다(그림 2). 여기서 x_i 와 x_f 는 각각 원점으로부터 터널굴착 시점 및 막장까지의 거리를 의미한다. 또한 식 (2)의 함수 G 는 식 (3)과 같이 표현되며 표 1에 제시된 표준확률표에서 그 값을 결정할 수 있다. 식 (2)를 이용할 경우 누적확률함수의 특성상 막장상부에서의 침하량은 최종침하량의 50%로 나타나는데 이러한 경향은 약 20~30%정도로 관측되는 현장 계측결과(배규진, 1989; 김창용, 1998)와 차이가 있으나 식 (2)로 작성된 침하곡선에서 막장 직상부 침하량이 현장계측결과와 일치하도록 수평 이동할 경우 현장 계측자료로부터 작성된 침하곡선과 잘 부합되는 것으로 알려져 있다.

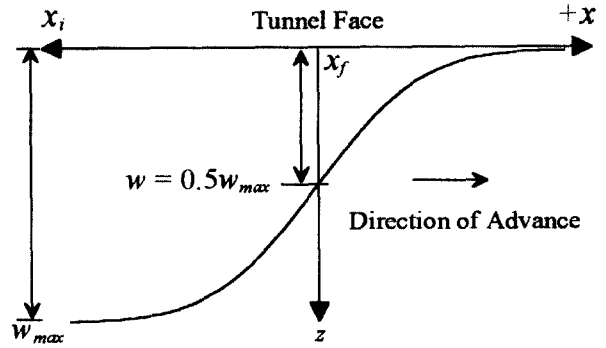


그림 2. 종방향 지표침하곡선(누적확률함수)

$$w = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}i} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \left[G\left(\frac{x-x_i}{i}\right) - G\left(\frac{x-x_f}{i}\right)\right] \quad (2)$$

$$G(a) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}} \int_{-\infty}^a \exp\left[-\frac{\beta^2}{2}\right] d\beta \quad (3)$$

한편, 변곡점을 $\frac{i}{R} = K_a \left\{ \frac{z_0 - z}{2R} \right\}^n$ 의 형태로 표현하고 (여기서 R 은 터널반경, K_a , n 은 지반조건에 따른 변수) 종·횡단면 침하곡선의 변위벡터는 터널 중심을 향한다고 가정할 경우 y 및 x 방향의 수평변위는 각각 식 (4)와 (5)를 이용하여 평가할 수 있다.

$$v = \frac{-ny}{z_0 - z} w \quad (4)$$

$$u = \frac{nV_s}{2\pi(z_0 - z)} \exp\left[-\frac{y^2}{2i^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2}{2i^2}\right] - \exp\left[-\frac{(x-x_f)^2}{2i^2}\right] \right\} \quad (5)$$

2.1.3 변곡점

식 (2)로 정의되는 침하곡선의 특성(곡률 및 경사)은 변곡점 i 의 위치에 좌우되며 따라서 침하곡선의 특성을 이용하여 주변 구조물 및 매설관의 손상정도를 평가할 경우 그 결과는 변곡점의 위치를 어떻게 선정하느냐에

표 1. 정규확률분포곡선의 수치 적분표

$\frac{x-x_f}{i}$	$G\left(\frac{x-x_f}{i}\right)$	$\frac{x-x_f}{i}$	$G\left(\frac{x-x_f}{i}\right)$	$\frac{x-x_f}{i}$	$G\left(\frac{x-x_f}{i}\right)$
0.0	0.500	1.1	0.864	2.1	0.982
0.1	0.540	1.2	0.885	2.2	0.986
0.2	0.579	1.3	0.903	2.3	0.989
0.3	0.618	1.4	0.919	2.4	0.992
0.4	0.655	1.5	0.933	2.5	0.994
0.5	0.691	1.6	0.945	2.6	0.995
0.6	0.726	1.7	0.955	2.7	0.997
0.7	0.758	1.8	0.964	2.8	0.997
0.8	0.788	1.9	0.971	2.9	0.998
0.9	0.816	2.0	0.977	3.0	0.999
1.0	0.841				

표 2. 대표적인 변곡점(i) 제안식

제안자	제안식
Peck(1969)	$i = 0.2(D + z_0)$
O'Reilly와 New(1982)	$i = 0.43(z_0 - z) + 1.1$ (점토) $i = 0.28(z_0 - z) - 0.1$ (모래)
Clough와 Schmidt(1982)	$i = \frac{D}{2} \left(\frac{z_0}{D} \right)^{0.8}$
Mair 등(1993)	$i = z_0 \left[0.175 + 0.325 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right) \right]$

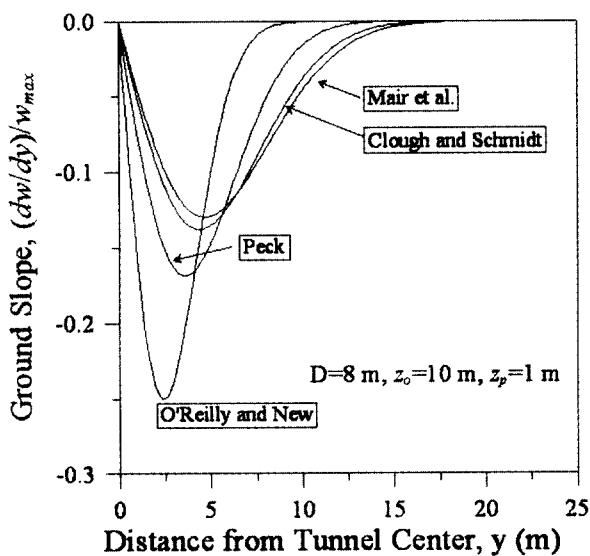
따라 상당한 차이를 보일 수 있다. 일반적으로 침하곡선에서 변곡점의 위치는 지반종류 및 토피고에 가장 큰 영향을 받으며 터널시공방법에 따라서는 큰 차이를 보이지 않는 것으로 알려져 있다.

지금까지 많은 연구자에 의해 변곡점의 위치를 추정하는 경험식들이 제안되었으며 표 2는 이들 중 대표적인 변곡점 산정식을 보여주고 있다. 우리나라 현장을 대상으로한 대표적인 연구로는 서울지하철 및 대구지하철 현장계측자료를 토대로한 배규진(1989)과 김창용(1998)의 연구를 들 수 있으며 특히, 김창용(1998)은 서울지하철의 계측자료와 모래지반을 대상으로한 홍성완(1984)의 실험결과, 그리고 부산지하철을 대상으로한 배규진(1989)의 현장계측자료, 일본계측자료 등을 종합적으로 분석한 결과 Clough와 Schmidt(1982)의 추정식이 우리나라 현장여건에 적합하다고 보고한 바 있다.

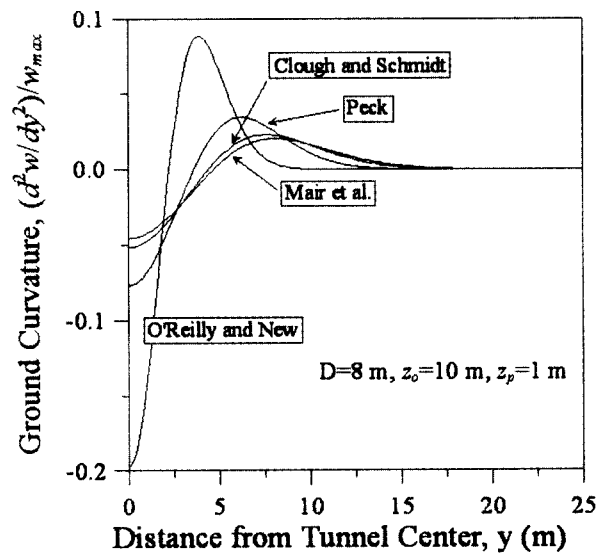
그림 3은 표 2에 제시된 변곡점 산정식을 토대로 구축된 횡단면 지반경사 및 곡률곡선을 비교하고 있다. 보이는 바와 같이 Clough와 Schmidt(1982)의 제안식과

점토지반을 대상으로한 Mair 등(1993)의 제안식은 거의 유사한 결과를 보이고 있으며 Peck(1969)의 결과 또한 큰 차이를 보이지 않고 있으나 O'Reilly와 New(1982)의 제안식은 경사 및 곡률을 매우 크게 평가하고 있어 매우 보수적인 것으로 나타났다. 이러한 경향은 변곡점의 위치가 침하곡선의 특성에 미치는 영향을 단적으로 보여주고 있으며, 따라서 침하곡선을 추정할 경우 현장의 지반조건 및 시공조건을 고려하여 변곡점의 위치를 선정하여야 할 것으로 판단된다. 한편, 대상현장의 횡단면 지표침하에 대한 계측자료가 존재할 경우 이를 토대로 종축을 $\log(w)$ 그리고 횡축을 터널중심으로부터의 거리의 제곱 y^2 으로 표현되는 도표를 작성하여 $w=0.606w_{max}$ 에 해당하는 지점까지의 수평거리를 변곡점의 위치로 간주할 수 있다. 이러한 방법은 기존의 경험식을 이용하는 방법보다 현장특유의 조건을 반영하는 보다 합리적인 방법이라고 할 수 있다.

한편, 종방향 침하를 평가할 경우에는 누적확률함수의 특성상 종 · 횡방향 곡선의 변곡점은 동일한 것으로,



(a) 경사



(b) 곡률

그림 3. 변곡점 위치에 따른 지반경사 및 곡률

표 3. 횡 · 종단면 침하곡선 특성

단면	항	최대치 평가식	발생위치
횡단면 (y-z plane, x-x _i = -∞)	수평	$ v_{max} = \frac{n}{z_o - z} \frac{V_s}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\right]$	y = ± i
	경사	$\left \frac{\partial w}{\partial y}\right _{max} = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i} \exp\left[-\frac{1}{2}\right]$	y = ± √3 i
	인장 변형률	$\left \frac{\partial v}{\partial y}\right _{max} = \frac{-n}{z_o - z} \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i} 2 \exp\left[-\frac{3}{2}\right]$	y = ± √3 i
	곡률	$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}\right)_{max} = \frac{2V_s}{\sqrt{2\pi} i^3} \exp\left[-\frac{3}{2}\right]$ $\left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right)_{max} = \frac{-n}{z_o - z} \frac{V_s}{\pi i^2} \exp\left[-\frac{3}{2}\right] \times$ $\left\{ \exp\left[-\frac{x-x_i^2}{2i^2}\right] - \exp\left[-\frac{x-x_i^2}{2i^2}\right] \right\}$	y = ± √3 i
종단면 (x-z plane, y=0)	수평	$ u_{max} = \frac{n}{z_o - z} \frac{V_s}{2\pi}$	x = x _i
	경사	$\left \frac{\partial w}{\partial x}\right _{max} = \frac{V_s}{2\pi i^2}$	x = x _i
	인장 변형률	$\left \frac{\partial u}{\partial x}\right = \frac{\pm n}{z_o - z} \frac{V_s}{2\pi i} \exp\left[-\frac{1}{2}\right]$	x = x _i ± i
	곡률	$\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right)_{max} = \frac{\pm V_s}{2\pi i^3} \exp\left[-\frac{1}{2}\right]$ $\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}\right)_{max} = \frac{\pm n y}{z_o - z} \frac{V_s}{2\pi i^3} \exp\left[-\frac{1}{2}\right]$	x = x _i ± i

즉 $i_x = i_y$, 간주하는데 일반적으로 이러한 가정에 의한 종방향 침하곡선은 현장계측에서 얻어진 침하곡선보다 다소 급한 경사를 나타내는 것으로 알려져 있다. 따라서, $i_x = i_y$ 의 가정을 토대로 작성된 종방향 침하곡선을 이용할 경우 곡률, 경사, 변형률 등이 높게 평가되므로 매설관에 대한 손상평가 결과 또한 보수적인 성향을 나타낸다고 할 수 있다(Attewell 등, 1986).

2.2 지반 변형률, 경사, 곡률

터널굴착시 발생하는 지반의 거동과 이에 따른 주변의 지상 혹은 지중 구조물의 거동은 지반과 구조물의 상대적인 강성 및 경계면 특성 등 지반-구조물 상호작용 정도에 따라 정성·정량적인 측면에서 상당한 차이를 보일 수 있다. 지반거동에 대한 주변 구조물의 구조적 응답특성은 구조물을 3차원적으로 모델링하고 앞서 언급한 방법으로 평가된 이론적인 지반 변위 u, v, w 를 지반/구조물 경계에 작용시켜 얻어지는 구조물의 변형률을 토대로 평가할 수 있으나 이러한 모델링 방법은 설계단계에서 많은 시간과 노력이 요구되므로 실무에서 적용하기에 많은 제약이 있다. 이러한 방법의 대안으로서 예비검토의 개념으로 주변구조물의 변위거동은 지반의 변위거동양상을 따른다고 가정하고 지표침하곡선 및 이의 도함수를 이용하여 계산되는 변위, 경사, 곡

률 등을 토대로 구조물의 손상도를 평가할 수 있다. 일반적으로 구조적 손상은 변위곡선에서 평가대상 항목의 최대치가 발생하는 지점에서 발생하므로 이러한 최대치는 손상에 대한 위험도를 평가하는데 활용될 수 있다. 표 3은 앞절에서 제시한 횡 · 종단면 침하곡선을 토대로 유도된 변위, 경사, 곡률의 최대치 및 발생지점을 요약·정리하고 있다.

3. 지중매설관 손상평가

지중매설관의 파괴는 관 내용물의 과다한 유출 혹은 유출을 방지시키기 위해 즉각적인 보수가 필요한 경우로 정의할 수 있으며, 또한 관체의 구조적 안정성의 개념에서 과다한 변위 혹은 좌굴이 발생한 경우에도 파괴로 간주할 수 있다. 주철관과 같은 취성관의 경우 파괴모드는 다음과 같다.

- 종방향 휨 변형으로 인한 횡단면상의 균열
- 횡방향 휨 변형으로 인한 종방향 분리
- 장기적 부식으로 인한 파열
- 관 조인트에서의 누출
- 관 접속부에서의 누출
- 직접적인 충격으로 인한 손상

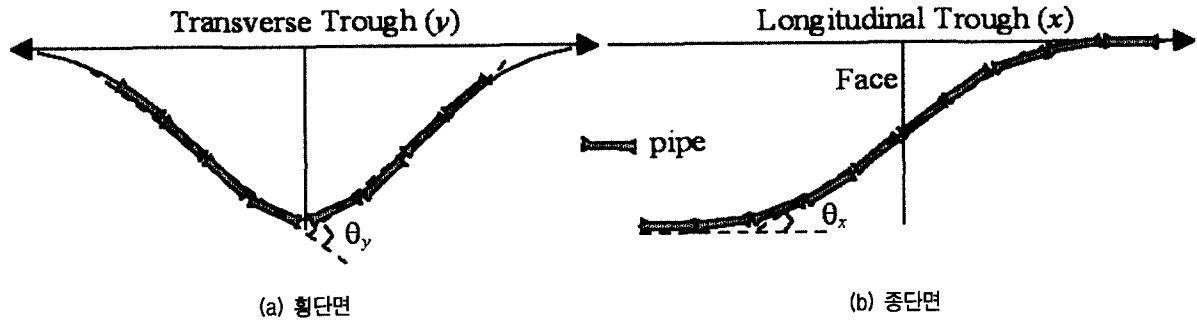


그림 4. 횡 · 종단면상에서의 연결부 최대 회전각

일반적으로 저압관망(low pressure pipeline network)의 경우 조인트에서의 누출이 가장 흔한 파손 유형으로 나타나며, 관체의 부식 및 차량하중 혹은 지반굴착으로 유발되는 부등침하로 인한 원주방향(circumferential)의 균열이 파손의 주된 원인으로 간주된다. 터널굴착시 발생하는 지반거동으로 인한 매설관의 손상은 주로 부등침하에 의한 조인트에서의 회전, 인발, 그리고 관체의 휨 및 수평변형으로 인한 인장균열의 형태로 발생한다.

본 절에서는 매설관의 변위형태는 지반침하곡선(ground settlement trough)을 따른다는 가정 하에 앞서 제시한 지표침하곡선의 특성을 토대로 매설관이 터널굴진축과 직교하는 경우와 터널굴진축에 평행하게 위치하는 경우에 대해 다양한 조건에서의 조인트 회전각(θ), 인발(R), 그리고 인장변형률(ϵ)을 평가하는 방법을 기술하였다. 본 고에서 제시된 기법은 관체의 강성 및 매설관/지반 경계면에서의 미끄러짐 등을 고려하지 않으므로 조인트 회전각 및 인발변위를 다소 과다하게 평가하는 성향이 있다고 할 수 있으나 매설관의 상태 및 조인트 조건 등에 대한 구체적 정보가 주어지지 않은 상태에서 수행되는 예비검토의 수단으로 적용할 수 있다.

3.1 조인트 회전각 및 인발

터널굴착에 따른 지반거동으로 조인트에서 발생 가능한 최대 회전각은 그림 4에서와 같이 조인트가 횡 종단면상에서의 회전에 대하여 가장 불리하게 위치한 경우를 고려하여 평가할 수 있으며 이는 횡 · 종단면 침하곡선의 평균경사를 토대로 구축된 식 (6)과 (7)을 이용하여 근사적으로 계산할 수 있다.

$$\theta_y = 2 \tan^{-1} \left(\frac{V_s}{2\pi i^2} \right) \quad (6)$$

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(0.4 \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i^2} \right) \quad (7)$$

한편, 조인트 자체의 인발저항력을 무시하고 관체는 강성이라고 가정하면 조인트에서의 인발변위는 횡 · 종단면상에서 지반의 수평변위를 토대로 결정할 수 있다. 즉, 매설관의 인발변위는 인접한 두 관의 중앙점에서의 상대 변위로 간주할 수 있으며, 따라서 발생 가능한 최대 인발변위는 임의의 관 중앙점이 최대 수평변위 발생 지점에 위치할 경우 인접관과의 상대 수평변위를 계산함으로써 평가할 수 있다. L_j 를 단일 관체의 길이라고 할 경우 터널과 직교하는 매설관 및 평행한 매설관의 최대 인발변위는 각각 식 (8)과 (9)를 토대로 평가할 수 있다.

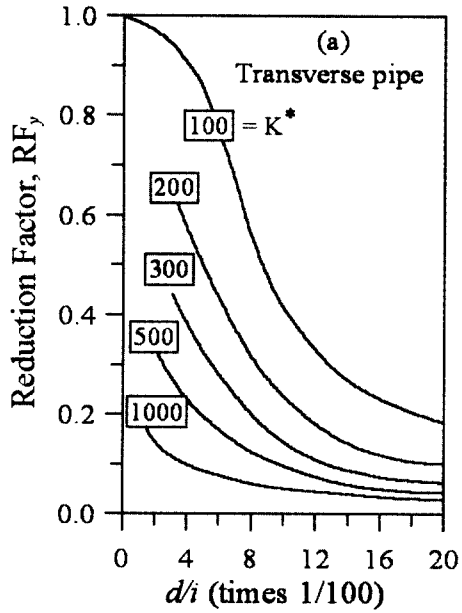
$$R_y = |v_{\max}| - |v_{(y=i+L_j)}| = \left(\frac{0.242 V_s}{z_o - z} \right) \left\{ 1 - 1.65 \left(1 + \frac{L_j}{i} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} \left(1 + \frac{L_j}{i} \right)^2 \right] \right\} \quad (8)$$

$$R_x = |u_{\max}| - |u_{(x=x_j+L_j)}| = \left(\frac{0.159 V_s}{z_o - z} \right) \left\{ 1 - \exp \left[\frac{-L_j^2}{2i^2} \right] \right\} \quad (9)$$

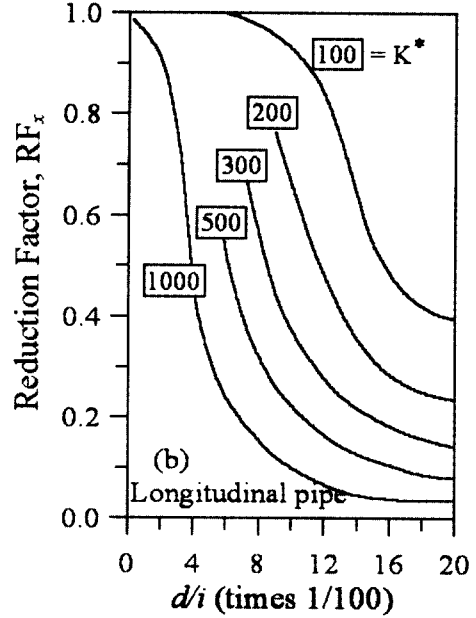
3.2 관 변형률

관의 손상을 유발시키는 변형률은 인장변형률이며 이는 크게 지반의 부등침하로 인한 휨변형률과 매설관과 평행한 방향의 수평변위로 인한 수평 인장변형률로부터 발생한다. 따라서 매설관의 최대 인장변형률은 최대 곡률 및 수평변형률이 발생하는 지점(횡 · 종단면 각각 $y = \sqrt{3}i$ 및 $x - x_j = \pm i$)에서의 휨변형률(지반곡률)과 수평변형률을 조합하여 계산할 수 있다.

일반적으로 매설관 자체의 강성과 매설관-지반 경계면에서의 미끄러짐 현상, 그리고 매설관의 조인트는 관



(a) 횡단관



(b) 종단관

그림 5. 매설관 수평변형률에 대한 감소계수

의 축방향 변형을 현저히 저하시키는 역할을 하므로 관에 평행한 지반의 움직임으로 인한 관체의 인장변형을 평가하는데 있어서 이러한 사항을 무시하고 지반의 수평변형률을 관체의 인장변형률로 간주할 경우 보수적인 결과를 낳게 된다. 이러한 맥락에서 Attewell 등(1986)은 관체의 인장변형률을 평가하는데 있어 매설관이 보유하는 강성을 고려하기 위해 Poulos와 Davis(1980)가 제안한 팽창성 지반에 시공되는 말뚝의 경우 지반의 수축 혹은 팽창으로 인해 발생하는 말뚝의 인장변형률 평가기법을 토대로 매설관의 강성으로 인한 변형률 감소계수 (RF)를 그림 5와 같이 제안하였다. 그림 5에서의 $K^* = \frac{E_p RA}{E_g}$ 는 지반-매설관 강성계수로서 매설관과 지반의 상대적 강성을 나타내는 계수이며 여기서 E_p 와 E_g 는 각각 관 및 관 주변지반의 탄성계수, A_p 는 관벽의 단면적, 그리고 RA 는 $A_p / \frac{1}{4} \pi d^2$ 로 표현되는 관의 단면적비로 정의된다(여기서 d 는 관의 외경). 따라서 횡·종단면상의 최대인장변형률은 식 (10)~(15)를 토대로 평가할 수 있다.

횡단면)

• 휨변형률

$$\epsilon_{by} = \frac{d}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)_{\max}$$

$$= \frac{V_s d}{\sqrt{2} \pi i^3} \exp\left[-\frac{3}{2}\right] = 0.089 \frac{V_s d}{i^3} \quad (10)$$

• 수평변형률

$$\begin{aligned} |\epsilon_{ay}| &= RF_y \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)_{\max} \\ &= \frac{RF_y}{z_o - z} \frac{2 V_s}{\sqrt{2} \pi i} \exp\left[-\frac{3}{2}\right] = RF_y \frac{0.178 V_s}{(z_o - z) i} \quad (11) \end{aligned}$$

• 총 인장변형률

$$\epsilon_{by} = \epsilon_{by} + |\epsilon_{ay}| \quad (12)$$

종단면)

• 휨변형률

$$\begin{aligned} \epsilon_{bx} &= \frac{d}{2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)_{\max} \\ &= \frac{\pm V_s}{2 \pi i^3} \exp\left[-\frac{1}{2}\right] \frac{d}{2} = 0.097 \frac{V_s d}{i^3} \quad (13) \end{aligned}$$

• 수평변형률

$$\begin{aligned} |\epsilon_{ax}| &= RF_x \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)_{\max} \\ &= \frac{RF_x}{z_o - z} \frac{V_s}{2 \pi i} \exp\left[-\frac{1}{2}\right] = RF_x \frac{0.097 V_s}{(z_o - z) i} \quad (14) \end{aligned}$$

표 4. 매설관의 재질에 따른 설계변형률 및 허용 변형률 증가

매설관 재질	설계 변형률 ($\mu \epsilon$)		허용 변형률 증가 ($\mu \epsilon$)	
	인장	압축	인장	압축
Pit 회주철 (pit cast grey iron)	370	1550	100	1200
Spun 회주철 (spun cast grey iron)	430~490	1770~2040		
연주철(ductile iron)	820	1020	500	700

(After Attewell 등, 1986; Bracegirdle 등, 1996)

● 총 인장변형률

$$\epsilon_{tx} = \epsilon_{bx} + |\epsilon_{ax}| \quad (15)$$

3.3 매설관 손상한계

터널굴착으로 발생하는 매설관의 손상여부를 평가하기 위해서는 대상 매설관의 각 평가항목별 손상한계를 설정하여야 한다. 일반적으로 매설관의 손상여부는 터널굴착이전 매설관의 부식정도, 응력수준, 조인트 형식 및 시공상태에 따라 달라지므로 모든 경우에 대하여 일률적인 수치를 적용하는데는 많은 문제가 있으며, 매설관의 시공완료후 시간이 경과하면서 부식정도 및 외부 영향 등이 누적됨에 따라 응력수준 또한 증가하므로 이를 고려하여 손상한계를 설정하여야 한다.

3.3.1 허용변형률

일반적으로 매설관의 허용변형률을 설정할 경우에는 매설관의 재료와 부식정도, 그리고 응력수준 등을 종합적으로 고려하여야 한다. 즉, 매설관의 재질은 연주철(ductile iron)과 같은 연성주철과 회주철(low-grade grey iron)과 같은 취성주철로 구분되며, 취성주철의 경우 응력집중으로 인한 취성파괴가 발생할 가능성이 높으므로 연성주철 보다 낮은 허용 변형률을 적용하여야 한다. 표 4는 Attewell 등(1986)과 Bracegirdle 등(1996)이 제안

한 설계시 적용되는 설계변형률 및 손상평가지 적용할 수 있는 허용 변형률 증가량을 보여주고 있다.

3.3.2 허용회전각 및 인발변위

매설관의 조인트 형식은 매설관과 지반의 상호작용에 많은 영향을 미치는 매우 중요한 항목이며 따라서 조인트 회전 및 인발변위로 인한 누출 가능성을 평가할 경우에는 조인트 형식을 고려하여 손상한계를 설정하여야 한다. 비록 조인트에서의 누출은 관체의 파열이 발생할 경우와 같은 극심한 결과를 초래하지는 않으나 과도한 누출은 결국 관의 파괴로 이어질 수 있으므로 이에 대한 정확한 검토가 요구된다. 일반적으로 가스관이나 상수도관으로 많이 사용되는 주철관의 조인트 형식은 볼트 및 플랜지 형식과 같은 강성 조인트, Lead-yarn과 같은 준 강성 조인트, 그리고 고무 개스킷과 같은 연성 조인트로 대별된다. 과거에 매설된 도심지 가스관 혹은 상수도관의 조인트는 대부분 준 강성의 Lead-yarn의 형식으로 이루어져 있으며, 최근에 시공된 관의 경우 일반적으로 연성 조인트로 시공되어 있다.

Lead-yarn 조인트로 시공된 가스관의 경우 조인트의 강성이 크기 때문에 조인트에서 발생하는 회전 및 인발변위에 대해 매우 민감하며 터널시공으로 인한 손상여부는 변위발생 이전의 상태에 좌우된다. 즉, 조인트 회전에 의한 누출 여부는 회전각의 크기뿐만 아니라 조인트의 시공상태 및 하중재하 속도 등에 좌우되며 누

표 5. 매설관 종류에 따른 허용 증가 회전각 및 인발변위

조인트 방식 및 상태	회전각 (degree)	인발변위 (mm)
Lead-yarn 조인트의 가스관 (초기누출 有)	0	0
Lead-yarn 조인트의 가스관 (초기누출 無)	1.0	10
Lead-yarn 조인트의 상수도관	1.5	15
고무 개스킷 조인트의 가스관 혹은 상수도관	2.0	25

(After Attewell 등, 1986)

출이 시작되지 않은 경우에는 4° 정도의 회전까지는 누출이 유발되지 않으나 이미 누출이 시작된 경우에는 경미한 추가 회전에도 누출량이 현저히 증가되는 것으로 보고되고 있다(Attewell 등, 1986). 한편, 매설관 손상의 측면에서 연성 조인트는 부등침하 발생에 따른 조인트 회전을 흡수하는 능력이 뛰어나며 대부분의 수평 지반 거동이 조인트에서의 수평변위로 흡수되어 관체 유발 인장력을 저감시키는 장점을 보유하나 조인트에서의 인발변위에 대한 검토를 통해 조인트 인발변위로 인한 누출발생 가능성에 대한 검토가 수행되어야한다. 표 5는 터널시공에 따른 지반거동으로 인한 주철관의 허용 조인트 회전각 및 인발변위를 나열하고 있다.

4. 매개변수 연구

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

4.1 검토조건

매개변수 연구에서는 직경(D) 8 m의 원형터널이 시공되는 경우에 대하여 토피고(z_0) 및 매설관의 매설깊이(z_p), 지반손실률(V)을 주변수로 채택하고 다양한 경우에 대한 검토를 수행하였다. 여기서의 지반손실률 V 는 지표침하 트라프 체적(V_f)의 터널 단면적($V_t = \pi D^2/4$)에 대한 백분율로 표현되며, 지반조건 및 시공수준 등을 간

표 6. 해석에 사용된 변수

구분	Case	
기하조건	z_0/D	1.5 ~ 6.5
	z_p/z_0	0.1, 0.2
지반손실률	$V(\%)$	1 ~ 5

접적으로 표현하는 파라메타라고 할 수 있다. 한편, 상기 손상평가식을 이용하여 설계도표를 작성하는데 있어 필요한 변곡점은 우리나라 지반에 적합한 것으로 평가된바 있는 Clough와 Schmidt(1982)의 산정식을 사용하였으며, 이와 아울러서 변곡점(i)의 영향을 검토하기 위해 앞서 언급한 타 연구자가 제안한 변곡점 산정식에 대한 적용성을 평가하였다. 표 6은 본 연구에서 고려한 각종 파라메타의 범위를 보여주고 있다. 일반적으로 터널이 도로를 따라서 계획되는 점을 감안하여 터널과 매설관이 직교하는 경우(직교관)와 평행한 경우(평행관)에 대한 검토를 수행하였다. 한편, 일반적으로 도심지에 시공되는 상·하수도관을 고려하여 조인트 간격(L_j)은 $L_j=5$ m로 간주하였다.

4.2 지반손실률 및 터널깊이의 영향

앞서 언급한 바와 같이 터널굴착시 발생하는 지반손실률(V)은 터널의 기하조건과 지반조건, 그리고 시공수준에 따라 좌우되며, 매설관의 손상여부를 좌우하는 매우 중요한 파라메타라고 할 수 있다. 그림 6과 7은 심도 $z_0=10$ m의 터널 상부에 위치하는 직교관의 경우에 있어서 지반손실률 V 에 따른 매설관의 회전각 θ 및 인발변

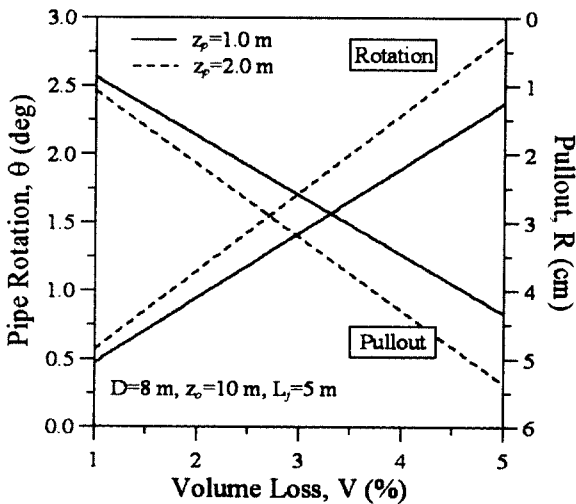


그림 6. 지반손실률에 따른 회전각 및 인발변위

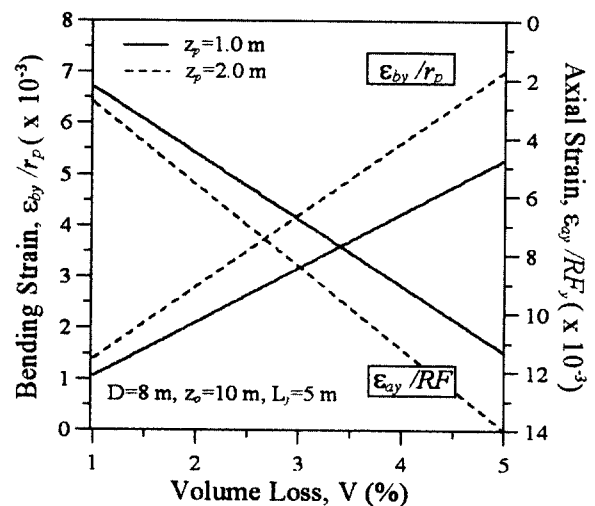


그림 7. 지반손실률에 따른 휨 및 수평변형률

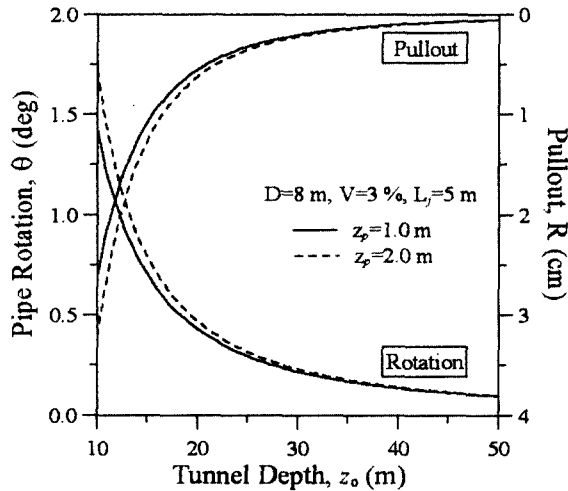


그림 8. 터널깊이에 따른 회전각 및 인발변위

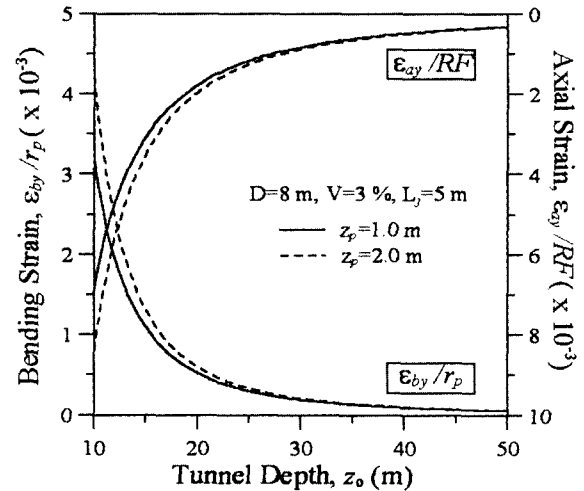


그림 9. 터널깊이에 따른 휨 및 수평변형률

위 R , 그리고 관체의 휨 ϵ_{by} 및 수평변형률 ϵ_{ay} 변화 경향을 매설심도 $z_p=1.0$ 및 2.0 m의 매설관에 대하여 보여주고 있는데 여기서 매설관의 매설 심도에 대한 영향은 변곡점 산정식을 적용하는데 터널의 토포고를 매설심도 만큼 줄이는 방법으로 고려하였다. 보이는 바와 같이 지반손실률 V 가 증가함에 따라 모두 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있는데, 전반적으로 임의의 지반손실률 V 에서 매설관의 심도가 깊어질수록 손상정도가 증가하며 이러한 경향은 지반손실률이 클수록 더욱 뚜렷해지는 경향을 보이고 있다. 따라서, 매설관 손상평가지 매설관의 깊이에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다.

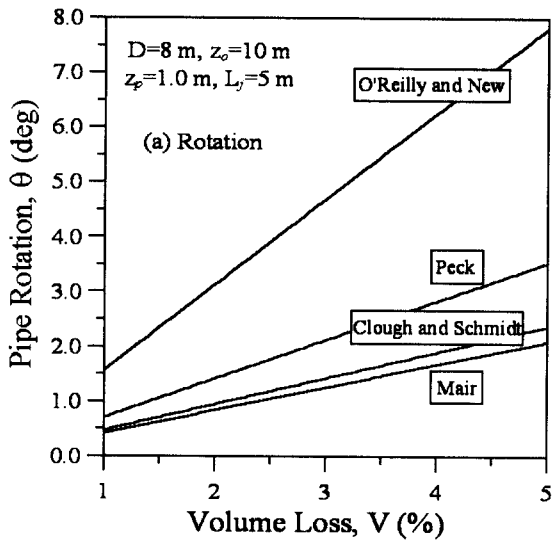
임의의 지반손실률에 있어서 매설관의 손상여부를 좌우하는 인자는 터널의 심도(z_0)라고 할 수 있다. 그림 8과 9는 지반손실률이 $V=3\%$ 인 경우에 있어서 터널심도에 따른 각 손상평가항목의 변화경향을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 각 손상평가항목은 터널심도가 깊어짐에 따라 지수함수 형태로 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 터널심도가 증가함에 따라 침하곡선의 최대침하량(w_{max})이 감소하고 변곡점 i 가 증가하여

침하곡선의 폭이 증가하기 때문으로 사료되며, 전반적으로 터널심도가 $z_0 < 20$ m, 즉 $z_0/D < 2.5$, 구간에서 터널심도가 감소함에 따라 손상정도가 현저히 증가하는 경향을 나타내고 있어 $z_0/D < 2.5$ 의 경우에 있어서는 지반손실률을 최소화하고 매설관 주변을 보강하는 등 시공관리에 세심한 주의를 요하여야 할 것으로 판단된다.

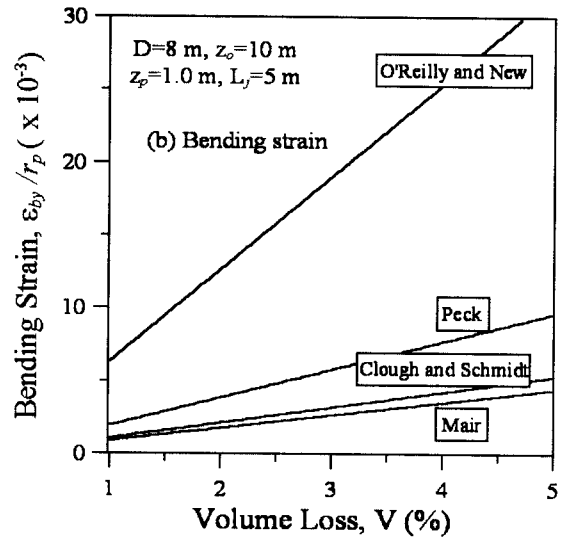
표 7은 지표면으로부터 1 m 하부에 매설된 직경 $d=30$ cm의 매설관 아래에 $D=8$ m, $z_0=10$ m의 터널이 시공되는 경우에 있어서 표 5에 제시된 관종별 손상한계를 토대로 결정된 각 항목별 임계 지반손실률(V_{cn})을 제시하고 있다. 여기서의 임계 지반손실률은 각 손상항목에 있어서 손상을 유발시키지 않는 최대 허용 지반손실률로서 보이는 바와 같이 관의 재질에 관계없이 회전각이나 조인트 인발변위 보다는 인장변형률에 대한 임계 지반손실률(V_{cn})이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 특히 회주철관(grey iron pipe)의 경우 임계 지반손실률이 $V_{cn} < 0.5\%$ 인 것으로 나타나 매설관의 손상을 피하기 위해서는 별도의 보강대책이 수립되어할 것으로 판단된다.

표 7. 매설관 종류에 따른 임계 지반손실률

관 재질	조인트 형태	임계 지반손실률 (V_{cn}) (%)			비고
		회전각	인발변위	인장변형률	
Pit 회주철 (pit cast grey iron)	Lead-yarn 조인트의 상수도관(무결합)	2	1.5	0.5	인장변형률 평가결과가 지배
	고무 개스킷 조인트의 상수도관	4	2.5		
연주철 (ductile iron)	Lead-yarn 조인트의 상수도관(무결합)	2	1.5	1.5	
	고무 개스킷 조인트의 상수도관	4	2.5		



(a) 회전각



(b) 휨변형률

그림 10. 변곡점 산정식에 따른 회전각 및 휨변형률

4.3 변곡점의 영향

앞서 언급한 바와 같이 변곡점의 위치는 침하곡선의 곡률 및 경사 등에 지대한 영향을 미치므로 조인트에서의 회전각 및 변위, 그리고 관체의 인장변형률 등의 손상평가 결과 또한 변곡점의 위치에 따라 많은 차이를 보일 수 있다. 따라서 본 연구에서는 변곡점의 위치가 손상평가 결과에 미치는 영향을 고찰하기 위해 앞서 제시된 대표적인 변곡점 산정식을 이용하여 계산된 손상평가 결과를 비교·분석하였다.

그림 10은 각 평가항목별 변곡점의 영향을 도식적으로 제시하고 있는데 전반적으로 평가결과는 Mair 등, Clough와 Schmidt, Peck, O'Reilly와 New 제안식 순으로 나타났으며, 특히 O'Reilly와 New의 제안식은 매우 보수적인 결과를 주는 것으로 나타났다. 한편, 산정식들 간의 차이는 지반손실률이 증가할수록 증가하는 것으로 나타났으며 이러한 결과는 변곡점의 위치선정이 주변 구조물의 손상평가에 미치는 영향을 단적으로 보여주는 것으로서 손상평가지 변곡점 선정에 많은 주의를 기울여야 할 것으로 판단되며, 우리나라 특유의 지반조건 및 시공조건이 반영된 보다 합리적인 변곡점 산정식의 개발을 위한 지속적인 연구가 요구된다고 하겠다.

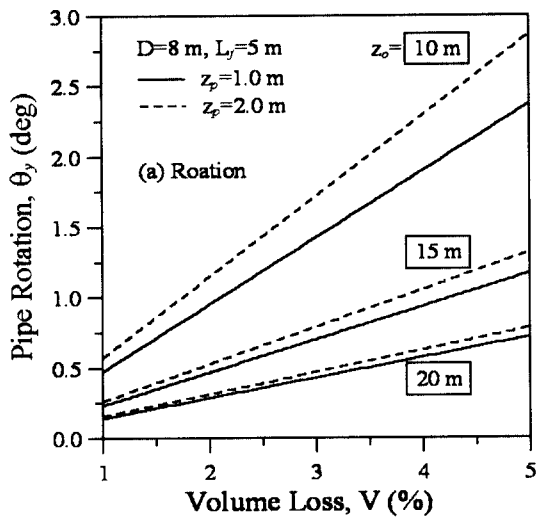
5. 설계도표

본 고에서는 앞서 제시된 손상평가기법을 토대로 터

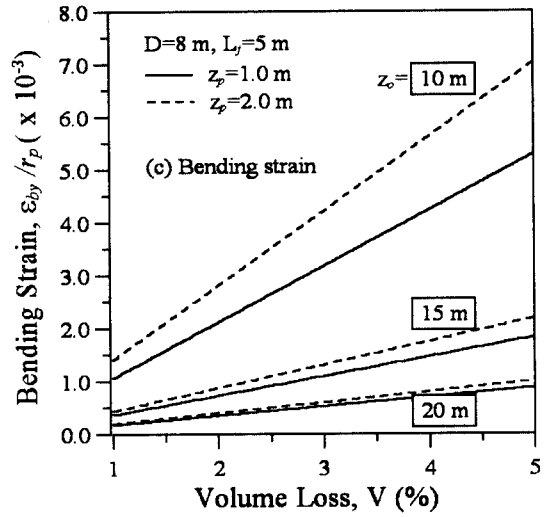
널시공에 따른 지반거동에 의한 매설관 손상여부를 평가할 수 있는 설계도표를 제시하였다. 이러한 설계도표는 도심지에서 시공되는 각종 가스관 및 상·하수도관의 손상평가에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

5.1 터널굴진축에 직교하는 매설관

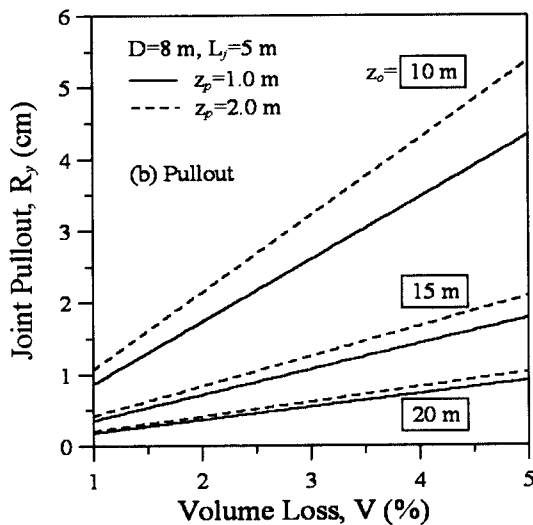
그림 11은 본 연구에서 제시한 손상평가기법을 토대로 얻어진 회전각과 인발변위, 그리고 휨 및 수평변형률에 대한 결과를 종합하여 구축된 터널굴진축에 직교하는 매설관에 대한 설계도표를 제시하고 있다. 본 설계도표에서는 총 세 가지 터널 심도($z_0=10, 15, 20$ m)에 대한 결과를 제시하였으며 그 이외의 경우에는 내삽(interpolation)을 통해 적용할 수 있다. 본 설계도표를 작성하는데 있어서 우리나라 지반특성에 적합한 것으로 보고된 바 있는 Clough와 Schmidt(1982)의 변곡점 산정식을 적용하였으며, 따라서 제시된 설계도표는 현장지반조건을 고려하여 지반손실률을 정확히 평가하여 적용할 경우 예비평가의 관점에서는 우리나라의 일반적인 지반조건에 큰 무리 없이 적용할 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 그림 11에서 관찰할 수 있는 바와 같이 $z_0/D \geq 2.5$ ($z_0 \geq 20$ m)에서는 손상도가 매우 낮은 것으로 나타나고 있어 일반적인 시공조건에 있어서 터널심도가 $z_0/D \geq 2.5$ 의 경우에는 주변 매설관의 손상 가능성이 희박한 것으로 간주하여도 무방할 것으로 판단된다.



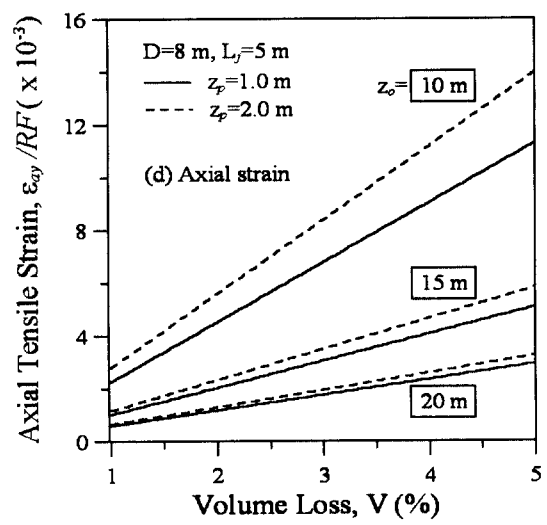
(a) 회전각



(b) 인발변위



(c) 휨변형률



(d) 수평변형률

그림 11. 직교관에 대한 설계도표

5.2 터널굴진축과 평행한 매설관

5.2.1 터널굴진축과 매설관축이 일치하는 경우 ($y=0$)

터널이 매설관과 평행하게 시공되는 경우 대한 회전각, 휨 및 수평변형률에 대한 평가식은 식 (16)~(18)에 제시된 바와 같이 직교관에 대한 평가식의 비로 표현할 수 있다. 한편, 인발변위의 경우 평행관과 직교관의 최대 인발변위비는 식 (19)와 같이 표현되며, 이는 다시 그림 12에 제시된 바와 같이 단일관체의 길이와 변곡점의 비에 L_j/i 에 따라 변화하는 보정계수로 표현할 수 있다. 따라서 터널굴진축과 매설관축이 평행한 경우에는 직교관에 대한 검토결과에 식 (16)~(18), 그리고 그림 12에 제시된 보정계수를 적용함으로써 손상정도를 평

가할 수 있다.

$$\frac{\theta_x}{\theta_y} = \frac{\tan^{-1}\left(\frac{V}{0.4\sqrt{2\pi}i^2}\right)}{2 \tan^{-1}\left(\frac{V}{2\pi i^2}\right)} = 0.81 \quad (16)$$

$$\frac{\epsilon_{bx}}{\epsilon_{by}} = \left(\frac{0.048 Vd}{i^3}\right) / \left(\frac{0.089 Vd}{i^3}\right) = 0.54 \quad (17)$$

$$\frac{\epsilon_{ax}}{\epsilon_{ay}} = RF_x \left(\frac{0.096 V}{(z_o - z_p)i}\right) / \left(\frac{0.178 V}{(z_o - z_p)i}\right) = 0.54 RF_x \quad (18)$$

$$\frac{R_x}{R_y} = \frac{\frac{0.159 V_s}{z_o - z_p} \left\{1 - \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{L_j}{i}\right)^2\right]\right\}}{\frac{0.242 V_s}{z_o - z_p} \left\{1 - 1.65 \left(1 + \frac{L_j}{i}\right) \exp\left[-\frac{1}{2} \left(1 + \frac{L_j}{i}\right)^2\right]\right\}} \quad (19)$$

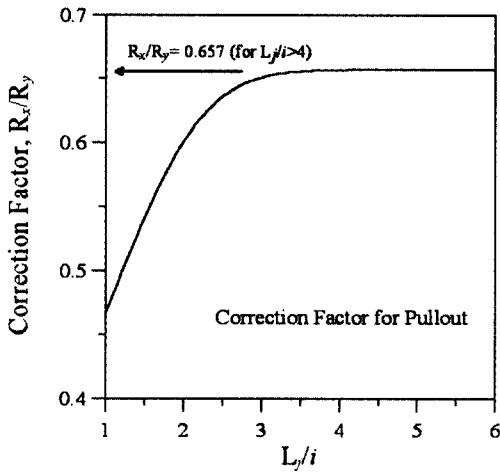
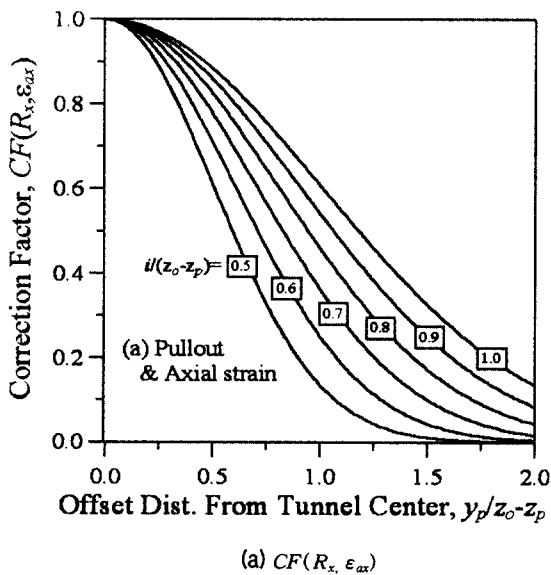


그림 12. 평행관의 인발변위에 대한 보정계수

식 (16)~(19)로 표현되는 평행관에 대한 보정계수는 1.0보다 작은값을 보이므로 수치상으로는 직교관 보다 평행관의 경우 손상정도가 낮게 평가된다. 그러나 평행관의 경우에는 관체의 모든 부위가 지반거동을 경험하게 되므로 각 손상평가항목이 최대치에 노출될 가능성이 매우 높으나 직교관의 경우에는 관의 일부분만이 지반거동에 노출되므로 취약한 부위가 최대 손상을 받게 될 가능성은 상대적으로 낮다고 할 수 있다. 따라서 평행관의 경우 손상정도가 낮게 평가되더라도 가중치를 적용하여 이를 설계에 반영하여야 할 것으로 판단된다.

5.2.2 터널굴진축과 매설관축이 편심을 갖는 경우 ($y=y_p$)



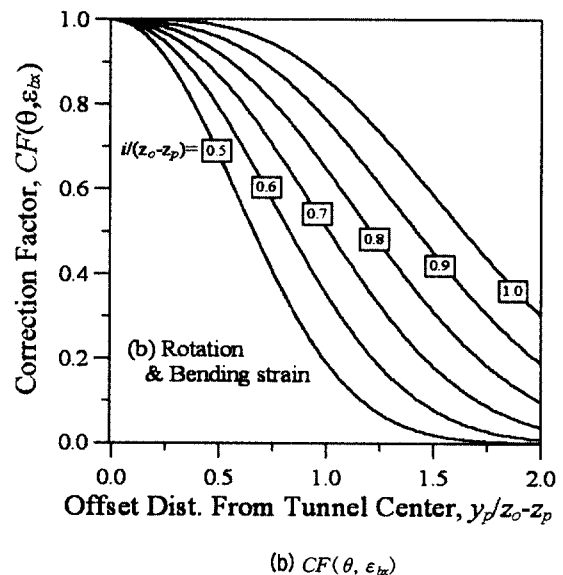
(a) $CF(R_x, \epsilon_{ax})$

지하철과 같은 도심터널의 경우 기 개설된 도로를 따라 시공되는 경우가 일반적이며 많은 경우에 있어 매설관이 터널과 평행하나 터널중심축에서 임의 거리($y=y_p$)만큼 이격되어 시공되는 경우가 발생한다. 앞서 제시된 평행관에 대한 평가식들은 매설관과 터널축이 일치하는 경우이므로 터널축으로부터 편심을 갖는 매설관의 경우에는 이에 대한 보정이 필요하다.

터널축으로부터 편심을 가진 매설관에는 종방향 연직침하 $w(y=y_p)$ 뿐만 아니라 관체에 연직으로 작용하는 수평변위 $v(y=y_p)$ 가 작용하므로 관체의 휨변형과 회전각은 연직침하 w 와 수평변위 v 의 합변위 (vector sum; $w+v$)에 의해 발생되며 이러한 합변위는 터널중심축에서의 침하량 $w_{max}(y=0)$ 보다 작으므로 매설관에 작용하는 회전각과 휨변형률 또한 감소한다. 즉, 터널중심축에서 $y=y_p$ 만큼 벗어난 지점에서의 연직침하와 수평변위는 각각 식 (20)과 (21)로 표현되므로 합변위는 식 (22)의 형태로 표현할 수 있으며 결국 편심을 갖는 관체의 매설관에 작용하는 횡단변위는 보정계수 $CF(\theta, \epsilon_{bx})$ 만큼 감소한다. 따라서 터널 중심으로부터 $y=y_p$ 에 위치한 매설관의 휨변형률과 회전각은 터널축과 매설관이 일치하는 경우의 수치에 보정계수 $CF(\theta, \epsilon_{bx})$ 를 적용하여 산정할 수 있다.

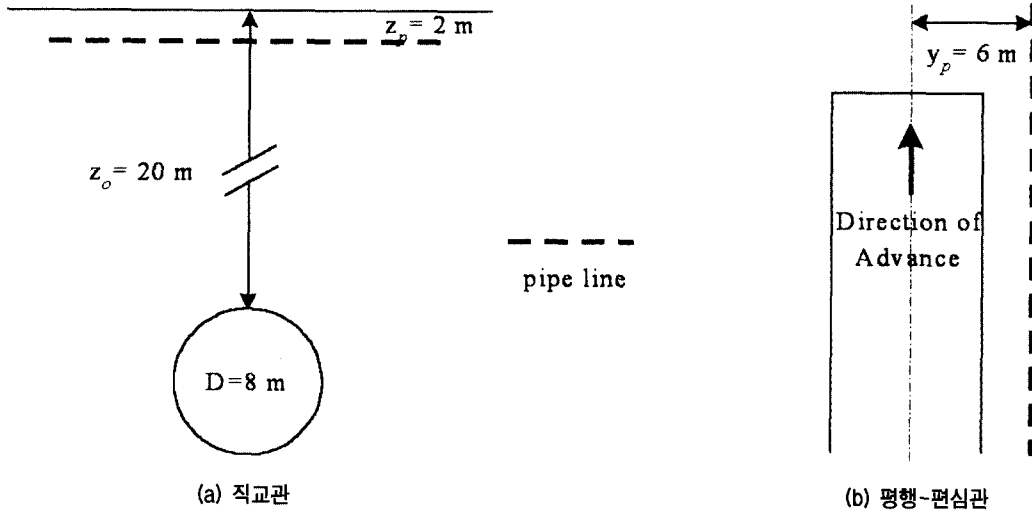
$$w_{y=y_p} = \exp\left[\frac{-y_p^2}{2i^2}\right] w_{max} \quad (20)$$

$$v_{y=y_p} = \frac{-y_p}{z_o - z_p} \exp\left[\frac{-y_p^2}{2i^2}\right] w_{max} \quad (21)$$



(b) $CF(\theta, \epsilon_{bx})$

그림 13. 편심 매설관에 대한 보정계수



$E_p(\text{soil modulus}) = 20\text{MN/m}^2$
 pipe outside dia. $d = 50\text{cm}$
 주) 지반 강성은 매설관 주변 지반의 강성

$E_p(\text{pipe modulus}) = 70\text{GN/m}^2$
 pipe thickness $t = 1\text{cm}$

그림 14. 검토조건 개략도

vector sum $(v + w)_{y=y_p}$

$$= \sqrt{1 + \left(\frac{y_p}{z_o - z_p}\right)^2} \exp\left[-\frac{y_p^2}{2i^2}\right] w_{\max}$$

$$= CF(\theta, \epsilon_{bx}) w_{\max} \quad (22)$$

한편, 터널중심축에서 $y=y_p$ 만큼 떨어진 지점의 종방향 수평변위 $u(y=y_p)$ 는 식 (5)에서 관찰할 수 있는 바와 같이 $y=0$ 의 경우와 비교하여 $\exp[-y_p^2/2i^2]$ 만큼 감소하므로 종방향 수평변위에 비례하는 조인트 인발변위 R_x 와 축방향 인장변형률 ϵ_{ax} 또한 같은 크기로 감소한다. 따라서 터널 중심축에서 일정한 거리만큼 이격되어 매설된 매설관의 조인트 인발변위 R_x 와 축방향 인장변형률 ϵ_{ax} 에 대한 보정계수 $RF(R_x, \epsilon_{ax})$ 는 식 (23)과 같이 표현된다.

$$CF(R_x, \epsilon_{ax}) = \exp\left[-\frac{y_p^2}{2i^2}\right] \quad (23)$$

그림 13은 각각 식 (22)와 (23)을 $y_p/(z_o-z_p)$ 와 $i/(z_o-z_p)$ 의 함수로 표현되는 도표의 형식으로 제시하고 있으며 이 표를 이용하여 다양한 조건에 대한 검토가 가능하다.

5.3 설계도표 적용에

5.3.1 검토조건

본 절에서는 제시된 설계도표의 적용에 대한 예시를

위해 15 m의 토피고를 갖는 직경 8 m의 터널이 시공되는 경우에 대한 매설관 손상평가 예를 다루었다. 터널시공시 지반거동이 문제가 되어 주변 매설관 및 구조물에 많은 영향을 미치는 경우는 지하수위가 높고 지반조건이 불량한 경우이므로 이러한 경우를 고려하여 단일지층의 토사지반($E_s=20 \text{ MN/m}^2$)에 터널이 시공되는 경우를 대상으로 하였다. 매설관은 간격 $L_j=5 \text{ m}$ 의 lead-yarn 조인트를 갖는 연주철 상수도관이 지표면으로부터 2 m의 심도에 매설되어 있는 경우를 고려하였으며, 터널굴진축과 직교하는 직교관(Case A)과 매설관의 중심축이 터널 중심축으로부터 6 m 이격되어 평행하게 위치하는 평행-편심관(Case B)에 대한 검토를 수행하였다. 한편, 지하수가 높게 위치하고 지반조건이 불량한 경우를 고려하여 지반손실률은 $V=4\%$ 로 설정하였다. 그림 14는 검토조건을 도식적으로 보여주고 있다.

5.3.2 검토결과

표 8은 검토와 검토순서를 요약하고 있다. 보이는 바와 같이 변곡점 및 수평변형률 감소계수를 결정한 후 본 고에서 제시한 설계도표 및 감소계수를 이용하여 직교관에 대한 손상평가를 수행한 후 평행 혹은 평행-편심관의 경우에는 직교관의 결과에 보정계수를 적용하는 방법으로 손상평가를 수행할 수 있다.

(1) 침하트라프 체적

$$V_s = V(\%) \times V_t = 0.04 \times 50.3 \text{ m}^3 = 2.01 \text{ m}^3$$

표 8. 검토결과 요약

직교관 (Case A)								
검토항목 (1)	설계도표 (2)	감소계수 (3)	평가치 (4)		임계치 (5)	손상여부 (6)	비고 (7)	
회전각(θ_y)	1.0°	-	1.0°		1.5°	No	그림 11(a)	
인발변위(R_y)	1.5 cm	-	1.5 cm		1.5 cm	Yes	그림 11(b)	
인장 변형률 (ϵ_{at})	휨변형률 (ϵ_{by})	435 $\mu\epsilon$	-	435 $\mu\epsilon$	1585 $\mu\epsilon$	500 $\mu\epsilon$	Yes	그림 11(c), (d) 그림 5(a), (b)
	수평변형률 (ϵ_{ay})	4600 $\mu\epsilon$	0.25	1150 $\mu\epsilon$				
평행-편심관 (Case B)								
검토항목 (8)	평행관 보정계수 (9)	편심관 보정계수 (10)	평가치 (11) = (2) × (9) × (10)		임계치 (12)	손상여부 (13)	비고 (14)	
회전각(θ_x)	0.81	0.7	0.5°		1.5°	No	식 (16) 그림 13(b)	
인발변위(R_x)	0.45	0.6	0.4 cm		1.5 cm	No	그림 12 그림 13(a)	
인장 변형률 (ϵ_{at})	휨변형률 (ϵ_{bx})	0.54	0.7	164 $\mu\epsilon$	1177 $\mu\epsilon$	500 $\mu\epsilon$	Yes	식 (17), (18) 그림 13(a), (b)
	수평변형률 (ϵ_{ax})	0.37	0.6	1013 $\mu\epsilon$				

(2) 변곡점

$$i = \frac{D}{2} \left(\frac{z_0}{D} \right)^{0.8} \therefore i = \frac{8}{2} \left[\frac{(15-2)}{8} \right]^{0.8} = 5.9 \text{ m}$$

(3) 수평변형률 감소계수 (그림 5)

$$K^* = \frac{E_p R_A}{E_g}$$

$$R_A = \frac{4(d-t)t}{d^2} = \frac{4(50-1)}{50^2} = 0.08$$

$$E_g = 20 \text{ MPa}, E_p = 70 \text{ GPa}, t = 10 \text{ mm},$$

$$\therefore K^* = \frac{E_p R_A}{E_g} = 280$$

$$d/i = 0.08, \therefore RF_y = 0.25, RF_x = 0.68$$

6. 결론

본 고에서는 도심 터널의 과학적인 설계/시공에 관련된 요소기술 확보의 일환으로 기존의 연구자들이 제시한 손상평가기법을 토대로 지중매설관 손상여부의 예비평가지 적용할 수 있는 평가기법을 제시하였다. 제시된 기법을 토대로 다양한 경우에 대한 매개변수 연구를 수행한 결과 제시된 손상평가기법의 평가결과는 변곡점의 위치에 많은 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 터널시공으로 인한 주변 구조물 및 지중 매설관 손상평가의 효율성 제고를 위해서는 우리나라 지반특성 및 시공조건이 반영된 보다 합리적인 변곡점 산정식의 개발을 위한 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

매개변수 연구결과 터널심도가 터널직경의 2.5배 이하인 경우 손상도가 현저히 증가하는 것으로 나타나 이러한 시공조건에서는 터널굴착에 따른 지반손실률을 줄이기 위한 대책마련이 필요하며 아울러서 지중 매설관에 대한 보강대책을 수립하는 등 시공관리에 세심한 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다. 한편, 전반적으로 관의 재질이나 연결부의 형식에 관계없이 관체의 인장 변형률에 대한 임계 지반손실률이 가장 낮은 것으로 나타나 관체의 인장변형률이 손상여부를 결정짓는 주된 영향인자인 것으로 나타났다. 본 연구에서 제시된 설계도표는 터널과 매설관의 상대적 위치 및 지반손실률 등 다양한 조건에 있어서 매설관의 손상도를 평가하는데 적용할 수 있으며, 따라서 실무에 있어서 설계/시공단계에서 예비평가의 개념에서 매우 유용하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 성균관대학교 산업설비 안전성평가 연구센터 (SAFETY and Structural Integrity Research Center)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

1. 김창용(1998), "도심지 터널 굴착에 따른 지반거동 특성 예측과 인접구조물 손상 평가에 관한 연구", 박사학위논문, 한양대학교

- 대학원.
2. 배규진(1989), "토사터널 굴착에 따른 주변지반의 변위 예측에 관한 연구", 박사학위논문, 연세대학교 대학원.
 3. Attewell, P. B., and Farmer, I. W.(1974), "Ground deformations resulting from shield tunnelling in London Clay". *Canadian Geotech. J.*, Vol.11, pp.380-395.
 4. Attewell, P. B., Farmer, I. W., and Glossop, N. H.(1978), "Ground deformation caused by tunnelling in a silty alluvial clay". *Ground Engineering*, Vol.11, No.8, pp.32-41.
 5. Attewell, P. B. and Woodman, J. P.(1982), "Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunneling in soil". *Ground Engineering*, Vol.15, No.8, pp.13-22.
 6. Attewell, P. B., Yeates, J., and Selby, A. R.(1986). *Soil Movements Induced by Tunnelling and their Effects on Pipelines and Structures*. Blackie, New York.
 7. Bracegirdle, A., Mair, R. J., Nyren R., J., and Taylor R. N.(1996), "A methodology for evaluating potential damage to cast iron pipes induced by tunnelling". *Proc. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam, pp.659-664.
 8. Clough, G. W. and Schmidt, B.(1981). "Design and performance of excavations and tunnels in soft clay". *In Soft Clay Engineering*, Elsevier, pp.569-634.
 9. Glossop, N. H. and Farmer, I. W.(1977), *Ground deformations during construction of a tunnel in Belfast*. Report to the Dept. of the Environment for Northern Ireland and the Transport and Road Research Laboratory, No.R6/77, October 1977, University of Newcastle upon Tyne.
 10. Hong, S. W.(1984), "Ground Movements Around Model Tunnels in Sand", Ph.D thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign.
 11. Leach, G.(1984), *Pipeline response to tunnelling*. British Gas Engineering Research Station, Report E pp.463.
 12. Mair, r. J., Talyor, R. N., and Bracegirdle, A.(1993), "Subsurface settlement profiles above tunnels in clays". *Geotechnique*, Vol. 43, No.2, pp.315-320.
 13. O'Reilly, M. P. and New, B. M.(1982), "Settlements above tunnels in the United Kingdon-their magnitude and prediction". *Proc. Tunnelling '82*, Inst. Mining & Metallurgy, London, pp.173-188.
 14. O'Rourke, T. D. and Trautman, C. H.(1982), "Buried pipeline response to tunnelling ground movement"s. *Proc. Europe '82 Conf.*, Basel, Switzerland, pp.5-12.
 15. Peck, R. B.(1969), "Deep excavations and tunnelling in soft ground", State of the Art Report, *Proc. 7th Int. Conf. SMFE*, Mexico City, State of the Art Volume, pp.225-290.
 16. Poulos, H. G. and Davis, E. H.(1980), *Pile Foundation analysis and Design*. John Wiley & Sons, New York.

(접수일자 2000. 12. 22)