

# 역해석 프로그램에 의한 단선터널 라이닝의 최적 계측 측정수 산정 연구

우종태<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>정회원, 경북대학교 건설환경디자인과 교수

## A study on the estimation of the optimal number of monitoring points in single-track tunnel lining with the inverse analysis program

Jong-Tae Woo<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Construction and Environmental Design, Kyungbuk University, Professor

**ABSTRACT:** In order to determine the optimal number of monitoring points in single-track tunnel lining, this thesis compares and evaluates the results of two cases: when the tunnel lining is modeled into a simple beam form and then is applied to 1) the tunnel lining inverse analysis program, and to 2) the commercially-used program. The displacement and stress of specific tunnel lining cross-sections are determined by entering the load conditions into the commercially-used program for tunnel interpretations. In doing so, two cases were assumed: where a *symmetrically*-distributed load was acting upon the tunnel lining of a single-track tunnel and where an *asymmetrically*-distributed load was in action. By comparing the computed displacement with the stress and displacement determined by entering side numbers 3, 5, and 7 into the tunnel lining inverse analysis program, the optimal number of monitoring points is determined. From the results of the research, it can be inferred that the number of monitoring points needs to be at least 5 points, considering the efficiency of monitoring in practice and the loss-and-damage rate of tunnel monitoring.

**Keywords:** Single-track tunnel lining, Inverse analysis method, Inverse analysis program, Optimal number of monitoring points

**초 록:** 본 논문은 단선터널 라이닝의 최적 계측 측정수를 산정하기 위해 단순보 형태로 모델링하여 터널 라이닝 역해석 프로그램에 적용한 결과와 상용 프로그램에 적용한 결과를 상호 비교하여 평가하였다. 단선터널을 대상으로 터널 라이닝에 대칭 분포하중이 작용하는 경우와 비대칭 분포하중이 작용하는 경우로 가정하여 터널해석 시 널리 사용되는 상용 프로그램에 하중조건을 입력시켜 터널 라이닝의 단면 위치별 변위와 응력을 산출하였다. 산출된 변위를 계측 측정수 3점, 5점, 7점으로 터널 라이닝 역해석 프로그램에 입력시켜서 구한 응력과 변위를 비교하여 최적 계측 측정수를 산정하였다. 연구결과 실무적으로 계측 수행의 경제성과 터널 계측의 손망실률을 고려한 계측 측정수가 최소 5점은 되어야 할 것으로 판단된다.

**주요어:** 단선터널 라이닝, 역해석 기법, 역해석 프로그램, 최적 계측 측정수

## 1. 서 론

최근 들어 건설계측기술은 IT산업 및 정보통신기술의 급격한 발달로 거의 모든 건설현장에서 공사 중

건설 계측이 일반화 되고, 사회기반시설의 효율적인 안전감시 및 유지관리를 위해 지하철, 도시철도, 일반 및 고속철도, 도로, 전력구, 통신구, 공동구 등의 터널 구조물에 유지관리 계측시스템의 도입과 적용이 증가 되고 있다(Lee et. al., 2000; Woo, 2009).

\*Corresponding author: Jong-Tae Woo  
E-mail: jtwoo@kbu.ac.kr

Received December 3, 2013; Revised December 17, 2013;  
Accepted December 23, 2013

일반적으로 터널에서의 계측은 공사계측과 유지관리계측으로 구분하고, 1980년 이후에 건설된 터널의

시공방법은 대부분은 NATM터널로 이 공법은 터널 지보재로 하여금 지반의 강도약화를 최대한 억제하여 지반이 가지고 있는 내하능력을 적극적으로 활용하면서 지속적인 계측관리가 바탕이 되는 공법으로 설계의 타당성을 규명함으로써 시공의 안전성과 경제성을 도모하기 위한 공사계측은 광범위하게 시행되고 있다.

터널공사 시 일상의 시공관리상 반드시 실시해야 하는 일상계측인 터널라이닝의 천단침하와 내공변위 계측수량은 시공 단계에 따라 터널 단면당 천단 1점, 상부반단면 양측 2점, 하부반단면 양측 2점 등 주로 5점에서 계측이 수행되고 있다.

지반조건에 따라 일상계측에 추가하여 실시하는 정밀계측인 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 응력 측정 계측수량도 시공 단계에 따라 터널 단면당 천단 1점, 상부반단면 양측 2점 또는 하부반단면 양측 2점 등 경제성을 고려하여 주로 3~5점에서 계측이 수행되고 있다(Woo, 2006).

NATM터널에서 공사계측은 필수적인 사항이지만 투자되는 많은 계측비용에 비해 계측결과의 신뢰도는 아직까지 낮은 실정이며, 일상계측인 터널라이닝의 천단침하와 내공변위 계측수량 5점과 터널 시공 단계에서 경제성 등을 고려하여 설정되는 정밀계측인 슛크리트 및 콘크리트 라이닝 응력 측정 수량 3~5점이 적정한지에 대한 터널 라이닝의 최적 계측 측정수 산정에 대한 연구는 국내에서 수행된바가 거의 없다(Woo, 2010).

본 논문은 터널 라이닝의 역해석 이론 검토를 통해 역해석 프로그램을 개발하고, 터널 라이닝 역해석 프로그램의 검증에 위하여 단순보 형태로 모델링하여 터널 라이닝 역해석 프로그램에 적용한 결과와 상용 프로그램에 적용한 결과를 상호 비교하여 평가하였다.

터널 라이닝의 최적 계측 측정수를 산정하기 위해 단선터널 라이닝에 작용하는 하중조건을 대칭 분포하중이 작용하는 경우와 비대칭 분포하중이 작용하는 경우로 가정하여 터널해석 시 널리 사용되는 상용 프로그램에 하중조건을 입력시켜 터널 라이닝의 단면

위치별 변위와 응력을 산출하였다. 산출된 변위를 계측 측정 3점, 5점, 7점으로 터널 라이닝 역해석 프로그램에 입력시켜서 구한 응력과 변위를 비교하여 단선터널 라이닝의 최적 계측 측정수를 산정하여 터널 계측의 신뢰도 향상과 계측기술 발전에 기여 하고자 한다.

## 2. 터널 라이닝의 역해석 프로그램

### 2.1 터널 라이닝의 역해석 프로그램 기본이론

터널분야에서 전통적인 역해석 기법에 대한 연구는 Sakurai & Takeuchi가 역산법을 근거로 한 역해석 기법을 제안하였는데, 이 방법은 터널이 선형, 등방성, 탄성체 상태의 지반에서 굴착된다고 가정하여 상대변위로부터 지반의 탄성계수와 초기응력을 추정하였다. 또한 Hisatake & Ito는 최소자승법을 이용하여 터널 라이닝의 역해석 방법을 제안하였으며, 터널 라이닝의 응력, 변형률 수렴과정을 검증하였다.

Hisatake & Ito 등은 터널 1차 복공의 응력추정을 내공변위 계측치로 역해석을 실시하여 수치해석 결과와 비교하였으며, Sakurai는 역산법을 이용하여 정규화 초기응력을 결정한 후 모든 절점에서의 변위를 계산한 다음 각 요소의 변형률을 구하는데 변형률 분포를 결정하는데 있어서 탄성계수와 초기응력의 비로 역해석을 수행하였다.

본 논문의 터널 라이닝 역해석 프로그램의 적용 기본 이론으로 터널 라이닝에 가해지는 외부하중은 식 1과 같은 가정조건이 만족된다면 역해석이 가능하다(Hisatake and Ito, 1983).

$$N_u \geq N_f \quad (1)$$

여기서,  $N_u$  는 측정된 라이닝 변위의 개수,  $N_f$  는 외부하중과 같은 미지수의 개수로 정의된다.

일반적인 역해석을 하기 위해서는 식 (1)과 같이

외부하중의 미지수에 상응하는 것보다 많은 개수의 변위계측이 이루어져야 하나, 현실적으로 터널라이닝의 변위계측은 천단, 상부, 하부에서 3점 내지 5점의 계측이 주로 수행되고 있어 많은 수의 계측을 수행하는 것은 비현실적인 문제로 이런 이론적인 단점을 극복하기 위해 역해석 방법을 이용한 역해석 프로그램의 적용이 필요하였다.

따라서, 터널 라이닝 안쪽면에 작용하는 외력의 자승이 최소가 되는 해를 이용하여 변위를 추정하는 방법을 적용하였으며, 이 방법은 미지수보다 적은 계측변위가 있더라도 단일해의 집합을 제공하기 때문에 비교적 정확성이 보장되는 방법이다.

최소자승법을 이용한 유한요소해석에서 최소자승법은 전 정의역에 대하여 오차함수의 제공의 적분값이 최소화되는 근사해를 결정하는 방법으로 주어진 계측 변위에 의해서 외력의 자승이 최소화되는 에너지 원리를 적용하여 나머지 미지점의 변위를 예측하는 방법으로 역해석의 신뢰성을 향상시킬 수 있는 방법이다.

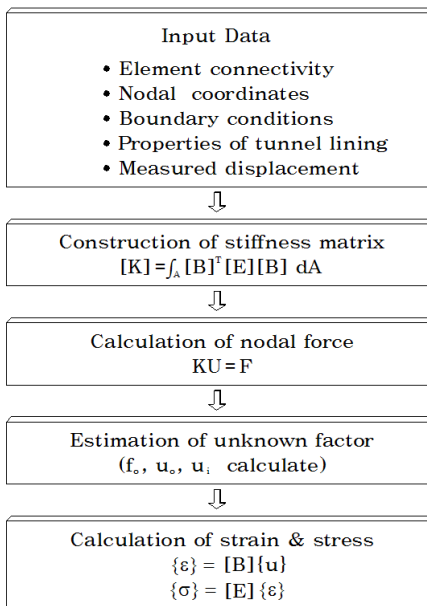


Fig. 1. Configuration of the tunnel lining inverse analysis

절점변위를  $u$ , 절점력을  $f$ , 강성매트릭스를  $K$  라 하면, 터널 라이닝의 강성방정식은 식 (2)와 같이 표시할 수 있다(Hinton and Owen, 1977).

$$\begin{pmatrix} f_* \\ f_i \\ f_o \\ f_c \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & K_{14} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & K_{24} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & K_{34} \\ K_{41} & K_{42} & K_{43} & K_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_* \\ u_i \\ u_o \\ u_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $f_*$ 는 라이닝 내면의 절점중 계측 절점을 표시,  $f_i$ 는 외력이 작용하지 않는 절점을 표시,  $f_o$ 는 외력이 작용하는 절점을 표시,  $f_c$ 는 변위를 구속하는 절점을 표시한다.

## 2.2 터널 라이닝의 역해석 프로그램 구성요소

터널 라이닝 역해석 프로그램에서 사용하는 구성요소는 4절점 평면변형률의 등대개 변수요소로서 해석 대상의 변위와 기하학적 형태를 정의하는데 동일한 형상함수를 사용하여 요소는 변형 전이나 변형 후에

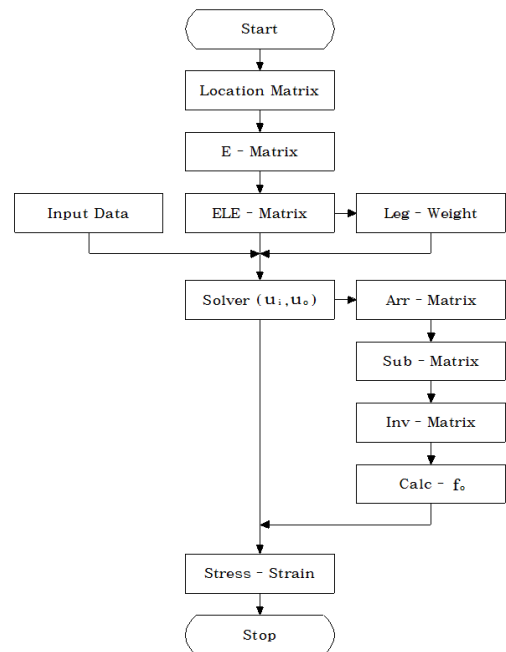


Fig. 2. Flow chart of tunnel lining inverse analysis program

도 항상 기하학적인 적합성은 물론 변위의 적합성을 만족하도록 하였으며, 터널 라이닝 역해석 프로그램의 구성내용을 정리한 역해석 프로그램의 구성도는 Fig. 1과 같으며, 터널 라이닝 역해석 프로그램의 순서도는 Fig. 2와 같다.

### 2.3 터널 라이닝의 역해석 프로그램 검증

일반적으로 터널 라이닝의 하중 지지능력을 평가하는데 있어서 지보재의 가장 극단적인 지지조건은 슛크리트가 타설되기 직전의 상태에서 Fig. 3(a)와 같이 터널 천단부에 하중이 작용하는 경우이며, 이 때의 지보재는 전체적으로 축력 N이 작용하고, 이로 인하여 Fig. 3(b)와 같이 지보재에는 휨모멘트 M이 발생하게 된다. 최대 휨모멘트는 터널의 천단부 아치에서 발생되므로 지보재의 하중지지력을 평가하기 위해서는 Fig. 3(c)와 같이 휨모멘트가 0인 모멘트 변곡점을 지점으로 하는 지간이 l인 단순아치에 축력이 작용하는 경우로 단순화 시킬 수 있으며, 단순아치는 단순보 형태의 해석모델로 대체가 가능하다.

터널 라이닝 역해석 프로그램의 검증을 위하여 Fig. 4와 같이 단순보 형태로 모델링하여 터널 라이닝 역해석 프로그램에 적용한 결과와 상용 프로그램인 FLAC 및 SAP에 적용한 결과를 상호 비교 평가하였다.

검증순서는 Fig. 4와 같이 하부 중앙 E점의 수직변위를 가정하고 이 변위를 터널 라이닝 역해석 프로그램에 입력시켜 작용하중과 변위를 산출하고, 산출된 작용하중을 상용 프로그램에 입력시켜 변위를 구하여 역해석에서 구한 변위와 비교하는 순서로 수행하였다.

단순보 형태의 모델링은 Fig. 4와 같고, 경계조건은 힌지, 하부중앙 E점의 수직변위는 1 mm, 탄성계수는  $2.5 \times 10^3$  MPa, 포아슨비는 0.15로 가정하였다.

가정한 중앙하부 E점의 변위를 터널 라이닝 역해석 프로그램에 입력시켜 산출한 하중과 변위는 Table 1과 같으며, 여기서 부호는 수평하중과 수평변위는 오른쪽(+), 왼쪽(-)이며, 수직하중과 수직변위는 위(+), 아래(-)로 하였다. 터널 라이닝 역해석 프로그램으로 산출한 Table 1의 하중을 상용 프로그램인 FLAC과 SAP에 입력시켜 구한 변위는 Table 2와 같다.

단순보 형태의 하부중앙 E점의 수직변위를 1 mm로

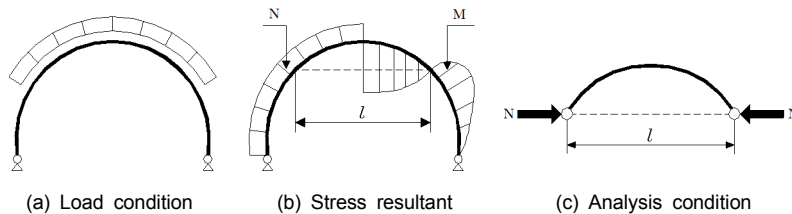


Fig. 3. Load-bearing concept of tunnel timbering

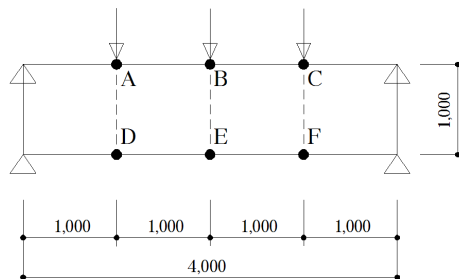
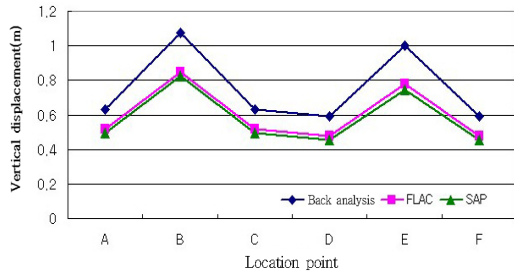


Fig. 4. The form of modeling a simple beam

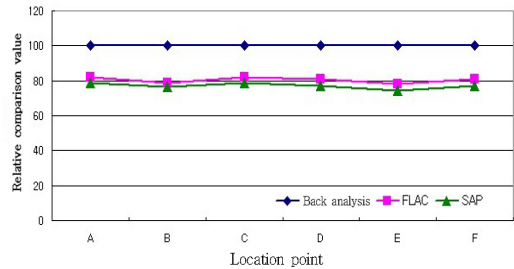
가정한 후 이 변위를 터널 라이닝 역해석 프로그램에 입력시켜 작용하중과 변위를 산출하고, 산출된 작용하중을 상용 프로그램에 입력시켜 변위를 구하여 역해석에서 구한 변위와 비교한 결과 해석 프로그램별 변위량 비교는 Fig. 5와 같다.

수직변위의 경우 적용한 터널 라이닝 역해석 프로그램의 상대값을 100%로 하였을 경우 FLAC과 SAP은 약 80%수준으로 터널 라이닝 역해석 프로그램이 큰 값을 보여 터널 시공 및 유지관리시 안전측으로 관리를 하기 위한 보수적인 값으로 판단되었다.

Fig. 5(b)의 해석 프로그램별 변위량 비교도에서



(a) Comparison of vertical displacement



(b) Relative Comparison of vertical displacement

Fig. 5. Comparison of vertical displacement according to analysis program

Table 1. Calculated result of the load and displacement by tunnel lining inverse analysis

Item		Left		Center		Right	
		Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Load (tonf)	Upper	A		B		C	
		-20.016	9.345	-35.761	0.000	-20.016	-9.354
	Lower	D		E		F	
		-	-	-	-	-	-
Displacement (mm)	Upper	A		B		C	
		-0.630	-0.276	-1.075	0.000	-0.630	-0.276
	Lower	D		E		F	
		-0.592	-0.247	-1.000	0.000	-0.592	0.247

Table 2. Calculated displacement by input to the commercial program

Item (unit: mm)		Left		Center		Right	
		Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
FLAC	Upper	A		B		C	
		-0.518	0.165	-0.847	0.000	-0.518	-0.615
	Lower	D		E		F	
		-0.479	-0.135	-0.779	0.000	-0.479	0.135
SAP	Upper	A		B		C	
		-0.496	-0.210	-0.825	0.000	-0.496	-0.210
	Lower	D		E		F	
		-0.457	-0.179	-0.745	0.000	-0.457	-0.179

### 3. 단선터널 라이닝의 최적 계측 측정수 선정

단순보 형태에 의한 터널 라이닝 역해석 프로그램 적용 결과를 상용 프로그램과 비교한 결과 적합한 것으로 판단되어 단선 터널 단면(터널폭 5.8 m, 높이 7.0 m)을 대상으로 터널 라이닝의 최적 계측 측정수 선정을 위해 역해석 프로그램에 적용하였다.

적용순서는 Fig. 6과 같이 터널 라이닝에 작용하는 하중조건을 가정하여 터널해석시 널리 사용되는 FLAC에 하중조건을 입력시켜 터널 라이닝의 단면 위치별 변위와 응력을 산출하고, 산출된 변위를 현장 계측시 터널의 변위량인 내공변위와 천단침하는 주로 3~7점에서 측정되므로 계측 측정수를 3점, 5점, 7점으로 구분하여 터널 라이닝 역해석 프로그램에 입력시켜서 구한 응력과 변위를 비교하는 순서로 수행하였다.

터널 해석조건으로 경계조건은 힌지, 메쉬 크기는 터널 라이닝의 두께에 해당하는 동일한 크기이며, 하중조건은 터널 단면 수치해석시 일반적으로 적용하는 하중조건이며, 대칭 분포하중으로 수직하중은 0.1 MPa, 수평하중은 좌우 0.05 MPa, 탄성계수는  $2.5 \times 10^3$  MPa, 포아슨비는 0.15로 가정하였으며, 비대칭 하중에 의한 비교는 단선 터널인 경우에 한하여 2가지 비대칭 분포하중 조건으로 비교분석을 수행하였다.

본 프로그램은 탄성모델을 사용하였고, 단선 터널

은 4개의 절점으로 구성된 30개의 요소로 구성된 모델을 사용하였다. 이 때 요소망은 변위를 계측한 지점의 위치와 절점이 일치하도록 하였으며, 경계조건으로는 터널 하단 인버트 부분의 X방향과 Y방향의 변위를 구속하였다.

#### 3.1 대칭 분포하중 작용시

하중조건은 대칭 분포하중으로 수직하중은 0.1 MPa, 수평하중은 좌우 0.05 MPa를 적용하였고, 요소망의 총 절점수는 62개이며, 4개의 절점으로 구성된 30개의 요소로 구분하였고, 계측측점 A, B, C, D, E, F, G의 7점과 요소번호를 일치시켰다. 여기서, A와 G는 하부 내공변위, B와 F는 상부 내공변위, C, D, E는 천단부 변위를 의미한다.

단선 터널은 형상이 난형으로 터널폭 5.8 m, 높이 7.0 m, 콘크리트 라이닝 두께 0.3 m인 경우에 대하여 해석모델은 Fig. 7과 같으며, FLAC에 입력시켜 산출한 발생변위는 Table 3과 같다.

계측 측정수는 천단침하 및 내공변위로 터널 현장에서 일반적으로 적용하고 있는 3점인 경우는 Case 1, 5점은 Case 2, 7점은 Case 3로 구분하여 역해석을 실시하였으며, Fig. 8과 같이 단선 터널에 대칭 하중 작용시 수평과 수직방향의 응력 및 변위를 각각 비교하였으며, FLAC에서 산출한 결과를 기준값으로 하

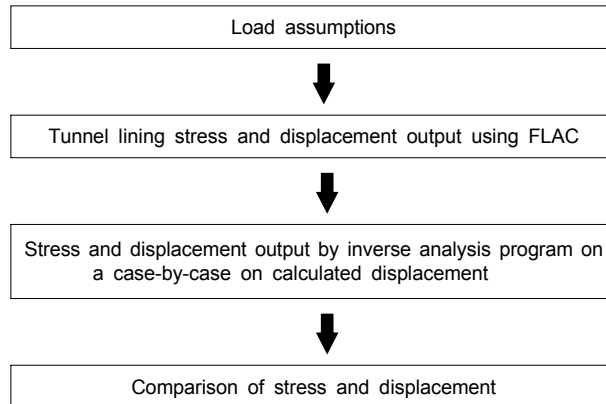


Fig. 6. Step of application for the tunnel lining inverse analysis program

였다.

수평응력은 Fig. 8(a)와 같이 Case 1인 경우는 터널 아치부에서만 기준값과 큰 차이를 보이나, 그 외의 구간에서는 같은값을 보이며, Case 2와 Case 3은 전구간에 걸쳐 기준값과 같은 값을 보였다. 수평응력의 크기는 터널 상부 좌우벽체 B, F점에서 0.5 MPa 정도의 압축응력을 보였으며, 천단 D점에서는 4.7 MPa 정도의 압축응력을 보였다.

수직응력은 Fig. 8(b)와 같이 Case 1인 경우는 터널 아치부에서만 기준값과 같은 값을 보였으나, 그 외의 구간에서는 큰 차이를 보였고, Case 2와 Case 3은 전구간에 걸쳐 거의 같은 값을 보였다. 수직응력의 크기는 터널 상부 좌우벽체 B, F점에서 5.0 MPa 정도의 압축응력이 발생되어 일반적인 터널 콘크리트 라이닝 설계기준강도의 25%수준이며, 천단 D점에서는 0.3 MPa 정도의 압축응력을 보였다.

따라서, 응력은 계측 측정수가 3점인 Case 1의 경우에는 상부 좌우벽체인 B, F점의 수평응력과 천단인 D점의 수직응력이 기준값과 같은 결과를 보이나, 나머지 지점에서는 차이를 보여 실용성이 떨어지므로

소수의 계측 변위수로부터 터널 라이닝의 전반적인 응력상태를 정확하게 추정하기 위해서는 Case 2와 Case 3이 기준값과 터널 전단면에 걸쳐 같은 값을 보이므로 Case 2인 계측 측정수 5개를 측정하여 역해석에 적용하는 것이 효과적인 것으로 판단되며, 계측 측정수의 증가와 함께 응력에 대한 역해석의 정밀도가 증대되는 것을 알 수 있다.

수평 및 수직변위는 Fig. 8(c)(d)와 같이 미소변위를 보였으며, 응력과는 다르게 역해석시 적용되는 계측 측정수에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 터널 상부 좌우벽체 B, F점의 수평변위는 기준값에서 0.11 mm이나, 각 Case에서 0.07 mm정도이며, 천단 D점의 수직변위는 기준값에서 0.37 mm이나, 각 Case에서 0.26 mm로 차이를 보였다.

### 3.2 비대칭 분포하중 작용시

하중조건은 비대칭 분포하중 작용시 측압의 효과를 고려하여 비대칭 분포하중을 적용하였으며, 요소망은 대칭하중인 경우와 같고, 단선 터널은 형상이 난형으

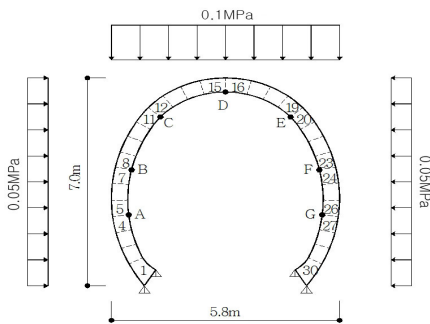


Fig. 7. Symmetric distribution of loads acting upon single line tunnel analysis model

Monitoring point number		
Item	No.	Location
Case 1	3	B, D, F
Case 2	5	B, C, D, E, F
Case 3	7	A, B, C, D, E, F, G

Table 3. Position displacement calculated from FLAC acting at symmetric distribution load (unit: mm)

Location	A	B	C	D	E	F	G
Element no.	4~5	7~8	11~12	15~16	19~20	23~24	26~27
Horizontal displacement	-0.035	-0.112	-0.044	-0.002	0.044	0.112	0.035
Vertical displacement	-0.034	-0.090	-0.247	-0.367	-0.247	-0.090	-0.034

로 터널폭 5.8 m, 높이 7.0 m, 콘크리트 라이닝 두께 0.3 m 인 경우에 대하여 비교를 실시하였다.

비대칭 분포하중 Case A의 하중조건으로 수직하중은 0.2 MPa과 0.1 MPa, 수평하중은 0.1 MPa을 적용하

였으며, 해석모델은 Fig. 9, FLAC에 입력시켜 산출한 발생 변위는 Table 4와 같다.

비대칭 분포하중 Case A인 경우의 응력과 변위는 Fig. 10과 같다.

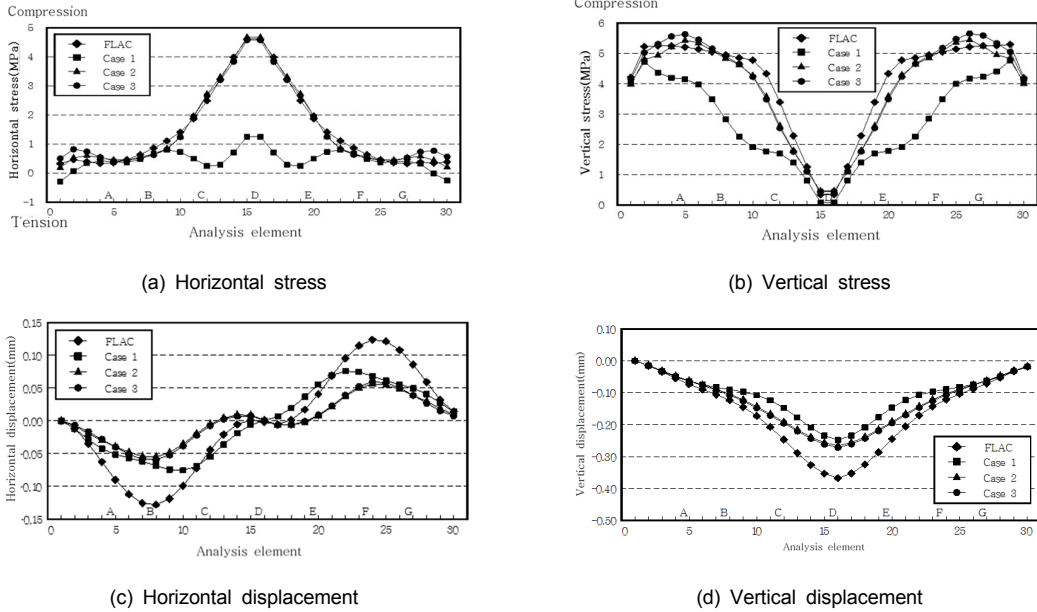


Fig. 8. Stress and displacement of symmetric distribution of the load acting in the single line tunnel

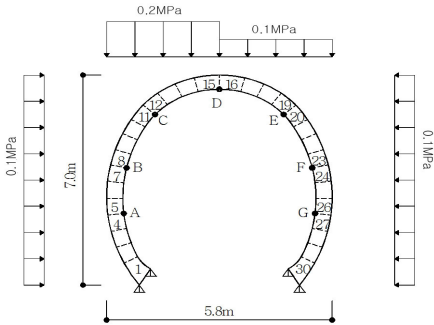


Fig. 9. Asymmetric distributed load Case A acting upon single line tunnel analysis model

Monitoring point number		
Item	No.	Location
Case 1	3	B, D, F
Case 2	5	B, C, D, E, F
Case 3	7	A, B, C, D, E, F, G

Table 4. Position displacement calculated from FLAC acting at asymmetric distribution load Case A (unit: mm)

Location	A	B	C	D	E	F	G
Horizontal displacement	0.055	0.139	0.116	-0.028	-0.158	-0.263	-0.122
Vertical displacement	-0.050	-0.090	-0.130	0.018	0.007	-0.022	-0.016



수평응력은 Fig. 10(a)와 같이 Case 1인 경우는 터널 아치부에서만 기준값과 차이를 보이나, 그 외의 구간에서는 같은 값을 보이며, Case 2와 Case 3은 전 구간에 걸쳐 기준값과 거의 같은 값을 보였다. 수평응력의 크기는 터널 상부 좌우벽체 B, F점에서 0.1 MPa이내의 인장응력을 보였으며, 천단 D점에서는 0.7 MPa이내의 인장응력을 보였다.

수직응력은 Fig. 10(b)와 같이 Case 1인 경우는 터널 아치부에서만 기준값과 거의 같은 값을 보였으며, 그 외의 구간에서는 큰 차이를 보였고 Case 2와 Case 3은 전 구간에 걸쳐 거의 같은 값을 보였다. 수직응력의 크기는 터널 상부 좌측벽체 B점에서 7.5 MPa정도의 인장응력, 상부 우측벽체 F점에서는 5.5 MPa정도의 인장응력이 발생되어 콘크리트 휨 인장강도(파괴계수)  $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}} = 2.89 \text{ MPa}$ 를 초과하는 것으로 나타나 콘크리트 라이닝의 두께 증대 또는 콘크리트 설계기중강도 증대가 필요하며, 천단 D점에서는 0.8 MPa정도의 인장응력을 보였다.

따라서, 응력은 계측 측정수가 3점인 Case 1인 경우

에도 좌우벽체인 B, F점의 수평응력과 천단인 D점의 수직응력만 일치하고 나머지 지점에서는 차이를 보이며 비대칭 하중이 작용하는 불균등 수직하중에서 Case 1은 실용성이 떨어져 터널 라이닝의 전반적인 응력상태를 정확하게 추정하기 위해서는 Case 2와 Case 3이 기준값과 터널 전단면에 걸쳐 거의 같은 값을 보이므로 Case 2인 계측 측정수 5개를 측정하여 역해석에 적용하는 것이 효과적인 것으로 판단되며, 계측 측정수의 증가와 함께 응력에 대한 역해석의 정밀도가 증대되는 것을 알 수 있다.

수평 및 수직변위는 Fig. 10(c)(d)와 같이 미소변위를 보였으며, 응력과는 다르게 역해석시 적용되는 계측 측정수에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 터널 상부 좌측벽체 B점의 수평변위는 기준값에서 0.14 mm이나, 각 Case에서 약 0.1 mm정도이며, 상부 우측벽체 F점은 기준값에서 0.26 mm이나, 각 Case에서 약 0.2 mm이며, 천단 D점의 수직변위는 기준값에서 0.02 mm이나, 각 Case에서 약 0.05 mm로 차이를 보였다.

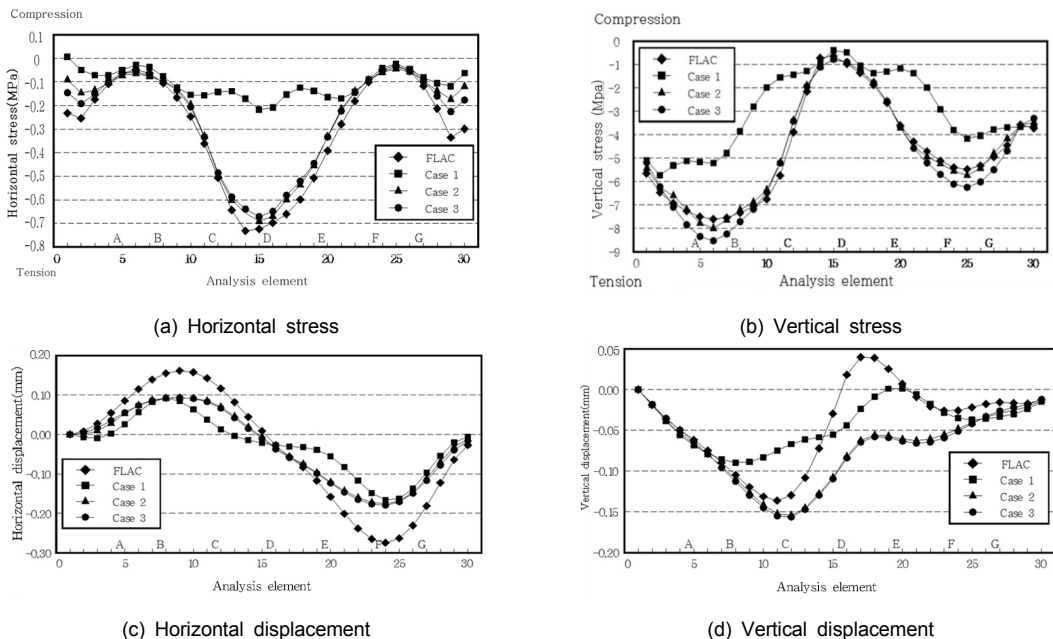


Fig. 10. Stress and displacement of asymmetric distribution of the load acting in the single line tunnel

### 3.3 단선터널 라이닝의 최적 계측 측정점수 선정 결과

단선터널 라이닝의 최적 계측 측정점수 산정을 위해 역해석 프로그램에 적용한 단선터널의 대칭분포하중과 비대칭 분포하중의 하중조건에 따른 수평응력과 수직응력, 수평변위와 수직변위 결과는 Table 5와 같다.

Table 5와 같이 하중조건에 관계없이 계측 측정점수에 따른 정밀도는 측정점이 많을수록 정밀한 것으로 나타나 측정점이 5~7점은 되어야 하며, 실무적으로 계측 수행의 경제성과 터널 계측의 손망실률(할증률, 고장률) 약 20%(Back et. al., 2002; Woo, 2013)를 반영할 경우 계측 측정점이 최소 5점은 되어야 할 것으로 판단되며, 향후 터널 단면별 계측 측정점에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 논문은 단선터널 라이닝의 최적 계측 측정점수를 선정하기 위해 단선 터널 라이닝에 작용하는 하중조건을 대칭 분포하중이 작용하는 경우와 비대칭 분포하중이 작용하는 경우로 가정하여 터널해석 시 널리

사용되는 상용프로그램에 하중조건을 입력시켜 터널 라이닝의 단면 위치별 변위와 응력을 산출하였고 산출된 변위를 계측 측정점수 3점, 5점, 7점으로 터널 라이닝 역해석 프로그램에 입력시켜서 구한 응력과 변위를 비교하여 최적 계측 측정점수를 선정하여 터널 계측의 신뢰도 향상을 위해 연구를 수행하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

1. 터널 라이닝 역해석 프로그램의 검증 결과 터널 라이닝 역해석 프로그램의 상대값을 100%로 하였을 경우 상용프로그램은 약 80%수준으로 터널 라이닝 역해석 프로그램이 큰 값을 보여 터널 시공 및 유지관리시 안전측으로 관리를 하기 위한 보수적인 값으로 판단되었다.
2. 대칭 분포하중을 적용한 결과, 수평 및 수직응력은 계측 측정점이 3점인 Case 1인 경우에는 상부 좌우 벽체인 B,F점의 수평응력과 천단인 D점의 수직응력이 기준값과 거의 일치하고 나머지 지점에서는 차이를 보여 Case 1은 실용성이 떨어지므로 소수의 계측 변위수로부터 터널 라이닝의 전반적인 응력 상태를 정확하게 추정하기 위해서는 Case 2와 Case 3이 기준값과 터널 전단면에 걸쳐 같은 값을 보이므로

Table 5. Result of single track tunnel lining by inverse analysis program

Result	Symmetry distribution load	Asymmetry distribution load
Horizontal stress	<ul style="list-style-type: none"> <li>·Case 1 : Large difference by criteria on arch part of tunnel.</li> <li>·Case 2 &amp; Case 3 : Same value by criteria on every part.</li> <li>·Inverse analysis accuracy of stress is increasing with increasing the number of monitoring spot (5, 7 points).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·Case 1 : Large difference by criteria on arch part of tunnel</li> <li>·Case 2 &amp; Case 3 : Same value by criteria on every part</li> <li>·Inverse analysis accuracy of stress is increasing with increasing of monitoring spot (5, 7 points).</li> </ul>
Vertical stress	<ul style="list-style-type: none"> <li>·Case 1 : Large difference by criteria.</li> <li>·Case 2 &amp; Case 3 : Same value by criteria on every part.</li> <li>·Inverse analysis accuracy of stress is increasing with increasing of monitoring spot.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·Case 1 : Large difference by criteria.</li> <li>·Case 2 &amp; Case 3 : Same value by criteria on every part.</li> <li>·Inverse analysis accuracy of stress is increasing with increasing of monitoring spot.</li> </ul>
Horizontal displacement Vertical displacement	<ul style="list-style-type: none"> <li>·In contrast with vertical and horizontal stress, not much affected by the number of monitoring spot (3, 5, 7 points) on inverse analysis.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>·In contrast with vertical and horizontal stress, not much affected by the number of monitoring spot (3, 5, 7 points) on inverse analysis.</li> </ul>
Accuracy order	monitoring point number 3point → 5point → 7point	monitoring point number 3point → 5point → 7point

Case1: 3 monitoring point (B, D, F), Case2: 5 monitoring point (B, C, D, E, F), Case3: 7 monitoring point (A, B, C, D, E, F, G)

로 Case 2인 계측 측정수 5개를 측정하여 역해석에 적용하는 것이 효과적인 것으로 판단되며, 계측 측정수의 증가와 함께 응력에 대한 역해석의 정밀도가 증대되는 것을 알 수 있다. 또한, 수평 및 수직변위는 미소변위를 보였으며, 응력과는 다르게 역해석시 적용되는 계측 측정수에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

3. 비대칭 분포하중을 적용한 결과, 수평 및 수직응력은 계측 측정수가 3점인 Case 1인 경우에는 좌우벽 체인 B,F점의 수평응력과 천단인 D점의 수직응력이 기준값과 거의 일치하고 나머지 지점에서는 차이를 보여 Case 1은 실용성이 떨어지므로 터널 라이닝의 전반적인 응력상태를 정확하게 추정하기 위해서는 Case 2와 Case 3이 기준값과 터널 전단면에 걸쳐 거의 같은 값을 보이므로 Case 2인 계측 측정수 5개를 측정하여 역해석에 적용하는 것이 효과적인 것으로 판단되며, 계측 측정수의 증가와 함께 응력에 대한 역해석의 정밀도가 증대되는 것을 알 수 있다.
4. 하중조건에 관계없이 계측 측정수에 따른 정밀도는 측정수가 많을수록 정밀한 것으로 나타나 측정수가 5~7점은 되어야 하며, 실무적으로 터널 계측의 손망실률을 반영할 경우 계측 측정수가 최소 5점은 되어야 할 것으로 판단되며, 향후 다양한 터널 단면을 대상으로 계측 측정수에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 일반연구지원사업 기본연구지원사업(유형II, 과제번호 2011-0009456)으로 “건설 및 터널 계측 기술의 공학적 응용을 위한 핵심 요소기술 개발”의 2013년 3차년도 연구과제(과제번호 2013020949)인 “터널계측 단면의 최적 측정수 연구”의 일부 내용이며, 이에 감사를 드립니다.

## References

1. Back, K.H., Oh, Y.S., Kim, Y.J., Kim, Y.G. (2002), “A study on efficiency of tunnel maintenance monitoring”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 4, No. 4, pp. 355-369.
2. Hinton, E., Owen, D.R.J. (1977), “Finite element programming”, Academic Press, pp. 1-305.
3. Hisatake, M., Ito, T. (1983), “Back analysis methods to tunnel linings”, International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, pp. 1047-1056.
4. Lee, D.H., Han, I.Y., Kim, G.S., Jin, S.W. (2000), “Case studies on applications of convergence measurement system at the stages of tunnel construction and maintenance”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 2, No. 3, pp. 59-69.
5. Sakurai, S. (1981), “Direct strain evaluation technique in construction of underground openings”, In Proceedings 22nd U.S. Symposium Rock Mechanics, pp. 278-282.
6. Sakurai, S., Takeuchi, K. (1983), “Back analysis of measured displacements of tunnels”, Rock Mechanics & Rock Engineering, pp. 173-180.
7. Woo, J.T. (2006), “Theory and practice of tunnel monitoring”, Goomi Publishing Co., pp. 91-95.
8. Woo, J.T. (2009), “A study on comparison of a ground water influx quantity in Seoul subway tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 4, pp. 353-359.
9. Woo, J.T. (2010), “A study of the present state analysis and development plans about construction monitoring and monitoring industry”, Journal of Korean Society of Civil Engineers, Vol. 30, No. 2D, pp. 163-169.
10. Woo, J.T. (2013), “A study on estimation of the total loss and damage ratio of maintenance monitoring sensor of subway tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 1, pp. 25-31.