

[Technical Note]

터널 유지관리계측의 압력 관리기준치 설정에 관한 연구

우종태^{1*}

¹정회원, 경북대학교 건설환경디자인과 교수

A study on the establishment of pressure limit values of management monitoring in tunnel

Jong-Tae Woo^{1*}

¹Dept. of Construction and Environmental Design, Kyungbuk University, Professor

ABSTRACT: This study analyzed a monitoring data, based on the initial limit values of monitoring in subway, of earth pressure and pore water pressure. The data is obtained from 8 sections of the Seoul metropolitan subway line No 6, 7 and 9 in about 5 years. Also, a research is performed to set up the limit values of management monitoring, which will be applied to management monitoring in tunnel, through comparing the limit values of overseas management monitoring data and that of domestic management monitoring data. And the result obtained from comparison show that the safety phase is 60% of allowable pressure, the attention phase is 80% of allowable pressure and the precision analysis phase is 100% of allowable pressure. Also, we presented a method of management monitoring by the absolute value which can be easily applied easily in practical affairs.

Keywords: Management monitoring in tunnel, Pressure limit values, Earth pressure, Pore water pressure

초 록: 본 논문은 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치 설정에 대한 연구로 계측 초기에 설정된 지하철계측 초기 관리기준치를 토대로 서울지하철 6,7,9호선 8개 대표단면의 터널 콘크리트라이닝의 토압과 간극수압에 대하여 약 5년에 걸친 계측 실적을 분석하고, 국외 계측관리기준을 비교하여 향후 터널 유지관리계측에 적용할 압력 계측관리기준치 설정에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 향후에 터널에 적용할 유지관리계측의 압력 관리기준치는 국내적용 계측관리기준치와 국외적용 계측관리기준치 분석결과를 비교하여 안전단계는 허용압력의 60%, 주의단계는 허용압력의 80%, 정밀분석단계는 허용압력의 100%로 실무에서 쉽게 적용할 수 있는 절대치에 의한 계측관리방법을 제안하였다.

주요어: 터널 유지관리계측, 압력 관리기준치, 토압, 간극수압

1. 서론

최근 들어 건설계측기술은 IT산업 및 정보통신기술의 급격한 발달로 거의 모든 건설현장에서 적용이 일반화 되고 있다. 또한 사회기반시설의 효율적인 안전감시 및 유지관리를 위해 지하철, 도시철도, 일반

및 고속철도, 도로, 전력구, 통신구, 공동구 등의 터널 구조물에 유지관리 계측시스템의 도입과 적용이 증가되고 있다(Lee et al., 2000; Woo, 2009).

일반적으로 건설공사에서의 계측은 공사계측과 유지관리계측으로 구분하고 있다. 공사계측은 주로 설계의 불확정성 요소 등을 보완하고 설계의 타당성을 규명함으로써 시공의 안전성을 확인하고 경제성을 확보할 목적으로 수행된다.

유지관리계측은 공사계측 단계에서 계측치가 대부분 수렴된 상태를 확인하고, 목적물인 철근 콘크리트

*Corresponding author: Jong-Tae Woo

E-mail: jtwoo@kbu.ac.kr

Received December 8, 2015; Revised December 29, 2015;

Accepted January 4, 2016

구조물이 시공되므로 이미 완공된 구조물에 대하여 공용 중에 지속적으로 구조물의 안전성 확인과 최적의 유지관리가 되도록 객관적이고 연속적인 공학적 판단자료를 제공하여 효율적이고 경제적인 구조물 유지관리에 기여하는 것을 목적으로 수행되고 있다 (Woo, 2013; 2014).

본 논문에서는 NATM터널에 적용할 유지관리계측의 압력 관리기준치 설정에 대한 연구로 계측 초기에 설정된 지하철 계측관리기준치를 토대로 유지관리계측이 체계적으로 수행된 서울지하철 6, 7, 9호선의 8개 대표단면의 콘크리트라이닝의 토압과 간극수압에 대하여 약 5년에 걸친 계측 실적을 분석한 결과와 국외에서 시행된 계측결과를 종합적으로 분석하여 향후에 적용할 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치 설정에 대한 연구로 터널 유지관리계측 기술발전에 기여하고자 한다.

2. 국내 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치

2.1 압력 관리기준치 설정 일반사항

터널의 유지관리계측 관리기준치는 지반의 거동상태, 인접구조물의 안전관계 및 지반의 역학적인 조건에 의하여 결정되므로 기준적인 수치를 명확히 제시하기 어려우며, 따라서 현장여건을 고려하여 결정하

여야 한다(Woo and Lee, 2012).

압력계측기인 경우 계측기 설치 시점의 하중상태를 고려한 구조해석 및 실내시험을 수행하여 초기치를 산정하고, 이를 근거로 한 관리기준치 설정이 필요하다. 각종 토압계, 간극수압계, 지하수위계, 변위계 등의 경우에는 초기치 확인후 관리기준치를 설정하며, 초기치 설정방법을 구체적으로 제시하여야 한다. 따라서 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치를 설정할 경우 실내시험, 이론 및 수치해석, 초기 시공실적 및 유사한 조건을 갖는 터널의 계측결과 등을 종합적으로 고려해서 설정하여야 한다.

2.2 압력 관리기준치 설정방법

터널 유지관리계측의 압력 관리기준치 설정방법으로는 완공 전에 설정된 관리기준치와 현장계측치를 비교 검토하여 그 시점에서의 안전성을 확인하는 방법으로 이 방법의 장점은 계측결과에 대해서 즉시 대응할 수 있다는 점에서 일반적인 안전관리 방법으로 사용되고 있으며, 단점으로는 설계치에 대한 관리기준의 결정방법과 현장 계측치가 관리기준치를 초과했을 때의 대응방법이다(Woo and Lee, 2008a). 또 하나의 절대치 관리방법은 안전율의 개념을 도입한 것으로 사전에 각 계측 항목별로 안전율을 설정하고, 설계시에 사용한 추정치 및 계측 결과치의 비와 안전율을 비교하여 안전성을 예측하는 방법이다. 절대치

Table 1. Limit values of Management monitoring on Seoul subway 2nd 1-Step 5,7,8 line

Item	Limit values of management monitoring
Tunnel outside earth pressure	• Earth pressure theoretically calculated in tunnel structure calculation is applied in maintenance limit value
Tunnel outside pore water pressure	• Water pressure theoretically calculated in tunnel structure calculation is applied in maintenance limit value
Tunnel convergence	<ul style="list-style-type: none"> • Optical fiber sensor and electricity-resistance sensor <ul style="list-style-type: none"> · Allowable strain = 0.0016(0.16%) - 0.002(0.2%) is the maximum strain which is concrete behavior within the elastic range. so, it is applicate 0.002 × 80% • Three dimensions lightwave measurement (vertical, convergence) <ul style="list-style-type: none"> · Allowable displacement = ±4 mm - Japan tokyo transportation maintenance limit value ±5 mm. so, it is applicate ±5 mm × 80%

에 의한 관리방법은 계측결과에 신속하게 대처할 수 있어 현장에서 안전관리를 위해 많이 사용되고 있으며, 경험이 적은 기술자라도 안전성 판단이 어느 정도 가능하다는 장점이 있다(Woo and Lee, 2008b).

서울지하철 2기1단계 5, 7, 8호선 NATM터널 유지관리계측에 1997년부터 적용하고 있는 절대치에 의한 관리기준은 Table 1과 같으며, 2000년 서울지하철 2기 2단계 6, 7호선 유지관리계측 매립식 계측기 초기치 3회 측정결과를 유지관리 통합운영 프로그램에 적용시키기 위해 각 계측기에 대한 분석업무를 수행하여 관리자가 상황실 컴퓨터에 실시간으로 입력된 계측값을 모니터링하는 과정에서 이상현상이 발생시 이에 대응 할 수 있도록 한 각 계측기별 관리운용지침은 Table 2와 같으며 Table 2.1은 토압, Table 2.2는 간극수압을 나타내고 있다.

2.3 국내 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치 검토

서울지하철 5, 7, 8호선 터널 유지관리계측 초기에 설정된 관리기준치인 Table 1을 토대로 5년에 걸친 계측 실적을 분석하여 향후에 적용할 터널 유지관리 계측의 압력 관리기준치 설정에 대한 연구를 위해

계측항목별로 구분하여 분석한 내용은 다음과 같다.

2.3.1 토압 관리기준치 검토

서울지하철 6, 7, 9호선 8개 대표단면의 토압 측정 평균치와 관리기준치 분석결과는 Table 3과 같으며, 작용 토압의 안전수준은 62%, 주의수준은 87%로 분석되었다.

2.3.2 간극수압 관리기준치 검토

서울지하철 6, 7, 9호선 8개 대표단면의 간극수압 측정평균치와 관리기준치 분석결과는 Table 4와 같으며, 작용 간극수압의 안전수준은 59%, 주의수준은 84%로 분석되었다.

한편, Table 2.2의 간극수압 관리운용지침은 기준치로부터 계측값 50~100 KN/m²사이의 변화로 설정하는 것으로 터널의 위치가 토사인 경우와 암반인 경우, 그리고 터널굴착높이에 따른 변화가 크므로 실효성이 없는 것으로 판단되어 Table 2.1 토압의 관리운용지침을 적용하여 분석하였다.

2.3.3 터널 내공변위 관리기준치 검토

서울지하철 5, 6, 7호선 터널 콘크리트라이닝의 내공변위 관리기준치는 Table 1과 같이 광섬유센서 및

Table 2. Management operating guidelines of Management monitoring on Seoul subway 2nd 2-Step 6,7 line

Table 2.1 Tunnel outside earth pressure

Management criteria	Safety judgment	Counter measures
0 ~ 25% changed for limit value + applicable earth pressure on design	Safety	-
25 ~ 50% changed for limit value + applicable earth pressure on design	Caution	Administrator should be carefully observed and checking the measurement monitoring in related site.
over 50% changed for limit value + applicable earth pressure on design	Precision analysis	Administrator should be require a qualified technician to precisely analyze corresponding cross-section

Table 2.2 Tunnel outside pore water pressure

Management criteria	Safety judgment	Counter measures
0 ~ 50 KN/m ² changed for limit value	Safety	-
50 ~ 100 KN/m ² changed for limit value	Caution	Administrator should be carefully observed and checking the measurement monitoring in related site.
over 100 KN/m ² changed for limit value	Precision analysis	Administrator should be require a qualified technician to precisely analyze corresponding cross-section

Table 3. Analysis result of tunnel outside earth pressure measured in the average value and limit values (unit: kN/m²)

Monitoring section location		Designed earth pressure (KN/m ²)		Earth pressure average measurement value (kN/m ²)						Tunnel outside earth pressure
		Side	Crown	North bound lane			South bound lane			
				Left	Crown	Right	Left	Crown	Right	
6-05 construction section (single line parallel tunnel)	15K485	125.0	125	61	-	48.7	30.8	-	22.8	Designed earth pressure (d.e.p) - Wall = Crown = 125 kN/m ² Wall max ave. = 61 = 0.49 d.e.p
	Average	125.0	125.0	61.0	-	48.7	30.8	-	22.8	
7-24 construction section (2-arch station double track tunnel)	41K400	160	-	(-3.5)	11	-	13.7	63.5	-	Designed earth pressure (d.e.p) - Wall = 118.6, Crown = 173.0 Wall max ave. = 44.1 = 0.37 d.e.p Crown max ave. = 26.5 = 0.15 d.e.p
	41K681 (double)	109	-	-	-	-	-	-	0.5	
	42K230	119	120	17	(-3.8)	-	25.6	12.7	-	
	42K250	120	230	39.5	0.0	-	93.0	3.4	-	
	42K435 (double)	85	169	-	6.3	-	-	-	-	
Average	118.6	173.0	28.3	5.8	-	44.1	26.5	0.5		
9-03 construction section (double track tunnel)	5K100	122.2	55.9	-	23.0	50.0	17.0	12.0	-	Designed earth pressure (d.e.p) - Wall = 122.2, Crown = 55.9 Wall max ave. = 58.0 = 0.47 d.e.p Crown max ave. = 21.0 = 0.38 d.e.p
	5K300	122.2	55.9	-	11.0	66.0	(-97.0)	30.0	-	
	Average	122.2	55.9	-	12.0	58.0	17.0	21.0	-	
Total average		111.9	118.0	44.7	8.9	53.4	30.6	23.8	11.7	-

Precautions: () is error value

- Tunnel outside earth pressure measurement max average value = (0.49 + 0.37 + 0.15 + 0.47 + 0.38) Designed earth pressure (d.e.p) ÷ 5 = 0.37 d.e.p (application on limit value)
- Calculated the limit value applying earth pressure guidelines
 - 1) Safety : 25% changed for limit value + applicable earth pressure on design = (0.25 + 0.37) d.e.p = 0.62 d.e.p (designed earth pressure)
 - 2) Caution : 50% changed for limit value + applicable earth pressure on design = (0.50 + 0.37) d.e.p = 0.87 d.e.p (designed earth pressure)
 - 3) Precision analysis : over 50% changed for limit value + applicable earth pressure on design = (over 0.50 + 0.37) d.e.p = over 0.87 d.e.p (designed earth pressure)

Table 4. Analysis result of measured average tunnel outside pore water pressure measured in the average value and limit values (unit: kN/m²)

Monitoring section location		Designed pore water pressure	Measured average pore water pressure						Tunnel outside pore water pressure
			North bound lane			South bound lane			
			Left	Crown	Right	Left	Crown	Right	
6-05 construction section (single line parallel tunnel)	15K485	28.0	10.0	-	3.1	(0.00)	-	6.4	Designed pore water pressure (d.p.w.p) - Wall = Crown = 28 kN/m ² Wall max ave. = 10 = 0.36 d.p.w.p
	Average	28.0	10.0	-	3.1	-	-	6.4	
7-24 construction section (2-Arch station tunnel, double track tunnel)	41K400	27.0	11.5	(0.00)	-	(0.00)	(0.00)	-	Designed pore water pressure (d.p.w.p) - Wall = Crown = 27.6 kN/m ² Wall max ave. = 17.7 = 0.64 d.p.w.p Crown max ave. = 4.0 = 0.15 d.p.w.p
	41K681	27.0	-	-	-	-	0.1	-	
	42K230	28.0	(0.00)	(0.00)	-	17.7	4.4	-	
	42K250	28.0	(0.00)	2.7	-	-	0.7	-	
	42K435	28.0	1.9	5.3	-	-	-	-	
Average	27.6	6.7	4.0	-	17.7	1.7	-		
9-03 construction section (double track tunnel)	5K100	45.0	-	-	5.0	2.0	-	-	Designed pore water pressure (d.p.w.p) - Wall = Crown = 45.0 kN/m ² Wall max ave. = 8.5 = 0.19 d.p.w.p
	5K300	45.0	-	-	-	15.0	-	-	
	Average	45.0	-	-	5.0	8.5	-	-	
average		33.5	8.4	4.0	4.1	13.1	1.7	6.4	-

Precautions: () is error value

- Tunnel outside pore water pressure measurement max average value = (0.36 + 0.64 + 0.15 + 0.19) Designed pore water pressure (d.p.w.p) ÷ 4 = 0.34 d.p.w.p (application on limit value)
- Calculated the limit value applying pore water pressure guidelines
 - 1) Safety : 25% changed for limit value + applicable pore water pressure on design = (0.25 + 0.34) d.p.w.p = 0.59 d.p.w.p (designed pore water pressure)
 - 2) Caution : 50% changed for limit value + applicable pore water pressure on design = (0.50 + 0.34) d.p.w.p = 0.84 d.p.w.p (designed pore water pressure)
 - 3) Precision analysis : over 50% changed for limit value + applicable pore water pressure on design = (over 0.50 + 0.34) d.p.w.p = over 0.84 d.p.w.p (designed pore water pressure)

전기저항식센서는 콘크리트의 허용변형률 개념에 의한 기준으로 최대변형률 0.0020(0.20%)의 80%인 0.0016(0.16%)으로 관리한 결과 계측치가 이 범위 이내에서 수렴되었다. 또한 3차원 광파기 측정 기준은 일본 동경교통국 관리기준치인 ± 5 mm의 80%인 ± 4 mm로 관리한 결과 계측치가 이 범위 이내에서 수렴되었다(Seoul Metropolitan Subway Construction Headquarters, 2002).

2.3.4 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치 분석 결과

앞에서 검토된 터널에 작용하는 토압, 간극수압, 내공변위의 유지관리계측 관리기준치 분석결과를 종합하면 Table 5와 같다.

Table 5. Result of limit values on management monitoring

Item	Limit values of monitoring management			Remark
	Safety	Caution	Precision analysis	
Tunnel outside earth pressure	0.62P	0.87P	over 0.87P	• P = designed earth pressure
Tunnel outside pore water pressure	0.59 μ	0.84 μ	over 0.84 μ	• μ = designed pore water pressure
Tunnel convergence	0.10%	0.13%	over 0.16%	• Optical fiber sensor and electricity resistance sensor allowable strain = 0.0016 (0.16%)
	± 2.5 mm	± 3.5 mm	over ± 4 mm	• Three dimensions lightwave measurement allowable displacement = 15 m ± 4 mm

Table 6. Limit values of monitoring management on the construction of retaining earth

Item	Criteria	Decision method			
		Limit values of monitoring management (safety factor)	Danger	Caution	Safety
Lateral pressure	Earth pressure distributionat design	$F = \frac{\text{designed value using earth pressure}}{\text{measurement by earth pressure}}$	F < 0.8	0.8 F 1.2	F > 1.2
Wall displacement	Estimates of the design	$F = \frac{\text{estimation of design}}{\text{measurement by deformation}}$	F < 0.8	0.8 F 1.2	F > 1.2

Table 7. Typical alarm levels a guide to field instrumentation in geotechnics

Level	Typical alarm level	
1	Green	Data within expected and acceptable limits (under 50%)
2	Blue	Data approaching (50-60%) of the upper limit
3	Amber	Data approaching (70-80%) of the upper limit
4	Red	Immediate action required to assess rates of change and implement modification to procedures (over 80%).

2.3.5 흙막이 공사의 계속 관리기준치

안전율 개념을 이용한 국내 건설현장에서 흙막이 공사의 측압 및 벽체변위 계측관리기준치는 Table 6과 같고(Lee and Woo, 2003), 본 연구에서는 터널 유지관리계측의 압력관리기준치를 절대치에 의한 관리방법 제안에 참고하였다.

3. 국외 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치 분석

3.1 지반구조물 계측관리기준

지반구조물 현장계측가이드에서 규정하고 있는 계측관리기준은 Table 7과 같다(Richard bassett, 2012).

3.2 Channel tunnel (Euro tunnel)

Channel tunnel은 총연장 50.45 km, 해저깊이 평균 45 m, 횡단시간 35분, 단면크기는 주 터널 직경 7.6 m, 서비스 터널 직경 4.8 m, 세그먼트 콘크리트라이닝의 설계기준강도는 28 MPa, 건설기간은 1987년에서 1994년까지 7년이 소요되었다(Moore and Crease, 1996).

Channel tunnel의 세그먼트 콘크리트 라이닝 압력은 계측기가 설치된 터널별로 평균압력 예상값의 50 ~ 90%를 관리기준치로 적용하고 있다(Moore and Crease, 1996; Eurotunnel, Transmanche-Link, 1991).

3.3 프랑스 Chatalet 지하철 정거장

하루 평균 이용 승객이 약 230만명에 달하는 파리 지하철 구간중 Chatalet 지하철 역사의 신규 노선 증설 공사시 역사의 안정성 여부를 지속적으로 관찰하기 위해 광섬유센서를 이용한 영구계측 프로그램이 채택되었다. 계측기 설치시점은 1992년으로 15 m 광섬유 변형센서를 10개소에 설치하였고, 지하철 운행시 자장 발생에도 불구하고 계측이 순조롭게 수행되었다. 관리기준치는 축선장 15 m당 ± 5 mm를 설정하여 지속적으로 관리하고 있으며, 만일 이 기준치를 초과하면 경고 조치가 자동적으로 작동하여 지하철 운행관리 중앙사무실에 통보되는 시스템이 채택되었다.

3.4 일본

일본 동경 교통국과 세이칸 터널(Seikan tunnel)의 콘크리트 라이닝 내공변위량 관리기준치는 다음과 같다.

(1) 동경 교통국

터널 콘크리트 라이닝 내공변위량 관리기준치를 축선장 15 m당 ± 5 mm로 관리하고 있다.

(2) 세이칸 터널

본선터널 콘크리트 라이닝 내공변위량 관리기준치는 축선장 10 m에서 ± 3 mm로 관리하고 있다(Maeda and Obata, 1992).

4. 향후 제안할 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치

앞에서 검토한 터널에 작용하는 토압, 간극수압, 내공변위의 유지관리계측 관리기준치 분석결과에 대해 국내적용 계측관리 기준치와 국외적용 계측관리 기준치 분석결과를 비교하여 안전단계는 허용응력의 60%, 주의단계는 허용응력의 80%, 정밀분석단계는 허용응력의 100%로(Woo, 2015) 향후 제안할 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치를 설정하면 Table 8과 같다.

Table 8. Limit value of future applied management monitoring

Item	Limit values of monitoring management			Remark
	Safety	Caution	Precision analysis	
Tunnel outside earth pressure	0.60P	0.80P	over 0.80P	• P = designed earth pressure
Tunnel outside pore water pressure	0.60 μ	0.80 μ	over 0.80 μ	• μ = designed pore water pressure
Tunnel convergence	0.10%	0.13%	over 0.16%	• Optical fiber sensor and electricity-resistance sensor allowable strain = 0.0016 (0.16%)
	± 2.5 mm	± 3.5 mm	over ± 4 mm	• Three dimensions lightwave measurement allowable displacement = 15 m ± 4 mm

위의 계측관리 기준치 적용시 각각의 계측항목 뿐만 아니라 전체 항목의 변화추이와 상관관계, 그리고 터널의 변상여부 등을 종합적으로 고려하여 터널의 안전성 여부를 판정하여야 할 것이다.

변화추이와 상관관계, 그리고 터널의 변상여부 등을 종합적으로 고려하여 터널의 안전성 여부를 판정하여야 할 것이다.

5. 결론

본 논문은 서울지하철 5, 6, 7호선 유지관리계측 초기에 설정된 계측관리기준치를 토대로 서울지하철 6, 7, 9호선 8개 대표단면의 콘크리트라이닝의 토압과 간극수압에 대하여 5년에 걸친 계측 실적을 분석하고, 국외 계측관리기준을 비교하여 향후 제안 할 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치를 설정하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

1. 계측관리 기준치 설정방법에서 절대치에 의한 관리방법은 안전율의 개념을 도입한 것으로 사전에 각 계측 항목별로 안전율을 설정하고, 설계시에 사용한 추정치 및 계측 결과치의 비와 안전율을 비교하여 안전성을 예측하는 방법으로 계측결과에 신속하게 대처할 수 있어 현장에서 안전관리를 위해 많이 사용되고 있어 향후 터널 유지관리계측의 압력 관리기준치를 절대치에 의한 관리방법으로 제안하였다.
2. 서울지하철 6, 7, 9호선 8개 대표단면의 콘크리트 라이닝의 토압과 간극수압, 내공변위에 대하여 5년에 걸친 터널 유지관리계측 항목의 계측 관리기준치 분석결과를 종합하여 Table 5와 같은 결론을 얻었다.
3. 향후 적용을 제안한 유지관리계측의 압력 관리기준치는 국내적용 계측관리 기준치와 국외적용 계측관리 기준치 분석결과를 비교하여 안전단계는 허용응력의 60%, 주의단계는 허용응력의 80%, 정밀분석단계는 허용응력의 100%로 절대치에 의한 계측관리방법을 도입하였으며, 계측관리 기준치 적용시 각각의 계측항목 뿐만 아니라 전체 항목의

감사의 글

이 논문은 정부(교육부)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 2015년 5차년도 연구과제(과제번호 2015012574)인 “터널계측의 압력 관리기준치 설정 연구”의 일부 내용이며, 이에 감사를 드립니다.

References

1. Eurotunnel, Transmanche-Link. (1991), “Monitoring of tunnel lining second annual report”, Gage technique limited.
2. 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.
3. Lee, S., Woo, J.T. (2003), “Design and construction of retaining earth structure”, Yeamoonsa, pp. 292-295.
4. Maeda, K., Obata, T. (1992), “The measurement of the behavior at the undersea portion of the seikan tunnel”, Journal of Japanese Tunnelling Association, Vol. 2, pp. 143-148.
5. Moore, D.R., Crease, A. (1996), “Tunnel instrumentation, engineering geology of the channel tunnel”, pp. 287-294.
6. Richard Bassett (2012), “A guide to field instrumentation in geotechnics, principles, installation and reading”, Spon Press, pp. 210-212.
7. Seoul Metropolitan Subway Construction Headquarters, (2002), “Maintenance monitoring report of Seoul

- metropolitan subway”, pp. 31-62.
8. Woo, J.T., Lee, R.C. (2008a), “Construction monitoring engineering”, Goomi Publishing Co., pp. 760-763.
 9. Woo, J.T., Lee, R.C. (2008b), “Construction monitoring engineering”, Goomi Publishing Co., pp. 763-765.
 10. 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.
 11. Woo, J.T., Lee, K.I. (2012), “A study on establishment of measurement and analysis frequency of maintenance monitoring in tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 2, pp. 117-129.
 12. 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.
 13. Woo, J.T. (2014), “A study on the estimation of the optimal number of monitoring points in single-track tunnel lining with the inverse analysis program”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No.1, pp. 1-11.
 14. Woo, J.T. (2015), “A study on establishment of stress limit values of management monitoring in tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 1, pp. 25-32.