

## 관리도를 이용한 터널 시공현장 계측변위 분석 기법 개발

임성빈 · 서용석\*

충북대학교 지구환경과학과

### A New Method for the Analysis of Measured Displacements during Tunnelling using Control Charts

Sung-Bin Yim and Yong-Seok Seo\*

Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

터널 굴착 중 수행되는 계측은 구성 지반의 거동을 가시화하여 안정성을 평가할 수 있는 중요한 정보를 제공한다. 일반적으로 계측은 터널 굴착면 형성 초기에 집중적으로 수행되며, 시간이 경과할수록 계측횟수를 줄여 나간다. 하지만 이러한 계측 기준 및 관리 지침은 확실적이며 뚜렷한 정량적 기준이 부족한 실정이다. 본 연구에서는 굴착 초기 발생하는 변위의 안정화 시점의 정량적 판단과 안정화 이후의 미세한 변위 변동 특성 분석 및 이상거동 평가를 위해 통계 관리도 기법을 적용하였다. 계측변위에 대한 이동범위(MR) 관리도 및 누적합(CUSUM) 관리도를 작성하여 변위 평가 가능성을 검토하였다.

**주요어 :** 터널 계측, 이동범위 관리도, 누적합 관리도, 변위 수렴

Tunnel measurements provide crucial information on the ground stability during the excavation, visualizing the ground behavioral characteristics with quantitative data. Generally, the frequency of the measurements is greater during the early stage of the tunnelling process and reduced with time. However, there are no quantitative criteria established for either the activities, such as the time, location and frequency of the measurement or the management guidance, especially for the site of subtle and unexpected displacement during the excavation. It is, however, still challenging to assess behavioral characteristics of subtle and unexpected displacement after stabilization. In this study, we propose a new method to assess stability and to analysis the behavioral characteristics of subtle and unexpected displacement after stabilization using statistic control charts of displacements. We also present a test result on the applicability of control chart and CUSUM control chart to measured displacements.

**Key words :** tunnel monitoring, MR control chart, CUSUM control chart, displacement convergence

## 서 론

일반적으로 지반은 건설공사 등으로 인하여 굴착이나 성토 시 새로운 응력상태에 맞게 평형상태로 전이되는 과정으로 거동한다. 따라서 터널 굴착에서의 가장 핵심은 새로운 평형상태로의 지반 거동이 급격하지 않도록 억제하면서 재평형 상태로 전이시켜 안정 상태로 만들어 주는 것이다(한국터널공학회, 2004). 굴착 중의 터널 주변 지반의 거동은 계측에 의해 정량화되어 가시화되

며, 일반적으로 변위 크기 및 변위 발생 속도 등을 통해 평가된다. 터널 굴착에 의한 변위는 굴착 초기에 가장 많이 발생하며, 굴착이 진행됨에 따라 즉 굴착면과 계측지점간 거리가 증가하면서 감소한다. 따라서 변위곡선의 경사는 시간이 경과함에 따라 점차 완만해지며 수렴한다. 이 수렴은 굴착 영향범위를 지나서 지반이 일차적으로 안정화되었음을 의미한다. 이러한 변위 수렴 시점은 대부분 현장에서 확실한 기준 없이 경험적으로 평가되고 있으며, 임성빈 등(2007)에 의해 통계 관리도 기

\*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

법을 이용한 안정화 시점 판단 기법이 제시된 바 있다.

현장계측은 굴착면 형성 초기에 집중적으로 수행되며, 시간이 경과할수록 계측횟수를 줄여 나간다. 많은 변위가 굴착면 형성 초기에 발생되며, 특히 대부분의 터널 붕괴사고가 굴착면 근처에서 발생한다. 현재 적용되고 있는 계측 변위 평가 기법은 대부분 총 변위 또는 변위 속도 등에 의해 규제되어, 이러한 초기 변위 평가에는 유리하다. 하지만 굴착면 후방, 즉 변위가 안정되었다고 판단된 이후 시점에도 붕괴 발생 사례가 다수 있다. 이러한 경우는 안정 상태에서 갑작스런 변위를 나타내거나, 점진적 또는 장기적인 미세변위의 형태로 나타난다. 하지만 갑작스런 변위가 발생하더라도 일반적으로 사용되는 초기변위를 포함하는 총 변위 평가 기준을 넘지 않는다면 인지가 어려울 것이며, 또한 계측 조건 및 오차 등을 고려하면 미세변위의 변동은 계측 데이터의 직접 분석으로는 판정이 어렵다.

본 연구에서는 이러한 지반의 일차 안정화 시점 이후에 발생하는 급격한 또는 점진적인 거동에 의한 이상 징후 판정을 위해 응용 통계기법의 일종인 관리도 기법을 적용하였다. 관리도(control chart)는 통계학적 확률을 근거로 하여 품질관리를 실시하는 도표로, 1924년 Schewhart에 의해 최초로 제안되었다. 관리도 이론은 제조공정에서의 품질관리 기술의 대표적인 방법의 하나로, 제품물질의 분포가 허용범위 이내에 있는지 또는 아닌지를 감시하는데 이용된다. 이러한 관리도는 Page(1954), Brook and Evans(1972), Lucas and Saccucci(1990), Prabhu et al.(1994), Costa(1997) 등에 의해 다양한 형태로 발전되어 왔다. 우리나라에 관리도법이 쓰이기 시작한 것은 1963년 한국공업규격으로 KSA3201(관리도법)이 제정되면서부터이다. 최근 이러한 관리도 이론은 국내 산업 전반에 걸쳐 다양하게 활용되고 있는 추세이다. 특히 지반공학 분야에서는 임성빈 등(2007)에 의해 터널 변위의 이동범위(MR) 관리도 분석을 통한 변위 수렴 판별 기법이 발표되었으며, 권오일 등(2008)은 관리도를 적용한 사면 계측 데이터 분석 시스템을 개발한 바 있다.

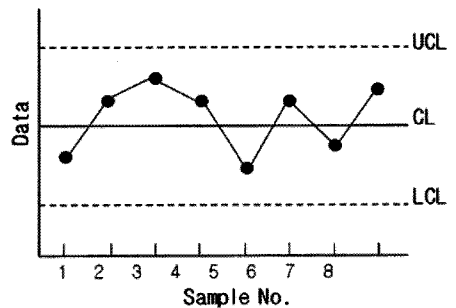
### 통계관리도 기본이론

관리도란 품질의 산포가 우연 원인에 의한 것인지 또는 이상 원인에 의한 것인지를 판별하는, 다시 말하면 공정이 안정 상태 또는 관리 상태에 있는지의 여부를 판별하고 공정을 안정 상태로 유지함으로써 제품의 품질을 균일화하기 위한 공정/프로세스의 통계적 관리 방

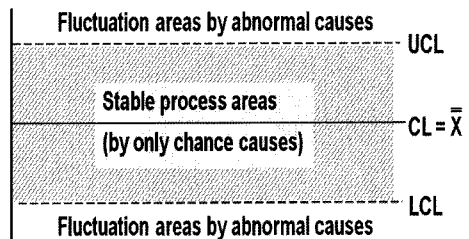
법이다. 다른 통계적 방법에 비하여 계산이 쉽고 그 적용 범위가 넓기 때문에 공정 관리나 품질 관리에 널리 사용되고 있는 기법이다. 관리도는 치수, 무게, 강도 등의 품질특성을 세로축, 시간 등을 가로축으로 하는 일종의 도표나 그래프의 형태이다(Fig. 1). 관리 대상의 측정치 분포 중 우연원인으로 인한 산포와 이상 원인으로 인한 산포를 구분하여 평가함으로써 공정을 관리 상태로 유지할 수 있도록 도와준다.

관리도에서는 우연원인과 이상 원인의 합리적 판단을 위해 관리한계선을 설정한다(Fig. 1). 관리한계는 공정의 현실을 감안한 기준으로 우연 변동의 범위를 말하며, 이상원인 발생 유무를 판단하는 기준이 된다. 공정이 정상 상태에 있을 때의 품질특성의 평균치에 해당하는 기준을 중심선(CL, center line), 중심선에서 3σ 위에 있는 관리한계선을 관리상한선(UCL, upper control limit), 중심선에서 3σ 아래 있는 관리한계선을 관리하한선(LCL, lower control limit)이라 한다. 여기서 σ는 표준편차이다. 3σ 관리한계선은 Schewhart가 제안한 것으로 일반적으로 널리 쓰이고 있다. 관리한계선이 정해진 관리도 도표 상에 Fig. 1과 같이 측정 결과를 점으로 표시하여 나타내는데, 이 점이 한계 밖으로 나가게 되면 제조공정 또는 품질에 이상이 있는 것을 나타내는 것이다.

관리도는 데이터, 즉 측정치의 종류에 따라 계량형 관



(a)



(b)

Fig. 1. Basic concepts of the statistical control chart.

**Table 1.** Classification of control charts by data types.

Quantitative data	Qualitative data
$\bar{x}$ (sample mean) QC chart	$p$ (fraction defectives) QC chart
$R$ (range) QC chart	$np$ (number of defectives) QC chart
$x$ (individual data) QC chart	$c$ (number of defects) QC chart
$R_s$ (range of adjacent data) QC chart	$u$ (number of defect per unit) QC chart
$\tilde{x}$ (median) QC chart	
$s$ (standard deviation) QC chart	
MR (moving range) QC chart	
MA (moving average) QC chart	
EWMA (exponentially weighted moving average) QC chart	
CUSUM (cumulative sum) QC chart	

**Table 2.** Classification of control charts by application types.

Focus of control	Type of control charts
Process mean	$\bar{x}$ , $x$ , CUSUM, EWMA QC chart
Process fluctuation	$R$ , $s$ , QC chart
Fraction defective	$p$ QC chart
Number of defective	$np$ QC chart
Number of defect	$c$ , $u$ QC chart

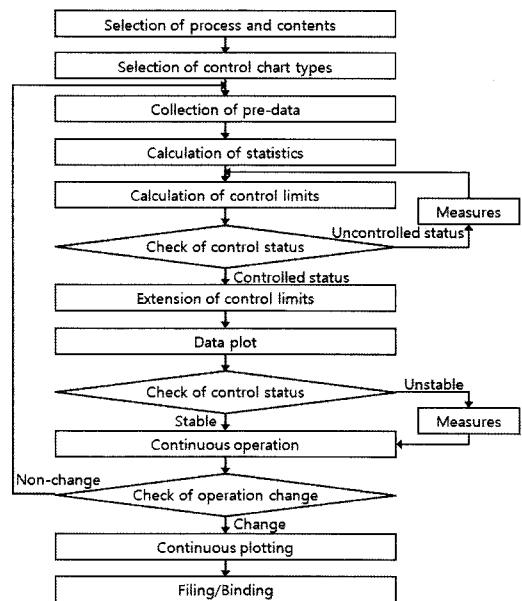
리도와 계수형 관리도로 대별된다(Table 1). 계량형 관리도는 품질을 대표하는 특성치를 측정, 표시하는 것으로서 이에는 측정치의 중심적 경향을 나타내는 평균치( $\bar{x}$ ) 관리도, 측정치의 분산을 나타내는 범위( $R$ ) 관리도 그리고 이들을 변형한 다양한 유형의 관리도가 있다. 계수형 관리도는 제품의 합격여부를 판별하는 데 사용되는 것으로서, 이에는 불량률( $p$ ) 관리도, 불량개수( $np$ ) 관리도, 불량개소( $c$ ) 관리도, 단위규모당 결점개소( $u$ ) 관리도가 있다. Table 2는 관리도를 적용 유형에 따라 분류한 것이다.  $\bar{x}$ ,  $x$ ,  $R$ ,  $s$ ,  $MR$ ,  $p$ ,  $np$ ,  $c$ ,  $u$  관리도 등은 기본적으로 목표값에서의 큰 변화를 탐지하는데 이용되며, CUSUM 및 EWMA 관리도는 미세한 변화를 잘 탐지한다.

일반적인 관리도 작성 및 처리과정은 Fig. 2와 같다.

### 이동범위(MR) 관리도 분석

#### 이동범위(MR) 관리도

이동범위 관리도(moving range control chart)는 측정값을 얻을 수 있는 시간 간격이 비교적 크거나 공정으로부터 한 개의 측정값 밖에 얻을 수 없는 경우 사용된다. 따라서 이동범위(MR) 관리도는 지점 당 1회 측정 시 하나의 데이터가 획득되며, 측정의 시간 폭이 긴 터널 계측 데이터 분석에 용이하게 활용될 수 있다. 이동범위(MR) 관리도에서는 공정의 표준편차 관리를 위해



**Fig. 2.** A flow chart for the control chart method.

일정한 구간 내에서의 측정값들 사이의 범위로 정의되는 이동범위를 설정한다. 이때 구간 간격은 임의로 설정할 수 있다. 이동범위(MR) 관리도는 흔히 측정값의 개별 데이터를 타점하는 개별( $x$ ) 관리도(individual control chart)와 병행하여 사용되며, 이것을  $x$ -MR 관리도라 부른다.

이동범위(MR) 관리도에서의 데이터 간의 표준편차  $\sigma$ 를 알고 있는 경우 관리한계선은 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned}
 UCL_{Rm} &= \mu_R + 3\sigma_R = (d_2 + 3d_3)\sigma = D_2\sigma \\
 CL_{Rm} &= \mu_R = d_2\sigma \\
 LCL_{Rm} &= \mu_R - 3\sigma_R = (d_2 - 3d_3)\sigma = D_1\sigma
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서,  $\mu_R$ 은 측정값의 평균값이며,  $\sigma_R$ 은 측정값의 표

준편차이다.  $d_2$ 와  $d_3$ 는 중심선을 위한 계수이며,  $D_1$ 과  $D_2$ 는 관리한계선을 위한 계수로 데이터 군의 크기에 따라 관리도용 계수표에 설정되어 있다. 측정값 간의 표준편차  $\sigma$ 를 모르는 경우는  $\sigma$ 의 추정치  $\bar{R}m/d_2$ 를 이용하여 다음과 같은 관리 한계선이 설정된다.

$$\begin{aligned}
 UCL_{Rm} &= \bar{R}m + 3d_3\bar{R}m/d_2 = D_4\bar{R}m \\
 CL_{Rm} &= \bar{R}m \\
 LCL_{Rm} &= \bar{R}m - 3d_3\bar{R}m/d_2 = D_3\bar{R}m
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서,  $\bar{R}m$ 은 이동범위의 평균이다. 2개의 데이터만 사용할 경우 관리도용 계수표에서  $D_4=3.27$ 이며,  $D_3$ 는 값이 없으므로 생각할 필요가 없다.

**계측변위의 이동범위(MR) 관리도 분석**

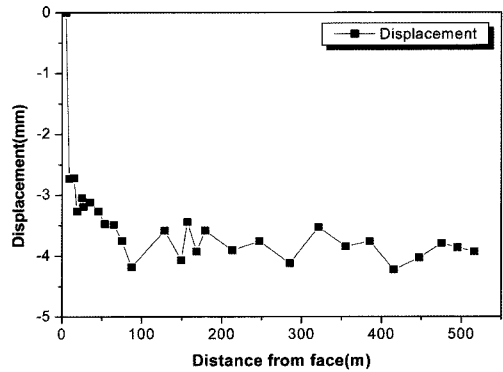
계측변위의 이동범위(MR) 관리도 작성 및 평가는 임성빈 등(2007)에 의해 제시된 방법을 근거로 하였으며, 범위 산정을 위한 구간  $k$ 는 5m, 10m, 15m, 20m, 25m, 30m로 구분하였다. 관리한계선은 계측 데이터의 특성 및 평가 목적을 고려하여 범위 0.5의 하한 경계선만 설정하였다. 또한 계측오차 등을 고려하여 측정값의 이동범위가 3연속으로 관리한계선에 포함되는 경우 변위가 수렴하는 것으로 판정하였다. Table 3은 특정 지점에서의 계측변위와 계산된 각 구간 조건별 이동범위를 정리한 것이다. Table 3에서 Last TH는 마지막 측정치의 순번을 나타낸 것이다. Fig. 3은 굴착면과 계측지점 간 거리에 따른 변위 분포와 이동범위(MR) 관리도를 도시한 것이며, 이 중 Fig. 3(a)의 변위 분포 그래프는 관리한계선이 제외된 개별 관리도로 간주할 수 있다.

계측변위의 이동범위(MR) 관리도(Fig. 3(b)) 판정 결과 4번째 측정값, 즉 굴착면 거리 19m부터 변위가 수렴한 것으로 평가되었다. 이후 변위는 일정한 범위 내에서 수렴 상태를 유지하다가 모든 관리도 상의 12번째 측정값에서 관리한계선을 넘어선다. 이는 Fig. 3(a)에서의 계측변위가 갑자기 증가한 구간과 일치한다. 급격한 증가 이후 변위는 일정 수준으로 유지되며, 이 현상은 이동범위(MR) 관리도 상에서도 잘 나타난다. 20번째 데이터에서 관리 한계선을 초과하지만 이는 계측 오차로 인한 변위 감소 현상에 의한 것이므로 무시될 수 있다.

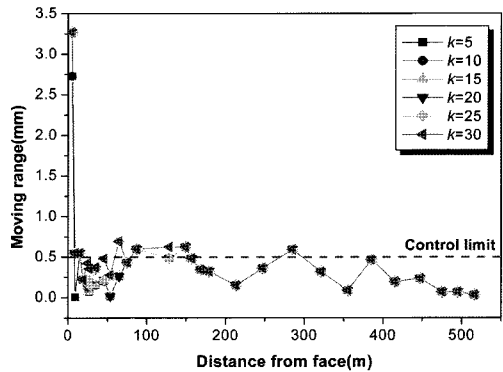
**누적합(CUSUM) 관리도 분석**

**누적합(CUSUM) 관리도**

누적합 관리도(cumulative sum control chart)는 과거 관



(a) Individual(x) control chart



(b) Moving range(MR) control chart

**Fig. 3.** An example of  $x$ -MR control chart for measured displacements.

측의 변화를 계속 누적하는 누적의 효과를 이용하는 방법으로서, 점을 찍어 나감에 있어서 앞의 관측값의 결과들을 누적해 얻은 값을 활용해 이상 변화를 탐지하는 방법이다. 즉, 표본값에서 얼마나 차이가 나는지를 계산하고 이 편차를 계속해서 누적해 나가면서 타점해 나가는 관리도이다. 누적합(CUSUM) 관리도는 특히 표본크기  $n=1$ 인 경우에 효과적이다. 따라서 누적합(CUSUM) 관리도는 지점 당 1회 1개의 데이터가 획득되는 계측 변위 분석에 적합하다. 누적합(CUSUM) 관리도 작성을 위한  $t$ 번째 측정값의 누적합  $S_t$ 는 다음의 식과 같이 정의된다.

$$S_t = \sum_{i=1}^t (\bar{x}_i - \mu_0) = (\bar{x}_t - \mu_0) + \sum_{i=1}^{t-1} (\bar{x}_i - \mu_0) = (\bar{x}_t - \mu_0) + S_{t-1} \tag{3}$$

여기서,  $\bar{x}_t$ 는  $t$ 번째 측정군의 평균값이며,  $\mu_0$ 는 목표값이다.

누적합(CUSUM) 관리도는 측정값의 변화를 탐지하는 것이 목적이지만 평균이 변하기만 하면 그 변화를 탐지

Table 3. Moving ranges for MR control chart.

No.	Dis- tance (m)	Displace- ment (mm)	k=5 m			k=10 m			k=15 m			k=20 m			k=25 m			k=30 m		
			Last TH	End (m)	Range	Last TH	End (m)	Range	Last TH	End (m)	Range	Last TH	End (m)	Range	Last TH	End (m)	Range	Last TH	End (m)	Range
1	5	0.000	2	10	2.729	3	15	2.729	4	20	3.271	5	25	3.271	6	30	3.271	6	35	3.271
2	9	-2.729	2	14	0.007	4	19	0.549	4	24	0.549	6	29	0.549	6	34	0.549	7	39	0.549
3	15	-2.722	4	20	0.549	5	25	0.549	6	30	0.549	6	35	0.549	7	40	0.549	7	45	0.549
4	19	-3.271	4	24	0.221	6	29	0.221	6	34	0.221	7	39	0.221	7	44	0.221	8	49	0.221
5	25	-3.050	6	30	0.139	6	35	0.139	7	40	0.139	7	45	0.139	8	50	0.221	9	55	0.423
6	27	-3.189	6	32	0.071	7	37	0.071	7	42	0.071	8	47	0.153	8	52	0.153	9	57	0.355
7	35.2	-3.118	7	40.2	0.153	7	45.2	0.153	8	50.2	0.153	9	55.2	0.355	9	60.2	0.355	10	65.2	0.371
8	45.8	-3.271	8	50.8	0.202	9	55.8	0.202	9	60.8	0.202	10	65.8	0.217	10	70.8	0.217	11	75.8	0.479
9	53.6	-3.473	9	58.6	0.016	9	63.6	0.016	10	68.6	0.016	10	73.6	0.016	11	78.6	0.277	11	83.6	0.277
10	65	-3.489	10	70	0.261	10	75	0.261	11	80	0.261	11	85	0.261	12	90	0.692	12	95	0.692
11	75.4	-3.750	11	80.4	0.431	11	85.4	0.431	12	90.4	0.431	12	95.4	0.431	12	100.4	0.431	12	105.4	0.431
12	87.4	-4.181	12	92.4	0.599	12	97.4	0.599	12	102.4	0.599	12	107.4	0.599	12	112.4	0.599	12	117.4	0.599
13	128.6	-3.582	13	133.6	0.484	13	138.6	0.484	13	143.6	0.484	13	148.6	0.484	14	153.6	0.484	15	158.6	0.623
14	149.5	-4.066	14	154.5	0.623	15	159.5	0.623	15	164.5	0.623	16	169.5	0.623	16	174.5	0.623	17	179.5	0.623
15	157	-3.442	15	162	0.483	15	167	0.483	16	172	0.483	16	177	0.483	17	182	0.483	17	187	0.483
16	168.6	-3.926	16	173.6	0.344	16	178.6	0.344	17	183.6	0.344	17	188.6	0.344	17	193.6	0.344	17	198.6	0.344
17	179.3	-3.582	17	184.3	0.322	17	189.3	0.322	17	194.3	0.322	17	199.3	0.322	17	204.3	0.322	17	209.3	0.322
18	213.3	-3.904	18	218.3	0.150	18	223.3	0.150	18	228.3	0.150	18	233.3	0.150	18	238.3	0.150	18	243.3	0.150
19	247.3	-3.754	19	252.3	0.362	19	257.3	0.362	19	262.3	0.362	19	267.3	0.362	19	272.3	0.362	19	277.3	0.362
20	285.3	-4.116	20	290.3	0.592	20	295.3	0.592	20	300.3	0.592	20	305.3	0.592	20	310.3	0.592	20	315.3	0.592
21	321.3	-3.524	21	326.3	0.318	21	331.3	0.318	21	336.3	0.318	21	341.3	0.318	21	346.3	0.318	21	351.3	0.318
22	355.3	-3.842	22	360.3	0.086	22	365.3	0.086	22	370.3	0.086	22	375.3	0.086	22	380.3	0.086	23	385.3	0.086
23	385.3	-3.756	23	390.3	0.465	23	395.3	0.465	23	400.3	0.465	23	405.3	0.465	23	410.3	0.465	24	415.3	0.465
24	415.3	-4.221	24	420.3	0.194	24	425.3	0.194	24	430.3	0.194	24	435.3	0.194	24	440.3	0.194	24	445.3	0.194
25	447.3	-4.027	25	452.3	0.235	25	457.3	0.235	25	462.3	0.235	25	467.3	0.235	25	472.3	0.235	26	477.3	0.235
26	475.3	-3.792	26	480.3	0.067	26	485.3	0.067	26	490.3	0.067	26	495.3	0.067	27	500.3	0.067	27	505.3	0.067
27	495.3	-3.859	27	500.3	0.067	27	505.3	0.067	27	510.3	0.067	27	515.3	0.067	28	520.3	0.067	29	525.3	0.067
28	516.1	-3.926	28	521.1	0.031	29	526.1	0.031	29	531.1	0.031	29	536.1	0.031	29	541.1	0.031	29	546.1	0.031

해 내지는 것은 아니다. 측정 오차 등과 같은 미세한 변화는 때로는 중요하지 않을 수 있기 때문에 어느 정도의 변화를 탐지하기를 원하는 거의 기준이 필요하다. 따라서 누적합(CUSUM) 관리도에서는 탐지하고자 하는 변화 크기를 지정하는 참고값(reference value,  $K$ )을 설정한다. 위쪽의 편차를 계산하는 누적합과 아래쪽으로의 편차를 계산하는 누적합 식은 다음과 같이 정의된다.

$$S_i^+ = \bar{x}_i - (\mu_0 + K) + S_{i-1}^+ \tag{4}$$

$$S_i^- = \bar{x}_i - (\mu_0 - K) - S_{i-1}^-$$

여기서  $S_0^+ = 0$ 이고,  $S_i^-$ 을 누적하는 과정에서  $S_i^-$ 의 값이 양이 되면 그 값을 0으로 둔다. 즉, 표본값이 목표값 보다 일정 이상 큰 것은  $S_i^+$ 로 누적하고, 표본값이 목표값보다 일정 이하 작은 것은  $S_i^-$ 로 하여 누적하는 방법이다. 따라서 누적합 관리도의 타점 통계량은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$S_i^+ = \max[0, \bar{x}_i - (\mu_0 + K) + S_{i-1}^+]$$

$$S_i^- = \min[0, \bar{x}_i - (\mu_0 - K) - S_{i-1}^-] \tag{5}$$

통계량  $S_i^+$ 와  $S_i^-$ 를 단측 상향누적합(one-sided upper CUSUM)과 단측 하향누적합(one-sided lower CUSUM)이라 각각 부른다.

탐지하고자 하는 변화 크기는 흔히 표준편차 단위로 나타낸다. 1 표준편차의 변화를 탐지하고자 하면 참고 값  $K$ 는 주로 이것의 반을 사용한다.

$$K = \frac{1}{2} \sigma_{\bar{x}} \tag{6}$$

여기서,  $\sigma_{\bar{x}}$ 는 각 데이터군 평균의 표준편차이다.

**계측변위의 누적합(CUSUM) 관리도 분석**

본 연구에서는 Fig. 4(a)의 현장 계측 변위를 대상으로 누적합(CUSUM) 관리도를 작성하여 평가하였다. 이를 위해 먼저 Table 4와 같이 구간  $k=20$ 에서의 이동범위를 계산하였다. Fig 4(b)의 이동범위(MR) 관리도 분석 결과 변위는 8번째 관측값, 즉 굴착면의 41.0m 후방에서부터 수렴하여 일차 안정화 시점에 도달한 것으로 판정된다.

MR 관리도 판정 결과에 의한 일차 안정화 시점 이후인 9번째 측정값부터 누적합(CUSUM) 관리도를 작성하여 장기 거동 특성을 분석하였다. 수렴 이후 최초 3개 측정값의 평균을 목표값( $\mu_0$ )으로 설정하였으며, 참고값  $K$ 는 탐지하고자 하는 변화의 크기로 정의되는 표준편차의 반으로 설정하였다. 누적합(CUSUM) 관리도 작성을 위한 예비단계

**Table 4.** Moving ranges for CUSUM control chart.

No.	Distance from face (m)	Displacement (mm)	No. of the last data	Distance of the last point (m)	Range
1	5	0.000	6	25	3.724
2	9	-3.724	7	29	0.763
3	13	-3.530	7	33	0.763
4	17	-3.035	7	37	0.763
5	21	-3.234	8	41	0.596
6	25	-3.330	8	45	0.596
7	29	-3.797	9	49	0.596
8	41	-3.202	10	61	0.596
9	46.6	-3.612	10	66.6	0.185
10	56.6	-3.797	11	76.6	0.074
11	72.6	-3.723	12	92.6	0.157
12	84.6	-3.879	12	104.6	0.087
13	110.6	-3.792	14	130.6	0.077
14	118.6	-3.715	15	138.6	0.028
15	134.0	-3.743	17	154.0	0.180
16	148.4	-3.923	17	168.4	0.143
17	150.6	-3.780	17	170.6	0.339
18	174.7	-4.119	19	194.7	0.415
19	194.7	-3.604	19	214.7	0.202
20	218.7	-3.807	21	238.7	0.170
21	230.3	-3.976	22	250.3	0.347
22	249.4	-3.629	23	269.4	0.146
23	266.3	-3.775	23	286.3	0.017
24	294.3	-3.792	24	314.3	0.014
25	326.3	-3.807	25	346.3	0.130
26	352.3	-3.937	26	372.3	0.333
27	373.9	-3.604	27	393.9	0.426
28	394.7	-4.130	29	414.7	0.496

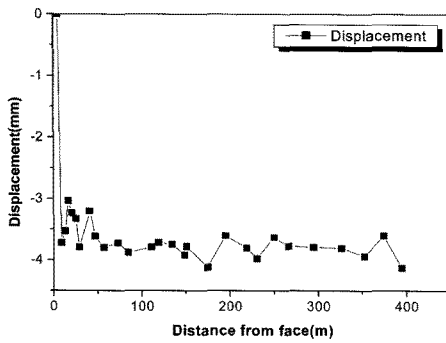
인 표 누적합은 Table 5와 같이 정리되며, 누적합(CUSUM) 관리도는 Fig. 4(c)와 같다. Fig. 4(a)의 계측변위를 살펴보면, 수렴 이후 계측 오차에 의한 데이터 진동으로 일정한 값을 기준으로 유지되고 있는 것으로 보인다. 하지만 Fig. 4(c)의 누적합(CUSUM) 관리도상의 단측 하향누적합은 계측변위가 점차적으로 증가하는 양상을 잘 보여준다. 특히 전체적으로 12번째, 16번째 측정값에서 추가 변위가 발생하였으며, 24번째 측정값부터 미세변위가 계속 발생하는 것으로 확인된다. 단측 상향누적합의 변화는 보이지 않으며, 따라서 수렴 이후 추가 변위가 일시적 또는 지속적으로 발생되고 있음을 보여준다.

**결 론**

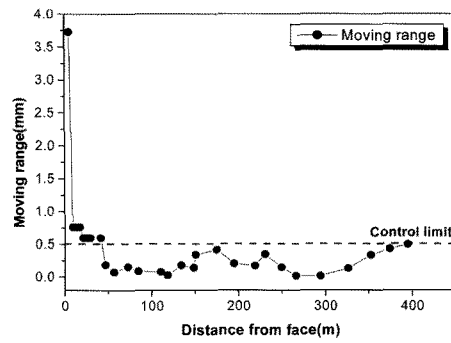
터널 시공시 계측은 굴착에 따른 지반의 거동 특성을

Table 5. Tabular CUSUM control chart.

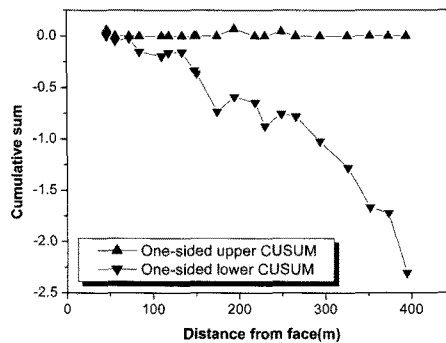
No.	Distance from face (m)	Displacement (mm)	One-sided upper CUSUM			One-sided lower CUSUM		
			+3.673	St+	N+	+3.749	St-	N-
9	46.6	-3.612	0.060	0.060	1	0.136	0.000	0
10	56.6	-3.797	-0.124	0.000	0	-0.048	-0.048	1
11	72.6	-3.723	-0.050	0.000	0	0.026	-0.022	2
12	84.6	-3.879	-0.206	0.000	0	-0.131	-0.153	3
13	110.6	-3.792	-0.119	0.000	0	-0.043	-0.196	4
14	118.6	-3.715	-0.042	0.000	0	0.034	-0.162	5
15	134	-3.743	-0.070	0.000	0	0.006	-0.156	6
16	148.4	-3.923	-0.250	0.000	0	-0.174	-0.330	7
17	150.6	-3.780	-0.107	0.000	0	-0.031	-0.362	8
18	174.7	-4.119	-0.447	0.000	0	-0.371	-0.732	9
19	194.7	-3.604	0.069	0.069	1	0.145	-0.588	10
20	218.7	-3.807	-0.134	0.000	0	-0.058	-0.645	11
21	230.3	-3.976	-0.303	0.000	0	-0.227	-0.873	12
22	249.4	-3.629	0.044	0.044	1	0.120	-0.753	13
23	266.3	-3.775	-0.102	0.000	0	-0.026	-0.779	14
24	294.3	-3.992	-0.319	0.000	0	-0.243	-1.022	15
25	326.3	-4.007	-0.334	0.000	0	-0.258	-1.280	16
26	352.3	-4.137	-0.464	0.000	0	-0.388	-1.668	17
27	373.9	-3.804	-0.131	0.000	1	-0.055	-1.723	18
28	394.7	-4.330	-0.657	0.000	0	-0.581	-2.305	19



(a) Displacement with distance from face



(b) MR control chart



(c) CUSUM control chart

Fig. 4. An example of MR and CUSUM control charts for measured displacement.

정량화 하는 중요한 정보를 제공한다. 계측에 의해 획득된 데이터는 총 변위의 크기 또는 변위 속도 등에 의해 안정성이 평가된다. 하지만 상기 안정성 평가 기법은 많은 변위가 발생하는 굴착면 형성 초기에는 적합하지만, 변위 수렴 이후 급작스런 변위 또는 점진적인 미세변위 등의 분석에는 효율적이지 않다. 또한 이러한 변위는 계측 오차에 의한 데이터 진동 등으로 인해 인지하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 터널 변위 수렴, 즉 지반의 일차 안정화 시점 이후의 계측변위 분석을 위해 이동범위(MR) 관리도 및 누적합(CUSUM) 관리도의 적용 가능성을 검토하였다.

계측변위의 이동범위(MR) 관리도 작성 및 평가 결과 수렴 이후에 발생하는 일시적인 발생 변위를 잘 인지하는 것으로 나타났다. 일반적인 계측변위 분석에 의해서는 데이터의 진동으로 인해 변위 증가 구간이 잘 확인되지 않지만, 일정한 구간 내에서의 범위 분석을 통해 표준편차를 고려한 데이터의 증가를 인지할 수 있었다.

점진적으로 발생하는 미세변위를 포함하는 전체적인 변위 거동 양상을 분석하기 위하여 계측변위의 누적합(CUSUM) 관리도를 작성하였다. 이를 통해 진동하면서 변화하는 변위의 추세 및 추가 변위가 발생하는 시점 등을 분석할 수 있었다. 특히 참고값의 설정으로 계측오차를 배제할 수 있어서 지반의 장기 거동 평가에 매우 효율적으로 활용될 수 있는 것으로 기대된다.

상기 관리도 기법을 터널 시공 현장의 계측 분석 시스템에 적용한다면, 기존의 평가 기법의 한계를 보완하여 계측 정보의 효율적이며 실질적인 활용을 가능하게 할 것이다. 이를 위해서는 확실적인 통계적 기준에 의한 관리한계선 설정 및 평가를 벗어난, 새로운 기준 마련을 위한 연구가 선행되어야 한다. 또한 이러한 관리도 기법은 사면, 댐, 기초, 건물 등의 다양한 구조물의 계측 정보 분석에도 확장·적용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구는 건설교통부의 2005년 건설핵심기술연구개발사업인 “IT 및 신소재를 활용한 급속 안정화 터널시공기술개발(과제번호:C105A1020001-05A0502-00240)” 연구사업의 일환으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- 터널의 이론과 실무, 2004, 한국터널공학회.  
 임성빈, 김성권, 서용석, 박시현, 2007, 관리도 기법을 이용한 터널 변위수렴 특성에 관한 연구, 대한지질공학회지, 17, pp. 197-204.  
 권오일, 백용, 서용석, 2008, 통계관리도 이론을 적용한 사면 계측데이터 분석 시스템 개발, 대한지질공학회 학술발표회, pp. 137-143  
 Brook, D. and D. A. Evans, 1972, An Approach to the Probability Distribution of CUSUM Run Length, Biometrika, Vol. 59, pp. 639-549.  
 Costa, A. F. B., 1997, X Chart with Variable Sample Size and Sampling Interval, Journal of Quality Technology, Vol. 29, pp. 197-204.  
 Lucas, J. M. and M. S. Saccucci, 1990, Exponentially Weighted Moving Average Control Schemes : Properties and Enhancements, Technometrics, Vol. 32, pp. 1-12.  
 Page, E. S., 1954, Continuous Inspection Schemes, Biometrika, Vol. 41, pp. 100-114.  
 Prabhu, S. S., D. C. Montgomery, and G. C. Runger, 1994, A Combined Adaptive Sample Size and Sampling Interval X Control Scheme, Journal of Quality Technology, Vol. 26, pp. 164-176.

---

2009년 6월 19일 원고접수, 2009년 7월 17일 게재승인

### 임성빈

충북대학교 지구환경과학과  
 361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
 Tel: 043-261-2765  
 Fax: 043-273-9645  
 E-mail: bins123@hanmail.net

### 서용석

충북대학교 지구환경과학과  
 361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
 Tel: 043-261-2765  
 Fax: 043-273-9645  
 E-mail: ysseo@cbu.ac.kr