

RMR 변수의 $x-R_s$ 관리도 분석을 통한 굴착면 전방 단층대 예측 기법

임성빈¹, 김광염², 김창용³, 서용석^{4*}

New approach on prediction of fault zone ahead of tunnel face by using $x-R_s$ control chart for RMR parameters

Sung-Bin Yim, Kwang-Yeom Kim, Chang-Yong Kim, Yong-Seok Seo

Abstract A new approach for prediction of a fault zone ahead of tunnel face by using statistical control charts is suggested and applied to the construction site. $x-R_s$ control charts of RMR parameters were investigated as approaching and passing through fault zone. The abnormal signal from the control charts was observed and analyzed based on statistical criteria. Fault zones in the application area were predicted in advance using this method and it was verified by comparing with observation data like horizontal boring and face mapping.

Key words: Statistical control chart method, $x-R_s$ control chart, fault zone, RMR

요 지 통계 관리도 기법을 활용한 터널 굴착면 전방 단층대 예측 기법을 제시하고 적용성을 검토하였다. 5개의 RMR 변수와 기초 RMR에 대한 $x-R_s$ 관리도를 작성하여 단층대로 접근함에 따른 각 변수의 변화 분석을 통해 이상 구간을 통계적인 기준에 의해 판정하였으며, 이러한 이상 구간을 단층대 구간으로 간주하였다. 관리도 평가 기법을 터널 시공현장에 적용한 결과, 선진수평시추 및 막장 관찰을 통해 확인된 3개소의 단층대 구간은 관리도 판정에 의해 단층대가 출현하는 시점보다 각각 1~3 굴착면 이전에 인지되었으며, 거리로 환산하면 2.2 m, 5.0 m, 6.0 m 이전에 해당된다.

주요어: 통계 관리도 기법, $x-R_s$ 관리도, 단층대, RMR 분류

1. 서 론

터널 공사 시 단층대, 파쇄대 등의 연약대가 존재하면 응력전이가 충분히 이루어지지 않으며, 대부분의 붕괴나 붕락은 이러한 연약대 구간에서 발생한다. 따라서 굴착 중 전방의 연약대를 예측하는 것은 시공 안전을 위한 매우 중요한 과정이며, 사고의 방지를 통해 경제적·인적 손실을 줄일 수 있는 최선의 방법 중 하나이다.

최근 3차원 계측기술의 발달과 다양한 수치해석적 연구를 통해 굴착 중 전방의 지질을 예측하기 위한 여러 시도가 이루어지고 있다. Schubert and Vavrovsky(1994)와 Schubert and Steindorfer(1996)는 각기 다른 지점에

서 측정한 터널의 천단변위를 하나의 선으로 연결한 영향선(influence)과 일정한 간격을 두고 이들을 연결한 경향선(trend line)을 정의하여 굴착면 전방 지반상태 변화의 예측에 이용하였다. 국내에서도 이러한 방법을 응용하여 김창용 등(2004)은 시공중에 얻어지는 계측 및 굴착면 관찰, 굴착정보 등을 이용하여 향후 발생할 전방의 내공함수 function parameter를 사전에 예측하고 굴착면 전방의 암반상태 변화를 예측하기 위한 연구를 수행하였으며, 김광염 등(2007)은 단층대 통과구간에서 나타나는 암반의 거동을 효율적으로 표현할 수 있는 계측 단면중심 벡터를 이용한 새로운 3차원 변위 분석 방안을 제시하였다. 3차원 변위 분석 기법 이외에도 TSP 등의 물리탐사를 통한 터널 전방의 불연속면 예측을 위한 다양한 연구가 수행된 바 있다(이찬우, 1997).

상기와 같이 굴착 중 전방의 지질을 예측하기 위한 방법은 계측변위 분석 방법과 물리탐사 방법으로 구분할

¹정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 Post Doc.

²정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원

³정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원

⁴정회원, 충북대학교 지구환경과학과 교수

*교신저자: 서용석 (ysseo@cbu.ac.kr)

수 있다. 굴착 중 전방 단층대 등을 예측하기 위한 TSP 등의 물리탐사 방법은 추가적인 비용이 소모되며, 측정 시간 및 분석에 많은 시간이 필요하기 때문에 흔히 사용되지는 않는다. 따라서 최근에는 터널 시공현장에서 일상적으로 측정되는 계측변위의 다양한 분석을 통한 굴착면 전방 단층대 예측 연구가 활발하다. 하지만 변위를 활용한 대부분의 연구는 수치해석 범위에서 수행되고 있으며, 연구결과에 따르면 연약대에 근접(0.5D~1D)해야 이상 변위가 인지된다. 일반적으로 10 m 이상의 계측간격과 불규칙한 계측주기, 계측오차 등을 고려한다면 변위 분석을 통한 실제 현장에서의 전방 단층대 예측은 다소 어려운 것으로 판단되며, 시공현장에서 활용될 수 있는 현실적인 기술이 되기 위해서는 현재 보다는 더 높은 수준의 계측기술과 계측환경이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 일상적으로 수행되는 RMR 평가 결과를 활용하여 굴착면 전방의 단층대를 예측할 수 있는 새로운 방안을 제시하고, 그 활용 가능성을 평가하였다. RMR 정보는 매 굴착면마다 획득되기 때문에 계측에 의한 변위정보 보다는 더 연속적인 데이터로 평가할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여 단층대로 접근하면서 나타나는 연속적인 RMR 정보의 이상변화를 감지하여 단층대의 존재를 사전에 예측하기 위하여, RMR 인자별 배점 변화를 통계적인 의미를 가지는 연속형 데이터로 간주하여 분석하였다. 데이터 분석을 위해서는 통계적 품질관리를 위해 사용되는 관리도 기법을 활용하였다.

관리도는 제조 공정에서 품질관리를 위한 중요한 도구로 이용되고 있다. 관리도는 Page(1954)에 의해 제안된 누적합(CUSUM) 관리도, Lucas and Saccucci(1990)가 집대성한 지수이동평균(EWMA) 관리도 등 사용 목적과 데이터 형태 등에 따라서 다양한 종류가 개발되어 사용되고 있다. 이러한 관리도는 시간에 따른 특정 결과의 변화과정을 통계적으로 관리하고, 또한 변화과정의 모수들을 추정하여 그 추이를 분석하는 데 효과적인 이론이다.

최근 관리도 이론은 산업 전반에 걸쳐 다양하게 활용되고 있다. 특히 지반공학 분야에서는 임성빈 등(2007)에 의해 터널 계측변위의 이동범위(MR) 관리도 분석을 통한 변위 수렴 판별 기법이 발표되었다. 또한 임성빈과 서용석(2009)은 터널 변위 분석 및 안정성 평가를 위한

누적합(CUSUM) 관리도의 활용 가능성을 검토하였으며, 권오일 등(2008)은 관리도를 적용한 사면 계측 데이터 분석 시스템을 개발한 바 있다.

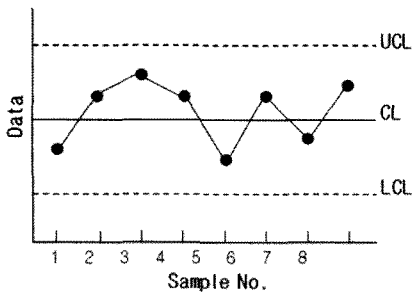
본 연구에서는 굴착이 완료된 총 116 m 연장의 대상 터널 50개소 굴착면의 RMR 평가결과 즉, 일축압축강도(R_1), 암질지수(RQD, R_2), 불연속면 간격(R_3), 불연속면 상태(R_4), 지하수 상태(R_5), 그리고 기초 RMR(RMR_b)의 배점 변화 양상으로부터 터널의 이상상태를 판단하기 위해 $x-R_s$ 관리도를 작성하였다. 시공 중 선진시추 및 face mapping 결과 확인된 3개소의 단층대와 관리도 판정에 의한 이상구간을 비교함으로써, RMR 관리도 평가에 의한 단층대 예측 가능성을 평가하였다.

2. $x-R_s$ 관리도

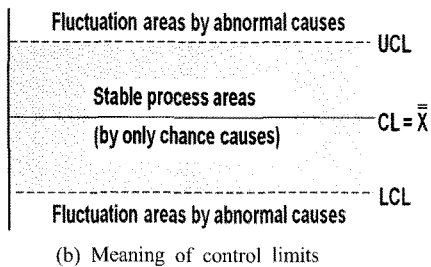
2.1 $x-R_s$ 관리도 기본 개념

관리도는 통계적 품질관리 기법의 일종으로 공정이 안정된 상태에 있는가를 조사하기 위해, 또는 공정을 안정한 상태로 유지하기 위한 기법이며, 공정의 상태를 나타내는 품질특성치를 이용하여 품질변동에 영향을 끼치는 원인을 신속히 판별하여 이상원인에 일련의 조치를 취함으로써 공정을 관리상태로 유지시킬 수 있는 통계적 방법이다. 즉, 관리도는 우연원인으로 인한 산포와 이상원인으로 인한 산포를 구분할 수 있도록 상하에 합리적인 판단을 내릴 수 있는 통계적 관리한계선(관리상한선, 관리하한선)을 결정한 다음 공정의 상태를 나타내는 품질 특성치(측정치, 데이터)를 타점하여 공정 중 이상원인이나 우연원인을 신속히 발견할 수 있는 기법이다. 관리도는 Fig. 1(a)에서와 같이 측정값, 중심선, 관리한계선 등으로 구성되며, 이 중 관리한계선은 측정값의 이상 유무를 판정하는 기준이 된다(Fig. 1(b)). 관리도는 데이터의 유형, 관리 유형, 적용 유형 등에 따라 여러 가지 방법으로 분류될 수 있으며, 사용 목적에 따라 올바르게 선택되어야 한다.

본 연구에 적용된 $x-R_s$ 관리도는 모집단 분포가 정규분포(normal distribution)인 품질특성을 대상으로 부분군(subgroup)의 크기가 1일 때, x 관리도는 품질특성 평균 또는 위치, R_s 관리도는 품질특성 산포(dispersion) 또는 변동을 관리하기 위해 고안된 품질도구의 일종이



(a) Basic composition of control chart



(b) Meaning of control limits

Fig. 1. Basic concepts of statistical control chart (임성빈과 서용석, 2009)

다(Breyfogle, 2003). 즉, x 관리도는 관측값을 관리할 목적으로 개개의 측정값을 하나의 점으로 기입하는 관리도이며, R_s 관리도는 인접한 관측값의 차를 타점하는 관리도이다. $x-R_s$ 관리도는 측정 시점별 1회 1개 측정값만 수집될 수밖에 없는 상황에서 활용가능하며, 측정 시점으로부터 분석 및 조치 시점까지 소요되는 시간 지연이 짧은 장점이 있다.

2.2 $x-R_s$ 관리도의 관리한계선 설정

관리한계는 공정의 현실을 감안한 기준으로 우연 변동의 범위를 의미하며, 이상원인 발생 유무를 판단하는 기준이 된다. Fig. 1에서와 같이 공정이 정상상태에 있을 때의 품질 특성의 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 σ 는 표준편차이며, 3σ 관리한계선은 Schewhart가 제안한 것으로 일반적으로 널리 쓰이고 있다.

일반적인 공정에서의 품질관리와는 달리 터널에서의 RMR 이상변화를 판정하기 위한 관리 기준설정은 매우 어려운 문제이다. 3σ 보다 높은 수준의 기준을 적용한다면 실제 단층대를 이상구간으로 인지하지 못할 수도 있으며, 낮은 수준의 관리한계선을 적용한다면 너무 많은 이상구간을 인지하여 혼란을 야기할 수도 있다. 따라서 가장 효과적으로 단층대의 영향에 의한 이상구간을 인지하기 위한 최적 관리한계선 설정은 매우 중요하다. 본 연구에서는 RMR 관리도를 이용하여 이상구간을 인지할 수 있는지를 평가하는 것이 주요한 목적이기 때문에 가장 일반적으로 사용하는 3σ 관리한계선을 적용하였다.

x 관리도의 관리한계선은 개개의 측정값의 관리도라는 특성상 측정값의 범위를 계산할 수 없다. 따라서 인접한 두 측정치 사이의 차인 이동범위(moving range, R_s)를 사용한다. 범위를 구하는데 사용된 데이터의 수가 2개임을 감안한 x 관리도의 중심선과 관리한계선은 식 (1)과 같다(임성빈 등, 2007).

$$CL = \bar{x} \quad (1)$$

$$UCL = \bar{x} + 3 \left(\frac{\overline{R_s}}{d_2} \right) = \bar{x} + \frac{3 \overline{R_s}}{1.128} = \bar{x} + 2.66 \overline{R_s}$$

$$LCL = \bar{x} - 3 \left(\frac{\overline{R_s}}{d_2} \right) = \bar{x} - \frac{3 \overline{R_s}}{1.128} = \bar{x} - 2.66 \overline{R_s}$$

여기서, CL 은 중심선, UCL 은 관리 상한선, LCL 은 관리하한선, \bar{x} 는 측정값의 평균, $\overline{R_s}$ 는 이동범위의 평균이며, d_2 는 두 개의 데이터를 대상으로 이동범위를 구하는 경우의 x 관리도용 계수이다.

R_s 관리도도 x 관리도와 마찬가지로 2개의 인접한 데이터를 이용하여 이동범위를 구하므로, 중심선과 관리한계선은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다(임성빈 등, 2007).

$$CL = \overline{R_s}$$

$$UCL = D_4 \overline{R_s} = 3.27 \overline{R_s} \quad (2)$$

$$LCL = \text{생각하지 않음}$$

여기서, CL 은 중심선, UCL 은 관리 상한선, LCL 은

관리하한선, \bar{R}_s 는 이동범위의 평균이며, D_4 는 두 개의 데이터를 대상으로 이동범위를 구하는 경우의 R_s 관리도용 계수이다. 본 논문에서는 R_s 관리도 상에서 측정값의 범위가 허용범위를 초과하는 변화를 탐지하는 것이 목적이기 때문에 관리 하한선은 생각하지 않게 되며, 만약 관리 하한선을 설정하더라도 그 값은 0이 된다.

2.3 $x-R_s$ 관리도 작성 방법

$x-R_s$ 관리도 작성을 위해서는 가장 먼저 데이터를 수집한다. 그리고 관측값을 선정하여, \bar{x} , R_s , \bar{R}_s 를 식 (3), 식 (4), 식 (5)에 의해 각각 계산한다.

$$\bar{x} = \frac{\sum s_i}{k} \quad (3)$$

$$R_{si} = |i \text{ 번째 측정치} - (i + 1) \text{ 번째 측정치}| \quad (4)$$

$$\bar{R}_s = \frac{R_{s1} + R_{s2} + \dots + R_{s,k-1}}{k-1} \quad (5)$$

여기서, \bar{x} 는 측정값의 평균, $\sum s_i$ 는 i 군에서의 측정값들의 합, k 는 측정값의 개수, R_{si} 는 i 번째 군의 측정치와 $i+1$ 번째 군의 측정치의 차이이다. 계산된 \bar{x} , R_s , \bar{R}_s 를 식 (1) 및 식 (2)에 대입하여 관리한계선을 계산하고, 관리도상에 관리한계선과 점을 기입하여 이상상태를 판정한다.

3. 현장 암반 평가

3.1 연구지역 개요

연구 대상 지역은 충북 청원군에 위치한 고속도로 ○공구 ○○ 터널 시공현장이다. 터널을 구성하는 기반암은 시대미상의 옥천계에 속하는 운교리층에 해당된다 (Fig. 2). 주로 사질암과 이질암의 교호층이 변성작용을 받은 암회색 내지 갈색 계통의 천매암이 우세하다. 구성 광물은 주로 석영, 녹니석, 견운모, 흑운모 등이며, 흑운모와 녹니석은 엽리방향으로 신장되어 나타난다. 전체적으로 70° 이상의 고각의 엽리가 발달해 있으며, 이들

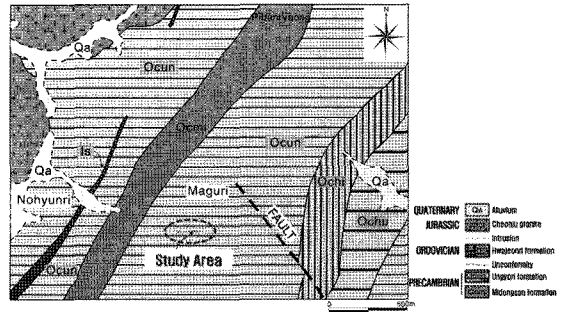


Fig. 2. Geologic map of the study area

은 터널 굴진방향의 반대방향으로의 배향을 가진다.

3.2 대상 터널 암반 평가

3.2.1 선진수평시추

설계단계에서 실시되는 지표지질조사 및 물리탐사 등에 의한 정보만으로는 터널 노선을 따른 전체의 지질 변화를 파악하기는 힘들다. 노선을 따른 지질 변화 양상을 굴착 이전에 확인하기 위하여 총 102.4 m 구간에 대해 선진수평시추를 실시하였다. 시추 시점과 종점은 각각 Sta. 0k + 116.1과 Sta. 0k + 103.7에 해당된다.

시추를 통해 획득된 코어 관찰 결과를 요약한 터널 노선을 따른 단면도는 Fig. 3과 같다. 크게 3개의 단층구간이 확인된다. 시추심도 7.8 m ~ 13.1 m 구간 (Sta. 0k + 108.3 ~ Sta. 0k + 103.0)은 폭 5.3 m의 단층대이며, 단층 점토 및 3 cm 이하의 암편들로 구성된다. 시추심도 45.6 m ~ 51.3 m 구간 (Sta. 0k + 70.5 ~ Sta. 0k + 64.8)은 단층 및 파쇄구간으로 구분할 수 있으며, 이 중 47.5 m ~ 49.2 m 구간 (Sta. 0k + 68.6 ~ Sta. 0k + 66.9)이 폭 1.7 m의 단층대에 해당된다. 시추심도 73.1 m ~ 79.4 m 구간 (Sta. 0k + 43.0 ~ Sta. 0k + 36.7)은 산발적인 파쇄대 및 소규모 단층들이 밀집해 있는 단층구간으로 분류할 수 있다.

3.2.2 굴착 중 굴착면 평가

터널 굴착 시 매 굴착면에 대한 face mapping과 RMR 평가를 수행하였으며, 선진시추결과와 마찬가지로 3구간의 단층대가 확인된다. 각 단층대의 분포 양상 및 특징을 살펴보면, 5번째 굴착면 (Sta. 0k + 107.9)에서 7번

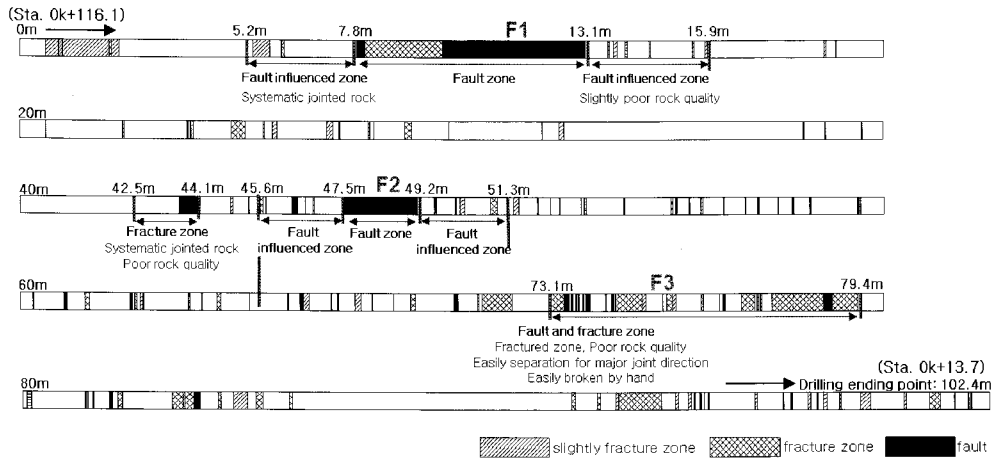


Fig. 3. Horizontal pre-drilling log

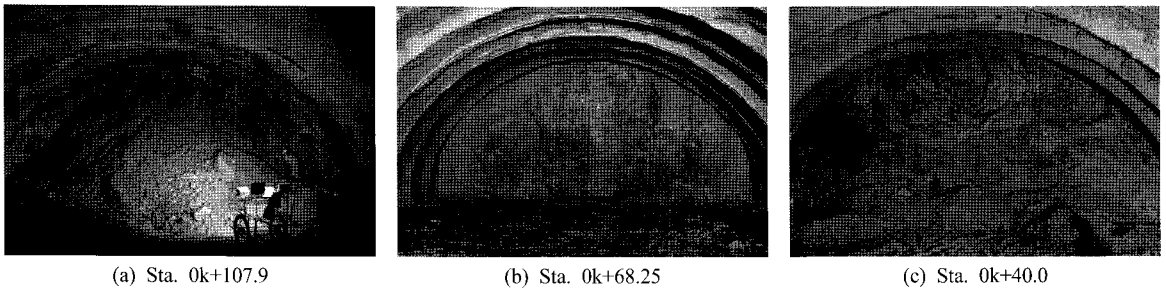


Fig. 4. Faces including fault zone

째 굴착면(Sta. 0k + 103.7)에 걸쳐 분포하는 단층대는 298/79의 방향으로 발달해 있으며, 25번째 굴착면(Sta. 0k + 68.25)에서 26번째 굴착면(Sta. 0k + 66.7)까지 305/80 방향을 가진 폭 2 m의 단층대가 나타난다. 그리고 37번째 굴착면(Sta. 0k + 40.6)에서 38번째 굴착면(Sta. 0k + 38.1) 구간에는 소규모 단층과 파쇄대가 밀집하여 나타난다. 굴착면 관찰에 의해 확인된 단층대 산출 구간은 선진수평시추 결과와 대체로 일치한다.

Fig. 4(a)는 첫 번째 단층이 출현한 5번째 굴착면(Sta. 0k + 107.9)의 사진이며, 단층 점토와 암편이 혼재되어 나타난다. 굴착면 붕괴가 우려돼 버력을 치우지 않은 상태로 공사를 진행하였으며, 천단에서는 굴착 이후에도 점토 및 암편이 떨어지고 있는 상태이다. Fig. 4(b)는 두 번째 단층이 나타나는 25번째 굴착면(0k + 68.25)의 사진이다. 단층이 발달하여 암질이 매우 불량하게 나타

나고 있으며, 굴착면 우측이 특히 심하게 파쇄된 상태이다. 그리고 점토가 두껍게 피복되어 있으며, 심한 풍화양상을 보인다. Fig. 4(c)는 37번째 굴착면(0k + 40.0)으로 3번째 단층이 출현한 굴착면이다. 굴착면 전체의 암질이 불량하며, 좌·우측 모두 심한 파쇄양상을 보인다. 우측부는 점토 및 모래로 구성되어 손으로 쉽게 부서지며, 천단부에서 점토 및 소규모 암편이 계속 떨어지는 상태이다. 특히 좌측부는 엽리면을 따라 암석이 쉽게 분리되는 양상을 보인다.

4. RMR 변수의 $x-R_s$ 관리도 작성 및 판정

4.1 RMR 데이터의 정규성 검정

각 굴착면의 RMR 데이터는 Table 1과 같으며, 기본적인 분포 특성을 검토하기 위하여 Fig. 5와 같이 히스

토그램을 작성하였다. 각 데이터의 평균과 표준편차는 x 관리도 및 R_s 관리도의 관리한계선 설정에 이용하였다. 히스토그램을 확인하기 어려운 RMR 데이터의 정규성 검정을 위해 항목별 정규분포 확률도를 작성하여 검토하였다(Fig. 6). 정규성이 높은 데이터일수록 $x-R_s$

관리도의 적용을 위해서는 이상적이다. 상대적으로 R_3 와 R_5 의 측정값이 일정한 구간에 집중되어 비정규성이 심한 것으로 보이며, RMR_b 의 정규성이 완벽하게 만족하지는 못하지만 상대적으로 비정규성의 정도가 완화된 것으로 판단된다.

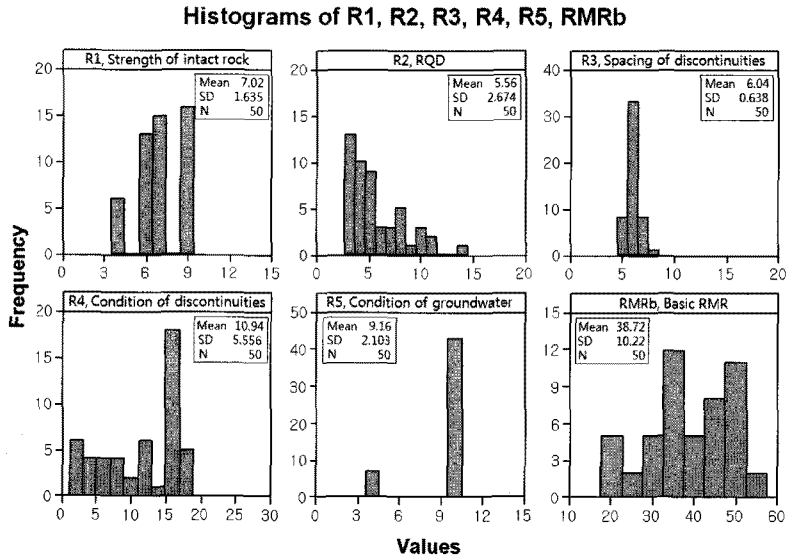


Fig. 5. Histograms for RMR parameters and basic RMR

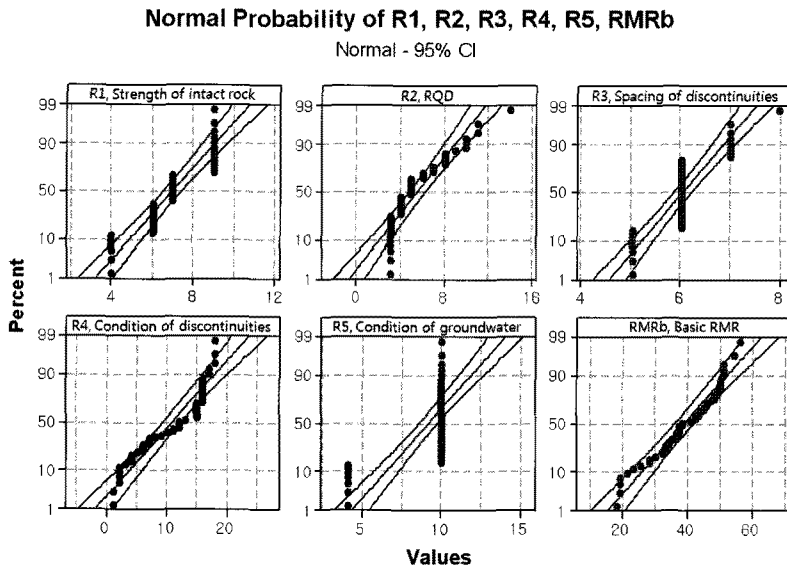


Fig. 6. Normal probability distributions for RMR parameters and basic RMR

Table 1. Results of RMR assessment on faces

Face No.	Station	R ₁	R ₂	R ₃	R4						R5	RMRb	Rock mass class
					Sum.	Pers.	Apet.	Rough.	Infill.	Weath.			
1	115.9	9	3	5	15	0	5	1	4	5	10	42	III
2	114.3	9	3	5	17	0	5	3	4	5	10	44	III
3	112.2	9	11	8	16	1	5	1	4	5	10	54	III
4	110.1	6	3	5	13	1	5	0	4	3	10	37	IV
5	107.9	4	3	5	2	1	0	1	0	0	4	18	V
6	105.95	4	7	5	1	0	0	1	0	0	4	21	IV
7	103.7	4	4	7	4	0	0	1	2	1	4	23	IV
8	101.4	9	4	6	12	1	1	1	4	5	10	41	III
9	99.8	9	11	6	15	1	4	1	4	5	10	51	III
10	97.5	9	8	7	16	1	5	1	4	5	10	50	III
11	94.9	7	5	6	17	1	4	3	4	5	10	45	III
12	92.75	7	4	6	16	1	5	1	4	5	10	43	III
13	90.55	6	3	6	12	0	4	1	4	3	10	37	IV
14	88.55	9	6	6	15	1	4	3	4	3	10	46	III
15	86.6	9	10	6	16	1	5	1	4	5	10	51	III
16	84	9	5	7	18	1	5	3	4	5	10	49	III
17	81.85	7	9	7	18	1	5	3	4	5	10	51	III
18	80.2	7	10	7	16	1	5	1	4	5	10	50	III
19	78.85	9	7	6	18	1	5	3	4	5	10	50	III
20	77.25	7	8	6	16	1	5	1	4	5	10	47	III
21	75.2	9	8	6	16	1	5	1	4	5	10	49	III
22	73.25	7	5	6	6	1	1	1	2	1	10	34	IV
23	71.25	7	4	6	9	1	1	0	4	3	10	36	IV
24	69.8	7	5	6	6	0	1	0	4	1	10	34	IV
25	68.25	6	4	7	1	0	0	1	0	0	10	28	IV
26	66.7	6	4	6	2	1	0	0	0	1	10	28	IV
27	64.6	6	3	6	7	0	1	1	2	3	10	32	IV
28	61.75	6	5	6	15	1	4	1	4	5	10	42	III
29	58.9	6	5	6	8	1	0	0	2	5	10	35	IV
30	56.3	6	5	6	6	0	0	1	2	3	10	33	IV
31	54.5	6	8	5	7	1	0	1	2	3	10	36	IV
32	52.6	6	4	6	10	0	1	0	4	5	10	36	IV
33	50.1	7	4	6	11	0	1	1	4	5	10	38	IV
34	48.45	7	3	6	12	1	1	1	4	5	10	38	IV
35	46.6	7	3	6	5	0	0	0	2	3	4	25	IV
36	43.6	4	3	6	2	0	0	1	0	1	4	19	V
37	40.6	4	3	6	2	0	0	1	0	1	4	19	V
38	38.1	4	3	5	3	1	0	1	0	1	4	19	V
39	36.35	6	6	6	4	0	0	1	2	1	10	32	IV
40	34.75	6	4	6	7	1	0	3	2	1	10	33	IV
41	32.5	6	4	6	4	0	0	1	2	1	10	30	IV
42	30.5	7	5	6	15	1	4	3	4	3	10	43	III
43	28.8	7	10	7	16	1	5	1	4	5	10	50	III
44	26.45	9	14	7	16	1	5	1	4	5	10	56	III
45	23.95	9	6	6	15	1	4	1	4	5	10	46	III
46	22.2	7	3	5	12	1	1	1	4	5	10	37	IV
47	20.85	9	8	6	15	1	5	0	4	5	10	48	III
48	19.2	9	7	6	16	1	5	1	4	5	10	48	III
49	17.3	9	5	6	15	0	5	1	4	5	10	45	III
50	15.15	7	3	6	11	0	4	0	4	3	10	37	IV

*Pers.: Persistence, Apet.: Aperture, Rough: Roughness, Infill.: In-filling, Weath.: Weathering

또한 정규성을 정량적으로 평가하기 위하여 정규분포 적합도 검정(goodness-of-fit tests)을 수행하였다(D'Agostino & Stephens, 1986; Shapiro & Francia, 1972). 정규성에 대해 경험적 누적분포함수를 기초로 하는 Anderson-Darling test와 Kolmogorov-Smirnov test(Lilliefors, 1967), 상관계수를 기초로 하는 Ryan-Joiner test(Filliben, 1975; Ryan & Joiner, 1976)의 수행 결과는 Table 2와 같다. Anderson-Darling test에 의하면 R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 (p -value<0.05), Ryan-Joiner test에 의하면 R_2 , R_4 (p -value<0.05), Kolmogorov-Smirnov test에 의하면 R_2 (p -value=0.013)와 R_4 (p -value<0.010)가 '데이터가 정규분포를 따른다'는 귀무가설의 기각 가능성이 높다. 따라서 분석대상 데이터의 정규성이 확보되지 않은 상태를 감안할 때 $x - R_s$ 관리도의 실제 성능 측면에서 이론적으로 다소 축소될 가능성이 있다. 이는 정규분포 대상을 기준으로 하는 경우 3σ 관리한계선 하에서는 99.73% 범위를 초과하는 데이터를 이상치로 인지하지만, 비정규성을 보이는 RMR 데이터에서는 그 기준이 달라질 수도 있음을 의미한다.

4.2 RMR 데이터의 관리도 작성 및 평가

대상터널의 50개소 굴착면에서 측정된 각 RMR 변수의 배점(Table 1), 즉 일축압축강도(R_1), 암질지수(RQD, R_2), 불연속면 간격(R_3), 불연속면 상태(R_4), 지하수 상태(R_5)와 기초 RMR(RMR_b)의 배점 변화 양상으로부터 터널의 이상상태를 판정하기 위하여 $x - R_s$ 관리도를 작성하였다. 3σ 관리한계선을 반영한 RMR 변수 및 기초 RMR(RMR_b)의 $x - R_s$ 관리도는 Fig. 7과 같다.

관리도의 판정은 설정한 관리 기준치를 초과하는 이상점을 확인함으로써 이루어진다. 본 연구에서는 RMR 변수 및 기초 RMR(RMR_b)에 대한 $x - R_s$ 관리도의 3σ 관리한계선에 의해 이상구간을 판정하였다. x 관리도와 R_s 관리도를 구분하여 이상구간에 포함되는 최초 관측값의 데이터 번호(굴착면 번호)를 Table 3에 정리하여 나타내었다.

대상 터널의 선진 수행시추 결과 확인된 단층대 분포 구간은 총 3개소이며, 각각 단층대 F I(Sta. 108.3 ~ Sta. 103.0), 단층대 F II(Sta. 68.6 ~ 66.9), 연약구간 F III(Sta. 43.0 ~ Sta. 36.7)로 구분된다. Face mapping 결

Table 2. Results of normality goodness-of-fit test

Normality test	Statics value	RMR Parameters					RMRb
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	
Anderson-Darling test	Observed test statistic	2.681	2.448	5.811	2.259	15.048	0.709
	p-value	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	0.060
Ryan-Joiner test	Observed test statistic	0.995	0.966	0.998	0.957	1.000	0.981
	p-value	>0.100	<0.010	>0.100	<0.010	>0.100	>0.100
Kolmogorov-Smirnov test	Observed test statistic	0.057	0.148	0.044	0.158	0.095	0.080
	p-value	>0.150	0.013	>0.150	<0.010	>0.150	>0.150

Table 3. Results of $x - R_s$ control charts based on the control limit of 3σ for prediction of fault zone ahead tunnel face

Fault zone	F I: Data No. 5~7 (Sta. 108.3~103.0 m)						F II: Data No. 25~26 (Sta. 68.6~66.9 m)						F III: Data No. 37~38 (Sta. 43.0~36.7 m)					
	R ₁			R ₂			R ₃			R ₄			R ₅			RMR _b		
	F I	F II	F III	F I	F II	F III	F I	F II	F III	F I	F II	F III	F I	F II	F III	F I	F II	F III
x	5		36							5	25	36	5		35	5		36
MR	4		36	4			4			5	22		5		35	5		

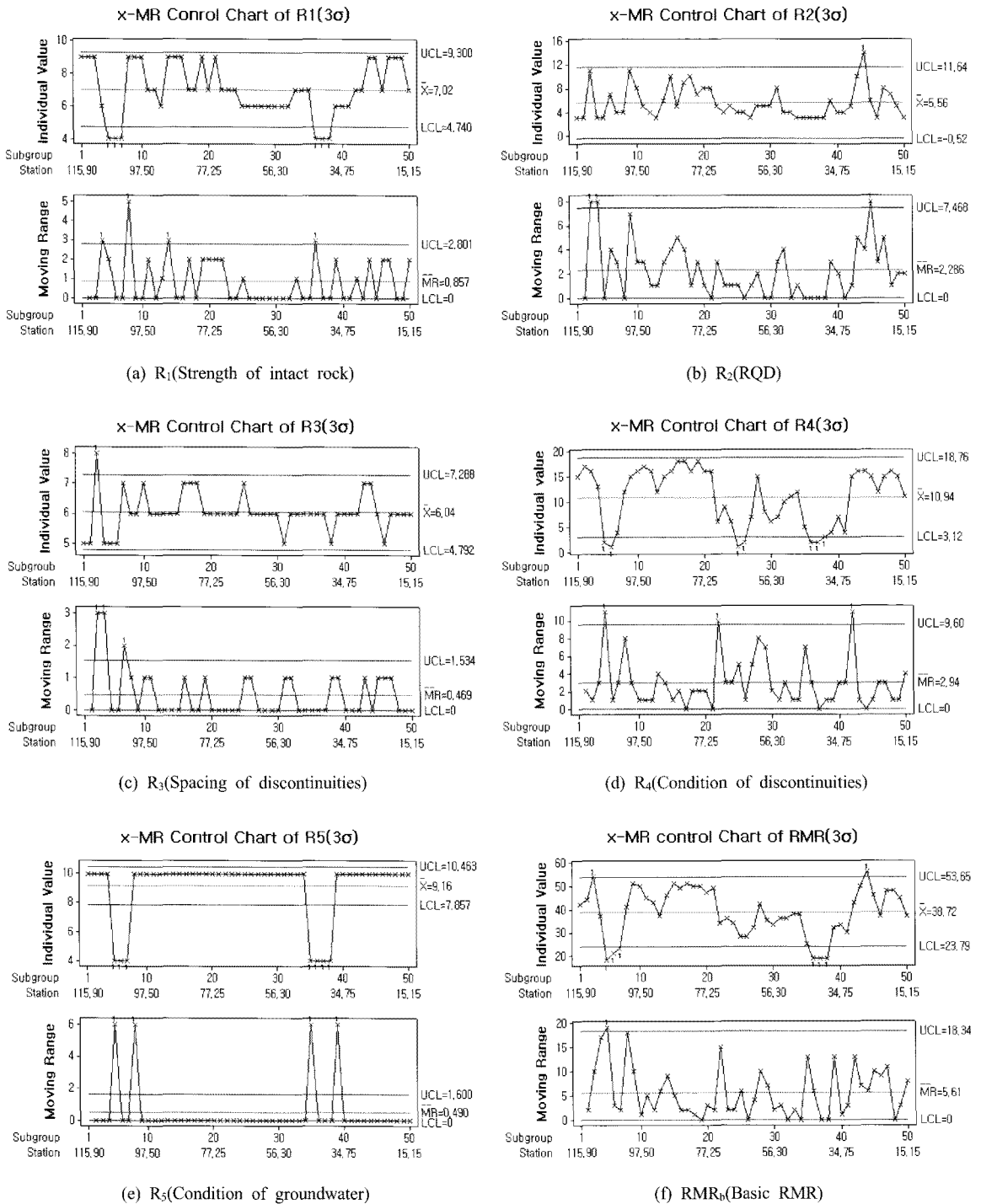


Fig. 7. $x - R_s$ control charts for RMR parameters and basic RMR

과에 의하면 단층대 F I은 5, 6, 7번째 관측값이 측정된 굴착면에서 확인되며, 단층대 F II는 25, 26번째 관측값이 측정된 굴착면에 해당된다. 그리고 37, 38번째 굴착면에는 파쇄 및 소규모 단층이 발달한 단층대 F III가 나타난다.

Table 3과 같이 일축압축강도(R_1), 불연속면 상태(R_4), 지하수 상태(R_5) 그리고 기초 RMR(RMR_b)의 x 관리도 판정에 의하면 단층대 F I은 실제 단층대 출현과 동일한 지점인 5번째 데이터에서 이상구간이 판정되었으며, 단층대 F II는 불연속면 상태(R_4)의 x 관리도에 의해 단층대 출현 굴착면에 해당되는 25번째 데이터에서 관리한 계선을 벗어난 것으로 확인되었다. 그리고 불연속면 상태(R_4), 지하수 상태(R_5), 기초 RMR(RMR_b)의 x 관리도 판정 결과, 단층대 F III는 각각 36번째, 35번째, 36번째 데이터에서 이상구간이 인지되었으며, 이는 실제로 단층대가 출현한 37번째 굴착면 보다 각각 1굴착면, 2굴착면, 1굴착면 빠른 시점이다.

R_s 관리도의 경우 x 관리도 보다 더 많은 지점에서 이상 구간이 확인되었다. 일축압축강도(R_1)의 R_s 관리도 판정을 통해서 단층대 F I과 단층대 F III가 각각 4번째 및 36번째 데이터에서 확인되었으며, 암질지수 (RQD, R_2)와 불연속면 간격(R_3)의 R_s 관리도는 단층대 F I을 4번째 데이터에서 인지하였다. 불연속면 상태(R_4)의 R_s 관리도 분석을 통해서 단층대 F I과 단층대 F II를 각각 5번째와 22번째 데이터에서 최초로 확인하였으며, 지하수 상태(R_5)의 R_s 관리도를 통해 단층대 F I과 단층대 F III를 5번째 및 35번째 굴착면에서 예측할 수 있었다. 기초 RMR(RMR_b)의 R_s 관리도 판정 결과는 단층대 F I을 실제 출현 굴착면인 5번째에서 인지하였다. 결과적으로 R_s 관리도 판정을 통해서 단층대 F I, F II, F III 각각 최대 1굴착면, 3굴착면, 2굴착면 이전에 예측 가능한 것으로 확인되었다.

상기 RMR 변수 및 기초 RMR(RMR_b)의 $x-R_s$ 관리도 평가 결과를 요약하면, 단층대 F I은 일축압축강도 (R_1), 암질지수(RQD, R_2), 불연속면 간격(R_3)의 R_s 관리도에서 가장 빨리 인지되며, 인지 시점은 실제 단층대 F I이 출현하는 5번째 굴착면보다 1굴착면 빠른 시점이다. 단층대 F II는 불연속면 상태(R_4)의 R_s 관리도 판정을 통해 최초 출현 굴착면보다 3굴착면 이전인 22번째

굴착면 평가에서 미리 예측되었다. 단층대 F III는 지하수 상태(R_5)의 x 관리도와 R_s 관리도에서 실제 출현 시점보다 2굴착면 빨리 인지되었다. 따라서 RMR 변수의 $x-R_s$ 관리도 판정을 통해 단층대 F I, F II, F III의 예측 및 출현 굴착면간 거리로는 2.2 m, 5.0 m, 6.0 m, 이상 구간 인지 굴착면과 정확한 단층대 출현 시점간 거리로는 1.8 m, 4.65 m, 3.6 m 이전에 미리 예측 가능한 것으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 계측정보에 비해 연속적인 데이터를 획득할 수 있는 RMR 정보를 활용한 단층대 예측 기법을 제시하였다. 굴착이 완료된 터널을 대상으로 단층대로 근접하면서 나타나는 RMR 인자와 기초 RMR(RMR_b)의 이상변화를 감지하기 위하여 각 인자의 배점 변화를 연속형 데이터로 간주하여 $x-R_s$ 관리도를 작성하였으며, 통계학적 기준에 의해 이상구간을 평가하였다. 굴착면에서 측정된 각 RMR 변수 및 기초 RMR(RMR_b)의 $x-R_s$ 관리도 평가에 의한 이상구간을 시공 중 선진수평시추와 face mapping 결과 확인된 3개소의 단층대 출현 시점과 비교함으로써, RMR의 $x-R_s$ 관리도 판정을 통한 단층대 예측 가능성을 검토하였다. 연구 내용 및 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 대상 터널의 노선을 따른 지질변화 양상을 파악하기 위하여 총 102.4 m 구간에 대해 선진수평시추를 실시하였다. 시추코어의 관찰 결과 3구간의 단층대가 확인되었으며, 각각의 폭은 5.3 m, 1.7 m, 6.3 m이다.
2. 터널 굴착 시 매 굴착면에 대한 face mapping 및 RMR 평가를 수행하였다. 선진수평시추 결과와 마찬가지로 3구간의 단층대가 확인되었다. RMR 평가 결과 터널 노선을 따른 암반은 주로 III ~ V등급으로 대체로 불량한 상태로 판정되었다.
3. 굴착 중 획득된 RMR 변수, 즉 일축압축강도(R_1), 암질지수(RQD, R_2), 불연속면 간격(R_3), 불연속면 상태(R_4), 지하수 상태(R_5) 그리고 기초 RMR(RMR_b) 데이터에 대한 $x-R_s$ 관리도를 작성하였다. 각각의 관리도는 일반적으로 사용되는 3σ 관리기준에 근거

- 하여 이상변화를 평가하였으며, 이러한 이상변화 구간을 단층구간으로 판정하였다.
4. 관리도 평가 결과 단층대 F I, F II, F III는 실제 출현 굴착면보다 각각 1굴착면, 3굴착면, 2굴착면 이전에 미리 인지되었으며, 이를 거리로 환산하면 2.2 m, 5.0 m, 6.0 m에 해당된다.
 5. 상기 연구 결과, RMR 변수 및 기초 RMR(RMR_b)의 관리도 평가는 굴진중 굴착면 전방의 단층대를 예측하기 위한 유용한 방안이 될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 예측의 민감도를 높이기 위해 더 낮은 수준의 관리한계선 설정에 대한 검토가 필요하며, 본 연구에서 적용한 $x-R_s$ 관리도 이외의 다른 여러 형태의 관리도를 적용하여 단층대 예측을 위한 최적 관리도 형태 정립을 위한 연구가 수행되어야 할 것이다.
 6. 특히 시공 중 본 기법의 적용을 위해서는 예비조사 결과를 이용한 관리한계선 설정 방안 및 현 시점까지의 RMR 데이터를 이용한 관리한계선을 갱신 방안 등에 대한 검토를 수행하여 현실적인 기술로 발전시킬 필요가 있다.

참고문헌

1. 권오일, 백용, 서용석 (2008), “통계관리도 이론을 적용한 사면 계측데이터 분석시스템 개발”, 대한지질공학회 학술발표회, pp. 137-143.
2. 김광영, 김창용, 이정인 (2007), “계측단면중심 벡터를 이용한 터널 막장전방 단층대 예측”, 한국지반공학회지, 제23권, 제6호, pp. 6-12.
3. 김창용, 홍성완, 김광영, 백승한 (2004), “터널 내공 변위 거동 분석에 관한 연구”, 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제6권, 제3호, pp. 183-197.
4. 이찬우 (1997), “막장전방 근거리 지반특성 예측을 위한 신계측 평가기술”, 대한토목학회지, 제45권, pp. 46-52.
5. 임성빈, 김성권, 서용석, 박시현 (2007), “관리도 기법을 이용한 터널 변위수렴 특성에 관한 연구”, 대한지질공학회지, 제17권, pp. 197-204.
6. 임성빈, 서용석 (2009), “관리도를 이용한 터널 시공현장 계측변위 분석 기법 개발”, 대한지질공학회지, 제19권, 제3호, pp. 261-268.
7. Breyfogle, F. W. III (2003), Implementing Six Sigma, New Jersey, John Wiley & Sons.
8. D'Agostino, R. B. and Stephens, M. A. (1986), Goodness-of-Fit Techniques, Marcel Dekker.
9. Filliben, J. J. (1975), “The probability plot correlation coefficient test for normality”, Technometrics, Vol. 17, 111p.
10. Lilliefore, H. W. (1967), “On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown”, Journal of the American Statistical Association, Vol. 62, pp. 399-402.
11. Lucas, J. M. and Saccucci, M. S. (1990), “Exponentially weighted moving average control schemes: Properties and Enhancements”, Technometrics, Vol. 32, pp. 1-12.
12. Page, E. S. (1954), “Continuous inspection schemes”, Biometrika, Vol. 41, pp. 100-114.
13. Ryan, Jr. T. A. and Joiner, B. L. (1976), Normal probability plots and tests for normality, Technical Report, Statistics Department, The Pennsylvania State University. (Available from Minitab Inc.)
14. Schubert, W. and Steindorfer, A. (1996), “Selective displacement monitoring tunnel excavation”, Felsbau, Vol. 14, pp. 93-97.
15. Schubert, W. and Vavrovsky, G.M. (1994), “Interpretation of monitoring result”, World Tunnelling, pp. 351-356.
16. Shapiro, S. S. and Francia, R. S. (1972), “An approximate analysis of variance test for normality”, Journal of the American Statistical Association, Vol. 67, pp. 215-216.

접수일(2010.11.11), 수정일(2010.11.19), 게재확정일(2010.11.26)