EPB Shield TBM 기계데이터와 지반상태의 상관관계 분석

정선민¹ · 이강현² · 박정준³ · 이인모^{4*}

¹비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사

²정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 연구교수

³비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수로

⁴정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Correlation between the EPB shield TBM machine data and the ground condition

Sun-Min Jung¹, Kang-Hyun Lee², Jeong-Jun Park³, In-Mo Lee^{4*}

¹Master, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Anam-dong 5-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-713

²Research Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Anam-dong 5-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-713

³Ph. D Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Anam-dong 5-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-713

⁴Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Anam-dong 5-ga, Seongbuk-gu, Seoul 136-713

ABSTRACT: This research covers correlation analysis between the machine data measured from EPB Shield TBM construction site and the ground condition during excavation, and figures out how the machine data are affected by the change of ground conditions through single and mixed parameter analysis. It was found that when the ground is changed from hard rock to soft rock, the ratio of the cutter torque to thrust force increases. The relationship between the ratio of the cutter torque to thrust force and the penetration rate shows that the ratio has a certain range of values for hard rock; on the other hand, it increases for soft rock. It means that we can recognize a sign of appearance of weak zone by assessing the ratio of the cutter torque to thrust force according to each penetration rate. Multiple regression analysis of the machine data showed that the cutter torque increases with the increases of the total thrust force, and it decreases with the increase of the uniaxial compressive strength of the ground.

Keywords: EPB Shield TBM, Ground condition, Machine data analysis, Multiple regression analysis

초 록: 본 연구에서는 EPB 쉴드 TBM 시공현장에서 얻은 기계데이터와 굴진당시의 지반상태와의 상관관계를 분석하여, 지반상태의 변화에 따른 기계데이터의 변화를 단일 및 복합변수분석을 통하여 규명하였다. 그 결과 경암지반에서 연암지반으로 지반이 변화할 때, 총추력과 커터토크의 비가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 총추력대비 커터토크의 비율(커터토크/총추력)을 굴착속도와 쌍대비교 하면 경암지반에서의 데이터는 일정한 범위 내에 있음을 확인 할 수 있으며, 연암지반에서는 경암지반일 때와 비교하면 추력대비 커터토크의 비율이 높은 값을 가진다. 이러한 결과를 바탕으로 총추력대비 커터토크의 비율과 굴착속도의 비교를 통해서 연약대 출현의 징후를 감지할 수 있다. 이와 같은 분석결과는 목적변수 커터토크가 설명변수 총추력이 증가할수록, 또 다른 설명변수 지반일축 압축강도가 감소할수록 증가한다는 중회귀분석의 결과를 통해서도 증명된다.

주요어: EPB 쉴드 TBM, 지반조건, 기계데이터 분석, 중회귀분석

***Corresponding author:** In-Mo Lee

E-mail: inmolee@korea.ac.kr

Received October 21, 2014; **Revised** October 31, 2014;

Accepted November 3, 2014

Copyright ©2014, Korean Tunnelling and Underground Space Association

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

TBM 터널의 설계단계에서는 한정된 지질조사 결과에 근거하여 신규 장비의 사양의 결정 또는 기존 장비의 적합성을 검토하는 과정을 거친다. 만약 결정된 장비의 사양이나 장비 선정 시에 적용한 지질조건에 비해 실제 시공 시의 상황이 불리하게 달라졌다면 그로 인한 굴진정지 또는 굴진속도의 저하가 발생할 수 있다. 하지만 굴진이 시작되고 나면 장비의 교체나 개조 등은 사실상 불가능하기 때문에 굴진 종료 시까지 투입된 장비로 최선의 운전을 하여야만 한다. 특히 토압식과 이수식의 쉴드 TBM은 굴진 중에 막장관찰이 어려우므로 시공중 얻을 수 있는 기계데이터의 수치들을 분석하여 지반상태의 변화를 예측하고 이를 시공에 반영하는 것이 중요하다(An et al., 2011). 본 연구에서는 토압식 쉴드 TBM을 사용한 『00발전소 관로 건설공사』에서 얻어진 기계데이터를 통해 지반 상태에 따른 데이터변화를 분석하였다.

2. TBM 기계데이터 영향변수 분석

TBM 굴진 중 기계데이터로 추력(kN), 커터토크(kN·m), 커터회전속도(RPM), 막장압(kPa), 쉴드잭 추진압력(MPa), 평균 잭스피드(mm/min), 사용잭 개수(pcs), 스크류개폐율(%), 배토량(m^3)을 포함한 수백여 가지 항목으로 구성된 데이터시트를 세그먼트 링(각 링 길이 900 mm)별로 얻을 수 있다. 해당현장의 기계데이터는 2 cm의 스트로크간격으로 이루어진 45~60개의 행과 다양한 기계데이터 256열로 이루어진 데이터시트를 세그먼트 링 하나당 두 개를 얻을 수 있었다. 500가지가 넘는 수많은 데이터를 분석하기 이전에 이 데이터들 중 주요한 변수를 추출할 필요가 있다. 먼저 불필요한 각종 스위치 ON/OFF 여부와 굴착 전 기본으로 세팅되는 항목 및 중복되는 데이터를 제외한다. 이것은 이후 단일 및 복합변수 분석(single and mixed parameter analysis)과 중회귀분석

(multiple regression analysis)을 시행할 시에 오류를 발생시키거나, 중복 분석되어 분석시간이 증가하기 때문이다.

2.1 분석대상 기계데이터 선정

일반적으로 TBM 시공현장에서 관리하는 기계데이터로는 굴진일보의 형식으로 작성 및 보관하는 것이 일반적이지만, 사실상의 기계데이터는 보다 더 방대한 정보를 담고 있다. 굴진일보로 관리되는 기계데이터로는 주로 커터 회전속도와 회전압, 쉴드잭의 굴진전·후의 스트로크차, 총추력, 쉴드잭압력, 테일 클리어런스, 피칭, 로링 등으로 현재까지 다수의 연구에서 주요 인자라고 밝혀진 항목들이다. 때때로, 이런 굴진일보의 형식으로 정리된 현장의 데이터로 현장 굴진자료 분석에 의한 연구가 진행되기도 하였다(An et al., 2011). 하지만 굴진일보상에 기록된 기계데이터는 오퍼레이터 및 작성자가 해당 세그먼트라이닝을 하나 굴착함에 있어 평균을 산정하는 과정이나 쉴드잭 선택을 변경하는 과정에서 오차가 발생할 수 있다. 이는 실제 기계에서 얻은 데이터시트와 굴진일보를 비교하는 과정에서 알 수 있었으며, 이러한 사실을 바탕으로 데이터시트를 통하여 분석하는 것이, 종합하고 집계하는 시간은 보다 더 오래 걸릴지라도 좀더 사실적인 분석이 가능함을 알 수 있다. 또한 완료된 현장의 데이터를 바탕으로 기계 본연의 특성을 파악하기 위해서는 굴진일보를 활용하기보다 실제 기계데이터 Datasheet를 활용하는 것이 정확한 결과를 도출할 수 있다. 그리하여 본 연구에서는 앞서 서술된 바와 같이 기계 기초데이터 전체를 분석하는 과정을 거쳐 주요한 변수를 추출하며, 불필요한 변수를 제외시켜 나간다. 이러한 과정을 통해 본 연구의 결과 이후에 기계데이터 분석을 실시하는 연구에서 역시 변수를 최소화 하여 분석을 실시 할 수 있을 것이다. 본 연구의 대상현장의 1,486 m구간의 토압식 쉴드 TBM 굴진데이터 전체를 활용하여 분석을 실시하였

다. 초기굴진에서부터 시작하여 도달구까지의 데이터 전체를 이용함으로써 기계적으로 직접적인 인과관계에 있는 항목을 제외시키는 것을 기본으로 실시한다.

커터헤드의 회전압은 다수의 유압모터에 의해 유압모터로 전달된 압력으로 커터헤드를 회전시킬 수 있는 원동력이 되는 항목이다. 이 압력을 기반으로 커터는 동일한 회전속도(RPM)를 유지할 수 있게 된다. 그리하여 커터에는 커터토크가 작용하게 되는 메커니즘을 가지게 된다. Fig. 1(a)에서 보이는 바와 같이, 커터 회전압과 커터토크는 단순비례의 관계를 가짐을 알 수 있다. 그리하여 앞으로 커터 회전압은 영향변수에서 제외하며, 커터토크를 주요영향 변수 대상항목으로 한다.

TBM은 총추력을 기반으로 쉴드잭으로 힘이 전달되어, 그 쉴드잭들이 직전의 세그먼트 링을 밀어줌으로써 굴진을 진행 하게 된다. 그러나 자칫 이 쉴드잭 추진압력을 주요 영향변수로 보아 영향변수 분석을 실시하는 오류를 범할 수가 있다. 하지만 하나의 링을 굴진하면서도 방향조절과 여러 가지 이유로 쉴드잭을 변경하기도 한다. 이러한 과정으로 인해 각각의 쉴드

잭 추진압력은 큰 차이를 보이는 경우도 있으며, 데이터를 기록하는 과정에서 역시 대표 값을 선택하기 힘들 수가 있다. 이러한 사실을 바탕으로 추력에 대비하여 쉴드잭 추진압력과 사용잭개수로 나타나는 기계데이터의 관계를 Fig. 1(b)에 나타내었다. 이처럼 쉴드잭 추진압력과 사용잭개수의 곱의 값은 추력과 비례하며, 쉴드잭 추진압력과 사용잭개수는 분석영향변수에서 제외하기로 한다.

토압식 TBM에서 배토량은 중요한 변수이다. 배토량이 굴진거리에 비해 많아진다면 굴진된 거리에서 계산되어진 굴착토의 양보다 많은 양이 기계로 흘러들어왔을 가능성이 있으며, 막장전방의 붕락이나 침하를 의심해야 한다. 그리고 반대로 배토량이 굴진거리에 비해 적다면 막장전방의 지반이 굴착되기 이전에 다져지고 있거나, 심한 경우에는 지반내 공동이 있을 수 있을 것이다. 이처럼 토압식 TBM에서 배토량을 확인하는 것은 상당히 중요한 시공관리 항목이다. 배토량을 조절하는 것은 챔버 내의 굴착토를 배출하는 통로인 스크류 컨베이어의 개폐율을 조정하거나 그 내부의 스크류를 얼마만큼 회전하게 할 것인지로

Fig. 1. Relationship between two machine data

조절 할 수 있다. 기계데이터에서 역시 배토량이 하나의 항목으로 구성되어 나오는 것을 확인하였으며, 이 변수가 어떠한 항목들에 영향을 받는지 확인해 보았다. 원칙적으로 토압식 TBM의 배토량은 광차나 컨베이어벨트를 통해 배출되는 과정을 육안으로 확인 할 수 있다. 기계데이터에서 확인 할 수 있는 배토량은 실제 배토되는 굴착토의 용량을 반영하는 것은 아니다. 이것은 Fig. 1(c)에서 보이는 바와 같이 스크류 개폐율과 스크류 회전수의 두가지 기계데이터 항목을 곱하여 계산되어지는 값과 배토량의 항목과 쌍대 비교를 한 결과 단순 비례하는 결과를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 기계데이터에서의 배토량은 스크류를 조절한 최종의 결과 값으로 확인 할 수 있으며, 이러한 이유로 스크류 관련 데이터는 주요영향변수 분석항목에서 제외하며, 배토량 하나의 항목으로 이

후 분석을 실시 한다.

평균잭스피드는 결국 굴착속도와 직결되는 항목일 것이다. 하지만 기계데이터상의 평균잭스피드는 Fig. 1(d)에서와 같이 상당량의 데이터는 비례관계 및 동일한 값을 나타내지만 부분적으로 일부분의 값들은 상당한 차이를 보이는 것을 확인 할 수 있다. 현실적으로 불가능한 데이터 구성이라는 것이다. 하지만 이것은 현장의 상황을 분석하는 것을 통해 그 이유를 도출할 수 있으며, 평균잭스피드의 기계데이터 항목은 리스크 요인을 확인할 수 있는 항목임을 알 수 있다.

분석 대상현장의 평균잭스피드와 굴착속도의 전체적인 현장 데이터를 나타내면 Fig. 2(a)와 같다.

Fig. 2(a)에서처럼 굴착속도와 평균잭스피드가 심한 차이를 보이는 지점이 있다. 하지만 이 구간들의 현장상황은, 초반의 데이터는 TBM의 초기굴진 부분

Fig. 2. Relationship between net penetration rate and average of jack speed

이며 링번호 #706 까지가 곡선구간이다. 이때에는 쉴드잭을 부분적으로 선택하여 선형을 조정해야 하는 구간이며, 일부 쉴드잭만을 사용하여 방향 회전이 이루어진다. 이러한 이유로 평균 잭스피드가 증가하는 것이다. 하지만 900번 링에서는 직선구간임에도 큰 값을 나타내는 지점이 있다. 이 지점은 링번호 #1000 부근에서 파쇄대가 출현하는 것으로 미루어보아 그 이전의 연약한 지반에서 인위적인 잭스피드 조정이 있었음을 확인할 수 있다. 이러한 특수한 상황 이외의 값을 확인하기 위하여 평균잭스피드의 최대·최소값이 아닌 굴착속도와 같은 축의 값으로 조정하면 Fig. 2(b)와 같다.

이때에는 초기굴진과 곡선구간 및 파쇄대 이전지점을 제외하면 모든 값이 굴착속도와 같은 값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 평균잭스피드는 선형조정여부를 확인할 수 있는 리스크 관리 항목으로 지정할 뿐, 주요 영향변수에서는 제외 하는 것으로 하여, 굴착속도를 영향가능 변수로 본다.

2.2 주요영향변수 선정

지반변화에 따른 TBM 기계데이터의 주요 영향변수를 선정하기 위하여 Sousa와 Einstein (2012)에 의해 실시된 변수 분석방법을 시행하였다.

2.2.1 단일변수 분석(Single parameter analysis)

TBM 본굴진 직선구간 경암 및 연암 지반에서의 데이터를 분석한 결과는 Fig. 3과 같으며, 지반에 따라 분포도의 차이가 보이는 변수를 주요변수로 볼 수 있다. 해당 현상은 Open-mode로 굴진하였으며 동일한 커터회전속도를 유지하였으므로 영향변수에서 막장압(kPa)과 커터회전속도(RPM)는 제외하여, 추력이 주요 영향변수로 파악된다.

2.2.2 복합변수 분석(Mixed parameter analysis)

단일변수의 분석으로는 순수한 오퍼레이터의 입력 값인 추력이 주요변수로 나타나지만, 이것은 오퍼레이터에 의해 조정된 값이므로 기계 입력변수에 따른

Fig. 3. Parameter selection - Single parameter analysis

출력변수의 변화와의 상관관계 분석이 필요하다.

단일변수와 동일한 방식으로 분석 결과 Fig. 4(a)와 같이 입력 값인 추력에 대비한 커터토크와 굴착속도의 변화가 주요 변수로 확인되었다.

Fig. 4(b)의 토크/추력과 굴착속도의 쌍대비교에서는 경암지반의 값은 추세선의 일정간격 내로 분포하고 있으며, 그 구간을 벗어나는 값들로 연암지반에서의 데이터를 구성한다.

2.2.3 변수 분석결과 활용

TBM 굴진 중 얻을 수 있는 기계데이터의 지반상태

에 따른 변화를 단일 및 복합 변수 분석을 통하여 규명하였다. 경암에서 연암으로 굴진 중의 데이터 변화특성을 통하여, 지반변화의 시작을 감지함으로써 복합지반 굴착에 대한 사전대비를 할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 사전에 조사되지 않은 연약대 출현의 징후로 활용할 수 있을 것이다. 해당현장에서 링번호 #983부터 링번호 #1003까지 21개링 18.9 m의 구간에 파쇄대가 출현하여 당시 기계의 오류로 기계데이터를 얻을 수 없었다. 하지만 변수분석 결과를 활용하여 파쇄대의 데이터를 예측 할 수 있다. Fig. 5와 같이 해당현장의 지층단면도와 기계데이터 전체를 비교해

(a) Two parameter analysis

(b) Relationship between two parameters

Fig. 4. Parameter selection - Mixed parameter analysis

보았다. 링번호 #0~#205 까지(Sta. 0+000~Sta. 0+185)는 초기굴진이 포함된 직선구간이며 그 이후 #206~#706(Sta. 0+185~Sta. 0+635) 구간은 곡선구간이다. 또한, 이 구간에서는 대부분 연암을 통과하는 것을 알 수 있다. 링번호 #205까지의 직선구간은 당시의 현장에서 작성된 굴진일보를 확인하여 장비투입중 기본값 세팅을 위한 단계임을 확인하였으며, 링번호 #706번까지의 구간은 실제스케일의 Auto-cad도면으로 곡선구간임을 확인하였다. 여기까지의 구간은 상당히 격차가 심한 데이터 양상을 보이고 있으므로, 직선구간 정상굴진의 구간의 안정된 데이터를 본 연구의 주요 분석구간으로 하였다. 정상굴진 구간에서는 경암으로 시작하여 차츰 연암구간으로 굴착이 이어짐을 볼 수 있으며, 굴착속도(mm/hr)와 토크(kN·m)/추력(kN)을 비교하여 보면, 앞 절에서 설명된 것과 같이 동일한 굴착속도에서 토크(kN·m)/추력(kN)의 값이 경암에 비해 연암에서 큰 값들을 보이고 있으며, Fig. 4에서 나타난 결과와 같음을 알 수 있다. 또한 파쇄대의 출현으로 누락된 18.9 m구간이 Fig. 5의

데이터의 누락으로 그래프의 연속성이 없는 ㉠지점이다. 그 직후 ㉡에서 보이는 것처럼, 이 구간은 경암 지반이지만 파쇄대의 출현으로 지반상태가 불량해진 이유로 연암지반에서와 같이 두 그래프간의 차이를 확인 할 수 있다. 이후에 다시 경암에서 연암으로 지반상태가 바뀐 이후에는 ㉢지점에서처럼 차이를 나타내는 기계데이터 특성을 다시 한 번 확인 할 수 있다.

3. TBM 기계데이터 중회귀분석

3.1 중회귀분석

단회귀분석에서는 목적변수(Object variable) y에 대해서 설명변수(Explanatory variable)가 하나인 경우에 대하여 주로 설명하고 있으나, 일반적인 현상을 논할 때에는 설명변수가 두 개 이상인 경우가 많다. 예를 들면 학교의 성적을 분석할 때, 한 과목의 성적을 예측하려면 여러 관련 과목을 설명변수로 할 필요가

Fig. 5. Cross-sectional diagram and Machine data

있다(No, 2008). TBM 굴진 중에 지반상태를 평가함에 있어서는 더욱 많은 기계데이터 변수를 필요로 하는 것이 명백하다.

하나의 목적변수 y 와 p 개의 설명변수 $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ 에 관해서 n 개의 데이터가 주어져 있다고 하자. 그래서 $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ 로부터 y 를 예측할 때의 기본식을 설정하지 않으면 안 된다. 그것이 다음의 식 (1)이다.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_px_p \quad (1)$$

이와 같이 y 와 $\{x_1, x_2, \dots, x_p\}$ 간의 관계식을 구하는 것을 중회귀분석(Multiple regression analysis)이라 한다.

3.2 중회귀분석의 해석방법

3.2.1 결정계수

회귀식의 유효성을 보는 지표로서 결정계수(Coefficient of determination)가 있다. 중회귀분석의 경우에 결정계수는 다음과 같은 문제점이 있다. 그것은 결정계수는 설명변수의 수를 늘릴수록 그 변수가 유용한 것이든 아니든 높아져 간다는 성질이 있다는 점이다. 그래서 회귀식에 무의미한 변수가 설명변수로 사용되었을 때에는 계수의 값이 오히려 내려가도록 조정된 결정계수가 사용된다. 이것을 조정된 결정계수라고 한다. 조정된 결정계수를 R^{*2} 라고 표기하면 결정계수 R^2 과는 다음 식 (2)과 같은 관계가 성립한다.

$$R^{*2} = 1 - \frac{n-1}{n-p-1}(1-R^2) \quad (2)$$

여기서, n 은 표본의 크기, p 는 설명변수의 수이다.

3.2.2 유의한 F

회귀식의 유의성을 판단하기 위한 방법이 통계적 가설검정이다. 중회귀식의 통계적 유의성은 분산분석표에 의해서 판정할 수 있다. 분산분석표의 ‘유의한

F (Significant F)’에 의거하여 회귀식의 유의여부를 판정한다. ‘유의한 F’는 유의수준 α 보다 작거나 같을 경우 회귀식이 유의하다고 판단하며, 통상적으로 유의수준 α 는 0.05를 사용한다.

3.2.3 편회귀계수의 t 통계량과 p 값

각 설명변수의 목적변수에 대한 영향력의 대소는 편회귀계수의 대소로 판단해서는 안 되고 t 통계량이나 p 값에 의해서 판단해야 한다. t 통계량의 값이 큰 변수일수록 목적변수를 예측 혹은 설명하는 데에 공헌도가 높다고 판단한다. 여기에서 t 통계량은 다음 식 (3)과 같이 계산된다.

$$t\text{통계량} = \frac{\text{편회귀계수의 값}}{\text{계수의 표준오차}} \quad (3)$$

t 통계량의 값 대신에 F 값을 이용하는 경우도 있는데 이들 사이에는 다음 식 (4)와 같은 관계가 있다.

$$F\text{값} = (t\text{값})^2 \quad (4)$$

경험적으로 F 값이 2이상이면 유효한 변수이고, 2 미만이면 유효하지 않은(불필요한) 변수로서 간주한다. 설명변수의 유효성 판단은 중회귀분석에 있어서 변수선택의 문제로서 중요한 의미를 갖는다.

F 값은 ‘위험도’라고도 불리며, 이 값이 크면 그 설명변수는 채택하지 않는 편이 좋다는 것을 의미한다. 이것은 중회귀식의 계산치와 실측치에 대한 산포의 정도를 나타내고 있기 때문에, 작을수록 목적변수 y 와의 관련성이 강한 것으로 된다. 통상 0.5이상이라면 위험하다고 판단한다.

3.3 TBM 기계데이터 분석

TBM 기계데이터와 지반상태의 상관관계를 중회귀분석으로 규명하기 위하여 Fig. 5에서의 전체 구간 중 초기굴진과 도달굴진, 그리고 곡선구간의 데이터

를 제외한 직선구간의 데이터만을 추출하여 분석을 실시하였다. 이것은 굴진 시 방향조절이나 다른 여러 가지 간섭조건들을 배제하고 지반상태와 특정 기계데이터의 분석을 용이하게 하기 위함이다. 지반상태에 대한 대표값은 일축압축강도를 사용하였다. Fig. 5에서와 같이 시공전 지반조사는 시점과 종점의 수직구를 제외하고 12개소를 실시하였다. 이때 조사된 터널 깊이에서의 지반 일축압축강도는 Table 1과 같다.

해당현장은 약 190 m간격으로 지반조사를 실시하였으며, 지반조사 된 지점사이의 구간은 단순보간법을 적용하여 해당 링의 기계데이터와 중회귀분석을 실시하였다. 이때의 목적변수 y 는 커터토크이며, 설명변수 $\{x_1, x_2\}$ 는 각각 총추력과 일축압축강도이다. 목적변수가 커터토크인 이유는 앞선 분석에서 주요 영향변수로 확인이 되었으며, 기계데이터 특성으로 살펴보았을 때, 오퍼레이터가 임의로 조절하는 입력 값이 아닌 굴착이 진행됨에 따라 나타나는 출력 값이기 때문이다. 반면에 일축압축강도는 지반의 고유특

성이며, 총추력의 경우에는 오퍼레이터가 조절할 수 있는 입력 값이기 때문에 설명변수로 두어야 한다.

중회귀분석을 실시하기 위하여 사용된 프로그램은 ‘Microsoft Excel 2010’이며 분석결과 회귀식은 식 (5)와 같으며, 세부결과는 Table 2, Table 3과 같다.

$$y = 558.027 + 0.039x_1 - 1.295x_2 \quad (5)$$

여기서, y 는 커터토크(kN·m), x_1 은 총추력(kN), x_2 는 일축압축강도(MPa) 이다.

상관계수 0.642, 조정된 결정계수 0.411의 신뢰성 있는 결과를 얻었으며, 회귀식의 유의성을 판단할 수 있는 유의한 F의 값이 1.98×10^{-65} 로 거의 “0”에 근접하여 상당한 유의정도를 나타냄을 확인할 수 있다. 또한, 각각의 설명변수 또한 유효하다. 이것은 F값이 2이상 이면 유효한 변수로 볼 수 있는지만 각각 2,047과 255, 166의 2와 비교할 수 없는 큰 값을 보이고 있으며, 위험도 P-값은 0.5미만이면 유효하다고 판단하지만

Table 1. Uniaxial compressive strengths of ground

Distance from launching shaft (m)	716	906	1,097	1,288	1,486
Ring No.	#796	#1,007	#1,218	#1,431	Receiving shaft
Uniaxial compressive strength (MPa)	81.7	117.0	62.6	53.6	52.7

Table 2. Results of multiple regression analysis

multiple correlation coefficient	0.642
coefficient of determination	0.413
Modified coefficient of determination	0.411
F ratio	196.695
Significant F	1.98×10^{-65}

Table 3. Reliability of coefficients

	Y-intercept	Total thrust force (x_1)	Uniaxial compressive strength (x_2)
coefficient	558.027	0.039	-1.295
Standard error	12.332	0.002	0.101
t-statistic	45.249	15.986	-12.886
F-value	2,047	255	166
P-value	3.393×10^{-189}	1.157×10^{-47}	-1.492×10^{-33}

해당 값 역시 ‘0’에 근접한 값을 보이고 있기 때문이다.

따라서 본 연구의 회귀식 식 (5)를 통해 기계데이터의 출력 값인 커터토크는 입력 값인 총추력에 비례하여 증가하며, 해당 지반의 일축압축강도가 작을수록 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 앞선 TBM 기계데이터 영향변수 분석의 결과와 동일하다. 연암에서 커터토크/추력의 값이 경암지반에 비해 높다는 것 즉 일축압축강도가 낮은 지반일수록 커터토크/추력의 값이 높다는 결과를 중회귀분석으로 증명 할 수 있다.

4. 결 론

샬드 TBM에서 막장전방의 지반을 일일이 확인하기가 용이하지 않으므로, 기계데이터로 현재 지반의 상태를 파악하거나, 기계데이터의 변화로 지반의 변화를 사전에 파악한다는 것은, 시공 중의 리스크를 상당량 감소 시켜 정지시간을 최소화 할 수 있을 것이다. 본 절에서는 시공 완료된 토압식 샬드 TBM 현장의 기계데이터를 분석하여 지반의 변화에 따른 기계데이터 변화특성을 규명하였다.

먼저 500개의 항목이 넘는 기계데이터 중 주요 영향변수를 구분하였다. 작성자나 오퍼레이터의 오차가 포함될 수 있는 굴진일보에 의지하지 않고 TBM 장비의 운전관리 결과 데이터시트를 활용함으로써, 오차가 없는 실제 주요영향변수를 구분하였다. 그 결과, 커터 회전압과 샬드잭 추진압력, 사용잭 개수, 스크류 개폐율, 스크류 회전수, 평균잭스피드와 같은 데이터를 제외 할 수 있었다. 또한, 평균잭스피드의 이상적인 증가현상은 곡선구간이나 연약대에서 선형을 조정하였을 경우 발생하는 것으로 이 값의 변화를 통해 선형 이탈 지점을 파악할 수도 있다.

지반변화에 따른 주요 영향변수로는 단일 기계 데이터로는 총추력이며, 복합 변수로는 커터토크/추력, 굴착속도/추력이다. 이런 변수들의 조합으로 경암과

연암지반에서의 기계데이터 특성을 알 수 있다. 이를 통하여 경암-연암-풍화암-토사의 순서로 구성된 층서 지반에서 터널 진행방향으로 지반경계가 경사져 있을 경우 경암구간 굴진 중 연암의 징후를 기계데이터로 확인 함으로써 사전에 복합지반에 대비하거나 조사되지 않은 연약대나 파쇄대의 출현에 대비할 수 있을 것이다.

본 연구의 대상현장은 대부분의 구간에서 막장의 자립이 가능하여 Open-mode로 동일한 커터회전속도를 유지하여 굴진하였다. 그리하여 기계데이터 영향변수에서 막장압과 커터회전속도는 영향변수에서 제외 되었다. 하지만 이후 이와 다른 상황에서 막장압과 커터회전속도의 변화가 있을 경우에도 본 연구에서와 같은 분석으로 보다 구체적인 분석이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술 혁신사업의 “TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적 건설기술 개발” 연구비지원(10기술혁신E09)에 의해 수행되었습니다.

References

1. An, M.S., Lim, K.S., Kim, K.J. (2011), “A study on advance rate under the operating conditions of EPB shield TBM based on TBM operation data”, Korean Society of Civil Engineers (KSCE), Vol. 31, No. 6, pp. 839-848.
2. No, H.J. (2008), “Management science by microsoft excel 2007”, Hanol publishing company, pp. 45-69.
3. Sousa, R.L., Einstein, H.H. (2012), “Risk analysis during tunnel construction using bayesian networks: porto metro case study”, Tunnelling and Underground Space Technology (TUST), Vol. 27, pp. 86-100.