

연약지반 실드 터널 굴착시 전석장애물 탐지방법 및 보상문제

Boulder Detection Methods and its Compensation for Obstruction in Soft Ground Tunnels by Shielded TBM

지왕률[†] · 하상귀^{*}

Warren-Wangryul Jee · Sang-Gui Ha

Abstract

Boulder detection methods and its compensation is discussed with consideration of boulder conditions in soft ground tunneling by shielded TBM. For analysis of proper compensation methods for boulder obstruction, its removal costs and cases on eight projects are presented. Compensation for boulder obstruction removal by volume or weight is not practical for most tunneling situation, but compensation by crew time is probably the most equitable method. If boulders are anticipated on project, boulder removal plan must be considered with proper equipment selection.

Keywords : Boulder Obstruction(전석장애물), Soft Ground(연약지반), TBM, Compensation(보상)

1. 서론

최근 연약지반상의 도심지 굴착사례가 증가하면서 터널 굴착중 전석(Boulder) 처리가 문제점으로 대두되고 있다. 터널 굴착중 갱도에 전석이 출현하는 경우를 전석 장애라고 하며, 전석 장애는 추가적인 처리 비용을 유발하게 된다. 전석 장애의 형태는 “장애를 일으키는 전석이 너무 커서 일반적인 방법으로 파쇄하거나 버력처리 시스템(Mucking system)으로 처리하기 어려운 경우” 또는 “전석 제거를 위해 갱도 또는 터널 외부에서 이루어지는 천공 및 파쇄(또는 발파)와 같은 보조공법이 필요한 경우”로 구분할 수 있다[1].

전석이란 일반적으로 조약돌 또는 자갈보다 치수가 큰 암석을 의미하지만, 현장의 기반암보다 그 크기가 훨씬 작아 설계 및 시공단계에서 노선상의 전석을 직접 간파하는 것은 쉽지 않다. 그러나 설계자가 어떠한 지층에 대해 전석의 존재 가능성과 관련 정보를 인지하고 있다면, 물리 탐사를 보다 효과적으로 수행할 것이며, 굴착 작업중 전석탐지에 초점을 맞춰 막장관찰을 실시할 것이다[2].

전석 장애물의 제거는 추가적인 처리와 비용이 요구되지만, 기본 굴진율과 생산성에 고려되지 않는 것이 현실이다. 전석 장애물 제거는 공기지연을 유발하며, 직·간접적으로 보상을 필요로 하게 된다. 보상문제는 전석 장애물 제거를 직접 공정에 포함시키는 방법과 별도의 부수적인 공정으로 분리하는 방법이 고려 될 수 있다. 두 가지 경우 모두 전석 제거에 대한 비용을 산정해야 한다는 공통점을 내포하므로 전석의 크기 및 특성에 대한 정보 수집이 필수적이라 할 수 있다[1,2].

본 논문에서는 연약지반상의 터널 굴착시 전석 장애물을 탐지하는 방법 및 처리기술을 소개하고, 비용상의 보상문제를 언급하였다. 또한 전석 장애물 보상문제와 관련된 해외 프로젝트 사례 8개를 제시하였다.

2. 전석 탐지기술

2.1 지반조사 및 물리탐사

전석 장애물에 대한 보상방법을 선정하기 전에 매장된 전석의 지질학적 특성과 전석이 발생할 확률을 평가해야 한다. Hunt & Angulo(1999년)는 지반조사 및 물리탐사를 이용하여 다음 6개 항목의 전석 발생 특성을 제안하였다.

[†] 책임저자 : 정회원, (주)대한콘설리트 철도사업본부 터널부, 전무이사, 콜로라도 CSM 공대 객원교수 겸임
E-mail : wjee@d-han.com
TEL : (02)725-2837 FAX : (02)730-1991

^{*} (주)대한콘설리트 철도사업본부 터널부, 대리

- Frequency(발생빈도)
- Distribution(발생분포)
- Sizes(크기)
- Shapes(형상)
- Rock composition(암석 구성)
- Matrix soil composition(토층 구성)

전석의 상태를 적절히 평가하기 위한 조사 방법으로 대규모 시추조사, 시험굴 굴착, 물리탐사 기법, 조사터널 굴착 등이 고려될 수 있다. Fig. 1은 전석 및 암석 시추가 가능한 대규모 시추장비이며, 이를 이용하여 시추된 전석들의 형상이 Fig. 2에 제시 되어 있다.

전석 탐지를 위한 물리탐사 기법으로 탄성파 탐사가 있다. 탄성파 탐사는 인위적으로 발생시킨 탄성파가 지하 매질을 통해 전파할 때, 매질에 따라 전파 속도가 변화하며, 매질의 경계부에서 굴절 또는 반사하는 성질을 이용한 것으로 Fig. 3은 전석 탐지가 가능하도록 탄성파 탐지 시스템을 장착한 TBM 장비를 보여주고 있다. GPR 탐사는 고주파수를 이용하여 목표물의 탐지 및 위치를 파악하는 방법으로

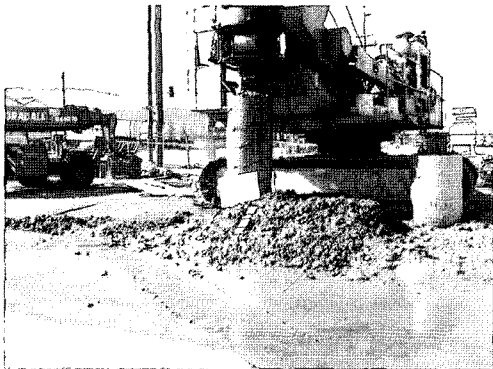


Fig. 1. 대규모 시추 장비

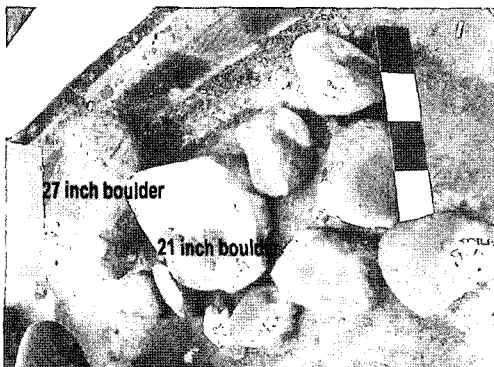


Fig. 2. 대규모 시추장비로 시추된 전석들

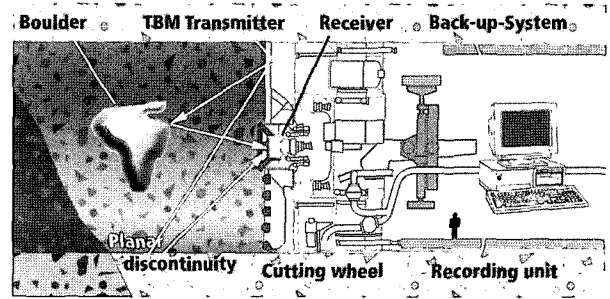


Fig. 3. 전석탐지가 가능한 TBM

전석 탐지를 위한 효과적인 방법이 될 수 있다. 이 밖의 물리적인 탐사기법으로 시추공 탄성파 탐사, 시추공 레이더 탐사 등이 있다.

2.2 전석 장애물의 정량적 평가

굴진율에 영향을 주는 전석의 특징들을 파악하기 위해서는 전석의 구성, 모양, 분포, 토층, 위치와 같은 사항들이 고려되어야 하나, 처리 비용 산정시 이들 사항을 종합적으로 고려하는 것은 쉽지 않다. 전석을 정량적으로 평가하는 방법으로 Geotechnical Baseline Report for Underground Construction(Technical Committee, 1997)와 Essex & Klein(2000)이 제안한 방법을 인용하면 다음과 같다.

- 예상되는 전석 장애물의 횡수
- 예상되는 전석 장애물의 양
- 전석 장애물 제거 시간(TBM 비가동 시간, 마모된 커터를 보수하는 시간을 포함)

Hunt & Angulo(1999)는 미국 밀워키(Milwaukee) 지역 프로젝트에 대하여 전석 장애물을 정량적으로 평가하고, 이들을 데이터베이스화 하여 두 가지 방법으로 전석을 평가하였다. 첫 번째 방법은 전석의 양을 터널 굴착량의 백분율로 표현하고 대략적으로 산정하는 방법이며, 두 번째 방법은 터널 굴착량에 대한 전석의 백분율을 결정하기 위해, 시추작업시 분석된 전석 빈도를 이용하여 반경험적 상관관계로부터 밝혀내는 것이다. 이들은 밀워키 지역에서 수행된 5개 프로젝트를 분석하였으며, 3개 프로젝트를 추가 분석하였다. Table. 1은 밀워키 지역에 대하여 추가로 실시한 3개 프로젝트에 대한 전석 평가 결과를 보여 주고 있다.

Fig. 4는 시추 시 분석된 전석 데이터에 대응하는 전석의 백분율 상관관계를 나타내고 있다. 연구 결과에 의하면, 이 지역의 전석 체적은 평균적으로 터널 굴착 체적의 0.01 ~ 1.82% 범위에 있는 것을 알 수 있다.

Table 1. 밀워키 지역 전석 평가 결과

Case No.	1	2	3
Project Name	Oklahoma Ave. Relief Sewer	Oak Creek Southwest	Miler, 37th and State MIS
Tunnel Length	725m	1524m	383m
Excavated Diameter	1.52m	1.40m	2.64m
No. of Borings	12	12	9
Avg. Boring Spacing	68.6m	132.6m	44.2m
Boulder Length/Boring Length in Till/Outwash	4.7%	1.8%	8.9%
Est'd No. of Boulders	15	11	29
Reported No. of Boulders in Tunnel	151	156	346
Reported No. of Boulders Obstruction	71	156	60
Avg. Boulders per 30m of Tunnel	6.2	3.1	27
Max. Boulders per 100m of Tunnel	59	-	154
Estimated Boulder Volume, m ³ ,	12.3	36.8	33.7
Avg. % Boulders by Volume in Tunnel	0.93%	1.57%	1.62%
Max. % Boulders by Volume, 60m(200ft) Tunnel Segment +/-	2.3%	-	2.9%

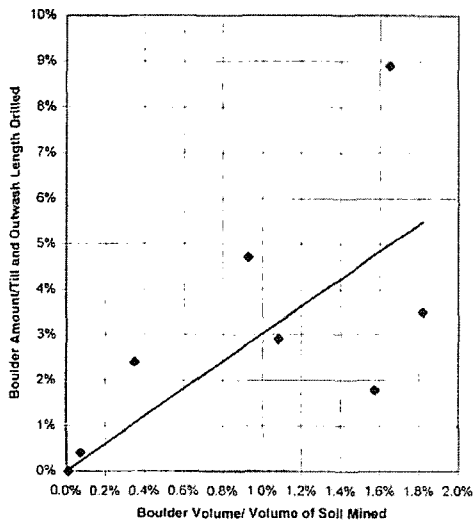


Fig. 4. 밀워키 지역의 전석 발생 상관관계

3. 전석장애를 제거 방법

3.1 측방으로 밀어내는 방법

TBM의 주변돌레에 부분적으로 접하고 있는 전석은 측방으로 밀어내는 방법이 적용될 수 있다. 이 방법을 적용하기 위해서는 TBM에 부분적으로 폐쇄된 면이 존재해야 하며, 전석이 주변 지반에 근입이 가능하도록 지반이 적당히 느슨해야 한다. 그러나 전석이 너무 커서 측방으로 밀어낼 수 없는 경우가 있으며, 연약한 토층에서 만나는 전석이 커터 헤드를 따라 회전하거나 헤드의 개구부에 박혀 버리는 경우도

발생한다[4,7].

3.2 원상태로 수집

TBM 헤드의 개구부가 전석을 통과시킬 정도로 충분히 큰 경우 원상태로 수집될 수 있다. 헤드의 구멍을 통과하는 전석의 크기는 전석과 헤드 구멍의 크기와 형상에 따라 달라진다. 매끄럽고 둥근 형상은 직사각형 또는 각진 전석보다 쉽게 TBM 헤드의 개구부를 통과할 것이다. 각진 형상의 전석은 파쇄될 때 까지 헤드의 전면을 따라 회전하거나 구멍에 박혀 있을 것이다. 대부분의 TBM은 굴착직경의 15~30% 이하 크기의 전석을 처리할 수 있다. 일단 전석이 헤드 부분을 통과하면, 버력처리 시스템을 통과해야 한다. 그러나 커다란 전석의 경우 분쇄하는 과정이 필수적으로 필요하다.

3.3 분쇄후 처리

1) 커터를 이용하여 분쇄

전석을 분쇄하는 커터의 능력은 커터 종류, 마모 정도, 암석의 구성, 강도, 전석의 형상, 방향, 토사층의 강도 등에 따라 결정된다(Dowden & Robinson, 2001). 커터의 종류에는 드래그 픽(Drag pick), 롤러 커터(Roller cutter), 디스크 커터(Disc cutter) 등이 있다.

드래그 픽은 강도가 약한 암석이나 적당히 산재된 경암 전석을 분쇄할 수 있으나, 무리지어 있는 전석에는 효과적이지 못하다. 롤러 커터는 전석을 조각으로 잘라낼 수 있으나, 전석의 강도가 강할 경우 절삭 속도가 느려지는 경향이 있다.

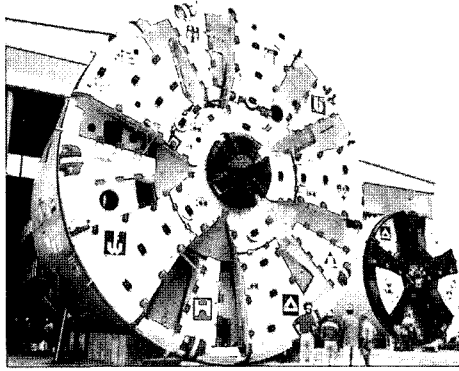


Fig. 5. 드래그 픽과 디스크 커터가 장착된 쉴드 TBM

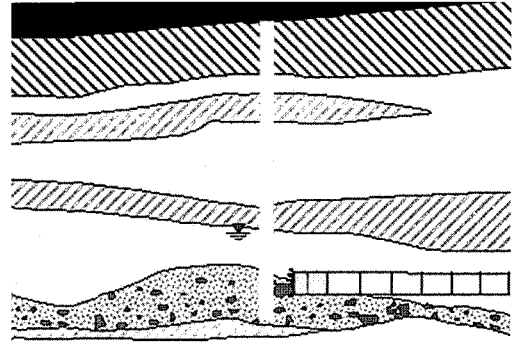


Fig. 6. 천공홀 속으로 전석을 밀어내는 TBM

디스크 커터(Fig. 5)는 전석이 분쇄되는 동안 전석을 잡아 줄 수 있을 정도로 토층이 충분히 단단한 경우 매우 효과적인 방법이다. Navin 등(1995)은 커터에 작용하는 힘에 대한 근입된 전석의 지지력을 비교하여 요구되는 토층의 강도를 제한한 바 있다. 만일 토층이 너무 느슨하거나 연약하면, 전석은 커터 주위를 회전하거나 커터를 손상시킬 것이다.

2) 기계적으로 분쇄

터널 내부를 통해 헤드 부분으로 접근이 가능하고, 막장이 그라우팅 보강 등으로 안정화된 경우 전석 장애물은 헤드의 개구부를 통해 다음과 같이 기계적으로 분쇄할 수 있다.

- 전석에 폭약을 설치하여 발파
- 천공홀에 유압을 작용하여 분쇄
- 천공홀에 급팽창 모르타르를 삽입하여 분쇄

3) 충전공간내에서 분쇄

슬러리 쉴드 TBM은 일반적으로 충전공간 내에서 전석을 파쇄하기 위해 암석 분쇄기를 장착하고 있다. 전석은 슬러리 상태로 펌핑될 수 있도록 충분히 작은 크기로 커팅 헤드의 구멍을 지나게 된다. 일반적으로 굴착직경의 20~35% 크기의 전석을 처리할 수 있으며, 전석의 크기에 따라 커터 헤드의 구멍 및 암석 분쇄기의 용량이 결정된다. 암석 분쇄기의 종류에는 Roller, Cone, Jaw 타입이 있다.

3.4 TBM 외부에서 제거

1) 천공홀로 밀어내는 방법

이 방법은 굴착할 위치로 지표 접근이 필요하므로, 지상에 중요한 구조물이 없어야 한다. 또한 굴착 장비는 0.8~1.2m 정도의 천공홀을 형성할 수 있어야 하며, TBM 아래로 1~2m 정도 추가 굴진이 가능해야 한다. 이 방법은 밀워키

지역에서 전석 제거를 위해 부분적으로 적용되었다(Fig. 6). 전석 제거후 천공홀은 뒷채움이 되며, 전석 주변의 공극은 그라우팅으로 채워져야 한다.

2) 지표 천공후 발파

만일 발파가 가능한 여건이면, 지표에서 전석 안으로 천공을 하고 이를 발파하는 것도 가능한 방법이다. 이 방법은 적절한 위치에 천공을 하고 장약을 충전하는 것이 관건이다.

3) 임시 수직갱을 통해 제거

1~2m 직경의 케이싱 홀 또는 라이닝 수직갱을 이용하여 지표로부터 접근이 가능한 경우 임시 수직갱을 통해 전석 장애물을 제거할 수 있다[3,5].

4) 접근 터널을 이용하여 제거

작업갱 근처에서 인력으로 접근 터널을 굴착하여 전석 장애물을 제거할 수 있다. 임시 지보재는 목재, 강관, 강판 등이 사용된다.

4. 전석장애물에 대한 보상문제

4.1 잡비 처리

전석 장애물이 얼마 되지 않고, 제거 비용이 그다지 높지 않을 때, 전석 장애물 제거 작업은 잡비로 처리할 수 있다. 전석 장애물이 잡비로 처리된다면, 전석 장애물에 대한 정량화 작업이 더욱 상세히 이행되어야 한다. 전석 장애물에 대해 이러한 과정이 무시된다면, 저가 입찰자는 전석장애물이 예상되지 않는다고 가정할 것이며, 설상가상으로 전석 장애물 처리가 불가능한 장비를 선정할 수도 있다. 이러한 경우 전석장애물이 굴착 중에 나타나고, 제거 비용이 발생한다면, 시공사는 상이한 현장 여건과 시방서의 결함에 대

해 추가 비용과 함께 공기 연장을 요구할 것이다.

4.2 계약 수정

계약 수정에 의한 전석장애물 보상비용 산정 방법은 효과적인 방법이 될 수도 있고 그렇지 않을 수도 있다. 만일 전석 장애물이 예상되고, 시공사가 이를 신속하고 효과적으로 제거할 적절한 장비를 보유하고 있다면, 이 방법은 좋은 선택이 될 수 있다. 이 방법은 전석 장애물이 예상되지 않거나, 입찰 전에 전석 장애물 제거 작업의 범위를 충분히 결정할 수 없을 경우 실용적인 방법으로 고려할 수 있다.

4.3 별도 공정으로 보상

1) 조우 회수를 기준으로 보상

전석장애물을 보상하는 간편한 방법은 장애물의 조우 회수에 근거하여 1개의 장애물에 대해 단위 비용으로 보상하는 것이다. 구체적으로 언급하면 15분 정도 소요되는 1회 발파로 비교적 작은 전석 장애물을 제거한다고 가정할 때, 이에 대하여 동일한 단위 비용을 적용함을 의미한다. 하지만 규모가 큰 전석의 경우 1회 이상의 발파가 필요할 것이며, 시간도 15분 이상이 소요될 수 있다. 또한 전석제거를 위해 막장을 보강할 경우가 발생하는데, 이 방법은 모든 경우에 대해 동일한 단위 비용을 적용하는 문제점이 있다.

2) 크기를 기준으로 보상

전석의 크기를 기준으로 전석 장애물을 판단하는 방법은 앞서 언급한 방법보다 좀 더 공정한 보상 방법이지만, 크기를 측정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 이 방법을 적용하려면 크기에 대한 기준을 명확히 할 필요가 있다. 예를 들어 TBM의 버력처리 시스템을 통과하는 비교적 작은 크기의 전석은 보상에서 제외하고, 보상의 범위에 있는 전석의 크기를 2~3개 정도로 분류하여 각 크기에 대해 보상에 차등을 두는 것이다.

3) 체적을 기준으로 보상

체적을 이용한 보상방법은 전체 전석 또는 조각이 터널 막장으로부터 쉽게 제거되어 측정이 용이할 때, 실용적인 방법이 될 것이다. 그러나 전석은 불규칙한 형상이며, 대략적인 체적은 치수를 근거로 계산된다는 점에서 앞서 언급한 크기를 기준으로 보상하는 방법과 별반 차이가 없다.

4) 중량을 기준으로 보상

중량으로 전석장애물을 보상하는 방법은 체적보다 측정하는 것이 용이하다. 보상 기준이 되는 전석은 적정 중량 이

상으로 표현이 가능하다. 그러나, 보상기준이 되는 전석을 구분하고, 중량을 측정하는 일은 추가적으로 수반되어야 한다.

5) 작업시간을 기준으로 보상

이 방법은 전석장애물로 발생하는 TBM의 굴진정지에 대하여 장애물 제거로 소요되는 작업 시간을 기준으로 보상하는 방법으로 가장 합리적인 방법이 될 수 있다. Manson, Berry, Hatem(1999)는 장애물 제거를 위한 작업시간에 대한 기준을 전체공정의 125%로 하였으며, 이를 초과하지 않으면 공기에 영향을 주지 않는다고 제안하였다.

5. 프로젝트 사례

5.1 Case 1—Interplant Solids Pipeline

몇 개의 분산된 전석이 설계단계에서 예상되었으나, 장애물의 양이 결정되지 않았고, 비용 항목으로 고려되지도 않았다. 시공단계에서 232개의 전석 장애물이 발생하였으며, 커터 헤드의 개구부를 통해 발파하여 제거하는데 82.5시간이 소요되었다. 전체 장애물 제거에 총 \$57,123이 소요되었으며, 굴진중 자연 파쇄된 전석을 제외하면, 전석 장애물당 \$372의 비용에 해당된다. 이를 전석 장애물당 작업시간으로 환산하면, 평균 21분에 해당된다.

5.2 Case 2—South Pennsylvania Ave.

이 사례의 경우 전석 장애물이 예상되었으나, 장애물의 양이 기록되지 않았으며, 제거 비용 또한 예산에 포함되지 않았다. 계약상에는 “기술자의 검토후 계약수정” 하도록 되어 있었다. 시공사는 막장개방형 TBM을 선택하였으며, TBM 굴진중 262개의 전석을 적절히 발파하였다. 이 전석들은 대부분 실트질 점토로 이루어진 빙역토에 근입되어 있었으며, 발파하는 동안 막장의 불안정은 문제되지 않았다. 발파 작업동안 굴착 지연시간은 전석당 15~60분이 소요되었으며, 평균 32분으로 기록되었다. 전석 처리 비용은 전석당 \$1,620으로 산정되었다. 이 프로젝트의 경우 시방서에 전석 등을 고려하여 TBM 장비를 선정할 것을 명시하지 않았다. 이 프로젝트의 최종 입찰자는 막장개방형 TBM 장비가 적절하다고 선정하였지만, 두 번째로 낮은 입찰가를 제시한 입찰자는 단지 \$50의 차이를 보였고, 커터 헤드가 막혀 있는 마이크로 터널링 TBM의 일종인 Iseki Unclemole(Fig. 7)를 계획하였으며, 이는 단지 자갈과 매우 작은 전석만을 처리할 수 있다. 이 입찰자가 선정되었다면, 전석에 대한 계약 수정 비용은 5~10배 높았을 것이다. 이 사례를 볼 때, 장비선정의 중요성과 조사단계에서 반드시 전석의 양이 기록되어야

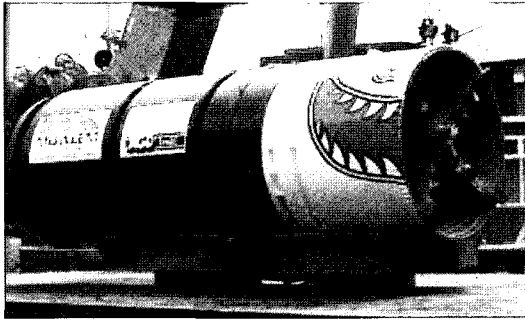


Fig. 7. Iseki Unclemole TBM

함을 알 수 있다.

5.3 Case 3-Ramsey Ave. 하수터널

전석장애물이 지반조사 보고서에 기록되어 있으며, 2개의 전석장애물에 대해 비용항목으로 기록되어 있다. 최소 가격이 명기되어 있지 않았지만, 최소 제거 범위가 다음과 같이 계약상 명시되어 있었다.

“장애물 발생은 터널 굴착 장비로 굴착할 수 없는 크기의 전석과 기타 장애물을 만나는 경우로, 계약자는 장애물을 제거할 적절한 방법을 결정해야 한다. 방법에는 장애물 근처로 사람이 접근 할 수 있도록 갱을 굴착하거나, 장애물을 밀어 넣을 수 있는 공간을 확보하는 것이다.”

시공사는 Iseki Unclemole를 선정하였다. Iseki Unclemole는 앞서 언급한 바와 같이 막장으로 접근이 불가능하고, 자갈은 처리가 가능하나 전석은 불가능하다. 터널 굴진을 80% 까지 전석 장애물은 발견되지 않았다. 그러나 6.4m를 남겨 두고 물을 포함한 조립토층에 근입된 직경 600mm의 고강도 화성암 전석에 의해 굴진이 정지되었다. 시공사는 인력으로 외부에서 접근 갱을 굴착하였으며, 전석을 신속하게 제거하고자 별도의 막장 안정처리를 하지 않았다. 그러나 액상화 현상이 일어나는 등 막장이 불안정하자 결국 지반 그라우팅을 실시하여 전석을 제거하였다. 비록 전석 장애물이 예상되었고, \$5,000의 비용 항목으로 고려되었으나, 대략 \$600,000의 비용이 발생하였다. 비용을 청구 하였으나, 청구는 거절되었고, 소송을 피하기 위해 전석 처리 비용은 입찰가 \$5,000에서 화해 금액 \$100,000으로 합의되었다.

5.4 Case 4-CT-7 Collector System

이 사례에서는 전석이 분산된 것으로 예상되었으나, 양이 기록되지 않았고, 비용 항목으로 지정되지도 않았다. 굴진 중 5개의 전석이 나타났으나, 실제 굴진에는 영향을 주지 않았다. 전석들은 투수성이 낮은 실트질 점토층에 존재하였으

며, 전석이 버력처리 시스템을 모두 통과한 사례이다.

5.5 Case 5-Elgin Northeast Interceptor

이 프로젝트에 대한 계약문서에는 전석 장애물에 대한 리스크를 기술하지 않았고, 지불 준비도 하지 않았다. 시공사는 전석이 발생할 것을 대비하여, 막장으로 접근이 가능한 막장개방형 TBM을 선정하였다. 굴진중 112개의 전석 장애물을 만났고 40L/sec(640g/min)의 유입수가 발생하였다. 지반조사 보고서는 많은 전석의 양과 높은 지하수 유입을 예상치 못했으며, 시추조사는 터널 인버트 아래 0~2m까지 실시하는데 그쳤다. 터널 영역의 대수층은 터널 아래 10m 이상까지 확장되어 있으며, 예상했던 것 보다 투수율이 매우 높았다. 이러한 악조건들은 전석 장애물당 평균 약 \$1,500의 추가비용을 발생시켰다. 시공사는 상이한 현장 조건에 대해 추가 비용을 청구하였다. 청구건은 거절되었으며, 결국 법원에서 소송으로 결말이 났다. 이 사례를 통해 전석 장애물에 대한 부적절한 조사가 추가 비용 발생 및 분쟁의 소지가 됨을 알 수 있다. 또한 계획단계에서 예상 전석장애물을 비용항목으로 고려하는 과정이 필요함을 시사한다.

5.6 Case 6-Oklahoma Ave. 하수터널

이 사례에서 전석 장애물은 다음과 같이 지반조사 보고서 상에 기록하였으며, 전석장애물을 25개로 예상하여 비용항목으로 고려한 경우이다.

“전석 장애물은 터널 막장에서 커다란 전석을 만나고 굴진이 정지되고, 전석이 너무 커서 버력처리 시스템을 통해 파쇄 또는 흡입이 곤란할 때를 의미한다. 이러한 경우 막장 또는 TBM 외부를 통해 제거하여야 한다. TBM 직경의 30% 이상인 크기의 전석은 TBM을 통해 분쇄하거나 흡입하기 어려운 것으로 본다. 30% 이하의 크기는 부수적인 방법 없이 TBM을 통해 분쇄 또는 흡입이 가능한 것으로 본다.”

시공사는 전석장애물을 예상하고, 막장접근이 가능한 막장개방형 TBM을 선택하였다. 25개의 전석 장애물이 예상되었으나, 실제 71개의 전석 장애물이 나타났다. 이 지역에 실시된 시추깊이는 터널 인버트 아래 2~3m이며, 기반암 능선 표면을 파악하지 못한 것이 원인이었다. 기반암 근처 굴착으로 예상보다 매우 높게 전석 집중이 나타났다. 하지만 전석을 사전에 예상하여 막장접근이 가능한 장비를 선정하였기 때문에 추가로 발견된 전석을 제거하는 것은 문제가 되지 않았다. 추가로 발견된 46개의 전석을 발파하면서 지연된 시간에 대해 작업시간으로 보상이 이루어졌다. 입찰시 예상했던 25개의 전석에 대한 비용은 전석당 \$2,500이었으나, 추가적인 46개의 전석장애물에 대한 평균 비용은 각각

\$630에 불과했다. 이 사례를 볼 때, 전석 장애물에 대해 작업시간으로 보상하는 방법이 장애물당 단위비용으로 처리하는 것보다 합리적임을 알 수 있다.

5.7 Case7—Oak Creek Southwest Interceptor

이 사례의 경우 전석 장애물이 예상되었고, 3가지 비용항목으로 구분하여 전석장애물에 대한 보상을 고려하였다.

- 300~600mm 전석 장애물 400개
- 600~1200mm 전석 장애물 70개
- 1200mm 이상의 전석 장애물

시공사는 작은 크기와 중간 크기의 전석 제거비용에 대하여 각각 80\$와 100\$에 입찰을 하였다. 이러한 낮은 비용은 설드내에서 인력으로 터널을 굴착할 계획에 기인한다. 얼마 지나지 않아, 인력으로 터널을 굴착하는 것이 너무 어렵고 속도가 너무 느리다는 것을 알게 되었고, 막장 개방형 TBM을 동원하였다.

크기로 전석장애물을 정량화하는 방법은 정확하지 않다. 실제 이 프로젝트에서는 156개의 전석장애물이 발생하였는데, 이 중 실제 크기가 1200mm 이상인 전석장애물을 중간 크기로 간주되어, 시공사는 입찰단가 보다 시간으로 보상해야 한다고 주장하기도 하였다. 크기에 근거한 보상방법은 정확하지 않으며, 실제 발파와 제거 이후 그 크기는 정확히 측정될 수 없다. 만약 전석 장애물이 시간과 비용에 따라 보상되어 진다면, 크기는 문제시 되지 않을 것이다.

5.8 Case 8—Miller 37th & State 하수터널

전석 장애물에 대한 사항이 지반조사 보고서에 수록되어 있으며, 아래와 같이 정의된 55개의 전석 장애물이 비용 항목으로 수록되어 있다.

“전석 장애물은 전석이 너무 커서 버력처리 시스템을 통하여 파쇄 하여 흡입을 할 수 없어 굴진이 정지되거나 작업이 방해될 때 발생한다. 이 경우 터널의 입구에서 천공 또는 파쇄와 같은 보조수단 또는 터널 외부로부터의 굴착에 의해 제거해야 한다. 터널 직경의 20% 이상인 크기의 전석은 전석 장애물로 고려되어 진다. 굴착되는 터널 직경의 20%보다 작은 크기의 전석은 전석 장애물로 고려될 수 없다.”

대략 346개의 전석이 발견되었으며, 이 중, 60~65개의 전석이 전석 장애물로 고려되었다. 60여개의 전석 장애물에 대한 보상비용은 입찰시 장애물당 보상비용 3,480\$으로 산정되었으며, 터널 직경의 20%보다 작은 286개의 작은 전석들에 대해서는 보상비용으로 고려되지 않았다.

굴착 중 커터가 심하게 손상되었으며, 커터 교체를 위해 굴진을 2회 멈춰야 했으며, 커터 헤드 개구부를 통해 인력굴착을 실시해야 했다. 커터 교체로 인한 공기 지연과 추가 비용 발생에도 불구하고, 손해배상은 인정되지 않았다. 이는 지반조사 보고서에 지반의 전석 특성을 적절히 나타내고 있으며, 비용 항목으로 55개의 전석장애물을 나타내고 있기 때문이다. 실제 발생한 전석장애물은 60개로 55개와 차이가 있으나, 그 차이는 15%에 불과하다. 전석에 대한 계약상의 적절한 비용조항 및 지반조사가 선행 될 때 손해 배상으로 인한 논쟁을 최소화할 수 있음을 이 사례로 부터 알 수 있다.

6. 결론

- (1) 전석 장애물에 대한 정확한 보상비용을 산정하기 위해서는 적절한 지반조사와 물리탐사가 무엇보다 중요하며, 전석장애물이 예상된다면, 장비선정에 있어 이를 충분히 반영시켜야 한다.
- (2) 전석의 양을 결정하는 방법으로, 첫 번째 방법은 전석의 양을 터널 굴착량의 백분율로 표현하여 산정하는 방법이며, 두 번째 방법은 터널 굴착량에 대한 전석의 백분율을 결정하기 위해, 시추작업시 분석된 전석 빈도를 이용하여 반경험적 상관관계로부터 예측하는 것이다.
- (3) 전석장애물을 제거하는 방법으로 측방으로 밀어내는 방법, 원상태로 수집하는 방법, 분쇄 후 처리하는 방법, TBM 외부에서 천공홀 등을 이용하여 접근 후 처리하는 방법 등이 있다.
- (4) 전석장애물은 발파 후 그 크기를 정확히 측정할 수 없으며, 예상 제거비용과 실제 비용의 차이가 있는 점을 볼 때, 전석장애물의 보상방법에 있어서 체적 또는 무게를 이용한 전석장애물 제거 비용 산출은 합리적이지 못하며, 작업시간에 따른 보상비용 산출이 논란을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 향후 합리적인 전석탐지 시스템의 개발이 필요하며, 전석장애물로 인한 보상비용을 설계단계에서 반영하려는 노력과 함께 전석을 효과적으로 분쇄할 수 있는 커터 및 TBM 장비 개발이 요구된다.

참고 문헌

1. Hunt, S.W. & Angulo, M. (1999), "Identifying and Baselineing Boulders for Underground Construction", In Fernandez, G. & Bauer (eds). Geo-Engineering for Underground Facilities:25w5-

270. Reston, Virginia:ASCE.
2. Brierley G.S., Howard, A.L. & Romley R.E. (1991), "Subsurface Exploration Utilizing Large Diameter Borings for the Price Road Drain Tunnel", Proceeding 1991 Rapid Excavation and Tunneling Conference, Chapter 1, pp.3-15, Littleton Colorado:SME.
3. Castro, R, Webb, R & Nonweiler, J. (2001), "Tunneling Through Cobbles in Sacramento, California", Proceeding 2001 Rapid Excavation and Tunneling Conference, pp.907-918, Littleton Colorado:SME.
4. W. R. JEE (2001), "Design of the Slurry Type Shielded TBM to Excavate the Alluvial Strata in Downtown Area", International Symposium on Application of Geosystem Engineering, Seoul Korea.
5. W. R. JEE (2003), "Boulder Detection Technologies and its Treatments in Soft Ground Tunneling", International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, November, 18-19, 2003, Seoul, Korea.
6. W. R. JEE (2001), "Design Report of Seoul Metro Line" No.9, Lot 909, April, 2001, Seoul, Korea.
7. W. R. JEE (2004), Slurry Type Shielded TBM for the Alluvial strata excavation in downtown area, North American Tunneling 2004, 73-78, USA.