

터널내 탄성파 반사법 탐사(TSP)와 TBM 굴진 자료의 상관성 검토 연구 고찰

지왕률, 최재화 (태조엔지니어링)

1. 서론 (Introduction)

터널 엔지니어는 항상 터널 막장면 전방을 예측함으로써 위험요소를 최소화 하고, 위험요소에 대한 대처 계획을 수립함으로써 사고를 미연에 방지하고 공기 지연에 따른 공사비 증대를 최소화 하고자 한다. 따라서 터널 엔지니어는 터널 굴착 공정에 영향을 주지 않으면서 터널 정방을 예측할 수 있는 방법들을 지속적으로 모색하게 되었으며, 신속하고 경제적인 터널 막장면 전방 예측 기법 중 하나로 터널내 탄성파 반사법탐사(TSP : Tunnel Seismic Prediction, HSP : Horizontal Seismic Profiling) 공법 등이 이미 전통적인 굴착공법 (NATM)에서는 일상적으로 적용하고 있다.

최근 터널 기계화 시공 공법인 TBM을 이용한 터널 굴착 기술은 중공업 산업의 발달에 따른 유압 장비의 대형화, IT 기술을 접목한 TBM 장비 제어 기술 발달, 소재 개발에 따른 커터의 강도 및 내구성 증대, 세그먼트 라이닝의 강도증대 및 방수성 향상, 계측 장비의 정밀성 증대에 따른 사전 위험 요소 예측 향상 등 장비의 성능은 향상되면서 장비의 가격은 오히려 제작사의 증가에 따라 내려가는 시대가 되었다.

TBM 굴착 직경도 과거 약 30년 전 전에는 약 4m 이내의 소규모 유틸리티 터널 위주로 굴착이 되었다면, 최근에는 19m 이상 되는 대규모 교통 터널까지 그 영역이 확대 되고 있다. <표. 1>

표 1. TBM 장비의 발전 현황

TBM 사양	과거 (약 30년 전)	최근 (1990년대 후반 이후)
직경	약 4~5m Utility Tunnel	약 10~19.2m Traffic Tunnel
TBM 종류	-암반 : Open TBM -연약지반 : Shield TBM	"Shield Type" 암반용 TBM의 적용 (1981년부터)
Disc Cutter 직경	14인치 이하	19인치까지 개발 (최대 하중용량 3배 증가)
TBM Power	- 30년 전과 비교 시 약 3배 이상 증가 - 지반조건의 변화에 따라 회전속도와 회전력의 원활한 조절 가능	
Cutter Head 회전속도	- 30년 전과 비교 시 2배 이상 증가	

이러한 기계화 시공의 눈부신 발달로 TBM 굴진율은 공기 및 공사비에 가장 핵심적인 변수로 사용되고 있으며, TBM 공법의 특성상 막장면을 육안으로 확인하기 어려운 상황에서 터널내의 막장 전방 예측 기술은 더욱 필요하게 되었다.

$$\text{굴진율(Performance)} = \frac{\text{굴진거리(m)}}{\text{단위시간(Day, Week, Month)}} \quad \text{<식-1>}$$

굴진율은 시간에 대한 거리로 단위로 보면 속도(m/day)의 개념과 일치한다. <식-1>

굴진율을 좌우하는 TBM 사양을 보면 Cutter Head의 RPM에 따른 암반의 굴착 깊이, 1 Cycle을 좌우하는 세그먼트 폭, 버력 반출에 따른 컨베이어 벨트 속도 및 용량, TBM Thrust Cylinder 길이 및 배치, Backup System, 물류 운송 계획, 무엇보다 현장 지반에 적합한 면판의 설계 등 이 모든 것이 서로 유기적으로 연관되어 운영될 때 비로소 최대의 굴진율을 발휘 할 수 있다.

최근에는 계측 기술의 지속적인 발달로 TBM 헤드부에 센서를 부착하여 <그림. 1> 터널 전방을 예측하는 기법들이 적용되고 있으며, 획득한 데이터는 자료처리를 통해 이미지로 이벤트를 확인 할 수 있다. 이러한 자료들은 암반의 구조적 특성과 관련성이 높으며 또한 TBM의 굴진관련 데이터는 터널내 탄성과 탐사에서 취득한 속도 및 반사 이벤트와 상관성이 나타난다.

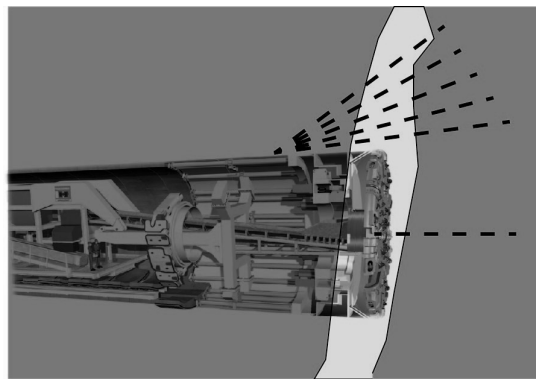


그림 1. TBM 장비의 전방 예측 모식도

암반의 구조적 특성, 탄성과 속도 자료, TBM 굴진 관련 데이터의 상호 상관성을 파악하는 것은 지반 리스크를 감소시키는 매우 중요한 정보가 된다.

2. 터널 굴착에서의 탄성파탐사 (Seismic Exploration During Tunnelling)

터널내 탄성파 반사법 탐사의 원리는 기본적으로 지표에서 수행하는 탄성파 반사법 탐사의 기본 원리와 같으나 송신기와 수신기가 터널의 벽면에 존재하는 점이 다르다.

터널내 탄성파 반사법 탐사(TSP/HSP)는 송신원으로 뇌관을 이용한 발진 방법이 주로 사용되며 3축 센서를 이용한 수신기는 직접 전파되어지는 P파 및 S파도 측정하고 막장 전방의 밀도나 탄성파 속도가 다른 매질에서 반사되어온 반사파도 수신하게 된다.<그림. 2> 이렇게 측정되어진 탄성파 자료는 주시와 반사파 추출 자료처리 과정을 통해 구조적 암반 특성을 예측하게 된다.

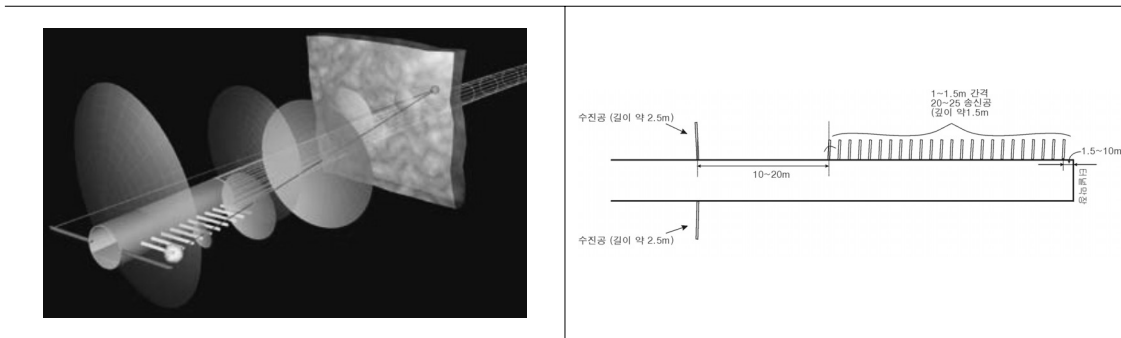


그림 2. TSP 데이터 측정 모식도

통상적으로 발진은 24개 지점에서 발생시키며, 수신은 2개의 3축 센서를 이용하여 취득하게 된다. 다수의 송신(TSP 측정방식)을 통한 데이터 측정 시 소요되는 시간을 최소화하기 위해, 수신기 센서를 여러 개 설치하고 송신원을 줄여 측정하는 방식(HSP 측정방식)도 적용되어 지고 있다. <그림. 3>

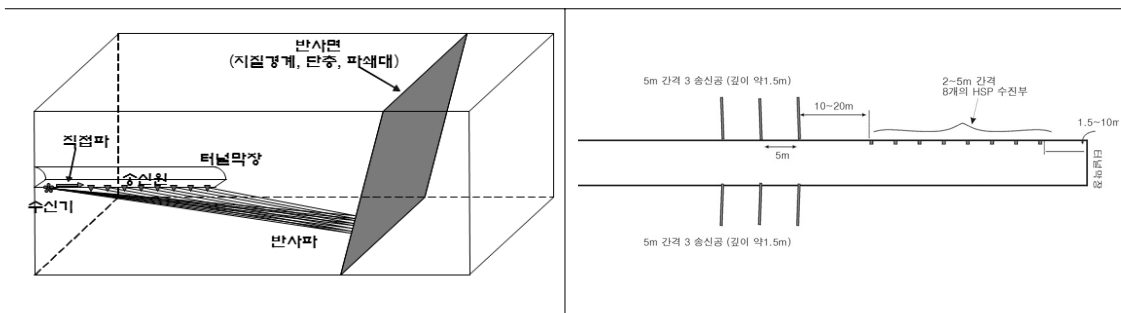


그림 3. HSP 데이터 측정 모식도

탄성과 데이터를 현장에서 획득하기 위해서는 가능한 터널 굴착 공정에 영향을 주어서는 안 되며, 송수신 배열도 현장 여건에 맞게 조절해야 한다. 현장 여건은 데이터를 취득하기 위한 최적의 조건을 유지하기 어렵고 따라서 노이즈가 함께 취득되는 경우가 많다. 데이터를 해석하기 위한 자료처리 시는 항상 노이즈가 함께 취득됨을 염두 해 두고 세심한 자료처리가 필요하다.

4. 탄성파 자료처리 (Short Outline Of Seismic Data Processing) 및 결과

현장에서 획득한 자료는 반사파가 잘 나타나는 형식의 취합형태로 변환한다. 자료중 반사면 영상화에 불필요한 직접파와 현장 잡음 등은 제거하고 주 대상인 반사파를 증폭하는 자료처리를 수행한다.

탄성파 반사법 자료 처리는 암반의 물성이 변화되는 구간인 파쇄대, 공동 등과 같은 지점에서

의 반사 이벤트를 찾는 과정으로 속도 모델 설정, 필터링, 마이그레이션(구조보정) 등과 같은 자료 처리 관정을 수행한다. 자료 처리를 하기 전에 사전 작업 (Pre-processing)을 통해 송신원 및 수신기 위치에 대한 입력 정보 및 암반의 탄성과 속도를 정확히 입력하여야 한다.<그림. 4>

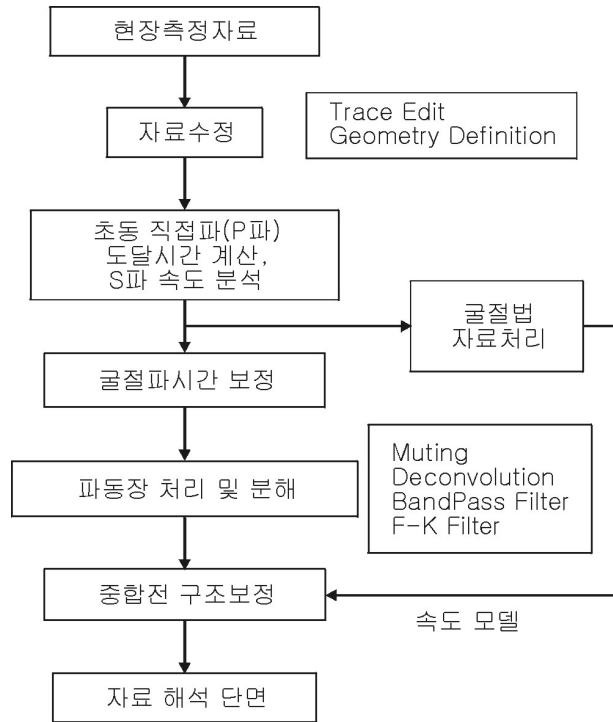


그림 4. 터널내 탄성과 반사법 탐사 해석 Flow Chart

이러한 일련의 자료 처리 과정을 거쳐 3차원 자료 처리를 수행하면 밀도와 속도의 차가 발생되는 단층파쇄대와 같은 경계면에서 발생한 반사파만이 증폭되어 결과를 보여 주게 된다. <그림. 5>

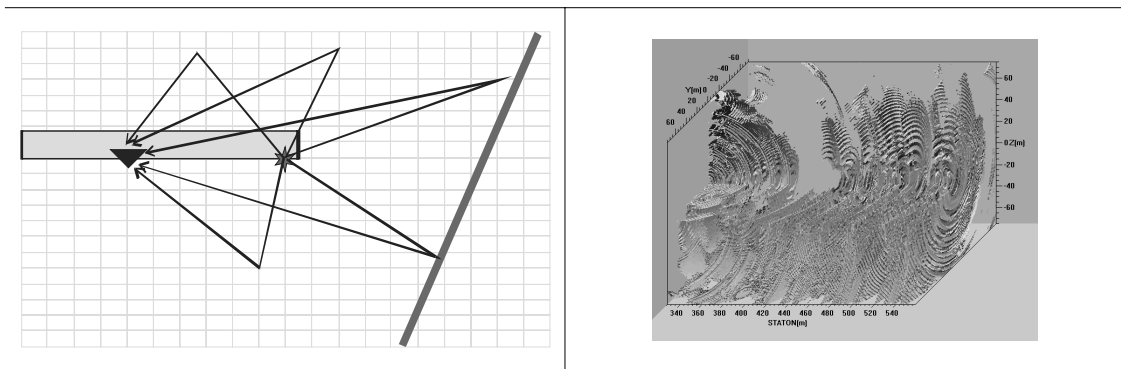


그림 5. 터널내 탄성과 탐사 반사파 이벤트 결과도

5. 터널내 탄성과 데이터와 TBM 굴착 데이터 상관성

TBM 굴착시 커팅 작업은 암반의 구조적 특성과 밀접한 관련이 있으며 굴진 관련 운영 변수는 암반의 물성값을 연속적으로 반영하며 측정되어진다. TBM 운영 관련 변수로는 Thrust Force, Torque, Penetration 등이 있다.

수차례 TBM 운영 중 측정되는 각각의 변수들을 실내시험을 통해 암반의 구조적 특성인 압축강도 및 정량분석 결과 값을 측정 비교하여 상관성을 파악하려 했지만, 관련성을 찾기는 쉽지 않아 제한적으로 평가 되어 사용되어 왔다.

그러나 암석의 체적 볼륨을 굴착하는데 필요한 에너지로 정의되는 비에너지 SE(Specific Energy)는 TBM 굴착과 연관성이 있는 암반의 압축강도, 인장강도, 연마도, 취성도, 절리, 불연속면 등과 관련성이 있는 것으로 나타나며 따라서 SE는 TBM의 굴착에 대한 전반적인 것을 대변해 준다.
(식-2)

$$SE = \frac{T}{P \cdot 0.3 \cdot DNS} \quad (\text{식-2})$$

T : Torque, N : Cutter Number

P : Penetration, S : Cutter Distance, D : Diameter

Thrust Force 로 유도 시 (식-3)와 같다.

$$SE = const * \frac{F}{(\sqrt{P} \cdot 0.3DNS)} \quad (\text{식-3})$$

F : Thrust Force

<그림. 6> 그래프는 Torque와 Thrust로 유도된 SE의 상관성을 보여주고 있다. 데이터는 Hard Rock TBM 의 굴진관련 자료를 3km 구간에서 취득하였으며, <식-2>, <식-3>를 이용하여 산출한 SE 평균값을 무차원 상수로 나타내어 회귀분석 한 결과이다.

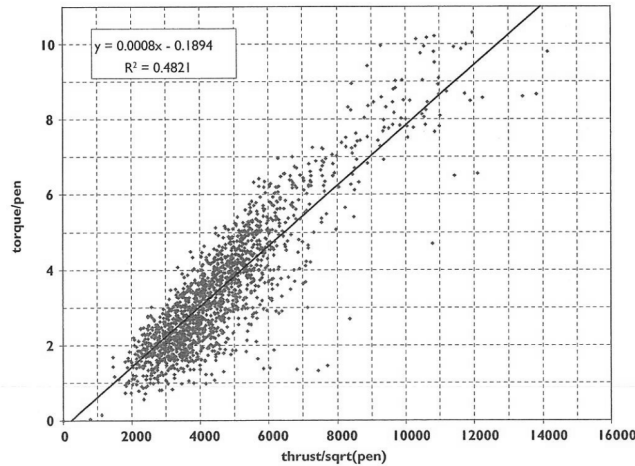


그림 6. Torque와 Thrust Force의 SE (Specific Energy) 상관 그래프

SE가 지반의 물리적 구조적 특성과 관련성이 있음을 파악한 후 TBM 데이터는 탄성파가 암질의 특성과 관련이 있으므로 막장 전방의 암질을 예측하는데 활용되고 있다.

그러나 TBM 굴진 자료는 터널 축을 따라 연속적으로 측정이 되는 반면, 터널내 탄성파 탐사는 암반의 물성치가 변화되는 즉 임피던스가 변화되는 구간에서만 반사가 이루어지는 현상을 파악함으로 다소 한계성이 있다.

이러한 한계성에도 불구하고 TBM 굴진에서 취득한 SE와 터널내 탄성파 탐사 결과와는 <그림. 7> 그림과 같은 상관성이 나타나고 있다.

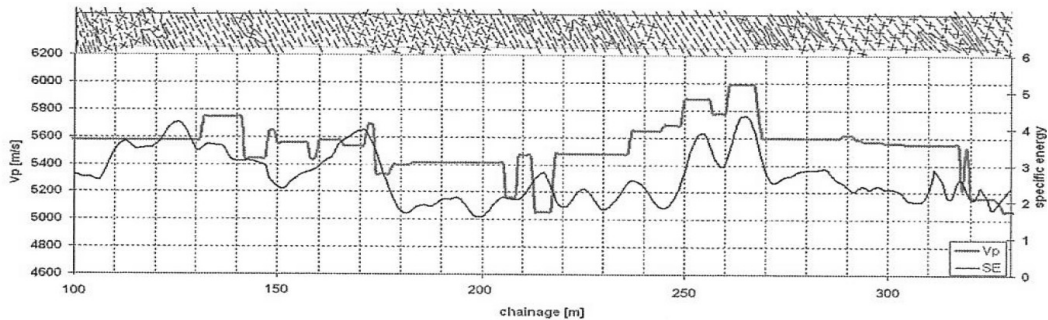


그림 7. Vp 속도와 SE(Specific Energy) 변화 그래프

이 단면은 TSP 탐사 속도 모델 분석을 통해 얻은 Vp와 경암 구간에서 취득한 TBM의 SE의 상관성을 보여주고 있다. 두 개의 그래프 경향을 보면 전반적으로 패턴이 일치하는 것을 알 수 있다.

측선 180~240m 구간의 Vp 저속도 구간에서 SE가 낮게 나타나고 있고, 170m 지점에서 급격하게 SE가 낮아지는 경향이 잘 일치하고 있다. 특히 255m, 265m 지점에서의 결과는 그래프의 패턴이 매우 잘 일치함을 볼 수 있다.

단층대가 분포하는 연약대 지역에서의 Vp 변화 그래프와 SE를 비교한 그래프를 보면 <그림. 8>과 같다.

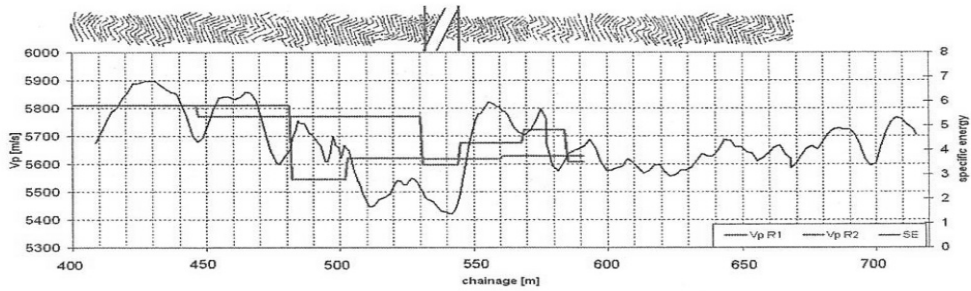


그림 8. 터널 벽면 양쪽에서 취득한 Vp 속도와 SE(Specific Energy) 변화 그래프

단층파쇄대가 분포하는 STA. 0+530~545 구간에서 SE가 급격하게 감소됨을 알 수 있고, Vp 또한 뚜렷한 감소 경향을 나타내고 있다. 그러나 터널내 탄성과 탐사의 경우 지오폰의 위치에 따라 단층파쇄대의 정확한 위치를 지정하기에는 다소 모호한 것도 사실이다. 이것은 단층파쇄대의 경계가 복잡한 지오메트리를 가짐으로써 발생한 것으로 생각되며 이러한 것은 양쪽 수진기에서 취득한 데이터를 3차원 해석을 통해 보다 정확한 결과를 산출 할 수 있다.

SE는 단층파쇄대 구간에서 뚜렷한 경계를 나타내고 있다.

두 가지의 지반 조건을 고찰해 보면 TBM 굴진과정에서 취득한 SE는 지반의 물성치와 매우 유사한 경향을 연속적으로 나타내는 반면, 터널내 탄성과 탐사 결과는 지반의 물성치가 변화하는 경계 조건에서 뚜렷한 이벤트가 나타나고 있으며 전반적으로 SE와 탄성과 탐사에서 취득한 Vp의 그래프 패턴은 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

5. 결론 (Conclusion)

국내의 경우 이미 터널 현장에서 터널내 탄성과 반사법 탐사(TSP/HSP)를 전통적인 굴착 공법인 NATM 현장에서는 많이 적용하고 있으며 암반의 물성 변화 구간이 뚜렷한 단층 파쇄대와 같은 이상대 구간에서 뚜렷한 반사 이벤트를 탐지하고 있다. 그러나 TBM 현장의 경우는 모델 실험과는 달리 데이터 취득 자체에 제약이 많이 있으며, 무엇보다 중요한 것은 현장에서 데이터 취득 시 주변의 노이즈가 없는 상태에서 양질의 데이터를 취득하기가 쉽지 않다는 것이다. 또한 탄성과 자료 처리에 필요한 속도 분석, 노이즈 필터링과 같은 작업에서 데이터와 노이즈를 구분하기 위해서는 세밀한 자료처리 과정을 거쳐야 하고 최종적으로 마이그레이션 (구조 보정) 작업을 통해 지질적 변화 구간의 정확한 위치를 파악하여야 한다.

최근에 TBM을 이용한 터널 굴착 공법이 해외에서는 이미 주류가 되었으며, 국내에서도 점차로 소규모 유틸리티 터널에서 대규모 교통 터널까지 적용을 시도하고 있다.

Shield TBM의 경우는 전통적인 NATM 공법과 달리 굴착 과정에서 Torque, Thrust Power, Penetration 등 지반 상태에 대한 정보를 지속적으로 파악할 수 있다. Vp속도의 변화는 SE와 연계 해석함으로써 이상대 구간을 보다 정밀하게 해석할 수 있으며, 3축 센서를 통한 3차원 해석 시 보다 정밀한 결과 도출이 가능하다.

그러나 Shield TBM 경우 굴착과 동시에 거의 동시에 세그먼트로 라이닝을 설치함으로써

전통적인 굴착방법에서 적용하는 탄성과 탐사를 동일하게 기계식 굴착공법인 Shield TBM에서 적용하기에는 센서를 부착하거나 송신원을 발생시키기에는 공간적인 제약이 많은 것이 사실이다. 따라서 터널내 탄성과 탐사도 기계화 시공에 맞는 장비의 개량이 필요하며 무엇보다 TBM 굴착 과정에서 파악되어지는 Thrust Power, Torque, Penetration 등과 같은 자료에 대한 정량적인 분석과 이에 대한 Database 구축이 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Thomas Dickmann & Robin Groschup - "Tunnel seismic exploration and its validation based on data from TBM control and observed geology", Technology innovation in underground construction PP189~201 (2010년)
2. 한국건설기술연구원 -TBM 핵심 설계·부품기술 및 TBM터널의 최적건설기술 (2010년)
3. 한국터널공학회 터널공학 시리즈 3-터널기계화 시공설계편, 도서출판 씨아이알 (2008년)
4. 지왕률, 김도영 -"차세대 고속굴착 HP TBM의 설계 및 시공적용" 제 7차 터널기계화시공기술 심포지엄 논문집 PP 61~71 (2006년)
5. 한국터널공학회 - 터널내 탄성과 탐사를 이용한 전방 지질 예측 및 평가 (2001년)