

3차원 스캔을 이용한 터널계측의 경제성에 관한 연구

A Study of Economic Aspects on 3-D Scanning Measurement during Tunnel Construction

최원일* · 박근영** · 조국환***

Choi, Won Il · Park, Geun-Young · Cho, Kook-Hwan

Abstract

D&B(Drill & Blast) method in tunnel construction requires accurate and rapid measurement of the ground movement, which is essential for feedback analysis. Case study and adaptability of IT technique for tunnel survey are discussed in this paper. The application of laserscannig and existing light wave instrument method in the field of tunnel construction were reported in several advanced country including Austria and Japan. Survey for the shoulder movements by IT survey method was conducted at a sub-way construction site and the results were compared to the conventional method. Also, the economic aspects of laserscannig method were analyzed using measured data which were categorized by expenses, frequency, interval and period in the field of construction. Therefore IT survey solution may contribute to execute more economic and safe construction

Key words : Tunnel survey, Feedback analysis, Laser scanner, Economical survey

요 지

D&B(Drill & Blast) 공법은 터널 시공시 현장지반조건에 대한 신속한 대응능력이 장점으로서, 정보화 시공에 의한 피드백해석(feedback analysis)이 필수적이며 이때 터널변위에 대한 신속하고 정확한 계측이 요구된다. 본 연구에서는 터널내공변위 계측에 있어서의 기존계측 사례와 첨단 IT기법을 이용한 계측사례의 비교·분석을 통한 적용성을 분석하고자 하며 적용성 평가를 위해 00지하철 현장에서 내공침하 비교계측실험을 실시하였다. 또한, 계측비용, 계측빈도, 계측간격, 계측기간, 계측소요시간 등을 평가항목으로 선정하여 실제 현장터널의 내공 및 천단변위 계측시 소요되는 계측 영역의 내역자료를 통해 경제성을 분석하였다. 따라서 터널 시공시 기존방법에 비해 보다 안전하고 경제적인 시공에 기여함으로써 첨단 IT기법을 응용한 레이저스캐너의 현장 적용성이 높다고 판단된다.

핵심용어 : 터널 계측, 피드백해석(feedback analysis), 레이저스캐너, 경제성 분석

1. 서 론

최근 국가적인 여객 및 물류 수요의 증가로 인해 국가기간 교통망의 확충 및 다양한 종류의 교통 수요가 요구되고 있다. 특히 정확하고 안정하며 대량적인 수송면에서 가장 인정을 받고 있는 철도에서 그 수요가 증가함에 따라 지하철 터널공사는 지속적으로 증가하고 있다. 따라서 인간의 능력과 기계의 성능을 종합하여 공학적인 정보수집 및 결과를 분석·평가하는 터널계측은 터널 안정성을 파악하고, 필요한 경우 시공에 그 결과를 반영, 재설계하여 보다 경제적으로 안전한 터널시공을 도모할 수 있는 매우 중요한 공정이다. 이에 본 연구에서는 현재 터널계측의 첨단조사기법을 분석하고, 시공 품질 개선방향 등 현장 적용성, 비용측면의 경제성에 대한

분석을 통하여 현장에서 적용할 수 있는 터널계측방법에 대한 연구를 수행하였다.

2. IT기법을 활용한 NATM터널에서의 계측

NATM의 기본원리상 터널시공이 현장계측결과에 따라 탄력적으로 지보패턴의 변경과 보강대책이 이루어져야 한다. 그럼에도 불구하고 현재 국내의 터널현장에서 현장계측이 제구실을 다하고 있지 못하고 있는 것은 한정된 계측예산 내에서 효율적이고, 경제적인 계측관리가 이루어지지 않고 있기 때문이다. 터널 선진국에서는 이미 이러한 문제점을 극복하기 위하여 많은 연구를 거쳐 IT를 이용한 새로운 계측시스템을 개발하여 현장에 성공적으로 적용하고 있다. 따라서 국내의

*한국시설공단 수도권 본부 차장(E-mail: choiwi@krnetwork.or.kr)

**서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정

***정희원 · 서울산업대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수(교신저자)

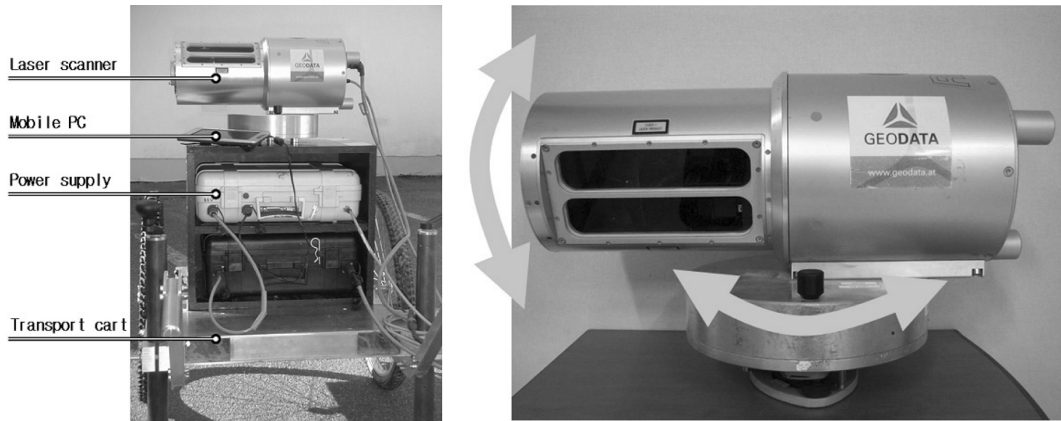


그림 1. 레이저스캐너

터널현장에서도 계속이 터널의 시공관리와 안전관리의 수단으로 제자리를 찾기 위해서는 재래식 계측시스템의 한계를 탈피 할 수 있는 IT를 이용한 새로운 계측시스템의 도입이 이루어져야 하겠다.

3. 계측기법

여기에서는 기존 계측기법 중에서 널리 사용되고 있는 광파측량기와 IT를 이용한 터널계측 방법으로 사용되고 있는 단면측정기(Profilometer)인 레이저스캔 각각의 특징 및 측정 원리 등에 대해 분석하였다.

3.1 광파측량기

광파기를 이용한 3차원 변형 측정 기술은 좌표점을 Targets System을 이용하여 터널 네트워크의 좌표시스템과 일치되게 계산함으로써 절대적인 변형값을 측정할 수 있다. 또한 광파기를 이용한 3차원 측정은 중장비를 동원하지 않고 한 명의 측정인원으로 작업이 가능하다. 이밖에 기존의 측정 방식과 비교하여 3차원 변형측정시스템의 평가 및 분석과 관련한 중요한 장점은 설치 및 유지 보수에 있다. 3차원 측정 타깃(Targets)은 보통 단 한 번에 설치로 유지관리 되지며, 오차율을 감소시키는 장점이 있다(우종태, 2004).

3.2 레이저스캐너

3차원 레이저스캐너는 레이저빔을 초고속 회전거울에 반사시켜 분산 주사함으로써 무수히 많은 관측점의 위치를 동시에 관측한다. 기계점으로부터 관측점까지의 수평각, 연직각 및 사거리를 측정 한 후 소정의 소프트웨어에 의해 후처리 방식을 수행하여 3차원 좌표위치를 결정한다.

수평각 및 연직각은 모터에 의해 스캐너가 일정한 간격으로 자동회전되어 관측되며, 사거리를 종래의 토탈스테이션과 동일한 방법으로 시간차측정(Time of Flight)방식 또는 위상차측정(Phase Measurement)방식에 의해 관측된다.

시간차 측정방식은 레이저를 발사하여 반사되어 돌아오는 시간차와 레이저 속도의 곱으로 거리를 관측하는 방법으로 가장 널리 사용되고 있는 방식이다. 그러나 이 방식은 특성상 가까운 거리에서 위상차측정방식에 비해 약 2mm 가량

표 1. 레이저스캐너 주요 장비사항

항목	사양
해상도 (Measurement resolution)	5 mm
측정범위 (Measurement range)	1 ~ 200 m
측정속도 (Measurement rate)	12,000 pts/sec

정확도가 떨어지는 단점이 있다.

또한 위상차측정방식은 레이저빔을 발사하여 반사되어 오는 위상의 개수에 최종 파장의 위상차를 더하여 거리를 관측하는 것으로 시간차측정방식에 비하여 정확도가 다소 높다(김인섭, 2007).

3.3 레이저스캐너의 사양

일반적으로 터널 현장이 분진, 진동, 지하수 누수, 습도, 낙석발생 등으로 인해 정밀장비에 대해서는 열악한 사용조건임을 감안할 때, 터널 레이저스캐너는 야외에서 사용되는 일반 스캐너에 비해 우수한 내구성을 요구한다. 특히 터널에서의 분진, 누수 및 낙석의 위험조건을 고려할 때, 견고한 하우징 및 방수기능은 필수적 요구 사항이며 레이저스캐너의 자세한 사양은 다음 표 1과 같다.(GEODATA, 2006)

레이저스캐너의 이동을 위해 픽업트럭에 거치하거나, 그림 1과 같이 손수레에 거치하는 두 가지 방법이 사용된다.

4. IT기법을 이용한 계측의 현장 적용성 분석

4.1 지층개요

연구구간은 지표로부터 매립층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층의 순서로 분포하고 있으며, 편마암이 기반암으로 분포하고 있고 어느 정도의 차이는 있으나 오랜 기간 풍화를 받아 형성된 풍화대층이 두껍게 분포하고 있으며 실시설계 및 보완 실시설계 지반조사를 근거로 추정된 구간별 지반조건은 표 2와 같다.

4.1.1 매립층 및 풍화토층

매립층은 지표면 아래 2.4 m~4.5 m 심도에 분포한다. 구성토질은 잔자갈 섞인 모래로 구성되어 있으며 표준관입시험시 매우 느슨 내지 느슨한 상대밀도를 나타낸다. 풍화토층은 지

표 2. 구간별 지질특성

구분		4 km 360	4 km 473	4 km 514 4 km 630
구조물		본선터널	환기구	본선터널
지반조건	상단	풍화토	-	풍화토, 풍화암
	상반	풍화암	-	풍화토, 풍화암
	하반	풍화암, 연암	-	풍화암, 연암, 경암

표면 아래 2.4 m~4.5 m 심도에서 14.7 m~23.9 m 심도 사이에 분포한다. 심한 풍화를 받아 토사화된 층으로 구성토질은 실트 섞인 모래로 구성되어 있으며 표준관입시험시 느슨 내지 매우 조밀한 상대밀도를 나타내며 하부로 갈수록 조밀해진다. 두개의 층 모두 색깔은 암갈색을 띠며 습윤 상태이다.

4.1.2 풍화암층

풍화암층은 지표면 아래 14.7 m~23.9 m 심도에서 21.0 m~25 m 심도 사이에 분포하며 구성토질은 실트 섞인 모래로 파쇄된다. 표준관입시험시 N치가 50회/9~6 cm로 매우 조밀하며 색깔은 암갈색을 띠고 있다.

4.2 레이저스캐너의 계측 정확성

터널 공사에서의 계측은 막상면 및 주변 지반, 전체 터널 구조물의 거동에 대한 신뢰할만한 자료가 신속하게 시공에 반영 되도록 하는 것이 중요하며, 이때 자료의 신뢰성을 확보하기 위해 계측기기의 정확성은 매우 중요하다. 따라서 실제 터널 공사 현장에서 레이저스캐너의 적용성을 분석하기 위해, 레이저스캐너를 광파측량기와의 계측 정확성을 기준으로 비교하였다.

그림 2에 나타난 바와 같이 본 구간에서 레이저스캐너 측정값 오차의 절대값을 평균하면 약 2.22 mm, 오차의 표준편차는 약 2.62 mm로 나타났다. 따라서 레이저스캐너의 측정값은 약 2~3 mm의 오차범위 내에서 광파기의 측정값과 일치

하는 경향을 보임으로써 계측치의 정확도 측면에서 현장 적용이 가능하다고 판단된다.

5. IT기법을 이용한 계측의 경제성 분석

앞에서 레이저스캐너의 터널현장 계측 적용성에 대해서 분석하였다면, 여기서는 경제성의 측면에서 레이저스캐너의 특성을 분석하였다. 기존 계측방법과 IT기법을 이용한 계측방법과의 경제성 비교 분석을 위해 기존방법의 경우 현재 터널현장에서 일반적으로 사용하고 있는 광파계측기를 대표 기기로 선정하였으며, IT기법으로는 현재 터널계측방법으로 사용되고 있는 단면측정기(Profilometer)인 레이저스캐너를 적용하였다. 광파계측기와 레이저스캐너의 직접적인 비교 분석을 위해서 현재 공사 중인 서울지하철공사 00현장터널의 내공 및 천단면위 계측시 소요되는 계측비용, 계측빈도, 계측간격, 계측기간, 계측소요시간을 평가항목으로 선정하여 계측용역의 내역 자료를 통해 경제성을 분석하였다.

5.1 터널연장에 따른 계측비용 분석

터널연장에 따른 계측비용 분석을 위해 계측비용에 영향을 주는 다른 요인(계측기간, 계측간격, 계측빈도)은 일정하다고 가정하였다. 즉, 본 분석의 경우 모든 구간에서 계측기간은 300일, 계측빈도는 1회/일, 계측간격은 5 m로 일정하다고 가정하였다. (실제 현장에서는 필요에 따라 구간별로 계측기간과 계측간격이 달라질 수 있다.)

다음 그림 3에 나타난 바와 같이 광파기와 레이저스캐너의 터널연장과 계측비용의 관계를 그래프로 도시해 보면, 광파기와 레이저스캐너 각각의 초기 투자비용이 y절편이 되고 초기 투자비용을 제외한 터널 단위길이당 계측비용이 기울기가 되

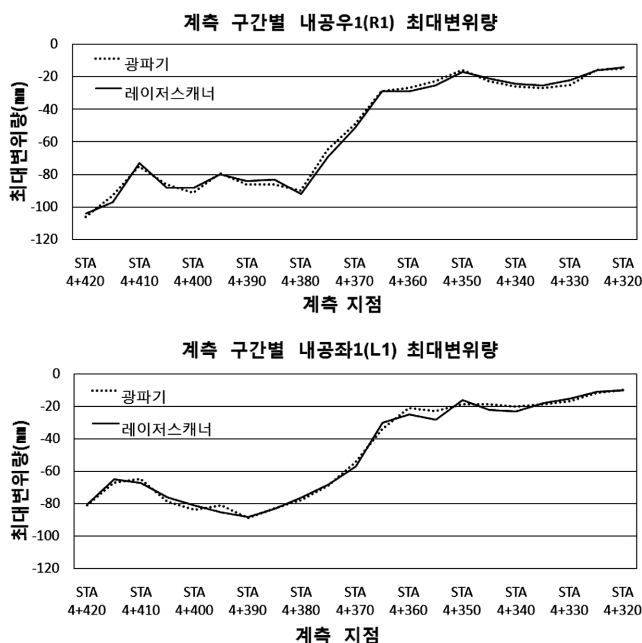


그림 2. 광파기와 레이저스캐너의 계측자료 비교

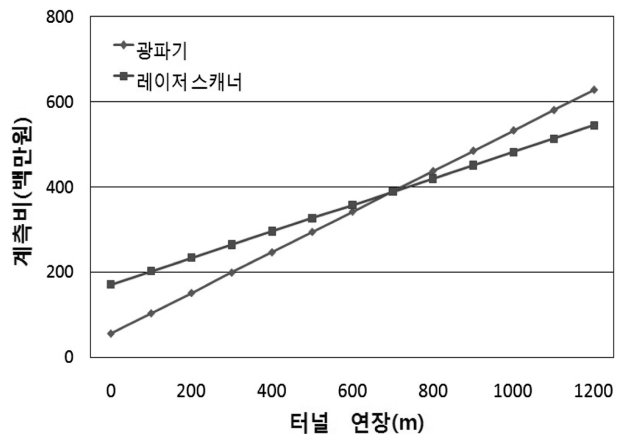


그림 3. 터널연장에 따른 계측비용

는 직선에 가까운 그래프가 만들어진다.

분석한 결과, 계측기간 300일 기준으로 터널연장이 약 600 m인 지점을 분기점으로 600 m 미만일 경우에는 레이저스캐너의 높은 초기 투자비용으로 인하여 광파기를 이용한 계측이 보다 경제성이 있으며, 600 m 이상일 경우에는 레이저스캐너를 이용한 계측이 보다 경제성이 있는 것으로 판단된다. 이는 광파기를 이용한 계측은 터널굴착이 진행됨에 따라 계측의 기준점이 되는 반사 타깃을 지속적으로 설치해 주어야 하기 때문에 터널연장이 길어질수록 추가적인 계측비용이 발생하게 되는 반면, 레이저스캐너는 기준점에 대한 단순 점 좌표가 아닌, 스캔을 통해 스펙트럼 벽면에 대한 직접적인 point-cloud를 수집하기 때문에 기계점 계산을 위한 최소한의 반사 타깃만을 필요로 하므로 그 운용비용이 상대적으로 적게 드는 것으로 나타났다.

5.2 계측빈도에 따른 계측비용 분석

일반적으로 터널굴착 후 경과된 시간, 터널굴착의 진행속도, 주변지반의 지질학적 상태, 지질의 변화정도, 변위의 수렴시기 등의 상황에 따라 계측빈도를 적절하게 조정하게 된다. 여기에서는 계측빈도에 따른 계측비용의 변화를 분석하기 위해 전체 터널구간에 같은 계측빈도를 적용시킨다고 가정하였다. 또한 계측빈도 외에 계측비용에 영향을 주는 다른 요인(터널연장, 계측기간, 계측간격)은 일정하다고 가정하였다. 터널연장은 1000 m, 계측기간은 300일이며 터널 전 구간의 계측간격은 5 m로 일정하게 설정하였다.

$$\text{계측빈도} \times \text{계측기간} = \text{실제 계측일수} \quad (1)$$

$$\text{실제 계측일수} \times \text{1일당 계측비용} = \text{총 계측비용} \quad (2)$$

식 (1), (2)로 1일당 계측비용으로부터 계측빈도에 따른 총 계측비용의 변화를 알 수 있다.

다음으로 그림 4는 광파기와 레이저스캐너의 계측빈도와 계측비용의 관계를 나타낸 그래프이다. x축은 1개월 당 계측빈도(회/30일)를 나타내고, 터널연장에 따른 계측비용과 마찬가지로 광파기와 레이저스캐너 각각의 초기 투자비용이 y절편이 된다.

터널연장 1000 m, 계측기간 300일, 계측간격 5 m를 기준으로 10회/월의 계측빈도를 분기점으로 10회/월 이상의 계측

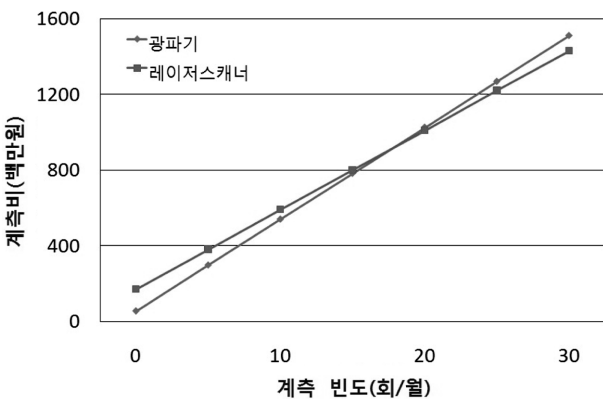


그림 4. 계측빈도에 따른 계측비용

빈도가 필요한 현장에서는 레이저스캐너가 보다 경제성이 있는 것으로 분석되었다.

5.3 계측간격에 따른 계측비용 분석

계측간격에 따른 계측비용의 변화를 분석하기 위해, 계측간격 외에 계측비용에 영향을 주는 다른 요인(터널연장, 계측기간, 계측빈도)은 일정하다고 가정하였다. 터널연장은 1000 m, 계측기간은 300일, 계측빈도는 1회/일로 설정하였다. 광파기의 경우, 하나의 터널단면을 계측지점으로 하며, 1개소의 계측지점 당 5개의 계측점을 측정한다.

다음 그림 5에 나타난 바와 같이 광파기와 레이저스캐너의 계측간격과 계측비용의 관계를 그래프로 도시하였다. x축은 계측간격(m)을 나타내고, 앞서서와 마찬가지로 광파기와 레이저스캐너 각각의 초기 투자비용이 y절편이 된다.

그림 5에서 볼 수 있듯이, 터널연장 1000 m, 계측기간 300일, 계측빈도 1회/일을 기준으로, 계측 간격이 5 m 이하일 경우에는 레이저스캐너가 보다 경제적인 것으로 분석되었다.

광파기를 이용해 계측을 할 때는, 하나의 터널단면마다 천단·내공변위측정을 위해 5개의 반사 타깃을 설치해 주어야 하므로, 계측간격이 좁아질수록 추가적인 자재비와 인건비가 요구될 수밖에 없다. 하지만 레이저스캐너는 1회당 20 m내의 계측점들을 연속적으로 측정하기 때문에 계측간격에 따라서 추가적인 계측비용이 발생하지 않는다. 따라서 계측간격이 짧은 공사구간일수록 레이저스캐너를 이용하면 계측비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

5.4 계측점의 개수에 따른 계측소요시간 분석

광파기와 레이저스캐너의 계측소요시간은 장비 세팅 소요시간과 계측점 측정 소요시간으로 구분된다. 장비를 세팅하는데 걸리는 소요시간이 항상 일정하다고 가정하면, 식 (3)과 같이 터널의 특정구간을 계측하였을 때 소요되는 총 시간(단, 장비 세팅 소요시간은 제외)과 총 계측점의 개수로부터 단위 계측점당 계측소요시간을 계산할 수 있다.

$$\frac{\text{총 계측소요시간(장비 세팅 소요시간 제외)}}{\text{총 계측점 개수}} = \frac{\text{계측소요시간}}{\text{단위 계측점}} \quad (3)$$

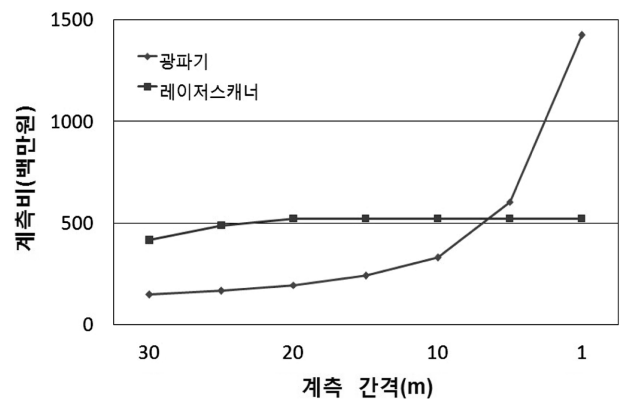


그림 5. 계측간격에 따른 계측비용

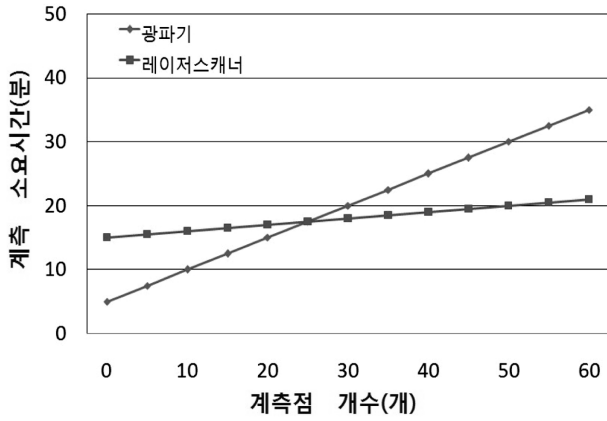


그림 6. 계측점 개수에 따른 계측비용

다음 그림 6은 광파기와 레이저스캐너의 장비 세팅 소요시간과 단위계측점당 계측소요시간을 근거로 계측점 개수-계측소요시간 그래프이다. x축은 장비 1회 설치구간당 측정해야하는 계측점의 개수를 나타내며, 계측점 개수가 0일 때의 소요시간은 장비 세팅 소요시간이며, y절편이 된다.

분석한 결과, 장비 1회 설치구간 당 약 25개의 계측점 개수를 분기점으로, 계측점 개수가 25개 미만일 때는 광파기가, 25개 이상일 때는 레이저스캐너가 계측시간단축에 더 유리하게 나타난다.

만약 계측간격이 일정할 경우, 계측점 개수는 터널의 연장에 비례하게 되고, 이것을 터널연장에 따른 계측비용의 분석결과와 연결시켜 보면 터널연장이 길어질수록 계측비용 절감과 계측시간 단축의 두 가지 측면 모두에서 레이저스캐너가 유리하다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서 기본이 되는 레이저스캐너를 이용하여 지하철도공사(광역철도)현장에서 사용된 계측 관련 내역서, 설계품셈, 시방서, 계측지침 등의 자료들을 기초로 IT기법을 이용한 계측의 적용성 및 경제성을 분석하였으며, 레이저스캐너를 이용한 기존의 계측기법을 보완하고 효율적으로 양질의 계측자

료를 수집, 분석할 수 있는 경제적인 방안에 대하여 연구하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) NATM터널 공사에서의 계측은 막장면 및 주변지반, 전체 터널구조물의 거동에 대한 신뢰할 만한 자료가 신속하게 시공에 반영되도록 하는 것이 중요하므로, IT기법을 활용한 레이저스캐너와 기존 광파측량기와 계측정확성을 기준으로 분석한 결과 레이저스캐너 측정값은 약 2~3 mm의 오차범위 내에서 광파기의 측정값과 일치하는 경향을 보임으로써 계측치의 정확도 측면에서의 현장 적용성이 가능하다고 판단된다.
- 2) IT기법을 활용한 레이저스캐너를 현장에 적용하여 터널연장, 계측빈도, 계측간격에 따른 계측 비용과 계측점수에 따른 계측소요시간을 기존 광파측량기와 비교·분석한 결과 터널연장에서는 600 m 이상, 계측빈도는 15회 이상, 계측간격은 5 m 이하일 때 기존 광파측량기보다 계측비용을 절감할 수 있고, 계측점의 개수는 25개 이상일 때 계측시간단축에 더 유리한 것으로 나타났다.
- 3) 위의 결과를 종합하여 볼 때 터널시공시 레이저스캐너를 이용한 계측은 기존방법에 비해 보다 완전하고 경제적인 시공에 기여할 수 있고, 현장 적용성이 높으며, 터널 막장면과 슛크리트면에 대한 종합적인 해석이 가능하여 NATM공법을 이용한 터널 공사에서 높은 활용성을 갖는 것으로 판단된다.

참고문헌

우종태 (2004) 터널의 이론과 실무. 한국터널공학회, pp.309~346.
 김인섭 외 (2007) 터널굴착시 3차원 레이저스캐너에 의한 내공단면 측량에 관한 연구. 대한토목학회논문집, 2007년 제27권 4D호, pp.541-546
 GEODATA (2006) Arbeitsanweisung Tunnel-scanner Auswertung, GEODATA, pp.5-10.

◎ 논문접수일 : 10년 01월 06일
 ◎ 심사의뢰일 : 10년 01월 06일
 ◎ 심사완료일 : 10년 03월 16일