

곡선 경로를 가지는 마이크로 터널링의 무인 원격 측량을 위한 자동 추미식 거리 및 각도 측정 시스템

Development of Auto Tracking Total Station for Unmanned Remote Surveying of Micro Tunneling with Curved Courses

이진이*, 김정훈
(Jinyi Lee and Jeong-Hoon Kim)

Abstract : Unmanned remote survey system is proposed to measure distance and angle of the present position of micro-tunneling machine from any starting point of entrance. Cross type linear LED that can be controlled remotely is attached to the tunneling machine. Range finder and angle measuring devise fixed to internal of the pipe can scan the center of LED. Distance and angle measuring devises are disposed in the measurable position of the pipe, then the present position of tunneling machine can be calculated automatically from the measurements.

Keywords : surveying, micro tunneling, total station, unmanned system, curved course

I. 서론

추진공법은 지중에 매설할 관로의 양단에 작업기지가 될 발진 수직구 및 도달 수직구를 구축하고, 발진 수직구로부터 도달 수직구를 향하여 굴진기에 의하여 지반을 굴삭해 나가면서, 추진관을 지중에 추진 매설해 나가는 방법이다. 특히 이러한 추진공법중의 하나인 마이크로 터널링 (일명 Semi-Shield) 공법은 강성이 있는 추진관을 발진 수직구로부터 잭으로 선단부에 설치된 굴착기와 함께 밀어 도달(목적지) 수직구까지 터널을 시공하는 공법으로써, 소구경(직경 2000mm이하) 터널 시공에 적합하다. 마이크로 터널링 공법은 다양한 형태와 재질의 관을 사용할 수 있으며, 추진관의 종류로는 원심주조 콘크리트관, 강관, 스틸 주름관, 주철관, 플라스틱관등 다양한 재질과 다양한 규격의 관로 공사가 가능하다는 특징이 있다. 따라서, 마이크로 터널링 공법은 지반 변위를 최소화할 수 있으며, 교통장애 및 환경피해를 최소화할 수 있으며, 지하수위가 높은 지층에서 비개착식으로 시공할 수 있으며, 추진속도가 빠르므로 공기를 단축할 수 있으며, 토사배출이 유체 수송되어 분리되므로 현장이 청결하며, 도심 중심부와 같이 제한된 공간에서도 시공이 가능하다는 장점이 있다[1]-[4].

이러한 장점으로 부터 우리나라와 교통사정이 비슷한 일본에서는 이미 마이크로 터널링 공법이 일반화되어 있다. 한 예로 약 2조 615억엔에 이르는 1998년도 배관공사의 총 사업비중에서 추진공법이 24%의 시장을 점하고 있으며, 그 연장거리도 연간 1,200km (단, 마이크로 터널링 공법은 약200km)를 넘어서고 있다[5].

일반적으로 상하수도, 전기, 가스, 통신망등 공공 목적의 파이프라인은, 공공 도로를 따라 매설되는 것이 원칙이므로,

곡선경로를 가지는 마이크로 터널링 작업은 피할 수 없으며, 계획 굴진경로와의 오차발생을 최소화하고, 맨홀간의 간격을 넓히며, 측량 작업자의 위험부담을 경감시키며, 측량시간의 단축에 의한 전체 공사기간의 단축을 위하여, 굴진현황을 정밀하게 원격으로 추적하기 위한 무인 원격 측량시스템의 개발은 매우 중요하다.

실제로 상술한 바와 같이 마이크로 터널링 공법이 일반화되어 있는 일본에서는, 각 건설회사 또는 조합에서 무인 원격 측량 시스템을 개발하여 운용하고 있다. 한 예로 Okumu ragumi사에서는 기존의 원격 추미식 거리·각도 측량 시스템 [6][7]의 조합에 의하여 굴진경로를 자동으로 측량하고 있다 [8]. 국내에는 대구경(직경 1000mm 이상)인 경우에 한하여 거리·각도 측정 시스템(이하 TS, Total Station) 또는 Laser Transit을 이용하여 직선 경로상의 수동 측량을 현장 적용하고 있다. 그러나, 작업자에 의한 수동 측량 작업이 곤란한 직경 1000mm 이하, 특히 곡선 경로를 가지는 마이크로 터널링의 경우 필수 불가결한 무인 원격 측량 시스템에 대한 연구는 아직 보고된 바가 없다.

본 논문은 새로운 원리에 의한 원격 추미식 거리 및 각도 측량 시스템의 개발, 즉 발진 수직구에 원격으로 점멸할 수 있는 십자형의 발광체를 설치하고, 추진관에 고정시킨 상하 좌우 각도측정 및 비접촉식 레이저 거리측정기가 부착된 무인 원격 제어장치에 의하여 십자형 발광체의 중심을 자동으로 검출한 후, 기준점으로부터 각도 및 거리를 측정하는 장치를 개발하였다. 본 장치는 이동하는 추진관내에 측정 가능한 범위를 연결하는 위치에 다수 배치하여 서로의 위치를 자동으로 계측하고 그들 데이터를 컴퓨터에 의하여 계산함으로써, 발진 수직구의 기준점으로부터 굴진기의 현재 3차원 좌표를 신속하고 정확하게 측량할 수 있다.

II. 시스템의 기본원리

1. 장거리 송수신 및 확장성

일반적으로 RS232 통신은 사용자층이 넓어 쉽게 접근할

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 7. 2., 채택확정 : 2003. 9. 17.

이진이 : 조선대학교 정보체계측공학과(jinyilee@chosun.ac.kr)

김정훈 : (주)영광기전 기술연구소 (norade21@hotmail.com)

수 있으며, 제어가 비교적 쉽고, 확장이 용이하다는 장점이 있으나, 통신거리가 수 m 정도로 짧은 단점이 있다. 한편, RS485는 통신거리가 1km 이상으로 매우 길어 장거리 원격 제어에 유리하나, 확장이 제한적이다. 따라서, 본 연구에서는 다중시리얼 통신장치와 인터페이스 컨버터의 조합에 의하여 장거리 원격 제어 및 확장성(즉, 1개의 컴퓨터로 다수 개의 토달 스테이션을 제어)을 확보하였다. 즉, 노트북 컴퓨터 또는 퍼스널 컴퓨터에 다중 시리얼 통신장치를 설치하고, 제어부에 RS232 변환기를 장착하여 마이크로 컴퓨터를 제어할 수 있도록 하고, 다중 시리얼 통신장치 및 제어부의 선단에 각각 RS232 to 485 인터페이스 컨버터를 설치하여 확장성의 개선 및 통신거리의 증대를 가능하게 하였다.

2. 자동정준

수직각을 조정 및 고정하기 위한 장치로서, 토달 스테이션의 수평을 자동으로 조정한다. 자동정준대는 한 예로 정반의 경사에 기인한 수포내의 전국 사이의 전위차를 측정하여 LM 가이드 상의 모터를 구동함으로써 상부 정반의 수평을 자동으로 조절하는 원리를 가진다[9]. 실제로 $\pm 4^\circ$ 의 범위에서 0.0028° 이하의 반복 정밀도로 수평을 유지하는 자동정준대가 실용화(Nissho, AS-21)되어 있어, 자동 정준대상의 광학계 및 구동계는 절대 수평을 기준으로 조정 및 계측할 수 있다.

3. 타깃의 자동 검색

본 시스템은 이제까지 제시되었던 타깃 자동 검색방법과는 다른 새로운 방식의 타깃 자동검색 방식을 적용하였다. 본 시스템에서 도입한 타깃은 그림 1과 같이 기본적으로 수직방향의 발광장치와 수평방향의 발광장치로 구성된다.

자동 검색용 타깃은 RS232통신에 의하여 원격으로 제어할 수 있도록 제어회로를 별도로 설치하고 있으며, 통신신호에 의하여 수평방향 또는 수직방향의 LED 배열을 점등할 수 있다. 수직방향 또는 수평방향의 광이 점등하였을 때 각각 회전스테이지 또는 고니오미터에 의하여 대물렌즈와 미러 및 접안 렌즈에 의하여 구성되는 망원경의 시야각안에 광이 입사될 때까지 회전시킨다. 즉, 수직방향의 LED 배열을 점등하고 망원경을 수평방향으로 회전시키면, 망원경의 시야각내의 점을 검색하는 것이 아니라 선을 검색하므로 보다 빠른 시간 내에 타깃을 검색할 수 있게 된다. 한편, 망원경의 시야내에는 그림 2와 같이 2개의 cubic type beam splitter (이하 CBS)에 의하여 1개의 광전센서와 두 개의 CCD Linear Sensor (이하 CLS)를 동일 광축상에 배열하였다. 이러한 구조에 의하여, LED 광원이 망원경의 시야각내에 위치하였을 때, 그 상은 각각 1개의 광전센서와 두 개의 CLS에 결상된다. 또한, 일단 수직방향의 LED의 배열을 점등하여 수직방향으로 망원경의 시야각을 검색하여 발광체의 유무를 검색한다.

한편, LED는 일반 광원에 비하여 선별적인 파장의 선택이 가능하므로 검색함에 있어서 광학필터의 도입에 의하여 주변 환경의 영향을 비교적 쉽게 피할 수 있으며, 방사각을 28° 정도로 국한시킬 수 있으며, 충분한 광량과 광변환 효율이 좋으며 체적이 작아 소형 경량화가 가능하며, 전력소모량이 적으며 응답속도가 빨라 잔상이 남지 않는다. 또한 시야각내의 광을 검출하기 위하여 적용한 광전센서는 파장

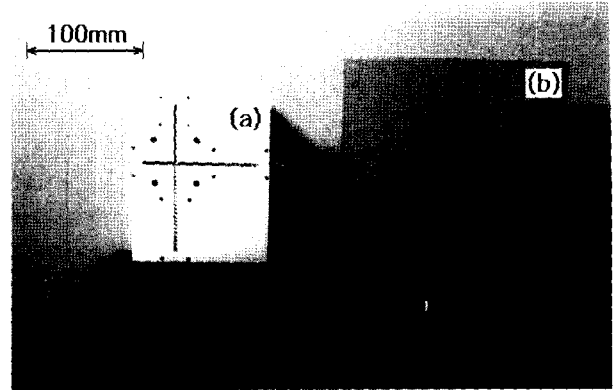


그림 1. 자동 검색용 타깃 (a) TS일체형 타깃 (b) 굴진기 부착용 타깃.

Fig. 1. Target for auto tracking (a) target to total station (b) target to tunneling machine.

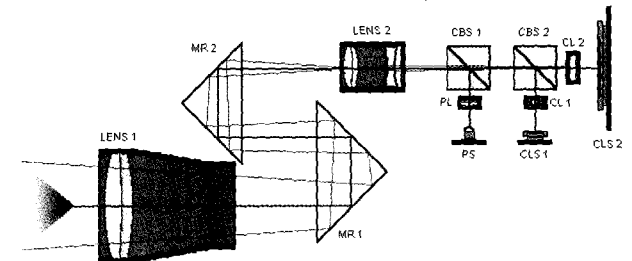


그림 2. TS 광학계의 개략도.

Fig. 2. Schematic of optical system.

선택이 비교적 수월하고 광 검출능력이 뛰어나며 응답속도가 빠르다.

타깃 자동검색의 흐름을 그림 3에 나타낸다. 수직 방향 또는 수평방향의 LED를 점등하고, 각각 수직방향 또는 수평방향으로 망원경의 시야각을 이동하면서 광전센서 신호가 시야각내에 LED 광이 입사하였다는 정보인 임계광량보다 크면 회전을 멈추고, 회전각도를 줄이면서 보다 정확한 회전스테이지의 회전각에 접근해 나가는 방식이다.

4. 정밀각도 계산

상술한 타깃 자동 검색에 의해 측정된 각도는 펄스 방식에 의하여 회전스테이지는 0.0025° , 고니오미터는 0.0008° 의 분해능을 가지나, 실제로는 시야각내의 발광 LED 배열의 결상 유무를 판별하므로 약 $\pm 1.0^\circ$ 정도의 분해능을 가지게 된다. 실제로 이러한 각정밀도는 굴진경로의 측량결과에 매우 큰 오차를 부여하게 된다. 따라서 본 연구에서는 CLS를 이용한 정밀 각도 측정 장치를 개발하였다. CLS는 $14\mu\text{m} \times 56\mu\text{m}$ 의 미소한 광전센서를 $14\mu\text{m}$ 간격으로 2048개 규칙적으로 배열한 CLS(SONY, ILX554B)를 이용하여 최고 광량 입사위치를 출력하는 CLS 시스템을 이용하였으며, 그림 4와 같은 원리를 가진다. 즉, CLS에 그림 4(a)와 같이 빛이 입사되면, 그림 4(b)와 같은 광량분포와 그림 4(c)와 같은 광전압 분포를 가지게 된다. 여기에서 망원렌즈의 정중앙에 LED가 위치하였을 때의 광전압 분포의 중심점 Y_c 로부터, 임의 각도에서

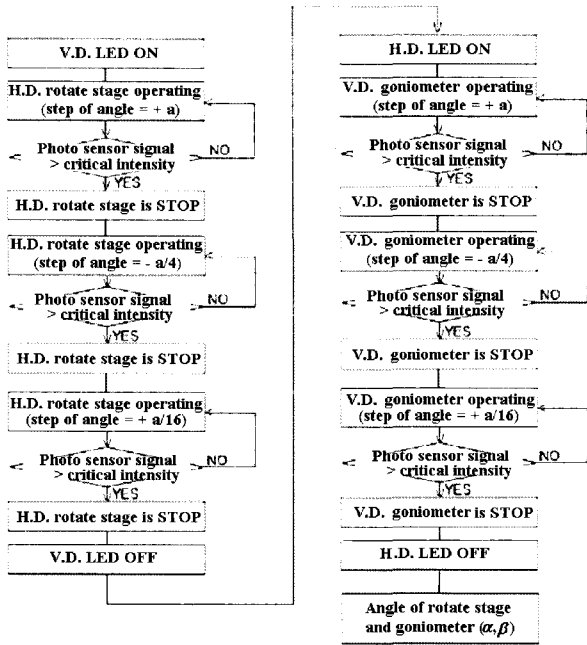


그림 3. 타깃 자동검색 흐름도.
Fig. 3. Flow-chart for auto tracking of target.

의 LED 위치에 따른 광전압 분포의 중심점 Y_i 까지의 픽셀수 ΔY_i 는,

$$\Delta Y_i = \frac{N + M}{2} - Y_c \quad (1)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 M과 N은 각각 임의의 광량에 의한 CCD 셀의 임계전압이하의 광전 센서를 나타낸다. 따라서, CLS로부터 출력되는 광량 분포를 저장, 비교, 분석하여 망원경 시야각내의 LED 발광부의 중심위치를 계산할 수 있다.

실제로 CLS에 입사한 광량분포의 한 예를 그림 5에 나타낸다. 횡축은 2048개의 각각의 광전센서를 나타내고, 종축은 8bit의 A/D 변환기에 의하여 처리된 광량의 세기를 나타낸다. 여기에서는 임계광량을 32로 하였으며, M과 N이 각각 810과 867이 되었음을 알 수 있다. 따라서 그 중심점은 838.5가 된다.

그림 6은 상술한 CLS에 의하여 정밀각도를 측정하는 원리를 나타낸다. 회전스테이지 또는 고니오미터에 의하여 임의의 각도 θ_1 만큼 망원렌즈를 회전하였을 때는 망원경의 시야각내에 타깃의 LED 발광부가 들어오지 않으나, θ_2 만큼 회전하였을 때는 망원경의 시야각내에 LED가 들어오게 된다. 또한, 등각도 간격 $\Delta \theta$ 만큼 회전하여 θ_3 및 θ_4 가 되었을 때도 LED는 망원경의 시야각을 벗어나지 않는다. 한편, θ_2 회전하였을 때의 CLS에 조사되는 LED광의 최고치 위치로부터 LED가 시야각의 중심에 위치하였을 때의 CLS에 조사되는 LED 광의 최고치 위치까지의 거리를 ΔY_2 , θ_3 만큼 회전하였을 때의 CLS에 조사되는 경우를 ΔY_3 , θ_4 만큼 회전하였을 때의 CLS에 조사되는 경우를 ΔY_4 라고 하면 LED가 시야각의 정중앙에 위치했을 때의 각도 θ_c 는 다음과 같이 표현된다. 즉,

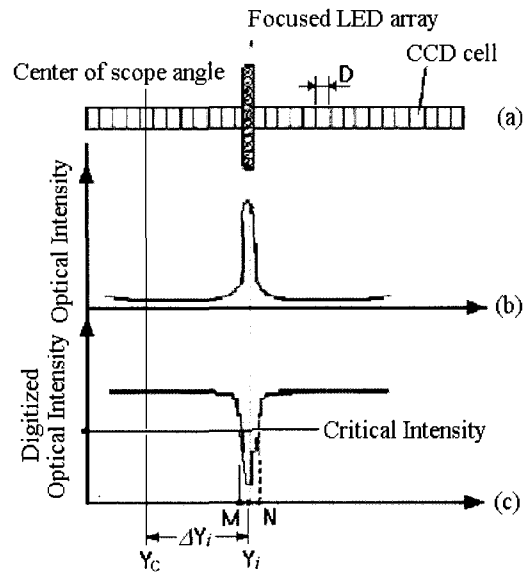


그림 4. CCD Linear Sensor의 원리.
Fig. 4. Principles of CCD linear sensor.

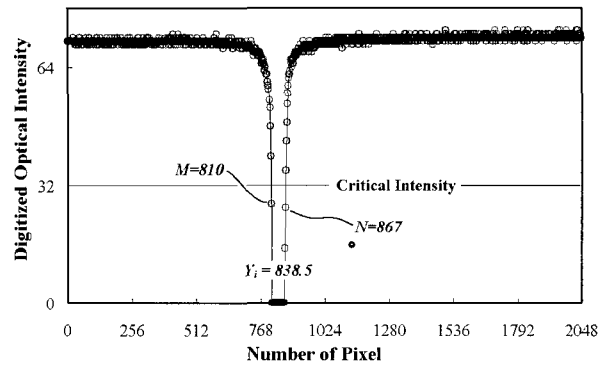


그림 5. CLS에 입사한 광량분포.
Fig. 5. Distribution of intensity on the CLS.

$$\theta_c = \theta_3 + \frac{\Delta \theta}{\Delta Y} \cdot \left[\frac{\Delta Y_2 + \Delta Y_3 + \Delta Y_4}{3} \right] \quad (2)$$

에 의하여 정밀하게 구할 수 있음을 알 수 있다. 여기에서 ΔY 및 $\Delta \theta$ 는 각 TS의 고유치이며, θ_3 는 회전스테이지 또는 고니오미터의 엔코더에 의하여 얻어지는 데이터로써 각각 0.0025° 및 0.0008° 의 분해능을 가진다. 또한, ΔY_2 , ΔY_3 , ΔY_4 는 CLS로부터 얻어지는 데이터로써 약 0.0001° 의 분해능을 가진다. 따라서 비록 LED가 망원경을 통하여 CLS의 중심에 결상되지 않더라도, 시야각내에서 CLS에 결상하는 위치를 파악함으로써 0.0025° 의 분해능으로 각도를 산출할 수 있다.

5. 레이저 거리측정

본 연구에서는 곡선 경로를 가지는 마이크로 터널링의 굴진 경로를 측량하고자 하는 목적을 가지고 있으므로, 수 백m 정도의 거리를 정밀하게 측량하여야 하는 일반적인 건설 토목 현장에서 사용되는 광파기는 필요하지 않다. 실제로 곡선 구간에서 토탈 스테이션의 간격 d와 회전반경 r_c 의 관계를 계산하면 그림 7로부터,

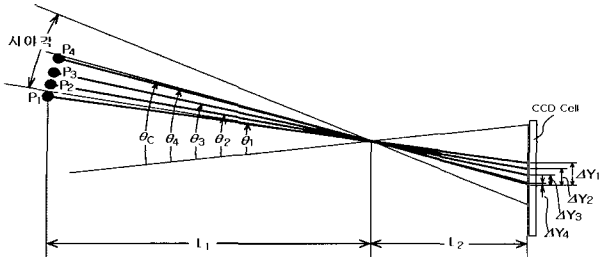


그림 6. CCD Linear Sensor에 의한 정밀각도계산.
Fig. 6. Calculating of precision angle by use of CCD linear sensor.

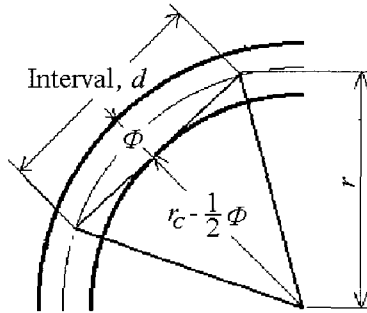


그림 7. 곡선구간에서 TS의 간격.
Fig. 7. Interval of total stations on the curved course.

$$d = 2 \cdot \sqrt{r_c \cdot \Phi - \frac{1}{4} \Phi^2} \quad (3)$$

과 같이 표현할 수 있다. 여기에서, r_c 는 터널의 중심선을 기준으로 한 회전반경, Φ 는 터널의 직경을 나타낸다.

(3)에 의하여 계산된 곡선구간의 회전반경과 TS의 간격과의 관계를 표 1에 나타낸다. 예를 들면 직경 $\Phi=1000\text{mm}$ 인 마이크로 터널링에 있어서 회전반경 $r_c=200\text{m}$ 일 때 최대 30m 거리 이내에 TS와 타깃이 위치하여야 한다. 따라서 직경 $\Phi=1000\text{mm}$ 이하의 마이크로 터널링의 굴진경로를 계획하기 위해서는 최대 30m의 거리에서 정밀하게 거리 측정할 수 있는 광과기(Leica, Disto-pro4a)로써 충분한 성능을 발휘할 수 있다.

6. 좌표측량

그림 8은 굴진 좌표계를 나타낸다. 발진 수직구의 기준점을 P_0 라 하고, 초기 굴진 방향을 Y, 이에 수직인 평면을 XY 평면이라 하자. 이때 XY 평면은 절대 수평이다. P_0 로부터 X 방향으로 Δx 및 $-\Delta x$ 의 위치에 있는 각각의 점을 P_1 과 P_2 , Z 방향으로 Δz 및 $-\Delta z$ 의 위치에 있는 각각의 점을 P_3 와 P_4 라 하자. 이때 $P_1(\Delta x, 0, 0)$, $P_2(-\Delta x, 0, 0)$, $P_3(0, 0, \Delta z)$, $P_4(0, 0, -\Delta z)$ 는 4쌍의 십자형 LED 타깃의 각각의 중심위치를 나타낸다. 한편, $T(x, y, z)$ 는 TS의 기계 중심 좌표이며, XY 평면 및 YZ 평면의 사영을 $B(x_1, y_1, 0)$ 및 $D(0, y_1, z_1)$ 라 하자. $B(x_1, y_1, 0)$ 의 X축 및 Y축에의 사영은 각각 $A(x_1, 0, 0)$, $C(0, y_1, 0)$ 이다. 또한 XY 평면에 평행하면서 $P_4(0, 0, -\Delta z)$ 를 지나는 평면상의 네 점을 $E(x_1, 0, -\Delta z)$, $F(x_1, y_1, -\Delta z)$, $G(0, y_1, -\Delta z)$, $H(0, 0, -\Delta z)$ 라고 하자. 한편 $T(x_1, y_1, z_1)$ 에서 $P_1(\Delta x, 0, 0)$, $P_2(-\Delta x, 0, 0)$, $P_4(0, 0, -\Delta z)$ 까지의 거리를 각각 L_{11} , L_{12} , L_{14} 라고 하면, 각각의 XY평면에의

표 1. 회전반경에 따른 TS의 간격.

Table 1. Interval of total stations to the differential radius of rotation.

Radius of Rotation	Distance		
	$\Phi 1000\text{m m}$	$\Phi 700\text{m m}$	$\Phi 500\text{m m}$
10	6.24	5.24	4.44
20	8.89	7.45	6.30
30	10.91	9.14	7.73
40	12.61	10.56	8.93
50	14.11	11.81	9.99
100	19.97	16.72	14.13
150	24.47	20.48	17.31
200	28.27	23.65	19.99
250	31.61	26.45	22.36
300	34.63	28.97	24.49
350	37.40	31.30	26.45
400	39.99	33.46	28.28
450	42.41	35.49	30.00
500	44.71	37.41	31.62
600	48.98	40.98	34.64
700	52.91	44.27	37.41
800	56.56	47.32	40.00
900	59.99	50.19	42.42
1000	63.24	52.91	44.72
1200	69.27	57.96	48.99

사영은 L_{11} , L_{12} , L_{14} 이 되며, YZ 평면에서의 사영은 L_{11} , L_{12} , L_{14} 이 된다. 즉,

$$\begin{vmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{14} \\ L_{11}'' & L_{12}'' & L_{14}'' \\ L_{11} & L_{12} & L_{14} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \overline{TP_1} & \overline{TP_2} & \overline{TP_4} \\ \overline{BP_1} & \overline{BP_2} & \overline{BP_0} \\ \overline{TA} & \overline{TA} & \overline{TE} \end{vmatrix} \quad (4)$$

이다.

한편, 그림 8의 3차원 도면을 XY 평면(그림 9(a)) 및 YZ 평면(그림 9(b))으로 표현하면, 그림 9와 같이 된다. 경로상에서 회전스테이지는 임의의 방향을 향하게 되나, 이 각도로부터 P_0, P_1, P_2 까지의 각도 $\alpha_{T_0}^0, \alpha_{T_0}^1, \alpha_{T_0}^2$ 는 상술한 정밀 각도 계산법에 의하여 취득할 수 있다. 한편 본 시스템은 상술한 바와 같이 자동 정준대에 의하여 절대 수평을 알 수 있고, 이를 기준으로 한 상하 회전운동이 가능하다. 이때 $\overline{DP_1}, \overline{DP_2}, \overline{DP_4}$ 와 수평면이 이루는 각도를 각각 $\beta_{T_0}^1, \beta_{T_0}^2, \beta_{T_0}^4$ 라고 하면, TS의 현재의 좌표 (x_1, y_1, z_1) 은

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{1}{4\Delta x} (L_{12}''^2 - L_{11}'^2) \\ y_1 &= \sqrt{L_{12}''^2 - (x_1 + \Delta x)^2} \\ z_1 &= -L_{14} \cdot \sin(\beta_{T_0}^4) - \Delta z \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } L_{11}' &= L_{11} \cdot \cos(\beta_{T_0}^1) \\ L_{12}' &= L_{11} \cdot \cos(\beta_{T_0}^2) \end{aligned} \quad (6)$$

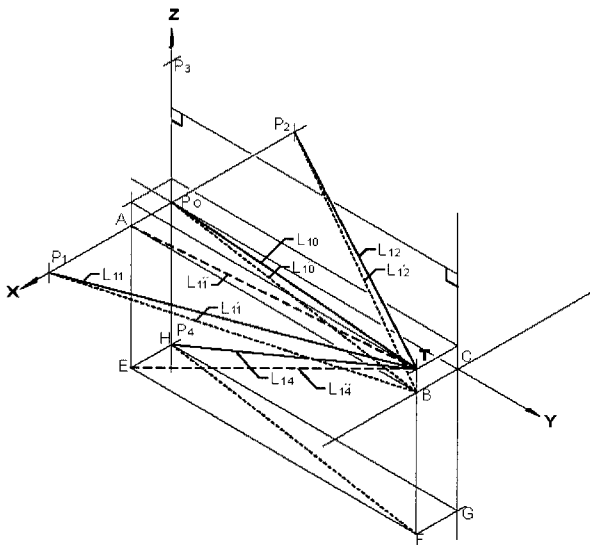
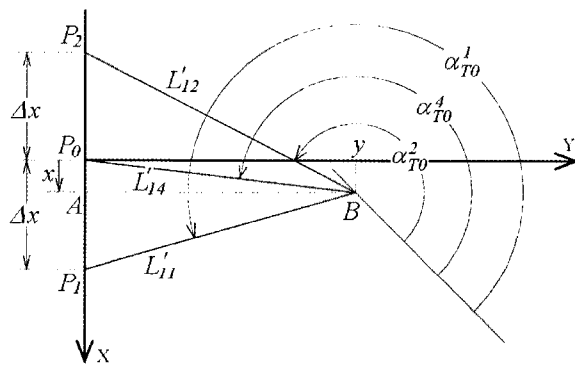
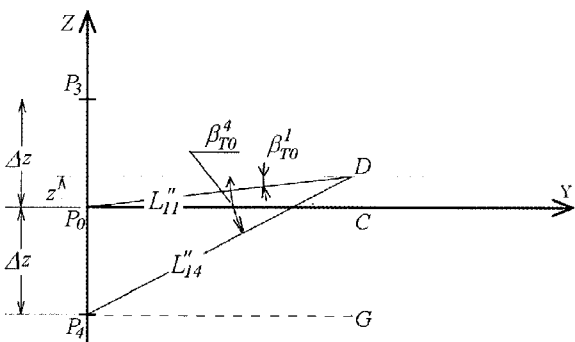


그림 8. 굴진 좌표계.
Fig. 8. Coordinate of tunneling.



(a) XY 평면에서의 사영



(b) YZ 평면에서의 사영

그림 9. 각 평면에서 고려한 사영.
Fig. 9. Projections on the XY and YZ planes.

으로부터 구할 수 있다.

III. 시스템의 구성

1. Main Box

Main Box(MB)는 그림 10에 나타낸 바와 같이 다중 시리얼

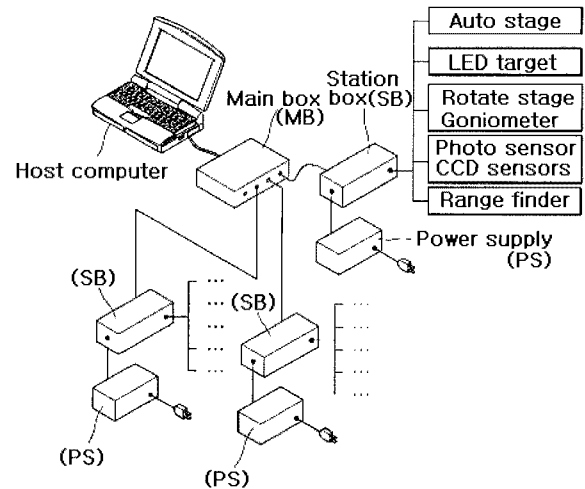


그림 10. 시스템의 구성.
Fig. 10. Schematics of system.

통신장치를 이용하여 Host Computer로부터의 명령을 각 TS의 제어부 (SB, Station Box)에 전달하기 위한 유닛이다. 또한 Main Box는 RS232 신호를 RS485로 변환하므로 1km 이상의 장거리를 최대 115.2kbps의 속도로 송수신할 수 있다. 한편, RS232 통신포트는 최대 128개까지 확장할 수 있어, 동수의 TS를 1대의 호스트 컴퓨터에 의하여 원격 제어할 수 있도록 하였다.

2. Station Box

Station Box(SB)는 TS와 컴퓨터를 연결하는 제어 유닛으로서, TS의 동작 및 계측 데이터의 통신을 제어한다. SB는 추진 판의 상부에 부착하거나, TS의 방수용 박스에 탑재 또는 가실대에 설치하기 용이하도록 육면체의 박스형으로 제작하였다. 외부에는 스위치, 통신용 커넥터, 전원공급 커넥터, 자동정준대 제어용 커넥터, CLS 구동용 커넥터, 타깃 제어 및 전원 공급용 커넥터를 구비하고 있으며, 내부에는 RS422 to RS232 변환기, main board, SMPS, Transformer, 회전 스테이지 및 고니오미터 제어기로 구성되어 있다. main board는 MB를 통한 컴퓨터의 원격 제어에 의하여 먼저 자동정준대의 전원을 연결하고, 자동수평명령을 전달하고, 일정시간 경과 또는 수평작업완료 신호를 접수한 후, 고정명령을 전달한다. 다음 단계로 타깃의 수직방향 LED를 점등한 후, TS의 수평방향 회전스테이지를 회전하면서, 광전센서의 신호입력을 모니터링하여 회전스테이지를 정지하고, 이때의 회전각도를 엔코더에 의하여 취득한다. 그리고, CLS의 데이터를 취득하여 계산하고, 신호를 출력하게 된다. 또한, 타깃의 수직방향 LED를 소등하고 수평방향 LED를 점등한다. 다음 단계로 수직방향 회전스테이지를 회전하면서 광전센서의 신호입력을 모니터링하여 신호입력여부에 따라 회전스테이지를 정지하고, 이때의 회전각도를 엔코더에 의하여 취득한다. 또한 레이저 거리 측정기를 원격 제어하여 타깃까지의 거리를 계측하여 일시 저장한 후, 컴퓨터에 정보를 송신한다.

3. Total Station

TS는 굴진기에 고정되어 발진 수직구의 기준점으로부터 굴진기까지의 거리 및 각도를 측정하기 위한 것으로서 그림

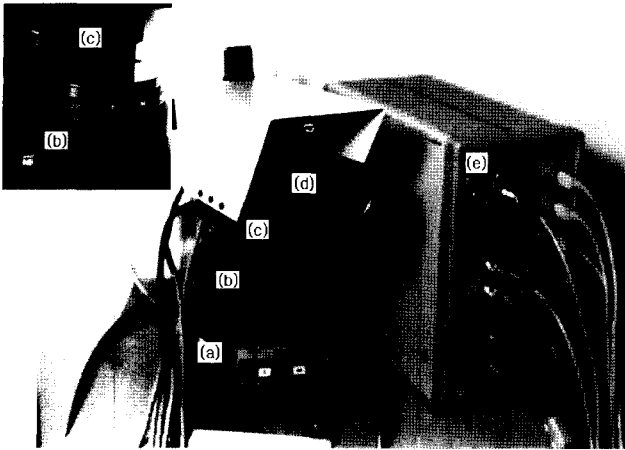


그림 11. 자체 제작한 Total Station.
Fig. 11. A trial total station.

11과 같은 구조를 가진다. 즉, 자동정준대(a)위에 회전스테이지(b)와 고니오미터(c)를 고정하고, 각도 측정용 센서 시스템과 거리측정용 광파기(d)를 종축 또는 횡축으로 회전할 수 있다.

또한 TS는 각 SB(e)에 의하여 제어할 수 있으며, 통신 커넥터를 통하여 컴퓨터로부터 자동정준대 제어, 회전스테이지의 제어, 고니오미터의 제어, 레이저 거리측정기 제어, 광전센서의 제어, CLS의 구동, 타깃 제어등의 명령을 전달받아 전방 또는 후방의 타깃을 자동으로 검출하고, 거리 및 각도를 계속하게 된다. 한편, TS의 망원렌즈는 시야각이 약 2.5°로 고정되어 있으며, 동일 광축선상에 광전센서와 두 개의 CLS가 고정되어 있다. 또한, 망원렌즈와 레이저 거리측정기는 평행한 광축선상에 위치하고 있다.

4. 타깃

본 곡선경로를 가지는 마이크로 터널의 무인 원격 측량 시스템은 그림 12에 표시한 바와 같은 발진 수직구용 타깃을 사용하여, 굴진기의 현재 좌표를 측량한다. 타깃은 SB에 의하여 제어되며, 특히 TS의 망원렌즈와 광전센서에 의하여 수직 또는 수평방향으로 정밀하지 않은 회전각도에 의해서도 망원렌즈의 시야각내에 직선형상의 광을 입사할 수 있도록 하여 타깃의 중심을 단시간에 찾을 수 있고, 광전센서에 충분한 광량을 입사하여 검출감도를 높일 수 있다. 또한 일정한 면적을 가지고 있어 거리 측정기로부터 레이저광이 반사할 수 있도록 충분한 면적을 제공한다. 한편, 타깃의 수직방향 또는 수평방향의 LED는 SB로부터 신호를 받아 원격 및 선택적으로 점등 또는 점멸할 수 있다.

IV. 실험 및 고찰

1. 시야각 실험

그림 13은 TS의 망원렌즈 시야각 실험 결과를 나타낸다. TS로부터 타깃까지의 거리를 5~20m에 고정하고, 시야각도 전후에서 0.025° 씩 회전($\Delta \theta$)하면서 CCD에 입사되는 광량 분포중 최고광량을 추적한 결과로써, 전체적으로 시야각내에서는 각도 변화량과 최고광량 중심픽셀의 위치가 거리 및 각도에 관계없이 선형적인 관계에 있으며, 이들 결과로부터

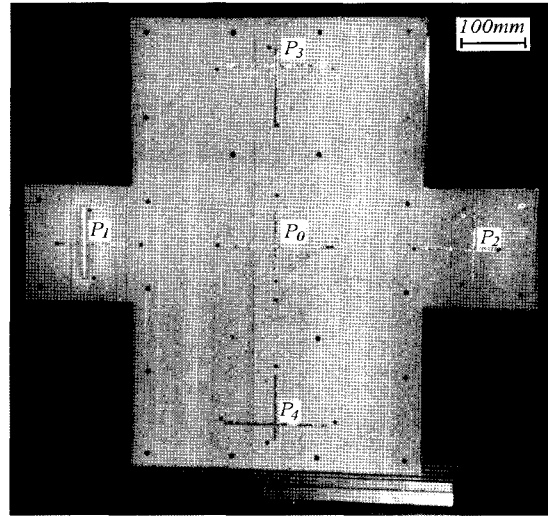
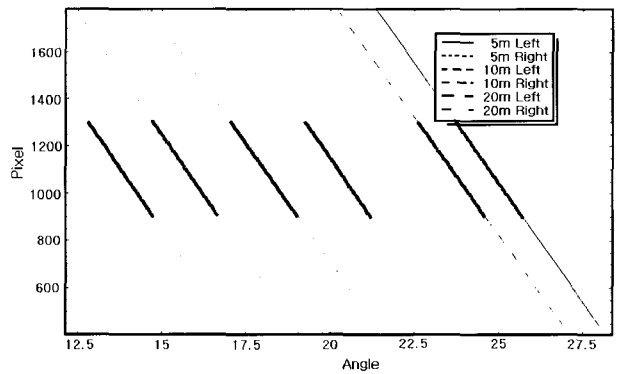
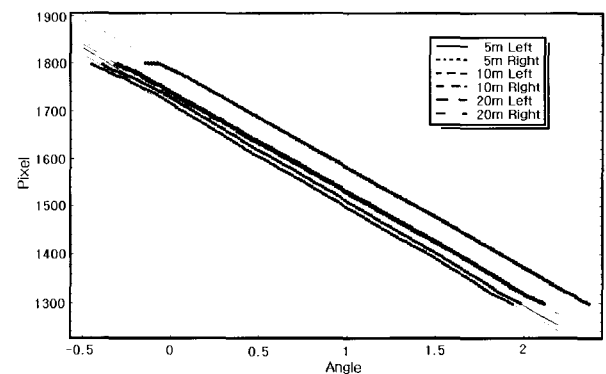


그림 12. 발진 수직구용 타깃.
Fig. 12. Target for entrance.



(a) 회전스테이지에 의한 좌우 자동스캔 결과.



(b) 고니오미터에 의한 상하 자동스캔 결과.

그림 13. 시야각 실험결과.

Fig. 13. Experimental results of range of vision.

렌즈의 왜곡현상은 무시할 수 있음을 알 수 있다. 특히 각 그래프의 선형영역에서의 기울기 즉, CCD의 1개 픽셀당 각도분해능($\Delta \theta / \Delta Y$)은 약 0.0049° 정도으로써 고정밀한 각도 측정이 가능함을 알 수 있다.

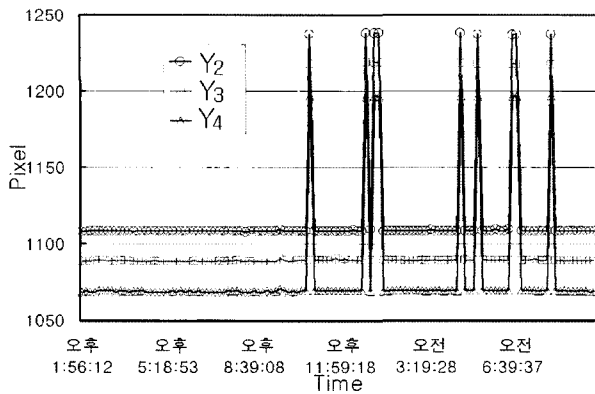


그림 14. 자동검색 결과(CLS).
Fig. 14. Auto tracking result (CLS).

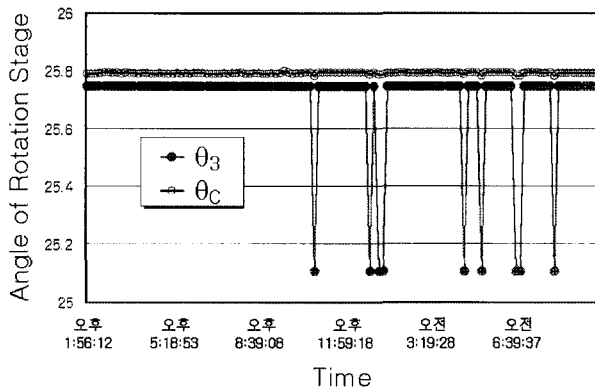


그림 15. 보정 전후의 각도출력 비교.
Fig. 15. Compare the angle of rotation stage with calculated precision angle.

2. 타깃 검색 반복정밀도

그림 14는 장시간에 걸쳐 고정된 타깃을 자동 검색한 CLS의 반복정밀도 실험결과를 나타내며, 1픽셀 정도의 차이를 보이는 도중에 130 픽셀 정도의 큰 변화가 몇 차례 발생하고 있다. 이것은 (2)의 $\Delta Y_2, \Delta Y_3, \Delta Y_4$ 가 크게 변화하여 θ_c 에 큰 영향을 미쳐 약 0.638° 의 반복정밀도 이하 요인이 된다. 그러나, 실제로는 그림 15의 회전스테이지의 엔코더값 (θ_c, θ_3 에 해당)에서 알 수 있듯이 그림 14의 각각의 Y_i 값이 크게 변화하는 것과 동기하여 θ_3 도 약 -0.640° 의 차이를 나타내고 있다. 따라서, $\Delta Y_2, \Delta Y_3, \Delta Y_4$ (Y_c 는 1100) 및 θ_3 에 의하여 2의 θ_c 를 구해보면 그림 15에 나타낸 바(0)와 같이 본 시스템이 약 $\pm 0.006^\circ$ 의 반복정밀도 (RMS= 0.00024°)를 가진다는 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 곡선 경로를 가지는 마이크로 터널링의 무인 원격 측량을 위하여, 십자형 발광체를 타깃으로 하고, 자동 정준대, 스텝핑모터, 코니오미터, CCD line scan sensor, 광전센서와 레이저 거리측정기에 의하여 구성되는 자동 추미식 거리 및 각도측정 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 다음과 같은 특징을 가지고 있다. 즉,

- 1) 다중시리얼 통신장치를 이용하여 최대 128개의 자동 추미식 거리 및 각도측정 시스템을 원격 제어할 수 있다.
- 2) RS232 to RS485 변환기를 도입하여 비교적 제어가 쉬운 RS232 신호를 1km 이상 송수신할 수 있다.
- 3) 자동정준대의 도입에 의하여 구동계 및 광학계는 0.0028° 의 반복정밀도로 절대 수평을 기준으로 계속할 수 있다.
- 4) 십자형 발광체의 중심을 자동으로 원격 검출할 수 있다.
- 5) 펄스식 엔코더와 CCD라인 스캔 센서의 조합에 의하여 0.0025° 의 각도분해능과 $\pm 0.006^\circ$ 의 반복정밀도로 상하 및 좌우 각도를 정밀하게 계측 가능하다.
- 6) 시스템의 기계 중심으로부터 십자형 발광체의 중심까지의 정밀한 상하 좌우 각도 및 거리 측정치로부터 각각의 상대좌표를 계산할 수 있다.

따라서, 본 시스템의 적용에 의하여 작업자들이 기피하는 지하 갱내 수동 측량을 무인 원격 측량하여 굴진기의 현재 좌표를 표시할 수 있다.

참고문헌

- [1] 최명진, 이창호, 김명모, “마이크로터널링 기술의 현재와 미래”, 지반, vol. 16, no. 1, pp. 26-33, 2000
- [2] 남장현, “마이크로터널링 장비의 자동 경로제어 기술”, 토목, vol. 48, no. 10, pp. 67-71, 2000
- [3] A. Kohzo, T. Fujimoto, E. Nagano, H. Sasaki, T. Takeuchi, D. Hatsuji, “Development of long span pipe jacking method for laying underground pipe”, *Technical report of Kawasaki Steel*, vol. 20, no. 1, pp. 83-88, 1988
- [4] T. Miyahara, O. Nobe, H. Tanaka, “Development of jacking pipe for pipeline with ultra sharp curve”, *Technical report of Kumamoto*, no. 41, pp. 48-55, 1999
- [5] Japan Micro-Tunneling Association, “추진공법에 관하여”, <http://www.suisinkyo.or.jp/2.html#>
- [6] Topcon, “자동추미 토탈스테이션”, <http://www.topcon.co.jp/sokuryo/gts80.html>
- [7] Trimble, “advanced Servo and Robotic total stations”, <http://www.trimble.com/totalstation5600.html>
- [8] Okumura-gumi, “곡선추진용 자동측량 시스템”, http://www.okumuragumi.co.jp/civil/tec_leef/shield/kyokusen.html
- [9] H. Ogawa, N. Teraji, I. Terauchi, “2축 경사센서”, 대한민국 특허등록 10-0218899, 1999

**이진이**

1968년 2월 16일생. 1992년 전북대학교 기계설계학과(공학사). 1995년 일본 토호쿠대학 기계공학(공학석사). 1998년 일본 토호쿠대학 항공우주공학(공학박사). 1998년 일본 토호쿠대학 강사. 1998년 일본 이와테대학 기계공학과 객원연구원. (재)이와테현 고도기술진흥협회 특별연구원. 1999년 일본 사이타마대학 문부교관. 2000년 ㈜레이콤 연구실장. 2002년 ㈜영광기전 연구소장. 2003년~현재 조선대학교 전자정보공과대학 정보제어계측공학과 교수. 관심분야는 센서, 계측시스템, 비파괴검사.

**김정훈**

1972년 12월 18일생. 1999년 경남대학교 산업디자인학과(이학사). 1999년 ㈜레이콤 주임연구원. 2002년 ㈜영광기전 주임연구원. 관심분야는 광학시스템, 컴퓨터그래픽스.