

# 레이저를 이용한 전차선 편위 및 높이 측정 시스템 개발

## Development of Catenary Stagger and Height Measurement System using Laser

송성근<sup>†</sup> · 이택희\* · 송재열\*\* · 박성모\*\*\*

Sung-Gun Song · Teak-Hee Lee · Jae-Yeol Song · Seong-Mo Park

**Abstract** Catenary and Pantograph are used to transmit electrical energy to electric railways. Catenary (Overhead Contact Lines) should be installed precisely and managed for stable train operations. But external factors such as weather, temperature, etc., or aging affect catenary geometry. Changed catenary stagger and height cause high voltage spark or instant electric contact loss. Big spark derived from contact loss can damage the pantograph carbon strip and overhead contact lines that might interrupt the train operations. Therefore, to prevent a big scale spark or electric contact loss, catenary maintenance are required catenary geometry measurement systems with catenary maintenance capability. In this paper, we describe the development of catenary height and stagger measurement system. The catenary height and stagger measurement system uses Acuity company's AR4000 Laser Range Finder for distance measurement and AccuRange Line Scanner for degree measurement. This system detects suspicious overhead line sections with excessive stagger and height stagger variance.

**Keywords** : Catenary Cable, Stagger, Height, Laser range finder, Line scanner

**요 지** 전차선과 팬터그래프는 물리적인 접촉을 통하여 전동차에 전력을 공급하는 장치로, 전동차가 안전하게 운행할 수 있도록 기술적인 규정에 따라 정밀하게 시공되어야 한다. 전차선의 편위 및 높이는 여러 가지 외부 환경 요소에 의하여 상태가 변화하며, 허용치를 초과한 전차선의 편위 및 높이는 높은 아크와 순간적인 전기 단전을 유발한다. 이는 팬터그래프와 전차선에 큰 손상을 주며 고장과 사고의 원인이 된다. 따라서 주기적으로 전차선의 상태를 점검하여 유지 및 보수를 할 수 있는 측정 장치의 요구가 증대되고 있다. 본 논문에서는 전차선의 높이 및 편위 검측 시스템에 관하여 기술 하였다. 검측 시스템은 Acuity사의 AR4000레이저 거리측정기와 AccuRange 라인 스캐너를 사용하여 전차선 높이 및 편위를 측정한다.

**주요어** : 전차선, 편위, 높이, 레이저 거리 측정기, 라인 스캐너

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

전동차는 팬터그래프(Pantograph)를 전차선(Overhead Contact Lines)에 접촉시켜 25,000V(교류구간), 1,500(직류구간)의 전기를 받아 기차 운행에 필요한 동력용 전원을

공급한다. 전동차에 필요한 전기를 정확히 공급하려면 전차선에는 일정한 높이, 균등한 장력, 적은 요동 등이 필요한데 가장 중요한 사항은 전차선이 팬터그래프에서 항상 일정한 높이와 편위 내에 있어야 한다는 것이다. 전차선의 위치가 레일중심에서 어느 정도를 유지하고 있는가를 전차선의 편위라고 하며, 레일에서 전차선까지의 거리를 전차선 높이라 하는데 이는 선로조건, 온도, 주행환경 등에 따라 변화되기 때문에 주기적으로 측정·점검하여 일정거리가 벗어나면 보수를 하여 전동차의 운행에 지장이 없도록 하여야 한다. 전철 초창기에는 보수자가 전 구간을 순회하며 편위자를 사용하여 수작업으로 검측을 하고, 측정 후 필요한 개소에 대하여 보수작업을 시행하였다. 그러나 보수자

<sup>†</sup> 책임저자 : 회원, 전남대학교, 전자컴퓨터공학과 박사과정  
E-mail : ssgun0@moiza.jnu.ac.kr  
TEL : (062)530-0798 FAX : (062)530-1759

\* 전남대학교, 정보통신공학과 교수

\*\* 전남대학교, 전자컴퓨터공학과 박사과정

\*\*\* 전남대학교, 전자컴퓨터공학과 교수

가 수작업으로 검측을 함으로써 측정 시에 오차가 발생되어 효과적인 보수에 애로가 발생 하였다. 그 오차는 주로 검측자에 따른 오차, 편위자 흔들림에 의한 오차, 움직이는 차량과의 조건에서 발생하는 오차 등이다[1]. 본 논문에서는 이러한 수작업 시 발생하는 오차를 줄이고, 차량을 이용하여 전차선의 편위 및 높이를 자동으로 측정하는 전차선 높이 및 편위 측정 시스템 개발에 관하여 기술하고 있다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 전차선의 편위 및 높이와 측정 방법에 대하여 살펴보고, 3장에서는 실제 시스템 설계 및 구현에 관하여 기술한다. 4장에서는 실제 구현된 편위 및 높이 측정 시스템의 실험결과와 환경에 대하여 기술하며, 마지막으로 5장에서는 향후 연구 방향과 결론을 맺는다.

## 2. 관련 연구

### 2.1 전차선의 편위와 높이

전철에 전력을 공급하는 전차선의 편위 및 높이는 전철 운행의 안전에 관련된 주요 측정 항목이다. 전차선의 높이는 전차선과 팬터그래프의 안정적인 접촉을 위하여 균일한 높이를 유지해야 하며, 전차선은 팬터그래프 접촉면(carbon stripshoe)의 균일한 마모를 위하여 지그재그(zigzag)로 설치되어야 한다. 편위의 방향은 50m 간격으로 설치된 전주(electric pole)에 따라 좌우로 바뀌며, 편위량은 좌우  $\pm 200\text{mm}$  이내이어야 한다. Fig. 1은 전차선의 편위와 높이를 나타내며 Table 1은 설계기준을 나타낸다[2].

### 2.2 전차선의 편위 및 높이 측정 방식

전차선의 편위와 높이를 측정하는 방법은 측정 장치와 전차선의 접촉 여부 및 측정 장치를 설치하는 방법에 따라 각각 차상식과 궤도식, 접촉식과 비접촉식으로 분류되며 이중 물리적인 제약이 없고 안전하며, 측정이 용이한 궤도식

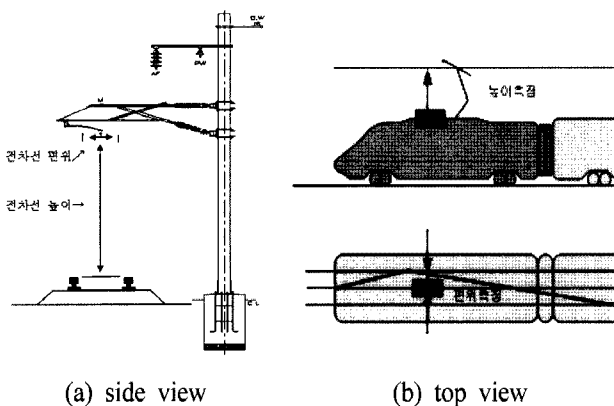


Fig. 1. Catenary stagger and height

Table 1. stagger and height standard rule

구분	기준
○ 전차선 편위	
- 일반구간, 복선터널	좌우 200mm(250mm)이하
- R 1,600 이상구간	좌우 200mm이하
- R 1,600 미만구간	선로외측 200mm이하
- 강풍구간, 승강장	좌우 100mm이하
- 단선터널	좌우 100mm이하
- 고상홈(수도권)	고상홈 반대측
- 무효부분	궤도중심에 설치
○ 전차선 높이	
- 커티너리 구간	표준 5,200mm(4,850mm) 최저 5,000mm 최고 5,400mm
- 강제가선 구간	표준 4,750mm

( ) : the inevitable case

비접촉 방법의 요구가 증가되고 있다. 현재 다양한 기술들이 존재하고 있으며 정밀도는 약 5mm로써 높은 정확도를 가지고 전차선의 높이 및 편위에 대한 측정이 가능하다. 그러나 기존 방법들은 전차선의 편위 및 높이 측정을 위해 상당히 많은 부품을 필요로 하기 때문에 측정 단가가 높으며 제어가 상당히 어려운 문제점이 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고 측정 정밀도가 높은 기술의 개발이 필요하다.

대표적인 비접촉 측정방식으로는 초음파를 이용한 방식과 머신비전을 이용한 방식이다. 초음파 방식의 경우 온도 등 외부 환경과 정밀도에, 머신비전을 이용한 방식은 고해상도 카메라 등 높은 제조 단가와 측정 장치의 정밀도에 각각 단점을 가진다[3]. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 높은 정밀도를 가지면서 제어하기가 쉬운 레이저 스캐너를 이용하여 편위 및 높이 측정 시스템을 구현하였다. 레이저 스캐너는 크게 거리를 측정하는 거리 측정기와 각도를 검출하는 라인 스캐너로 나뉜다.

#### 2.2.1 레이저 거리 측정기

본 논문에서 사용한 거리 측정기는 TOF(Time of flight) 방식으로 Fig. 2와 같이 방출된 적외선 레이저빔이 대상물

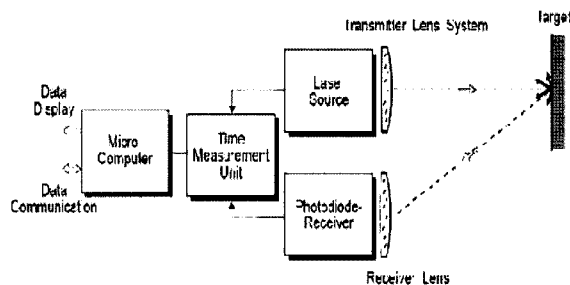


Fig. 2. Time of flight method

체에 반사되어 돌아오는 이동시간(travel time)으로부터 거리를 역산하여 대상점 좌표를 인지한다[4].

거리  $D$ 는 식 (1)과 같이 경과된 시간에 빛의 속도( $c$ )를 곱하여 산정된다[5].

$$D = \frac{1}{2} \cdot c \Delta t \quad (1)$$

$c$  : 빛의속도       $\Delta t$  : 시간차

### 2.2.2 라인 스캐너

전차선의 좌표값을 얻는 라인 스캐너는 1.3과 같이 고속으로 회전하는 반사경을 이용하여 방출각을 조절하여 측정하는 라인스캔(line scan)방식을 사용하였다.

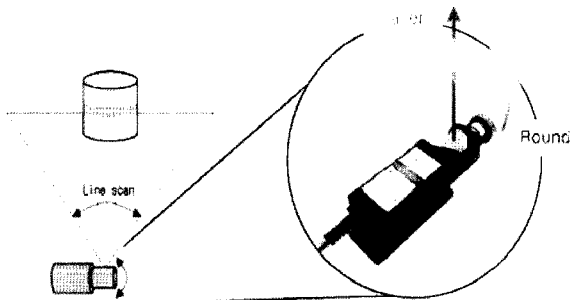


Fig. 3. Laser line scanner method

라인 스캐너의 반사경은 회전판과 커플링을 사용하여 직결되어 회전하며, 회전판은 Fig. 4와 같이 방출각을 계산하기 위하여 여러 개의 홀(hole)로 이루어져 있다. 이 홀은 광센서를 이용하여 명암차로 검출되며, 이에 비례하는 펄스를 생성한다. 따라서 이 홀의 개수에 따라 해상도가 결정된다. 본 논문에서 사용 된 라인 스캐너는 1024개의 홀을 가지며, 방향을 나타내기 위하여 90°의 위상차를 갖는 두 개의 회전판을 사용하였다. 또한 해상도를 높이기 위하여 rising edge와 falling edge 모두를 검출하여 최대 0.08°(360°/4096)의 해상도를 나타낼 수 있다.

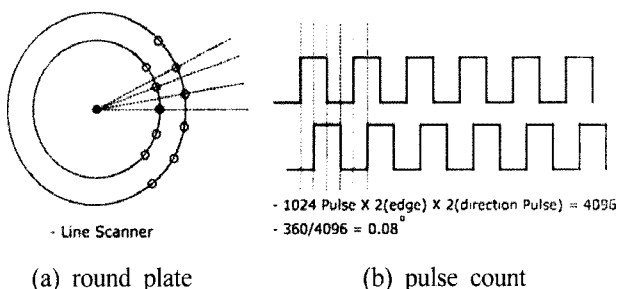


Fig. 4. Laser line scanner basic concept

## 3. 설계 및 구현

### 3.1 전차선 편위 및 높이 측정 알고리즘

전차선의 편위 및 높이 계산을 위해서는 측정 기준의 정의가 필요하다. Fig. 5는 편위 및 높이 측정을 위한 측정 기준을 보여준다.  $D_{sr}$ 는 편위의 측정 범위로서 레일의 중심에서 -400mm ~ +400mm까지 총 800mm의 측정 범위를 가지며,  $D_{hr}$ 는 편위의 측정 범위로 4,500mm부터 6,000mm까지 총 1,500mm의 측정 범위를 갖는다.  $\alpha$ 는 측정 장치의 위치로 측정 장치가 설치된 차량의 높이 오프셋을 나타낸다. 일반적으로 열차는 3,400mm의 높이를 가진다.

Fig. 5에 나타난 관련 변수들을 가지고 식 (2)와 같이 최대 감지각이 산출 가능한데, 최대 감지각  $\theta_{max}$ 는 불필요한 측정을 막고, 측정 장치의 효율적인 메모리 사용과 고속연산을 위해 사용된다.

$$\begin{aligned} \theta_{max} &= \tan^{-1} \frac{\frac{1}{2} D_{sr}}{D_{cable} - \alpha} \\ &= \tan^{-1} \left( \frac{(1/2) \cdot 800}{4500 - 3400} \right) \approx 20^\circ \end{aligned} \quad (2)$$

$\theta_{max}$  : maximum  $\theta$        $D_{cable}$  : cable height

레이저 스캐너에서 의해서 측정된 거리와 각도가 주어지면 식 (3)과 식 (4)와 같이 편위와 높이 산출이 가능하다.  $D_r$ 과  $\theta$ 는 각각 레이저 스캐너에서 검출된 거리와 각도를 나타내며  $\alpha$ 는 오프셋을 나타낸다.

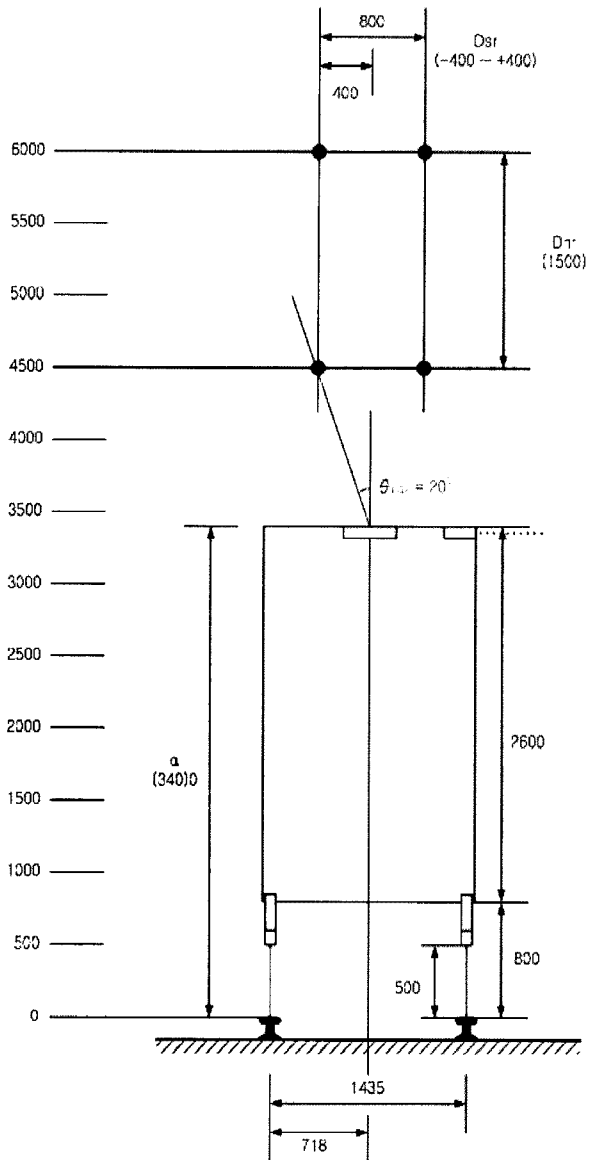
$$D_{height} = D_r \times \cos \theta + \alpha \quad (3)$$

$$D_{stagger} = D_r \times \sin \theta \quad (4)$$

### 3.2 측정 시스템의 구현

본 논문에서는 구현을 위하여 Acuity사의 레이저 스캐너를 사용하였다. Acuity사의 레이저 스캐너는 AR4000 거리 측정기와 AccuRange 라인 스캐너가 하나로 통합된 모듈이다. AR4000 거리 측정기는 레이저빔이 측정대상에 반사되어 돌아올 때까지의 시간을 계산하여 PWM(Pulse Width Modulation) 신호로 출력하며[6], AccuRange 라인 스캐너는 스캔 모터가 360° 회전할 때마다 4096개의 각도에 비례하는 펄스를 출력한다. AR4000 거리 측정기와 AccuRange 라인 스캐너는 최대 0.032mm의 분해능과 0.08°의 해상도를 가진다[7].

Fig. 6은 구현된 전차선 편위 및 높이 측정 시스템의 전



$D_{hr}$  : Height Range       $D_{sr}$  : Stagger Range  
 $\theta$  : Measurement Degree       $\alpha$  : Offset(train height)

Fig. 5. Variables of catenary stagger and height

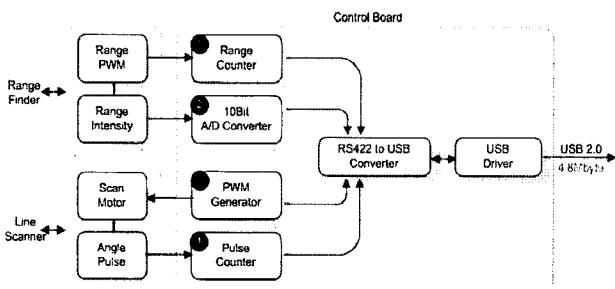


Fig. 6. Catenary stagger and height measurement system architecture

체 구조를 나타낸다. AR4000 레인지 파인더에서 나오는 PWM 신호의 시간 값을 계산하고 AccuRange 라인 스캐너의 각도 펄스를 카운트하기 위해서는 별도의 측정 보드

가 필요하며, 본 연구에서는 ATmega128 MCU를 사용하여 구현하였다. 측정 보드는 편위와 높이 외에 잡음 제거 및 데이터 신뢰성을 보장하기 위하여 레이저빔의 반사강도(Intensity)까지 측정한다. 측정된 데이터는 USB 인터페이스를 통하여 분석용 PC와 연결되며, 텍스트와 그래프 형태로 저장된다. 각 블록 및 기능은 다음과 같다.

- ① Range Counter : 사면에 반사되어 돌아오는 레이저 빔 수신 신호를 50KHz/sec의 샘플링 레이트로 검출하여 거리를 계산하는 회로.
- ② 10Bit ADC : 반사된 레이저빔의 신호 강도를 측정. 잡음 제거 및 데이터의 신뢰성 보장을 위해 사용된다.
- ③ PWM Generator : 라인 스캐너의 스캔 모터를 일정한 속도로 회전 시키는 회로. 기본 10 RPS를 가지며 프로그램에 의하여 변경 가능하다.
- ④ Pulse Counter : 라인 스캐너의 회전 각을 정밀하게 검출하는 회로. 한 바퀴(360°) 회전 시 2048개의 펄스를 카운트하며  $360/2048=0.18^\circ$ 의 해상도를 제공한다.

### 3.3 스캔 속도에 따른 데이터 검출비

구현된 편위 및 높이 측정 시스템은 라인 스캐너의 초당 회전수에 따라 검출 가능한 데이터 비율이 달라진다. 회전수에 따라 레이저빔이 타겟(target)에 맞는 비율이 선형적으로 증가하거나 감소하기 때문이다. 따라서 데이터의 신뢰성을 보장을 위해 라인 스캐너의 회전수에 따른 초당 레이저빔이 전차선에 히트(hit) 되는 수를 계산할 필요가 있다.

먼저 초당 측정 가능한 편위 및 높이 데이터의 샘플링 레이트  $\omega$ 는 식 (5)와 같이 거리측정기의 샘플링 레이트 ( $RF_{sample}$ )를 라인 스캐너의 초당 회전수( $LS_{RPS}$ )로 나눔으로써 산정된다. 구해진  $\omega$ 를 가지고 식 (6)과 같이 히트 카운트  $HC$ 를 도출해 낼 수 있다. 여기서  $\phi_{cable}$ 은 전차선의 지름을 나타낸다.

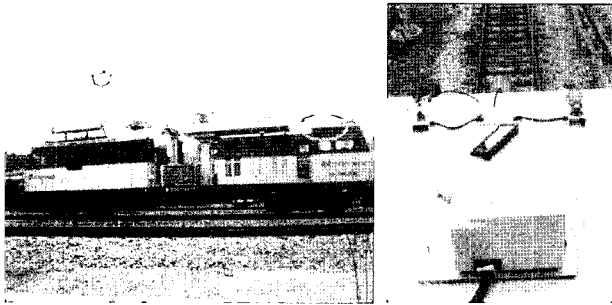
$$\omega = \frac{RF_{sample}}{LR_{RPS}} \tag{5}$$

$$HC = \frac{\phi_{cable}}{(2\pi R/\omega)} \tag{6}$$

구현된 편위 및 높이 측정 시스템의  $RF_{sample}$ 는 50K이며  $LS_{RPS}$ 는 10 RPS, 전차선의 지름은( $\phi_{cable}$ ) 12mm이다. 전차선의 거리 측정 범위가 설치위치(3400mm)로부터 1100mm~2600mm이기 때문에 이를 식 (5)와 (6)에 대입시키면 원거리(최소) 3개부터 근거리(최대) 9개까지 히트 카운트가 산출된다. 따라서 구현된 시스템의 레이저빔이 빔맞은 경우 없이 측정 가능함을 이론적으로 검증할 수 있다.

#### 4. 실험 및 결과

실험을 위하여 Fig. 7과 같이 한국철도시설공단 시설보수 차량인 모터카 PMIL-401호에 탑재하였다. 측정 시스템은 모터카 지붕의 정 중앙에 설치되며 유선으로 차량 내부에 있는 측정용 컴퓨터와 연결된다. 또한 차량의 속도와 측정 위치를 계산하기 위하여 차륜에서 tacho 정보를 받아온다.



(a) Measurement vehicle (b) Measurement system  
 Fig. 7. Catenary Stagger and Height Measurement System

Fig. 8은 옥계역의 임시선로로 약 5km 구간을 시속 30 km/h 주행속도로 왕복 주행하여 측정하였다. 측정된 결과는 그래프 형태로 분석용 PC에 실시간 현시되며 직각 좌표계로 표현된다. 가로축은 위치(킬로정 원점으로부터의 거리 기준)를 표시하고, 세로축은 그에 따른 편위와 높이를 나타낸다. 동시에 기준을 위한 참고 값으로 위치와 속도까지 표시하였다. Fig. 9는 측정 화면을 보여준다. 측정결과

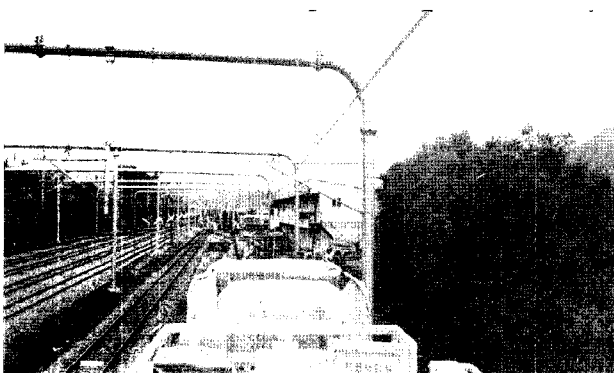


Fig. 8. Measurement environment

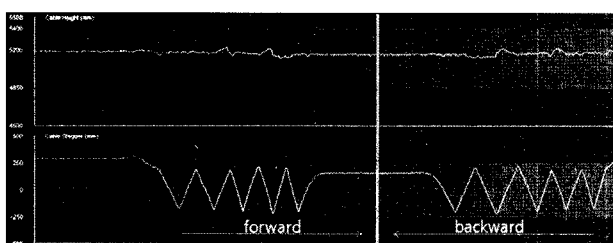


Fig. 9. Measurement result

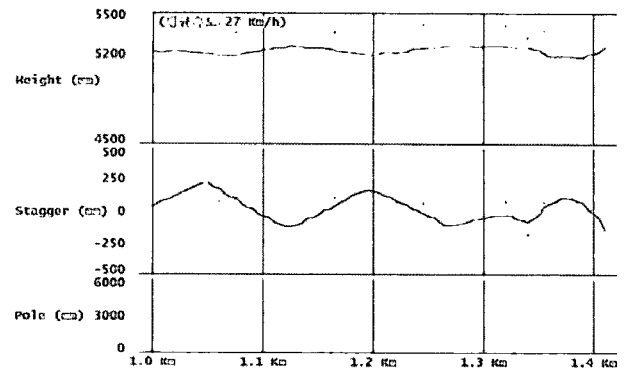


Fig. 10. Analysis result

0.18°(50K/2048)의 해상도마다 2~3개의 거리 데이터가 획득되었으며, 히트 카운트(HC)는 평균 4~5 개가 검출되었다. 왕복 측정 시 반복 정밀도는 평균 0.25mm를 나타냈으며 그래프는 기준치를 벗어나는 편위 및 높이 없이 완만한 형태의 곡선을 그렸다. Fig. 10은 분석을 위하여 특정 구간을 확대 하여 표시한 결과 그래프를 나타낸다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 레이저를 이용한 비접촉식 전차선 편위 및 높이 측정 시스템 개발에 관하여 기술하였다. 거리와 각도 측정을 위하여 Acuity사의 AR4000 레이저 거리 측정기와 AccuRange 라인 스캐너를 사용하였고, 별도의 측정 보드를 개발하였다. 개발된 편위 및 높이 측정 시스템은 0.25mm의 반복 정밀도와 0.18°의 해상도를 가지며, 분석 프로그램에 의해 텍스트와 그래프 형태로 출력된다. 이는 능동적인 점검 지점을 제공함으로써 전차선의 설치 및 유지보수에 효과적으로 응용될 수 있다.

현재 구현된 편위 및 높이 측정 시스템은 설치된 차량의 기울기가 고려되지 않아 주행 측정 시 외부 환경적인 요인에 따라 오차가 발생한다. 따라서 이를 보정함으로써 더욱 정교한 편위 및 높이를 얻을 수 있는 연구를 진행 중이다.

#### 감사의 글

본 연구는 BK21 사업단의 지원을 받았으며, 한국철도학회 2008 춘계 학술대회에 발표된 내용으로[8] 추천을 받아 이에 수정·보완하여 학회 논문에 제출함.

#### 참고 문헌

1. 코레일(2003), “철도 전기시설안내”, 코레일.
2. 안영훈, 현충일 (2004). “전철화된 호남선에서의 전기차량에 의

- 한 전차선로 측정 및 평가,” 한국철도학회 학술발표대회논문집, 2004. June, pp. 60-65.
3. 김선기 외 6명(2006), “스테레오비전을 이요한 전차선 높이 및 편위 정밀 측정”, 한국정밀공학논문집, 제 23권 10호, pp. 14.21.
  4. 추창우 외 4명(2007) “3차원 복원 기술 동향”, 전자통신동향분석.
  5. 조형식 외 3명(2008), “대상체의 반사 특성에 따른 지상레이저 스캐너의 정확도 분석”, 한국GIS학술대회, 2008. June, pp. 306~309.
  6. Acuity corporations(2006), “AR4000 Range Finder User's Manual”.
  7. Acuity corporations(2006), “AccuRange Line Scanner User's Manual”.
  8. 송성근, 박성모(2008), “전차선 편위 및 높이 측정 시스템 개발에 관한 연구”, 한국철도학회학술대회, 2008. June, pp. 101.
- 접수일(2008년 7월 10일), 수정일(2008년 9월 29일),  
게재확정일(2008년 10월 7일)