

초고속주행 하이퍼루프 포드의 정밀 위치측정 장치 구현 및 성능평가

옥민환**, 최수용*, 최재현*, 이관섭*

Implementation and Performance Evaluation of a Precision Localizing Device for Hyperloop Pods Driving at Ultra-High Speeds

Min-Hwan Ok**, Su-Yong Choi*, Jae-Heon Choe*, Kwan-Sup Lee*

요약 하이퍼루프는 튜브 내를 부상한 상태로 초고속주행하는 미래형 이동 시스템으로 제안되었다. 하이퍼루프에서 달리는 포드 차량은 선형 동기모터 상에서 주행하기에 위치측정이 근본적 중요성을 가진다. 1000km/h 이상의 속도로 주행하는 포드 차량의 가속과 감속에 정밀한 위치측정이 요구되며 또한 차량간 거리 유지를 위한 속도 조절에도 요구된다. 본 논문은 laser surface velocimeter를 개량하여 새로운 범위조건의 위치측정을 시도한다. 높은 정밀도로 초고속 이동체의 위치를 측정해야 하기에 지나가는 타일의 레이저 반사율 차이 검출로 변위를 계산하는 상대위치 측정장치를 구현하여 성능시험으로 평가하였다. 500km/h 미만의 포드 속도에서 cm 단위의 정밀도로 정확한 위치 측정을 보였으며, 500km/h 이상의 포드 속도에서도 0.1% 미만의 매우 낮은 오차율로 위치측정 결과를 보여주었다. 향후 500km/h 이상에서의 오차율도 0에 수렴하도록 연구를 진행해야 한다.

Abstract A futuristic locomotion system called Hyperloop is projected for driving at ultra-high speed, levitated in the tube. In hyperloop localization of pods on the linear synchronous motor is essential for pod driving. precision localization is required for acceleration and deceleration of pods driving at speed above 1,000km/h, and also required for adjusting the pod speed driving at this very-high speed to maintain inter-vehicle distance. In this work, a new scale of localization is challenged by modified laser surface velocimeter. In acceleration the speed of a virtual pod is calculated along its displacement measured by laser reflection. Under the requirement of precise localization of the pod driving at ultra-high speed, a displacement measurement device, which detects the difference in reflections from tiles passing by the pod, is developed and evaluated through performance test. Tests of pod speeds below 500km/h have showed exact localization results of the precision in centimeters, and tests of pod speeds above 500km/h have showed localization with very low error rates under 0.1%. For the measurement above 500km/h, future works would pursue the error rate converges to zero.

Key Words : Hyperloop, Linear synchronous motor, Localization, Laser surface velocimeter, Relative distance

1. 서론

미래형 주행기술인 하이퍼루프[1]는 대륙 범위의 이동에서 이용할 초고속 이동 시스템이다. 하이퍼루프 포드(차량)는 지상 가이드웨이에서 주행을 제어하

여 시속 1,000km대의 속도에 이르는 초고속 이동체로서 LSM(Linear synchronous motor) 추진으로 바라는 속도까지 도달하게 된다. 하이퍼루프의 포드 주행환경은 아진공 튜브 내에서 부상된 상태의 초고속 주행으로 다음과 같은 측정 조건을 가진다.

This research was supported by a grant from R&D Program of the Korea Railroad Research Institute, ROK

*Dept. of HTX research team, Korea Railroad Research Institute

**Corresponding Author : Dept. of HTX research team, Korea Railroad Research Institute (panflute01@hanmail.net)

Received October 03, 2020

Revised October 21, 2020

Accepted October 22, 2020

- 비접촉 측정
- 아진공 상태
- GPS, GLONASS 이용 불가
- 음속보다 빠른 측정

비접촉 측정은 부상된 차량이 초고속 주행 중 어느 부위도 닿아서는 안전하지 않기 때문에 타코미터 같은 접촉하여 회전수를 세는 방식의 측정 방법은 쓸 수 없다는 것이다. 지상 주행 차량 종류들 중 다수가 이런 방식을 이용하여 상대 위치를 측정하기에 많은 종류의 센서가 제외된다. 아진공 환경은 음파를 이용한 측정 방법을 쓸 수 없다는 것이며, 항공기에서 사용되는 기류에 의한 동압 검출로 측정하는 속도계 등도 사용할 수 없다는 것이다. 하이퍼루프 포드는 지상에서 주행하는 항공기처럼 여길 수 있기 때문에 항공기 장치를 사용하지 못하는 것은 여러 가지 방법의 측정에 있어 어려움이 많다는 의미가 된다.

튜브 내의 이동체이기 때문에 항법위성 측위인 GPS, GLONASS도 이용할 수 없다. 이 측위방식은 대부분의 지구 상 이동체가 사용하는 측정 방법으로 항법위성을 이용하지 못하는 이동체의 측위는 측정 방식에 있어 매우 제한적이라는 것을 알 수 있다. 초고속 주행 속도가 아음속이기 때문에, 측위 속도는 음속 보다 빨라야 한다. 센서가 측정하는 속도는 충분히 빠르더라도 그 아날로그 값을 디지털 처리하는 속도 또한 마찬가지로 빨라야 한다는 것으로 처리장치가 고속계산을 해야 할 필요성을 가진다.

포드는 LSM 추진으로 주행하기 때문에 LSM 추진 제어에 다음과 같은 측정 수준이 요구된다.

- cm 단위의 측정 정밀도(measurement precision)
- msec 단위의 측정 빈도(sampling rate)

msec 단위의 측정은 측정 빈도가 고속으로서 센서와 함께 신호처리도 msec 단위로 수행되어야 한다는 요구수준이다. 그리고 초고속 주행을 하는 포드의 위치를 cm 단위로 측정한다는 요구수준으로 속도를 기준으로 초정밀 측정을 요구하는 수준이다. 비

례적으로 100km/h대 주행 차량이라면, 차량의 위치를 mm 단위의 정밀도로 msec 단위의 빈도로 측정한다는 것이다.

요구수준의 고정밀도로 고속으로 측정하는 방법은 튜브 내라는 환경에 의해 몇 가지 밖에는 없으며, 그 중에 레이저를 이용한 고정밀, 고속 측정으로 상대위치 측정 방식을 고안한다. 레이저 광을 응용하는 방식은 레이저의 고정밀 특성과 빛이라는 아날로그 신호를 디지털로 처리하는 소자들의 고속성능 특성으로 포드 상대위치 측정의 요구수준에 적합하다. 레이저를 이용하여 차량의 위치를 측정한다면 튜브 내에서는 LSV(Laser surface velocimeter[2])가 적합한 형태이나, 100km/h의 주행차량으로 견주어 볼 때 mm 단위의 정밀도로 msec 단위의 빈도로 측정한다는 요구조건에서 도플러효과 미분계산(differential Doppler process)을 millisecond 미만의 시간으로 처리하는 하드-리얼타임 조건이 부가된다. 실험적 LSV의 속도 측정 수준은 100~300mm/s로서[3], 0.36km/h~1.08km/h의 속도로서 요구수준에 크게 미달한다. Microsecond 수준의 리얼타임 조건에 레이저 광소자들은 시간 내에 응답하나, 도플러효과 미분계산까지 시간 내에 응답할 수 있는 상용 전자회로 기술은 그 자체로 도전적인 이슈인 관계로 본 논문에서는 도플러효과 미분계산을 포함하지 않는 다른 방식으로 상대위치 측정을 수행한다.

2. 레이저 상대위치 측정장치

2.1 포드 상대위치 측정방식

레이저를 반사시켰을 때 강한 반사광이 나타나는 타일과 약한 반사광이 나타나는 타일을 번갈아 배치하는 상대위치 측정 방식을 고안하였다. 타일의 가로 폭은 동일하며 측정 정밀도의 절반인 몇 cm로 정해져 있다. 측정 빈도는 차량의 속도와 관계없이 몇 msec로 고정되어 있다.

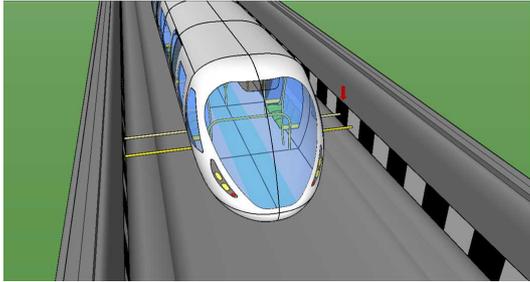


그림 1. 검정타일에서 반사광이 약하게 검출
Fig. 1. Continuously detect weaker reflection from a black surface

하양타일의 강한 반사광이 검출되다가 곧이어 검정타일의 약한 반사광이 검출되다가(그림 1), 다시 다음 하양타일의 강한 반사광이 검출되면(그림 2) 앞의 하양타일에서 다음 하양타일만큼 이동한 것으로 판정된다. 그래서 하양타일마다 포드 이동이 측정되므로 하양타일의 간격이 측위 정밀도로 결정된다.

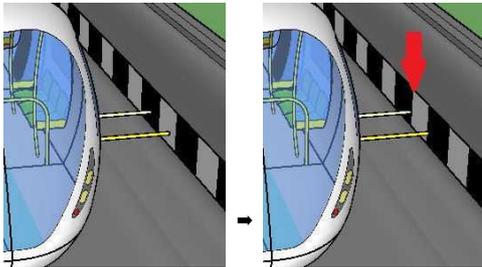


그림 2. 반사광이 하양 타일에서부터 강하게 검출되기 시작
Fig. 2. Beginning to detect stronger reflection from a white surface

2.2 광측정의 원리

로터리 엔코더(Rotary encoder)나 선형 스케일(Linear scale)등과 같이 주기적으로 반복되는 패턴을 참조하여 변위를 디코딩하는 장치는 신호의 강건함과 고속처리 능력 등의 특성 덕분에 1차원 변위 측정의 표준이 되어왔다[4, 5, 6, 7].

본 논문에서는 레이저의 빛을 슬릿빔(Slit beam)으로 가공하여 목표물(반사판)으로 주사하며, 반사판에는 눈금의 띠 형태로 눈금에 따라 반사율을 다르게 한다. 눈금을 빛이 잘 반사되는 부분과 흡수되는 부분으로 구분하여 위치를 구분 짓게 한다. 레이저가 반사판에 도달하였을 때 반사판의 성질에 따라 되돌

아오는 레이저 반사광의 광량이 차이가 있다. 그림 3처럼 이를 광수신단의 포토 다이오드로 수신하여 전자 신호로 변환 이를 MCU가 계수하여 직렬통신 방식으로 추진시스템으로 전송하게 된다.



그림 3. 반사율이 낮은 곳과 높은 곳의 반사광 차이
Fig. 3. Difference in levels of reflection from a black surface and one from a white surface

2.3 상대위치 측정장치 설계

측정장치는 그림 4에 나온대로 크게 광학부, 신호처리부로 되어 있다. 광학부는 광신호를 보내는 레이저 부분과 광신호를 수신하는 PD로 광학 구성이 되어 있다. 수신된 광신호는 필터링을 통해 신호를 디지털 신호로 변환 MCU로 보내어 진다. 신호처리부는 광학 신호를 다른 광학적 노이즈 및 전기적 노이즈를 제거하기 위해 Lock in Amp를 이용하여 정확한 신호를 수신할 수 있도록 구성하였다.

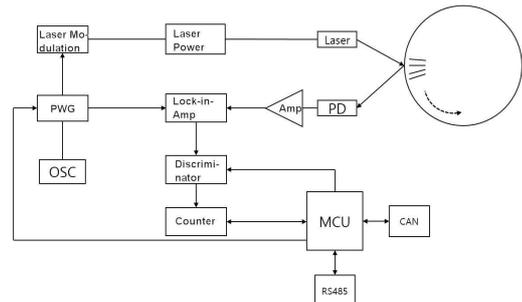


그림 4. 상대위치 측정장치 및 고속시험기 구성도
Fig. 4. Assembly of the displacement measuring device and a high-speed imitator

외부와 통신 연결은 직렬통신을 통해 외부로 계수 정보를 전송한다. 성능평가를 위해 그림 4의 우측 편에 보이는 고속시험체를 제작하여 30cm 원판을 고속회전하여 회전판의 반사율이 다른 마커를 읽어 상대위치 측정 성능시험이 가능하도록 하였다.

3. 레이저 상대위치 측정장치 세부구성과 고속시험기 세부구성

3.1 광학부 세부구성

송신단 광학계 구성은 30mm 직경의 초점거리 50mm를 갖는 Plano-covex 렌즈를 사용하였다. 레이저를 시트빔으로 만들기 위해 Rod lense를 사용하였다. 시트빔은 다시 Plano-covex 렌즈에 의해 컬리메이션되어 대기중으로 조사된다.

3.2 신호처리부 세부구성

신호처리부는 프리앰프, 대역통과필터, Lock-In-AMP, 그리고 MCU로 구성되어 있다.

- 프리앰프

미세한 광신호를 획득하기 위해서는 노이즈를 제거하고 신호를 증폭하는 신뢰성 있는 회로가 그림 5에 나타나 있다. 수신회로는 Trans Impedance Amp.라고 하는 반전형(Invert) 전류-전압 변환회로를 포토 다이오드 D1의 광전류를 전압으로 바꾸어 준다.

$$V_{out} = - I_{in} \times R_1 \quad (1)$$

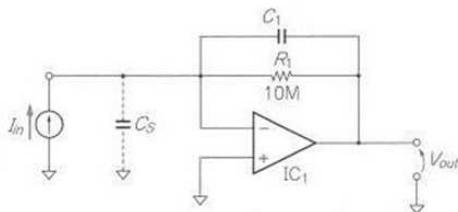


그림 5. 기본 전류원에 대한 증폭회로
Fig. 5. Pre-Amplifier

C1은 발진 방지용이다. 본 논문에서는 미세전류를 측정하기 위해서 바이어스 전류가 적은 FET OP-앰프가 사용되었다. 기본적인 전류 원을 전압으로 바꾸는 증폭기이다.

- BPF (대역통과필터)

레이저 광원을 대기 중으로 조사 할 때 대기 중의

외란광과 신호원을 구분하기 위해 광원을 변조하여 조사한다. 이때 100kHz 주파수로 대기 중으로 조사하게 된다.

대기 중의 에어로졸에 의한 산란으로 돌아오는 신호와 외란광과의 구별하기 위해 레이저에서 조사한 주파수 성분만을 통과시켜 신호를 획득하게 된다. 100kHz로 변조된 수신 신호를 통과시키고 기타 주파수 대역을 차단하는 BPF이다. 이 필터는 Low Pass, Sallen Key, Butterworth 4차로 구성하였다. Cut-Off 주파수 부분에서 평단도를 향상하기 위하여 구성하였다. 2단 80kHz 고역통과필터와 130kHz 저역통과필터로 구성되어 있다.

- LIA (Lock-In-Amp)

LIA는 Balanced Modulator/Demodulator (AD630)를 사용하여 제작되었다. AD630은 정밀도가 높은 Balanced Modulator이다. 온-보드 애플리케이션 저항의 네트워크는 0.05 % 정도 (AD630B)와 ±1, ±2의 정밀도 폐쇄 루프 이득(gain)을 제공한다. 이 저항들은 정확하게 +1, +2, +3, +4의 멀티플렉서 이득을 구성하는데 사용할 수 있다.

LIA는 특성 주파수 성분의 교류성분을 DC 성분의 크기와 위상으로만 나타낸다. Clock-source board에 있는 위상 전이기(AD9833)의 참조 신호의 Phase를 조정하여 위상차가 0이 되도록 한다.

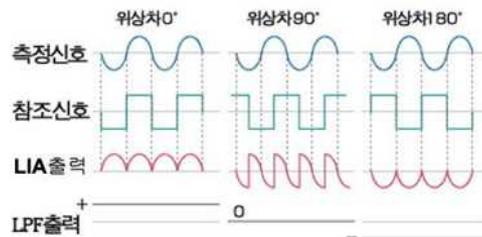


그림 6. LIA를 이용한 신호 측정결과
Fig. 6. Signals via Lock-In-Amp

대역통과필터를 통과한 신호를 2배 증폭하여 준다. 그림 6과 같이 참조신호 100kHz를 증폭하여 Reference 신호로 사용한다.

• MCU(마이크로 컨트롤러)
 아날로그 회로에서 디지털 신호로 변환되어진 신호가 전달되면 그림 7의 MCU에서 이를 계수 하여 외부로 출력한다. 아날로그 내부 회로의 클럭(Clock) 컨트롤 및 위상 컨트롤을 한다. 외부 직렬통신은 CAN, RS-232로 연결하였다.

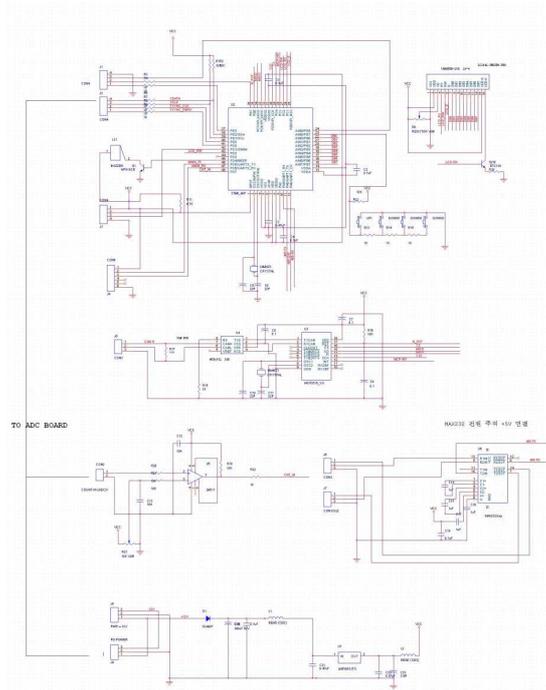


그림 7. 마이크로 컨트롤러 회로
 Fig. 7. Micro controller circuit

3.3 고속시험기 세부구성

상대위치 측정장치의 검증을 위해 고속의 이동 대상체가 필요하다. 고속 이동 물체에 대한 모의 시험을 위해 그림 8에 보여지는 회전체 형태로 고안하고 고속회전판 표면에 마킹을 하여 신호를 검출하였다.

모터는 고속 회전이 필요하여 AC 2KW급 서보 모터로 구동하였으며 이에 포함된 드라이버로 구성되어 있다. 모터 제어를 위한 컨트롤러를 별도로 구성하여 PC를 이용하여 회전체의 속도 및 작동을 조절할 수 있도록 하였다.

회전판은 무광검정색으로 Anodizing 처리 되었으며 표면에 레이저 식각을 하여 반사가 잘될 수 있

도록 하였다. 레이저 식각이 되어진 면은 원판 재질인 알루미늄이 노출되어 레이저 광을 잘 반사하게 되고 이를 마킹이라 부른다. 튜브 내의 하양타일에 해당한다.

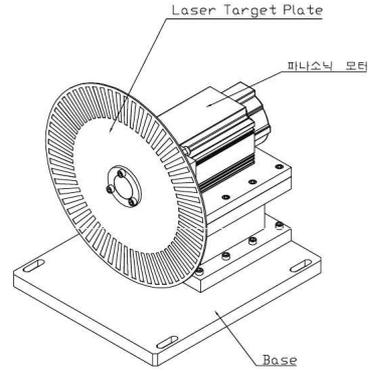


그림 8. 고속시험기 구조
 Fig. 8. The structure of a high-speed imitator

회전체의 속도는 디지털로 제어가 가능하다. 최고 회전은 3,500rpm까지 회전할 수 있다. 회전판의 반지름이 0.15m이기에 회전시 선속도는,

$$2\pi \times 0.15m \approx 0.94m\text{이고,}$$

$$0.94m \times x \text{ rpm (분당회전수)} \times 60\text{min} = y \text{ km/h (시속)이므로,}$$

$$0.94m \times 3,500 \text{ rpm} \times 60 \text{ min} = 197,400 \text{ m/h} = 197.4 \text{ km/h,}$$

로서 약 197km/h의 최고 선속도를 낸다. 상대위치 측정 요구단위가 3cm 이므로 원주 전체길이에 마킹을 31개 그려 넣으면 모두 검출되었을 때 197.4 km/h 속도가 되는 것이다. 이 마킹의 수를 늘려, 더 높은 속도의 측정 시험을 할 수 있다. 128개의 마킹을 그려 넣은 원판에서 128개 모두를 검출하면 815.0km/h의 측정 속도를 달성하게 되며, 162개의 마킹을 그려 넣은 원판에서 162개 모두를 검출하면 1,031.5km/h의 측정 속도를 달성하게 되는 것이다.

4. 레이저 상대위치 측정장치 성능평가

4.1 레이저 상대위치 측정장치 기능구현

고속 이동 물체에 대한 모의 시험을 위해 회전체 형태의 각속도로 가상 이동 물체의 선속도를 모사하였다. 그림 9에 보이는 상대위치 측정장치의 표시창을 통해 회전판 RPM 및 반사광 검출 누산 등을 확인할 수 있다.

위치검지 정밀도 및 정확도 향상을 위해 센서 오류 및 반사면 오염 대비 정밀도/정확도 증강[8]과, 오류검지 및 단계적 정보 사용 가능한 정보 이중화[9]를 통해 위치 측정시 측정신뢰도와 정보다각화를 꾀할 수 있다.

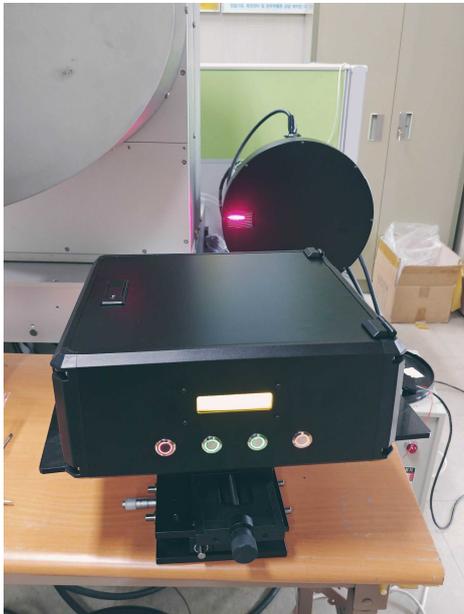


그림 9. 상대위치 측정장치와 고속시험기의 외형
Fig. 9. Appearance of the displacement measuring device and a high-speed imitator

4.2 고속시험기 대상 기능시험

고속시험기 회전판의 마킹 너비가 좁을수록 고배율 적용으로 초고속 선속도를 모사하게 된다. 그림 10은 반사광으로 수신된 아날로그 신호를 오실로스코프로 검출하고 있는 화면으로, 정확한 신호 수신형

태를 보여주고 있다. 레이저에 캐리어 신호를 실어서 송신하고, 이 캐리어 신호가 실려 있는 반사광만을 수신할 반사광으로 인정하는 방식으로 외부 광원의 간섭을 차단한다. 이 방식은 레이저 포인터에서 임의의 패턴을 실은 레이저를 발신하고 수신된 빛에 해당 패턴이 있는지 비교해보는 방식과 같은 원리이다 [10]. 최근에는 레이저에 부호어를 사용하고 변조를 통해 데이터 수신률을 높이는 연구도 진행되고 있다 [11]. 그림 10에서 하단부 파형이 광수신부에서 검출된 신호가 증폭되어 보이는 것이고, 하단부 파형을 Lock-in-Amp를 통해 캐리어 성분을 제거 및 몇 단의 필터로 상측의 파형을 만드는데 이것이 디지털 카운터에 들어가는 디지털 신호로서 수신 반사광과 정확히 매칭됨을 보이고 있다.

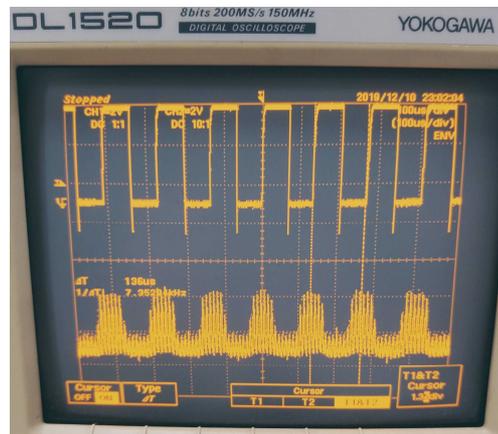
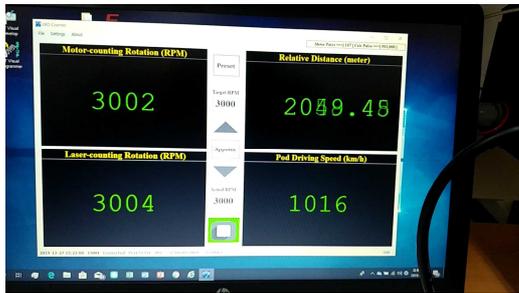


그림 10. 반사광 아날로그 신호
Fig. 10. Levels of analogue signals in th reflection

회전판 각속도를 이동체의 선속도의 증가에 비례하도록 증가시켜가며 성능시험을 수행하였다. 이동체 선속도(Pod speed)를 135km/h, 457km/h, 677km/h, 1,016km/h로 증가시켜가는 그림 11에서 상대위치 측정이 정확한 결과값을 출력하는지를 보여준다. 이동체 선속도가 600km/h를 넘어서면서부터 상대위치(Relative distance)값의 변화가 고정된 수치를 보여주기 어려울 정도로 빠르다.



(a) 500km/h 미만 선속도에서의 측정시험



(b) 500km/h 이상 선속도에서의 측정시험

그림 11. 상대위치 측정장치의 속도별 시험장면
Fig. 11. Screenshots of the distance measurement device in performance test

가상의 이동체 선속도를 저속에서부터 고속까지 증가시켜가며 성능시험한 결과를 속도 그래프와 상대위치 그래프로 그림 12, 그림 13으로 보이고 있다. 속도별 지점에서 10회 실험치를 평균한 값들을 도시하였다.

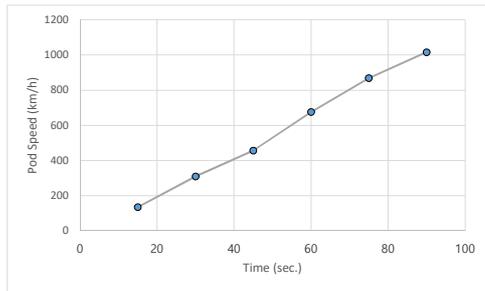


그림 12. 시간별 이동체 선속도 (km/h)
Fig. 12. Pod speed along time (km/h)

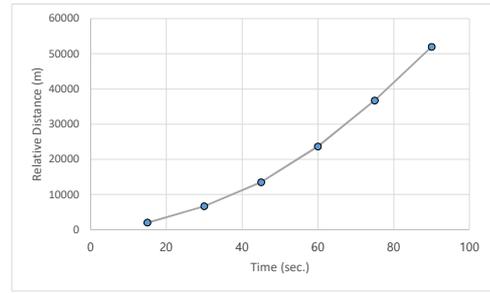


그림 13. 시간별 이동체 상대위치 (m)
Fig. 13. Relative distance along time (m)

상대위치 측정에 있어 측정 속도와 아울러 중요한 측정 정확도를 알아보았다. 표 1의 Localization Accuracy는 회전판의 모터 회전수 / 수신된 마킹의 개수로 계산된 회전수이다. 마킹의 개수가 정확히 맞아야 회전수가 같다. 하나라도 더 있으면 한 회전 더 한 것으로 계산한다. 선속도 500km/h 미만에서는 정확히 측정되었으나, 1,000km/h 미만까지는 회전수가 2번 더 계산되며, 1000km/h 이상에서는 3번 더 계산되었다.

디지털로 변환된 수신신호가 속도가 빨라질수록 On-Off 주기가 짧아져 On-Off 구분이 뚜렷이 안되어 On의 횟수를 일부 중복 누산하는 over-counting 현상으로 추정된다. 초고속의 영역에서 나타나는 현상이라 아직 명확한 분석은 아니나 MCU 회로를 개선하여 해결해야 할 향후 과업이 될 것이다.

표 1. 이동체 선속도, 상대위치, 측정 정확도
Table 1. Pod speed, Relative distance and Localization accuracy

	Pod Speed(km/h)	Relative Distance(m)	Localization Accuracy
Below 500km/h	135	2,025	400 / 400
	310	6,675	977 / 977
	457	13,530	1351 / 1351
Below 1,000km/h	677	23,685	2001 / 2003
	869	36,720	2701 / 2703
Above 1,000	1016	51,960	3002 / 3005

5. 결 론

아진공 튜브 안이라는 특수한 주행환경이면서 cm 단위의 정밀도를 요구하는 위치측정 요구조건에 1,000km/h에 달하는 속도에서의 정밀위치측정은 여러 가지로 도전적 과제이다. 현재의 기술 상 반응 속도가 가장 빠른 광소자를 사용하여 레이저를 이용한 상대위치 측정장치를 구현하여 1,000km/h대까지 성능시험을 해보았다. 기존 LSV 기술은 도플러 효과 미분계산이 필요해 1,000km/h대의 초고속에서 전자회로가 하드-리얼타임으로 처리하는 것은 난이도가 높아, 미분계산을 제외한 방식으로 구현하였다. 레이저 반사광의 반사율 차이로 위치변화를 요구 수준으로 측정하며 반사광의 강도 차이가 초고속으로 변화하는 상태를 검출하는 성능시험 통해 측정장치를 평가하였다. 광소자의 반응속도로는 처리가 가능한 수준이나 전자회로로 이어지면서 500km/h 초과에서부터 측정오류가 발생하기 시작하였으나 비율로 계산하면 0.09995%~0.09993%의 오차율을 보이기엔 긍정적인 결과로 평가한다. 향후 오차율을 줄여나가는 연구를 이어가야 한다.

REFERENCES

- [1] "Hyperloop Alpha", Elon Musk, whitepaper <https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf>, Tesla Inc., August 2013.
- [2] "Laser surface velocimeter", <https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_surface_velocimeter>, Wikipedia.
- [3] B. Xue, H. Zhang, T. Zhao, H. Jing, "A Traceable High-Accuracy Velocity Measurement by Electro-Optic Dual-Comb Interferometry", Appl. Sci., Vol. 19, No. 9, pp. 4118-4124, 2019.
- [4] A. E. Brennemann, Holic, R. L., "Magnetic and optical fluorescence position sensing for planar linear motor", Proc. of Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3, pp. 101-107, 1995.
- [5] S. H. Lee, K. S. Jung, "Precision displacement measurement using astigmatism", J. of Korean Society Precision Engineering, Vol. 25, No. 7, pp. 87-94, 2008.
- [6] KEYENCE Corp. Application Note,

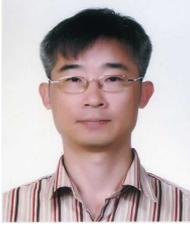
<http://www.keyence.co.kr/application/appli_204022.asp?no=4022>.

- [7] B. hnilicka, A. Besancon-voda, H. J. Schroder, G. Filardi, "Modeling the focus error characteristic of a DVD player", Proc. of the 2002 Int. Conf. on Control Application, Vol. 2, pp. 629-630, 2002.
- [8] M.-H. Ok et al., High-Speed Relative Position Measurement Method by Scanning and Detecting with Multiple Light Sources, KR Patent: 10-2019-0161376, 2019.
- [9] M.-H. Ok et al., High-Speed Relative Position Measuring Method by Scanning and Detecting with Multiple Light Sources, Capable of Detecting Bitwise Information, KR Patent: 10-2019-0161377, 2019.
- [10] Y.-h. Lee, H. -w. Ju, and S. -h. Song, "Development of Camera Controller with Pointer Tracking Unit", J. of Korea Inst. Information, Electronics, and Communication Technology, vol. 1, no. 3, pp. 111-117, Dec, 2008.
- [11] A.-h. Lee, C. -U. Baek, and D. -H. Lee, J.-W. Jung, "Underwater Laser Communication Using LDPC Coded Method", J. of Korea Inst. of Information, Electronics, and Communication Technology, vol. 11, no. 3, pp. 246-252, Jun, 2018.

저자약력

옥 민 환(Min-Hwan Ok)

[정회원]



- 1999년 2월 : 부산대학교 전자계산학과(이학석사) 졸업
- 2009년 2월 : 고려대학교 컴퓨터학과(이학박사) 수료
- 2001년 ~ 2004년 : 창신대학교 정보통신학과 조교수
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

〈관심분야〉 자율주행, 스마트카, 텔레매틱스

최 수 용(Su-Yong Choi)



- 2011년 2월 : 부산대학교 기계공학부 졸업
- 2016년 2월 : 과학기술원 원자력 및 양자공학과(공학박사) 졸업
- 2017년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

〈관심분야〉 무선전력전송, LSM, 하이퍼루프

최 재 현(Jae-Heon Choe)



- 2011년 2월 : 서울대학교 기계공학부 졸업
- 2017년 2월 : 서울대학교 기계공학부(공학박사) 졸업
- 2017년 2월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

〈관심분야〉 경량구조 설계, 복합재응용 설계최적화

이 관 섭(Kwan-Sup Lee)



- 1982년 2월 : 한양대학교 기계공학과 졸업
- 1995년 2월 : 과학기술원 기계공학과(공학석사) 졸업
- 2002년 2월 : BMSTU 제어계측공학과(공학박사) 졸업
- 1982년 3월 ~ 1996년 8월 : 국방과학기술연구원 선임연구원
- 1996년 8월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 수석연구원

〈관심분야〉 하이퍼루프, CBM