

경지 균평 작업을 위한 자동 표고 측정에 관한 연구*

A Study on the Automatic Level Measurement for Land Leveling

김 종 안*	김 수 현**	곽 윤 근**
준회원		
J. A. Kim	S. H. Kim	Y. K. Kwak

ABSTRACT

An automatic level measurement system was developed to level the land for direct seeding of rice. A laser transmitter/receiver set was used to measure land-level. The inclination error occurred in level measurement on irregular land surface could be compensated by attaching rotating mass.

The level measuring experiments were performed on three kinds of different shapes(step, random, sine). This system could accurately measure step level of which amplitude was 40mm in 0.5s, random level change within ± 5 mm maximum measurement error, and sine level change of which spatial frequency was 0.5m-1. To verify performance of the inclination error compensation system, frequency transfer function(acceleration input vs. inclination error) was computed by spectral analysis. The inclination error was decreased about 20dB by error compensation system.

주요용어(Key Words): 균평작업(Land leveling), 자동표고측정(Automatic level measurement), 레이저(Laser), 레이저균평기(Laser leveling system)

1. 서 론

우리의 主食인 벼 생산의 국제 경쟁력 확보를 위해서는 적은 노동력으로도 벼 생산이 가능한 직파 재배법을 도입하여 널리 보급하는 것이 필요하다. 그런데 벼 직파 재배시에는 경지면의 균일한 정도가 생산량에 크게 영향을 미치기 때문에 전 경지면의 정밀한 균평 작업이 이루어져야 한다. 기준 표고 설정 및 작업 계획을 위하여 정확한 표고 측정과 그 측

정값을 이용한 경지면의 표고 지도 작성이 필요하다. 경지면의 표고는 그림 1과 같이 외부에서 기준 높이가 되는 레이저 빔(laser beam)을 海面과 평행하게 발생시키고 그것을 레이저 수신기를 이용하여 감지함으로써 측정할 수 있다. (Fouss et al., 1972) 그런데 시험적으로 미국에서 도입된 균평 작업기의 레이저 수신기는 수신기의 중심 위치가 레이저 빔보다 높은지 낮은지 여부만을 감지하여 나타내어 준다. 이러한 수신기를 이용하여 표고를 측정하기 위해서

+ 본 연구는 '95년 농촌진흥청 특정연구개발 사업비 지원으로 수행되었음

* 한국과학기술원 기계공학과 대학원

** 한국과학기술원 기계공학과

는 자와 같은 보조 도구를 이용한 수작업에 의존하여야 하므로 넓은 면적의 경지에서 이루어지는 표고 측정 작업은 대단히 힘든 작업이 될 수밖에 없을 뿐 아니라 작업의 精密度도 저하된다.

따라서 본 연구에서는 표고의 측정 작업을 자동화하기 위해 제어 장치를 이용하여 레이저 수신기의 중심부가 항상 기준이 되는 레이저 빔을 추종하도록 제어하고 이 때에 발생하는 레이저 수신기의 수직 변위를 측정하여 수치화 된 표고값을 얻을 수 있는 자동 표고 측정 장치를 설계하고 제작하여 그 성능을 시험한다.

2. 이론 분석

가. 이론적 개요

본 실험에 사용된 균평 작업기는 스크레이퍼(scraper)를 이용하여 경지면을 외부에 설치된 레이저 발생 장치에서 나오는 해수면과 나란한 레이저 빔과 평행해지도록 整地할 수 있도록 구성되었으며 본 연구에서 설계한 균평 작업기의 전체적인 구성은 그림 1과 같다. 이는 이동 차량의 뒤에 부착되어 균평 작업을 수행하게 되고 경지면의 표고를 측정하는 부분, 표고 지도 작성을 위해 균평 작업기의 위치를 추정하는 부분, 표고 지도를 작성하는 부분, 스크레이퍼를 작동시키는 부분으로 구성되어 있다.

균평 작업을 하기 위해서는 기준이 되는 표고의 설정이 필요하므로 차량의 주행시에 자동으로 전체 경지의 표고를 일정 간격으로 측정하여 그 값의 평균을 기준 표고로 설정한다. 기준 표고의 설정 후,

현위치의 표고값이 이 기준 표고에 비하여 높고 낮은가에 따라 경지면의 깎기 또는 메우기 작업을 하게 된다.

나. 기울어짐 오차 및 보상

자동 표고 측정 장치는 이동 차량에 부착되어 차량의 불규칙 노면 주행시에 표고를 측정하기 때문에 그림 2와 같이 차량의 기울어짐으로 인해 정확한 표고값을 측정할 수 없다. 이러한 기울어짐 측정 오차는 표고 측정 장치의 롤링 방향의 기울어짐이 θ , 피칭 방향의 기울어짐이 ϕ , 레이저 수신기가 부착된 표고 측정 장치의 길이가 L 이라 할 때, $\Delta\varepsilon$ 는 식 (1)과 같다.

$$\Delta\varepsilon = L \cdot (1 - \cos\theta \cdot \cos\phi) \dots\dots\dots (1)$$

식 (1)에서 보면 기울어짐 오차를 감소시키기 위해서는 표고 측정 장치의 길이와 기울어짐을 줄여야 하지만 측정 장치의 길이를 줄이는 방법에는 제한이 있으므로 기울어짐(θ, ϕ)을 줄여야 함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 측정 장치가 항상 수직인 방향을 유지할 수 있도록 측정 장치의 고정 부분을 두 개의 짐발(gimbal) 구조를 이용하여 각 축 방향으로 자유롭게 회전이 가능하도록 하고 또 측정 장치가 기울어졌을 때 복원력이 작용될 수 있도록 측정 장치의 무게 중심을 고정 부분 아래쪽에 위치하도록 설계하였다.

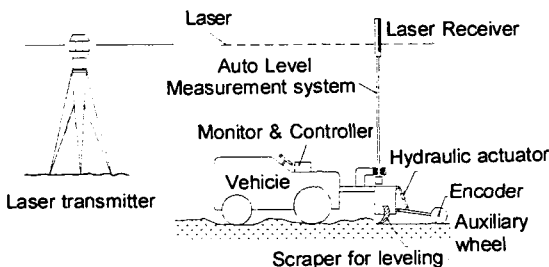


Fig. 1 Land leveling system.

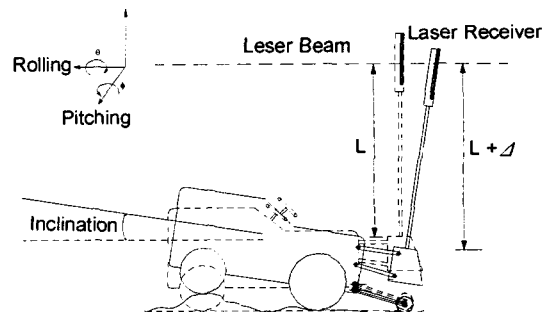


Fig. 2 Occurrence of measurement error due to inclination.

차량의 가속속, 회전과 불규칙 노면 주행 등의 동적인 상태에서 받는 외부 가속도 입력에 대하여 측정 장치가 항상 수직을 유지할 수 있도록 하기 위하여 측정 장치 아래쪽에 빠른 속도의 회전체를 부착하여, 이 때 발생하는 운동량 모멘트를 이용하여 외부 가속도 입력에 의한 기울어짐의 영향을 최소화하였다.

다. 동역학적 해석

요구되는 오차 보상 성능에 적합한 회전체의 속도 및 질량 관성 모멘트 등을 결정하기 위해서 표고 측정 장치에 대한 동역학식을 유도하였다. 동역학적 해석을 위한 표고 측정 장치의 간략화 된 모델은 그림 3과 같다.

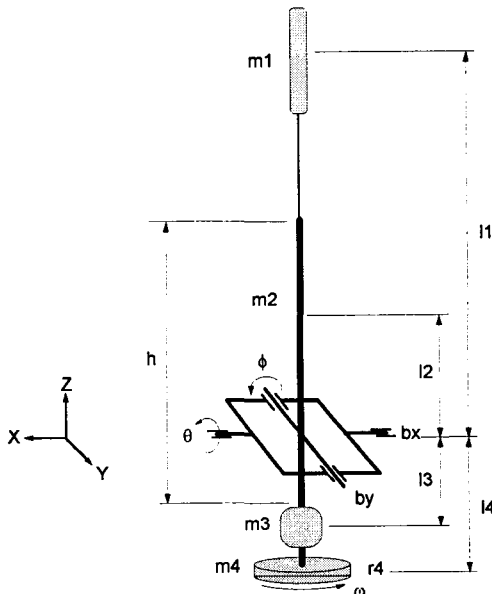


Fig. 3 Simplified model of level measurement system.

여기서 m_1 는 레이저 수신기, m_2 는 봉, m_3 는 모터, 기어, 타이밍 풀리 등으로 이루어진 구동부, m_4 는 회전체의 질량을 각각 나타내며 $l_1 \sim l_4$ 는 받침대에 고정된 위치부터 각각의 질량체 무게 중심까지 거리이며 h 는 봉의 길이, r_4 는 회전체의 반지름, b_x 와 b_y 는 각 축 베어링의 감쇠계수이다. 따라서 x 축 방향의 톨

링각(rolling angle)을 θ , y 축 방향의 피칭각(pitching angle)을 ϕ , 회전체의 각속도를 ω 라 하였을 때, x, y, z 방향의 가속도 입력 $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$ 에 대한 간략화 된 표고 측정 장치 모델의 동역학식은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

(Beer, 1977)

$$\begin{aligned} I_1 \ddot{\theta} &= J_{12} \ddot{y} + J_{13} \ddot{z} + H_{12} \dot{\theta} \dot{\phi} + H_{23} \dot{\phi} \dot{\omega} + F_1 \\ I_2 \ddot{\phi} &= J_{21} \ddot{x} + J_{22} \ddot{y} + J_{23} \ddot{z} + H_{11} \dot{\theta} \dot{\theta} + H_{13} \dot{\theta} \dot{\omega} + F_2 \\ &\dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

여기서 오차 보상 장치 작동시의 회전체 속도는 거의 일정하기 때문에 회전체를 구동하는 모터에서 발생하는 토크는 동역학식에서 무시되었다. (Beer, 1977) 그리고 각 매개변수는 아래와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} I &= m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 + m_4 l_4^2 \\ ml &= -m_1 l_1 - m_2 l_2 + m_3 l_3 + m_4 l_4 \\ I_x &= \frac{1}{12} m_2 h^2 \quad I_y = \frac{1}{12} m_2 h^2 \quad I_p = \frac{1}{4} m_4 r_4^2 \\ I_1 &= (I_x + I + I_p) \cos \phi \\ I_2 &= I_y + I + I_p \\ J_{12} &= -ml \cos \theta \\ J_{13} &= -ml \sin \theta \\ J_{21} &= ml \cos \phi \\ J_{22} &= ml \sin \theta \sin \phi \\ J_{23} &= -ml \cos \theta \sin \phi \\ H_{12} &= (I_x + I_y + 2I) \sin \phi \\ H_{23} &= -2I_p \\ I_{11} &= -(I_x + I + I_p) \sin \phi \cos \phi \\ H_{13} &= 2I_p \cos \phi \\ F_1 &= -b_1 \dot{\theta} - mlg \sin \theta \\ F_2 &= -b_2 \dot{\phi} - mlg \cos \theta \sin \phi \end{aligned}$$

라. 오차 보상 방법 검증 및 설계 변수값 결정

오차 보상 장치의 성능에 영향을 미치는 설계 변

수는 회전체의 질량 관성 모멘트와 회전 속도인데, 이들을 크게 할 수록 오차 보상 효과도 증가하지만, 반면 진동의 발생, 모터의 토크 제한 등 여러가지 문제점이 야기되므로 적절한 관성 모멘트값과 회전속도를 결정해 주는 것이 필요하다.

따라서 여기에서는 회전체를 회전 속도가 1,750rpm 인 교류 유도 전동기 축에 직결하여 구동하는 것으로 가정하고 모의 실험을 통하여 요구되는 오차 보상 성능에 적합한 회전체의 관성 모멘트값을 결정하였다. 모의 실험에 사용된 가속도 입력은 다음과 같은 방법으로 설정하였다.

표고 측정 장치를 출력이 19,435W이고 무게가 13,818N인 이동 차량에 부착하여 작업을 한다고 가정하면 차량이 10km/h의 속도로 주행할 때 낼 수 있는 진행 방향 최대 가속도는 4.95m/s^2 정도이고 차량이 10km/h의 속도로 최소 회전 반경(3m)으로 회전할 때 받는 횡방향의 최대 가속도는 2.5m/s^2 정도이다. 이러한 외부 가속도 입력값을 기준으로 하여 다음의 두 가지 경우에 대하여 모의 실험을 하였다.

Case 1 : 진행방향과 횡방향의 최대 가속도가 임펄스(impulse) 형태로 입력된 경우

Case 2 : 진행방향에 크기가 최대 가속도의 1/3, 주기가 0.3Hz, 횡방향에 크기가 최대가 속도의 1/2, 주기가 0.4Hz인 사인과 형태의 가속도 입력이 가해진 경우

균평 작업이 이루어진 경지면의 최대 표고차는 3~4cm내에 들어야 하므로 표고 측정시의 오차는 1cm 이내가 되어야 이러한 균평 작업 정밀도를 얻을 수 있다. 따라서 두 가지 경우의 외부 가속도 입력에 대해서 모두 기울어짐 오차를 1cm 이하로 보상할 수 있도록 회전체의 반지름과 질량값을 결정하였다.

표고 측정 장치의 각 설계 인자값을 표 1과 같이 설정하였을 때, 앞에서 설명한 두 가지 가속도 입력에 대한 모의 실험 결과는 각각 표 2와 표 3과 같다. 결과에서 보면 오차 보상 장치를 이용함으로써 각 축의 기울어짐 각이 1/5이하로 감소되고 기울어짐 오차값을 1cm 미만으로 보상할 수 있음을 알 수 있다.

Table 1 Value of the design variable of level measurement system

Design variable	Units	Value
m_1	N	9.8
m_2	N	39.2
m_3	N	49
m_4	N	135.24
l_1	m	2
l_2	m	0.4
l_3	m	0.20
l_4	m	0.27
b_x	Ns	0.02
b_y	Ns	0.01
r_1	m	0.17
h	m	0.8
ω	rpm	1,750

Table 2 Result of simulation (case 1)

	Without compensation system	With compensation system
Max. inclination (rolling)	15.2°	2.7°
Max. inclination (pitching)	7.3°	3.2°
Max. inclination error (L=2m)	4.4cm	0.6cm

Table 3 Result of simulation (case 2)

	Without compensation system	With compensation system
Max. inclination (rolling)	11.2°	2.5°
Max. inclination (pitching)	17.8°	2.4°
Max. inclination error (L=2m)	9.7cm	0.6cm

3. 실험 재료 및 방법

가. 설계 및 제작

자동 표고 측정 장치는 수신기를 구동하는 부분, 레이저 수신기를 고정시키는 부분, 그리고 수신기 고정부의 운동을 안내하는 부분으로 이루어져 있다. 자동 표고 측정 장치의 전체적인 구조는 그림 4와 같다. 표고 측정 장치의 구동부는 스텝핑 모터 (stepping motor), 타이밍 벨트(timing belt)와 풀리(pulley)로 구성되고, 레이저 수신기에서 감지되는 신호에 따라 레이저 수신기의 중심부가 외부에서 발

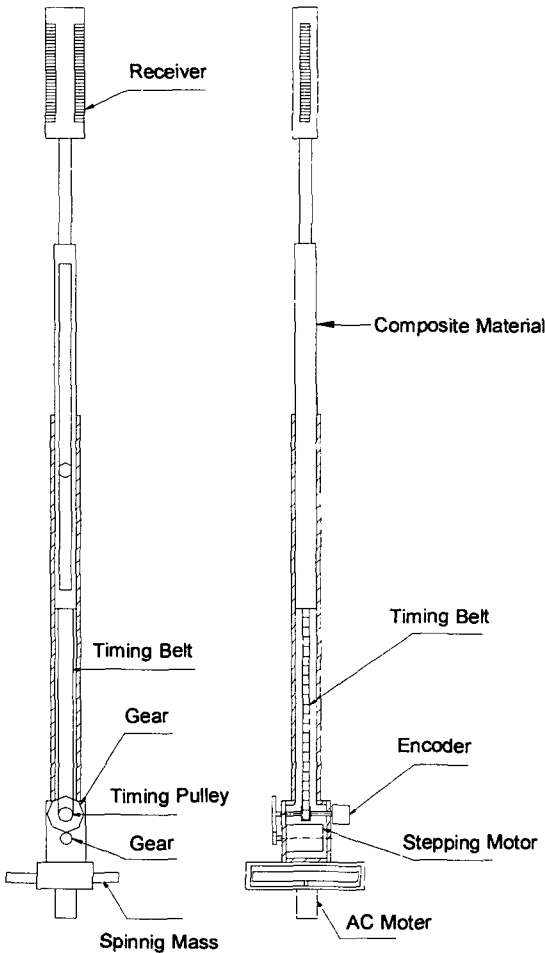


Fig. 4 Structure of automatic level measurement system.

생되는 기준 레이저 빔을 추종하도록 제어할 수 있다. 그리고 타이밍 풀리 축에는 엔코더(encoder)가 부착되어 있어 타이밍 풀리 축의 회전량을 측정하여 표고값을 계산할 수 있다.

정확한 표고값을 측정하기 위해서는 레이저 수신기가 표고 변화를 빠르게 추종할 수 있어야 한다. 동일한 용량의 스텝핑 모터를 이용하여 보다 빠른 감속을 하기 위해서는 모터에 걸리는 관성을 줄여야 하는데 제작된 표고 측정 장치에서는 수신기를 고정시키는 부분을 경량의 복합 재료를 이용하여 제작함으로써 적은 용량의 구동 모터를 사용하면서도 빠른 속도와 높은 정확도로 수직 위치를 추종할 수 있다.

수신기를 상하 방향으로 구동하기 위해서 Oriental Motor사의 Vexta PK268 스텝핑 모터와 SPD4225 2상 스텝핑 모터 구동기 (stepping motor driver)가 사용되었다. 모터에서 발생된 토크 (torque)는 평기어를 이용하여 3:1로 증폭되어 타이밍 풀리 축에 전달된다. 두 개의 풀리에는 타이밍 벨트가 걸려 있고 벨트의 한쪽 면은 수신기를 고정시키는 부분(복합 재료)과 연결되어 있어 풀리의 회전에 따라 수신기가 아래 위로 구동될 수 있는 구조로 되어 있다. 수신기의 구동 범위는 중앙 위치에서 $\pm 30\text{cm}$ 이고 구동 분해능은 풀스텝(full step) 구동시 0.16mm 이다. 표고 측정을 위해 풀리 축과 연결되어 있는 엔코더의 분해능은 800pulses/rev이고 이를 이용하면 0.1mm 정도의 분해능으로 수신기의 수직 이동 거리 변화를 측정할 수 있다. 제작된 자동 표고 측정 장치의 전체 모습은 그림 5와 같다.

그림 6은 자동 표고 측정 장치의 구동 시스템에 대한 블럭 다이어그램(block diagram)이다.

IBM 486 PC를 주체어기로 사용하고 인터페이스 보드(interface board)를 통해 스텝핑 모터 구동기에 펄스 및 구동 속도, 방향에 대한 명령을 입력해 준다. 또한 레이저 수신기와 엔코더에서 나오는 출력을 디지털 입력 단자와 카운터 입력 단자를 통해서 각각 입력받게 된다.

기울어짐 오차 보상 장치는 회전체와 그것을 구동하기 위한 모터로 구성되어 있다. 회전체는 무게가 135.24N이고 반지름이 175mm인 원판 형태이고 회

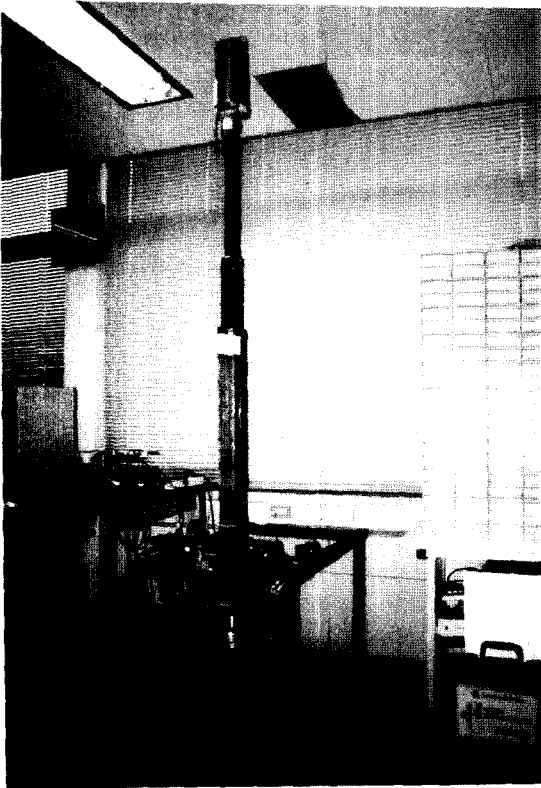


Fig. 5 Automatic level measurement system.

기를 사용하였는데 이러한 모터는 별도의 구동기나 제어기 등이 필요 없기 때문에 편리하게 사용할 수 있는 장점이 있다. 사용된 모터의 출력은 90W이고 정격 토오크와 회전속도는 각각 0.95Nm, 1750rpm이다.

나. 실험 방법

1) 자동 표고 측정 실험 방법

제작된 자동 표고 측정 장치의 표고 측정 성능을 시험하기 위해 계단 형태, 임의 형태, 사인(sine) 형태 표고 변화에 대하여 측정 성능을 각각 시험하였다. 실험시의 샘플링 시간은 10ms로 하였다.

표고 측정 장치에 지표의 표고 변화와 유사한 입력을 넣어 주기 위해서 그림 7과 같이 측정 장치를 실험 장치의 회전축에서 일정 거리 L 만큼 오프셋(offset)시켜 고정시킨 뒤 회전축을 중심으로 회전운동을 발생시켜 주었다. 오프셋된 거리 L 과 엔코더를 이용하여 측정된 축의 회전량 θ 를 이용하여 표고 변화 입력값 d 를 계산할 수 있다. 실험에 사용된 레이저 발신기와 수신기는 각각 Spectra-Physics사의 Laserplane 750과 Grade-Eye RD2S-L이다.

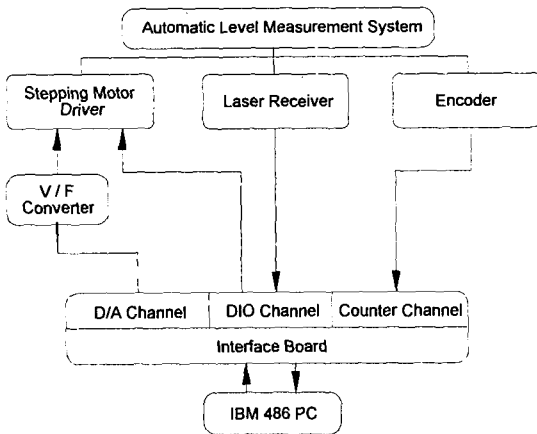


Fig. 6 Schematic block diagram of automatic level measurement system.

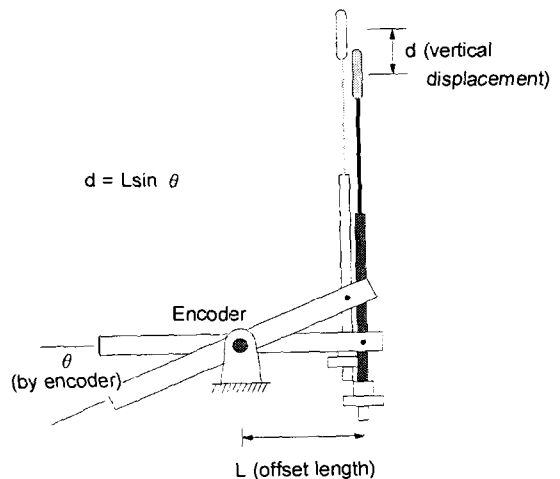


Fig. 7 Schematic diagram of level measuring experiment setting.

전축에 대한 질량 관성 모멘트는 2.49Nm²이다. 회전체의 구동을 위한 모터로는 단상 교류 유도 전동

2) 기울어짐 오차 보상 실험 방법

제작된 기울어짐 오차 보상 장치의 성능을 시험하기 위해 표고 측정 시스템이 고정된 프레임(frame)의 x축과 y축에 각각 입력된 가속도를 측정할 수 있는 가속도계를 부착하고 임펄스와 유사한 형태의 가속도와 주기적인 가속도 입력이 가해진 경우에 대하여 오차 보상 장치의 성능을 각각 시험하였다. 각 가속도 입력의 크기와 주기는 표 4와 같다.

- Case 1: 임펄스와 유사한 가속도 입력시 보상 장치를 가동하지 않은 경우
- Case 2: 임펄스와 유사한 가속도 입력시 보상 장치를 가동한 경우
- Case 3: 주기적 가속도 입력시 보상 장치를 가동하지 않은 경우
- Case 4: 주기적 가속도 입력시 보상 장치를 가동한 경우

Table 4 Amplitude & period of input acceleration

	case 1	case 2	case 3	case 4
amplitude (x)	3.5 m/s ²	4.1 m/s ²	3.1 m/s ²	3.5 m/s ²
amplitude (y)	5.8 m/s ²	5.9 m/s ²	4.2 m/s ²	4.3 m/s ²
period	1.3 s	1.3 s	2.4 s	2.4 s

다음에는 가속도 입력과 기울어짐 오차간의 관계를 나타내는 주파수 전달 함수를 구하기 위해 외부로부터의 가속도를 입력, 기울어짐 오차를 출력으로 각각 설정하고 스펙트럴 해석을 하였다. (Bendat et al., 1986) 여기에서 구해진 주파수 전달 함수를 이용하면 오차 보상 장치의 성능과 이와 같은 장치가 실제 균형 작업에 이용될 수 있는지 여부를 판단할 수 있다.

표고 측정 장치의 고유 진동수는 0.3Hz 정도의 낮은 주파수이기 때문에 10Hz 보다 높은 주파수의 가속도 입력에는 거의 반응하지 않는다. 따라서 여기에서는 10Hz 이하의 주파수 영역을 관심 주파수 대역으로 설정하였다. 실험시의 외부 가속도 입력은

가능한 임펄스 입력과 근사한 형태로 넣어 주어 관심 주파수 대역내에서 균일한 입력이 가해지도록 하였다. 실험시의 샘플링 주기는 5ms로 하였고 45초 동안의 값을 측정하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

가. 자동 표고 측정 실험

40mm 크기의 계단 형태 표고 변화를 입력하고 표고 변화를 측정한 결과는 그림 8과 같다.

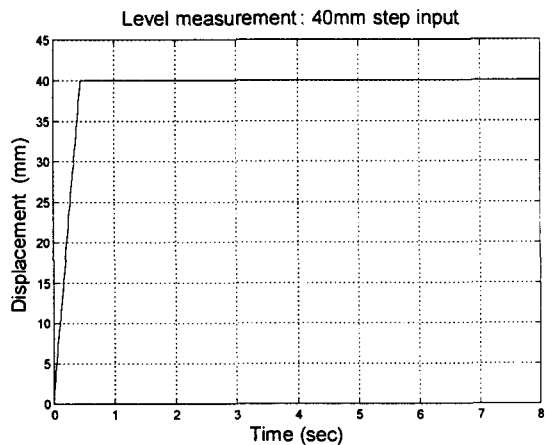


Fig. 8 The result of level measurement (level change of step, amp.: 40mm).

표고 측정 장치에 이용된 레이저 발신 장치와 수신 장치의 샘플링 주기가 100ms로 제한되어 있고 수신 장치의 출력이 온-오프(on-off) 형태이기 때문에 구동 속도를 너무 올려주게 되면 정확한 위치에 정지하지 못하고 샘플링 간격 동안에 정확한 위치를 지나쳐 버리게 되어 이러한 결과가 나타난다. 이 실험에서는 표고 변화 정도가 크고 작음에 따라 표고 측정 장치의 구동 속도를 조절하여 주는 방법으로 표고 측정 성능을 개선하였다.

임의 형태 표고 변화 입력시의 표고 측정 실험 결과를 그림 9에 나타내었다. 실선은 표고 측정값이고 점선은 임의의 표고 변화 입력이다.

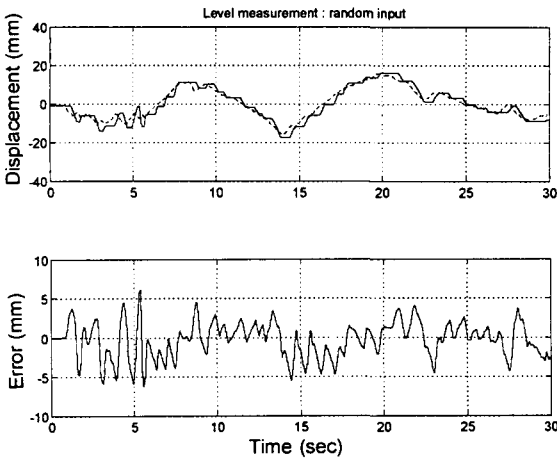


Fig 9 The result of level measurement (level change of random shape, amp.: ± 20mm).

실험 결과에서 보면 최대 오차 ± 5mm 정도의 범위에서 표고를 측정할 수 있음을 알 수 있다. 이 정도의 측정 오차를 가진 표고 측정 장치는 실제 균평 작업에 이용될 수 있다.

다음에는 차량의 진행 속도가 2m/s라 가정하였을 때 $0.05m^{-1}$ 에서 $1.0m^{-1}$ 까지의 공간 주파수 범위의 사인 형태 표고 변화 입력을 넣어주고 표고 측정 실험을 하였다. 그림 10은 실험 결과를 이용하여 $0.05m^{-1} \sim 1.0m^{-1}$ 공간 주파수 범위에서 자동 표고 측정 장치의 보데 선도(bode plot)를 그린 것이다. $0.05m^{-1}$ 와 같이 낮은 공간 주파수의 표고 변화 입력에 대해서는 레이저 수신기의 불감대로 인한 약간의 위상 지연이 있지만 거의 정확한 표고를 측정할 수 있었다. 그러나 $0.25m^{-1}$, $0.5m^{-1}$ 로 입력 공간 주파수가 증가하게 되면 위상 지연과 측정 오차가 증가하게 된다. 제작된 표고 측정 장치의 측정 한계 공간 주파수는 $0.5m^{-1}$ 정도라 말할 수 있고 이 정도의 측정 한계를 가진 자동 표고 측정 장치는 균평 작업시 차량의 주행 속도가 2m/s 정도의 느린 속도라는 점을 고려했을 때 실제 작업에 이용될 수 있을 것이다.

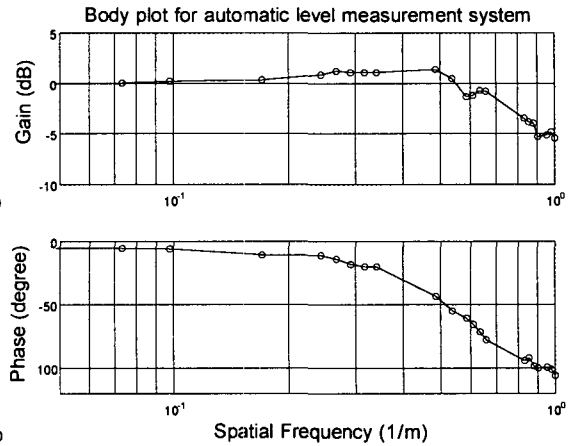


Fig. 10 Bode plot for automatic level measurement system.

나. 기울어짐 오차 보상 실험

1) 오차 보상 성능 실험

그림 11부터 그림 14까지는 각 경우에 대한 결과이다. 실선은 실험의 결과를 나타낸 것이고 점선은 실험과 동일한 가속도 입력에 대하여 앞에서 유도된 동역학식과 추정된 시스템 인자값을 이용한 모의 실험의 결과이다. 또 결과에 나타난 오차값은 측정 장치의 길이가 2m라 가정하였을 때의 기울어짐 오차값을 나타낸 것이다.

기울어짐 보상 장치를 가동시켜 준 경우 각 방향의 기울어짐은 1/2이하로 감소하였고 기울어짐 오차값은 1/6이하로 감소하였다. 두 경우 모두 기울어짐 오차값은 1cm 이하로 보상할 수 있었다. 동일한 외부 가속도 입력에 대한 실험 결과는 아니지만 case 1, case 3에 비해 각각 더 큰 가속도 입력인 case 2, case 4에 대하여 기울어짐 오차 보상 장치를 부착함으로써 상당한 오차 보상 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

2) 스펙트럴 해석(spectral analysis)을 통한 보상 성능 평가

그림 15과 그림 16은 각각 오차 보상 장치를 가동하지 않았을 때와 가동시의 주파수 전달 함수의 이

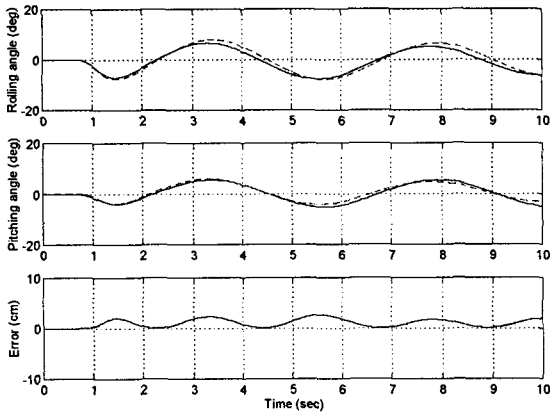


Fig. 11 Inclination angle & error (case 1).

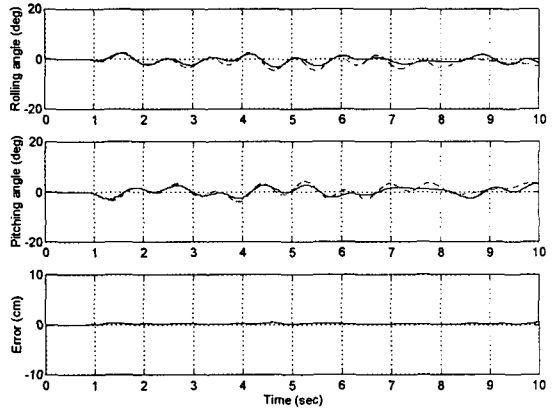


Fig. 14 Inclination angle & error (case 4).

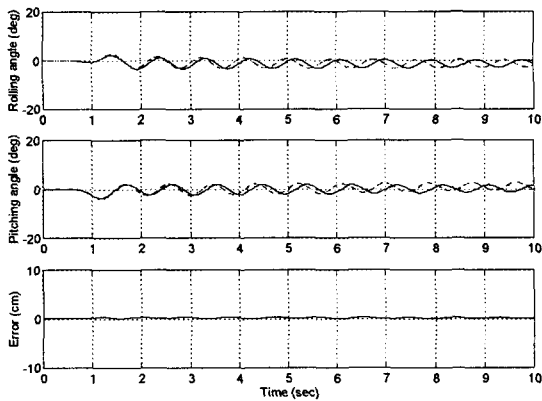


Fig. 12 Inclination angle & error (case 2).

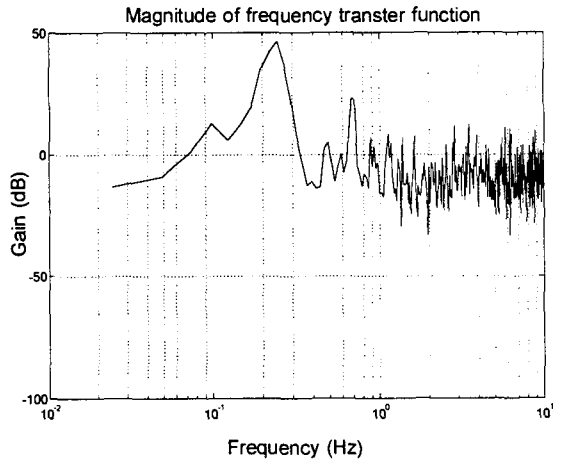


Fig. 15 Magnitude of frequency transfer function (without error compensation system).

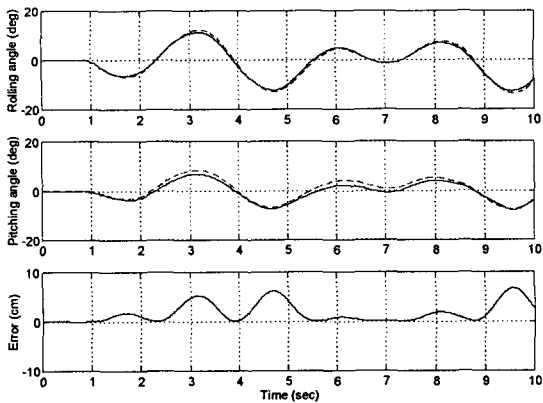


Fig. 13 Inclination angle & error (case 3).

득을 나타낸 것이다. 가속도 입력은 $1m/s^2$, 측정 장치의 길이가 2m라 가정하였을 때의 기울어짐 오차 값은 1cm를 기준으로 정규화 된 값을 이용하여 나타낸 것이다.

결과에서 보면 시스템의 고유 진동수는 0.25Hz에서 1.1Hz로 변화되었고 오차 보상 장치를 가동하지 않은 경우에 비해 대역폭이 1/4 정도로 좁아짐을 알 수 있다. 균형 작업시의 차량 속도를 고려하면 차량에 부착된 표고 측정 장치가 받는 가속도 중 측정 장치의 기울어짐에 크게 영향을 미치는 것은 주로

1Hz 이하의 낮은 주파수 대역이라 가정할 수 있다. 따라서 시스템의 고유 진동수를 높이고 대역폭을 좁게 함으로써, 공진에 의하여 기울어짐 오차가 급격히 증가할 가능성을 감소시킬 수 있고 전체적인 가속도 입력에 의한 기울어짐 오차의 발생을 줄일 수 있다.

전체적으로 보면 오차 보상 장치를 가동시킴으로써 기울어짐 오차를 20dB 이상 감소시킬 수 있었고 공진 주파수 영역 외에서의 주파수 전달 함수의 진폭은 -20dB 이하의 값으로 나타났다. 따라서 이 기울어짐 보상 시스템을 이용하면 10m/s² 미만의 가속도 입력에 대하여 기울어짐 오차를 1cm 이하로 보상할 수 있다.

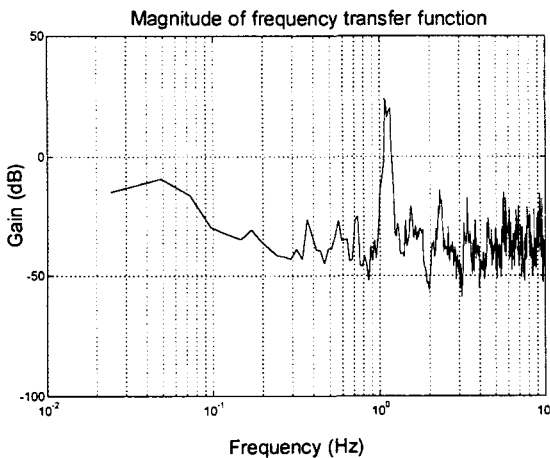


Fig. 16 Magnitude of frequency transfer function (with error compensation system).

5. 결 론

본 연구에서는 기존에 수작업으로 이루어지는 표

고 측정 작업을 자동화 할 수 있는 방법을 제시하였고 레이저를 이용한 자동 표고 측정 장치를 설계, 제작하였다. 불규칙 노면상에서의 측정 작업시에 발생하는 기울어짐 오차를 감소시킬 수 있는 방법을 고안하였다. 표고 측정 장치의 동역학식을 유도하여 고안된 기울어짐 오차 보상 방법의 타당성을 검증하고 오차 보상 장치의 설계 변수값을 결정하였다.

계단 형태, 임의 형태, 사인 형태의 표고 변화 입력에 대하여 표고 측정 성능을 실험하였고 여러가지 형태의 외부 가속도 입력에 대한 표고 측정 장치의 기울어짐을 측정하고 가속도 입력과 기울어짐 오차간의 주파수 전달 함수를 구하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 임의 형태의 표고 변화를 최대 오차 ± 5mm 정도의 범위 내에서 측정할 수 있었고 사인 형태 표고 변화의 경우에 0.5m⁻¹ 정도의 표고 변화 공간 주파수 까지 측정할 수 있었다. 실제 균평 작업시의 차량 이동 속도를 고려해 볼 때 이러한 성능의 표고 측정 장치는 실제 작업에 이용될 수 있을 것이다.

(2) 기울어짐 오차 보상 장치를 이용함으로써 10m/s² 이하의 외부 가속도 입력에 대하여 기울어짐 오차값을 1cm 이하로 보상할 수 있다.

참 고 문 헌

1. F. P. Beer and E. R. Johnston, Jr. 1977. Vector Mechanics for Engineers(Dynamics). McGraw-Hill, pp. 920-924.
2. J. S. Bendat and A. G. Piersol. 1986. Random Data, 2ed. John Wiley and Sons, pp. 164-176.
3. J. L. Fouss and M. Y. Hamdy. 1972. Simulation of a Laser Beam Automatic Depth Control. Transaction of the ASAE 15(4):692-695.