

초음파를 이용한 농업 기계의 실제 주행 속도 측정⁺

Measurement of True Forward Velocity of Agricultural Machinery using Ultrasonic-wave

김경욱*
K. U. Kim

신범수*
B. S. Shin

Summary

The feasibility of using ultrasonic-wave doppler sensors for a measurement of the actual ground speed of agricultural machines was investigated. The actual ground speed is estimated from the doppler shift frequencies of the two ultrasonic-waves transmitted to and received from a moving object. A prototype of the speed-measurement system was designed and constructed for the performance test.

The measurement system showed a good performance with a flat surface at speeds lower than 3m/s. However, it was failed to receive the reflected signals from the rough and irregular soil surfaces. Further researches to solve this problem and to improve its performance are now underway.

1. 서론

농업 기계는 일반적으로 표토층의 강도가 약한 농경지에서 사용되기 때문에 작업할 때는 표토층이 파괴되어 주행 장치에서 많은 슬립이 발생한다. 이러한 슬립은 동력 손실을 초래할 뿐만 아니라 작업 속도를 변화시켜 작업의 정도와 균일성을 크게 저하시킨다. 또한, 슬립 자체도 변화되기 때문에 실제 작업 속도가 수시로 변화되어 시비기와 방제기와 같은 경우에는 균일한 시비와 약제 살포가 어려우며 이식기와 파종기같은 경우에는 일정한 재식 거리를 유지하기가 어렵다. 따라서 작업 정도와 균일성을 유지하기 위해서는 실제 작업 속도에 따라 시비, 방제, 파종,

이식 등의 작업이 이루어져야 한다. 실제 작업 속도가 필요한 경우는 이외에도 경운 작업이 있다. 경운 작업에서는 견인 부하를 제어하는 데 실제 작업 속도가 이용된다. 즉 실제 작업 속도를 감지하여 슬립을 계산하고 이를 견인 부하의 제어 변수로써 활용할 수 있다. 이와 같이 보다 정확하고 효율적인 작업을 수행하기 위해서는 작업기의 실제 작업 속도를 측정할 필요가 있다.

일반적으로 차량의 이론 주행 속도는 최종 구동륜의 원주 속도와 같으므로 최종 구동륜의 회전 속도를 직접 측정하여 쉽게 구할 수 있다. 그러나 실제 주행 속도는 수동 방식 또는 새로운 속도 측정 장치를 사용하여 측정하여야 한다. 실제 주행 속도를 측정하는 가장 용이한 방법으로

⁺ 이 논문은 1993년도 한국학술진흥재단의 자유공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과

는 차량이 일정한 거리를 주행하는 데 필요한 시간을 측정하여 주행한 거리를 측정된 시간으로 나누는 방법이 있으나 측정 오차가 크고 실시간 측정이 불가능하기 때문에 측정된 속도를 이용할 수 없다는 단점이 있다. 5륜을 이용하여 실제 주행 속도를 측정하는 방법은 하중이 작용하지 않는 5륜을 차량에 부착하여 차량이 주행할 때 5륜의 속도를 측정하고 이를 차량의 실제 주행 속도와 같다고 보는 방법이다. 이 방법은 하중이 작용하지 않는 5륜에는 슬립이 발생하지 않는다는 것을 기본 가정으로 하고 있다. 그러나 이 방법도 지면이 불균일하고 장애물이 존재하는 토양에서는 5륜이 미끄러지거나 튀어 오르기 때문에 큰 오차가 발생할 수 있고 측정 장치가 차지하는 만큼의 공간이 필요하다는 단점이 있다. Tompkins 등(1988)은 5륜을 사용하여 트랙터의 실제 주행 속도를 측정하였을 때, 견인력이 전혀 작용하지 않은 상태에서도, 이론 주행 속도 대비(對比) 약 10%의 오차가 발생한다고 보고한 바 있다.

이러한 측정 방식의 단점을 해결할 수 있는 새로운 방법으로는 비접촉식 감지 장치를 사용하는 방법이 있다. 이 방법은 이동하고 있는 물체에 연속 전파(continuous-wave)를 발사하였을 때 반사되어 돌아오는 반사파의 주파수가 변하는 도플러 효과를 이용하는 방식이다. 측정 매체는 주로 초음파 또는 마이크로파가 이용된다. 현재, 미국에는 마이크로파 속도 센서가 개발되어 시판되고 있다. 일반적으로 마이크로파 도플러 센서는 특수한 마이크로웨이브 모듈이 필요할 뿐만 아니라 신호 처리가 어렵고 보편화되지 않았기 때문에 비싸다는 단점이 있다. 이에 비하여 초음파는 온도, 바람 등 주변 환경에 의한 영향이 있으나, 소형이며 가격이 저렴하고 신호 처리가 용이하다는 장점이 있다. 또한, 마이크로파보다 파장이 짧기 때문에 정교한 측정이 가능하다. 최근 초음파 센서는 다양하게 개발되어 많은 분야에서 응용되고 있으며 주로 펄스-에코(pulse-echo) 형태를 이용한 거리 감지, 비파괴

검사 등에 응용되고 있다. 그러나 농업 기계 분야에서는 아직 응용 사례가 없는 실정이다.

본 연구는 초음파를 매질로 하는 도플러 센서를 개발하여 농업 기계의 실제 주행 속도를 측정할 수 있는 측정 장치로서의 적용 가능성을 구명하고자 하였다.

2. 연구사

Broderick과 Hayre(1969)는 도플러 반사 신호의 주파수를 분석하여 평탄한 표면에서는 정규 분포를 나타내며, 불규칙한 표면에서는 비정규 분포를 보인다고 하였다. 이는 반사 신호의 주파수가 3개의 주파수 성분, 즉 평탄한 표면에서 반사된 주파수 성분과 표면의 굴곡에 따라 반사된 두 개의 주파수 성분으로 구성되었다는 것을 나타낸다. 특히, 후자의 경우 반사 신호의 강도는 표면 굴곡도와 안테나 빔폭(beamwidth)의 영향을 받는다고 하였다. Stuchly 등(1978)은 약 10 GHz급의 도플러 모듈을 이용한 도플러 레이더를 구성하여, 트랙터의 실제 주행 속도 측정이 가능함을 제시하였다. 5륜으로 측정된 주행 속도를 기준으로 하였을 때, GE사 도플러 모듈의 경우 0.5%, MA사 도플러 모듈의 경우 2%의 측정 오차를 보였다. 주행 속도 측정시 오차를 최소화하기 위하여 지표면에 대한 투사각은 작은 것이 바람직하나, 투사각이 지나치게 작으면 반사 신호의 강도가 급격히 감소되므로 적정 투사각의 유지가 요구된다고 하였다. 최적의 도플러 주파수를 추출할 수 있었던 투사각은 GE 도플러 모듈의 경우 30° 이었으며, MA 도플러 모듈의 경우에는 30~45° 이었다고 보고하였다. 또한, 도플러 신호의 파워 스펙트럼의 주파수 대역폭은 평탄한 표면에서보다는 거칠은 표면에서 좁게 나타나기 때문에 속도 측정 장치는 경운 토양에서도 정확하다고 보고하였다. Sokol(1983)은 도플러 효과를 이용하여 작동 주파수대가 24.125GHz인 마이크로파로써 트랙터의 실제 주행

속도를 측정할 수 있는 도플러 레이더 센서를 개발하였다. 이 도플러 레이더 센서는 주행 속도에 따라 주파수가 다른 구형파 신호를 출력하며, 다양한 토양 조건에서 ±2% 이내의 측정 오차를 유지할 수 있다고 하였다. Tompkins 등(1988)은 키가 큰 식물체가 있는 지면을 제외한 대부분의 토양 조건에서는 마이크로파 도플러 속도 센서를 이용한 경우가 5륜이나 전륜(front wheel)을 이용한 경우보다 정확한 실제 주행 속도를 측정할 수 있었다고 보고하였다. 5륜, 전륜, 도플러 속도 센서의 평균 측정 오차는 각각 5%, 10%, 0.5% 이었다. McLendon과 McDonald(1991)는 파종 작업시 레이더 속도 센서를 사용하여 트랙터의 실제 작업 속도를 정확하게 측정함으로써 파종 거리의 오차를 토양 조건과 주행 속도에 관계없이 2% 이내로 유지할 수 있었다고 보고하였다. Hesse와 Withington(1993)은 도플러 레이더 센서로써 트랙터의 실제 주행 속도를 측정하여 슬립을 계산하고 이를 히치 제어에 활용함으로써 과도한 슬립으로 인한 토양 파손 및 시간과 연료의 손실을 막을 수 있었다고 하였다.

Hata 등(1991)은 도플러 효과를 이용하여 초음파를 매질로 한 트랙터의 실제 주행 속도 측정 장치를 개발하였다. 주파수가 200 kHz인 초음파를 사용하여 발진 신호를 각각 ±90°로 위상 편이시키고, 이를 수신 신호와 혼합한 후 저주파수 필터를 통과하여 다시 위상을 비교하는 방식으로 도플러 주파수를 측정하였다. 마이크로파를 이용하는 레이더 속도 센서보다 특히 0.1~5 m/sec의 저속 범위에서 보다 정확하게 속도를 측정할 수 있었다고 하였다.

3. 초음파 도플러 센서의 개발

가. 도플러 효과를 이용한 속도 측정 원리

전파의 진원을 향하여 또는 그 반대 방향으로 이동하는 물체에 주기가 일정한 파를 발사하면,

반사되어 돌아오는 파는 그 주기가 변하게 된다. 이 때 반사되어 수신된 파의 주파수를 도플러(doppler) 주파수라고 하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_r = \frac{V+v}{V-v} f_i \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

f_r = 수신 주파수

f_i = 송신 주파수

V = 전파의 공기중 전달 속도(마이크로파 : 3×10^8 m/sec, 초음파 : $331.5 + 0.6 \cdot t$ (°C) m/sec)

v = 물체의 이동 속도(+ v : 이동 물체가 전파의 진원에 접근할 때, - v : 이동 물체가 전파의 진원으로부터 멀어질 때)

송신과 수신 주파수의 차를 도플러 시프트(doppler shift)라고 하며 도플러 시프트 f_d 는

$$f_d = | f_i - f_r | = \frac{2v}{V-v} f_i \dots\dots\dots (2)$$

가 된다. 만일 물체의 이동 속도가 전파의 전달 속도에 비하여 충분히 작다고 하면 즉, $V \gg v$ 이면

$$f_d = \frac{2v}{V} f_i \dots\dots\dots (3)$$

로 나타낼 수 있으며 식 (3)으로부터

$$v = \frac{V f_d}{2 f_i} \dots\dots\dots (4)$$

가 된다. 따라서 식 (4)를 이용하여 송신 주파수와 도플러 주파수로부터 물체의 이동 속도를 구할 수 있다. 이 원리를 이용하여 차량의 주행 속도를 측정한다.

차량의 주행 속도를 측정하기 위해서는, 전파의 진원을 주행하는 차량에 고정하고 지표면을 피사체로하여 도플러 주파수를 측정하여야 하기 때문에 그림 1에서와 같이 전파의 발사 방향과 지면이 경사를 이루도록 하여야 한다. 차량이 v 의 속도로 주행할 때 송신 전파는 θ_1 의 각도로 발사되며, 반사파는 이미 차량이 미소 구간을 진행한 후이므로 θ_2 의 각도로 수신용 초음파 변환기에 수신된다. 전파를 발사할 때 전파의 파장은

$$\lambda_r = \frac{V + v \cos \theta_r}{f_t} \dots\dots\dots (5)$$

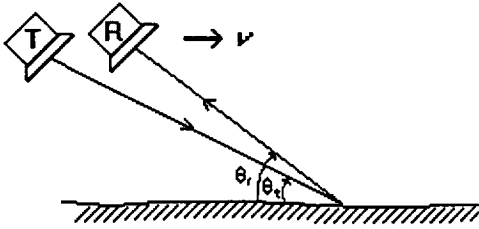


Fig. 1 Operating principle of ultrasonic-doppler sensor

가 되며, 이 전파가 진원으로 반사되어 돌아왔을 때 주파수는

$$f_r = \frac{V - v \cos \theta_r}{\lambda_r} \dots\dots\dots (6)$$

가 된다. 여기서, $\lambda_r = \lambda_t$ 이므로 도플러 시프트 주파수, f_d 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_d = |f_t - f_r| = \frac{v(\cos \theta_r + \cos \theta_t)}{V + v \cos \theta_t} f_t \dots\dots\dots (7)$$

차량의 주행 속도가 전파의 진행 속도에 비하여 충분히 작다고 하면

$$V \cong V + v \cos \theta_t$$

$$\theta_t \cong \theta_r \cong \theta$$

로 가정할 수 있다. 따라서

$$f_d = \frac{2v \cos \theta}{V} f_t \dots\dots\dots (8)$$

로 간단히 표현된다. 여기서, 전파의 공기중 전달 속도 V 는 초음파를 매질로 사용하는 경우 식 (1)에서와 같이 주변 온도에 의해 결정된다.

나. 초음파를 이용한 주행속도 측정장치

어떤 목표물에 전파가 발사되면 그 전파의 일부는 목표물의 특성에 따라 흡수 또는 투과되고 나머지는 반사된다. 이 반사된 신호를 감지하여 필요한 정보를 추출하게 되므로 정확한 정보를 얻기 위해서는 가능한한 큰 반사 신호를 얻어야 한다. 그러나 토양과 같이 성질이 균일하지 못한

물체에서는 전파가 토양 내부로 흡수 또는 소멸되거나 불규칙한 표면에서 난반사가 일어나기 때문에 충분한 반사 신호를 얻기 어렵다. 일반적으로 반사 특성은 송신 주파수의 영향을 받으며, 주파수가 높을수록 투과력이 약화되어 반사의 가능성이 높으나, 동시에 공기 중에서 손실이 증가하기 때문에 목적에 따라 적절한 주파수를 선택하여야 한다. 신(1993)의 연구에 의하면 작동 주파수를 40kHz로 하였을 때 토양 표면으로부터 충분한 반사 신호를 얻을 수 있었으며 또한 시중에서 보편적으로 유통되고 있는 초음파 변환기의 공칭 주파수도 40kHz이므로, 본 연구에서는 40kHz를 작동 주파수로 사용하였다. 본 연구에서 사용한 초음파 변환기 (MA40L1R/S, Murata Co., Japan)는 발신용과 수신용으로 분리되어 있으며 40 ± 5 kHz 주파수 대역에서 양호한 발신 특성과 수신 특성을 나타내었다. 농업 기계의 작업 속도가 대부분 0.5~3 m/sec이므로 이를 측정 속도의 범위로 하였을 때, 식(3)으로부터, 수신과의 주파수 변화는 약 2kHz 이내이며 이는 수신용 초음파 변환기가 양호하게 수신할 수 있는 특성 범위에 포함되었다.

도플러 효과를 이용하기 위해서는 연속파를 발신하고 또 연속적으로 반사 신호를 수신할 수 있어야 한다. 그러나 펄스-에코 방식에 비하여 연속파를 이용하는 경우에 대한 연구는 거의 없었기 때문에 많은 시행착오를 겪으며 측정 장치를 제작하였다.

측정 장치는 그림 2에서와 같이 신호 발생부, 초음파 발신부, 초음파 수신부, 도플러 변이 주파수 감지부와 전원부로 구성하였다. 측정 장치

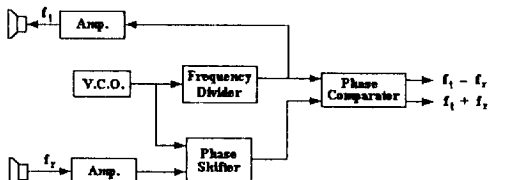


Fig. 2 Block diagram of the speed-measurement system

에 사용된 각 부품은 표 1에서와 같이 시중에서 구하기 용이한 것으로서 총 비용은 일만원 미만이었다. 그림 3은 제작된 초음파 주행 속도 측정 장치의 외관도이다.

Table 1 Components used in the speed-measurement system

| I.C. Chip | Function | Remark |
|------------------------|--|--------|
| 4069 | Hex Inverter | |
| 4011 | HAND gate | |
| 4504 | Hex level shifter | |
| 1458 | Dual Op. Amplifier | |
| 4584 | Hex schmitt trigger | |
| 4520 | 4-bit binary counter | |
| 4046 | V.C.O. & Phase comparator | |
| 4013 | Dual D Flip-Flop | |
| 393 | Voltage comparator | |
| Resistors | | |
| Variable Resistance | | |
| Capacitances | | |
| Ultrasonic transducers | Transmitting & Receiving ultrasonic-wave | 40 kHz |

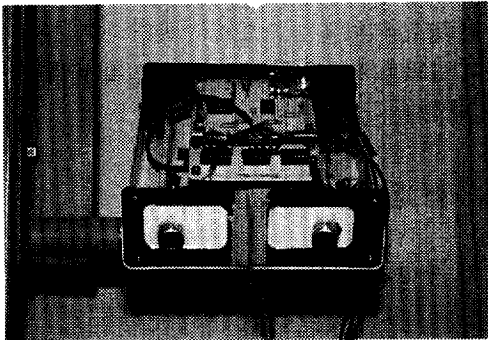


Fig. 3 View of constructed speed-measurement system

1) 신호 발생부

신호 발생부는 작동 주파수가 40kHz인 신호를 발생시키기 위하여 그림 4에서와 같이 주파수가 고정된 크리스탈 발진기보다는 전압 조정

으로써 주파수를 변화시킬 수 있도록 발진(V.C.O.) 기능이 있는 C-MOS IC 4046을 사용하여 제작하였다. V.C.O. 입력 전압을 조절하여 160 kHz의 신호를 발생시키고, 이것을 4520을 통하여 4분주하여 40kHz의 신호를 초음파 발진부에 공급하였다. 4분주된 신호는 도플러 주파수 검출을 위한 기준 주파수로서 주파수 감지부에 있는 4046의 위상 비교부에 입력하였다.

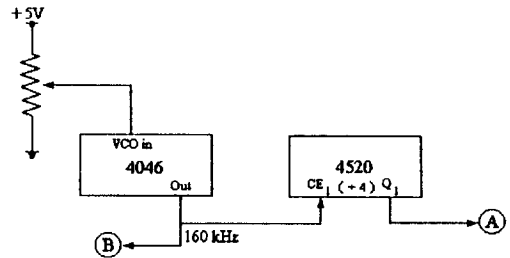


Fig. 4 Ultrasonic-pulse generator

2) 초음파 발진부

신호 발생부에서 발생된 40kHz의 구형파를 4504를 통하여 0~12V의 구형파로 변화시키고, 이 구형파가 초음파 변환기를 작동시킬 수 있도록 4069를 사용하여 두 번 반전시켜 초음파 변환기의 한 끝단에, 한 번 반전 시켜 초음파 변환기의 다른 끝단에 연결하여 0~24V로 증폭하고 증폭된 구형파가 초음파 변환기를 통하여 목표면에 발사되도록 하였다. 그림 5는 초음파 발진부의 회로도를 나타낸 것이다.

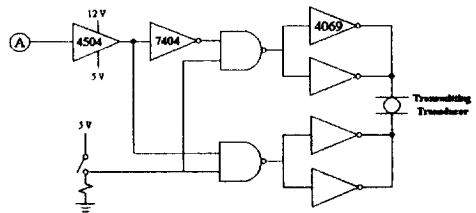


Fig. 5 Ultrasonic transmitting circuit

3) 초음파 수신부

목표 표면에서 반사되어 돌아온 신호는 공기 중에서의 감쇄와 목표물 표면에서의 난반사 등

으로 인하여 발생되었던 신호에 비하여 그 크기가 매우 작아진 상태로 초음파 수신 변환기에 수신된다.

초음파 수신 변환기에 인가된 신호는 두 개의 증폭기를 갖춘 1458를 통하여 연속적으로 두 번 증폭된다. 이것을 다시 4584를 통하여 파형 정형한 후 도플러 변이 주파수 감지부에 입력시킨다. 수신부 회로는 그림 6에서와 같이 제작되었다.

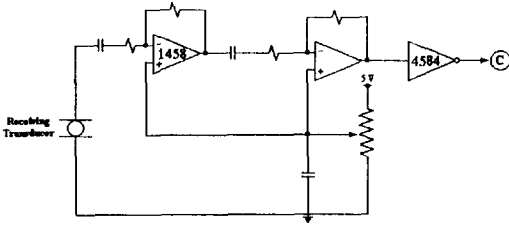


Fig. 6 Ultrasonic receiving circuit

4) 도플러 변이 주파수 감지부

발신 주파수, f_t 와 수신 주파수, f_r 사이의 위상 변화가 일치하지 않도록 f_t 의 4배 즉, 160kHz의 V.C.O. 출력 신호를 클럭으로 사용하여 수신 주파수를 4013을 통하여 이상시킨다. 이 신호를 40 kHz의 송신 신호와 함께 4046의 위상 비교기에 입력한다. 위상 비교기의 두 출력중 PC_1 은 배타적 OR(XOR gate)이므로 두 입력 신호의 합인 $f_t + f_r$ 이 출력되고 PC_2 의 출력 펄스 폭은 두 입력 신호의 상승에서 위상을 비교하여 위상이 다른 경우에만 0을 출력한다. 이 출력 펄스열은 주기적으로 변화하며 그 주기는 두 입력 신호의 주파수 차이와 같게 된다. 그림 7은 주파수 감지부의 회로도이다.

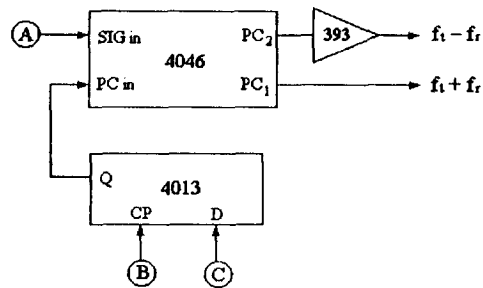


Fig. 7 Detecting circuit of Doppler shift

5) 초음파 변환기의 배치

발신용 및 수신용 초음파 변환기는 그림 8에서와 같이 배치하였다. 발신용 변환기의 신호가 직접 수신용 변환기에 인가되지 않도록 두 변환기 사이의 거리를 15cm로 하고 그 사이에 초음파 변환기의 측면 높이와 같은 길이의 차단막을 설치하였다. 발신용 변환기에서 발생된 신호가 1m 떨어진 위치에서 반사되어 수신용 초음파 변환기에 수신될 수 있도록 두 변환기의 자세를 서로 안쪽을 향하여 배치하였다. 발신할 때 발신용 변환기에서 발생하는 진동과 소음이 수신용 변환기에 전달되지 않도록 고무와 스펀지를 이용하여 초음파 변환기를 철제 상자에 고정하였다.

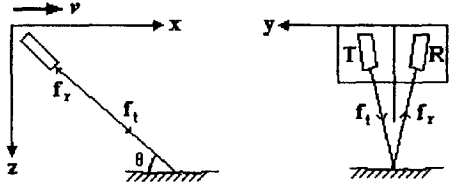


Fig. 8 Arrangement of transmitting and receiving ultrasonic transducers

한편, 초음파 변환기의 투사각은 초음파를 목표 표면을 향하여 발사할 때 초음파 빔의 방향과 목표 표면이 이루는 각으로 정의할 수 있는데, 목표 표면과 평행하게 초음파를 발사할 때를 0°로 하였다.

4. 실험 장치 및 방법

가. 수신 성능 시험

실제, 제작한 속도 측정 장치의 수신 성능을 평가하기 위하여 수신부에서 수신된 반사 신호의 주파수를 측정하였다. 주파수 측정은 샘플링 주기를 1초로 한 주파수 계수기를 사용하여 측정하였다. 초음파 발사 방향과 직각을 이루는 평면인 목표물을 초음파 변환기에 대하여 전후로 이동시키면서 수신 주파수를 측정하였다. 또한,

수신 주파수에 미치는 투사각의 영향을 분석하기 위하여 투사각을 변화시키며 수신 주파수의 변화를 조사하였다. 투사각은 속도 측정 장치의 높이를 결정한 상태에서 0°부터 90°까지 변화시켰다. 이 때 기준 평면으로는 전자의 경우 합판을 사용하였으며, 투사각의 영향을 분석하기 위한 수평면으로는 콘크리트 로면을 사용하였다. 속도 측정 장치의 수신 성능 시험은 인공 토양조의 토양 표면에서도 실시하였다.

나. 가상 주행 로면 시험

속도 측정 장치의 성능을 시험하기 위하여 그림 9에서와 같이 콘베이어 벨트로서 구성된 가상 주행 로면을 제작하였다. 속도 측정 장치를 고정하고 콘베이어의 벨트를 회전시킴으로써 측정 장치가 지표면을 주행하는 것과 같은 효과를 나타낼 수 있도록 하였다. 콘베이어 벨트는 길이와 폭이 각각 50cm, 30cm 이고, 0.5마력 직류 모터를 사용하여 최고 5m/s까지 속도를 조정할 수 있도록 하였다. 속도 측정 장치는 별도로 제작된 지지대에 장착하였으며, 지상고와 투사각을 조절할 수 있도록 하였다.

가상 주행 로면 시험에서는 속도 측정 장치의 높이를 콘베이어 벨트 표면으로부터 40cm, 투사각을 35°로 하였으며 이 위치에서 벨트의 속도를 변화시키면서 도플러 시프트 주파수를 측정하였다. 이 때 실내 온도는 15°C이었으며, 바람은 없는 상태였다.

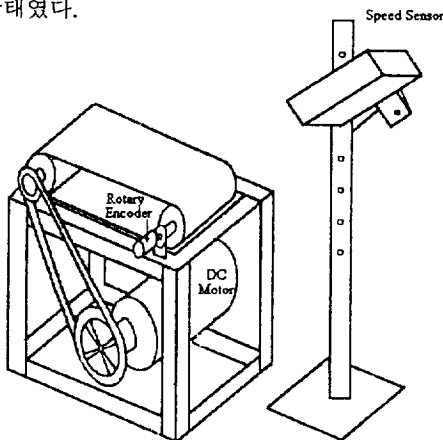


Fig. 9 Experimental in-door road surface

다. 토양조(Soil-Bin) 시험

토양 표면에 대한 속도 측정 장치의 성능 시험은 서울대학교 농업생명과학대학 농공학과에 설치되어 있는 토양조에서 실시하였다. 이 토양조의 길이, 폭, 깊이는 각각 9m, 1m, 0.5m이고 고정된 토양조 위를 대차가 이동할 수 있으며 대차의 속도는 최고 1 m/sec까지 변속 모터로써 조정할 수 있도록 되어 있다. 토양조 내의 토양은 토심 20cm의 자연토로서 밀도, 토립자의 크기, 토양 표면의 굴곡 등은 균일하지 않은 상태이었다.

속도 측정 장치는 토양 표면으로부터 높이 40 cm, 투사각 35°가 되도록 대차에 고정된 지지 프레임에 설치하였다. 대차의 속도는 변속 모터의 가변 저항을 조정하여 0.2m/s의 간격으로 최고 1m/sec까지 5단계로 변화시켰으며 각 속도에서 측정 장치의 도플러 주파수를 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

가. 작동 범위의 설정

속도 측정 장치의 작동 가능 거리 및 투사각의 범위는 정지 상태의 목표물을 향하여 발사한 초음파의 주파수와 목표물에서 반사되어 돌아온 반사 신호의 주파수를 비교하여 두 주파수가 같은 경우에 정상 작동 범위로 간주하였다.

먼저 목표 평면이 초음파의 발신 및 수신 방향에 대하여 수직을 이룬 상태에서 측정 장치로 가까이 오거나 멀어지게 할 때, 목표 표면이 측정 장치로부터 2m 이내의 범위에 있을 때 정확하게 발신 주파수와 같은 주파수의 반사 신호를 수신할 수 있었다.

한편, 투사각의 변화에 따른 측정 장치의 수신 성능 시험에서는 표 2에서와 같이 지상고가 높아짐에 따라 투사각을 크게 해야 반사 신호를 수신할 수 있었다. 그러나, 식(8)에서 보는 바와

같이 투사각이 커지면 측정할 수 있는 도플러 시프트 주파수가 작아지게 되고 종국적으로 투사각 90°일 때, $\cos \theta$ 는 0이 되어 물체의 이동 속도를 측정할 수 없는 상태, 즉 도플러 효과를 이용할 수 없는 상태가 된다. 따라서, 발신 주파수와 동일한 반사 신호 주파수를 수신할 수 있는 범위내에서 가능한한 작은 투사각을 적정한 투사각이라고 할 수 있다. 또한 Stuchly 등(1978)도 앞 장의 연구사에서 언급하였던 적정 투사각의 범위를 벗어나게 되면 투사각이 증가 또는 감소함에 따라 속도 측정 오차가 급격히 증가한다고 보고한 바 있다. 본 측정 장치에서는 최소한의 투사각 35°, 목표물로부터의 지상고 0.5m 이내에서 발신 주파수와 동일한 주파수의 반사 신호를 수신할 수 있었으므로 그것을 적정 작동 범위로 간주하였다. 투사각이 적정 범위를 벗어나 작아지면 발신 주파수와 동일한 반사 신호를 수신할 수 없었는데, 이것은 반사 신호의 강도가 급격히 감소되어 측정 장치에 반사 신호가 수신되지 않았기 때문으로 판단되었다. 따라서, 적정 작동 범위의 투사각과 지상고를 유지하기 위하여 속도 측정 대상체에 측정 장치를 설치하는 데 세심한 주의가 요구되었다.

Table 2. Effects of transmitting angle and height of sensor on the Doppler frequency

| Transmitting Angle | Doppler Frequency (kHz) | | | | | |
|--------------------|--------------------------|------|------|--------------|------|------|
| | Transmitting height from | | | | | |
| | Concrete surface | | | Soil surface | | |
| | 0.3m | 0.5m | 0.7m | 0.3m | 0.5m | 0.7m |
| 15° | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20° | 18 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 25° | 32 | 20 | 0 | 18 | 15 | 0 |
| 30° | 40 | 29 | 0 | 29 | 30 | 10 |
| 35° | 40 | 40 | 15 | 40 | 40 | 18 |
| 40° | 40 | 40 | 28 | 40 | 40 | 20 |
| 45° | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 29 |
| 50° | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |

토양 표면에 대한 반사 신호의 주파수는 토양 표면의 굴곡과 토양 강도에 따라 큰 영향을 받는 것으로 보이며 비교적 토양 표면이 평탄한 경우에는 투사각이 35° 이상이고 목표물로부터의 지상고가 0.5m 이내인 범위에서 정확하게 발신 주파수와 동일한 주파수의 반사 신호를 수신할 수 있었다. 굴곡이 심한 경우에는 발신 주파수 40 kHz에 대한 반사 신호의 주파수가 10kHz 이하인 경우도 있었다.

나. 가상 로면에서의 성능

실내에서 수행한 가상 로면 즉, 벨트 콘베이어에 대한 속도 측정 장치의 성능은 그림 10과 표 3에서와 같다. 그림 10에서 도플러 시프트의 값은 각 벨트 속도에서 반사 신호의 주파수를 10회 측정된 평균값으로 계산한 것이다. 시험 결과는 측정 속도의 범위에서 벨트 속도와 측정된 도플러 시프트의 관계는 비선형으로 나타났다. 속도가 3m/s 이하인 범위에서는 측정 도플러 시프트가 이론치보다 적었으며 3m/s 이상에서는 측정치가 이론치보다 컸다. 속도가 증가할수록 측정 도플러 시프트의 값은 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 벨트 속도가 증가함에 따라 도플러 주파수가 증가함으로써 초음파 수신 변환기의 수신 특성이 저하될 뿐만 아니라 수신부에서 처리될 신호의 주파수 대역이 확대되어 신호 처리 성능도 저하되기 때문인 것으로 판단된다.

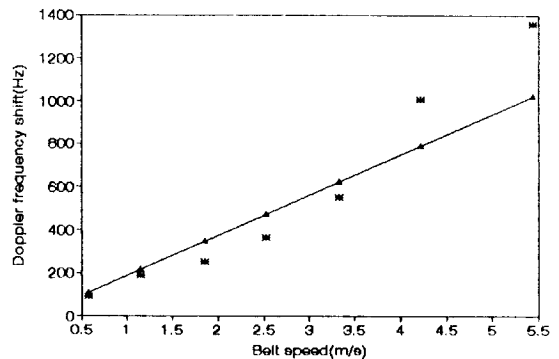


Fig. 10 Experimental results on speed measurements

이론적으로 속도 측정 장치에서 측정되어야 할 속도 1m/s당 도플러 시프트 188 Hz를 기준으로 하였을 때, 3 m/s 이하의 저속에서는 0.07~0.59 m/s의 측정 오차가 발생하였으며 3m/s 이상의 범위에서는 1.16~1.78 m/s의 오차가 발생하였다. 따라서, 본 연구에서 개발한 속도 측정 장치는 3m/s 이하의 속도를 측정하는 경우에 한하여 사용이 가능할 것으로 판단된다.

Table 3 Measurement error on the surface of the belt-conveyor

| Actual belt speed(m/s) | Doppler Shift Frequency(Hz) | Measured belt speed(m/s) | Measurement Error(%) |
|------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------|
| 0.58 | 95.0 | 0.51 | 12.7 |
| 1.15 | 190.0 | 1.01 | 12.1 |
| 1.85 | 252.5 | 1.34 | 27.5 |
| 2.53 | 364.7 | 1.94 | 23.1 |
| 3.32 | 550.8 | 2.93 | 11.8 |
| 4.21 | 1010.1 | 5.37 | 27.5 |
| 5.44 | 1356.7 | 7.22 | 32.7 |

다. 토양에서의 성능

토양 표면에서 실시한 성능 시험은 초음파를 이용한 속도 측정 장치의 성능을 확인하는 데 매우 부정적인 결과로 나타났다. 그림 11에서 보는 바와 같이 토양조에서 대차가 정지 상태일 때는 발신 주파수와 동일한 주파수의 신호를 수신하였으나, 대차가 주행할 때는 속도에 관계없이 수신 주파수는 발신 주파수인 40 kHz로부터 약 10 kHz에 이르는 큰 주파수 범위에서 변동하였다. 이것은 불규칙적인 토양 표면으로 발사된 초음파가 감쇄 및 난반사 등으로 인하여 약화되었기 때문에 수신용 초음파 변환기가 충분한 양의 반사 신호를 수신할 수 없고 또한, 급격하게 신호 강도와 주파수가 변화하는 반사 신호에 대하여 측정 장치가 신속하게 응답하지 못하기 때문인 것으로 판단된다. 본 연구에서 사용한 초음파 변환기는 보편적으로 사용되는 것으로서, 지

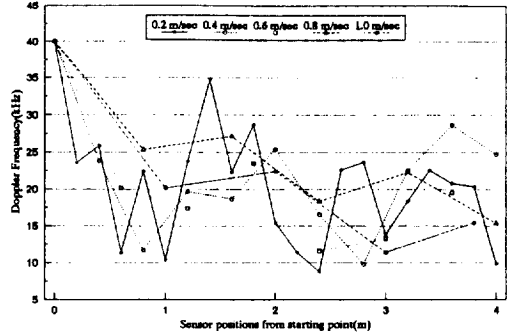


Fig. 11 Fluctuations of doppler frequency on soil surface

향각이 -6 dB를 기준으로 약 50° 정도로 크기 때문에, Broderick과 Hayre(1969)의 연구 결과에서와 같이, 굴곡이 있는 표면에서는 반사 신호의 주파수가 비정규 분포를 이루게 되어 주 도플러 주파수보다는 주위 주파수들의 신호 강도가 증가하여 수신된 주파수의 변동 폭이 과도하게 나타나는 것으로 생각된다.

이러한 현상은 연구 초기에는 예상하지 못한 것이었다. 현재, 토양 표면과 같이 불균일하고 동시에 불규칙한 반사 표면에서 신호 처리에 충분한 반사 신호를 얻을 수 있도록 측정 장치를 개선하기 위한 연구를 계속하고 있다. 고려하고 있는 개선의 주 방향은 다음과 같다.

첫째, 디지털 IC를 사용하여 초음파를 발생하여 수신하고 신호 처리를 위한 연속파를 위해서는 구형파가 아닌 정현파를 발신할 수 있도록 펄스 트랜스(pulse transformer)를 이용하며 수신부에서도 Op. Amp 증폭 방식 대신 동조 회로와 트랜지스터를 이용하는 방식을 검토하는 방안이다. 둘째, 일반적으로 작동 주파수가 증가하면 공중에서 전파의 감쇄가 크나 안테나 또는 변환기의 지향성을 향상시킬 수 있으므로 보다 고주파의 초음파를 사용하는 방안이다.

5. 결론

초음파를 매질로 한 도플러 센서를 이용하여

농업 기계의 실제 주행 속도를 측정하기 위한 속도 측정 장치를 개발하고 이를 현장에 적용하기 위한 기술적 타당성을 검토하였다. 속도 측정 장치는 디지털 IC를 사용하여 40kHz의 초음파를 이동 물체에 연속적으로 발사하고 물체에서 반사된 반사 신호를 수신하여, 두 신호의 주파수 차이를 검출하며 이 주파수 차이로써 물체의 이동 속도를 구하는 원리로 되어 있다. 정지된 물체에 대하여 속도 측정 장치는 최소 투사각 35°, 지상고 50cm 이내의 범위에서 정확한 40kHz의 반사 신호를 수신할 수 있었다. 가상 로면과 같은 이상적인 표면에서는 표면 속도가 3m/s 이하인 저속에서 0.07~0.59m/s의 측정 오차가 발생하였으며 그 이상의 속도 범위에서는 1.16~1.78 m/s의 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 표면의 주행 속도가 증가할수록 급격히 증가하였다. 그러나 실제 토양 표면에서는 50°에 이르는 초음파 변환기의 지향각과 토양 표면에서의 감쇄 및 난반사 등으로 인하여 수신 신호가 매우 불안정하였으며 적절한 도플러 신호를 감지할 수 없었다. 따라서 속도 측정 장치를 농업 기계에 적용하기 위해서는 아직 토양 표면과 같이 불균일하고 불규칙한 반사 표면에서 충분한 반사 신호를 검출하기 위한 연구가 요구되고 있다.

참 고 문 헌

1. Broderick, R. F. and H. S. Hayre. 1969. Doppler return from a random rough surface. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems. v.AES-5(3) : 441-449.
2. Egawa, A. 1983. A microwave doppler radar velocity meter for construction machinery. SAE paper 821083.
3. Hata, S., M. Takai and K. Ohmiya. 1991. Development of ground speed sensor for agricultural tractors. Journal of JSAM. v.53(6) : 3-10.
4. Hesse, H. and G. Withington. 1993. Digital electronic hitch control for tractors. Agricultural Engineer : 14-17, Spring 1993.
5. McLendon, D. B. and S. McDonald. 1991. Radar-based in-field distance marking. Trans. of the ASAE. v.34(5) : 2219-2224.
6. Sokol, D. G. 1983. Next generation radar sensor for true ground speed measurements. Agri-Maton, v.1 : 76-84.
7. Stuchly, S. S., A. Thansandoje, J. Maldek and J. S. Townsend. 1978. A doppler radar velocity meter for agricultural tractors. IEEE Trans. on Vehicular Technology. v.VT-27(1) : 24-30.
8. Tompkins, F. D., W. E. Hart, R. S. Freeland, J. B. Wilkerson and L. R. Wilhelm. 1988. Comparison of tractor ground speed measurement techniques. Trans. of the ASAE. v.31(2) : 369-374.
9. 신범수. 1994. 농업 토양 표면 형상을 감지하기 위한 센서의 개발. 한국과학재단 지원 '93 국내 Post-Doc. 연수 결과 보고서. 서울대학교 농업생명과학대학.