

초고주파도플러속도측정에서 물체의 초기속도결정방법

정원철, 리영명, 신금혁

경애하는 최고령도자 김정은동지께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학자, 기술자들은 우리의 원료와 선진과학기술에 의거하여 다른 나라 제품들보다 값이 낮으면서도 질이 담보되는 여러가지 용도의 제품들을 더 많이 연구개발하여야 합니다.》

초고주파도플러속도측정장치는 다른 종류의 속도측정장치들에 비하여 장치가 간단하고 설치가 쉬운 등 여러가지 우점들을 가지고있다.[1]

그러나 측정장치의 위치에 따라 측정값이 실지대상의 속도와 차이나게 되며 특히 대상의 초기속도를 결정하는것이 어려운 문제로 나서게 된다. 선행연구[2]에서는 측정장치를 대상의 운동경로에 배치하는 방법으로 이 문제를 해결하였지만 설치조건의 제한성으로 하여 이런 방법을 적용하는것은 실천적으로 불합리하다.

본문에서는 측정장치가 운동경로로부터 벗어나 배치되는 경우 측정값이 실지속도와 차이나게 되는 원인을 분석하고 물체의 초기속도를 정확히 결정하는 방법을 제기하였다.

1. 초고주파도플러속도측정의 기본원리

그림 1에 초고주파도플러속도측정장치의 구성도를 보여주었다.

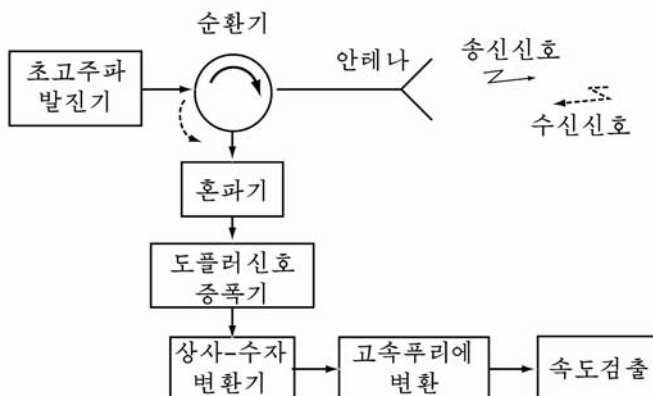


그림 1. 초고주파도플러속도측정장치의 구성도

초고주파발진기에서 나온 X 대역의 초고주파신호는 순환기와 안테나를 거쳐 공간에 복사된다. 공간에 복사된 초고주파신호는 물체에 반사되어 안테나에 수신되는데 그것의 수신신호주파수는 물체가 운동할 때 도플러효과에 의하여 변화된다. 혼파기는 송신신호와 수신신호를 혼파하여 차주파수(도플러주파수)신호를 얻는다.

도플러주파수는 물체의 속도와 다음과 같은 관계에 있다.

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda}$$

이러한 주파수를 가진 도플러신호는 도플러신호증폭기에서 필요한 준위만큼 증폭되고 표본화되어 상사-수자변환된다.

얻어진 수자자료는 고속푸리에변환되며 이때 얻어지는 주파수성분으로부터 물체의 속도를 결정한다.

결국 측정되는 물체의 속도는 안테나에 대한 물체의 동경방향속도로 되며 실지물체의 속도로는 되지 않는다. 정확한 물체의 속도값은 물체의 운동속도와 동경속도가 방향이 일치한 경우이다.

만일 두 속도방향이 일치하지 않는 경우 측정값으로부터 실지물체의 운동속도 특히 초기속도를 정확히 결정하는 문제가 제기된다.

2. 목표의 운동속도와 동경방향속도, 측정값사이의 관계를 고려한 초기속도결정

그림 2에 운동속도와 동경방향속도사이의 관계를 보여주었다.

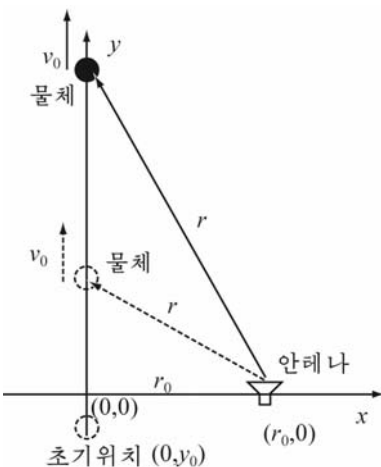


그림 2에서 보는바와 같이 목표와 수신기가 운동방향으로 한직선에 놓이지 않았을 때 그것의 운동속도와 동경방향속도는 차이하게 된다.

그림 2에서 목표의 운동방향을 y 축으로, 초기위치는 $(0, y_0)$, 수신기의 위치는 $(r_0, 0)$ 으로 정하였다.

먼저 목표의 속도가 v_0 으로서 일정하다면 시간에 따르는 수신기로부터 목표까지의 거리 r 는 다음과 같다.

$$r = \sqrt{r_0^2 + (v_0 t - y_0)^2} \quad (1)$$

이로부터 목표의 동경방향속도는

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{v_0^2 t}{\sqrt{r_0^2 + (v_0 t - y_0)^2}} \quad (2)$$

그림 2. 운동속도와 동경방향 속도사이의 관계

로서 목표의 실지속도뿐만아니라 그것의 비행시간과 초기위치, 수신기의 위치에도 관계된다.

여기로부터 수신기에 수신되는 도플러주파수는

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{v_0^2 t}{\lambda \sqrt{r_0^2 + (v_0 t - y_0)^2}} \quad (3)$$

이다.

한편 수신신호의 파형은 다음과 같이 표시할수 있다.

$$u(r, t) = u(r) \cdot \sin \varphi(t) \quad (4)$$

식 (4)에서 $u(r)$ 는 r 에 따르는 수신된 목표신호의 세기로서 다음과 같다.

$$u(x) = \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cdot u_0 \quad (5)$$

여기서 r 는 안테나로부터 목표까지의 위치이고 r_0 은 안테나로부터 목표까지의 초기위치, u_0 은 초기위치 r_0 에서 수신된 목표신호세기이다.

또한 $\varphi(t)$ 는 다음과 같이 표시된다.

$$\varphi(t) = \int \omega(t) dt = \int 2\pi f_d(t) dt = \frac{4\pi}{\lambda} \int v_r(t) dt = \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{r_0^2 + (v_0 t - y_0)^2} \quad (6)$$

따라서 식 (4)는 다음과 같다.

$$u(t) = \left(\frac{r_0^2}{r_0^2 + (v_0 t - y_0)^2} \right) u_0 \sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{r_0^2 + (v_0 t - y_0)^2} \right) \quad (7)$$

식 (7)과 같이 표시되는 수신신호는 신호처리기에서 AD변환되고 고속푸리에변환(FFT)되어 도플러주파수가 얻어지며 이로부터 물체의 동경속도를 얻는다.

이때 표본화주파수를 200kHz, 표본점개수를 8 192개로 정하였다.

물체의 초기위치를 $y_0 = 0$ m, 속도를 $v_0 = 30$ m/s, 수신기의 위치를 $r_0 = 0.1$ m, 0.3 m로 하였을 때 물체의 실지속도와 동경방향속도, 수신신호스펙트르를 그림 3에 보여주었다.

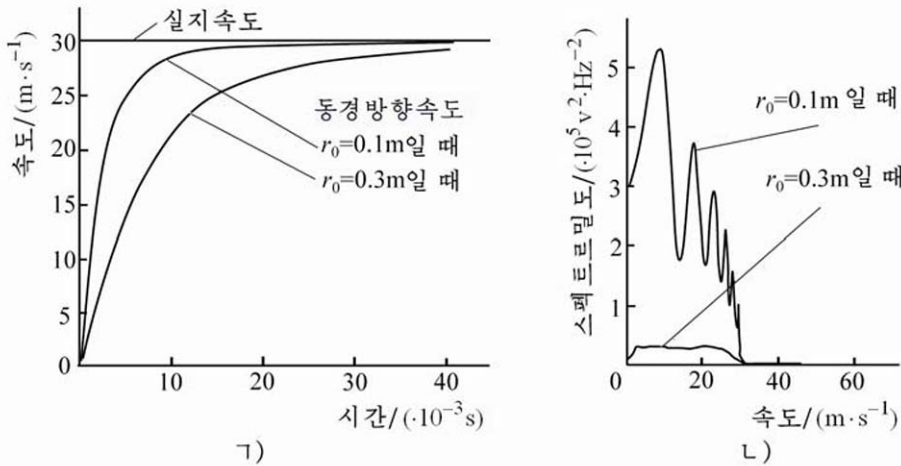


그림 3. 물체의 실지속도, 동경방향속도(㉠)와 수신신호스펙트르(㉡)

그림 3에서 보는바와 같이 목표의 동경방향속도는 처음순간에는 최소값을 가지다가 시간이 지남에 따라 급격히 증가하여 실지운동속도에 접근하며 수신기의 위치가 목표에 가까울수록 동경방향속도가 급격히 증가하여 실지운동속도에 빨리 접근한다는것을 알수 있다. 그리고 수신기와 목표의 배치방향이 목표의 운동방향과 일치($r_0 = 0$)한다면 목표의 운동속도와 동경방향속도는 완전히 일치한다. 또한 수신기가 목표의 운동방향으로부터 벗어난 경우($r_0 \neq 0$) 수신신호의 스펙트르를 보면 신호주파수는 0~30m/s속도대역에 있으며 낮은 속도대역의 스펙트르밀도가 크다. 이것은 목표의 수신신호가 가까운 거리에서는 세기가 세고 멀어질수록 그 세기가 급격히 감소하기때문이다. 이로부터 목표의 속도를 구하기 위해서 모든 표본점들에 대하여 고속푸리에변환을 하고 스펙트르밀도가 최대인 속도성분을 검출하는 방법을 리용하는것이 불합리하다는것을 알수 있다.

한편 목표의 운동경로를 여러개로 나누고 목표의 실지속도와 동경방향속도, FFT방법으로 구한 매 경로의 속도값을 그림 4에 보여주었다. 이때 8 192개의 표본점을 16구간으

로 나누고 매 구간의 512개의 표본점에 대하여 고속푸리에변환을 진행하여 최대값을 검출하는 방법으로 속도를 측정하였다.

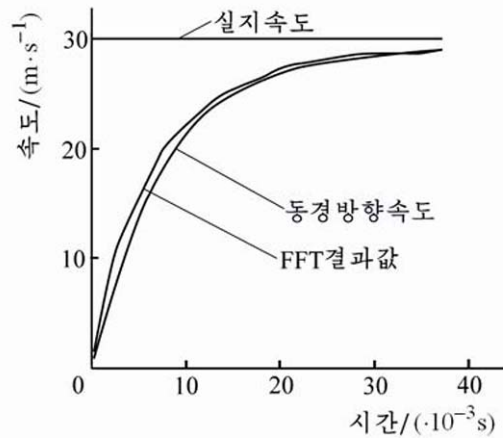


그림 4. 목표의 실지속도와 동경방향속도, FFT방법으로 구한 매 경로의 속도값

그림 4에서 보는바와 같이 구간별속도측정값은 동경속도에 가까운 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 그리고 동경속도와 실지목표의 속도관계를 고려하지 않는다면 측정결과로부터 실지 등속운동하는 물체를 가속운동하는것으로 볼 수 있으며 따라서 운동속도를 정확히 알 수 없다.

한편 물체가 공간에서 공기의 저항을 받으며 가속운동을 하는 경우 그것의 초기속도를 구하는것은 보다 어렵다.

물체가 가속도 a 를 가지고 운동하는 경우 그것의 속도는 $v(t) = v_0 - at$ 이고 시간에 따르는 동경방향속도는

$$v_r(t) = \frac{dr}{dt} = \frac{\left(v_0t - \frac{1}{2}at^2\right)(v_0 - at)}{\sqrt{r_0^2 + \left(v_0t - \frac{1}{2}at^2\right)^2}} \quad (8)$$

이다. 그리고 그것의 도플러주파수는

$$f_d = \frac{2v_r}{\lambda} = \frac{2\left(v_0t - \frac{1}{2}at^2\right)(v_0 - at)}{\lambda\sqrt{r_0^2 + \left(v_0t - \frac{1}{2}at^2\right)^2}} \quad (9)$$

이고 신호파형은

$$u(t) = \left(\frac{r_0^2}{r_0^2 + \left(v_0t - \frac{1}{2}at^2\right)^2} \right) u_0 \sin \left(\frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{r_0^2 + \left(v_0t - \frac{1}{2}at^2\right)^2} \right) \quad (10)$$

이다.

물체의 초기위치를 $y_0 = 0\text{m}$, 속도를 $v_0 = 30\text{m/s}$, 가속도를 $a = 40\text{m/s}^2$, 수신기의 위

치를 $r_0 = 0.2\text{m}$ 로 하였을 때 물체의 속도와 동경방향속도, 수신신호스펙트르를 그림 5에 보여주었다.

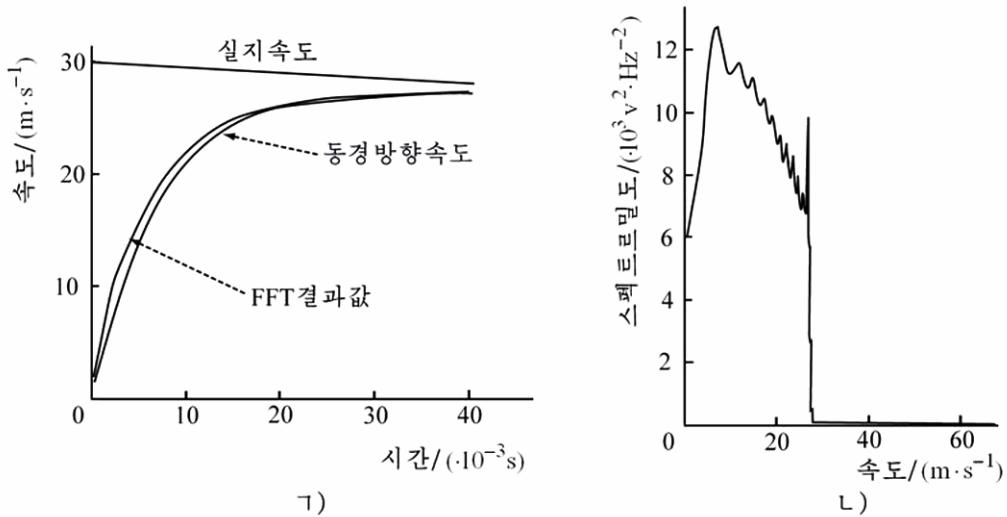


그림 5. 물체가 가속운동을 할 때 운동속도와 동경방향속도(1)), 수신신호스펙트르(2))

그림 5에서 측정속도는 등속운동할 때와 같은 방법으로 고속푸리에변환하여 구하였다.

그림 5에서 보는바와 같이 측정속도값은 동경속도와 거의 같으며 시간에 따라 실지운동속도에 접근하지만 초기속도값성분($v_0 = 30\text{m/s}$)은 얻어지지 않는다. 이것은 수신신호스펙트르(그림 5의 2))를 보아도 알수 있다.

따라서 얻어진 수신신호스펙트르로부터 직접 속도를 구하는 방법으로는 물체의 초기운동속도를 알수 없다.

물체의 초기속도를 알자면 수신기의 위치와 각이한 시각에 따르는 속도측정값을 가지고 식 (8)에 의하여련립방정식을 세워 구하여야 한다.

물론 가속도의 변화를 고려하여 시간간격은 짧게 정할수록 좋다.

논문에서는 측정실험을 통하여 위의 결과를 검증하였다.

이를 위해 수신기의 위치는 $r_0 = 0.2\text{m}$, 표본화주파수는 220kHz , 표본화점은 8 192, FFT구간은 8개, 매 구간의 표본점의 개수는 1 024로 정하였다.

도플러속도측정기를 리용하여 얻은 속도 측정결과는 그림 6과 같다.

그림 6에서 보는바와 같이 측정된 물체의 운동속도는 위에서 고찰한 가속운동하는 물체의 운동속도와 그 변화형태가 같다. 그리고 식 (8)을 리용하여 물체의 초기속도를

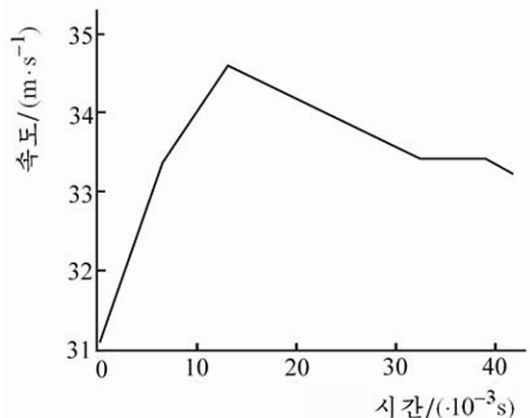


그림 6. 속도측정결과

계산하면 36.1m/s 이다. 이것은 우리가 이미 알고있는 물체의 초기속도 36.2m/s 와 매우 근사하다. 물체의 운동속도와 그 변화형태가 같다. 그리고 식 (8)을 리용하여 물체의 초기속도를 계산하면 36.1m/s 이다. 이것은 우리가 이미 알고있는 물체의 초기속도 36.2m/s 와 매우 근사하다.

맺 는 말

초고주파도플러속도측정에서 수신기가 물체의 운동자리길로부터 일정한 거리에 배치된 경우 정확한 초기속도값이 측정되지 않으며 정확한 초기속도를 구하자면 수신기를 운동자리길에 완전히 접근시키거나 혹은 시간에 따르는 속도를 측정하여 초기속도값을 결정하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] X. Zhang et al.; WCECS, 2, 10, 23, 2013.
- [2] G. Sattibabu; International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering, 1, 4, 22, 2012.

주체109(2020)년 8월 5일 원고접수

A Determination Method of Initial Object's Velocity for Microwave Doppler Velocity Measurement

Jong Won Chol, Ri Yong Myong and Sin Kum Hyok

In microwave Doppler velocity measurement, no initial object's velocity is exactly measured when the radar is located at a short distance from object trajectory. In order to determinate exactly the initial velocity, the radar has to be closely approached to the trajectory, or the initial one is determined by measuring the velocity according to moving time.

Keywords: microwave signal, Doppler velocity, spectrum