회전 속도 vector 계측을 위한 공간필터 검출기의 개발

고현민 *, 노도환 **
*전북대학교 대학원 전기공학과, **전북대학교 전자정보공학부

A Development of SFD for the measurement of rotational velocity vector

Go, Hyun-Min *, Rho, Do-Hwan **
*Chonbuk Nat'l Univ. Electrical Eng, Chonbuk Nat'l Univ. Electric & Information School

Abstract - In this paper, we propose the non-contact method to measure rotational speed vector using spatial filtering method. The rotational speed ω is known by the frequency of output sinusoidal signal direct proportional to that and the rotational direction is given by the phase delay from the weighting function design of spatial filter.

1. 서 론

펌프, 엔진 그리고 발전기 등의 회전형 기계장치에서 회전각 속도의 변동을 측정하기 위해 펄스열이나 정현파를 이용하는 교류 및 직류 발전기 타코미터, optical sensor, 가변 자기저항 센서, 회전 자기 센서, Wiegand 센서, stroboscopy 등이 사용되고 있다[1]. 이러한 펄스열이나 정현파를 이용하는 방법은 실제로 고정도 계측을 하기 어렵다. 광학적 장비를 사용하는 경우에는 대상물에 슬릿이 마크가 되어 있지만 슬릿의 가공중심과 원판의 회전 중심이 일치하지 않으면 실제로 회전 속도가 일정해도 회전에 따른 주기적 변동이 출력되는 등의 단점이 있다. 이 외에도 로터리 엔코더를 사용하거나 자이로를 이용하는 방법 등이 있으나 ,엔코더를 이용하는 경우 대상물과의 회전축 일치가 회전 속도 계측에 많은 영향을 미치며, 자이로를 이용하는 경우 시스템이 복잡해지는 등의 문제가 있다.

본 논문에서는 극좌표계의 공간 필터를 회전속도 계측을 위한 장치로써 사용하여 비접촉의 회전속도 센서를 구성함과 동시에 회전 방향을 계측함으로써 회전 속도 벡터를 측정할 수 있는 센서의 구성에 대해서 제안한다[2][3][4]. 대상물의 회전축과의 일치에 따른 중심일치의 영향에 대해 실험을 통해 계측 장치의 유효성을 나타냈다.

2. 공간필터 검출기와 계측원리

2.1 회전 속도 측정원리

공간필터가 존재하는 평면상에 극좌표계 (γ, θ)를 설정하고, 공간필터의 weighting function을 $h(\gamma, \theta)$라고 한다. 회전하고 있는 대상은 광학적으로 랜덤한 반사율 $f(\gamma, \theta)$라고 하자. 회전 속도 계측을 위한 시스템의 구성은 그림 1과 같다.

이러한 시스템으로부터 얻어지는 출력 $g(\theta_0)$는 식 (1)과 같다.

$$g(\theta_0) = \int_a^b \int_0^{2\pi} \gamma d\theta f(\gamma, \theta_0 + \theta) h(\gamma, \theta) \quad (1)$$

$$\theta_0 = \omega t + \theta_c \quad (2)$$

(θ_c: 초기 상대 각변위)

윗 식에서 $h(\gamma, \theta)$는 공간필터의 weighting function이고, θ_0는 측정대상과 공간필터와의 상대위치이다. 또, a와 b는 각각 공간필터의 내경과 외경이다.

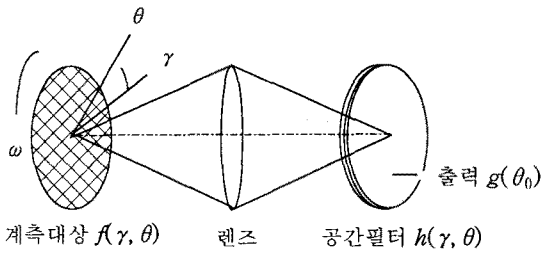


그림 1. 공간필터를 이용한 회전속도계측 원리

공간필터의 특성을 파워 스펙트럼 밀도함수를 이용하여 나타내기 위해서 먼저 측정대상의 광학적 반사율 $f(\gamma, \theta)$의 파워 스펙트럼 밀도 $\Phi(\mu, \nu)$를 구해보면,

$$\Phi(\mu, \nu) = \left| \int_0^\infty d\gamma \int_0^{2\pi} \gamma d\theta f(\gamma, \theta) e^{-j2\pi(\mu\gamma + \nu\theta)} \right|^2 \quad (3)$$

식 (3)와 같다.

또, θ방향의 auto-correlation 함수 $R(\tau_\theta)$를 구해보면 식(4)와 같다.

$$R(\tau_\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} d\mu \int_{-\infty}^{\infty} d\nu \Phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 e^{j2\pi\nu\tau_\theta} \quad (4)$$

여기에서 $H(\mu, \nu)$는 공간필터 weighting function $h(\gamma, \theta)$의 퓨리에 변환이다. 따라서, θ방향의 파워 스펙트럼 밀도 $\Psi(\nu)$는 식 (5)와 같이 얻을 수 있다.

$$\Psi(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mu, \nu) |H(\mu, \nu)|^2 d\mu \quad (5)$$

실제로 얻어진 출력의 시간영역에서의 파워 스펙트럼 밀도 $\Omega(f)$는 식(2)를 고려하여 구하면,

$$\begin{aligned} \Omega(f) &= \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\mu, \frac{f}{\omega}) |H(\mu, \frac{f}{\omega})|^2 d\mu \\ &= \frac{1}{\omega} \Psi(\frac{f}{\omega}) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)과 같이 얻을 수 있다. 여기에서 ω는 회전속도이다. 식 (6)에서 알 수 있는 바와 같이 회전속도 ω에 비례하여 $\Omega(f)$의 주파수축이 변하는 것을 알 수 있다. 또, 식 (5)에서는 측정대상 및 공간필터의 공간주파수 영역에서의 특성과 출력과의 관계를 알 수 있으며, 식 (5)에서 $|H(\mu, \nu)|^2$는 $\nu = \nu_0$만을 선택하는 첨예한 특성의 공간필터의 필터효과를 나타낸다.

2.2 공간필터의 특성

$|H(\mu, \nu)|^2$이 특정의 ν에서 첨예한 선택특성을 가지도록 하기 위해서는 극 좌표계에서의 γ방향에 폭을 가지고 있어야 하며, θ방향에 주기적 구조를 가져야 한다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$h(\gamma,\theta)=h_1(\gamma),h_2(\theta) \tag{7}$$

$$h_1(\gamma)=\begin{cases} 1\ ;\ a\le\gamma\le b \\ 0\ ;\ 0\le\gamma<a,\gamma>b \end{cases} \tag{8}$$

$$h_2(\theta)=h_2(\theta+\theta_p) \tag{9}$$

$$N\cdot\theta_p=2\pi\ ,\ N\text{: 양의 정수} \tag{10}$$

즉, 공간필터의 형상은 1회전이 N등분된 pitch 각 θ_p의 주기를 가지고 있으며, 내경 a, 외경 b의 원형 패턴으로 구성되어 있다. 이 경우, 식 (5)를 고려하여 $|H(\mu,\nu)|^2$을 계산하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$|H(\mu,\nu)|^2=4\pi^2|H_\gamma(\mu)|^2\cdot|H_\theta(\nu)|^2 \tag{11}$$

$$\begin{aligned}|H_\gamma(\mu)|^2 &= \frac{4ab\sin^2\pi\mu(b-a)}{(2\pi\mu)^2} \\ &+\frac{2\pi(b-a)-\sin2\pi\mu(b-a)}{(2\pi\mu)^4} \\ &=\frac{4\sin^4\pi\mu(b-a)}{(2\pi\mu)^4}\end{aligned} \tag{12}$$

$$|H_\theta(\nu)|^2=\left(\frac{\sin N\pi\nu P}{N\sin\pi\nu P}\right)^2\cdot\left|\int_0^P\frac{h_2(\theta)}{P}\exp\{-j2\pi\nu\theta\}d\theta\right|^2 \tag{13}$$

회전속도 계측을 위해서는 일반적으로 주파수 측정으로부터 그대로 rpm 값을 알기 위해 N을 60으로 하면 rpm 값을 얻을 수 있다. 이러한 식들에 의해 구성된 공간 필터는 그림 2와 같은 방사형으로 구성되었으며, weighting function $h_2(\theta)$는 그림 3와 같다.

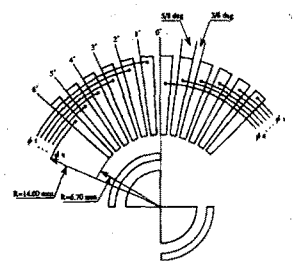


그림 2. 회전속도 계측을 위한 공간필터의 구성

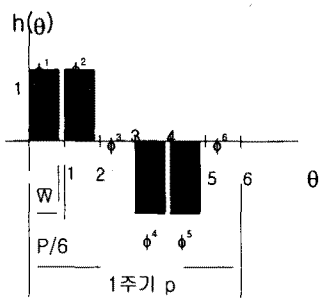


그림 3. weighting function $h(\theta)$

2.3 회전 중심 일치에 따른 영향

본 논문에서 제안한 공간필터를 이용한 회전속도 계측 시스템의 경우, 회전하고 있는 계측 대상에서 본 회전중심과 공간필터의 회전중심이 일치할 필요가 있다.

그림 4와 같이 공간필터와 회전체가 구성되어 있을 때, 극좌표계를 설정하고, 어긋난 중심간의 거리를 l로 했을 때 R과 Θ는 다음과 같은 관계를 가지게 된다.

$$R(\gamma,\theta)=(\gamma^2+l^2+2\gamma l\cos\theta)^{1/2} \tag{14}$$

$$\Theta(\gamma,\theta)=\sin^{-1}\{\gamma\sin\theta/R(\gamma,\theta)\} \tag{15}$$

식 (14)와 식 (15)를 이용하여 중심 일치에 따른 필터의 특성을 생각해보면,

$$\Psi_1(\nu)\fallingdotseq k_1\int_b^a dR\cdot R^2\left|\int_0^{2\pi}h_2\left(\Theta+\frac{l}{2R}\sin2\Theta\right)\cdot\exp(-j2\pi\nu\Theta)d\Theta\right|^2 \tag{16}$$

식 (16)으로부터 l/b가 증가하면, 출력신호의 피크치가 감소하고, 피크치가 저주파 영역으로 약간의 이동이 발생함을 알 수 있다. 또, a/b가 큰 편이 중심일치가 발생하지 않아도 그 영향을 덜 받는다는 것을 알 수 있다.

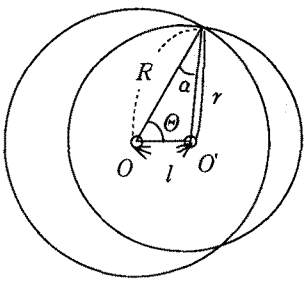


그림 4. 공간필터와 회전체의 중심일치

(O: 회전체의 중심, O': 공간필터의 중심)

2.4 회전 방향 계측

회전하는 계측대상의 회전방향을 측정하기 위해서는 그림 3에서 보이는 것과 같은 공간필터의 weighting function을 변형하면, 회전방향을 검출할 수 있다.

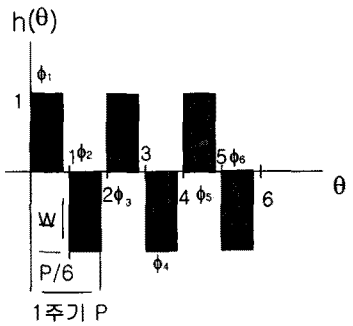


그림 5. 회전방향 계측을 위한 weighting function

3. 실험결과

회전속도 계측을 위한 실험장치의 개요도는 그림 6.과 같다. 모터는 2상 서보 모터를 사용하였으며, 회전체로는 직경 100㎜의 원판을 사용하였다. 가변전압원에 의해 모터의 회전속도를 변화시켜 가면서 회전속도를 측정하였다. 공간필터부에서는 렌즈(F/3.5 f=55㎜)를 사용하여 회전체의 광학적 반사율 $f(\gamma,\theta)$를 측정하였다. 또, xy mechnical stage를 이용하여 회전체의 회전중심과 공간필터의 회전중심의 일치에 따른 영향을 평가하였다. sampling rate는 5[㎑]이고, sampling data수는 1024를 기준으로 실험하였다.

사진 1.은 실제 실험장치의 구성이다.

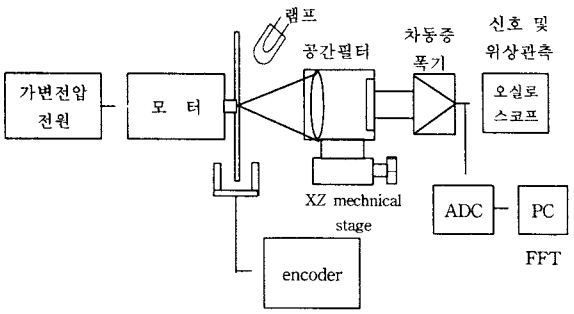
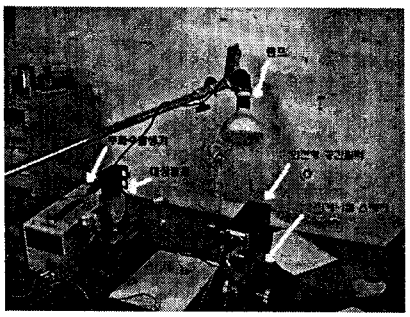


그림 6. 회전속도 계측 시스템 개요도



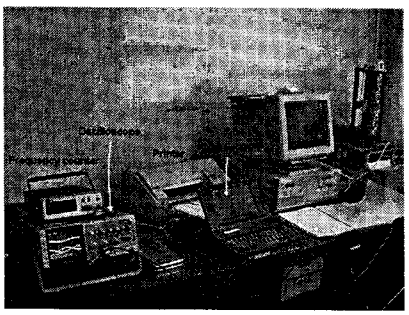


사진 1. 회전속도 계측 시스템

3.1 회전 속도 측정결과

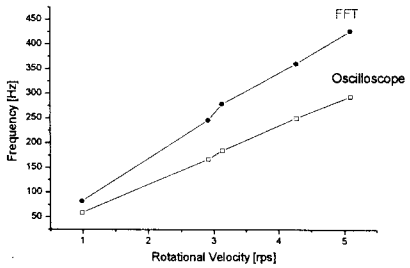
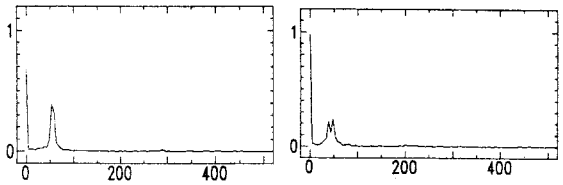


그림 7. 회전속도 측정 결과

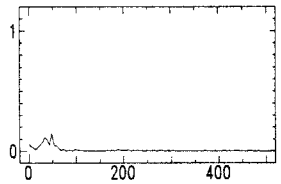
위 실험결과로부터 회전속도 ω와 주파수 f와의 비례관계를 알 수 있다. 즉, 회전속도가 증가함에 따라 주파수도 같이 증가하는 직선으로 나타남으로써 공간영역에서의 주파수를 측정하는 것에 의해 회전하는 대상물체의 회전속도를 고분해능으로 계측할 수 있다는 사실을 알 수 있다.

5.2 중심일치에 따른 실험

그림 8(a),(b)는 회전체의 회전중심과 공간필터의 회전중심의 일치에 따른 영향을 실험하기 위해 xy mechnical stage를 이용하여 x축 방향으로 중심을 어긋나게 하여 실험한 결과이다.



(a) 중심을 일치시킨 경우 (형상 1)　(b) 중심을 ½ 어긋나게 한 경우



(c) 중심을 ¾ 어긋나게 한 경우

그림 8. 중심일치에 따른 실험결과

위 실험결과는 식 (16)에 나타난 바와 같이 중심의 일치 정도에 따라 출력신호의 피크치가 감소하고, 저주파 대역으로 약간 이동한 것을 알 수 있다.

5.3 회전체의 형상에 따른 실험

회전하고 있는 계측대상의 형상에 따른 영향을 알아보기 위해 다음 그림 9와 같은 무늬를 회전체에 부착하여 실험하였다.

(a) 형상 1　(b) 형상 2

형상 1의 결과는 그림 8의 (a)와 같고 형상 2에 따른 결과는 그림 10과 같다. 실험결과에서 알 수 있는 것처럼 공간필터를 사용하여 회전속도를 측정할 경우 회전체의 형상은 회전속도 계측에 큰 영향을 미치지 않는 것을 볼 수 있다.

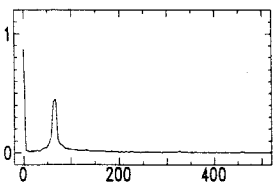


그림 10. 형상에 따른 회전속도 측정 실험결과(형상 2)

5.4 회전 방향 실험

회전체의 회전방향을 측정하기 위해 그림 5와 같은 weighting function으로 구성하고, ϕ_1, ϕ_3, ϕ_5와 ϕ_2, ϕ_4, ϕ_6의 신호를 차동 증폭하여 그 위상을 측정함으로써 회전방향을 알 수 있다.

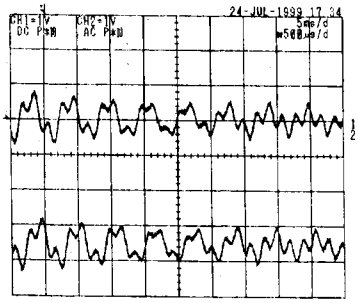


그림 11. 회전방향 측정 실험결과

그림 11의 상단의 그래프는 ψ_1, ψ_3, ψ_5 증폭신호이고, 하단의 그래프는 ψ_2, ψ_4, ψ_6 증폭신호이다. 위 그래프에서 ψ_2, ψ_4, ψ_6 증폭신호가 ψ_1, ψ_3, ψ_5 신호에 비해 위상이 지연된 것을 알 수 있으면, 이는 회전체가 왼쪽으로 회전하고 있다는 것을 의미한다.

4. 결 론

본 논문에서는 공간필터를 이용하여 비접촉의 회전속도 센서를 구성함과 동시에 회전 방향을 계측함으로써 회전 속도 벡터를 측정할 수 있는 센서의 구성에 대해서 제안하였다. 실험결과로부터 회전속도가 증가함에 따라 주파수가 증가하는 것을 알 수 있었으며, 대응관계를 이용하면 고정도의 회전속도 계측이 가능하다. 회전 속도 벡터계측에 있어 중요한 회전방향도 제안된 시스템을 이용하면 weighting funtion의 구성에 의해 측정이 가능하였다. 회전체의 형상에 따른 실험결과에서도 120 [Hz]의 같은 주파수를 출력함으로써 형상에 따른 영향을 받지 않는 것을 알 수 있었다. 중심일치의 경우에는 약 2[%] 정도의 오차가 발생하였다.

이 시스템은 비접촉으로 회전속도와 방향을 계측할 수 있으며 수명이 긴 장점을 가지고 있으나, 중심일치에 따라 오차가 발생하는 점과 측정기의 상대 위치가 고정되어야 하는 단점을 가지고 있어 이에 대한 연구가 요구된다.

본 논문은 과학기술부·한국과학재단 지정 지역협력연구센터인 전북대학교 메카트로닉스 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] John G. Webster, "The Measurement Instrumentation and Sensors H.B.",CRC press and IEEE press, pp 16.1-16.16.

[2] D.H. Rho, "A study on the Design Method of Spatial Filter for Non-Contact Speed Measurement", KITE Circuit and System Trans., vol.12, No.1,pp50-54, 1988

[3] A. Kobayashi, "The Progress of Spatial Filter Method for Measurement", Jpn. J. Apl. Phys., vol.52, No.12,pp 1007-1014, 1983

[4] 정준익, 한형배, 고현민, 노도환, "계측용 공간필터의 가변적 다치화된 가중치 실현에 관한 연구", 1998년도 정기총회 및 추계학술대회 논문집 B, vol 1, pp.481-483

[5] Joseph W. Goodman, "Statistical Optics", John Wiley & Sons, Inc, 1985