

액체저항경사계의 특성과 동적모델링

송무석^{†*}, 안자일^{**}

홍익대학교 조선해양공학과^{*}
수퍼센츄리^{**}

Characteristics and Dynamic Compensation Modeling of Liquid-Based Tilt Sensor

Museok Song^{†*} and Jail Ahn^{**}

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Hongik University^{*}
Super Century^{**}

Abstract

The characteristics of a tilt sensor utilizing the resistance change of an electrolyte associated with inclination is investigated, and a dynamic compensation modeling is proposed to make the real-time measurement of the absolute slope possible even with sporadically dynamic motion. Although the proposed system is small, economical and accurate for quasi-steady slope measurement, since it contains a freesurface the evolution of the liquid surface that has no direct relation to the real slope must be excluded for any rapid rotations or translations. For various artificial motions the response of the sensor is analyzed and simplified modeling equations are proposed.

※Keywords: Tilt sensor(경사계), Electrolyte(전해질), Real-time slope measurement(실시간경사계측), Dynamic compensation modeling(운동특성보정모델)

1. 서론

다양한 운동 중인 물체의 경사도를 측정하는 방식에는 여러 가지가 있으나, 사용하는 계측장치에 따라 정확도, 동적특성 그리고 비용면에서 각기 장

단점을 가지고 있다. 상대적으로 정밀하고 계측값을 전기적인 신호로 처리하기 위하여 능동형 장치가 주로 사용되는데, 가장 보편적인 장비로 중력장에서 사용가능한 진자형 경사계측기(pendulous angular displacement sensor)와 다양한 영역에서 이용되는 자이로계측기(gyroscopic sensor) 그리고 여러 형태의 (각)가속도계측기(accelerometer)가 있다. 이들은 각각 민감도 및 중력크기변화에 따른 문제, 편향(drift)의 문제 그리고 절대경사각을

접수일: 2003년 6월 16일, 승인일: 2005년 1월 2일

† 주저자, E-mail: msong@hongik.ac.kr

Tel: 041-860-2578

필요로 할 경우의 적분오차의 문제 등을 가지고 있으며, 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 하드웨어 및 소프트웨어의 고급화가 요구된다(Doebelin 1990).

소위 “생활의 디지털화”가 화두인 현대사회에서는 그 필요성이 간과되었던, 혹은 경제성에 비추어 적용이 회피되었던 다양한 영역에서 물체의 경사도 계측이 요구되고 있다. ICBM이나 항공기 등의 사례와 비교하여 상대적으로 덜 정밀하지만 충분히 정확한 경사계측이 요구되는 이러한 중간 수준의 수요영역은 적절한 경제적 부담이 가장 중요한 요구조건일 수 있으며, 이러한 상황에서 상기한 고급 장비들의 조합으로 경사정보를 취득하는 것은 경비면에서 무리일 뿐 아니라 종종 그 공간적 크기가 문제가 되곤 한다.

본 연구는, 저가이고 소형인 장치를 이용하여 실시간으로 물체의 경사를 파악할 수 있는 시스템을 개발하기 위한 기초 연구이다. 본 연구에서 활용한 장비는 작은 밀폐된 용기에 전해액을 부분적으로 채우고 수평상태에서 액체수면과 수직인 다수의 도선을 배열하여 용기가 경사할 경우 도체간의 전기 저항이 변하는 성질을 이용하는 방식이다. 이 방식은 원리와 구조가 간단하여 제작 원가가 극히 저렴하고 소형으로 제작이 가능할 뿐 아니라 중력장 내에서 비교적 우수한 정확성이 예상되나, 기본적으로 자유수면(free surface)을 포함하고 있어 용기의 운동에 수반되는 절대경사각과 무관한 액체거동에 기인한 오류경사각 신호를 제거해 줄 수 있어야만 불규칙적인 경사변화의 실시간 파악이 가능하다.

이에 현재 시판되고 있는 AOSI사의 DX-045D 모델을 (Advanced Orientation System 2000) 대상으로 그 기본 특성을 분석하고 다양한 형태의 실험 및 해석을 이용하여 장치의 동특성을 파악한 후 상응하는 출력을 실제 각도로 변환해 줄 수 있는 보정 모델을 본 연구에서 제시하였다.

2. 저항식 경사계측의 기본개념

Fig. 1과 같이 X축을 중심으로 양의 방향으로 기울어져 있는 경사계를 고려하여 저항식 경사계측

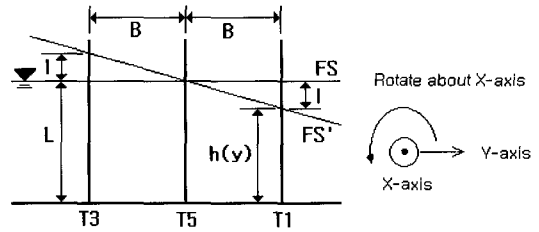


Fig. 1 Definition sketch of a liquid tilt sensor rotated positively around the x-axis.

의 기본적인 개념을 설명한다. 그림에서 수평상태에서 바닥으로부터 올라온 3개의 도선이 액체깊이 L 만큼 잠겨있고 3개의 도선은(T1, T3, T5) 전압계측단자인 T5를 중심으로 서로 B 만큼 떨어져 있다. 경사된 상태에서 (FS'으로 표시) 도선의 깊이는 h 로 변하고 이때 양쪽의 전압입력/접지 단자의 길이는 각각 l 만큼 줄어들고 늘어난다. 따라서 B 와 L 을 알고 있는 상황에서 변화하는 길이 l 을 알 수 있다면, x-축을 중심으로 회전한 경사정도를 파악할 수 있게 된다.

이제 T1에 전압 V_0 를 걸고 T3를 접지로 할 경우 T5에서 계측되는 전압을 V_5^+ , 입력과 접지를 바꾼 경우의 출력을 V_5^- 라 하고, 거의 같은 시간에 단자의 방향을 바꾸어 위의 두 값을 구한다면, 아래와 같이 입력전압이 없는 V_5 와 l 간의 비선형 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{V_5^+ - V_5^-}{V_5^+ + V_5^-} = \frac{\ln\{1 - (l/L)^2\}}{\ln\left\{\frac{1+l/L}{1-l/L}\right\}} = D \quad (1)$$

여기서 D 는 무차원값으로 l 의 크기 즉 경사도에 따라 변하는 값이고, 이후 이 D 값을 ‘처리된 V_5' , 혹은 ‘processed V_5 ’로 칭한다. 위의 비선형 방정식의 해를 실시간으로 구하기는 어렵고, 따라서 정해진 계측기 형상에 대하여 실험을 수행하고 결과를 게인함수(gain function)의 형태로 정리하는 것이 필요하다.

본 연구에 이용된 DX-045D센서의 형상을 Fig.2에 보였다. 전해액이 반 정도 채워진 작은 원형 용기 내에 바닥에서 5개의 도선이 나와 수면위로 돌출해 있는 형상이다. 가운데의 도선은 신호 검출부

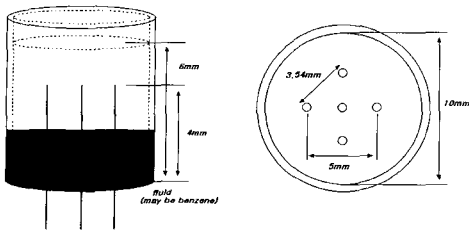


Fig. 2 Side & top views of EZ-TILT Sensor, DX-045D.

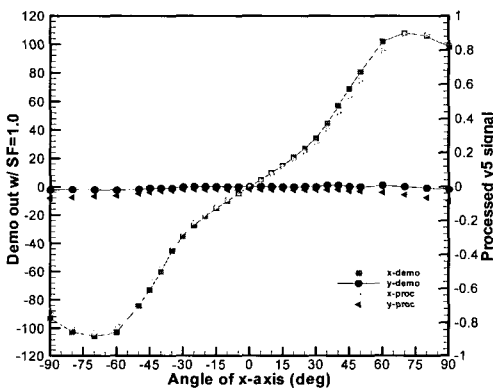


Fig. 3 Processed V5 & Demo output vs rotated angle. Connected symbols are for AOSI outputs. ■ and ► are for roll angles, and ● and ◀ are for pitch angles.

이고 가장자리의 4도선은 각기 다른 조합으로둘씩 입력부와 접지부가 되도록 회로가 구성된다. 결국 4가지 경우의 전류흐름이 반복적으로 이루어지며 10.25ms의 시간 동안에 한번 반복이 이루어지도록 설계되어 있다.

3. 정적 경사의 계측 특성

경사계의 기울기를 등간격으로 바꾸어 가며 출력신호를 받아서 (1)식의 D값을 제작사로부터 공급된 디코더의 출력(Demo out)과 비교하였다 (Fig. 3). 그림에서 가로축은 경사계의 실제 경사각 도이고 왼쪽 세로축은 출력신호를 제작사에서 공급

한 모듈을 이용하여 처리한 결과, 오른쪽 세로축은 스케일을 고려하지 않은 D(processed V5)값을 위한 것이다. 그림에 보인 경우는 x-축 중심의 회전만 준 상황이고, x-축 회전각과 y-축 회전각이 서로 독립적임을 확인할 수 있다. 회전 정도에 따라 출력값의 경사도(gain)가 다른 것을 볼 수 있지만, 신호의 처리가 제대로 이루어지고 있음을 알 수 있고, 약 $\pm 60^\circ$ 까지의 경사는 유일하게 결정됨을 확인할 수 있다.

4. 경사계의 동적응답 특성 및 모델링

임의의 경사를 체계적으로 주면서 경사계의 특성을 파악하기 위하여 Fig. 4와 같은 실험기구를 제작하여 횡동요(roll), 종동요(pitch), 선수동요(yaw) 및 전후동요(surge)를 포텐시오미터(potentionmeter)와 가속도계를 이용하여 계측하였다.

Fig. 5에는 x-축 중심의 급작스런 회전을 임의로 주며 그 때에 얻어지는 경사계의 출력값과 실제값을 비교하여 보였다. 전반적으로 실제 경사를 따라가고 있지만, 갑자기 경사가 변하는 순간에 경사계의 출력은 심한 과도응답(overshoot)과 진동(oscillation)을 동반함을 볼 수 있다. 이는 경사계의 순간적인 움직임이 경사계 내부의 자유수면을 급격히 흔들어 줌으로써 실제 경사와는 무관한 오류경사를 산출해내고 있음을 나타낸다. 따라서, 일반적으로 동적 경사거동의 정확한 계측을 위하여 수면의 진동성분 신호가 제거되어 보정될 수 있어야 한다.

계측되는 경사각에 직접적으로 영향을 미치는 원치 않는 수면 교란은 센서의 수평방향 가속도와 회전 각가속도의 갑작스런 변화와 수평방향의 일정한 값을 갖는 가속도에 의하여 발생한다. 수평방향의 일정한 가속도는 액체가 가속도의 반대방향으로 물리게 하는, 일종의 중력방향의 변화로 상수값의 수정을 요구하지만 가속도의 변화에 의하여 발생하는 수면의 진동은 물체 거동의 크기와 방향에 따른 초기 진폭과 위상차 그리고 후에 따르는 진동의 주기를 파악하여야만 보정이 가능하다. 본 연구에서는 결과로 나타나는 수면교란이 이러한 각각의 거

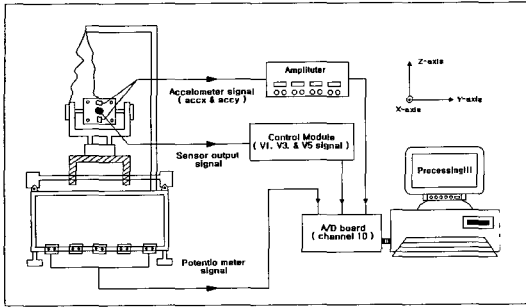


Fig. 4 Experimental setup. Accelerometers and potentionmeters are used to measure the accelerations and rotation angles.

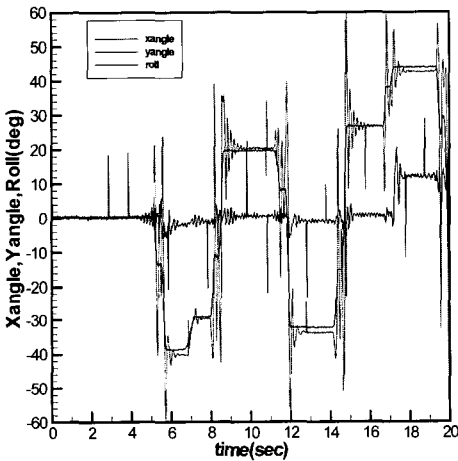


Fig. 5 Typical dynamic response of DX-045D to impulsive rotations about x-axis.

동에 대하여 선형적인 특성을 보인다고 가정하고각 거동 인자에 대한 진폭, 위상차 그리고 주기를 파악하고자 하였다.

전술한 경사각 수정성분들을 하나의 식으로 나타내면 아래와 같이 쓸 수 있는데, 이 θ_{comp} 을 센서 출력으로 구해진 각도값에서 빼줌으로써 보정된 실제 각도를 구할 수 있게 된다.

$$\theta_{comp}(t) = A e^{-at} \sin(2\pi ft + \delta) + \theta_{acc}$$

여기서 A , a , f 그리고 δ 는 각각 진폭, 감쇠 계수, 주파수 그리고 위상차이다. 끝의 θ_{acc} 는 일

정 가속도에 의해서 유발되는 경사 수정량이다.

우선, 신호의 진동특성을 파악하기 위하여 가두어진 수체의 고유수면거동을 선형포텐셜 유동을 가정한 이론 해석을 통하여 살펴 보았다. 반지름 a 인 원통형 용기내부의 수면거동을 정리하면 일반해는 아래의 식으로 표현되는데, 여기서 ϕ 는 속도포텐셜, k 는 파수 그리고 J_n 은 n 차의 Bessel 함수이다(Yih 1969).

$$\phi = A \cosh k(z+h) J_n(kr) e^{in\theta} e^{-i\omega t}$$

$$\zeta = a J_n(kr) e^{in\theta} e^{-i\omega t}$$

수면에서의 경계조건을 적용하면 분산조건이 다음과 같이 얻어지고

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \left(1 + \frac{\gamma}{\rho g} k^2 \right),$$

벽면에서의 경계조건을 적용하면 파수에 대한 방정식이 구해진다.

$$n J_n(ka) - ka J_{n+1}(ka) = 0, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

Fig. 6은 결과로 얻어진 수면의 고유형상을 보이고 있는데 그림의 우측 상부에 있는 1차 모드에서 (sloshing mode) 주기가 가장 짧고 그 값은 실험에 사용된 용기에 대하여 9.13Hz 이다.

위의 해석 결과를 실험에서 수면의 진동으로 예측되는 신호와 비교하여 Fig. 7에 보였다. 수평으로 놓인 계측기를 고무망치를 이용하여 순간적으로 회전시키고 그 때 나타나는 진동신호의 주기를 회전각도의 함수로 정리하였다. 센서의 경사로 인한 수선면적의 형상이 축대칭에서 벗어나는 효과는 유효 수선면적의 증가로 처리하여 해석하고 비교 하였다. 그림에 보이는 바와 같이 계산된 주파수가 예측된 결과와 (6.5Hz-5.0Hz) 비교하여 크게 나타나고 있는데 이는 용기 내부 액체의 물성과 액체의 실제 깊이에 따라 달라질 수 있는 양이다; 표면장력과 수심이 작아지면 작아진다. 사실, 본 실험에서 사용되고 있는 전해액은 벤젠 계열의 액체로 추정되나 휘발성이 강하고 소량으로 그 내용을 정확

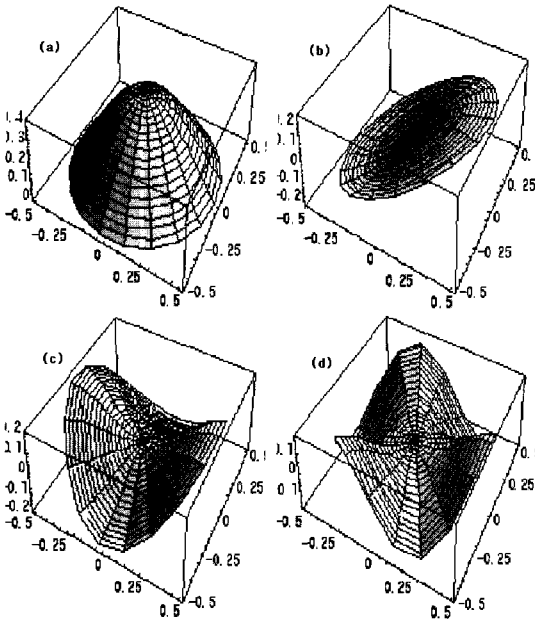


Fig. 6 Eigenmodes of the free surface motion at each mode. (a)0th, (b)1st, (c)2nd and (d)3rd mode and the radius is normalized.

하게 파악하지 못하고 있는 상황이다. 반면, 경사각 0°의 결과로 무차원화한 결과는 그 각도에 따른 주파수 변화 특성이 거의 일치하고 있음을 볼 수 있다. 결론적으로 신호의 진동특성은 정확한 용기의 형상과 전해액의 물성만 주어진다면 해석적으로 배제가 가능한 것으로 판단된다.

전술한 용기 내의 진동하는 수면 거동은 임펄스 형태의 가속도 변화가 주어지면서 발생한다. 계측기의 운동과 신호를 엄밀히 관찰한 결과, 가속도가 부분적으로 0을 가로지르는 (zero-crossing) 순간을 파의 시점으로 볼 수 있음을 파악하였고, 발생하는 파의 크기는 스파이크(spike) 형태의 가속도의 적분(acceleration impulse, velocity maximum)이나 가속도의 최대값 자체를 인자로 하여 결정된다고 보는 것이 합리적이라고 판단하였다. 이러한 바탕에서, x-축방향 혹은 y-축방향으로 짧은 이동거리를 고무망치를 이용하여 충격적으로 움직이게 하고 그 때에 직진임펄스(최대속도, 가속도 적분값, cm/s)에 대한 수면파의 진폭을 구하여 하나의 그

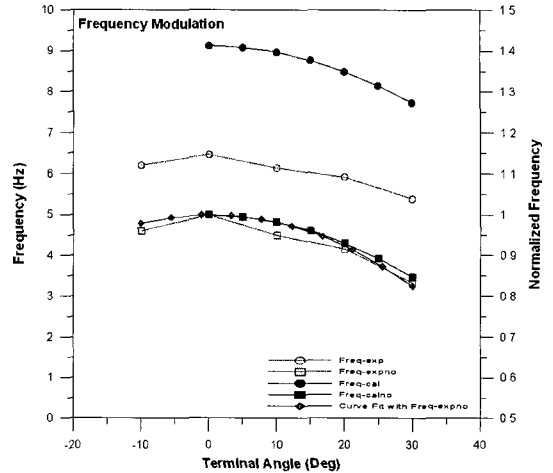


Fig. 7 Calculated & measured natural frequencies at various terminal tilt angle. Circles are the frequencies and squares are their normalized values by zero terminal angle values. Empty symbols are from experiment and filled symbols are for calculation. Diamonds are for the fitted curve.

림으로 정리한 것이 Fig.8이다. 그림에서 보듯이 진폭과 직진임펄스간에 선형의 관계가 있음을 확인할 수 있다.

발생하는 수면파가 파정으로 시작하는지 혹은 파저로 시작하는지를 위상차로 (δ) 정리하면, 가속도 형상을 정현파(sine wave)의 형태를 기본으로 할 경우 아래의 Table 1과 같다.

가속도의 변화로 발생된 수면파는 1~2초간의 진동후 지수적으로 소멸한다. 이 진동의 감쇠율은 용기의 형상에, 즉 초기의 경사에 어느 정도 영향을 받을 수 있으나 기본적으로 용기 내부의 작동유체의 점성과 생성파의 주파수에 밀접한 관련이 있다. 실험을 통하여 파악된 감쇠율은 평균적으로 -5.0 (1/sec)이었다.

마지막으로, 일정한 가속도가 수평방향으로 주어질 경우 수면의 경사(θ_{acc})는 센서의 경사와 무관하고 수평가속도 정보가 있을 경우에 한해서 아래와 같이 보정이 가능하다(Robertson and Crowe 1997).

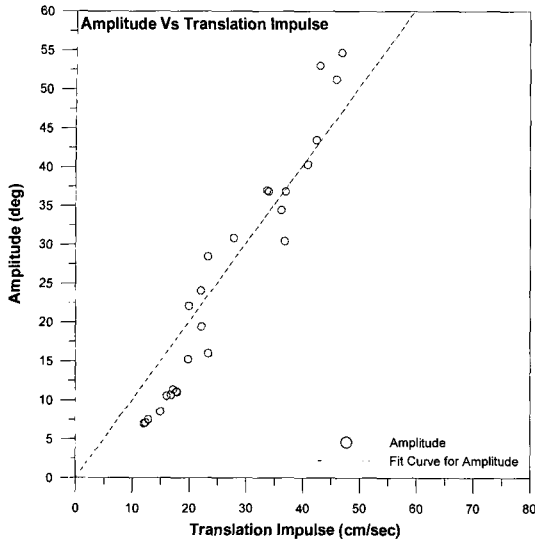


Fig. 8 Response amplitude for translational motion

Table 1 Phase lags for each motion

Acc. in	Slope Measured in	Phase Lag
Roll	Roll	π
Pitch	Pitch	π
Surge	Pitch	π
Sway	Roll	0

$\theta_{acc}^{pitch} = -\arctan(a_x/g)$; $\theta_{acc}^{roll} = \arctan(a_y/g)$
 여기서 a_x 및 a_y 는 각각 x와 y방향 수평가속도이고 g 는 중력가속도이다.

5. 적용한계 및 고찰

이상의 다양한 실험적 이론적 해석을 토대로 본 액체경사계의 활용한계를 정리해 본다. 우선 느린 경사거동의 경우 $\pm 60^\circ$ 까지 경사에 대해 2~3%의 정확도로 계측이 가능한 것으로 판단된다. 그 이상의 각도에서 활용이 가능하려면 용기의 형상과 도선배치 및 신호처리를 종합적으로 고려하는 연구가 필요하다.

준정상상태의 느린 가속도 변화가 주어질 경우 정상상태의 계측한계에 해당하는 $6m/s^2$ 까지의 가속도가 안정적으로 허용되고 $15m/s^2$ 까지 확장이 가능하다. 비정상 거동의 경우 직선운동은 임펄스로 $0.6m/s$ 까지, 회전운동의 경우 임펄스로 $170deg/s$, 각가속도로 $3700deg/s^2$ 까지 적용이 가능할 것으로 판단된다. 위의 값들은 초기나 최종 경사각도가 0에 가까운 경우, 혹은 비교적 작은 경우에 적용이 가능하다고 말할 수 있고 각종 운동이 동시에 일어날 경우 각 요소에 기인한 수면의 경사가 정상상태의 허용계측각도 $\pm 60^\circ$ 를 넘지 않아야 하는 한계를 가진다. 이를 간략히 식으로 정리하면:

$$|\theta_{pitch} - \tan^{-1}(\frac{a_x}{g}) - 0.32898 \times I_{pitch} - 0.016103 \times I_x| < 60 \text{ (deg)}$$

$$|\theta_{roll} + \tan^{-1}(\frac{a_y}{g}) - 0.32898 \times I_{roll} + 0.016103 \times I_y| < 60 \text{ (deg)}$$

여기서 θ_{pitch} 와 θ_{roll} 은 센서의 경사각도이고 I 는 임펄스이다.

6. 결론

본 연구는 AOSI사의 DX-045D 경사센서를 대상으로 실험 및 해석을 수행하여 장치의 동특성을 파악한 후, 센서의 출력을 실제 경사각도로 변환해 줄 수 있는 보정 모델을 도출하는 것을 목적으로 하였다. 상용화된 센서를 대상으로 하였지만 본 연구의 결과는 일반적인 전해액을 사용하는 센서에 확장될 수 있고 추후 구체화된 목적에 부합되는 자체 센서의 개발에 필수적인 정보를 제공하고 있다.

우선, DX-045D 센서의 각도 계측 알고리즘을 분석하고 필요한 계인함수(gain function)를 적용 가능 각도구간을 구분하여 고차의 근사 다항식으로 정리하고, $\pm 60^\circ$ 의 경사 영역에서 구해진 계인함수가 신뢰도 있는 결과를 줄을 확인하였다.

또한, 자유수면 효과로 인한 불필요한 오류경사를 보정하기위하여, 보정경사를

$\theta_{comp}(t) = A e^{-at} \sin(2\pi ft + \delta) + \theta_{acc}$ 와 같이 제안하고 진폭(A), 감쇠율(a), 주파수(f), 위상차(δ) 그리고 일정한 가속도 영향(θ_{acc})을 센서 거동 종류에 따라 체계적으로 정리하였다.

본 연구의 대상 센서의 활용한계는 모든 운동이 고려된 경우의 수면 경사가 센서의 바닥을 기준으로 $\pm 60^\circ$ 이내일 경우 2~3%의 정확도로 경사계측이 가능한 것으로 판단되고 본 연구에서 제안한 게인함수를 사용할 경우 처리된 V5값이 ± 0.8 을 넘지 않는 범위까지 확장이 가능한 것으로 보인다. 그 이상의 각도에서 활용이 가능하려면 추후 용기의 형상과 도선배치 및 신호처리를 종합적으로 고려하는 새로운 형태의 센서개발이 필요하다.

후 기

이 연구는 한국과학재단의 첨단조선공학연구센터의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

- Advanced Orientation System, 2000, EZ-TILT-2000 Software Application Note. AOSI.
- Doebelin, E.O., 1990, Measurement systems, 4th Ed., McGraw-Hill.
- Roberson, J. and Crowe, C., 1997, Engineering Fluid Mechanics, Wiley.
- Yih, C., 1969, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill.



< 송 무 석 >



< 안 자 일 >