

인체 머리부 6 자유도 운동 측정의 신뢰성 향상을 위한 가속도계 감도축의 오프셋(offset) 추정

Estimation of Sensitivity Axis Offset of an Accelerometer for Accurate Measurement of the 6 DOF Human Head Motion

이 정 훈† · 김 광 준** · 장 한 기***

Jeung-Hoon Lee, Kwang-Joon Kim and Han-Kee Jang

(2007년 11월 6일 접수 ; 2008년 9월 8일 심사완료)

Key Words : Human Head Motion(인체 머리부 운동), Translational Accelerometer(병진 가속도계), Sensitivity Axis(감도축), Offset(오프셋)

ABSTRACT

Motion sickness is well known to be caused by long time exposure to the very low frequency motion in the multiple axes of human body. Since the vestibular system for the perception of low frequency motion is located in the head, accurate measurement of 6 degree of freedom head motion is of great importance. In this study, the measurement system consisting of a safety helmet and 9 translational accelerometers was constructed for the estimation of 3 translational and 3 rotational motions of human head. Since estimation errors of 3 rotational components can be significantly magnified even by small offset of the sensitivity axis from the geometric center of an accelerometer, accurate measurement of sensitivity axis must be preceded. The method for accurate estimation of the offset was proposed, and the effect of offset on the estimation of angular acceleration was investigated.

1. 서 론

인체 진동과 관련된 연구 분야 중에서, 멀미 현상(motion sickness)은 머리부의 거동과 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 멀미 현상은 1 Hz 미만의 저주파수 운동 환경에 장시간 노출될 때 발생하며, 수직 방향뿐만 아니라 수평 방향 성분 및 회전 방향 성분 모두 영향을 미치는 것으로 알려져 있다^(1,2). 특히, 인체의 머리부에는 저주파수 거동을 인지할 수 있는 전정 기관 등의 감각 기관이 위치하고 있어서, 머리

부의 정확한 거동 측정은 멀미현상의 평가를 위해 매우 중요하다고 할 수 있다. 머리부의 거동은 저주파수 범위에서 강체로의 가정이 가능하며, 거동을 정확히 정의하기 위해서는 6 자유도 운동의 정확한 측정이 요구된다.

기존의 연구에서는, 가속도계를 설치한 바이트-바(bite-bar)를 피 실험자의 입에 물려, 6 자유도 운동을 측정하는 경우가 많았다^(2,3). 그러나, 바이트-바를 이용하여 장시간에 걸쳐 실험을 진행할 경우, 피 실험자의 입에 침이 피거나 얼굴 근육을 경직시키는 등 상당한 고통을 유발시키고 측정하고자 하는 거동 신호를 왜곡시킬 수 있다. 따라서, 이 연구에서는 롤러-블레이드(roller-blade)용 헬멧을 도입하여 그 표면에 다수의 가속도계를 부착하여 머리부의 6 자유도 운동을 측정하고자 하였다. 그러나, 헬멧을 이용

† 교신저자: 정희원, 삼성중공업 대덕선박연구센터
E-mail : jhope.lee@samsung.com
Tel : (042)865-4378

* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정희원, 두산인프라코어 예측설계기술팀

할 경우, 벨트에 의해 결정되는 머리부와의 체결성이 부족할 때 헬멧과 머리부 사이의 상대 운동이 발생할 수 있으며, 이와 같은 문제점은 머리부 6 자유도 운동 측정에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 상대 운동의 발생 가능성을 확인하기 위한 연구가 수행되었는데, 바이트-바와 헬멧을 동시에 이용한 머리부 운동의 측정 결과, 저주파수 영역에서는 헬멧과 머리부와의 상대 운동을 무시할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다⁽⁴⁾.

헬멧을 이용하여 머리부의 저주파수 거동을 측정하는 방법에는 문제가 없으나, 헬멧에 부착된 가속도계를 이용하여 회전 성분을 추출해 낼 경우 유의해야 할 사항이 있다. 많은 경우, 두 개 이상의 병진 가속도계를 이용하여 회전 성분(각가속도)을 추정하는데, 이때, 측정된 가속도 신호의 차이를 가속도계 사이의 거리로 나누는 절차를 거치게 된다. 따라서, 가속도계 내부 감도축의 위치(‘가속도계 내부 옵셋’이라 칭함)를 정확하게 알아야만 오차 없이 머리부의 회전 성분을 추정할 수 있게 된다⁽³⁾. 이 연구에서는, 가속도계 내부 옵셋을 정확히 파악함으로써, 헬멧을 이용한 머리부 6 자유도 추정 성분의 신뢰성을 높이고자 한다.

2. 머리부 6 자유도 운동 측정을 위한 기본 이론

ISO-8727:1997(E)에서는 인체 머리부의 운동 측정을 위한 좌표축을 Fig. 1과 같이 제시하고 있다⁽¹⁾.

즉, 머리 내부에 존재하는 원점 O의 x, y, z방향 운동을 3개의 병진 성분으로, 그리고 각 축에 대한 머리부의 회전을 3개의 회전 성분으로 정의하고 있다. 이때, 머리 내부에 원점 O가 존재하므로, 이

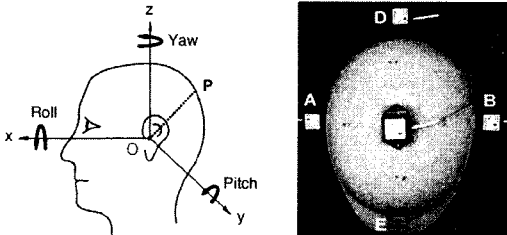


Fig. 1 Biodynamic coordinate system for human head defined by ISO-8727(left) and roller-blade helmet(right)

점에 가속도계를 직접 부착하여 운동을 측정하는 것은 현실적으로 불가능하다. 그러므로, 머리부 주변에 가속도계를 적절히 배치하여 머리부의 6 자유도 운동을 추정하게 된다. 서론에서 언급하였듯이, 이 연구가 멀미 현상과 관련한 연구에 응용되기 위해, 기존의 연구에서 많이 사용되던 바이트-바 대신, 롤러 블레이드용 헬멧을 이용하여 가속도계를 부착하고자 하였다.

가속도 측정량으로부터 머리부의 6 자유도 운동을 결정하는 과정은 다음과 같다. 머리 표면에서 임의의 한 점을 P라고 하면, P점의 가속도는 원점 O의 가속도와 머리부 각속도 및 각가속도를 이용하여 식 (1)과 같이 정의된다⁽⁵⁾.

$$a_p = a_o + \omega \times (\omega \times R) + \alpha \times R \quad (1)$$

a_p 와 a_o 는 각각 P점과 O점의 가속도 벡터를 의미하며, ω 와 α 는 각각 머리부의 각속도 및 각가속도 벡터를 의미한다. 그리고, R 은 O점에서 P점까지의 거리 벡터를 의미한다. 식 (1)에서 보듯이, 벡터로 표시된 이 식을 전개하면 원점 O의 가속도 3개와 머리부의 각가속도 3개 등 적어도 6개 이상의 미지수가 포함되어 있음을 알 수 있다. 따라서, 각속도의 곱의 형태로 나타나 있는 우측 두 번째 항(2차 가속도 항)을 고려하지 않더라도, 머리부의 6 자유도 운동을 묘사하기 위한 병진 가속도계는 최소한 6개임을 알 수 있으며, 측정의 정확성을 높이기 위해 2차 가속도 항을 고려할 경우는 최대 12개의 가속도계가 필요하다.

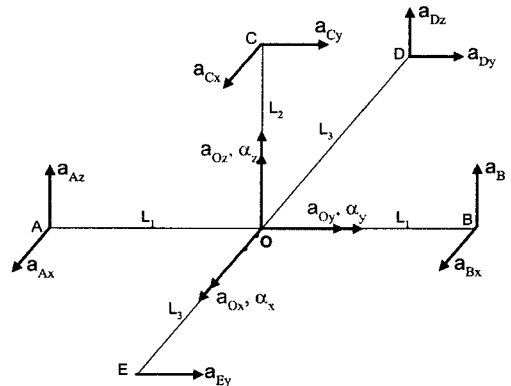


Fig. 2 Arrangements of 9 translational accelerometers on the helmet

그러나, Fig. 2에서처럼, 헬멧의 대칭성을 고려한 가속도계의 배치를 이용하면, 필요한 가속도계의 개수는 9개까지 줄일 수 있다⁽⁴⁾. 이와 같은 9개 병진 가속도계의 배치로부터, 머리부 6 자유도 운동 추정식을 유도하면 다음과 같으며,

$$\begin{aligned}
 a_{Ox} &= \frac{a_{Ax} + a_{Bx}}{2} \\
 a_{Oy} &= \frac{L_3(a_{Ax} - a_{Bx}) + 2L_1a_{Dy}}{2L_1} + 2L_3\omega_x\omega_y \\
 a_{Oz} &= \frac{a_{Az} + a_{Bz}}{2} \\
 \alpha_x &= \frac{a_{Bz} - a_{Az}}{2L_1} - \omega_y\omega_z \\
 \alpha_y &= \frac{2a_{Dz} - a_{Az} - a_{Bz}}{2L_3} + \omega_x\omega_z \\
 \alpha_z &= \frac{a_{Ax} - a_{Bx}}{2L_1} + \omega_x\omega_y
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_x &= \frac{a_{Bz} - a_{Az}}{2L_1} - \omega_y\omega_z \\
 \alpha_y &= \frac{2a_{Dz} - a_{Az} - a_{Bz}}{2L_3} + \omega_x\omega_z \\
 \alpha_z &= \frac{a_{Ax} - a_{Bx}}{2L_1} + \omega_x\omega_y
 \end{aligned} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)의 2차 가속도 항은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}
 \omega_y\omega_z &= \frac{1}{4} \left(\frac{2a_{Cy} - a_{Dy} - a_{Ey}}{L_2} + \frac{a_{Bz} - a_{Az}}{L_1} \right) \\
 \omega_z\omega_x &= \frac{1}{4} \left(\frac{a_{Az} + a_{Bz} - 2a_{Dz}}{L_3} + \frac{2a_{Cx} - a_{Ax} - a_{Bx}}{L_2} \right) \\
 \omega_x\omega_y &= \frac{1}{4} \left(\frac{a_{Bx} - a_{Ax}}{L_1} + \frac{a_{Ey} - a_{Dy}}{L_3} \right)
 \end{aligned} \quad (4)$$

3. 가속도계 내부 오프셋(offset)의 추정법

머리부 각가속도 추정식(식 (3))을, 가속도계 사이의 거리(L_i , 가속도계 감도축 사이의 거리)에 대하여 1차 테일러 급수 전개(Taylor series expansion of first order)를 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \Delta\alpha_j &= \sum_{i=1}^3 \frac{\partial\alpha_j}{\partial L_i} \Delta L_i \quad (j = x, y, z \quad i = 1, 2, 3) \\
 &= \sum_{i=1}^3 \frac{R_i}{L_i^2} \Delta L_i
 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, R_i 는 가속도 측정치의 조합을 의미한다. 식 (3)과 식 (5)에서 볼 수 있듯이, 머리부 각가속도 추정시, 측정된 가속도 신호의 차를 가속도계 사이의 거리(L_i)로 나누는 절차를 거치기 때문에, 가속도계 사이 거리에 오차(ΔL_i)가 포함되면 머리부 각가속도 추정 결과에 포함된 오차($\Delta\alpha$)는 $1/L_i^2$ 에 비례하는 값으로 결정된다. 따라서, 각가속도 추정치의 신뢰를 위해 L_i 의 정확한 측정이 매우 중요한 요소가 됨을 주지할 필요가 있으며, 아울러 가속도계 내부의 감도축 위치를 결정하는 것이 매우 필요하다고 볼 수 있다.

보통 가속도계의 감도축은 그것의 기하학적 중심에 위치하는 것으로 간주하는 것이 일반적이지만, 3축 가속도계의 경우에는 세 감도축이 모두 기하학적 중심에 위치한다고 단정하기에는 무리가 따른다(Fig. 3). 이 연구에서는, 헬멧에 부착하기 위한 가속도계(Crossbow CXL04LP3)의 감도축이 기하학적 중심으로부터 얼마나 떨어져 있는지, 즉, 내부 오프셋의 정

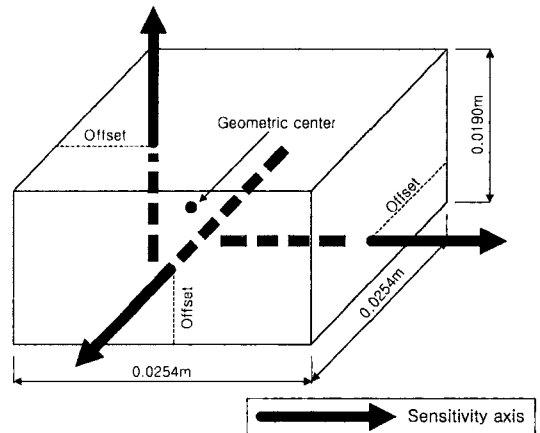


Fig. 3 Sensitivity axes of 3-axis accelerometer which has an finite offset length

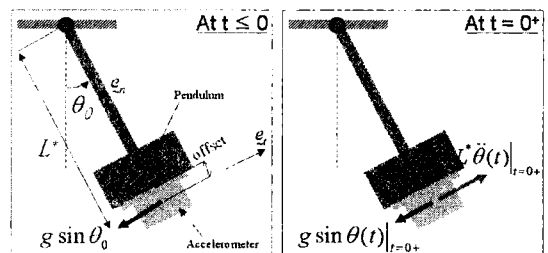


Fig. 4 Accelerometer on simple pendulum

량적인 크기를 추정하고자 한다.

가속도계 감도축의 내부 옵셋을 추정하기 위하여, 이 연구에서는 대상 가속도계의 특성을 이용하였다. 이 가속도계는 DC(0 Hz)부터 측정이 가능하므로 정적인 힘, 예를 들어, 중력에 대해서도 반응을 하게 된다. 이 가속도계를 Fig. 4와 같이 일정한 각도(θ_0) 만큼 기울어져 있는 단진자에 위치시킨 후 정적인 상태($t \leq 0$)를 유지시키면, 접선 방향의 감도축으로부터는 $-g \sin \theta_0$ 의 중력 가속도가 출력된다.

$$a_t(t)|_{t \leq 0} = -g \sin \theta_0 \quad (6)$$

이 상태에서, 단진자의 자유진동이 시작하려고 하는 순간($t=0+$), 접선 방향 감도축에는 $L^* \ddot{\theta}$ 만큼에 해당하는 회전에 의한 동적인 가속도가 작용하기 시작한다. 단, L^* 는 가속도계의 내부 옵셋이 포함된 단진자의 길이를 의미한다.

여기서, 단진자 운동 방정식 및 선형화된 운동 방정식의 해, $\theta(t)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \ddot{\theta} + \omega^2 \sin \theta(t) &= 0, \quad \theta(0) = \theta_0 \\ \text{Linearize } \ddot{\theta} + \omega^2 \theta(t) &= 0 \\ \text{Solution } \theta(t) &= \theta_0 \cos \omega t \end{aligned} \quad (7)$$

따라서, $t > 0$ 에서 접선 방향의 감도축으로부터 출력되는 가속도는 식 (8)과 같이 쓸 수 있으며,

$$a_t(t) = -L^* \theta_0 \omega^2 \cos \omega t - g \sin \theta(t) \quad (8)$$

$t=0+$ 에서는,

$$a_t(t)|_{t=0+} = \lim_{t \rightarrow 0} a_t(t) = -L^* \theta_0 \omega^2 - g \sin \theta_0 \quad (9)$$

와 같다. 그러므로, 식 (6)과 식 (9)로부터,

$$a_t(t)|_{t=0+} - a_t(t)|_{t \leq 0} = -L^* \theta_0 \omega^2 \equiv \Delta \quad (10)$$

의 관계를 얻을 수 있다. 다시 말해, $t=0+$ 와 $t \leq 0$ 에서의 접선 방향 가속도 신호 차이를 구하면, 다음과 같은 식을 통하여 L^* 의 추정이 가능하다.

$$L^* = -\frac{\Delta}{\theta_0 \omega^2} \quad (11)$$

한편, $t > 0$ 에서 $a_t(t)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} a_t(t) &= F(t) + G(t) \\ \text{where,} \\ F(t) &= -L^* \theta_0 \omega^2 \cos \omega t, \quad G(t) = -g \sin(\theta_0 \cos \omega t) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, 우변 첫 항, $F(t)$ 의 시간에 대한 1차 및 2차 미분을 통하여, $F(t)$ 의 최소값 및 최대값을 가질 조건을 조사하면,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(F(t)) &= L^* \theta_0 \omega^3 \sin \omega t \xrightarrow{t=n\pi/\omega, (n=0,1,2,\dots)} 0 \\ \frac{d^2}{dt^2}(F(t)) &= L^* \theta_0 \omega^4 \cos \omega t \begin{cases} > 0 \text{ for } t = (2n)\pi/\omega \\ < 0 \text{ for } t = (2n+1)\pi/\omega \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

와 같으므로, $F(t)$ 는 $t = (2n)\pi/\omega$ 에서 최소값을, $t = (2n+1)\pi/\omega$ 에서 최대값을 가짐을 알 수 있다. 마찬가지로, $G(t)$ 의 시간에 대한 1차 및 2차 미분은,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(G(t)) &= g \theta_0 \omega \cos(\theta_0 \cos \omega t) \sin \omega t \\ \frac{d^2}{dt^2}(G(t)) &= g \theta_0^2 \omega^2 \sin(\theta_0 \cos \omega t) \sin^2 \omega t \\ &\quad + g \theta_0 \omega^2 \cos(\theta_0 \cos \omega t) \cos \omega t \end{aligned} \quad (14)$$

이므로, $0^\circ \leq \theta_0 < 90^\circ$ 의 범위에서, $G(t)$ 역시 $F(t)$ 와 마찬가지로 $t = (2n)\pi/\omega$ 에서 최소값을 가지며, $t = (2n+1)\pi/\omega$ 에서 최대값을 가짐을 확인할 수 있다. $G(t)$ 와 $F(t)$ 의 주파수는 모두 ω 이고, 서로 같은 시간에 최대 및 최소값을 가지므로, $G(t)$ 와 $F(t)$ 사이의 위상차가 없음을 알 수 있다. 따라서, $a_t(t)$ 의 최대값과 최소값의 차이(δ)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} a_t(t)|_{t=(2n+1)\pi/\omega} - a_t(t)|_{t=(2n)\pi/\omega} &\equiv \delta \\ &= 2L^* \theta_0 \omega^2 + 2g \sin \theta_0 \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)를 정리하면, L^* 을 추정할 수 있는 또 하나의 식을 얻을 수 있다.

$$L^* = \frac{\delta - 2g \sin \theta_0}{2\theta_0 \omega^2} \quad (16)$$

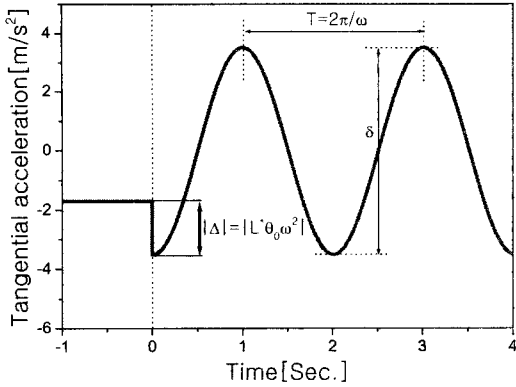


Fig. 5 Simulation of tangential acceleration of a simple pendulum which is freely vibrating from release

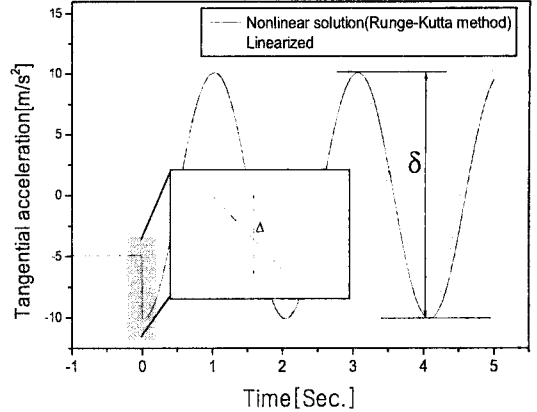


Fig. 6 Numerical simulation result(for $\theta_0=30^\circ$)

Fig. 5는 식 (6)과 식 (8)을 이용하여, 모사 실험($L^*=1.2\text{ m}$, $\omega=2\pi\times 0.497\text{ rad/s}$)을 수행한 결과를 나타낸다. $t\leq 0$, 즉, 정적인 상태에서 θ_0 를 측정하고, $t=0$ 과 $t=0+$ 에서 접선 방향의 가속도 차이의 크기(Δ)를 측정하거나, 또는 $t>0$ 에서 그것의 최대값과 최소값의 차이(δ)를 측정하면, 단진자의 주기로부터 결정되는 ω 를 식 (11)이나 식 (16)에 대입함으로써, 가속도계 내부 오프셋을 포함한 단진자의 길이 L^* 를 결정할 수 있다.

그러나, 식 (11)과 식 (16)은 단진자의 선형화된 운동방정식으로부터 얻은 결과이므로, 비선형성이 포함된 실험 결과와 잘 맞지 않을 우려가 있다. 선형화된 운동방정식의 사용 가능 여부는 초기 조건(특히, θ_0 의 크기)에 의해 결정되므로, 다양한 초기 조건에 대해, 식 (11)과 식 (16)의 타당성을 검증할 필요가 있다. 이를 위하여, $L_{True}^*=1.2\text{ m}$, $\omega=2\pi\times 0.497\text{ rad/s}$ 라 가정하고, θ_0 를 0.1° 에서 30° 까지 변화시켜 가며, 식 (7)의 비선형 미분 방정식을 Runge-Kutta의 방법을 통해 직접 풀어서, $\theta(t)$ 를 얻었다. 이것을, 접선 방향 비선형 가속도식(식 (17))에 대입하여,

$$a_t(t) = L_{True}^* \ddot{\theta}(t) - g \sin \theta(t) \quad (17)$$

$$\xrightarrow{\ddot{\theta}(t) = -\omega^2 \sin \theta(t)} -L_{True}^* \omega^2 \sin \theta(t) - g \sin \theta(t)$$

를 계산한 후, 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다.

그 후, Fig. 6에서 Δ 와 δ 를 읽어, 식 (11)과 식 (16)에 대입하여 L_{True}^* 를 추정하였는데, Fig. 7에 여러 초기 조건에 대한 추정 결과인 L_{Linear}^* 와 참값인 L_{True}^*

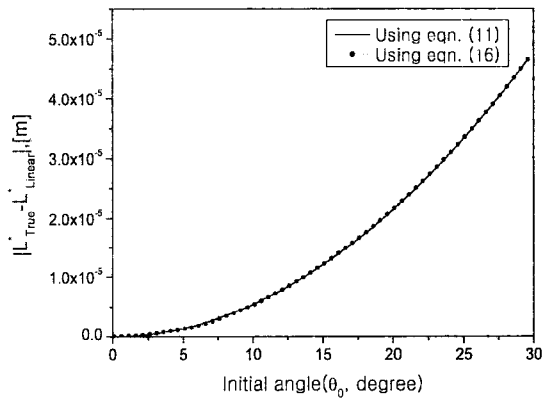


Fig. 7 Comparison of the estimation errors(= $L_{True}^* - L_{Linear}^*$) by the two methods

의 차이를 도시하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 고찰한 초기 조건 범위 내에서, 식 (11)과 식 (16)을 각각 이용한 L_{True}^* 의 추정 오차가 서로 매우 유사할 뿐만이 아니라, 초기 조건(각도)에 따라 오차의 크기가 증가하고는 있지만, 그 수준은 10^{-5} m 정도로서, $L_{True}^*(=1.2\text{ m})$ 에 비해 무시가 가능하다. 따라서, 초기 조건에 상관없이 식 (11)이나 식 (16)을 이용한 L^* 의 추정이 가능할 것으로 사료된다.

4. 단진자를 이용한 가속도계 내부 오프셋 추정 실험

Fig. 8은 단진자 실험을 위한, 실험 장치의 구성을 보여주고 있다. $t\leq 0$ 인 상태(정적인 상태)를 구현하

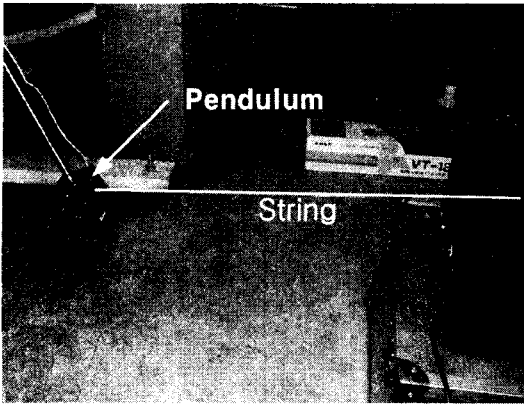


Fig. 8 Experimental setup of a simple pendulum: realization of the initial condition

기 위하여 단진자의 끝에 실(string)을 매달아, 그것을 일정 각도만큼 기울여 유지시켰으며, 그 후에 실을 끊어서 단진자의 자유 진동 조건을 구현하였다. 참고로, 이 실험에 사용된 단진자의 길이(가속도계 내부 옵셋 제외)는 1.2 m이다.

Fig. 9는 실험 결과 즉, 자유진동을 하고 있는 단진자에 부착된 가속도계의 접선 방향 감도축으로부터 출력되는 가속도 신호를 나타낸 그림이다. 참고로, 접선 방향 가속도 그래프의 양상이 모사 실험 결과(Fig. 5)에서의 그것과 반대인 이유는, 가속도계 감도축의 양의 방향이 접선 방향 단위 벡터의 방향과 반대이기 때문이다. Fig. 9에서, 신호를 획득하기 시작한 후인, 대략 $t=4.8(s)$ 에 실을 끊어 단진자를 자유진동 시켰다는 것을 알 수 있으며, $t=4.8(s)$ 이전의 전압 신호로부터 θ_0 를 얻을 수 있다. 또한 $t=4.8(s)$ 과 $t=4.84(s)$ 에서 접선 방향의 가속도 차이를 측정하면 Δ 를 얻을 수 있다. $t=4.8(s)$ 이후로는 가속도 신호의 변조(modulation) 현상이 생기는 것을 관찰할 수 있는데, 이 변조 현상의 반송 주파수는 12.7 Hz이며, 이는 단진자 계의 1차 모드가 나타나는 주파수이다. $t=4.8(s)$ 이후 가속도 신호를 푸리에 변환하면 ω 를 측정할 수 있으며, θ_0 와 Δ 를 식(11)에 대입하여 L^* 을 계산하면 1.208 m이 된다. 따라서, 단진자의 길이(1.2 m)를 고려하면 가속도계 내부 옵셋은 0.008 m임을 알 수 있다.

한편, $t=4.8(s)$ 이후의 접선 방향 가속도 신호에는 변조 현상이 생길 뿐만 아니라 감쇠로 인하여 신호의 진폭이 지속적으로 줄어들게 되므로, 접선 방

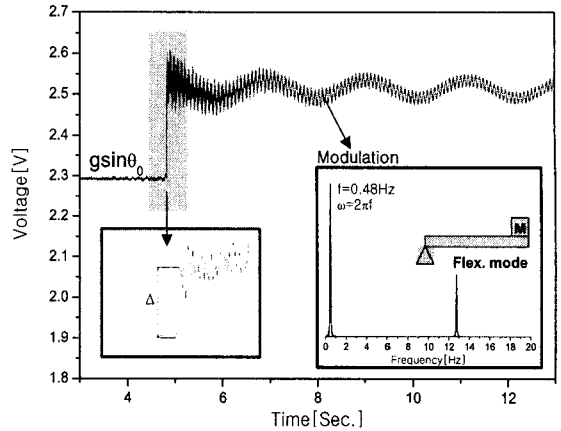


Fig. 9 Measured tangential acceleration in the simple pendulum

Table 1 Offset averages, L_i values & its error bound

	Distance from origin O to sensor,(1)	Offset average,(2)	L_i values,(1)+(2)	Error bound
L_1	10.50 cm	1.20 cm	11.70 cm	± 0.10 cm
L_2	9.59 cm	0.91 cm	10.50 cm	± 0.11 cm
L_3	13.58 cm	1.27 cm	14.85 cm	± 0.05 cm

향 가속도 신호의 최대값과 최소값의 차이인 δ 의 측정이 어려워 식(16)을 통한 L^* 의 추정은 어려운 것으로 판단된다. 결국, 식(11)과 식(16)은 L^* 을 추정하는데 있어서 이론적으로는 서로 차이가 없지만, 실험적인 측면에서 식(11)을 이용하는 것이 유용하다고 판단된다.

위의 과정을 헬멧 주위에 부착될 나머지 8개의 가속도계 감도축에 대해서 반복한 후, 그 결과를 헬멧 위의 가속도계 배치와 함께 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이, 가속도계 내의 감도축들은 그것의 기하학적 중심에 위치하지 않는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 식(2), (3), (4)에서 사용되는 가속도계 사이의 거리(L_i)의 적용 시, 가속도계의 내부 옵셋을 고려해 주어야 한다. 그러나, Fig. 10에 표시된 모든 옵셋을 고려하려면, 식(2), (3), (4)의 머리부 6 자유도 운동 추정식이 매우 복잡해질 뿐만 아니라, 헬멧의 대칭성을 이용하여 측정점의 수를 줄일 수 있는 장점(4)도 사라지게 된다. 이와 같은 단순화를 위해, 이 연구에서는 Table 1에 정리한

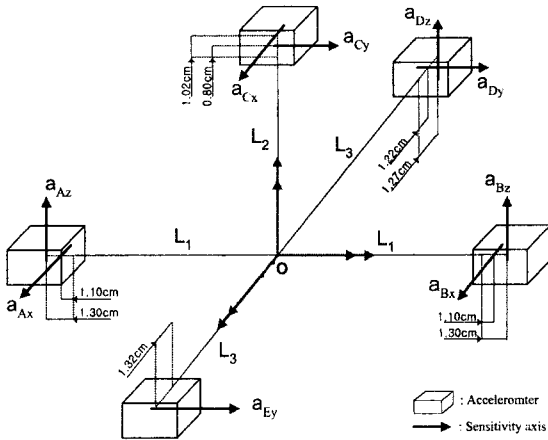


Fig. 10 Estimated offset lengths of the sensitivity axes

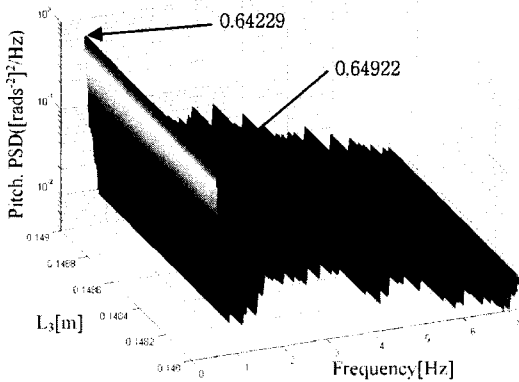


Fig. 11 Variation of the angular acceleration with L_3

바와 같이 측정된 오프셋을 평균한 후 이를 원점-센서 사이의 거리와 더하여 각 L_i 에 대한 대표치를 구하였으며, 측정 오프셋의 상-하한값을 오차범위로 설정하였다.

오차범위 내에서 각가속도 추정치의 변화를 관찰하기 위해, 실제 진동 환경(150톤급 선박)에서 머리부 6 자유도 운동 신호를 획득한 후, L_3 를 14.80~14.90 cm의 범위에서 변화시켜가며, 피치 방향 각가속도의 변화를 주파수 영역에서 관찰하고 Fig. 11에 도시하였다. 이 그림에서 볼 수 있듯이, 각가속도 추정치의 최대 변화폭은 대략 $0.00693 \text{ [rads}^{-2}\text{]}^2/\text{Hz}$ 정도로서, 최소값을 기준으로 1.07%의 비교적 무시할 수준의 변화 양상을 보인다. 만약, 오프셋을 고려하지 않고 각가속도를 계산하면, 오프셋을 포함한 경우보다

최대 15% 정도의 과대추정(over-estimation)이 된다. 따라서, 머리부 6자유도 운동, 특히 회전성분 추정에 있어서 가속도계 내부 오프셋에 대한 파악이 선행되어야 함을 강조할 수 있다.

5. 결론

저주파 대역에서 주로 발생하는 멀미 현상에 대한 평가 및 분석을 위해, 헬멧을 이용한 머리부 6 자유도 운동 측정 시스템이 기존에 제작되었다. 그러나, 병진 가속도계가 부착된 헬멧 시스템을 이용한 머리부 6 자유도 운동 추정에 있어서, 가속도계 내부의 감도축 위치를 정확히 알지 못할 경우, 가속도 사이의 거리(L_i)에 오차가 포함되고, 이로 인해 머리부 각가속도의 추정에 많은 오차가 포함될 수 있음을 관찰하였다.

이 연구에 사용된 가속도계가 DC부터 측정할 수 있음에 착안한 후, 단진자를 이용하여 가속도계 내부의 오프셋을 추정하고자 하였다. 오프셋 추정 실험을 통하여, 원점-가속도계 사이의 거리를 작은 오차 범위(최대 0.11 cm)에서 정할 수 있었기 때문에, 각가속도 추정의 변화 양상도 1%정도의 무시 가능한 수준으로 낮출 수 있었다. 아울러, 오프셋을 고려하지 않을 때 최대 15%정도 각가속도의 과대추정이 되는 것으로 미루어, 머리부의 회전운동 측정에 있어 가속도계 감도축 오프셋파악이 선행되어야 함을 강조하였다.

끝으로, 이 연구에서 제안하는 감도축의 오프셋 추정법이 멀미 현상과 관련된 저주파수 범위의 머리부 운동의 측정에 있어서 신뢰할 수 있는 측정치를 제공하리라 사료된다.

참고 문헌

- (1) ISO 2631-1:1997(E) "Mechanical Vibration and Shock - Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibration - Part 1: General Requirements".
- (2) Griffin, M. J., 1990, "Handbook of Human Vibration", Academic Press, London.
- (3) Cheung, W.-S., Choi, B.-J., Kwon, H.-S. and Eun, H.-J., 2001, "Head Vibration Measure-

ment Devices and Their Uncertainty Characteristics”, Inter-noise 2001, Hague : Holland.

(4) Lee, J.-H., Ko, H.-S., Kim, K.-J. and Jang, H.-K., 2003, “Measurement of 6 Degree of Freedom Movement of Human Head in Low Frequency Range”, 2003-01-1632, 2003 SAE

Noise & Vibration Conference & Exhibition, Traverse City, USA.

(5) Kane, T. R. and Levinson, D. A., 1985, “Dynamics : Theory and Applications”, McGraw-Hill Book Company.