

# 펄스파 자왜 센서를 이용한 고정밀 액위 센서 시스템의 실현에 관한 연구

## Implementation of High Accurate Level Sensor System using Pulse Wave Type Magnetostriction Sensor

최우진\* · 이준탁†  
(Woo-Jin Choi · John-Tark Lee)

**Abstract** - In this paper, we introduce the implementation of high accurate level sensor system using the pulse wave type magnetostriction sensor. When a current pulse flows along the waveguide, the magnetic field also propagates towards the end of waveguide. When this magnetic field just passes the position of the magnet for level detection, the resultant magnetic field by these two magnetic fields makes a torsional reflected signal. This is used to calculate the time difference between a interrogation pulse wave and this torsional reflected signal. The key elements and characteristics were investigated to implement level sensor system based on this principle. We introduce a method to calculate the speed of ultrasonic reflected signal and how to make a model of sensing coil. In particular, we experiment with the characteristics of the torsional reflected signal according to the changes of the interrogation voltage and displacement. To make high accurate level sensor system, two methods were compared. One is to use the comparator and time counter, the other is STFT(Short Time FFT) which is capable of the time-frequency analysis.

**Key Words** : Level, pulse, Sensor, Magnetostriction, STFT, Coil, Waveguide, TDC

### 1. 서 론

1842년 Joule의 법칙으로 유명한 영국의 James Prescott Joule은 긴 니켈봉에 감긴 코일에 전류를 흘릴 때 니켈봉의 길이가 변화되는 자왜 현상을 발견하였다. 이처럼 강자성체가 자화되면 외형이 약간 변형되는데, 이를 자왜 현상 또는 자기 Joule 효과라고도 한다. 이와는 반대로, 강자성체에 응력을 가할 때, 투자율이 변화하고 자화의 세기가 변화하는 역자왜 현상을 Villari 효과라 한다[1][2]. 또 다른 자왜 현상 중에는 본 논문에서 응용하고자 하는 Wiedemann 효과가 있다. 1820년 덴마크의 물리학자 Hans Oersted는 도선에 전류를 흘리면 오른손의 법칙에 따라 도선 주위에 자계가 형성됨을 발견하였다. 그리고, 독일의 Gustav Wiedemann은 1858년경, 전류가 흐르는 강자성체에 외부의 자계를 쇄교시키면, 전류에 의한 자계와 상호 작용을 하여 도선이 비틀리게 된다는 것을 발견하였다[1][3]. 오늘날은 고속의 신호를 제어, 계측할 수 있으므로 이러한 기술을 이용하면 응용 분야는 매우 넓어진다. 즉, 강자성체의 도파선에 전류를 발사하고, Wiedemann효과에 의한 도선의 뒤틀림을 측정할 수 있으므로 위치 센서로 응용되고 있다.

본 논문의 액위 측정에 있어서는 전류 펄스 신호가 도파

선을 통해 액위 검출 영구자석이 놓인 위치에 당도할 때, 외부 자장과 쇄교에 의해 큰 자기충격이 발생하고 이로 인해, 도파선 내에서는 초음파가 발생하고 길이가 변화되는 원리를 이용할 경우, 액위 검출 영구자석까지의 거리를 매우 정밀하게 측정할 수 있다. 정해진 도선의 길이를 알고 있고, 전기펄스의 발사 순간 그리고 전기신호의 전파 속도, 비틀림 반사 신호의 속도 등을 알 수 있기 때문에, 발사되는 전기신호와 반사되어 되돌아오는 비틀림 반사 신호 간의 시간을 측정하면, 스트레인 파가 발생하는 액위 검출 영구자석의 위치 지점을 정확하게 계산해 낼 수 있다. 이러한 자왜 효과 방식의 액위 센서 시스템은 정확한 위치 검출을 위한 연구와 관련이 있다. 도파선에 초음파 펄스를 직접 발사하는 방식은 비파괴 검사, 정밀 위치 센서 등에 널리 활용될 수 있으나, 발사된 초음파를 수신하기 위해 압전 세라믹을 이용하여 수신부를 제작해야 하는 등 구조적으로 복잡하며 발사부가 이동해야 하므로 액위 센서로는 다소 부적합하다[4]. 반면, 도파선에 전류 펄스를 발사하는 방식은 전기회로적으로 구성할 수 있어 구조적으로 간단하며, 이를 이용한 정밀 위치 센서, 액위 센서 시스템에 관한 다양한 응용 연구가 수행되고 있다[2][5][6]. 센싱 코일에서 얻어지는 반사 전압의 외부 노이즈 신호에 대한 영향을 줄이고 S/N비를 높이기 위한 연구, 자왜 현상에 대한 전자계 해석을 통한 동작 원리에 관한 연구 등이 수행되었다[7][8].

본 논문에서는 전류 펄스를 발사하는 방식의 액위 센서 시스템의 구현에 관하여 소개하고자 하며, 기존의 연구에서는 발사되는 전류 펄스파의 속도는 일반적으로 무시하고 수신되는 초음파 반사 신호의 속도만을 고려하는데 본 논문

\* Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University, Korea.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering,  
Dong-A University, Korea.

E-mail : jtlee@dau.ac.kr

Received : December 15, 2012; Accepted : January 25, 2013

서는 모델링을 통한 수학적 근거와 거리 증가에 따른 오차를 정량적으로 제시한다. 또한, 정확한 액위 검출을 위한 전류 펄스 신호의 생성법 및 도파선 내에서 발생된 비틀림 반사 신호를 검출하기 위한 검출 코일 회로의 설계법을 제시한다. 실험에서는 발사 전압의 크기에 따른 반사 전압의 크기 변화, 거리에 따른 반사 전압의 크기 및 주파수의 변화를 관찰하고, 마지막으로 비교기 및 시간 계수기를 이용하는 방식과 주파수 분석을 이용한 방식의 성능 비교를 통하여 주파수 분석을 이용한 고정밀 액위 측정 시스템의 실현 가능성을 제안하고자 한다.

## 2. 자왜 센서의 기본 원리

### 2.1 자왜 효과 센서에 의한 액위 검출 원리

그림 1은 자왜식 액위 센서 시스템을 나타낸 것으로 플로트의 위치를 측정하기 위하여 전류 펄스를 인가하는 펄스 발생기, 발사 펄스파를 안내하는 도파선, 도파선의 몸체부를 따라 슬라이딩하며 이동되는 액위 검출 영구자석, 액위 검출 영구자석부에서 발생하는 비틀림 파를 감지하여 전기 신호로 변환하는 센싱 코일부, 펄스 발생기에 의한 전류 펄스와 센싱 코일의 전기신호 사이의 지연 시간을 액위로 산출하는 시간 계수기로 구성되어 있다[2][4][8][9]. 전기 신호가 도선을 따라 이동하는 매우 짧은 주기의 펄스라면, 전기에 의하여 유도된 자계는 전류 펄스와 동일한 속도와 시간을 갖고 직각인 방향으로 도선 바깥을 이행하게 될 것이다. 그리고, 그림 1과 같이 액위 검출 영구자석을 도파선 가까이에 놓으면 전류 펄스에 의해 도파선 주위에 발생된 자계가 액위 검출 영구자석의 자계와 쇄교하는 순간, Wiedemann 효과라고 알려진 기계적인 비틀림의 스트레인 파가 발생하여 도파선 양방향으로 일정속도로 이행하게 된다[2][6][7][8][10]. 비틀림은 전류 펄스, 액위 검출 영구자석에 의해 제공되는 자계에 기인하는 도파선 주위 자계의 벡터합으로 나타난다. 이것이 도파선에 약한 기계적인 비틀림을 발생시킨다[2][8].

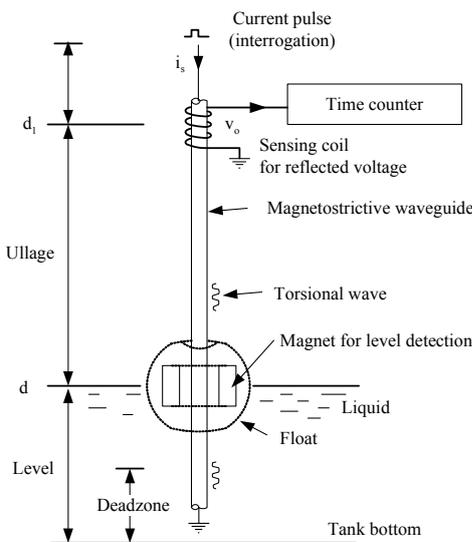


그림 1 자왜식 액위 센서  
Fig. 1 Magnetostrictive type level sensor

발사된 전류 펄스에 의한 자계  $\Phi_i$ 와 액위 검출 영구자석에 의한 자계  $\Phi_m$ 의 교차에 의해 자왜 도선에는 비틀림 파가 발생하며, 이 비틀림 자계의 자속 밀도  $B$ 는 다음과 같이 얻어진다[8]. 여기서,  $B_i$ 는 전류 펄스에 의해 발생한 자속 밀도이며,  $B_M$ 은  $B_i$ 의 최대 자속 밀도이다.  $\mu$ ,  $\mu_m$ ,  $\mu_M$ 은 도파선의 상대 투자율이다.

$$B_i = k_i B_M \quad (1)$$

$$B = \mu H = \mu \sqrt{(k_i B_M \mu_m)^2 + (B_M \mu_M)^2} / (\mu_M \mu_m) \quad (2)$$

$$\theta_B = \tan^{-1} \left( \frac{B_i}{B_m} \right) \quad (3)$$

다음 그림 2는 액위 센서 시스템의 제어 신호 블록도를 나타낸 것이며, 본 논문에서는 비틀림 반사 신호의 속도 계산 방법, 발사 회로 및 자계 센싱 코일 회로의 설계를 위주로 논의하고자 한다.

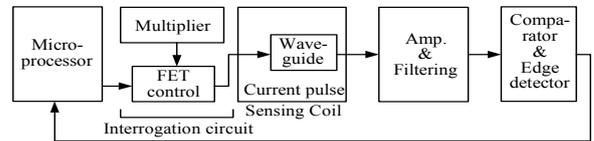


그림 2 시스템의 제어신호 블록도  
Fig. 2 System block diagram of control signal

### 2.2 비틀림 반사 신호의 속도 계측

발사된 전기 펄스 신호는 광속으로 도파선을 통과하게 되고, 액위 검출 영구자석의 위치에서 발생하는 비틀림 반사 신호는 초음속으로 도파선을 따라 전파된다. 이 비틀림 반사 신호의 속도는 기지의 위치  $d_R$ 에 대하여 다음과 같은 수식으로 계측할 수 있다.

$$d_R = c \times t_1 = v \times t_2 \quad (4)$$

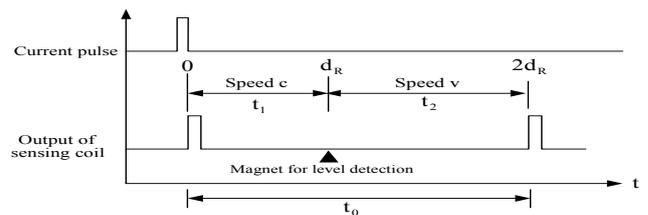


그림 3 전류 펄스 신호 및 센싱 코일부의 출력  
Fig. 3 Current pulse signal and sensing coil output

그리고, 광속과 비틀림 반사 신호의 속도가 상이하고 시간 또한 다르므로, 펄스의 발사로부터 반사되어 되돌아오기까지의 시간은  $t_0 = t_1 + t_2$ 이며, 왕복 거리는  $2d_R = c \times t_1 + v \times t_2$ 와 같이 쓸 수 있다.  $c$ 와  $d_R$  그리고  $t_0$ 는 기지의 값 또는 측정을 통하여 알 수 있는 값이므로, 다음의 식으로부터 비틀림 파의 전파속도  $v$ 를 구해낼 수 있다.

$$2d_R = d_R + vt_2 = d_R + v(t_0 - t_1) = d_R + v \left( t_0 - \frac{d_R}{c} \right) \quad (5)$$

$$d_R = v \left( t_0 - \frac{d_R}{c} \right) \quad (6)$$

$$v = \frac{d_R}{t_0 - \frac{d_R}{c}} \quad (7)$$

그리고, 임의의 측정에서의 액체의 액위(ullage)  $d$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$d = \frac{vt_0}{1+v/c} \quad (8)$$

여기에서, 광속  $c=3 \times 10^8 [m/s] \gg v$ 이므로,  $d=vt_0$ 로 근사될 수 있다. 일반적인 자왜 선형 위치 센서 연구에서는 근사화된 표현을 많이 이용하고 있다[6][8]. 예를 들어  $d=1[m]$ , 비틀림 반사 신호의 속도가  $v=2,820[m/s]$ 라고 하면 측정값  $d_M = vt_0$ 로 근사화 하여 계산한 경우,  $t_0$ 는  $354.609[\mu s]$ 로 된다. 이때, 광속으로 인한 오차  $d_c$ 는 식(9)와 같이  $1[m]$ 당  $9.4[\mu m]$ 가 발생한다.

$$d_M = v \times t_0 = d + d_c \quad (9)$$

본 논문에서는  $1[m]$  측정 범위의  $1[mm]$ 급의 정밀도로 액위 센서 시스템을 구현하고자 하므로 광속에 따른 오차는 무시할 수 있다. 하지만, 도파선의 길이에 따른 음파 속도의 변동은 비선형성의 주요한 원인 중의 하나가 될 수 있다[2]. 따라서, 식(7)을 이용하여 기지의 위치에 기준 영구 자석을 추가로 배치한다면, 액위 센서 시스템의 측정 길이의 변화 또는 도파선 재료의 차이 등에 의한 비틀림 파의 속도의 오차를 자동 보정할 수 있으며, 광속에 따른 오차  $v(d_R/c)$ 도 보정할 수 있다.

### 2.3 액위 센서 시스템의 발사 회로

다음의 그림 4는 본 연구에서의 전류 펄스 발사 회로로서, 배압(multiplier) 회로는 높은 DC 전압을 발생시키기 위해 Cockcroft 배압 회로로 구현할 수 있다. 배압 회로의 출력에 대해  $I_C$ 가 일정하도록 트랜지스터를 이용한 전류 레귤레이터 회로를 채용함으로써 도파선으로 일정한 전류가 흐르도록 제한한다. 특히, 발사 회로 성능은 측정 거리를 확장하는 데 중요한 요소이다. 측정 거리가 길어지면 도파선의 임피던스는 증가하게 되고 발사 전류는 감소하게 된다. 발사 전류의 감소에 의해 센싱 코일에서 비틀림 반사 신호는 매우 작게 나타나므로 원하는 측정 거리를 확보하기 위해서는 도파선의 임피던스 증가에도 충분한 전류를 흘릴 수 있도록 발사 전압을 증가시킨 적절한 발사 회로의 설계가 필요하다[9]. 그림 5에 7배압의 발사 회로의 설계 예를 보였다.

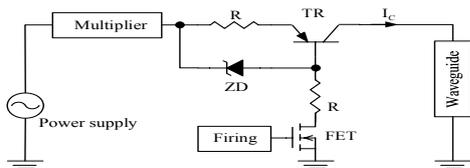


그림 4 전류 펄스 발사 회로  
Fig. 4 Interrogation circuit

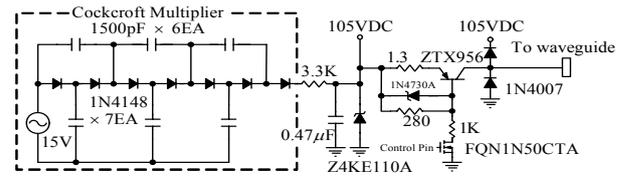


그림 5 배압기와 전류 펄스 발사 회로도  
Fig. 5 Voltage multiplier and interrogation circuit

### 2.4 펄스파 자왜 센서의 자계 센싱 코일

센싱 코일을 이용한 방식은 신호 검출을 위해 도파선에 직접 센서를 삽입하지 않아도 되는 잇점이 있다. 그림 6과 같은 센싱 코일에서는 페르테이의 전자 유도 법칙에 의해 전압이 유기된다[8].  $N$ 회 감긴 단면적  $A$ , 프레임의 길이  $l$ 인 코일 내를 자속이 관통할 때, 페르테이 전자 유도 법칙에 의해 발생하는 유도 기전력은 다음의 식(10)과 같다. 여기서 자속은  $\Phi_N = BA = N\phi$ 로 주어진다. 단,  $B$ 는 자속 밀도이다.  $\mu$ 를 비투자율,  $\phi$ 를 코일 1 권선 당의 자속,  $L$ 을 인덕턴스라고 하면, 자계 센싱 코일의 출력은 식(11)과 같다[11].

$$e(t) = - \frac{d\Phi_N}{dt} \quad (10)$$

$$e(t) \approx - \frac{N^2 \mu A}{l} \frac{di(t)}{dt} = -L \frac{di(t)}{dt} \quad (11)$$

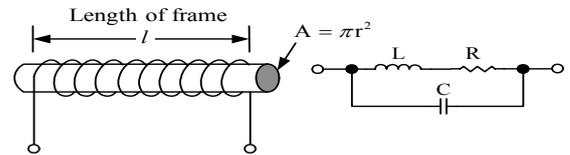


그림 6 센싱 코일의 모형과 등가회로  
Fig. 6 Scheme and equivalent circuit of sensing coil

이상의 식으로부터 알 수 있듯이, 비틀림 반사 신호의 검출을 위한 센싱 코일의 출력을 높이기 위해서는 코일의 권수를 많이 하고, 같은 권수라면 프레임의 길이가 작도록 해야 한다. 또, 투자율이 높은 코일을 사용해야 한다.

센싱 코일은 그림 6의 등가회로로 생각할 수 있다. 센싱 코일에서의 임피던스는 비틀림 반사 신호의 주파수에 따라서 변동되므로 감도를 높이기 위해 다음의 공진 주파수를 고려한 센싱 코일의 설계가 필요하다. 공진 주파수  $f$ 에서 전류는 다른 주파수에 비하여 최소값이 되고, 임피던스는 최대가 된다[9].

$$2\pi f = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{L}\right)^2} \quad [rad/sec] \quad (12)$$

본 논문의 센싱 코일 방식은 기존의 압전 소자나 강자성체 테이프를 이용하는 방식에 비하면 구성이 매우 간단하여 구현이 용이하지만, 낮은 감쇠, 낮은 온도 감도, 낮은 자왜 계수의 도파선으로 설계되어야 하므로 반사 전압의 진폭과 S/N비가 낮은 단점이 있다[2]. 따라서, 본 연구에서는 반사 전압의 낮은 진폭, 노이즈 환경에서도 원 신호를 정확히 찾

아낼 수 있는 시간-주파수 해석을 적용하여 이러한 문제를 해결하고자 한다.

### 3. 실험 및 고찰

액위 센서 시스템을 구성하는 주요 부분의 실험 환경에 대해 설명한다. 발사 회로는 발사 전압의 크기에 따른 영향을 확인하기 위하여 전원 15[V]에 대한 3배압 회로의 45[V], 7배압 회로의 105[V]를 각각 구성하였다. 앞서 그림 5에 7배압 회로를 이용한 발사 회로의 구체적인 설계 회로도도 나타내었다. 발사 펄스파의 방전 시간은 0.5[μs]이다.

다음으로 센싱 코일은  $N=850$ ,  $l=7$ [mm],  $r=4.5$ [mm]로 하였다. 인덕턴스는 식(11)을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다. 단,  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 이다.

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A}{l} \approx 8.3[\text{mH}] \quad (13)$$

다음의 표 1은 실험에서 사용한 도파선의 사양으로 철과 니켈이 주성분이며, 직경이 작으므로 자왜 효과에 의한 비틀림 반사 신호는 현저한 분산이나 감쇠없이 전달될 수 있다.

표 1 도파선의 사양

Table 1 Specification of waveguide

Parameter	Unit	Material, Value
Material	-	Ni-iron-chromium alloy
Length	mm	1200
Diameter of wire	mm	0.5
Modulus of elasticity, E	kN/mm <sup>2</sup>	176
Resistivity, ρ	μΩ · m	1.1

다음의 그림 7은 구현한 전자부 외형 사진으로, 마이크로 프로세서 ATXMEGA128를 사용하였다. 시스템 클럭은 주파수 체배를 통해 32[MHz]로 사용하여 거리 분해능을 1[mm] 미만으로 설계하였다. 전체 액위 센서 시스템의 테스트 환경을 그림에 함께 나타내었다. 실험은 전류 펄스 발사 후 비틀림 반사 신호의 수신까지 걸리는 왕복 시간의 측정하는 방식으로 수행하였다. 연구에서는 수신된 센싱 코일 전압 신호에 대하여 두 가지 신호 처리 방식을 적용해 보았다.

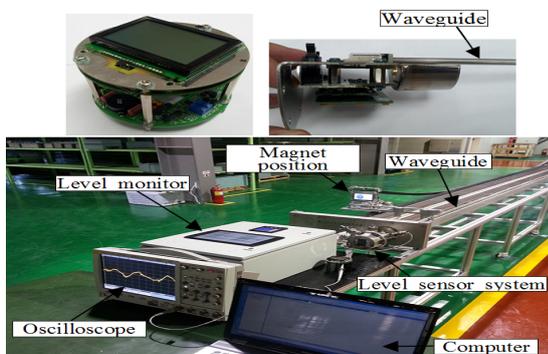


그림 7 액위 센서 시스템 및 테스트 환경  
Fig. 7 Level sensor and experimental test environment

첫째는 비교기와 시간 계수기를 이용한 방식으로 그림 8의 TDC(Time to Digital Conversion) 구간을 시간 계수기를 이용하여 계수한다. 둘째는 발사 전압 신호 및 반사 전압에 대한 FFT(Fast Fourier transform) 또는 STFT(Short Time FFT)를 수행하여 시간-주파수 해석을 이용한다.

#### 3.1 비교기와 시간 계수기를 이용한 방식

그림 8은 발사 회로의 출력 전압, 센싱 코일 전압의 FFT, 3배압 발사시 반사 전압, 7배압 발사시 반사 전압, 비교기 출력 파형, 예지 검출기 출력 파형을 각각 나타낸다. 특히, 비틀림 반사 신호의 최대치는 ullage 0.4[m]에 액위 검출 영구자석이 위치시켰을 때 두 경우 모두 175[μsec]에서 나타났으며, 7배압 회로의 경우가 비틀림 반사 신호의 크기에 있어서 3배압 회로의 경우보다 약 15% 증가하였다. 다음으로 ullage 변화에 비틀림 반사 신호의 주파수 변화를 살펴보았다. 우리는 발사 전압에 의한 신호는 제외하고, 비틀림 반사 신호에 대해서만 FFT를 수행하였으며, 최대 이득을 가지는 주파수는 그림 9와 같이 64[kHz]~65[kHz] 이내로 나타났다. 결과적으로 ullage 변화에 따른 주파수 변화는 거의 없었다. 다만 반사 전압의 크기는 ullage가 길어짐에 따라 작아지는 경향을 나타내었다. FFT는 Hanning 윈도우, 폭 200[kHz], 중심주파수 100[kHz], 스케일 20[dB]로 수행하였다.

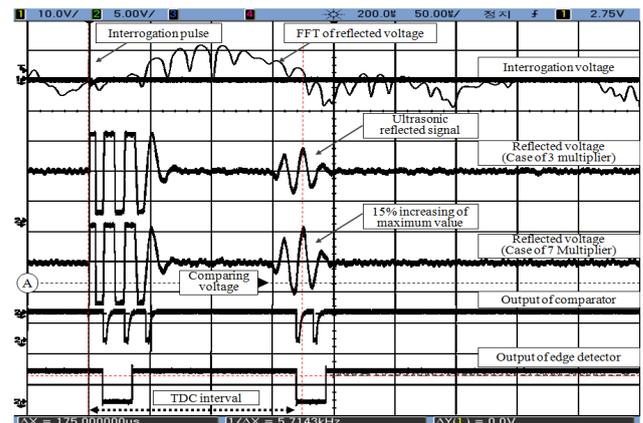


그림 9 발사 전압 강도에 따른 반사 전압과 TDC 구간의 신호들  
Fig. 9 Signals of reflected voltage and TDC interval according to strength of interrogation voltage

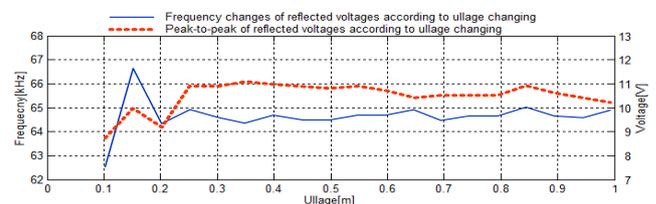


그림 9 Ullage 변화에 대한 주파수 및 Peak-to-Peak 전압 변화  
Fig. 9 Frequency and peak-to-peak voltage changes according to ullage changing

액위 계측을 위해 발사 펄스파와 비틀림 반사 신호 간의 시간을 측정하여야 한다. 그림 8에서의 TDC 구간  $t_0$ 를 측정하기 위해 시간 계수기를 사용하며, 계수 값  $n$ 은 다음의

식(14), 식(15)를 이용하여 액위 ullage를 구할 수 있다[9].

$$n = t_0 \cdot f_{cnt} = \frac{d}{v} \cdot f_{cnt} \quad (14)$$

$$d = \frac{v \cdot n}{f_{cnt}} \quad (15)$$

단,  $f_{cnt}$ 는 시간 계수기의 주파수,  $v$ 는 비틀림 반사 신호의 속도이다.

### 3.2 STFT(Short Time FFT)를 이용한 방식

시간-주파수 해석은 비정상(non-stationary) 특성을 신호 처리하기 위해 시간-주파수 평면으로 신호의 시간적인 스펙트라를 보는 것이다. Wigner-Ville Distribution, Short Time Fourier Transform, Continuous Wavelet Transform 등의 기초적인 방법들을 사용할 수 있는데, 여기에서는 STFT를 이용하고자 한다. 신호  $x(t)$ 에 대한 STFT 및 스펙트로그램은 다음의 식(16), 식(17)과 같이 정의된다.

$$STFT(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\omega^*(\tau-t)e^{-2j\pi f\tau}d\tau \quad (16)$$

$$S(t, f) = |STFT(t, f)|^2 = \left| \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)\omega^*(\tau-t)e^{-2j\pi f\tau}d\tau \right|^2 \quad (17)$$

단,  $t$ 는 시간,  $\omega$ 는 시간축을 따라 이동하는 신호의 국부적인 스펙트럼을 관찰하기 위한 윈도우 함수,  $\tau$ 는 지연시간, \*는 공액 복소수이다.

다음의 그림 10은 액위 검출 영구 자석이 0.4[m]에 위치한 경우의 반사 신호에 대한 STFT 수행 결과를 나타낸다. 스펙트로그램에서의 윈도우 함수는 Hanning 윈도우를 사용하였으며, 오버랩은 10%로 하였다. 그 결과, 175[ $\mu$ s]에서 수신 신호를 확인할 수 있다.

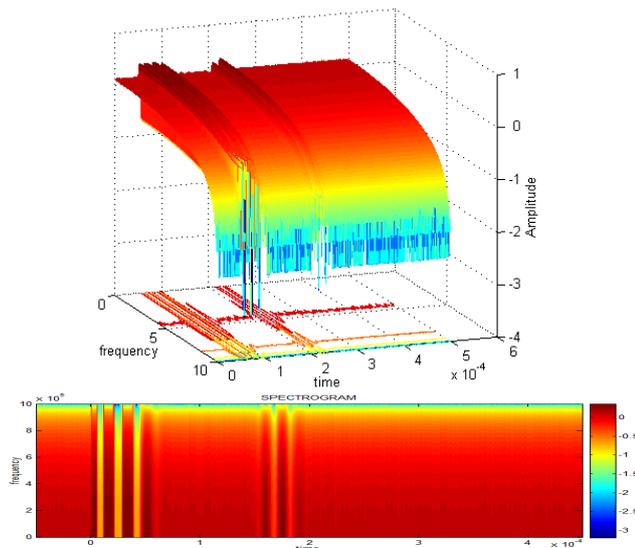


그림 10 수신 신호의 주파수 매쉬-그리드 및 스펙트로그램  
Fig. 10 Frequency mesh-grid and spectrogram of Sensing Signal

### 3.3 고찰

여기에서는 상기 두 가지 방식의 측정 정밀도를 상호 비교하고자 한다. 액위 검출 영구자석을 ullage 0.2~1.0[m]까지 0.2[m] 단위로 변화시켰을 때의 측정값으로 비교하였으며, 그림 11은 그 때의 센싱 코일의 전압값이다. 액위 검출 영구자석이 내장된 플로트의 이동에 따라 발사 전압과 비틀림 반사 신호 사이의 시간차가 비례적으로 증가하고 있다.

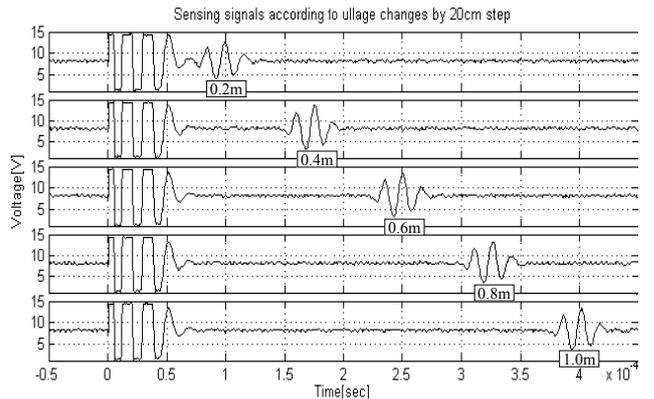


그림 11 Ullage 변화에 따른 센싱 코일 신호  
Fig. 11 Signals of sensing coil according to ullage changes

식(8)을 이용하면 기지의  $d$ 와 측정값  $t_0$ 로써 비틀림 반사 신호의 속도  $v$ 를 실험적으로 측정할 수 있다. 본 연구에서는 두 방식으로 얻어진 실험 결과를 표 2에 나타내었다. 측정된 시간에 대해 선형 보상을 하여 얻어진 거리에 대하여, 그 오차의 평균은 각각 1.2673[mm], 0.5298[mm]이며, 표준편차는 0.9302[mm], 0.6649[mm]로 나타났다. STFT를 이용한 방식이 오차 및 표준편차에서 다소 적은 값을 나타내어 정밀도가 높은 것으로 나왔는데, 이것은 비교기를 이용하는 방식의 경우에는 그림 8의 ㉠점과 같은 기준 전압값으로 비교하므로, 반사 신호의 약간의 기울기 변화에도 큰 오차로 이어질 수 있다. 즉, ullage가 변화하면 전압의 크기도 다소 변동하기 때문으로 판단된다.

표 2 Ullage 측정 결과

Table 2 Results of ullage measurement

기준항목	비교기와 시간 계수기를 이용한 측정 방식	STFT를 이용한 시간 측정 방식
ullage 거리 d[m]	TDC구간 측정시간 $t_0$ [ $\mu$ sec]	측정 시간 $t_0$ [ $\mu$ sec]
	보상후 거리 [mm]	보상후 거리 [mm]
0.2	92	99.5
0.4	168.6	175
0.6	244.3	250
0.8	320	326.5
1.0	395	401.5
오차평균	-	1.2673
표준편차	-	0.5298

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자왜 현상을 이용한 액위 센서 시스템의 구현에 관한 연구를 소개하였다. 발사되는 전류 펄스파의 속도를 고려한 액위 센서 시스템의 액위 검출의 원리와 거리 증가에 따른 광속의 오차를 정량적으로 제시하였다. 그리고, 핵심적인 구성 요소인 펄스파의 발사 회로 및 비틀림 반사 신호에 대한 검출 코일 회로의 설계 사례를 소개하였다. 특히, 본 연구에서는 다음의 사항을 알 수 있었다.

첫째, 발사 회로의 전압을 3배압 45[V] 대비 7배압 105[V]로 증가시키면 반사 전압의 최대치는 15% 증가하여 수신 감도를 올릴 수 있음을 확인하였다.

둘째, ullage를 크게 할수록 비틀림 반사 신호의 전압은 서서히 떨어졌으나, 중심주파수는 64[kHz]~65[kHz] 이내로 큰 변화는 없었다. 따라서, 시간-주파수 분석 기법을 이용하면 정밀한 위치 계측이 가능하며, 반사 신호의 감쇠 및 노이즈에도 강인한 센서 시스템을 구축할 수 있을 것으로 판단된다.

셋째, 정밀한 액위 계측을 위해 수신된 비틀림 반사 신호에 대한 시간-주파수 분석 기능이 있는 STFT(Short Time FFT) 기법을 적용함으로써 정밀도를 높이고자 하였으며, 이를 비교기 및 시간 계수기를 이용하는 방식과 성능 비교를 하였다.

구현된 시스템의 측정 오차평균은 0.5298[mm], 표준편차는 0.6649[mm]로 목표로 하고 있는 1[mm] 이내의 정밀도를 만족하였다. 향후, 측정오차의 주요 원인이 되는 발사 신호의 영향 및 수신 신호의 시간 축 상에서의 기준 선정에 관한 연구와 분해능 개선을 위한 평균 및 보상기법, 필터링 기법, 액위 검출 영구자석의 형상과 세기의 선정 등에 관한 추가적인 연구를 수행할 예정이다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부에서 시행한 광역경제권 선도 산업 육성사업의 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

[1] A. G. Olabi and A. Grunwald, "Design and application of magnetostrictive material", *Materials and Design*, Vol. 29, pp. 469-483, January 2007.

[2] David S. Nyce, "Linear Position Sensors: Theory and Application", John Wiley & Sons, Inc., 2004.

[3] Edward M. Purcell, "Electricity and Magnetism", McGraw-Hill, Inc., 1985.

[4] Fernando Seco, Jose Miguel Martin, and Antonio Ramon Jimenez, "Improving the Accuracy of Magnetostrictive Linear Position Sensors", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 58, No. 3, pp. 722-729, March 2009.

[5] Mei Yuan, Dongya Sun, Ke Sun, Jinghui Wu, Zhaoyang Wang, and Lei Shi, "Key Technology of

Magnetostrictive Fuel Sensor", *IEEE International Conference on Industrial Informatics*, pp. 1000-1005, August 2006.

[6] Yongjie Zhang, Weiwen Liu, Haibo Zhang, Jinfeng Yang, and Hui Zhao, "Design and Analysis of Differential Waveguide Structure to Improve Magnetostrictive Linear Position Sensors", *Sensors* 2011, 11, pp. 5508-5519, May 2011.

[7] Yongjie Zhang, Weiwen Liu, Jinfeng Yang, Chunfeng Lv, and Hui Zhao, "Design of Compensation Coils for EMI Suppression in Magnetostrictive Linear Position Sensors", *Sensors* 2012, 12, pp. 6395-6403, May 2012.

[8] Wang Zheng, Chang Xiaoming, and Hiroyuki Wakiwaka, "Study on Impulse Magnetic Field of Magnetostrictive Position Sensor", *Intelligent Systems and Applications(ISA)*, 2010 2nd International Workshop, Vol. II, pp. 933-936, May 2010.

[9] Woo-Jin Choi, Suk-Joon Ji, Kyung-Yup Kim, and John-Tark Lee, "The Implementation of Magnetostrictive Type Level Sensor System using Guided Pulse Wave", *SCIS-ISIS*, pp. 2206-2209, November 2012.

[10] Chang Xiaoming, Wang Zheng, and Hiroyuki Wakiwaka, "The Study on the Fixed End Wave in Magnetostrictive Position Sensor", *Intelligent Systems and Application(ISA)*, 2010 2nd International Workshop, Vol. I, pp. 81-84, May 2010.

[11] Marc T. Thompson, "Inductance Calculation Techniques", *Power Control and Intelligent Motion*, Vol. 25, No. 12, pp. 40-45, December 1999.

#### 저 자 소 개



#### 최 우 진 (崔 宇 進)

1994년 동아대학교 전기공학과(공학사), 1996년 동아대학교 전기공학과(공학석사), 2004년 동아대학교 전기공학과(박사 수료), 현재 : 한라IMS(주) 기술연구소장



#### 이 준 탁 (李 浚 柝)

1979년 동아대학교 전기공학과(공학사), 1981년 동아대학교 전기공학과(공학석사), 1988년 중앙대학교 전기공학과(공학박사), 1997년 - 1998년 Tsukuba University 객원교수, 현재 : 동아대학교 전기공학과 교수