

2 차 스마트 센서의 센싱능력 평가기법 개발

황성연* (전북대 정밀기계대학원), 홍동표** (전북대 기계항공시스템공학부, 교수, 공업기술연구소)
 강희용** (전북대 기계항공시스템공학부), 박준홍*** (전북대 정밀기계대학원)

Development of Estimation Method of Sensing Ability of 2nd Smart Sensor

S. Y. Hwang (Precise Mechanical Eng. Graduate school. CBNU), D. P. Hong (Mechanical Eng. Faculty. CBNU)
 H. Y. Kang (Mechanical Eng. Faculty. CBNU) J. H. Park (Precise Mechanical Eng. Graduate school. CBNU)

ABSTRACT

This paper deals with sensing ability of 2nd smart sensor that has a sensing ability of distinguish materials. We have developed new signal processing method that have distinguish different materials. We made the 2nd smart sensor for experiment. The second type of smart sensor is HH type. We have developed a new signal processing method that can distinguish among different materials. The estimation method (R_{SAI} Index) is developed for 2nd smart sensor (HH smart sensor). Experiment and analysis are executed for estimation the new method. We estimated sensing ability of 2nd smart sensor with R_{SAI} method. Sensing Ability of the 2nd smart sensor were evaluated relatively through a new R_{SAI} method. According to frequency changing, influences of the 2nd smart sensor are evaluated through a new recognition index R_{SAI} . Applications of this method are for finding abnormal conditions of objects (auto-manufacturing), feeling of objects (medical product), robotics, safety diagnosis of structure, etc.

Key Words : 2nd Smart Sensor(2 차 스마트 센서), Sensing Ability Index(센싱능력지수), Auto-Correlation Function(자기 상관함수), Weighting Function(가중함수), R_{SAI} Index(인식지수)

1. 서론

현대는 공장이나 산업현장뿐만 아니라 의료분야, 통신분야 등 스마트센서를 이용하는 분야가 넓어져 일반인들의 생활 가까이에 서도 많이 볼 수 있다. 이에 따라 스마트 센서의 형상 및 재료, 그리고 신호 처리 방법도 다양하게 연구되어지고 있고, 스마트센서의 성능 향상 또한 중요한 연구 과제가 되고 있다. 본 연구에서는 지적센서의 재료로는 PVDF(polyvinylidene fluoride) 필름과 초탄성재료를 선택하였다. PVDF 필름은 최근 개발된 압전 소재로서 박막의 공학용 필름이다. 이는 그 가공이 다른 센서소재에 비해 매우 간단하고 가벼울 뿐만 아니라 사용 주파수 영역과 동적 범위가 넓다는 등의 여러 가지 장점을 지니고 있어 많은 분야에서 응용되어 사용되어지고 있고 확대될 전망이다. Royston 은 금속 파이프에 물이 통과할 때 평면파를 검출하기 위한 경험적 비파괴 스마트센서로서 PVDF 센서를 이용하였다⁽¹⁾. 대부분 스마트센서는 정적인 상태에서 대상물의 형태나 특성을 파악하기 위한 센싱 기법이 연구되었다. 반면에 Howe 는 동적인 상황에서 공간과 순간적인 주파수를 센싱할

수 있는 스마트센서에 관한 연구를 수행하였다⁽²⁾. Li 는 밀링 표면의 파괴, 칩핑(chipping), 마모를 자동적으로 검출하기 위한 스마트 센서에 관한 연구를 하였다⁽³⁾. 그 외 로봇관절 강도나 손상정도를 파악하기 위한 비파괴 센서나 반구형 실리콘 고무에 PVDF 필름을 매트릭스 형태로 분포시켜 접촉 위치와 특성을 파악할 수 있는 스마트센서로 제안되어진바 있다.

위에 언급한 많은 연구에서 보듯이 그 스마트센서의 응용범위는 시스템의 이상유무 검출에 많은 부분을 할애하고 있고 데이터 처리에 있어 많은 해석 기법이 제안되어져 왔다. 이번 연구에서는 대상물을 상대적으로 인식하여 구별할 수 있는 2 차 스마트센서의 개발과 2 차 스마트센서를 이용한 대상물 인식능력을 평가하는 기법을 검증하는 것이다. 본 실험은 실제적인 응용분야 중 하나인 유방암 진단용 스마트센서 시스템개발을 위한 기초실험중의 일부이다. 즉 이러한 기초 실험을 통하여 데이터 베이스를 구축하여 좀더 신뢰성 있는 2 차 스마트센서의 센싱능력 범위와 센싱능력 한계를 평가하기

위한 기초 실험이다. 이 실험을 위하여 HH(Hard-Hard)타입의 2 차 스마트센서를 개발하여 사용하였다⁽⁴⁾. 이 스마트센서는 대상물 인식용으로 사용되는 센서이다. 본 논문에서는 새로운 평가 기법(R_{SAI})을 개발하였고 이 평가기법의 유용성을 2 차 스마트센서의 입력조건 변화에(변위, 가속도 값) 따른 2 차 스마트센서의 대상물 센싱능력을 상대적으로 평가할 수 있음을 실험적으로 증명하고자 한다. 또한 스마트 센서의 최적의 센싱조건을 찾고자 할 때 이 새로운 인식지수(R_{SAI})을 이용하여 대상물을 상대적으로 인식할 수 있는지를 연구하고자 한다.

2. 새로운 평가 기법(R_{SAI}) 제안

진동시 인간이 느낄 수 있는 진동의 양을 정량적으로 표현하려는 노력이 많은 연구자들에 의해 제시되고 있다. 그 중에서도 ISO 2631⁽⁵⁾은 진동에 대해 인간이 주관적으로 느낄 수 있는 지각변수(Perception Variable)를 K_s 라는 지수로 표현하였다. 이것을 센싱능력(Sensing Ability)에 적용시켰을 때 센싱능력은 K_s 에 비례하여 증가한다. ISO 2631⁽⁵⁾에 기초한 VDI 2057⁽⁶⁾에 따르면 단일축 진동에서의 지각변수는 식(1)과 같이 정의된다.

$$K_s = \alpha a_s \quad (1)$$

여기서 $\alpha=20$, a_s 는 인체가 주관적으로 느끼는 진동 가속도의 평균 제곱근값(Root Mean Square Value)을 나타낸다. 식(1)은 평균값이 영일 때 표준 편차가 평균 제곱근값과 같다는 분산의 성질을 이용하여 인체가 주관적으로 느끼는 가속도 성분 분산(σ_{hs})으로 나타낼 수 있다

$$K_s = \alpha \sqrt{\sigma_{hs}^2} = \alpha \sigma_{hs} \quad (2)$$

분산(σ_{hs})은 인간이 느끼는 가속도 $H_s(t)$ 의 자기상관함수 R_{hs} 로 나타낼 수 있고 자기상관함수는 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density) 함수의 푸리에 변환이므로 K_s 는 식(5)와 같이 센서에 실제로 전달된 진동가속도의 파워 스펙트럼 밀도 $S_{pb}(\omega)$ 로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{hs}^2 = E[H_s^2(t)] = R_{hs}(0) \quad (3)$$

$$S_{hs}(\omega) = |f(\omega)|^2 S_{pb}(\omega) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} K_s &= \alpha \sqrt{\sigma_{hs}^2} = \alpha \sqrt{R_{hs}(0)} \\ &= \alpha \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_{hs}(\omega) e^{i\omega t} d\omega} \\ &= \alpha \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} S_{hs}(\omega) d\omega} \\ &= \alpha \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega)|^2 S_{pb}(\omega) d\omega} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $S_{hs}(\omega)$ 는 인간이 느낄 수 있는 진동가속도의 파워 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density)이며, $f(\omega)$ 는 인체의 역할을 전달함수로 나타낸 것으로 식(5)에서 K_s 를 계산하려면 먼저 전달함수 $f(\omega)$ 를 구해야 한다. 한편 BS 6841⁽⁷⁾에서는 ISO 2631⁽⁵⁾을 더욱 발전시켜 전달함수 $f(\omega)$ 와 같은 개념으로 가중함수(weighting function) W_b 를 제안하였다. 먼저 식(5)를 변환해서 일반 센싱능력지수를 정의하였다. 먼저, 본 연구에서는 주관적인 인간이 아닌 객관적인 센서에서의 감도를 나타내고자 하므로 $\alpha=1$ 로 놓고 식(5)를 제공하였다. $f(\omega)$ 는 BS 6841⁽⁷⁾의 가중함수와 같기 때문에 $f(\omega)$ 대신에 BS6841⁽⁷⁾의 가중함수 W_b 를 대입하여 다음과 같이 정의하였다.

$$SAI_g = \left(1 \cdot \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |f(\omega)|^2 S_{pb}(\omega) d\omega} \right)^2 \quad (6)$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} \left| W_b \left(\frac{\omega}{2\pi} \right) \right|^2 S_{pb}(\omega) d\omega \quad (7)$$

여기서 가중함수 W_b 는 인간의 인식능력에 주로 영향을 받는 주파수 영역인 5Hz에서 100Hz까지는 1로 정의하였다. 따라서 식(7)은 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$\begin{aligned} SAI_g &= \int_{2\pi A}^{2\pi B} S_{pb}(\omega) d\omega \\ &= \sum_A^B S_{pb}(f) \end{aligned} \quad (8)$$

이 때 인간이 지각할 수 있는 주된 주파수 영역에서 센싱능력을 평가하고자 하므로 $A=5$, $B=100$ 로 주파수 대역을 한정하였다. 새로운 센싱능력지수는 일반적 센싱능력지수인 식(8)에서 S_{pb} 의 절대값을 취해 정해진 구간에 대하여 평균한 값으로 수정해서 다음과 같이 센싱능력지수(Sensing Ability Index, SAI)를 정의하였다.

$$SAI = \frac{1}{B-A} \sum_A^B |S_{pb}(f)| \quad (9)$$

(A=5, B=100)

SAI 한 개의 값으로 대상물을 인식하는 데는 한계가 있다. 따라서 센서의 서로 다른 부분에서 획득한 두 개의 SAI 값의 비를 이용하여 새로운 대상물 인식 지수(R_{SAI})를 다음과 같이 정의하였다.

$$R_{SAI} = \frac{SAI_2}{SAI_1} \quad (10)$$

아랫첨자 1, 2 는 센싱포인트를 의미한다. 아랫첨자 1 은 1 층(HH1) SAI 값을 의미하고 아랫첨자 2 는 2 층(HH2)의 SAI 값을 의미한다.

2. 실험장치 및 실험방법

3.1 스마트센서 개발

본 연구에서는 실험을 위하여 HH(Hard-Hard)Type 스마트센서를 제작하여 사용하였다. 스마트센서에 삽입할 압전 소자는 탄성적 유연성이 높아서 입력에 대한 출력이 정확한 PVDF 필름을 이용하였다. PVDF 필름은 필름의 두께 및 형상 등에 따라 독특한 응답 특성을 갖는다. Base1 과 Base 2 그리고 Surface material 사이의 접착은 기포가 생기지 않도록 M-Bond 200 을 사용하여 압축상태와 기밀을 유지하여 접착하였고 같은 종류의 센서의 접착상태에 따른 센서의 센싱 감도의 보정도 실시하였다.

본 연구에서 사용되어진 스마트센서의 규격은 Table 1 에 나타내었다. Fig.1 은 센서의 개략도이다.

Table 1. Specification of HH smart sensor

Base1 material	Base2 material	Surface material (thickness)	Sensor Type
Hard	Hard	0.5 mm	HH
PVDF film symbol			
PVDF1, PVDF2			HH1
PVDF3, PVDF4			HH2

3.2 실험장치 및 실험 방법

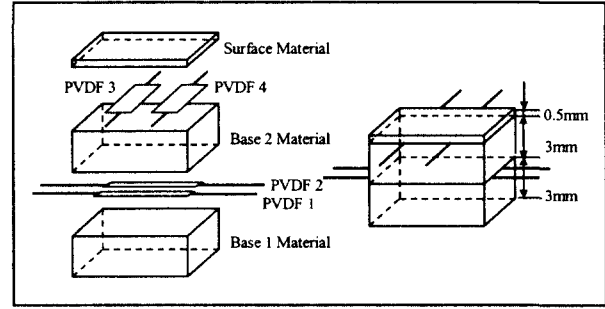


Fig 1. Schematic of smart sensor

Fig.2 는 실험장치의 개략도를 보여주고 있다. 실험 장치는 크게 스마트센서를 제어 할 수 있는 입력 제어시스템, 제작된 스마트센서를 고정시킬 수 있도록 제작된 스마트센서 고정시스템 및 입력 시스템, 센서에서 발생하는 신호를 획득하여 변환시켜주는 데이터 획득 및 변환 시스템, 컴퓨터 프로그래밍을 통한 신호 처리 및 분석시스템으로 나눌 수 있다. 우리는 실험을 위하여 대상물을 준비하였고 이 4 종류의 대상물은 다른 강도를 가지고 있는 철(Fe), 알루미늄(Al), 나무(Wo), 스펀지(Sp)이다. 대상물의 두께는 3mm 이고 지름이 10mm 인 원형으로 제작하였다. 본 연구에서는 2 차스마트센서의 센싱 능력을 평가하기위해 가속도(g)와 가진 변위를 변화시켜 그에 대한 동적인 응답 특성에 관하여 실험하였다. Table.2 는 실험에 사용된 입력변수 값이다.

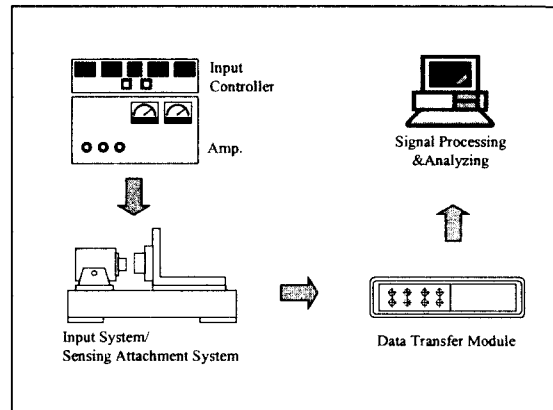


Fig 2. Schematic of the experimental set-up

Table 2. Input Variables for Experiment

Changing variable	Changing value
Acceleration	1g, 5g, 10g
Frequency	20Hz
Displacement	0.3, 0.5, 0.7mm

4. 실험결과 및 고찰

2 차 스마트센서를 이용하여 주파수 변화에 따른 지적센서의 대상물의 인식능력을 새로운 평가기법인 인식지수(R_{SAI}) 방법으로 평가하여 보았다.

a) Fig.3-5 에서 살펴 보면 각각의 대상물에 대한 R_{SAI} 값의 변화를 통해 대상물을 상대적으로 인식할 수 있음을 알 수 있다. 대상물의 경도차이는 $Sp < Wo < Al < Fe$ 순으로 철(Fe)이 가장 큰 값을 가지고 있다. 이러한 조건 하에서 새로운 인식지수 (R_{SAI})을 이용하여 상대적으로 대상물을 변별해 낼 수 있음을 실험적으로 증명하였다. 즉 대상물의 경도차이에 의한 에너지 전달에 차이가 있음을 알 수 있고 이러한 개념의 새로운 인식지수(R_{SAI})가 대상물을 변별해 낼 수 있음을 알 수 있다.

b) Fig.3-5 에서 30Hz 에서 R_{SAI} 값의 경향은 $Sp > Wo > Al > Fe$ 순으로 경도(경도차이는 $Sp < Wo < Al < Fe$ 순으로 철이 가장 큼)가 약한 대상물일수록 R_{SAI} 값은 크게 나타남을 알 수 있다. 즉 입력 조건에 따른 가진에 의해 발생하는 에너지가 2 층 PVDF 에서 직접적으로 전달되고 1 층 PVDF 까지는 경도가 작은 대상물일수록 에너지를 많이 흡수하여 에너지가 전달에 차이가 있다는 결론에 도달한다. 즉 대상물에 대한 에너지 전달비에 의해 대상물을 판별할 수 있음을 알 수 있다.

c) 본 실험은 실제적인 응용분야 중 하나인 유방암 진단용 스마트센서 시스템개발을 위한 기초실험중의 일부이다. 즉 이러한 기초 실험을 통하여 데이터 베이스를 구축하여 좀더 신뢰성 있는 스마트센서의 센싱능력 범위와 센싱능력 한계를 평가하기 위한 기초 실험이었다. Fig.3-5 에서 살펴보면 30 Hz 에서는 대상물에 대한 상대적 변별능력이 모든 가진 가속도값 에서 차이가 없음을 알 수 있다. 즉 스마트센서의 설계 시 용도에 맞는 적절한 센싱조건을 새로운 인식지수인(R_{SAI})를 통하여 상대적으로 평가 및 선정할 수 있음을 보여주고 있다.

d) 새로운 인식지수인(R_{SAI})를 통하여 모든 가속도 값 변화에 따른 스마트센서의 영향성도 평가할 수 있음을 알 수 있다. 즉 이러한 기초 실험을 통한 데이터 베이스를 구축은 좀더 신뢰성 있는 스마트센서의 센싱능력 범위와 센싱능력 한계를 평가하기 위한 중요한 요소이기도 하다.

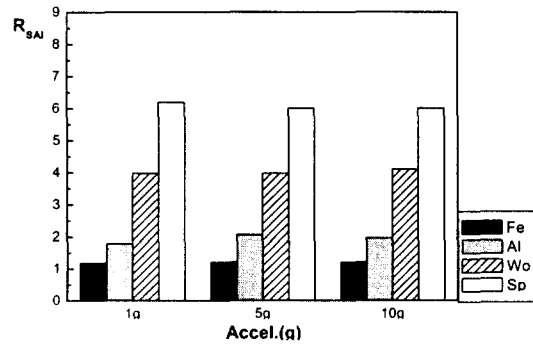


Fig 3. The R_{SAI} Value According to Acceleration Value Changing (30Hz - 0.3mm)

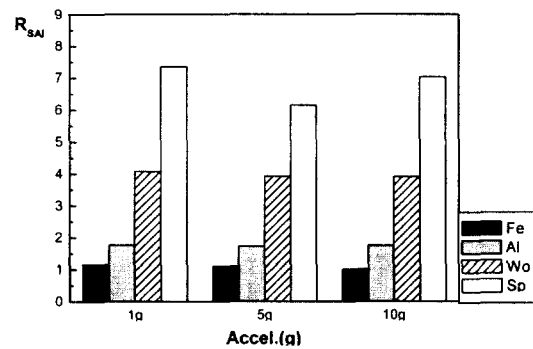


Fig 4. The R_{SAI} Value According to Acceleration Value Changing (30Hz - 0.5mm)

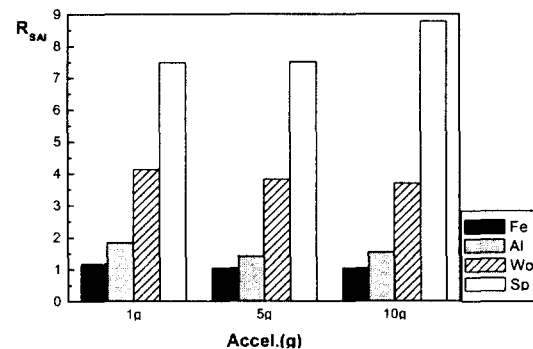


Fig 5. The R_{SAI} Value According to Acceleration Value Changing (30Hz - 0.7mm)

5.결론

본 실험은 실제적인 응용분야 중 하나인 유방암 진단용 스마트센서 시스템개발을 위한 기초실험중의 일부이다. 즉 이러한 기초 실험을 통하여 데이터 베이스를 구축하여 좀더 신뢰성 있는 스마트센서의 센싱능력 범위와 센싱능력 한계를 평가하기 위한 기초 실험이었다. 본 논문에서는 재료에 대한 인식능력을 향상시키기 위하여 새로운 스마트센서를 개발하였고 입력 조건에 따른 상대적으로 대상물 인식능력을 향상시키기 위한 새로운 평가기법인 인식지수(R_{SAI})를 제안하였다. 새로운 인식지수(R_{SAI})를 이용하여 가속도값 변화와 가진변위 변화에 따른 대상물인식능력을 상대적으로 평가하였다. 새로운 평가기법인 인식지수 R_{SAI} 가 입력 변화에 따른 스마트센서의 센싱능력을 상대적으로 평가하고 최적의 스마트센서를 설계하는데 유용한 평가방법임을 증명하였다. 이러한 평가 방법을 이용하여 좀더 진보적인 센서들의 응용범위와 최적의 센서 조건을 찾아내는데 응용할 수 있으리라 사료된다.

참고문헌

- 1.
2. T.J.Royston, "Technical Note: Shaped polyvinylidene fluoride(PVDF) sensors for intelligent measurement of plant-wave acoustic pressure on liquid-filled pipes," *Noise Control Engineering Journal*, vol. 43. no. 1., pp. 15-20. 1995.
3. Robert D. Howe, "Dynamic Tactile Sensing: Perception of Fine Surface Features with Stress Rate Sensing," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 9, no. 2., April, 1993.
4. C. James Li and S. Y. Li, "A New Sensor for Real-Time Milling Tool Condition Monitoring," *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, vol. 115. no. 2A., pp. 285-290, 1993.
5. Seong Youn Hwang, Dong Pyo Hong, et al. "Development & Estimation of Dynamic Characteristic Model of Sensor for Sensing Stiffness," *Proc. of The Fifth Int. Symp. On Artificial Life and Robotics*, pp. 62-65, January 2000.
6. International Organization for Standardization, *Evaluation of Human exposure to whole-body vibration - part1: General Requirements (ISO 2631/1)*, International Organization for Standardization, 1985.
7. Association of German Engineers, *Effect of Mechanical vibrations on Human beings (VDI 2057)*,

Association of German Engineers, 1987.

8. British Standards Institution, 1987, *British Standard Guide to Measurement and Evaluation of Human Expose to Whole-body Mechanical Vibration and Repeated Shock (BS 6841)*, British Standards Institution, 1987.