

폴리머 굽힘센서를 이용한 손의 형상 추정과 로봇 팔 제어 연구

Shape-Estimation of Human Hand Using Polymer Flex Sensor and Study of Its Application to Control Robot Arm

이진혁*, 김대현**†

Jin-Hyuk Lee* and Dae-Hyun Kim**†

초 록 초음파 로봇 검사시스템은 발전설비 등 상시감시가 요구되는 구조물의 감시를 위해 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 그러나 이러한 설비의 구조물은 형상과 구조가 매우 다양하고 복잡하여 단순한 패턴으로 이동과 검사가 가능한 로봇으로는 상시감시에 한계를 가지게 된다. 복잡한 구조물의 정밀검사는 정교한 행동이 가능한 로봇 시스템이 필요하다. 로봇의 제어를 초음파검사 작업자의 손의 형상에 따라 직관적으로 움직이도록 한다면 보다 정밀한 검사 로봇의 개발이 가능할 것으로 판단된다. 폴리머 굽힘센서는 대변형의 측정이 가능하고 곡면에 적용성이 높아 최근 인체 형상 측정 및 재활보조 등 다양한 활용을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구에서는 구조물의 상시감시를 위한 초음파검사 로봇이 작업자의 손동작에 따라 동작이 가능한 직관적 제어를 위해 폴리머 굽힘센서를 이용하여 사람 손의 형상 감시 연구를 수행하였다. 다수의 센서를 적용하여 손의 다양한 움직임을 추정하고 실험적 검증을 통해 사람 손의 형상에 따른 직관적 로봇의 제어가 가능함을 확인하였다.

주요용어: 폴리머 굽힘센서, 비파괴검사 로봇, 로봇 제어, 구조 건전성 감시

Abstract Ultrasonic inspection robot systems have been widely researched and developed for the real-time monitoring of structures such as power plants. However, an inspection robot that is operated in a simple pattern has limitations in its application to various structures in a plant facility because of the diverse and complicated shapes of the inspection objects. Therefore, accurate control of the robot is required to inspect complicated objects with high-precision results. This paper presents the idea that the shape and movement information of an ultrasonic inspector's hand could be profitably utilized for the accurate control of robot. In this study, a polymer flex sensor was applied to monitor the shape of a human hand. This application was designed to intuitively control an ultrasonic inspection robot. The movement and shape of the hand were estimated by applying multiple sensors. Moreover, it was successfully shown that a test robot could be intuitively controlled based on the shape of a human hand estimated using polymer flex sensors.

Keywords: Polymer Flex Sensor, Nondestructive Testing Robot-Arm, Robot-Arm Control, Structural Health Monitoring(SHM)

1. 서 론

발전설비 또는 대형 플랜트는 그 규모나 역할로 인해 안전성에 대한 고신뢰도가 요구된다. 수많은 구조물로 구성되는 이러한 시설은 안전성을 확보하고 유지하기 위한 다양한 안전검사가 수행되고 있다. 특히, 발전소는 정기검사 기간을 중심

으로 비파괴검사 기반의 구조물 감시가 지속적으로 진행되고 있다. 다양한 비파괴검사 방법중 초음파 비파괴검사 기법은 적용 가능한 검사 대상물이 다양하고 결과의 신뢰성이 높아 구조물 건전성 평가에 적용되고 있다. 그러나 기존의 대부분의 비파괴검사 방법은 작업자의 수작업에 의해 검사가 수행된다. 따라서 고온구조물, 방사선 환

경, 고소지역의 구조물 등의 검사에 제한이 생기게 되고 특히 가동중 구조물은 검사가 불가능하게 된다. 이에 따라 최근에는 로봇 등을 이용한 자동화 무인검사에 대한 요구와 연구가 많이 진행되고 있다[1-3].

로봇 검사 시스템은 작업자의 접근한계 지역에 적용이 가능하여 상시감시에 매우 유리하다. 그러나 로봇의 경우 일정한 움직임만 가능한 경우가 대부분으로 다양하고 복잡한 구조물의 검사 및 적용에 한계를 가지게 된다. 따라서 로봇을 이용한 검사는 대부분 정량적 결함평가나 검사보다 구조물의 결함 유무를 우선적으로 판단하기 위한 스캐닝(scanning) 방법으로 적용된다. 하지만 발전설비의 다양한 구조물중 일부 구조물은 단순 결함 유무의 판단이 아닌 정밀검사가 요구되고 이러한 구조물의 검사는 원격 제어 기반의 로봇 팔을 이용한 검사 방법이 유리하다. 로봇 팔의 원격 제어에는 무수히 많은 방법과 시스템이 개발되어 있으나, 대부분 원격 조종기 기반으로 이루어지고 있다. 조종기를 이용한 제어는 숙달이 필요하고 직관적인 제어에 다소 어려움이 따르게 된다. 또한 검사 작업자의 직접적인 제어가 수행되지 못하는 경우가 많아 검사의 신뢰도가 떨어진다. 따라서 로봇 팔을 이용한 비파괴검사를 위해서는 검사자의 손의 형상과 움직임 등의 변화를 추정하여 로봇이 유사한 움직임을 보일 수 있는 직관적인 제어 방법 효과적일 수 있다.

로봇 팔의 직관적인 움직임 제어 시스템은 환자의 재활이나 움직임을 돕기 위한 의료용 분야에서 활발히 개발되고 있다. 이러한 연구는 압력 센서 또는 변형을 센서를 이용하여 사람의 신체 변화 또는 움직임을 측정하여 동작 로봇의 제어 방법이 적용되고 있다[4-6]. 그러나 사람의 신체는 곡면이 많고 움직임에 의한 변화는 대부분 변형이 크게 발생된다. 즉 초음파검사 로봇 제어를 위한 검사자의 손의 형상과 변형의 측정에서 일반적인 센서는 적용성이 떨어진다.

폴리머 굽힘센서(polymer flex sensor)는 과도한 변형이 발생하면 측정하기 어려운 기존의 센서와 달리 90°의 굽힘까지 측정이 가능하여 적용 범위가 넓다. 즉 유연한 물체의 움직임 감지가 가능하여 손가락이나 손목의 움직임을 유연하게 측정이 가능하여 인체 형상 측정을 위한 센서로 활용 가능성이 매우 높다.

본 연구에서는 폴리머 굽힘센서를 이용하여 사용자 손의 형상과 움직임을 측정하고 이를 기반으로 로봇의 팔을 제어하는 아이디어를 도출하였다. 즉 검사자의 손의 형상에 따른 폴리머 굽힘센서의 신호 변화를 측정하고 손의 변형과 움직임을 추정하는 연구를 수행하였다. 그리고 손의 형상과 움직임을 기반으로 로봇의 팔이 직관적인 움직임이 가능하도록 로봇의 제어 연구를 수행하였다. 실험을 바탕으로 굽힘센서 신호 특성을 확인하여 손의 형상을 실시간으로 추정하고 제어를 위한 알고리즘을 도출하였다. 최종적으로 실제 로봇의 제어 실험을 수행하여 굽힘센서를 기반으로 동작 로봇의 직관적 제어가 가능함을 확인하였다.

2. 폴리머 굽힘센서

폴리머 굽힘센서는 전도성 물질이 포함된 폴리머를 플라스틱 박판의 한쪽 면에 프린트한 센서로 전도체인 폴리머의 저항 특성을 이용하여 센서에 발생하는 변형을 측정하는 원리를 가진다. 즉 폴리머 센서는 변형이 발생하게 되면 폴리머 입자 사이에 마이크로 크랙(micro-crack)이 발생하게 되고 이에 따라 전기적 저항 특성이 변화하게 된다. Fig. 1은 이러한 폴리머 센서의 전기적 원리이다. 여기서 R_F 는 기준 저항, V_{in} 는 입력전압, R_S 는 폴리머 센서의 저항이다.

최종적으로 센서의 저항값 R_S 가 변화하게 되면 출력 전압 V_{out} 의 변화가 발생하여 센서의 변

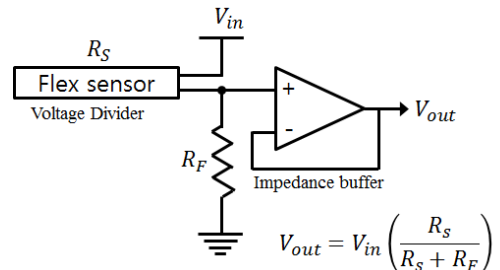


Fig. 1 Principle of a polymer flex sensor [7]



Fig. 2 Picture of a polymer flex sensor [7]

형을 측정할 수 있다[6]. Fig. 2는 실제 사용되고 있는 폴리머 센서이다.

3. 폴리머 굽힘센서의 특성 실험

폴리머 센서는 기본적으로 저항값을 이용하여 센서의 변형 정도를 측정할 수 있다. 즉 변형이 없는 상태에서는 일정한 저항값을 나타내게 되며 변형이 발생하게 되면 저항이 상승하는 특성을 가진다[6]. 이러한 저항값을 이용하여 제어 시스템을 구축하기 위해서는 변형에 따른 정확한 저항값의 정보가 필요하다. 이를 확인하기 위한 기초실험을 수행하였다.

굽힘센서의 변형에 따른 저항 특성을 확인하기 위하여 센서에 0°에서 45°까지 호의 각을 5° 간격으로 발생시키며 일정한 전압을 인가하였다. 이때 사용된 센서(Flx-03, Alsrobot)의 길이는 100 mm이다. Fig. 3은 폴리머 센서로 측정된 전압 특성을 보여준다. 측정 결과 센서에 가해지는 호의 각이 커질수록 센서의 저항이 증가하게 되고 따라서 측정 전압이 감소하는 특성을 확인할 수 있다. 폴리머 센서는 긴 길이와 대변형이 발생하는 특성을 가지게 된다. 따라서 변형을 곡률 뿐만 아니라 변형되는 길이에 따른 신호 특성의 확인이 필요하고 이를 위한 기초실험을 수행하였다. 우선 센서의 변형이 일정한 곡률로 발생할 수 있도록 아크릴 배관을 이용하여 배관의 표면에 센서를 접촉하였다. 이때 사용된 배관은 다양한 곡률이 발생할 수 있도록 6 mm, 9 mm, 11.5 mm, 13.5 mm, 17 mm의 반경을 가지는 배관을 사용하였다. 그리고 각 배관에 접촉면의 길이를 증가시켜 곡률에 의해 발생하는 호의 길이를 5 mm 간격으로 증가시키며 곡률의 변화와 호의 길이의 변화에 따른 센서의 전압을 측정하였다. Fig. 4는 접촉 배관의 곡률 반경과 센서의 변형 길이에 따라 발생하는 전압 변화를 보여준다. 그리고 실험 결과를 이용하여 센서에 가해지는 곡률 반경과 센서에 변형 길이에 따른 전압값을 근사할 수 있는 함수를 도출하였다. 식(1)은 실험을 기반으로 도출된 전압 식이다.

$$V(\theta, \rho) = (0.0017\rho - 0.0444)\theta\rho + 3.759 \quad (1)$$

여기서 V 는 출력 전압이고 θ 는 변형이 발생하는 호의 길이를 나타내며, ρ 는 센서의 변형이 발생

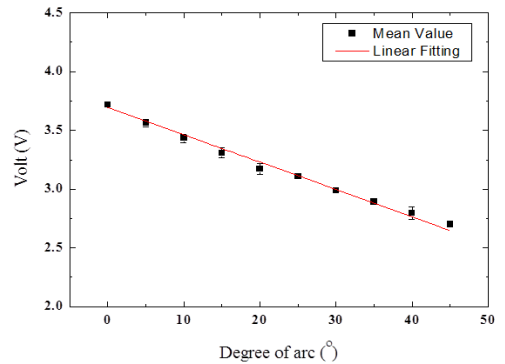


Fig. 3 Amplitude according to the bending arc of the flex sensor

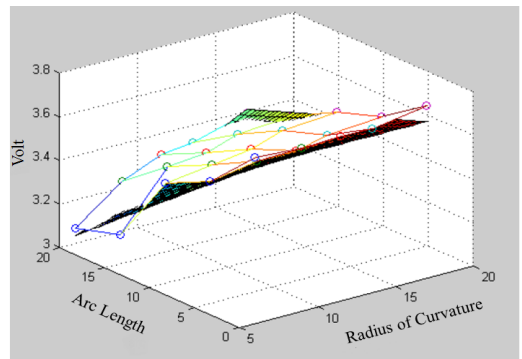


Fig. 4 Amplitude according to the bending arc and arc-length of the flex sensor

되는 곡률의 반경이다. 도출된 식은 2차 방정식으로 복수해를 가지게 되지만 센서의 특성을 고려하여 특정 곡률 반경 구간의 값을 취하면 변형의 정도를 근사할 수 있다. 그리고 도출되는 센서의 변형 정도를 이용하여 로봇의 움직임 제어가 가능하다.

4. 굽힘센서 기반의 로봇 제어

로봇의 직관적인 제어를 위해서는 굽힘센서의 신호를 측정하고 센서의 전압을 바탕으로 로봇을 제어할 수 있도록 시스템의 구축이 필요하다. 즉 신호 수집 장치와 신호 처리와 제어부를 구성하여 로봇 팔의 제어를 수행할 수 있고 이를 효율적으로 수행하기 위하여 LabVIEW S/W를 이용하여 신호 처리 프로그램을 구성하였다.

센서부는 손의 형상과 변화를 측정하기 위하여 굽힘센서를 장갑에 적용하여 손의 형상을 측정할

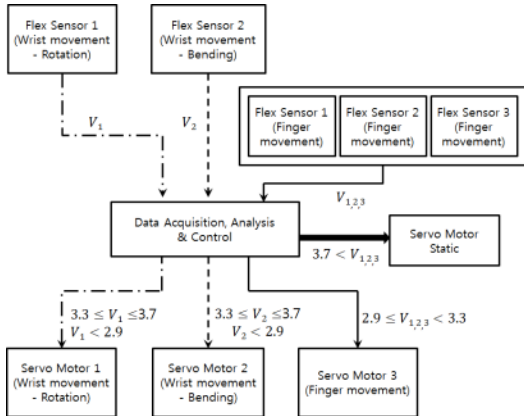


Fig. 5 Schematic diagram of robot-arm control system based on the flex sensors

수 있도록 구성하였다. 손의 움직임은 초음파 비파괴검사시 발생하는 일반적인 움직임을 고려하여, 손목의 회전, 손목의 굽힘 그리고 손가락의 움직임을 구분하여 측정할 수 있도록 설계 및 적용하였다. 이때, 손목의 회전(좌우 움직임)과 굽힘(상하)에 의한 센서의 변형과 손가락에 의한 변형 정도가 다르기 때문에 이를 이용하여 센서는 손가락의 변화와 손목 움직임에 의한 변화를 동시 측정할 수 있도록 적용되었다. 즉 센서의 신호는 손목의 움직임에 의해 정적 상태부터 소변형에 의한 일정 전압 구간까지 발생하게 되며, 손가락의 변화에 의해서는 센서의 대변형이 발생하게 되어 손목의 움직임보다 큰 전압 변화를 발생시킨다. 그리고 손가락의 변형과 손목의 변화가 동시에 발생하게 되면 전압의 변화가 더 증가하게 된다. 이러한 점을 이용하여 일정구간의 전압 변화는 손목의 움직임, 다음 구간의 전압 변화는 손가락의 움직임, 그리고 더 큰 전압 변화는 손가락과 손목의 동시 변화로 인지하고 로봇 제어에 적용이 가능하다.

Fig. 5는 이러한 센서 특성을 이용한 로봇의 직관적 제어 시스템의 구성 개략도를 보여준다.

이와 같은 센서와 제어 시스템을 기반으로 로봇의 제어 실험을 수행하였다. 실험 구성에서 굽힘 센서에 전압을 인가하고 변화되는 전압의 신호를 아두이노 우노(Arduino Uno)를 이용하여 컴퓨터로 수집하였다. 그리고 로봇 팔을 레고 마인드스톰(Lego Mindstorms)을 이용하여 간단하게 구성하였다. 이때, 로봇 팔은 실제 초음파 비파괴검사시 검

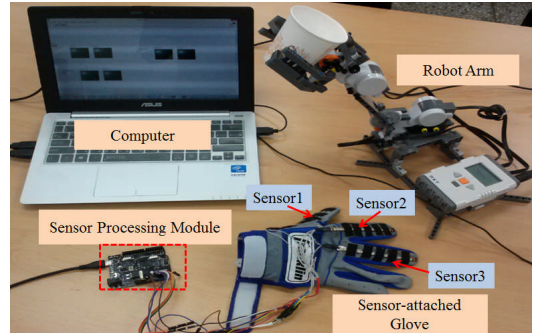


Fig. 6 Picture of robot-arm control system

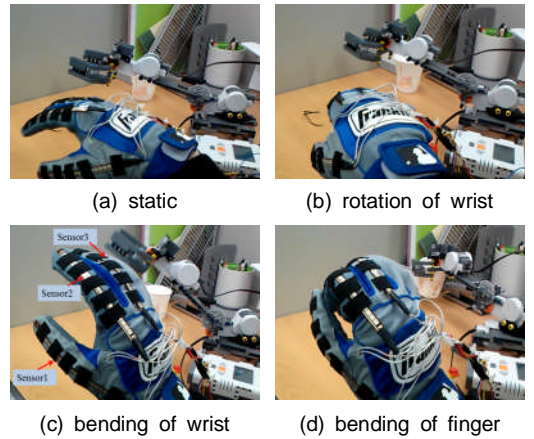


Fig. 7 Picture of robot-arm control test

사자의 팔의 움직임과 유사한 동작을 할 수 있도록 관절과 모터를 구성하였다. 그리고 신호 처리 및 제어 프로그램을 적용하여 실험을 구성하였다. Fig. 6은 굽힘센서 기반의 로봇 원격 제어 시스템 검증을 위한 실험의 구성을 보여준다.

굽힘센서 기반의 로봇 원격 제어 시스템 검증을 위한 실험 결과 손목의 회전(좌우 움직임), 손목의 굽힘(상하 움직임) 그리고 손가락의 움직임을 굽힘센서 1, 2, 3으로 측정하고 측정된 형상 변화에 따라 로봇이 주어진 동작을 수행함을 확인할 수 있었다. Fig. 7은 로봇 팔 제어실험 결과를 동작 상태에 따라 보여주며 Fig. 8은 센서의 전압 신호이다. 실험 결과 손목의 회전에 따른 로봇 팔의 회전, 손목의 굽힘에 따른 로봇 팔의 굽힘 그리고 손가락의 움직임에 따른 로봇 손의 변형 등 사용자의 움직임에 따라 로봇 팔이 동작하였다. 특히 로봇 팔이 사용자 손의 형상과 움직임에 따라 매우 직관적인 동작이 가능함을 확인할 수 있었다.

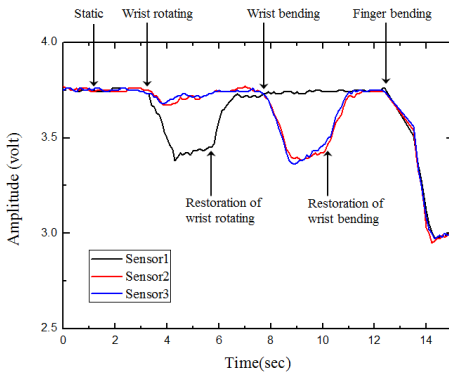


Fig. 8 Signals of the each sensor from robot-arm control test

5. 결론

본 연구에서는 폴리머 굽힘센서를 이용하여 사람의 손의 형상을 추정하고 이를 바탕으로 비파괴검사 로봇의 직관적 제어를 위한 제어 연구를 수행하였다. 폴리머 굽힘센서의 신호 특성에 대한 기초연구 결과 굽힘센서가 원호에 따라 변형될 때 원의 반경과 호가 발생하는 길이에 따른 전압 변화를 확인할 수 있었으며 이를 기반으로 작업자의 손의 형상 변화를 실시간으로 추정할 수 있었다. 그리고 추정되는 손의 변화를 바탕으로 시퀀스 제어를 적용하여 손의 변화 입력에 따라 로봇 모터를 선형적으로 제어하도록 시스템을 구현하였다. 최종적으로, 폴리머 굽힘센서를 활용하여 사람 손의 형상과 움직임의 추정을 수행하고 이에 따른 로봇의 직관적 제어가 가능함을 확인하였다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] R. Murayama, S. Makiyama, M. Kodama and Y. Taniguchi, "Development of an ultrasonic inspection robot using an electromagnetic acoustic transducer for a Lamb wave and an SH-plate wave," *Ultrasonics*, Vol. 42, pp. 825-829 (2004)
- [2] J.-H. Lee, S.-J. Lim, I.-K. Park and D.-H. Kim, "Development of automated ultrasonic testing system for partial joint-weld of heat exchanger's header to tube in power plant," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 30, No. 4, pp. 367-372 (2010)
- [3] J.-H. Lee, S. Han, J. Ahn, D.-H. Kim and H. Moon, "Two-module robotic pipe inspection system with EMATs," *Smart Structures and Systems*, Vol. 13, No. 6, pp. 1041-1063 (2014)
- [4] G.-S. Kim, "Design of a Three-Axis Force Sensor for Wrist Bending-Exercise Rehabilitation Robot," *Journal of Sensor Science and Technology*, Vol. 22, No. 2, pp. 118-123 (2013)
- [5] H.-Y. Kim, J.-H. Lee and D.-H. Kim, "Muscular condition monitoring system using fiber bragg grating sensors," *Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing*, Vol. 34, No. 5, pp. 362-368 (2014)
- [6] G. Orenco, L. Sberini, N. D. Lorenzo, A. Lagati and G. Saggio, "Curvature characterization of flex sensors for human posture recognition," *Universal Journal of Biomedical Engineering*, Vol 1, No. 1, pp. 10-15 (2013)
- [7] <http://www.spectrasymbol.com/flex-sensor>