누설자속 탐상법 및 노이즈 필터를 이용한 와이어로프의 결함진단시스템 개발

A Development of the Fault Detection System of Wire Rope using Magnetic Flux Leakage Inspection Method and Noise Filter

이 영 진* · 아 미 나** · 이 권 순†
(Young Jin Lee · Mi Na A · Kwon Soon Lee)

Abstract - A large number of wire rope has been used in various industries such as cranes and elevators. When wire used for a long time, wire defects occur such as disconnection and wear. It leads to an accident and damage to life and property. To prevent this accident, we proposed a wire rope fault detection system in this paper. We constructed the whole system choosing the leakage fault detection method using hall sensors and the method is simple and easy maintenance characteristics. Fault diagnosis and analysis were available through analog filter and amplification process. The amplified signal is transmitted to the computer through the data acquisition system. This signal could be obtained improved results through the digital filter process.

Key Words : Signal processing, Wire rope fault detection, Filter circuit, Digital filter process

1. 서 론

와이어로프는 항만을 비롯하여 건설 및 각종 중공업 산업 현장에서 크레인 등에 널리 이용되고 있다. 이러한 로프를 장시간 사용하면 반복 하중에 의한 피로와 국부부식 등에 의해 소선이 단선되고 시브(sheave)나 다른 구동부품과의 접촉에 의해 마모가 발생하여 파손되므로 사고를 유발하고 생명과 재산에 피해를 줄 수 있다. 이러한 사고를 미연에 방지하기 위해서는 주기적인 검사가 필수적이지만 그 간격이 길어 검사를 하지 않을 경우에 발생될 수 있는 안전사고 확률은 더욱 높아진다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로써 와이어로프의 결함진단 시스템 개발과 이를 위한 신호처리법에 대하여 다루고자 한다 [1-2].

결함진단 기법은 시각 탐지, 외경 측정검사, 방사선 투과 시험, 전자기적인 방법 및 음향방출방법 등이 있지만, 시각 탐지 및 외경 측정검사 방법은 단선 등 유해결함의 검출에 한계가 있고, 방사선 투과시험은 시간과 비용 면에서 어려움이 있으며, 음향방출방법은 기술적인 면에서 적용의 어려움이 있으므로 전자기적인 방법이 주로 이용된다[3]. 본 논문에서는 전자기적인 결함탐지 방법 중에서도 간단하고 유지보수가 용이한 특성이 있고, 홀센서를 기반으로 하는 누설

자속 탐상법을 이용한 결함진단 시스템을 제안하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 결함진단 시스템은 홀센서를 통해 와이어로프의 누설자속을 측정하여 결함을 진단하는데, 이 시스템에서 홀센서로부터 입력되는 신호는 수 mv이며, 이 신호에 포함된 노이즈 또한 수mv이다. 이러한 신호는 통신, 전선 및 회로상의 고주파의 주변 노이즈들이 합쳐진 결과로서 이를 통하여 결함을 진단하기란 어렵다. 따라서 본 논문에서는 아날로그 방식의 필터 및 증폭 과정을 통하여 결함 부위를 진단 및 분석이 가능하도록 하였으며, 1차 H/W 필터 및 증폭과정에서 부족한 부분을 보완하기 위하여 디지털 필터를 추가하여 검사자의 편의에 따라 원 신호를 분석할 수도 있고 필터 된 신호를 통하여 결함 분석이 더욱 용이하도록 하였다.

2. 와이어로프 결함진단 시스템

2.1 시스템 구성

와이어로프 결함탐지를 위한 시스템 구성은 그림 1에 나타낸 것과 같이 센서가 장착되는 와이어로부터 결함을 검출하는 센서검출부와 검출된 신호를 증폭하는 신호처리부 그리고 처리된 신호를 컴퓨터로 전송하는 DAQ 전송부 및 전송받은 데이터를 가공하여 검사자가 분석을 수행할 수 있는 컴퓨터시스템으로 구성된다.

2.2 센서부

와이어로프는 강자성체인 경고강선(탄소강)으로부터 구성되어 있다. 이 때, 자화 검출기의 영구 자석에 의해 와이어로프를 강하게 자화하면 소선 단선 등의 국부적인 단면적 변화에 의하여 누설 자속이 변화하게 된다. 이 누설 자속의 변화량을 홀 센서로 감지해 전기신호로 변환하는 것으로서

* Dept. of Aviation Control System, Korea Aviation Polytechnic Colleges, Korea

** Dept. of Electrical Eng., Dong-A University, Korea

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

E-mail : kslee@dau.ac.kr

Received : February 12, 2014; Accepted : February 27, 2014

그 상태를 평가할 수 있다. 홀센서에서 측정된 홀 전압(V_H)은 식(1)과 같이 나타내어진다. 여기서 K 는 홀센서 계수, I 는 홀센서에 인가되는 정전류, B_{MFL} 는 홀센서와 수직인 방향의 누설자속이다. 따라서 전압 V_H 을 측정함으로써 누설자속과 그 크기를 측정할 수 있고, 누설자속의 크기와 주기에 따라 결함의 크기와 종류를 구별할 수 있게 된다[4-6].

그림 1 와이어로프 결함진단 시스템 구성

Fig. 1 A block diagram of the fault diagnosis system

$$V_H = K \cdot I \cdot B_{MFL} \quad (1)$$

이러한 결함의 탐지방법이 누설 자속 탐상법이며, 이 외에도 유사한 전자기적 방법인 와전류 탐상법과 초음파 탐상법 등이 있으나 결함 탐지 성능 그리고 경제적인 요소를 고려하여 본 실험에서는 경제적이면서 탐지효과가 우수한 누설 자속 탐상법을 이용한 검출 시스템을 개발하였다.

그림 2 누설 자속의 발생 현상

Fig. 2 Phenomenon of the leakage flux

그림 3은 참고문헌 [7]의 특허기술을 바탕으로 한 자화검출 개념도로서 센서부의 중앙에 홀 센서(HW200)를 배치하고 센서부의 양 끝에 원형으로 영구자석을 배치함으로써 와이어의 결함부위가 홀센서를 지나갈 때 누설자속을 감지할 수 있도록 설계하였다.

그림 3 센서부의 기본 구조

Fig. 3 Basic structure of the sensor part

그림 4 홀센서 구성 회로

Fig. 4 Hall sensor configuration circuit

센서모듈에 홀센서를 부착하기 위하여 그림 4의 회로와 같이 홀센서 보드를 제작하였고, 영구자석으로 자기장을 형성하여 발생하는 누설자속을 검출하기 위하여 홀센서로부터 얻은 출력전압을 측정하면 그림 5와 같다. 그림 5에서 보는 바와 같이 홀센서로부터 얻은 신호의 크기와 이 신호에 포함된 주변 노이즈의 크기가 비슷하여 결함을 진단하기가 어렵기 때문에 추가적인 신호처리과정이 필요하며, 이 과정은 신호처리부에서 다루도록 하였다.

그림 6은 그림 3의 기본 개념을 바탕으로 제작된 자화검출장치로서 홀센서 6세트가 그림 6(c)와 같이 대칭구조로 배치되었으며, 검출기의 양 끝에 영구자석을 배치하여 자료가 형성되도록 제작하였다. 측정하고자 하는 와이어는 그림 6(d)의 진행방향으로 와이어를 이송 시 결함을 측정할 수 있도록 구성되어 있다.

2.3 신호처리부

그림 5에서 보는 바와 같이 홀센서에서 입력되는 신호는 수mv이며, 이 신호에 포함된 노이즈 또한 수mv이다. 이러한 신호는 통신, 전선 및 회로상의 고주파의 주변 노이즈들이 합쳐진 결과로서 이를 통하여 결함을 진단하기란 어렵기 때문에 노이즈 제거 및 증폭 등의 신호처리과정이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 차단주파수보다 낮은 대역을 필터링하는 HPF(High Pass Filter)와 차단주파수보다 높은 대역을 필터링하는 LPF(Low Pass Filter)를 이용하여 필터회로를 구성하였다.

그림 7과 같이 홀센서에서 입력되는 원신호를 1차 증폭정도를 통하여 신호를 증폭시켜 필터가 용이하도록 한 후 먼저, 전압 오프셋을 제거하기 위한 HPF와 이후 전압에 포함

(a) ① Terminal voltage

(b) ② Terminal voltage

그림 5 홀센서 출력전압(scale : 20mv, time dev. : 200ms)

Fig. 5 Hall sensor output voltage(scale : 20mv, time dev. : 200ms)

그림 6 자화검출기

Fig. 6 Fault detection device of wire rope

된 각종 노이즈 고주파 성분을 제거하기 위한 능동 LPF를 구현하였다. 마지막으로 증폭과정에서 발생된 오프셋 전압을 제거하기 위하여 HPF를 적용하여 결함신호를 검출할 수 있도록 하였다. 또한 1차 필터 및 증폭 후 남아 있는 잔류

그림 7 신호처리 개념도

Fig. 7 Block Diagram of signal process

그림 8 신호처리보드

Fig. 8 Signal processing board

노이즈부분을 제거하기 위하여 디지털 필터를 추가하여 검사자의 편의에 따라 원 신호를 분석할 수도 있고 필터된 신호를 통하여 결함 분석이 더욱 용이하도록 하였다.

그림 8에서 보는 바와 같이 좌측 커넥터를 통하여 총 6개의 홀센서로부터 신호를 입력 받아 중앙 하단부의 LM324 증폭회로를 통하여 신호를 증폭하고, HPF 및 LPF회로를 통하여 필터를 거친 후 중앙 상단의 SMA 커넥터를 통하여 신호를 출력하도록 개발하였다.

2.4 DAQ처리 및 데이터 전송부

신호처리부에서 증폭 및 1차 필터된 신호를 분석 및 진단을 위하여 컴퓨터로의 전송은 NI(National Instrument) DAQ 9234보드를 사용하여 측정 data를 취득하여 USB형 플랫폼을 통해 통신하도록 하였다.

2.5 컴퓨터시스템 및 GUI

전송되어온 와이어 결함 측정신호를 디스플레이, 분석, 데이터 보존 등을 하기 위하여 그림 10과 같이 태블릿pc를 장착하여 휴대용으로 제작하여 와이어의 결함을 현장에서 직접 확인하며, 진단 및 기록 보존할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

그림 9 DAQ처리 및 데이터전송부

Fig. 9 DAQ processing and data transmission unit

그림 10 고장진단을 위한 GUI 컴퓨터 시스템

Fig. 10 GUI computer system for the fault detection

특히, GUI 환경 구축은 Labview를 이용하여 1차 H/W 필터 및 증폭과정에서 부족한 부분을 보완하기 위하여 디지털 필터를 추가하였으며, 그림 11에서 보는 바와 같이 H/W 필터를 통해 측정된 신호를 분석할 수도 있고, 디지털 필터를 이용하여 추가로 필터된 신호를 통하여 결함 분석이 더욱 용이하도록 구성하였다.

그림 11 결함 측정 및 진단을 위한 GUI

Fig. 11 GUI for fault measurement and detection

3. 실험 및 고찰

3.1 결함 와이어로프 제작 및 실험환경 구축

와이어의 대표적 결함에는 와이어의 늘어남, 단선, 마모를 들 수 있는데, 본 논문에서는 단선에 대한 결함 검출을 연구

하였다. 실제 제작한 결함 와이어로프를 그림 12에 나타내었으며, 한 가닥 및 두 가닥 단선 결함이 있는 와이어를 이용하여 실험을 구현하였다.

(a) A single strand break

(b) Double-stranded break

그림 12 결함 와이어

Fig. 12 Fault wire rope

3.2 필터회로제작 및 실험

아날로그 필터에는 인덕턴스와 커패시턴스를 구성 소자로 하는 LC 필터, 증폭기와 저항에 의한 액티브 필터, 수정 진동자에 의한 수정 필터 등이 있다[8]. 그 중에서 능동 필터는 특정한 주파수대의 전력은 통과시키고, 다른 주파수의 전력은 저지하는 주파수 선택성회로로, 트랜지스터나 IC등의 능동소자와 저항, 콘덴서의 수동 소자로 구성하고, 저역 주파수대에서 좋은 특성이 얻어지지 않는 인덕턴스는 사용하지 않는다[2,9]. 본 논문에서 제안한 시스템에서는 이러한 능동 필터를 선택하여 필터회로를 제작하였으며, 설계된 필터회로는 그림 13과 같다. 먼저 그림 13의 ①번 단자와 ②번 단자로 유입되는 홀센서의 원신호로부터 1차 차동증폭과정을 통하여 ③번 단자와 ④번 단자에서는 두 홀센서의 각 전압간의 차분과정을 통하여 결함부위가 나타나도록 한다.

그림 13 신호처리 보드 구성

Fig. 13 Schematic of signal processing board

그림 14는 1차 차동증폭 후 그림 14의 ③번 단자와 ④번 단자에서 측정된 두 홀센서의 각 전압의 출력파형을 나타낸다.

하지만, 그림 14의 신호는 많은 노이즈와 전압의 오프셋 등으로 결함부위를 식별하기 어렵다. 그림 15는 그림 14의 2차 증폭 및 HPF를 통하여 차동 증폭된 두 신호를 약 10배 증폭한 신호이며, ⑤번 단자에서 측정된 출력파형이다. 그림에도 불구하고 여전히 전압의 오프셋이 존재하여 결함부위를 명확히 식별할 수 없다. 그림 16은 이러한 오프셋을 저감시킨 결과로 ⑥번 단자에서 측정하였다. 이 후 결함부위의 전압을 보다 식별하기 용이하도록 하기 위하여 2차 능동 LPF필터 후 증폭과정을 거친 신호를 ⑦번 단자에서 측정한 출력파형을 그림 17에 나타내었고, 다시 HPF과정을 거쳐 ⑧번 단자에서 측정하면 그림 18과 같은 신호를 얻을 수 있다.

(a) ③ Terminal output voltage

(b) ④ Terminal output voltage

그림 14 1차 차동증폭 전압(scale : 20mv, time dev : 200ms)

Fig. 14 1st differential amplifier voltage(scale : 20mv, time dev : 200ms)

그림 15 1차 HPF필터 후 ⑤번 단자 출력전압(scale : 200mv, time dev : 200ms)

Fig. 15 ⑤ Terminal output voltage after 1st HPF(scale : 200mv, time dev : 200ms)

3.3 컴퓨터시스템 및 GUI를 통한 와이어로프 결함 검출 실험

그림 19에서 보는 바와 같이 하드웨어적인 필터과정을 통하여 유입된 원신호는 여전히 고주파 노이즈를 포함하고 있어 결함을 식별하기에는 어려움이 있다. 따라서 1차 H/W 필터 및 증폭과정에서 부족한 부분을 보완하기 위하여 디지털 필터를 추가하였다. 디지털 필터는 Feedback 및 Phase응

그림 16 오프셋 저감 후 ⑥번 단자 출력전압(scale : 200mv, time dev : 200ms)

Fig. 16 ⑥ Terminal output voltage after offset reduction(scale : 200mv, time dev : 200ms)

그림 17 2차 능동 LPF필터 및 증폭 후 ⑦번 단자 출력전압(scale : 500mv, time dev : 200ms)

Fig. 17 ⑦ Terminal output voltage after 2nd active LPF and amplification (scale : 500mv, time dev : 200ms)

그림 18 2차 HPF 필터 후 ⑧번 단자 출력전압(scale : 500mv, time dev : 200ms)

Fig. 18 ⑧ Terminal output voltage after 2nd HPF(scale : 500mv, time dev : 200ms)

답에 따라 FIR(Finite Impulse Response)계열의 필터와 IIR(Infinite Impulse Response)계열의 필터로 분류할 수 있다. FIR계열의 필터는 feedback이 없고, 필터통과 전후 신호의 위상왜곡이 없는 것이 가장 큰 특징이며, IIR계열의 필터

는 Feedback이 있고, 아날로그 필터와 유사한 구조를 갖는 것이 큰 특징이다.

그림 19 노이즈가 포함된 검출신호와 필터 후 신호

Fig. 19 Fault detection signal contained noise and filter signal

본 논문에서 제안한 시스템의 경우, 아날로그 필터와 유사한 구조를 가지는 IIR 필터가 변환이 용이하고, IIR 필터가 유한한 계수의 개수를 가진 무한 Impulse응답을 발생시키는 피드백 구조이기 때문에 IIR 필터는 FIR 필터보다 각 샘플 당 더 적은 계산량으로 효율적인 성능 구현이 가능하므로 디지털필터로는 IIR 필터를 선택하였다. Cut-off 주파수 대역이 50Hz 이하인 IIR LPF 필터를 적용하여 해당 노이즈를 모두 제거함으로써 결함의 식별을 용이하도록 하였다. 그림 19의 ①번 부분이 필터 적용 전 노이즈가 포함된 신호이고, ②번 부분이 IIR필터를 거쳐 고주파 노이즈를 제거한 결함신호이다.

그림 20 결함 검출신호

Fig. 20 Fault detection signal

그림 20은 출력 신호로부터 결함의 유무 및 결함 크기에 따른 신호를 검출하여 나타낸다. 결함이 발생하여 해당 스레숄드(Threshold)전압(3[V] 이상)을 초과하는 경우 결함을 판단하고 결함수를 카운터하며, 추후 이를 DB로 구축하여 해당 와이어로프에 대한 정밀진단에 활용할 수 있도록 하였

다. 측정된 모든 데이터는 컴퓨터 시스템에 실시간으로 저장되어 그림 21과 같이 현장시험 후에도 해당 와이어로프의 데이터를 분석할 수 있도록 구성하였다. 와이어 결함 두 가지에 대하여 총 6개의 센서 중 인접한 홀센서로부터 누설자속에 의한 결함 검출신호를 확인할 수 있었으며, 여러 차례의 실험과 다양한 각도에서 실험한 결과 결함신호를 일관되게 검출함을 확인할 수 있었다.

그림 21 저장한 결함 신호 분석

Fig. 21 Stored fault signal analysis

4. 결 론

본 논문에서는 와이어로프 결함 탐지기를 설계 및 실험 분석하였다. 전체시스템은 간단하고 유지보수가 용이한 특성이 있는 홀센서를 이용한 누설탐상방법을 선택하여 결함 진단 시스템을 구성하였고, 아날로그 방식의 필터 및 증폭 과정을 통하여 결함 진단 및 분석이 가능하도록 하였으며, 증폭된 신호는 DAQ 시스템을 통해 컴퓨터로 전송되어 디지털 필터과정을 거쳐 보다 향상된 결함진단 시스템을 구축할 수 있었다. 이러한 결과는 현장에서 테스트를 할 경우에 환경적인 요인에도 더 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대가 된다. 본 연구의 실험은 실험실 규모에서 와이어의 결함을 측정하는 것으로 진행되었으나 추후 조선소의 크레인에 설치된 와이어결함진단 실험을 추가적으로 실험 및 보완하여 진행할 계획이다. 특히, 상용화를 위하여 마모, 부식, 꼬임 등 보다 다양한 형태의 결함 종류에 대한 실험과 이를 통한 와이어의 결함정도에 따라서 스레숄드 전압의 범위와 정도를 결정하기 위한 부분이 보완되어야 할 것으로 사료된다. 이러한 시스템이 구축된다면 와이어로프의 안전을 보다 신뢰성 있게 확보할 수 있을 것으로 기대하며, 와이어로프의 교체시기를 연장하므로 그에 따른 비용을 절감하여 자원낭비를 막을 수 있고, 불필요한 잦은 교체로 인한 예산낭비도 절감할 수 있다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 정부의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A2008434)

References

- [1] Young Jin Lee, Moon Je Koo, and Kwon Soon Lee, "A Development of Fault Detection System of Crane Wire Rope," KIEE Conference, pp. 15-17, 2013.
- [2] A new filter topology for analog high-pass filters, Texas Instruments Incorporated, 2008.
- [3] Hyeon Seok Jang, "Stochastic Model based Fault Diagnosis of Crane Wire Rope using Probability Density Estimation," Dong-A Univ. Master Thesis, 2012.
- [4] Soon Ho Won and Kyung Shik Cho, "Corrosion Assessment of Storage Tank Floor using Magnetic Flux Leakage Technique," Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, vol. 20, no. 1, pp. 38-45, 2000.
- [5] Hui Min Kim and Gwan Soo Park, "A Study on Determining the Shape of Small Axial Cracks by using Magnetic Flux Leakage in NDT System for Underground Pipe," Journal of the Korean Magnetics Society, vol. 23, no. 1, pp. 18-25, 2013.
- [6] Soo Yung Park, Kwon Sang Ryu, Yong Il Kim, Wan Kyu Lee, Jae Kyun Lim, and Young Hyun Nam, "Nondestructive Testing of Welding Flaw at Gas Pipeline by Measuring Magnetic Flux Leakage," Journal of the Korean institute of gas, vol. 12, no. 2, pp. 53-56, 2008.
- [7] Kwon Soon Lee, Hyung Se Moon, Soon Tek Kim, and So Hyun Ahn, "Wire Rope Defect Detection System and Method Thereof," Patent 10-2008-0001578, 2008.
- [8] W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California Technical Publishing, 1999.
- [9] 川田章弘, "Property learning of analog filter design", Monthly Electronic Engineering, vol. 3, pp. 41-65, 2009.

저 자 소 개

이 영 진 (李 榮 珍)

1992년 동아대학교 전기공학과 졸업(학사), 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(Ph.D), 2006년 조지아텍 교환교수, 2000년~현재 한국폴리텍대학 항공캠퍼스 항공제어시스템과 부교수
 관심분야: 고장진단, 시스템제어, 지능시스템
 Tel : 055-830-3482
 Fax : 055-830-3414
 E-mail : airlee@kopo.ac.kr

아 미 나 (阿 美 那)

2013년 2월 동아대 전기공학과 졸업(학사), 2013년 3월~현재 동아대 전기공학과 제어 및 시스템 연구실 석사과정
 Tel : 051-200-6950
 Fax : 051-200-7743
 E-mail : amn0150@naver.com

이 권 순 (李 權 純)

1977년 충남대학교 공업교육과 졸업(학사), 1981년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1990년 미국 오레곤주립대학교 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(Ph.D), 1997년 Virginia Polytech 교환교수, 2003년~2008년 과학기술부지정 국가지정연구실(NRL), 1982년~현재 동아대학교 전기공학과 교수, 2013년~현재 대한전기학회 전기설비부문회 회장
 관심분야: 자동제어, 지능시스템, 설비고장진단, 항만자동화
 Tel : 051-200-7739
 Fax : 051-200-7743
 E-mail : kslee@dau.ac.kr