

원격 크레인 와이어 로프 결함 탐지 시스템 개발에 관한 연구

민 정 탁* · 이 진 우* · 이 권 순**

* 동아대학교 전기공학과 대학원, ** 동아대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

A Study on Development of Remote Crane Wire Rope Flaws Detection Systems

Jeong-Tak Min* · Jin-Woo Lee* · Kwon-Soon Lee**

* Department of Electrical Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

** Division of Electrical Electronic & Computer Engineering, Dong-A University, Busan 604-714, Korea

요 약 : 와이어 로프는 엘리베이터, 건설현장의 리프트, 현수교 등 다양한 산업 현장에 응용되어 지고 있다. 특히, 크레인의 와이어 로프는 컨테이너 이송에 중요한 요소로서 컨테이너 이송 시 로프에 결함이 발생한다면 안전사고, 생산성 저하에 따른 경제적 손실 그리고 컨테이너 터미널의 경쟁력 손실 등 여러 가지 문제점이 초래된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 원격 크레인 와이어 로프 결함 탐지 시스템을 개발하였으며, 본 시스템은 크게 결함 탐지부, 신호 처리부, 원격 모니터링부로 구성되어져 있다. 측정된 신호는 외부적 환경으로부터 노이즈를 가지게 되는데 원신호로부터 이러한 노이즈를 제거하기 위하여 이산 웨이블릿 변환을 적용하였다. 그 결과 와이어 로프 결함을 탐지하는데 있어서 좀 더 쉽게 결함을 판별할 수 있었다. 결론적으로 이러한 시스템의 개발은 와이어 로프의 교체 시기 연장으로 항만의 비용을 절감할 수 있으며, 경쟁력 향상 그리고 엘리베이터, 리프트 등 다양한 산업현장에 이러한 시스템을 적용할 수 있다.

핵심용어 : 와이어 로프, 홀 센서, 누설 자속, 비 파괴 검사, 이산 웨이블릿 변환, 무선 통신, 원격 제어

Abstract : Wire ropes are used in a myriad of various industrial applications such as elevator, mine hoist, construction machinery, lift, and suspension bridge. Especially, the wire rope of crane is important component to container transfer. If it happens wire rope failures during the operation, it may lead to safety accident, economic loss by productivity decline and so on. To solve this problem, we developed remote wire rope fault detecting system, and this system is consisted of 3 parts that portable fault detecting part, signal processing part and remote monitoring part. All detected signal has external noise or disturbance according to circumstances. So, we applied to discrete wavelet transform to extract a signal from noisy data. It is verified that the detecting system by de-noising has good efficiency for inspecting faults of wire ropes in service. As a result, by developing this system, container terminal could reduce expense because of extension of wire ropes exchange period and could competitive power. Also, this system is possible to apply in several fields such as elevator, lift and so on.

Key words : Wire Rope, Hall Sensor, MFL, NDT, Discrete Wavelet Transform, Wireless Communication, Remote Control

1. 서 론

크레인(crane) 및 엘리베이터(elevator)를 비롯하여 건설업계 및 스키장의 리프트(lift)등에 각종 와이어 로프가 수없이 많이 설치되어 있다. 일부 와이어 로프는 설치 후 이미 오랜 시간이 경과되어 결함 발생의 위험에 노출되어 있는 경우와 항만 크레인에 사용되는 와이어 로프의 경우 특별한 결함 측정장치가 없기 때문에 단지 시간 경과(800-1000h)에 따른 로프 교체가 이루어지고 있다. 한국 산업 안전 보건법에서 로프 교체 기준은 와이어 로프의 한 가닥에서 소선 수가 10%이상 단선 시, 지름 감소가 공칭 지름의 7%초과 시 그리고 심한 부식 또는 변형이 있을 때라고 규정되어 있다. 그러나 항만에서

교체되는 와이어 로프를 조사한 결과 90%이상이 거의 인장손실이 없다는 것이 조사되어 졌다. 결국 이러한 시간 경과에 따른 와이어 로프의 교체는 컨테이너 부두의 비용 낭비를 초래한다. 또한, 크레인 와이어 로프는 원활한 컨테이너의 이송에 중요한 영향을 주는 요소이다. 그러나 외적 환경에 의한 로프의 파손이 발생한다면 크레인의 컨테이너 이송 시 안전관리 문제, 로프 파손 시 발생한 과도한 정비 및 교체시간 발생으로 생산성 저하 등 여러 가지 컨테이너 부두에 경제적 손실을 발생시키는데 이러한 문제점 해결이 본 연구의 목적이라 하겠다.

먼저 본 시스템의 센서 header부 즉, 결함 탐지부는 종래에 시각 탐지에서부터 시작하여 누설 자속 탐상법 및 와전류 탐

* min0121@smail.donga.ac.kr 051)200-6748
* jinwoo@smail.donga.ac.kr 051)200-6748
** 정회원, kslee@daunet.donga.ac.kr 051)200-7739

상 그리고 초음파 탐상법이 있으나 결함 탐지 성능 그리고 경제적인 요소를 고려하여 본 실험에서는 경제적이면서 탐지 효과가 우수한 누설 자속 탐상법을 이용한 검출 시스템을 개발하였다. 본 시스템은 항만 센터에서 원격으로 크레인의 와이어 로프 결함을 탐지 할 수 있게 하기 위하여 센서 header부와 크레인 제어용 컴퓨터와는 RF-무선통신이 이루어 지며, 다시 크레인 제어용 컴퓨터와 항만센터와 원격으로 실시간 모니터링 하였다. 그리고 하드웨어 상에 존재하는 여러 가지 잡음(고주파 성분)으로 인하여 구분할 수 없는 미세한 결함신호를 이산 웨이브렛 변환 (Discrete Wavelet Transform)을 이용하여 De-noising하였다.

2. 결함 탐지 시스템

와이어 로프의 결함을 검출하려면 우선, 로프에 발생하는 결함의 상태를 파악해야 한다. 와이어 로프에서 사용 중에 발생하는 손상 상태는 다양하며 일반적으로 마모(abrasion), 단선(broken wire), 부식(corrosion), 형붕괴(deformation)로 분류할 수 있다. 로프의 결함은 이들 중 하나에 의한 경우가 있고 2~3개가 중복하여 발생하기도 한다. 이들 중 가장 위험한 것이 단선으로 그 대부분은 피로에 의하여 일어난다고 추정된다. 따라서, 로프 제조 시에는 이러한 손상에 대한 저항을 크게 하여 제조하고 로프 사용 시에는 조기에 손상을 발견, 대체하고 로프손상을 충분히 파악한 후 손상원인을 제거하여야 한다. 와이어 로프 결함을 탐지하는 방법으로 영상, 누설 자속, 초음파 등의 여러 가지 비 파괴 탐지법이 있다. 영상의 경우 비용적으로는 저렴하지만 와이어 로프 특성상 외부 결함 탐지 시 많은 시간이 필요하며, 초음파 탐상법은 탐지 성능은 상당히 우수하나 초음파 제너레이터가 고가이다. 결국 경제성과 탐지 성능이 양호한 누설 자속 탐지법을 본 실험에서 센서 header로 선택하였다(E. Kalwa, 1987)(S D Kim, 2001).

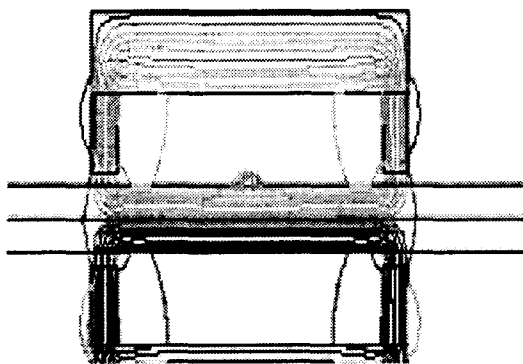
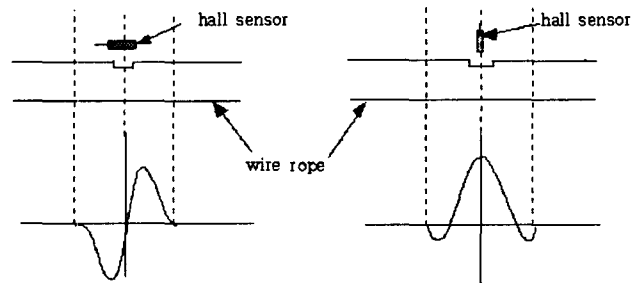


Fig. 1 Magnetic leakage flux

누설 자속은 와이어로프의 양쪽에 영구자석을 서로 반대의 극성으로 배치하면, 자속은 N극에서 와이어 로프를 타고 S극 방향으로 흐르며 자기 폐 회로를 형성한다. 그러면, 만약에 와

이어 로프에 Fig. 1과 같이 임의의 위치에 결함(단선)이 생기면 자속은 Fig. 1과 같이 결함 부분에는 타원을 그리며 흐르게 된다. 이러한 누설 자속의 세기는 결함 크기에 비례하며 센서 header 부분에 장착된 홀 센서는 누설 자속의 세기만큼의 홀 전압을 발생한다. 아래의 Fig. 1은 Flux 2D Program으로 simulation한 결과이다. 그러나 본 simulation을 함에 있어 와이어 로프와 같이 꼬임 형태를 만드는 것은 불가능하기에 둥근 형태로 하였으며, 재질과 직경은 와이어 로프와 같은 조건으로 하였다. 이러한 simulation으로 누설 자속의 크기를 예상할 수 있으며 영구자석의 자기력선속밀도를 정할 수 있다.

본 연구에서는 희토류(NdFeB) 영구자석을 사용하여 자기 폐 회로를 구성하였으며 와이어 로프에 결함이 있을 시 발생하는 누설 자속을 linear 홀 센서를 통하여 결함의 유무와 크기 정도를 판별하였다. 홀 센서의 위치에 따라 수평으로 놓았을 때와 수직으로 놓았을 때의 검출 파형을 아래의 Fig. 2에서 나타내고 있는데, 실험에서는 수평으로 놓았을 때 보다 수직으로 놓았을 때가 관찰하기 쉽고 단선이나, 마모에 대하여 잘 나타나기 때문에 이 방법으로 실험을 하였다. 그리고 Fig. 3은 본 실험에서 설계한 센서 header부다(J. B Nestleroth, 1999).



(a) horizontal direction (b) vertical direction
Fig. 2 Output for linear hall-sensor

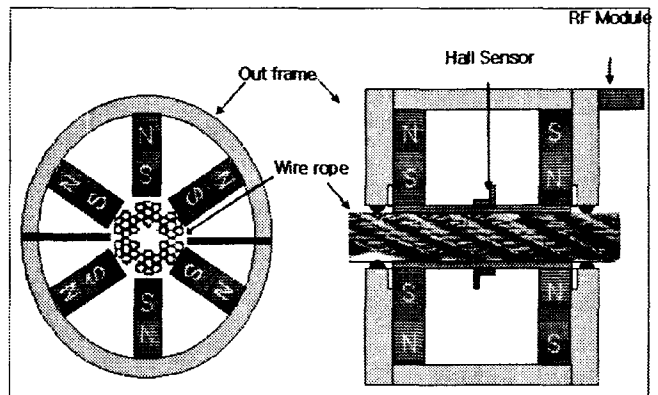
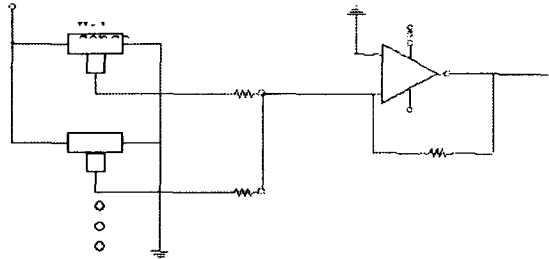


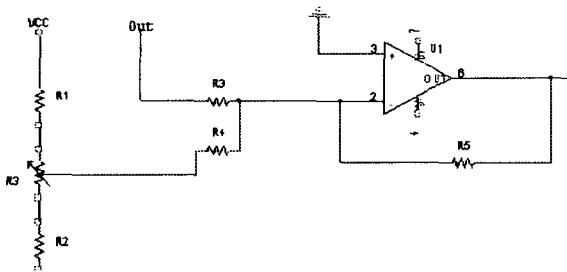
Fig. 3 Detection header

홀 센서에서 우리가 얻고자 하는 것은 홀 센서에 의해 검출되는 자계의 세기 즉, 자속을 측정하여 자속에 비례되는 홀 전압을 얻고자 함이다. 홀 전압은 측정되는 자속의 세기에 비해 그 신호가 저전압(mV) 이다. 그러므로 홀 전압을 증폭시켜 저

전압을 알맞은 신호로 증폭 시켜야 한다. 그리고 홀 전압을 보상하기 위한 회로와 홀 센서의 동상 전압이나, 불평형 전압을 제거하기 위한 회로 등이 있다. 이렇게 홀 전압을 정밀화하는 회로가 있지만, 여기서는 결합에 의한 누설 자속에 대한 홀 전압의 변화분만 검출하기 위한 것이므로 이러한 정밀 회로가 필요하진 않을 것이다. 하지만 홀 전압을 검출하기 위한 간단한 비교기 등의 회로가 필요하다.



(a) Detection Circuit



(b) Off-set Circuit

Fig. 4 Analog signal processing

다음은 홀 센서가 여러 개 사용되어 지므로 각각에 대한 홀 전압 검출 회로가 필요하게 된다. 그리고 누설 자속이 검출되지 않아도 홀 센서의 동상신호와 op-amp의 차동 전압이 임의의 전압으로 나타나므로 이 전압을 증폭기를 통하면 이 레벨의 전압도 증폭이 된다. 사실상 이 증폭된 레벨은 필요가 없다. 그래서 검출회로 후단에 불필요한 전압 레벨을 제거하기 위한 off-set회로가 필요하다. Fig. 4는 8개의 홀 센서 탐지 회로와 그 출력전압을 off-set회로를 통하여 불필요한 전압 레벨을 제거하고 앞단의 차동 증폭을 거쳐 2단 증폭을 하였다. 이 결과 최종 측정 전압을 얻었다. off-set 회로를 거친 전압은 10bit A/D 변환 후 RF 송신부를 통하여 무선 통신을 하게 되며 이 신호는 크레인 제어용 컴퓨터에서 수신되어 신호 처리를 하게 된다.

3. De-noising

신호 검출 시 하드웨어상에 존재하는 noise 그리고 RF 무선통신상에 발생하는 noise 즉 고주파 신호는 비교적 큰 단선과 같은 결합에 대해서는 결합 판별에 큰 문제가 없지만 작은

단선과 부식, 마모와 같은 결합은 노이즈와 결합 판별이 어렵기 때문에 이러한 노이즈를 제거해야 된다. 일반적인 신호에서 저주파 신호는 신호의 본질을 나타내고, 반대로 고주파수는 신호의 부분적인 특성을 나타낸다. 사람의 말을 예를 들면, 고주파 신호의 인자를 제거하면 목소리가 다르게 들리지만 그 뜻은 알 수 있고, 저주파 신호 인자를 제거하면 말을 이해할 수 없게 된다. 잡음 제거에는 여러 가지 방법이 있겠지만 여기서는 이산 웨이브렛 변환을 이용하여 신호의 잡음을 제거하였다. 이산 웨이브렛에서는 상세(detail)와 근사치(approximation)란 용어가 자주 사용되는데, 근사치들은 신호의 저주파 인자인 High-Scale이고, 상세들은 신호의 고주파 인자인 Low-Scale이다. 웨이브렛 변환은 웨이브렛 함수와 스케일 함수를 시변 입력신호와 곱하여 주파수 영역에서 고주파와 저주파로 주파수 분할을 하게 된다(Raghuveer,1998)(Nason, 1993).

$$\Psi(n) = \sum_k h(k) \Phi(2n-k) \quad (1)$$

$$\Phi(n) = \sum_k g(k) \Phi(2n-k) \quad (2)$$

(Ψ : 웨이브렛 함수, Φ : 스케일 함수)

위의 식 (1), 식 (2)에서 $h(k)$ 는 웨이브렛 함수의 계수로써 고주파 통과 필터 계수와 같은 역할을 하며, $g(k)$ 는 스케일 함수의 계수로써 저주파 통과 필터의 계수로써 작용을 한다. 각 함수들의 계수에 의해서 주파수 분할이 이루어지기 때문에 신호 분석에 유용한 모 웨이브렛(mother wavelet)을 선택하기 위한 모 웨이브렛의 주파수 분석은 매우 중요하며, 모 웨이브렛의 주파수 분석과 이를 근거로 신호 분석에 가장 적합한 웨이브렛을 선택하여야 한다(I. Daubechies, 1992). 스케일 함수를 이용하여 웨이브렛 변환을 취할 때, 레벨의 감소($j = -1, -2, \dots, k$)에 따라 신호의 주파수 스펙트럼이 'dyadic'(이분)으로 분할되는데, 샘플링 레이트는 aliasing 을 발생시키지 않기 위해 신호가 포함하고 있는 주파수 성분의 2배 이상으로 설정해 주어야 하기 때문에 레벨이 감소함에 따라 샘플링 레이트가 1/2로 감소되며, 각 레벨에서의 차단 주파수도 1/2로 감소된다. 이와 같이 웨이브렛 변환은 신호가 가지고 있는 주파수 성분을 분할 및 분석할 수 있다(J. M Lina, 1995).

$$D_{2^j} [x(n)] = \sum_{k=0}^{K-1} d_{2^j}(K) \Psi_{2^j} (n-2^j k) \quad (3)$$

$$C_{2^j} [x(n)] = \sum_{k=0}^{K-1} c_{2^j}(K) \Phi_{2^j} (n-2^j k) \quad (4)$$

식 (3)은 detail 신호로써 식 (1)의 웨이브렛 함수와 translation factor인 'd' 에 의해서 입력신호의 고주파 성분을 레벨에 따라 분할하며, 식 (4)는 approximate 신호로써 식 (2)의 스케일 함수와 스케일 factor인 'c' 에 의해서 입력신호의 저주파 성분을 레벨에 따라 분할한다. 분할된 성분은 문턱 값(threshold)을 설정하여 고주파 성분을 제거하는데 즉, 원신

호(original signal)의 저주파 통과 버전이다.

$$x(n) = u(n) + \sigma w(n) \quad (5)$$

$x(n)$ 은 원 신호이고, $u(n)$ 은 잡음이 제거된 신호가 되는데, σ 의 선택에 의해, 원 신호의 노이즈 $w(n)$ 을 억제시킬 수 있다. 일반적으로 원 신호에 아무런 영향 없이 모든 노이즈를 제거하는 필터를 만드는 것은 불가능하다 할 수 있다. 노이즈의 대부분은 적당한 크기에서 웨이블릿 계수들에 의해 표현이 가능하다고 할 수 있는데, 이러한 노이즈에 해당하는 계수들을 제거하기 위해 식 (6)과 같이 soft threshold를 적용하였다.

$$y_{soft}(t) = \text{sign}(x(t))(|x(t)| - \delta) \quad |x(t)| > \delta \quad (6)$$

$$y_{soft}(t) = 0 \quad \text{Otherwise}$$

$$\delta = \gamma \lambda \sqrt{\frac{2 \ln(n)}{n}}$$

(단, δ 는 soft thresholding, $y_{soft}(t)$ 는 웨이블릿 변환 계수, n 은 샘플데이터의 수, λ 는 noise level, γ 는 상수)

계산의 가장 일반적인 방법은 한 밴드(band)에서 계수(coefficients)들의 샘플 분산 σ^2 을 계산하고 표준편차 σ 의 곱으로 임계치를 설정하는 방법이다. 임계화된 변환 계수들의 역 웨이블릿은 노이즈가 제거된 신호가 된다(R. Averkamp, 1996). 이러한 De-noising 기법은 신호의 손실없이 잡음이 제거되는 효율적인 기법이라 할 수 있다.

4. 실험 및 고찰

크레인용 와이어 로프 결함 탐지 시스템의 성능을 평가하기 위하여 먼저 실험실에서 실제 크레인에 사용된 후 폐기된 20Φ 1m 와이어 로프에 테스트를 해보았다. 그러나 앞에서 언급했듯이 폐기된 와이어 로프는 단지 시간의 경과에 따른 교체로 아무런 결함이 없기 때문에 Fig. 5와 같이 인공적으로 15cm 간격으로 1mm, 2mm, 3mm크기로 결함을 만든 후 실험을 하였다.

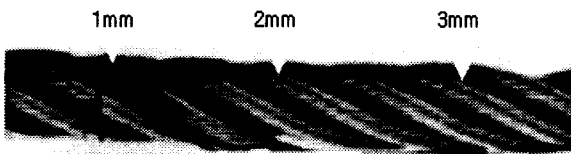


Fig. 5 Shape of wire rope flaws

아래의 Fig. 6은 실제 크레인에서 와이어 로프의 상·하 운 동시 결함 탐지를 목적으로 실험실에서 제작한 프레임과 센서 Header이다. 센서 header에 사용된 영구자석의 자기력선속밀도는 simulation을 통해 충분히 빠르게 와이어 로프를 자기 포화 시키기 위하여 1.21T(tesla)를 사용하였으며, 자석과 와이어 로프사이의 간격을 1mm로 유지하기 위하여 22Φ 롤러를 사용하였다. 센서 Header에서 자기 폐회로는 결함 부위에서

결함의 크기에 비례하는 누설 자속을 발생시키는데, 이러한 누설 자속은 홀 센서를 통해 Fig. 7과 같이 설계된 회로를 통해 전압 증폭 -> Off-set -> 10bit ADC -> RF 송신을 하게 된다. AD변환은 AVR 시리즈의 mega 103을 이용하였으며 RF 무선 통신은 BIM-418을 사용하였다. 센서 Header에 부착된 RF-송신기는 크레인 제어용 컴퓨터에 연결된 RF-수신기에 신호를 송신하게 된다.

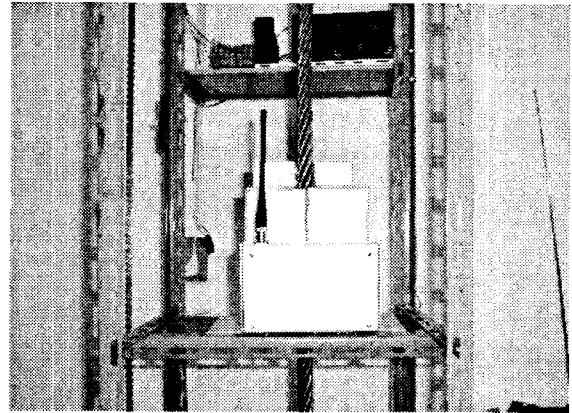


Fig. 6 Mechanical configuration

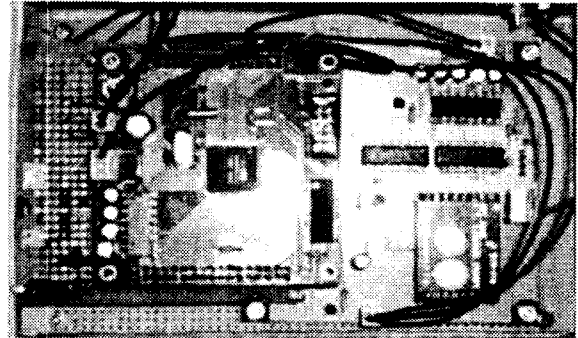


Fig. 7 Signal processing board

이러한 회로와 무선 통신상에는 고주파 성분 즉, 노이즈가 포함되는데 이러한 노이즈는 작은 결함파의 구분이 어렵기 때문에 노이즈를 제거하는 것이 중요하다. 앞에서 언급했듯이 본 실험에서는 하드웨어 적인 filtering이 아니라 소프트웨어 적으로 이산 웨이블릿을 적용하여 노이즈를 filtering하였다.

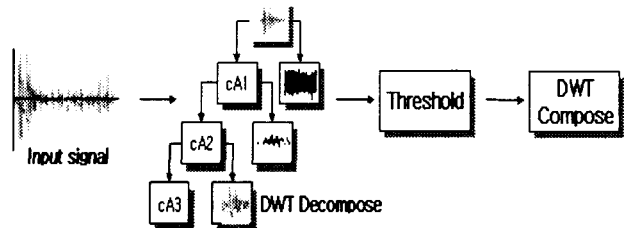
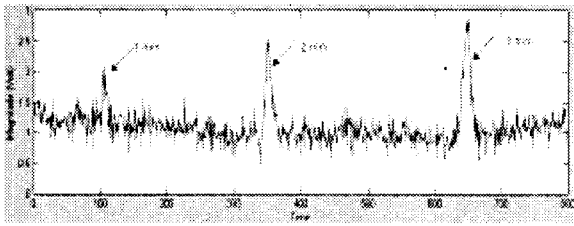
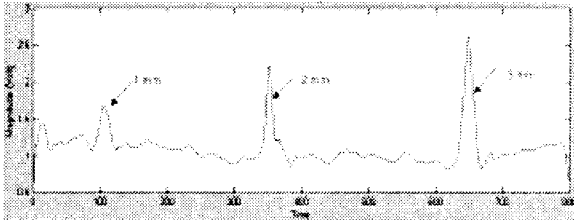


Fig. 8 Schematic diagram of de-noising



(a) Original signal



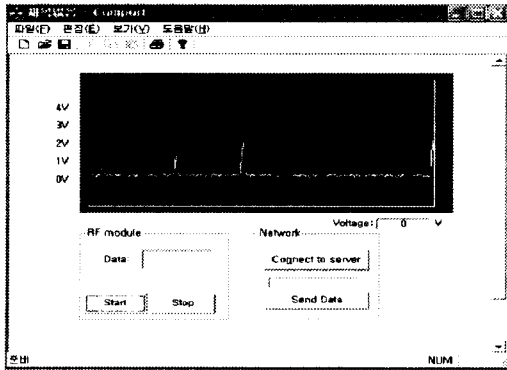
(b) De-noising signal

Fig. 9 Comparison of original and de-noising signal

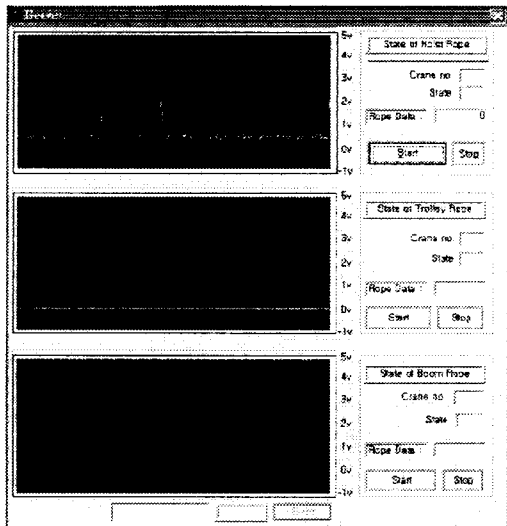
이산 웨이브렛을 위한 웨이브렛의 기저는 공간적인 지역화가 우수하고, 기울기에 대한 정보를 잘 보존하는 Daubechies' wavelet 변환을 적용하였으며, 3단계 multi-resolution을 한 후 soft-threshold를 적용하여 노이즈를 제거한 후 신호를 재구성하였다. De-noising 과정은 Fig. 8과 같으며 신호 파형은 Fig. 9와 같이 원 신호와 노이즈가 제거된 신호와의 차이를 알 수 있다.

이렇게 신호 처리된 신호는 항만 센터에서 크레인 와이어 로프 상태를 실시간 확인할 수 있도록 센터의 컴퓨터와 크레인 제어용 컴퓨터 사이에는 무선 LAN으로 원격 통신이 이루어진다. 이 때 항만에는 무선 LAN으로 네트워크가 형성되어 있으므로 server용 프로그램은 센터에 설치하고, client 프로그램은 크레인 제어용 컴퓨터에 설치만 하면 된다. 먼저 client에서 server로 접속하기 위해서는 server에서 할당된 ID와 password를 입력하면 server에서 접속을 허용하고 크레인용 와이어 로프의 결함을 원격으로 센터에서 실시간으로 확인할 수 있다. 실제 1대의 갠트리 크레인에는 hoist, trolley, boom의 3종류의 지름이 다른 와이어 로프가 설치되어 있다. 본 실험에서는 3종류의 신호를 받을 수 있게 program은 되어져 있지만 실험실에서 하나의 와이어 로프 결함을 탐지하였기 때문에 Fig. 10과 같이 하나의 파형만 나타나게 된다. Fig. 10에서 보듯이 client와 sever의 신호가 실시간으로 탐지할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 본 실험의 전체 시스템을 나타낸 것이다.



(a) Client(Computer for crane control)



(b) Server(Center computer)

Fig. 10 Client and server program

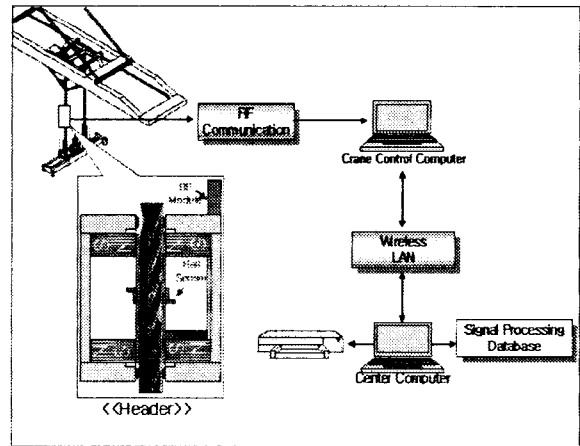


Fig. 11 Whole systems

5. 결론

본 논문에서는 항만의 크레인 와이어 로프 결함을 탐지하는 원격 시스템을 개발하였다. 이러한 시스템의 개발은 와이어 로프 교체 시간 연장으로 컨테이너 터미널의 비용낭비를 감소시키며, 안전문제 해결 및 경제적 효과가 발생할 것이다. 또한, 본 시스템은 크레인에 한정되는 것이 아니라 엘리베이터, 건설현장의 리프트 및 스키장의 리프트 등 다양한 분야에 적

용이 가능하다.

아직 본 시스템은 다양한 결함 즉 마모, 부식, 꼬임 등에 대한 테스트가 이루어지지 않았기 앞으로 많은 결함에 대한 데이터 베이스를 구축한 후 여기에 인공 알고리즘을 프로그래밍해서 능동적인 결함 탐지 시스템을 개발하는 것이 향후 과제이다.

참 고 문 헌

- [1] E. Kalwa, K. Piekarski(1987), Design of Hall-effect sensors for magnetic testing of steel wire ropes, NDT International, Vol. 20, No. 5, pp. 295-240.
 - [2] I. Daubechies(1992). Ten lectures on wavelets. Society for industrial and applied mathematics.
 - [3] J. M Lina and Michel Mayrand(1995), Complex Daubechies Wavelets, Applied and Computational Harmonic Analysis, Vol. 2 pp.219-229.
 - [4] J. B Nestleroth, T. A. Bubenik(1999), Magnetic Flux Leakage(MFL) Technology For Natural Gas Pipeline Inspection, GRI.
 - [5] Nason, B. P. and Silverman B. W.(1993), The discrete wavelet transform, Statistics Research Report 93:07.
 - [6] R. Averkamp and C. Houdre(1996), Wavelet thresholding for non Gaussian noise: a preliminary report, Tech. Rep. Georgia Institute of Technology, Atlanta.
 - [7] Raghuvver M. Rao and Ajit S. Bopardikar(1998), Wavelet Transform, Addison-Wesley, pp.183-189.
 - [8] S D Kim(2001), Development of Nondestructive Detecting System for Elevator Wire Ropes using Hall-effect Sensors, J. of KSS, Vol. 10, No. 1, pp. 33-42.
-

원고접수일 : 2002년 11월 28일

원고채택일 : 2003년 3월 11일