광 스페클 패턴 변화를 이용한 침입자 탐지용 디지털 신호처리 시스템 구현 및 성능 분석

Implementation and Analysis of Digital Signal Processing System for Intruder Detection using the Variations of the Optical Speckle Patterns

김 인 수 · 강 진 석* · 김 기 만*

Insoo Kim · Jin-Seok Gang* · Ki-Man Kim*

요 약

본 논문에서는 감도와 신뢰성이 높은 멀티모드 광섬유에서 스페클 패턴(speckle pattern) 변화를 이용한 침입자 탐지용 디지털 신호처리 시스템을 구현하였다. 구현된 시스템의 성능은 실측 데이터로부터 분석되었다. 아울러 성능을 향상시키기 위하여 적응 디지털 필터를 도입하였다. 실험 결과 침입자 탐지는 96 % 이상이었으며, 사람과 차량을 구분하는 성능은 평균 90 %로 나타났다.

Abstract

In this paper, we have implemented the digital signal processing system for intruder detection using speckle pattern variation in multi-mode optical fiber with hypersensitive and high fidelity. The performance of the implemented system was evaluated by experiments. In order to improve the system performances we applied the adaptive digital filter. In experimental results we could see 96 % intruder detection and 90 % man/car discrimination probability.

Key words : Speckle Pattern, Intruder Detection, Adaptive Filter

Ⅰ. 서 론

최근 주요 시설물에 해당하는 빌딩, 교량, 방호벽, 터널 등의 침입, 붕괴 등에 대한 위험이 존재하고 있으며 특히 국가의 주요 기간시설, 구조물의 감시가 체계적으로 이루어지지 않고 있어 많은 물적, 인적 피해가 발생할 우려가 있다. 이에 반하여 외국의 경우는 다양한 감지 시스템을 주요 시설물에 설치하여 침입자를 상시 감시하는 연구가 활발히 진행 중에 있다.

현재까지 레이다, 적외선 감시 시스템 및 CCD 감시 카메라 등과 같이 여러 종류의 침입자 탐지 시스템이 개발되어 사용되고 있다. 그러나 이들은 고가이면서 감도가 낮고, 넓은 범위를 탐지할 수 없어 세계적으로 광섬유 기술을 이용한 침입자 탐지 시스템의 개발이 시도되었다. 특히 OTDR(Optical Time Domain Reflectometer) 기술을 이용하여 침입자가 광섬유를 절단했을 경우만 침입자를 감지할 수 있는 광섬유 침입자 탐지 시스템이 개발되었다[1]. 그러나 이 시스템은 감도가 너무 낮아 실제 상황에서는 사용이 불가능하였다. 또한 간섭계형 센서를 이용한 시스템이 연구되었으나 아직 실제 사용할 수 있을 정도의 신뢰성을 가진 센서 시스템은 개발되지 못하였다[2]. 이에 반해 스페클 형 센서는 미세 입력 변화

「본 연구는 민군겸용기술개발 사업의 연구비 지원(M1-0190-01-0002)으로 수행되었음.」

한국전기연구원 전자의료기기연구그룹(Korea Electrotechnology Research Institute)

*한국해양대학교 전파공학과(Department of Radio Sciences & Eng., Korea Maritime University)

· 논 문 번 호 : 20031126-168

· 수정완료일자 : 2004년 2월 18일

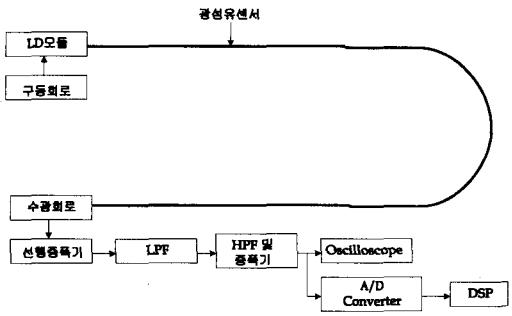
로 인한 스페클 무늬의 변화에 따라 수광부에 입력되는 광의 세기가 바뀌어 침입자의 유무를 판단할 수 있는 구조를 가지고 있어 매우 민감하면서도 소형, 저비용으로 센서를 구성할 수 있는 장점이 있으며[3], 이러한 스페클 현상은 정밀 측정 분야에 응용되고 있다[4].

본 논문에서는 [3]에서 개발된 스페클 센서를 이용하여 침입자 탐지용 디지털 신호처리 시스템을 개발하였다. 또한 시스템 운용 중에 발생할 수 있는 외부 잡음 요인들에 강인한 방법을 연구하고 실측 자료를 바탕으로 그 성능을 분석하였다. 외부 잡음 요인들로는 바람과 비와 같은 날씨 영향과 차량 운행 시 발생하는 기계적인 진동으로 인한 것들이 있다. 이러한 외부 잡음을 최소화하기 위해 적응 디지털 필터를 적용하고 실험을 통해 그 성능을 고찰하였다. 실험 결과 침입자 탐지는 96 % 이상이었으며, 침입자 가운데 사람과 차량을 구분하는 성능은 90 % 정도로써 적응 필터를 적용하지 않은 경우보다 약 15 % 가량 성능이 향상되었다.

Ⅱ. 침입자 탐지 시스템 구현

레이저에서 방출되어 멀티모드 광섬유에 인가된 빛이 진행하면서 빛을 구성하는 모드 사이에 간섭을 일으켜 광섬유 끝단에서 빛을 관찰하면 밝고 어두운 부분이 나타나는데 이를 스페클이라 한다. 만약 외부에서 광섬유에 물리적인 힘이 인가되면 밝고 어두운 위치가 바뀌는데 이와 같은 성질을 이용하여 침입자 탐지 시스템을 구성할 수 있다[5].

구현된 광섬유 침입자 탐지 시스템의 특성을 파악하기 위해 그림 1과 같이 구성하여 실험하였다. 실험장치는 레이저 다이오드(LD) 모듈, LD 구동회로, 수광 모듈, 증폭기, 저역 및 고역 통과 필터 및 디지털 신호 처리 시스템 등으로 구성되어 있다. LD 구동회로에서 LD에 전류를 공급하면 빛이 방출된다. 방출된 빛은 광섬유에 coupling 되어 광섬유 센서를 통해 수광 모듈로 전달된다. 수광 모듈에 있는 광 검출기(PD)는 광섬유 센서를 통해 전송되는 빛의 모드와 모드 사이에 일어나는 간섭 때문에 발생한 스페클 패턴의 일부분을 검출한다. 검출된 신호는 선행 증폭기, 필터들을 거쳐 디지털 신호 처리 회로



(a)

(b)

(c)

그림 1. (a) 구현된 시스템의 구성도, (b) 장비 사진, (c) 매설된 광 케이블 사진

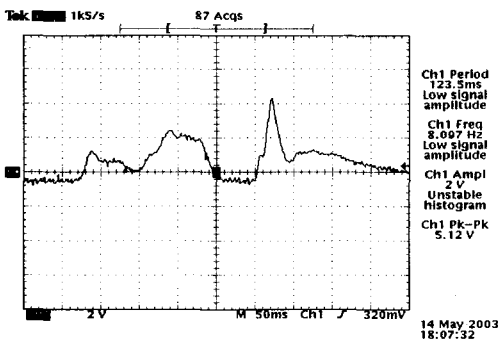
Fig. 1. (a) Block diagram of the implemented system, (b) system photograph, (c) photograph of the laid optical cable.

로 들어간다. 구동회로에서 LD로 공급되는 전류는 65 mA이고, 저역 통과 필터의 차단 주파수는 5 kHz, 고역 통과 필터의 차단 주파수는 100 Hz이며 사용되어진 광섬유 센서는 500 m 멀티모드 광섬유로써 국내 L사에서 제작된 것이다. 디지털 신호 처리 시스템은 Texas Instruments사의 범용 DSP 프로세서인 TMS320C31 프로세서로 구현되었다. 이 프로세서는 32 비트 부동 소수점(floating-point) 연산을 수행한다[6],[7]. DSP 프로세서 주변에는 512 Kword 용량의

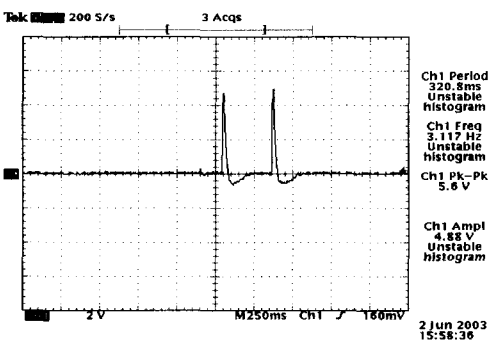
RAM과 EPROM을 각각 연결하였다. 사용자 프로그램은 EPROM에 저장되어 있다가 리셋 신호가 인가된 후 RAM으로 전송되고 프로그램 카운터가 RAM에 저장된 프로그램의 첫 번째 주소를 지정함으로써 프로그램이 실행된다.

구현된 침입자 감시 시스템이 침입자 유무 판단 및 침입자 구별(차량과 사람)이 가능한지를 알아보기 위해 현장 실험을 수행하였다. 500 m의 광섬유 센서 중 약 5 m를 2 cm 깊이의 땅속에 매설하였고 나머지 광섬유 센서는 주변 바람이나 온도변화에 의한 영향을 줄이기 위해 상자 안에 내장하였다. 침입자 판단 유무 및 침입자 인식 정도를 알기 위해 땅속에 매설된 광섬유 센서 위를 사람과 차량이 지나가면서 센서 응답 특성을 조사하여 침입자 유무 판단 확률과 침입자 인식 확률을 조사하였다.

그림 2에는 오실로스코프 상에 나타난 데이터의 시간 영역 형태를 나타내었다. 그림 2(a)는 표본화 주파수를 1 kHz로 하였을 때 1초 동안의 데이터를 나타낸 것으로 약 65 kg 정도의 몸무게를 갖는 사람이 보통 걷는 속도로 지나간 경우이다. 그림 2(b)는 표본화 주파수를 200 Hz로 하였을 때 데이터를 나타낸 것으로 2000 cc급 중형승합차가 약 30 km/h의 속도로 지나간 경우이다. 실험에서 사람과 차량이 운동장에 광 케이블이 매설된 지점을 밟고 지나가게 된다. 시간 영역의 특징을 살펴보면 사람의 경우 한 번의 피크가 발생하며, 차량의 경우 앞 뒤 바퀴로 인하여 두 번 피크가 발생하였다. 이러한 특징을 이용하면 사람과 차량의 침입을 구분할 수 있다. 약 200회 정도의 반복적인 실험 결과 침입자 유무 판단은 90 %였으며, 사람과 차량 구별의 정확도는 75 % 정도로 나타났다. 탐지를 위한 문턱치(threshold)는 반복적인 실험을 통해 직관적으로 구하였다. 여기서 사람과 차량을 구별하는 성능이 상대적으로 낮게 나타났는데 이는 그림 2(a)에서 볼 수 있는 것처럼 입력이 없는 구간에서도 바람과 같은 외부 여건에 의한 잡음 성분으로 인한 것으로 볼 수 있다. 특히 비가 내리거나 바람이 있는 경우 이로 인해 구별 능력이 현저하게 저하되었다.



(a)



(b)

그림 2. 실험 결과 (a) 사람, (b) 차량
Fig. 2. Experimental results (a) man, (b) car.

Ⅲ. 적응 디지털 필터를 이용한 성능 개선

광센서는 침입자에 의한 자극뿐만 아니라 바람, 비, 눈과 같은 다양한 외부 자극에 의해서도 반응하여 결국 신호 대 잡음비를 떨어지게 한다. 이러한 잡음들은 주기적이거나 랜덤하거나 아니면 이들의 혼합된 특징을 가질 수 있다. 일반적으로 잡음은 짧은 구간에서 스테이셔너리(stationary)하므로 적응 디지털 필터를 이용하면 상관성을 갖는 잡음들을 적절하게 제거할 수 있다[8],[9]. 이러한 접근 방법은 실제 침입자가 없는데도 경보가 발생하는 거짓 경보(false alarm)가 나타날 확률을 낮추어 주며, 실제 침입자가 있는 시점에서도 신호 대 잡음비를 향상시켜 감지 확률을 높이게 된다.

적응 디지탈 필터의 주입력은 광센서 출력을 증폭하고 필터링하여 나온 신호를 디지털 형태로 변환한 신호가 되며, 기준 입력은 이 주입력을 일정 시간만큼 지연시킨 신호를 사용한다[10]. 이러한 구성을 적응 예측(adaptive prediction) 시스템이라 한다. 이 경우 적응 필터는 침입자가 없는 대부분의 시간 동안 입력되는 주변 잡음 특성에 적응되어 이를 제거하지만 침입자가 있는 경우 갑작스러운 신호 특성

변화에 적응하지 못하고 그대로 출력으로 내게 된다. 따라서 적응 디지털 예측 시스템은 잡음 입력의 상관성을 낮추는 역할을 하게 한다. 바꾸어 말하면 적응 디지털 예측 시스템의 출력은 대역이 제한된 백색잡음의 성질을 띤다. 특히 본 논문에서는 기존의 일반적인 적응 디지털 예측 시스템보다 성능이 개선된 방법을 적용하였으며, 그 구조를 그림 3에 나타내었다. 이 필터는 크게 두 부분으로 구성되어 있다. 아래 부분은 일반적인 적응 알고리듬을 사용하는 필터이며, 윗 부분은 적응 필터에서 계산된 계수를 그대로 사용하여 필터링하는 역할을 한다. 다만 이 두 필터의 입력 데이터는 D개 샘플만큼 시간

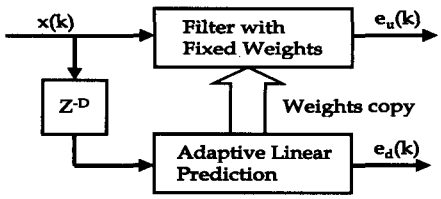


그림 3. 적용된 적응 디지털 필터 구조
Fig. 3. Applied adaptive digital filter structure.

차이가 나도록 하였다. 그 결과 침입자 입력 신호가 없는 구간에서 잡음 성분에 맞추어져 있는 적응 필터의 계수를 사용하면 침입자 신호 발생 구간에서 침입자 신호를 추정하지 못하기 때문에 잡음 성분은

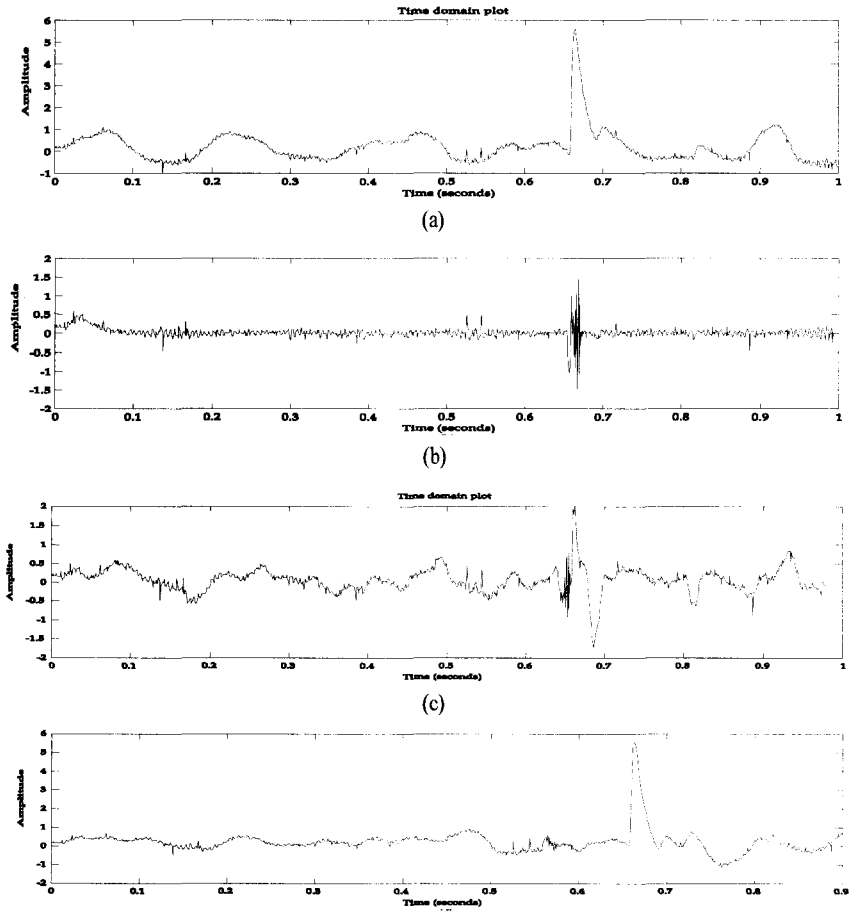


그림 4. 시간 지연 값에 따른 데이터 처리 결과 (a) 원 신호, (b) 5 샘플 지연, (c) 20 샘플 지연, (d) 100 샘플 지연
Fig. 4. Results of data processing according to the time delay. (a) original signal, (b) 5-sample delay, (c) 20-sample delay, (d) 100-sample delay.

제거되고 침입자 신호 성분만 남게 된다. 적응 디지털 예측 시스템내의 필터 구조는 트랜스버설(transversal) 형태로 하였으며, 계수들은 계산량이 비교적 적고 효율적인 최소 자승 평균(Least Mean Square) 알고리듬을 사용하여 갱신하였다. 적응 필터와 고정된 필터 사이의 입력되는 데이터의 시간차 D는 적어도 침입자 신호의 길이보다 길어야 한다. 이에 따라서 적응 디지털 예측 시스템의 계수는 μ가 수렴 상수일 때, 다음의 관계를 갖는다.

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \mu e_a(k) x(k-D-1) \qquad (1)$$

수렴 상수는 입력에 대한 반응 속도를 결정하며, 이 값이 크면 빠른 적응성을 가지지만 상대적으로 높은 오차를 가지며 값이 작으면 오차는 줄어드나 적응 속도가 느린 단점이 있다. 따라서 이 값은 실험을 통하여 얻어진 대상 데이터의 통계적인 특성에 의해 결정되어진다. 적응 디지털 필터 출력 $e_u(k)$는 다음과 같은 크기 함수 M(k)를 계산한 뒤 일정한 문턱치(threshold)를 기준으로 침입자를 탐지한다. 여기서 적용된 창(window) 함수 h(k)는 hanning 함수이다[11].

$$M(k) = \sum_{m=i}^{i} |e_u(m)| h(k-m) \qquad (2)$$

위에서 언급한 적응 디지털 필터를 실측된 데이터를 이용하여 그 효용성을 고찰하기 위해 실험을 수행하였다. 그림 4, 5 및 6은 데이터를 처리한 결과로써 시간 지연 값의 변화, 계수의 개수 변화 및 수렴 상수의 변화에 따른 결과를 나타내었다. 우선 그림 4에는 계수는 10개, 수렴 상수는 0.01인 경우 시간 지연을 5 샘플, 20 샘플 및 100 샘플로 하였을 때 결과를 원래 신호와 비교하여 나타내었다. 이들은 각각 5 msec, 20 msec 및 100 msec에 해당하는 시간

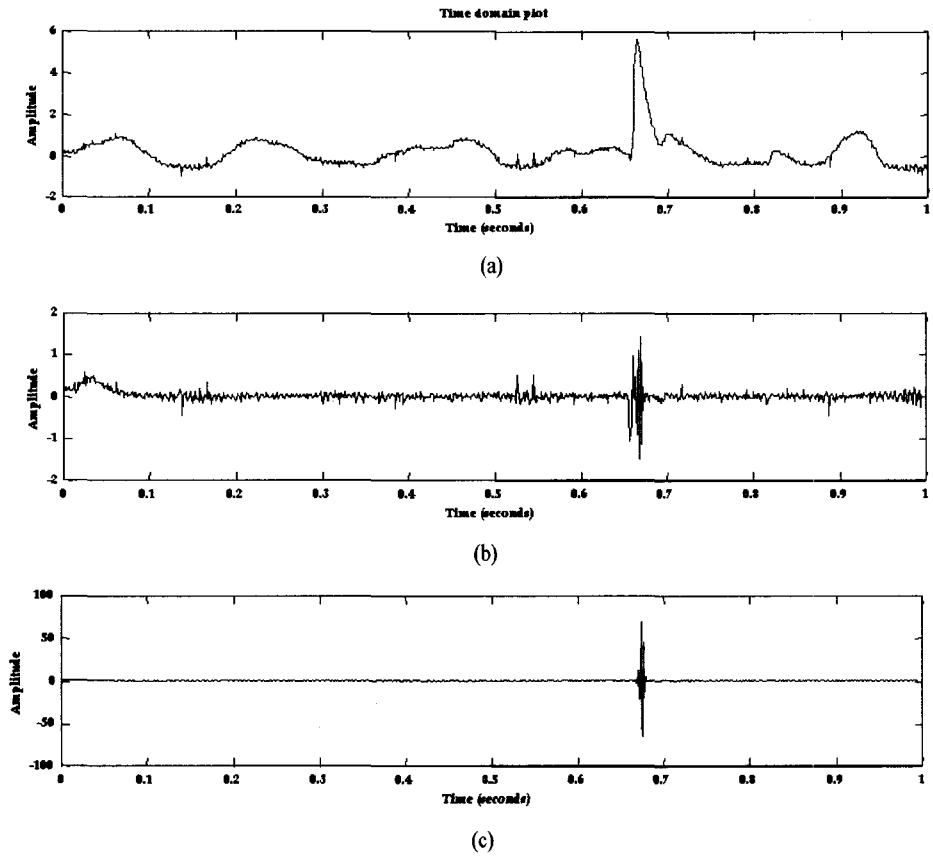


그림 5. 계수의 갯수에 따른 데이터 처리 결과 (a) 원 신호, (b) 10개, (c) 15개
Fig. 5. Results of data processing according to the number of weights. (a) original signal, (b) 10, (c) 15

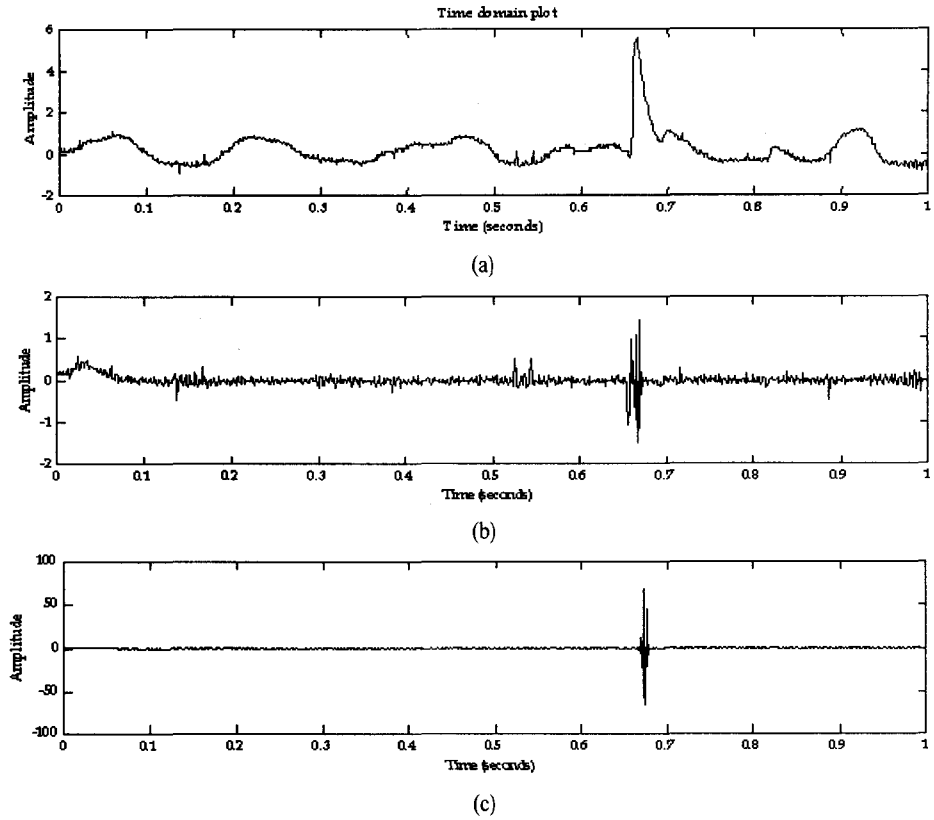


그림 6. 수렴 상수 값에 따른 데이터 처리 결과 (a) 원 신호, (b) 0.01, (c) 0.001
Fig. 6. Results of data processing according to the convergence parameter. (a) original signal, (b) 0.01, (c) 0.001

이다. 이 그림에서 5 샘플 지연인 경우 다른 값들 보다 잡음 성분을 효율적으로 제거하는 것을 볼 수 있다. 이는 상대적으로 짧은 시간 구간 내에서 잡음 신호들 사이의 상관도가 높기 때문에 다른 경우보다 성능이 좋게 나타난다. 그림 5는 시간 지연은 5 샘플, 수렴 상수는 0.01일 때 계수의 수가 각각 10개와 15개인 경우를 비교하였다. 결과는 계수의 수가 증가한 경우가 향상된 성능을 보여주고 있으나 너무 수가 증가하면 계산량 증가와 함께 오버플로우(overflow)가 발생할 확률이 커진다. 그림 6에는 시간 지연은 5 샘플이고 계수는 10개일 때 수렴 상수가 각각 0.01과 0.001인 경우의 결과를 나타낸 것이다. 결과는 수렴 상수가 클수록 적응 필터가 빠른 수렴성을 나타낸 것을 볼 수 있으나 이 역시 너무 크면 발산할 우려가 있으므로 적절한 선택이 요구되어진다. 최종적으로 매설을 1 cm 정도 깊이로 하고, 바닥에 긴 플라스틱 판을 깐 뒤 그 위에 케이블을 설치하고 그 위에 마사토와 같이 부드러운 흙을 덮되 약간의 둔덕을 만들어 탐지 성능을 측정하였다. 그리고 앞의 결과들을 토대로 시간 지연 값은 5 샘플로 하였고, 계수의 수와 수렴 상수는 각각 15개와 0.005

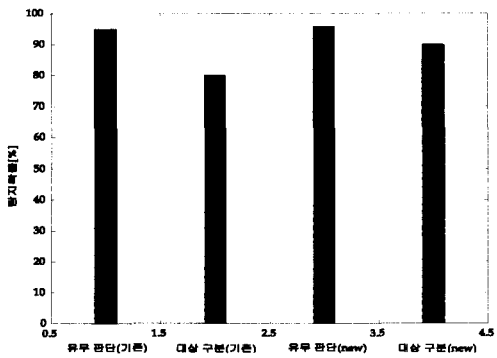


그림 7. 실험에 따른 시스템 성능 분석 결과
Fig. 7. Result of system performance evaluation via experiment.

로 하여 디지털 신호처리 프로세서와 연결된 메모리에 저장하여 동작되도록 하였다. 측정 결과의 신뢰도를 높이기 위해 총 약 600회 정도의 실험이 수행되었으며, 앞선 실험과 마찬가지로 문턱치는 반복적인 실험에 의해 직관적으로 결정되었다. 또한 사람과 차량의 구분은 첫 번째 피크가 발생한 후 500 ms 내에 피크가 발생하지 않으면 사람으로 판단하고 500 ms 내에 피크가 한 번 더 발생하면 차량으로 판단하도록 하였다. 그 결과 기존 시스템으로는 90 % 침입자 탐지 확률 및 75 %의 사람/차량 대상 구분 능력을 나타내었고, 적응 디지털 필터를 거친 경우에는 96 %의 탐지 확률과 90 %의 대상 구분 확률을 나타내었다.

Ⅳ. 결 론

최근 주요 민간 시설물 즉 빌딩, 교량, 방호벽, 터널 등의 침입, 붕괴 등에 대한 위험이 존재하고 있으며 특히 국가의 주요 기간시설, 구조물의 감시가 체계적으로 이루어지지 않고 있어 많은 인적, 물적 피해가 발생할 우려가 있다. 이에 반하여 외국의 경우는 탐지 시스템을 주요 시설물에 설치하여 침입자를 상시 감시하는 연구가 활발히 진행 중에 있다. 따라서 주요시설의 침입자 탐지를 효율적으로 행하기 위하여 침입자 탐지 시스템 개발이 절실히 요구되고 있다. 이에 본 논문에서는 감도가 높고 넓은 지역을 감시할 수 있으며 원거리 감시가 가능한 멀티모드 광섬유에서 전송되는 빛의 모드와 모드 사이에 간섭 때문에 발생하는 스페클 패턴의 변화를 이용하는 광섬유 침입자 탐지 시스템을 구현하였다. 또한 운용 과정에서 외부 잡음 요인으로 인한 성능 저하 요인들을 감소시키기 위한 신호 처리 알고리듬이 개발되었다. 이를 위해 적응 디지털 신호 처리 기법을 도입하여 환경 요인으로 인한 잡음들을 효율적으로 제거하였다. 이러한 환경 잡음들은 시스템 잡음과는 달리 시간에 따라 그 특성이 변화하므로 이를 제거하기 위한 필터 특성 역시 그때마다 변화되어야 한다. 이러한 특성을 만족시키는 것이 적응 디지털 필터이다. 실험 결과 침입자 탐지 능력뿐만 아니라 대상 구별 능력도 향상되었다.

본 논문에서는 사람과 차량을 구별 성능을 향상하기 위한 적응 알고리듬을 개발하였으나 잡음의 종류에 따라서는 아직 완벽하게 구별하지 못하고 있으며 현재처럼 크기 함수와 더불어 추가적인 파라메타를 사용하여야 할 것으로 본다. 앞으로 이에 대한 연구가 필요하며 다양한 환경 데이터를 수집하여 적응 필터의 각종 파라메타들을 결정하여야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] J. Park, W. Lee and H. Taylor, "Fiber optic intrusion sensor with configuration and optical time-domain relectometer using coherent interference of Rayleigh backscattering", *Optical and Fiber Optic Sensor Systems*, pp. 49-56, 1998.

[2] A. D. Kersey, K. L. Dorsey and A. Dandridge, "Transmissive serial interferometric fiber sensor array", *IEEE J. Lightwave Technology*, vol. 7, pp. 846-852, 1989.

[3] 엄년식, 김요희, 양승국, 오상기, 김인수, 박재희, 강신원, "스페클 패턴을 이용한 침입자 센서", 대한전자공학회 논문집, 38(3), pp. 236-242, 2001년 3월.

[4] Shizhuo Yin, P. P. Francis and T. S. Yu, "Application of fiber specklegram sensor to fine angular aligment", *Optics Communications*, vol. 170, pp. 15-21, Oct. 1999.

[5] 김인수 외, 침입 감시용 광 스페클 방식 광섬유 센서 시스템 개발, 한국전기연구원, 2001년.

[6] *TMS320C3x User's guide*, Texas Instruments, 1994.

[7] *TMS320 Floating-point DSP Assembly Language Tools User's guide*, Texas Instruments, 1991.

[8] B. Widrow, et al., "Adaptive noise cancelling : Principles and applications", *Proc. IEEE*, vol. 63, pp. 1692-1716, Dec. 1975.

[9] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*, Prentice-hall, 1991.

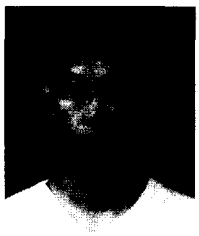
[10] N. Ahmed, et al., "On an intrusion-detection approach via adaptive prediction", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-15, no. 3, pp. 430-438, May 1979.

[11] L. R. Rabiner, R. W. Schafer, *Digital processing of speech signals*, Prentice-hall, 1978.

김 인 수

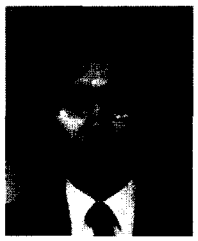
1984년 2월: 동아대학교 전자공학과 (공학사)
1986년 2월: 동아대학교 전자공학과 (공학석사)
1986년 2월~현재: 한국전기연구원 전자의료기기연구그룹 책임연구원
1997년~1998년: Shanghai 803 Research Institute, Visiting Scientist
1998년~2000년: SIOM, Visiting Scientist
2003년~2004년: SUT, Visiting Researcher
[주 관심분야] 광섬유 센서, 광기술, 양자 암호화, 전자의료기기

강 진 석



2003년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2003년 3월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
[주 관심분야] 디지털 신호처리, 수중 통신

김 기 만



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
1995년 3월~1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의용공학교실 (Fellow)
1996년 9월~현재: 한국해양대학교 전파공학과 부교수
[주 관심분야] 수중 통신, 신호처리, DSP 및 CPLD 구현