

가청 주파수대 음장 변화 측정 기반 침입 감지 기술

Intrusion detection based on the sound field variation of audible frequency band

이성규† · 박강호* · 양우석* · 김종대*

Sung Q Lee, Kang-Ho Park, Woo Seok Yang, Jong Dae Kim

김대성** · 김기현** · 왕세명**

Daesung Kim, Kihyun Kim and Semyung Wang

Key Words : Security(보안), Audio frequency (가청음향), Sound field variation(음장변화)

ABSTRACT

In this paper, intrusion detection technique based on the sound field variation of audio frequency in the security space is proposed. The sound field formed by sound source can be detected with the microphone when the obstacle or intruder is positioned. The sound field variation due to the intruder is based on the interference of audio wave. With the help of numerical simulation of sound field formations, the increase or decrease of sound pressure level is analyzed not only the obstacle, but also the intruder. Even the microphone is positioned behind the source, sound pressure level can be increase or decrease due to the interference.

Frequency response test is performed with Gaussian white noise signal to get the whole frequency response from 0 to half of sampling frequency. There are three security cases. Case 1 is the situation of empty space with and without intruder, case 2 is the situation of blocking obstacle with and without intruder, and case 3 is the situation of side blocking obstacle with and without intruder. At each case, the frequency response is obtained first at the security space without intruder, and second with intruder. From the experiment, intruder size of 50cm x 50cm can be successfully detected with the proposed technique. Moreover, the case 2 or case 3 bring about bigger sound field variation. It means that the proposed technique have the potential of more credible security sensing in real situation.

1. 서 론

최근 안전을 위협하는 상황의 증가와 보안의식 및 기술의 첨단화로 말미암아 보안시장은 그 규모가 확대되어가고 있다. 보안기술은 사람이 직/간접적으로 필요로 하는 상황에서 진보하여 자동 경비/경계 시스템으로의 진화를 계속하고 있다[1].

보안시스템에 사용되는 센서는 매우 다양하지만, 센서마다의 동작원리와 장단점이 달라 상호 보완적인 역할 분배를 통해서 신뢰성 있는 보안시스템을 구축하게 된다. 건물 내 침입을 감지하는 기술로 대표적인 기술은 영상센서, 적외선 센서, 마이크로웨이브센서, 레이더센서 등이 있다. 이중 CCTV 로 대표되는 영상센서는 침입자의 영상변화를 보고 침입 여부를 판단하는 것으로 렌즈오염이나 빛과 그림자에 의한 오보가 빈번히 발생하는 단점이 있으며 특히 밤에는 조명이 있어야 한다는 큰 단점이 존재하여 전력 소모면에서 취약성이 존재한다. 적외선 센

서는 값이 싼 수동형 소자에서부터 값비싼 능동형 소자까지 존재하나, 열 차폐에 의한 오보의 단점이 존재한다. 기타 다른 센서들도 특수한 경우에 매우 유리하나, 또 다른 경우에는 취약성을 가지고 있어 필요한 경우에 적절한 통합 보안시스템으로 구성 해야 한다.

본 논문에서는 빌딩 내 센서 노드에 장착되어 빌딩내부의 사무실이나, 중요한 공간에 대해서 보안시스템을 설정하는 기술 중 가청 주파수대의 파장으로 형성되는 음장이 침입에 의해서 변화되는 정도를 감지하여 1 차 보안경계를 구현하는 기술에 관한 기초 연구결과를 소개하고자 한다.

저가의 스피커와 마이크로폰에 의해서 측정이 가능한 음장 변화 감지 센서모듈은 스피커에 의해서 발생된 음장이 침입 물체에 의해서 왜곡되는 정도를 측정하여 감지하는 기술로, 어두운 환경에서도 감지가 가능하며, 전력소모 및 가격 측면에서 매우 유리하다. 또한 제안 기술은 침입 물체에 의한 음향 회절 및 반사/흡수를 이용한 것으로, 파장이 실내 장애물에 비해 길어 장애물 뒤쪽으로는 침입에 대해서도 감지가 가능하므로 직진성이 높은 적외선, 초음파, 마이크로웨이브 방식에 비해서 효과적인 공간 경계가 가능하다[2]. 게다가, 본 기술은 1 차 공간 경계기술로 침입이 인식될 경우 CCTV 와 같은 2 차

† 교신저자 : 한국전자통신연구원

E-mail : Hermann@etri.re.kr

Tel : (042) 860-1142, Fax : (042) 860-5608

* 공동저자 : 한국전자통신연구원

** 공동저자 : 광주과학기술원

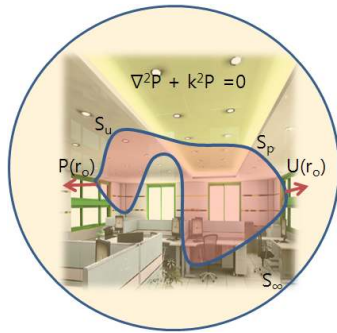
고급의 센서기술과 연동하여 효과적인 보안 시스템을 구성할 수 있다.

본 논문에서는 장애물이나 침입물체에 의한 음장 변화 현상에 대한 개념을 설명하고, 대표적인 보안 환경 속에서 음장 변화를 음향 방사 해석을 통하여 분석을 한다. 장애물과 침입물체에 의한 음향 상호 간섭과 그에 따른 음장 변화 현상을 2 차원 무향 공간에서 실험을 통해서 파악하고, 본 기술의 가능성을 검증 한다.

2. 음장 변화 측정 기반 침입 감지

2.1 절 음장 형성 및 음장 변화 현상

일반 보안 공간은 그림 1 에서와 같이 음파 방정식($\nabla^2 P + k^2 P = 0$)이 지배하는 공간과, 압력($P(r_0)$) 및 속도($U(r_0)$)를 바탕으로 하는 음원, 그리고 속도 경계(S_u), 압력경계(S_p), 무한 경계(S_∞)로 모델링 된다[3].



<그림 1. 음향 공간의 음원 및 경계 조건>

본 논문에서는 음장 변화에 기반한 보안공간을 형성하기 위하여 먼저 그림 2 에서와 같이 한쪽 벽에 속도경계조건을 가지는 음원 생성 소자인 스피커를 배치하고, 감시공간 네 꼭지점에서는 마이크로폰을 배치하여 그 위치에서의 음압과 위상을 정보를 획득하여 음장 변화를 감지한다. 이때 스피커에 들어가는 입력신호와 마이크로폰에서의 출력 신호를 통해서 감시공간에서의 전달함수를 구할 수 있게 된다. 그림 2 에서와 같이 실제 음장은 물체에 의해서 음파가 왜곡되는 현상이 일어나게 되며, 파장에 따라 회절, 반사/흡수 현상이 복합적으로 일어나게 된다. 이러한 현상을 전달함수 측면에서 보면 용이하다. 즉, 음원의 크기를 q 라 하고, 이의 Laplace transform 을 $Q(s)$ 로, 1 번 마이크로폰에서의 음압을 p_1 이라 하고 이의 Laplace Transform 을 $P_1(s)$ 라 하면, 음향공간에서의 전달함수는,

$$H_1(s) = P_1(s) / Q(s) \quad (1)$$

로 얻어진다.

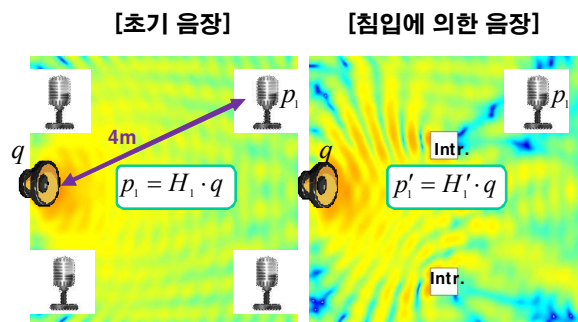
침입이 발생하면 음향공간의 전달함수가 달라지는데, 음향공간에서 침입 물체로 말미암아 변화된 음향공간 전달함수는,

$$H'_1(s) = P'_1(s) / Q(s) \quad (2)$$

로 음원은 동일하나, 측정되는 음압이 달라지므로 말미암아 전달함수가 달라지는 것을 측정할 수 있게 된다. 음장의 변화를 구하기 위해서, 초기 상태의 음장에서 구한 전달함수를 바탕으로 침입에 의해서 변화된 음장의 전달함수의 차이를 구하면 식 (3)과 같다.

$$E(s) = H_1(s) - H'_1(s) \quad (3)$$

본 논문에서는 이러한 음장 변화를 전달함수의 차이를 통하여 감지하여 보안공간에서의 침입을 인식하는 기술에 대해서 제안한다.



< 그림 2. 스피커와 마이크로폰을 이용한 음장 보안공간 형성 및 물체에 의한 음장의 왜곡 현상에 따른 전달함수의 차이 발생 >

2.2 절 대표적 보안 환경

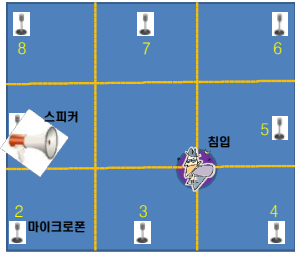
본 논문에서는 음장 변화 감지를 통한 보안 기술의 가능성을 검증하기 위해서 대표적인 침입 상황을 설정하여 해석 및 실험을 수행하였다. 그림 3 에서와 같이 Case 1 은 아무것도 없는 공간을 초기 상태로 하여 침입물체가 한쪽 방향에 들어왔을 때의 상황이며, Case 2 는 전방의 장애물에 의해서 가려지는 상태에서 침입물체가 들어왔을 때의 상황이며, 마지막으로 Case 3 은 측면에 장애물이 있는 상태에서 침입물체가 들어왔을 때의 상황을 나타낸다.

이때, 보안 감시하고자 하는 공간의 크기는 일반적인 사무실을 기준으로 하여 가로 세로 각각 3m의 크기로 설정을 하고, 음원은 스피커를 사용하며 좌측 중앙에 위치하며 1Pa의 음압을 발생한다.

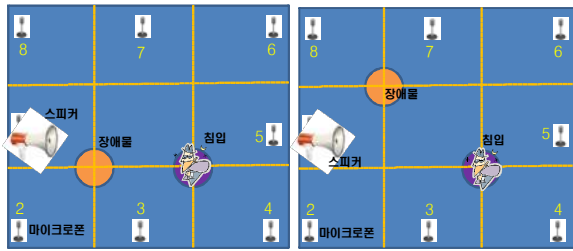
마이크로폰은 4 개의 꼭지점과 4 개의 변 중심에 반시계방향으로 1~8 번으로 설정하나, 실재는 네 꼭지점에 위치한 2,4,6,8 번 4 개의 마이크로폰만을 이용하여 침입을 판단하였다.

침입물체 및 장애물은 각각 지름 50cm의 원형으로 가정하여 음향에 대해 등방향 특성을 가지도록

하였다.



(a) case1: 빈 공간에 침입 발생 경우

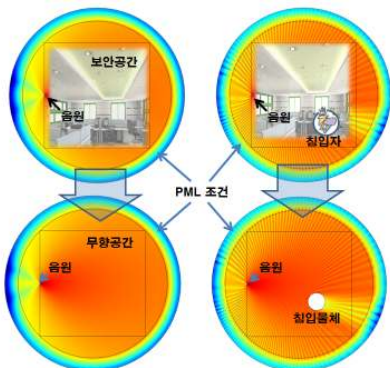


(b)case2: 정면장애물, (c)case3: 측면장애물

<그림 3. 대표적인 침입상황: (a) case 1, (b) case 2, (c) case 3>

2.3 절 음장 변화 해석- 침입에 따른 음장간섭

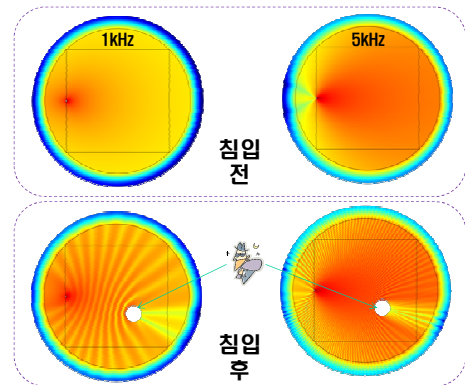
장애물과 침입에 의한 음장 변화 현상을 이해하기 위해서 상용해석 도구인 COMSOL 을 이용하여 음장 변화 해석을 수행하였다. 음장 형성은 가속도 음원을 사용하였으며, 경계조건으로는 무향실을 가정하여 반지름 1.5m 이상에서는 무한 경계조건인 PML(Perfect Matching Layer)를 설정하였다. 감시하는 공간인 보안공간은 무향 공간으로 모델링 하였으며, 침입자 및 침입 물체는 본 논문에서는 각각 Sound Hard Wall 로 가정을 하여 수행하였다. 그림 4 는 해석을 위한 조건을 나타낸다[4].



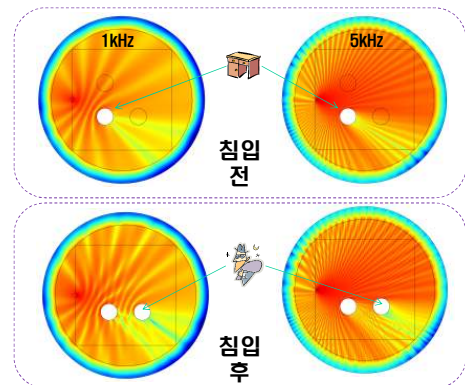
<그림 4. 보안공간, 음원, 침입자, 물체에 대한 해석 모델>

침입 감지의 신뢰도를 높이기 위해서는 하나의 주파수를 사용하는 것보다는 여러 개의 주파수를 사용하는 것이 효과적이므로, COMSOL 을 이용하여 다중 주파수 스캔 방식의 알고리즘을 검증해 보았다. 그림 5 는 1kHz, 5kHz 음원에 대해서 각 침입 상황에서의 SPL 값을 본 결과이다. 그림 5-(a)에서는 Case 1 에 대한 해석 결과로, 아무것도 없는 상황에서 평온하던 음장이 침입 물체로 말미암아 간섭무늬 효과가 나타난다. 즉 침입 물체에 의해서 음장의 변화가 일어나는데, 주파수에 따라 음파의 촘촘함이 결정된다.

Case 2 에 대한 결과는 그림 5-(b)와 같으며, 전방에 장애물이 있는 상태에서 침입물체가 들어온 상황으로 음압이 감소하는 영역도 있지만 전반적으로는 간섭효과에 의한 음파의 보강/상쇄 현상이 두드러지게 나타난다.

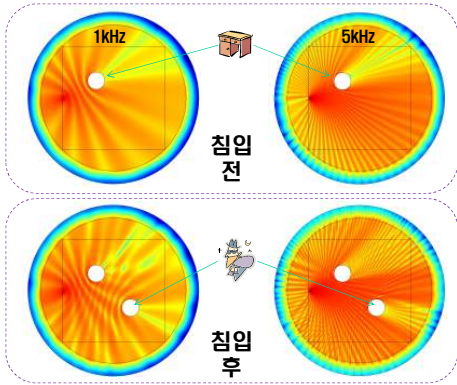


<그림 5-(a): Case 1 에 대한 1kHz, 5kHz 에서의 음장 변화 해석>



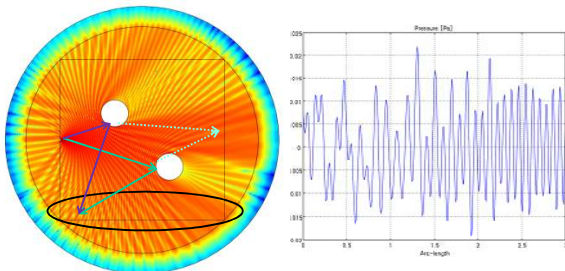
<그림 5-(b): Case 2 에 대한 1kHz, 5kHz 에서의 음장 변화 해석>

그림 5-(c)는 Case 3 에 대한 결과로, 측면에 장애물이 있는 상태에서 침입물체가 들어온 상황으로 Case 2 와 유사하며 간섭의 효과가 주파수와 거리에 따라 발생하는 패턴이 다르게 나타난다.



<그림 5-(c): Case 3 에 대한 1kHz, 5kHz 에서의 음장 변화 해석>

그림 6 은 이러한 음장 변화 현상을 분석하기 위해서 벽면 아래 면에서의 음압을 나타낸 것으로 침입 물체에 의해서는 음압이 감소하는 현상보다는 간섭효과에 의해서 +/-를 반복하는 현상이 더 우세하므로 침입물체의 인식 여부는 음압 감소를 측정하거나, 평균적인 값을 취하기 보단 절대 값을 취하여 판단하는 것이 바람직하다는 것을 알 수 있다.



<그림 6: 침입에 의한 음장의 간섭현상>

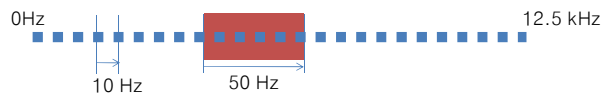
3. 실험 및 결과

3.1 절 실험 장치 구성

본 논문에서는 침입감지에 대해 2 차원 무향 공간에서 실험을 수행하였다. 측정 환경은 가로 세로 3m의 무향실이며, 음원은 BRITZ 사의 5W 급 스피커를 사용하며, 10cm 전방에서, 94dB의 Gaussian white noise 를 발생 시켰다. 데이터 획득을 위해 샘플링 주파수를 25600Hz 로, 주파수 분해능은 10 Hz 로 설정하였다. 음압 및 위상으로 대변되는 음장을 측정하는 마이크로폰은 높이 44 cm 에 위치시키고, 반시계 방향으로 1 ~ 8 번으로 설치 하였다. 침입물체로는 지름 50cm, 길이 1.5m 의 PVC 파이프를 사용하여 무향실 위에서 볼 때 원형의 침입물체가 되도록 설정하였으며, 장애물 또한 지름 50cm, 길이 1.5m 의 PVC 파이프를 사용하였다.

실험은 스피커에서의 입력 전압 대비 마이크로폰에서의 출력 전압의 주파수 응답 특성을 측정하여 수행하였다. 주파수 응답 특성 실험은 0Hz 에서 12.5kHz 의 샘플 주파수 반까지의 값을 동시에 측정하며, 신뢰도 향상을 위해서 25 회 평균값을 채택하여 하나의 주파수 응답 특성을 구한다. 주파수 응답 특성을 구한 후에는 침입 발생 전과 침입 발생 후의 음압 차를 구한 다음, 음압이 간섭에 의해서 +/-값으로 나타나는 Error 값을 식(4)에서와 같이 절대값을 취하였다. 절대값을 취하는 과정은 그림 7 에서와 같이 음압차 값 데이터를 50Hz 구간으로 Norm 값을 취하여 중심 주파수에서의 값으로 설정 한다. 이는 평균값 개념으로 10Hz 의 주파수 분해능에서의 민감한 변화를 줄이기 위함이다.

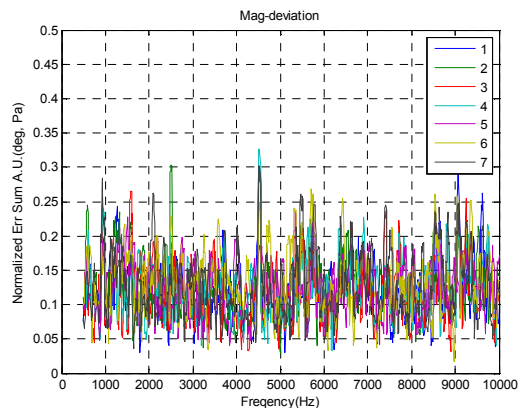
$$|E(s)| = |H_1(s) - H'_1(s)| \quad (4)$$



<그림 7. 0~12.5kHz 까지 50Hz 구간마다 norm 을 취해 각 주파수에서의 오차를 구함>

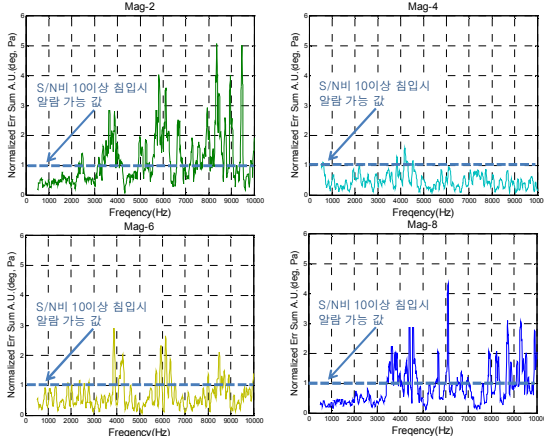
3.2 절 실험결과

침입 판단을 위해 2,4,6,8 번 마이크로폰(꼭지점 위치)에서의 음압 차이에 대한 Norm 값을 주파수에 대해서 얻는다. 침입이 없을 때의 주파수 응답 변화율을 Noise level 로 정의할 수 있는데, 이 값을 구하기 위해서 7 회동안 10 분 간격으로 주파수 응답 특성을 측정하였다. 그 결과, 그림 8 에서와 같이 주파수 응답 변화율의 평균값은 0.1dB 로 측정되었고, 이 값을 보안 감지시의 Noise level 값으로 설정한다. 침입의 여부를 판단하는 기준 값은 경고 알람의 신뢰도를 위해서 S/N 이 10 인 Norm err = 1 인 지점을 경계로 하여 판단한다.



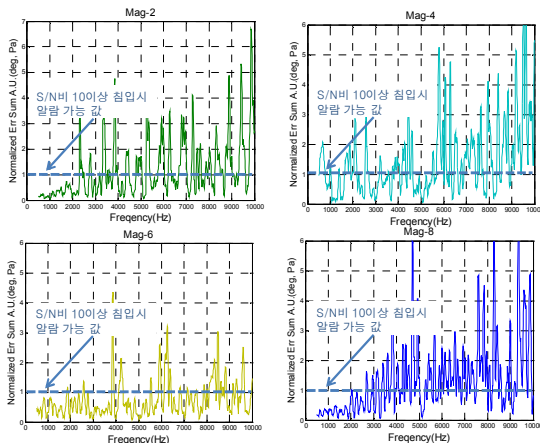
<그림 8. 침입이 없을 때 10 분 간격으로 7 회 측정시 주파수응답특성 : 0.1dB 평균 측정오차>

각 보안상황에 따른 주파수 응답특성을 구하여 알람을 주는 값을 기준으로 살펴보면 다음과 같다. 그림 9는 Case 1의 실험결과이다. 침입시 간섭에 의한 음압 차의 Norm 값을 2,4,6,8 번 마이크폰에서 구하여 얻은 그래프를 살펴보면, 특히 2, 8 에서 큰 변화를 알 수 있으며 모든 경우에 대해서 S/N 비율이 10 이상의 구간이 존재하므로 침입에 의한 음장 변화를 뚜렷이 알 수 있으며 침입에 대한 알람 신호를 얻을 수 있다.



<그림 9. Case 1에서의 2,4,6,8 번의 마이크폰에서의 음장 변화 정도>

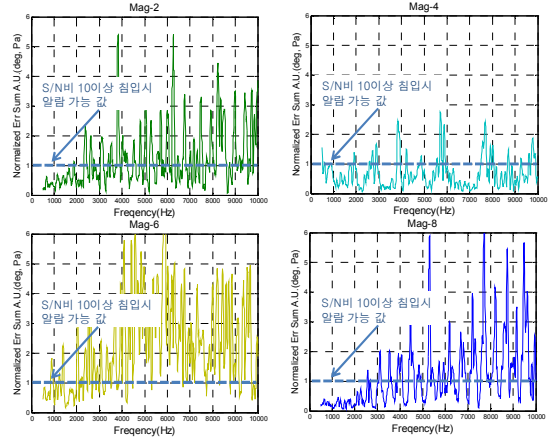
Case 2, 3 에서도 유사한 양상을 보이나 그림 10, 11 에서와 같이 침입 발생 전 상태 대비 침입 발생 후 주파수 스캔 범위 내에서 S/N 비율이 10 배 이상의 음장 변화를 보이는 구간이 상당히 넓은 것을 알 수 있다.



<그림 10. Case 2에서의 2,4,6,8 번의 마이크폰에서의 음장 변화 정도>

주목할 만한 점은, 아무것도 없는 감시공간인 Case I 과 비교해 볼 때는 더 큰 변화를 감지 할 수 있는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 장애물에 의한 간섭효과가 있는 상태에서 침입이 발생되었을 때 그 간섭 현상이 더욱 크게 일어나는 것을 의미한다. 즉,

장애물의 존재가 침입 인식의 방해가 되는 것이 아니라, 오히려 감시에 있어서 더 긍정적인 효과로 나타날 수 있다는 것을 의미하므로 본 기술이 장애물이 있는 실제 공간에 효과적으로 적용될 수 있을 것이라는 기대를 갖게 한다.



<그림 11. Case 3에서의 2,4,6,8 번의 마이크폰에서의 음장 변화 정도>

침입 물체의 크기가 사람과 비슷한 크기인 지름 50cm 인 작은 경우에 대해서 Case 1, 2, 3의 보안상황에 따른 음장 변화 감지 결과를 정리하면 표 1 과 같으며, 알람 신호의 크기에 따라 원 및 이중원으로 표시를 하였다. 실험결과 무향실 공간 2D, 50cm 크기의 침입물체에 대해서 큰 S/N 비로서 침입을 알려주는 알람이 가능함을 결론적으로 알 수 있으며 특히 장애물이 있을 경우 알람을 알리는 신호가 더욱 큼을 알 수 있다.

<표 1. 음장 변화 침입감지 결과>

	Mic 2	Mic 4	Mic 6	Mic 8	알람
무향실, 2D 지름 50cm 침입 Case I	○	○	○	○	ON
무향실, 2D 지름 50cm 침입 Case II	○	○	○	○	ON
무향실, 2D 지름 50cm 침입 Case III	○	○	○	○	ON

4. 결 론

본 논문에서는 침입에 의한 음장 변화를 감지하여 침입을 인식하는 기술을 제안하였다. 스피커와 마이크폰으로 형성된 음장 보안 공간에서 장애물이 있을 때 음장은 파동의 간섭에 의해 음압이 커지거나 작아지는 특성을 갖는다. 이를 이용하여 침입 전과 후의 주파수 응답 특성을 각각 구하고, 그 차이에 대해서 Norm 값을 취하여 분석해본 결과 침입에 의한 음장 변화를 감지 할 수 있었다.

본 논문에서는 이러한 침입에 의한 음장 간섭현상을 보안공간을 2D, 무향공간으로 설정하여 COMSOL 을 이용하여 수치해석적으로 분석하였다. 분석결과 음장은 장애물이나, 침입에 의해서 단순 작아지기보다는 회절과 간섭에 의해서 음압이 커지거나 작아지는 현상이 나타난다.

화이트 노이즈를 음원으로 하는 주파수 응답 실험을 Case 1, 2, 3 의 대표적인 보안상황에 대하여 수행하였으며, 그 결과 50cm x 50cm 크기의 원형 침입 물체에 대해서 성공적으로 침입을 감지하는 것을 알 수 있었다. 더욱이 장애물이 있는 case 2, 3 의 실험결과 값을 아무것도 없는 감시공간인 case 1 과 비교해 볼 때 음장의 변화가 더 커진 것으로 나타났으며, 이는 장애물에 의한 간섭효과가 있는 상태에서 침입이 발생하였을 때 그로 인한 간섭 현상이 더욱 크게 일어나는 것을 의미한다. 즉, 장애물이 있어서 침입 인식의 방해가 되는 것이 아니라, 오히려 더 긍정적인 효과로 나타나므로 본 기술이 장애물이 있는 실제 공간에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

향후 실제 장애물체의 경우 음향 임피던스가 다양하게 존재하므로 다양한 음향 임피던스를 갖는 장애물에 대해서 연구를 진행할 예정이며, 침입물체에 대해서도 반사 정도나 임피던스 정도가 다른 조건에 대해서도 수행 할 계획이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음. [10035570, 스마트&그린 빌딩용 자가충전 지능형 센서노드 플랫폼 개발]

참 고 문 헌

(1) 정용택, 2009, “ 보안센서 현황과 전망” , 전자공학회지 제 36 권 10 호. pp. 1093~1103

(2) Victor Kremin, 2002, “ Ultrasound motion sensor” , Cypress Microsystems, Application note, pp. 1~11

(3) 김양한, 2005, “ 음향학 강의” , 청문각

(4) COMSOL User' Guide , “ Piezoacoustic Transducer”