

선박내 소음 환경 개선을 위한 능동소음제어 시스템 구현

이 병 도* · 전 태 인**

Implementation of an Active Noise Control System for Improvement of Noise Environment in a merchant ship

Byungdo Lee* · Tae-In Jeon**

Abstract

The acoustic noise in a merchant ship is caused by various noise sources such as the sound generated by operating a M/E, generators and pumps. It has not only the periodical characteristics but also high power in low frequency below 500Hz. Active noise control technique can be easily applied to eliminate the acoustic noise in a ship.

In this thesis, it has been studied active method with design technique of adaptive filter rather than passive method which putting on headphone using sound absorbing or interceptive materials. Computer simulation and experimental results show that the proposed active noise control method is effective to reduce the acoustic noise in a specific space like a bedroom. Also, a new method using time delay neural network theory to model the secondary path in active noise control system is proposed.

It has been used to model unknown characteristics of the elements which are composed of analog low pass filter, power amplifier, pre amplifier, A/D · D/A converter. Also, the time delay neural network theory is used to compensate the non-linear characteristics between speaker and microphone in specific frequency

* 한국해양대학교 전기공학과 석사과정 전기공학 전공

** 한국해양대학교 전기공학과 교수

band. Moreover, a blind separation algorithm is studied to separate a noise signal from a sound signal without detail informations of the acoustic signal. It is used as a preprocessor for an intelligent active noise canceller for which cancels only noise signals without affecting an original sound signal.

제 1 장 서 론

선박내의 작업 환경은 매우 열악하다. 선상에서의 생활을 힘들게 하는 많은 요인들 중 발전기, 팬, 및 기관 등에 의해 발생하는 소음은 그 정도가 매우 심각하여, 선상 작업자의 청각 장애를 유발하여 작업 의욕을 떨어뜨릴 뿐만 아니라, 주어진 현장 상황에 적합한 지시 사항을 작업자에게 정확히 전달하는데 상당한 어려움을 유발하고 있다. 이를 개선하기 위해, 무선 헤드폰과 마이크 등을 이용하여 선박내 소음 환경 하에 의사 소통을 수행하고 있으나 그 성능에 상당한 한계가 있다. 따라서, 보다 나은 선박내 작업 환경을 만들기 위해서는 보다 우수한 성능을 갖는 소음 제어 기술이 개발되어야 할 필요가 있다. 최근에 소개된 능동 소음 제어 기법은 저주파수 소음을 효과적으로 차단할 수 있어 선박내에 존재하는 다양한 저주파수 소음을 상당히 차단할 수 있을 것으로 기대된다. 따라서, 본 연구에서는 선박내의 다양한 소음원들의 특성을 분석하여, 선실의 침실 부근 소음을 헤드셋의 도움 없이 효과적으로 줄여 줄 수 있는 능동소음 제어 시스템을 개발한다.

보다 나은 성능을 갖는 능동소음제어 시스템을 구현하기 위해서는 능동 소음 제거기를 구성하는 증폭기, 마이크로폰, 필터, 및 스피커의 비선형성에 대한 고려가 있어야 한다. 그러나, 기존의 능동소음제어 시스템에서는 각 소자들에 포함된 비선형성을 충분히 고려하지 못하고 있다. 본 논문에서는 2차 경로의 비선형 특성을 시간 지연 신경회로망을 이용하여 모델링하는 새로운 방법을 제안한다. 일반적으로 마이크로폰을 통해 얻은 신호에는 신호원과 잡음원이 동시에 존재한다. 기존의 능동 소음 제거기는 마이크로폰에서 얻은 신호가 우리가 원하는 신호원이든 잡음원이든 상관없이 적응적으로 제거하므로, 원하는 신호원에 대한 정보의 손실이 존재할 수 있다. 만약, 신호원과 잡음원을 분리해 낼 수만 있다면, 잡음원만을 적응적으로 제거하는 지능형 능동 소음 제거기의 구성이 가능하다. 최근에, 소음원에 대한 사전 정보 지식 없이 각각의 음원들을 분리해 낼 수 있는 신호원 분리 방법이 소개되었다. 본 논문에서 신호원과 잡음원이 동시에 존재하는 경우, 신호원의 정보 손실 없이 잡음원만 선별적으로 제거하기 위한 지능형 능동 소음 제거기의 전처리 프로세스로서 신호원 분리 알고리즘을 이용할 수 있는 가능성을 살펴본다.

제 2 장 능동소음제어

능동소음제어 기법이라 함은 그림 1과 같이 소음에 대해 위상이 180° 반전된 인공음을 적응 필터를 통해 발생시켜 두 신호의 상호 결합에 의한 중첩의 원리를 이용하여 소음을 감소시키고자 하는 이론이다^[1].

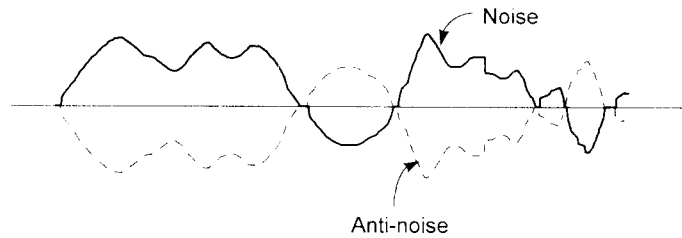


Fig. 1 The principle of an active noise control

능동소음제어에는 피드포워드 능동소음제어와 피드백 능동소음제어로 구분될 수가 있다. 본 논문에서는 좁은 공간에 대한 소음제어를 위해 피드백을 사용한다.

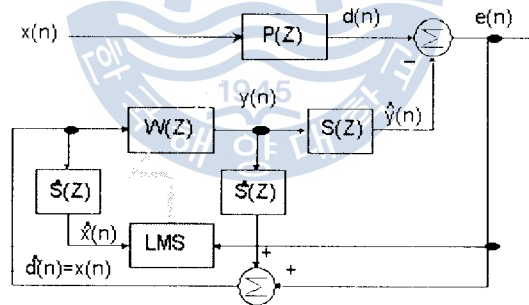


Fig. 2 Block diagram of feedback ANC

제 3 장 능동소음제어 시스템의 성능 향상

3.1 시간 지연 신경회로망을 이용한 2차 경로 함수 모델링

2차 경로 함수는 필터 출력과 오차 신호와의 합점 사이의 스피커-공기-마이크로폰으로 구성된다. 2차 경로는 주파수적으로 민감하고 상당한 비선형성을 포함하고 있기 때문에 오차 신호의 크기 및 위상을 왜곡시킨다. 이러한 오차 신호의 크기 및 위상 왜

꼭은 결과적으로 최소 평균 자승 알고리즘의 성능을 저하시킨다. 또한, 최소 자승 오차 알고리즘의 수렴 속도가 느려지기도 하며, 잉여 오차는 증가되어 알고리즘을 불안하게 하는 요인이 될 수도 있다^[2].

그래서, 이러한 문제점의 개선을 위해 비선형성의 특성을 갖는 시스템에 있어서 스스로의 학습을 통해 그 특성을 쉽게 동일화할 수 있고 신경망이 갖는 시그모이드의 비선형성과 적응성 및 일반화 능력을 갖는 신경망 기술을 이용한다. 본 논문에서는 시간 지연 신경 회로망(time delay neural network, TDNN)을 사용한다^[3].

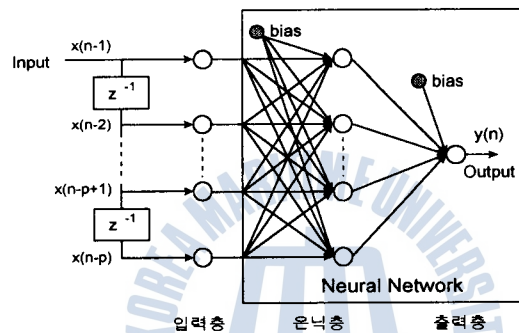


Fig. 3 Time delay neural network

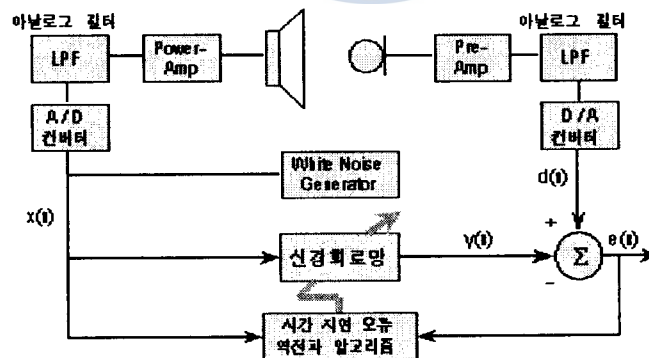


Fig. 4 Block diagram of secondary-path modeling using time delay neural network

그림 4는 2차 경로 함수 $S(Z)$ 를 시간 지연 신경 회로망을 이용하여 모델링하는 과정을 나타낸 것이다. 백색잡음을 입력층의 시간 지연 소자를 통해 입력하고, 2차 경로에 대한 동일화를 오차 역전달 알고리즘을 이용하여 2차 경로의 출력인 목적 패턴

성분값 d 와 신경망 출력 패턴의 성분값 y 와의 오차가 원하는 수렴영역에 도달할 때까지 연결 가중치를 갱신한다.

그림 5는 백색잡음을 입력으로 하고 목적 패턴 성분값에 대해 신경망의 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 그림에서 실선은 목적 패턴의 성분값을 나타내고, 점선은 신경망의 학습을 통해 2차 경로의 특성을 동일화한 것이다.

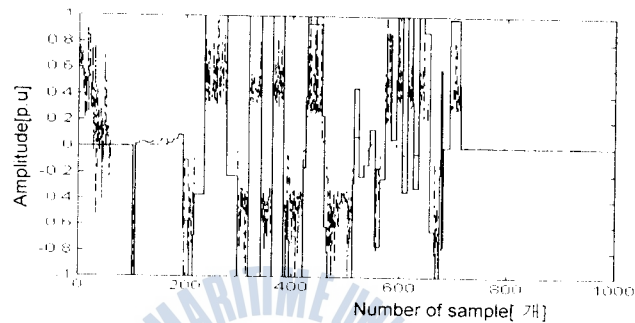


Fig. 5 Simulation result of secondary-path modeling using time delay neural network

그림에서 알 수 있는 것과 같이 신경망을 이용한 2차 경로 함수의 모델링이 모양이나 진폭이 거의 일치함을 알 수가 있다.

3.2 신호원과 잡음원의 분류 알고리즘

이 상에서는 능동소음제거기의 성능 향상을 위한 또 다른 방법으로 임의의 공간상에 신호원과 잡음원이 혼재하는 상황에서 신호원과 잡음원에 대한 사전 정보 지식 없이 마이크를 통해 입력된 신호들을 이용하여 적절히 설계된 분류기를 통해 신호원과 잡음원을 분류하는 전처리 장치와 분류된 잡음 신호를 환경의 변화에 대해서도 능동적으로 제거시킬 수 있도록 능동 소음 제거기를 이용하여 잡음원만 효과적으로 제거할 수 있는 시스템 장치를 제안한다. 이 시스템은 전처리로서 제어하고자 하는 특정 공간에 존재하는 신호원들을 분류하여 존재하는 신호가 원하는 신호인지 아닌지를 판단하고, 원하지 않는 신호인 경우는 적절한 소음 제거 제어장치를 사용하여 제거하고자 하는 것이 그 원리이다.

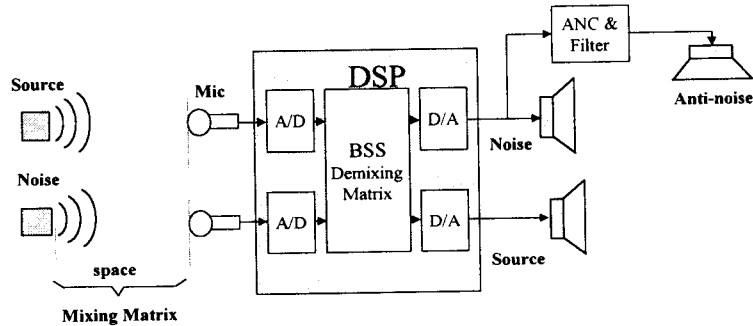


Fig. 6 Noise cancel method using blind source separator

3.2.1 신호원 분류의 원리

신호 분류(blind source separation, BSS)의 발상은 서로 상호간에 통계적으로 독립인 신호들이 어떻게 섞여 있는지에 대한 아무런 지식 없이 원 신호들을 복구하는 것이 목적이다^[4].

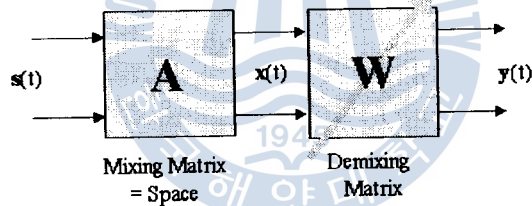


Fig. 7 Principle of BSS

그림 7과 같이 어떤 고정된 시간 t 에서 상호 독립이고 stationary process이며, 각각의 신호들은 어떠한 차수 상에서 모멘트를 가지며 가우시안 분포를 갖는 n 개의 알려지지 않은 신호원 $s(t)$ 가 존재한다면, 공간(Mixing Matrix) A 를 통하여 센서로 검출되는 검출 신호 $x(t)$ 는

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{A} \mathbf{s}(t). \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 은 알려지지 않은 비특이 혼합 행렬이다. 신호원과 혼합행렬의 지식 없이, 다음의 선형변환에 의해 관찰자 $\mathbf{x}(t)$ 로부터 원신호를 복원하기 위해 demixing 행렬 \mathbf{W} 를 찾는 것이 최종목적이 된다.

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{W}(t) \mathbf{x}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{W} = \mathbf{A}\mathbf{P}\mathbf{A}^{-1} \quad (3)$$

여기서, \mathbf{A} 는 비특이 대각 행렬이고, \mathbf{P} 는 permutation 행렬이다. demixing 행렬 \mathbf{W} 가 식 (3)과 같이 될 때 출력 $\mathbf{y}(t)$ 는 원신호 $\mathbf{s}(t)$ 와 같은 신호로 복원된다.

demixing 행렬을 찾기 위한 기존의 방법으로 정보 이론에서 소개된 ME (Maximum Entropy)와 MMI(Minimum Mutual Information)가 있다. ME는 변환된 출력의 정보량을 나타내는 Entropy를 최대화하는 것이고, MMI는 신호간의 구성성분들이 독립적이기 위해 상호정보(Mutual Information, MI)를 최소화하는 방법이다. 신호 분리 알고리즘인 ME를 실현하기 위해서는 신호원이 영평균이어야 하고 그 편차가 1이어야 하는 전제조건이 만족되어야 하므로 임의의 신호원을 분리하는데는 적절하지 않다. 시뮬레이션한 결과도 만족할 만한 결과를 주지 못했다. 그래서 본 논문에서는 신호 분리 알고리즘을 MMI를 사용한다. 또한, MMI의 실현을 위해서는 MI의 근사가 필요하고 알고리즘의 속도를 향상시키기 위해 natural gradient descent 방법이 사용된다.

3.2.2 시뮬레이션 및 결과 분석

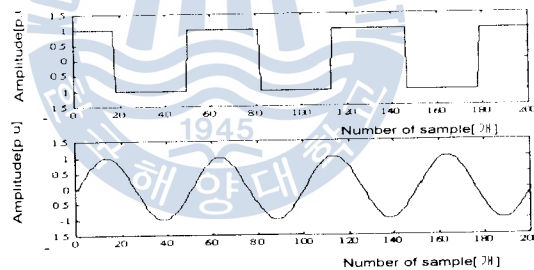


Fig. 8 Source signal

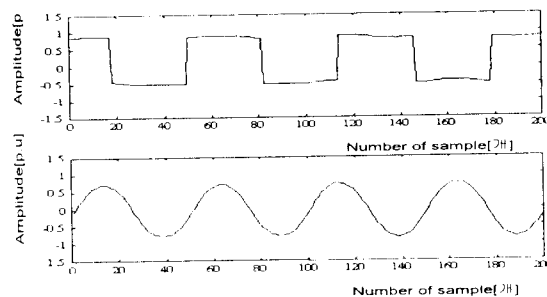


Fig. 9 Output signal of BSS

시뮬레이션을 위해 사용된 신호는 그림 8과 같이 구형파와 정현파이다. 단, 구형파를 원하는 신호라 하고 사인파를 잡음이라고 간주한다.

Mixing 행렬을 거쳐 나오는 신호, 즉 센서에 검출되는 신호를 신호 분류 알고리즘을 이용하여 얻어진 결과가 그림 9이다.

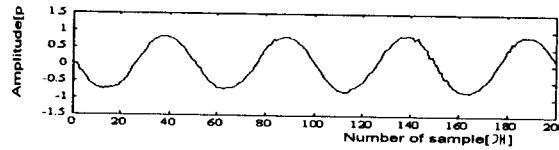


Fig. 10 Anti-noise

그림 10은 분류된 신호에서 잡음원을 제거하기 위해 능동소음제어 처리하여 얻어진 잡음원과 위상이 180° 반전된 신호이다.

그러므로, 위의 결과에 의해 소음 제거 시스템의 전처리 장치로의 적용 가능성을 입증하였다.

다음은 그림 11과 같은 신호 분류기의 실질적인 하드웨어의 구성을 통해 실험한 결과를 나타낸다. 실험을 위해 사용된 신호는 정현파의 400Hz와 3kHz 신호성분이다. 단, 3kHz의 신호를 원하는 신호라 하고 400Hz를 잡음이라고 간주한다.

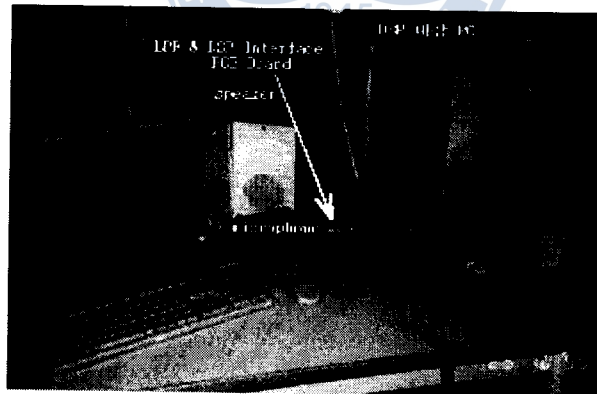


Fig. 11 Applied example of systems

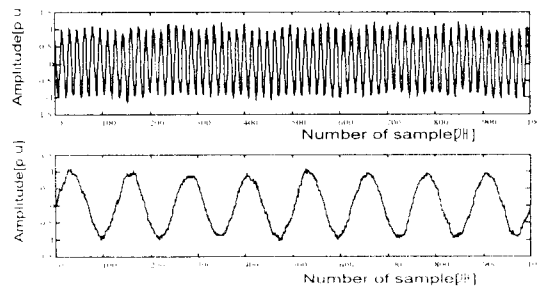


Fig. 12 Source signal

그림 12는 사용된 신호원으로 센서와 증폭기, A/D 컨버터를 통해 DSP의 메모리에 저장하여 얻어진 신호이고, 그림 13은 두 신호원이 섞여 센서에 검출된 신호를 나타낸다.

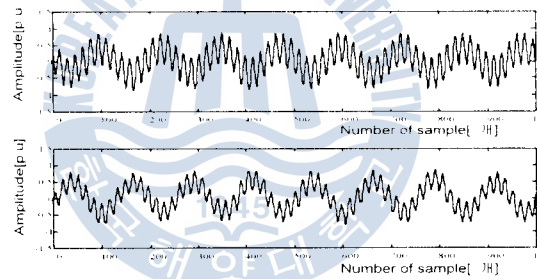


Fig. 13 Detected signal

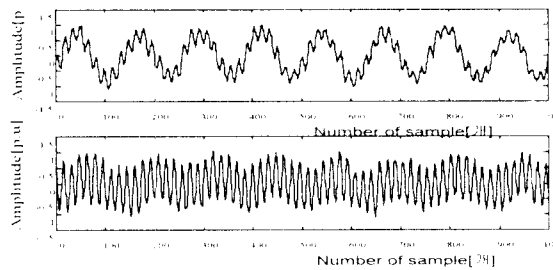


Fig. 14 Separated signal

그림 14는 그림 13과 같이 두 섞인 신호를 입력으로 하여 신호분리 알고리즘을 거쳐 분류된 신호를 의미한다. 또한 그림 14는 신호 분류 알고리즘의 학습한 결과, 즉 신경

망의 각 뉴런을 연결하는 가중치를 고정시킨 후 피드포워드한 결과이다.

따라서, 위의 결과에서 입증할 수 있는 것은 신호원과 잡음원이 동시에 존재하는 경우 신호원의 정보 손실 없이 잡음원만 선별적으로 제거하기 위한 능동소음제어기의 전처리 프로세스로서 신호원 분리 알고리즘이 효용될 수 있는 가능성을 입증하였다.

제 4 장 실험결과 및 고찰

4.1 선박내 소음 스펙트럼 분석

선박내 소음의 제어를 위해서는 소음의 특성을 분석하고 소음원을 밝혀내어 적합한 제어방법을 연구하며, 소음의 주파수 분석을 통해 능동소음제어에 적합한 주파수 대역 인가를 검증해야 한다. 이를 위해 선박내 소음신호의 획득 및 주파수 스펙트럼 분석을 수행하였다. 선박내의 소음 데이터는 DAT(digital audio tape)를 사용하여 녹음하였고, 분포 주파수 성분을 분석하기 위해 스펙트럼 분석기를 사용하였다.

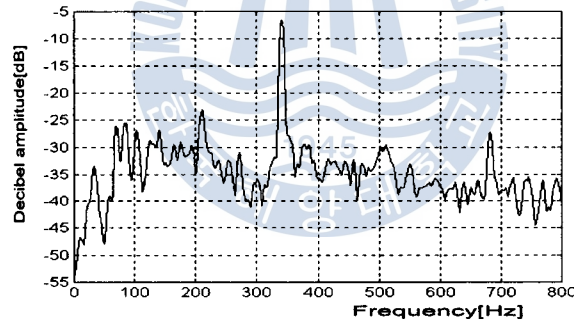


Fig. 15 Spectrum of fan room

그림 15는 선박의 선속이 0knots인 상태에서 팬실에서 측정된 소음으로 340Hz에서 음압레벨이 큰 피크치를 가진다. 또한, 스펙트럼 분석을 행한 장소는 선박의 팬실뿐만 아니라 엔진실, 강의실, 엔진 제어실, 발전기실 등에서 행했다.

위의 스펙트럼 분석을 통해 확인할 수 있는 사실은 선박내 공간에서 갖는 큰 음압의 주파수 분포는 20 ~ 400Hz이다. 이러한 주파수 분포는 주기적으로 회전하거나 반복 작업하는 팬, 엔진, 발전기 등에서 생기는 잡음으로 협대역 주파수 특성을 가진다. 엄밀히 말하자면 선박내에서 발생하는 주파수는 팬이나 발전기 등의 모터가 회전할 때 발생하는 주파수이다. 이러한 특징은 소음의 통계적인 특성이 시변인 경우에 적응 필터

를 이용한 능동소음제어를 적용할 수 있게 한다.

4.2 시뮬레이션

본 절에서는 잡음환경에 그 성능이 우수한 음성인식 시스템을 개발하기 위해 선박내 발생하는 잡음을 능동적으로 제거하는 능동소음제어 이론의 적용 가능성 여부를 가름하기 위해 시뮬레이션을 통해 미리 검증한다. 좁은 공간에 대한 소음 제어로 라우드 스피커와 마이크로폰 사이의 경로와 시스템의 전기적인 지연 및 하드웨어적 비선형성을 무시한다. 그리고 디지털 저역 통과 필터 설계는 통과역단 주파수를 500Hz로 하고, 샘플링 주파수는 4kHz이며, 천이폭은 167Hz, 저지역단 감쇄량은 50dB 이상으로 하며, 필터 계수는 해밍 창함수를 사용하여 정규화 천이폭 Δf 의 식 (4)와 식 (5)의 관계에 의해 80개로 한다. 시뮬레이션을 위한 소음원은 선속이 8knots인 상태에서 선박내의 침실에서 채취한 것이다.

$$\Delta f = 0.167/4 \approx 0.04175 \tag{4}$$

$$N = 3.3/\Delta f = 79.042 \tag{5}$$

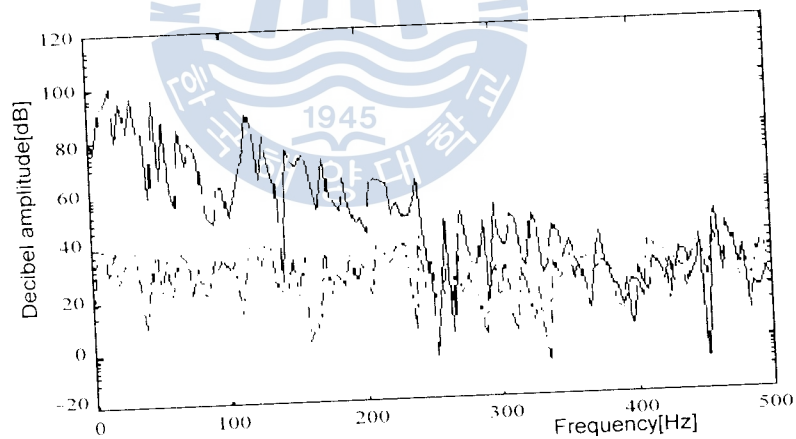


Fig. 16 Spectrum of a noise and system output

그림 16은 실선이 선박 소음이고, 점선이 능동소음 처리되어 나타나는 시스템의 출력으로 스펙트럼 분석한 결과를 나타낸 것이다. 그림 21에서 알 수 있는 것과 같이 선박 소음이 저주파수 부분에서 큰 파워를 가지는 것에 비해 적용 소음 처리된 결과가 약 30dB ~ 40dB의 감쇄 효과가 있음을 확인할 수가 있다. 위 그림에서의 진폭이라 함은 전압 이득을 의미한다.

4.3 실험 및 결과 검토

능동소음제어 시스템의 실질적인 하드웨어 구성은 다음과 같다.

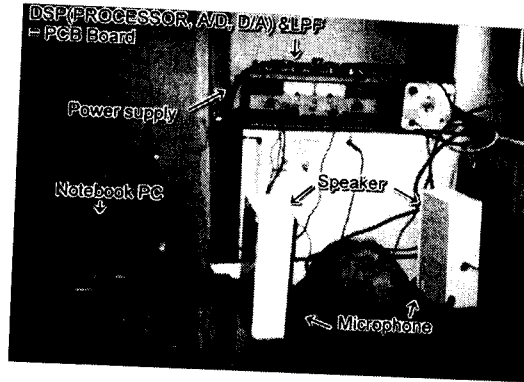


Fig. 17 Applied example of systems in a ship

그리고 실제 시스템에 적용할 때 단일 채널을 사용해서는 소음을 충분히 줄이지 못하므로 이 논문에서는 2채널을 사용하여 소음 제어를 수행하였고 사용되는 적응 필터 계수의 개수는 20개이다.

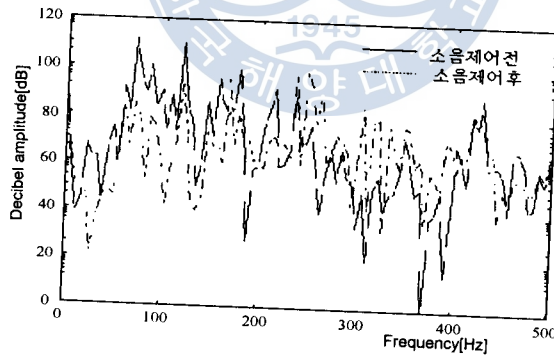


Fig. 18 Spectrum of the noise and the processed result in a sleeping room

그림 18은 선박이 정박 중일 때 침실 내에서 침실 문을 열어 놓은 상태에서 소음 제어한 결과를 나타낸 것이다. 실선이 침실 공간의 소음을 나타내고, 점선이 소음 제어한 결과이다. 발생한 소음의 80Hz에서는 약 25dB의 감쇄를 갖고, 110Hz에서는 20dB의 감쇄 효과를 갖는다.

이러한 사실에서 알 수 있는 것과 같이 실시간 소음 제어기의 하드웨어적 실현을 통

해 소음 처리된 결과는 20dB 정도의 감쇄 성능 효과를 볼 수 있었다. 특정 주파수 진폭이 증가한 것은 스피커가 가지는 비선형성과 오차 경로를 무시한 제어의 영향으로 기인한다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 선박내 공간의 침실에서 선상인의 안락한 수면을 위해 소음 음압레벨을 감쇄시키는 실시간 능동소음제어 시스템을 구현하였다. 스피커의 위치를 침대의 배개 머리 양쪽에 설치하고 마이크로폰은 스피커의 아래쪽에서 스피커를 마주보게 위치시켰다. 특히, 능동소음제어에서 스피커와 마이크로폰의 위치는 공간의 음향학적 특성에 의해 제어장치의 성능과 안전성 측면에서 매우 중요하다. 실질적으로 컴퓨터 시뮬레이션과 시스템 구성상에서의 감쇄 효과의 차이는 하드웨어의 매칭관계 및 TMS320C50 DSP의 고정 소수점 연산 방식, 제어장치의 적당한 위치 선정에 있어서 완전하지 못한 점에서 초래되었다. 앞으로는 지금까지의 연구에서 발생한 문제점들을 개선하고, 2차 음향 경로의 모델링한 결과 및 전처리 장치로서의 신호 분류 알고리즘을 능동소음제어기에 적용하여 안정성 있는 능동소음제어 시스템의 개발이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] S. J. Elliott and P. A. Nelson, Active noise control, IEEE Signal Processing Magazine, pp. 12-35, October 1993.
- [2] C. C. Boucher, S. J. Elliott, P. A. Nelson, "Effect of errors in the plant model on the performance of algorithms for adaptive feedforward control", Proc. IEE, Vol. 138, No. 4, pp. 313-319, August 1991.
- [3] Simon Haykin, Neural networks, Macmillan College Publishing Company, pp. 498-501, 1994.
- [4] H. H. Yang and S. I. Amari, "Adaptive online learning algorithms for blind separation : Maximum entropy and minimum mutual information", Neural Computation, Vol. 9, pp. 1457-1482, 1997.

