

변압기 주위소음 정음화 시스템 개발

Development of Active Noise Control System for Quieting Transformer Noise

°최효열

전력연구원 시스템·통신연구소(Tel:+82-42-865-5481; Fax:+82-42-865-7704; e-mail:hychoi@kepri.re.kr)

Abstracts Development and realization of Adaptive Active Noise Control used for quieting transformer noise are planned to provide workers with comfortable working environment and to attenuate the noise for residents in many noisy areas (power plant, power transformer, GIS transformer etc).

Keywords Impulse Response, Active Noise Control, Transformer Noise, Adaptive Filter, Acoustic Field

1. 서론

일반적으로 소음을 제어하는 방법은 수동소음제어와 능동소음제어로 나뉜다. 지금까지의 소음제어는 흡음재나 방음재를 사용하여 발생된 소음을 흡수, 차단하려는 수동적인 방법이 주로 연구되어 왔으나 이러한 방법은 사용재료의 특성상 무게와 부피의 증가로 설치에 넓은 공간과 많은 비용이 필요하다. 특히 500Hz 이하의 저주파에 대하여서는 성능이 떨어지는 단점이 있다[1]. 이에 비해 2차 음원을 사용하여 소음과 동일한 진폭과 반대의 위상을 갖는 인공음을 발생시켜 중첩시킴으로써 소음의 음압레벨을 줄이는 능동소음제어(ANC: Active Noise Control)는 저주파를 제어하기에 적합하며 소음의 진행경로를 차단하는 수동적 방법과 달리 적은 무게와 작은 부피로 인해 공간과 비용을 줄일 수 있다는 장점이 있다[2].

이러한 개념은 1930년부터 있었으나 마이크로프로세서의 고성능화로 신호처리기술이 급격히 발달된 최근에 와서야 실시간 능동소음제어시스템을 구현할 수 있게 되어 활발한 연구가 진행되고 있다. 현재 능동소음제어기술은 자동차[1]나 비행기[3]등 중량을 줄여야 하는 대상과 모관[4]와 같은 단방향 소음의 제어 및 구조물 내부의 정음화, 가전제품의 소음제어, 열린공간과 막힌공간의 정음화 등에 적용되어 많은 성과를 거두고 있다.

본 연구는 이러한 능동소음제어기술을 변압기소음의 제어에 응용하여 실시간 처리시스템으로 구현하였다. 변압기의 소음은 변압기 코어내의 자기수축에 의해 발생하는데 60Hz를 기본주파수로 하여 60Hz의 우수배에 해당하는 하모닉성분으로 이루어져 있다[9]. 이중 음압레벨이 비교적 작은 고주파성분을 제외하면 소음제어의 대상이 되는 성분은 120, 240, 360Hz의 정현파이다[6]. 이러한 변압기소음은 주파수가 거의 일정하다는 것과 제어 대상 정음화영역이 넓다는 특징이 있다.

2. 능동소음제어 알고리즘

능동소음제어의 원리를 그림 1에 나타냈다. 소음원에서 발생된 소음신호는 음향공간의 경로를 거쳐 오차마이크로폰으로 전

달되는데 스피커에서는 이 소음신호와 동일한 진폭과 역위상을 갖는 인공음을 발생시켜 중첩시킴으로써 소음을 감쇄 시키고자 하는 것이다[4]. 인공음은 센서를 사용하여 검출한 소음원으로부터의 신호를 참조신호로 삼아 이를 적응필터를 거쳐 발생하게 되며 이때의 적응필터의 계수는 오차마이크로폰에 입력된 오차신호에 의해 갱신된다[7].

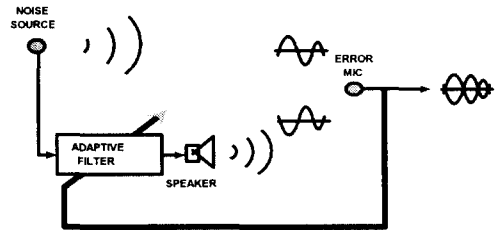


그림 1 능동소음제어의 원리

적응필터의 출력과 마이크로폰 사이에 2차 전달경로가 존재한다면 전달도중 신호의 왜곡이 발생하게된다. 전달경로는 스피커와 마이크 사이의 음향공간 뿐 아니라 스피커와 마이크의 전기적, 기계적 특성에 의해서도 발생하는데 그로 인한 왜곡은 Filterd-x LMS 알고리즘으로 보상에 주어야한다[8]. 이때 필요한 전달경로를 측정하기 위해서는 소음제어 과정에서 측정하는 온라인 방법과 미리 측정하는 오프라인의 방법을 사용한다[4]. 전달경로가 수시로 변화하는 경우라면 온라인 추정방법을 사용해야하며 변압기소음과 같이 거의 변하지 않는 경우에는 오프라인 추정방법이 적당하다.

오차마이크로폰은 소음을 제거하고자 하는 영역에 위치시키는데 오차신호에 대한 정보를 많이 얻을 수 있도록 배치해야하며 스피커는 발생 신호가 마이크까지 정확히 전달되도록 하는 공간적 배치가 중요하다[8][9]. 소음원과 인공음을 발생시키는 스피커는 정음화 대상주파수의 반파장 이내의 공간에 위치할 때 가장 좋은 소음제어 성능을 낸다[1]. 넓은 영역을 정음화 시키

거나 소음제어의 성능을 높이기 위해서는 마이크로폰과 스피커의 수를 늘리는 방법이 있는데 이때 사용되는 Multiple-Error Filtered-x LMS 알고리즘은 채널수의 증가로 계산량이 늘어나는 문제점이 있다.

3. 변압기소음의 특성

변압기소음의 제어를 위해서는 소음의 특성을 분석하고 소음원을 밝혀내어 적합한 제어방법을 연구하며 소음의 주파수분석을 통해 능동소음제어에 적합한 주파수대역인가를 검증해야한다. 이를 위해 변압기소음신호의 획득 및 주파수 파형을 분석하였으며 그 결과 변압기 소음은 일정한 다수개의 주파수로 이루어진 정현파의 합으로 구성됨을 확인하였다[9].

3.1 변압기소음원의 특성

변압기의 소음은 전송전력 파형이 코어, 코일 및 변압기 본체의 진동을 일으켜 발생한다. 이때 코어는 전송전력 주파수의 두 배에 해당하는 주파수로 진동하게되므로 소음은 두 배 주파수의 하모닉 성분으로 구성된다[9]. 예를 들면 국내는 60Hz의 전송전력을 사용하므로 코어가 120Hz의 진동을 하여 이의 하모닉성분인 240, 360, 480Hz등의 정현파가 섞인 소음을 낸다[5]. 그림 2는 수색에 위치한 변전소에서 추출한 변압기소음의 주파수 스펙트럼을 그린 것이다.

정현파가 섞여있는 소음성분을 능동소음제어의 대상으로 한 변압기소음은 120Hz와 하모닉성분으로 구성되어 있으므로 전체 소음의 음압레벨은 이러한 정현파 음압레벨의 로그 합으로 정의할 수 있다.

그림 2에서 각 주파수의 크기를 비교해 보면 변압기소음의 주된 성분은 120, 240, 360Hz의 저주파음을 알 수 있다[9]. 여러 성분들의 음압레벨 크기는 변압기의 구조에 의해 결정된다. 그 외의 고주파 하모닉성분은 공기와 벽에 의해 흡수되고 60Hz의 성분은 잘 지각되지 않으므로 120, 240, 360Hz의 세 가지다. 이러한 500Hz이하의 저주파소음에서는 능동소음제어가 적합하므로 실시간 시스템의 구현시에는 고주파성분을 제외시키기 위해 LPF를 거친 저주파만을 사용하였다. 여러 정현파가 섞여있는 소음을 제어하기 위하여 전송전력 60Hz를 이용하여 우수 배의 대상 주파수인 120, 240, 360Hz를 만들어내는 하모닉성분 발생기를 거친 신호를 참조신호로 사용한다.

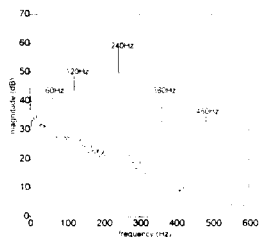


그림 2 변압기소음의 주파수 스펙트럼

4. 능동소음제어 시스템의 하드웨어 구성

변압기 소음제어 시스템의 블럭도는 그림 3과 같다. MOTOROLA사의 DSP96002 프로세서로 구동되는 이 시스템은 PC와의 인터페이스를 통해 적응능동소음제어의 주요계산을 수행하는 Anel사의 MM96TM, 입력신호를 변환하는 A/D변환기와 스피커출력신호를 변환시키는 D/A변환기의 디지털시스템, 마이크로입력신호의 간섭현상을 제거하고 출력신호의 고주파성분을 제거하는 필터, 출력신호를 증폭시키는 증폭기의 아날로그 시스템으로 구성되어 있다[9]. 이때 디지털시스템과 아날로그시스템은 한 세트당 16채널씩의 입출력을 담당하며 필요시 여러 세트를 병렬로 연결하여 더 많은 채널시스템으로 확장할 수 있도록 설계되었다.

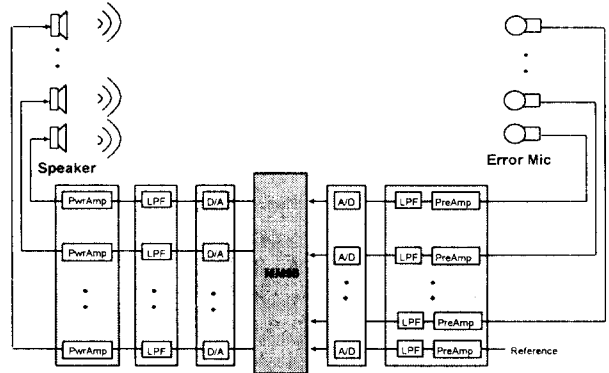


그림 3 변압기 소음제어 시스템 블럭도

4.1 MM96

다수의 마이크에서 추출된 120, 240, 360Hz의 데이터를 샘플링하여 처리하기 위해서는 많은 계산량의 부담을 감수해야한다. 특히 MLMS를 구현하는 과정은 다수의 필터에서 콘볼루션이 수행되므로 고성능의 프로세서를 이용하여야 실시간으로 구현할 수 있다. 프로세서에서의 계산은 고정소수점(Floating Point)계산과 부동소수점(Floating Point) 계산으로 분류된다. 데이터를 고정된 자리수로 표현하는 방식은 작은 수에서 정밀도가 떨어질 뿐 아니라 계산도중에 표현 가능범위를 넘는 경우(Overflow)가 발생하여 데이터의 범위에 따라 그 자리 수를 조정해야 하는 단점이 있다. 반면 부동소수점 방식은 수의 자리수 표현이 가변적으로 설정되므로 작은 수에서 정밀도가 높으며 표현 가능범위를 넘는 경우도 발생하지 않아서 제어하기가 용이하다.

4.2 디지털시스템

다수의 아날로그 입력신호를 디지털로 변환하는 A/D변환 시스템을 구현할 때 각 입력신호마다 A/D변환기를 한 개씩 사용하는 방법은 채널수가 늘어갈수록 많은 부피와 비용을 필요로 한다. 이에 반해 Mux를 이용하여 한 개의 A/D변환기로 모든 입력을 순서대로 변환하는 방식은 비교적 적은 비용으로 구현할 수 있다. 이러한 구조의 A/D변환기는 그림 4와 같다.

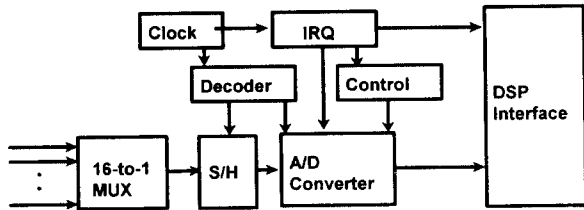


그림 4 A/D변환기

4.3 아날로그 시스템

A/D변환시 변환 가능 범위가 정해져 있으므로 그 범위에 맞도록 입력신호의 크기를 조정해야 한다. 8비트, 12비트, 16비트 A/D변환기는 각각 45dB, 70dB, 90dB의 입력 범위를 갖는다. 이는 최대입력과 최소입력의 차로서 마이크로부터의 입력신호는 A/D변환의 성능을 높일 수 있도록 각 범위에 맞게 조정되어야 한다.

5. 변압기 주위소음 정음화

5.1 변전소 현장배치

변압기 주위소음 정음화 시스템 개발을 위해 대상 변전소를 설정한 뒤 현장조사를 실시하였다. 이는 변전소의 구조와 변압기의 형태조사, 정음화 대상과의 지리적 배치 조사, 변전소 소음의 채취 및 분석 등을 통하여 시스템을 설치, 운용하기 위한 계획 수립을 위한 것이다.

옥내 변전소는 건물 내에서 한 개 또는 다수개의 변압기를 운용하는데, 안전등의 요인으로 높은 위치에 접근할 수 없으며 이는 시스템 설치에 있어 장애가 된다. 여기서 발생된 소음은 주위의 주거지역으로 전파되는데 소음원과 주거지역은 매우 근접되어 있다. 대상 변전소의 현장배치는 그림 5와 같다.

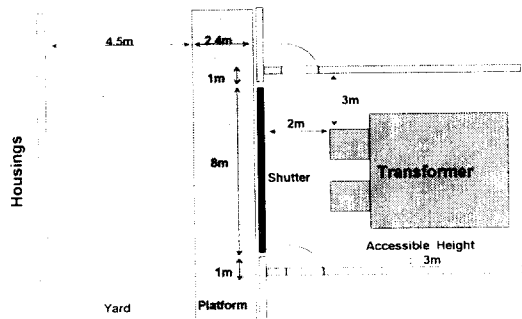


그림 5 대상 변전소의 현장배치

5.2 변압기 소음분석

변압기소음의 제어를 위해서는 소음의 특성을 분석하고 소음원을 밝혀내어 적합한 제어방법을 연구하며 소음의 주파수분석을 통해 능동소음제어에 적합한 주파수대역인가를 검증해야한다. 이를 위해 변압기소음신호의 획득 및 주파수 파형을 분석하였으며 그 결과 변압기 소음은 일정한 다수개의 주파수로 이루어진

정현파의 합으로 구성됨을 확인하였다[9].

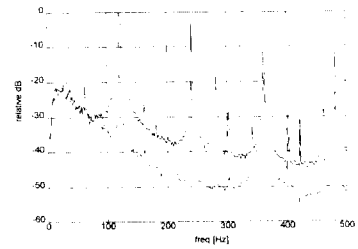


그림 6 변압기소음의 주파수 스펙트럼

[————— 근거리에서의 소음 - - - - - 원거리에서의 소음]

5.3 능동 소음제어 시스템의 배치

소음원을 하나의 점 음원이 아닌 면 음원으로 가정했을 때, 이 음원은 Sound Radiating Window로 가정하여 이에 따른 스피커, 마이크의 배치를 그림 7에 표현하였다.

(a),(b)의 그림은 2차 음원 스피커가 소음과 같은 방향으로 향하도록 배치되어, 중첩시킨 후 제어된 신호가 외부로 향하는 형태이다. 이때 마이크는 정음화 대상영역을 외부로 설정하는 경우와 내부로 선정하는 경우에 따라 (a)와 (b)의 두 가지 형태를 사용할 수 있다.

(c),(d)의 그림은 2차 음원 스피커가 소음원을 향하도록 배치된 형태이다.

이처럼 소음원을 향하여 정음화를 수행하도록 함으로서 보다 작은 power의 2차음신호로 소음을 제어하도록 한 것이다. 이것은 적은 power를 사용한다는 점에서 시스템을 좀더 안정시키며 발산할 가능성을 줄일 수 있다.

본 연구에서는 소음원에서 방사되는 소음의 진행방향으로 인공음을 방사시켜 대상영역 및 오차마이크에서의 소음을 제어하기 위하여 (a)형태의 시스템 배치를 구현하였다. 이것은 정음화 대상영역 주위의 소음을 제어하는데 초점을 맞춘 배치형태이다.

시스템은 여러 형태의 스피커와 마이크 배치, 수량을 시험한 결과 12개 스피커, 24개 마이크가 가장 적절한 형태임을 확인하였다. 이러한 시스템의 배치를 그림 8에 표현하였다.

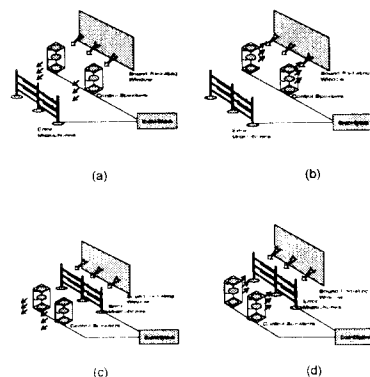


그림 7 스피커와 마이크의 다양한 배치형태

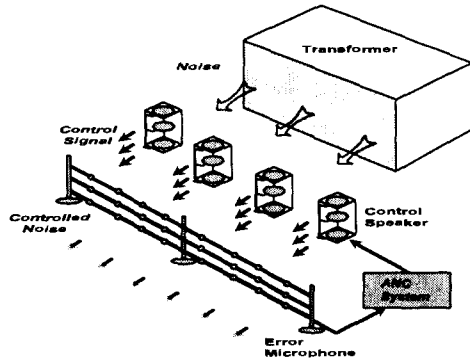


그림 8 변압기 주위소음 정음화 시스템의 배치
(12 Control Speaker × 24 Sensing Microphone System)

5.4 능동 소음 제어 결과

실제 변압기 주위 소음을 제어하고자 12 Speaker × 24 Mic 능동 소음제어 시스템을 그림 8과 같이 설치하여 정음화 실험을 수행하였을 때 24개 오차 마이크에서의 소음제어는 120Hz와 240Hz에서는 소음제어가 원활히 이루어졌으나, 360Hz와 같은 높은 주파수 성분은 마이크간의 간격이 너무 떨어져 배치된 원인으로 소음제어가 되지 않았다. 이것은 마이크간의 간격이 제어주파수의 파장에 따라 가깝게 배치될 경우에 소음을 제어할 수 있기 때문이다. 실제 환경에서는 정음화 영역이 넓어서 마이크를 넓게 배치해야 하므로 360Hz를 제어할 만큼 촘촘히 배치할 수 없었다. 그러므로 제어대상 주파수를 120, 240Hz로 한정하였다.

일반적으로 많이 사용되는 Filtered-x LMS 알고리즘을 사용한 실험결과 120Hz는 최고 30dB의 소음감쇄를, 240Hz는 최고 18dB의 소음감쇄를 얻었다.

실험결과 특정 위치의 마이크에서는 제어가 작게 이루어지거나 이루어지지 않는 경우가 발생했는데, 이것은 마이크의 위치 선정시 음압레벨이 잘 측정되지 않거나 인공음이 도달하기 어려운 위치에 마이크가 놓였기 때문이다. 실내에서는 폐공간의 모드분석을 통하여 최적의 위치를 판단하여 마이크를 배치하나, 실외에서는 최적의 위치를 실험을 통하여 구해야하는 어려움이 있기 때문이다.

6. 결론

본 연구에서는 변압기 능동소음제어를 위해 소음원을 분석하여 제어대상의 주파수를 규명하였으며 열린 공간 및 막힌 공간에서의 음장분석과 효과적인 제어 알고리즘을 연구하여 능동 소음 제어 시스템을 제작, 실험하였다. 능동소음제어 시스템은 DSP96002 프로세서가 내장된 MM96 Board로 제어 및 주요계산을 수행하였으며 데이터의 입출력을 위한 A/D, D/A변환기 등의 디지털 부분과 각종 필터 및 증폭기로 구성되어 있는 아날로그 부분으로 구성되어있다. 소음의 광역제어를 위해서 다채널의 시

스템이 필요하므로 시스템은 한 세트당 16채널의 입출력을 담당하게 제작되어 있으며 필요시 병렬처리를 통해 더 많은 채널시스템으로 확장할 수 있도록 설계되어 있다.

본 연구는 능동소음제어 기술을 이용하여 변압기 주위소음을 정음화 하기 위한 기초연구로써 실증시스템은 변압기 주위의 120Hz, 240Hz 성분의 잡음을 어느 정도 저감하는 효과를 보였으나 FAN 잡음 등의 기타 소음을 억제하지 못해 전체적인 잡음억제는 적음을 알 수 있었다. 그러나 능동소음제어 기술은 세계적으로 연구가 추진중인 단계이고 변압기 소음제어는 국내에서 처음 적용한 기술로써 기초 기술확보에 의미를 부여하고 향후 본격적인 연구결과 활용을 위해서는 산업체 기술이전을 통한 상업화가 필요하며, 후속 연구 과정의 추진과 전문가 육성에 많은 노력을 기울여야 할 것이다.

참고문헌

- [1] S. J. Elliott and P. A. Nelson, "Active Noise Control," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 12 - 35, October, 1993.
- [2] B. Widrow, J. R. Glover, J. M. McCool et al., "Adaptive Noise Cancelling : Principles and Applications," *Proc. IEEE*, vol. 63, no. 12, pp. 1692 - 1716, 1975.
- [3] S. J. Elliott, P. A. Nelson, I. M. Stothers, et al., "In-Flight Experiments on the Active Control of Propeller-Induced Cabin Noise," *J. Sound and Vibration 140*, pp. 219 - 238, 1990.
- [4] Hyounsuk Kim, Youngjin Park, Jeong Guon Ih, "An Efficient ANC Algorithm for a Long Duct System," *Korea-U.S Vibration Engineering Seminar*, pp. 275 - 292, March 1993
- [5] Blaise Gosselin, Jeanne C. Fortin, "Measurement of the Noise Emitted by Electrical Substations-Part 1: Measurement Method," *Inter-Noise 92*, pp. 771 - 774, 1992.
- [6] O. L. Angevine, "Active Cancellation of the Hum of Large Electric Transformers," *Inter-Noise 92*, pp. 1 - 4, 1992.
- [7] B. Widrow, S. D. Stearns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1985.
- [8] 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.
- [9] Samuel E. Craig, O. L. Angevine, "Active Control of Hum from Large Power Transformers-The Real World," *Second Conference on Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, pp. 279 - 290, April 1993.