

비최소위상 상쇄계를 가진 시스템을 위한 주기소음의 적응 역 궤환 제어

Adaptive Inverse Feedback Control of Periodic Noise for Systems with Nonminimum Phase Cancellation Path

김선민, 박영진
(Sunmin Kim and Youngjin Park)

Abstract : An alternative inverse feedback structure for adaptive active control of periodic noise is introduced for systems with nonminimum phase cancellation path. To obtain the inverse model of the nonminimum phase cancellation path, the cancellation path model can be factorized into a minimum phase term and a maximum phase term. The maximum phase term containing unstable zeros makes the inverse model unstable. To avoid the instability, we alter the inverse model of the maximum phase system into an anti-causal FIR one. An LMS predictor estimates the future samples of the noise, which are necessary for causality of both anti-causal FIR approximation for the stable inverse of the maximum phase system and time-delay existing in the cancellation path. The proposed method has a faster convergence behavior and a better transient response than the conventional filtered-x LMS algorithms with the same internal model control structure since a filtered reference signal is not required. We compare the proposed methods with the conventional methods through simulation studies.

Keywords : nonminimum phase, active noise control, periodic noise, adaptive inverse feedback

I. 서론

소음/진동은 일상생활에서뿐만 아니라 산업현장에서도 흔히 접하게 되는 환경오염원으로서 쾌적한 생활환경을 추구하려는 욕구가 점차로 증가하는 현대사회에서는 이에 대한 관심이 점차로 증가하고 있다.

특히, 엔진이나 팬과 같은 회전기계는 주기소음을 유발하므로 주기신호의 능동제어에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다[1]-[4]. 적응 궤환 제어 방법으로 가장 기본이 되는 방법은 Internal Model Control(IMC)을 기법[5]을 이용한 *filtered-X LMS* 방법[6]이다. 이러한 방법들은 기본적으로 *filtered-X LMS* 알고리즘을 사용하므로 *filtered*-기준신호를 필요로 한다. 따라서 능동소음제어에 있어서 수렴성능이 느려지거나 오버슈트(overshoot)가 발생한다[3]. 1998년에 이러한 문제를 해결하기 위해서 Bouchard는 역 궤환(inverse feedback) 구조를 제안하였으나 배경잡음에 대한 영향을 고려하지 않았고 비최소위상 상쇄계에 대해서는 사용할 수 없었다[3].

본 논문에서는 비최소위상 상쇄계를 가진 시스템을 위한 시변 하는 주기소음의 적응 역 궤환 제어방법을 제안한다. 제안한 방법은 *filtered-X LMS* 알고리즘에 의해서 제어가 개선되지 않고 역 모델을 사용하므로 수렴 성능이 향상된다. 비최소위상 상쇄계의 역 모델을 구하기 위해서 상쇄계를 시간지연, 최소위상 시스템과 최대위상 시스템으로 나누어 따로 역 모델을 구하고, 최대위상 시스템의 역 모델은 안

정한 비 인과적 유한충격응답(anti-causal FIR) 모델로 근사화 한다. 상쇄계의 시간지연은 상쇄계의 역 모델에서 시간 예측이 되고 최대위상 시스템의 역 모델을 구할 때도 마찬가지로 인과성이 깨지므로 미래의 데이터를 필요로 하게 된다. 이를 위해 LMS 예측기를 사용한다.

제안한 방법의 성능을 검증하기 위해서 컴퓨터 모의실험을 수행한다. 기존의 방법인 IMC기법을 이용한 능동소음제어 방법[6]과 주파수추정기법을 이용한 능동소음제어 방법[2]와의 비교를 통해 제안한 두 가지 방법의 성능을 비교, 검증한다. 제안한 방법은 빠른 수렴성능과 좋은 천이성능을 갖고, 특히 주파수가 시변 하는 주기소음에 대해서 좋은 성능을 나타낸다.

II. 주기소음의 능동 궤환 제어방법

1. IMC기법을 이용한 능동소음제어

Internal model control (IMC)기법을 이용한 능동소음제어 방법[6]은 잘 알려진 *filtered-X LMS* 알고리즘과 유사하나 기준신호를 측정하는 대신 그림 1의 블록선도에서 알 수 있듯이 오차로부터 줄이고자하는 목적신호, $d(n)$ 를 추정하고 이를 기준신호로 사용한다. 여기서, H 는 상쇄계, \hat{H} 는 상쇄계의 모델, $W(z)$ 는 제어기, $d(n)$ 은 줄이고자 하는 주기 신호가 포함된 목적신호, $e(n)$ 은 제어기의 오차이다.

일반적으로 앞먹임제어방법에서는 줄이고자 하는 주기 신호의 성분만이 기준신호가 될 때 가장 좋은 성능을 보인다. 그러나 이 방법에서 사용되는 기준신호 $r(n)$ 에는 줄이고자 하는 주기신호 이외에도 측정 잡음과 같은 배경소음이 섞여 제어 성능을 저하시킨다.

이 방법에서 사용된 잘 알려진 앞먹임제어 알고리즘인

접수일자 : 2000. 12. 27., 수정완료 : 2001. 6. 18.

김선민, 박영진 : KAIST 기계공학과(sumin@bomun.kaist.ac.kr/yjpark@sorak.kaist.ac.kr)

※ 본 논문은 BK21 사업과 한국과학재단 가상현실연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

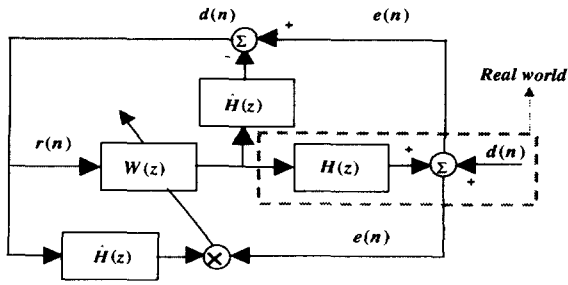


그림 1. IMC를 이용한 능동소음제어.
Fig. 1. ANC using IMC technique.

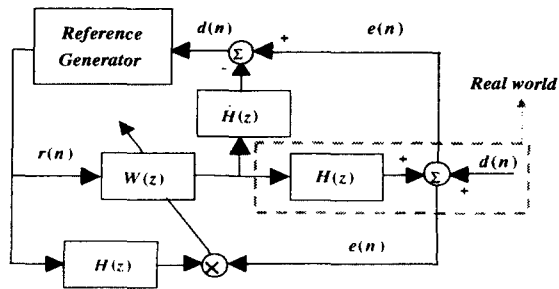


그림 2. 주파수추정기법을 이용한 능동소음제어.
Fig. 2. ANC using frequency estimation.

filtered-X LMS알고리즘은 filtered-기준신호(상쇄계 모델을 통과한 기준신호)를 필요로 하고 많은 계산량을 요구할 뿐만 아니라 다음과 같은 두 가지 문제점을 유발한다[3]. 첫째, filtered-기준신호의 통계적 특성이 원래 줄이고자 하는 소음의 통계적 특성과 다른 경우, 수렴속도가 저하된다. 둘째, 상쇄계가 긴 충격응답특성을 갖거나 상쇄계의 시간지연이 클 경우, filtered-기준신호의 발생시 수렴 속도가 느려지거나 오버슈트가 발생하는 등 천이성능이 저하된다.

2. 주파수 추정기법을 이용한 능동소음제어

주파수 추정기법을 이용한 능동소음제어방법[2]은 줄이고자 하는 주기 소음의 주파수를 추정하여 기준신호를 발생하고 filtered-X LMS와 같은 기준의 앞먹임알고리즘을 사용하여 소음을 제거하는 방법으로 블록선도는 그림 2와 같다.

이 방법은 다중 정현파 형태의 기준신호를 직접 만들어 내므로 측정잡음과 같은 배경소음이 기준신호에 포함되지 않아 주파수 추정이 정확하게 된다면 IMC 방법에 비해 좋은 제어 성능을 갖는다. 그러나 이 방법도 filtered-X LMS방법에 의해 제어가 갱신되므로 수렴속도가 늦고 천이성능이 저하된다.

3. 역 궤환 제어방법

위의 2.1절과 2.2절의 궤환 제어방법은 측정된 오차로부터 기준신호를 만들어 filtered-X LMS와 같은 앞먹임 적응제어 알고리즘을 사용한다. 이와는 달리 역 궤환 제어는 적응적으로 제어를 갱신시키는 것이 아니라 IMC기법을 이용하여 줄이고자 하는 주기소음을 추정한 후 상쇄계 모델의 역 모델을 통과시켜 소음을 제거한다. 그림 3은 역 궤환 제어방법의 블록선도이고 C(z)는 궤환 제어기의 이산전달함수이다.

역 궤환 제어방법의 목적신호에 대한 오차의 페루프 전

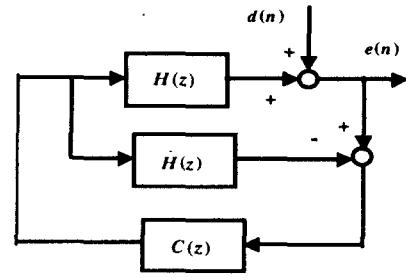


그림 3. 역 궤환 제어 방법.
Fig. 3. Inverse feedback control.

달함수는 (1)과 같다. (1)에서 알 수 있듯이 궤환 제어기가 정확하게 (2)처럼 된다면 이상적으로 제어가 될 것이다. 이 경우, 궤환 제어기는 (2)와 같이 상쇄계의 역 모델이 되는데 상쇄계가 비최소위상 시스템이라면 안정한 역 모델을 구할 수 없게 된다. 일반적으로 소음제어 시스템에서 상쇄계는 비최소위상 시스템이므로 이 절의 일반적인 역 궤환 제어방법은 소음제어에 사용하는 데에 어려움이 있다.

$$\frac{e(n)}{d(n)} = \frac{1+HC}{1+(\hat{H}-H)C} = 1+HC, \tag{1}$$

$$C = -H^{-1} \tag{2}$$

III. 주기소음의 적응 역 궤환 제어방법

1. 비최소위상 시스템의 안정한 역 모델

비최소위상 상쇄계의 역 모델은 안정한 anti-causal FIR(비인과적-유한충격응답) 모델로 근사화할 수 있다. 안정성을 보장하기 위해 인과성을 손해 보는 것이다.

상쇄계는 (3)과 같이 최소위상 시스템 $H_m(z)$ 과 최대위상(maximum phase) 시스템 $H_u(z)$, 시간 지연으로 구성된다고 가정한다. 최대위상 시스템은 모든 영점이 불안정한 시스템을 말하며 설명의 편의를 위해 (4)와 같이 불안정한 영점 1개만을 갖는 시스템이라고 가정한다.

$$H(z) = z^{-d} H_m(z) H_u(z) \tag{3}$$

$$H_u(z) = 1 - bz^{-1}, |b| > 1 \tag{4}$$

비최소위상 상쇄계의 역 모델을 구하는 과정에서 시간 지연은 시간 예측이 되고 최소위상 시스템은 역 모델을 구하기가 쉽지만 최대위상 시스템의 역 모델은 (5)에서 알 수 있는 것과 같이 극점의 크기가 1보다 크게 되어 불안정하게 된다.

$$H_u(z)^{-1} = \frac{1}{1 - bz^{-1}} \equiv \frac{x(n)}{y(n)} \tag{5}$$

(5)에서 $x(n)$ 과 $y(n)$ 의 차분 방정식을 구한 후 과거의 값을 좌변에 그 이후의 값을 우변으로 배치하면 (7)와 같이 된다.

$$x(n) - bx(n-1) = y(n) \tag{6}$$

$$x(n-1) = -\frac{1}{b}y(n) + \frac{1}{b}x(n) \quad (7)$$

위와 같은 과정을 반복하면 현재의 값 $x(n)$ 은 (8)과 같이 미래의 값으로 표현이 되고 M 이 충분히 크다면 (9)와 같이 근사화 할 수 있다. 즉 비최소위상 상쇄계의 역 모델을 안정한 anti-causal FIR 모델로 근사화 할 수 있음을 알 수 있다.

$$x(n) = -\sum_{k=1}^M \frac{1}{b^k} y(n+k) + \frac{1}{b^M} x(n+M) \quad (8)$$

$$x(n) \cong -\sum_{k=1}^M \frac{1}{b^k} y(n+k) = -\sum_{k=1}^M \frac{1}{b^k} z^k y(n) \quad (9)$$

최대위상 시스템의 불안정한 영점이 다수개인 경우에 대해서 살펴보자. 위의 경우와 같이 비최소위상 시스템은 (3)과 같이 세가지 시스템으로 구성된다고 가정하자. 최대위상 시스템은 (10)과 같이 영점이 l 개라 하자.

$$H_u(z) = \prod_{i=1}^l (1 - b_i z^{-1}), |b_i| > 1, \forall i \quad (10)$$

최대위상 시스템의 역 모델은 (11)과 같고 역 모델 시스템의 입력과 출력을 각각 $y(n)$, $x(n)$ 로 정의하고 위의 경우와 같이 전개하면 (13)이 성립한다. M_i 는 에러가 사용자가 정한 허용범위 안에 들어오도록 잡아주면 된다. M_i 이 클수록 에러가 작아지는 대신 많은 수의 미래데이터를 필요로 하고 b_i 가 큰 경우에는 b_i 가 작은 경우보다 M_i 가 작아도 에러는 작다.

$$H_u(z)^{-1} = \prod_{i=1}^l \frac{1}{1 - b_i z^{-1}} = \sum_{i=1}^l \frac{c_i}{1 - b_i z^{-1}} \equiv \frac{x(n)}{y(n)}, \quad (11)$$

$$c_i = (1 - b_i z^{-1}) H_u(z)^{-1} \Big|_{z=b_i}, i=1,2,\dots,l, \quad (12)$$

$$x(n) = \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{M_i} \frac{c_i}{b_i^k} y(n+k) + \sum_{i=1}^l \frac{1}{b_i^{M_i}} x(n+M_i) \quad (13)$$

$$\cong -\sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{M_i} \frac{c_i}{b_i^k} y(n+k)$$

$$H_u(z)^{-1} \cong -\sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{M_i} \frac{c_i}{b_i^k} z^k, \quad (14)$$

여기서, b_i 는 1보다 큰 수이므로 M_i 가 충분히 크다면 입력과 출력의 관계는 (13)와 같이 근사화 될 수 있다. 즉 최대위상 시스템의 역 모델은 (14)과 같이 anti-causal FIR 모델로 근사화 된다.

최소위상 시스템의 역 모델과 시간지연에 대한 역 모델은 쉽게 구해지고, M_i 의 최대값이 M 이라면 비최소위상 상쇄계의 역 모델은 (15)의 근사화 식으로 구해진다.

$$H(z)^{-1} \cong z^{A+M} H_m(z)^{-1} \tilde{H}_u(z)^{-1}, \quad (15)$$

$$\tilde{H}_u(z)^{-1} = -\sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^{M_i} \frac{c_i}{b_i^k} z^{-(M-k)}. \quad (16)$$

먼저 실험적으로 상쇄계 $H(z)$ 를 구한 후 (10)에서 (16)까지의 과정을 통해 비최소위상 상쇄계의 안정한 역 모델을 구할 수 있다. (3)과 (15)에서 각각 알 수 있듯이 상쇄계의 시간지연은 역 모델을 구할 때 스텝 시간예측 형태로 나타나고 최대위상 시스템은 역 모델을 구할 때 M 스텝 시간예측이 필요하므로 (15)에서 보는 것과 같이 전체적으로 $A+M$ 스텝의 시간예측이 필요하게 된다.

미래 데이터를 얻기 위한 시간 예측기는 잘 알려진 LMS 예측기(predictor)를 사용한다. 본 논문의 적응 제어 알고리즘은 LMS 알고리즘만을 사용하게 되므로 기존의 filtered-X LMS 알고리즘으로 적용시키는 방법에 비해서 빠른 수렴성을 갖게 된다[7].

2. 적응 역 궤환 구조

본 논문에서 제안한 LMS 예측기를 이용한 비최소위상 상쇄계를 가진 시스템을 위한 주기소음의 적응 역 궤환 제어 방법은 그림 4에서와 같이 IMC기법을 이용하여 소음을 추정하는 부분과 LMS 예측기 그리고 상쇄계의 안정한 역 모델로 구성된다. 매 스텝마다 LMS 예측기를 갱신시켜 시변하는 주기소음 $d(n)$ 의 미래 데이터를 실시간으로 추정한다.

신호대잡음비가 좋지 않은 경우, LMS 예측기의 성능이 저하되므로 그림 5에서 보는 것과 같이 적응노치필터를 이용한 적응선형증진기(adaptive line enhancer)를 예측기 앞에 설치하여 배경잡음에 대한 강건성을 높일 수 있다. 적응노치필터 $N(z)$ 의 갱신은 참고문헌 [2]와 같이 한다. 적응선형증진기는 목적소음의 주기적 성분만을 강화시킨 신호를 출력으로 내보내 LMS 예측기의 성능을 향상시킨다. 상쇄계 모델이 정확하다면, 제안한 방법의 안정성은 LMS 예측기의 안정성과 동일하다.

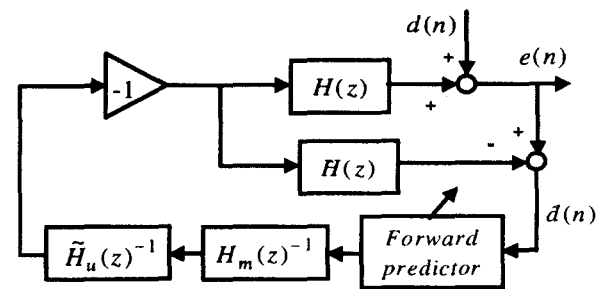


그림 4. 적응 역 궤환 제어 방법 I.
Fig. 4. Adaptive inverse feedback control I.

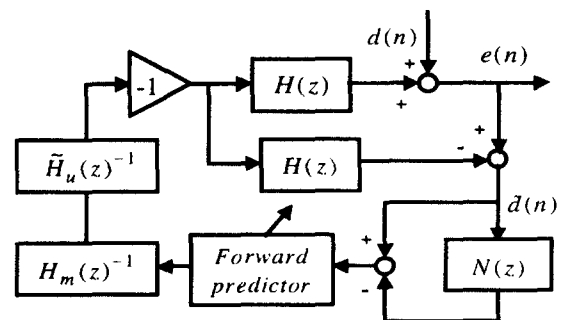


그림 5. 적응 역 궤환 제어 방법 II.
Fig. 5. Adaptive inverse feedback control II.

IV. 컴퓨터 모의실험

본 논문에서 제안한 두 가지 방법과 기존의 두 가지 방법을 컴퓨터 모의실험을 통해서 비교, 검증한다.

- 방법 1: IMC 기법을 이용한 능동소음제어
- 방법 2: 주파수 추정기법을 이용한 능동소음제어
- 방법 3: 주기소음의 적응역 케환 제어방법 I
- 방법 4: 주기소음의 적응역 케환 제어방법 II

컴퓨터 모의 실험에서 사용된 비최소위상 상쇄계는 여객선 선실에서의 소음제어 시스템에서 실험에 의해 구해진 상쇄계로서 (17)과 같고 3.1절의 방법에 의해 계산된 최대위상 시스템의 역 모델은 (18)와 같으며 네 번째 항까지만 근사화했으므로 전체적으로 10스텝 예측을 했다. 줄이고자 하는 소음은 (19)과 같이 150Hz와 200Hz 두개의 순음과 백색잡음으로 이루어졌다고 가정한다.

$$H(z) = \frac{z^{-6}(1-0.9891z^{-1})(1-6.4337z^{-1})}{(1-(0.6564+i0.6343)z^{-1})(1-(0.6564-i0.6343)z^{-1})} \quad (17)$$

$$\hat{H}_u(z)^{-1} = -\frac{1}{6.4337^4} - \frac{1}{6.4336^3} z^{-1} - \frac{1}{6.4437^2} z^{-2} - \frac{1}{6.4337} z^{-3} \quad (18)$$

$$d(n) = 2\sin(2\pi f_1 nT) + 1.5\sin(2\pi f_2 nT + 1) + \zeta(n) \quad (19)$$

표 1과 표 2는 각각 신호대잡음비가 10dB와 0dB인 경우이다. 표에서 OSPL reduction [dB]은 overall sound pressure level의 저감량을 의미하고 Peak reduction [dB]은 각각 두개

표 1. 성능 비교(신호대잡음비=10dB).
Table 1. Performance comparison(SNR=10dB).

| SNR=10dB | 방법 1 | 방법 2 | 방법 3 | 방법 4 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| Filter length | 20 | 10 | 10 | 10 |
| Step size | 0.07 | 0.07 | 0.1 | 0.2 |
| OSPL reduction | -7.2 | -9.2 | -7.5 | -10.1 |
| Peak reduction | -30,-30 | -30,-30 | -30,-25 | -30,-30 |
| Convergence step | 1200 | 500 | 200 | 200 |
| Overshoot[ratio] | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Computation load | 195 | 231 | 156 | 224 |

표 2. 성능 비교(신호대잡음비=0dB).
Table 2. Performance comparison(SNR=0dB).

| SNR=0dB | 방법 1 | 방법 2 | 방법 3 | 방법 4 |
|------------------|---------|---------|---------|---------|
| Filter length | 40 | 20 | 20 | 10 |
| Step size | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.2 |
| OSPL reduction | -2.3 | -2.8 | -2.2 | -2.8 |
| Peak reduction | -20,-10 | -30,-15 | -20,-10 | -30,-15 |
| Convergence step | 1200 | 1000 | 500 | 500 |
| Overshoot[ratio] | 1.5 | 1 | 1 | 1 |
| Computation load | 312 | 290 | 235 | 224 |

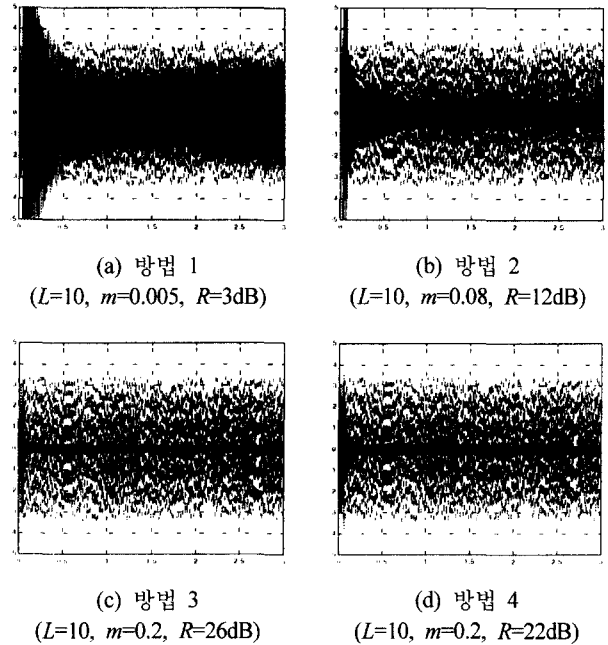


그림 6. 네가지 방법의 제어 전후의 신호(-- 제어 전, — 제어 후).

Fig. 6. Signal before and after control(-- before control, — after control).

의 순음의 저감량을 의미한다. Overshoot는 천이상태에서의 원 소음의 크기에 대한 제어 후 소음의 크기 비를 나타내며 계산량의 단위는 flops이다. Step size는 LMS 알고리즘에서의 수렴상수로써 이 값이 크면 수렴이 빠른 반면 시스템이 불안정해질 수가 있다. 본 모의실험에서는 전체적으로 제어 성능이 좋아지도록 수렴상수를 튜닝(tuning)하여 사용하였다. 두개의 표에서 알 수 있듯이 제안한 방법은 수렴성능이 빠르고 천이상태에서 오버슈트가 없음을 알 수 있다. 그에 비해 다른 특성은 비슷한 성능을 보였다. 제안한 두 가지의 방법 중에서 적응선형증진기를 이용한 방법이 백색잡음에 대한 소음 저감 성능이 좋았다.

그림 6은 두개의 순음의 주파수가 각각 150Hz에서 230Hz로 200Hz에서 320Hz로 시변하고 백색잡음이 섞이지 않은 소음에 대해서 3초간 모의실험을 수행한 결과이다. 그림에서 x축은 시간(초), y축은 크기를 나타낸다.

그림 6에서 보듯이 제안한 방법이 빠른 수렴 속도로 인해 좋은 성능을 갖음을 알 수 있었고 filtered-X LMS 알고리즘을 사용하는 기존의 방법은 수렴이 늦어 많은 소음 저감을 위해서는 수렴상수를 키워야 하는데, 이는 오버슈트를 유발시켰다. 그림설명에서 L은 적응필터길이, m은 수렴상수, R은 저감된 소음신호의 전체파워를 의미한다.

V. 결론

본 논문에서는 비최소위상 상쇄계를 가진 시스템을 위한 주기소음의 적응역 케환 제어방법을 제안하였다. 비최소위상 상쇄계의 역 모델을 구하기 위하여 최대위상 시스템의 역 모델을 안정한 anti-casual FIR모델로 근사화 하였고 LMS 예측기를 사용하여 이를 구현하였다. 기존의 filtered-X LMS

알고리즘을 사용하는 소음제어방법에 비해 빠른 수렴 속도와 좋은 천이성능을 갖고 특히 주파수가 시변하는 소음신호에 대해서 좋은 성능을 갖음을 모의실험을 통해 검증하였다.

참고문헌

[1] T. Usagawa, Y. Shimada and M. Ebata, "Adaptive algorithm for active control of periodic noise with on-line frequency tracking," *INTERNOISE 98*, 1998.
 [2] S. Kim and Y. Park, "Active control of multi-tonal noise with reference generator based on on-line frequency estimation," *Journal of sound and vibration*, vol. 227, no. 3, pp. 647-666. Sept., 1999.
 [3] M. Bouchard, "Alternative feedback structure for the adaptive active control of periodic and time-varying periodic

disturbances," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 20, no. 4, pp. 517-527, 1998.
 [4] 임혁, 최종호, 최병갑, "절삭 가공시 발생하는 주기적 외란의 제거," 제어자동화시스템공학회 논문지, 제5권, 7호, pp. 800-807, 10. 1999.
 [5] S. E. Forsythe and M. D. McCollum, "Stabilization of a digitally controlled active isolation system," *Proc. Recent Advances in Active Control of Sound and Vibration*, pp. 879-889, 1991.
 [6] S. J. Elliott and P. A. Nelson 1993 *IEEE Signal Processing Magazine* 0, 12-35. Active noise control.
 [7] 나희승, 박영진, "제한 Filtered-x LMS 알고리즘을 이용한 능동 소음 제어," 한국소음진동공학회지, vol. 8, no. 1, pp. 485-493, 1998.



김 선 민

1974년 10월 7일생. 1996년 한국과학기술원 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1998년). 1998년~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정. 관심분야는 3차원 입체음향, 능동소음제어, 주파수추정기법, 신호처리.



박 영 진

1957년 9월 30일생. 1980년 서울대학교 기계공학과 졸업. 동대학원 석사(1982년), the university of michigan 박사(1987년). 1987년~1988년 the university of michigan research fellow, 1988년~1990년 New Jersey Institute of Technology Assistant professor. 1990년~현재 한국과학기술원 기계공학과 교수. 관심분야는 자동제어, 3차원 입체음향, 능동 소음 및 진동제어, MR유체, 차량의 안정성 제어, 차량의 고장진단, 제어이론, 강인제어, 시스템 규명.