

피드포워드 적응제어 시스템에서 음향전달계 추정 임펄스 응답의 안정성 평가

이유현*, 차경환**, 김천덕***, 이영섭****, S. J. Elliott****
*부경대학교 대학원 음향진동공학과, **동서대학교 정보통신공학부
부경대학교 전기제어공학부, *ISVR. University of Southsampton

A Study on Stability Estimation for Impulse Response of Acoustic Transfer System in Adaptive Feedforward Control System

You-Hyun Lee*, Kyung-Hwan Cha**, Chun-Duck Kim***, Young-Seob Lee****, S. J. Elliott****

*Dept. of Interdisciplinary Program of Acoustic and Vibration. Pukyong National Univ.

**Faculty of Information and Communication Eng. Dongseo Univ.

***Faculty of Electronic and Control Eng. Pukyong National Univ.

****ISVR. University of Southampton

요 약

특정 플랜트내에 원하지 않는 음이나 진동신호를 능동적으로 제어하기 위해 LMS의 Filtered reference와 Filtered error 방법으로 피드포워드 적응제어 시스템을 사용할 때 오차신호의 수렴특성을 플랜트의 추정 임펄스 응답의 정확도로써 나타낼 수 있는 식을 제안하고 수치 시뮬레이션과 실험으로 그 유효성에 대해 기술한다. 플랜트내 음향전달계의 추정 임펄스 응답의 안정성 평가식은 이미 W. Ren과 P. R. Kumar에 의해 발표되었으나[1], 그 평가방법은 플랜트내의 실제(True) 임펄스 응답을 필요로하고 있어 수치 시뮬레이션에서는 가능한 방법이지만 임펄스 응답의 측정이 불가능한 실제의 적응제어 시스템에 적용하는 것은 곤란하다. 따라서, 플랜트의 추정 임펄스 응답을 크로스스펙트럼법(Cross-Spectrum)으로 추정하여 그 임펄스 응답을 피드포워드 적응제어 시스템에 적용했을 때 안정성 여부를 평가하고, 또한 오차신호의 수렴특성을 Filtered reference와 Filtered error 방법에서 각각 확인하였다. 수치 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 일치함을 확인하였다.

I. 서 론

피드포워드 적응제어 시스템에 적용되는 Filtered reference 와 Filtered error LMS 방법은 소음을 발생 하는 공간인 플랜트에서 소음의 폭로량을 감소시키거나 특정 주파수의 소음을 제거하고자할 때 사용되어지고 있다.[2]

적용 제어 시스템의 구성에서 플랜트의 소음 제거용 신호를 생성하는 필터 계수는 플랜트내 음향 전달계의 임펄스 응답이 미리 측정되어져 플랜트의 출력신호와 회망 응답 사이의 오차신호에 의해 구하여진다. 그러므로 소음 제거를 목적으로 하는 피드포워드 적응제어 시스템에서 사용되어지는 플랜트의 임펄스 응답은 적응제어 과정 이전에 측정되어야 한다. 그리고 측정되어진 추정 임펄스 응답에 대한 안정성 평가 역시 적응제어 과정 이전에 평가되어야 한다.

또한, 적응 제어 시스템 구동시 실시간 처리에서 문제가 되는 연산시간을 줄이기 위해 플랜트의 추정 임펄스 응답의 길이를 오차신호가 수렴하는 안정 범위까지 줄일 필요가 있다.

추정 임펄스 응답에 대한 안정성 평가식은 이미 W. Ren과 P. R. Kumar에 의하여 발표되어졌다. W. Ren과 P. R. Kumar의 안정성 평가식은 실제 임펄스 응답과 추정 임펄스 응답의 위상 특성으로 그 안정성을 평가하고 있다. 그러나, 플랜트의 실제 임펄스 응답은 정확한 측정

이 불가능하므로 W. Ren과 P. R. Kumar에 의하여 발표되어진 평가식은 수치 시뮬레이션에서 사용 가능하고 실제 피드포워드 적응 제어 시스템에서는 그 사용이 불가능하다.

따라서, 본 논문에서는 크로스스펙트럼법으로 추정된 플랜트의 추정 임펄스응답에 대한 새로운 안정성 평가식을 제안하고, Filtered reference와 Filtered error 방법으로써 수치 시뮬레이션과 실제 세미나실 실험의 적용에서 그 결과가 일치함을 확인하였다.

II. 안정성 평가

플랜트의 추정 임펄스응답의 안정성 평가식으로써 실제 임펄스응답과 추정 임펄스응답의 전달응답의 비가 엄격한 양의 실수라는 것이 W. Ren과 P. R. Kumar에 의해 발표되었으며, 그 평가식으로써 실제 임펄스응답과 추정 임펄스응답의 주파수응답에서 요구되어지는 조건을 식(1)에 나타내었다.

$$\operatorname{Re}\left[\frac{\hat{P}(e^{j\omega T})}{P(e^{j\omega T})}\right] > 0 \quad \text{for all } \omega T \quad (1)$$

식(1)에서 $P(e^{j\omega T})$ 는 플랜트내의 실제 임펄스응답의 주파수특성이고, $\hat{P}(e^{j\omega T})$ 는 추정 임펄스응답의 주파수특성이다. 이 식은 $\hat{P}(e^{j\omega T})$ 의 위상응답이 모든 주파수에서 $P(e^{j\omega T})$ 의 위상응답의 $\pm 90^\circ$ 이내에 있어야 적응제어 시스템 동작시 안정적으로 오차신호의 파워가 감쇠한다. 그러나, W. Ren과 P. R. Kumar에 의해 제안되어진 안정성 평가식은 정확한 실제의 임펄스응답을 요구하고있어 수치 시뮬레이션에서는 평가할 수 있는 식이지만, 정확한 실제의 임펄스응답의 측정이 불가능한 실제 플랜트의 음향전달계를 사용하는 피드포워드 적응제어 시스템에서는 그 사용이 곤란하다.

따라서, 본 논문에서는 플랜트의 추정 임펄스응답에 대한 새로운 평가식을 도입한다.

$$\text{Misadjustment} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum e(n)^2}{\sum y(n)^2} \right] \quad (2)$$

$i(n)$: 플랜트의 입력신호

$y(n)$: 플랜트의 출력신호

$\hat{P}(n)$: 플랜트의 추정 임펄스응답

$\hat{y}(n)$: $i(n)$ 과 $\hat{P}(n)$ 의 컨볼루션신호

$e(n)$: $y(n) - \hat{y}(n)$ 의 오차신호

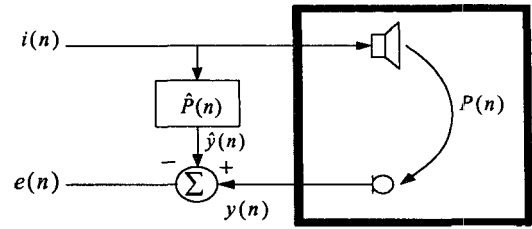


그림. 1 안정도 평가 블록도

식(2)는 플랜트내의 실제 음향전달계를 경유한 마이크로폰 출력응답 $y(n)$ 과 그리고 $i(n)$ 과 추정 임펄스응답 $\hat{P}(n)$ 의 컨볼루션신호 $\hat{y}(n)$ 의 오차신호인 $e(n)$ 과 $y(n)$ 의 파워비로써 안정성을 평가하며, Misadjustment가 -10dB정도 이하이면 그 추정 임펄스응답은 안정하다고 고려할 수 있다. 그리고, 그 평가 블록도를 그림. 1에 나타내었다.

III. 수치 시뮬레이션

수치 시뮬레이션에 사용되어진 입력신호와 출력신호는 500Hz LPF를 거친 백색잡음이고 스피커와 마이크로폰사이 간격은 0.68cm이다. 이때 샘플링 주파수는 2kHz이다. 크로스스펙트럼법으로 추정된 128포인트의 플랜트 추정 임펄스응답을 각 7가지 경우로 제로패딩하여 각각에 대한 안정성을 고려하였다. 그 각각에 대한 Misadjustment를 표. 1에 나타내었다. 그리고 플랜트내 마이크로폰의 출력신호에 대한 오차신호의 비인 Misadjustment의 그래프를 그림. 2에 나타내었다.

그림. 3의 W. Ren과 P. R. Kumar가 제시한 안정성 평가식에서 실제 임펄스응답과 추정 임펄스응답의 위상차가 90° 이내인 $\hat{P}_1, \hat{P}_2, \hat{P}_3, \hat{P}_4, \hat{P}_5$ 는 오차신호가 수렴하고, 위상차가 90° 이상인 \hat{P}_6, \hat{P}_7 은 오

표. 1

Impulse Response	Length of impulse Response	Misadjustment	수렴특성
\hat{P}_1	128	-27.8605	수렴
\hat{P}_2	96	-27.4411	수렴
\hat{P}_3	64	-24.5036	수렴
\hat{P}_4	48	-19.8798	수렴
\hat{P}_5	32	-11.1404	수렴
\hat{P}_6	24	-7.7071	발산
\hat{P}_7	20	-5.0286	발산

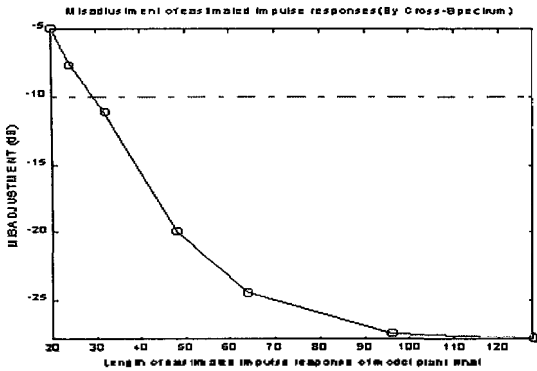


그림. 2 Misadjustment의 그래프

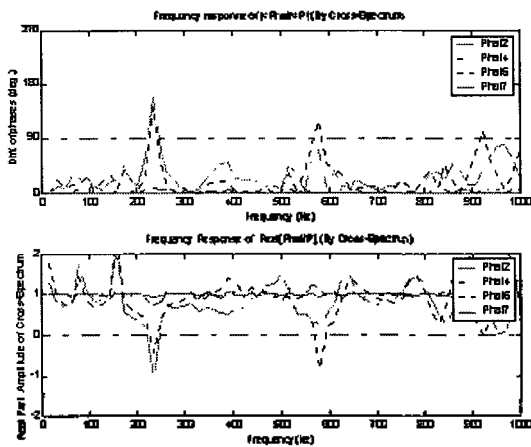


그림. 3 실제 임펄스응답과 추정 임펄스응답의 위상특성 그래프

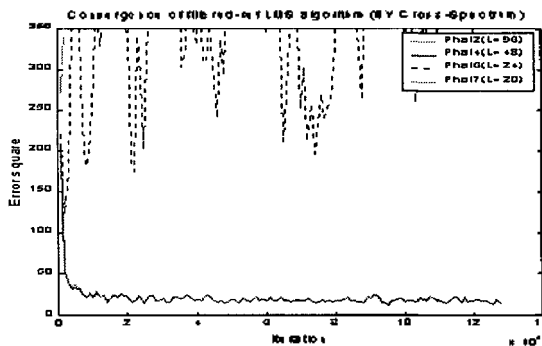


그림. 4 Filterd reference방법의 수렴특성

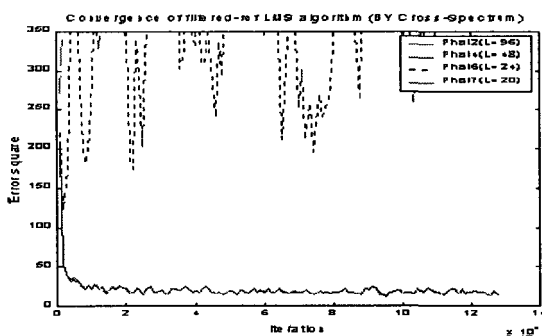


그림. 5 Filterd error방법의 수렴특성

차신호가 발산함을 Filterd reference와 Filterd error 방법의 수렴특성을 나타내는 그림. 4와 그림. 5에서 확인할 수 있으며, 오차신호의 수렴한계가 플랜트내 마이크로폰의 출력신호에 대한 오차신호의 비인 Misadjustment가 -10dB정도 이하임을 알 수 있다.

IV. 실험

실험에 사용되어진 입력신호로 500Hz LPF를 거친 백색잡음을 사용하여 스피커를 구동시켰고, 마이크로폰 출력신호 또한 500Hz LPF를 통과시켰다. 이때, 스피커와 마이크로폰 사이 간격은 0.68m이다. 샘플링 주파수는 2kHz이다. 그리고 플랜트의 음향전달계로는 Room을 사용하였으며, Room size는 8.8×4.6×2.6m이다. 그리고 이 실험의 블록도를 그림. 6에 나타내었다.

W. Ren과 P. R. Kumar의 안정성 평가식(1)의 검증을 위해 크로스스펙트럼법으로 추정한 128포인트의 임펄스응답을 실제의 임펄스응답으로 두고 추정 임펄스응답으로는 크로스스펙트럼법으로 추정한 128포인트의 임펄스응답을 각 7가지 경우로 제로패딩하여 각각의 안정성을 고려하였다. 그 각각에 대한 Misadjustment를 표. 2에 나타내었다.

표. 2

Impulse Response	Length of impulse Response	Misadjustment	수렴특성
\hat{P}_1	128	-16.4292	수렴
\hat{P}_2	96	-15.3302	수렴
\hat{P}_3	64	-14.1493	수렴
\hat{P}_4	48	-11.9361	수렴
\hat{P}_5	40	-12.3242	수렴
\hat{P}_6	36	-10.7012	수렴
\hat{P}_7	34	-9.3815	발산

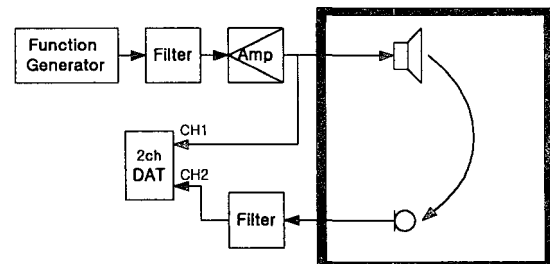


그림. 6 실험 블록도

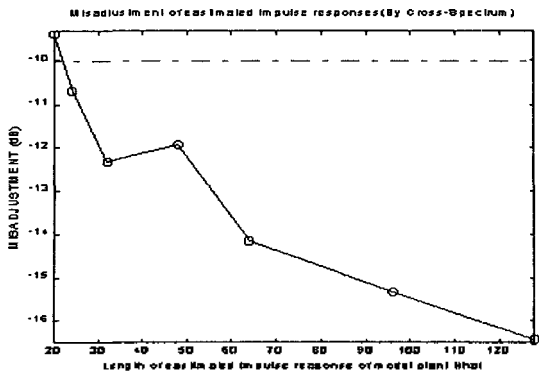


그림. 7 Misadjustment의 그래프

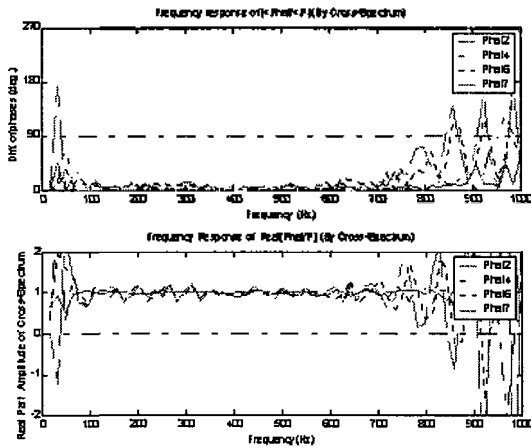


그림. 8 실제 임펄스 응답과 추정 임펄스 응답의 위상특성 그래프

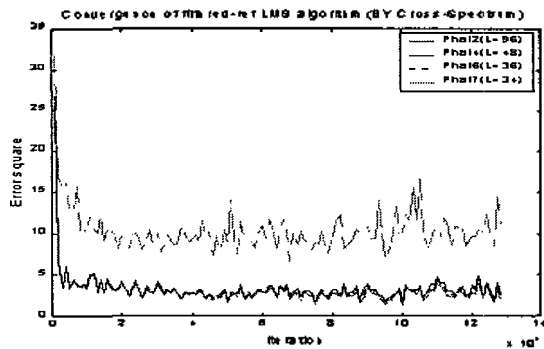


그림. 9 Filtered reference방법의 수렴특성

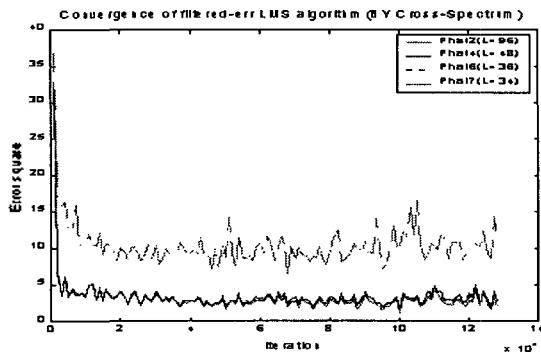


그림. 10 Filtered error방법의 수렴특성

그림. 8의 W. Ren과 P. R. Kumar가 제시한 안정성 평가식에서 실제 임펄스 응답과 추정 임펄스 응답의 위상차가 90° 이내인 $\hat{P}_1, \hat{P}_2, \hat{P}_3, \hat{P}_4, \hat{P}_5, \hat{P}_6$ 은 오차신호가 수렴하고, 위상차가 90° 이상인 \hat{P}_7 은 오차신호가 발산함을 Filtered reference와 Filtered error 방법의 수렴특성을 나타내는 그림. 9와 그림. 10에서 확인할 수 있으며, 오차신호의 수렴한계가 플랜트내 마이크로폰의 출력신호에 대한 오차신호의 비인 Misadjustment가 -10dB 정도 이하임을 알 수 있다.

V. 결론

피드포워드 적응 제어 시스템에서 단일입력 단일출력의 플랜트를 적용하는 Filtered reference와 Filtered error 방법은 적용 시스템이 발산되지 않고 안정성이 있는 알고리즘으로 널리 사용되고 있다. 그러나, 다중입력 다중출력 적응 제어 시스템에 적용시 플랜트의 추정 임펄스 응답에 대한 정확한 안정성이 요구되고, 또한 하드웨어 구성시 실시간 처리를 위한 마이크로프로세서의 연산시간을 고려하여 플랜트의 추정 임펄스 응답 길이를 오차신호가 안정적으로 수렴하는 범위까지 최소화할 필요성이 요구된다.

따라서, 실제 피드포워드 적응 제어 시스템에서의 플랜트의 추정 임펄스 응답에 대한 확실한 안정성 평가식이 요구되어져, 본 논문에서는 새로운 안정성 평가식을 제안하였고, 수치 시뮬레이션의 결과와 실험의 결과가 일치함을 확인하였다. 그 결과 Misadjustment가 -10dB 정도 이하이면 오차신호가 안정적으로 수렴하는 것을 확인하였다.

Reference

1. W. Ren and P. R. Kumar 1989 *Processing of Inter-Noise 89*, 435-440. Adaptive active noise control: structures, algorithms and convergences analysis.
2. S. J. Elliott 1998 *Filtered Reference and Filtered Error LMS Algorithms for Adaptive Feedforward Control*. Academic Press
3. E. A. Wan 1996 *Processings of ICASSP 96*. Adjoint LMS: an efficient alternative to the filtered-x LMS and multiple error LMS algorithms