

다수의 스피커를 사용하는 선형 배열 시스템에서 기하학적 접근 방법을 통한 스위트 스팟 분석

Sweet Spot Analysis of Linear Array System with a Large Number of Loudspeakers by Geometrical Approach Method

양 훈 민* · 박 영 진† · 박 윤 식*
Hunmin Yang, Youngjin Park and Youn-sik Park

(Received May 27, 2013 ; Revised November 12, 2013 ; Accepted November 12, 2013)

Key Words : Sweet Spot(스윗 스팟), Linear Array(선형 배열), Impulse Response(충격 응답), Pulse-train(펄스열), Time Duration(지속 시간), Aperture Size(구경 크기)

ABSTRACT

This paper describes techniques used to analyze the sweet spot of sound field reproduced by ear-level linear arrays of loudspeakers by geometrical approach method. Previous researches have introduced various sweet spot definitions in their own way. In general, sweet spot is defined as an area whose stereophonic sound effect is valid. Its size is affected by the geometrical arrangement of the system. In this paper, a case when plane waves are generated by linear arrays of loudspeakers in the horizontal plane is considered. So the sweet spot is defined as an area in which the listener can perceive the desired azimuth angle. Because there are many loudspeakers, impulse responses at listener's ears are in the form of pulse-train and the time-duration of the pulse-train affects the localization performance of the listener. So we calculated the maximum time duration of pulse-train by geometrical approach method and identified with the results of impulse response simulation. This paper also includes parameter analysis with respect to aperture size, so it suggests a tool for sound engineers to expect the sweet spot size and listener's sound perception.

Nomenclature

- θ : 평면파의 수평각(°)
- θ_{max} : 평면파의 최대 수평각(°)
- l : 선형 스피커 배열의 구경 크기(m)
- d : 스피커부터 청자까지의 수직 거리(m)
- Σ : 스위트 스팟의 크기(m)

- x : 짐에서 청자까지의 수평 거리(m)
- $\Delta\tau_{1,2}$: 펄스열의 지속 시간(s)
- $\Delta\tau_{max}$: 펄스열의 최대 지속 시간(s)
- c : 음속(m/s)

1. 서 론

스윗 스팟은 디자인된 정위감으로 청자에게 입체

† Corresponding Author ; Member, Department of Mechanical Engineering, KAIST
E-mail : yjpark@kaist.ac.kr
Tel : +82-42-350-3060, Fax : +82-42-350-8220
* Department of Mechanical Engineering, KAIST

A part of this paper was presented and selected as one of best papers at the KSNVE 2013 Annual Spring Conference
‡ Recommended by Editor SungSoo Na
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

음향이 생성되는 청취영역이다. 입체음향 관련 많은 연구자들이 각자 그들만의 방식으로 스위트 스팟에 대한 정의를 내려왔고^(1,2), 스위트 스팟의 크기는 시스템의 기하학적 배치에 영향을 받는다고 알려져 있다⁽³⁾. 이 논문에서는 청자가 음장 재현 결과 원하는 가상 음원과 동일한 방향감을 느끼는 영역, 즉 정위감이 잘 생성되는 영역을 스위트 스팟으로 정의한다. 일정한 수평각을 갖고 입사하는 평면파를 음장 재현할 때, 스위트 스팟은 청자가 구현하고자 하는 수평각과 동일한 각을 인지하는 영역이 된다.

이 논문은 다수의 스피커를 사용하는 선형 배열 시스템을 통해 수평각을 갖고 입사하는 평면파를 음장 재현할 경우의 스위트 스팟을 기하학적 접근 방법을 통해 분석하는 것을 목적으로 한다. 또한 다수의 스피커를 사용하여 음장 재현을 하기 때문에 청자의 위치에서 측정되는 충격 응답은 펄스열의 형태를 띠게 되고, 펄스열의 지속 시간은 청자의 음원 인지에 지대한 영향을 주게 된다. 따라서 이 논문은 기하학적 접근 방법을 통해 스위트 스팟을 결정한 후, 스위트 스팟 안에서 펄스열의 최대 지속 시간을 계산하여 청자의 음원 인지를 예측할 수 있는 방법을 제안한다. 그리고 제안한 방법을 충격 응답 모의실험 결과와 비교분석하여 타당성을 검증하도록 한다.

또한 스위트 스팟의 크기를 넓히기 위하여 선형 스피커 배열의 구경의 크기를 넓히는 것이 이슈가 되고 있기 때문에, 이 논문에서는 구경 크기에 따른 스위트 스팟의 크기와 펄스열의 최대 지속 시간의 변화를 파라미터 분석한 결과를 제시하여, 음향 엔지니어들로 하여금 스피커 시스템을 설계하기 전에 청자의 음원 인지를 미리 예측할 수 있는 도구를 제안한다.

2. 본 문

2.1 스위트 스팟의 크기 계산

(1) 무한개의 스피커가 제한된 구경을 가질 때

무한개의 스피커를 사용하고 제한된 구경 크기를 갖는 선형 배열 시스템에서 입사하는 평면파가 임의의 수평각을 갖고 입사할 때, 기하학적 분석 방법으로 계산되는 스위트 스팟을 Fig. 1에 나타내었다. 이때 스위트 스팟은 스피커의 구경 크기와 선형 배열과 청자 사이의 수직 거리 그리고 구현하고자 하는 평면

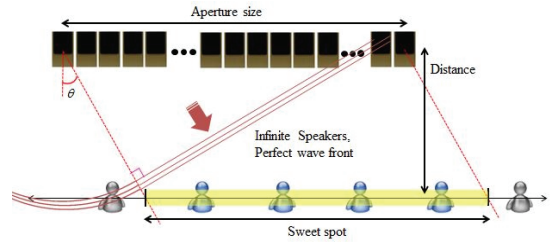


Fig. 1 Sweet spot with finite aperture size and infinite number of loudspeakers; Virtual plane wave is coming from the front-left of the listener with azimuth angle of θ

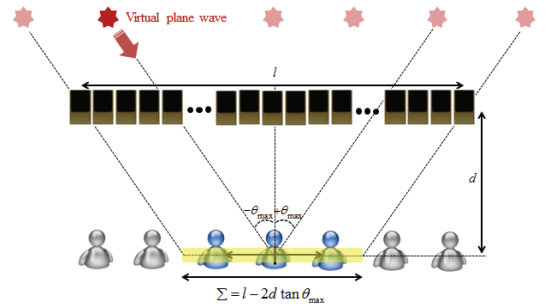


Fig. 2 Sweet spot with finite aperture size and infinite number of loudspeakers; Azimuth angle range of virtual plane wave is from $-\theta_{max}$ to $+\theta_{max}$

파의 수평각 θ 가 정해져 있을 때, 청자가 원래 구현하고자 했던 평면파의 수평각과 동일한 각도를 인지하는 영역으로 정의된다. 이 때 처음 도달하는 파면에 수직한 방향으로 청자가 각도를 인지를 한다고 가정하였다.

선형 배열 시스템의 제한된 구경 크기 안에 무한개의 스피커가 있을 때에는, 구경 크기만큼의 영역에 완벽한 파면이 구현되기 때문에 스위트 스팟의 크기는 구경의 크기와 동일하다. 다만 구현하고자 하는 평면파의 수평각과 스피커와 청자까지의 수직 거리에 의해 결정되는 평행이동 거리만큼 이동해서 스위트 스팟이 결정된다.

(2) 동일한 조건하에서 수평각이 제한될 경우

Fig. 1과 동일한 조건에서 평면파의 수평각 범위를 $-\theta_{max}$ 에서 $+\theta_{max}$ 로 제한시켰을 때 결정되는 스위트 스팟을 Fig. 2에 나타내었다. 이때 계산되는 스위트 스팟의

크기는 구경의 크기와 청자와 스피커 사이의 수직 거리, 그리고 평면파의 수평각의 함수로써 표현되며 이것을 수식으로 정리하여 다음과 같이 나타내었다.

$$\Sigma = l - 2d \tan \theta_{\max} \tag{1}$$

기하학적 접근 방법을 통해 식 (1)로 계산되는 스위트 스팟의 크기는 충격 응답 모의실험을 통해서 실제로 계산되는 스위트 스팟의 크기와 같음을 선행연구를 통해서 확인하였다⁽⁴⁾. 그리고 이러한 방법론은 다수의 스피커를 사용하는 실제 시스템에 근사적으로 적용 가능하다.

2.2 펄스열의 최대 지속 시간 계산

2.1에서 기하학적 접근 방법을 통해서 선형 배열 스피커 시스템의 스위트 스팟의 크기를 계산하였다. 이때 다수의 스피커를 사용해서 음장을 재현하기 때문에 양쪽 귀의 충격 응답은 모두 여러 개의 펄스가 각각의 시간 지연을 갖고 들어오는 펄스열의 형태를 띠게 된다. 그리고 이 펄스열의 지속 시간은 청자의 음원 인지에 큰 영향을 주게 된다. 펄스열의 최대 지속 시간은 첫 번째 펄스와 마지막 펄스 사이의 지속 시간으로 정의한다. 펄스열의 지속 시간에 따라서 제 1과면 효과가 발생하여 청자가 첫 번째 도달하는 펄스로 음원 인지를 할 수도 있고, 펄스열의 지속 시간이 매우 클 경우에는 에코로 분리된 소리를 들을 가능성도 있다⁽⁵⁾. 따라서 이러한 펄스열의 지속 시간을 계산하는 것은 청자의 음원 인지를 예측하는 데 매우 중요하다. 이번 절에서는 이러한 펄스열의 지속 시간을 기하학적 접근 방법을 통해 계산하도록 한다.

(1) 펄스열의 최대 지속 시간 계산

펄스열의 지속 시간을 기하학적 접근 방법을 통해서 계산하였다. 청자가 x 의 위치에 있을 때(Fig. 3) 펄스열의 지속 시간은 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\Delta\tau_{1,2}(x) = \left| \frac{\sqrt{(l-x-d \tan \theta_{\max})^2 + d^2} - \sqrt{(d \tan \theta_{\max} + x)^2 + d^2}}{c} + \frac{l \sin \theta_{\max}}{c} \right| \tag{2}$$

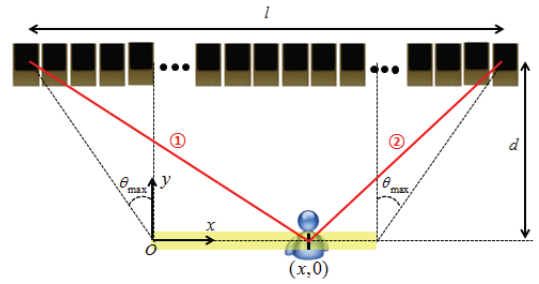


Fig. 3 Coordinate definition for calculation of maximum time duration; Origin is the left end of the sweet spot

식 (2)를 통해서 청자가 임의의 위치 x 에 있을 때의 펄스열의 지속 시간이 계산되었다. 이 때 청자의 음원 인지에 영향을 주는 범위는 지속 시간의 최대 값으로 인해서 결정된다. 따라서 스위트 스팟 영역 안에서 펄스열의 최대 지속 시간을 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\Delta\tau_{\max} = \left| \frac{\sqrt{(l-d \tan \theta_{\max})^2 + d^2} - d \sec \theta_{\max} + \frac{l \sin \theta_{\max}}{c}}{c} \right| \tag{3}$$

(2) 실제 시스템에의 적용 예시

스피커 10개를 0.5 m 등간격으로 선형 배치하고, 구경 크기 $l=4.5$ m, 청자와의 거리 $d=2.0$ m, 평면파의 최대 수평각 $\theta_{\max}=30^\circ$ 인 선형 배열 스피커 시스템에 대해서 식 (3)을 통해 펄스열의 최대 지속 시간을 계산하면 $\Delta\tau_{\max}=11.2$ ms의 결과를 얻을 수 있다.

2.3 충격 응답 모의실험

2.2절에서 기하학적 접근 방법을 통해 계산된 펄스열의 최대 지속 시간 값이 합당한지 알아보기 위해서 충격 응답 모의실험을 통해서 결과를 검증해 보았다.

모의실험의 조건은 2.2절의 실제 시스템에의 적용 예시의 경우와 동일하게 두고(Fig. 4), 왼쪽 귀와 오른쪽 귀 각각의 충격 응답을 모의실험을 통해 구해 보았다. 충격 응답은 CIPIC-HRTF 데이터베이스의 케마 더미 헤드의 실제 실험 측정값을 사용하였다.

모의실험의 결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다. 왼쪽 귀의 충격 응답(Fig. 5)과 오른쪽 귀의 충격 응답

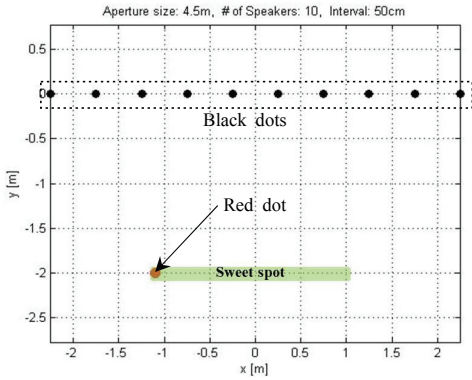


Fig. 4 Coordinate definition for simulation; red dot is the listener position and black dots are the speaker position. Speakers are numbered as 1 to 10 from left to right

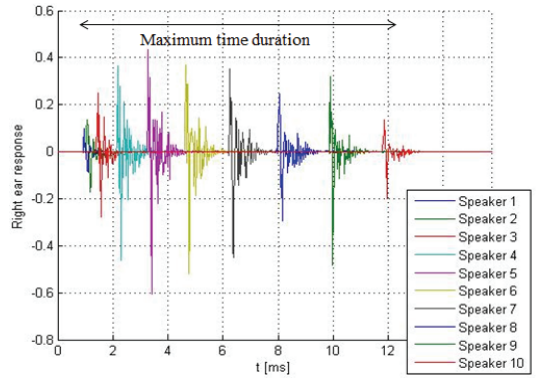


Fig. 6 Right ear impulse response; Azimuth angle of plane wave is -30 degree

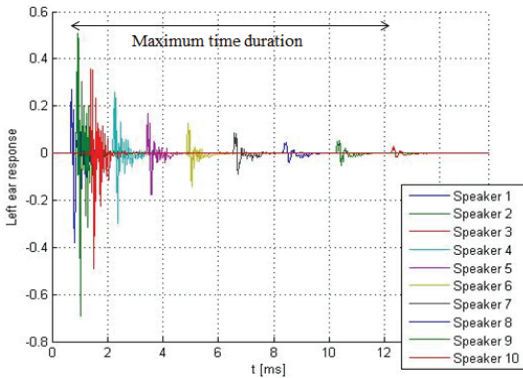


Fig. 5 Left ear impulse response; Azimuth angle of plane wave is -30 degree

(Fig. 6) 모두 총 10개의 펄스들이 각각의 시간 지연 값을 갖고 들어오는 펄스열의 형태를 띠게 된다. 이때 첫 번째 펄스의 피크와 마지막 펄스의 피크 사이의 시간 지연으로 정의되는 펄스열의 지속 시간 값이 양쪽 귀 모두 약 11 ms인 것을 그래프를 통하여 확인할 수 있다. 이것은 2.2절에서 이 논문이 제안하는 기하학적 방법을 통해서 구한 $\Delta\tau_{max}=11.2$ ms 결과와 일치한다.

충격 응답 모의실험 결과를 통해서 이 논문이 제안하는 기하학적 분석 방법의 타당성을 보였다. 이 논문이 제안하는 기하학적 분석 방법은 모의실험에 비해서 비교적 간단하고 쉽게 최대 지속 시간 값을 구할 수 있는 계산상의 용이함이 있다. 또한 수식으로 정의되기 때문에 각 파라미터들에 변화를 주면서

최대 지속 시간이 어떻게 변하는 지에 대한 해석적인 분석이 가능하다. 하지만 실제로 청자의 양쪽 귀에 맺히는 신호에 대한 정밀한 분석을 위해서는 모의실험 또는 실험을 수행해야 할 것이다.

2.4 파라미터 해석 및 예측 도구 제한

선형 배열된 스피커 구경의 크기가 스위트 스팟의 크기와 펄스열의 최대 지속 시간 값에 어떤 영향을 주는 지 알아보기 위하여 파라미터 해석을 수행하였다. 수행된 파라미터 해석은 제한된 구경 크기 안에 무한개의 스피커가 있을 때를 가정하여 유도된 결과이지만, 다수의 스피커를 사용하는 실제 스피커 시스템에 근사적으로 적용 가능하다. 또한 스위트 스팟의 크기나 최대 지속 시간 값은 선형 배열 스피커의 구경 크기로 인해 결정되는 값이므로 구경 내의 스피커 개수의 유한성에 영향을 받지 않는다. 다만 유한개의 스피커로 인해 공간 에이리어싱(aliasing)이 발생하여 음상 오차를 발생시킬 가능성이 있다. 구경 크기에 따른 스위트 스팟의 크기는 식 (1)에 의해서 결정되고, 구경 크기에 따른 펄스열의 최대 지속 시간 값은 식 (3)에 의해서 결정 된다. 예시로 2.2절에서 사용했던 동일한 변수들을 사용하여 구경 크기에 따른 영향을 그린 그래프를 Figs. 7, 8에 나타내었다.

Fig. 7을 보면, 스위트 스팟의 크기가 구경 크기가 증가함에 따라서 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 스위트 스팟의 크기를 증가시키기 위해서 구경 크기를 늘리는 방법을 사용하는데, 이것은 타당한 방법임을 이 연구의 결과로써 확인할 수 있다. Fig. 8을 보면, 구경 크기가 증가함에 따라

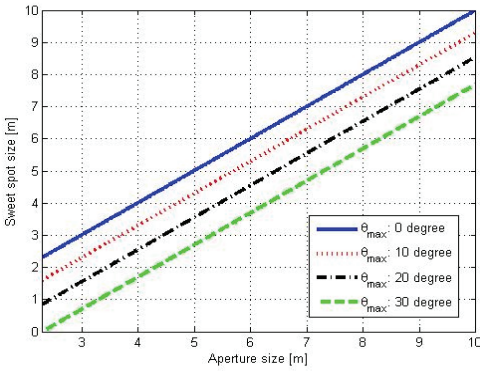


Fig. 7 Aperture size - sweet spot size graph

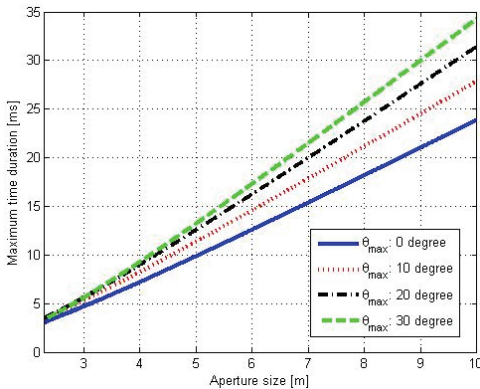


Fig. 8 Aperture size - maximum time duration graph

펄스열의 최대 지속 시간 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다.

스윗 스팟의 크기를 키우기 위해 구경 크기를 증가시키게 되면 최대 지속 시간 값이 또한 증가하고, 이것은 청자의 음원 인지와 음색에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 스윗 스팟의 크기를 키우기 위해서 구경 크기를 증가시킬 때, 펄스열의 최대 지속 시간 값 또한 고려하면서 적절하게 구경 크기를 결정해야 된다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과들은 음향 엔지니어가 선형 스피커 배열 시스템을 설계할 때 설계변수 설정 방법에 대한 예측 도구가 될 수 있다.

예를 들어, 평면파의 구현각도가 0°이고, 펄스열의 최대 지속 시간이 20 ms를 넘지 않아야 되는 시스템이 주어졌을 때, 이 연구가 제안하는 예측 도구를 사용해서 구경 크기는 최대 6.5 m까지 증가시킬 수 있고(Fig. 8), 이것으로 인해 결정되는 선형 배열 시스템의 스윗 스팟의 크기는 약 4 m가 됨을 실제로

청감 평가를 해보지 않고도 쉽게 예측할 수 있다 (Fig. 7). 평면파의 구현각도가 10°, 20°, 30°인 경우들에 대해서 파라미터 해석한 결과를 또한 Figs. 7, 8에 첨부하였고, 뿐만 아니라 보다 다양한 경우들에 대해서도 식 (1), (3)을 사용해서 파라미터 해석 수행이 가능하며, 그 결과를 예측 도구로써 사용할 수 있다.

또한 평면파의 구현각도에 따른 스윗 스팟의 크기와 펄스열의 최대 지속 시간의 변화 양상도 그림들을 통하여 확인할 수 있다. 평면파의 구현각도가 증가할수록 스윗 스팟의 크기는 감소하고 펄스열의 최대 지속 시간은 길어진다. 다시 말해서, 구현하고자 하는 평면파의 구현 각도가 클 경우에 같은 크기의 스윗 스팟을 확보하기 위해서는 선형 스피커 배열 시스템의 구경 크기를 더 증가시켜야 된다는 것을 의미한다.

3. 결 론

이 논문은 다수의 스피커를 사용하는 선형 배열 시스템에서 평면파를 구현하고자 할 때 결정되는 스윗 스팟을 기하학적 접근 방법을 통해 분석하는 것을 목적으로 한다.

무한개의 스피커를 사용하고 제한된 구경 크기를 갖는 시스템의 물리적 파면 분석으로부터 스윗 스팟을 정의하고, 청자에게 도달하는 펄스열의 최대 지속 시간을 계산함으로써 청자의 음원 인지에 대해 미리 예측할 수 있는 도구를 제시하였다. 이 때 스윗 스팟의 크기는 구경 크기와 스피커에서 청자까지의 수직 거리, 그리고 평면파의 구현각도에 의한 함수로써 결정된다. 계산된 스윗 스팟의 크기는 구경 크기가 증가할수록, 스피커에서 청자까지의 수직 거리가 짧아질수록, 평면파의 구현각도가 작아질수록 증가한다. 스윗 스팟 안에서 기하학적 접근 방법으로 계산된 펄스열의 최대 지속 시간은 충격 응답을 통한 모의실험 결과와 일치함을 확인하였다. 간단한 기하학적 접근 방법을 통해서 선형 배열 스피커 시스템의 스윗 스팟의 크기와 펄스열의 최대 지속 시간을 계산할 수 있고, 또한 청자의 음원 인지와 음색의 변화까지 예측할 수 있는 도구를 제안하였다.

일반적으로 스윗 스팟을 넓히기 위해서는 구경 크기를 늘리면 된다는 것이 정설이지만, 펄스열의

지속 시간이 길어져서 음원 인지나 음색의 변화를 가져올 수 있기 때문에 최대 구경 크기에 제한이 있을 수 있다.

후 기

이 논문은 정부(지식경제부)의 재원으로 산업융합 기반구축사업의 지원(No. 10037244) 및 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2012-0000975).

References

- (1) Merchel, S. and Groth, S., 2009, Adaptive Adjustment of the “Sweet Spot” to the Listener’s Position in a Stereophonic Play Back System – Part 1, Proceedings of ICA, pp. 1~2.
- (2) Rose, J., Nelson, P., Rafaely, B. and Takeuchi, T., 2002, Sweet Spot Size of Virtual Acoustic Imaging Systems at Asymmetric Listener Locations, J. Acoust. Soc. Am., Vol. 112, No. 5, pp. 1~2.
- (3) Takeuchi, T. and Nelson, P., 2001, Robustness to Head Misalignment of Virtual Sound Imaging Systems, Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 109, No. 3, pp. 1~2.
- (4) Yang, H., Park, Y. and Park, Y., 2013, Sweet Spot Analysis of Sound Field Reproduced by Ear-level Linear Arrays of Loudspeakers Using Inter-aural Time Difference Cue, Proceedings of 15th APVC, pp. 5~6.
- (5) Litovsky, R., Colburn, H., Yost, W. and Guzman, S., 1999, The Precedence Effect, JASA, Vol. 106, No. 4, pp. 1633~1654.
- (6) Lee, C. and Park, Y., 2000, Effective Layout of Loudspeakers in a Multichannel Sound System for Real Time Virtual Sound Reproduction, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 455~461.
- (7) Lee, C., Chang, J., Park, J. and Kim, Y., 2008, Personal Monitor & TV Audio System by Using

Loudspeaker Array, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 7, pp. 701~710.

(8) Lee, J., Park, Y. and Park, Y., 2012, Comparison of Sound Field Reproduction Technique Using Least-squares Method and Wave Field Synthesis, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 454~455.

(9) Sun, J. and Kim, K., 2012, Isolation of Vibrations due to Speakers in Audio-visual Electronic Devices without Deteriorating Vibration of Speaker Cone, Journal of JMST, Vol. 26, No. 3, pp. 723~730.



Hunmin Yang, B.S. in KAIST, Mechanical Eng., 2012, M.S. in KAIST, 2012~Present, in Structural Dynamics and Applied Control Lab. Research interests are 3D sound technology, signal processing and sound reproduction.



Youngjin Park, B.S. in Seoul National University, Mechanical Eng., 1980, M.S. in Seoul National University, Mechanical Eng., 1982, Ph. D. in University of Michigan, 1987, University of Michigan Research Fellow, 1987~1988., New Jersey Institute of Technology Assistant Professor, 1988~1990., KAIST Mechanical Eng. Professor, 1990~Present, in Structural Dynamics and Applied Control Lab. Research interests are automatic control, active and passive noise control, 3D sound technology, MR fluids, vehicle stability control, fault diagnosis, robust control and system identification.