한국정보전자통신기술학회논문지(jkiiect)'20-2, Vol.13 No.1
논문 20-13-01-1 http://dx.doi.org/10.17661/jkiiect.2020.13.1.1

3way 라인어레이 스피커를 위한 웨이브가이드 알고리즘 구현 및 설계

황지원*, 김변곤**, 조주필***

A Design and Algorithm Implementation of Waveguide for 3way Line Array Speaker

Jee Won Hwang*, ByunKon Kim**, Juphil Cho***

요 약 음향 시스템의 지향성 제어기술은 음향의 품질 향상을 위한 핵심 기술이다. 음향 시스템에서 점 음원이 아닌 선 음원을 제공하면 원거리에서 감쇠 간섭의 영향을 줄일 수 있기 때문에, 고품질의 음향을 제공할 수 있다. 특히, 라인 어레이(line-array) 스피커 시스템을 이용하면 원거리까지 균일한 고품질의 음향을 제공할 수 있다. 그러나, 고음은 파장이 짧기 때문에 라인 어레이 시스템의 스피커간의 거리가 짧아야 하지만 물리적인 한계가 있다. 본 논문에서 이러한 문제점을 해결하기 위해 웨이브 가이드를 설계하고 스피커 유닛에 장착하였다. 개발된 스피커의 성능 확인을 위해 다양한 음향 특성을 측정하고 테스트 하였다. 그 결과 개발된 스피커를 이용하여 라인 어레이 음향 시스템을 구성하면 고음 영역을 포함한 모든 영역에서 선 음원을 제공할 수 있기 때문에 단일 확장 음원과 같은 효과를 얻을 수 있고, 원거리까지 고품질의 음향을 제공할 수 있음을 확인하였다.

Abstract Directivity control technology of sound system is a key technology for improving sound quality. Providing a line source rather than a point source in an acoustic system can reduce the effects of attenuation interference at long distances, thereby providing high quality sound. In particular, A line-array speaker system can be used to provide coherent, high-quality sound over long distances. However, high frequencies have shorter wavelengths, so the distance between the speakers of a line array system must be shorter, but there are physical limitations. In this paper, we designed a wave guide and installed it in the speaker's compression driver to solve this problem. We measured and tested various acoustic characteristics to verify the performance of the speaker. As a result, when the line array sound system is constructed using the developed speakers, it is possible to provide a line source in all areas including the treble range, thereby achieving the same effect as a single extended source and providing high quality sound up to far distances.

Key Words : Line Array Speaker, COMSOL, 3D Modeling, Waveguide, Polar Pattern, FDM, SPL

1. 서론

최근의 스피커 시스템 기술은 단순한 파워앰프의 출력을 높이는 것만이 아니라, 좋은 음을 제공기 위해서는 하울링이 생기지 않는 70 ~ 100dBA 이상 충분한 음량 제공, ±3dB 이내의 균일한 음압 분포, 명료한 좋은 음질을 제공해야 한다[1][2]. 스피커 시스템의 지향성 제어기술은 음향 시스템의 음질 향상을 위한 핵심 기술이라 할 수 있다. 예를 들어, 평탄한 주파수

*Chonbuk National University
**Kunsan National University
***Corresponding Author : Dept. of Integrated IT & Communication Eng., Kunsan Nat'l Univ.
Received November 19, 2019 Revised November 19, 2019 Accepted December 28, 2019

특성을 갖는 스피커를 2개 스태킹하면 이론대로 음압 레벨이 상승되지 않고 음질도 나빠진다. 라인 어레이(line-array) 스피커 시스템은 원거리까지 균일한 음질을 만들어 이러한 문제점을 해결한 것이다[3]. 라인 어레이는 스피커를 수직으로 배치하여 정면축 상에서는 증가 간섭이 발생하게 하고, 정면축 이외에서는 감쇠 간섭이 발생하도록 만든 것이다. 라인 어레이 시스템을 구성할 때 저음과 중음은 일반 스피커를 사용해도 문제가 없지만, 고음이 문제가 된다. 고음은 파장이 짧기 때문에 축상에서 감쇠 간섭이 발생 않도록 하기 위해서는 고음 스피커간 거리가 짧아야 하는데 물리적으로 한계가 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 스피커 유닛에 웨이브가이드(wave guide)를 장착하는 것이다[4][5].

본 논문에서는 라인 어레이 시스템의 성능을 향상시키기 위한 웨이브 가이드를 설계하고 그 특성을 측정하였다. 여러 스피커 모듈을 수직을 쌓아 전체 시스템을 구성하면 모든 고주파 음원 소스가 위에서 아래로 거의 끊이지 않는 선을 이루며 단일 확장 음원과 같은 효과를 얻을 수 있어 원거리까지의 음질을 향상 시킬 수 있다[6][7]. 웨이브 가이드의 출구에서 1 ~ 20 kHz에 해당하는 고음원의 위상이 거의 같아야 하고 개발된 웨이브 가이드는 최대 편차를 가능한 작게 설계하였다.

2. 웨이브가이드 설계

3Way 라인어레이 스피커를 위한 웨이브가이드 설계를 위해 3D 설계를 수행하였다. 그림 1은 3D 편집 툴을 사용해 설계된 웨이브가이드이다.

웨이브가이드 내부 중앙에 웨이브가이드 출구의 위상제어를 위해 마름모 구조로 삽입되어 있다.

2.1 COMSOL을 이용한 특성 모의실험

설계된 웨이브가이드의 특성을 평가하기 위해 모의실험을 수행하였다. 모의실험에 사용한 툴은 COMSOL MULTI-PHYSICS로 웨이브가이드 내부를 모델링하여 Acoustic Pressure, Sound Pressure Level, 수평/수직 Polar pattern, Phase response등을 모의실험을 수행하였다[8]. 그림 2는 주요 주파수(4KHz, 8KHz, 12.6KHz, 16KHz)에서 웨이브가이드 내부의 Acoustic pressure field 의 결과이다.

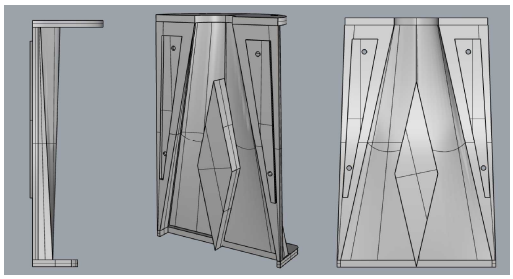

그림 1. 웨이브가이드 3D 모델
Fig. 1. 3D model of waveguide

그림 3은 4 ~ 16KHz까지 1/3 Octave 단위로 모의실험한 Farfield의 Acoustic polar pattern 이다.

그림 4는 웨이브가이드 출구의 중심부터 거리에 따른 위상변화를 보여준다. 그림 5는 내부가 빈 웨이브가이드 출구 중심부터 거리에 따른 위상변화 그래프이다. 제안된 웨이브가이드는 4KHz ~ 16KHz에서 내부가 비어있는 웨이브가이드 보다 거리에 따른 위상변화가 적음을 알 수 있다.

2.1.1 시뮬레이션 결과

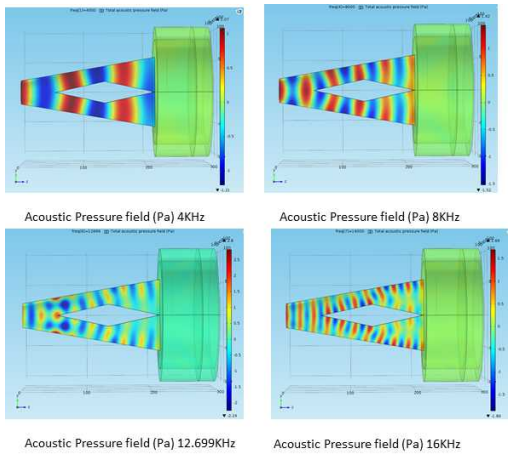

그림 2. Acoustic Pressure Field 결과
Fig. 2. Result of Acoustic Pressure Field

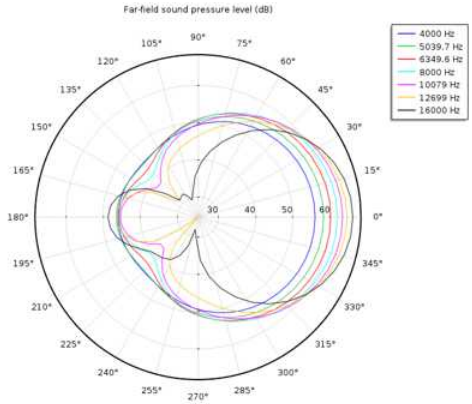

그림 3. 웨이브가이드 수평 수직 polar pattern(Far Field 해석)
Fig 3 Horizontal and vertical polar pattern of waveguide(Far Field analysis)

웨이브가이드 3D 라인어레이 스피커의 음향특성의 향상을 위해서는 웨이브가이드 출구에서 출력되는 음향의 위상이 일정해야 라인어레이 스피커가 여러개로 구성되어, 선음원을 형상할 때 거리에 따른 음압 저하를 줄일 수 있어 더 멀리 소리를 보낼 수 있다. 특히 4~8 KHz는 인간이 민감하게 들을 수 있는 대역이어서 위상차가 적을수록 특성이 좋아진다. 표 1과 같이 제안된 형상의 웨이브가이드가 일

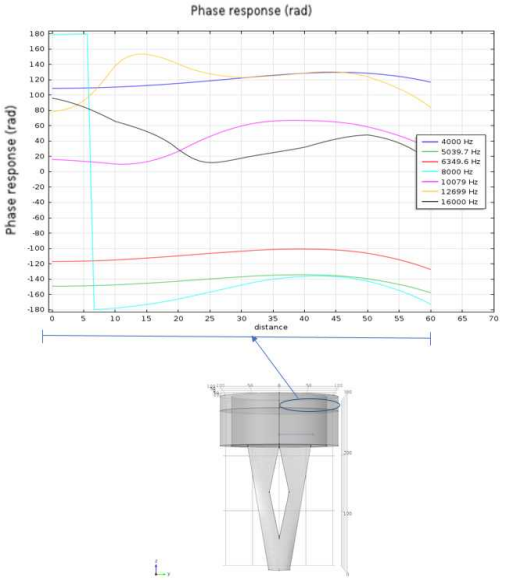

그림 4. 웨이브가이드 출구 중심축으로부터 거리에 따른 위상 응답 특성
Fig. 4. Phase Response Characteristics with distance from end of the center axis of the waveguide

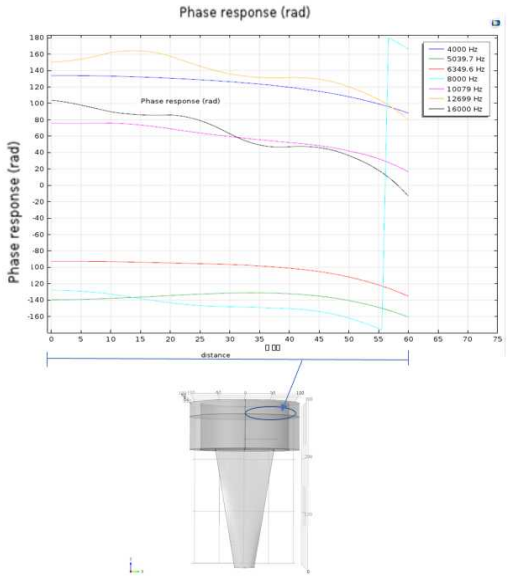

그림 5. 내부가 빈 웨이브가이드 출구 중심축으로부터 거리에 따른 위상 응답 특성
Fig. 5. Phase Response Characteristics with distance from end of the center axis of the inner blank waveguide

반 방식보다 4~8KHz 대역에서 50~100%의 우수한 위상특성을 보임을 확인할 수 있다.

표 1. 웨이브가이드 위상차 비교
Table 1. Comparison of Waveguide Phase Gap

주파수	중심축 거리에 따른 최대 위상차	
	그림4 (제안방식)	그림5 (일반방식)
4KHz	21°	40°
5KHz	20°	30°
6.3KHz	23°	31°
8KHz	42°	52°

2.2 웨이브가이드 3D 샘플 제작 및 시험

2.2.1 3D CAD 설계도

웨이브가이드 금형제작 전에 웨이브가이드 샘플을 제작하였다. 그림 6은 웨이브가이드 3D 캐드 설계도이다.

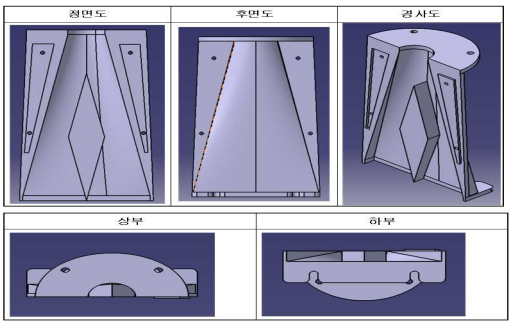

그림 6. 웨이브가이드 3D 설계도
Fig. 6. 3D design of waveguide

2.2.2 3D프린팅 시제품 출력

웨이브가이드 3D 설계도에 따라 수지압출적층방식(FDM : Fused Deposition Modeling)방식과 광경화적출방식(SLA : Stereo Lithography Apparatus) 방식을 적용한 3D 샘플을 제작하였다.

표 2. FDM 방식
Table 2. Fused Deposition Modeling

구 분	장비명	사용재료	출력시간	개수
FDM방식	Finebot	ABS	60시간	2EA

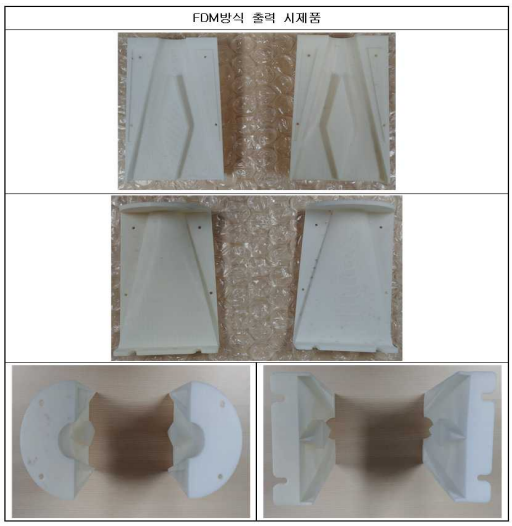

그림 7. FDM 으로 제작한 3D 웨이브가이드 샘플
Fig. 7. 3D waveguide sample made with FDM

표 3. SLA방식으로 출력한 웨이브가이드 시제품
Table 3. Waveguide prototype printed by SLA

구 분	장비명	사용재료	출력시간	개수
SLA방식	Projet7000	Visjet Flex	10시간	2EA

FDM 방식으로 제작한 웨이브가이드는 ABS, PLA를 사용하여 소재자체의 강도가 좋은 편이나, 노즐의 고온과 압력에 의해 모델이 제작되어 레이어간의 결합력이 약하고 정밀도가 낮아 시험에 사용하기 부적합하였다. SLA 방식으로 제작된 웨이브가이드의 샘플은 FDM방식보다 더 정밀하고 경도가 우수하여 시험용으로 사용하였다.

2.3 웨이브가이드 시험

2.3.1 시험환경

제작된 웨이브가이드 시험을 위해 공인시험소인 차세대음향지원센터에 의뢰하여 지향각과 주파수응답특성을 시험하였다. 그림 10은 웨이브가이드 시험환경이다. 그림 11은 개발된 웨이브가이드의 성능을 보여주고 있다.

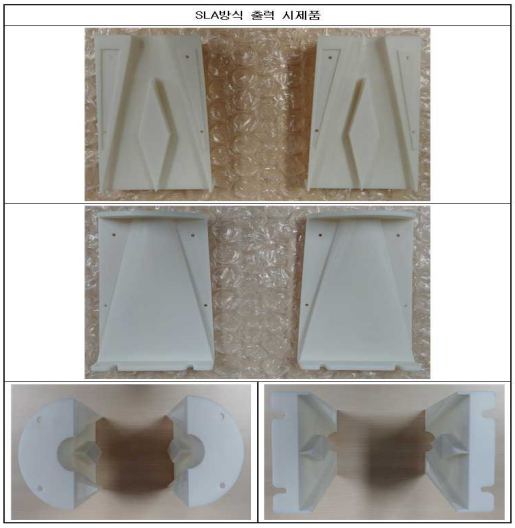

그림 8. SLA 방식으로 출력한 웨이브가이드 3D 샘플
Fig. 8. 3D waveguide samples made with SLA

그림 9. 제작된 웨이브가이드 샘플
Fig. 9. Completed waveguide sample

2.3 웨이브가이드 시험

2.3.1 시험환경

제작된 웨이브가이드 시험을 위해 공인시험소인 차세대음향지원센터에 의뢰하여 지향각과 주파수응답특성을 시험하였다. 그림 10은 웨이브가이드 시험환경이다. 그림 11은 개발된 웨이브가이드의 성능을 보여주고 있다.

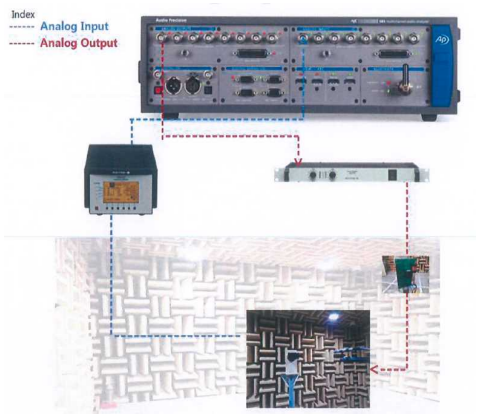

그림 10. 웨이브가이드 시험환경
Fig. 10. Waveguide test environment

2.3.2 시험결과

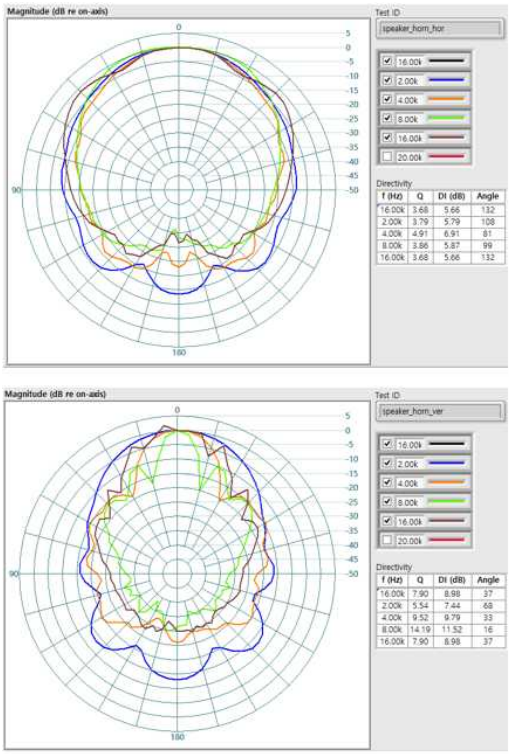

그림 11. 수직 및 수평 주파수 Polar Pattern
Fig.11. Horizonta and vertical frequency Polar Pattern

2.4 라인어레이 스피커 제작을 위한 웨이브가이드 금형제작과 웨이브가이드 제작

알루미늄 다이캐스팅방식의 웨이브가이드 제작하기 위해 그림 12와 같은 3D 도면을 제작하고 그림 13(a)와 같은 금형을 제작하였다.

그림 13(b)는 알루미늄 다이캐스팅 방식으로 제작된 웨이브가이드 실물사진이다.

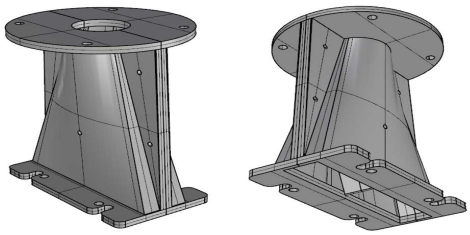

그림 12. 웨이브가이드 금형제작을 위한 3D 도면
Fig. 12. 3D drawings for waveguide mold making

3. 3Way 라인어레이 스피커 개발

12인치 드라이버 2개와 5인치드라이버 4개, 2대의 HF 웨이브가이드를 장착한 라인어레이 스피커를 개발하기 위해서 라인어레이스피커 스피커 인클로저, 및 각종 구조체를 설계 제작하였다.

그림 13. 웨이브가이드 금형 및 제작된 웨이브 가이드
Fig. 13. Waveguide mold and manufactured waveguide

그림 14는 2번째 시작품으로 설계한 3Way 라인 어레이스피커의 3D 도면이다.

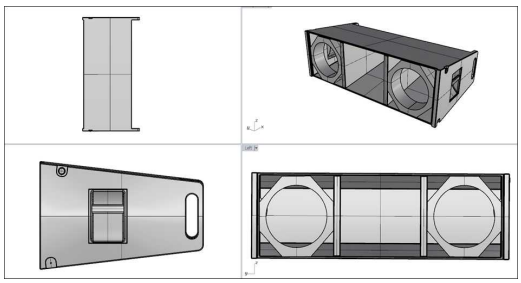

그림 14. 3Way 라인 어레이 스피커 인클로저 3D 도면
Fig. 14. 3Way line array speaker enclosure 3D drawing

3.1 성능시험결과

라인 어레이 스피커용 출력 4000W 급 듀얼 18인치 서브우퍼의 시제품을 제작했으며 제작된 서브우퍼 스피커의 성능평가 결과는 표 4와 같다. 목표치에 근접하거나 우수한 결과를 가짐을 확인할 수 있다. 스피커의 최대출력 음압레벨을 성능 시험 평가하는 인증시험기관에서 Peak 출력 측정이 불가한 관계로 업계에서 사용하는 값 기준으로 측정했으며 업계에서는 rms값에 12dB crest factor를 더한 값을 최대 SPL 값으로 계산하므로 이에 근거해 값을 도출하였다. 성능시험은 KOLAS 인정 공인시험기관인 전자부품연구원산하 차세대음향산업지원센터에 의뢰하여 시험하였으며 스피커의 최대출력 음압레벨 등 시험항목은 국제표준인 AES-5id-1997의 시험방법에 따라 측정하였다.

표 4. 성능시험 평가
Table 4. Performance Test Evaluation

평가항목	목표치 / 시험결과
스피커의 최대 출력음압레빌	138dB
	139.5dB (SPL)
스피커주파수응답	45~16KHz
	63Hz ~ 18KHz (± 10 dB)

4. 결론

본 논문에서 이러한 문제점을 해결하기 위해 웨이브 가이드를 설계하고 스피커의 유닛에 장착하였다. 개발된 스피커의 성능 확인을 위해 다양한 음향 특성을 측정하고 테스트 하였다. 그 결과 개발된 웨이브 가이드를 적용한 스피커는 최대 출력 음압레벨의 설계 목표치 138dB을 만족할 수 있는 139.5dB을 보여주고 있으며 고주파 영역의 주파수 응답은 목표치의 16k Hz를 만족할 수 있는 18kHz의 성능을 보이고 있다. 따라서, 개발된 스피커를 이용하여 라인 어레이 음향 시스템을 구성하면 고음 영역을 포함한 모든 영역에서 선 음원을 제공할 수 있기 때문에 단일 확장 음원과 같은 효과를 얻을 수 있고, 원거리까지 고품질의 음향을 제공할 수 있음을 확인하였다.

REFERENCES

[1] A. Makivirta, "Design of Minimum Diffraction Coaxial Loudspeakers with Integrated Waveguides", Audio Engineering Society, 142nd Convention, pp. 1-12, May, 2017.

[2] Sung Jae Hoon, "Method of designing for line array speaker", Monthly PA, April, 2017.

[3] J. Hyun, "Optimization of loudspeaker for improved directivity characteristics", The Korean Society of Mechanical Engineers, No. 6, pp. 134-135, 2010.

[4] B. Edgar and et al, "Spatial Audio Approaches for Embedded Sound Art Installations", Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression, pp. 426—430. June, 2017.

[5] D. Kim, "Directivity control algorithm of line array speaker by considering a single loudspaker", The Korean Society of Mechanical Engineers, No. 2, pp. 147-148, 2009.

[6] J. Kook, "Design of acoustic waveguides for improved directivity characteristics of loudspeakers using topology optimization", The Korean Society of Mechanical Engineers, No. 4, pp. 666-668, 2010.

[7] Jung Ho Kim, "Acoustic Characteristics of a loudspeaker obtained by vibration and Acoustic analyses", The Korean Society of Mechanical Engineers, *Vol. 21*, No.10, pp. 1742-1756, Oct., 1997.

[8] H. W. Choi, "Acoustic analysis and vibration modeling for design of flat vibration speaker", Korean Society of Precision Engineering, No. 3, pp. 545-546, Oct., 2008.

저자약력

황 지 원 (Jee Won Hwang) (정회원)

- 1995년 2월 : 전북대학교 공학박사
- 2011년~현재 : 전북대학교 IT정보공학과 교수

〈주관심분야 : 디지털신호처리, 센서네트워크, RFID 통신시스템, 임베디드 시스템, 방송통신융합기술〉

김 변 곤 (ByunKon Kim) (정회원)

- 1990년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 공학사
- 1995년~1997년 : 전북대학교 전자공학과 공학석사
- 1997년~2001년 : 전북대학교 전자공학과 공학박사
- 2005년~ 현재 : 군산대학교 전자공학과 교수

〈주관심분야 : 센서네트워크, RFID 통신시스템, 임베디드 시스템, 방송통신융합기술〉

조 주 필 (Juphil Cho) (정회원)

- 2001년 2월 : 전북대학교 전자공학과 공학박사
- 2000년~ 2005년 : ETRI 이동통신연구단 선임연구원
- 2006년~2007년 : ETRI 이동통신연구단 초빙연구원
- 2011년~2012년 : 미국 USF, 교환교수
- 2005년~ 현재 : 군산대학교 IT정보제어공학부 IT융합통신공학전공 교수

〈주관심분야 : LTE-A, 5세대 이동통신, Cognitive Radio, LED-ID, 방송통신융합기술〉