

논문-06-11-2-10

E-VSB 시스템의 필드 테스트 결과

이용태^{a)‡}, 박성익^{a)}, 김승원^{a)}, 이수인^{a)}, 서종수^{b)}

Field Test Results of E-VSB System

Yong-Tae Lee^{a)‡}, Sung Ik Park^{a)}, Seung Won Kim^{a)}, Soo-In Lee^{a)}, and Jong Soo Seo^{a)}

요 약

본 논문에서는 Zenith/ATI가 제안하여 ATSC DTV 표준 개정안으로 채택된 Enhanced-VSB(E-VSB) 시스템에 대한 필드 테스트 절차 및 결과를 기술하고, 그 결과를 다양한 각도에서 분석한다. 대전에서 수행된 필드 테스트에서는 E-VSB 시스템의 성능 개선 효과를 분석하기 위해 안테나 종류에 따른 실내 및 실외에서의 수신여부, 잡음 마진 및 수신가능 방위각 등을 측정하였다. 또한, 본 논문에서는 E-VSB 시스템과 기존의 8-VSB 시스템 사이의 상호 호환성(backward compatibility)을 검증하고, 테스트 지점 선정, 송신기 및 측정 차량 구성에 관해서 점검한다. 필드 테스트 결과에 의하면, E-VSB 시스템은 실내 수신과 같은 다중경로가 많은 난시청 환경에서 특히 우수한 성능을 보였을 뿐만 아니라 기존 8-VSB 시스템과 상호 호환성을 유지하였다.

Abstract

This paper presents and analyzes field test results of E-VSB(Enhanced-VSB) system proposed by Zenith/ATI and adopted ATSC standard. In the field test, according to types of antennas we measured reception possibility, noise margin, ease of reception to analyze performance improvement of E-VSB system at each outdoor/indoor test point. Also, we verify a backward compatibility between E-VSB and conventional 8-VSB system and check selection of test point, and configuration of transmitter and test vehicle. By the field test results, E-VSB system did not only outperform over 8-VSB system at severe multipath environment such as indoor reception, but also verified backward compatibility with it.

Key words: ATSC, E-VSB, Field Test

I. 서 론

지상파 DTV 방송방식은 미국방식(ATSC, Advanced Television Standard Committee), 일본방식(ISDB-T, Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial), 유럽방

식(DVB-T, Digital Video Broadcasting-Terrestrial)으로 크게 나눌 수 있으며, 각 방식 모두 영향권을 넓히고자 노력하고 있다. 이러한 세계적 추세에 맞추어 국내에서는 1997년에 디지털 지상파 TV 방송방식을 미국방식으로 채택하였고, 시험 및 실험방송을 거쳐 2001년 하반기부터 수도권 지역을 대상으로 디지털 지상파 TV의 본 방송을 시작하였다.

미국, 브라질, 싱가포르 등에서는 ATSC, DVB-T, 그리고 ISDB-T 전송방식에 대한 비교 테스트를 수행하였다¹⁾⁻⁶⁾. 그 결과에 의하면 잡음, ATSC 8-VSB 시스템은 RF 간섭신

a) 한국전자통신연구원 전파방송연구단

Radio & Broadcasting Research Division, ETRI

b) 연세대학교 전기전자공학과

Department of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University

‡ 교신저자 : 이용태(ytlee@etri.re.kr)

호, 다중경로 페이딩, 수신기 특성 등으로 인해 수신 성능에 문제가 있는 것으로 분석 되었다. 이에 따라 미국 ATSC는 기술그룹 T3/S9를 통하여 DTV RF 시스템 성능에 대한 기술적인 검토 및 성능 개선을 총괄하도록 하였다. 이후 2001년 10월에 11개 가진 업체로부터 개선된 8-VSB DTV 시스템에 대한 RFP(Request for Proposal)를 수용하였고, 최종적으로 선정된 Zenith/ATI와 Philips의 이중 스트림(dual stream) 시스템에 대해 실험실 테스트 및 필드 테스트를 각각 실시하였다⁷⁾. 실험실 테스트 및 필드 테스트 결과를 바탕으로 2003년 5월에 Zenith/ATI가 제안한 E-VSB (Enhanced-VSB) 시스템이 T3/S9 투표에 의해 후보 규격으로 잠정 확정되었고, 이후 2004년 7월에 개선된 8-VSB DTV 시스템으로 ATSC에서 최종 확정되었다. 이에 국내에서는 필드 테스트를 통한 ATSC DTV 표준 개정안에 대한 기술검증 필요성이 제기되었고, 한국전자통신연구원(ETRI)은 방송방식 발전위원회 회원사로부터 협조 및 자문을 얻어 E-VSB 필드 테스트를 수행하였다.

본 논문에서는 대전에서 수행된 E-VSB 시스템에 대한 필드 테스트 절차 및 결과를 기술하고, 그 결과를 다양한 각도에서 분석한다. 약전계 지역에서 수신 성능을 향상시킬 수 있는 E-VSB 시스템을 위한 측정항목으로는 안테나 종류에

따른 실외 및 실내에서의 수신여부, 노이즈 마진 및 수신가능 방위각 등이다. 또한, 본 논문에서는 E-VSB 방식이 기존의 8-VSB 방식과 상호 호환 가능한지를 검증하고, 테스트 지점 선정, 송신기 및 측정차량 구성에 관해서도 점검한다.

II. E-VSB 시스템

8-VSB 전송시스템은 방송구역 확보 측면에서는 성능이 우수하지만, 복잡한 다중경로가 존재하는 실내 및 이동 환경에서는 수신 성능저하가 발생하는 문제가 여러 나라의 디지털 TV 방식 비교 테스트 결과에서 나타났다. 이에 ATSC는 8-VSB 지상파 DTV 전송시스템의 실내수신 성능개선을 위하여 기존 규격에 일부변형을 추가한 새로운 성능 개선안을 제안 받았고, 기존의 8-VSB 전송 시스템과 상호호환(backward compatibility)이 가능한 기술을 중심으로 A/53 Interim 초안을 작성하였다. 개선안은 크게 Zenith/ATI와 Philips의 이중 스트림 기술과 Broadcom의 혼련열 신호 기술로 나눌 수 있다⁸⁾. 이중 스트림 기술은 기존의 주 서비스 모드(main service mode)에 유효 정보 전송률을 낮추어 잡음과 채널에 강한 특성을 나타내는 강인 모드(robust mode)

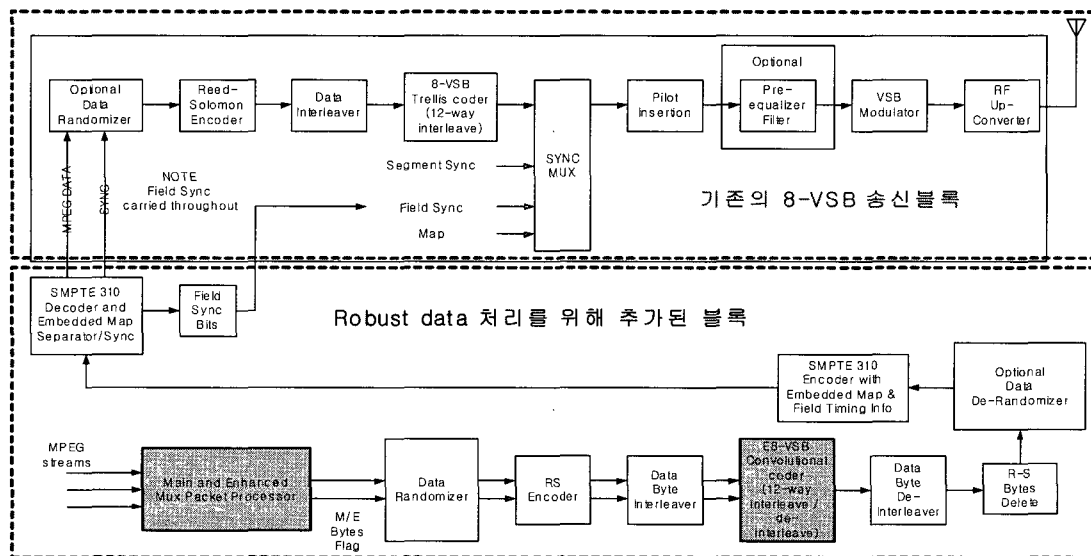


그림 1. Zenith/ATI의 E-VSB 송신기 구조
Fig. 1. Configuration of Zenith/ATI E-VSB modulator

를 추가로 제공함으로써 TOV (Threshold of Visibility) 성능 개선을 가져오는 방안이다. 훈련열 신호 기술은 유효 정보 전송률 줄이지 않으면서 현재의 훈련열 길이를 확장함으로써 채널등화 성능 개선을 가져오는 방안이다. 제안된 개선안 중에서 Zenith/ATI가 제안한 이중 스트림 기술이 2004년 7월에 E-VSB 규격으로 최종 승인되었다.

Zenith/ATI가 제안한 E-VSB 송신기 구조는 그림 1과 같다. E-VSB 송신기 구조는 크게 기존 8-VSB 송신 블록과 E-VSB를 위해 추가된 블록으로 나눌 수 있다. E-VSB를 위해 추가된 블록에서는 기존 8-VSB로 처리될 MPEG 패

킷(이하 표준 패킷)과 강인 처리될 패킷(이하 강인 패킷)을 입력 받아 그림 2와 같은 다중 패킷 처리기를 통해 다중화한다. 다중화된 패킷은 기존 8-VSB와 같은 구조를 갖는 난수화기, Reed-Solomon 부호화기, 데이터 인터리버에서 처리된 후 그림 3 및 4와 같은 강인 데이터 컨볼루션 부호화기를 통해 부호화된다. 부호화된 데이터는 데이터 디인터리버, Reed-Solomon 패러티 제거기, 역난수화기를 통해 MPEG 패킷 형태로 재생성되어 기존 8-VSB 송신 블록으로 전달된다. Zenith/ATI가 제안한 E-VSB 시스템의 자세한 송신 과정은 참고 문헌 [9]에 나타난다.

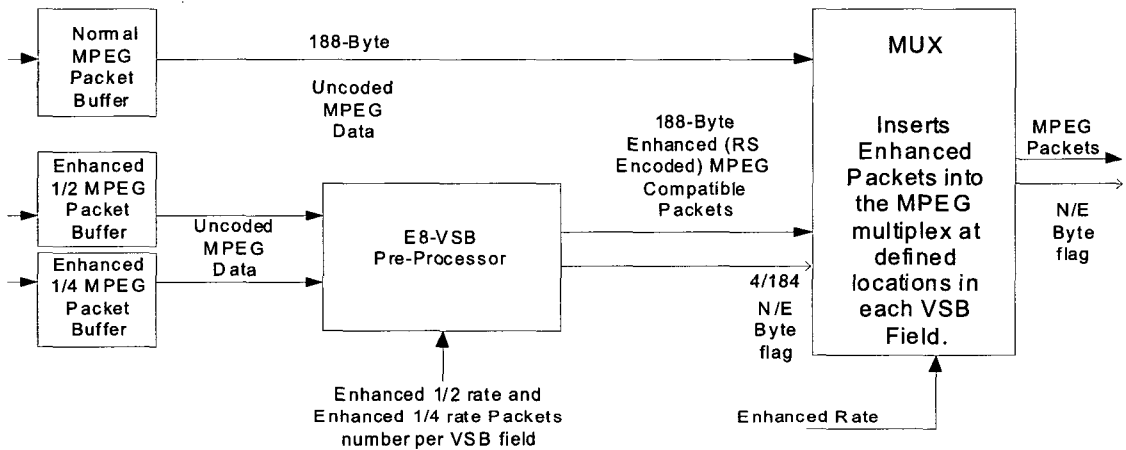


그림 2. 표준 및 강인 다중 패킷 처리
Fig. 2. Main and enhanced mux packet processor

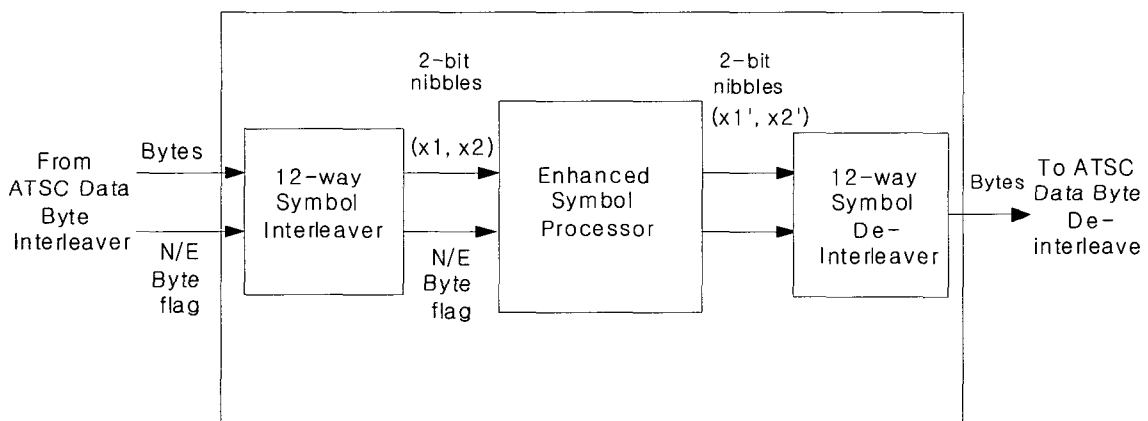


그림 3. E-VSB 컨볼루션 부호화기
Fig. 3. E-VSB convolutional encoder

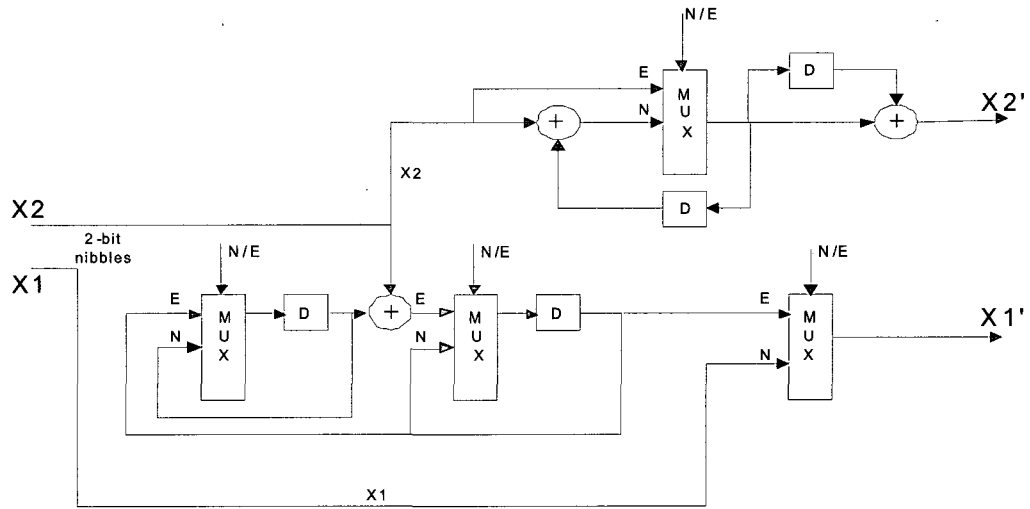


그림 4. 강인 심볼 처리기
Fig. 4. Enhanced symbol processor

III. E-VSB 시스템의 필드 테스트를 위한 구성

1. 송신 시스템 구성

필드 테스트를 위한 송신 시스템 및 송신 안테나는 ETRI 6 연구동에 설치되었다. E-VSB 신호와 8-VSB 신호를 교대로 송신할 수 있는 송신 시스템의 구성도는 그

림 5와 같고, 그 외관은 그림 6 (a)와 같다. E-VSB 변조기는 E-VSB 스트림을 입력받아 IF 주파수 대역(44 MHz)의 E-VSB 변조된 신호로, 8-VSB 변조기는 8-VSB 스트림을 입력받아 IF 주파수 대역의 8-VSB 변조된 신호로 각각 변환한다. E-VSB 변조된 신호의 정상(normal) 모드 데이터 전송율은 9 Mbps, 강인 모드 데이터 전송율은 4.5 Mbps 이고, 8-VSB 변조된 신호의 데이터 전송율은

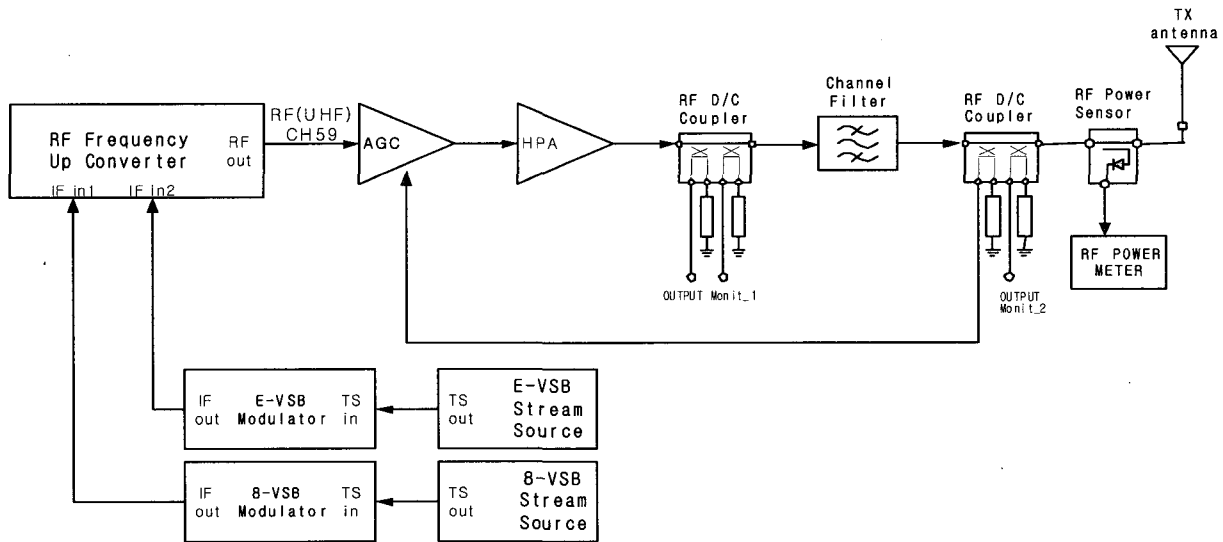
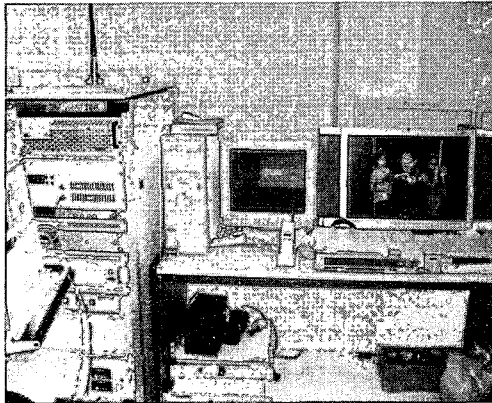
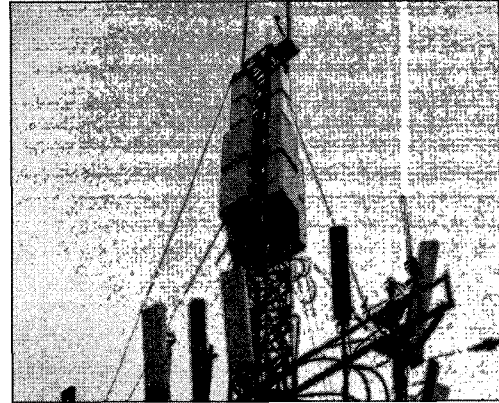


그림 5. 송신 시스템의 구성도
Fig. 5. Transmitter configuration



(a) 송신 시스템 외관



(b) 송신 안테나 외관

그림 6. 송신 시스템 및 안테나

Fig. 6. Transmitter and antenna

19.39 Mbps 이다. RF 상향 변환기는 IF 채널 스위치를 통해 선택된 IF 대역의 변조 신호를 59번 채널(743 MHz)

의 RF 신호로 변환하고, 변환된 RF 신호는 HPA (High Power Amplifier)와 Channel Filter를 거쳐 그림 6 (b)와 같은 2단 다이폴 송신 안테나를 통해 송신된다. 표 1은 송신 시스템의 재원을 나타낸다.

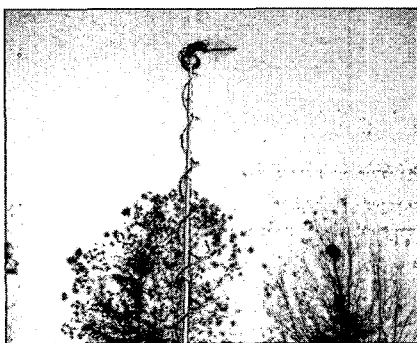
표 1: 송신 시스템의 재원

Table 1. Specifications of transmitter facilities

중심 주파수	743 MHz (CH. 59)	
송신 대역폭	6 MHz	
송신 출력	50 W	
안테나 이득	9 dBi	
케이블 손실	1.5 dB	
안테나 좌표	위도	127도 22분 02초
	경도	36도 22분 44초
철탑고	20 m	
해발고	101 m	

2. 수신 시스템 구성

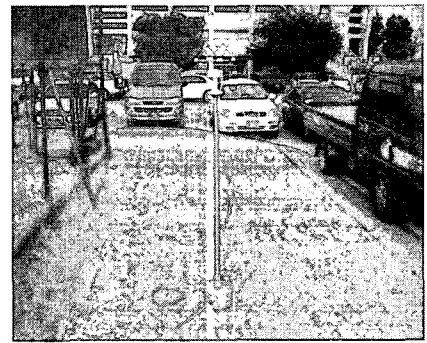
필드 테스트를 위해 MBC의 DTV 측정차량을 활용하였고, 수신 안테나는 그림 7과 같은 9 m 지향성(로그 피어리틱) 안테나와 1.5 m 지향성(야기) 및 무지향성(omni) 안테나로 구성된다. 9m 지향성 안테나는 공기압에 의해 높이조절이 가능한 안테나 마스트의 끝에 설치되며, 1.5 m 지향



(a) 9 m 지향성 안테나



(b) 1.5 m 지향성 안테나



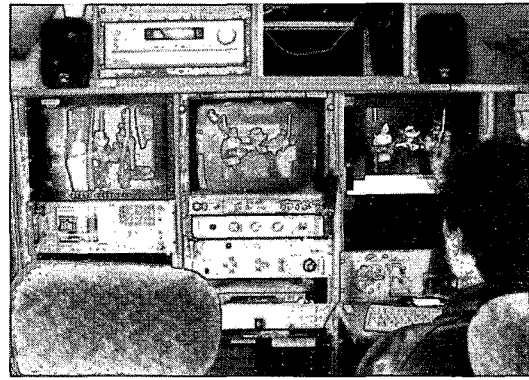
(c) 1.5 m 무지향성 안테나

그림 7. 수신 안테나

Fig. 7. Receiving antennas



(a) 측정 차량 외관



(b) 측정 차량 내부

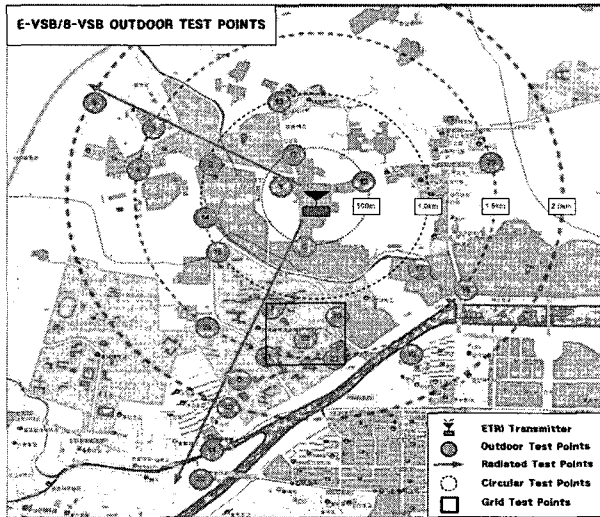
그림 8. 측정 차량 외관 및 내부

Fig. 8. Inside and outside test vehicle

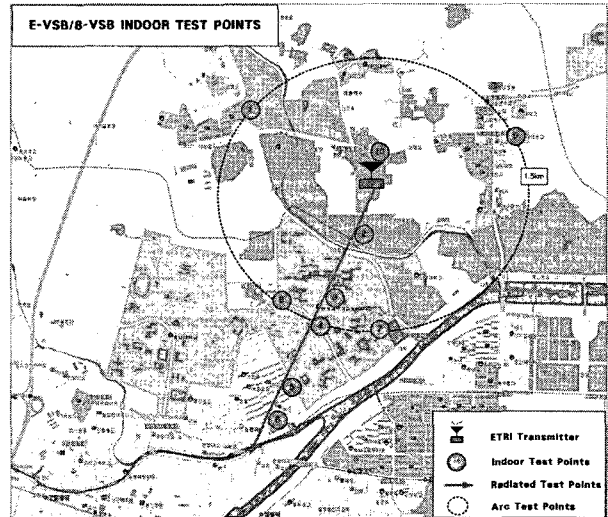
성 및 무지향성 안테나는 모터에 의해 방향 제어가 가능한 간이 마스트에 설치된다. 측정차량 내부 시스템은 그림 8과 같이 8-VSB 신호와 E-VSB 정상/강인 모드의 신호를 측정할 수 있는 STB(Settop Box), 모니터, 잡음 생성기, 스펙트럼 분석기 등으로 구성된다. 또한, 약한 수신 신호를 분석하기 위해 LNA(Low Noise Amplifier)와 감쇄기가 사용되었으며, 360도 수신 전개 패턴을 파악할 수 있는 프로그램이 설치되었다. 수신 시스템의 자세한 구성 방법은 참조 문헌 [10-11]에 나타난다.

3. 측정 지점

측정은 크게 그리드 측정, 호상 측정, 방사선 측정의 세 가지 유형으로 분류되며, 실외 측정을 위해 25 지점, 실내 측정을 위해 10 지점이 선정되었다. 그리드 측정은 E-VSB 신호와 8-VSB 신호에 대한 도심지에서의 수신 양상을 비교하기 위한 것이고, 호상 측정은 송신기로부터 동일한 거리에 위치한 지점에서의 주변 환경에 따른 신호 변화 현상을 파악하기 위한 것이며, 방사선 측정은 거리에 따른 송신



(a) 실외 측정 지점



(b) 실내 측정 지점

그림 9. 실외 및 실내 측정 지점

Fig. 9. Test points at outdoor and indoor locations

기 신호의 특성을 파악하기 위한 것이다. 실외 측정을 위한 측정 지점들은 그림 9 (a)와 같고, 송신소로부터 최소 이격거리는 0.335 km이며, 최대 이격거리는 2.695 km이다. 호상 측정을 위해 20 지점, 방사선 측정을 위해 11 지점, 그리드 측정을 위해 5 지점이 각각 중복 선정되었다. 실내 측정을 위한 측정 지점들은 그림 9 (b)와 같고, 송신소로부터 최소 이격거리는 0.5 km이며, 최대 이격거리는 2.45 km이다. 또한, 실외 측정 결과와 비교하기 위해 실외 측정 지점 근처의 건물 1층 실내를 선정하였다. 실내 측정 역시 실외 측정과 동일하게 호상 측정을 위해 5 지점, 방사선 측정을 위해 5 지점, 그리드 측정을 위해 4 지점이 각각 중복 선정되었다.

IV. 필드 테스트 결과

필드 테스트는 실외 25 지점과 실내 10 지점에서 수행되었다. 8-VSB 송신 신호는 8-VSB 수신기와 E-VSB 정상 모드 수신기를 이용하여 측정되었고, E-VSB 송신 신호는 8-VSB 수신기와 E-VSB 정상 및 강인 모드 수신기를 이용하여 측정되었다. 실외 측정은 9 m 지향성 안테나, 1.5 m 지향성 및 무지향성 안테나를, 실내 측정은 1.5 m 지향성 및 무지향성 안테나를 이용하여 각각 수행되었다. 또한, 측정 데이터의 신뢰성을 확보하기 위하여 기준 지점에서 측

정 시스템의 상태 및 측정 데이터 결과를 측정 시작전에 매일 파악하였다.

필드 테스트를 위한 측정 항목은 각 측정 지점별로 수신 신호의 전계 강도, 수신 성공 여부, 잡음 마진, 그리고 수신 가능 방위각 등이다. 여기서, 수신 성공 여부는 수신 신호의 영상 및 음성 상태를 통해 판단하고, 잡음 마진은 수신 에러(화면깨짐) 없이 수신하는데 필요한 최소한의 신호 대 잡음비를 의미하며, 일반적으로 수신 전계 강도에 비례한다. 이러한 측정 결과를 통해 8-VSB 수신 성능에 대한 E-VSB 정상 및 강인 모드에서의 수신 성능 개선을 분석한다. 또한, E-VSB 송신 신호에 대한 8-VSB 수신기의 동작여부를 파악함으로써 E-VSB 방식의 상호 호환성을 평가한다.

1. 실외 필드 테스트 결과

그림 11~13은 8-VSB 및 E-VSB 신호를 송출할 때 8-VSB 수신기와 E-VSB 정상 및 강인 모드 수신기에서의 9 m 지향성 안테나와 1.5 m 지향성 및 무지향성 안테나에 따른 실외 수신 성공률, 잡음 마진, 수신 가능 방위각을 각각 나타낸다. 8-VSB 신호를 송출할 때 9 m 지향성 안테나를 사용하였을 경우 양 수신기 모두 84 %의 수신 성공율을 가지지만, 1.5 m 무지향성 안테나를 사용하는 경우 48% 이하의 비교적 낮은 수신 성공율을 가진다. 또한, 잡음 마진

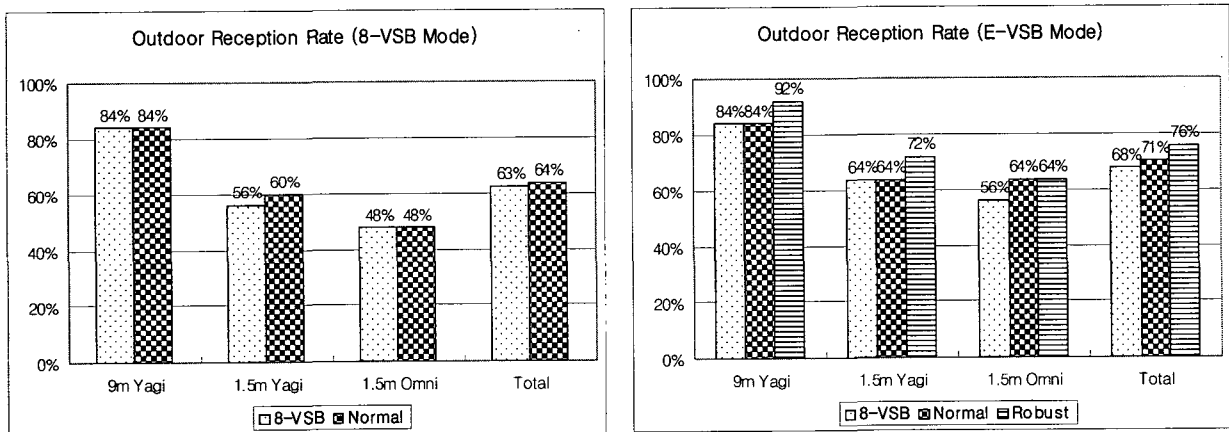


그림 11. 실외 수신 성공률
Fig. 11. Reception rate at outdoor locations

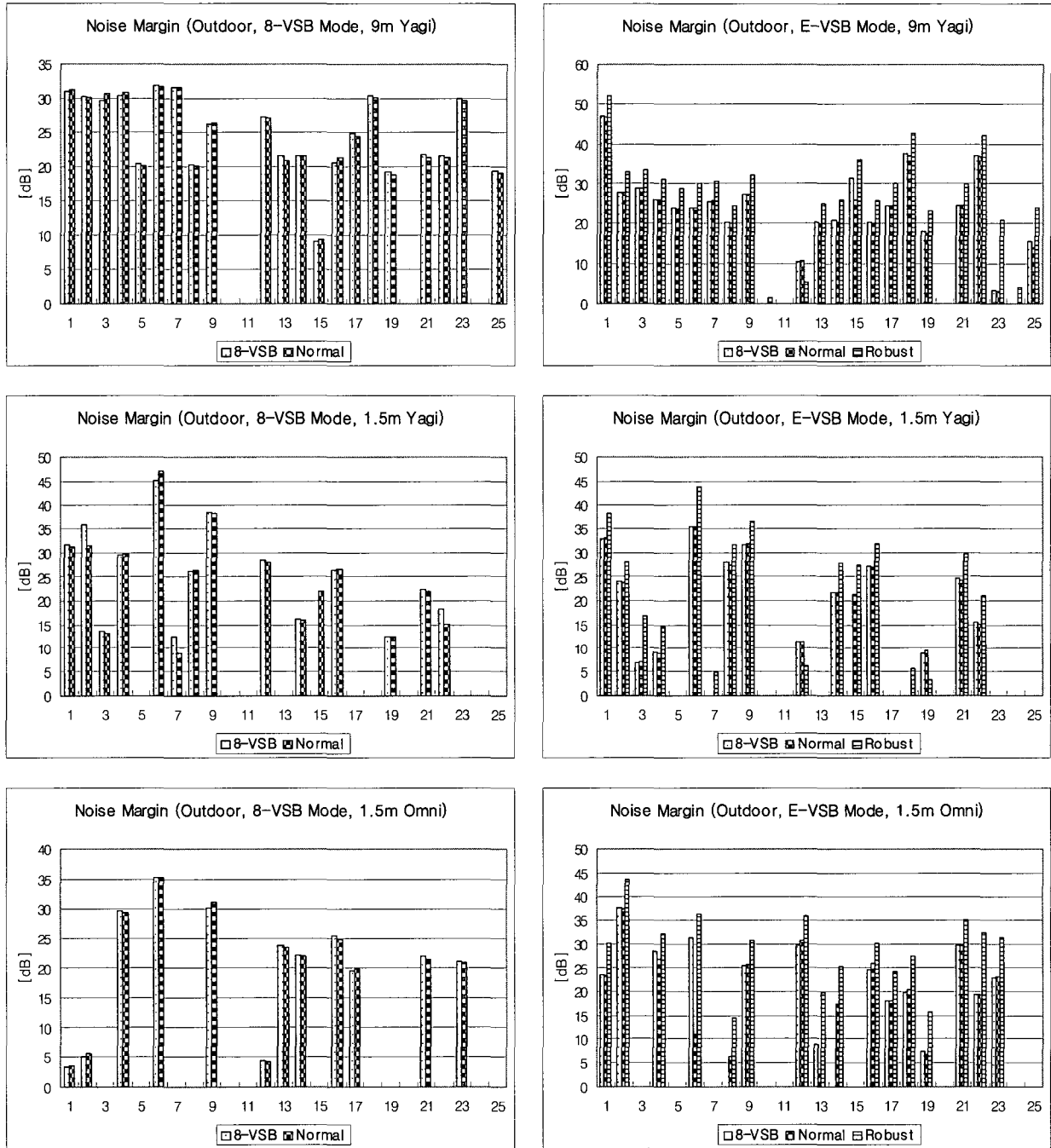


그림 12. 실외 수신잡음 마진
 Fig. 12. Noise margin at outdoor locations

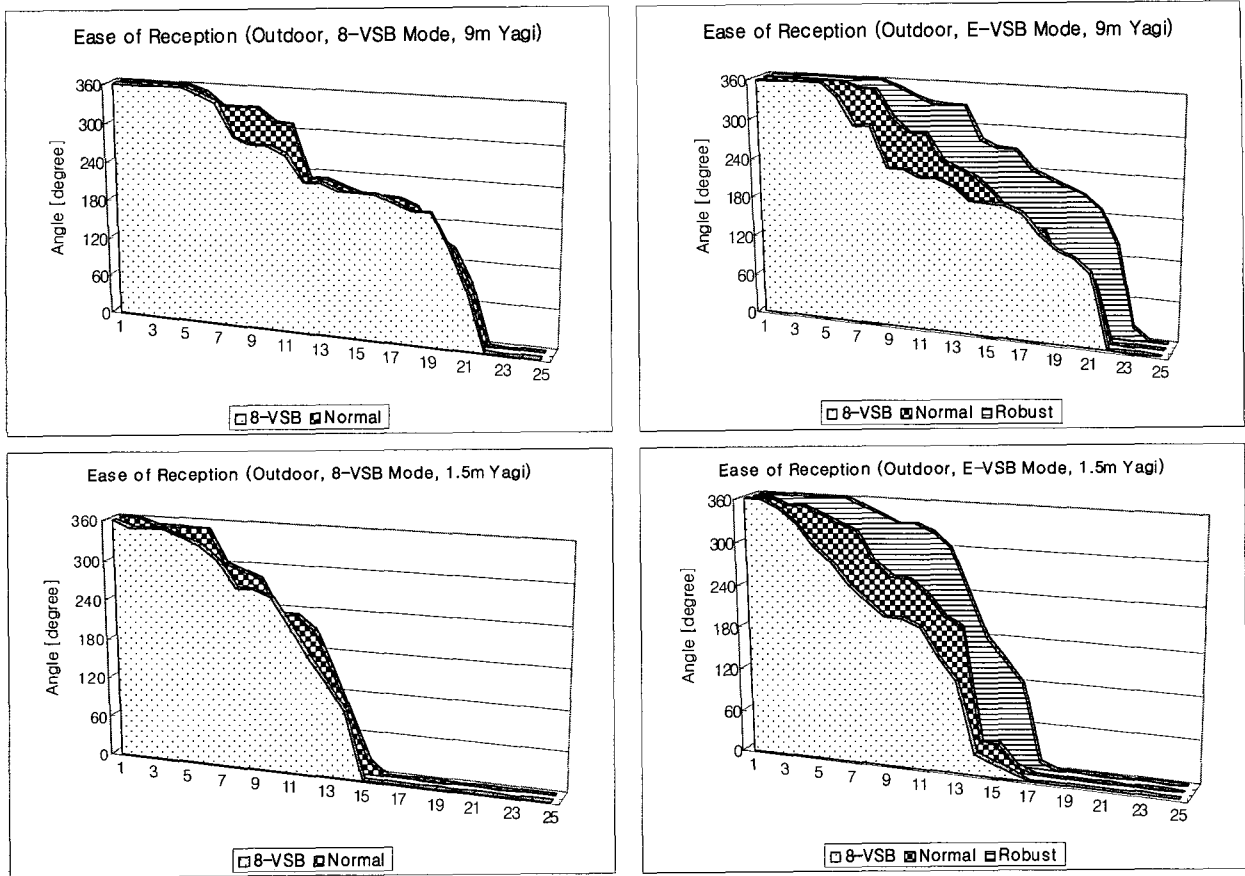


그림 13. 실외 수신가능 방위각
 Fig. 13. Ease of reception at outdoor locations

및 수신 가능 방위각은 양 수신기에서 거의 동일하다. 8-VSB 신호를 송출하는 경우 사용되는 안테나에 따라 수신 성능에는 차이가 있지만, 8-VSB 및 E-VSB 수신 성능은 비슷하게 나타난다.

E-VSB 신호를 송출할 때 9 m 지향성 안테나를 사용하였을 경우 8-VSB 수신기와 E-VSB 정상 모드 수신기는 모두 84 %의 수신 성공율을 가지며, E-VSB 강인 모드 수신기의 경우 92%의 높은 성공율을 가진다. 또한 1.5 m 무지향성 안테나를 사용하면, 지향성 안테나 보다 낮은 수신 성공율을 가진다. 잡음 마진 및 수신 가능 방위각은 E-VSB 강인 모드 수신기가 다른 수신기보다 높게 나타난다.

2. 실내 필드 테스트 결과

그림 14~16은 8-VSB 및 E-VSB 신호를 송출할 때 8-VSB 수신기와 E-VSB 정상 및 강인 모드 수신기에서의 1.5 m 지향성 및 무지향성 안테나에 따른 실내 수신 성공율, 잡음 마진, 수신 가능 방위각을 각각 나타낸다. 8-VSB 신호를 송출할 때 1.5 m 지향성 안테나를 사용하였을 경우 8-VSB 수신기 및 E-VSB 정상모드 수신기는 70 % 이상의 수신 성공율을 가지지만, 1.5 m 무지향성 안테나를 사용하는 경우 10 % 이하의 낮은 수신 성공율을 가진다. 또한, 잡음 마진 및 수신 가능 방위각은 양 수신기에서 거의 동일하게 나타난다. 따라서 8-VSB 신호를 송출하는 경우 사용되는 안테나에 따라 수신 성능에는 차이가 있지만,

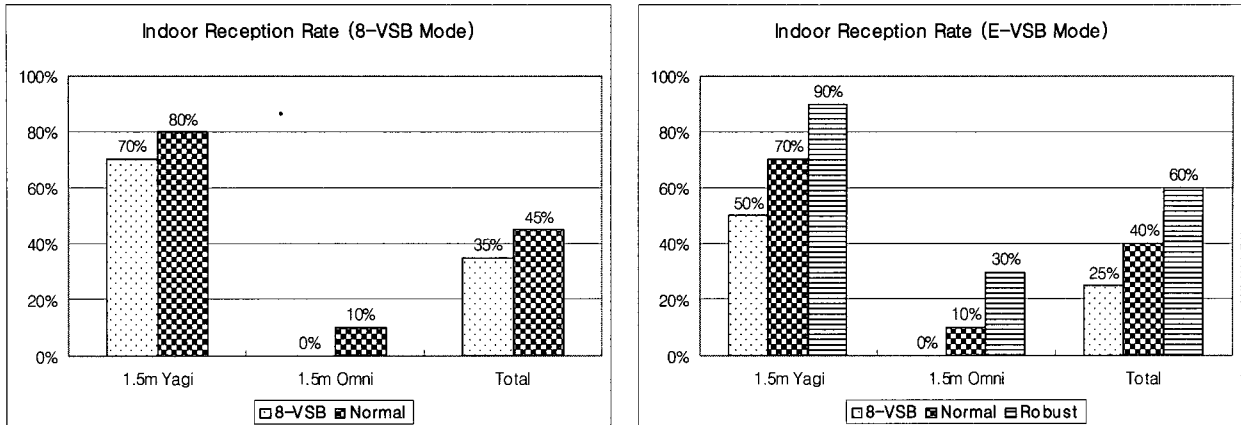


그림 14. 실내 수신 성공률
Fig. 14. Reception rate at indoor locations

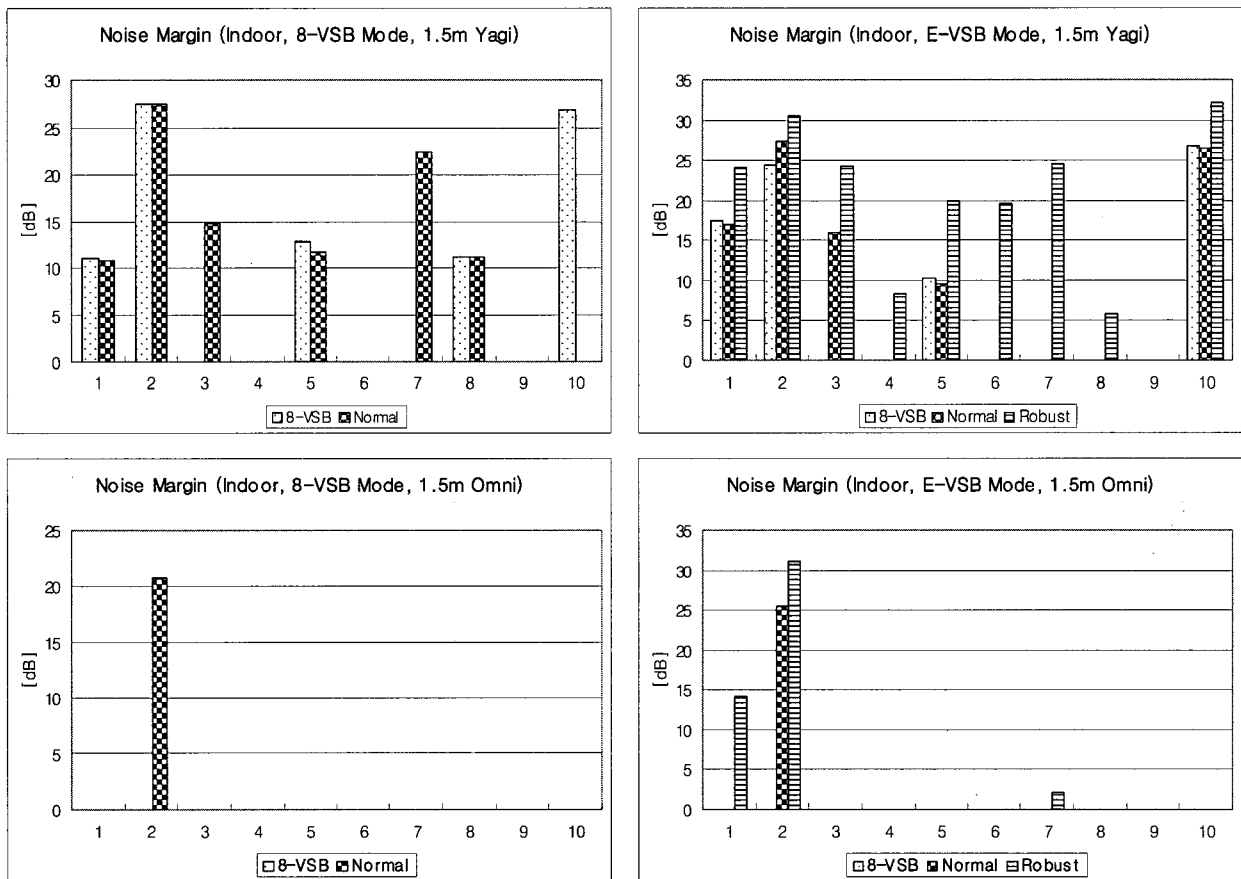


그림 15. 실내 수신잡음 마진
Fig. 15. Noise margin at indoor locations

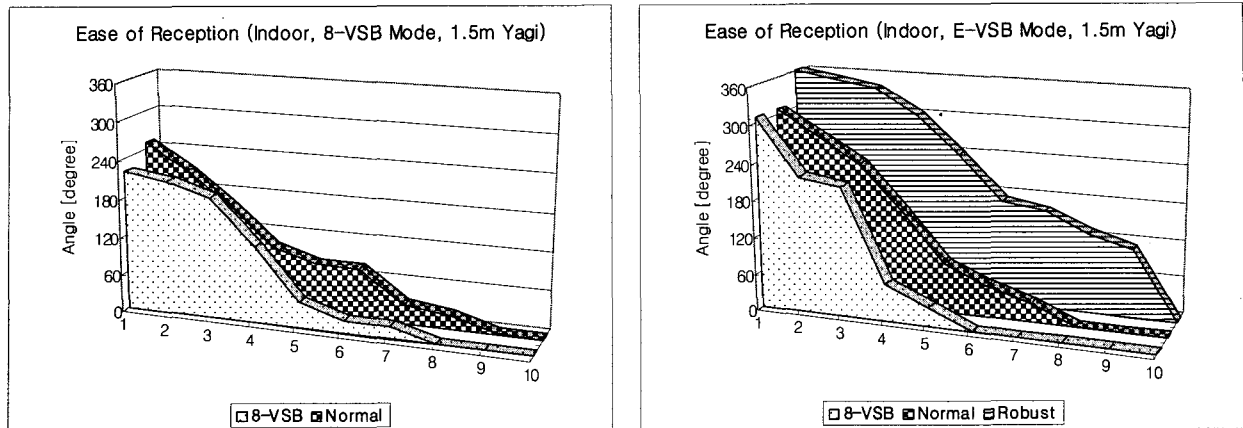


그림 16. 실내 수신 가능방위각
Fig. 16. Ease of reception at indoor locations

실내 수신에서도 8-VSB 및 E-VSB 수신 성능은 비슷하게 나타난다.

E-VSB 신호를 송출할 때 1.5 m 지향성 안테나를 사용하면 8-VSB 수신기와 E-VSB 정상 모드 수신기는 각각 50 % 및 70 %의 수신 성공율을 가지며, E-VSB 강인 모드 수신기의 경우 90 %의 높은 성공율을 가진다. 또한 1.5 m 무지향성 안테나를 사용하면, 지향성 안테나 보다 낮은 수신 성공율을 가진다. 여기서 E-VSB 송신 신호에 대해 E-VSB 정상 모드 수신기가 8-VSB 수신기보다 높은 수신 성공율을 갖는데, 그 이유는 E-VSB 정상 모드 수신기에 강인 스트림을 이용한 등화부 성능개선 알고리즘이 적용되었기 때문이다. 이러한 개선된 등화부의 효과는 실외 수신보다는 다중경로 왜곡이 심한 실내 수신에서 더 많이 나타난다. 잡음 마진 및 수신 가능 방위각은 E-VSB 강인 모드 수신기가 다른 수신기보다 높게 나타난다.

V. 결론 및 향후 전망

본 논문에서는 Zenith/ATI가 제안한 E-VSB 시스템에 대한 필드 테스트 절차 및 결과를 기술하고, 그 결과를 다양한 각도에서 분석하였다. 약전계 지역에서 수신 성능을 향상시킬 수 있는 E-VSB 방식의 성능 개선 효과를 분석하기 위해 실외 및 실내에서의 수신여부, 노이즈 마진 및 수신가능 방위각 등

을 안테나 종류에 따라 측정하였다. 필드 테스트 결과에 의하면, E-VSB 시스템은 8-VSB 시스템과 상호 호환성을 유지하였고 강인 모드인 경우 우수한 수신 성능을 보였다. 특히 강인 모드의 경우 실내 수신환경과 같은 난시청 환경 개선에 많은 도움이 될 것으로 판단된다. 그러나 E-VSB 시스템의 정상 모드인 데이터 전송율이 감소되기 때문에 기존의 8-VSB 시스템에 비해 화질이 열화된다는 약점도 확인되었다.

참고 문헌

- [1] T. J. Thong, "Digital TV field trials in Singapore," ABU Technical Review, no. 178, 1998.
- [2] T. J. Thong, "Singapore digital television technical committee Final report," May 1999.
- [3] SET/ABERT, 11A/69, "Digital television systems Brazilian tests final report," <http://www.set.com.br/testing.pdf>.
- [4] "8 VSB/COFDM Comparison Report, Association for Maximum Service Television (MSTV)," Wash., DC, Dec. 2000.
- [5] Y. Wu, E. Pliszka, B. Caron, P. Bouchard and G. Chouinard, "Comparison of Terrestrial DTV Transmission System: The ATSC 8-VSB, the DVB-T, and ISDB-T BST-OFDM," IEEE Trans. Broadcasting, vol. 46, no. 2, June 2000, pp. 101-113.
- [6] Y. Wu, "Performance comparison of ATSC 8-VSB and DVB-T COFDM transmission systems for digital television terrestrial broadcasting," IEEE Trans. Consumer Electronics, vol. 45, no. 3, Aug. 1999, pp. 916-924.
- [7] "VSB Enhancement Testing Consortium (VETC)," reports on field tests in Washington D.C (2002) and New Haven, CT (2003).
- [8] ATSC T3/S9 Proposal Questions & Proposals, Advanced

Television System Committee, 2003.

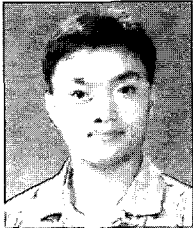
[9] ATSC Digital Television Standard A/53 E, Advanced Television System Committee, 2005.

[10] G. Sgrignoli, "ATSC Field Test Vehicle Design," Model Station

Document, April, 1997.

[11] 박성익, 이용태, 음호민, 서재현, 김홍목, 김승원, 이수인, "동화형 디지털 동일 채널 중계기 Part II : 필드 테스트 결과," 방송공학회 논문지, 제10권, 제2호, pp. 221-237, 2005년.

저 자 소 개



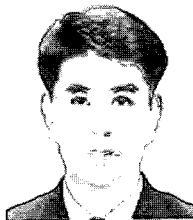
이 용 태

- 1989년 3월 ~ 1993년 2월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
- 1993년 8월 ~ 1995년 8월 : 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
- 2002년 8월 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
- 1995년 8월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 선임연구원
- 주관심분야 : RF 신호처리, 디지털 신호처리, DTV 전송시스템



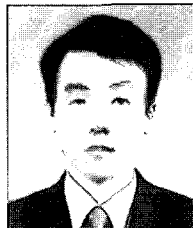
박 성 익

- 1996년 3월 ~ 2000년 2월 : 한양대학교 전자전기공학부 (공학사)
- 2000년 3월 ~ 2002년 2월 : 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 연구원
- 주관심분야 : 채널코딩, 디지털 신호처리, DTV 전송시스템



김 승 원

- 1982년 3월 ~ 1986년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
- 1986년 3월 ~ 1988년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1993년 8월 ~ 1999년 2월 : Florida University ECE (Electrical & Computer Engineering) (공학박사)
- 1989년 6월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 책임연구원
- 주관심분야 : 디지털 신호처리, DTV 전송시스템



이 수 인

- 1980년 3월 ~ 1985년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학사)
- 1987년 3월 ~ 1989년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1989년 3월 ~ 1996년 2월 : 경북대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1990년 2월 ~ 현재 : 한국전자통신연구원 방송시스템연구그룹 그룹장
- 주관심분야 : 디지털 통신/방송 시스템, 오류정정부호



서 종 수

- 1975년 2월 : 연세대학교 전자공학과 (공학사)
- 1983년 12월 : University of Ottawa, Canada 전기공학과 (공학석사)
- 1988년 6월 : University of Ottawa, Canada 전기공학과 (공학석사) (공학박사)
- 1975년 4월 ~ 1981년 12월 : LG정밀 연구소
- 1982년 7월 ~ 1989년 12월 : IDC, Canada 책임연구원
- 1990년 1월 ~ 1992년 3월 : 삼성종합기술원 정보시스템 연구소 수석연구원
- 1992년 4월 ~ 1995년 2월 : CAL, Canada 책임연구원
- 1995년 3월 ~ 현재 : 연세대학교 전기전자공학과 정교수