

ILS 로컬라이저 시스템 분석 및 전력증폭기 설계

System Analysis and Power Amplifier Design for ILS Localizer

김수경^{1,2} · 구경현^{2*}

¹한국공항공사

²인천대학교 전자공학과

Su kyung Kim^{1,2} · Kyung Heon Koo^{2*}

¹Korea Airports Corporation, Seoul, 07505, Korea

²Dept. of Electronics Engineering, Incheon National University, Incheon, 22012, Korea

[요 약]

본 논문에서는 ILS (instrument landing system) 로컬라이저 전력증폭기의 변조도, 출력, 그리고 위상 변화량 규격의 요구성능을 도출하기 위하여, 시스템의 주요 성능 중에서 course structure와 course width를 연구하였다. Course structure의 편차 규격($\pm 5 \mu\text{A}$)을 만족하기 위한 CSB (carrier with sideband) 증폭기의 변조신호 DDM (difference in depth of modulation) 편차 규격을 $\pm 1 \mu\text{A}$ (0.001 DDM)로 규격화하였다. CSB 30 W 전력증폭기를 설계하였고, 변조도 보상회로를 통하여 동작운용 출력범위(45 dBm ~ 35 dBm)에서 SDM (sum in depth of modulation)은 $40\% \pm 0.1\%$, DDM은 ± 0.0005 DDM의 특성을 얻었다. 그리고 course width와 displacement sensitivity 규격에 대하여 시뮬레이션으로 분석하고, 가장 엄격한 규격인 운용개시 점검시에 적용되는 $\pm 0.1^\circ$ 변화량을 적용하여, SBO (suppressed with sideband only) 증폭기의 출력변동은 $\pm 2 \text{ mW}$, 위상은 $\pm 3^\circ$ 로 규격화하고 특성을 만족하였다. 출력과 온도에 따른 보상회로를 적용하여, 안정적인 변조지수, 출력, 그리고 위상 특성을 얻었다.

[Abstract]

In this paper, course structure and course width were studied among the main performances of the system to derive the required performance of the modulation index, output power, and phase change specifications of the instrument landing system (ILS) localizer power amplifier. To satisfy the course structure's deviation standard ($\pm 5 \mu\text{A}$), the difference in depth of modulation (DDM) deviation standard of the carrier with sideband (CSB) amplifier was standardized to $\pm 1 \mu\text{A}$ (0.001 DDM). CSB 30 W power amplifier was designed, and through the modulation compensation circuit, sum in depth of modulation (SDM) is $40\% \pm 0.1\%$ and DDM is ± 0.0005 DDM in the operating output range(45 dBm ~ 35 dBm). In addition, the course width and displacement sensitivity specifications were analyzed through simulation, and the $\pm 0.1^\circ$ change applied during commissioning inspection, which is the most stringent standard, was applied. The output variation of the suppressed with sideband only (SBO) amplifier was $\pm 2 \text{ mW}$ or less, The phase was standardized to within $\pm 3^\circ$ and the characteristics were satisfied. By applying a compensation circuit according to output power and temperature, stable modulation index, output, and phase characteristics were obtained.

Key word: Instrument landing system, Localizer, Difference in depth of modulation, Sum in depth of modulation, Power amplifier.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.1.116>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 7 February 2024; Revised 26 February 2024

Accepted (Publication) 28 February 2024 (29 February 2024)

*Corresponding Author; Su Kyung Kim

Tel: *** - **** - ****

E-mail: skkim04@airport.co.kr

1. 서론

계기착륙시스템(ILS; instrument landing system)은 항공기의 활주로 접근 및 착륙 유도용 국제 표준시설로써, 지향성 전파를 방사하여 정상궤도로 활주로까지 안전하게 유도하는 시스템이며, 로컬라이저(LOC; localizer), 글라이드패스(GP; glide path), 마커(marker)로 구성되는 무선설비로써 각각 항공기에게 방위각, 활공각, 그리고 착륙지점까지의 거리정보라는 3차원 정보를 제공한다. 본 논문에서 연구한 계기착륙시스템 로컬라이저의 규격은 국제민간항공기구(ICAO; International Civil Aviation Organization)의 국제표준 및 권고(SARPs; Standard and Recommended Practices)로 규정돼 있다. 운용 주파수 대역은 108.10 MHz ~ 111.95 MHz이며, 40개 채널, 그리고 50 kHz의 채널 간격이다. 이중 주파수 로컬라이저에서는 방위각 정보를 제공하기 위하여 CRS(course)와 CLR(clearance) 두개의 주증폭기로 구성되는 Capture Effect 방식은 5 kHz ~ 15 kHz 주파수 이격 특성을 갖으며, CRS 신호는 CLR 신호보다 10dB이상 크게 설계한다. 따라서 항공기 지시기는 $CRS \pm 10^\circ$ 영역에서는 CRS신호에 반응하며 CRS Sidelobe가 충분히 낮은 $\pm 35^\circ$ 영역에서는 CLR 신호에 주로 반응하다[1]-[3]. 안테나는 소형화 및 이득향상을 위하여 LPDA(Log periodic dipole array)를 사용하여 14, 16, 20, 24, 또는 32개 Array로 적용되며, 공항 Category, 활주로길이, 그리고 공항의 지형지물 같은 설치 환경 여건에 맞게 선택된다. CRS와 CLR 주증폭기의 각 증폭기는 CSB(carrier with sideband) 증폭기(변조 : 90 Hz + 150 Hz)와 SBO (suppressed carrier with sideband only) 증폭기(변조 : 90 Hz - 150 Hz)로 구성되며, 각각의 신호들은 빔 합성기를 통하여 그림 1에서와 같이 4개의 방사 패턴을 형성한다. 각각 변조주수 합과 차 신호인, SDM (sum in depth of modulation)과 DDM (difference in depth of modulation)의 표현된다. 착륙 및 접근하는 항공기에게 CRS의 CSB와 SBO증폭기 신호는 Center line 및 Course Width를 결정하는 신호가 되고, CLR CSB와 SBO증폭기 신호는 활주로 중심선으로 안내하고 유도한다.

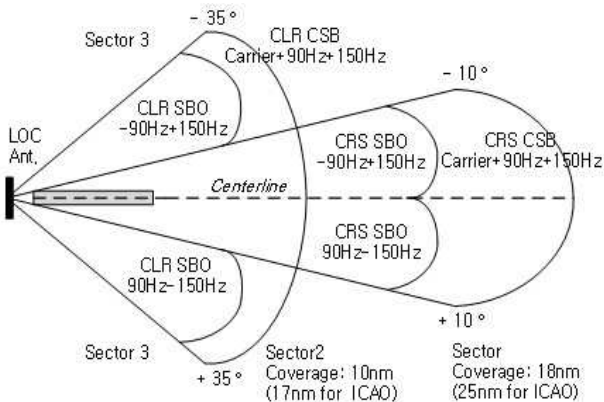


그림 1. ILS 로컬라이저 운용범위와 변조신호[4]
Fig. 1. The coverage and modulation signal of ILS localizer[4].

이때 항공기가 수신한 DDM 값이 조종석 계기의 전류값으로 변환되어 우측은 150 Hz, 좌측은 90 Hz 변조 성분이 우세하게 표시되며, 접근하는 항공기에 활주로 중심선 정보를 제공하여 지정된 경로를 벗어나면 계기판의 Cross Pointer가 좌우 편향을 지시하게 된다.

계기착륙시스템 로컬라이저의 시스템 주요 규격 중 하나는 course alignment accuracy로서, 활주로 중심선과의 정렬 (DDM = 0) 정확도이며, 규격은 ± 3 m 이다. 정렬 보정시 안테나를 돌리거나 RF 케이블 길이의 위상을 정밀하게 맞춰야하는 물리적인 조정 절차의 번거로움이 있다. Course alignment 미세 조정을 목적으로 비콘에서 90 Hz와 150Hz의 변조조 balance를 조정하여 정렬하는 방법제안등이 연구돼 왔다[5]-[6]. 또한 SDR (software defined radio)을 이용한 신호분석 및 SDM과 DDM을 활용하여 로컬라이저 수신기 설계에 관한 이론적 해석 및 기존 계측기와와의 비교·검증하는 연구들이 발표돼 왔다[7]-[8].

ILS 로컬라이저의 빔합성기와 안테나를 통한 방사신호가 건물 및 지면 구조물들의 반사로 다중경로 페이딩을 발생하며, 공간상에서 90 Hz, 150 Hz의 변조 신호품질에 많은 영향을 준다. 본 연구에서는 빔합성기 설계와 안테나 설치의 물리적으로 정렬이 되었다는 가정하에, ILS 로컬라이저의 송신부 CSB와 SBO 전력증폭기의 성능이 시스템의 주요 요구성능에 미치는 영향을 분석하고, 전력 증폭기의 요구규격으로 도출하여 설계·측정하였다. 시스템의 전기적 규격은 ICAO 기준으로서, 결심고도 (DH; decision height) 30 m 이하이고 시정거리 (RVR; runway visual range) 300 m 이하에서 적용되는 CAT (category) III 기준으로 적용한다.

II. 시스템 분석 및 증폭기 요구사항

시스템의 주요 요구성능으로는 항공기 수신신호가 center line 연장선에서 측정 되는 DDM의 편차를 정의하는 course Structure, 수평면상의 진입각으로서 규정된 0.155DDM수치로 조정된 course width, 그리고 운용개시나 정기검사시 유지관리하는 displacement sensitivity 요구성능을 중점적으로 분석하였다. 본 논문에서 주요한 지표로서 자주 언급되고 공간에서의 합성변조 지수로 사용되는 DDM과 SDM은 식(1) ~ 식(3)으로 나타낼 수 있다[6]-[7].

$$DDM = 2m \frac{E_{SS}}{E_{CS}} \cos(\phi) \tag{1}$$

식(1)에서 E_{CS} 는 송신기에서 반송파와 함께 변조된 측파대 신호(CSB)이며, E_{SS} 는 분리 방사된 신호(SBO)를 나타낸다. ϕ 는 CSB와 SBO 신호의 위상 차이 값이다.

$$DDM = m 150 \text{ Hz} - m 90 \text{ Hz} \tag{2}$$

$$SDM = m150\text{ Hz} + m90\text{ Hz} \tag{3}$$

공간에서 합성된 90 Hz와 150 Hz는 신호처리에 의해 분리하여 개별 변조도가 측정되며, 식(2)와 식(3)에 의한 변조신호 간의 합과 차의 신호가 SDM과 DDM의 지수로 계산된다. 공간상에서의 변조도 변화에 따른 course structure와 course width의 편위 정도를 분석하고 비콘 송신 증폭기의 요구성능 목표를 도출하기 위한 분석을 하였다.

2-1 Course Structure

Course structure는 그림 2에서 보여주는 것과 같이 코스정렬(zone 2와 3) 또는 코스 신호(zone 1)의 평균값 으로부터 항공기 계기 포인터의 최대 편위를 의미하며, uA 단위로 표현하고 거리는 NM 단위를 사용한다. Point A에서 point E 지점 사이 구간을 Zone 1에서 Zone 5로 나누고, category 등급별로 적용기준이 다르다. Course structure 편이는 zone 2 영역인 point B 지점(활주로말단 3000 ft)에서부터 point D 지점까지 $\pm 5\text{ uA}$ 의 편차 규격을 만족 해야한다. 지형지물들의 반사파에 의한 cross over 신호들이 존재하지만, 빔합성기 및 안테나 array의 정렬오차 이내로 설치 되었다면, centerline 연장선에서의 course structure 신호품질은 CRS CSB 증폭기의 변조신호 품질에 주로 영향을 받는다. 이상적으로는 centerline에서 변조신호 90 Hz와 150 Hz는 20% 균형이 맞추어져 있다면, SDM은 40% 이고 DDM은 0 DDM 이다. CSB 신호의 출력은 로컬라이저의 운용범위를 결정하고, 변조 신호들의 합과 차로 표현되는 SDM과 DDM 지수의 기준신호가 되므로 출력과 위상을 안정적으로 제어하는 것이 중요하다. 로컬라이저에서 변조차이 0.155 DDM은 계기판의 150 uA로 환산되는데, 증폭기는 1 uA(0.001 DDM) 이내의 변화량으로 규격화 하였다. 따라서 90 Hz와 150 Hz 사이의 변조도 차이는 0.10% 이내의 안정성이 요구된다.

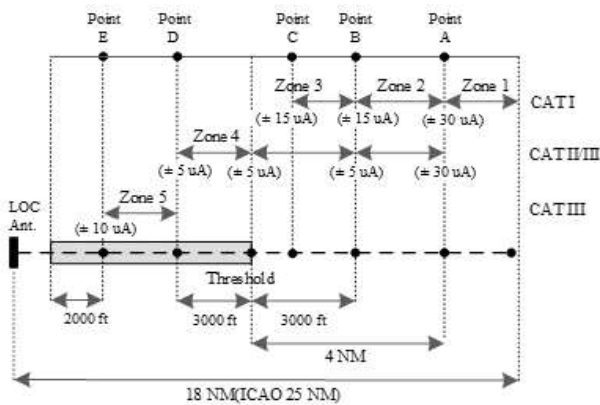


그림 2. 로컬라이저 course structure
Fig. 2. Localizer course structure.

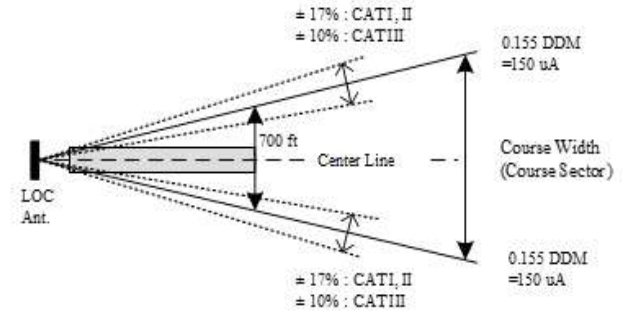


그림 3. 코스폭과 편위감도
Fig. 3. Course width and displacement sensitivity.

2-2 Course Width

CSB & SBO 증폭기는 각각 CRS와 CLR sector로 구분되어 필드로 방사되고 위상 관계는 동위상이 되어야 한다. 그림 3에서 보여주는 것과 같이 course width는 CRS 방사필드 영역이며, 서비스 운용범위에 맞는 CSB 출력이 확정되고, 활주로 말단 중심에서 350 ft되는 지점에서 0.155 DDM이 나오도록 SBO의 변조신호 출력과 위상을 조정하여 course width 각도가 정해진다. 운용개시 후에는 편위감도 이내의 course width가 유지되어야 한다. 그러나 장비 운용에 따른 출력과 위상의 미세한 변화들이 식 (1)의 계산에 의하여 DDM의 변화가 나타나고 코스폭 각도의 변화를 가져온다. 또한 이중화 비콘에서는 장비간의 편차가 $\pm 0.5^\circ$ 이내이거나 운용개시 검사시에 설정된 값의 10%값 중 최소값이 적용된다[1]-[2]. ILS 필드 환경 시뮬레이터(AXIS 110 ILS localizer)를 이용하여 출력과 위상 변화에 따른 course width를 변화를 시뮬레이션 하였다. 이때 안테나는 시뮬레이터에 모델링 되어있는 Wilcox 20/10 Dual 모델을 적용하였다. 활주로 길이는 2800 m (9000 ft)를 적용 하였으며 course width는 3.94° 로 시뮬레이션 되었다. 한국공항공사에서 운영하는 전국 14개 공항의 활주로는 3600 m~2000 m까지 분포되어 있으며, 중간활주로 길이를 모델로 삼았다. 아래 그림 4에서 보는 것과 같이 course width는 3.94° 로 예측 되었고, 동그란 박스 부분이 0.155 DDM(150 uA) 값이다.

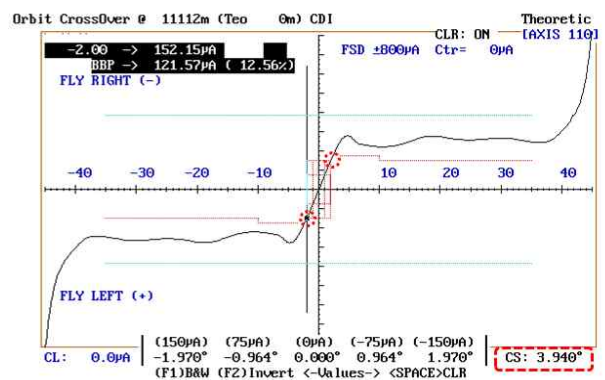


그림 4. 로컬라이저 운용범위에서의 DDM 신호
Fig. 4. DDM signal of localizer operational range.

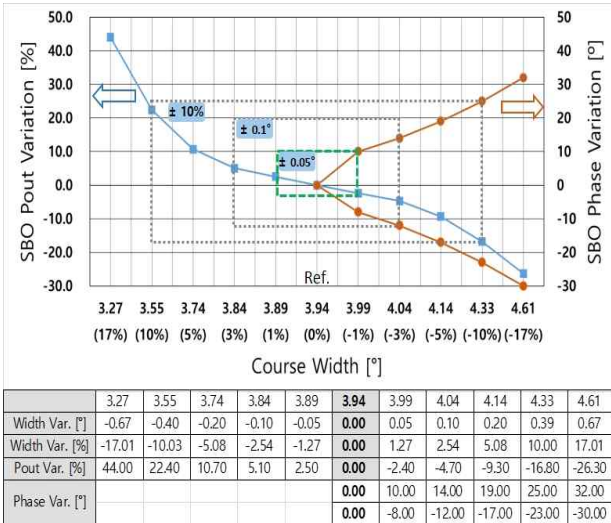


그림 5. SBO Amp의 Pout & phase 변화에 따른 코스폭
 Fig. 5. Course width according to change in Pout & phase of SBO Amp.

AXIS 시뮬레이터로 SBO 증폭기의 출력과 위상값을 변화시켜가며 코스폭의 변화를 연구하였으며, 이때 CRS CSB 출력은 공간변조의 기준신호로써 변화시키지 않았다. 그림 5에서 가로축의 가운데 3.94 °(Ref)를 기준으로 좌·우측으로 course width 변화량을 기록하였고 그래프로 작성하였다. 1%, 3%, 5%, 10%, 그리고 17% 변화량에서 course width의 편위에 해당 되는 값을 구하기 위하여, 세로축 SBO 출력과 위상 변화 값을 구하였다. 정기검사시에 적용되는 displacement sensitivity 규격은 ± 10% 이므로 이 기준을 적용하면, SBO 출력은 - 16.8% ~ + 22.4% 범위이고, 위상은 - 23 ° ~ + 25 ° 범위의 변화량일 때에 만족한다. 시스템 주요 요구규격을 정리하면, course structure는 시스템 규격 ± 5 uA의 편차 규격을 만족하기 위하여 CSB 증폭기의 DDM은 0.0001 DDM(1 uA) 이내의 변화량을 목표로 설정하였다. 또한 course width는 가장 엄격한 규격인 운용개시 점검시에 적용되는 ± 0.1 ° 이내 기준을 적용하여, SBO 출력은 - 4.7% ~ + 5.1% 범위이고, 위상은 - 12 ° ~ + 14 ° 범위의 변화량일 때에 규격을 만족한다. 따라서 안테나 정렬 및 CSB 출력의 변동성까지 고려하여 SBO의 출력변동은 2% 이내, 위상변동은 ± 5 ° 이내로 규격화하여 아래 표 1과 같이 주요 요구사항을 정리하였다.

표 1. 증폭기 주요 요구성능 규격
 Table 1. Specification of required amplifier performance.

Items	Specification
Freq. Range	108 ~ 112 MHz
Pout Range(CSB)	45 dBm ~ 35 dBm
Pout Range(SBO)	30 mW ~ 500 mW
Modulation(CSB)	20% ± 0.1%(90 Hz, 150 Hz)
SDM Stability(CSB)	± 0.2%
DDM Stability(CSB)	± 0.001DDM
Pout Stability(SBO)	< 3mW
Phase Stability(SBO)	< 5°

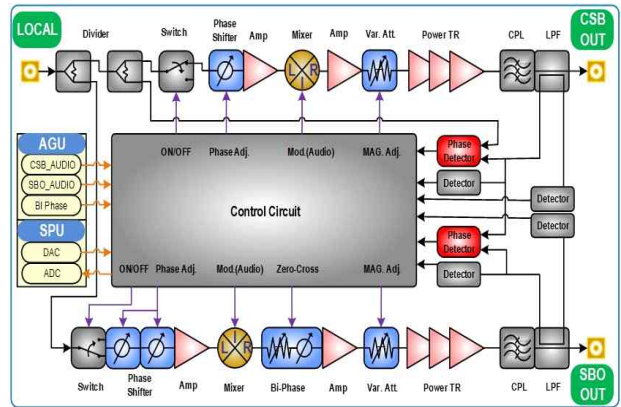


그림 6. CSB & SBO Amplifier 블록도
 Fig. 6. Block diagram of CSB & SBO amplifier.

III. 증폭기 설계

3-1 변조부 및 제어회로

CSB 증폭기는 AM (amplitude modulation) 변조 증폭기로서 switching modulator나 square-law modulator를, SBO 증폭기는 반송파를 억압해야하는 DSB-SC (double side band suppressed carrier) 변조로서 balanced modulator나 ring-modulator를 사용하여 변조 신호를 생성한다[9]-[10]. 그림 6은 본 논문에서 설계한 로컬라이저 전력증폭기의 전체 블록도 이다. CSB 진폭변조 설계는 모듈레이터로 믹서를 사용하였고, 시스템 유닛 AGU (audio generation unit)로부터 변조신호 90 Hz + 150 Hz 변조신호와 local(+ 2dBm) 신호가 믹서로 인가되어 변조된다.

SBO 변조부 설계시 반송파 신호를 억압(-40dBc min.)하고 변조신호만 출력으로 내보내야 한다. 변조신호는 AGU로부터 90 Hz - 150 Hz 합성신호의 절대값 신호 형태로 믹서에 인가되어 local 신호와 변조된다. 또한 반송파 신호를 억압하기 위해서 AGU로부터 |90 Hz - 150 Hz| 신호주기에 동기화된 zero crossing 트리거신호를 받아서 반송파 위상을 180도 반전시켜주는 bi-phase 부품에 신호가 인가되고 주기에 맞추어 동작시켜준다. 트리거에 위상동기된 동작으로 반송파가 억압되고 변조신호 90Hz - 150 Hz 성분만을 얻을 수 있다.

CSB와 SBO 증폭기의 가장 중요한 특성은 출력과 위상의 안정적 제어이다. 증폭기의 출력은 각 증폭기의 출력 신호를 커플링하여 감지한 이후에 내부 제어회로인 적분기를 이용하여 각각 출력을 일정하게 제어하는 AGC (auto gain control)를 설계하였다. 위상제어는 CSB 신호를 먼저 Local 신호에 먼저 동기화 시키고, SBO의 반송파 위상과 동기화하였다. 위상차이 값에 선형적인 phase detector를 사용하여 위상오차를 감지하였다. 위상차이를 일정하게 제어하는 AGC 회로로 자동제어 회로를 설계하였다. SPU (signal process unit)에서 별도 제어하는 DAC (digital to analog converter)전압으로 AGC & APC의 동작을 제어하였다.

3-2 증폭부 설계

CSB 증폭기는 60 dB 이득과 P_{1dB} 는 51.5 dBm 이상이 나오도록 구동 증폭기를 포함하여 4단 증폭기로 설계 되었으며, 최종 단 트랜지스터는 NXP사의 LDMOSFET (laterally diffused metal oxide semiconductor), MRFE6VP6600N를 사용하였다. 효율 및 운용범위 전력에서의 SDM의 선형적인 변조도 특성 만족 하도록, 동작점을 AB급으로 설계하고, 2차 하모닉 임피던스가 리액턴스 성분을 갖도록 조정하여, J급으로 동작시켜 효율과 선형성을 만족하도록 설계하였다[4], [11]. SBO 증폭기는 45 dB 이득과 P_{1dB} 는 46.5 dBm 이상이 나오도록 구동 증폭기를 포함하여 4단 증폭기로 설계 되었으며 저주파 대역에서 범용적으로 사용되는 NXP사의 LDMOSFET, MRFE6VP1500N을 최종 단 트랜지스터로 사용하였다. 20 dB 정도 Back-off 출력 아래에서 운용하여 고출력 트랜지스터의 비선형 혼변조 신호가 변조 신호 성분(90 Hz, 150 Hz)에 영향이 없도록 설계하였다. LDMOS 부품들의 단중 주기가 빨라지고 있기 때문에 50 V 동작의 LDMOS 트랜지스터를 사용하였고, 30 V에서 MRFE6VP6600N은 P_{1dB} 에서 210 W, MRFE6VP1500N은 P_{1dB} 에서 60 W의 특성을 보인다.

IV. 제작 및 측정

로컬라이저 비콘의 시스템 인터페이스에 증폭기의 입·출력 신호를 맞추고, 하나의 모듈안에 CSB와 SBO 증폭기를 같이 구성하여 신호제어를 하였다. 그림 7은 본 연구를 위해 제작한 로컬라이저 CSB와 SBO 증폭기의 제작 사진이다. 논문 [4]에서 선행 연구된 CSB 증폭기의 특성은 P_{SAT} 출력 54.5 dBm에서 최대효율은 71.5%, P_{1dB} 출력 51.5 dBm에서 효율은 51.5%의 결과를 얻었으며 동작운용 출력범위(45 dBm ~ 35 dBm)에서의 SDM 특성(40% ± 0.3%)을 얻었다. 본 논문에서 출력에 따른 보상회로를 적용하여 SDM 특성 40% ± 0.03%의 특성을 얻었다.

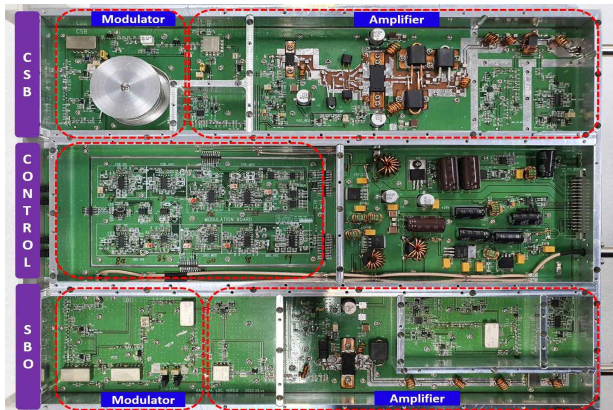


그림 7. 로컬라이저 주 증폭기 제작 사진
Fig. 7. Photo of the main amplifier for localizer.

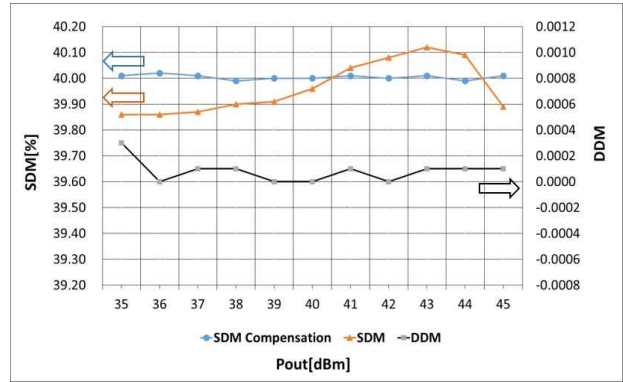


그림 8. 로컬라이저 CSB 증폭기의 SDM & DDM 특성
Fig. 8. SDM & DDM characteristics of CSB amplifier for localizer.

시스템의 주요 요구사항 분석을 통해 SDM의 변조도 편차를 40% ± 0.1% 이하의 특성을 얻기 위하여 AGU에서 인가되는 합성 변조신호에 DC Offset 보상회로를 적용하였으며, SPU에서 DAC 값을 변화시켜가며 출력 및 온도 변화에 따른 미세한 변조도 편차를 보정하였다. CSB 증폭기의 변조신호 90 Hz와 150 Hz는 증폭기가 선형적인 영역에서 운용되면 두 변조신호 간에 균형이 거의 맞는다. 따라서 증폭기의 SDM 특성의 편차를 맞추는 방향으로 보상회로를 적용하면 DDM의 특성도 안정적으로 제어 가능하다. 또한 특정 출력에서 운용하게 될 때, 변조신호 생성모듈인 AGU에서 calibration을 통하여 정밀하게 제어가 가능하다. 그림 8에서 출력에 따른 CSB 증폭기의 SDM과 DDM 측정 값을 도식화 하였으며, SDM의 변조도의 보상 후 40% ± 0.03%의 특성을 얻었으며, DDM 변조도 값은 ± 0.0003 DDM을 얻었다. 시스템 course structure 분석에서 도출한 요구 성능 규격 ± 0.001 DDM 이내를 만족함을 알 수 있다.

CSB 출력 30 W에서의 RF 특성을 그림 9에서 보여주고 있다. 변조 20%일 때 반송파와 변조신호는 -20 dBc 특성을 보이며, 변조신호(90 Hz, 150 Hz)들의 잡음영역 고조파 신호들은 변조 신호대비 최소 -35 dBc 이상일때 왜곡이 최소화 됐으며, 출력이 올라갈수록 비선형 성분들에 의한 변조 왜곡이 발생한다.

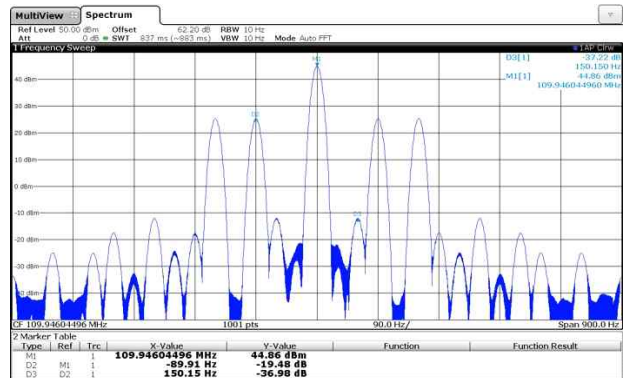


그림 9. CSB 증폭기 RF 특성(30 W)
Fig. 9. CSB amplifier RF characteristics(30 W).

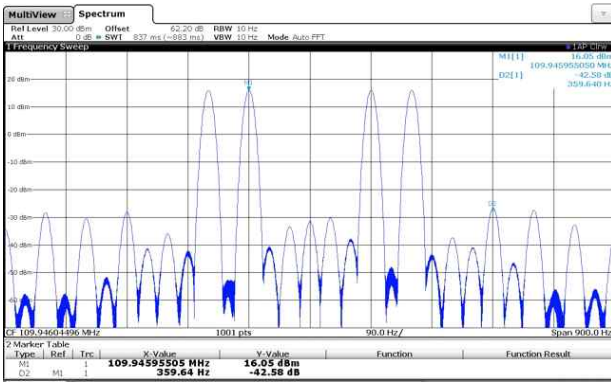


그림 10. SBO 증폭기 RF 특성(160 mW)
 Fig. 10. SBO amplifier RF characteristics(160 mW).

SBO 출력 160 mW 에서의 RF 특성을 그림 10에서 보여주고 있다. 보유하고 있는 로컬라이저 안테나 및 비콘 기준으로 Course Width에 설정하는 출력으로 측정하였으며, 설계한 증폭기의 운용 동작범위 출력은 30 mW ~ 500 mW 이다. 반송파 신호 억압은 -60 dBc 이상의 양호한 특성을 얻었다. 또한 변조신호 대비 하모닉 특성은 -40 dBc 이상으로 특성을 만족한다.

CSB와 SBO 출력은 AGC 회로를 통하여 안정적으로 출력 특성을 얻을 수 있었으며, 안정도는 CSB 출력은 100 mW 이내, SBO 출력은 2mW를 얻기 위하여 16 bit DAC를 사용하여 정밀 전력 제어를 하였다. 증폭기의 온도 변화에 다른 출력 안정을 위하여 각각 온도 보상회로를 적용한 하여 0.1 dB 이내로 출력을 안정화 하였다. SPU 유닛에서 출력에 따른 보상은 20구간으로, 온도에 따른 보상은 5구간으로 적용하였다. CSB와 SBO 출력단에서 반송파 위상 동기가 이루어져야 한다. SBO의 억압된 반송파를 재복원하여 CSB 신호와 위상 Detector에서 위상 비교를 하였고 일정한 위상 오차를 유지하는 APC를 설계하였다. 공간에서의 CSB 변조신호 (90 Hz + 150 Hz)와 SBO 변조신호 (90 Hz - 150 Hz) 합성신호를 시험을 통하여 실험을 진행하였다. SBO 출력에 90도 케이블을 연결하고, CSB 출력과 동위상 결합을 하면 변조신호들의 벡터 합 차로 동작하여 동일한 변조값으로 고정된다.

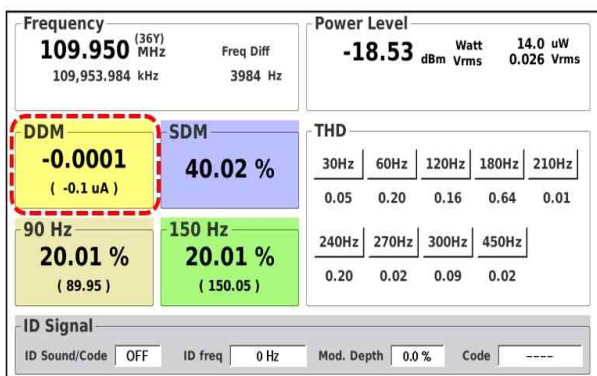


그림 11. CSB & SBO 위상동기 DDM 측정값
 Fig. 11. CSB & SBO phased-locked DDM measurements.

표 2. 요구성능 대비 측정값 비교

Table. 2. Comparison of Measurement Characteristics against Required Performance

Items	Specification	Result
Freq. Range	108 ~ 112 MHz	108 ~ 112 MHz
Pout Range(CSB)	45 dBm ~35 dBm	45 dBm ~35 dBm
Pout Range(SBO)	30 mW ~ 500 mW	30 mW ~ 500 mW
Modulation(CSB)	20% ± 0.1% (90 Hz, 150 Hz)	< 20% ± 0.1% (90 Hz, 150 Hz)
SDM Stability(CSB)	± 0.2%	<± 0.1%
DDM Stability(CSB)	± 0.001 DDM	<± 0.0005 DDM
Pout Stability(SBO)	< 3 mW	< 2 mW
Phase Stability(SBO)	< 5°	< 2°

이때 0 DDM으로 특성이 되는 SBO 위상값을 찾고 시스템의 위상동기의 기준 위상으로 확정한다. 그림 11은 두 신호를 90° phasing으로 합성하여 0 DDM 특성을 보여주며, 한국공항공사 FTS (field test system, 모델명 : SKY Maru 910) 계측기로 측정하였다. II장에서 시스템 주요규격 (course structure, course width, displacement sensitivity) 분석에 통하여 전력증폭기의 요구규격을 도출하였으며, 표 2에서 요구성능 대비 측정값을 비교하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 계기착륙시스템 로컬라이저 시스템의 주요 요구성능 분석을 통하여 course structure의 편차 규격 (± 5 uA) 을 만족하기 위한 CSB 증폭기의 DDM 편차 규격을 1 uA (0.0001 DDM) 규격화하였다. CSB용 30W 전력증폭기를 설계 (P_{1dB} 출력 51.5 dBm, 효율은 51.5%)하였고 동작용 출력범위 (45 dBm ~ 35 dBm) 에서의 SDM 변조도 편차를 보정하여 40% ± 0.1% 이내의 특성을 얻었고, DDM은 ± 0.0005 DDM 이하의 특성을 얻었다. 또한 시스템 규격 course width와 displacement sensitivity를 시뮬레이션을 통하여 분석하고, 가장 엄격한 규격인 운용개시 점검시에 적용되는 ± 0.1° 이내 변화량을 적용하여, SBO 증폭기의 출력변동은 3 mW, 위상은 5° 이내의 요구성능을 규격화하여 그 이하의 특성을 만족하였다. 변조지수, 출력, 그리고 SBO 자동 위상제어는 온도에 따른 보상회로를 적용하여, 안정적인 출력과 위상 제어가 가능하여, 로컬라이저 시스템의 요구규격을 만족할 수 있는 송신부 설계할 수 있었다. 특히 출력에 따른 변조도 보상회로는 기존 증폭기 대비, 출력의 미세한 변화에도 안정적 변조도 특성을 얻을 수 있었다. 향후 전력증폭기의 온도보상 회로를 좀 더 안정화 시키고, 변조생성부와 안테나를 포함한 전체 시스템 분석 연구를 진행할 계획이다.

Acknowledgments

본 연구는 2021년도 한국공항공사 재원으로 수행된 연구임.

References

- [1] ICAO, *Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation Volume 1 Radio Navigation Aids*, Montreal: International Civil Aviation Organization, ch. 3, 2018.
- [2] Departments of the Army, the Navy, and the Air Force and the Federal Aviation Administration, United States standard Flight Inspection Manual, Order 8200.1D, Oklahoma: The Federal Aviation Administration, ch. 15, April. 2015.
- [3] A. Novak and J. Pitor, "Flight inspection of instrument landing system," in *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, Vienna: Austria, pp. 329-332, June 2011.
- [4] S. K. Kim, and K. H. Koo, "Design and amplitude modulation characteristics with bias of class J power amplifier for CSB," Vol. 27, No. 6, pp. 849-854, Dec. 2023.
- [5] N. I. Voytovich, B. V. Zhdanov, and O. I. Orablev, "Influence on the course line position of errors in the amplitude-phase distribution difference channel signals in ILS localizer antenna," in *Ural Symposium on Biomedical Engineering*. Yekaterinburg: Russia, pp. 329-333, May, 2019.
- [6] A. V. Zotov, B. V. Zhdanov, and N. I. Voytovich, "Theory and experiment of ILS localizer course line electronic adjustment," in *International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing*, Sochi: Russia, pp. 1-5, 2019.
- [7] P. Buaon, N. Montree, and K. Horapong, "A Software Defined Radio Receiver for ILS Localizer Signal-in-Space Parameters Inspection using Chirp-Z Transform and Self-Adaptive AGC," *Asia-Pacific Conference on Communications(APCC)*, Perth: Australia, Dec. 2017.
- [8] C. Leosrisook, K. Pongpheaw, and K. Horapong, "An implementation of powertable ILS localizer signal Receiver using SDR," *International Symposium on Communications*, Incheon: Korea, pp. 131-135, Sep. 2014.
- [9] B. Kanmani, "The modified switching-modulator for generation of AM and DSB-SC: theory and experiment," *IEEE Digital Signal Processing workshop*, pp. 780-785, Feb. 2009.
- [10] S. S. B, M. G. Asuti, and A. Mishra, "DSB-SC AM based software defined radio (SDR)," in *IEEE International Conference*. Bangalore: India, pp. 1356-1360, May 2016.
- [11] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, 2nd ed. Norwood, MA: Artech House, ch. 4, 2006.



김 수 경 (Su Kyung Kim)

1997년 2월 : 인천대학교 전자공학과 (공학사)
 1999년 8월 : 인천대학교 전자공학과 (공학석사)
 2012년 7월 ~ 현재 : 한국공항공사 항행장비사업센터 연구원
 2012년 3월 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 박사과정
 ※ 관심분야 : 항행 시스템 설계, 전력증폭기 설계, 레이더 전파 신호처리



구 경 현 (Kyung Heon Koo)

1981년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학사)
 1983년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월 : 서울대학교 전자공학과 (공학박사)
 1987년 ~ 현재 : 인천대학교 전자공학과 교수
 ※ 관심분야 : 마이크로파 회로 및 안테나 설계, 고효율 전력증폭기 설계, 항행 시스템 설계