

완전 디지털 다기능 레이더의 송신 근접전계 시험에서 빔 패턴 보정에 관한 연구

Study on the Beam Pattern Correction in Transmitting Near-Field Measurements of a Digital Multi-Function Radar

주정명 · 채희덕 · 박종국 · 진형석 · 강연덕 · 한일탁* · 김두수* · 이동국*

JoungMyoung Joo · Heeduck Chae · Jongkuk Park · Hyung-Suk Jin · Yeon-Duk Kang ·
Il-Tak Han* · Doo-Soo Kim* · Dong-Kook Lee*

요 약

디지털 레이더의 근접전계 시험 시 필연적으로 발생하는 누설 신호는 각각의 측정 데이터 샘플에 영향을 미치게 된다. 비록 각각의 누설 신호는 아주 미약한 크기이지만, 측정된 근접전계를 원전계 빔 패턴으로 변환할 때에는 그 성분이 누적되어 큰 영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 근접전계 데이터의 백프로젝션(Back-Projection)을 통해 누설 신호를 효과적으로 제거하는 방안에 대해 검증하였다. 먼저 시뮬레이션에서는 노이즈 및 누설 신호 간 특성을 검토하고, 수학적으로 모델링된 근접전계 측정 신호를 모사하였다. 다음으로 보어사이트와 빔 조향된 경우에 대해 누설 신호가 안테나 빔 패턴에 미치는 영향성에 대해 분석하였다. 또한, 제안된 방법을 통해 근접전계 데이터로부터 누설 신호를 추출 및 제거하고 결과를 비교하였다. 마지막으로 시뮬레이션과 같은 방식으로 완전 디지털 다기능 레이더의 송신 근접전계 시험 시 측정된 데이터에 제안된 방법을 적용하여 누설 신호가 보정된 결과를 제시하였다.

Abstract

Leakage signals, inevitably generated during near-field measurement of a digital radar, affect the measured data samples. Although each leakage signal occurs at a very low level, the signals accumulate and have a significant effect when the measured near-field converts into a far-field beam pattern. In this study, we verified a method that effectively eliminates the leakage signals through back projection from the near-field data. In the simulation, the difference between the characteristics of the noise and leakage signal was examined, and the near-field measurement signal was simulated with mathematical modeling. Next, we analyzed the effect of leakage signals on antenna beam patterns in the case of boresight and beam steering. In addition, the leakage signals were extracted from the near-field data and removed using the proposed method, and the results were compared. Finally, the proposed method was applied to the measured data in the near-field test of a digital multi-function radar similar to the simulation, and the results of the leakage correction are presented.

Key words: Multi-Function Radar, Full Digital Radar, Leakage Correction, Near-Field Measurement, Phased Array Antenna

LIG 넥스원(LIG Nex1)

*국방과학연구소(Agency of Defence Department)

· Manuscript received December 20, 2019 ; Revised January 28, 2020 ; Accepted February 7, 2020. (ID No. 20191220-138)

· Corresponding Author: JoungMyoung Joo (e-mail:joungmyoung.joo@lignex1.com)

I. 서 론

세계적으로 레이더 기술이 발전함에 따라 초기의 수동형 레이더에서 아날로그형 수동/능동 위상 배열 레이더를 거쳐 최근에는 부배열 또는 개별 소자 단위의 디지털 능동 위상 배열 레이더가 개발되고 있다. 디지털 레이더는 기존의 아날로그형 위상 배열 레이더에 비해 배열 안테나 축소/확장 용이 및 부배열 구성의 자유도 증가 등 안테나 개구면의 구조적인 유동성이 증가하고, 그로 인해 다중빔/적응빔 등 다양한 빔 형성 및 빔 제어에 장점이 있다. 그밖에 저손실 데이터 처리, 순시 동적 범위 및 선형성 향상에 대한 이점 등으로 점차 그 수요가 높아질 전망이다^[1]. 국외에서는 이러한 개별 소자 단위의 완전 디지털 레이더에 대한 연구가 활발히 진행되어 개발 완료되었으며^{[2],[3]}, 레이더 기술 발전 추세에 발맞추어 국내에서도 수신에 한정하여 디지털 레이더가 개발되었다^{[4]~[7]}. 최근에는 송수신 모두 개별 소자 단위의 디지털을 적용한 완전 디지털 다기능 레이더에 대한 개발 초기 단계로서 시제 제작 및 검증 중에 있다^{[8]~[10]}.

이러한 최신의 레이더들에는 능동 위상 배열 안테나 시스템이 적용되며, 안테나 성능 검증을 위한 시험이 필수적이다. 일반적으로 능동 위상 배열 안테나는 안테나 크기, 시험 시설의 제원 및 시험 항목 등을 고려하여 근접전계 시험을 수행하며, 송신/수신을 분리하여 각각에 대한 빔 패턴을 검증한다^{[4]~[7],[11]}. 그러나 디지털 능동 위상 배열 안테나는 시스템 특성 상 DC Offset, RF 소자 간 격리도, I/Q 채널 간 불균형(imbalance), 송수신 경로상의 불안정한 커넥터/케이블 등 다양한 원인에 의해 누설 신호(leakage)가 불가피하게 발생한다. 발생하는 누설 신호는 주 신호 대비 매우 적은 양으로 실제 레이더 운용 시에는 크게 문제가 되지 않으나, 측정된 근접전계 데이터를 원전계 빔 패턴으로 변환 시 공간상의 중심(0, 0 위치)에서는 큰 오차로 작용할 수 있다. 이것은 근접전계 시험 특성 상 측정 프로브 스캔 범위 내 각각의 측정 포인트마다 안테나 근접전계 신호에 복소 상수(complex constant)의 누설 신호가 포함되며, 원전계 빔 패턴 변환 시 각 데이터 샘플에 포함된 누설 신호는 누적되어 나타나기 때문이다^[12]. 이러한 오차는 빔 패턴에 왜곡을 초래하여 능동 위상

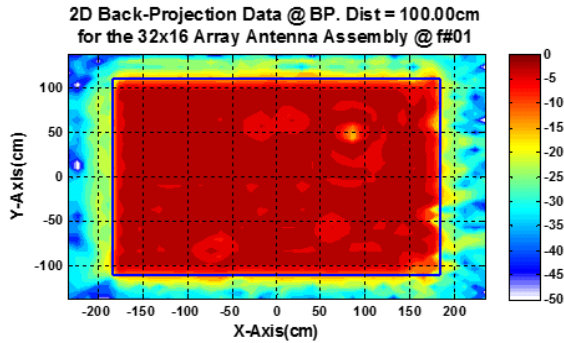
배열 안테나의 성능을 검증하는데 어려움을 준다.

앞서 언급한 것과 같이 측정된 각 근접전계 데이터 샘플에서 주 신호의 최대치보다 누설 신호의 크기가 훨씬 작기 때문에 근접전계 데이터에서 이 신호를 제거하기가 쉽지 않다. 특히, 고출력의 펄스를 사용하는 송신 근접전계 시험에서는 누설 신호의 크기 또한 커지므로 송신 빔 패턴에 왜곡이 크게 발생한다. 따라서 본 논문에서는 디지털 능동 위상 배열 안테나의 송신 근접전계 시험 시 측정된 데이터에, 참고문헌 [12]에서 기(既) 제안된 효과적인 누설 신호 보정 방안을 적용하고, 원전계로 변환된 송신 빔 패턴으로부터 제안된 방법이 디지털 능동 위상 배열 안테나 시험에서도 유효함을 검증하였다. II 장에서는 송신 근접전계 초기 측정 데이터로부터 변환된 원전계 빔 패턴에 왜곡 현상이 발생했음을 확인하고 원인을 분석하였다. 다음으로 송신 근접전계 측정 데이터 및 누설 신호를 모델링하고, 누설 신호 및 시스템 노이즈 간 특성에 대한 시뮬레이션 결과를 기술하였다. III 장에서는 시뮬레이션을 통해 누설 신호에 의한 빔 패턴 영향성과 보정 결과를 제시하고, 디지털 능동 위상 배열 안테나의 실제 측정된 송신 근접전계 데이터에도 누설 신호 보정 방안을 적용하여 누설 신호 제거 전/후 및 이상적인 빔 패턴과 비교하였다.

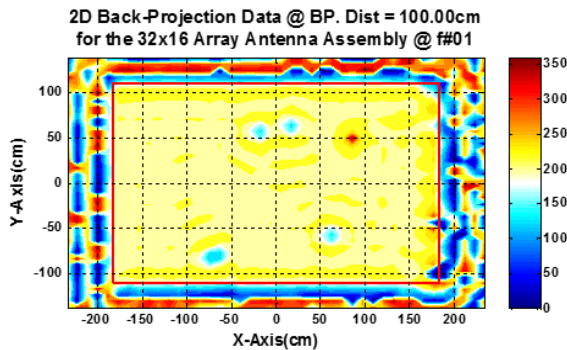
II. 패턴 왜곡 현상 확인 및 원인 분석

2-1 송신 근접전계 시험 초기 측정 결과 및 분석

먼저 송신 근접전계 시험 전, 완전 디지털 다기능 레이더 다용 능동배열안테나부를 무반향 챔버 내에 설치 후 기계적 정렬을 수행하였다. 다음으로 각 복사소자 간 위상 정렬을 위해 채널별 정렬값 및 기준 보정값을 추출하였다. 본 논문에서 시험한 능동배열안테나부는 송신의 경우 소자별 가중치로 유니폼(Uniform) 분포를 적용하였으며, 앞서 추출한 채널별 정렬값 및 기준 보정값을 적용하여 보어사이트(Boresight) 빔에 대한 송신 근접전계 측정을 진행하였다. 그림 1은 프로브면에서 측정된 근접전계 데이터를 안테나 개구면으로 백프로젝션 한 결과를 나타낸다. 안테나 개구면에서의 채널별 크기/위상 확인 결과, 일



(a) 안테나 개구면에서의 크기 분포
(a) Distribution of the measured magnitude on the aperture

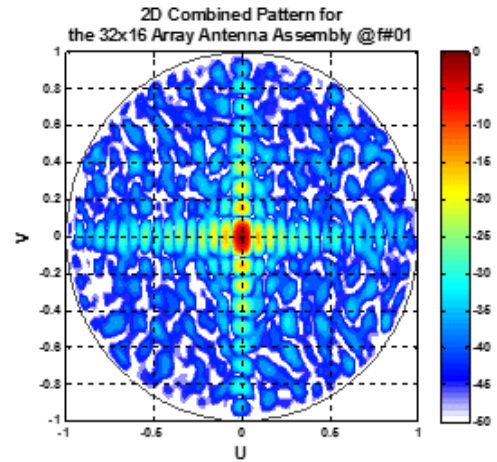


(b) 안테나 개구면에서의 정렬된 위상 분포
(b) Distribution of the aligned phase on the aperture

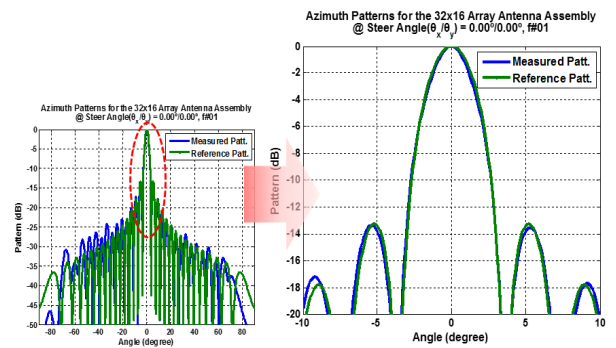
그림 1. 안테나 개구면에서의 백프로젝션(크기/위상) 결과
Fig. 1. Result of back-projection on the antenna aperture.

부 채널을 제외한 대부분의 채널이 위상 정렬되었음을 볼 수 있다. 여기서 위상이 정렬되지 않은 일부 채널은 디지털반도체송수신조립체(DTRM)가 불안정하거나, 제어 조립체와의 통신 프로토콜 오류가 원인으로 근접전계 시험 기간 중 디버깅 및 안정화하였다.

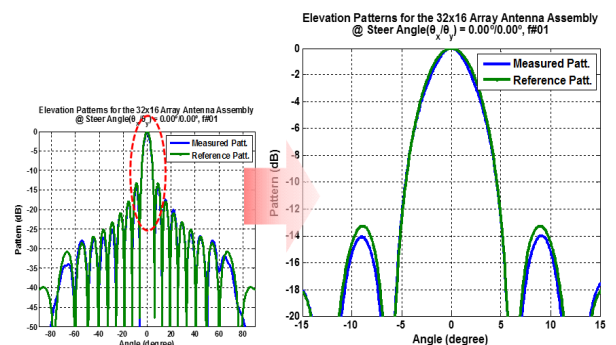
다음으로, 푸리에 변환(Fourier Transformation)을 통해 측정된 근접전계 데이터를 원전계 빔 패턴으로 변환하고, 이상적인 빔 패턴과 결과를 비교하였다. 그림 2와 같이 완전 디지털 능동 위상 배열 안테나의 2차원 빔 패턴이 형성되었음을 확인할 수 있다. 전반적으로는 이상적인 빔 패턴과 유사한 수준이었으나, 빔폭이 이상적인 패턴에 비해 약 0.22° (방위각)/ 0.43° (고각) 좁고, 보어사이트에서 먼 각도의 Far-SLL(Far-Side Lobe Level)로 갈수록 좌우 비대칭이 되었다(표 1 참조).



(a) 측정된 2차원 안테나 빔 패턴 @ U-V 도메인
(a) Measured 2-D antenna beam pattern @ U-V domain



(b) 방위각 방향 빔 패턴
(b) Azimuth beam pattern



(c) 고각 방향 빔 패턴
(c) Elevation beam pattern

그림 2. 측정 및 이상적인 안테나 빔 패턴 결과 비교
Fig. 2. Comparison of antenna beam pattern between the measured and ideal.

표 1. 안테나 빔 패턴 성능 비교

Table 1. Performance comparison for antenna beam pattern.

Item		Ideal pattern	Measured pattern
HPBW	Azimuth	3.21°	2.99°
	Elevation	5.50°	5.07°
Max. SLL	2D	-13.25 dB	-13.37 dB
	Azimuth	-13.25 dB	-13.38 dB
	Elevation	-13.28 dB	-13.99 dB

일반적으로 채널별 위상 정렬 상태가 완벽하지 않으면 이상적인 빔 패턴 대비 빔폭 증가, 부엽준위 변화/좌우 비대칭 등의 현상이 나타날 수 있다. 따라서 Far-SLL의 좌우 비대칭 현상은 일부 채널의 불안정한 위상 정렬 상태에 의한 결과라고 할 수 있다. 하지만 안테나 개구면의 물리적인 크기가 증가하거나, 동일 개구면에서 측정 주파수가 증가하지 않는 이상 빔폭이 감소하기는 어렵다. 이는 디지털 능동 위상 배열 안테나 근접전계 측정 시 데이터 샘플에 포함된 누설 신호에 의한 빔 패턴 왜곡의 결과라고 판단하였다.

2-2 근접전계 데이터 모델링 및 누설 신호 특성 분석

근접전계 시험 시 한 측정 지점에서 프로브로 수신되는 신호는 식 (1)과 같으며, 이 신호를 안테나 개구면으로 백프로젝션하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다^[12].

$$E_{meas}(x_i, y_i, d) = E_{AUT}(x_i, y_i, d) + E_{Leak}(x_i, y_i, d) + n(x_i, y_i, d) \quad (1)$$

$$E_{BP}(x_i, y_i, 0) = E_{BP,AUT}(x_i, y_i, 0) + E_{BP,Leak}(x_i, y_i, 0) + n_{BP}(x_i, y_i, 0) \quad (2)$$

개구면으로 백프로젝션한 데이터로부터 누설 신호를 추출하기 위해 식 (2)를 평균하면 다음의 식 (3)을 얻을 수 있다^[12].

$$\begin{aligned} & \frac{1}{N_T} \sum_{i=1}^T E_{BP}(x_i, y_i, 0) \\ &= \frac{1}{N_T} \left(\sum_{i=1}^T E_{BP,AUT}(x_i, y_i, 0) + \sum_{i=1}^T E_{BP,Leak}(x_i, y_i, 0) + \sum_{i=1}^T n_{BP}(x_i, y_i, 0) \right) \\ &= \frac{1}{N_T} \cdot \sum_{i=1}^T E_{BP,AUT}(x_i, y_i, 0) + L_{Constant} e^{jkd} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, T 는 측정된 전체 근접전계 영역을 의미하고, N_T 는 T 에 대한 샘플 개수이다. 측정 샘플의 개수가 충분히 많으면 무작위 변수(random variable)인 시스템 노이즈의 평균은 0이 되고, 개구면에서의 백프로젝션 평균 신호와 복소 상수인 누설 신호 성분만 남게 된다. 식 (2)의 백프로젝션 데이터에서 대부분의 에너지는 안테나 개구면에 분포해 있으므로, 개구면의 약 120 %~130 % 영역을 제외한 나머지 영역의 데이터를 취하여 평균하면 식 (3)으로부터 누설 신호 성분만 추출할 수 있음을 알 수 있다. 최종적으로 안테나 개구면으로부터 획득한 누설 신호 성분을 원래의 근접전계 데이터에서 제거하기 위한 최종 보정값은 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

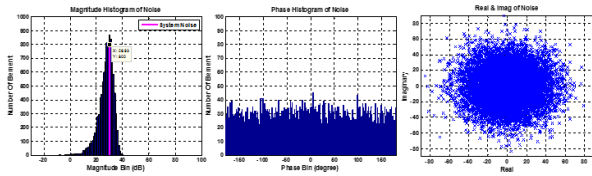
$$\begin{aligned} & \frac{1}{N_R} \sum_{i=1}^R E_{BP}(x_i, y_i, 0) = L_{Constant} e^{jkd} = L_{BP,Const} \\ & L_{Compensation} = L_{BP,Const} \cdot e^{jkd} = L_{Constant} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, R 은 백프로젝션 데이터에서 개구면 이외의 누설 신호 추출을 위해 선택한 영역을 의미하고, N_R 은 R 에 대한 샘플 개수이다.

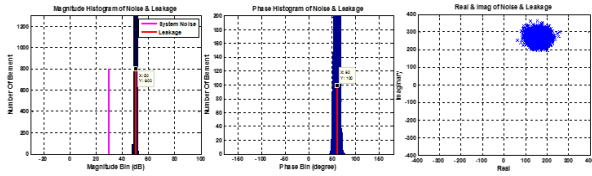
다음으로는 개구면 영역 이외의 백프로젝션 데이터에서 대부분의 안테나 신호는 제거되어 누설 신호와 노이즈만 있으므로 노이즈와 누설 신호 간 특성에 대해 검토할 필요가 있다.

따라서 누설 신호의 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션에서는 I/Q 각각 10,000개씩의 무작위 변수를 발생시킨 후 RMS 노이즈가 약 30 dB 수준을 갖도록 하고, 크기/위상에 대한 도수 분포도(histogram)와 I/Q 확률 분포를 확인하였다. 그 결과, 노이즈의 크기는 상수(constant) 특성을 보였지만, 위상은 무작위 특성을 보였다. 또한 I/Q 데이터는 원점을 중심으로 골고루 퍼져 있음을 확인할 수 있다. 위와 같은 노이즈에 크기 50 dB, 위상 60°를 가진 누설 신호 인가 후 특성을 확인하였다. 누설 신호가 포함된 노이즈의 크기/위상 도수 분포도는 모두 인가된 누설 신호의 크기 및 위상에 모여 있고, I/Q 분포에도 그만큼 오프셋(offset)이 발생함을 알 수 있다(그림 3 참조).

다음으로 누설 신호의 크기/위상에 따른 누설 신호 예측 결과를 검토하였다. 누설 신호가 포함된 노이즈 데이터 크기/위상에 대한 각각의 도수 분포도에서 빈도수가



(a) 노이즈 특성 결과
(a) Result of only noise characteristics



(b) 노이즈 + 누설 신호 특성
(b) Result of noise + leakage characteristics

그림 3. 노이즈 특성 결과 비교

Fig. 3. Results comparison of noise characteristics.

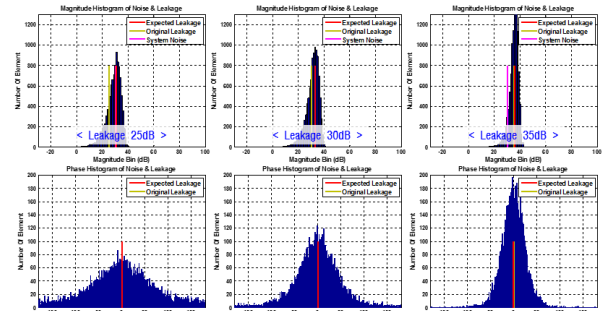
가장 많은 5개 값의 평균을 누설 신호의 크기/위상 예측 값으로 판단하였다. 여기서 RMS 노이즈는 약 30 dB로 고정하고, 누설 신호의 크기는 1 dB~50 dB 범위에서 1 dB 단위로 변화시켰고, 위상은 0°, -60°, 130°의 3가지 경우에 대해 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과, 누설 신호의 크기가 노이즈보다 같거나 작을 때는 누설 신호 예측이 어려웠으며, 신뢰성 있는 누설 신호 추출을 위해서는 노이즈보다 누설 신호가 최소 5 dB 이상 커야 할 것으로 판단되었다. 또한, 누설 신호 추출 시 노이즈 대비 누설 신호의 크기가 중요하며, 누설 신호의 위상은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 이에 대한 결과를 그림 4와 그림 5에 제시하였다.

III. 누설 신호 보정 및 송신 빔 패턴 결과

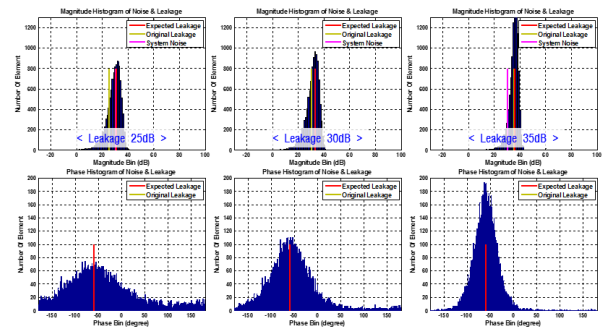
3-1 시뮬레이션을 통한 누설 신호 보정 결과

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 누설 신호가 안테나 빔 패턴에 미치는 영향성과 2장에서 검토한 방법으로 누설 신호를 추출 및 보정한 결과에 대해 기술하고자 한다.

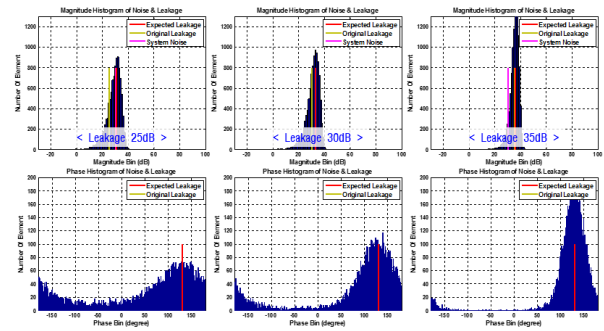
시뮬레이션을 위해 안테나 개구면에 해당하는 영역에 주 신호만큼의 크기(약 68 dB, 위상 0°)만 인가하고, 측정 프로브면으로 백프로젝션한 후 노이즈(약 21.8 dB)를 더



(a) 크기/위상 도수 분포도 @ 누설 신호 위상 0°
(a) Magnitude/phase histogram @ leakage phase 0°



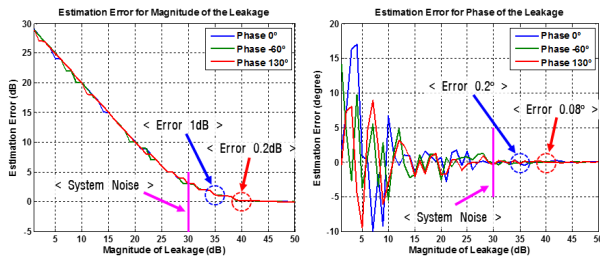
(b) 크기/위상 도수 분포도 @ 누설 신호 위상 -60°
(b) Magnitude/phase histogram @ leakage phase -60°



(c) 크기/위상 도수 분포도 @ 누설 신호 위상 130°
(c) Magnitude/phase histogram @ leakage phase 130°

그림 4. 누설 신호 크기/위상에 따른 누설 신호 예측 결과
Fig. 4. Expected leakage results according to magnitude and phase of the leakage.

하여 실제 송신 근접전계 측정 영역과 동일한 면적의 이상적인 근접전계 데이터를 모델링하였다. 여기서, 인가한 주 신호 및 노이즈의 크기는 송신 근접전계 시험 시 측정된 값을 적용하였다. 다음으로 이상적인 근접전계 데이터



(a) 크기 예측 오차 (b) 위상 예측 오차
(a) Magnitude estimation error (b) Phase estimation error

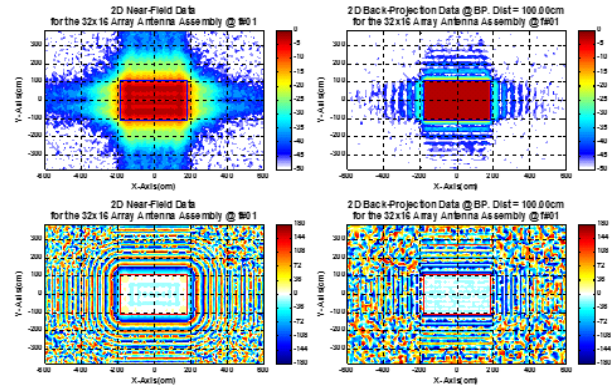
그림 5. 누설 신호 크기/위상에 따른 누설 신호 예측 오차
Fig. 5. Leakage estimation error for according to magnitude and phase of the leakage.

에 누설 신호를 인가하여 실질적인 측정 데이터를 모사하였다. 누설 신호의 크기는 1 dB~40 dB 범위에서 1 dB 단위로 변화시켰고, 위상은 0°~180° 범위에서 45° 단위로 변화시킨 5가지 경우에 대해 검토하였다.

인가한 주신호의 위상은 0°이기 때문에 누설 신호의 위상이 곧바로 주 신호와의 위상 차이가 된다. 그림 6은 모델링한 근접전계 및 백프로젝션 데이터를 나타낸다. 이상적인 근접전계 및 백프로젝션 데이터의 경우, 개구면에서 멀어질수록 신호의 크기는 점점 작아지고 위상은 무작위로 변하는 반면, 누설 신호가 있는 경우에는 데이터의 끝 쪽에서도 일정한 크기와 위상 성분이 존재함을 알 수 있다.

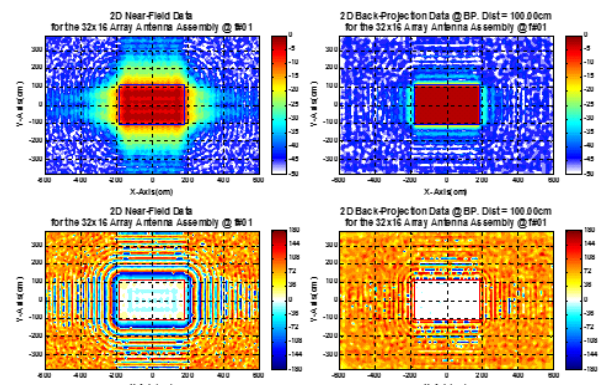
근접전계 데이터로부터 원전계 빔 패턴 변환 후 누설 신호가 없을 때의 빔 패턴을 기준으로 하여 누설 신호의 크기와 주 신호와의 위상차에 따라 빔 패턴에 미치는 영향을 검토하였다. 주 신호와 누설 신호 간 위상차가 90° 일 때, 빔 패턴에 미치는 영향이 가장 적었으며, 이 위상차를 기준으로 이득 및 빔폭 오차가 대칭성을 보였다. 또한, 누설 신호의 크기가 노이즈보다 커질수록 빔 패턴 왜곡 현상도 심해져 패턴 오차가 급격하게 증가하였다. 이러한 결과로부터 누설 신호의 크기가 같더라도 주 신호와의 위상차에 따라 빔 패턴에 미치는 정도가 다르며, 패턴 왜곡에 방향성이 있음을 유추할 수 있다(그림 7 참조).

다음은 그림 6(c)에 보인 누설 신호(25 dB/90°)를 포함한 근접전계 데이터에서 누설 신호를 보정한 후의 근접전계 및 백프로젝션 데이터를 나타낸다(그림 8 참조). 누



< Magnitude/Phase @ Main Signal with Only Noise >

(a) 근접전계 데이터 (b) 백프로젝션 데이터
(a) Near-field data (b) Back-projection data



< Magnitude/Phase @ Main Signal with Noise+Leakage(25dB/90°) >

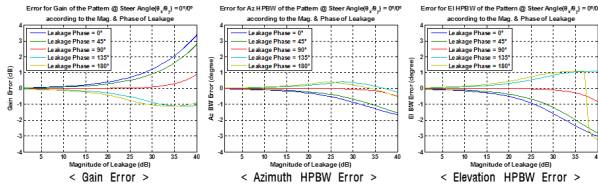
(c) 근접전계 데이터 (d) 백프로젝션 데이터
(c) Near-field data (d) Back-projection data

그림 6. 누설 신호 유/무에 따른 근접전계 및 백프로젝션 데이터

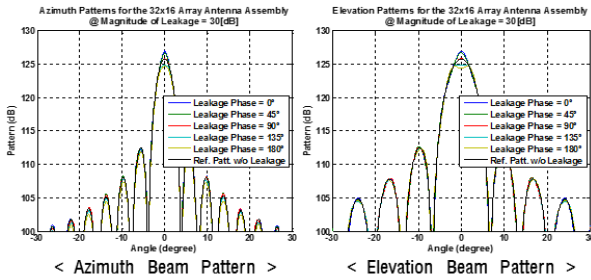
Fig. 6. Near-field & back-projection data with or without leakage.

설 신호 보정 후 그림 6(a)와 그림 6(b)에 나타난 이상적인 근접전계 및 백프로젝션 데이터와 매우 유사해졌음을 알 수 있다.

본 논문에서는 2장에서 검토한 방법과 같이 백프로젝션 데이터에서 안테나 개구면의 약 130 % 영역 이외의 나머지 데이터에 대한 크기/위상 도수 분포도로부터 누설 신호를 추출 후 보정하였다. 왜냐하면 누설 신호 추출 시 백프로젝션 데이터에서 개구면의 약 130 % 영역을 제외했지만 나머지 영역에도 개구면에서 퍼져나간 신호가 일부 포함되어 안테나의 주 신호를 완벽히 제거하기 어렵다.



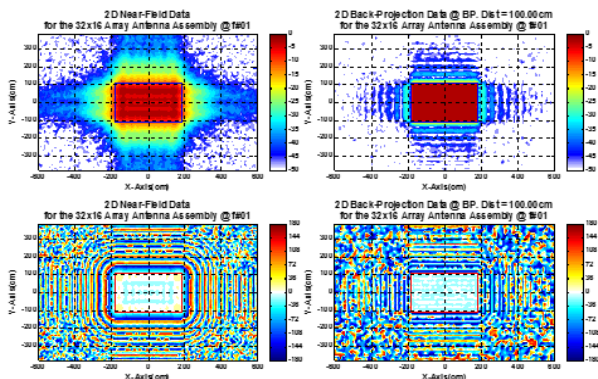
(a) 누설 신호에 의한 빔 패턴 성능 오차
(a) Error in beam pattern performance due to leakage



(b) 누설 신호(30 dB)에 의한 빔 패턴 비교
(b) Comparison of beam pattern due to leakage(30 dB)

그림 7. 누설 신호 크기 및 주 신호 대비 위상차에 의한 빔 패턴 영향성

Fig. 7. Effect on beam pattern by magnitude of leakage and phase difference from main signal.



(a) 근접전계 데이터 (b) 백프로젝션 데이터
(a) Near-field data (b) Back-projection data

그림 8. 누설 신호 보정 후 근접전계 및 백프로젝션 데이터
Fig. 8. Near-field & back-projection data with leakage correction.

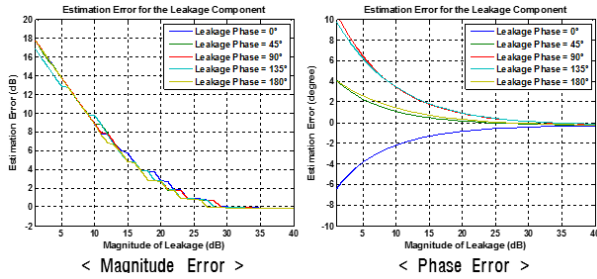
또한, 이 신호는 무작위 변수가 아니므로 누설 신호 추출을 위해 선택한 영역의 데이터를 단순히 평균하여 보정값으로 사용하게 되면 개구면에서 퍼져나간 신호가 영향

을 미쳐 누설 신호 추출 오차가 커질 수 있기 때문이다. 이와 유사한 방식으로, 기존에는 근접전계 데이터로부터 누설 신호 예측 및 보정을 위해 근접전계 데이터 자체를 이용하는 방법도 제안되었다^{[13][14]}. 2장에서 모델링한 근접전계 측정 데이터 식 (1)을 평균하면 식 (3)과 같이 노이즈 신호는 제거되고, 안테나 주 신호와 누설 신호 성분만 남게 되며, 여기서 안테나 주 신호를 제거하기 위해 일정 수준 이하의 데이터나 일정 영역을 제외한 데이터만 사용한다. 하지만 백프로젝션 데이터에 비해 근접전계 데이터에는 안테나 주 신호가 훨씬 더 넓게 분포해 있기 때문에(그림 6 참조), 안테나 주 신호 제거를 위한 문턱치(threshold)나 데이터 제거 영역을 어떻게 설정하느냐에 따라 시스템 노이즈나 안테나 주 신호에 의한 영향이 매우 커질 수 있으며, 그만큼 누설 신호 추출 오차가 커지게 된다^[12].

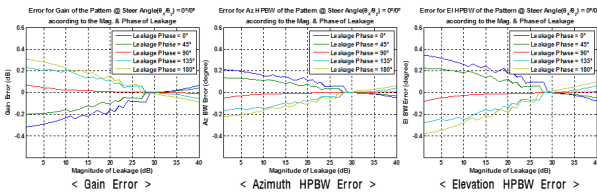
다음으로 누설 신호 예측 오차와 누설 신호 보정 후의 원전계 빔 패턴 및 성능 오차에 대해 검토하였다. 누설 신호 보정 전의 경우와 마찬가지로 누설 신호가 없는 이상적인 빔 패턴을 기준으로 비교하였다(그림 9 참조). 누설 신호의 크기가 작을 때는 예측 오차가 매우 크기 때문에 오히려 누설 신호 제거 전보다 패턴에 왜곡이 발생하여 성능 오차가 커졌다.

이것은 누설 신호가 작을 때는 패턴에 거의 영향을 미치지 않았지만, 오차가 큰 누설 신호를 근접전계 데이터에 보정 시 이 값이 또 다른 누설 신호가 되어 패턴에 크게 영향을 주기 때문이다. 따라서 누설 신호가 커지면 예측 오차는 작아져 더 정확하게 누설 신호를 보정할 수 있으므로 빔 패턴 오차도 작아질 것이다. 하지만 시뮬레이션 결과, 누설 신호가 점점 커지면서 보정 후 빔 패턴 오차가 작아졌으나, 누설 신호의 크기가 시스템 노이즈를 넘어 일정 수준 이상이 되면 빔 패턴 오차가 다시 커지는 경향을 보였다. 누설 신호의 크기가 시스템 노이즈보다 약 7 dB~8 dB 이상일 때, 누설 신호 예측 오차 및 보상 후 빔 패턴 오차가 가장 작은 것으로 나타났다. 따라서 실제 송신 근접전계 시험 시 시스템 노이즈 레벨을 고려하여 누설 신호의 크기가 너무 크지 않도록 제어해야 한다.

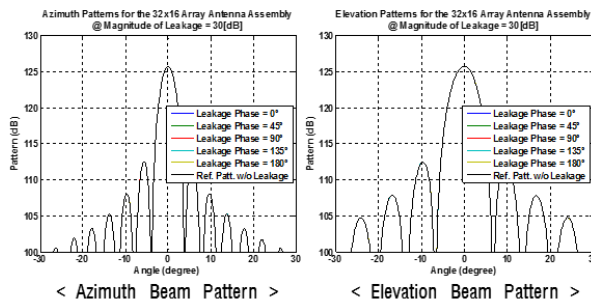
또한, 본 논문의 서론에 언급한 것과 같이 누설 신호는



(a) 누설 신호 크기/위상 예측 오차
(a) Estimation error for magnitude/phase of leakage



(b) 누설 신호 보정 후 빔 패턴 성능 오차
(b) Error in beam pattern performance with leakage correction



(c) 누설 신호(30 dB) 보정 후 빔 패턴 비교
(c) Comparison of beam pattern with leakage(30 dB) correction

그림 9. 누설 신호 크기/주 신호 대비 위상차에 따른 누설 신호 예측 오차 및 보정 결과 @ 보어사이트
Fig. 9. Estimation error and correction result for leakage according to magnitude of leakage and phase difference from main signal @ boresight.

측정된 근접전계 데이터를 원전계 빔 패턴 변환 시 공간상의 중심 위치에 영향을 준다. 따라서 조향된 빔 패턴에 대해서는 주엽(main-lobe)이 아닌 부엽(side-lobe)에 영향을 미칠 것이다.

따라서 이번에는 빔 패턴의 부엽이 공간상의 중심(0, 0)에 위치하도록, 모델링 된 근접전계 데이터에 방위각 방향으로 14° 조향한 경우와 고각 방향으로 16° 조향한 2가

지 경우에 대해 각각 시뮬레이션 수행 후 결과를 검토하였다. 빔 조향된 경우에도 누설 신호 유/무에 따른 근접전계 데이터의 크기/위상이 보어사이트의 경우와 같은 경향을 보였다(그림 10 참조). 조향된 원전계 빔 패턴에 대해서는 이득 및 빔폭 오차와 더불어 (0, 0) 위치에서의 패턴 값에 대한 오차도 함께 제시하였다(그림 11 참조). 예상한 것과 같이 누설 신호가 주엽에 미치는 영향은 매우 작았고, (0, 0) 부근에 위치한 부엽에서 왜곡이 발생하였으며, 누설 신호의 크기와 주 신호와의 위상차에 따라 패턴 왜곡의 정도도 달라졌다. 빔 조향된 경우에도 누설 신호 보정 후 근접전계 데이터가 그림 10(a)의 이상적인 결과와 매우 유사해졌음을 알 수 있다(그림 12 참조). 누설 신호 예측 오차와 보정 후의 원전계 빔 패턴 오차는 그림 9에서 보인 보어사이트에 대한 시뮬레이션 결과와 매우 유사한 경향을 나타냈다(그림 13 참조).

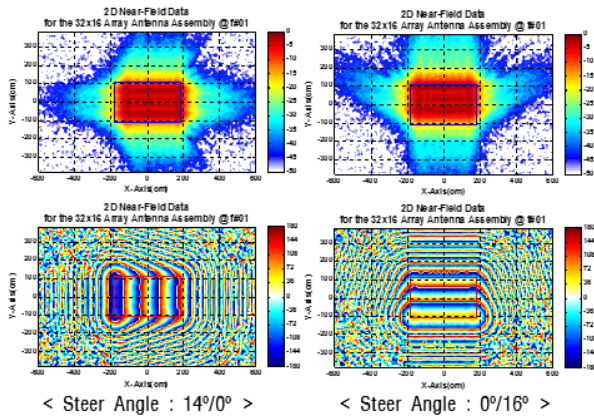
지금까지 시뮬레이션을 통해 보어사이트와 방위각/고각 방향으로 빔 조향된 경우에 대해 누설 신호 크기 및 주 신호와의 위상차가 빔 패턴에 미치는 영향성에 대해 알아보았다. 또한, 누설 신호 추출 시의 예측 오차를 검토하고, 보정 후 빔 패턴에 발생한 왜곡 현상이 얼마나 줄어드는지 확인함으로써 백프로젝션 데이터를 이용한 누설 신호 추출/보정 방안의 유효성을 검증하였다.

3-2 송신 근접전계 시험 및 누설 신호 보정 결과

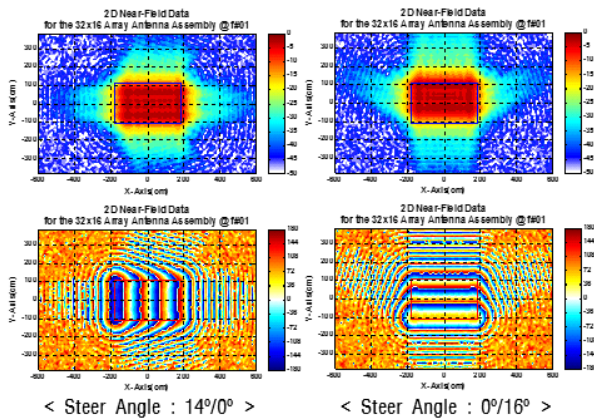
이제부터는 실제 송신 근접전계 시험으로부터 획득한 근접전계 데이터에 앞서 검증한 누설 신호 보정 방안을 적용하고, 그 결과를 제시하고자 한다.

송신 근접전계 측정 전 정렬값 및 보정값을 적용하고, 중심 주파수에 대해 시뮬레이션과 같이 보어사이트 빔을 포함하여 방위각 방향 15° 조향 빔과 고각 방향 15° 조향 빔을 측정하였다. 여기서 2-1장의 송신 근접전계 초기 측정 후 각 조립체별 디버깅을 통해 불안정했던 채널별 정렬 상태를 안정화시켰다. 디버깅 후 그림 14에 보인 것과 같이 채널별 위상이 매우 잘 정렬되었음을 확인하였다.

먼저, 그림 15는 누설 신호 보정 전 각 조향각별 근접전계 데이터를 나타낸다. 송신 근접전계 측정 결과, 시물



(a) 누설 신호가 없을 때의 빔 조향된 근접전계 데이터
(a) Beam steered near-field data without leakage

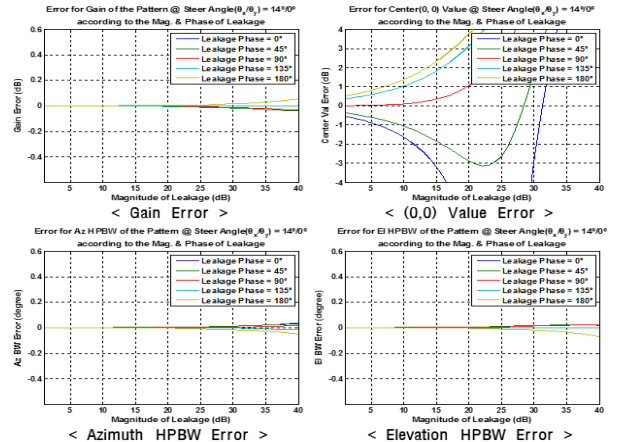


(b) 누설 신호가 있을 때의 빔 조향된 근접전계 데이터
(b) Beam steered near-field data with leakage

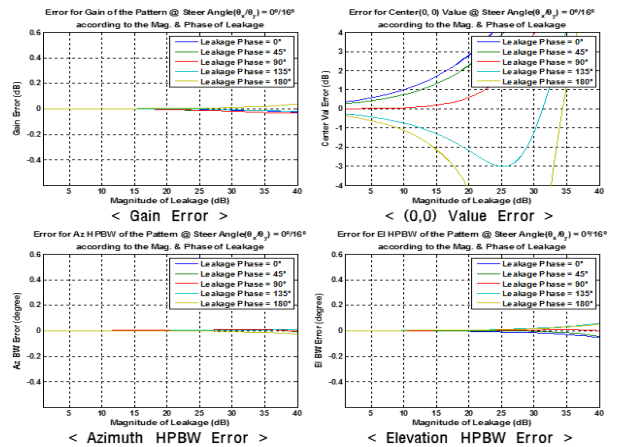
그림 10. 누설 신호 유/무에 따른 빔 조향된 근접전계 데이터

Fig. 10. Beam steered near-field data with or without leakage.

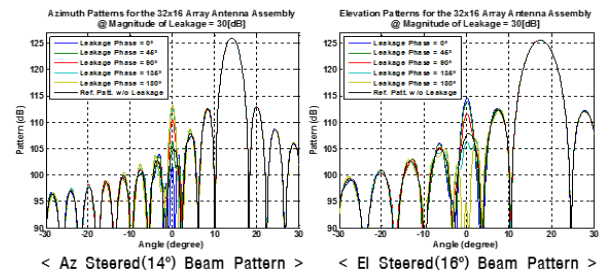
레이션의 누설 신호가 포함된 근접전계 결과와 유사하게 측정 영역 내 개구면과 먼 데이터의 끝 쪽까지 누설 신호로 인한 크기와 위상 성분이 분포해 있음을 볼 수 있다. 여기에 백프로젝션 데이터를 이용한 누설 신호 추출 및 보정 절차를 적용하였다. 보어사이트에서 측정된 백프로젝션 데이터의 안테나 개구면 이외 영역에 대한 크기/위상 도수 분포도는 그림 16과 같다. 누설 신호가 제거된 근접전계 데이터를 그림 17에 나타내었으며, 누설 신호 보정 전에 비해 크기/위상 분포가 이상적인 경우에 가까워졌음을 알 수 있다.



(a) 누설 신호에 의한 빔 패턴 성능 오차 @ 조향각 : 14°/0°
(a) Error in pattern performance due to leakage @ steer angle: 14°/0°



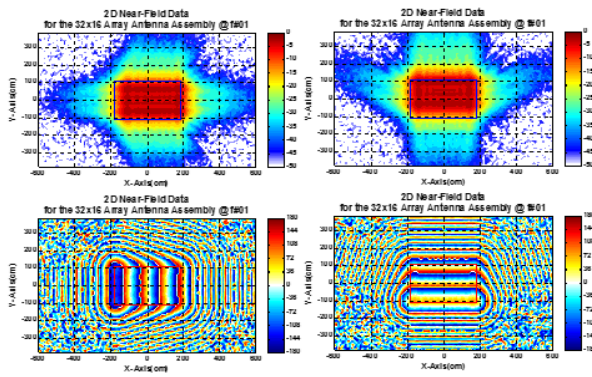
(b) 누설 신호에 의한 빔 패턴 성능 오차 @ 조향각 : 0°/16°
(b) Error in pattern performance due to leakage @ steer angle: 0°/16°



(c) 누설 신호(30 dB)에 따른 조향된 빔 패턴 비교
(c) Comparison of steered beam pattern according to leakage(30 dB)

그림 11. 누설 신호 크기 및 주 신호 대비 위상차에 의한 조향된 빔 패턴 영향성

Fig. 11. Effect on steered beam pattern by magnitude of leakage and phase difference from main signal.



(a) 조향각 : 14°/0° (b) 조향각 : 0°/16°
(a) Steer angle : 14°/0° (b) Steer angle : 0°/16°

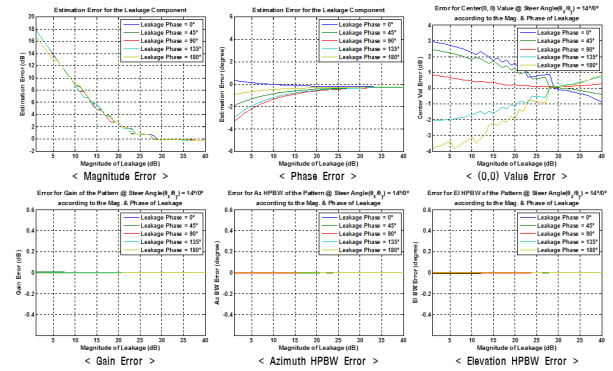
그림 12. 누설 신호 보정 후의 조향된 근접전계 데이터
Fig. 12. Steered near-field data with leakage correction.

다음으로 누설 신호 보정 전/후의 송신 근접전계 데이터로부터 변환된 원전계 빔 패턴과 빔폭 및 부엽준위 등의 성능을 비교/검토하였다. 그림 18은 이상적인 빔 패턴과 누설 신호 보정 전/후의 측정된 빔 패턴을 나타낸다.

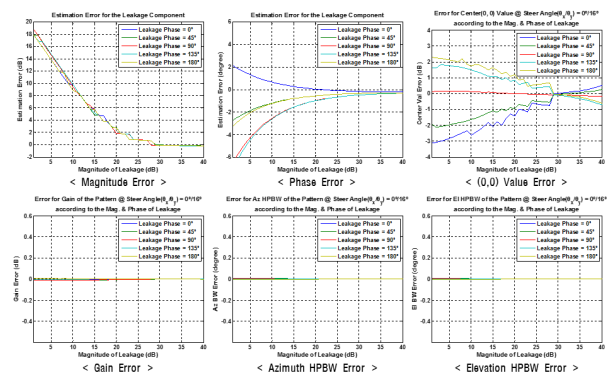
보어사이트 빔 패턴의 경우, 누설 신호에 의한 왜곡이 주엽에 발생하여 이상적인 빔 패턴에 비해 방위각/고각 방향 빔폭이 각각 약 0.41°/0.74° 더 좁게 나왔다. 반면에 누설 신호 보정 후 빔 패턴의 주엽에 왜곡 현상이 완화되었으며, 방위각/고각 방향 빔폭 오차도 약 0.09°/0.11°로 감소하였다. 방위각 또는 고각 방향으로 조향된 경우에 대해서는 빔 패턴의 주엽이 공간상의 중심 위치를 벗어나 있기 때문에, 누설 신호 보정 전/후로 성능에는 크게 차이가 없다. 다만 빔 조향으로 인해 중심 위치로 이동된 부엽에 나타난 왜곡 현상은 누설 신호 보정 후 개선되었다. 보어사이트 빔 패턴에 대한 성능 비교 결과를 표 2에 제시하였다. 이상적인 빔 패턴에 비해 측정된 빔 패턴에서의 열화된 부엽준위 결과는 측정 오차 및 채널별 위상 정렬이나 빔 조향 시 제한된 비트로 제어되는 위상 오차 등에 기인한 것으로 판단된다.

IV. 결 론

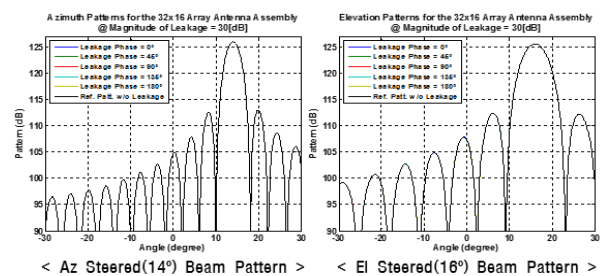
본 논문에서는 측정된 근접전계 데이터에서 안테나 주 신호보다 훨씬 작은 크기의 누설 신호를 제거하기 위해 제안된 여러 방법 중 측정 프로브면의 근접전계를 안



(a) 누설 신호 예측 오차 및 보정 후 빔 패턴 오차 @ 조향각 : 14°/0°
(a) Estimation error for of leakage and beam pattern error after leakage correction @ 조향각 : 14°/0°



(b) 누설 신호 예측 오차 및 보정 후 빔 패턴 오차 @ 조향각 : 0°/16°
(b) Estimation error for of leakage and beam pattern error after leakage correction @ 조향각 : 0°/16°



(c) 누설 신호(30 dB)에 따른 조향된 빔 패턴 비교
(c) Comparison of steered beam pattern according to leakage(30 dB)

그림 13. 누설 신호 크기/주 신호 대비 위상차에 따른 누설 신호 예측 오차 및 보정 결과 @ 빔 조향 시
Fig. 13. Estimation error and correction result for leakage according to magnitude of leakage and phase difference from main signal @ beam steer.

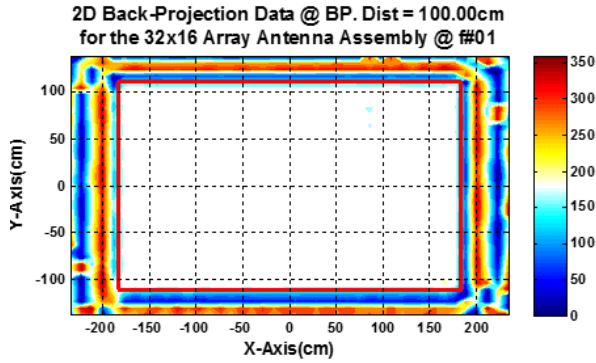


그림 14. 조립체별 디버깅 후 안테나 개구면에서의 채널별 위상 정렬 결과

Fig. 14. Phase align result for each channel on antenna aperture after debugging assemblies.

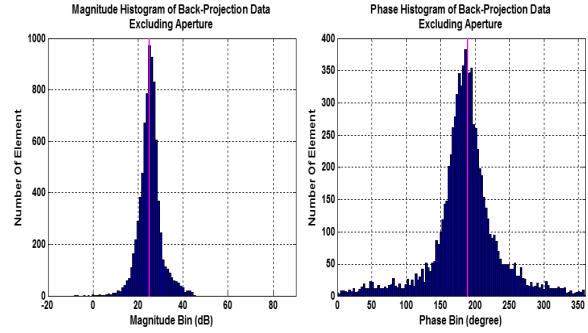
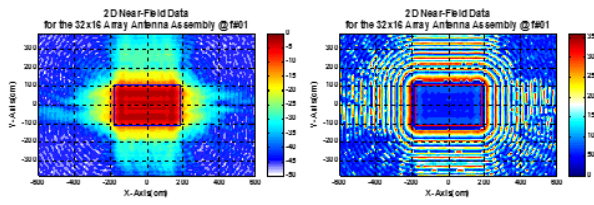
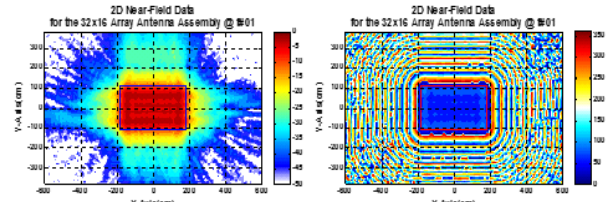


그림 16. 백프로젝션 데이터의 안테나 개구면 이외 영역에 대한 크기/위상 도수 분포도 @ 보어사이트
Fig. 16. Magnitude and phase histogram for back-projection data excluding antenna aperture @ boresight.



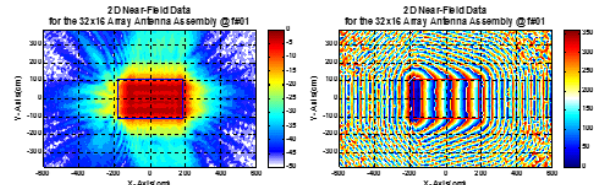
< Magnitude/Phase Distribution for Near-Field Data >

- (a) 근접전계 데이터 @ 보어사이트
- (a) Near-field data @ boresight



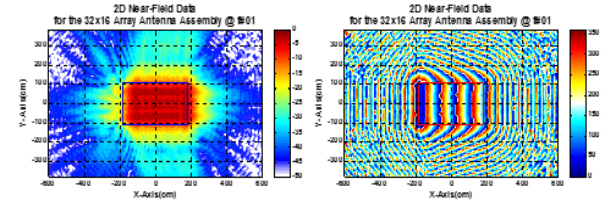
< Magnitude/Phase Distribution for Near-Field Data >

- (a) 근접전계 데이터 @ 보어사이트
- (a) Near-field data @ boresight



< Magnitude/Phase Distribution for Near-Field Data @ Steer : 15°/0° >

- (b) 근접전계 데이터 @ 빔 조향된 경우
- (b) Near-field data @ beam steering case

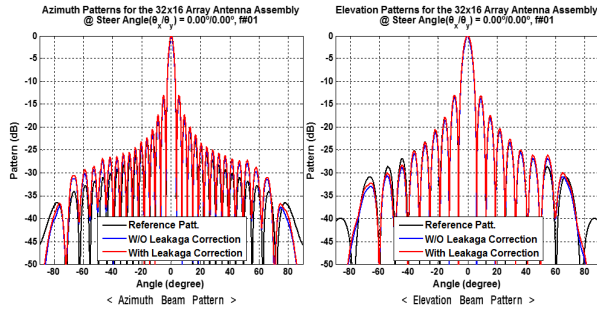


< Magnitude/Phase Distribution for Near-Field Data @ Steer : 15°/0° >

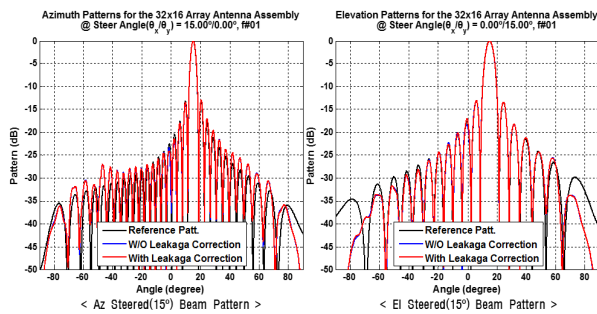
- (b) 근접전계 데이터 @ 빔 조향된 경우
- (b) Near-field data @ beam steering case

그림 15. 누설 신호 보정 전 빔 조향별 근접전계 데이터
Fig. 15. Near-field data by beam steering before leakage correction.

그림 17. 누설 신호 보정 후 빔 조향별 근접전계 데이터
Fig. 17. Near-field data by beam steering after leakage correction.



(a) 1-D 방위각/고각 빔 패턴 @ 보어사이트
(a) 1-D azimuth/elevation beam pattern @ boresight



(b) 1-D 방위각/고각 빔 패턴 @ 빔 조향된 경우
(b) 1-D azimuth/elevation beam pattern @ beam steering case

그림 18. 빔 조향별 누설 신호 보정 전/후 및 이상적인 원전계 빔 패턴 비교 결과

Fig. 18. Comparison results for far-field beam pattern without or with leakage correction and ideal by beam steering.

표 2. 누설 신호 보정 전/후 및 이상적인 빔 패턴 성능 비교 @ 보어사이트

Table 2. Performance comparison for beam pattern without or with leakage correction and ideal @ boresight.

Item		Ideal beam pattern	Before leakage correction	After leakage correction
HPBW	Azimuth	3.21°	2.80°	3.30°
	Elevation	5.50°	4.76°	5.61°
Max. SLL	2D	-13.25 dB	-13.58 dB	-12.97 dB
	Azimuth	-13.25 dB	-13.80 dB	-12.98 dB
	Elevation	-13.28 dB	-13.59 dB	-12.98 dB

테나 개구면으로 백프로젝션 한 데이터를 이용해 누설 신호를 추출 및 보정하는 방법의 유효성에 대해 검증하

였다. 먼저 시뮬레이션을 통해 안테나의 주 신호가 없는 노이즈와 누설 신호만 있는 상태에서 데이터의 크기/위상 도수 분포도를 이용해 누설 신호의 특성을 검토하였다. 다음으로 근접전계 측정 신호를 누설 신호가 없는 이상적인 경우와 누설 신호를 포함한 실제적인 경우에 대해 모델링하고, 누설 신호의 크기와 주 신호와의 위상차를 변화시켜 이 2가지 요소가 보어사이트, 방위각 조향 및 고각 조향된 각각의 안테나 빔 패턴에 미치는 영향성에 대해 분석하였다. 또한, 누설 신호를 포함한 근접전계 데이터를 백프로젝션 기법을 통해 안테나 개구면에서의 전계 분포로 변환하고, 크기/위상 도수 분포도로부터 누설 신호를 추출하여 근접전계 데이터에서 제거하였다. 누설 신호 보정 전/후 및 이상적인 경우에 대해 근접전계 데이터와 개구면에서의 백프로젝션 데이터를 비교하여 제안된 방법을 통해 누설 신호가 잘 제거되었음을 확인하였다. 그리고 누설 신호가 제거된 근접전계 데이터로부터 원전계 빔 패턴 변환 후 이상적인 빔 패턴과 비교하고 결과를 제시하였다.

마지막으로 개별 소자 단위의 완전 디지털 다기능 레이더의 실제 송신 근접전계 시험을 통해 획득한 데이터에도 앞서 검토한 방법으로 누설 신호를 보정하고, 시뮬레이션과 동일한 방식으로 근접전계, 백프로젝션 데이터 및 원전계 빔 패턴을 비교/검토하였다. 그 결과, 이상적인 빔 패턴 대비 누설 신호 보정 전에는 방위각/고각 빔폭 오차가 0.41°/0.74°에서 누설 신호 보정 후 0.09°/0.11°로 감소하였고, 빔 패턴에 발생한 왜곡 현상이 개선되어 제안된 방법이 실제 측정에서도 유용함을 확인하였다. 본 논문에서 연구한 결과가 향후 근접전계 시험을 통한 완전 디지털 레이더의 능동 위상 배열 안테나 빔 패턴을 검증하는데 있어 누설 신호 보정 및 오차 검토를 위한 참고 자료로 활용될 것을 기대한다.

References

- [1] S. H. Talisa, K. W. O'Haver, T. M. Comberiate, M. D. Sharp, and O. F. Somerlock, "Benefits of digital phased array radars," *The Proceedings of the IEEE*, Mar. 2016, vol. 104, no. 3, pp. 530-543.

- [2] I. Lupa, "Phased array-technology and trends," in *2008 IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems*, Tel-Aviv, May 2008, pp. 1-8.
- [3] E. Brookner, "Phased-array and radar astounding breakthroughs: An update," in *2008 IEEE Radar Conference*, Rome, May 2008, pp. 1-6.
- [4] Y. W. Kim, H. D. Chae, J. K. Park, H. G. Na, and M. H. Jeon, "Measurement technique for the active phased array antenna," in *Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, Mar. 2014, vol. 25, no 2, pp. 50-59.
- [5] H. Chae, J. M. Lee, Y. W. Kim, H. S. Kim, H. S. Jin, and J. Park, "Near-field receiving measurement of active phased array antenna for full digital radar application," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 7, pp. 625-634, Jul. 2016.
- [6] J. W. Yu, H. Chae, J. Park, J. H. Lim, D. Kim, and H. S. Jin, et al., "Near-field Rx-measurement for active phased array of digital radar using calibration path," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 27, no. 6, pp. 504-511, Jun. 2016.
- [7] K. H. Kim, H. Kim, D. Y. Kim and H. S. Jin, "Development of planar active phased array antenna for detecting and tracking radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no 12, pp. 924-934, Dec. 2018.
- [8] J. M. Joo, J. H. Lim, J. Park, H. S. Jin, Y. D. Kang, and I. T. Han, et al., "Transmitting near-field measurement of full digital active phased array antennas for multi-function radar application," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 12, pp. 979-991, Dec. 2019.
- [9] J. H. Lim, S. J. Park, M. W. Kang, S. H. Hwang, W. J. Song, and J. M. Joo, et al., "Design and fabrication of planar element unit digital array antenna for multi-function radar," in *Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering*, Aug. 2019, vol. 7, no. 1, p. 565.
- [10] S. H. Hwang, H. S. Kim, J. M. Joo, and M. S. Kwon, "Optimal design and implementation of real-time digital multi-beam former for full-digital multi-function radar application," in *Proceedings of the Korean Institute of Electromagnetic Engineering*, Aug. 2019, vol. 7, no. 1, p. 573.
- [11] H. Chae, H. S. Kim, D. K. Lee, M. D. Jeong, and J. Park, "Transmit-beam pattern measurement of the active phased-array antenna using near-field measurement facility," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 12, pp. 1155-1164, Dec. 2011.
- [12] F. J. Cano-Facila, S. Burgos, and M. Sierra-Castaner, "New methods to reduce leakage errors in planar near-field measurements," in *Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation-(EUCAP)*, Rome, Apr. 2011, pp. 3581-3585.
- [13] P. R. Rousseau, "An algorithm to reduce bias errors in planar near-field measurement data," in *21st Annual Symposium of the Antenna Measurement Techniques Association*, California, CA, Oct. 1999, pp. 269-273.
- [14] A. C. Newell, J. R. Guerrieri, and K. MacReynolds, "Methods to estimate and reduce leakage bias errors in planar near-field antenna measurements," in *Proceedings of the Antenna Measurement Techniques Association*, California, Oct. 2002.

주 정 명 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8210-1758>



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2013년 3월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2013년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] 수동 및 능동 위상 배열 안테나, 레이더 시스템

진 형 석 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0764-9596>



2000년 8월: 광운대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 8월~현재: LIG넥스원 수석연구원
[주 관심분야] 디지털 레이더 시스템, 능동 위상 배열 레이더, 초고주파 능동 회로 및 송수신기 설계

채 회 덕 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4609-1764>



1999년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학사)
2001년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학석사)
2008년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2007년 3월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 안테나 구조 및 빔 패턴 최적화, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 전자파 수치 해석

강 연 덕 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0527-3641>



1993년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
1996년 2월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년 8월: 한국항공대학교 전자공학과 (공학박사)
2000년 9월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 초고주파 소자, 전자파 해석

박 중 국 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5834-9238>



1995년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2001년 8월: 서울대학교 전기컴퓨터공학부 (공학박사)
2001년 11월~현재: LIG넥스원 수석연구원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 적응형 빔 형성, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 전자파 수치 해석

한 일 탁 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7944-4816>



2006년 2월: 충남대학교 전자전파정보통신공학부 (공학사)
2008년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)
2008년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템 및 신호처리, 전자파 전파 및 산란, 전자전파 특성 예측 모델링

김 두 수 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1570-1291>



2001년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)

2006년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)

2006년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 배열 안테나 설계, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 최적화 알고리즘 구현

이 동 국 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7372-1218>



1998년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

2000년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학석사)

2002년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 다기능 레이더 시스템, 능동 위상 배열 안테나 시스템, 전자장 수치 해석