

# Monte-Carlo 방법에 의한 소나배열 소자의 허용오차 규정

## Decision of Error Tolerance in Sonar Array by the Monte-Carlo Method

이 용 범\*, 이 준 영\*\*, 김 형 동\*\*\*  
(Yongbeum Lee\*, Joonyoung Lee\*\*, Hyeongdong Kim\*\*\*)

\* 한화정보통신 모바일 소프트웨어팀, \*\* 한양대학교 전자통신전파공학과, \*\*\* 한양대학교 전자전기공학부  
(접수일자: 2001년 12월 27일; 채택일자: 2002년 3월 4일)

본 논문에서는 Monte-Carlo 방법으로 빔패턴 오차의 허용범위를 만족하는 개별소자의 허용오차를 규정하였다. 일반적으로 사용되는 통계적인 방법은 불규칙한 특성을 갖는 랜덤오차를 정규분포를 갖는 랜덤변수로 모델링을 하여 개별소자의 오차범위를 규정하는데, 이러한 방법은 해석하고자 하는 배열소자의 개수증가에 따라 계산량이 지수승으로 늘어나게 되어 많은 소자배열에는 적합하지 않게 된다. 이러한 단점을 보완하기 위해서 이 논문에서는 Monte-Carlo 방법을 사용하여 배열소자의 증가에 따른 계산량의 증가를 줄이는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 그리고 이렇게 규정된 오차의 범위를 간단한 모의실험을 통해서 검증하였다.

**핵심용어:** Monte-Carlo 방법, 빔패턴 허용오차, 개별소자 허용오차, 랜덤 샘플링

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

In this paper, error tolerance of each array element which satisfies error tolerance of beam pattern is decided by using the Monte-Carlo method. Conventional deterministic method decides the error tolerance of each element from the acceptance pattern by testing all cases, but this method is not suitable for the analysis of large number of array elements because the computation resources increase exponentially as the number of array elements increases. To alleviate this problem, we applied new algorithm which reduces the increment of calculation time increased by the number of the array elements. We have validated the determined error tolerance region through several simulation.

**Keywords:** Monte-Carlo method, Error tolerance of beam pattern, Error tolerance of array element, Random sampling

**ASK subject classification:** Underwater acoustics (5.6)

## I. 서론

소나배열을 이용하여 빔패턴을 설계할 경우 빔폭, 부엽준위, 지향성 등 사용목적에 가장 중요한 배열인자를 기준으로 최적 합성 방법을 선택하여 개별소자의 가중치를 부여하게 된다. 이때 최적 빔합성의 가장 큰 전제는

책임저자: 김형동 (hdkim@hanyang.ac.kr)  
133-791 서울시 성동구 행당동 17번지  
한양대학교 전자전기공학부  
(전화: 02-2290-0373; 팩스: 02-2290-0377)

모든 가중치의 값이 변동없이 정확하다는 것으로서 실제로 어떠한 배열도 가중회로를 구성하였을 경우 원하는 최적 가중치의 값을 정확히 유지시키기 힘들다. 또한 대량 양산용 배열소자를 사용할 경우 소자 제조 공정상 연구실 수준에서 고려되었던 소자 특성을 벗어난 것들을 사용할 가능성도 커지게 된다. 따라서 설계 빔패턴으로부터 특성이 크게 벗어나지 않는 허용 빔패턴을 구현하기 위하여, 소자의 허용오차 범위를 제시하고 이를 바탕으로 제작시 고려해 주는 것이 중요하다.

기존의 연구에 의하면 불규칙한 성질을 갖는 랜덤오차는 정규분포를 갖는 랜덤변수로 모델링을 하여 해석하는 연구가 이루어져 왔는데, Ruze (1952)[1]는 이를 바탕으로 진폭 및 부엽준위의 영향을 유도하였고, Gilbert & Morgan (1955)[2], Elliott (1958)[3]는 2차원 배열의 형태에 대하여 확장시켜 적용하여 오차에 의한 배열의 이득 및 부엽준위의 영향을 해석하였다. 그러나 이들 대부분의 연구는 오차가 평균 부엽준위에 미치는 영향을 해석한 것으로서 실제 레이다 시스템에서 중요하게 작용하는 요소인 최고 부엽준위와 오차와의 관계는 J. K. Hsiao (1984)[4]에 의해 제안되었다. 통계해석적인 방법은 오차를 포함한 빔패턴의 최고 부엽준위의 분포를 모델링하여 오차와 배열의 영향관계를 도출하고 역으로 허용패턴으로부터 특성 허용오차를 추출하는 이론적인 방법으로 대칭적 형태를 갖는 1차원 및 2차원의 임의의 배열의 형태에 대하여 보편적으로 적용 가능하다. 소나배열의 허용오차를 J. K. Hsiao (1984)[4]에 의해 제안된 통계해석적 방법을 적용하여 소나배열에 포함된 랜덤오차가 빔패턴에 미치는 영향을 통계적으로 살펴볼 수 있다. 그러나 이러한 확정오차 방법은 계산량이 너무 많아 변수가 많아지는 2차원에서는 개별소자들의 오차에 대한 분산을 구하기 불가능하게 된다.

본 논문에서는 Monte-Carlo 방법을 사용하여 2차 배열 안테나의 허용오차 규정을 실현하였다. II장에서는 기존의 해석 방법과 새로이 제시된 방법에 대해서 비교해 보고 III장에서는 II장에서 제시된 방법으로 허용오차의 범위를 규정하고 이론적인 배경을 설명하며, IV장에서는 간단한 모의실험을 통해서 검증하였고, 마지막으로 V장에서는 논문의 결론과 앞으로의 연구방향에 대해서 서술하였다.

## II. Monte-Carlo 방법

배열 안테나는 각 소자에 특정 가중치를 주어 원하는 빔패턴을 만들 수 있다. 그림 1과 같이  $P_1$ ,  $P_2$  소자로 이루어진 안테나를 예를 들면, 그림 1에서와 같이  $P_1$ ,  $P_2$  소자가 어떤 특정한 값을 가질 때 최적 빔을 형성하게 된다. 그러나  $P_1$ 과  $P_2$ 에 오차가 발생할 경우 최적 빔은 원하지 않은 오차가 생기게 된다. 최적 빔만을 갖는 안테나를 제작하기에는 현실적으로 어렵기 때문에 최적 빔에서 허용 가능한 오차 범위 즉, 주빔의 이득이나 최대 부엽준위 등의 허용 변동폭을 기준으로 제작하게 된다. 그러므로 그림 2와 같이 허용 빔 오차로부터 각 소자의 허용 오차를 역으로 계산하는 것이 본 논문의 주목적이다.

최대 허용오차를 찾는 기본 방법은 그림 3과 같이 최적 포인트로부터  $P_1$ ,  $P_2$ 의 오차를 늘려가며 허용 빔패턴에 합당한지를 Monte-Carlo 랜덤 샘플링 방법으로 테스트하여 결국 소자의 최대 허용오차 범위를 규정하는 것이다. 그림 3에서 실선의 면적은 찾고자 하는  $P_1$ ,  $P_2$ 의 오차들로 이루어진 최대 오차조합범위라 정의한다. 그러나  $P_1$ 과  $P_2$ 의 오차범위를 증가시켜 최대 오차조합범위를 찾는 과정에는 다루기 어려운 문제가 있다. 미리 예측할 수 없는 최대 오차조합범위가 그림 3에서 왼쪽 그림의 직사각형이라고 가정한다면 왼쪽 그림에서 보는 것과 같이  $P_1$ ,  $P_2$ 의 오차범위를 같은 크기로 늘려서 찾은 빔 근 영역의 오차조합범위는 실선으로 표시된 최대 오차조합범위와 차이가 나는 것을 알 수 있다. 최대 오차조합범위는 그림 3의 오른쪽과 같이 각 소자가 빔패턴에 미치는 영향이 크고 적음에 따라 증가폭의 가중치를 다르게 하여 계산해야만 한다.

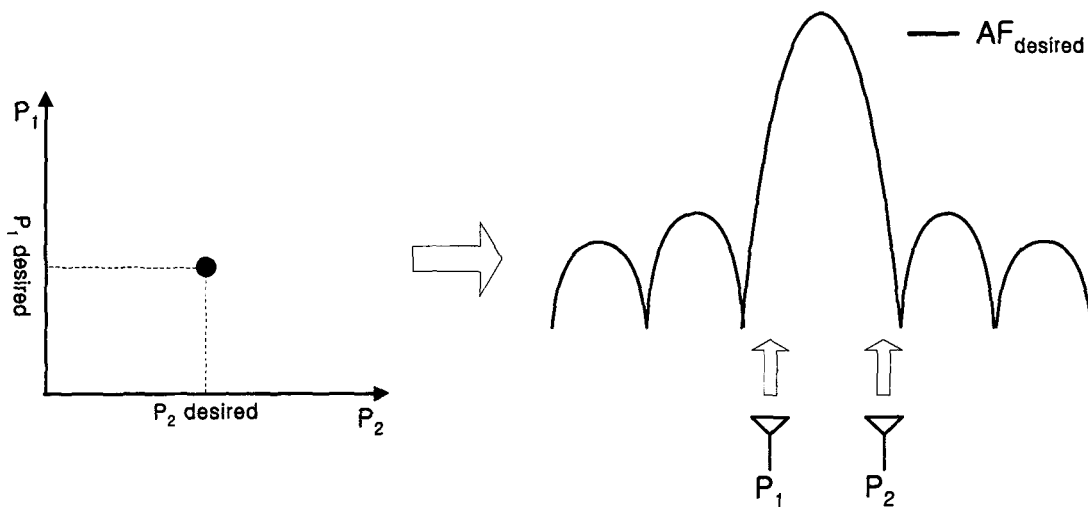


그림 1. 안테나 최적빔  
Fig. 1. Antenna optimum beam.

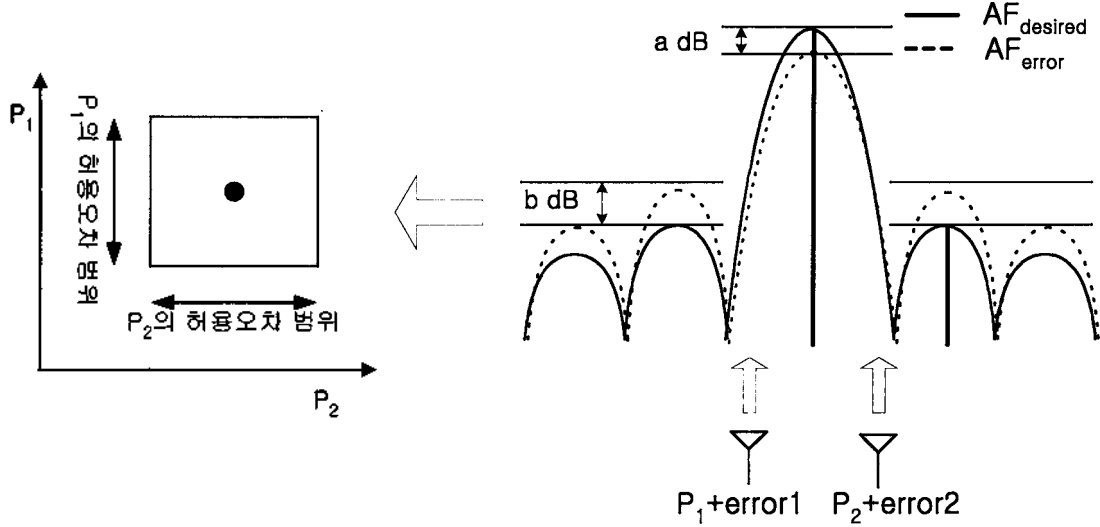


그림 2. 오차 발생과 빔오차  
Fig. 2. Error occurrence and beam error.

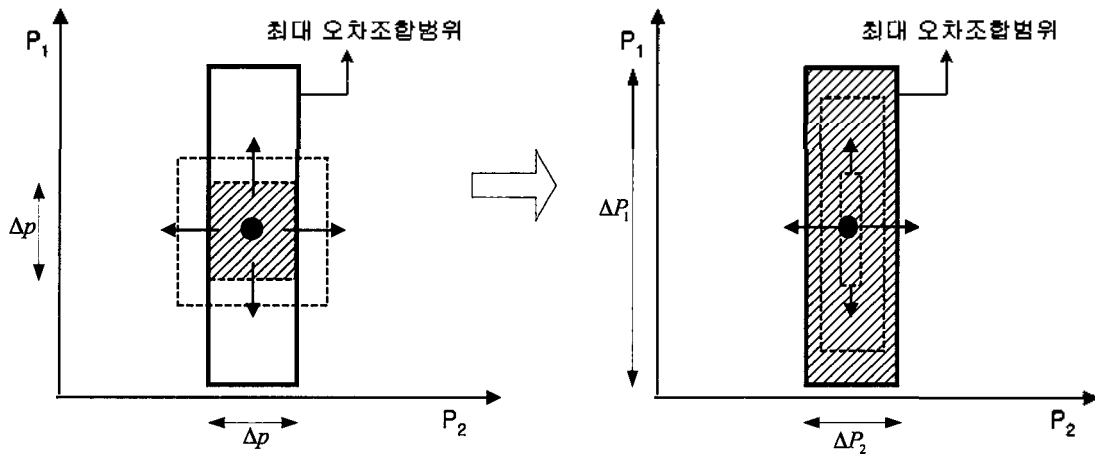


그림 3. 개별소자의 오차증가 비율  
Fig. 3. Rate of increasing error of individual element.

결과에 미치는 개별소자들의 오차범위를 어떠한 비율로 늘려나아가야 할지 그 가중치를 결정하는 것은 쉽지 않다. 배열소자의 개수가 많아질수록 예측하기 힘들게 된다. 오차의 증가비율을 결정하는 가중치를 구하기 위해 제시한 방법은 다른 소자들의 오차가 존재할 경우 한 소자의 오차가 빔패턴에 미치는 영향을 그 소자의 오차에 대한 분산으로 나타내 각 소자의 오차분산에 비례하게 오차를 증가시키는 것이다. 이러한 방법은 크게 확정오차 방법 (Deterministic Method)과 Monte-Carlo 방법을 사용하여 구할 수 있다.

먼저 확정오차 방법 (Deterministic Method)은 그림 4의 절차와 같이 각 소자들의 일정구간으로 나누어진 오차의 모든 조합을 계산하여 각 소자의 오차분산을 알아내는

방법으로 계산량이 매우 커서 많은 소자를 갖는 경우에는 적합하지 않다.

또 다른 방법인 Monte-Carlo 방법은 그림 5와 같이 한 소자의 오차구간을 일정하게 나누고 고정된 오차에서 다른 소자들의 오차를 단일분포로 랜덤하게 발생시켜 빔 허용오차를 만족하는지를 살펴보는 방식으로 오차분산을 알아내게 된다. 이 방식은 본 논문에서 제안한 방식으로써 확정오차방식에 비해 계산량을 크게 줄이면서 타당한 결과를 얻을 수 있었다. 예를 들어 10개 소자로 이루어진 배열에서 각 소자의 오차를 M개 구간으로 나누어 분산을 구한다면 M의 10승의 계산량이 필요한 반면 제안된 Monte-Carlo 방법은 한 개의 소자에 대해 M×1000번의 계산으로도 타당한 오차의 분산을 얻을 수 있다.

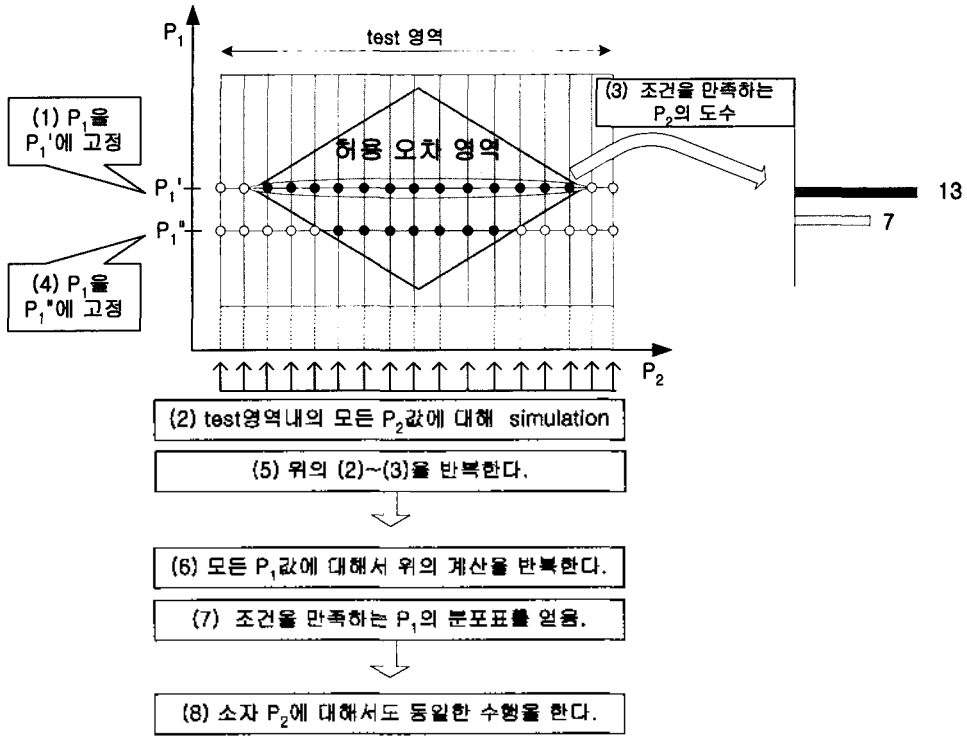


그림 4. 확정오차 방법  
Fig. 4. Deterministic Method.

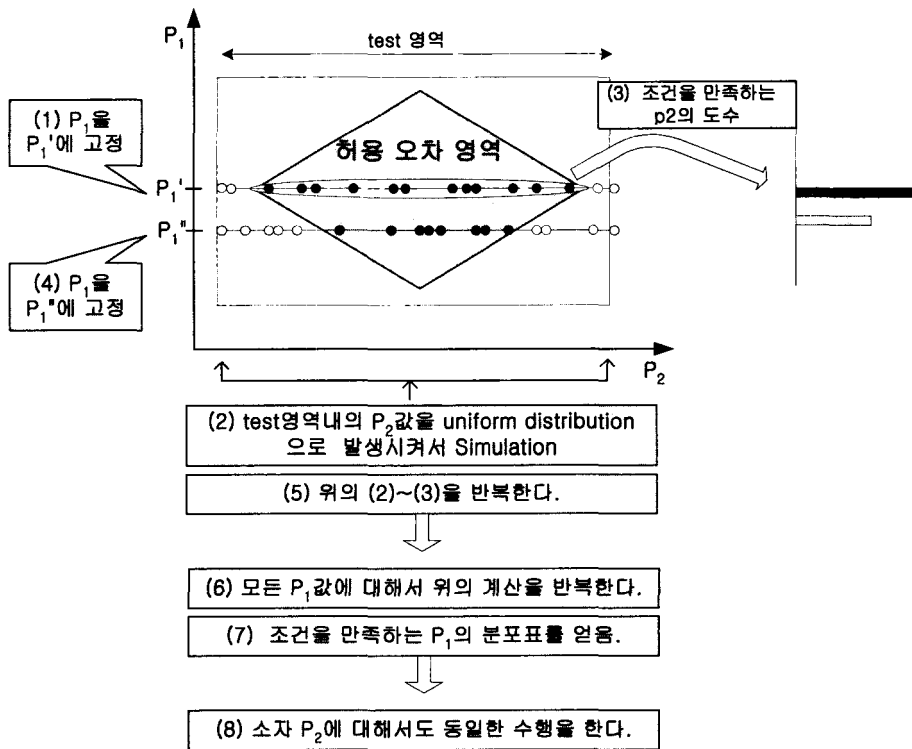


그림 5. Monte-Carlo 방법  
Fig. 5. Monte-Carlo Method.

### III. 허용오차의 범위 규정

허용 빔패턴 오차로부터 개별 소자의 허용오차를 규정하기 위해서 그림 6의 순서도와 같은 과정을 수행해야 한다. 각 과정에 대한 간략한 설명은 다음과 같다.

#### 3.1. 각 소자의 오차분산 계산

그림 5와 같은 Monte-Carlo 방법을 사용하여 각 소자의 도수분포를 조사하고 그 결과를 가우시안 분포로 모델링하여 오차분산을 구한다. 즉, 오차분산을 알고자 하는 소자와 단일분포로 랜덤하게 오차를 발생시킨 다른 소자들을 조합하여 도수분포를 얻고 이 도수분포를 가우시안 분포로 모델링하여 오차분산을 구하는 것이다. 본 연구에서 적용한 Monte-Carlo 방법에서는 한 소자의 오차를 고정시켰을 때 1000번의 랜덤조합 수를 사용하였으며 이 결과가 1000번 이상의 조합을 사용하였을 때와는 무시할 정도의 적은 오차를 가졌음을 확인하였다.

#### 3.2. 각 소자의 오차 증가 가중치 부여

만약  $P_1, P_2$ 의 소자가 있고 각각의 분산이  $\sigma_1^2, \sigma_2^2$ 이며 늘려갈 오차범위를  $L_1, L_2$ 라고 하면, 가중치는 다음의 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{L_1}{\sigma_1} = \frac{L_2}{\sigma_2} = K \quad (1)$$

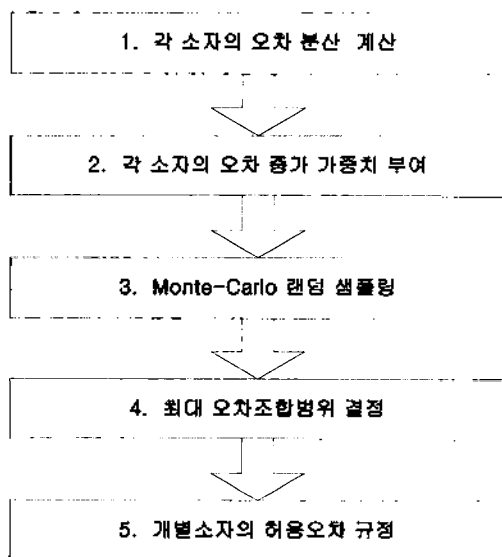


그림 6. 허용오차 규정과정  
Fig. 6. decision process of error tolerance.

#### 3.3. 랜덤 샘플링

식 (1)에서  $K$ 를 점점 크게 하면  $L_1, L_2$  또한 각 소자의 오차 분산 값에 비례하게 증가할 것이고 결국 오차조합 범위가 넓어지게 된다. 어떤  $K$ 값에 의해 결정된  $L_1$ 과  $L_2$ 의 범위가 허용 빔 패턴오차를 만족하는지를 테스트 해야 한다. 이 테스트 방법이 바로 랜덤 샘플링이다. 다시 말해  $L_1, L_2$ 의 범위 내에서 Monte-Carlo 랜덤 샘플조합들을 취하여 모든 샘플 중에 몇 개의 샘플이 허용 빔패턴 오차를 만족하는지를 판단하기 위한 과정이다.

#### 3.4. 최대 오차조합범위를 결정

$P_1, P_2$  소자만이 존재할 경우를 예로 들면 허용 빔패턴 오차를 만족하는  $P_1, P_2$ 의 오차조합범위는 그림 7의 이상적 최대 오차조합범위이며 그 형태를 예측하기 어렵다. 그러나  $P_1, P_2$ 의 허용오차 범위로 규정되어지는 최대 오차 조합범위는 그림 7의 직사각형의 형태를 갖게 된다. 이 둘 조합범위는 같은 형태라고 보장할 수 없기 때문에 100% 꼭 맞게 허용오차범위를 규정하기는 매우 어렵다. 본 연구에서도 95%의 만족도를 나타내는 범위를 최대 오차조합범위로 설정하였다. 즉 95% 최대 오차조합범위는 샘플 수  $N$ 개 중 95%가 빔 허용오차를 만족하는 범위를 말한다.

#### 3.5. 개별소자의 허용오차 규정

최대 오차조합범위를 만드는 각각의 소자 오차의 범위를 그 소자들의 최대 허용오차로 규정한다. 즉,  $N$ 개의 샘플 중 95%가 빔패턴의 허용오차 범위를 만족하면  $K$ 의 증가를 멈추고 그때의  $L_1$ 과  $L_2$ 값을  $P_1$ 과  $P_2$ 소자의 최대 허용오차로 규정하였다.

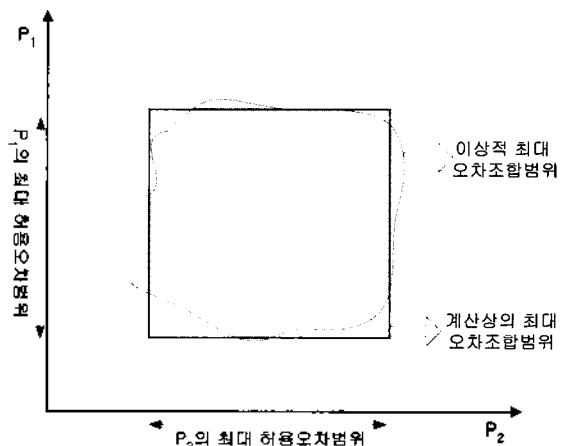


그림 7. 이상적 오차범위와 계산 가능한 오차범위 비교  
Fig. 7. Comparison between ideal error range and calculable error range.

### IV. 모의 실험

#### 4.1. 소나배열 소자의 진폭 및 위상 허용오차 규정

II장과 III장에서 언급된 방법으로 실제 원하는 빔패턴을 만드는 그림 8과 같은 37개의 소자를 갖는 2차원 배열 안테나에 대하여 모의실험을 수행하였다. 37개의 소자를 확정 오차 방법으로 실험한다면 계산량이 매우 커 시뮬레이션이 거의 불가능하므로 그림 2와 같은 허용빔 패턴조건에 준한 각 개별 소자의 허용오차를 Monte-Carlo 방법으로 시뮬레이션을 하여 희망하는 위상오차와 진폭오차를 규정해 보았다. 허용 빔패턴 오차는 다음과 같다.

$$\text{Maximum main lobe} = \pm 0.5 \text{ dB}$$

$$\text{Maximum side lobe} = +5 \text{ dB}$$

설계자가 원하는 이상적인 빔패턴을 나타내는 2차원의 빔 패턴식으로 진폭오차와 위상오차를 인가해야 할 기본식은 식 (2)와 같다.

$$f(\theta, \phi) = \sum_n \sum_m I_{mn} e^{j k_0(m d, \mu + n d, \nu)} \quad (2)$$

$$\mu = (\sin \theta \cos \phi - \sin \theta_0 \cos \phi_0),$$

$$\nu = (\sin \theta \sin \phi - \sin \theta_0 \sin \phi_0)$$

개별소자에 기계적, 전기적으로 독립적이고 불규칙한 오차가 포함되었다고 가정하면 위 식에 진폭오차와 위상오차가 인가된 다음 식과 같이 표현된다. 식 (3)에서  $\delta_{mn}$  은 진폭오차이고  $\phi_{mn}$  은 위상오차를 나타내고 있다.

$$f(\theta, \phi) = \sum_n \sum_m I_{mn} (1 + \delta_{mn}) e^{j \phi_{mn}} e^{j k_0(m d, \mu + n d, \nu)} \quad (3)$$

위 식으로부터 Monte-Carlo 방법으로 허용오차의 범위를 규정하였을 경우 그림 9와 그림 10과 같은 범위를 얻을 수 있었다. 규정한 개별소자들의 허용오차의 범위 내에서 무작위로 조합한 안테나들은 모의실험상에서 설정한 허용 빔 패턴조건을 만족하는 결과를 얻어 통계적 방법인 Monte-Carlo 방법이 허용오차를 규정하는 합당한 방법임을 입증할 수 있었다.

그림 9와 그림 10에서 각 소자의 허용오차는 소자들의 가중치가 커짐에 따라서 줄어들음을 쉽게 관찰할 수 있다. 기존의 확정오차 방법으로 계산하기 어려운 많은 소자들의 조합을 Monte-Carlo 방법으로 계산할 수 있었고 가우시안 함수를 도입하여 랜덤조합의 샘플의 수를 줄일 수 있어 더 많은 소자들의 조합들도 쉽게 접근할 수 있다는 가능성을 보여주는 실험이다.

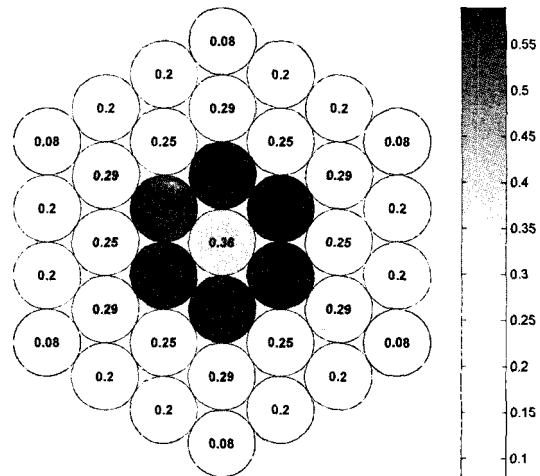


그림 8. 배열 구조와 최적 가중치  
Fig. 8. Array structure and optimum weight.

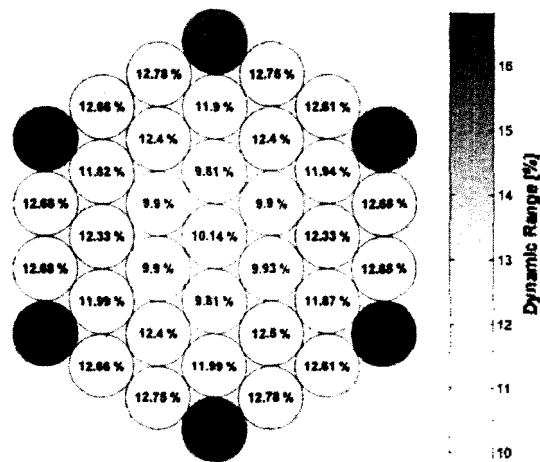


그림 9. 각 소자의 진폭 상대 허용오차  
Fig. 9. Amplitude acceptable error of each element.

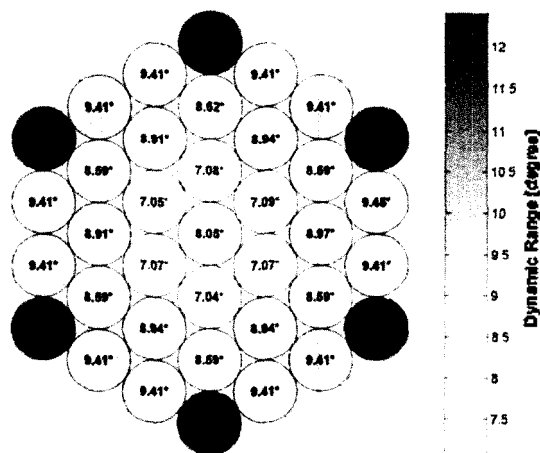


그림 10. 각 소자의 위상 허용오차  
Fig. 10. Phase acceptable error of each element.

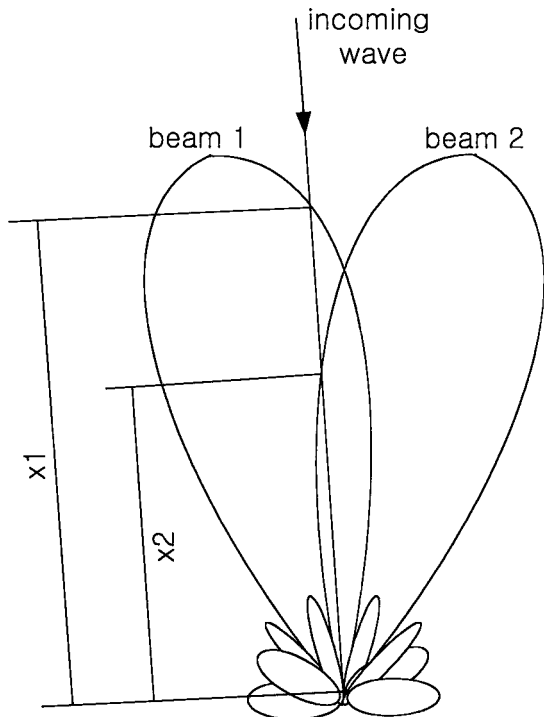


그림 11. 진폭 비교 모노펄스  
Fig. 11. Amplitude compare monopulse.

#### 4.2. 진폭 비교 모노펄스 방식과 개별소자 가중치오차의 영향

진폭 모노펄스 방식은 그림 11과 같이 두 개의 안테나를 이용하여 각 안테나에 수신된 신호의 진폭차를 비교하여 신호원의 방향을 탐지하는 방식이다. 그러므로 식 (4)와 같이 모든 방향 ( $\theta$ )에 대한 빔1과 빔2 진폭 ( $X_1, X_2$ )의 차이인  $E_0(\theta)$ 를 미리 계산하고 실제 측정된  $E_p(\theta)$ 와  $E_0(\theta)$ 를 비교하여 방향을 예측한다.

$$\begin{aligned}
 x_2(\theta) &= \frac{X_2(\theta)}{N(\theta)} \\
 x_1(\theta) &= \frac{X_1(\theta)}{N(\theta)} \\
 N(\theta) &= |X_1(\theta)| + |X_2(\theta)| \\
 E_0(\theta) &= x_2(\theta) - x_1(\theta)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

그림 12와 같이 이상적인 안테나 빔에서는 그림 13과 같이  $-10^\circ$ 와  $10^\circ$ 사이에서 1대1 대응을 이루어 그 각도 내의  $E_0(\theta)$ 를 미리 계산하게 되는데 어떤 하나의 소자에서 위상이나 진폭의 오차가 발생하게 되면 그림 14와 같이 미리 계산된 값과의 차이가 크게 되고 탐지각에 심각한 영향을 미치게 된다. 그림 14에서는 다른 소자의 오차가 전혀 없고 5번째 소자의 진폭오차 하나만이 있을 경우

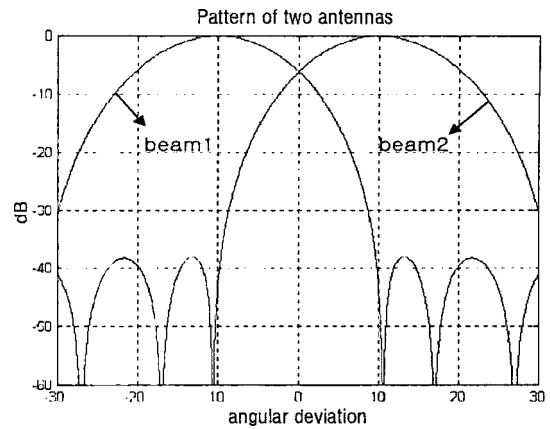


그림 12. 주빔의 위치가 다른 2개의 빔패턴  
Fig. 12. Two beams pattern with different main beam position.

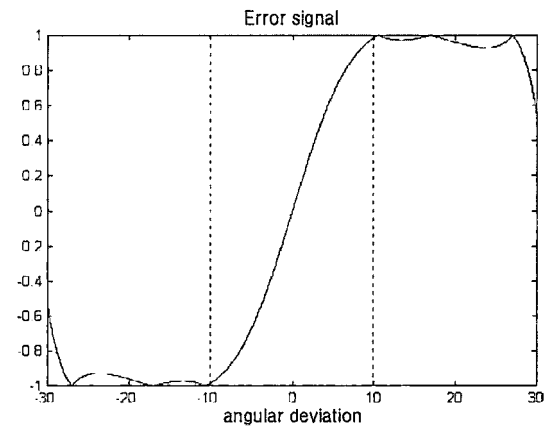


그림 13. 두 빔의 신호 차  
Fig. 13. Signal difference of two beams.

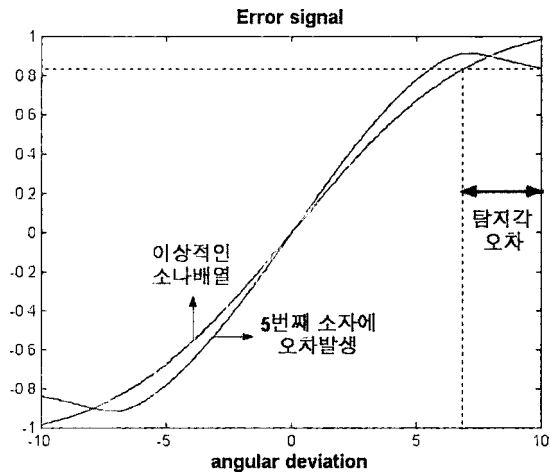
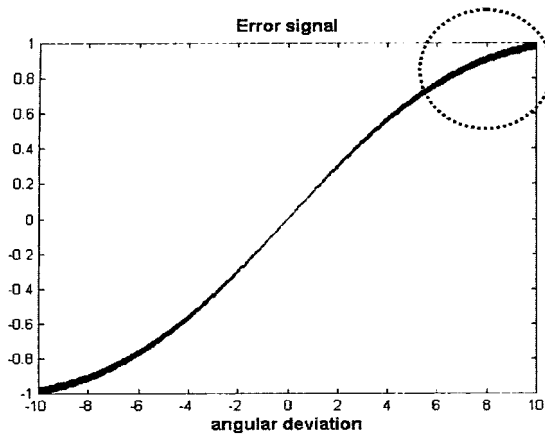


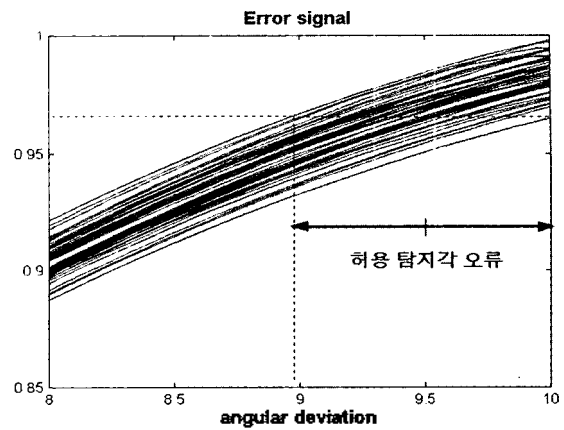
그림 14. 소자오차가 발생할 때의 탐지각 오차  
Fig. 14. Detecting angle error when element error occur.

$3^\circ$ 의 탐지각 오류가 발생한 것을 보이고 있다.

그러나 탐지각 오류를  $\pm 0.5^\circ$ 이하로 제한하기 위해 10개 소자의 허용오차를 표 1과 같이 Monte-Carlo 방법으로



(a) 허용오차 내에서의 탐지각 오차의 범위  
(a) Range of Detecting angle error in error tolerance



(b) (a)의 점선 부분  
(b) A dotted line of (a)

그림 15. 허용오차 범위 내에서의 탐지각 오류  
Fig. 15. Detecting angle error in error tolerance.

표 1. 10개의 소자의 허용오차  
Table 1. Error tolerance of 10 elements.

	optimum weight	tolerance(%)
w1	0.02424	6.33
w2	0.05715	3.86
w3	0.10205	2.86
w4	0.14505	2.86
w5	0.17149	2.02
w6	0.17149	2.02
w7	0.14505	2.86
w8	0.10205	2.86
w9	0.05715	3.86
w10	0.02424	6.33

로 정해주게 되면 그림 15와 같은 제한된 탐지각 오차의 범위를 얻을 수 있다.

### V. 결론

본 논문에서는 Monte-Carlo 방법을 이용하여 개별 소자의 오차가 빔패턴에 미치는 영향을 살펴보고, 서로 상관 관계가 없으며 불규칙한 특성을 갖는 오차를 랜덤 변수로 모델링하여 역으로 빔 패턴의 허용 특성을 만족하는 개별소자의 허용오차 범위를 제시하였다. 제안된 기법은 더 적은 수행시간으로 타당한 허용오차를 얻을 수 있는 방법으로 가중치가 크면 오차의 영향도 커지기 때문에 통계해석적 방법에 의한 오차 범위를 만족하면

서 가중치의 상대적 비에 따라 차등적인 오차의 분산을 갖도록 규정해 주었으며, 이를 모의 실험을 통해서 검증하였다. 아울러 중요한 배열인자인 주빔의 이득, 최고 부엽준위, 빔포인팅 오차와 관련된 패턴부분에 가중치를 부여하여 제어함으로써 안테나의 용도에 따라 중요 시되는 배열인자의 영향을 고려한 허용오차를 규정 할 수 있는 알고리즘이다. 또한 이 방법은 많은 수의 소자를 갖는 배열 안테나뿐만 아니라 통신용 스마트 안테나 및 위성 안테나 등의 배열 안테나의 해석에 적용할 경우 유용할 것이며 결과에 영향을 주는 변수가 다수 존재할 경우 원하는 결과의 허용범위를 벗어나지 않도록 각 변수의 허용오차 범위를 정하는 모든 문제에 적용할 수 있을 것이다.

### 참고 문헌

1. J. Ruze, "The effect of aperture errors on the antenna radiation pattern," *Nuovo Cimento (Suppl.)*, 9 (3), 364-380, 1952.
2. E. N. Gilbert and S. P. Morgan, "Optimum design of directive antenna arrays subject to random variations," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 34, 637-663, May 1955.
3. R. E. Elliot, "Mechanical and electrical tolerances for two-dimensional scanning antenna arrays," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. AP-6, 114-120, 1958.
4. J. K. Hsiao, "Normalized relationship among errors and sidelobe levels," *Radio Science.*, vol. 19, 292-302, Jan.-Feb. 1958.
5. R. J. Mailloux, *Phased Array Antenna Handbook*, Artech House, 1996.
6. M. I. Skolnik, *Nonuniform Arrays*, McGraw-Hill, 227-234.



1969.

7. J. L. Allen, *The Theory of Array Antennas*, MIT Lincoln Laboratory Technical Report, no. 323, 1963.
8. R. C. Hansen, *Phased Array Antennas*, John Wiley & Sons, 1998.
9. 왕성식, "개별진동체 특성 허용오차 예측," 공학석사학위논문, 한양대학교, 1999.
10. K. R. Carver, W. K. Cooper, and W. L. Stutzman, "Beam pointing errors of planar phased arrays," *IEEE Trans. Antennas and Propagat.*, vol. AP-21, 199-202, Mar. 1973.
11. B. D. Steinberg, *Principles of Aperture and Array Systems Design*, John Wiley & Sons, 1976.
12. J. K. Hsiao, "Design of error tolerance of a phased array," *Electronic Lett.*, 21 (19), 834-836, Sept. 1985.
13. C. A. Balanis, *Antenna theory analysis and design.*, John Wiley & Sons, 1982.
14. S. Holm, B. Elgetun, and G. Dahl, "Properties of the beam pattern of weight and layout optimized sparse arrays," *IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect. and Freq. Contr.*, 44 (5), 983-991, Sep. 1997.
15. W. F. Richards and Y. T. Lo, "Antenna pattern synthesis based on optimization in probabilistic sense," *IEEE Trans. Antenna and Propagat.*, vol. AP-23, 165-172, 1975.
16. R. Spence, *Tolerance Design of Electronic Circuits*, Addison-Wesley, 1988.
17. W. Kederer and J. Dettelsen, "Direction of arrival (DOA) determination based on monopulse concepts," *2000 Asia-Pacific Microwave Conference*, 120-123, 2000.
18. S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House, 1984.
19. N. Kalouptsidis and S. Theodoridis, *Adaptive System Identification And Signal Processing Algorithms*, Prentice-Hall, 1993.
20. 신근희, "통계적 방법에 의한 평면 배열 안테나 소자의 특성 허용오차 규정," 공학석사학위논문, 한양대학교, 1999.
21. 최철민, "Monte-Carlo simulation과 Deterministic simulation의 합성적 방법에 의한 배 열소자 가중치에 따른 오차의 규정," 한국음향학회 학술발표대회 논문집, 333-336, Nov. 2000.
22. 이용범, "Monte-Carlo 방법에 의한 소나배열 소자의 허용오차 규정," 수중음향학회 학술발표대회논문집, 74-79, Sep. 2001.

## 저자 약력

### • 이 용 범 (Yongbeum Lee)



1999년 2월: 서울산업대학교 전자공학과 (공학사)  
 2002년 2월: 한양대학교 전자통신전파공학과 (공학 석사)  
 2002년 3월~ 현재: 한화정보통신 모바일 소프트웨어팀  
 ※ 주관심분야: 배열안테나 및 마이크로파 회로 설계, 전자파 수치해석

### • 이 준 영 (Joonyoung Lee)



2001년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)  
 2001년 3월~ 현재: 한양대학교 전자통신전파공학과 석사과정  
 ※ 주관심분야: 배열안테나 및 마이크로파 회로 설계, 전자파 수치해석

### • 김 형 등 (Hyeongdong Kim)



1984년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)  
 1986년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)  
 1992년 5월: The University of Texas at Austin (Ph. D.) 안테나 및 마이크로파공학 전공  
 1989년 5월~ 1992년 5월: Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Eng., The University of Texas at Austin :Research Assistant  
 1992년 6월~ 1993년 1월: Microwave Research Lab., Dept. of Electrical and Computer Eng., The University of Texas at Austin :Postdoctoral Fellow  
 1993년 3월~ 1996년 2월: 한양대학교 전파공학과 전임강사  
 1996년 3월~ 2001년 2월: 한양대학교 전파공학과 조교수  
 2001년 3월~ 현재: 한양대학교 전자전기공학부 부교수  
 ※ 주관심분야: 이동통신용 안테나, 마이크로파 회로, 초음파 공학 전자파 수치해석, 웨이브릿 변환의 수치해석 응용, EMI/EMC 해석