

# 선형배열음원의 최적 지향성합성

정회원 정 의 철\*, 김 상 윤\*\*, 김 온\*\*\*, 조 기 량\*\*\*\*

## Optimal Directivity Synthesis of Linear array Sources

Eui-cheol Jeong\*, Sang-yun Kim\*\*, On Kim\*\*\*, Ki-ryang Cho\*\*\*\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 반복계산에 따라 비선형 최소점을 탐색하는 최적화 알고리즘의 선택이 선형배열음원의 지향성합성에 미치는 영향을 목적지향성의 설계사양에 대한 만족도, 수렴성, 그리고 적응성의 면에서 비교·검토하였다. 지향성합성은 최적화 알고리즘인 DFP(Davidon-Fletcher-Powell)법과 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)법을 이용하였으며, 준이상 빔과 회전 빔, 그리고 멀티 빔을 목적지향성으로 설정하였다.

수치계산 결과, 지향성합성에 대한 준뉴턴법의 유효성 확인과 함께 수치계산 과정에서 발생된 문제점에 대한 해결 방법도 제시하였다.

**Key Words** : Optimum Algorithm, Linear Array Sources, Directivity Synthesis, Quasi-Newton Method

### ABSTRACT

This paper compared and investigated the choice of optimal algorithm affects on the directivity synthesis of linear array in the satisfaction to the design specification of the desired directivity, convergence characteristic, and adaptability.

Optimal algorithms use a quasi-Newton method(DFP and BFGS method) for realizing the desired directivity, used a quasi-ideal beam, steering beam, and a multi-beam, chosen as desired directivity.

In the numerical result, this paper verified the effectiveness of the quasi-Newton method to the directivity synthesis, and offered a solving approach of occurred problems in the numerical simulation process.

## I. 서 론

근래에 최적제어기술이 잡음제거를 포함한 신호 처리 분야에서 다양하게 적용되고 있다<sup>[1-4]</sup>.

음파의 지향성을 실현하는 초음파트랜스듀서<sup>[5]</sup>도 하드웨어 시스템에 최적화 알고리즘을 채용하여 종래의 시스템만으로는 불가능했던 다양한 지향성합성

을 가능하게 하는 새로운 지향성합성 시스템으로 변모하고 있다.

어군탐지기, SONAR, 측심기, 트랜스폰더를 포함한 여러 분야에서 사용되는 초음파트랜스듀서는 사용 목적에 따라 무지향성, 단일 빔, 멀티 빔, 스캐닝 빔에 이르기까지 다양한 지향성을 실현할 수 있어야 되기 때문에 최적제어기술을 이용한 초음파트랜

\* 한국공항공사(jechul30@airport.co.kr), \*\* 전남대학교 대학원 전자통신공학과(syk@daesungfa.com),

\*\*\* 전남대학교 해양기술학부(kimon@jnu.ac.kr), \*\*\*\* 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부(krcho@jnu.ac.kr), (°:교신저자)

논문번호 : KICS2011-12-611, 접수일자 : 2011년 12월 12일, 최종논문접수일자 : 2012년 3월 30일

스튜서의 연구는 필수적이다.

일반적으로 음원에 가해진 하중분포에 의한 지향성합성은 순문제(forward problem)를 이용하여 간단하게 계산할 수 있으나, 이와 반대로 설정된 목적지향성을 합성하기 위하여 최적의 하중분포를 구하는 문제에서는 역문제(inverse problem)<sup>[6]</sup>의 해법에 따른 지향성합성 방법을 이용하여야 한다.

따라서 본 논문에서와 같이 하나의 지향성합성 시스템을 이용하여 다양한 지향성을 구현하여야 하는 경우에도 역문제에 의한 지향성합성 방법을 도입한다.

목적지향성에 대응하는 최적의 하중분포를 계산하기 위하여 일반적으로 최적화 알고리즘을 이용한다.

최적화 알고리즘은 이제까지 1회의 계산으로 해를 도출하는 직접법<sup>[7]</sup>, LMS(Least-Mean-Square)법<sup>[8]</sup>, 준뉴턴법인 DFP법, BFGS법<sup>[9,10]</sup>, 그리고 유전자 알고리즘<sup>[11]</sup> 등과 같이 반복과정에 의해 최적해를 구하는 반복법이 제안되어 있다.

이러한 최적화 알고리즘을 지향성합성 문제에 적용하는 경우에 계산된 하중분포가 목적지향성에 대응하는 최적해인지의 여부, 반복계산 과정에서의 목적함수의 수렴특성, 그리고 음원조건(배열음원의 길이나 음원수) 변화에 대한 적응성에 있어서 각각 특유의 성질을 갖는다.

이와 같이, 최적화 알고리즘의 선택은 지향성합성 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요소로 된다. 따라서 지향성합성 시스템에 대해 최적의 성능을 보증할 수 있는 최적화 알고리즘의 객관적인 비교·분석 데이터가 필요하게 된다.

본 논문에서는 하드웨어 시스템으로서 직선상으로 배열된 점음원을 생각하고, 최적화 알고리즘으로서는 준뉴턴법인 DFP법과 BFGS법을 도입하여 지향성합성에 대한 두 알고리즘의 몇 가지 비교를 통하여 이들의 유효성을 확인하고, 수치계산 과정에서 도출되는 문제점에 대한 해결책도 제시하고자 한다.

## II. 선형배열음원에 의한 지향성합성

그림 1과 같이  $y$ 축의 일직선상에  $N$ 개의 음원을 일정한 간격  $d$ 로 선형배열하고 각각의 음원에서 각주파수  $\omega$ 인 연속 정현파가 방사되고 있는 경우,

음원에서 멀리 떨어진 원주상의 관측점  $m$ 에서의 음압  $p_m$ 은

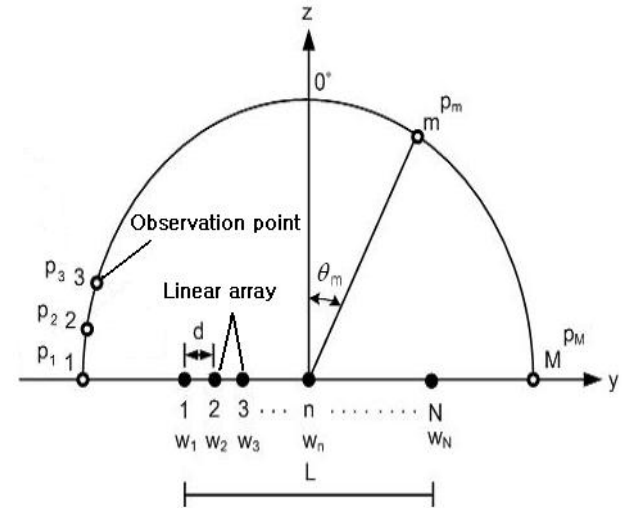


그림 1. 선형배열음원 및 관측점  
Fig. 1. Linear array sources and observation point

$$p_m = \sum_{n=1}^N s_{mn} w_n \quad (m = 1, 2, \dots, M) \quad (1)$$

로 표시할 수 있다. 식(1)에서

$$s_{mn} = \exp\left(jka \frac{2n - N - 1}{2} \sin\theta_m\right) \quad (2)$$

$$w_n = A_n \exp(-j\phi_n) \quad (3)$$

이다. 여기에서,  $k$ 는 파수(= $w/c$ ,  $c$ 는 음속),  $A_n$ ,  $\phi_n$ 은  $n$ 번째 음원의 진폭 및 위상,  $M$ ,  $N$ 은 각각 관측점수, 점음원수, 그리고  $\theta_m$ 은  $z$ 축을 중심으로 한 관측점까지의 방위각( $-90^\circ \leq \theta_m \leq 90^\circ$ )이다.

식(1)은 행렬을 이용하면 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\{P\} = [S]\{W\} \quad (4)$$

즉, 지향성벡터 $\{P\}$ 는 음원의 위치와 관측점의 방위에 관계하는 형상행렬 $[S]$ 와 음원을 구동하는 하중벡터 $\{W\}$ 와의 선형결합으로 나타낼 수 있다.

식(4)에서,

$$\{P\} = \{p_1 p_2 \cdots p_M\}^T \quad (5)$$

$$\{S\} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1N} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s_{M1} & s_{M2} & \cdots & s_{MN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\{W\} = \{w_1 w_2 \cdots w_N\}^T \quad (7)$$

이다.

그림 1에서 배열음원의 형상이 변하지 않는다고 가정하면, 형상행렬  $[S]$ 는 일정하게 되며, 식(4)에서 지향성벡터  $\{P\}$ 는 배열음원의 하중벡터  $\{W\}$ 만에 의해 지배되기 때문에 하중벡터  $\{W\}$ 를 적절하게 조정함에 의해 목적으로 하는 지향성합성이 가능하게 된다.

따라서 본 논문과 같은 지향성합성 문제는 목적 지향성을 합성하기 위하여 배열음원의 최적 하중분포를 결정하는 역문제로 취급한다.

### III. 지향성 최적화 알고리즘

선형배열음원의 최적 지향성합성을 실현하기 위한 최적화 알고리즘은 준뉴턴법인 BFGS법과 준뉴턴법의 창시자로서 알려져 있는 DFP법을 이용하였다.

준뉴턴법은 초기하중분포  $\{W\}_0$ 와 형상행렬  $[S]$ 의 곱셈에 의해 초기지향성  $\{P\}_0$ 를 계산하고, 이것과 목적지향성  $\{Z\}$ 와의 오차가 최소(이상적으로는 0)가 되도록 반복계산에 의해 선형배열음원의 하중분포를 갱신하는 반복법이다.

목적지향성  $\{Z\}$ 와  $i$ 회째의 반복과정에서 계산된 지향성  $\{P\}_i$ 와의 오차벡터  $\{\varepsilon\}_i$ 는 식(5)와 같이 된다.

$$\{\varepsilon\}_i = \{Z\} - \{P\}_i \quad (5)$$

본 논문에서 목적지향성  $\{Z\}$ 는 각각의 방향에 크기만을 설정하기 때문에 오차벡터  $\{\varepsilon\}$ 에 대해서도 크기만을 고려하는 것으로 한다.

반복계산과정에서 오차평가를 위한 2승평균오차(이하, 목적함수  $F$ 라고 함)는 식(6)과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{M} (\{\varepsilon\}_i^T \{\varepsilon\}_i) \\ &= \frac{1}{M} (\{Z\}^T \{Z\} - 2\{P\}_i^T \{Z\} \\ &\quad + \{P\}_i^T \{P\}_i) \end{aligned} \quad (6)$$

이 목적함수를 최소치가 되게 하는 하중분포가 최적의 하중분포로 된다. 여기에서, 하중벡터  $\{W\}_i$ 를 조절하기 위한 기울기벡터  $\{\nabla\}_i$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\{\nabla\}_i = \left\{ \frac{\partial F}{\partial w_{1i}} \quad \frac{\partial F}{\partial w_{2i}} \quad \cdots \quad \frac{\partial F}{\partial w_{ni}} \quad \cdots \quad \frac{\partial F}{\partial w_{Ni}} \right\} \quad (7)$$

여기에서, 목적함수  $F$  각 성분의 편미분에 대한 계산은 해석적인 방법과 차분법을 이용한 근사적인 계산방법이 있다.

본 논문에서는 이 중에서 해석적인 방법을 채택하여 식(8)과 같이 구하였다.

$$\frac{\partial F}{\partial w_{ni}} = \frac{2}{M} \sum_{m=1}^M \frac{\{\varepsilon\}_i}{\{P\}_i} \{P\}_i [\bar{S}]_{mn} \quad (8)$$

식(8)에서  $n$ 은  $n$ 번째의 음원, 그리고  $\bar{\quad}$ 는 공액복소수를 나타낸다.

준뉴턴법에서는 식(7)의 기울기벡터  $\{\nabla\}_i$ , 목적함수  $F$ 를 최소 또는 근사 최소화하는  $\lambda_{\min}$ , 그리고 목적함수의 2계의 편미분행렬을 DFP 공식이나 BFGS 공식을 이용하여 근사적으로 계산한 근사행렬  $[H]_i$ 에 따라 다음과 같이 하중분포를 갱신한다<sup>9,10)</sup>.

$$\{W\}_{i+1} = \{W\}_i - \lambda_{\min} [H]_i \{\nabla\}_i \quad (9)$$

그림 2는 준뉴턴법을 이용한 지향성 최적화과정을 나타낸 흐름도이다.

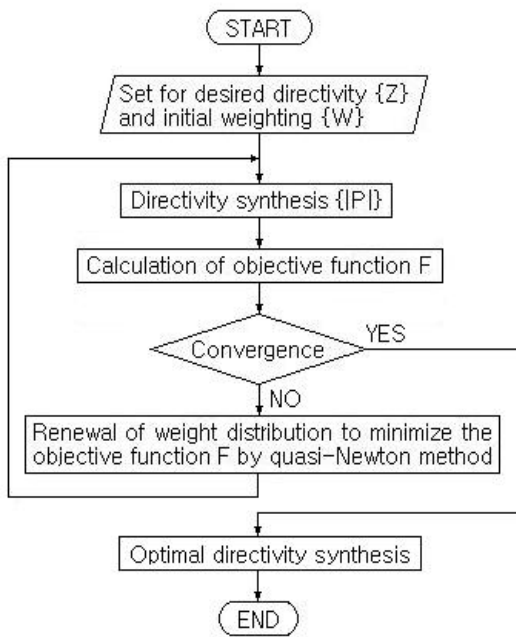


그림 2. 준뉴턴법에 의한 최적 지향성합성과정  
 Fig. 2. Optimum directivity synthesis process by quasi-Newton method

#### IV. 목적지향성 및 음원조건 설정

지향성합성을 위한 초음파트랜스듀서를 설계할 때에 고려해야할 중요한 지향성 사양으로서 메인 로브의 반치각 및 사이드 로브 레벨이 있다.

본 논문에서는 지향성에 대한 설계사양을 고려한 지향성합성 문제에 대해 검토하였다.

목적지향성  $\{Z\}$ 와  $i$ 회째의 반복에서 계산된 지향성  $\{P_i\}_i$  와의 오차  $\{e_i\}_i$ 는 식(5)를 이용하여 평가한다. 이 경우,  $\{P_i\}_i$  가  $\{Z\}$ 보다 크거나 작아도 오차가 증대되는 방향으로 평가된다.

일반적으로 사이드 로브는 레벨이 몇 dB 이하이면 양호하다고 하는 허용범위만 지정된다. 따라서 식(5)를 이용하여 오차를 평가할 때에 사이드 로브 레벨이 허용범위 내에 있어도 오차가 과대평가될 염려가 있다.

이러한 경우에 대처하기 위하여 어느 관측점에서 지향성이 설정된 사양을 만족하고 있으면, 그 관측점의 오차를 1/100로 완화하는 오차제어[12]를 하였다. 또한, 메인 로브에 대해서도 반치각 내에서 감도의 리플을 규정치 이내로 하기 위하여 같은 방법으로 오차를 평가하였다.

본 논문에서는 이상과 같은 오차제어를 위하여

프로그램에 이러한 사항을 추가하여 준이상 빔을 예로 지향성합성을 시도하였다.

이상 빔은 지향각 내에서의 감도가 일정하고 그 이외의 각도에서는 감도가 없다고 하는 지향성으로서 정의된다. 그러나 이상 빔은 유한개의 음원으로는 실현할 수 없다. 이에 따라, 사이드 로브 레벨이 규정한 값 이하이면 준이상 빔으로서 근사적으로 실현되었다고 간주한다.

목적지향성으로는 임의로 설정된 반치각에 대해 사이드 로브 레벨을 -30dB 이하로 제한한 빔, 회전 빔, 그리고 멀티 빔으로 정하고, 이에 대해 지향성합성을 시도하였다.

한편, 그림 1의 선형배열음원의 음원조건과 초기 하중분포, 그리고 오차평가를 위한 관측점수는 다음과 같이 임의로 설정하였다.

- ① 음원의 배열길이  $L=5.0\lambda$
- ② 점음원수  $N=19$ (음원간격  $0.278\lambda$ )
- ③ 관측점수  $M=181(1^\circ$  간격)
- ④ 하중분포의 초기치로는 중앙의 음원에만 진폭 1을 가하고, 다른 점음원에 대해서는 전부 0으로 하였으며, 위상은 모든 점음원에 대해 0으로 설정하였다.

수치계산은 PC(Pentium IV 2.8GHz, RAM 256 Mbyte)를 이용하여 모두 배정도(double precision)로 하였으며, 최적 지향성합성을 위한 반복계산횟수는 DFP, BFGS 두 알고리즘의 수렴특성을 고려하여 최대 100회로 하는 것으로 하였다.

#### V. 지향성합성 시뮬레이션

5.1. 임의의 반치각을 갖는 준이상 빔의 합성 예  
 그림 3은 그림 1에서  $\theta_m=0^\circ$ 로 방사하는 반치각  $10^\circ$ 의 준이상 빔을 목적지향성으로 설정한 경우의 지향성합성 결과이다.

DFP법, BFGS법 모두 설정한 메인 로브의 반치각은 물론 사이드 로브 레벨도 -30dB 이하로 제한한 지향성 설계사양을 만족하고 있음을 알 수 있다. 단, 본 논문에서 목적지향성을 설정할 때에 메인 로브의 반치각 이외의 각도에 대해서는 0이라고 하는 값을 설정하기 때문에 사이드 로브 레벨이 이상적으로는 0이 되어야 한다고 하는 측면에서 두 방법의 결과를 비교해 보면 BFGS법이 DFP법에 비해 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

그림 3의 지향성합성 결과는 DFP법의 경우, 반복 6회, BFGS법의 경우에는 반복 10회째의 결과이다.

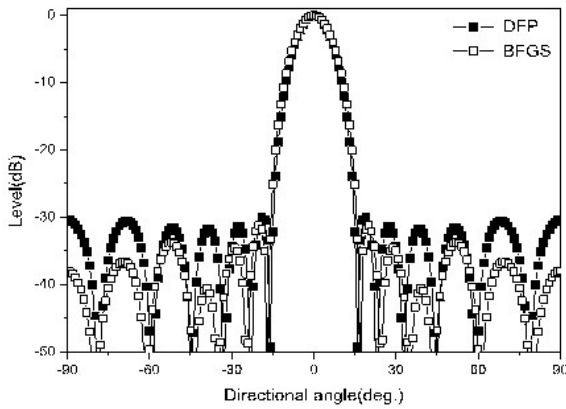
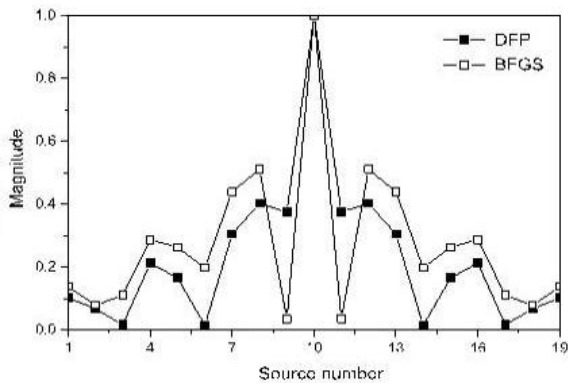
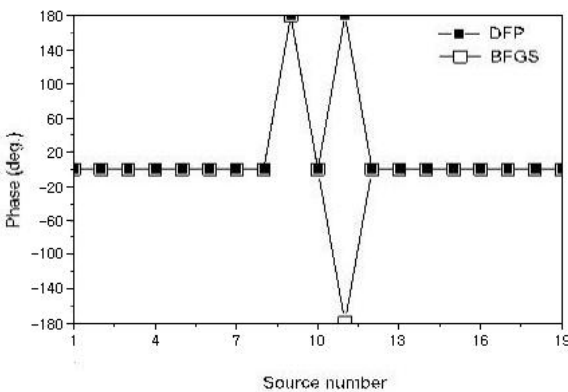


그림 3. 반치각 10°인 준이상 빔의 지향성합성  
Fig. 3. Synthesized directivity pattern of quasi-ideal beam (beam width 10°)



a) Magnitude distribution



b) Phase distribution

그림 4. 그림 3의 지향성에 대응하는 하중분포  
Fig. 4. Weight distribution which corresponds to directivity of fig. 3

그림 4는 그림 3의 지향성에 대응한 하중분포로서 a)는 최대치를 1로 규격화시킨 진폭분포, b)는 위상분포를 나타내고 있다.

그림 5는 그림 3의 예에 대한 목적함수의 수렴과정과정을 나타낸 것이다. 여기에서 두 방법 모두 반복과 함께 급속하게 오차가 감소하여 DFP법은 6회째( $F = -137.3\text{dB}$ ), BFGS법은 10회째( $F = -140.1\text{dB}$ )에서 수렴에 이르러 최대반복횟수인 100회에 이르기까지 값이 변하지 않음을 나타내고 있다.

수렴속도는 작은 차이이지만 DFP법이 빠르며, BFGS법이 DFP법에 비해 2.8dB 오차가 개선됨을 알 수 있다.

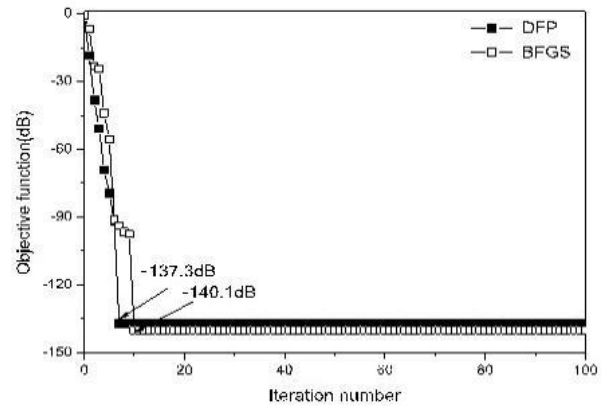


그림 5. 그림 3의 예에 대한 목적함수의 수렴특성  
Fig. 5. Convergence characteristics of objective function for the fig. 3

## 5.2. 초기하중분포와 음원조건의 선택이 지향성합성에 미치는 영향

준뉴턴법과 같은 반복법을 이용하여 지향성합성을 하는 경우에 초기하중분포의 설정과 음원조건의 선택은 지향성합성에 큰 영향을 미친다.

이에 따라, 초기하중분포 및 음원조건의 적절한 선택이 요구되지만, 다양한 지향특성에 대응하여 이들을 적절하게 선택하는 것은 현실적으로 어렵다. 그리하여, 많은 경우에 수차례의 시행착오를 거치면서 최적의 값을 결정하게 된다.

### 5.2.1. 초기하중분포의 선택이 지향성합성에 미치는 영향

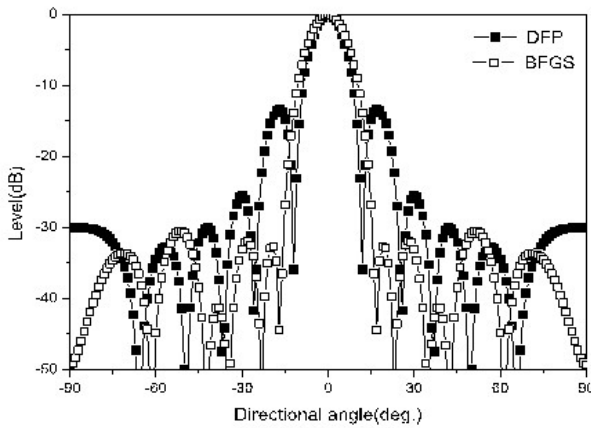
그림 6은 하나의 예로써 음원조건( $L=5.0\lambda$ ,  $N=19$ ) 및 반치각 크기는 그림 3의 예와 동일하게 하

고, 초기하중분포는 그림 3의 예와는 다르게 모든 배열음원에 진폭 1(위상은 모든 음원에 0)을 가한 경우의 DFP법과 BFGS법에 의한 지향성합성 결과와 목적함수의 수렴특성을 나타낸 것이다.

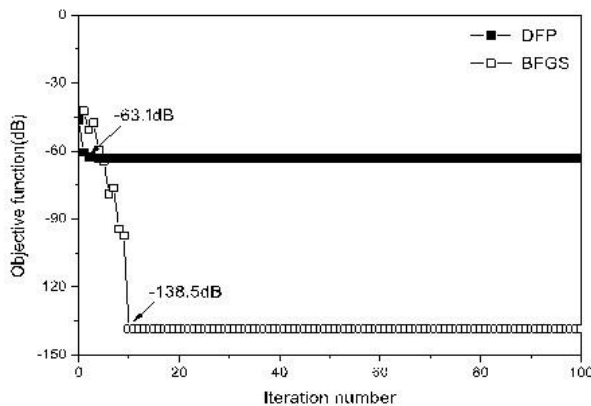
그림 3, 5와 Fig. 6의 a), b)를 비교하면

① DFP법의 경우, 초기치의 설정변경에 따라 목적함수의 값도 -137.3dB에서 -63.1dB로 오차가 매우 커짐을 알 수 있다. 이로 인하여 사이드 로브 레벨이 지향성 설계사양을 만족하지 못함을 그림 6에서 볼 수 있다.

② BFGS법의 경우, 초기치 선택법에 따라 목적함수의 크기가 -140.1dB에서 -138.5dB로 크게 변동하지는 않으나 그림 6의 b)에 나타나 있듯이 수렴 과정에서 약간의 불안정성을 보인다.



a) Synthesized directivity pattern



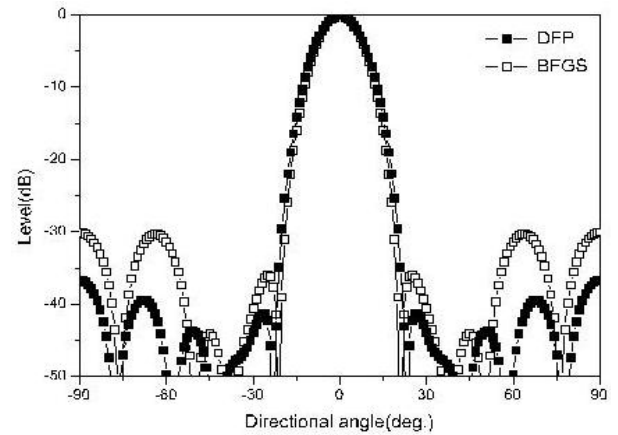
b) Convergence characteristics

그림 6. 초기하중분포로서 모든 음원에 진폭 1(위상은 모든 음원에 0)을 가한 때의 합성된 지향성과 목적함수의 수렴특성

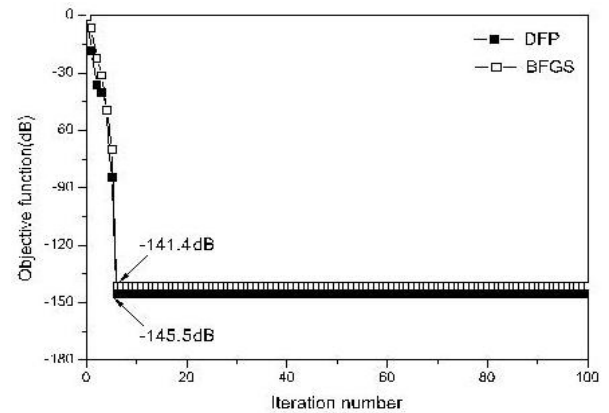
Fig. 6. Synthesized directivity pattern and convergence characteristics of objective function(initial magnitude : all sources are 1, initial phase : all sources are 0)

### 5.2.2. 음원수의 변화가 지향성합성에 미치는 영향

그림 7은 그림 3과 동일한 목적지향성에 대해 배열길이( $L=5.0\lambda$ )는 동일하게 하고, 음원수( $N=15$ )를 변화시킨 경우의 지향성합성 결과와 목적함수의 수렴특성을 나타낸 것이다.



a) Synthesized directivity pattern



b) Convergence characteristics

그림 7. 음원수를 변화시킨 경우의 합성된 지향성 및 목적함수의 수렴특성(음원수  $N=15$ , 배열길이  $L=5.0\lambda$ )

Fig. 7. Synthesized directivity pattern and convergence characteristics of objective function ( $N=15$ ,  $L=5.0\lambda$ )

그림 3, 5와 그림 7을 비교해 보면

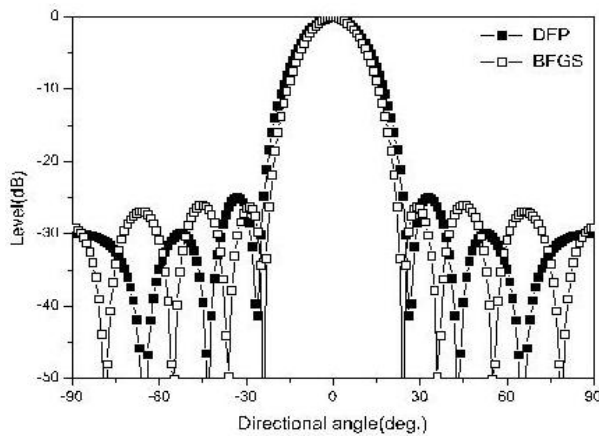
① DFP법의 경우, 사이드 로브 레벨도 지향성 설계사양을 만족하며, BFGS법에 비해 사이드 로브를 억

압하고 있음을 알 수 있다. 목적함수의 값도 -137.3dB에서 -145.5dB로 8dB 이상 오차가 작아짐을 알 수 있다.

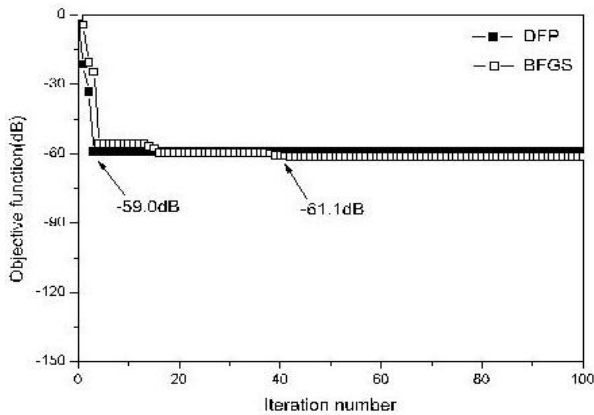
② BFGS법의 경우, 음원수가 변화여도 목적함수의 크기는 -140.1dB에서 -141.1dB로 거의 변동하지는 않으며, 따라서 지향성 설계사양을 만족하고 있음을 알 수 있다.

5.2.3. 배열길이의 변화가 지향성합성에 미치는 영향

그림 8은 그림 3과 동일한 목적지향성에 대해 음원수( $N=19$ )는 동일하게 하고, 배열길이( $L=2.5\lambda$ )를 변화시킨 경우의 지향성합성 결과와 목적함수의 수렴특성을 나타낸 것이다.



a) Synthesized directivity pattern



b) Convergence characteristics

그림 8. 음원의 배열길이를 변화시킨 경우의 합성된 지향성 및 목적함수의 수렴특성 (음원수  $N=19$ , 배열길이  $L=2.5\lambda$ )  
Fig. 8. Synthesized directivity pattern and convergence characteristics of objective function ( $N=19$ ,  $L=2.5\lambda$ )

그림 3, 5와 그림 7을 비교해 보면

① DFP법의 경우, 메인 로브의 반치각은  $18^\circ$ 로 지향성 설계사양인  $10^\circ$ 를 크게 상회하며, 사이드 로브도 억압 레벨인 -30dB를 상회하고 있음을 알 수 있다. 목적함수의 값도 -137.3dB에서 -59.0dB로 2배 이상 오차가 증가함을 알 수 있다.

② BFGS법의 경우, 메인 로브의 반치각( $16^\circ$ ), 사이드 로브 레벨이 전반적으로 지향성 설계사양을 만족하지 못하고 있다. 목적함수의 크기도 -140.1dB에서 -61.1dB로 오차가 2배 이상 증가하였다.

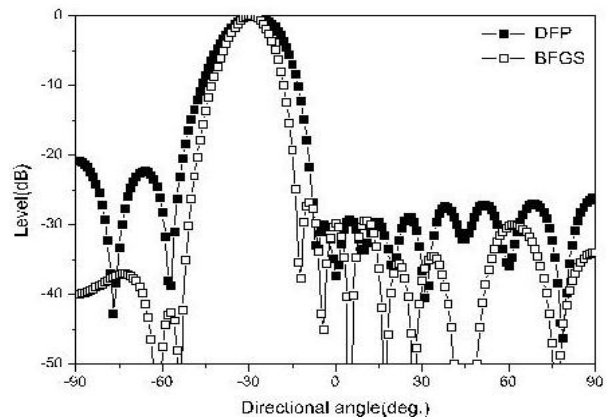
이와 같이, 반복법을 이용하여 지향성합성을 하는 경우에 초기하중분포 및 음원조건(음원수, 배열길이)의 선택이 목적함수의 수렴특성은 물론 지향성합성에 있어서도 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

5.3. 회전 빔에 대한 지향성합성 예

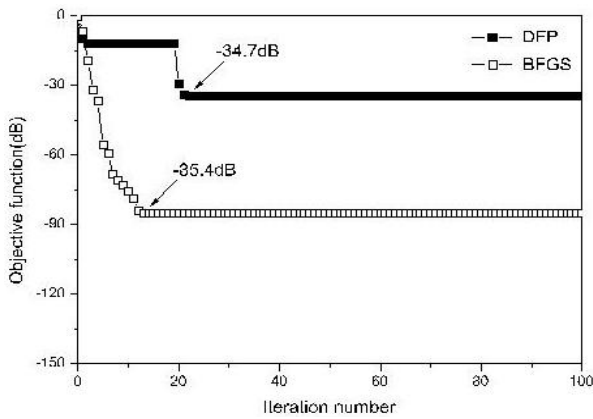
초음파진단장치 등에서 사용되는 초음파트랜스듀서는 배열음원의 하중분포를 전기적으로 변화함에 따라 목적으로 하는 방향으로 빔을 방사하는 방법이 채용된다. 이 경우, 빔을 회전시켜도 반치각이나 사이드 로브 레벨에 대한 지향성 설계사양을 만족하여야 한다.

그림 9는 그림 1에서  $\theta_m = -30^\circ$  방향으로 회전시킨 준이상 빔(반치각  $10^\circ$ )을 목적지향성으로 한 경우의 지향성합성 결과이다. 음원조건 및 초기하중분포의 설정은 그림 3과 동일하게 하여 시뮬레이션하였다.

그림 9 a)의 지향성합성 결과에서 알 수 있듯이 BFGS법은 목적으로 하는 방향으로의 빔 방사는 물론 원하는 지향성 설계사양을 거의 만족하고 있다.



a) Synthesized directivity pattern



b) Convergence characteristics

그림 9. 회전 빔에 대한 최적 지향성합성  
Fig. 9. Optimum directivity synthesis for the steered beam

반면에, DFP법의 경우에는 메인 로브의 반치각 및 사이드 로브 레벨이 설계사양을 만족하지 못하고 있다. 이 결과는 초기하중분포 및 음원조건을 적절하게 선택함에 따라 개선시킬 수 있다.

그림 9 b)는 목적함수의 수렴특성을 나타낸 것으로서 DFP법은 반복 22회째에서 -34.7dB, BFGS법은 반복 13회째에서 -85.4dB를 나타내어 DFP법에 비해 수렴속도가 빠르며, 오차도 작음을 알 수 있다.

#### 5.4. 멀티 빔에 대한 지향성합성 예

수중통신 등에서 서로 떨어진 둘 이상의 상대와 통신하는 경우에는 멀티 빔을 필요로 하게 된다. 이 경우, 임의의 양 방향으로 빔을 방사하여도 반치각이나 사이드 로브 레벨에 대한 지향성 설계사양을 만족하여야 한다.

그림 10은 메인 로브의 반치각이 각각 10°인 준 이상 빔을 ±37° 방향으로 동시에 방사하는 때의 지향성합성과 목적함수의 수렴특성을 나타낸 것이다.

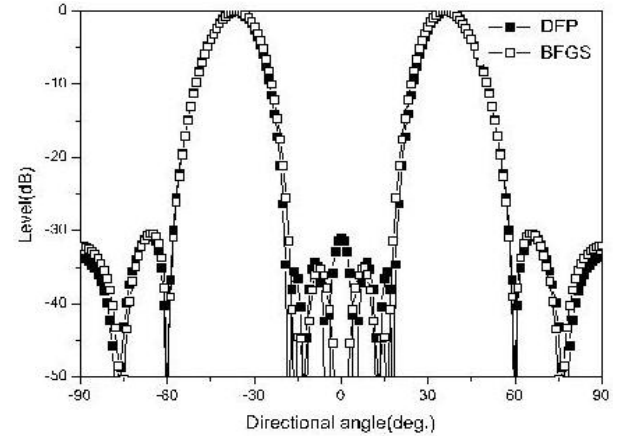
이 예에서 음원조건 및 초기하중분포는 그림 3과 동일하게 설정하여 시뮬레이션하였다.

그림 10 a)의 지향성합성 결과에서는 DFP법, BFGS법 모두 메인 로브의 방사 방향이 설정한 방향과 일치하고, 사이드 로브의 억압 레벨도 -30dB 이하를 만족하여 두 방법 모두 효과적임을 알 수 있다.

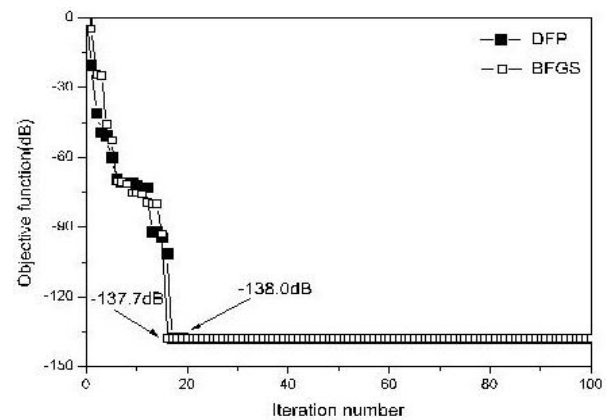
그림 10 b)는 a)의 예에 대한 목적함수의 수렴특성을 나타낸 것으로 BFGS법의 경우에는 반복 15회째에서 -137.7dB, DFP법에서는 반복 16회째에서

-138.0dB로 수렴하였다.

그림 10 a)의 결과는 목적지향성을  $\theta_m = \pm 37^\circ$ 로 대칭으로 설정하여 수치계산한 하나의 예이며, 목적지향성의 방사방향을 비대칭으로 설정한 경우에도 대응이 가능하다.



a) Synthesized directivity pattern



b) Convergence characteristics

그림 10. 멀티 빔의 지향성합성 예  
Fig. 10. Synthesized directivity with two multi-beam

## VI. 결 론

본 논문에서는 준뉴턴법인 DFP법과 BFGS법을 최적화 알고리즘으로 채용한 선형배열음원의 최적 지향성합성에 대해 검토하였다.

준이상 빔, 회전 빔, 그리고 멀티 빔의 목적지향성을 예로 하여 몇 가지 수치 시뮬레이션을 통하여



지향성합성에 대한 성능, 목적함수의 수렴속도 및 안정성, 음원조건의 선택에 따른 적응성 등에 대해 위의 두 최적화 알고리즘을 비교한 결과,

① 최적화 알고리즘을 이용하여 종래의 시스템만으로는 불가능했던 다양한 지향성합성이 가능하다.

② 최적화 알고리즘에 오차제어를 도입하여 메인 로브 및 사이드 로브에 대한 지향성 설계사양을 고려한 지향성합성이 가능하다.

③ 임의로 설정한 예에 대한 지향성합성에서 음원조건의 변화에 대한 적응성 면에서는 BFGS법이 DFP법에 비해 뛰어난 특성을 나타내었다.

④ 음원수, 음원배열길이, 그리고 초기하중분포의 선택은 목적으로 하는 지향성합성에 대한 성능, 목적함수의 수렴특성, 그리고 적응성 등에도 큰 영향을 미친다.

⑤ 가우스 소거법으로 대표되는 직접법에 의해 얻어진 근사하중분포를 반복법의 초기하중분포로 이용하는 방법에 따라 초기하중분포의 선택에 따른 문제점은 대응할 수 있다.

⑥ 음원수 및 음원배열길이와 최적 지향성합성에 미치는 영향은 최적제어를 통한 이들의 조정에 의해 효과적인 지향성합성이 달성될 수 있으리라고 생각된다.

이외에도, DFP, BFGS법과 같은 최적화 알고리즘을 적용하면, 복수의 주파수에 대해서도 목적으로 하는 지향성사양을 만족하는 지향성합성이 가능하다.

### 참 고 문 헌

[1] A. Bhavani Sankar, D Kumar, and K Seethalakshmi, "Performance Study of Various Adaptive Filter Algorithms for Noise Cancellation in Respiratory Signals", *Signal Processing : An International Journal(SPIJ)*, 4(5), pp. 267-278. 2010.

[2] A. M. Pasqual, and J. Roberto, "A Comparative Study of Platonic Solid Loudspeakers as Directivity Controlled Sound Sources", *Proc. of the 2nd International Symposium on Ambisonics and Spherical Acoustics*, May, 2010.

[3] M. Abo-Zahhad, S. M. Ahmed, N. Sabor, and A. F. Al-Ajlouni, "The Convergence Speed of Single- and Multi-Objective Immune Algorithm Based

Optimization Problems", *Signal Processing : An International Journal (SPIJ)*, 4(5), pp. 247-266. 2010.

[4] A. Madkour, M. A. Hossain, K. P. Dahal, and H. Yu, "Intelligent Learning Algorithms for Active Vibration Control", *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, 37(5), pp. 1022-1033, September 2007.

[5] 笹倉豊喜, "超音波送受波器の最適設計", *コンピュータローレ* 39, pp. 106-112. 1992.

[6] K. C. Park, Y. Kagawa, T. Takao, K. R. Cho, "Optimization of the Frequency Characteristics in SAW Filter Design", *Inverse Problem in Engineering*, Vol. 8, pp. 473-493. April 2000.

[7] 森 正武, "數値計算プログラミング", 岩波書店. 1988.

[8] B. Widrow, S. D. Sterns, "Adaptive signal processing", Prentice-Hall. 1985.

[9] 小野寺 嘉孝, 杉原 正顯, 殿塚 勳, 森 正武, 小柳 義夫, 戸嶋 信幸, 長谷川 秀彦, "Fortran 77による數値計算ソフトウェア", 丸善株式會社, 1989.

[10] 茨木俊秀, 福島雅夫, "最適化プログラミング", 岩波書店. 2005.

[11] Wai-Ki Ching, Ho-Yin Leung, Nam-Kiu Tsing, Shu-Qin Zhang, "A Genetic Algorithm for Optimal Control of Probabilistic Boolean Networks", *The 2nd International Symposium on Optimization and Systems Biology*, pp. 29-35, October 2008.

[12] 土屋隆生, 河野 宏, 加川幸雄, "超音波送受波器の最適指向性合成シミュレーション", *日本シミュレーション學會誌*, 12(1), pp. 61-69, 1993.

정 의 철 (Eui-cheol Jeong)

정회원



1994년 2월 여수수산대학교  
전자통신공학과 졸업

2012년 2월 전남대학교 대학원  
전자통신공학과 공학석사

1994년 3월 ~ 현재 한국공항  
공사

<관심분야> 영상신호처리, 공항  
관제시스템, 최적제어 등

김 상 윤 (Sang-yun Kim)

정회원



1997년 2월 호원대학교 전자계산학과 졸업  
2012년 현재 전남대학교 대학원 전자통신공학과 석사과정  
1997년 3월~현재 대성 FA(주) 이사

<관심분야> 영상신호처리, ITS, 최적제어 등

조 기 량 (Ki-ryang Cho)

정회원



1982년 2월 광운대학교 통신공학과 졸업  
1992년 8월 건국대학교 대학원 전자공학과 공학석사  
2002년 3월 일본 오카야마대학 자연과학연구과 공학박사  
현재 전남대학교 전기·전자통신·컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 음성신호처리, 파동·압전 문제의 수치해석, 최적제어 등

김 은 (On Kim)

정회원



1994년 2월 여수수산대학교 전자통신공학과 졸업  
2002년 2월 전남대학교 대학원 전자통신공학과 공학석사  
2007년 2월 전남대학교 대학원 전자통신공학과 공학박사  
현재 프로닉스 대표이사, 전남대학교 해양기술학부 겸임교수

<관심분야> 통신·음성·영상신호처리, 공장자동화, 최적제어 등