

# BEAM-forming 측정 방법의 원리 및 응용

이 태 봉\*

(Brüel & Kjaer Korea)

## 1. 머리말

근접음향 홀로그래피 (near field acoustic holography) 는 소음원의 위치를 찾아내는데 있어서 정확하고 효과적인 측정 방법으로 잘 알려져 있다. 이 방법은 소음원에 근접한 거리에서 마이크로폰 배열을 이용하여 측정 물체의 방사소음이 얻어질 수 있도록 측정 대상물 전체 면적에 대한 측정 데이터를 얻은 후 홀로그래피 계산을 통하여 소음원의 위치를 쉽게 이해 할 수 있는 음장 가시화 시스템이다. 측정면적은 반드시 중요 소음원 요소 전체를 커버하기 위해 대체로 가로, 세로 길이의 2배가 되는 면적을 측정하여야 한다. 또 측정면에 대한 격자(grid) 간의 거리는 최대 측정 주파수의 반 파장이 되게 측정 마이크로폰을 위치시킨다. 따라서 근접음향 홀로그래피 측정 방법은 측정 주파수가 높거나, 측정 대상물의 측정 면적이 큰 경우에는 매우 많은 지점에서의 측정이 수행되어야 한다. 더 나아가 측정이 평면상 (직교 좌표에 한함)에서 측정이 이루어져야 함으로 소음 방사면이 임의의 곡면인 경우 제한된 사용 조건을 갖게 된다. 이러한 경우에 있어서 BEAM-forming 측정 방법은 마이크로폰 배열을 이용한 또 다른 효과적인 측정 방법이 될 수 있다.

기본적으로 BEAM-forming 측정 방법은 음향

홀로그래피 측정 방법과 같이 마이크로폰 배열을 이용하면서도 근접음향 홀로그래피에 비해 다소 멀리 떨어진 지점에서 높은 주파수 대역에 대한 측정이 가능하며 모아진 측정 자료들을 일련의 신호처리를 통해 측정 물체의 소음원 위치를 가시화 할 수 있다. BEAM-forming 측정에서는 측정 분해능이 측정하고자 하는 주파수 파장과 측정 어레이(array) 지름 사이에 반 비례 관계를 갖게 된다. 측정 주파수가 낮은 영역에서는 일반적으로 이 조건을 만족시키기가 매우 힘들며, 이 조건을 만족시키기 위해서는 매우 큰 측정면적을 갖는 어레이 시스템을 구성해야만 한다. 따라서 BEAM-forming 측정 방법은 저주파수 영역의 측정을 하는 경우 실질적인 관점에서 낮은 측정 분해능을 갖게 된다. 그럼에도 불구하고 일반적인 BEAM-forming 측정에서는 대상 소음원을 갖는 물체 크기에 비례하는 어레이를 이용 할 필요성은 없다. 대체로 불규칙 어레이 형상을 이용하는 경우 분해능을 향상시키기 위해 측정 대상물에 가급적 가까운 거리를 유지하는 것이 필수적이다. 그러나 이때 측정 어레이 반경보다 가까운 거리에서의 측정은 피하는 것이 좋다.

근접음향 홀로그래피와 BEAM-forming 측정 방법은 둘 다 마이크로폰 배열을 이용하면서도 가장 큰 차이점은 측정에서 사용되는 마이크로

\* E-mail : tblee@bksv.co.kr / 02)3473-0605

폰 어레이 형상이다. 마이크로폰 어레이를 이용하여 마이크로폰이 위치하는 측정 좌표의 차이를 변화시킨다. 근접음향 홀로그래피가 일정한 격자 형태의 측정 어레이를 이용하는 반면에 BEAM-forming 방법은 불규칙 어레이 형상(랜덤 형상)을 이용한다. 근접음향 홀로그래피에서는 정방향 형태의 측정 데이터를 이용하여 2차원 공간 DFT처리를 한 후 발생하는 공간 에어리징 문제점을 공간 가중 함수(spatial weighting function)를 사용하여 제거시킨다. 이때 측정 격자 사이의 거리가 최대 측정 주파수의 반 파장을 초과하면 공간 에어리징 성분으로 인한 고스트 영상의 발생으로 음원의 정확한 위치를 찾을 수 없게 된다. 반면에 불규칙 어레이를 사용하는 경우에는 좀 더 높은 측정 주파수의 범위까지 공간 에어리징 효과를 완화시킬 수 있다. 이러한 이유로 BEAM-forming 측정방법이 상대적으로 적은 수의 마이크로폰을 이용하면서도 음향 홀로그래피에 비해 상대적으로 높은 주파수 범위까지 측정이 가능해진다.

## 2. 원리 및 어레이 설계

BEAM-forming의 기본적인 원리는 그림 1과 같이 측정 대상면에서 발생한 평면파가 마이크로폰 배열로 구성된 측정 지점들 사이의 신호 도달 시 도착 시간에 따른 전달 시간차와 이때의 동일 성분을 합하여 각각의 주파수 성분에 대해서 신호처리를 한다. 마이크로폰 신호의 시간 지연 성분들은 선택된 소음원 방향으로 상관관계를 이용하여 더해 줄 수 있게 선택한다. 그림 1의 경우를 보면 가장 우측에 있는 마이크로폰에 가장 먼저 신호가 도달되며, 다음에 두 번째 마이크로폰의 순서로 신호가 도달된다. 첫 번째 도달하는 신호가 가장 큰 시간 지연을 갖게 되고 두 번째 신호가 두 번째로 큰 시간 지연을 갖게 된다. 따라서 모든 신호는 더해지기 전에 시간에 대한 정렬

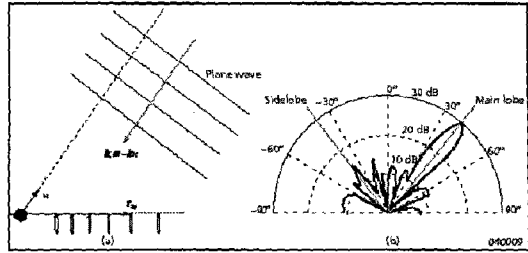


그림 1 평면파의 진행 및 일반적인 주엽에 대한 감도 형상

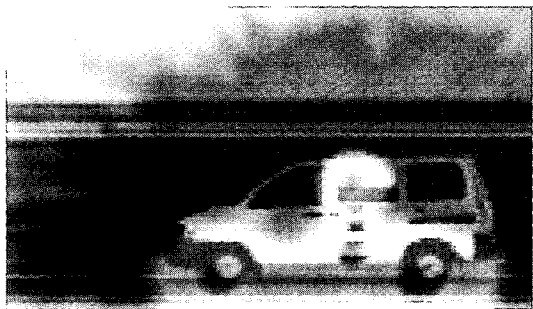


그림 2 BEAM-forming을 이용한 소음 등고선 예제

을 한다. 따라서 큰 파워를 갖는 큰 진폭의 출력이 같은 시간 지연이 되게 얻어진다. 이때 다른 방향으로부터 도달하는 신호는 낮은 파워를 갖게 된다.

주어진 어레이 초점 방향  $\kappa$ 에 대한 BEAM-forming 출력  $b(\kappa, t)$ 는 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$b(\kappa, t) = \sum_1^M p_m(t - \Delta_m(\kappa)) \quad (1)$$

여기서  $p_m$ ,  $m=1, \dots, M$ 은 측정된 음압 신호들이고  $M$ 은 측정에 사용된 마이크로폰 배열의 숫자가 된다. 결론적으로 BEAM-forming 측정은 지연과 합(delay and sum) 알고리즘을 이용하여 측정 대상물 전체를 커버할 수 있는 위치에 마이크로폰 어레이를 위치시키고 이때 얻은 측정 데이터를 이용하여 그림 2와 같은 소음 등고선을

그려줄 수 있다.

머리말에서 BEAM-forming의 가장 큰 특징인 어레이 배치에 대해서 언급하였다. 우선적으로 BEAM-forming 측정에서는 어떠한 형태로 어레이 형상을 만들 것인가가 가장 중요한 측정 장비 구성 요소가 된다. 이때 최적의 실용적인 어레이 형태를 설계하기 위해 그림 1과 같이 어레이를 초점 방향으로 배치한 후 어레이의 지향형태를 고려하면 초점 방향에 가장 근접한 방향이 가장 큰 음향 강도를 갖게 된다. 지향 방향에서의 가장 큰 정점을 주엽(mainlobe)이라고 부른다. 다른 방향의 감도는 더 낮은 값을 갖게 된다. 이때 다른 방향에서의 작은 국부적인 정점을 부엽(sidelobe)이라고 부른다. 한 주파수 지점에서의 한 개의 평면파의 단면에 대한 지향 형태를 그림 1에서 볼 수 있다. 모든 방향과 측정 주파수 전범위에 대한 최대 주엽 레벨 MSL (maximum sidelobe level) 을 계산하기 위해 다음과 같이 어레이 형태를 함수  $W(k)$ 로 표현한다.

$$W(k) \equiv \sum_{m=1}^M e^{jK \cdot r_m} \quad (2)$$

여기서  $r_m$ ,  $m = 1, \dots, M$ 은 측정 마이크로폰의 좌표 번호가 되며  $K$ 는 파수(wave number) 벡터가 된다. 식 (2)의 어레이 형태 방정식으로부터 임의의 방향에서 어레이에 도달하는 평면파에 대한 어레이 응답을 만들어 낼 수 있다. 만약 식 (2)에서 x-y 평면을 갖는 평면 어레이로 조건을 제한하면  $r_m$  지점에서 z 방향 값은 영이 되고 어레이 형태 함수는  $K_z$ 에 독립적이 된다. 따라서 좀더 단순화된 어레이 형상을 위해 어레이 형태를  $(K_x, K_y)$  평면에 대해서만 고려한다.  $(K_x, K_y) = (0, 0)$  지점에서 가장 큰 값을 갖는  $W$  어레이 형태를 볼 수 있다. 이 지점에서의 최대값은 모든 주파수와 모든 초점 방향에 대한 주엽치를 나타낸다.

그림 3(a)는 일반적인 어레이 형태를 표현한다.

모든 방향과 주어진 주파수 범위에 대한 최대 주엽 레벨은 주엽 폭  $K_{\min} = 2\pi/D$ 의 구형 디스크에서 최대 피크 값으로 확인 할 수 있다. 여기서  $D$ 는 어레이의 지름이다. 또  $K_{\max} = 2\omega_{\max}/c$ 로 표현 할 수 있으며,  $c$ 는 소리의 전파 속도이고  $\omega_{\max}$ 는 사용되는 어레이의 최대 주파수 값을 의미한다. 주엽의 폭  $K_{\max}$ 는 어레이 지름에 반비례함을 알 수 있다. 최종적으로 측정물체 표면에서 어레이 위치까지의 거리를  $L$ 로 표현하면, 임의의 지점에서 거리에 따른 측정 분해능  $R$ 은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$R_{Axis} \equiv L \frac{\lambda}{D} = \frac{L}{D} \lambda \quad (3)$$

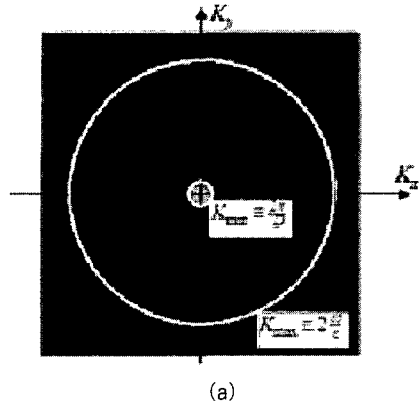
그림 4에서 중심 선상으로부터 임의의 각도  $\theta$  위치에 대한 분해능은 다음과 같이 된다.

$$R(\theta) \equiv \frac{R_{Axis}}{\cos^3(\theta)} \quad (4)$$

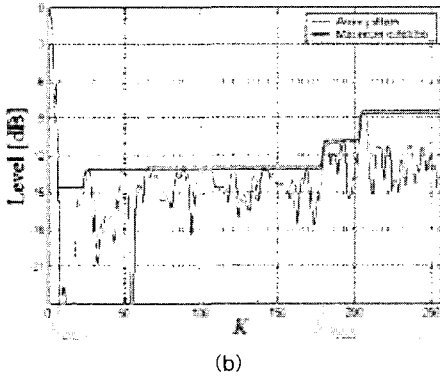
중심 축으로부터 측정 각도가  $30^\circ$  이상이 되면 매우 급격하게 분해능이 나빠진다. 실용적인 관점에서는 중심 축으로부터 약 10도의 범위 내에서 BEAM-forming 측정면적을 확보해야 한다

이 지점에서 어레이 설계에 대해 언급하기 위해 그림 1의 결과를 살펴보면 주엽에 대한 부엽의 상대적 차이 정도에 따라 임의의 초점 방향에 대한 분해능 및 다른 방향에서의 원하지 않은 성분을 제거 할 수 있는 차이가 있음을 알 수 있다. 따라서 BEAM-forming 어레이 설계에 있어서 가장 중요한 인자는 측정하고자 하는 주파수 범위에서 가급적 적은 MSL 값을 갖도록 어레이를 구성해야 한다. 식 (2)에 의하면 어레이 형태는 완전히 마이크로폰 위치의 좌표값에 의해 결정된다. 따라서 BEAM-forming 장비의 성능은 선택된 어레이 형상에 따라서 결정된다고 볼 수 있다.

그림 5는 세가지 다른 형태의 기하학적 어레이 형상에 따른 각각의 MSL 값을 표시 했다. 바퀴

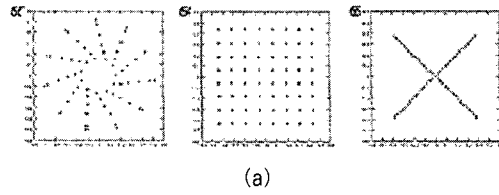


(a)

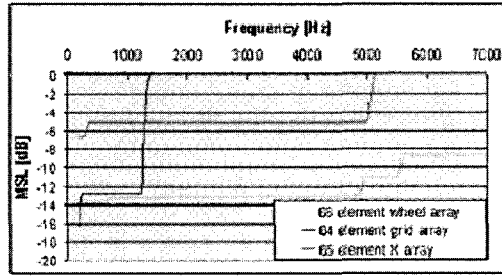


(b)

그림 3 어레이 형상 및 최대 주엽 프로파일



(a)



(b)

그림 5 세가지 어레이 형상에 따른 MSL 비교

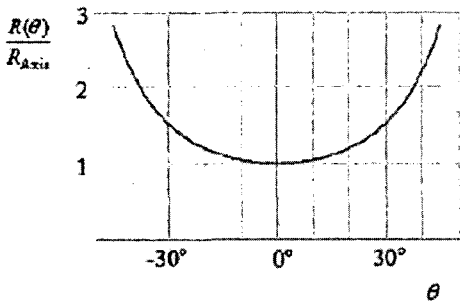
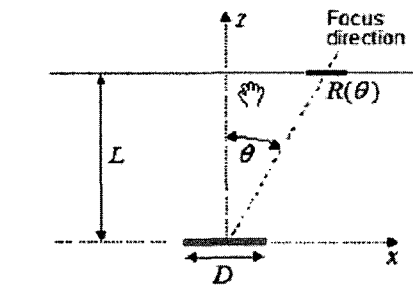


그림 4 축 방향의 분해능

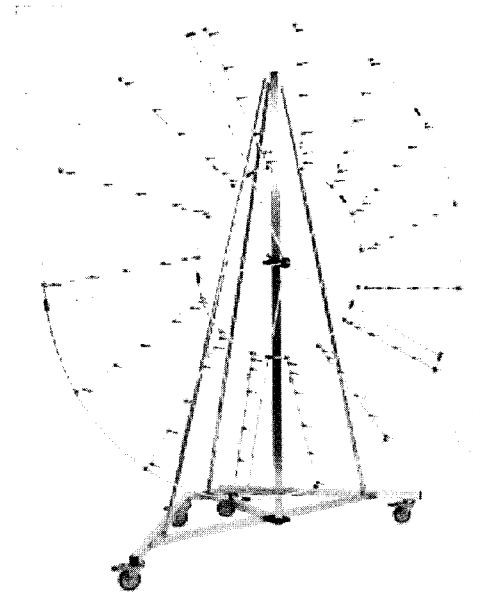


그림 6 Brüel & Kjær 바퀴 형상 어레이

형상 어레이가 격자 형상 어레이나 크로스 형상 어레이 보다 나은 성능을 보여주고 있다. 격자 형상의 어레이는 일정한 간격으로 마이크로폰을 배치하는 것으로 배치된 마이크로폰 사이의 간격이 최대 측정 주파수의 반 파장을 넘을 경우 심

각한 공간 엘리어징 현상을 초래한다. 이러한 엘리어징 효과는 매우 큰 부엽치를 갖게 되고 이로 인해 소음원 매핑시 고스트 영상으로 나타나며 이로 인해 정확한 소음원의 위치를 파악하기 힘들게 된다.

일반적으로 랜덤 어레이 형상을 이용하는 경우에는 이와 같은 엘리어징 현상을 상당부분 피할 수 있는 어레이 배치로 알려져 있다. 그러나 실제적인 측정 장비 제작에 있어서 랜덤 좌표로 인한 마이크로폰 위치의 확보, 지지하고 있는 구조물의 제작 및 연결 케이블 설치 등의 어려움으로 인해 상업적인 시스템에서는 잘 사용되지 않고 있다. 그림 6의 바퀴 형상 어레이는 B사에서 사용하고 있는 어레이 형태로 랜덤 어레이의 장점을 살리면서 좀 더 실용적인 규칙적인 형태를 갖도록 설계되어 있다.

### 3. 응용사례

BEAM-forming 장비는 소음원의 위치를 찾아내는 매우 효과적이고 실용적인 측정방법으로서 다양한 산업용 설비와 제품에 대한 측정이 이루어지고 있다. 국내에서도 많은 사례가 있었으나 제품 개발의 기술보안 문제로 인해 공개하지 못하고 본사에서 수행된 과제를 중심으로 여기에 기술 하고자 한다. 여기에 기술된 응용 사례 이외에도 국내에서 BEAM-forming 측정장비를 이용하여 대형 발전 터빈, 차량의 변속기, 냉장고, PDP, 산업용 건설장비, 항공기 동체 소음의 사례가 있었으나 그 결과를 보여 줄수 없는 안타까움이 있습니다. 이 점 독자 여러분들의 이해를 부탁드립니다

#### 3.1 차량전체에 대한 소음원 측정

첫 번째 사례는 볼보 승용차의 소음 방사를 측정 한 것이다. 근접 음향 홀로그래피를 이용하는 경우 2 m × 4 m의 경우 바닥면의 미러 효과를



그림 7 BEAM-forming 계산에 의한 음장 가시화

사용하더라도 약 3 m × 8 m의 측정 점의 면적을 커버해야 하며 약 3 kHz 까지 측정시 총 24,000 점에 대한 측정이 이루어 져야 한다. 실질적으로 이러한 측정을 위해서는 테스트 셀의 동력계 드럼 위에서 차량을 시동한 후 스캐닝 방법에 의한 정상 상태 측정을 해야 한다. 그러나 측정 시간이 나 레퍼런스의 선정, 정상상태의 유지가 문제점이 될 수 있다. 더 나아가 자동차의 가속 운행 조건인 경우 스캐닝 방법은 사용할 수 없는 단점이 있다. 이에 비해서 BEAM-forming 측정방법은 임의의 측정거리에서(일반적으로 3-7m) 불규칙 어레이를 사용하여 넓은 주파수 범위에 대한 측정을 매우 짧은 시간 내에 측정 할 수 있다(실질적으로 1분이내 측정이 끝남). 또 측정물체의 바닥면이 반사면이라면 좋은 분해능을 유지하면서 사용되는 채널 수를 반으로 사용할 수 있는 반쪽 바퀴 형상 어레이가 사용 되기도 한다.

#### 3.2 풍동에서의 차량외부 소음 측정

풍동에서의 차량 외부소음을 측정하는 경우에는 풍동 설비 내의 바람의 영향을 받지 않는 일정 거리에서 측정이 이루어 져야 하며 풍속이 매우 큰 상황에서 근접음향 홀로그래피를 이용하는 경우에는 바람의 영향으로 매우 제한된 속도에서만 측정이 가능해 진다. 그러나 BEAM-forming의 경우에는 상당히 떨어진 거리에서 측정을 할



그림 8 풍동에서의 차량 외부 소음원 측정

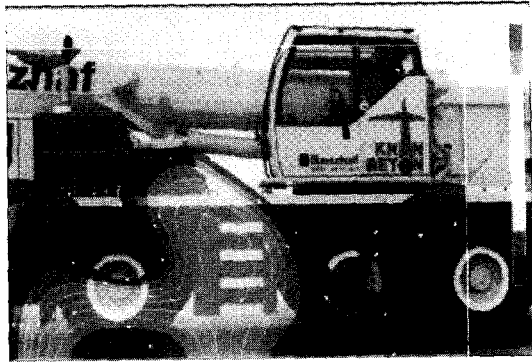


그림 9 최대 부하시 기증기 소음원 측정

수 있고 이때 거리에 따른 공간 분해능을 유지하기 위해서는 좀 더 큰 직경의 어레이가 사용되어야 한다. 여기서는 지름 2.4 m, 96 채널의 바퀴 형상 어레이를 이용하여 측정을 하였다. 측정 주파수 범위는 약 3 kHz로서 근접음향 홀로그래피 방법을 이용할 경우 최대 5 cm의 그리드 간격을 유지하여야 하며 차량 전체 면적에 대해 스캐닝시에는 측정 시간으로 인해 풍동의 강한 바람에 의해 측정 중 일어날 수 있는 에러를 보상하기가 매우 힘들다. 그러나 BEAM-forming을 사용하는 경우에는 풍동시설 내에 바람의 영향이 없는 측면 부위에서 일정 거리를 두고 짧은 시간 안에 측정을 할 수 있다. 여기서 측정 차량은 시속 130 km/h의 바람이 부는 가운데 차량의 측면에 평행한 3.3 m의 거리에서 정상상태의 조건으로 측정이 됐다. 그림 8의 측정 결과에 의하면 주파수 2.1 kHz에서 2.6 kHz 범위에 걸쳐 소음 방사가 되는 중요 부분이 전방 차륜, 측면 미러, A필라 그리고 도어 핸들에 분포하고 있음을 보여 주고 있다.

### 3.3 대형 기증기 소음원 측정

다소 높은 주파수 범위에 대한 대형 물체의 소음원 측정에 있어서 BEAM-forming 방법은 매우 효과적인 측정 수단이 될 수 있다. 여기서는 직경 1 m, 42 채널로 구성된 바퀴 형상 어레이를 이용하여 약 7 m 거리에서 최대 부하를 갖는 기증기

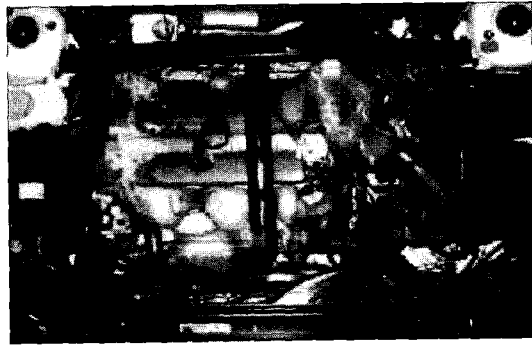


그림 10 승용차 엔진 소음원 측정

의 소음원을 측정했다. 측정 면적을 커버하기 위해 측정 거리를 늘려야 하며 측정 거리에 따른 면적을 이용한 공식을 이용하여 약 30도 각도에 대해  $1.15 \times 7 \text{ m} = 8 \text{ m}$ 의 매핑 면적을 잡을 수 있다. 그러나 이때 공간 분해능은  $1.22 \times 7/1 = 8.5$  파장으로 매우 떨어진다. 그림 9는 약 2.05 kHz 부근에서의 소음원의 위치를 보여주고 있다.

### 3.4 고주파수 범위까지의 엔진 소음 측정

그림 10의 측정 결과는 직경 1 m, 66 채널의 바퀴 형상 어레이를 엔진표면으로부터 0.9 m 거리에서 12.8 kHz 까지 측정을 하였으며 BEAM-forming 계산은 6.3 kHz 범위까지 수행됐다. 잘 알려진 대로 이 정도의 주파수 측정을 위해 근접음향 홀로그래피 방법을 이용하는 경우 마이크로

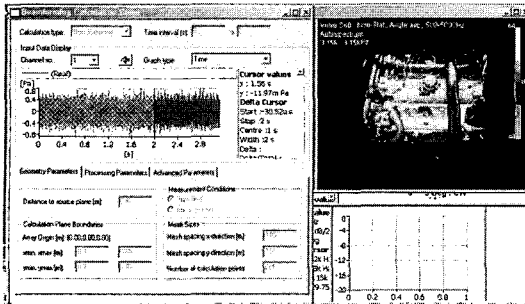


그림 11 Non-stationary 상태에서의 시간에 따른 음장 가시화 예

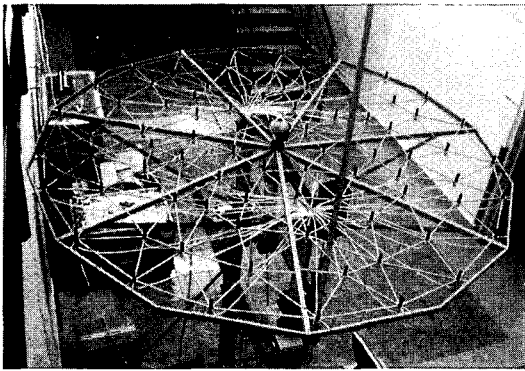


그림 12 근접 음향 홀로그래피와 BEAM-forming 측정을 동시에 할 수 있는 복합 어레이 형상

폰의 간격은 2 cm 정도가 되어야 하며 전체 엔진 방사소음 면적을 커버하기 위해서는 적어도 2,500 지점에서의 측정이 필요하다. 일반적으로 사용되는 마이크로폰의 직경이 1/4 인치인 경우를 보면 케이블의 작업 및 마이크로폰 상호간의 간섭 효과를 유발 할 수 있기 때문에 실용적으로 매우 사용하기가 어렵다.

### 3.5 비정상상태 BEAM-forming

그림 11은 어레이 마이크로폰에서 얻어지는 모든 채널의 시간 신호를 기록한 다음 각각의 일정 시간 구간에 대한 BEAM-forming 계산을 수행하여 신호가 불규칙적으로 변하는 비정상 상태의 소음원을 시간에 따라 등가 소음 곡선으로 표시

한 예이다. 이때 잘 알려진 크랭크 앵글분석 기법을 이용하여 크랭크 앵글에 대한 정보와 속도를 감지할 수 있는 RPM 센서를 이용하면 엔진 사이클에 대한 비정상 상태의 BEAM-forming 계산을 크랭크 앵글의 각도에 따라 처리할 수 있다. 두 회전으로 구성되는 엔진 사이클인 경우 1/3 대역 필터를 이용하여 약 간격으로  $720/5 = 144$  개의 BEAM-forming 계산이 처리되며 선택된 시간 구간에 대하여 모든 회전각에 대한 평균값을 계산한다.

## 4. 근접음향 홀로그래피와 BEAM-forming의 결합

기본적으로 근접 음향 홀로그래피는 고주파 측정에 있어서 마이크로폰 사이의 거리에 따른 측정 상의 문제가 발생하고 BEAM-forming은 실용적인 어레이 크기의 제한으로 인해 저주파 측정의 문제점을 갖고 있다. 따라서 하나의 어레이 형상을 이용하여 저주파에서는 근접음향 홀로그래피 기법을 고주파 측정에서는 BEAM-forming 기법을 사용하여 측정 주파수에 대한 실용적인 제약점을 극복하는 것이다. 그림 12의 어레이 형상은 영국의 톨스로이스의 항공기 엔진의 소음원 측정을 위해 제작된 어레이 구조물로서 피자형상의 모양으로 구성되어 있다. 예를 들어 1 m 직경과 84 채널을 갖는 어레이를 이용하는 경우, 홀로그래피 측정을 위해서는 좋은 측정 분해능을 유지하기 위해 가급적 물체 소음면에 근접시켜야 한다. 따라서 1.5 kHz 까지 측정 범위를 유지하기 위해 15 cm의 마이크로폰 간격이 필요하며 물체 표면으로부터의 거리도 15 cm 위치에서 측정이 된다. 같은 어레이를 이용하여 BEAM-forming 측정은 어레이 직경의 0.8 배 이내에서 이루어 져야 하며 0.8 파장의 길이 내의 분해능을 갖는다. 측정 주파수는 1.5 kHz에서 7.5 kHz까지 커버할 수 있다. B사에서 사용된 어레이

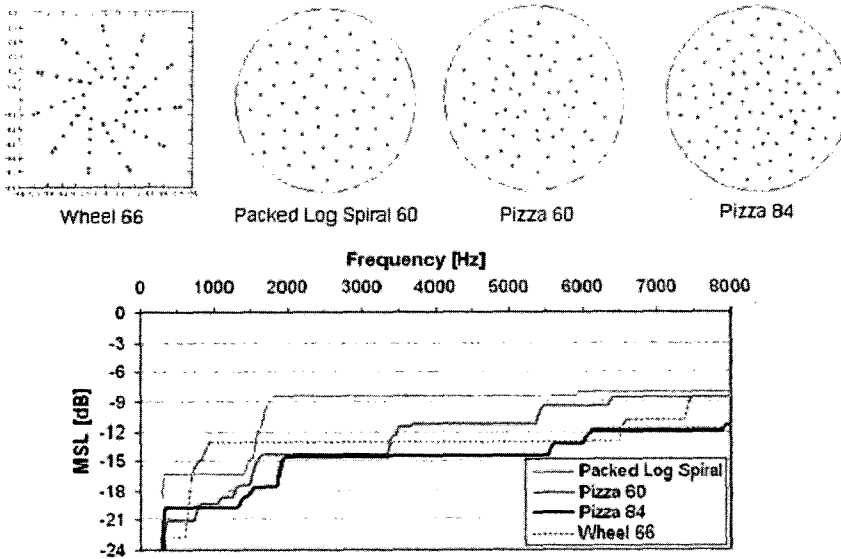


그림 13 어레이 형상 및 채널수에 따른 MSL 비교

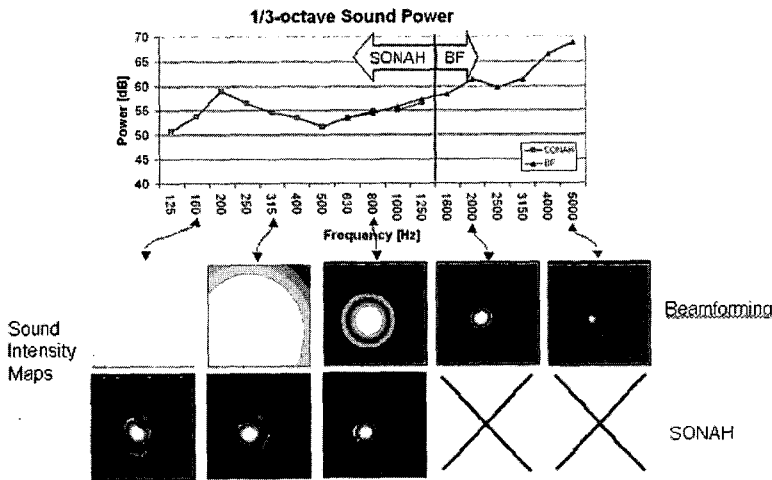


그림 14 스피커를 이용한 복합 어레이 형상에 대한 소음원 측정 결과

형상의 최적 설계는 앞에서 언급한 MSL의 최소화 값을 갖는 실용적 형상을 찾아내는 것이다. 최고의 분해능을 갖는 랜덤 형상 어레이로부터 MSL을 최소화 하기 위해 모든 마이크로폰의 좌표값을 이동시켜 최적의 마이크로폰 숫자와 위치를 찾아내는 작업이 수행되었다. 이 작업과정을 기술하면 먼저 어레이 직경, 어레이 모양 및


가동 주파수 범위의 변수를 선정한다. 최대 주파수에서의 MSL값은 최소 주파수에서의 MSL보다 적거나 같기 때문에 최대 주파수에서의 최소 값을 갖는 MSL을 찾는다. 따라서 어레이의 기하학적 형상을 조정하여 최소최대 최적화 프로그램을 이용하여 최대 주파수에서의 최소 MSL값을 갖는 어레이 형상을 찾아낸다. 그림 13은 여러



가지 형상의 에러에 따른 최대 주엽치(maximum mainlobe level)를 보여주고 있다.

그림 14는 60채널로 구성된 측정 시스템을 이용한 결과로서 마이크로폰 사이의 평균 거리가 12 cm인 5개의 단면으로 연결된 원판 형태 어레이 형상을 이용하여 측정을 하였다. 근접 음향 홀로그래피 측정을 위해서 스피커 표면으로부터 12 cm 거리에서 측정이 이루어 졌고, BEAM-forming 측정은 50 cm 거리에서 측정 한 결과를 보여주고 있다. 이때 약 800 Hz 범위의 중간 주파수 대역은 보간법(interpolation)에 의한 평균값을 이용한다. 신호처리 과정은 두 번의 계산과정(음향 홀로그래피 좌표로의 전환 및 계산, BEAM-forming 좌표로 전환 및 계산)을 거쳐 얻어진 결과를 이용하여 주파수 범위에 따라 저주파에서는 홀로그래피 결과를 고주파에서는 BEAM-forming 결과를 사용한다.

## 5. 결론

BEAM-forming 측정 기법은 대형 구조물, 고속으로 움직이는 소음원에 대해 다소 떨어진 지점에서 쉽고 빠르게 현장에서 측정을 끝낼 수 있는 효과적인 측정 방법이다. 그러나 현실적으로 공간상의 측정 분해능의 영향으로 측정 거리의 상당한 제약을 받게 된다. 이의 극복을 위해서는 큰 직경의 다채널 어레이를 필요로 하며 이는 측정을 위한 고가의 비용이 요구된다. 그럼에도 불구하고 최근에 상업적으로 다수의 제품이 출시되고 있고 실용적인 편리성으로 향후에 많은 분야에서 이의 사용이 있을 것이라 예측이 된다. 

## 참고문헌

- (1) Maynard J.D., Williams E.G. and Lee, Y., 1985, "Nearfield Acoustical Holography: I. Theory of

Generalized Holography and the Development of NAH", J. Acoust. Soc. Am. 78(4), pp. 1395~1413.

- (2) Hald, J., 1989, "STSF - a Unique Technique for Scan-based Near-field Acoustic Holography without Restrictions on Coherence", Brüel&Kjær Technical Review No. 1, pp. 1~50.
- (3) Johnson, D. H. and Dudgeon, D. E., 1993, "Array Signal Processing: Concepts and Techniques", Prentice Hall, New Jersey.
- (4) Proakis, J.G. and Manolakis, D. G., 1996, "Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications", 3rd Edition, Prentice Hall, New Jersey.
- (5) Yasushi, T., 1997, "Two-dimensional Microphone Array System for Measuring Distribution of Aerodynamic Noise-sources on High-speed Trains", International Symposium on Simulation, Visualization and Auralization for Acoustic Research and Education, Tokyo.
- (6) Underbrink, J. R. and Dougherty, R. P., 1996, "Array Design for Non-intrusive Measurement of Noise Sources", Proceedings of Noise-Con 96, pp. 757~762.
- (7) Nordborg, A., Wedemann, J. and Willenbrink, L., 2000, "Optimum Array Microphone Configuration", Proceedings of Internoise.
- (8) Danish patent No. PA 2002 00412.
- (9) Elias, G., 1995, Proceedings of Internoise pp. 1175~1178.
- (10) Hald, J. and Christensen, J.J., 2002, To Appear in Proceedings of Inter-Noise.
- (11) Christensen, J.J. and Hald, J., 2004, "Beamforming. Brüel & Kjær Technical Review, No. 1.