

# 누설오차의 영향을 고려한 음향 인텐시티의 추정

안세진\*\* · 정의봉\* · °정호경\*\*

## Sound Intensity Estimation with the Effect of Leakage Error from the Contaminated Data

Se Jin Ahn , Weui Bong Jeong , Ho Kyoung Jeong

### ABSTRACT

Acoustic intensity is usually estimated by the cross-spectrum of acoustic pressure at two adjacent microphones. The cross-spectrum calculated by digital Fourier transform technique will unavoidably have leakage error since the period of signal will not be usually coincident with record length. Therefore, the acoustic intensity estimated by the conventional FFT analyzer will show distorted value. In this paper the expression of the Fourier transformed data of a harmonic signal is formulated when there is leakage error. The method to eliminate the effect of leakage error from the contaminated data is also proposed. Some numerical examples show the validation of the proposed method.

### 1. 서론

오늘날 음향 인텐시티 측정 방법으로써 보편적으로 이용되는 것은 2개의 근접한 마이크로폰 신호의 크로스 스펙트럼(Cross Spectrum)의 허수 부분으로부터 그 값을 계산하는 방법(FFT Method)이다. 그러나, 일반적으로 계측기에서 사용하고 있는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)은 일종의 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)으로서, 주파수 영역의 데이터는 이산적인 성질을 가지게 된다. 이와 같은 주파수의 불연속으로 인하여 스펙트럼 상에는 시간 신호의 실제 주파수를 나타내 줄 수 없게 된다. 그러므로 측정시의 음향 인텐시티는 왜곡된 두 주파수의 크

로스 스펙트럼(Cross Spectrum)을 이용하여 계산되므로 정확한 주파수와 값을 측정 하기가 어렵다.

이전의 연구<sup>(8)</sup>에서 단일주파수 신호에 대해 정확한 진폭, 주파수, 위상을 찾았고, 얻어진 음향 변수들을 사용하여 누설오차가 제거된 인텐시티를 구할 수 있었다. 하지만 실제의 신호는 여러 주파수와 진폭을 가지는 신호들의 중첩이다. 중첩된 신호에 대해 이전의 방법을 사용할 경우 진폭과 주파수는 비교적 정확한 값을 찾을 수 있지만, 위상의 경우 정확한 값을 구하기가 요원하다.

본 논문에서는 누설오차에 의하여 왜곡된 시간 신호가 푸리에 변환되었을 때의 스펙트럼 표현식을 구하여 누설오차가 제거된 위상을 구하는 방법을 제시한다. 그리고 이렇게 얻어진 신호를 사용하여 누설오차의 영향이 제거된 인텐시티를 구하는 방법을 제시하고자 한다.

\* 정회원, 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

## 2. 음향 인텐시티에서의 누설오차

음향 인텐시티는 단위 면적당의 음압과 입자속도의 곱의 시간 평균된 값이다. 음압은 마이크로폰을 이용하여 쉽게 측정할 수 있지만 입자속도를 측정하는 것은 그렇게 쉽지 않다. 그러나 입자 속도는 선형화된 오일러 식에 의해 압력구배(거리에 따른 순간압력 변화 비율)와 관계시킬 수 있다. 현재 사용되고 있는 인텐시티 측정법은 2개의 근접한 마이크로폰으로 압력 구배(Pressure gradient)를 측정하여, 이것과 입자속도와의 관계식을 만들어 사용한다. 이는 FFT분석기를 이용하여 2개의 음압신호의 크로스 스펙트럼(Cross Spectrum)의 허수 부분에 인텐시티를 연관시키는 것이다. 즉 다음식으로 인텐시티를 구할 수 있다.

$$I = -\frac{2 \operatorname{Im} S_{AB}}{\omega \rho \Delta r} = -\frac{\operatorname{Im} G_{AB}}{\omega \rho \Delta r} \quad (1)$$

여기서,

$S_{AB} = A^* \cdot B$  : Cross spectrum

A : 마이크로폰 1의 음압신호 스펙트럼

B : 마이크로폰 2의 음압신호 스펙트럼

$\Delta r$  = 두 마이크로폰 사이의 거리

$\omega$  = 주파수(Hz),  $\rho$  = 음장의 밀도

누설오차는 실제신호를 이산화 하는 과정에서 기록시간 T가 신호의 주기와 일치하지 않아서 푸리에 변환시 실제와는 다른 주파수와 크기가 나타나는 현상이다. 이런 누수 현상은 인텐시티의 경우 실제와는 다른 두 신호(누설 오차가 발생한 신호)의 크로스 스펙트럼으로 나타내어지므로 더욱 심각하다고 할 수 있다.

Table 1은 인텐시티 측정에 사용되는 두 개의 마이크로폰에서 측정된 음압 신호에 대해 누설오차가 발생한 경우( $\Delta f=1\text{Hz}$ )와 발생하지 않는 경우( $\Delta f=2\text{Hz}$ )에 대한 간단한 예이다. 음압 신호의 주파수  $f=251\text{ Hz}$ , 마이크로폰 1에서의 진폭 20 Pa, 마이크로폰 2에서의 진폭 19 Pa 일 때 각 마이크로폰에서의 신호를 푸리에 변환 후 크기를 나타내었다.

주파수 분해능  $\Delta f=1\text{Hz}$ 로 sampling한 경우는 누설오차가 발생하지 않으므로 정확한 인텐시티를 추정할 수 있지만, 주파수 분해능을  $\Delta f=2\text{Hz}$ 로 sampling한 경우는 마이크로폰에서의 음압 신호가 누설오차가 발생하여 왜곡됨을 알 수 있다. 또 마

Table 1. An example of the effect of leakage error for pressure signal with frequency  $f=251\text{Hz}$

	$\Delta f=1(\text{Hz})$ at 251Hz	$\Delta f=2(\text{Hz})$ at 252Hz	error(%)
Pressure1	20.000(Pa)	12.736(Pa)	36.32
Pressure2	19.000(Pa)	12.119(Pa)	36.22
Intensity	0.454 ( $W/m^2$ )	0.183 ( $W/m^2$ )	59.69

이크로폰에서 측정된 두 신호의 크로스 스펙트럼을 사용하는 인텐시티는 더욱 심각한 오차를 수반한다는 것을 쉽게 알 수 있다.

## 3. 음향신호의 디지털 푸리에 변환

음압식은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$p(r, t) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i e^{j(2\pi f_i t - k_i r)} \quad (2a)$$

하나의 주파수 신호만을 보면 다음과 같다.

$$p(r, t) = A_0 e^{j(2\pi f t - kr)} \quad (2b)$$

여기서 음압의 실수부만을 취하고 위상을  $\phi_0$ 라 두면 음압은 다음식

$$\begin{aligned} p(r, t) &= A_0 \cos(2\pi f t - \frac{2\pi f}{c} r) \\ &= A_0 \cos(2\pi f t + \phi_0) \end{aligned} \quad (3)$$

과 같다. 여기서  $A_0$ 는 진폭,  $f$ 는 입력 주파수이다.

먼저  $m$ 을 "기록시간(record length) T 내의 파의 개수"라고 정의하면, 거의 모든 경우에  $m$ 은 정수가 아닌 실수(만약  $m$ 이 정수이면, 기록시간과 신호의 주기가 정수배가 되므로 누설오차가 발생하지 않는다.)가 되며, 다음 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} m &= \frac{T}{T_{\text{period of signal}}} = \frac{1/\Delta f}{1/f} = f T \\ &= p + q \end{aligned} \quad (4a)$$

그러므로

$$f = m \Delta f = (p + q) \Delta f \quad (4b)$$

와 같이 쓸 수 있다. 여기서  $p$  (스펙트럼에서 최대 peak이 나타나는 이산 주파수의 일련번호, 기지량)는  $m$ 의 정수부,  $q$ (구하고자 하는 주파수 오차, frequency error, 미지량)는  $m$ 의 소수가 된다. 계측기에 의해 sampling된 신호로부터 최대 주파수 신호의 위치  $p$ 를 구할 수 있으므로,  $q$ 를 구하면 누설 오차가 제거된 입력주파수  $f$ 를 알 수 있게 된다.

변수  $m$ 을 대입한후 (3)식을 이산식으로 바꾸고 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transformation,

DFT)하면, 공학 스펙트럼(engineering spectrum) 상의 푸리에 계수  $P_\nu$ 는<sup>(8)</sup>

$$P_\nu = \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} p_k e^{-i2\pi f_k T/n}$$

$$= A_0 \left[ \frac{e^{i\phi_0} [1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}]}{n[1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}]} + \frac{e^{-i\phi_0} [1 - e^{-i2\pi(m+\nu)/n}]}{n[1 - e^{-i2\pi(m+\nu)/n}]} \right]$$

$\nu = 0, 1, 2, \dots, \frac{n}{2} - 1$  (5)

가 되고, 여기서  $\nu$ 는 푸리에 계수의 일련번호이다.

#### 4. 누설오차의 개선

##### 4.1 진폭과 주파수 추정

식(5)로부터 일변수 bisection법을 이용하여  $q$ 를 찾기 위해 다음과 같이 정리 한다.<sup>(8)</sup>

$$F(q) = \left| \frac{\phi V_{p,m} + V_{p,-m}}{\phi V_{p+1,m} + V_{p+1,-m}} \right| - \left| \frac{P_p}{P_{p+1}} \right| \quad (6)$$

여기서

$$V_{\nu,m} = \frac{1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}}{n[1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}]} \quad (7)$$

$$V_{\nu,-m} = \frac{1 - e^{-i2\pi(m+\nu)/n}}{n[1 - e^{-i2\pi(m+\nu)/n}]} \quad (8)$$

$$\phi = e^{i2\phi_0} = -\frac{P_p V_{p-1,m} - P_{p-1} V_{p,m}}{P_p V_{p-1,-m} - P_{p-1} V_{p,-m}} \quad (9)$$

식(6)을 일변수 bisection법을 이용하여  $F(q)=0$ 이 되는  $q$ 를 찾을 수 있다. 이렇게  $q$ 를 구하고 나면, 실제 신호의 주파수  $f_{true}$ , 즉  $f$

$$f = f_{true} = m\Delta f = (p+q)\Delta f \quad (9)$$

로 구할 수 있다. 한편 진폭  $A_0$ 를 식(6)으로부터 구할 경우 위상항이 변수로 추가 되어 정확한 값을 구하기가 어려워진다. 그러므로 이전 연구<sup>(8)</sup>의 직접법을 사용하여 정확도가 좀더 높은 진폭을 구한다.

식(5)에서 괄호 속의 두 번째 항은 첫 번째 항에 비해 절대값이 매우 작아서 무시할 수 있고,  $n \rightarrow \infty$  근사한 후 정리하면

$$\therefore P_\nu = A_0 \left[ e^{i(\phi_0 + \pi(m-\nu))} \cdot \frac{\sin \pi(m-\nu)}{\pi(m-\nu)} \right] \quad (10)$$

진폭  $A_0$ 는 식(10)에서  $\nu = p$ 를 대입하고, 절대값을 취하여 다음 식

$$A_0 = |P_p| \cdot \frac{\pi q}{\sin \pi q} \quad (11)$$

과 같이 구할 수 있다.

#### 4.2 위상의 추정

실제의 음압신호의 경우는 식(2a)와 같이 여러 주파수가 중첩된 신호이다. 주파수 오차와 진폭은 단일 주파수 신호 식(2b)를 이용하여도 아주 좋은 결과를 얻을 수 있지만 위상의 경우는 그렇지 못하다. 그러므로 앞에서 구한 주파수 오차와 진폭을 이용하여 보다 정확한 위상을 구하도록 한다. 먼저 식(10)을  $n$  개의 음압신호에 대해 나타낸다.

$$P_\nu = \sum_{i=1}^n A_i \left[ e^{i(\phi_i + \pi(m_i - \nu))} \cdot \frac{\sin \pi(m_i - \nu)}{\pi(m_i - \nu)} \right] \quad (12)$$

$$, \quad m_i = p_i + q_i \quad , \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

$\nu = p_k$  ( $k$  번째 peak) 일 경우

$$P_{p_k} = \sum_{i=1}^n A_i \frac{\sin \pi(p_i + q_i - p_k)}{\pi(p_i + q_i - p_k)} \left[ e^{i(\phi_i + \pi(p_i + q_i - p_k))} \right] \quad (13)$$

$$, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

식(13)으로부터 실수부를 취하면

$$\text{Re}\{P_{p_k}\} = \sum_{i=1}^n A_i \frac{\sin \pi(p_i + q_i - p_k)}{\pi(p_i + q_i - p_k)} \left[ \cos \{ \phi_i + \pi(p_i + q_i - p_k) \} \right] \quad (14)$$

코사인 법칙을 이용하고,  $p_i - p_k$ 는 정수이므로

$$\text{Re}\{P_{p_k}\} = \sum_{i=1}^n A_i \frac{\sin \pi(p_i + q_i - p_k)}{\pi(p_i + q_i - p_k)} \cos \pi(p_i - p_k) \cos(\phi_i + \pi q_i)$$

$$= A_{ki} C_i \quad (15)$$

여기서,

$$A_{ki} = A_i \frac{\sin \pi(p_i + q_i - p_k)}{\pi(p_i + q_i - p_k)} \cos \pi(p_i - p_k) \quad (16)$$

$$C_i = \cos(\phi_i + \pi q_i) \quad (17)$$

$$, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad , \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

식(15)를 행렬 형태로 나타내면,

$$[A_{ki}][C_i] = [\text{Re}\{P_{p_k}\}] \quad (18)$$

가 되고,  $n$  개의 peak 에 대해 전체를 행렬 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1n} \\ A_{21} & & & \\ \vdots & & \ddots & \\ A_{n1} & & & A_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Re}\{P_1\} \\ \text{Re}\{P_2\} \\ \vdots \\ \text{Re}\{P_n\} \end{bmatrix} \quad (19)$$

여기서  $[A_{ki}]$ 는 식(16)에서 구할 수 있다. 즉  $A_i$ 와  $q_i$ 는 앞 절의 진폭, 주파수 추정 결과로부터

얻을 수 있고,  $p_i, p_k$  는 각각 FFT data 에서 peak 의  $i$  및  $k$  번째 이산 번호이므로 쉽게 구할 수 있다. 또,  $[Re(P_k)]$  항은 FFT data 의  $k$  번째 peak 의 실수부 이다.

그러므로 미지수는  $C_i$  이고 식  $n$  개 미지수  $n$  개 로써 연립하여  $C_i$  를 구할 수 있다. 이렇게  $C_i$  를 구하고 실제 신호의 위상  $\phi$  는 식(17)로 부터

$$\phi_i = \cos^{-1}(C_i) - \pi q_i \quad (20)$$

로 구할 수 있다. 이때 위상은  $\phi_i$  와 함께  $-\phi_i$  도 함께 구해지므로 위상의 참값을 얻기 위해 식(13) 의 허수부를 이용하여 구한 값과 비교하여 결과를 추정한다.

즉, 식(13) 의 허수부는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Im\{P_k\} &= \sum_{i=1}^n A_i \frac{\sin \pi(p_i + q_i - p_k)}{\pi(p_i + q_i - p_k)} [\sin \{\phi_i + \pi(p_i + q_i - p_k)\}] \\ &= \sum_{i=1}^n A_i \frac{\sin \pi(p_i + q_i - p_k)}{\pi(p_i + q_i - p_k)} \cos \pi(p_i - p_k) \sin(\phi_i + \pi q_i) \\ &= A_{ki}'' S_i \end{aligned} \quad (21)$$

여기서,

$$A_{ki}'' = A_i \frac{\sin \pi(p_i + q_i - p_k)}{\pi(p_i + q_i - p_k)} \cos \pi(p_i - p_k) \quad (22)$$

$$S_i = \sin(\phi_i + \pi q_i) \quad (23)$$

$$i=1, 2, 3, \dots, n, \quad k=1, 2, 3, \dots, n$$

식(21)을 행렬 형태로 나타내면

$$[A_{ki}''] [S_i] = [Im\{P_k\}] \quad (24)$$

가 되고,  $n$  개의 peak 에 대해 전체를 행렬로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} A_{11}'' & A_{12}'' & \dots & A_{1n}'' \\ A_{21}'' & & & \\ \vdots & & \ddots & \\ A_{n1}'' & & & A_{nn}'' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Im\{P_1\} \\ Im\{P_2\} \\ \vdots \\ Im\{P_n\} \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서 미지수는  $S_i$  이고  $[A_{ki}'']$  와  $[Im\{P_k\}]$  는 앞서와 같이 구한다. 역시 연립하여  $S_i$  를 구할 수 있고 실제 신호의 위상  $\phi$  는 식(23)으로부터

$$\phi_i = \sin^{-1}(S_i) - \pi q_i \quad (26)$$

로 구할 수 있다.

결국 식(20)과 식(26)으로부터 얻어진 결과를 비교하여 원하는 위상값을 찾을 수 있다.

이런 방법으로 누설오차의 영향을 상당히 제거한 음압신호를 얻을 수 있다. 추정된 진폭, 위상, 주파수를 이용하여 음압신호를 얻고 이로부터 누설오차

가 제거된 인텐시티를 구할 수 있다.

## 5. 수치해석 예

점음원에 대한 음압식은

$$p(r, t) = \sum_{i=1}^n j\rho c \frac{Q_i k_i}{4\pi r_i} e^{j(\omega_i t - k_i r)} \quad (27)$$

하나의 점음원에 대한 인텐시티의 이론식은

$$I(r) = \frac{1}{8} \rho c \left( \frac{Q}{\lambda r} \right)^2 \quad (28)$$

인텐시티는 벡터량이므로

$$\begin{aligned} \vec{I}(r) &= \vec{I}(r_1) + \vec{I}(r_2) + \vec{I}(r_3) + \dots \\ &= \sum_{i=1}^n \vec{I}(r_i) \end{aligned} \quad (29)$$

여기서,

$\rho$ : 음장(Sound Field)의 밀도

$c$ : 음속,  $Q_i$ : Source Strength

$k_i$ : 파수 (=  $\omega/c$ ),  $\lambda_i$ : 파장

$r_i$ : 음원으로부터의 거리

,  $i=1, 2, 3, \dots, n$

Fig.1 은 두개의 simple source의 중첩에 의한 음향 인텐시티 측정결과를 나타낸다. 두 음원으로부터 acoustic center 까지의 거리  $r_1, r_2$ , 인텐시티 프루버 축으로부터 각각  $\theta_1, \theta_2$ 의 각을, Source strength  $Q_1, Q_2$  를 가지는 두 음원으로부터 발생하는 음압 신호의 중첩을 나타내었다.

Table 2.는 Fig 1에서  $\rho=1.21 \text{ kg/m}^3$ ,  $C=343.0 \text{ m/s}$  이고 source 1 으로부터  $Q_1=0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $f_1=251 \text{ Hz}$ 의 신호가, source 2 로부터  $Q_2=0.0002 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $f_2=571 \text{ Hz}$  인 신호가 발생하고, acoustic center 로부터 각각  $r_1=1.0 \text{ m}$ ,  $r_2=1.0 \text{ m}$  이며, 인텐시티 프루버 축과의 각  $\theta_1=0^\circ$ ,  $\theta_2=30^\circ$ 인 경우 데이터 개수  $n=1024$ ,  $\Delta f=2 \text{ Hz}$  로 하여 누설오차가 발생한 data로부터 진폭, 주파수, 위상을 추정된 결과를 보여준다.

Table 2 에서 사용된 exact value 는 식(27)에 의해 구해진 진폭과 위상의 이론치와 실제 입력 주파수 값이고, conventional method 는 기존의 FFT data 로부터 얻어진 값이다. 본 논문에서 제안한 추정법에 의해 구해진 값들은 proposed method 로 나타내었다.

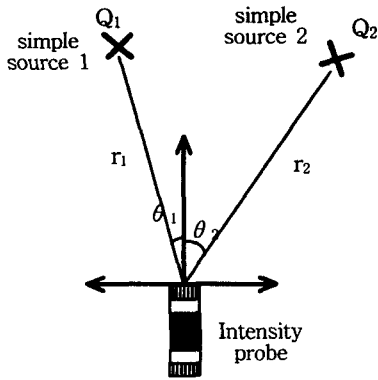


Fig.1 An example of two simple source sound intensity probe direction

Table 2 Pressure estimated in case of Fig 1. ( $\Delta f=2\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.05\text{m}$ , two simple sources)

micphone1	f(Hz)	p( $\times 10^{-2}\text{pa}$ )	phase (°)
exact value	251.00	1.557	-166.8
	571.00	7.001	-136.3
conventional method	250.00	0.998	-76.5
	572.00	4.488	-46.4
proposed method	251.00	1.557	-167.0
	571.00	7.061	-136.3

micphone2	f(Hz)	p( $\times 10^{-2}\text{pa}$ )	phase (°)
exact value	251.00	1.482	-180.0
	571.00	6.762	-162.3
conventional method	250.00	0.937	-90.1
	572.00	4.313	107.7
proposed method	251.00	1.481	-180.4
	571.00	6.762	-162.2

수치해석 예의 결과를 보면 기존의 FFT data는 누설오차가 발생하여 정확한 주파수,진폭,위상과는 차이가 큰 값을 가지지만, 본 논문에서 제안한 방법으로 추정된 음향변수들은 상당한 정확도를 가진다는 것을 알 수 있다.

Table 3.은 Table 2와 같은 조건하에서  $f_1=251\text{Hz}$ ,  $f_2=571\text{Hz}$  인 주파수의 중첩에 대해서 이론식에 의한 인텐시티 값과 누설오차가 발생한 경우의 값, 또 본 논문에서 제안한 방법에 의해 얻어진 음향 변수들을 사용하여 구한 인텐시티 결과를 비교하였다. 누설오차 발생시와 제안한 방법의 인텐시티는 식(1)에 의해 구할수 있고 여기에서  $\Delta f=2\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.05\text{m}$  로 두었다.

Table 3 Intensity estimated in case of Fig 1. ( $\Delta f=2\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.05\text{m}$ , two simple sources)

exact value		conventional method		proposed method	
f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )
251.00	0.278	252.00	0.117	251.00	0.285
571.00	4.980	572.00	1.949	571.00	4.801

Fig.2 는 4개의 Simple Source의 중첩에 의한 음향 인텐시티 측정을 나타낸다. 4 개의 음원으로부터 acoustic center 까지의 거리가 각각  $r_1, r_2, r_3, r_4$ , 인텐시티 프루버 축으로부터 각각  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 의 각을, source strength  $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4$  를 주파수  $f_1, f_2, f_3, f_4$  를 각각 가지는 음압신호의 중첩을 나타내었다.

Table 4. 는 Fig 2 에 대해 앞과 같은 방법으로 인텐시티를 비교하였다. 이때 Source 1로부터  $Q_1=0.0001\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $f_1=1501.5\text{Hz}$ ,  $r_1=1.0\text{m}$ ,  $\theta_1=0^\circ$ , Source 2로부터  $Q_2=0.0002\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $f_2=1603.5\text{Hz}$ ,  $r_2=1.2\text{m}$ ,  $\theta_2=30^\circ$ , Source 3에서  $Q_3=0.0003\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $f_3=1714.5\text{Hz}$ ,  $r_3=1.1\text{m}$ ,  $\theta_3=10^\circ$ , source 4로부터  $Q_4=0.0004\text{ m}^3/\text{s}$ ,  $f_4=1858.5\text{Hz}$ ,  $r_4=1.05\text{m}$ ,  $\theta_4=15^\circ$  로 두어 계산 하였다. 역시 누설오차 발생 시와 제안한 방법의 인텐시티는 식(1)에 의해 구할 수 있고 여기에서  $\Delta f=3\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.006\text{m}$  로 두었다.

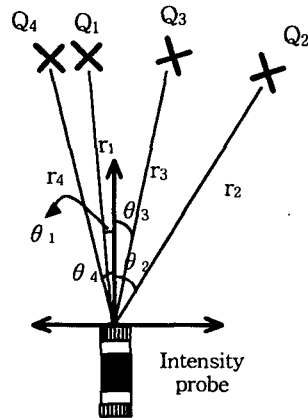


Fig.2 An example of four simple source sound intensity probe direction

## 참고문헌

**Table 4** Intensity estimated in case of Fig 2. ( $\Delta f=3\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.006\text{m}$ , four simple sources)

exact value		conventional method		proposed method	
f(Hz)	I ( $\times 10^{-6} \text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6} \text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6} \text{W/m}^2$ )
1501.5	9.942	1500.0	4.069	1501.5	9.942
1603.5	27.275	1602.0	11.803	1603.5	27.564
1714.5	94.948	1716.0	38.395	1714.5	93.979
1858.5	213.506	1860.0	86.447	1858.5	211.556

이상의 수치해석 예에서 누설오차에 의해 왜곡된 신호는 제안한 방법에 의해 매우 정확한 주파수를 찾을 수 있으며, 누설오차가 제거되지 않은 신호의 인텐시티 값은 이론값과의 오차가 매우 큰 반면, 본 논문에서 제안한 방법에 의해 얻어진 인텐시티 값은 상당한 정확도를 가지고 있음을 알 수 있다.

## 6. 결론

(1) 디지털 푸리에 변환시 누설오차에 의하여 각각의 신호는 크기와 주파수가 왜곡된다. 이에 음향 인텐시티는 각각의 두 신호(누설 오차가 발생한 신호)의 Cross Spectrum를 이용한 값이므로 누설 오차의 영향은 더욱 크다.

(2) 누설오차를 갖는 왜곡된 주파수로부터 본래 신호의 주파수와 진폭, 위상을 예측하여 이로부터 인텐시티를 구하였다.

(3) 제안한 방법에 의해 구해진 인텐시티의 경우 누설오차에 의한 영향이 상당히 제거되었음을 보였다.

(4) 본 연구시 사용된 방법을 개선하여 정도를 더 높이고 실제 음향신호에 적용할 필요가 있다.

- (1) F.J.Fahy, Sound Intensity, 2nd Ed. E & FN Spon, 1995
- (2) L.E.Kinsler, Fundamentals of Acoustics, 3rd Ed. Wiley, 1982
- (3) R.B.Randall, B.Tech, Frequency Analysis, 3rd Ed. B&K, 1987
- (4) Huang Dishan, "Phase Error in Fast Transform Analysis", Mechanical System Signal Processing, 1995,9(2), p.113-118
- (5) John C. Burgess, "On Digital Spectrum Analysis of Periodic Signals", The Journal of the Acoustical Society of America, Vol.58, No.3, September, 1975
- (6) 정의봉, 장진혁, 장다운, 1999, "디지털 푸리에 변환에서 비감쇠 신호의 누설오차 개선에 관한 연구", 대한기계학회 1999년 추계학술대회 논문집A p761-766
- (7) 정의봉, 안세진, 장호엽, 장진혁, 2001 "디지털 푸리에 변환에서 누설오차의 개선", 한국소음진동학회지, vol.11, no 3, 2001년6월 p455-460
- (8) 안세진, 정의봉, 정호경, 2001 "단일 주파수를 갖는 음향 인텐시티의 누설오차 개선" 한국소음진동학회 추계학술대회 논문집II 2001년 p.1156-1161