

# 단일 주파수를 갖는 음향 인텐시티의 누설오차 개선

정의봉\* · 안세진\*\* · °정호경\*\*

## Leakage Error Improvement of the Intensity with a single frequency

Weui Bong Jeong , Se Jin Ahn , 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 date of a harmonic signal with a single frequency is formatted 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. 하지만 푸리에 변환(Fourier Transform, FT)은 시간 데이터가 무한한 시간에 걸쳐 있을 때에만 주파수 영역에서 그 연속성을 유지할 수 있다. 그러나, 일반적으로 계측기에서 사용하고 있는 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)은 일종의 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)으로서, 계측기가 가진 기억용량의 제한으로 인해 실제로는 충분한 시간, 즉 무한

한 시간에 걸쳐 데이터를 받을 수 없기 때문에 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 크로스 스펙트럼 (Cross Spectrum)을 이용하여 계산되므로 정확한 주파수와 값을 측정 하기가 어렵다.

본 논문에서는 단일 음향신호에 대하여 누설오차에 의해 왜곡된 주파수로부터 본래 신호의 정확한 주파수와 진폭을 구하여 보다 정확한 인텐시티를 구하는 방법을 제시하고자 한다.

#### 2. 음향 인텐시티

음향 인텐시티는 단위 면적당의 음압과 입자속도의 곱의 시간 평균된 값이다. 음압은 마이크로폰을 이용하여 쉽게 측정할 수 있지만 입자속도를 측정

---

\* 정회원, 부산대학교 기계공학부

\*\* 부산대학교 대학원 기계설계공학과

하는 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.

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

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 주파수와 크기가 나타나는 현상이다. 이런 누수 현상은 인텐시티의 경우 실제와는 다른 두 신호(누설 오차가 발생한 신호)의 크로스 스펙트럼(Cross spectrum)으로 나타내어지므로 더욱 심각하다고 할 수 있다.

### 3. 음향신호의 디지털 푸리에 변환

음압식들은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

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

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

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

과 같다. 여기서  $A_0$  는 진폭이고,  $f$  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.

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

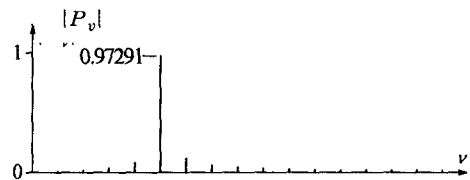
그러므로

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

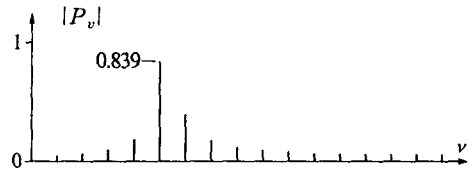
와 같이 쓸 수 있다. 여기서  $p$  (스펙트럼에서 최대 peak이 나타나는 이산 주파수의 일련번호, 기지량)는  $m$ 의 정수부,  $q$ (구하고자 하는 주파수 오차, frequency error, 미지량)는  $m$ 의 소수가 된다. 계측기에 의해 Sampling 된 신호로부터 최대 주파수 신호의 위치  $p$ 를 구할 수 있으므로,  $q$ 를 구하면 누설 오차가 제거된 입력주파수  $f$ 를 알 수 있게 된다. Fig.1에서는  $q$ 에 따른 누설 오차 (Leakage Error)의 변화를 보여준다.

이제  $q$ 를 계산하기 위해서는  $q$ 의 범위에 대해서 먼저 알아두어야 한다. Fig.2에서 보듯이, peak는 실제 주파수와 가장 가까운 주파수에서 나타나게 되므로, 실제 주파수  $f_{true}$ 의 범위는

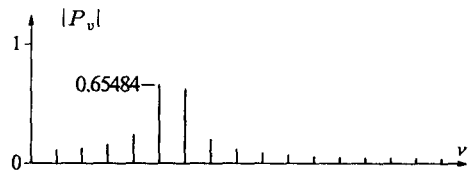
$$f_p - 0.5\Delta f \leq f_{true} \leq f_p + 0.5\Delta f \quad (5)$$



(a)  $q = 0.1$



(b)  $q = 0.3$



(c)  $q = 0.5$

Fig.1 A typical example of spectrum with varying  $q$ , where exact value  $A = |P_v| = 1$

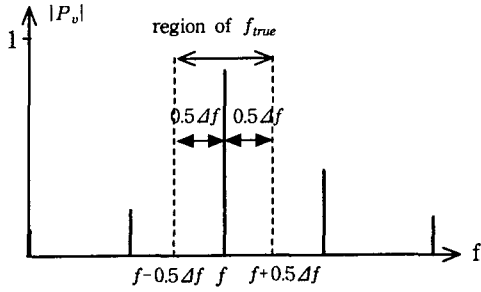


Fig.2 Region of  $f_{true}$  in Spectrum

가 되고,  $f_p = p\Delta f$ ,  $f_{true} = m\Delta f$  그리고 식(4)의 관계로부터 식(5)은 아래와 같음을 알 수 있다.

$$-0.5 \leq q \leq 0.5 \quad (6)$$

(3)식을 이산시간 데이터의 형태로 바꾸기 위해, 시간 데이터의 개수를  $n$  이라 하면, 시간 간격  $\Delta t$  는  $\Delta t = T/n$  이 되므로 이산시간  $t_k$  는

$$t_k = k \Delta t = \frac{kT}{n}, \quad k=0,1,2,\dots,n-1 \quad (7)$$

로부터 실제 주파수는  $f = m/T$  이다. 또 주파수 간격을  $\Delta f$  라 할때,  $\Delta f = 1/T$  로 쓸수 있고, 스펙트럼 상에서 표시되는 주파수는  $f_\nu = \nu \Delta f = \nu/T$ ,  $\nu = 0,1,2,\dots$  이다. 이들을 이용하여 (3)식을 이산식으로 바꾸면,

$$p_k = A_0 (\cos \frac{2\pi mk}{n} + \phi_0), \quad k=0,1,2,\dots,n-1 \quad (8)$$

가 된다. 여기서  $k$ 는 시간 데이터의 일련 번호이고,  $n$ 은 데이터 개수이다. (8)식을 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transformation, DFT)하면, 공학 스펙트럼(engineering spectrum) 상의 푸리에 계수  $P_\nu$  는

$$\begin{aligned} P_\nu &= \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} p_k e^{-i2\pi f_k T/n} \\ &= \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} A_0 \cos(2\pi mk/n + \phi_0) \cdot e^{-i2\pi f_k T/n} \\ &= \frac{2}{n} \sum_{k=0}^{n-1} A_0 \cos(2\pi mk/n + \phi_0) \cdot e^{-i2\pi (\nu/T)kT/n} \\ &= \frac{2A_0}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{e^{i(2\pi mk/n + \phi_0)} + e^{-i(2\pi mk/n + \phi_0)}}{2} \cdot e^{-i2\pi \nu k/n} \\ &= \frac{A_0}{n} \sum_{k=0}^{n-1} [e^{i\phi_0} \cdot e^{i2\pi(m-\nu)k/n} + e^{-i\phi_0} \cdot e^{-i2\pi(m+\nu)k/n}] \\ &= A_0 \left[ \frac{e^{i\phi_0} [1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}]}{n[1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}]} + \frac{e^{-i\phi_0} [1 - e^{-i2\pi(m+\nu)/n}]}{n[1 - e^{-i2\pi(m+\nu)/n}]} \right] \\ &\quad , \nu=0,1,2,\dots,\frac{n}{2}-1 \end{aligned} \quad (9)$$

가 되고, 여기서  $\nu$ 는 푸리에 계수의 일련번호이다.

#### 4. 누설오차의 개선

##### 4.1 직접법에 의한 누설오차 개선

(9)식에서  $e^{i\phi_0}$ 와  $e^{-i\phi_0}$ 는 절대값이 1이므로, 괄호 속에 있는 두 항 각각의 절대값에는 영향을 미치지 않는다. 또한 괄호 속의 두 번째 항은 첫 번째 항에 비해 절대값이 매우 작아서 무시할 수 있다. 따라서, 식 (9)는

$$P_\nu = A_0 \left[ \frac{e^{i\phi_0} [1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}]}{n[1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}]} \right] \quad (10)$$

로 근사시킬 수 있다. 또,  $n \rightarrow \infty$  로 근사하면 분모는

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n[1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}] = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - e^{i2\pi(m-\nu)/n}}{1/n} \quad (11)$$

가 되어, 이는  $\frac{0}{0}$ 의 형태이므로, L'Hôpital의 정리를 이용하면, 분모는 다음과 같다.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{-i2\pi(m-\nu)e^{i2\pi(m-\nu)/n}}{1} = -i2\pi(m-\nu) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \therefore P_\nu &= A_0 \left[ e^{i\phi_0} \cdot \frac{1 - e^{i2\pi(m-\nu)}}{-i2\pi(m-\nu)} \right] \\ &= A_0 \left[ e^{i\phi_0} \cdot \frac{e^{i\pi(m-\nu)} - e^{-i\pi(m-\nu)}}{i2\pi(m-\nu)} \cdot e^{i\pi(m-\nu)} \right] \\ &= A_0 \left[ e^{i[\phi_0 + \pi(m-\nu)]} \cdot \frac{\sin \pi(m-\nu)}{\pi(m-\nu)} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

가 되므로, 푸리에 계수의 절대값은  $\phi_0$ 와는 무관하다. 따라서,  $q$ 는  $|P_p|$ 와  $|P_{p\pm 1}|$ 로부터 구할 수 있다. 즉,

$$R_\pm = \left| \frac{P_p}{P_{p\pm 1}} \right| = \left| \frac{q \pm 1}{q} \right| > 1 \quad (\text{복호등순})$$

①  $P_{p-1} > P_{p+1}$  일 경우 ( $-0.5 \leq q \leq 0$ )

$$q = -\frac{1}{1+R_-} \quad (14)$$

②  $P_{p-1} < P_{p+1}$  이일 경우 ( $0 \leq q \leq 0.5$ )

$$q = \frac{1}{1+R_+} \quad (15)$$

이렇게  $q$ 를 구하고 나면, 실제 신호의 주파수  $f_{true}$ , 즉  $f$ 는

$$f = f_{true} = m\Delta f = (p+q)\Delta f \quad (16)$$

로 구할 수 있다. 한편, 진폭  $A_0$ 는 (13)식에  $\nu = p$ 를 대입하고, 절대값을 취하여

$$A_0 = |P_p| \cdot \frac{\pi q}{\sin \pi q} \quad (17)$$

와 같이 구할 수 있다.  $\Phi_0$ 를 구하기 위해서 (13)식에  $v=p$  를 대입하면  $P_p$ 는

$$P_p = A_0 \left[ e^{i(\Phi_0 + \pi q)} \cdot \frac{\sin \pi q}{\pi q} \right] \quad (18)$$

가 되고,  $P_p$ 의 위상각을  $\angle P_p$ 로 표시하면  $\angle P_p$ 는

$$\angle P_p = \Phi_0 + \pi q \quad (19)$$

이다.  $\angle P_p$ 는 기지량이므로 위식으로부터  $\Phi_0$ 는

$$\Phi_0 = \angle P_p - \pi q \quad (20)$$

로 구할 수 있다.

#### 4.2 반복법에 의한 누설오차 개선

정확식에 의한 반복 계산법으로 미지수를 구하기 위해 (9)식을

$$P_v = A_0 [e^{i\Phi_0} V_{v,m} + e^{-i\Phi_0} V_{v,-m}] \quad (21)$$

로 두면, 여기서  $V_{v,m}$ 와  $V_{v,-m}$ 은

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

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

이다. 미지수  $q$ 와  $\Phi_0$ 를 일변수 bisection법을 이용하여 구하기 위해  $P_p/P_{p\pm 1}$ 에  $e^{i\Phi_0}$ 를 곱하면

$$\frac{P_p}{P_{p-1}} = \frac{e^{2i\Phi_0} V_{p,m} + V_{p,-m}}{e^{2i\Phi_0} V_{p-1,m} + V_{p-1,-m}} \quad (22a)$$

$$\frac{P_p}{P_{p+1}} = \frac{e^{i2\Phi_0} V_{p,m} + V_{p,-m}}{e^{i2\Phi_0} V_{p+1,m} + V_{p+1,-m}} \quad (22b)$$

와 같이 된다.  $e^{i2\Phi_0}$ 를  $\Phi$ 라 하면, (22a)식으로부터  $\Phi$ 는

$$e^{i2\Phi_0} = \Phi = -\frac{P_p V_{p-1,m} - P_{p-1} V_{p,m}}{P_p V_{p-1,-m} - P_{p-1} V_{p,-m}} \quad (23)$$

이 되고, 이를 (22b)식에 대입하여 정리하고,  $q$ 에 관한 함수  $F(q)$ 를

$$F(q) = \left| \frac{\Phi V_{p,m} + V_{p,-m}}{\Phi V_{p+1,m} + V_{p+1,-m}} \right| - \left| \frac{P_p}{P_{p+1}} \right| \quad (24)$$

로 두면, 이 식으로 일변수 bisection법을 이용하여  $F(q)=0$ 이 되는  $q$ 를 찾을 수 있다. 또한, (23)식으로부터

$$\Phi_0 = \frac{1}{2i} \text{Ln} \Phi = \frac{1}{2i} \text{Ln} \left[ -\frac{P_p V_{p-1,m} - P_{p-1} V_{p,m}}{P_p V_{p-1,-m} - P_{p-1} V_{p,-m}} \right] \quad (25)$$

와 같이  $\Phi_0$ 도 구할 수 있다. 주의해야 할 점은 위상  $\Phi_0$ 를  $e^{i2\Phi_0}$ 로부터 구하기 때문에  $\Phi_0$ 의 실제값이  $-\pi \leq \Phi_0 \leq \frac{\pi}{2}$ 나  $\frac{\pi}{2} \leq \Phi_0 \leq \pi$ 의 범위에 있을 때는 실제값이 아닌  $\Phi_0 \pm \pi$ 가 구해지게 된다. 이것은, 이 두 경우에  $2\Phi_0$ 의 동경이 같기 때문에 일어나는 현상으로, 실제의  $\Phi_0$ 를 구하기 위해서는, 두 경우를 모두 고려하여 앞절에서 언급한 직접 계산으로 구한  $\Phi_0$ 에 가까운 값을 실제의  $\Phi_0$ 로 택해야 한다. 이것으로써,  $q$ 와  $\Phi_0$ 가 구해지면, 실제 신호의 주파수  $f_{true}$ , 즉  $f$ 는

$$f = f_{true} = m \Delta f = (p+q) \Delta f \quad (26)$$

로 구할 수 있다. 한편, 진폭  $A_0$ 는 (21)식에  $v=p$ 를 대입하고, 절대값을 취하여

$$A_0 = \left| \frac{P_p}{e^{i\Phi_0} V_{p,m} + e^{-i\Phi_0} V_{p,-m}} \right| \quad (27)$$

와 같이 구할 수 있다.

이상의 반복법을 이용하면 직접법보다 개선된 추정값을 예측할 수 있다.

이로부터 각각의 누설오차가 제거된 음압신호를 얻을 수 있다. 이 신호의 크로스 스펙트럼으로부터 누설오차가 제거된 인텐시티를 구할 수 있다.

### 5. 수치해석 예

#### 5.1 점 음원(Simple Source) 예의 적용

점음원에 대한 음압식은

$$p(r,t) = j\rho c \frac{Qk}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (28)$$

점음원에 대한 인텐시티의 이론식은

$$I(r) = \frac{1}{8} \rho c \left( \frac{Q}{\lambda r} \right)^2 \quad (29)$$

여기서,

$\rho$  : 음장(Sound Field)의 밀도

$c$  : 음속,  $Q$  : Source Strength

$k$  : 파수 (=  $\omega/c$ ),  $\lambda$  : 파장

$r$  : 음원으로부터의 거리

Table 1.은  $\rho=1.21 \text{ kg/m}^2$  ( 20 °C 공기 기준),  $C=343.0 \text{ m/s}$  ( 20 °C 공기 기준),  $Q=0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $r=0.05 \text{ m}$ , 데이터 개수  $n=1024$  개로 하고  $\Delta f = 2 \text{ Hz}$  로하여 251 Hz 근처에 있는 몇개의 주파수에 대해서 이론식에 의한 인텐시티 값과 누설오차가 발생한 경우의 값, 또 정확식을 이용하여 일변수 Bisection 법으로 반복 계산하여 구한 결과를 비교 하였다. 누설오차 발생시와 제안한 방법의 인텐시티는 식(1)에 의해 구할수 있고 여기에서  $\Delta r=0.05 \text{ m}$  로 두었다.

Table 2 는  $\Delta f = 3 \text{ Hz}$ , 데이터 개수  $n=2048$  개로하여 (나머지 변수들은 Table 1 과 같은 값) 2000 Hz 근처에 있는 몇개의 주파수에 대해 여기에서는  $\Delta r=0.006 \text{ m}$ 로 하여 실시하였다.

이상의 점 음원의 수치해석 예에서 누설오차가 발생한 경우의 인텐시티값은 큰 오차를 가지며 제안한 방법의 경우 매우 근접한 해를 구할수 있다는 것을 알 수 있다.

**Table 1** Intensity estimated from the leakage error. ( $\Delta f=2\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.05\text{m}$ , simple source)

exact value		conventional value		proposal value	
f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )
250.50	1.107	250.00	0.892	250.50	1.100
250.75	1.109	250.00	0.678	250.75	1.102
251.00	1.111	252.00	0.448	251.00	1.104
251.25	1.113	252.00	0.680	251.25	1.106
251.50	1.116	252.00	0.899	251.50	1.109

**Table 2** Intensity estimated from the leakage error. ( $\Delta f=3\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.006\text{m}$ , simple source)

exact value		conventional value		proposal value	
f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )
1998.5	70.448	1998.0	63.728	1998.5	69.886
1999.0	70.483	1998.0	47.820	1999.0	69.920
1999.5	70.519	1998.0	28.352	1999.5	69.955
2000.0	70.554	2001.0	47.867	2000.0	69.990
2000.5	70.589	2001.5	63.855	2000.5	70.024

## 5.2 맥동하는 구(Pulsating Sphere)에의 적용

맥동하는 구에 대한 음압식은

$$p(r,t) = \rho c U_0 \frac{a}{r} \cos \theta_a e^{j(\omega t - k(r-a) + \theta_a)} \quad (30)$$

인텐시티 이론식은 다음과 같다.

$$I = \frac{1}{2} \rho c U_0^2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 \cos^2 \theta_a \quad (31)$$

여기서,

$\rho$  : 음장(Sound Field)의 밀도

$c$  : 음속,  $a$  : 평균반경,  $\theta_a = ka$

$U_0$  : 맥동 속도,  $k$  : 파수 ( $= \omega/c$ )

$r$  : 구의 중심으로부터의 거리

Table 3은  $\rho=1.21 \text{ kg/m}^2$  ( 20 °C 공기 기준),  $C=343.0 \text{ m/s}$  (20 °C 공기 기준),  $a = 0.1 \text{ m}$ ,  $U_0 = 0.01 \text{ m/s}$ ,  $r=1.0 \text{ m}$ , 데이터 개수  $n=1024$  개로 하고 301 Hz 근처에 있는 몇개의 주파수에 대해서  $\Delta f=2 \text{ Hz}$ ,  $\Delta r=0.05 \text{ m}$  하여 실시하였다.

Table 4는 Table 3 과 같은 조건에서 1000 Hz 근처에 있는 몇개의 주파수에 대해서  $\Delta f=3 \text{ Hz}$ ,  $\Delta r = 0.006 \text{ m}$  로 하여 실시하였다.

**Table 3** Intensity estimated from the leakage error. ( $\Delta f=2\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.05\text{m}$ , pulsating sphere)

exact value		conventional value		proposal value	
f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )
300.50	150.735	300.00	120.720	300.50	148.931
300.75	150.651	300.00	91.539	300.75	148.846
301.00	150.566	302.00	60.289	301.00	148.759
301.25	150.481	302.00	91.432	301.25	148.672
301.50	150.396	302.00	120.438	301.50	148.585

**Table 4** Intensity estimated from the leakage error. ( $\Delta f=3\text{Hz}$ ,  $\Delta r=0.006\text{m}$ , pulsating sphere)

exact value		conventional value		proposal value	
f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )	f(Hz)	I ( $\times 10^{-6}\text{W/m}^2$ )
999.5	13.727	999.0	12.493	999.5	13.700
1000.0	13.822	999.0	9.434	1000.0	13.794
1000.5	13.917	999.0	5.629	1000.5	13.889
1001.0	14.012	1002.0	9.564	1001.0	13.984
1001.5	14.108	1002.0	12.839	1001.5	14.079

**Table 5** Intensity estimated by the proposed method with varying  $\Delta r$

exact Intensity value= $0.276 \times 10^{-6} \text{ w/m}^2$ , $f=125 \text{ Hz}$			
$\Delta r \text{ m}$	0.05	0.012	0.006
Intensity( $\times 10^{-6} \text{ w/m}^2$ )	0.2758	0.2755	0.2756
Error Ratio(%)	0.032	0.002	0.000

exact Intensity value= $1.102 \times 10^{-6} \text{ w/m}^2$ , $f=250 \text{ Hz}$			
$\Delta r(\text{m})$	0.05	0.012	0.006
Intensity( $\times 10^{-6} \text{ w/m}^2$ )	1.0955	1.1020	1.1023
Error Ratio(%)	0.623	0.036	0.009

exact Intensity value= $27.601 \times 10^{-6} \text{ w/m}^2$ , $f=1250 \text{ Hz}$			
$\Delta r(\text{m})$	0.05	0.012	0.006
Intensity( $\times 10^{-6} \text{ w/m}^2$ )	21.9767	27.2186	27.4745
Error Ratio(%)	20.259	1.239	0.311

exact Intensity value= $440.962 \times 10^{-6} \text{ w/m}^2$ , $f=5000 \text{ Hz}$			
$\Delta r(\text{m})$	0.05	0.012	0.006
Intensity( $\times 10^{-6} \text{ w/m}^2$ )	95.6800	357.4426	419.1145
Error Ratio(%)	121.698	18.940	4.954

이상 맥동하는 구의 수치해석 예도 점음원과 같은 결과를 보여준다.

이상의 수치해석 예에서 누설오차에 의해 왜곡된 신호는 제안한 방법에 의해 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.

또한 주파수가 높아 질수록 인텐시티의 오차율이 일정하게 증가함을 볼 수 있다. 이는 두 마이크 로폰사이의 거리에 의한 것으로서  $\Delta r$ 을 조절하여 적절한 인텐시티 값을 구하여야 한다.

Table 5는 몇가지 주파수에서 제안한 방법에 의해 구해진 두 인텐시티를  $\Delta r$ 에 대해 비교하고 있다. 여기서 변수들의 값은 Table 1과 같다.

## 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 고유 주파수와 진폭을 예측하여 이로부터 인텐시티를 구하였다.

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

(4) 제안한 방법에서의  $\Delta r$ 의 변화에 의한 인텐시티 오차의 정도를 보였다.

(5) 본 연구를 여러 주파수를 갖는 음향 신호에 대해서 확장할 필요가 있다.

## 참고문헌

- (1) F.J.Fahy, "Sound Intensity", Second Edition p.90-142
- (2) Lawrence E.Kinsler, Austin R.Frey, Alan B.Coppens, James V.Sanders, "Fundamentals of Acoustics" Third Edition p.163-169
- (3) R.B.Randall, B.Tech, "Frequency Analysis" Third Edition p.16-31, p.227-230
- (4) Huang Dishan, "Phase Error in Fast fourier Transform Analysis", Mechanical System and 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, 장호협, 장진혁, 2001 "디지털 푸리에 변환에서 누설오차의 개선", 한국소음진동학회지, vol.11, no 3, 2001년6월 p455-460