

음향 인텐시티의 누설오차 개선에 관한 기초적 연구

A Basic Study on the Improvement of Leakage Error of the Acoustic Intensity

정의봉*, 정호경**, 안세진*, 윤상돈***
(Weui-Bong Jeong*, Ho-Kyoung Jeong**, Se-Jin Ahn*, Sang-Don Yoon***)

*부산대학교 기계공학부, **한국항공우주연구원, ***LG전자

(접수일자: 2002년 7월 5일; 수정일자: 2003년 4월 18일; 채택일자: 2003년 6월 9일)

음향 인텐시티는 근접한 두 개의 마이크로폰으로부터 얻어지는 음압의 크로스 스펙트럼으로부터 얻어진다. 크로스 스펙트럼은 이산 푸리에 변환에 의해 얻어지는데 이는 기록시간과 신호의 주기가 일반적으로 일치하지 않기 때문에 누설오차의 발생을 피할 수 없다. 그러므로 기존의 FFT 해석기로부터 얻어지는 음향 인텐시티는 왜곡된 값을 보여준다. 본 논문에서는 단일주파수를 가지는 조화 신호에 누설오차가 발생한 경우 푸리에 변환된 데이터를 규정한다. 또한 왜곡된 데이터로부터 누설오차의 영향을 제거하는 방법을 제안한다. 제안한 방법의 타당성을 보이기 위해 몇 가지 수치해석 예를 보인다.

핵심용어: 음향 인텐시티, 이산 푸리에 변환, 누설오차, 기록시간, 크로스 스펙트럼

부고분야: 음향 신호처리 분야 (1,2)

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 with a single frequency 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.

Keywords: Sound intensity, Digital fourier transform, Leakage error, Record length, Cross spectrum

ASK subject classification: Acoustic signal processing (1,2)

I. 서론

오늘날 음향 인텐시티 측정 방법으로써 보편적으로 사용되는 것은 2개의 근접한 마이크로폰 신호의 크로스 스펙트럼 (Cross Spectrum)의 허수 부분으로부터 그 값을 계산하는 방법 (FFT Method)이다. 이 때 발생할 수 있는 오차에는 인접한 두 개의 마이크로폰의 위상 불일치에 의하여 측정 가능한 하한 주파수가 결정되어지며, 입사 음도를 두 음압의 유한 차분에 의해서 근사 계산하기 때문에 생기는 오차로 인하여 상한 주파수가 결정되어진다. 더구나 이와 같은 해석 가능한 범위 내에 있는 주파수 신호라 하더라도 푸리에 변환시의 누설오차도 음향 인텐

시티의 오차의 요인이 된다. 누설오차를 저감시키기 위해서 일반적으로 신호에 적합한 창함수 (Window function)가 이용되고 있지만 근본적인 대책이 되지 못하고 있다. 푸리에 변환 (FT: Fourier Transform)은 시간 데이터가 무한한 시간에 걸쳐 있을 때에만 주파수 영역에서 그 연속성을 유지할 수 있다. 그러나 일반적으로 계측기에서 사용하고 있는 고속 푸리에 변환 (FFT: Fast Fourier Transform)은 일종의 이산 푸리에 변환 (DFT: Discrete Fourier Transform)으로서, 계측기가 가진 기억용량의 제한으로 인해 실제로는 충분한 시간, 즉 무한한 시간에 걸쳐 데이터를 받을 수 없기 때문에 주파수 영역의 데이터는 이산적인 성질을 가지게 된다. 이와 같은 현상은 반드시 누설오차 (leakage error)를 동반하게 되므로, 측정시의 음향 인텐시티는 왜곡된 두 신호의 크로스 스펙트럼을 이용하여 계산되므로 정확한 주파수와 값을 측정하

초임저자: 정의봉 (wbjeong@pusan.ac.kr)
619-735 부산광역시 금정구 장전동 산 30번지
부산대학교 기계공학부
(전화: 051-510-2337; 팩스: 051-517-3805)

기가 어렵다. 지금까지 단위 충격 응답함수에 대해서는 누설오차를 개선하기 위한 연구[1-3]가 일부 진행되었지만 음향 인텐시티에 적용한 예는 없다.

음향 인텐시티는 여러 주파수의 신호가 중첩된 복합적인 신호가 일반적이다. 그러나 본 논문에서는 음향 인텐시티의 누설오차 개선에 대한 기초적인 연구로서 하나의 단일 주파수를 갖는 음향신호에 대하여, 누설오차에 의해 왜곡된 주파수로부터 본래 신호의 정확한 주파수와 진폭을 구하여 보다 정확한 인텐시티를 구하는 방법을 제시하고자 한다.

II. 음향 인텐시티

음향 인텐시티는 음압과 입자속도의 곱으로 나타낼 수 있다. 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 FFT 분석기를 이용하여 2개의 음압신호의 크로스 스펙트럼의 허수 부분에 인텐시티를 연관시키는 것이다. 즉 다음 식으로 인텐시티를 구할 수 있다[4].

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

여기서,

- S_{AB} : $A^* \cdot B$: 크로스 스펙트럼
- A : 마이크로폰 1의 음압신호 스펙트럼
- B : 마이크로폰 2의 음압신호 스펙트럼
- Δr : 두 마이크로폰 사이의 거리
- ω : 주파수 (rad/sec), ρ : 음장의 밀도

누설오차는 실제신호를 이산화하는 과정에서 기록시간 T 가 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.

III. 음향신호의 이산 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 ϕ_0 라 두면 음압은 다음 식

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

과 같다. 여기서 A_0 는 진폭이고, f 는 입력 주파수 이다. 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

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

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

이제 q 를 계산하기 위해서는 q 의 범위에 대해서 먼저 알아두어야 한다. 그림 1에서 보듯이 피크값은 실제 주파수와 가장 가까운 주파수에서 나타나게 되므로 실제 주파수 f_{true} 의 범위는

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

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

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

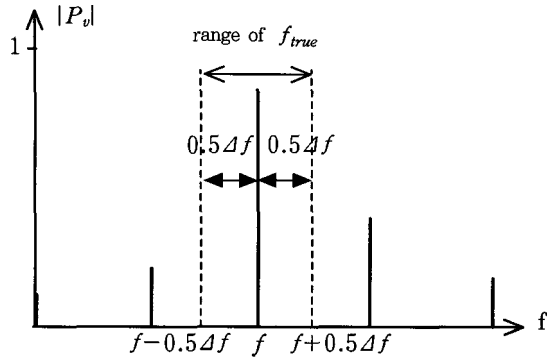


그림 1. 스펙트럼상에서 f_{true} 의 영역
Fig. 1. Region of f_{true} in spectrum.

식 (3)을 이산시간 데이터의 형태로 바꾸기 위해 시간 데이터의 개수를 n 이라 하면, 시간 간격 Δt 는 $\Delta t = T/n$ 가 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 $f = m/T$ 이고, 또 주파수 간격을 Δf 라 할 때 $\Delta f = 1/T$ 로 쓸 수 있고, 스펙트럼 상에서 표시되는 주파수는 $f_\nu = \nu \Delta f = \nu/T$, $\nu = 0, 1, 2, \dots$ 이다. 이들을 이용하여 식 (3)을 이산식으로 바꾸면,

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

가 된다. 여기서 k 는 시간 데이터의 일련 번호이고, n 은 데이터 개수이다. 식 (8)을 이산 푸리에 변환 (DFT: discrete Fourier transformation)하면, 공학 스펙트럼 (engineering spectrum) 상의 푸리에 계수 P_ν 는

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

가 되고, 여기서 ν 는 푸리에 계수의 일련번호이다.

IV. 누설오차의 개선

식 (9)를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$P_\nu = A_0 [e^{i\phi_0} V_{\nu, m} + e^{-i\phi_0} V_{\nu, -m}] \quad (10)$$

여기서 $V_{\nu, m}$ 와 $V_{\nu, -m}$ 은

$$\begin{aligned} V_{\nu, m} &= \frac{1 - e^{-2\pi(m-\nu)/n}}{n[1 - e^{-2\pi(m-\nu)/n}]} \\ V_{\nu, -m} &= \frac{1 - e^{-2\pi(m+\nu)/n}}{n[1 - e^{-2\pi(m+\nu)/n}]} \end{aligned}$$

이다. 미지수 q 와 ϕ_0 를 bisection법[5]을 이용해서 구하기 위해 P_p/P_{p+1} 에 $e^{i\phi_0}$ 를 곱하면

$$\frac{P_p}{P_{p-1}} = \frac{e^{2i\phi_0} V_{p, m} + V_{p, -m}}{e^{2i\phi_0} V_{p-1, m} + V_{p-1, -m}} \quad (11a)$$

$$\frac{P_p}{P_{p+1}} = \frac{e^{2i\phi_0} V_{p, m} + V_{p, -m}}{e^{2i\phi_0} V_{p+1, m} + V_{p+1, -m}} \quad (11b)$$

와 같이 된다. $e^{2i\phi_0}$ 를 Φ 라 하면, 식 (11a)로부터 Φ 는

$$e^{2i\phi_0} = \Phi = -\frac{P_p V_{p-1, -m} - P_{p-1} V_{p, -m}}{P_p V_{p-1, m} - P_{p-1} V_{p, m}} \quad (12)$$

이 되고, 이를 식 (11b)에 대입하여 정리하고, q 에 관한 함수 $F(q)$ 를

$$F(q) = \left| \frac{\Phi V_{p, m} + V_{p, -m}}{\Phi V_{p+1, m} + V_{p+1, -m}} \right| - \left| \frac{P_p}{P_{p+1}} \right| \quad (13)$$

로 두면, 이 식으로 bisection법을 이용, $F(q) = 0$ 이 되는 q 를 찾을 수 있다. 또한 식 (12)로부터

$$\phi_0 = \frac{1}{2i} \text{Ln } \Phi = \frac{1}{2i} \text{Ln} \left[-\frac{P_p V_{p-1, -m} - P_{p-1} V_{p, -m}}{P_p V_{p-1, m} - P_{p-1} V_{p, m}} \right] \quad (14)$$

와 같이 ϕ_0 도 구할 수 있다. 주의해야 할 점은 위상 ϕ_0 를 $e^{2i\phi_0}$ 로부터 구하기 때문에 ϕ_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 현상이다. 실제의 ϕ_0 를 구하기 위해서는 뒤에서 언급하는 식 (22)에서 구한 ϕ_0 에 가까운 값을 실제의 ϕ_0 로 택해야 한다. 이것으로써 q 와 ϕ_0 가 구해지면, 실제 신호의 주파수 f_{true} , 즉 f 는

$$f = f_{true} = m\Delta f = (p+q)\Delta f \quad (15)$$

로 구할 수 있다. 한편 진폭 A_0 는 식 (10)에 $\nu = p$ 를 대

입하고 절대값을 취하여

$$A_0 = \left| \frac{P_p}{e^{i\phi_0} V_{p,m} + e^{-i\phi_0} V_{p,-m}} \right| \quad (16)$$

와 같이 구할 수 있다.

한편 bisection법의 수렴을 용이하게 하기 위해 미지수의 초기치를 다음과 같이 구할 필요가 있다.

식 (9)에서 $e^{i\phi_0}$ 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

$$P_\nu = A_0 \left[\frac{e^{i\phi_0} [1 - e^{2\pi(m-\nu)/n}]}{n [1 - e^{2\pi(m-\nu)/n}]} \right] \quad (17)$$

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

$$\lim_{n \rightarrow \infty} n [1 - e^{2\pi(m-\nu)/n}] = -i2\pi(m-\nu) \quad (18)$$

이므로 식 (17)은

$$\therefore P_\nu = A_0 \left[e^{i[\phi_0 + \pi(m-\nu)]} \cdot \frac{\sin \pi(m-\nu)}{\pi(m-\nu)} \right] \quad (19)$$

가 되므로 푸리에 계수의 절대값은 ϕ_0 와는 무관하다. 따라서 q 의 초기치는 $|P_p|$ 와 $|P_{p\pm 1}|$ 로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q = \begin{cases} -\frac{1}{1+R_-} & P_{p-1} > P_{p+1} \\ \frac{1}{1+R_+} & P_{p-1} < P_{p+1} \end{cases} \quad (20)$$

단,

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

한편, 식 (19)에 $\nu = p$ 를 대입하면 P_p 는

$$P_p = A_0 \left[e^{i[\phi_0 + \pi q]} \cdot \frac{\sin \pi q}{\pi q} \right] \quad (21)$$

가 되고, P_p 의 위상각을 $\angle P_p$ 로 표시하면 ϕ_0 는

$$\phi_0 = \angle P_p - \pi q \quad (22)$$

로 구할 수 있다.

이상의 제안한 방법에 의해 누설오차가 발생한 스펙트

럼 데이터로부터 누설오차가 제거된 음압신호를 얻을 수 있다. 이 얻어진 신호의 크로스 스펙트럼으로부터 누설 오차가 제거된 인텐시티를 구할 수 있다.

V. 수치해석 예

5.1. 점 음원 (Simple Source)에의 적용

점음원에 대한 음압식은[6]

$$p(r, t) = j\rho c \frac{Qk}{4\pi r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (23)$$

이고, 점음원에 대한 인텐시티의 이론식은

$$I(r) = \frac{1}{8} \rho c \left(\frac{Q}{\lambda r} \right)^2 \quad (24)$$

이다. 여기서,

ρ : 음장 (Sound Field)의 밀도

c : 음속, Q : 음원세기 (Source Strength)

k : 파수 (= ω/c), λ : 파장

r : 음원으로부터의 거리

표 1은 $\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$, $C = 343.0 \text{ m/s}$, $Q = 0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$, $r = 0.5 \text{ m}$, 데이터 개수 $n = 1024$ 개로 하고, $\Delta f = 2 \text{ Hz}$, $\Delta r = 0.05 \text{ m}$ 로 하여 251 Hz 근처에 있는 누설오차가 발생하는 몇 개의 주파수를 대상으로, 각각의 단일 주파수를 가지는 음향 신호에 대한 수치 해석 예를 보여준다. 표 1에 사용된 참값 (exact value)은 식 (23)에 의해서 얻어진 음압의 이론값이다. 기존 방법 (conventional method)은 기존의 측정방법인 누설오차가 발생한 FFT 데이터를 사용하여 얻어진 값이다. 제안 방법 (proposed method)은 본 논문에서 제안한 추정법에 의해 얻어진 누설오차가 제거된 결과이다. 수치해석 예로부터 누설오차가 크게 발생하는 251 Hz 주파수를 가지는 신호의 경우 기존의 방법에 의한 음압은 실제 이론 음압과는 아주 큰 오차를 가진다. 누설오차가 덜 발생하는 250.50 Hz, 251.50 Hz 또한 정도의 차는 있지만 이론해와는 큰 차이를 가짐을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 추정법에 의해 누설오차를 제거할 경우 상당한 정확도를 가진 음압 값을 얻을 수 있다. 표 2는 표 1의 결과를 이용하여 구한 인텐시티 값들을 비교하였다. 표 2에 사용된 참값은 식 (24)에 의해서 얻어진 인텐시티의 이론값이다. 기존 방법은 기존의 인텐시티 측정방법인 누설오차가 발생한

표 1. 누설오차가 발생한 데이터로부터 음압 평가 ($\Delta f = 2$ Hz, $\Delta r = 0.05$ m, 점음원)Table 1. Pressure estimated from the data with leakage error ($\Delta f = 2$ Hz, $\Delta r = 0.05$ m, simple source).

Microphone 1					
exact value		conventional method		proposed method	
f(Hz)	$P(\times 10^{-2} Pa)$	f(Hz)	$P(\times 10^{-2} Pa)$	f(Hz)	$P(\times 10^{-2} Pa)$
250.00	3.184	250.00	3.184	250.00	3.184
250.50	3.191	250.00	2.875	250.50	3.191
251.00	3.197	252.00	2.038	251.00	3.197
251.50	3.203	252.00	2.886	251.50	3.203
252.00	3.210	252.00	3.210	252.00	3.210

Microphone 2					
exact value		conventional method		proposed method	
f(Hz)	$P(\times 10^{-2} Pa)$	f(Hz)	$P(\times 10^{-2} Pa)$	f(Hz)	$P(\times 10^{-2} Pa)$
250.00	2.881	250.00	2.881	250.00	2.881
250.50	2.887	250.00	2.601	250.50	2.887
251.00	2.892	252.00	1.884	251.00	2.892
251.50	2.898	252.00	2.661	251.50	2.898
252.00	2.904	252.00	2.904	252.00	2.904

표 2. 누설오차가 발생한 데이터로부터 인텐시티 평가 ($\Delta f = 2$ Hz, $\Delta r = 0.05$ m, 점음원)Table 2. Intensity estimated from the data with leakage error ($\Delta f = 2$ Hz, $\Delta r = 0.05$ m, simple source).

exact value		conventional method		proposed method	
f(Hz)	$I(\times 10^{-6} W/m^2)$	f(Hz)	$I(\times 10^{-6} W/m^2)$	f(Hz)	$I(\times 10^{-6} W/m^2)$
250.00	1.102	250.00	1.096	250.00	1.097
250.50	1.107	250.00	0.894	250.50	1.100
251.00	1.111	252.00	0.446	251.00	1.104
251.50	1.116	252.00	0.897	251.25	1.109
252.00	1.120	252.00	1.113	252.00	1.114

표 3. 누설오차가 발생한 데이터로부터 인텐시티 평가 ($\Delta f = 2$ Hz, $\Delta r = 0.05$ m, 맥동하는 구)Table 3. Intensity estimated from the data with leakage error ($\Delta f = 2$ Hz, $\Delta r = 0.05$ m, pulsating sphere).

exact value		conventional method		proposed method	
f(Hz)	$I(\times 10^{-6} W/m^2)$	f(Hz)	$I(\times 10^{-6} W/m^2)$	f(Hz)	$I(\times 10^{-6} W/m^2)$
300.00	150.735	300.00	120.921	300.50	148.931
300.50	150.735	300.00	120.921	300.50	148.931
301.00	150.566	302.00	60.089	301.00	148.759
301.50	150.396	302.00	120.249	301.25	148.585
301.50	150.396	302.00	120.249	301.50	148.585

IFT 데이터를 사용하여 식 (1)로부터 얻어진 값이다. 제안 방법은 본 논문에서 제안한 추정법에 의해 얻어진 누설오차가 제거된 신호의 크로스 스펙트럼을 사용하여 구한 결과이다. 누설오차가 크게 발생하는 251 Hz 주파수를 가지는 신호의 경우 기존의 방법에 의한 인텐시티 평가는 실제 이론해와는 아주 큰 오차를 가진다. 특히 인텐시티는 음압의 크로스 스펙트럼을 사용하므로 표 1의 음압의 경우보다 더욱 심각한 누설 오차를 수반한다는 것을 알

수 있다. 누설오차가 덜 발생하는 250.50 Hz, 251.50 Hz에서의 인텐시티 값 역시 음압의 경우보다 큰 누수현상을 보인다. 하지만 본 논문에서 제안한 방법에 의한 인텐시티 값은 어떤 경우라도 이론해와 아주 근접한 값을 얻을 수 있다.

5.2. 맥동하는 구 (Pulsating Sphere)에의 적용

맥동하는 구에 대한 음압식은[6]

$$p(r, t) = \rho c U_0 \frac{a}{r} \cos \theta_a e^{j(\omega t - k(r-a) + \theta_a)} \quad (25)$$

이고, 인텐시티 이론식은 다음과 같다.

$$I = \frac{1}{2} \rho c U_0^2 \left(\frac{a}{r}\right)^2 \cos^2 \theta_a \quad (26)$$

이다. 여기서,

- ρ : 음장 (Sound Field)의 밀도
- c : 음속, a : 평균반경, $\theta_a = ka$
- U_0 : 맥동 속도, k : 파수 (= ω/c)
- r : 구의 중심으로부터의 거리

표 3은 $\rho = 1.21 \text{ kg/m}^3$, $C = 343.0 \text{ m/s}$, $a = 0.1 \text{ m}$, $U_0 = 0.01 \text{ m/s}$, $r = 1.0 \text{ m}$, 데이터 개수 $n = 1024$ 개로 하고 301 Hz 근처에 있는 몇 개의 주파수에 대해서 $\Delta f = 2 \text{ Hz}$, $\Delta r = 0.05 \text{ m}$ 하여 실시하였다. 표 3에서 알 수 있듯이 맥동하는 구의 수치해석 결과도 점음원과 마찬가지로 기존의 FFT 방법으로는 정확한 인텐시티를 추정할 수 없으며, 특히 누설오차가 가장 크게 발생하는 301 Hz 에서는 아주 큰 오차를 가짐을 알 수 있다. 그러나 제안하는 방법은 모든 주파수 신호에 대하여 인텐시티를 정확히 추정할 수 있다.

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.

VI. 결론

- (1) 음향 인텐시티 측정을 위하여 사용되는 두 점의 음압 신호를 디지털 푸리에 변환시 누설오차에 의하여 각각의 음압신호는 크기와 주파수가 왜곡되었다. 그리고 두 음압신호의 크로스 스펙트럼으로 계산되는 음향 인텐시티는 음압신호보다 누설오차에 의한 왜곡이 더욱 증폭되었다.
- (2) 누설오차를 갖는 왜곡된 신호로부터 본래 신호의 주파수와 진폭을 예측하여 정확한 인텐시티를 추정할 수 있는 방법을 단일 주파수를 갖는 순음인 경우에 대하여 제시하였다.
- (3) 제안한 방법에 의해 구해진 인텐시티의 경우 누설오차에 의한 영향이 제거되었음을 보였다.

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

참고 문헌

1. J. C. Burgess, "On digital spectrum analysis of periodic signals," *The Journal of the Acoustical Society of America*, 58 (3), 556-567, September, 1975.
2. H. Dishan, "Phase error in fast fourier transform analysis," *Mechanical System and Signal Processing*, 9 (2), 113-118, 1995.
3. 정의봉, 안세진, 장호형, 장진혁, "디지털 푸리에 변환에서 누설 오차의 개선" *한국소음진동학회지*, 11 (3), 455-460, June 2001.
4. F. J. Fahy, "Sound Intensity," 2nd Ed., E&FN Spon, 1995.
5. 홍준표, "컴퓨터 수치해석", 문운당, 1994.
6. L. E. Kinster, *Fundamentals of Acoustics*, 3rd Ed. Wiley, 1982.

저자 약력

• 정 의 봉 (Weui-Bong Jeong)



1978년 2월: 서울대학교 졸업 (공학사)
 1980년 2월: KAIST 졸업 (공학석사)
 1990년 3월: 동경공업대학 졸업 (공학박사)
 현재: 부산대학교 기계공학부 교수

• 정 호 경 (Ho-Kyoung Jeong)



2003년 2월: 부산대학교 졸업 (공학사, 공학석사)
 현재: 한국항공우주연구원 우주발사체기술실

• 안 세 진 (Se-Jin Ahn)



1996년 2월: 부산대학교 졸업 (공학사, 공학석사)
 1998년 3월~1999년 8월: 삼성전자동자 중앙연구소 근무
 1999년 9월~2003년 2월: 부산대학교 졸업 (공학박사)
 현재: 부산대학교 기계기술연구소

• 윤 상 돈 (Sang-Don Yoon)



2003년 2월: 부산대학교 졸업 (공학사, 공학석사)
 현재: LG전자 방장고연구소