

단계적 측정법에 의한 시간 영역 음향 홀로그래피 Time Domain Acoustic Holography by Step-by-step Measurement

윤 호 성* · 남 경 옥** · 김 양 한***

Ho-Sung Yoon, Kyoung-Uk Nam and Yang-Hann Kim

Key Words : Time Domain Acoustic Holography(시간 영역 음향 홀로그래피), Step-by-Step Measurement(단계적 측정법)

ABSTRACT

When we carry out acoustic holography, step-by-step measurement provides us larger aperture size with same number of microphones. But when we carry out step-by-step measurement, it is known that sound signal must be stationary. However, when transfer function between input and output signal is time-invariant, we can apply step-by-step measurement to acoustic holography even if sound signal is transient. We have to do only some processing on signals from step-by-step measurements to make the signal data of each step compatible with other steps. This paper accounts for that processing method.

1. 서 론

음향 홀로그래피처럼 다수의 측정점을 갖는 경우에 기준 신호를 이용하여 각 측정점의 신호를 단계적으로 측정하는 방법⁽¹⁾ 혹은 보다 진보된 방법으로서 측정면을 스캔하는 방법^{(2),(3)}이 많이 사용되어져 왔다. 이는 홀로그램면의 모든 점에서의 음압을 동시에 측정할 수 있는 장비는 매우 고가이기 때문이다.

이러한 단계적 측정 방법은 신호가 정상(stationary)인 경우에만 적용할 수 있고, 과도적(transient)인 경우에는 적용이 제한적이다. 과도적인 경우에 음향 홀로그래피를 수행하기 위해서는 결국 모든 점에서의 음압을 동시에 측정해야 하는 것으로 이해되어져 왔다⁽⁴⁾. 그러나 이는 단계적 측정방법의 가장 기본적인 가정을 잘못 이해한데서 발생한 오류이다. 단계적 측정 방법의 가장 기본적인 가정은 신호가 정상이어야 한다는 가정이 아니라 입력과 출력 사이의 전달함수가 시불변(time-invariant)이라는 것이다. 따라서 신호가 과도적이라도 전달 함수가 시불변이라면, 단계적 측정법은 적용 가능하다.

예를 들어 성덕대왕신종 실험⁽⁵⁾의 경우를 살펴보자. 첫 번째 타종 시에 x_1 이라는 위치에 마이크로폰을 두고 측정하였다고 하자. 두 번째 타종 시에는 x_2 라는 위치에서 음압을

측정하였다고 하자. 그리고 당좌에 가해진 힘과 각 측정점 사이의 전달 함수는 시불변이라고 가정하자. 만약 당좌에 가해진 힘이 두 측정에서 같은 경우에는 x_1 과 x_2 에서 측정된 두 신호는 동기화(synchronization)만 시키면, 동시에 측정된 것과 같은 효과를 가진다. 당좌에 가해진 힘이 두 측정에서 다른 경우에는 기준 신호를 이용하여 그 차이를 보상해 주면 되는 것이다.

이러한 방법은 예로 든 성덕대왕신종의 경우에 이미 적용되어 성덕 대왕 신종의 매 시간별 방사 음장을 성공적으로 관찰할 수 있었다. 하지만 그 구체적인 신호처리 과정은 자세히 언급되지 않았다. 본 논문에서는 과도적인 음장에서 단계적 측정을 했을 때 동시에 측정된 것과 같은 효과를 갖도록 하는 구체적인 신호처리 과정에 대해서 설명한다.

2. 기본 이론

2.1 시간 영역 음향 홀로그래피

음향 홀로그래피는 임의의 면에서의 음압 분포를 이용하여, 또 다른 임의의 지점의 음장 정보(음압, 속도, 인텐시티 등)를 예측해 내는 기법이다. 이러한 음압 정보는 Fig. 1의 측정면의 각 지점에서 측정해야 할 것이다. 이 때 모든 측정점에서 한꺼번에 측정하는 것이 동시 측정법이고, 측정을 여러 단계로 나눠서 각각의 단계에 측정점 중 몇 곳에서 측정하고 다음 단계에서 나머지 측정점들을 측정하는 방식이 단계적 측정법이다. 어느 측정법이든 측정면의 음압 정보를 얻

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

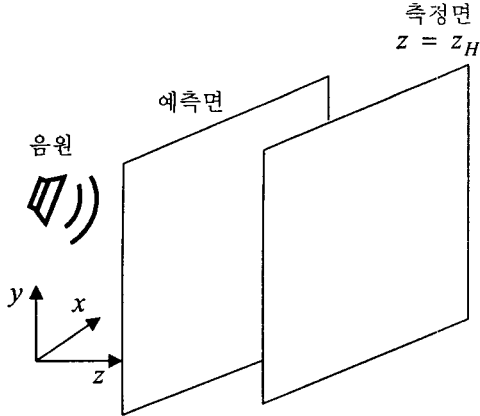


Fig. 1 평면 음향 홀로그래피의 좌표계

어내었다면 시간 영역으로부터 푸리에 변환을 하여 주파수 영역 상의 음압 정보를 얻어낼 수 있다. 즉,

$$p(x, y, z, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}(x, y, z, t) e^{-ik_z t} dt \quad (1)$$

평면 음향 홀로그래피의 이론을 적용하면 측정면보다 음원에 가깝거나 또는 먼 평면(예측면) 상의 음압 분포는 다음 식으로 구할 수 있다⁶⁾.

$$\hat{p}(x, y, z, f) = F^{-1}[\tilde{\hat{p}}(k_x, k_y, z_H; f) e^{ik_z(z-z_H)}] \quad (2)$$

$$k_z = \sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2} \quad (3)$$

이 식에서 $\tilde{\hat{p}}(k_x, k_y, z_H; f)$ 는 $\hat{p}(x, y, z_H; f)$ 를 x 와 y 에 대해 푸리에 변환한 음압 분포이다.

식 (2)로부터 얻어지는 음압 분포는 주파수 영역에서의 정보이므로 $\hat{p}(x, y, z, f)$ 를 다시 시간에 대해 푸리에 역변환하여, 즉,

$$p(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \hat{p}(x, y, z, f) e^{ik_z t} df \quad (4)$$

와 같은 식으로 시간 영역에서 예측면의 음압 분포를 알아낼 수 있다.

2.2 동시 측정시와 같은 신호 예측

앞 절에서 설명한 시간 영역 홀로그래피를 수행할 때, 음원이 정상(stationary)이 아니라 과도적(transient)이면 동시 측정법을 사용해야 하는 것으로 인식되어 왔다. 단계적 측정법으로도 과도적인(transient) 신호에 대한 시간 영역 홀로그래피를 할 수 있다. 다음은 이러한 명제를 증명하고 있다.

단계적 측정법에서 음원에서 내는 소리가 매 단계에서 같다는 보장은 없다. 그럼에도 불구하고 단계적 측정법으로 구한 음압 분포가 동시 측정법으로 구할 때와 서로 같기를 바란다. 그를 위한 방법을 먼저 이야기 하되, 이 논문에서는 간단한 예로 가진이 하나이거나, 여럿이라 하더라도 서로 상관관계가 있는(coherent) 경우를 다룬다.

단계적 측정법의 각각의 측정 단계 중 i 번째 단계에서의 가진을 $F_i(f)$ 로 정의하고 i 번째 단계의 측정에서 j 번째 위치의 마이크로폰에 잡히는 신호를 $\hat{p}_{i,j}(f)$ 로 정의하면,

$$\hat{p}_{i,j}(f) = H_{i,j}(f) F_i(f) \quad (5)$$

로 표현할 수 있다. 여기서 $H_{i,j}(f)$ 는 $F_i(f)$ 와 $\hat{p}_{i,j}(f)$ 의 전달 함수가 된다. 이 논문에서 마이크로폰의 위치에 매긴 번호 j 는 기준 마이크로폰의 위치를 0번이라고 하고 어레이 마이크로폰들의 각각의 위치는 1번부터 번호를 매기는 것으로 한다.

우리가 단계별 측정법으로 얻는 것은 $\hat{p}_{i,j}(f)$ 인데 동시 측정법을 사용했다면 $\hat{p}_{i,j}(f)$ 대신에 $\hat{p}_{1,j}(f)$ 가 측정되었을 것이다. $\hat{p}_{1,j}(f)$ 를 얻어내어 측정면을 구성하도록 하는데 단계적 측정법에서는 한 단계에 여러 위치 j 중에서 일부만 측정하게 된다.

예를 들어 한 단계에서 5개의 마이크로폰을 써서 5단계로 측정을 하게 되면 j 는 0번부터 25번까지 구해야 하지만 첫 단계에서 측정되는 것은 0번에서 5번까지이다. 나머지 6번부터 25번까지는 다른 단계에서 구한 측정 결과를 바탕으로 예측해야 한다.

우선은 식 (5)로부터

$$\hat{p}_{1,j}(f) = H_{1,j}(f) F_1(f) \quad (6)$$

이다. 이 때, $H_{1,j}(f) = H_{i,j}(f)$ 라고 가정하면,

$$\hat{p}_{1,j}(f) = H_{i,j}(f) F_1(f) \quad (7)$$

가 된다. 이 때 역시 식 (5)로부터

$$F_1(f) = \frac{\hat{p}_{1,0}(f)}{H_{1,0}(f)} \quad (8)$$

이고

$$H_{i,j}(f) = \frac{\hat{p}_{i,j}(f)}{F_1(f)} \quad (9)$$

임을 알 수 있다. 또한

$$F_i(f) = \frac{\hat{p}_{i,0}(f)}{H_{i,0}(f)} \quad (10)$$

이므로

$$H_{i,j}(f) = \frac{\hat{p}_{i,j}(f)}{\hat{p}_{i,0}(f)} H_{i,0}(f) \quad (11)$$

가 된다.

$$\therefore H_{i,j}(f) F_1(f) = \frac{\hat{p}_{i,j}(f) H_{i,0}(f)}{\hat{p}_{i,0}(f) H_{1,0}(f)} \hat{p}_{1,0}(f) \quad (12)$$

인데 기준 마이크로폰의 위치는 매 단계마다 변함없으므로 $H_{1,0}(f) = H_{i,0}(f)$ 이다.

$$H_{i,j}(f) F_1(f) = \frac{\hat{p}_{i,j}(f)}{\hat{p}_{i,0}(f)} \hat{p}_{1,0}(f) \quad (13)$$

가 되는데 그러면 식 (7)에 의해

$$\therefore \hat{p}_{1,i}(t) = \frac{\hat{p}_{i,i}(t)}{\hat{p}_{i,0}(t)} \hat{p}_{1,0}(t) \quad (14)$$

가 되어 동시 측정시와 같은 음압 분포를 얻어 낼 수 있는 것이다.

여기서 눈여겨 보아야 할 것은 지금까지의 수식 전개 과정에서, 측정하려는 신호가 정상(stationary)이어야 한다는 가정은 일체 들어있지 않다는 점이다. 단지 가진과 마이크로폰에 잡히는 신호 사이의 전달 함수가 매 단계에서 같아야 한다는 가정이 들어가 있을 뿐이다. 그러므로 정상(stationary)이 아닌 과도적(transient)인 신호의 음장에 대해서도 단계적 측정법으로 홀로그래피법을 수행하는 것이 가능하다.

이러한 신호 처리 과정을 통해 시간 영역에서의 홀로그래피를 수행하였을 때 동시 측정법을 통하여 얻은 예측면의 음압 분포와 단계적 측정법을 통하여 얻은 예측면의 음압 분포가 같아야 할 것이다. 이를 확인해보기 위해 모의 실험을 수행하고 다음 절이 그 결과를 설명하고 있다.

3. 모의 실험

3.1 구성

쌍극(dipole) 음원에서 나오는 소리에 대해 2절의 방법을 적용해 보았다. 공간적인 구성은 Fig. 2와 같이 하였다. 음원의 두 극이 놓인 방향은 x 방향으로 하고 측정면과 음원과의 거리는 0.1m로 하였다. 기준 마이크로폰은 음원으로부터 x 방향으로 0.2m 떨어진 것으로 하였다. x 방향으로 배열된 31개의 마이크로폰을 매 단계마다 y 방향으로 역시 0.05m씩 올리면서 측정해 나가는 상황에서 각각의 마이크로폰에 들어오는 신호를 모의로 넣어준다.

이 때, 매 단계마다 음원에서 내는 소리가 다르게 하여서

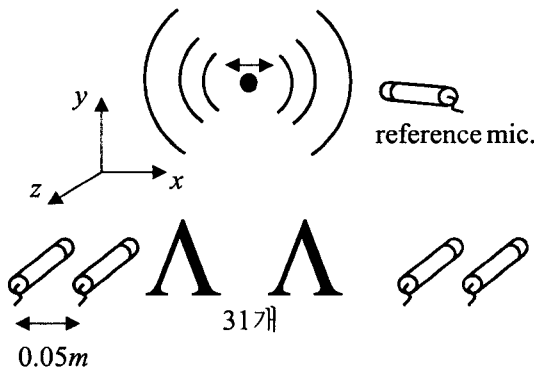


Fig. 2 모의 실험의 공간적 구성

마이크로폰의 신호를 넣어주면 단계적 측정법으로 얻은 신호에 해당된다. 그리고 그 신호들로부터 앞절의 이론을 바탕으로 음원이 있는 면에서의 음압 분포를 시간 영역에서 예

측해 낸다.

한편 반대로 매 단계마다 음원에서 내는 소리가 같게 해서 마이크로폰에 넣어주면 이 때의 신호는 동시측정시에 얻은 신호에 해당된다. 역시 이 경우에도 음원이 있는 면에서의 음압 분포를 시간 영역에서 예측해 낼 수 있다.

앞의 두 경우에서 얻은 시간 영역의 음압 분포가 서로 일치한다면 음원의 신호가 과도적인(transient) 신호이므로 과도적인 신호에 대해서도 단계별 측정법을 통해 시간 영역 홀로그래피를 수행해도 좋다고 말할 수 있는 것이다.

3.2 결과

동시 측정시에 음원에서 내보내는 신호는 기준 마이크로폰에 Fig. 3과 같은 파형으로 잡히게 된다. 주파수는 100Hz로 하고 시간에 따라 e^{-20t} 에 비례하여 감쇠하도록 하였다.

동시측정법에 대한 모의 실험을 할 때는 이 신호가 마이크로폰의 위치로 전파되어 갔을 때의 신호를 취하지만 단계적 측정법에 대한 모의 실험을 할 때는 첫 번째 단계에서만 Fig. 3의 신호가 전파되는 것으로 가정하고 두 번째 단계부터는 Fig. 3의 신호에 변화를 준 다른 신호가 음원으로부터 전파되는 것으로 가정한다.

두 번째 단계부터는 음원에서 나오는 음향 신호의 진폭과 위상에 난수를 써서 매 단계마다 그 값이 달라지게 하였다. 진폭은 Fig. 3의 신호의 2배까지 변할 수 있게 하였고 위상의 경우는 0에서 2π 까지의 임의의 숫자로 변할 수 있게 하였다.

Fig. 4는 동시 측정시에 얻게 되는 예측면의 음압 분포를 나타낸 것이다. 음압 크기의 척도를 데시벨(dB)이 아닌 Pa 단위로 나타낸 것은 음압을 복소수로 표현했을 때 시간 영역에서는 실수값이 의미가 있으므로 음압이 음수인 영역이

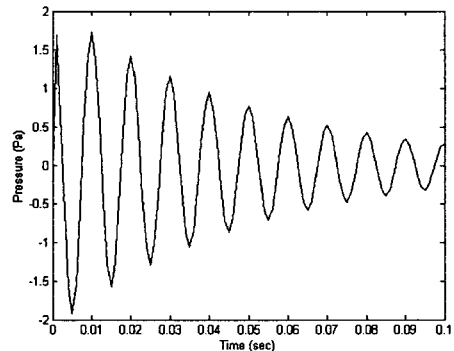
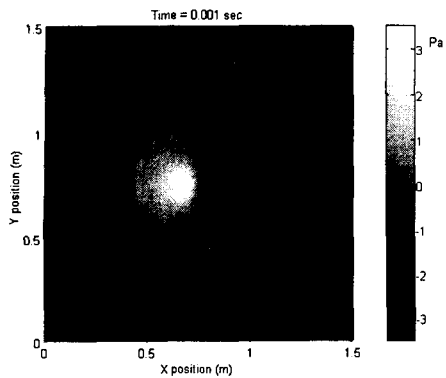
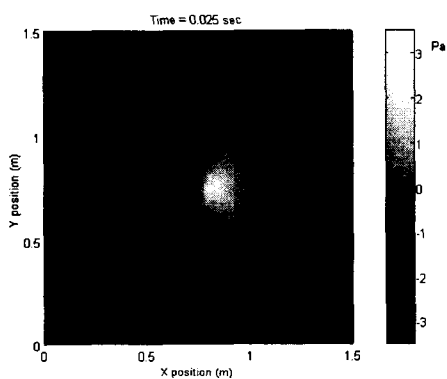


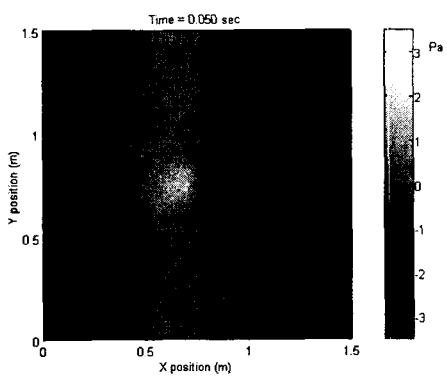
Fig. 3 동시 측정시에 기준 마이크로폰에 잡히는 신호



(a)

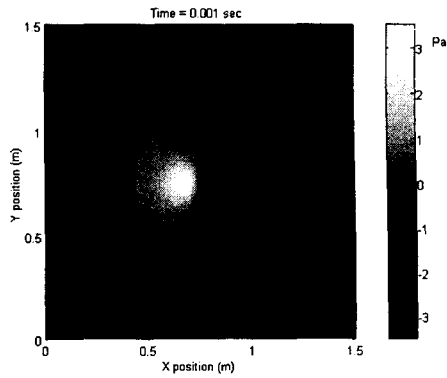


(b)

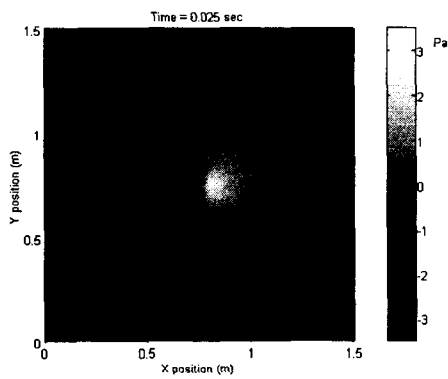


(c)

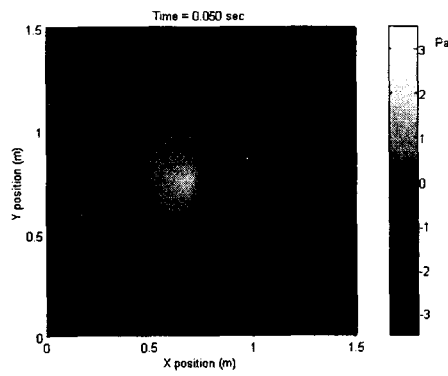
Fig. 4 동시 측정시의 예측면(음원이 있는 면)의 음압 분포 (a)t=0.001초 (b)t=0.025초 (c)t=0.050초



(a)



(b)



(c)

Fig. 5 단계적 측정시의 예측면(음원이 있는 면)의 음압 분포 (a)t=0.001초 (b)t=0.025초 (c)t=0.050초

존재하기 때문이다. Fig. 4에서 시간의 흐름에 따른 위상의 변화와 진폭의 감쇠를 볼 수 있다.

한편, Fig. 4와 함께 그 오른쪽의 Fig. 5를 비교해 봐야 하는데 Fig. 5에 단계적 측정시에 얻게 되는 예측면의 음압 분포가 나타나있기 때문이다. 비교해 보면 좌우의 패턴이 똑 같이 나타남을 볼 수 있다.

모의 실험을 하면서도 매 단계에서 변동을 주지 않은 것이 있는데, 신호가 시간마다 감쇠하는 비율과 신호가 진동하는

주파수가 그것이다. 식 (14)에서 $\frac{\hat{p}_{i,i}(f)}{\hat{p}_{i,0}(f)}$ 라는 비를 구해

야 하는데 만일 i 번째 단계에서 주파수가 f 인 성분이 없다면 이 비를 구할 수가 없다. 따라서 첫 번째 단계에서 0이 아니었던 주파수 성분들은 다음 단계들에서도 나타나야 한다. 따라서 신호의 주파수는 변동을 주지 않았다. 또한, 감쇠하는 비율에 따라 주파수 성분이 이동(shift)하기 때문에 감쇠하는 비율도 변동을 주지 않았다. 하지만 매 단계에서 각 주파수 성분의 진폭과 위상의 변화는 식 (14)을 이용하여 보상할 수 있다는 것을 본 모의 실험을 통해 알 수 있다.

4. 결론

홀로그래피를 수행할 때, 대상이 되는 음원의 신호가 과도적(transient)이어도 단계별 측정법을 적용했을 때와 동시 측정법을 적용했을 때가 같은 결과가 나온다는 것을 이론적으로 보이고 그 확인을 모의 실험을 통하여 하였다. 과도적인(transient) 신호를 비교하기 위하여 주파수 영역이 아닌 시간 영역에서의 비교확인을 하였다. Fig. 4와 Fig. 5를 비교해 보면 매 단계에서 음원에서 발생하는 신호의 진폭이나 위상이 차이를 가져도, 기준 마이크로폰에 잡히는 신호와 어레이 마이크로폰에 잡히는 신호 사이의 전달 함수가 매 단계에서 변화가 없으며 첫 단계에서 나타났던 주파수 성분들이 다음 단계에서도 0이 아닌 어떤 크기로는 나타나지만 한다면, 과도적인(transient) 음향 신호에 대해서도 마치 동시 측정을 한 것처럼 시간 영역에서의 홀로그래피를 수행할 수 있다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL)사업과 교육인적자원부의 두뇌한국 21(BK21) 프로그램의 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- (1) J. Hald, "STSF - a unique technique for scan-based Near-field Acoustic Holography without restrictions on coherence," B&K Technical Review No. 1, 1989
- (2) Hyu-Sang Kwon and Yang-Hann Kim, "Moving frame technique for planar acoustic holography," J. Acoust. Soc. Am. 103(4), 1998, pp. 1734-1741.
- (3) Soon-Hong Park and Yang-Hann Kim, "An improved moving frame acoustic holography for coherent bandlimited noise," J. Acoust. Soc. Am. 104(6), 1998, pp. 3179-3189.
- (4) J. Hald, "Non-stationary STSF," B&K Technical Review No. 1, 2000
- (5) 김양한, 김시문, "원통형 음향 홀로그래피를 이용한 성덕대왕 신종의 방사음장 특성 분석," 한국음향학회지, 제 16권, 제 4호, 1997, pp. 94-100.
- (6) J. D. Maynard, E. G. Williams, and Y. Lee, "Near field acoustic holography (NAH): 1. Theory of generalized holography and the development of NAH," J. Acoust. Soc. Am. 78(4), 1985, pp. 1395-1413.