

# 스캐닝 평면 음향 홀로그래피에서의 스펙트럴 분산 보정

## Compensation for Spectral Variance in Scan-Based Planar Acoustical Holography

권 휴상\* · 김 용조\*\* · J. S. Bolton\*\* · 서 재갑\* · 박 준홍\* · 서 상준\*  
Hyu-sang Kwon, Yong-joe Kim, J. Stuart Bolton, Jae-gap Suh,  
Jun-hong Park, and Sang-jun Suh

**Key Words** : Acoustical Holograph(음향 홀로그래피), Hologram(홀로그램), Microphone array(마이크로폰 배열)

### ABSTRACT

Multi-reference, scan-based Acoustical Holography is a useful measurement technique when insufficient microphones are available to measure a complete hologram at once. When the sound sources are stationary, the whole hologram can be constructed by joining together sub-holograms captured using a relatively small scan array. Here that approach is extended by the development of a formulation that explicitly includes the acoustical transfer functions between the reference microphones and the scanning microphones. Based on those expressions, a compensation procedure of spectral variance due to source-non-stationarity is proposed. It has been verified both numerically and experimentally that this procedure can help suppress spatially distributed noise caused by the source level non-stationarity that is always present in a measurement.

### 1. 서 론

생활수준이 향상되고 산업이 발달함에 따라 소음문제 해결에 대한 요구는 날로 증대되고 있다. 이러한 소음문제 해결의 첫 단계로는 소음원의 위치와 세기 등은 물론이고 이로부터 발생한 소음이 전파되어 나가는 시공간적 경로와 방사특성 등을 정확히 파악하는 것이라 하겠다. 이를 위하여 종래에는 대상물의 소음 발생부위의 진동을 측정하고 이를 해석하여 소음원을 유추하거나 한 두개의 마이크로폰 혹은 음향 인텐시티 탐촉자 등을 이용하여 부분적인 음장을 측정하여 유추, 해석하는 등의 방법을 사용하였다. 그러나 이러한 방법들은 공간적으로 소음원이나 방사음장 등을 정확하게 제공할 수 없다는 단점을 가지고 있으며 이에 공간적인 음장정보를 전체적으로 측정, 해석하고자 하는 연구가 계속 되어 왔다. 이러한 노력의 결과로 1980년대 중반 이후부터

본격적인 연구가 진행되어 오고 있는 음향 홀로그래피 방법은 관심있는 대상체의 방사음장을 전 공간영역에서 해석할 수 있다는 장점으로 인하여 주목을 받고 있으며, 근래에 들어서 센서기술 및 하드웨어의 발달로 인하여 응용이 더욱 활발해지고 있다.

음향 홀로그래피 방법은 그 형태에 따라 다양한 방법이 있지만 그 기본은 평면 어레이를 사용하는 평면 음향 홀로그래피라 할 수 있다. 평면 음향 홀로그래피 방법에서는 이차원 평면 격자형으로 마이크로폰을 배열하여 평면상의 음압을 측정하고 이를 사용하여 음원의 표면으로부터 바깥으로 반 무한 공간에서의 음장을 예측한다. 여기서 측정하는 평면을 홀로그램 면이라 하고 이 평면의 측정음압 분포를 홀로그램이라 한다. 그런데 홀로그램을 측정하기 위해서는 측정점의 개수가 많기 때문에 한 번에 측정하기란 불가능한 마이크로폰의 개수 제한 때문에 용이하지 않으며 실제적인 이용에서는 전 홀로그램을 부분으로 나누어서 순차적으로 부분 홀로그램을 측정하고 이를 조합하여 홀로그램을 얻는 스캐닝 방법을 많이 사용한다. 이와 같은 순차적인 측정을 위한 필수적인 가정은 음원으로부터 방사하는 음장이, 즉, 음원의 세기와 위치가 시간에 따라 변하지 않는 정상상태라는 것이다. 또한 부분 홀로그램 사이의 신호관계를 동기화시키기 위하여 몇 개의 마이크로폰을 고정된 위치에 두고

\* 한국표준과학연구원  
E-mail : hyusang@kriss.re.kr  
Tel : (042) 868-5057, Fax : (042) 868-5028

\*\* Purdue University

기준 음압 신호를 측정하여야 한다. 이와 같은 기준 마이크로폰은 상관관계가 없는 음원의 개수보다 많아야 하며 각 음원의 신호를 측정하기 쉬운 위치에 설치해야 한다.

순차적인 홀로그래프 측정의 기본적인 가정은 신호의 정상상태이지만 실제 측정에 있어서 이러한 가정을 엄밀하게 만족시키기는 쉽지 않으며 따라서 이에 대한 보정이 필요함을 알 수 있다. 일반적인 관점에서 정상상태라 함은 음원의 위치나 형태와 같은 기하학적인 특성이 변하지 않는 조건과 함께 그 발생음의 세기나 주파수 특성 등이 일정한 조건을 의미한다. 그런데 일반적으로 음원의 기하학적인 일관성은 쉽게 유지할 수 있으며 정상상태라는 가정이 크게 어긋남이 없게 된다. 그러나 발생음의 세기 등과 같은 신호의 정상상태는 일정하게 유지하기가 용이하지 않음이 사실이다. 이와 같이 음원의 세기나 위상이 매 측정마다 달라지는 현실적인 측정 조건에서 각 부분 홀로그래프를 보정하여 동일한 측정의 홀로그래프를 구성하는 것이 본 연구의 목적이다. 이러한 정상상태 보정을 통하여 홀로그래프와 이로부터 예측하는 음장을 정확하게 표현할 수 있게 된다.

본 연구에서는 음장 보정에 대한 이론적인 전개와 함께 무향실 내에서 두 개의 스피커와 마이크로폰 어레이를 이용한 실험과 시뮬레이션을 수행하였다. 그리고 이를 통하여 제안하는 방법들의 타당성을 검증하고 이 보정방법을 이용한 음장 예측 개선의 가능성을 확인하고자 한다.

## 2. 이론적 해석

### 2.1 평면 음향 홀로그래피 이론

음원이 존재하지 않는 임의의 공간내의 음장은 이 공간을 둘러싸는 경계면의 음압 및 입자속도를 적분하는 Kirchhoff-Helmholtz 식으로부터 쉽게 계산할 수 있다. 이 관계식은 수치 해석적인 경계요소법이나 실험적인 음향 홀로그래피 방법 등과 같이 공간상의 음장을 예측하기 위한 기본식으로 널리 알려져 있다. 이때 경계면을 무한평면과 무한반구로써 설정함으로써 Sommerfeld 경계조건에 의해서 무한반구상의 경계적분을 제거하고 Dirichlet 경계조건을 만족하는 Green 함수를 적절히 선택함으로써 평면상의 음압 분포의 측정으로써 음장을 예측할 수 있는 평면 음향 홀로그래피의 기본식을 유도할 수 있다.

이러한 평면 음향 홀로그래피의 음장 예측식은 공간상의 Fourier 변환을 이용하여 간략하게 표현할 수 있으며 이는 홀로그래프 평면의 음압분포를 마이크로폰 어레이를 이용하여 측정된 뒤 공간상의 Fourier 변환을 이용하여 평면파 성분들로 나누어 원하는 공간상에 전파하고 이를 중첩하여 음장을 예측하는 과정이라 표현할 수 있다.

이러한 음장 예측을 수행할 때 유한한 개수의 측정점의 음압을 이용하여 예측을 행하므로 필연적으로 예측음장에

오차가 포함되어진다. 그러므로 이를 줄이기 위한 연구가 계속되어 왔는데 유한한 크기의 측정구경에 의한 창문함수 영향을 줄이기 위한 최소오차 창문함수와 공간상의 엘리머싱을 제거하기 위한 공간필터의 사용 등은 그 대표적인 예이다.

### 2.2 순차적 홀로그래프 측정 방법

음향 홀로그래피의 기본이론으로부터 이산화된 음향 홀로그래피 식을 표현할 수 있으며 이로부터 음장 예측 관계식은 다음과 같이 벡터-행렬 관계식으로 단순화하여 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}' = \mathbf{T}\mathbf{y} \quad (1)$$

여기에서  $\mathbf{y}$  와  $\mathbf{y}'$  는 각각 홀로그래프 면과 예측면에서의 음장, 즉 음압이나 입자속도 등을 나타내며  $\mathbf{T}$  는 홀로그래프 면에서부터 예측면까지의 음장 예측 함수로 표현된다. 여기서 이 식은 상관관계가 있는 음장에 적용된다. 그런데 실제적인 측정에서 신호의 랜덤 특성은 측정 신호의 스펙트럴 값으로 표현되어 지고 이에 따라 식 (1) 은 다음과 같은 스펙트럴 관계식으로 표현되어 진다.

$$\mathbf{S}_{\mathbf{y}'\mathbf{y}'} = \mathbf{E}\{\mathbf{y}'\mathbf{y}'^H\} = \mathbf{T}\mathbf{E}\{\mathbf{y}\mathbf{y}^H\}\mathbf{T}^H = \mathbf{T}\mathbf{S}_{\mathbf{y}\mathbf{y}}\mathbf{T}^H \quad (2)$$

여기에서 윗첨자 H 는 Hermitian 변환을 나타내며 홀로그래프 면과 예측면의 신호벡터는 각각 스펙트럴 함수들로 구성된 행렬로 다시 표현되어 짐을 알 수 있다.

이 식으로부터 홀로그래프 면의 각 측정점 사이의 스펙트럼을 측정하여 전달 행렬을 곱함으로써 예측면의 각 점들 사이의 스펙트럴 행렬을 구할 수 있게 된다. 그리고 이 스펙트럴 행렬은 독립적인 음원에 의한 각 음장의 선형적인 조합으로써 표현되어지며 이를 측정하기 위하여 몇 개의 기준 신호를 사용하여 나타낼 수 있다.

### 2.3 기준신호를 이용한 순차적 측정 방법

순차적인 측정을 이용한 홀로그래프의 측정에서 상관관계가 없는 음원의 개수보다 기준 마이크로폰의 개수가 많다고 가정하면 홀로그래프의 각 측정점의 신호는 각 음원 및 기준 마이크로폰과의 기하학적인 관계에 의해서 다음과 같이 기준 신호의 선형적인 조합으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{r} \quad (3)$$

여기에서  $\mathbf{r}$  은 기준 신호벡터, 그리고  $\mathbf{H}$  는 기준점 신호와 홀로그래프 신호 사이의 관계를 표현하는 전달함수의 행렬이다. 여기서 전달함수 행렬을 얻기 위해 식 (3) 의 양변에 기준 신호벡터를 곱하여 스펙트럼을 구하여 정리하면 다음과 같다.

$$\mathbf{H} = \mathbf{S}_{\mathbf{r}\mathbf{y}}^H \mathbf{S}_{\mathbf{r}\mathbf{r}}^{-1} \quad (4)$$

마찬가지 방법으로 양변에 홀로그램 신호를 곱하여 홀로그램 면에서의 스펙트럴 행렬을 구하면 다음과 같다.

$$\mathbf{S}_{yy} = \mathbf{H}\mathbf{S}_{ry} \quad (5)$$

식 (4) 와 식 (5) 로부터 홀로그램의 스펙트럴 행렬은 기준점 신호와 홀로그램 신호들 사이의 스펙트럴 행렬의 관계식으로 표현되어 진다.

$$\mathbf{S}_{yy} = \mathbf{S}_{ry}^H \mathbf{S}_{rr}^{-1} \mathbf{S}_{ry} \quad (6)$$

결국 홀로그램의 스펙트럴 행렬은 기준점 신호와 홀로그램 신호들 사이의 스펙트럴 행렬을 측정함으로써 얻어지고 이로부터 예측면의 음장을 계산하게 된다. 이 홀로그램의 스펙트럴 행렬은 각각의 독립적인 신호들의 선형적인 조합이므로 이를 각각 분리하여 표현하면 다음과 같은 부분 음장행렬  $\mathbf{a}$  로써 표현할 수 있다.

$$\mathbf{a} = \mathbf{S}_{ry}^H \mathbf{S}_{rr}^{-1/2} = \mathbf{H}\mathbf{S}_{rr}^{1/2} \quad (7)$$

여기서 이 부분 음장행렬의 각 열은 독립적인 음장의 표현을 나타내며 이는 각각 공간적으로 상관된 음장을 의미하고 이는 결국 식 (1) 의 음장 예측식에 적용이 가능하다는 것을 의미한다. 이와 같은 방법으로 예측면에서의 음장행렬을 얻을 수 있는데 이는 각 열이 독립적인 음장으로써 표현된다. 또한 예측면의 전체 음장은 이 독립음장의 파워를 모두 선형 조합함으로써 구할 수 있게 된다.

## 2.4 스펙트럴 분산의 보정

음장 예측을 위한 홀로그램의 부분 음장분리를 통하여 독립적인 부분 음장행렬 관계식을 얻을 수 있으며 이를 통하여 예측을 수행할 수 있다. 이론적인 측정에서는 식 (7) 의 기준점 신호가 매 측정마다 일정하다고 가정할 수 있지만 실제적으로는 신호의 크기가 달라지고 이에 따라 매 측정마다의 기준점 신호 스펙트럴 행렬은 다를 수밖에 없게 된다. 그러므로 이러한 신호의 특성을 무시하고 기준점 신호와 홀로그램 신호의 스펙트럴 행렬을 구하면 매 측정에서의 불일치가 발생하며 이는 홀로그램과 예측음장에 오차로 나타나게 된다. 이를 보정하기 위해서는 부분 음장의 표현식에서 기하학적인 정상상태 조건과 신호적인 분산을 분리, 해석해야 하는데, 전달함수 행렬  $\mathbf{H}$  는 음원과 기준점 위치, 홀로그램 측정점의 위치와 관련된 기하학적인 조건으로부터 결정되어지는 행렬이므로 이는 기하학적인 정상상태 조건에서는 음장의 변화와 관계없이 일정해야 함을 알 수 있다. 그러므로 이를 계산하기 위해서는 매 측정마다 변화하는 기준점 신호와 홀로그램 신호를 이용하여 식 (4) 로부터 계산을 해야 한다. 이에 반해 식 (7) 에서 기준점 신호의 스펙트럴 행렬은 음장의 크기를 나타내며 이는 전체 기준점 신호를 평균하여 얻을 수 있다. 결국 순차적인 측정에서 음장 신호에 크기의 분산이 존재하는 경우에 부분 음장행렬을 표

현하는 식은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\mathbf{a}_{(\text{step})} = \mathbf{H}_{(\text{step})} \mathbf{S}_{rr,(\text{avg})}^{1/2} = \mathbf{S}_{ry,(\text{step})}^H \mathbf{S}_{rr,(\text{step})}^{-1} \mathbf{S}_{rr,(\text{avg})}^{1/2} \quad (8)$$

여기에서 아래첨자 (step) 과 (avg) 는 각 순차적인 측정에서의 값과 모든 측정의 평균 결과를 의미한다. 결국 순차적인 측정에 의한 부분 홀로그램의 결합은 원하는 전체 홀로그램이 되며 여기서 식 (8) 에 의하여 매 측정으로부터 발생하는 신호의 불일치는 보정되어 사라지게 됨을 알 수 있다. 이와 같은 과정을 통하여 기하학적으로 일정한 측정조건에서는 신호의 변화가 커더라도 정확한 음장을 재현할 수 있게 된다.

## 3. 실험 및 결과

### 3.1 실험 및 모의실험 방법

이론적인 해석을 바탕으로 무향실에서 실험을 수행하고 그 결과를 해석하였다. 또한 비슷한 조건의 모의실험을 통하여 이론적인 해석의 타당성을 검증하였다.

실험은 무향실에서 두 개의 스피커를 사용하여 수행하였으며 이는 각각 독립적인 광대역 백색 잡음으로 구동되었다. 두 스피커는 고유한 주파수 특성을 가지고 있기 때문에 주파수별로 서로 다른 음장 특성을 가지게 된다. 홀로그램은 0.0508 m 의 간격으로 배열된 9 개의 수평 마이크로폰 어레이를 이용하여 스캐닝하며 측정하였으며 5 개의 기준 마이크로폰을 사용하였다. 결과적으로 32 스캐닝을 통하여 수평 18, 수직 16 점의 홀로그램을 얻을 수 있었다. (그림 1) 실험에 사용한 마이크로폰의 위치나 스피커의 크기 등 실험 조건은 그림 1 에서 확인할 수 있다.

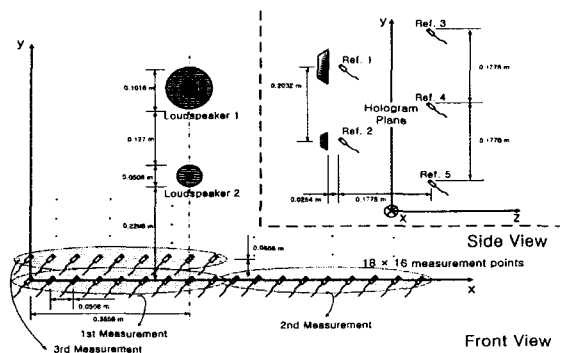


Fig. 1 Sketch of experimental setup.

실험과 비슷한 환경의 컴퓨터 모의실험은 다음과 같이 수행하였다. 소음원은 두 개의 단극 소음원으로 하고 각각 독립적인 랜덤 신호를 입력하였다. 소음원의 출력 레벨은 매 스캔마다 다르게 함으로써 실제 측정조건에서의 분산을 모

델팅하였다. 매 측정시 측정신호는 4096 Hz 의 샘플링 주파수로 512 개를 사용하였으며 20 회의 선형 평균으로 스펙트럼을 계산하였다.

### 3.2 결과 분석 및 고찰

모의실험을 통하여 1 번 기준 마이크로폰에서 계산한 스펙트럼은 그림 2 와 같다. 그림에서 확인할 수 있듯이 매 측정마다 스펙트럼의 크기가 다르게 주어지는데 그 크기의 분산은 수 dB 이내로 실제 조건과 비교할 때 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그런데 보정을 수행하지 않고 예측을 수행한 결과(그림 3)는 보정 결과(그림 4)와 큰 차이를 보이고 있다. 또한 보정하지 않은 결과에서 나타나는 오차의 경향은 부분 홀로그래프의 형상을 그대로 나타내고 있음을 알 수 있고 이는 각 부분 홀로그래프의 분산 차이가 직접적으로 오차에 포함되어 진다는 사실을 의미한다고 볼 수 있다.

실험을 통해서도 같은 결과를 확인할 수 있었는데, 먼저 두 기준 마이크로폰의 스펙트럼과 분산은 그림 2 에서 확인할 수 있다. 두 스피커는 저주파와 고주파에서 서로 다른 주파수 특성을 가지고 있으며 이는 각 주파수별 음장 해석을 통해서 확인할 수 있다. 실험결과는 5 개의 기준점 음압 신호로부터 SVD(Singular Value Decomposition)을 사용하여 두 부분 음장을 해석하였고 그림은 1 kHz 의 주파수 성분에서의 각 부분 음장을 보여준다. 실험에서도 분산에 의한 오차의 발생과 보정의 효과를 확인할 수 있다. 이와 같은 결과에서 제안한 보정 방법을 통하여 실제적인 측정에서의 개선된 음장 해석을 수행할 수 있었다.

### 4. 결론

평면 음향 홀로그래피 방법론을 중심으로 순차적인 측정 방법에서의 음원의 비 정상상태에 따른 분산 오차를 해석하고 이를 보정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 이론적인 해석과 수식 전개를 통하여 분산의 보정을 수행할 수 있는 근거를 확인하였으며 컴퓨터 모의실험과 무향실에서의 실험을 통하여 그 결과를 확인하였다. 순차적 측정방법의 기본 가정인 정상상태 조건은 음원의 기하학적인 조건과 신호의 분산으로 표현할 수 있고, 기하학적으로 동일한 일반적인 조건에서 신호의 분산은 제안한 보정 방법을 통하여 제거할 수 있었고, 그 방법론의 타당성과 적용 가능성을 확인하였다.

### 참고 문헌

1. J. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, Nearfield Acoustical Holography: I. Theory of Generalized Holography and the Development of NAH, *J. of the Acoust. Soc. Am.*, 74(4), 1395-1413, 1985.
2. J. Hald, STSF - A Unique Technique for Scan-Based Nearfield Acoustical Holography Without Restriction on Coherence, *B&K Technical Review No. 1*, 1988.
3. H.-S. Kwon and J. S. Bolton, Partial Field Decomposition in Nearfield Acoustical Holography by the Use of Singular Value Decomposition and Partial Coherence Procedures, *Proc. NOISE-CON 98*, 649-654, 1998.
4. D.L. Hallman and J.S. Bolton, A Comparison of Multi-Reference Nearfield Acoustical Holography Procedures, *Proc. NOISE-CON 94*, 929-934, 1994.

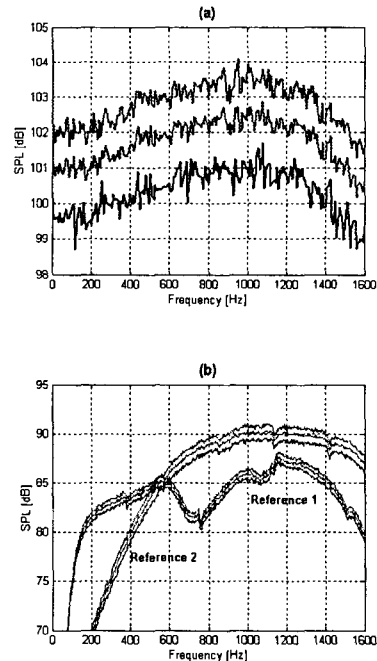


Fig. 2 Mean reference spectra (green) and +/- one standard deviation (blue and red lines): (a) numerical simulation results for reference 1 and (b) experimental results for references 1 and 2.

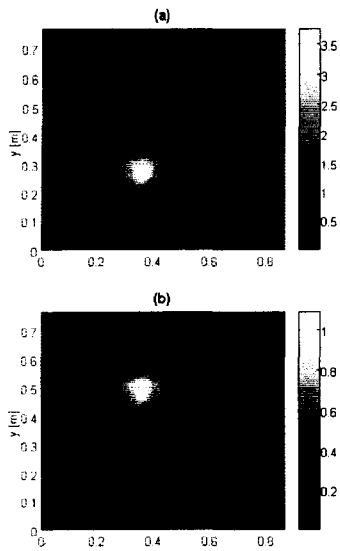


Fig. 3 Simulation result at 512 Hz without correction: (a) first and (b) second partial pressure field.

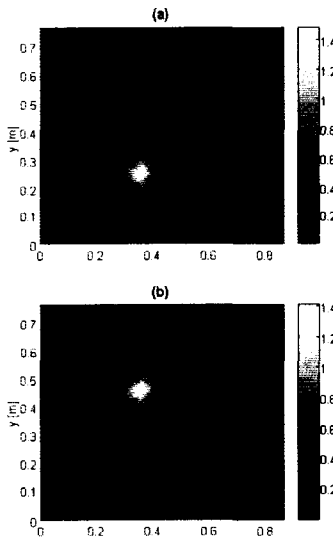


Fig. 4 Simulation result at 512 Hz with correction: (a) first and (b) second partial pressure field.

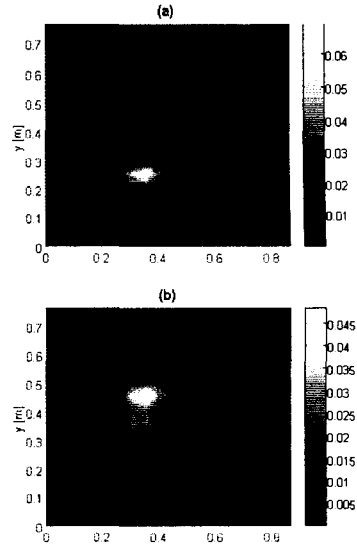


Fig. 5 Experimental result at 1 kHz without correction: (a) first and (b) second partial pressure field.

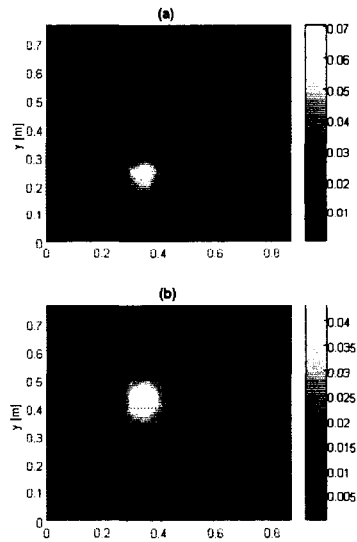


Fig. 6 Experimental result at 1 kHz with correction: (a) first and (b) second partial pressure field.