

# 폭발파 모델을 이용한 실내 음장 해석에 관한 연구

송기혁 · 강우람<sup>\*\*</sup> · 이덕주<sup>\*</sup> · 김영남<sup>\*\*</sup>

국방과학연구소 · <sup>\*</sup>한국과학기술원 · <sup>\*\*</sup>바람과 소리

(2015. 4. 17. 접수 / 2015. 8. 10. 수정 / 2015. 8. 17. 채택)

## Study on the Indoor Acoustic Field Analysis using the Blast Wave Model

Kee-Hyeok Song · Woo-Ram Kang<sup>\*\*</sup> · Duck-Joo Lee<sup>\*</sup> · Young-Nam Kim<sup>\*\*</sup>

Agency for Defense Development · <sup>\*</sup>KAIST · <sup>\*\*</sup>Flow&noise Inc.

(Received April 17, 2015 / Revised August 10, 2015 / Accepted August 17, 2015)

**Abstract :** A portable recoilless guided missile generates a strong back blast and impulsive noise at the nozzle when it launches. In the case of indoor operations, the hazard of the blast noise from a recoilless weapon increases due to limited indoor spaces. Also, the noise levels determine the operational feasibility of a weapon; therefore, it is important to predict the blast noise levels distribution in the indoor space in advance. In addition, computational fluid dynamics (CFD) method generally used for fluid related simulations, requires high computing cost and time to simulate the whole domains. The domain includes both blast wave region and large and various indoor space region. Therefore, an efficient method for predicting the far-field noise level within a short time should be developed. This paper describes an analysis model for predicting the indoor noise distributions by considering the shape effect of the building within a short time. A new developed blast wave model was implemented using the noise source. Additionally, noise reflections at the closed surfaces such as walls and noise transmissions at the opened surfaces such as windows and doors were considered in calculating the noise levels. The predicted noise levels were compared with the experimental data obtained from the indoor launch test to validate the reliability of program.

**Key Words :** impulse noise, interior space, blast wave model, computational fluid dynamics

### 1. 서론

유도탄 발사 시 충격소음(Impulse noise)이 발생하게 되며 이때 발생한 충격소음은 사수에게 청력손실 또는 난청 등의 신체적인 피해를 가할 수 있다. 이에 관련하여 충격소음의 위해성, 위해성 평가방법, 소음저감방법 등에 관하여 많은 연구가 이루어진 바 있다<sup>1-17)</sup>. 특히, 실내에서 발생하는 충격소음에 관한 연구 분야에서는 측정된 대부분의 음압 데이터가 실험결과에 의존한 것이며 공간의 크기, 창문과 출입문 위치 등의 실내조건이 변경될 경우, 이러한 조건들을 변경하여 실험을 반복해야하는 어려움이 있다. 결과적으로 수치해석을 통해 빠른 시간에 실내공간이 갖는 다양성을 고려하여 충격음에 대한 소음 분포를 해석할 수 있는 방법이 필요하다.

충격소음에 대한 실내 분포 해석을 통해 실내에서의 인체 안전성을 결정할 수 있으며 이는 유도탄의 발사 가능성 유무를 결정하는 매우 중요한 연구 분야이다. 실내 공간 전체를 전산유체해석(CFD)을 통한 수치해석 방법으로 접근할 경우 실내공간의 크기 때문에 너무 많은 해석 격자가 필요하다는 문제가 발생한다. 따라서 연소시간과 실내공간 전체를 고려한 전산유체해석은 해석에 따른 많은 시간 및 많은 자원을 요구하기 때문에 직접적인 접근이 매우 제한적이라고 볼 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 벽이 없는 소음원 근거리에서의 전산유체해석 결과를 이용하여 소음원을 추출하고, 실험 및 해석결과에 따른 실제 압력파형을 몇 개의 파라미터를 사용한 단순 폭발파 모델(Simple blast wave model)로 단순화하였다. 또한 기하음향기법(Geometric acoustic method)을 사용하여 벽면

<sup>\*</sup> Corresponding Author : Woo-Ram Kang, Tel : +82-42-350-3756, E-mail : kang\_woo\_ram@kaist.ac.kr  
KAIST, 291, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34141, Korea

으로부터의 소음반사와 출입문 등을 통한 소음투과를 반영하였으며 실내 유도탄 발사실험 결과와 비교하여 결과의 타당성을 규명하였다.

## 2. 외부 소음해석

### 2.1 수치해석 방법

유도탄 발사에 의한 소음 발생 및 방사 그리고 후폭풍 해석은 초음속 고속 제트와 저속의 유동이 동시에 존재하며, 노즐의 후방에서도 2차 연소(After burning)가 계속되어 복잡한 물리적 현상을 동반하는 수치적으로 매우 난해한 문제로 정의 될 수 있다.

본 연구에서는 2차 연소 해석의 복잡성을 배제하고 노즐 내의 연소실에서 모든 기체가 완전 연소된 상태로 방출되는 것으로 가정하여 2가지 가스인 연소가스와 공기에 대한 유동해석을 수행했다. 전산유체해석은 압축성 유동해석에 장점을 갖고 있는 미국 MetaComp Technologies사의 CFD++를 사용하였다.

소음 전파 해석은 해석 격자의 크기와 시간간격(Time step)의 제약 조건이 있지만 시간에 따른 정밀한 음파 해석을 위하여 Explicit 방법을 사용하였다. 실제 노즐형상을 구성하기 위하여 최소 0.5 mm 정도의 해석 격자가 필요하며 안정화된 유동해석을 위하여 Courant-Friedrichs-Lewy 조건에 따라 모든 3차원 해석의 시간 간격은  $5 \times 10^{-7}$  s를 사용하였다. 또한 정밀한 음파해석을 위해서는 균일한 해석격자를 사용해야 하는데 이러한 조건을 발사 실내 전체 공간에 적용하는 것은 메모리와 해석시간의 문제로 현실적 어려움이 존재한다. 따라서 6개의 노즐이 중심에서 축대칭으로 존재한다는 형상적인 특징을 이용하여 해석 공간을 중심에서 1/12 형상으로 정의했으며, 이 때 전체 해석 격자의 수는 대략 4,500,000개로 유동해석을 수행했다. Fig. 1은 유동 해석에 사용한 노즐 주변의 해석격자 형상을 보여주고 있다.

Fig. 1에서 보여주는 것처럼 노즐의 중앙 단면과 이웃한 노즐 사이 단면의 30도 원통형 형상을 해석공간

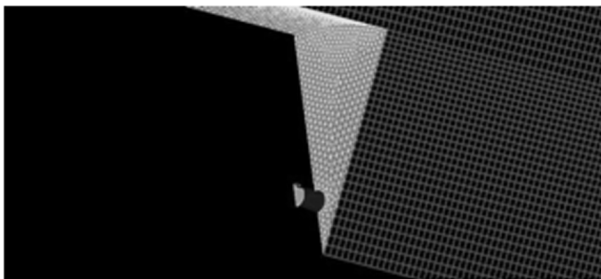


Fig. 1. Grid pattern around the nozzle.

으로 사용하였다. 이러한 단순 형상은 실내발사 시 박스 형태의 실내공간의 영향을 고려할 수 없다는 문제점을 갖고 있지만, 유동해석의 현실적 한계와 본 연구 과제에서 유동해석의 목적이 실내 음장해석의 소음원을 제공하는 것임을 고려할 때 충분한 타당성을 갖는 것으로 사료된다. 유동해석에 사용한 지배방정식은 2개의 기체(연소가스, 공기)가 존재하는 비점성, 압축성 Euler 방정식을 적용하였으며, 수치기법으로 공간에 대하여 2차 정확도(2<sup>nd</sup>-order), 시간에 대하여 Multi-step-RK explicit 방법을 사용하였다. Riemann solver로는 HLLC (Harten-Lax-van Leer-Contact)를 적용했으며, 이 방법은 전단층(Shear layer)을 정확하게 해석하여 제트에서 발생하는 정밀한 소음해석을 할 수 있다는 장점을 갖고 있다.

### 2.2 유동해석 입력조건

연소가스의 물성 값은 비열비 1.22, 그리고 분자량 25.17로 설정하였으며, 공기의 경우 300 K의 대기압으로 유지되는 것으로 했으며 비열비 1.4, 분자량 28을 사용하였다. 노즐을 출발하는 연소가스는 순수한 연소가스로 방출되어 노즐외부에 공기와 섞이는 것으로 문제를 정의하였으며, 해석공간 외부는 300 K의 대기압으로 유지되는 것으로 경계조건을 설정하고, 외부로 향하여 빠져나가는 음장은 반사 없이 자연스럽게 밖으로 빠져나가도록 비반사 경계조건을 부여하였다. 지배방정식을 압축성 Euler 방정식을 사용하기 때문에 벽면에서 유동이 미끄럼조건(Slip condition)을 부여하였다. Table 1은 외부소음 해석에 사용한 물성값 및 경계조건을 보여주고 있다.

### 2.3 소음 해석 검증

외부 소음해석을 통해 실내 음장 해석을 위한 소음

Table 1. The physical properties and boundary conditions used in flow analysis

		Combustion gas	Air
Property value	Specific heat ratio	1.22	1.4
	Molecular weight	25.17	28
Boundary conditions	Nozzle inlet temperature and total pressure	- Temp. : 2562 K - Total pressure : change with time	
	Far conditions	- Temp. : 300 K - Pressure : Atmospheric pressure - Non-reflective conditions	
	Wall conditions	- slip condition	

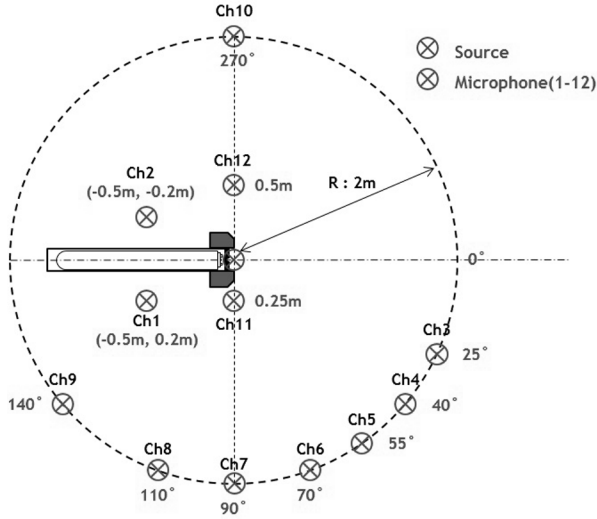


Fig. 2. Microphone location and the channel number of the outdoor test.

원 자료를 생성하므로 외부 소음해석은 정확한 해석이 필요한 부분이다. 실내 음장 해석은 결국 벽이 없는 자유음장 상태의 유동/소음 데이터를 기반으로 하기 때문에 기본적으로 자유음장 상태의 정확한 해석/예측이 선행되어야 한다. 따라서 현장에서 유도탄 발사실험을 3회 실시하였으며 실험 결과와 해석결과의 비교를 통해 검증을 수행하였다.

Fig. 2는 외부 발사실험의 마이크로폰 위치와 채널 번호를 보여준다.

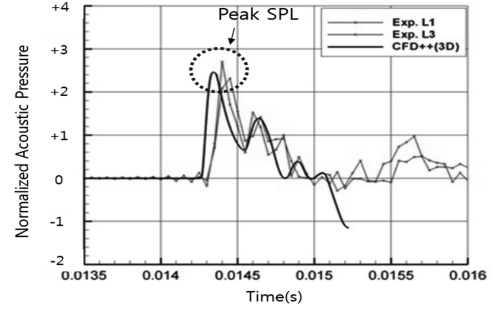
마이크로폰은 사수, 부사수 위치 및 Ch. 11, Ch. 12를 제외하고 발사관으로부터 2 m 거리에 원형으로 배치되어 있다. 유동해석에서는 해석 영역을 1 m로 한정하였으며, 해석과 실험의 비교는 사수, 부사수 위치 및 Ch. 11, Ch. 12 위치에서 시간에 따른 압력 값을 대상으로 하였다. Fig. 3은 해석과 실험 결과와 비교한 것으로 1.5 dB 미만의 피크음압레벨 차이를 보여 해석결과가 실험결과와 잘 일치함을 나타내고 있다.

소음해석을 통해 신뢰성을 갖는 0.75 m 거리에서 피크음압레벨(Peak sound pressure level<sup>11,17</sup>)의 방향성을 도출했으며 중심거리 2 m 위치에서의 실험결과와 비교한 결과는 Fig. 4와 같다. 해석결과는 실험결과와 마찬가지로 제트방향으로 소음방향성이 크게 나타나고 있다.

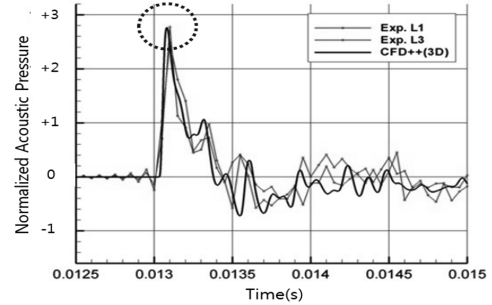
### 3. 실내 음장 해석

#### 3.1 실내 음장 해석과의 연계

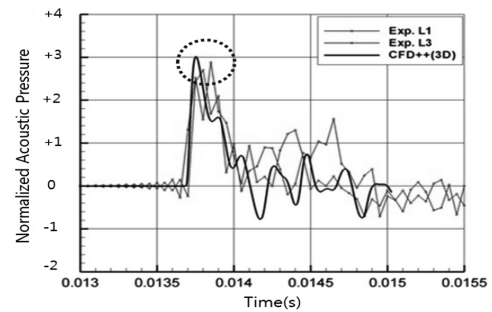
실내 음장 해석을 위해서는 유동해석이나 실험 결과



(a) Ch. 1



(b) Ch. 11



(c) Ch. 12

Fig. 3. Comparison of the pressure change over time in the Ch. 1,11,12 (L1: First firing L3: Third firing).

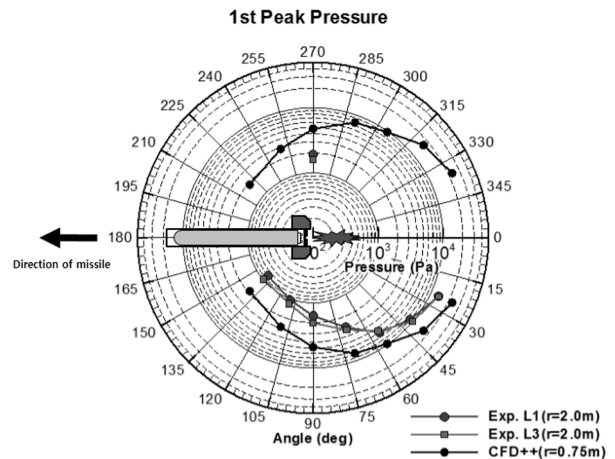


Fig. 4. Comparison of noise directivity.

를 소음원(Noise source)으로 입력해야 한다. 유동해석 결과는 3 축 방향의 속도 값과 압력으로 시간에 따른 모든 데이터를 저장하여 사용한다. 일반적인 소음해석 방법은 소음원 전체를 둘러싼 소음원 적분면을 구성하여 사용하게 되는데, 이 경우 적분면이 매우 넓을 경우 소음원 데이터는 적분면의 모든 격자점에서 그리고 모든 시간에 대한 해석 자료가 필요하므로 현실적인 해석 측면에서 매 시간간격마다 큰 데이터를 저장해야 하는 문제점을 해결해야 한다. 그러나 본 연구의 실내 음장해석에서는 후폭풍 발생 초기의 충격음이 실내 소음장 분포에 중요한 영향을 미치므로 비교적 짧은 시간의 유동 해석 결과만을 사용하는 것이 가능하다.

본 연구에서는 Fig. 5가 보여주는 것처럼 실내 음장 해석을 위하여 발사관 중심에서 0.5 m 떨어진 위치 구 면상에 고각 0°로부터 10° 간격으로 170° 까지 18개 지점의 유동해석 데이터 중 속도 및 압력 데이터를 소음원으로 사용하는 것으로 정의하였다.

Fig. 6은 노즐 출구로부터 0.5 m 거리에서의 1차 폭발파 피크압력을 유동해석 결과로 보인 것이며, 여기

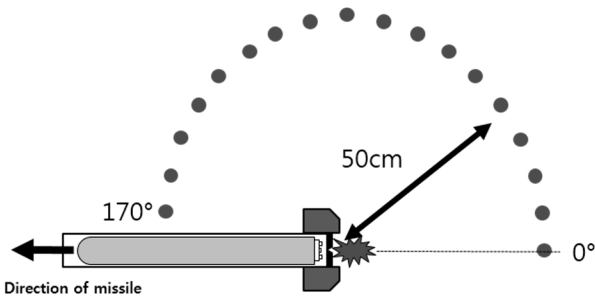


Fig. 5. Location of the noise sources of indoor sound field analysis.

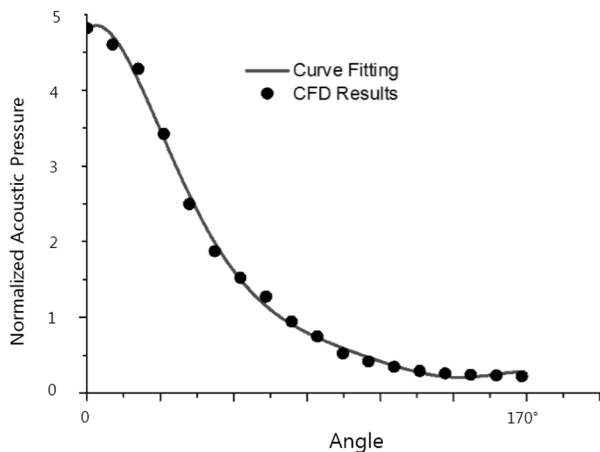


Fig. 6. Pressure peak interpolation results in accordance with the angle.

서 각도에 따른 Interpolation 곡선을 폭발파 모델의 소음원으로 사용하였다.

### 3.2 폭발파 모델

공간 전체를 전산유체 해석하는 것은 제약이 많으므로 노즐 근방의 근거리 유동 및 소음해석에 전산유체 해석을 사용하여 소음원을 추출하고 전체 실내음장 해석을 수행하는 방법을 적용하는 것이 필요하다. 이러한 접근방법으로 가장 일반적인 방법은 소음원을 둘러싸는 Kirchhoff surface를 구성하고 전산유체 해석결과를 사용하는 Kandula가 제안한 방법<sup>18)</sup>이 있다. 이 방법은 모든 선형 음향문제에 적용할 수 있지만, 발사 초기의 폭발파가 중요한 특수한 문제에 대해서는 많은 전산유체 데이터를 미리 저장해 놓고 있어야 하는 비효율성을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서는 폭발파의 특성을 고려하여 소음원과 수음자의 거리 및 각도만을 입력하여 해석적으로 소음 값을 얻는 형태로 효율적이며, 시간에 따른 전산유체 데이터의 저장이 필요 없는 매우 단순한 형태의 폭발파 모델(Blast wave model)을 개발하는 것이 필요하다.

지금까지는 주로 폭발물에 의한 구형(Spherical) 폭발파 모델이 주로 연구되어 왔다. 가장 많이 사용되는 대표적인 모델은 Manmohan 등이 제시한 Friedlander 폭발파 모델<sup>19)</sup>로 수식 (1)로 표현될 수 있다.

$$p = p_s(r) \left(1 - \frac{t}{t_s}\right) e^{-\frac{t}{t_s}} \quad (1)$$

여기서  $p_s(r)$ 는 반경  $r$ 위치에서 폭발파의 최대 압력, 그리고  $t_s$ 는 폭발파의 형태를 결정하는 파라미터를 나타낸다. Fig. 7은 전형적인 폭발에 의해 발생하는 Friedlander 폭발파의 사례를 보여주고 있다.

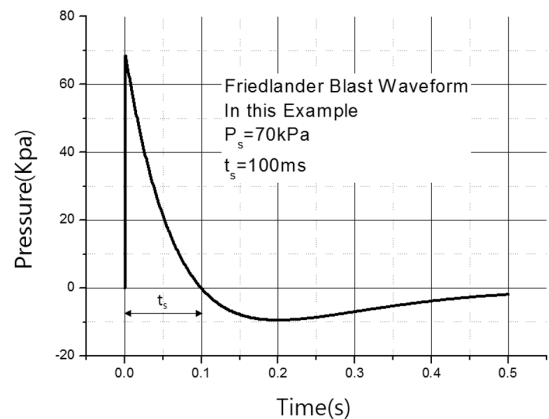


Fig. 7. Friedlander blast wave form.

그림에서 보여주는 것처럼 시간에 따라 양의 값을 갖던 압력이 약간의 음압을 형성하다 대기압으로 수렴되는 것을 보여주고 있다. 그러나 본 연구에서와 같이 소음의 방향성(Noise directivity)이 강한 문제에는 구형파가 아닌 각도에 따른 방향성을 고려하는 것이 필요하며, 이를 위해 새로운 폭발파 모델을 개발하고 적용하였으며 그 결과를 실험결과와 비교하였다.

### 3.2.1 선형 폭발파 모델

각도를 고려한 폭발파 모델의 가장 쉬운 접근 방법은 선형 파형 방정식(Linear blast wave equation, (2))을 이용하는 방법이다. 선형 폭발파 모델을 본 연구에 적용하지는 않았지만 방향성을 갖는 폭발파 모델 개발에 이론적 근거를 제공한다.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) \quad (2)$$

여기서  $p$ 는 압력,  $r$ 은 소음원 반경을 나타내며  $c$ 는 음속을 나타내고 있다. 방정식 (2)에서 폭발파 형태의 방정식 해는 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = \sum_{n=0}^{\infty} A_n P_n(\cos \theta) e^{-\frac{t}{t_s}} i_n \left( \frac{r}{ct_s} \right) \quad (3)$$

여기서  $P_n(\cos \theta)$ 는 르장드르의 다항식(Legendre polynomial),  $i_n \left( \frac{r}{ct_s} \right)$ 은 베셀함수(Spherical modified Bessel polynomial)를 나타내며,  $t_s$ 는 압력 피크의 발생시점부터 압력이 0에 도달하기까지의 시간을 나타낸다. 특히  $t_s$ 는 전산유체 해석결과 또는 압력측정 시험결과를 이용하여 폭발파 형태를 결정할 수 있는 상수로 사용될 수 있다. 르장드르 다항식과 Fig 5 위치에서의 베셀함수 값을 사용하여 소음원의 음향방사 방향성을 고려할 수 있지만 Friedlander 폭발파 모델과 다르게 시간에 따라 항상 양의 압력 값을 갖고 있어 실제 폭발파 형태와는 차이가 있다. 원거리에서 베셀함수의 특성은 수식 (4)로 표현할 수 있다.

$$\lim_{\frac{r}{ct_s} \rightarrow \infty} i_n \left( \frac{r}{ct_s} \right) = \frac{1}{r} e^{\frac{r}{ct_s}} \quad (4)$$

폭발파는 일반적으로 매우 짧은 시간에 대기압으로 수렴한다. 이러한 특성은 수식 (3)에서  $t_s$ 가 매우 작은 값을 갖는다는 것을 의미하며, 이 경우 Fig. 5에서 보여주는 소음원에서도 수식 (4)가 성립할 수 있다.

본 연구 대상의 폭발파 형태에서  $t_s$ 가 작은 값일 경

우 수식 (3)은 매우 단순한 형태의 다음과 같은 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\lim_{\frac{r_{0.5}}{ct_s} \rightarrow \infty} p = \frac{r_{0.5}}{r} e^{\left( \frac{r-r_{0.5}}{ct_s} - \frac{t}{t_s} \right)} p_{r_{0.5}}(\theta), \quad \left( t \geq \frac{r-r_{0.5}}{c} \right) \quad (5)$$

여기서  $r_{0.5}$ 는 Fig 5의 소음원 반경  $r=0.5$  m를,  $p_{r_{0.5}}(\theta)$ 는 거리 0.5 m에서 폭발파의 각도에 따른 피크 압력 값을 나타내는 함수를 나타내고 있으며 이러한 조건에서 수식 (3)과 같이 특별히 르장드르 다항식을 사용할 필요가 없어졌으며, 소음원에서 폭발파의 피크 값에 대한 모든 형태의 곡선 맞춤(Curve fitting) 수식을 사용하는 것이 가능하다. 그리고 수식 (5)는  $t \geq \frac{r-r_{0.5}}{c}$  조건에서 사용되어야 한다는 것을 알 수 있다.

### 3.2.2 단순 폭발파 모델

선형 폭발파 모델로부터 얻어진 수식 (5)는 매우 유용하지만, 폭발파의 비선형 특성 때문에 발생하는 압력피크 이후 음의 압력을 갖는 물리적 현상을 반영하지 못하고 있다. 따라서 물리적 특성을 반영하는 수식 (1)의 Friedlander 폭발파 모델을 폭발파의 방향성 특성을 단순한 형태로 반영하고 있는 수식 (5)에 적용하는 것이 필요하다.

우선 수식 (1)은 폭발파의 시간 특성만을 보여주는 식으로 우선 거리에 따른 폭발파 특성을 함께 반영하는 폭발파 모델을 구성하는 것이 필요하다. Fig. 8은 거리와 시간에 따른 폭발파의 거동을 나타내는 그림이다. 폭발파가 음속으로 진행할 경우 수식 (1)의 시간 항  $t$ 는 Fig. 8에서  $t'$ 로 대치되어야 하며 수식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$t' = t - \frac{r-r_{0.5}}{c} \quad (6)$$

그리고 폭발파 피크 값  $p_s(r)$ 이 거리에 따라  $r^{-1}$ 로 거동한다고 가정할 경우 수식 (1)은 수식 (7)로 표현된다.

$$p = p_{r_{0.5}} \frac{r_{0.5}}{r} \left( 1 - \frac{t - \frac{r-r_{0.5}}{c}}{t_s} \right) \exp \left( - \frac{t - \frac{r-r_{0.5}}{c}}{t_s} \right) \quad (7)$$

여기서  $p_{r_{0.5}}$ 는  $r_{0.5}$ 에서의 피크 압력을 나타내고 있다. Fig. 9는 수식 (7)에 의한 거리에 따른 폭발파의 거동을 보여주고 있다.

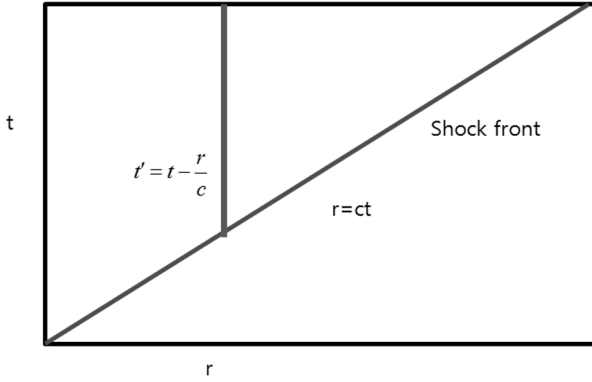


Fig. 8. Coordinate of blast wave.

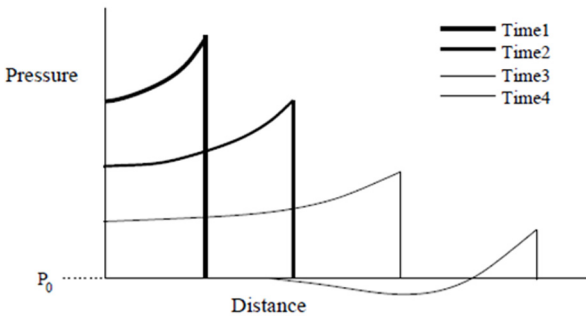


Fig. 9. Behavior depending on the distance of the wave.

식 (5)와 식 (7)을 합성한 형태로 물리적인 폭발파의 특성과 방향성을 표현할 수 있으며, 구현하기 쉬운 형태로 수식 (8)과 같이 단순 폭발파 모델(Simple blast wave model)로 정의할 수 있다.

$$p = p_{r_{0.5}}(\theta) \frac{r_{0.5}}{r} \left( 1 - \frac{t - \frac{r - r_{0.5}}{c}}{t_s} \right) \exp\left( - \frac{t - \frac{r - r_{0.5}}{c}}{t_s} \right) \quad (8)$$

$$t \geq \frac{r - r_{0.5}}{c}$$

여기서  $t_s$ 는 폭발파 형상을 결정하는 파라미터 값으로 실험결과 및 전산유체 해석결과 시간에 따른 폭발파의 변화 특성에 맞게  $2 \times 10^{-3}$  s를 사용하였으며  $p_{r_{0.5}}(\theta)$ 는 전산유체 해석결과를 사용하여 Fig. 6과 같이 곡선 맞춤된 값이다. 여기서  $c$ 는 음속 값으로 340 m/s를 적용하였다.

Fig. 10은 실외발사의 경우 단순 폭발파 모델 결과와 노즐 출구부로부터 0.5 m에서의 전산유체 해석결과를 비교한 그림이며 해석결과와 폭발파 모델결과가 잘 일치함을 알 수 있다. 또한 Fig. 11은 실외발사의 경우 단순 폭발파 모델 결과와 노즐 출구부로부터 2.0 m(Fig. 2)에서의 실험결과를 비교한 것으로 모든 채널에서 피

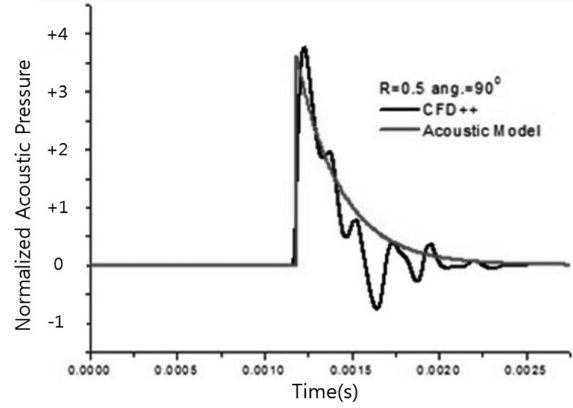


Fig. 10. Comparison of simple blast wave model results with CFD results.

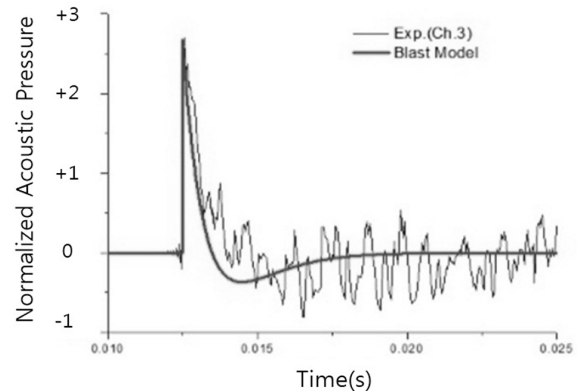


Fig. 11. Comparison of simple blast wave model results with experimental results.

크음압레벨이 2.0 dB미만의 미소한 차이를 보여 실험결과와 폭발파 모델 결과가 잘 일치함을 확인하였다.

### 3.3 실내 음장 해석에서 벽면 반사 및 입출구를 통한 소음 투과

실내에서 유도탄 발사에 따른 폭발파는 마이크론에 직접 전달, 벽면 반사에 의해 전달 그리고 입/출구를 통해 폭발파가 투과되는 경우가 존재한다. 따라서 실내 음장 해석에서 벽면에 의한 폭발파의 반사와 창문 및 입/출구를 통한 투과를 고려하는 방법을 개발하는 것이 필수적이다.

소음의 벽반사와 소음투과를 고려하는 방법으로 실제 소음원과 가상 소음원(Image acoustic source)을 사용하는 기하음향기법(Geometric acoustic method)을 본 연구의 해석 방법으로 사용하였다<sup>20)</sup>. 본 연구에서 참고 문헌의 접근 방법과의 차이점은 소음원이 방향성이 없을 경우는 가상 소음원을 사용하는 것이 편리하지만 방향성이 존재하는 경우 벽면 반사에 따라 소음원의

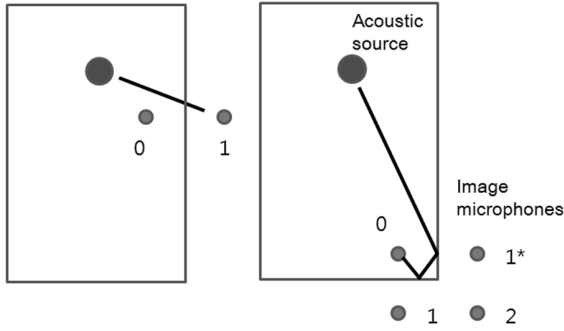


Fig. 12. Wall reflective analysis method(Left: 1 time wall reflective, Right : twice wall reflective).

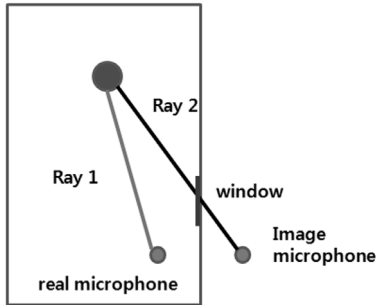


Fig. 13. Image microphone processing method in the case where the window.

방향성을 바꿔 주어야하기 때문에 프로그램에 복잡성이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 소음원이 아닌 실제 실내 측정점에 대한 가상 측정점(Image microphone point)의 위치를 기하음향기법에 의하여 벽면반사에 따라 반복적으로 구하는 방법으로 개발했다. Fig. 12는 한 예로서 소음원과 마이크론의 위치에 따른 벽면 반사 조건을 보여주고 있다. 벽면 반사는 소음원과 벽면 그리고 마이크론이 동일 평면상에서 발생한다. 벽면에 1회 반사되는 경우 그림과 같이 마이크론 0에 전달 경로는 실내공간 외부에 있는 가상적인 마이

크로폰 1에 폭발파가 직접 전달되는 것과 동일하다. 벽면 2회 반사의 경우 그림에서 보여주는 것처럼 소음원으로부터 마이크론 0에 도달되는 경로는 가상 마이크론 2에 직접 전달되는 것과 동일하다. 이런 방식으로 3회 반사, 4회 반사로 계속 실제 마이크론에 대한 가상 마이크론의 위치를 결정해 나갈 수 있다. 창문, 개폐문 등 소음 투과 요소가 있는 경우를 반영하기 위해서는 소음원과 가상 마이크론을 연결하는 음향 광선(Acoustic ray)을 구성한다. Fig. 13은 창문이 있을 경우이며 그림에서 보여주는 것처럼 광선이 창문을 통과하는 경우 가상 마이크론은 가상 마이크론 위치 데이터 집합으로부터 제거된다.

#### 4. 실내음장 해석 결과

수치해석 결과의 타당성을 확인하기 위해서 단순 폭발파 모델을 이용하여 실내음장해석을 수행한 결과를 실내발사 실험결과와 비교하였다.

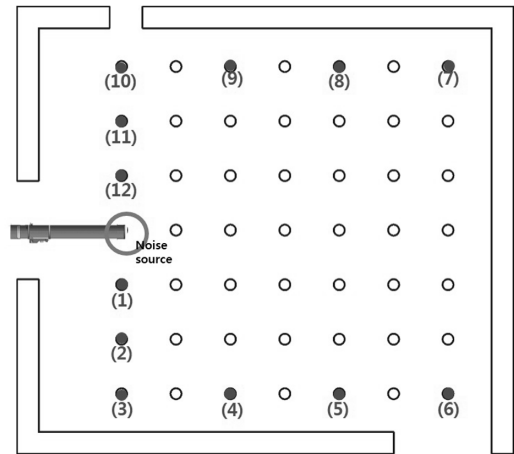
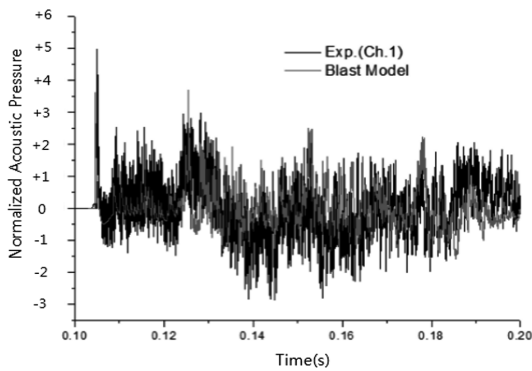
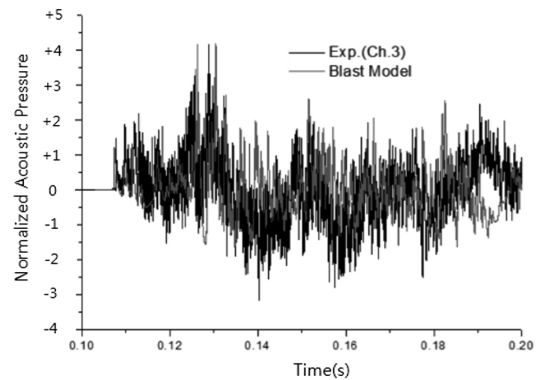


Fig. 14. Interior shots measurement location.



(a) Ch. 1



(b) Ch. 3

Fig. 15. Comparison of experimental results with numerical analysis.

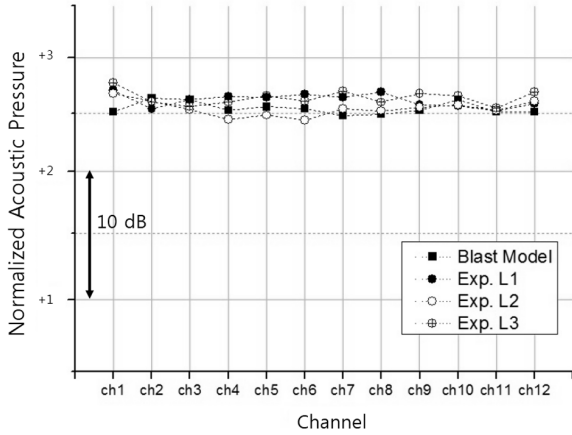
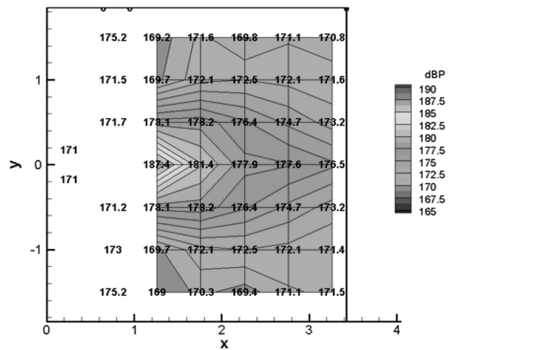
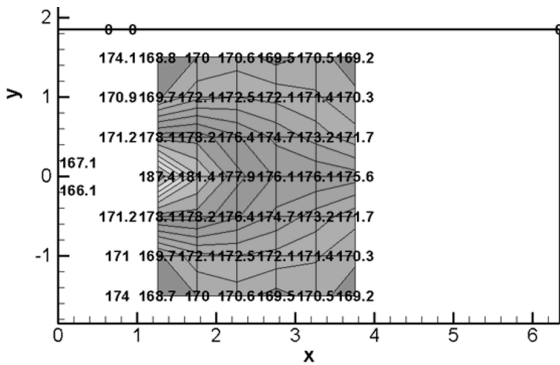


Fig. 16. Comparison of peak sound pressure level for all channels.



(a) 27 m<sup>3</sup>



(b) 50 m<sup>3</sup>

Fig. 17. numerical analysis results of diverse spaces.

실험은 35 m<sup>3</sup> 크기의 실내공간에서 시행되었으며 마이크로폰은 Fig. 14에 보인 바와 같이 후폭풍의 영향이 적을 것이라 판단되는 정면과 측면 벽면을 따라 12채널이 설치되었다.

Fig. 15는 실험과 수치해석 결과를 비교한 것으로 모든 채널에서 동일한 시간-압력 패턴을 보였다. Fig. 16은 각각의 채널에 대해 3회 실험과 수치해석 결과에

다른 피크음압레벨을 나타낸 것으로 실험과 수치해석 결과가 3.0 dB 미만의 차이를 보였으며 이를 통해 해석 결과가 타당한 것으로 판단하였다.

개발된 실내음장 해석방법을 적용하여 공간 내부의 피크음압레벨 분포를 실험을 통하지 않고 예상할 수 있으며 Fig. 17과 같이 다양한 공간 크기에서의 피크음압레벨에 대한 실내음압분포를 계산할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 빠른 시간에 실내 공간 내부의 음장 해석을 할 수 있는 방법을 개발하였다.

충격소음의 방향성 구현이 가능한 단순 폭발파 모델 (Simple blast wave model)을 개발했으며 충격소음의 벽면에 의한 반사, 창문 및 출입구를 통한 투과를 반영하기 위해 기하음향기법(Geometric acoustic method)을 사용하였다. 실내 음장 해석을 수행한 결과, 실험결과와 비교 시 3.0 dB 미만의 피크음압레벨 차이와 동일한 시간-압력 패턴을 보여 해석결과의 타당성을 입증하였다.

개발된 실내음장 해석방법을 이용하여 실험에 의한 실측을 거치지 않고 다양한 공간 형태에서의 피크음압레벨 분포를 빠르게 파악할 수 있으며 이 연구 결과는 향후 각종 유도탄 및 폭발물의 인체위해성 평가에 활용될 수 있으리라 예상된다.

## References

- 1) H. H. Chiu, E. G. Plett, M. Summerfield and C.W. Nelson, "Blast-Noise Environment of Impulsive Firing", AIAA 74-48, 1974.
- 2) R. F. Chaillet, D. C. Hodge, G. R. Garinther and F. N. Newcomb, "High Intensity Impulse Noise: A Major Problem", Technical Memorandum, U.S Army Human Engineering Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.1-32, 1964.
- 3) G. R. Garinther and K. D. Kryter, "Auditory and Acoustical Evaluation of Several Shoulder-rifles", Technical Memorandum, U.S Army Human Engineering Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.1-65, 1965.
- 4) E. B. Shank and G. R. Grinther, "Firing from Enclosures with LAW, DRAGON an TOW", Technical Memorandum 16-75, U.S. Army Human Engineering Laboratories, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.39, 1975.
- 5) G. R. Price, "Firing from Enclosures with 90mm Recoilless Rifle: Assessment of Acoustic Hazard," Technical



- Memorandum 11-78, U.S. Army Human Engineering Laboratory, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.1-14, 1978.
- 6) U.S. Army Human Engineering Lab., "Maximum noise level for Army Materiel Command Equipment", HEL Standard S-1-63B, Aberdeen Proving Ground, MD, pp.16, 1965.
  - 7) A. Glorig, W. D. Ward and J. Nixon, "Damage Risk Criteria and Noise-induced Hearing Loss", Arch. Otolaryngol., No.74, pp.413-423, 1965.
  - 8) W. J. Murphy and C. A. Kardous, "A Case for using A-weighted Equivalent Energy as a Damage Risk Criterion", National Institute for Occupational Safety and Health, EPHB Report, No.350-11a, 2012.
  - 9) K. Buck, "Performance of Different Types of Hearing Protectors Undergoing High-Level Impulse Noise", International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), Vol. 15, No. 2, pp. 227-240, 2009.
  - 10) A. Dancer and R. Franke, "Hearing Hazard from Impulse Noise: A Comparative Study of Two Classical Criteria for Weapon Noises (Pfander Criterion and Smoorenburg Criterion) and the LAeq8 Method, Acustica - Acta Acustica", Vol. 3, pp. 539 - 547, 1995.
  - 11) MIL-STD-1474D, "Department of Defense Design Criteria Standard", 1996.
  - 12) C. P. Chan, K. H. Ho, K. K. Kan and J. H. Stuhmiller, "Evaluation of Impulse Noise Criteria using Human Volunteer Data", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 110, Issue 4 , 2001.
  - 13) B. H. Kong, S. S. Jeong, E. K. Son, S. B. Lee and K. H. Song, "Interior Analysis of Impulse Noise from Weapons in a Perspective on Damage Risk Using the Alternative Image Theory", 19th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 10.2515/6, pp. 2013-2031, 2013.
  - 14) J. H. Patterson and D. L. Johnson, "Temporary Threshold Shifts Produced by High Intensity Free field Impulse Noise in Humans Wearing Hearing Protection", USAARL Report, No. 8, pp.94-46, 1994.
  - 15) J. H. Patterson, "Proposed New Procedure for Estimating Allowable Number of Rounds for Blast Overpressure Hazard Assessment", U.S. Army Aeromedical Research Laboratory (USAARL), Report, No.98-03, 1997.
  - 16) K. Buck, "Performance of Hearing Protectors in Impulse Noise", RTO HFM Lecture Series, 2000.
  - 17) K. H. Song and, B. H. Kong, "A Study of How to Evaluation of Impulse Noise Based on MIL-STD-1474D", Fall Conference of the Korean Society of Safety, pp. 51, 2014.
  - 18) M. Kandula, "Simulation of Supersonic Jet Noise with Nonlinear CFD and Kirchhoff Surface Integral", Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 2, No. 4, pp. 456-465, 2008.
  - 19) M. D. Goel, V. A. Matsagar, A. K. Gupta and S. Marburg, "An Abridged Review of Blast Wave Parameters" Defence Science Journal, Vol. 62, No. 5, pp. 300-306, 2012.
  - 20) T. Funkhouser, I. Carlbom, G. Elko, G. Pingali, M. Sondhi and J. West, "A Beam Tracing Approach to Acoustic Modeling for Interactive Virtual Environments", ACM Computer Graphics, SIGGRAPH'98 Proceedings, pp. 21-32, 1998.