



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

지형 효과를 고려한  
폭발 소음 시뮬레이션

A reactive hydrodynamic simulation of a  
concrete-confined detonation for estimating  
noise propagation with terrain attenuation  
effects

2021년 8월

서울대학교 대학원

항공우주공학과

지 준 태

# 지형 효과를 고려한 폭발 소음 시뮬레이션

A reactive hydrodynamic simulation of a  
concrete-confined detonation for estimating  
noise propagation with terrain attenuation  
effects

지도 교수 여 재 익

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함  
2021년 6월

서울대학교 대학원  
항공우주공학과  
지 준 태

지준태의 공학석사 학위논문을 인준함  
2021년 6월

위 원 장 \_\_\_\_\_

부위원장 \_\_\_\_\_

위 원 \_\_\_\_\_

# 초 록

한 지점에서 폭발이 발생하면 고온 및 고압 가스가 방출된 다음 폭풍과 형태로 대기를 통해 전파된다. 이로 인해 환경 소음의 형태로 폭발음이 발생하여 폭발 원을 둘러싼 주변 주민들에게 청각 손상을 일으키는 것으로 알려져 있다. 이러한 소음 수준을 줄이기 위한 노력의 일환으로 폭발과 관련된 소음을 완화하고 최소화하기 위해 방음벽이 있는 폭발시험장을 설치한다. 본 연구에서는 콘크리트 방음벽 내부의 초기 폭발 원에서 실제 폭발 압력을 계산하고 실제 지형에서 환경 소음 전파를 평가하기 위한 수치 예측을 진행하였다. 특히, 실제 지형에서 구형 폭발에 대한 지배적인 보존 방정식에 구체적인 상태 방정식을 폭발시험장에서 3m 이내에 적용하고 폭발 원에서 수 킬로미터 떨어진 곳에서 계산한 데이터를 실험 데이터와 비교하였다. 더욱이 소음 감소량은 먼저 실제 지형의 소음 전파를 측정 값과 비교 한 먼 거리에서 소멸되는 방음벽에 의해 흡수된 폭발 압력을 고려하여 예측하였다.

**주요어** : 소음감쇠(Noise attenuation), 폭굉(Detonation), 콘크리트(Concrete), 환경소음 (Environmental noise)

**학 번** : 2019-27077

# 목 차

제 1 장 서 론.....	1
제 2 장 폭풍과 소음 시뮬레이션 .....	3
제 1 절 지배방정식과 상태방정식 .....	3
제 2 절 반응 모델.....	6
제 3 절 방음벽 및 지형 모델링 .....	7
제 4 절 환경 소음 분석 .....	9
제 3 장 검증 및 결과 .....	11
제 1 절 검증 및 근거리 계산 결과.....	11
제 2 절 원거리 계산 결과 .....	14
제 4 장 결론 .....	19
참고문헌.....	20
Abstract.....	22

## 표 목차

[표 1] .....	6
[표 2] .....	6
[표 3] .....	16

## 그림 목차

[그림 1] .....	12
[그림 2] .....	13
[그림 3] .....	13
[그림 4] .....	14
[그림 5] .....	15
[그림 6] .....	15
[그림 7] .....	16
[그림 8] .....	17
[그림 9] .....	18

# 제 1 장 서 론

고폭약은 건설 및 군사용으로 다양한 용도로 자주 사용된다. 폭발물이 폭발하면 초음속으로 전파되는 폭굉과 함께 충격파가 생성된다. 일부 연구자들은 다양한 에너지 물질에 대한 폭발 효과를 정확하게 모델링하기 위해 다양한 수치적 시도를 수행하였다. Kim 등[1]은 반응 속도 모델을 실험적으로 결정하기 위해 기존 방법에서 12 개가 아닌 4 개의 매개 변수만으로 새로운 반응 속도 모델을 개발하여 복잡한 Ignition & Growth 과정을 크게 단순화시켰다. Yu 등[2]은 HMX 및 RDX와 같은 일반적인 고폭약에 의한 폭발에 의한 고체 경계에서 압력 손실의 양을 추정하기 위해 Gap test에서 압력 감쇠 연구를 수행하였다. 폭발이 시작되면 고압 응축 가스가 단시간 내에 대량으로 생성된다. 생성된 가스는 폭굉파의 형태로 주변 공기로 전파되고 이후에 근처의 고체 구조를 통과하면서 전파되고 감쇠된 다음 야외에서 소멸된다. 폭굉파는 충격파의 형태로 공기 중으로 전파되고 충격 소음이 발생하여 인간의 청각에 악영향을 미친다. 지속적인 임펄스 소음(Impulse noise)은 청력 손실을 초래할 수 있다. 따라서 폭발 원에서 발생하는 소음 수준을 예측하고 이를 최소화하는 방법을 찾는 것이 중요하다.

폭발물이 폭발하면 고압 가스가 발생하여 폭굉파가 발생한다. Baker 등[3]은 다양한 지형에서 이러한 폭발 파를 수치적으로 분석하였다. Benselama 등[4]은 폭발물의 모양을 변경하여 터널에서 폭굉 파의 반사와 전파를 연구하였다. Clutter 및 Stahl 등[5]은 다양한 산업 환경에서 폭발물에 의한 폭굉파 간의 상호 작용을 분석했다. 폭굉파는 최고 압력에 도달하고 표준 압력보다 낮은 음압을 통과한 다음 표준 압력으로 돌아가는 충격파이다. 인간은 소음의 형태로 표준 압력(대기압)의 압력 변화를 감지하고 느낄 수 있습니다. 따라서 폭굉파에 의해 생성된 고압은 인간에게 큰 소음으로 작용하며 환경 소음을 유발한다. 따라서 폭발 후 공기로 전파되는 폭발 압력을 최소화해야 한다. 본 연구에서는 폭발 시험장에서 발생하는 폭발 압력을 줄이기 위해 폭 2m, 길이 1m, 높이

1m, 두께 0.15m의 직육면체 형태의 콘크리트 방음벽을 모델링하여 시뮬레이션을 진행하였다. 압력의 최고점은 음압 레벨(Sound pressure level)을 통해 실제 데시벨로 변환 된 후 수치적으로 예측하였고 측정된 데시벨과 비교하였다.

인간에게 작용하는 소음은 지형의 영향을 많이 받는다. 폭발 원에서 같은 거리에 있는 지점이라도 감지하는 소음 수준이 다를 수 있다. 이는 폭발로 인해 생성 된 압력이 주변 지형에 흡수되고 반사되기 때문이다. 따라서 폭발 지점에서 멀리 떨어진 다양한 거리에서의 소음 수준을 결정할 때 이러한 지형 효과를 가장 잘 이해해야 한다. 본 연구에서는 그 영향을 추정하기 위해 실제 지형을 계산상에 고려하였다. 이를 위해 실제 지형 좌표의 고도를 추출하여 STL (Stereolithography) 파일로 변환하여 parametrized level-set method를 full reactive hydrodynamic simulation에 사용할 수 있도록 하였다. Wang et al 등[6]은 ANSYS를 사용하여 평면 지형의 경우 반사 된 압력을 계산하여지면 반사의 효과를 보여주었다. Kuzu et al 등[7]은 경험적 방정식을 통해 폭풍파로 인한 과압의 작동 및 지질학적 매개 변수와 소음 정도를 예측하였다. 일반적인 음향 솔버는 주기적인 노이즈 소스(Periodical noise source)에 대한 질량 및 운동량 보존 법칙을 지배방정식으로 사용한다. 그러나 본 연구에서의 반응성 유체 역학 솔버는 Eulerian 유체 방정식을 사용하여 고 폭발 폭발에 대한 질량, 운동량, 에너지, 반응물의 보존 법칙을 결정하며 시간에 따라 변화하는 물리량을 정확하게 계산하는 장점이 있다. 또한 주기적 소음이 아닌 임펄스 소음(Impulsive noise)을 계산하기 위해 콘크리트 챔버 내의 폭발로 인한 초기 압력 감쇠 예측을 진행하였다. 폭발 원은 91% RDX와 9% wax (Comp-A)로 구성된 구모양의 폭약을 사용하였다. 이러한 복합 폭발물에 대한 Jones-Wilkins-Lee (JWL) 매개 변수는 열 평형 코드인 Cheetah[8]을 사용하여 결정되었다.

## 제 2 장 폭풍과 소음 시뮬레이션

### 제 1 절 지배방정식과 상태방정식

이전 연구에서 Bin 등[9]이 총구 소음을 계산하기 위해 2 차원 Eulerian 방정식을 사용 하였듯이, 폭발물로 인한 충격 소음 시뮬레이션을 계산하기 위해 3 차원 Eulerian 방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 본 연구에서는 위에서 언급 한 3 차원 Eulerian 방정식 에 반응 모델 항이 추가 된 솔버, 즉 반응성 유체 역학 솔버(Hydrodynamic solver)를 사용하였다. 반응성 유체 역학 솔버는 반응 모델 항이 3D 오일러 방정식 세트에 추가되는 미분방정식이다. 물질이 고온 고압에 어떻게 반응하는지 정확하게 시뮬레이션 할 수 있는 솔버이다. 폭발음을 분석하기 위해 폭발물이 반응하기 시작하고 반응이 진행됨에 따라 압력과 온도가 상승하고 공기로 전파되는 물리량을 계산하여 이를 통해 폭발음에 의해 전파되는 압력을 계산하고 폭발음을 예측할 수 있다. PETN 및 Comp-A의 충격에 의한 폭발에 대한 반응성 역학과 함께 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식을 나타내는 3 차원 오일러 방정식이 사용되었다. 폭발에 대한 방정식은  $\varphi = 1$  및  $\delta = 0$ 으로 설정하였고 콘크리트와 같은 비반응성 고체에 동일한 방정식을 적용하기 위해  $\varphi = 0$  및  $\delta = 1$ 으로 설정하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2 + p)}{\partial x} + \frac{\partial \rho uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} - \delta \left( \frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{xz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \frac{\partial \rho vu}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2 + p)}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} - \delta \left( \frac{\partial S_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{yz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho wu}{\partial x} + \frac{\partial \rho wv}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2 + p)}{\partial z} - \delta \left( \frac{\partial S_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial S_{zz}}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$



$$\begin{aligned} & \frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial u(\rho E + p)}{\partial x} + \frac{\partial v(\rho E + p)}{\partial y} + \frac{\partial w(\rho E + p)}{\partial z} - k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \\ & - \varphi \rho Q_i \dot{\omega}_i + \delta T (\alpha (3\lambda + 2G) (\dot{\epsilon}_{xx} + \dot{\epsilon}_{yy} + \dot{\epsilon}_{zz}) + \frac{\rho c}{T} \dot{T}) - \delta S_E = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\varphi \left( \frac{\partial Y_i}{\partial t} + \frac{\partial Y_i u}{\partial x} + \frac{\partial Y_i v}{\partial y} + \frac{\partial Y_i w}{\partial z} - \dot{\omega} \right) = 0 \quad (6)$$

$$S_E = \frac{\partial (uS_{xx} + vS_{xy} + wS_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (uS_{xy} + vS_{yy} + wS_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial (uS_{xz} + vS_{yz} + wS_{zz})}{\partial z} \quad (7)$$

위의 방정식에서  $\rho, u, v, w, E, p, Q_i, \dot{\omega}_i, T, k, \alpha, \lambda, G, \dot{\epsilon}_{ij}, Y_i, S_{ij}$  는 밀도, x-, y-, z- 방향 속도 성분, 단위 질량 당 에너지, 압력, 방출된 화학 에너지, 화학 반응 속도, 온도, 전도 계수, 열팽창 계수, Lamé's first parameter, 전단 계수, 변형률, 반응 혼합물의 질량 분율 및 편차 응력을 의미한다. 지배 방정식은 각각 시간 및 공간 이산화에서 3 차 Runge-Kutta 및 ENO (Essentially Non-Oscillatory) 방법을 사용하였다.

구조물의 계산을 위해 다음 방정식을 사용하여 편차 응력을 계산하였다.

$$\frac{\partial S_{xx}}{\partial t} + \frac{\partial (uS_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial (vS_{xx})}{\partial y} + \frac{\partial (wS_{xx})}{\partial z} = 2\Omega_{xy} S_{xy} + 2\Omega_{xz} S_{xz} + 2G\bar{D}_{xx} \quad (8)$$

$$\frac{\partial S_{xy}}{\partial t} + \frac{\partial (uS_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial (vS_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial (wS_{xy})}{\partial z} = \Omega_{xy} (S_{yy} - S_{xx}) + \Omega_{xz} S_{zy} - \Omega_{zy} S_{xz} + 2G\bar{D}_{xy} \quad (9)$$

$$\frac{\partial S_{yy}}{\partial t} + \frac{\partial (uS_{yy})}{\partial x} + \frac{\partial (vS_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial (wS_{yy})}{\partial z} = 2\Omega_{xy} S_{xy} + 2\Omega_{yz} S_{yz} + 2G\bar{D}_{yy} \quad (10)$$

$$\frac{\partial S_{xz}}{\partial t} + \frac{\partial (uS_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial (vS_{xz})}{\partial y} + \frac{\partial (wS_{xz})}{\partial z} = \Omega_{xz} (S_{zz} - S_{xx}) + \Omega_{xy} S_{yz} - \Omega_{yz} S_{xy} + 2G\bar{D}_{xz} \quad (11)$$

$$\frac{\partial S_{yz}}{\partial t} + \frac{\partial(uS_{yz})}{\partial x} + \frac{\partial(vS_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(wS_{yz})}{\partial z} = \Omega_{yz}(S_{zz} - S_{yy}) + \Omega_{yx}S_{xz} - \Omega_{xz}S_{xy} + 2G\bar{D}_{yz}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial S_{zz}}{\partial t} + \frac{\partial(uS_{zz})}{\partial x} + \frac{\partial(vS_{zz})}{\partial y} + \frac{\partial(wS_{zz})}{\partial z} = 2\Omega_{yz}S_{yz} + 2\Omega_{xz}S_{xz} + 2G\bar{D}_{zz} \quad (13)$$

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (14)$$

$$\bar{D}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{1}{3} D_{kk} \delta_{ij} \quad (15)$$

식 (8) ~ (15)는 음원에서 폭발과 압력을 감쇠시키는 콘크리트 챔버의 동적 편차 응력을 계산하기 위해 사용되었다. 여기서,  $S_{ij}, \Omega_{ij}, \bar{D}_{ij}$  및  $\delta_{ij}$ 는 각각 편차 응력, 스핀 텐서, 편차 변형률 텐서 및 Kronecker delta를 나타낸다.

반응성 유체 역학 시뮬레이션을 위해 2개의 고폭약과 1개의 콘크리트 챔버와 같은 모든 고체 물질에 대한 EOS가 필요하다. 식 (16)의 Jones-Wilkins-Lee (JWL) EOS는 폭발 압력을 계산하는 데 사용되었다. 이때  $A, B, R_1, R_2, w, \rho_0$ 는 폭약의 종류에 따라 달라지는 파라미터들을 의미한다. 식 (17)의 Mie-Gruneisen EOS는 콘크리트의 압력을 계산할 때 사용하고, 여기서  $\rho_0, \Gamma_0, s, c_0$ 는 각각 초기 밀도, Gruneisen 계수, 선형 Hugoniot 경사 계수 및 bulk sound speed를 나타낸다. 콘크리트, PETN 및 Comp-A의 EOS 매개 변수는 표 1에 요약되어 있고 기압은 식 (18)인 이상기체 방정식을 사용하여 계산하였다.

$$P_{\text{explosive}} = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + w \frac{E}{V}; \quad V = \frac{\rho_0}{\rho} \quad (16)$$

$$P_{\text{concrete}}(\rho, e) = \rho_0 \Gamma_0 e + \begin{cases} \frac{\rho_0 c_0^2 \varphi}{(1-s\varphi)^2} \left[ 1 - \frac{\Gamma_0}{2} \varphi \right] & \text{if } \rho \geq \rho_0 \\ c_0^2 (\rho - \rho_0) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

$$P_{\text{air}} = (\gamma - 1) \rho e \quad (18)$$

표 1. 고폭약과 콘크리트에 대한 상태방정식 매개변수

	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_0$ (m/s)	$S$	$\Gamma$	$A$ (GPa)	$B$ (GPa)	$R_1$	$R_2$	$\omega$
<b>Concrete</b>	2477	4850	-15.1	0.8					
<b>Explosive 1 (PETN)</b>	1778	-	-	-	532.49	7.14	3.99	0.95	0.40
<b>Explosive 2 (Comp-A)</b>	1732	-	-	-	532.71	6.23	4.10	0.96	0.39

## 제 2 절 반응 모델

압력 유도 반응은 KYP 모델을 사용하여 모델링하였다. 이 모델은 식 (19)에 표시된 것처럼 12 개의 알려지지 않은 매개 변수 [1] 대신 4개의 매개변수를 사용하는 단순화 시킨 모델이다. 점화는 충격 압축으로 인해 발생하며 격리 된 핫스팟 연소로 인해 성장이 발생한다. I, G, a 및 b의 네 가지 매개 변수는 각각 점화 상수, 성장 상수, 압축 감도 및 압력 감도를 나타낸다. 또한,  $\lambda$ 는 폭약의 질량 분율의 순간적인 변화를 나타내는 반응 진행 변수를 의미한다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = I(1-\lambda)\eta^a + G(1-\lambda)p^b, \eta = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \quad (19)$$

표 2. 두가지 폭약에 대한 반응 모델 매개변수

Parameters	Explosive 1 (PETN)	Explosive 2 (Comp-A)	Units

I	0.94	12.10	$\mu s^{-1}$
a	4.0	4.0	-
G	41.8	1074.4	$\mu s^{-1} Mbar^b$
b	1.3	1.65	-

### 제 3 절 방음벽 및 지형 모델링

Level set은 식 (20)과 같이 외부 영역과 내부 영역의 경계를 함수로 정의한다. 우선 콘크리트 챔버 경계를 정의하였고 그 다음으로 3D 지형 정보를 계산 영역에 삽입하였다.

$$\phi_t + \vec{V} \cdot \nabla \phi = 0. \quad (20)$$

STL 파일 형식은 원하는 모양을 여러 삼각형으로 나누고 각 삼각형의 꼭지점 좌표와 삼각형 외부로 향하는 법선 벡터를 제공한다. 삼각형의 각 변에 해당하는 벡터가 각각  $U_{1,n}, U_{2,n}, U_{3,n}$  이면 식과 같이 Gram-Schmidt 직교 과정을 사용하여 임시 벡터  $v_{1,n}, v_{2,n}, v_{3,n}$  을 생성한다. 벡터  $U_{1,n}, U_{2,n}, U_{3,n}$  및  $v_{1,n}, v_{2,n}, v_{3,n}$  를 포함하는 평면은 각각  $q_{1,n}, q_{2,n}, q_{3,n}$  로 정의된다.  $q_{1,n}, q_{2,n}, q_{3,n}$  평면은 식 (22)로 표현된다.

$$\begin{aligned} v_{1,n} &= U_{2,n} - \left( \frac{U_{2,n} \cdot U_{1,n}}{U_{1,n} \cdot U_{1,n}} \right) U_{1,n} \\ v_{2,n} &= U_{3,n} - \left( \frac{U_{3,n} \cdot U_{2,n}}{U_{2,n} \cdot U_{2,n}} \right) U_{2,n} \\ v_{3,n} &= U_{1,n} - \left( \frac{U_{1,n} \cdot U_{3,n}}{U_{3,n} \cdot U_{3,n}} \right) U_{3,n} \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned}
q_{1,n}(G_k) &= (G_k - P_{1,n}) \cdot v_{1,n} \\
q_{2,n}(G_k) &= (G_k - P_{2,n}) \cdot v_{2,n} \\
q_{3,n}(G_k) &= (G_k - P_{3,n}) \cdot v_{3,n}
\end{aligned} \tag{22}$$

첫 번째 부호 거리 함수는 삼각형 기둥을 생성하고 삼각형 기둥의 내부 그리드 포인트에 레벨 값을 할당하여 생성한다. 이렇게 얻은 거리 함수에서 표면과 다른 표면이 서로 접촉 할 때 부적절한 경계 표면이 발생한다. 이러한 잘못된 인터페이스를 수정하려면 식 (23)과 같은 공식을 사용하여 정의해야 한다.  $\overline{V}_{1,n}$ 는 삼각형의 두 정점에 의해 생성된 t에 대한 매개변수화 된 직선이다. 식 (26)에서  $V_{1,n}$ 은  $0 < t < 1$  범위에있는 임의의 점 ( $G_k$ )과 가장자리 사이의 직선과의 교차점을 의미한다.

$$\begin{aligned}
\overline{V}_{1,n} &= \begin{bmatrix} P_{1,n,x} + (P_{2,n,x} - P_{1,n,x})t \\ P_{1,n,y} + (P_{2,n,y} - P_{1,n,y})t \\ P_{1,n,z} + (P_{2,n,z} - P_{1,n,z})t \end{bmatrix} \\
t &= \frac{(P_{1,n} - G_k) \cdot (P_{2,n} - P_{1,n})}{|P_{2,n} - P_{1,n}|^2}
\end{aligned} \tag{23}$$

$$\overline{\phi}^2(G_k) = \begin{cases} |P_{1,n} - G_k|, t \leq 0 \\ |V_{1,n} - G_k|, 0 < t < 1 \\ |P_{2,n} - G_k|, 1 \leq t \end{cases} \tag{24}$$

그러면 점  $P_{1,n}$ 과 점  $G_k$  사이의 거리는 매개 변수 t가 0보다 작은 부분에 대한 최단 거리이며, 점  $P_{2,n}$ 과 점  $G_k$  사이의 거리는 매개 변수 t가 1보다 큰 범위에서 가장 짧아지게 된다. 이는 식 (25)으로 표현된다. 내부와 외부로 구분하는 부호는 식 (26)과 같이 정의된다. 그 다음 결정된 최소값( $\overline{\phi}_n^2$ )을 레벨 세트 함수로 설정하였다.

$$sign = \left\{ \begin{array}{l} \frac{(G_k - P_{1,n}) \cdot N_n}{\|G_k - P_{1,n}\| \cdot N_n}, t \leq 0 \\ \frac{(G_k - V_{1,n}) \cdot N_n}{\|G_k - V_{1,n}\| \cdot N_n}, 0 < t < 1 \\ \frac{(G_k - P_{2,n}) \cdot N_n}{\|G_k - P_{2,n}\| \cdot N_n}, 1 \leq t \end{array} \right\} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \phi_n^2 &= sign \times \phi_n^{-2}(G_k) \\ \phi_n^2 &= \min(\phi_n^2(G_k)) \end{aligned} \quad (26)$$

앞서 언급한 3D 레벨 설정 방법을 사용하여 근거리를 계산하기 위해 AutoCAD를 사용하여 콘크리트 방음벽을 만든 후 형상을 레벨 기능을 부여하고 실제 계산 영역을 STL 형식으로 가져와 계산에 적용하였다. 실제 지형의 경우 한국 토지 정보 플랫폼 (<http://map.ngii.go.kr/>)에서 지형 좌표 고도를 획득한 후 AutoCAD를 이용하여 STL 파일을 생성하여 계산에 삽입하였다. 이를 통해 실제 계산 영역에 원하는 형상을 삽입할 수 있었다.

## 제 4 절 환경 소음 분석

일반적으로 노이즈 분석은 방정식 (20)으로 표현되는 Lighthill[10]의 방정식 시작된다. Lighthill의 방정식은 질량 및 운동량 보존 법칙을 조합한 식으로 이는 곧 고체 표면의 임의 운동과 잡음 생성을 고려하는 단일 방정식인 Ffowcs-Williams 및 Hawking 방정식으로 이어진다. 소음 분석은 일반적으로 Ffowcs Willams 및 Hawking 방정식을 사용하여 주기적 소음원의 밀도 및 압력 섭동을 계산하는 프로세스를 나타낸다.

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - a^2 \frac{\partial^2 \rho}{\partial x_i^2} = \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial x_i \partial x_j} \quad (20)$$

음향 솔버와는 달리 현재 반응성 유체 역학 솔버를 통해 소음 수준을 계산하는 방법에 차이가 있다. 반응성 유체 역학적 접근 방식은 질량, 운동량, 에너지 및 화학 종에 대한 보존 방정식을 해결하는 지배 방정식을 기반으로 콘크리트 챔버 내부의 폭발로 인한 폭발을 시작 소음원으로 고려한다. 음향 솔버는 Ffowcs-Willams 및 Hawking 방정식의 솔루션으로 밀도 섭동을 계산하는 반면, 반응성 유체 역학 솔버는 실제 지형에서 전체 폭발 압력 전파 동안 모든 경과 시간에 대한 플럭스(Flux)를 계산한다. 따라서 노이즈 전파 프로세스의 전체 프로세스 동안 특정 시간에 데이터를 계산할 수 있다. Gloerfelt 등 [11]의 이전 연구에서는 난류 모델이 없는 압축 가능한 Navier-Stokes 방정식과 Ffowcs-Willams 및 Hawking 방정식을 사용하여 DNS 결과를 비교하였다. 그들의 압력장 결과에 따르면 두 방법 사이의 압력 윤곽의 차이는 무시할 만하다는 것이 확인되었다. 따라서 현재 반응성 유체 역학 접근법을 사용하여 정밀한 근거리 폭발 과정을 포함하는 임펄스의 소음 전파를 계산하였다.

사람이 느끼는 소음은 일반적으로 음압 레벨(SPL)을 통해 데시벨 단위로 표현한다. SPL은 방정식 (21)으로 표현할 수 있다. 여기서  $P_{rms}$ 는 압력 변화의 제곱 평균 제곱근이고  $P_{ref}$ 는 인간 청력의 역치로  $2 \times 10^{-5}$  Pa이다. 평균의 제곱근은 압력 변화가 주기적 함수에서와 같이 양수 및 음수 값으로 진동 할 때 유용하다. 소음을 연구한 많은 연구자들은 평균 압력과의 차이로 음압 레벨에 포함 된  $P_{rms}$ 를 계산하였다. 평균 압력과의 차이 또는 압력 섭동은 Ffowcs Williams-Hawkings [12]의 음향 분석을 사용하여 계산한다. FW-H 방정식은 방정식 (22)으로 표현한다. FW-H 방정식을 통해 관찰자의 관점에서 임의의 물체의 움직임에 따른 압력 섭동을 얻을 수 있다. 음압 레벨은 얻은 압력 섭동을 사용하여 계산된다. 이 과정에서 점성과 난류로 인한

압력 소음이 발생하고, 이 압력 소음에 대한 음압 레벨을 계산하면 여러 주파수에서 다양한 음압 레벨이 발생하게 된다. 이는 음원에서 지속적으로 진동이 발생할 때 적용 할 수 있는 분석 방법이다. 그러나 본 연구의 목적은 폭발물 폭발로 인한 소음을 계산하는 것이다. 따라서 이 과정은 본 연구에서 사용 된 반응성 유체 역학 솔버와 차이점을 보인다. 점성에 의한 작은 섭동이 없고 난류 항을 포함하지 않는 Euler 방정식을 지배 방정식으로 사용하기 때문에 폭발에 의한 압력 변화는 최대 압력과 대기압과의 차이로 Prms를 구할 때 평균값을 중심으로 진동한다고 가정하였다. Rasheed 등[13]에 따르면 폭발로 인한 피크 압력은 펄스 폭발 터빈 시스템(Pulse detonation turbine system)에서 측정되었으며 측정 된 데이터는 폭발로 인한 펄스 소음을 계산할 때 사용되었다. 여기서 Prms는 실험적으로 측정 된 피크 압력과 평균값의 차이를 사용하여 음압 레벨을 도출하였다.

$$SPL = 20 \log_{10}(p_{rms} / p_{ref}) \quad (21)$$

$$p'(x, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_{f=0} [\frac{Q_i n_i}{4\pi|x-y|}]_{r_c} dS - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_{f=0} [\frac{L_{ij} n_j}{4\pi|x-y|}]_{r_c} dS + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_{f>0} [\frac{T_{ij}}{4\pi|x-y|}]_{r_c} dV, \quad (22)$$

$$Q_i = \rho(u_i - v_i) + \rho_0 v_i,$$

$$L_{ij} = \rho u_i (u_j - v_j) + P_{ij},$$

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + [(p - p_0) - c_0^2 (p - p_0)] \delta_{ij} - \sigma_{ij}.$$

## 제 3 장 검증 및 결과

### 제 1 절 검증 및 근거리 계산 결과

콘크리트 방음벽 내부의 폭발 계산의 타당성을 검증하려면 콘크리트 EOS의 정확성을 검증해야 한다. Gebbeken 등[14]은 플라이어 플레이트 충격 테스트(Flyer-plate impact test)에서 콘크리트에 대한 Hugoniot 물리량의 실험 데이터를 측정하였다. 그림 1에서 보는 바와 같이 콘크리트 판 (100cm x 100cm x 30cm) 중앙에 PETN 500g을



놓은 후 폭발을 가했다. 그림 1의 오른쪽 그림은 수직 및 수평 방향의 네 개의 gauge pressure 측정장치를 보여준다. 실험 결과는 PETN에서 음의 y 축 방향으로 60mm, 80mm에 위치한 센서에서 압력을 측정하였으며, 시뮬레이션에서는 40mm, 60mm, 80mm에 위치한 센서에서 압력을 측정하였다.

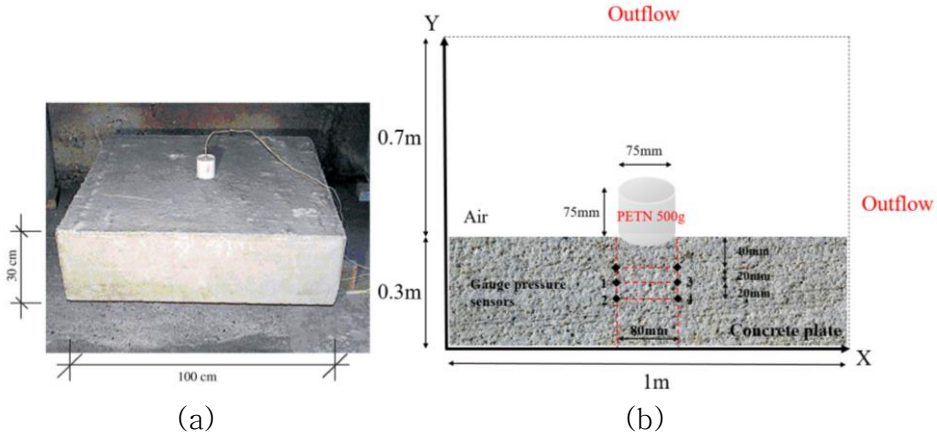


그림 1. (a) 콘크리트 실험 set-up과 (b) 수치해석 도메인 개략도

그림 2는 수치 결과와 비교 한 실험 데이터를 나타낸 그래프이다. 센서 1과 3은 실험 설정에서 PETN에 가장 가까운 곳이므로 그곳에서 가장 높은 압력 피크가 측정되었다. 계산 된 최대 압력 피크는 약 13GPa였으며, 이는 PETN에 가장 가까운 위치에서의 과잉 예측이다. 현재의 계산은 콘크리트 블록 깊숙이 들어가면서 정량적 감쇠 패턴을 재현하는 것이므로 이 지점 아래의 센서 데이터를 주의 깊게 봐야한다. 센서 1과 3을 보면 실험 데이터와 수치 데이터가 모두 0.06ms에 가까운 시간에 일치한다. 마찬가지로, 2와 4에서 가장 먼 센서 위치는 0.1ms에 가까운 시간에 유사한 압력 패턴을 나타낸다.

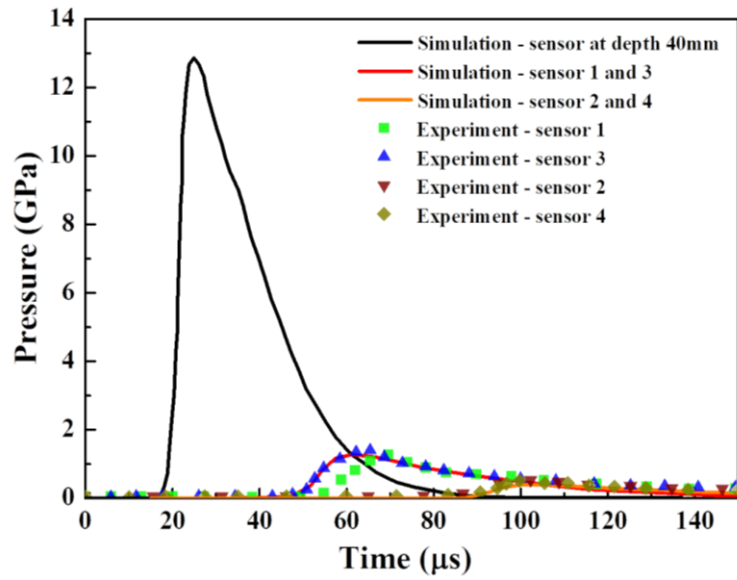


그림 2. 네 개의 센서 위치에서 콘크리트 판을 통한 압력 감쇠 그래프

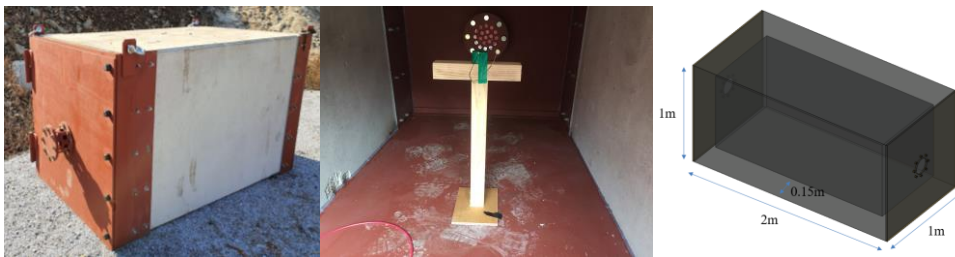


그림 3. 실제 지형에서의 폭발 테스트를 위한 콘크리트 방음벽과 내부 및 AutoCAD 모델링

콘크리트 방음 실의 정확한 내부 구조와 치수는 그림 3과 같다. 가스 방출 캡은 양쪽 벽 끝에 설치되어 있는 구조를 가진다. 콘크리트 챔버 중앙에 0.5m 높이의 나무 막대를 설치되어 있다. Comp-A 폭약이 나무 막대에 설치되고 콘크리트 챔버 내에서의 폭발 테스트를 위해 전기 신호를 주어 기폭하였다.

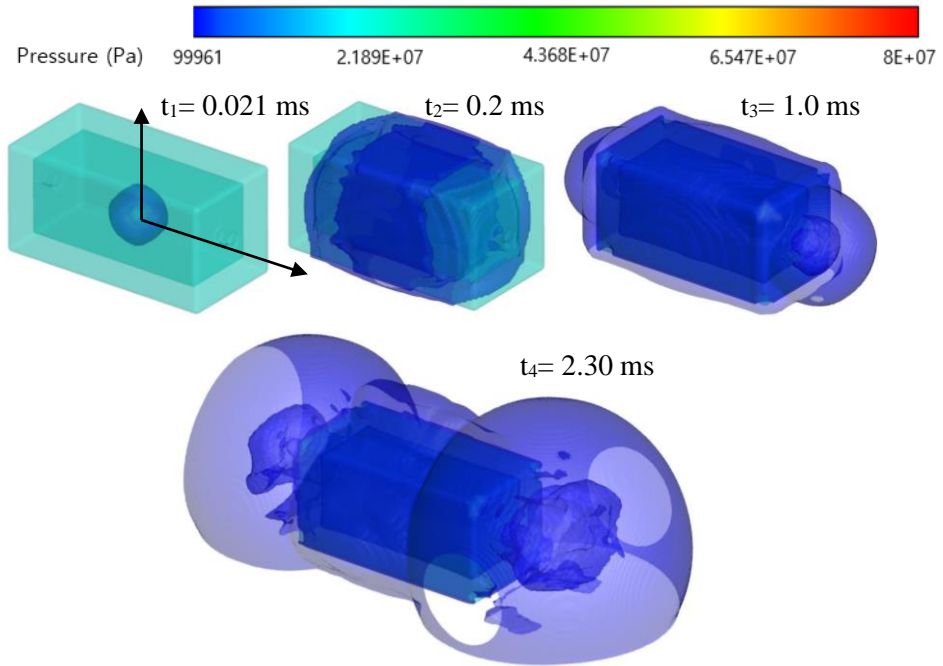


그림 4. 챔버 내부에서의 500g의 Comp-A 폭발에 의한 pressure iso-contour

그림 4는 콘크리트 챔버 내부에서 500g의 Comp-A가 폭발할 때 시간에 대한 압력의 변화를 나타낸다. 폭발 후 폭발파가 수직 방향보다 수평 방향으로 훨씬 높고 빠른 값으로 양쪽 끝의 가스 캡을 향해 전파된다. 폭발 지점에서 3m 이내의 근거리에서 압력, 속도, 밀도, 에너지를 계산한 뒤 그 값을 실제 지형을 나타내는 원거리 영역에서 폭발 및 소음 전파를 시뮬레이션하기 위한 초기 값으로 대입하였다.

## 제 2 절 원거리 계산 결과

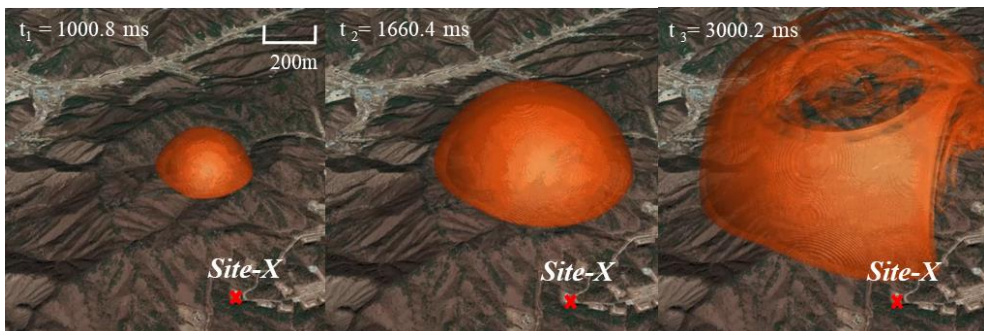


그림 5. Site-X 주변 2km 부근에서의 Comp-A 500g의 폭발 압력 전파 iso-contour

그림 5는 폭발 지점에서 1.6km 떨어진 Site-X로의 압력 전파를 거시적으로 시각화 한 것이다. 실제 지형을 매핑하기 위해 한국 토지 정보 플랫폼에서 고도 좌표를 추출하고 STL 파일을 AutoCAD에서 추출하여 매개 변수화 된 레벨 설정 방법을 사용하여 계산 영역에 삽입하였다. 초기 압력 조건은 3장 1절에서 계산된 압력, 밀도 및 에너지를 삽입하여 계산하였다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 압력은 반구 모양으로 전파되고 그 안에 복잡한 모양의 압력장이 생성된다. 이는 시뮬레이션상에서 지면의 반사 효과를 고려하였기 때문이라고 판단된다.

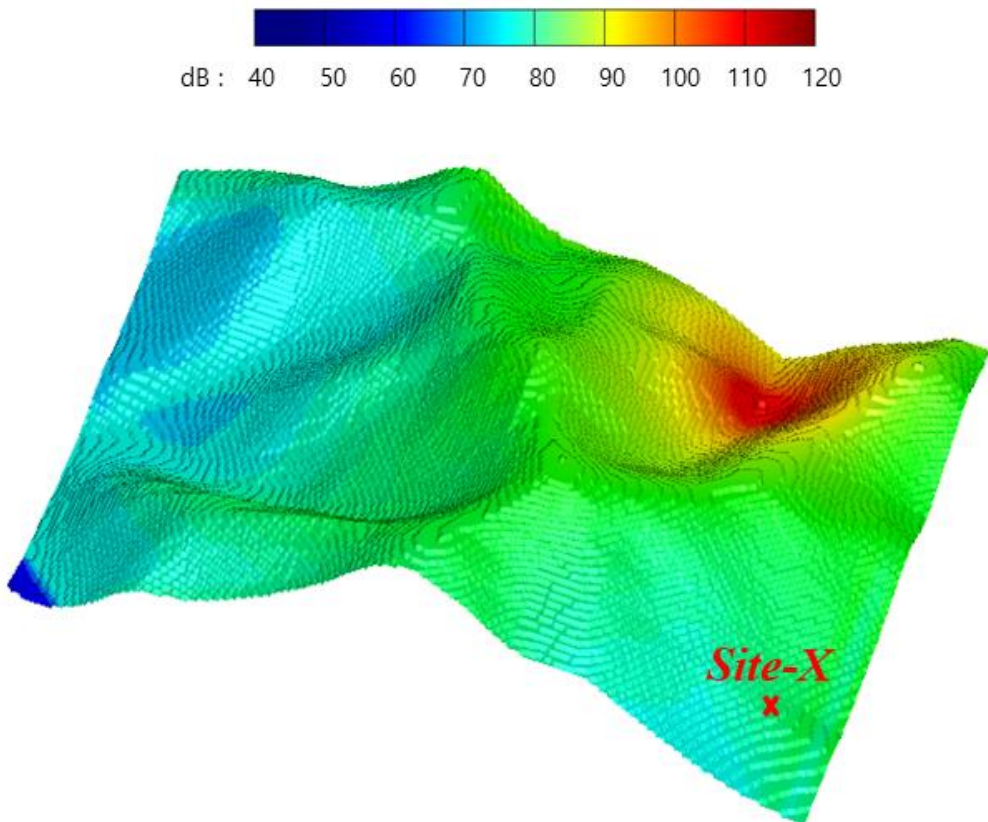


그림 6. Comp-A 45g의 폭발에 의한 노이즈 맵(Noise map)

그림 6은 Comp-A 45g의 폭발에 의한 노이즈 맵을 보여준다.

압력파가 전파됨에 따라 지면의 반사파로 인해 복잡한 율곽 장이 형성되어 압력 섭동이 발생한다. 데시벨 등고선에서 알 수 있듯이 거리가 멀어짐에 따라 소음은 감소했지만, 같은 거리에서도 지질학적 특성으로 인해 계곡에서 더 큰 소음이 감지되었다. 표 3은 근거리 장과 원거리 장에서 압력 선단 속도(pressure front velocity)를 비교한 결과를 보여준다. 근거리 분석에서는 콘크리트 챔버 내부의 폭발 압력 속도를 계산하고, 실제 지형 장거리 결과 분석에서는 지형을 따라 대기로 확산되는 폭발 압력의 전면 속도를 계산하였다. 결과에서 알 수 있듯이 콘크리트 챔버 내부의 폭발 파 전면 속도는 Comp-A의 이론적 폭굉 속도와 거의 일치했으며 대기로 확산되는 폭발 파도 전면 속도는 음속에 가까운 속도로 전파되었다.

표 3. 폭풍파의 전면 속도 비교

	Near field (< 3 m)	Far field (< 1500 m)
Blast wave speed (m/s)	2801.7 (Detonation velocity)	335.8 (Sound velocity)

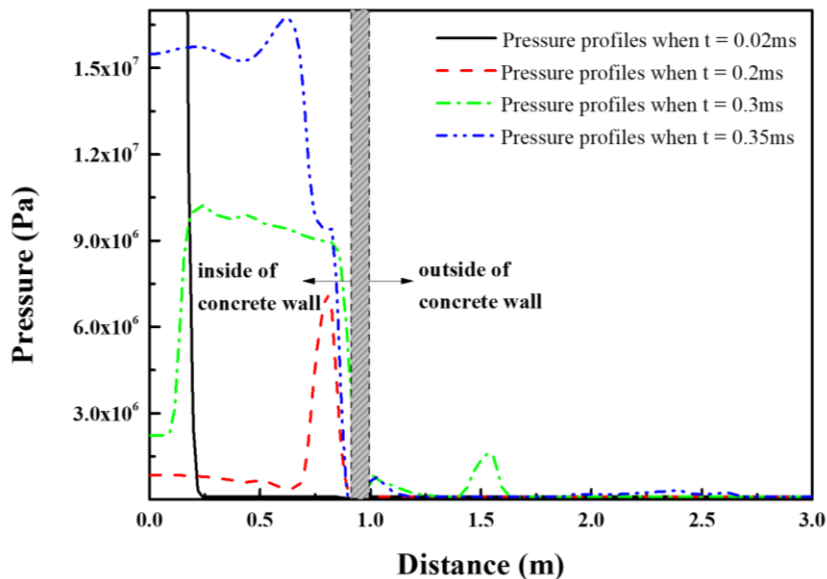


그림 7. 콘크리트 방음벽 내부,외부 최대 3m 거리의 압력 그래프

그림 7은 그림 4의 첫 번째 그림과 같이 폭발의 중심이 0 인 콘크리트 벽 외부 방향으로 존재하는 지점의 압력 값을 시간에 따라 그린 그래프이다.  $t = 0.0002\text{s}$ 까지 폭발 압력이 가스 캡에 도달하지 않았기 때문에 콘크리트 챔버 내부의 압력은 외부 압력보다 훨씬 높다. 그러나  $t = 0.0010\text{s}$ 에서 압력이 가스 캡에 도달하고 피크가 외부로 전파되는 것으로 나타난다. 전파된 최고 압력은 거리가 증가함에 따라 점차적으로 감소한 뒤 공중으로 퍼지게 된다.

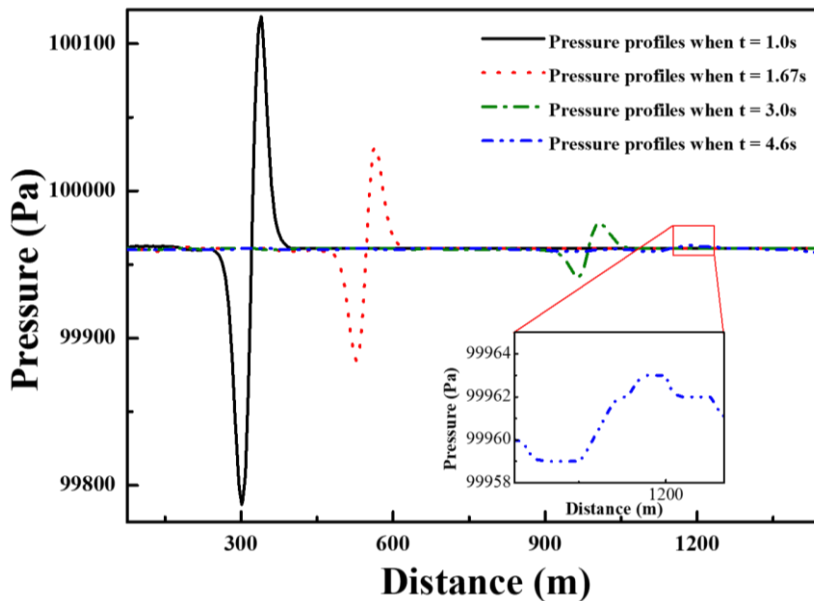


그림 8. 폭발 시험장으로부터의 시간에 따른 압력 전파

그림 8은 폭발의 중심을 근원지에서 1.6km 떨어진 site-X를 연결하는 직선상의 압력을 보여준다. 그래프를 보면 기압이 대기압보다 낮은 부분이 존재한다. 이것은 폭풍파의 전형적인 특성으로 설명할 수 있다. 시간이 지남에 따라 거리가 증가함에 따라 피크 압력이 감소하는 것을 볼 수 있다.  $t = 4.6\text{s}$  일 때 약 99963 Pa의 압력이 생성되었으며, 이는 주변의 대기압과 비슷한 값을 나타낸다. 이러한 작은 압력 변화가 소음 발생에 기여하는 것으로 판단된다.

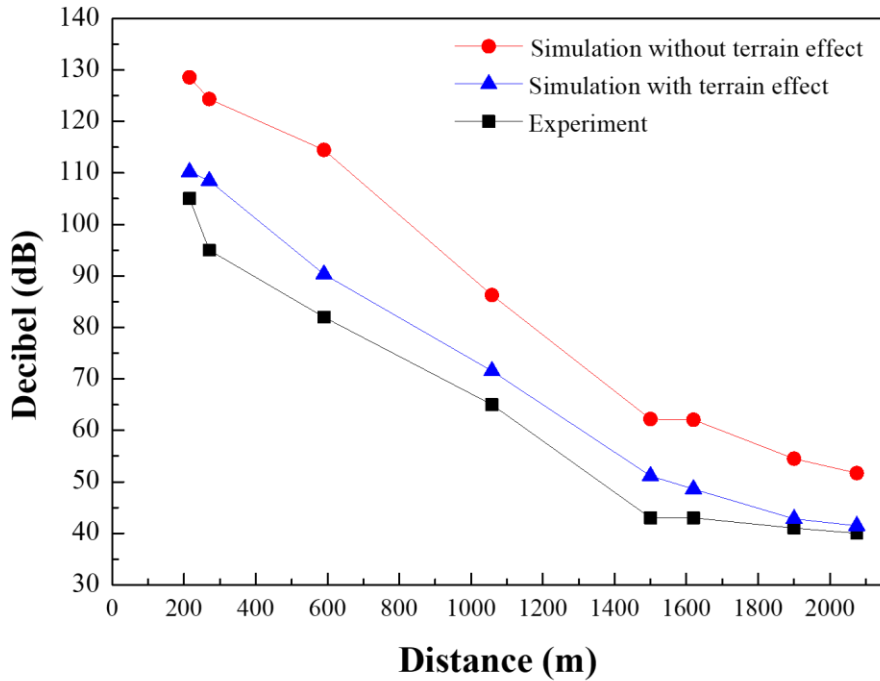


그림 9. 실제 측정 데이터와 시뮬레이션 결과의 비교

그림 9는 Comp-A 45g를 사용하여 데시벨 단위로 실험에서 얻은 측정 데이터와 지형 효과가 있는 노이즈 시뮬레이션, 지형 효과가 없는 노이즈 시뮬레이션의 결과를 비교한 그래프이다. 시뮬레이션의 지형 효과는 지면에 의한 반사와 흡수를 모두 고려하였다. 앞에서 설명한 코드의 검증과 같이 높은 압력이 단단한 내부 즉, 지면으로 흡수되도록 계산이 수행되었다. 그림 9에서 알 수 있듯이 지형 효과를 고려한 시뮬레이션 데이터는 실험값에 가까운 결과를 보여준다. 실험 결과에서 나타나듯이 폭발 지점부터 거리가 멀어짐에 따라 200m의 산악 지형이 있었기 때문에 방음 숲 효과로 인해 데시벨 수준이 감소한 것으로 나타났다. 비교 결과 대략 5 ~ 20dB의 과예측(Overprediction)이 있었으며 이는 시뮬레이션에서 동일하게 나타난다. 이는 시뮬레이션 계산 과정에는 지면의 반사와 흡수 만 포함되기 때문이다. 이전에 수행되었던 연구[15], [16]에 따르면 소음 감쇠는 반사, 흡수 및 산란에

의해 발생한다. 실제 지형에서 소음 감쇠와 관련된 요인은 기상학, 지상 감쇠, 대기 난류, 물리적 장벽 및 초목 등이 있다. 선행 연구에 따라 습도에 의한 감쇠는  $1\text{dB} / 100\text{m}$ , 식생에 의한 감쇠는  $0.2\text{dB} / 100\text{m}$ , 지면에 의한 감쇠는 최대  $18\text{dB}$ 까지 감소한다. 그러나 반응성 유체 역학 시뮬레이션은 반사와 흡수를 고려하고 그 외의 요소는 고려하지 않았다. 그럼에도 불구하고 현재 연구는  $1.5\text{km}$  이상의 거리에서  $5\text{dB}$  이상의 과예측을 제공했으며, 이는 원거리 소음 감쇠의 모든 향후 반응성 유체 역학 모델링에 필요한 요소들을 제공하였다.

## 제 4 장 결 론

본 연구에서는 콘크리트로 둘러 쌓인 고풍약의 폭발로 인한 폭풍과 전파를 반응성 유체 역학 솔버를 사용하여 시뮬레이션 하였다. 폭발 원에서 몇 킬로미터 떨어진 거리에서 소음 수준을 예측하기 위해 3차원의 방음벽과 실제 지형을 포함하였고 이는 매개 변수화 된 레벨셋(Level-set) 방법을 통해 구현되었다. 음향 솔버와 달리 본 연구에서 사용된 방법은 시간이 지남에 따라 먼 거리를 이동하는 임펄스 노이즈의 전파 계산을 위해 질량, 운동량, 에너지 및 화학종 보존 방정식을 지배방정식으로 사용하였다. 폭발 원으로부터 3 미터 이내의 근거리 압력 감쇠는 측정치와 비교하여 정확하게 예측되는 것으로 나타났다. 원거리 압력 전파 경우, 소음 수준의 예측을 효과적으로 개선하기 위해 반사 및 산란과 함께 실제 지형의 흡음도 고려되어야 한다. 결과적으로 계산된 결과와 측정된 데이터 사이의 근거리 및 원거리 소음 수준 비교를 통해 현재 반응성 유체 역학 모델링의 적합성을 설명하였다.



## 참고 문헌

- [1] B. H. Kim, J. S. Park, K. C. Lee and J. J. Yoh, “A reactive flow model for heavily aluminized cyclotrimethylene–trinitramine,” *J. Appl. Phys.* 116, 023512 (2014).
- [2] H. J. Yu, B. H. Kim, S. G. Jang and J. J. Yoh, “Performance characterization of a miniaturized exploding foil initiator via modified VISAR interferometer and shock wave analysis,” *J. Appl. Phys.* 121, 215901 (2017).
- [3] W. E. Baker, P. A. Cox, J. J. Kulesz, R. A. Strehlow, and P. S. Westine, *Explosion Hazards and Evaluation*. Vol. 5 (2012).
- [4] A. M. Benselama, M. J. –P. William–Louis, F. Monnoyer, and C. Proust, “A numerical study of the evolution of the blast wave shape in tunnels,” *J. Hazard. Mater.* 181, 609 (2010).
- [5] J. Clutter and M. Stahl, “Hydrocode simulations of air and water shocks for facility vulnerability assessments,” *J. Hazard. Mater.* 106, 9 (2004).
- [6] Y. Wang, H. Wang, C. Cui and B. Zhao, “Investigating different grounds effects on shock wave propagation resulting from near–ground explosion,” *Appl. Sci.* 9(17), 3639 (2019).
- [7] C. Kuzu, A. Fisne, S.G. Ercelebi, “Operational and geological parameters in the assessing blast induced airblast–overpressure in quarries,” *Appl. Acou.* 70, (2009) 404–411.
- [8] L. E. Fried, W. M. Howard, and P. C. Souers, *Cheetah 2.0 User’s Manual*, UCRL–MA–117541 (Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, 1998).
- [9] J. H. Bin, M. W. Kim and S. G. Lee, “A numerical study on the

generation of impulsive noise by complex flows discharging from a muzzle,” *Int. J. Numer. Meth. Engng.* 75 (2008) 964–991.

[10] J. E. Ffowcs Williams and D. L. Hawkins, “Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion,” *Philos. Trans. Roy. Soc., A* 264 No. 1151, (1969) 321–342.

[11] X. Gloerfelt, C. Bailly and D. Juve, “Direct computation of the noise radiated by a subsonic cavity flow and application of integral methods,” *J. Sound and Vib.* 226, (2003) 119–146.

[12] A. N. Yazdi, G. A. Bres and L. Mongeau, “An acoustic analogy formulation for moving sources in uniformly moving media,” *Proc. R. Soc. A* 467, (2011) 144–165

[13] A. Rasheed, A. H. Furman and A. J. Dean, “Pressure measurements and attenuation in a hybrid multitube pulse detonation turbine system,” *J. Prop and Power.* 25, 1 (2009).

[14] N. Gebbeken, S. Greulich and A. Pietzsch, “Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact test,” *Int. J. Impact Eng.* 32, 12 (2006).

[15] J. E. Piercy and T. F. W. Embleton, “Review of noise propagation in the atmosphere”, *J. Acou. Soc. of Amer.* 61, 1403 (1977).

[16] E. H. Brown and F. F. Hall Jr., “Advances in atmospheric acoustics”, *Reviews of Geophysics.* 16, 1 (1978) 47–110.

## Abstract

# A reactive hydrodynamic simulation of a concrete–confined detonation for estimating noise propagation with terrain attenuation effects

Juntae Ji

Department of aerospace engineering

The Graduate School

Seoul National University

When a point source detonation occurs, high temperature and pressure gases are released and then propagate through the open atmosphere as a blast wave. This leads to an explosive sound in the form of environmental noise, which has been known to cause hearing damages to nearby residents surrounding the explosion source. In an effort to reduce such noise levels, explosion test sites are installed with sound barriers to mitigate and minimize the noise associated with blasts. In this study, realistic explosion pressure was calculated at an initial detonation source inside a concrete sound barrier, and a numerical prediction was made to evaluate the environmental noise propagation in actual terrain. In particular, we applied the concrete equation of state to the governing conservation equations for a spherical detonation in confined geometry and compared the experimental data taken within 3 meters from the test

site and a few kilometers away from the sound source. Moreover, the amount of noise reduction was predicted by first considering the absorbed explosion pressure by the sound barrier, which later dissipated at a far distance at which the noise propagation in an actual terrain was compared with the measurements.

**Keywords : Noise attenuation, Detonation, Concrete, Environmental noise.**

**Student Number : 2019–27077**