

그래픽 프로세서를 이용한 고차 유한 차분식 기반 수중채널모델 연구

배호석 · 김원기 · 손수욱 · 하완수[†]

A Study on the Underwater Channel Model based on a High-Order Finite Difference Method using GPUs

Ho Seuk Bae · Won-Ki Kim · Su-Uk Son · Wansoo Ha[†]

ABSTRACT

As unmanned underwater systems have recently emerged, a high-speed underwater channel modeling technique, which is one of the most important techniques in the system, has received a lot of attention. In this paper, we proposed a high-speed sound propagation model and verified the applicability through quantitative performance analyses. We used a high-order finite difference method (FDM) for wave propagation modeling in the water, and a domain decomposition method was adopted using multiple general-purpose graphics processing units (GPUs) to increase the calculation efficiency. We compared the results of the model we proposed with the analytic solution in the half-infinite media and results of the Virtual Timeseries Experiment (VirTEX) model, which is based on the ray method. Finally, we analyzed the performance of the model quantitatively using numerical examples. Through quantitative analyses of the improvement in computational performance, we confirmed that the computational speed increases linearly as the number of GPUs increases. The computation times are increased by 2 times and 8 times, respectively, when the domain size of computation and the maximum frequency are doubled. We expect that the proposed high-speed underwater channel modeling technique is able to contribute to the enhancement of national defense as an underwater communication channel model and analysis tool to develop the underwater communication technique for the unmanned underwater system.

Key words : Underwater channel model, Finite difference method, Graphics processing unit

요약

최근 수중 무인 체계가 대두됨에 따라 핵심 기반 기술인 장거리 수중통신기술 및 고속 수중채널모델링 기술이 많은 관심을 받고 있다. 본 논문에서는 고속 수중채널모델링을 수행하기 위한 고속 음파전달모델을 제안하여, 정량적인 성능 분석을 통해 제안 기술의 적용 가능성을 살펴보았다. 수중에서의 파동 전파를 모사하기 위하여 고차 유한 차분 기법을 사용하였으며, 범용 그래픽 프로세서를 이용한 영역 분할 기법을 적용하여 여러 개의 그래픽 프로세서 병렬 처리를 통해 연산 속도를 향상시켰다. 제안한 기법은 반무한 매질에서의 해석해와의 비교 및 파선법에 기반한 VirTEX 모델을 이용한 결과와의 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다. 최종적으로 수치예제를 통해 고속 수중채널 모델링 기법의 정량적인 연산 성능을 분석하였다. 개발 모델의 연산 성능 향상 정도를 정량적으로 분석한 결과 그래픽 프로세서 수가 증가함에 따라 연산 속도가 선형에 가깝게 빨라지는 것을 확인하였다. 연산 영역의 크기가 2배로 증가할 때와 주파수가 2배로 증가할 때 계산 시간은 각각 2배와 8배로 증가하였다. 본 논문을 통해 제안한 고속 수중채널모델 기술은 해양무인체계의 수중통신기술 개발을 위한 수중통신 채널모델 및 분석 툴로 탑재되어 국방력 강화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 수중채널모델, 유한차분식, 그래픽 프로세서

Received: 1 October 2020, **Revised:** 11 December 2020,
Accepted: 15 December 2020

[†] **Corresponding Author:** Wansoo Ha

E-mail: wansooaha@pknu.ac.kr

Dept. of Energy Resources Engineering,
Pukyung University, Busan, Korea

1. 서론

해군의 전력은 유인체계에서 무인체계로 점진적으로 변화하고 있는 추세이며, 최종적으로 과학기술의 발달과

더불어 고도화된 무인체계를 이용한 효과 중심 작전을 기반으로 한 무인전투체계가 미래 핵심 전력이 될 것이다. 특히 무인잠수정을 포함하는 수중드론은 무인전투체계의 핵심 전력으로, 해군전력으로서의 개발 필요성은 더욱 더 증대되고 있다(Allard and Shahbazian, 2014; Lee, 2017).

무인전투체계의 지휘통제 및 정보교환 등을 위해서는 안정적이고 장거리까지 통달 가능한 수중통신 기술 확보가 필수적이다. 하지만 실제 해양환경은 시간적, 공간적인 변동성을 가지며, 기온, 풍속 등 외부적 환경의 영향으로 수중에서의 음파전달 양상은 균질하지 않다. 또한, 수중통신채널은 일반적으로 대역제한 채널이며, 강한 도플러 천이 채널이므로 육상통신에 비해 강한 인접 심볼간 간섭과 위상 변이를 가진다. 장거리까지 통달 가능하기 위해서는 저주파 대역의 운용이 필수적이지만 저주파 운용 시 높은 환경잡음에 의해 신호대잡음비가 낮아진다. 따라서 안정적이고 효과적으로 장거리까지 통달이 가능한 수중통신 기술 개발을 위해서는 수중채널모델에 대한 선제적인 연구가 필수적이다.

많은 과학자들은 해양환경의 변동성을 고려한 수중채널모델에 대한 다양한 연구를 수행하였다. 대표적으로 미 해양연구소의 Porter (2008)는 파선추적 기반 수중채널 모델인 Bellhop 모델을 개발하여 관련자들에게 제공하고 있는데, 단일 주파수 특성을 가지는 음원에 대한 고유음선 및 전달손실 모델을 신뢰성 있게 구현하였다.

대부분의 수중채널모델 후속 연구들은 Bellhop 모델을 활용하고 있는데, Siderius and Porter (2006; 2008)와 Peterson and Porter (2011)는 Bellhop 모델에서 도출된 음선정보를 이용하여 시계열 신호를 모의하는 기법인 VirTEX(Virtual Timeseries Experiment)를 제안하였다. VirTEX 기법은 플랫폼의 움직임, 해수면 변동에 따른 음파의 도달시간, 진폭, 입사각 및 반사각 등을 이용하여 각 음선에 대한 도플러 천이량을 고려함으로써 실제상의 변동성을 반영한 결과를 모사할 수 있기 때문에 수중통신 성능검증을 위한 수중채널 모델로 활용성이 높은 것으로 알려져 있다.

하지만, 이러한 채널모델은 파선법에 기반한 Bellhop 모델을 기반으로 개발되었기 때문에 음파의 탄성효과, 모드변환, 다중반사, 회절 등 음파의 모든 전달양상을 설명할 수 없으며, 한 번의 수치계산으로 모든 위치에서의 음장을 계산할 수 없는 제한성을 가진다.

이러한 한계를 해소하기 위한 방법 중 하나는 파면법에 기반한 음파전달모델을 사용하는 것이다. 그 중 파동

방정식을 이용한 음파전달모델은 음파가 매질을 물리적으로 전파해가는 형상을 모사할 수 있는 방법으로, 음파의 탄성효과 등의 물리적인 거동을 모사할 수 있으며, 한 번의 계산으로 모든 위치에서의 파동장을 동시에 계산할 수 있다. 하지만 파동방정식을 이용한 수치해석은 많은 양의 반복 계산을 필요로 하기 때문에 고성능의 컴퓨터 자원과 많은 연산 시간이 필요하게 된다.

반복적인 계산의 효율을 높이고 비용을 줄이기 위해 다양한 병렬 프로그래밍 기법들이 존재한다. 병렬 프로그래밍 기법에는 다중 CPU를 이용하는 방법과 그래픽 프로세서(Graphics Processing Unit, GPU)를 이용하는 방법 등이 있는데, GPU를 이용한 방법은 비용이 다른 병렬 처리 방법보다 상대적으로 저렴하고 속도가 빠르기 때문에 최근 수치해석, 물리탐사, 조선, 기상 예측, 인공지능 등 여러 업계에서 널리 사용되고 있다(Ha 등, 2013; Kwon and Kang, 2017; Kim 등, 2018; Xu 등, 2018; Chen 등, 2020).

본 논문에서는 NVIDIA사의 병렬 처리 API (Application Programming Interface)인 CUDA(Compute Unified Device Architecture)를 이용해 고속 음파전달모델을 개발하고 성능을 정량적으로 분석하였다. 2차원 음향매질 근사 파동방정식을 사용하고 분산조건 및 안정조건에 따라 격자 간격을 계산하여 연산 효율을 증가시켰다. 또한, 성능을 더욱 높이기 위해 다중 GPU를 사용하되, 영역 분할 기법을 적용하여 병렬로 연산을 수행하였다. 개발한 모델은 해석해와 VirTEX 모델 결과와 비교를 통해 그 타당성을 검증하였다. 최종적으로 실험예를 모사한 합성 자료를 이용한 수치모델링을 수행하였으며, 다양한 조건에서 제안 모델의 정량적 성능 분석을 수행하였다.

2. 수중채널 모델링 기법

2.1 고차원 유한 차분식

본 논문에서는 Chen (2011) 논문에 제시된 고차원 유한 차분식을 이용한 파동 방정식 이산화 기법을 적용하였다. 2차원 음향파 파동 방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1}$$

여기서 p 는 압력장, v 는 P파 속도를 의미한다. 식 (1)에서 우변의 시간에 대한 2차 미분에 4차 유한 차분식을 적용하고, Lax-Wendroff 방법을 이용하면 다음의 식을

얻을 수 있다(Chen, 2011).

$$\begin{aligned} & \frac{p^{n+1} - 2p^n + p^{n-1}}{\Delta t^2} \\ &= v^2 \left(\frac{\partial^2 p^n}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^n}{\partial z^2} \right) \\ &+ \frac{v^4 \Delta t^2}{12} \left(\frac{\partial^4 p^n}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 p^n}{\partial z^4} + 2 \frac{\partial^4 p^n}{\partial x^2 \partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

위 식에서 Δt 는 시간 격자 크기이다. 우변의 공간에 대한 2차 미분식에 10차 유한 차분식을 적용하고 4차 미분식은 2차 미분식에 비해 오차가 작으므로 4차 유한 차분식을 적용하면 다음과 같은 고차 유한 차분식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \frac{p_{i,j}^{n+1} - 2p_{i,j}^n + p_{i,j}^{n-1}}{\Delta t^2} \\ &= \frac{v_{i,j}^2}{h^2} \sum_{l=-5}^5 (w_l^1 p_{i+l,j}^n + w_l^2 p_{i,j+l}^n) \\ &+ \frac{v_{i,j}^4 \Delta t^2}{12h^4} \sum_{m=-3}^3 (w_m^3 p_{i+m,j}^n + w_m^4 p_{i,j+m}^n) \\ &+ \frac{v_{i,j}^4 \Delta t^2}{12h^4} \sum_{l=-2m}^2 \sum_{m=-2}^2 2(w_{lm}^5 p_{i+l,j+m}^n) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 공간격자 간격 $\Delta x = \Delta z = h$ 이다. w_l^1, w_l^2 은 공간 2차 미분항의 가중치이고, w_m^3, w_m^4 은 공간 4차 미분항의 가중치다. w_{lm}^5 는 공간 혼합 4차 미분항의 가중치다. 각각의 가중치는 표 1과 같다(Chen, 2011).

Table 1. The weighting factors of differential terms (Chen, 2011)

Grids	Weighting				
	$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 p}{\partial z^2}$	$\frac{\partial^4 p}{\partial x^4}, \frac{\partial^4 p}{\partial z^4}$	$\frac{\partial^4 p}{\partial x^2 \partial z^2}$		
			0	± 1	± 2
0	-5269/1800	28/3	6	-19/6	1/6
± 1	5/3	-13/2	-19/6	5/3	-1/12
± 2	-5/21	2	1/6	-1/12	-
± 3	5/126	-1/6	-	-	-
± 4	-5/1008	-	-	-	-
± 5	1/3150	-	-	-	-

2.2 분산 및 안정조건

Dablain (1986)에 의하면 전술한 시간 4차 · 공간 10차 유한 차분 기법의 정확도는 시간 4차 · 공간 pseudo-spectral 기법을 적용했을 경우의 정확도와 유사해서 파장당 격자수를 3개 정도만 써도 괜찮은 것으로 알려져 있다. 그러나 Dablain (1986)의 연구는 100 Hz 미만의 주파수를 대상으로 한 연구이고, 본 논문에서 1,000 Hz 이상의 주파수 대역을 사용하여 시험한 결과 분산과 계산 시간 사이의 트레이드 오프를 고려했을 때 파장당 격자수가 6개에서 10개 정도가 되도록 모델링하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

Chen (2011)에 의하면 위 고차 차분식은 3차원의 경우 Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) 수 값이 0.4097, 2차원의 경우 0.5018보다 작으면 안정적이다.

분산조건에 사용한 식은 다음과 같다.

$$h = \frac{v_{\min}}{Gf_{\max}} \quad (4)$$

위 식에서 h 는 공간 격자 간격으로, 최저 속도(v_{\min}), 파장당 격자수(G), 최대 주파수(f_{\max})로부터 계산한다. 안정조건에 사용한 식은 다음과 같다.

$$\Delta t = \frac{ph}{v_{\max}} \quad (5)$$

위 식에서 Δt 는 CFL 수(p)와 공간 격자 간격(h), 최대 속도(v_{\max})로부터 계산한다.

2.3 경계조건

본 논문에서 경계 조건은 Liu and Sen (2010)의 혼합 경계 조건과 Clayton and Engquist (1977)의 A1 경계 조건을 혼합하여 사용했다. GPU 메모리 사용량을 줄이기 위해 시간 격자 두 개에 해당하는 파동장만을 저장하기 때문에 시간에 대한 2차 미분이 들어가는 경계 조건은 적용할 수 없었다. 따라서 시간에 대한 1차 미분을 이용하는 Clayton and Engquist (1977)의 A1 경계 조건을 사용하되, 경계면 반사파가 더 잘 없지도록 Liu and Sen (2010)의 혼합 경계 조건을 함께 적용하였다.

Clayton and Engquist (1977)의 A1 경계 조건은 경계에 단방향 파동 방정식을 사용하는 기법으로 이때 사용하는 식은 다음과 같다.

$$p_x + \frac{1}{v} p_t = 0 \tag{6}$$

Liu and Sen (2010)의 Hybrid 경계 조건은 경계 영역 층들에서 양방향 파동 방정식을 이용해 파동장을 계산하고 같은 위치에서 단방향 파동 방정식을 이용해 파동장을 한 번 더 계산한 후 두 파동장에 가중치를 적용하여 합하는 방법이다. 계산 영역 안쪽에서는 양방향 파동장에 더 큰 가중치를 적용하고 경계 바깥 부분에서는 단방향 파동장에 더 큰 가중치를 적용하여 양방향 파동 방정식이 단방향 파동 방정식으로 갑자기 바뀌므로 인해 생기는 인공 반사파를 줄일 수 있다.

2.4 CUDA 프로그래밍

CUDA는 그래픽 처리장치에서 수행하는 병렬 처리 알고리즘을 C/C++ 프로그래밍 언어를 사용하여 작성할 수 있도록 하는 기술이다(Cheng 등, 2014). CPU와는 달리 GPU는 대량의 코어를 가지고 수천 스레드를 동시에 실행시킬 수 있다. 응용 프로그램이 수행하는 작업이 이러한 병렬처리 연산에 적합할 경우, GPU를 이용함으로써 커다란 성능 향상을 기대할 수 있다.

GPU 연산 시 하나의 코어가 하나의 스레드를 담당하게 된다. GPU 코어들은 스레드들이 모여 하나의 블록을 이루며, 블록들이 모여 그리드를 이루는 계층 구조를 가진다.

본 연구에 사용한 주요 GPU 메모리 구조로는 접근 속도가 빠르지만 용량이 제한적인 레지스터와 공유메모리, 접근 속도는 상대적으로 느리지만 용량이 큰 전역 메모리가 있다.

2.5 커널 함수

본 연구의 핵심 커널 함수는 GPU 상에서 시간 반복마다 식 (3)의 공간에 대한 유한 차분식을 계산하는 함수이다. 커널 내에서의 연산은 빠른 연산을 위해 공유메모리를 사용하였다. 공유메모리는 접근 속도가 빠르지만 용량이 제한적이기 때문에 전체 모델링 영역을 BDIMX x BDIMY 크기의 블록들로 나누어 계산하였다. 유한 차분식을 계산하기 위해서는 현재 계산하고자 하는 영역 바깥 부분에 할로(halo) 영역 파동장이 필요하다. 시간 4차 · 공간 10차 차분식을 위해서는 좌, 우, 위, 아래 부분에 다섯 개씩의 할로 영역이 필요하기 때문에 파동장 계산 전에 그림 1과 같이 (BDIMX + 10)(BDIMY + 10) 크기의 공유 메모리를 할당하고 전역 메모리에 저장된

파동장을 공유 메모리에 복사한다. 복사 후에는 내부 흰색 영역의 격자점들에서 병렬로 새로운 파동장 값을 계산한다. 이 때 고차 차분식을 사용하기 때문에 붉은 격자 위치에서의 파동장을 계산하기 위해서는 파란 격자로 표시한 위치에서의 이전 시간 파동장 값이 필요하다. 이 값들은 여러 격자 계산에서 반복적으로 사용되기 때문에 전역 메모리에서 공유 메모리로 한 번만 복사하고 속도가 빠른 공유 메모리에서 반복적으로 접근하여 사용한 후 결과값만 다시 전역 메모리에 저장하게 된다.

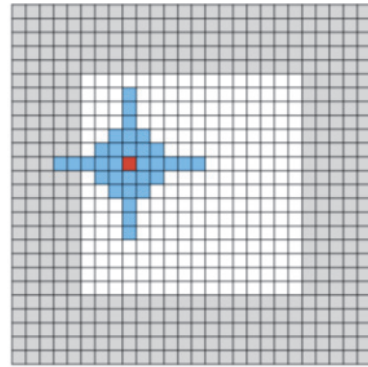


Fig. 1. Finite difference (FD) computation using the shared memory

2.6 영역 분할 기법

영역 분할 기법에서는 전체 영역을 GPU 개수만큼 분할하여 병렬로 계산한다. 영역 경계 부분에서는 매 시간 격자마다 정보를 교환하여 다음 시간 격자에서 계산을 수행할 수 있도록 한다. 그림 2에 GPU가 두 개인 경우의 영역 분할 개념도를 제시하였다. 전체 영역을 왼쪽 영역과 오른쪽 영역 두 개로 나누어 두 개의 GPU에서 각각 파동장을 계산한다. 이때 가운데 색칠된 영역은 두 개의 영역에 중복되어 포함된다. 연산 순서는 다음과 같다.

1. 왼쪽과 오른쪽 영역에서 1번 격자들에서의 파동장을 먼저 계산
2. 2번 격자들에서의 파동장 계산과 동시에 미리 계산한 1번 격자 파동장 복사를 실행
3. 다음 시간 반복에서 업데이트된 파동장을 이용해 위의 과정 반복

왼쪽 영역에서 볼 때 파란색 영역은 유한차분식 계산을 위해 필요한 할로 공간으로, 주황색 영역의 파동장 계산을 위해 필요하지만 파란색 영역에서의 값을 직접 업

데이트하지는 않는다. 오른쪽 영역에서 볼 때 주황색 영역은 유한차분식 계산을 위해 필요한 할로 공간으로, 파란색 영역의 파동장 계산을 위해 필요하지만 주황색 영역에서의 값을 직접 업데이트하지는 않는다. 각각의 영역에서 할로 영역의 값을 업데이트하지는 않지만 다음 시간 반복 계산시에는 업데이트된 값이 필요하기 때문에 좌우 영역 사이에 통신이 필요하다. 이 때 경계에서 할로 영역만 주고 받기 때문에 통신 양이 많지 않고 2번 격자 계산과 통신이 동시에 진행되므로 영역 분할로 인한 연산 시간 증가는 크지 않다.

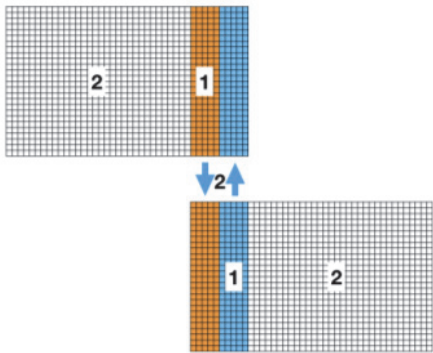


Fig. 2. Domain decomposition and communication

3. 수중채널 모델 시뮬레이션

수중채널 모델 시뮬레이션을 위하여 VirTEX 모델은 Ocean Acoustics Library에서 제공하는 Matlab 버전의 오픈소스를 활용하여 윈도우즈 운영체제에서 계산하였다. 유한 차분식을 이용한 수중채널 모델은 CUDA Toolkit 10.2 버전을 이용해 리눅스 운영체제에서 컴파일하고 실행하였다.

3.1 해석해와의 비교

본 논문에서 사용한 고차원 유한차분법 기반 수중채널 모델링 기법을 검증하기 위하여 반무한 음향매질에서의 파동방정식 해석해와 음파전달모델 결과를 비교하였다. 검증에 사용한 반무한 모델은 물층 속도가 1,500 m/s이며, 해수면 경계에는 디리클레(Dirichlet) 경계 조건을 사용하였다. 반무한 음향매질에서 송수신기의 위치는 그림 3과 같다.

2차원 및 3차원 상속도 음향매질에서의 해석해는 각각 식 (7), (8)과 같다.

$$\frac{i}{4} H_0^{(1)}\left(\frac{\omega}{c} |\vec{x} - \vec{x}'|\right), \tag{7}$$

$$\frac{\exp\left(i\frac{\omega}{c} |\vec{x} - \vec{x}'|\right)}{4\pi |\vec{x} - \vec{x}'|} \tag{8}$$

여기서 ω 는 각주파수, c 는 P파 속도, \vec{x} 는 수신기 좌표, \vec{x}' 는 송신원 좌표, $H_0^{(1)}$ 는 제 1종 한켈(Hankel) 함수를 의미한다. 직접파는 위의 식을 그대로 이용하였고, 해수면 경계 반사파는 송신원의 y 좌표를 음의 좌표로 바꾸고 진폭에 -1을 곱해서 얻었다. 이를 통해 얻은 2차원 및 3차원 충격 반응(impulse response)은 그림 4와 같다.

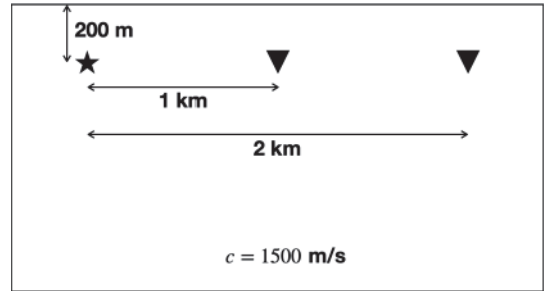
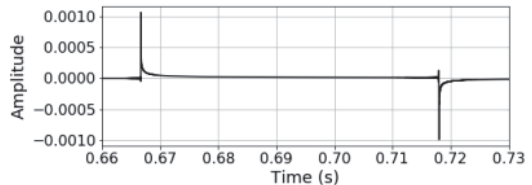
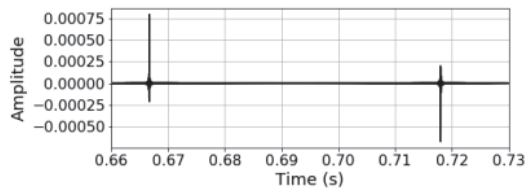


Fig. 3. Half-infinite homogeneous acoustic media



(a)



(b)

Fig. 4. Impulse responses from the homogeneous model using the (a) 2D and (3) 3D analytic solutions of the acoustic wave equation

고차원 유한차분법 기반 수중채널 모델링 기법검증을 위해 그림 5의 송신 펄스를 사용하였다. 주파수 영역에서

2차원 해석해와 모델링에 사용한 펄스를 곱한 후 역푸리에 변환을 통해 시간 영역 해석해를 얻고 음파전달모델 결과와 비교하였다. 그 결과 그림 6과 같이 음파전달모델 결과가 해석해와 유사하게 도출되는 것을 확인하였다. 단, 2.2절에서 설명한 것과 같이 고속 음파전달모델링 수행을 위하여 약간의 수치 분산을 허용하고 파장당 격자수를 낮췄기 때문에 파형 시작 부분에서 미세한 진동이 발생한 것을 관찰할 수 있다.

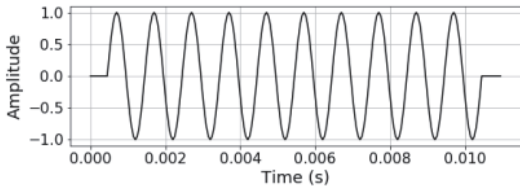


Fig. 5. Transmitted pulse of 10 cycle wave (1 kHz)

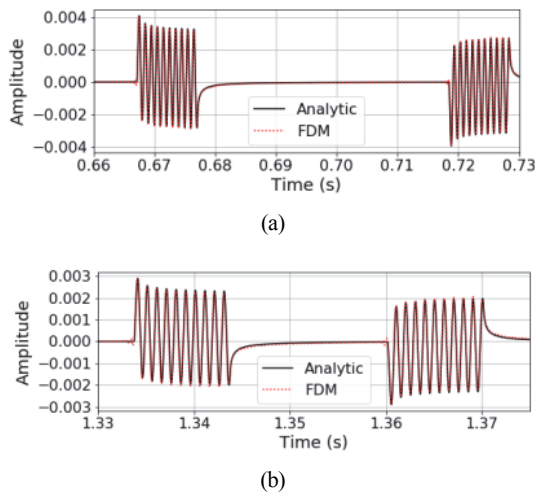


Fig. 6. 2D analytic solution (black) and modeling results (red) of the 2D FD modeling for the given transmitted pulse. The distances between the source and receivers are (a) 1 km and (b) 2 km, respectively

3.2 VirTEX 모델과의 비교

본 논문에서 사용한 파면법에 기반한 유한 차분 모델링과는 달리 파선법에 기반한 VirTEX 모델에서는 음파의 탄성효과, 모드변환, 다중반사, 회절 등을 정확하게 모사할 수 없는 등 알고리즘의 근본적인 차이가 존재한다. 또한, 본 논문에서 사용한 유한 차분 모델링 기법은 2차원 공간에서의 파동 전파를 모델링하는 반면, 파선법에 기반한 VirTEX 모델에서는 3차원 모델에서의 파동 전파

를 모델링한다. 따라서, 두 음향모델 간 비교 시 파형의 차이는 불가피하다.

본 논문에서는 2차원과 3차원의 차이를 줄이고자 2차원 모델링 결과의 진폭을 보정하여 음향모델 간 비교를 수행하였다. 2차원 매질과 3차원 매질에서의 파동 방정식의 그린함수는 그림 4와 같이 진폭과 감쇄 형태가 다르기 때문에 진폭 보정을 위해 유한 차분 모델링 결과에 \sqrt{ct} 를 곱하였다. 이 때 물층 속도 c 는 상속도 1,500 m/s를 사용하였다.

그림 7은 유한 차분 모델링 결과와 VirTEX 모델 결과를 비교한 것이다. 상술한 알고리즘의 근원적 접근 방법 및 2차원과 3차원 그린함수의 차이에 대한 진폭보정 오차를 고려할 때, 제안 모델의 타당성을 확인할 수 있었다.

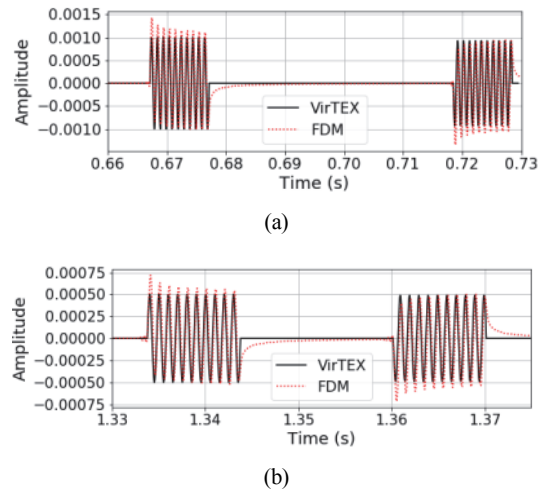


Fig. 7. Traces from the VirTEX (black) and the proposed scheme (red). The distances between the source and receivers are (a) 1 km and (b) 2 km, respectively

3.3 수중채널 모델 수치예제

수치예제에 사용한 모델은 실제 동해 해역의 형상을 단순화시킨 모델로 입력 모델은 그림 8과 같다. 송신원을 모델 좌측 경계 200 m 깊이에 위치시키고, 수신기는 송신원으로부터 2 km에서 10 km까지 2 km 간격으로 200 m 깊이에 위치시켰다. 그림 5의 송신 펄스를 이용하여 VirTEX 프로그램과 유한 차분 프로그램으로부터 얻은 결과는 그림 9와 같으며, 모델링에 사용한 변수들은 표 2에 제시하였다.

자세한 비교를 위해 VirTEX 프로그램의 결과와 진폭

조정된 유한 차분법 결과 트레이스들을 확대하여 그림 10에 제시하였다. 그림들을 보면 신호 도달 시간과 진폭이 대체로 유사하나 거리가 멀어질수록 진폭 차이가 커지고 파형도 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 유한 차분법 결과의 진폭 조정은 상속도를 이용해 이루어졌기 때문에 상속도가 아닌 모델에서 송수신기 거리가 멀어질수록 진폭 오차가 더 커진다. 해석해 비교에서 본 것처럼 2차원과 3차원 파동 전파 양상에 차이가 존재하고 거리에 따라 감쇠되는 정도도 다르기 때문에 진폭과 파형 차이가 발생하게 된다. 또한 VirTex 모델에서 사용한 지층의 밀도값이 1.2 g/cc로 유한 차분법에서 가정하는 1.0 g/cc와 다르기 때문에 지층 경계면 반사파의 진폭도 달라지게 된다. 그 외에도 파선법과 파면법 사용으로 인한 회절 파 유무 등의 차이가 존재한다. 이러한 차이에도 불구하고 두 결과에서 주요 이벤트들의 발생 여부와 발생 시간이 잘 맞는 것을 확인할 수 있다.

Table 2. Modeling parameters.

Parameter	Value
Source position (km)	(x, y) = (0, 0.2)
Receiver position (km)	(2.0, 0.2), (4.0, 0.2), (6.0, 0.2), (8.0, 0.2), (10.0, 0.2)
Time sampling rate (ms)	0.04
Grid size (m)	0.2
CFL number	0.3
Number of grids per wavelength	7.28
Maximum velocity (m/s)	1526.74
Minimum velocity (m/s)	1456.27

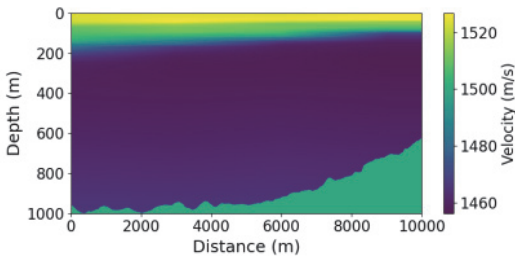


Fig. 8. A sound speed structure for numerical simulation

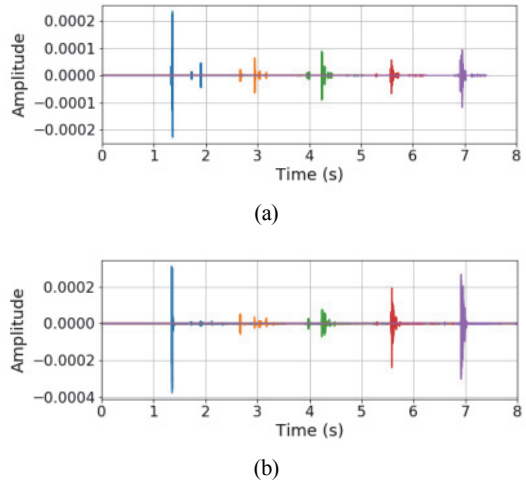


Fig. 9. Traces from the (a) VirTEX and (b) FD programs

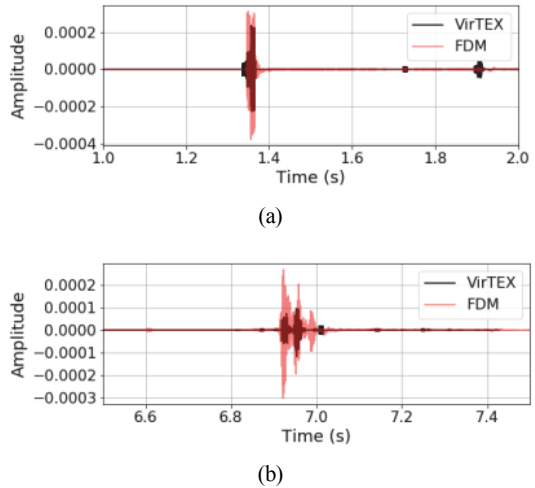


Fig. 10. Traces from the VirTEX and FD programs. The distance between the source and receivers are (a) 2 km and (b) 10 km, respectively

4. 병렬 연산성능 분석

연산 성능 분석을 위해 사용한 CPU는 Intel Xeon Gold 6130 2.1 GHz 모델(2017년 출시)이다. GPU는 단일 GPU를 사용한 경우 Nvidia Tesla V100 32GB PCIe 모델(2018년 출시)을 사용하였고, GPU 수에 따른 연산 성능 비교 시에만 Nvidia Tesla K40 12GB PCIe 모델(2013년 출시)을 사용하였다. 연산 시간은 처음에 한 번만 수행하는 메모리 할당 및 초기화 부분은 제외하고 핵심 알고리즘인 시간 반복 부분만 비교하였다.

4.1 CPU와 GPU 연산 성능 비교

CPU와 GPU 연산 성능 비교를 위해 1 km x 1 km 크기의 동일한 모델에 대해 CPU 단일 코어를 사용해 계산한 경우와 한 장의 GPU 카드를 사용해 계산한 경우의 시간을 비교하였다(표 3). 그 결과 GPU 프로그램이 CPU 프로그램보다 100배 이상 빨랐으나, CPU 프로그램에도 병렬 연산을 적용하면 차이가 크게 줄어들 것이다.

Table 3. Computation times for CPU and GPU experiments

Processor	Time (s)	Speedup
CPU	1426	1.00
GPU	12	118.83

4.2 GPU 수에 따른 연산 성능 비교

그림 8의 수치 모델에서 좌측 상부 2 km x 1 km를 추출하고 관측 시간을 4 s로 바꿔 연산을 수행하였다. 동일한 모델에 대해 GPU 카드의 개수를 1개에서 4개까지 늘려가며 연산 시간을 비교하였다. 그 결과 GPU 카드 개수가 증가함에 따라 연산 속도도 선형에 가깝게 증가하는 것을 볼 수 있다(표 4). 이는 영역 분할로 인해 GPU 사이에 추가적인 통신이 발생하기는 하지만 영역 내부 연산과 영역 경계에서의 통신 중첩으로 인해 통신으로 인한 부하가 크지 않기 때문이다.

Table 4. Computation times for multi-gpu experiments

Number of GPU cards	Time (s)	Speedup
1	3838	1.00
2	1968	1.95
3	1296	2.96
4	998	3.85

4.3 계산영역 크기에 따른 연산 성능 비교

수치 모델에서 조건에 따라 모델 크기를 바꾸어가며 4 s 동안 모델링을 수행하였다. 계산 영역의 크기를 1 km x 1 km부터 시작하여 2, 4, 8, 10, 16배로 늘려가며 음파 전달모델링을 수행한 결과 연산 시간은 계산 영역 크기에 비례해 증가하는 것을 확인할 수 있었다(표 5).

Table 5. Computation times for models with different sizes

Model size	Time (s)	Scaling
1 km x 1 km	200	1.00
2 km x 1 km	357	1.79
4 km x 1 km	757	3.79
8 km x 1 km	1636	8.18
10 km x 1 km	2012	10.06
16 km x 1 km	3204	16.02

4.4 최대 주파수에 따른 연산 성능 비교

수치 모델에서 모델 크기를 2 km x 1 km, 관측 시간을 2 s로 수정하고 식 (4)의 파장당 격자수 8인 일정한 분산 조건, 식 (5)의 CFL 수가 0.3인 안정 조건에서 최대 주파수를 증가시켜가며 연산 시간을 측정하였다. 주파수가 2배가 되면 공간 격자 크기가 1/2이 되어 총 격자수가 4배로 증가하고 안정 조건에 의해 시간 격자도 1/2로 작아지게 된다. 이 경우 연산 뿐 아니라 통신과 입출력 시간도 증가하므로 총 계산 시간은 8배 이상 증가할 것이라 예상할 수 있다. 실제 실험 결과 최대 주파수가 2배가 될 때마다 총 계산 시간은 8배 가까이 증가하였다(표 6).

Table 6. Computation times for models with different frequencies

Maximum frequency (Hz)	Time (s)	Scaling
1000	247	1.00
2000	2042	8.27
4000	15002	60.74

5. 결론

본 논문에서는 NVIDIA사의 병렬 처리 API인 CUDA를 이용해 파동 방정식 기반 고속 음파전달모델을 개발하였다. 개발 모델은 수중 통신채널 모델링에 널리 활용되는 기존 VirTEX 모델과 유사한 시계열 신호 모의 결과를 보여주었다. 접근 속도가 빠른 GPU 공유 메모리를 사용하여 연산 속도를 높였으며 다중 GPU 연산을 위해 영역 분할 병렬 처리 기법 적용하였다. 개발 모델의 연산 성능 향상 정도를 정량적으로 분석한 결과 GPU 수에 따라 연산 속도가 선형에 가깝게 빨라지는 것을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발한 모델은 수중통신기술 개발을 위한 성능시험장비에 탑재되어 수중통신 채널모델로 활용할 예정이며, 수중통신 성능분석을 위한 구성모델로도 활용 가능할 것으로 기대된다.

References

- Allard, Y. and E. Shahbazian, Unmanned Undersea Vehicles (UUV) Information Study, OODA Technologies, DRDC-RDDC-2014-C290, pp. 3-11, 2014.
- Chen, J.-B., "A stability formula for Lax-Wendroff

- methods with fourth-order in time and general-order in space for the scalar wave equation”, *Geophysics*, Vol. 76, No. 2, pp. T37-T42, 2011.
3. Chen, G., Meng, H., Liang, Y. and Huang, K., “GPU-accelerated real-time stereo estimation with binary neural network”, *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, Vol. 31, No. 12, pp. 2896-2907, 2020.
 4. Cheng, J., Grossman, M. and McKercher, T., *Professional CUDA C Programming*, John Wiley & Sons, Indianapolis, Indiana: pp. 387-424, 2014.
 5. Clayton, R. and Engquist, B., “Absorbing boundary conditions for acoustic and elastic wave equations”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 67, No. 6, pp. 1529-1540, 1977.
 6. Dablain, M. A., “The application of high-order differencing to the scalar wave equation”, *Geophysics*, Vol. 51, No. 1, pp. 54-66, 1986.
 7. Ha, S., Ku, N. and Roh, M.-I., “GPU-accelerated reliability analysis method using dynamic reliability block diagram based on DEVS formalism”, *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 22, No. 4, pp. 109-118, 2013.
 8. Kim, S., Cho, J. and Park, D., “Accelerated large-scale simulation on DEVS based hybrid system using collaborative computation on multi-cores and GPUs”, *Journal of the Korea Society for Simulation*, Vol. 27, No. 3, pp. 1-11, 2018.
 9. Kwon, D.-C. and Kang, B.-Y., “CPU and GPU performance analysis for convolutional neural network”, *The Journal of Korean Institute of Information Technology*, Vol. 15, No. 8, pp. 11-18, 2017.
 10. Lee, O.-S., “A direction of development of large UUVs for anti-submarine warfare connected to the future warfare development trend of the Navy”, *Defense & Technology*, Vol. 457, pp. 80-89, 2017.
 11. Liu, Y. and Sen, M. K., “A hybrid scheme for absorbing edge reflections in numerical modeling of wave propagation”, *Geophysics*, Vol. 75, No. 2, pp. A1-A6, 2010.
 12. Peterson, J. C. and Porter, M. B., “A Fast Algorithm for Computing Doppler Introduced by Sea Surface Gravity Waves,” 161st Meeting of the Acoustical Society of America, pp. 5aUW, 2011.
 13. Porter, M. B., *Ocean Acoustics Library*, <https://oalib-acoustics.org/>, 2008.
 14. Siderius, M. and Porter, M. B., “Modeling techniques for marine mammal risk assessment”, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 31, No. 1, pp. 49-60, 2006
 15. Siderius, M. and Porter, M. B., “Modeling broadband ocean acoustic transmissions with time-varying sea surfaces”, *Journal of Acoustical Society of America*, Vol. 124, No. 1, pp. 137~150, 2008.
 16. Xu, J., Liu, W., Wang, J., Liu, L. and Zhang, J., “An efficient implementation of 3D high-resolution imaging for large-scale seismic data with GPU/CPU heterogeneous parallel computing”, *Computers and Geosciences*, Vol. 111, pp. 272-282, 2018



배 호 석 (ORCID : <https://orcid.org/0000-0001-7819-4376> / belfre@add.re.kr)

2007 서울대학교 지구환경시스템공학부 학사
2011 서울대학교 에너지시스템공학부 박사
2011~ 현재 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 수중음향, 해양탐사, 소나시스템



김 원 기 (ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-9590-4701> / konekee@add.re.kr)

2007 충북대학교 지구환경과학 학사
2009 충북대학교 지질과학 석사
2014 서울대학교 에너지시스템 공학 박사
2015~ 현재 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 수중음향, 소나신호처리, 소나성능예측



손 수 욱 (ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-0501-7624> / suson@add.re.kr)

2008 한양대학교 지구해양과학 학사
2010 한양대학교 해양환경과학 석사
2015 한양대학교 해양환경과학 박사
2016 한양대학교 박사 후 연구원
2016~ 현재 국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 수중음향, 소나시스템, 수중통신



하 완 수 (ORCID : <http://orcid.org/0000-0002-9941-4777> / wansooaha@pknu.ac.kr)

2006 서울대학교 지구환경시스템공학부 학사
2008 서울대학교 에너지시스템공학부 석사
2011 서울대학교 에너지시스템공학부 박사
2013 부경대학교 조교수
2017~ 현재 부경대학교 부교수

관심분야 : 물리탐사, 고성능컴퓨팅, 머신러닝