

---

# C형 CIP법을 이용한 3차원 음장해석

이채봉\* · 오성관\*\*

The Three-Dimensional Acoustic Field Analysis using the Type C CIP Method

Chai-bong Lee\* · Sung-qwan Oh\*\*

## 요 약

본 연구는 C형 CIP법을 이용한 3차원 시간영역 음장해석법의 정밀도에 대해서 세밀한 검토를 하였다. 3차원 C형 CIP 음장해석의 위상오차 특성과 전파방향에 따른 오차를 명확히 하고, 본 수치 해석법의 유효성을 나타내었다. 또, 종래의 수치해석법으로 staggered-grid 모델을 이용한 FDTD법에 따른 계산결과와 M형 CIP법에 의한 계산결과와 비교를 하였다. 본 논문의 검토에 의해 같은 이산화조건에서는 C형 CIP법은 M형 CIP법 및 FDTD법보다 해석법이 가진 분산성이 적고, C형 CIP법으로 계산된 음압 파형은 변형이 적은 결과가 되는 것을 알 수 있었다. 그리고, C-1형 CIP법, C-2형 CIP법, M형 CIP법 및 FDTD법의 메모리와 계산시간을 비교하였다. 그 결과 C형 CIP해석은 FDTD해석에 비하여 수치분산성이 적지만 많은 사용 메모리와 계산시간이 필요하였다. C-1형과 C-2형 CIP법은 입방체의 격자 대각 방향에서는 축 방향에 비하여 정밀도가 약간 저하하는 것을 알 수 있었다. 그리고 C-2형 CIP법은 C-1형 CIP법보다 사용 메모리와 계산시간이 적고, 계산정밀도도 고려해서 보면 유효한 해석법이라는 것이 명확하였다.

## ABSTRACT

The authors have investigated the acoustic field analysis using the Constrained Interpolation Profile(CIP) Method recently proposed by Yabe. This study has examined the calculation accuracy of the three-dimensional(3-D) acoustic field analysis using the type C CIP method. In this paper we show phase error of type C CIP method and the dependence on the wave-propagation direction in the type C CIP acoustic field analysis, and then demonstrate that it gives less-diffusive results than conventional analysis. Moreover, in comparison between type C-1 CIP, type C-2 CIP, type M CIP and FDTD, reports the memory requirements and calculation time of each method.

## 키워드

Type C CIP method, Type M CIP method, Acoustic field analysis, Multi-dimensional, FDTD method

## 1. 서 론

최근에는 계산기의 발달과 함께 음장의 시간영역 해석법이 개발되고 있으며 몇 가지의 해석법이 제안되었다. 현재, 비교적 간단히 정식화 되는 stagge-

red-grid를 이용한 유한 차분법(Finite Difference Time Domain Method : FDTD법)이 넓게 적용되고 있다[1-4]. 그러나, FDTD법은 지배 방정식을 중심 차분으로 근사하여 음장을 해석하는 법이기 때문에 해석대상으로 하는 파장과 셀 사이즈의 관계에 따라서

---

\* 동서대학교 전자공학과(lcb@dongseo.ac.kr)  
접수일자 : 2010. 03. 11

\*\* 교신저자:아기다현립대학 전자공학과  
심사완료일자 : 2010. 04. 08

수치적인 오차가 발생하는 것으로 알려져 있다. 고차의 차분을 이용한 FDTD법도 제안되어 있지만, 이 해석법은 여러 점으로 구성되고 있기 때문에 경계에서의 처리가 어렵다. 또, 계산의 정밀도가 시간스텝에 많이 의존하는 것으로 보고되고 있다[4-5]. 이러한 종래의 해석법에서 발생하는 오차를 감소시키는 새로운 해석법으로 유체역학 분야의 Yabe 박사팀에 의해 제안된 CIP법(Constrained Interpolation Profile Method)이 제안되고 있다[6-7]. 이 해석법의 주목할 만한 특징은 음파의 전파를 해석할 때에 데이터 값과 데이터의 미분치도 이용해서 계산을 행하는 것이다. 그리고 Directional splitting method를 이용한 다차원 CIP법으로는 M형 CIP법과 C형 CIP법이 제안되어 있다[8-9]. 지금까지의 연구는 계산 알고리즘이 비교적 간단한 M형 CIP법을 이용한 음장해석에 관한 계산 정밀도의 검토를 하였다. 그러나, C형 CIP법을 이용한 음장해석에 관한 계산정밀도의 검토에 관한 연구는 거의 없는 형편이다.

본 논문에서는 C형 CIP법을 이용한 3차원 시간영역 음장해석법의 정밀도에 대하여 자세한 검토를 하고 본 해석법의 유효성을 나타내었다.

## II. C형 CIP법을 이용한 3차원 음장의 수치 해석

### 2.1 방향분리를 이용한 3차원 음장해석의 정식화

손실을 무시한 경우, 음장의 방정식은 다음과 같다.

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = -\nabla p, \quad \nabla \cdot v = -\frac{1}{K} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (1)$$

여기서  $\rho$ 는 밀도,  $K$ 는 체적탄성률,  $p$ 는 음압,  $v$ 는 입자속도이다. 식(1)에서 아래와 같이 방향분리를 한다.

$$\frac{\partial W}{\partial t} + A \frac{\partial W}{\partial x} = 0, \quad (W^n \rightarrow W^*), \quad (2)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + B \frac{\partial W}{\partial y} = 0, \quad (W^* \rightarrow W^{**}), \quad (3)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + C \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad (W^{**} \rightarrow W^{n+1}). \quad (4)$$

여기서,  $W$ 는  $(p, Zv_x, Zv_y, Zv_z)^T$ 이며  $W^*$  및  $W^{**}$ 는 각각  $x$ 방향에 전파한 후의  $W$  및  $y$  방향에 전파한 후의  $W$ 를 의미한다. 식(2)에 의해  $x$ 방향에 대해서는

$$\frac{\partial}{\partial t} p + c \frac{\partial}{\partial x} Z v_x = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} Z v_x + c \frac{\partial}{\partial x} p = 0. \quad (6)$$

가 얻어진다. 단,  $Z$ 는 특성임피던스,  $c$ 는 매질중의 음속이다 ( $Z = \sqrt{\rho K}$ ,  $c = \sqrt{K/\rho}$ ). 위 식의 합과 차를 계산해서 양변에  $x$ 로 편미분하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\partial_x p \pm Z \partial_x v_x) \pm c \frac{\partial}{\partial x} (\partial_x p \pm Z \partial_x v_x) = 0 \quad (7)$$

여기서, 매질은 일정하고  $\partial_x = \frac{\partial}{\partial x}$ 이다.

같은 방법으로  $y$  및  $z$ 방향에 대해서도 식을 도출하고 각각의 방향에 대해서 정리하면 다음과 같다.

$x$ 방향에 대해서,

$$\frac{\partial}{\partial t} F_{x\pm} \pm c \frac{\partial}{\partial x} F_{x\pm} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} G_{x\pm} \pm c \frac{\partial}{\partial x} G_{x\pm} = 0. \quad (9)$$

여기서

$$G_{x\pm} = \partial_x p \pm Z \partial_x v_x, \quad (10)$$

$$F_{x\pm} = p \pm Z v_x, \quad (11)$$

이 된다. 위의 식은 각각  $F_{x\pm}$ 와  $G_{x\pm}$ ,  $F_{y\pm}$ 와  $G_{y\pm}$  및  $F_{z\pm}$ 와  $G_{z\pm}$ 의 방정식으로 되어 있기 때문에  $F_{x\pm}$ ,  $G_{x\pm}$ ,  $F_{y\pm}$ ,  $G_{y\pm}$ ,  $F_{z\pm}$  및  $G_{z\pm}$ 를 변수로 해서 CIP법을 적용한 것으로,  $x$ ,  $y$  및  $z$ 방향의 전파에 대해서 음장을 계산하는 것이 가능하다[8-9].

x방향을 계산할 때에는  $p \pm Z v_x$ 와  $\partial_x p \pm Z \partial_x v_x$ 의 계산은 했지만, y방향 계산에 이용하는  $\partial_y p$ 와 z방향 계산에 이용하는  $\partial_z p$ 에 대해서는 x 방향의 전파를 계산하지 않고 있다. 그래서 이하에 나타내는 식(12)과 식(13)에 1차 함수 보간을 적용하여  $\partial_y p$  및  $\partial_z p$ 의 x방향의 전파를 계산한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\partial_y p \pm Z \partial_y v_x) \pm c \frac{\partial}{\partial x} (\partial_y p \pm Z \partial_y v_x) = 0. \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\partial_z p \pm Z \partial_z v_x) \pm c \frac{\partial}{\partial x} (\partial_z p \pm Z \partial_z v_x) = 0. \quad (13)$$

또, y 및 z방향에 대해서도 같은 방법으로 각각의 식에 1차 함수 보간을 적용하여  $\partial_x p$  및  $\partial_z p$ 의 y방향의 전파,  $\partial_x p$  및  $\partial_y p$ 의 z방향의 전파를 계산한다. 이와 같이 변화가 급격하지 않은 변수(3차원 음장해석의 경우는 x방향의  $\partial_y p$  및  $\partial_z p$ , y방향의  $\partial_x p$  및  $\partial_z p$ , z방향의  $\partial_x p$  및  $\partial_y p$ )에 대해서는 1차 함수 보간을 적용하여 계산 절차를 간단화한 해석법을 M형 CIP법이라고 한다[6].

### 2.2 CIP법에 의한 3차원 음장해석을 위한 이산화

그림 1은 3차원 음장해석을 CIP법을 이용해서 계산할 경우의 격자 모델을 나타내고 있다. 그림 1에서 나타낸 것처럼 본 해석법에는 음압, 입자속도를 그림과 같이 그리드 상에 배치하였다.

본 해석법은 널리 사용되고 있는 staggered-grid 모델(Yee 셀)을 이용한 FDTD법과는 달리, 음압과 입자속도의 반 셀의 어긋남은 존재하지 않는다. 또, 각 격자상에 각각의 성분의 미분치  $\partial_x p$ ,  $\partial_x v_x$ ,  $\partial_y p$  및  $\partial_y v_y$ ,  $\partial_z p$  및  $\partial_z v_z$ 를 배치하였다.

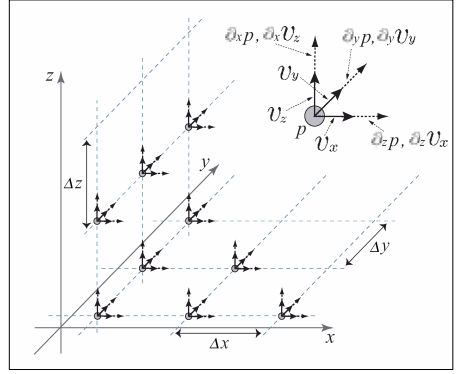


그림 1. CIP법 음장해석을 위한 모델  
Fig. 1 Model in acoustic analysis using the CIP method.

방향 변화로는 우선  $\pm x$ 방향으로의 전파를 생각하면  $\pm x$  방향의 변수로 하는  $F_{x\pm}$ 와  $G_{x\pm}$ 에 대해서는  $+x$ 방향에  $F_{x+}$ 와  $G_{x+}$ 가 전파하고  $-x$ 방향에  $F_{x-}$ 와  $G_{x-}$ 가 전파한다. 그림 2는 CIP법에 의한 계산의 모델을 나타내고 있다. 그림 2에 의해  $\pm x$ 방향에 대해서 시간스텝  $n+1$ 의  $F_{x\pm}$ 와  $G_{x\pm}$ 는 다음과 같은 식으로 얻어진다.

$$F_{x\pm}^{n+1}(i, j, k) = a \xi^3 \pm b \xi^2 \pm G_{x\pm}^n(i, j, k) \pm F_{x\pm}^n(i, j, k), \quad (14)$$

$$G_{x\pm}^{n+1}(i, j, k) = 3a \xi^2 \pm 2b \xi \pm G_{x\pm}^n(i, j, k). \quad (15)$$

으로 된다. 단,

$$a = \frac{G_{x\pm}^n(i, j, k) \pm G_{x\pm}^n(i \mp 1, j, k)}{(\mp \Delta x)^2} \pm \frac{2(F_{x\pm}^n(i, j, k) \mp F_{x\pm}^n(i \mp 1, j, k))}{(\mp \Delta x)^3}, \quad (16)$$

$$b = \frac{3(F_{x\pm}^n(i \mp 1, j, k) \mp F_{x\pm}^n(i, j, k))}{(\mp \Delta x)^2}$$

$$\pm \frac{2G_{x\pm}^n(i, j, k) \pm G_{x\pm}^n(i \mp 1, j, k)}{\mp \Delta x}, \quad (17)$$

$$\xi = \mp c \Delta t. \quad (18)$$

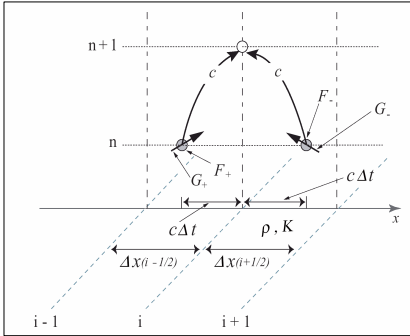


그림 2. CIP법에서 ±x방향의  $F_{x\pm}$ 와  $G_{x\pm}$ 의 계산법

Fig. 2 Calculation method of  $F_{x\pm}$  and  $G_{x\pm}$  to ±x-direction using the CIP method.

여기서,  $\Delta x$ 와  $\Delta t$ 는 각각 격자 사이즈와의 시간스텝이다. ±y방향에 대해서는  $F_{y\pm}$ 와  $G_{y\pm}$ , ±z방향에 대해서는  $F_{z\pm}$ 와  $G_{z\pm}$ 로 치환한 것으로 ±x방향과 같이 구하는 것이 가능하다.

### III. CIP법을 이용한 3차원 음장의 계산결과

그림 3은 해석모델을 나타내었다. 해석영역의 중심을  $O$ , 관측점을  $Q$ 로 하고  $x$ 축과  $OQ$ 의 각을  $\phi$ ,  $z$ 축과  $OQ$ 의 각을  $\theta$ 로 하였다. 입력으로는 점  $O(x, y, z) = (0, 0, 0)$ 에서 식(14) 및 그림 4에서 나타낸 파형으로 음압 구동할 때의 각 관측점에서의 음압을 계산하였다.

$$p(t) = \beta(12 a^2 (t-\tau) - 8 a^3 (t-\tau)^3) e^{-a(t-\tau)^2} \quad (19)$$

여기서,  $\tau = 50\Delta t$ ,  $a = 1.5 \times \frac{1}{(10\Delta t)^2}$ 와

$\beta = 5.4 \times 10^{-10}$ 으로 하였다. 그리고 이하에서 계산되는 CIP 해석에 대한 각 조건을 표 1에 나타내었다.

그림 5의 (a)는 CIP법으로 계산된 시간에 대한 음압 파형을 나타내었다. 관측점의 좌표( $x$ [m],  $y$ [m],  $z$ [m])는 Q1(2.5, 0, 0), Q2(5.0, 0, 0) 및 Q3(7.5, 0, 0)로 하고 있다(따라서  $\phi = 0^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$ 로 됨). 단,  $x$ ,  $y$  및  $z$ 는 원점에서의 거리[m]를 나타내고 있다. 그리고

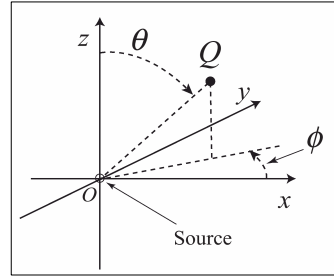


그림 3. 해석 모델  
Fig. 3 Analysis model.

그림 (b)는 FDTD법에 의한 해석에 대해서 구한 결과를 나타내었다. 여기서, FDTD법에 의한 해석의 셀 사이즈( $\Delta$ ) 및 시간스텝( $\Delta t$ )은 CIP법의 그리드 사이즈와 시간스텝과 같은 값을 이용하고 있다. 그림 5에서 (a), (b)의 음압 파형을 비교하면 FDTD해석에 의해서 얻어진 파형이 일그러지고 진동하고 있는 상태임을 알 수 있다. 그리고 전파거리가 멀게 되면 진동이 많아지고 파형이 크게 일그러지는 것을 알 수 있다.

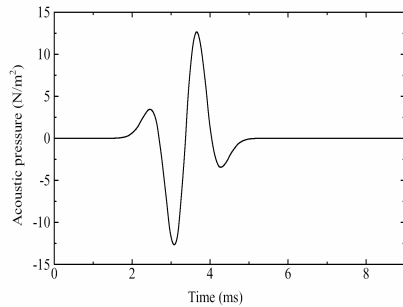


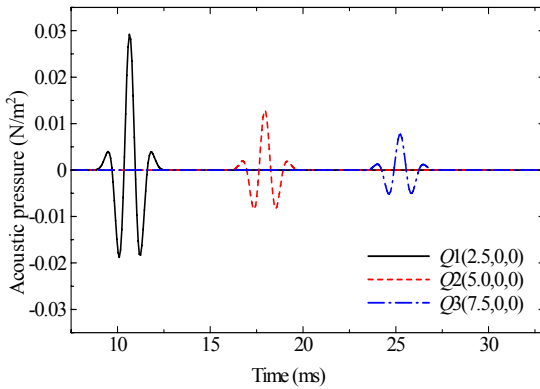
그림 4. 입력된 음압 파형  
Fig. 4 Acoustic pressure waveform.

표 1. CIP법의 수치해석 조건  
Table 1. Conditions of the analysis by the CIP method

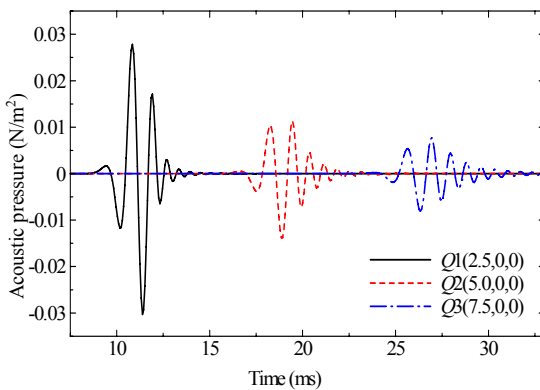
기호	범위 및 조건
grid size	$\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta = 0.05m$
time step	$\Delta t = 6.735 \times 10^{-5}s$
$\Phi$ (azimuthal angle)	$0^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$
$\Theta$ (elevation angle)	$0^\circ \leq \rho \leq 90^\circ$
$\rho$	1.21
$K$	$1.4235529 \times 10^5$

그림 6은 그림 5 (a)의  $Q2(5.0, 0, 0)$ 의 음압 파형을 주파수 변환하여 구한 CIP 및 FDTD 해석결과와 이론값과의 위상오차를 나타내었다. 그림 6의 종축은 위상오차, 횡축은 주파수를 의미한다. 그림에서 CIP 해석결과는 위상오차가 거의 생기지 않는 반면, FDTD 해석결과는 주파수가 높아짐에 따라 위상오차가 생기는 것을 알 수 있다. 예를 들면, 1024Hz에서는 170deg. 만큼 위상지연이 생기고 있다. 여기서 셀 사이즈를 고려하면 1024Hz에서는 point per wavelength(p.p.w.)는 6.7이고 또, 관측점까지의 거리  $OQ = 5m$ 는 약 15 파장에 해당한다.

0)의 진폭값의 비율을 나타내고 있다. 그리고 그림 7에서는 이론값에서 얻은 진폭비를 나타내고 있으며, 그 값은  $-3.52dB$  이다. 그림에서 FDTD 해석결과는 전 주파수에 대해서는 이론치와 거의 같지만, CIP 해석결과는 주파수가 높아짐에 따라 약간 감소하고 있으며 1024Hz(p.p.w. = 6.7)에서는 이론치보다 1.75dB 감쇄하고 있다. 이것들의 결과에서  $x$ 방향에서의 전파에 대해서, M형 CIP해석은 위상의 정밀도는 매우 좋지만 약간의 에너지 감소가 생긴다는 것을 알 수 있다.



(a) CIP법

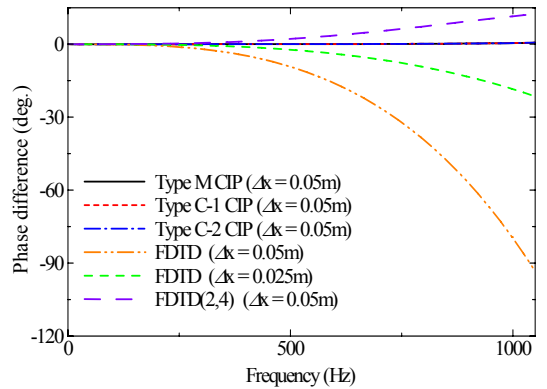


(b) FDTD법

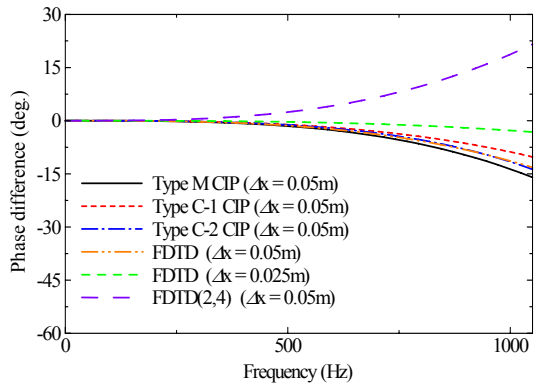
그림 5.  $Q1, Q2$  및  $Q3$ 의 음압 계산결과

Fig. 5 Calculated results of  $p$  at  $Q1, Q2$  and  $Q3$

그림 7은 CIP 및 FDTD 해석결과의 진폭비를 나타내었다. 종축은  $Q2(5.0, 0, 0)$ 의 진폭값과  $Q3(7.5, 0, 0)$



(a) 축 방향( $\phi = 0^\circ, \theta = 0^\circ$ )



(b) 대각 방향( $\phi = 45^\circ, \theta = 55^\circ$ )

그림 6. 주파수에 대한 위상오차

Fig. 6 Phase error versus frequency.

같은 그림(a)에서 축 방향에서는 CIP의 위상오차가 거의 생기지 않는 반면, FDTD는 주파수가 높아지면 질수록 위상오차가 생기는 것을 알 수 있다. 그리고

그림(b)에서 대각 방향에서는 셀 사이즈를  $\Delta=0.025m$ 로 한 경우의 FDTD법이 가장 위상오차가 적은 것을 알 수 있었다.

다음으로 전파에 따른 진폭의 감쇠를 평가 하였다. 그림 7에 Q2( 5.0, 0, 0 )와 Q3( 7.5, 0, 0 )의 음압 파형에서 얻은 진폭비를 나타내었다. 단, (a) 및 (b)는 각각 축 방향과 대각 방향에서의 결과를 나타내고 있다. 여기서 진폭비는 두 점의 진폭비를 계산하고 그 값에서 이론값에서 계산한 진폭비의 값을 줄인 값으로 하고 있다(수치적인 감쇠가 없으면 0dB가 된다).

같은 그림에서 축 방향과 대각 방향에서의 FDTD의 진폭비는 전부의 주파수에 대해서 이론값과 거의 일치한다. 한편 축 방향과 대각 방향에서의 CIP의 진폭비는 주파수가 높아지는 것에 반하여 약간 감소하고 1024Hz(point per wavelength(p.p.w.) : 6.7)에서는 이론값보다 약 1.75dB 감소하고 있다. 그리고 대각 방향에서는 C-1형 CIP법이 M형 CIP법보다 진폭의 감쇠가 작은 것을 알았다. 이것들의 결과에서 이하의 것을 알 수 있다. 예로 1024Hz일 때, M형 CIP법의 진폭비가 C-1형 CIP법의 진폭비보다도 약 2.5dB 감소하고 있다.

다음에 전파방향에 대한 영향을 검토하였다. 그림 8에서는 전파방향에 대한 위상속도를 나타내었으며 (a) 및 (b)는 각각  $xy$ 평면( $\theta = 90^\circ$ )과 3차원 격자의 대각선을 포함한 평면( $\phi = 45^\circ$ )에서의 결과를 나타내고 있다. 같은 그림에서 종축은 매질의 음속으로 규격화한 위상치로 나타내고 있다. 횡축에 대해서는 (a)가  $x$ 축에서의 각도  $\phi$ , (b)가  $z$ 축에서의 각도  $\theta$ 로 하고 있다. 그리고 주파수는 1024Hz(p.p.w. = 6.7)의 경우를 나타내고 있다.

전체적으로 보면 같은 이산화조건일 경우, C-1형 CIP법이 가장 수치분산성이 적은 해석법이다. CIP법의 해석결과는 축 방향에서 대각 방향으로 향해서 위상속도가 늦어지고 대각 방향에서 가장 늦어진다. FDTD(2,4)법은 전 각도에서 위상속도가 음속보다도 약간 빨라진다.

그림 9는 전파방향에 대한 진폭비를 나타내었으며 (a) 및 (b)는 각각  $xy$ 평면( $\theta = 90^\circ$ )과 3차원 격자의 대각선을 포함한 평면( $\phi = 45^\circ$ )에서의 결과를 나타내고 있다. 같은 그림에서 종축의 진폭비는  $OQ = 5m$ 와

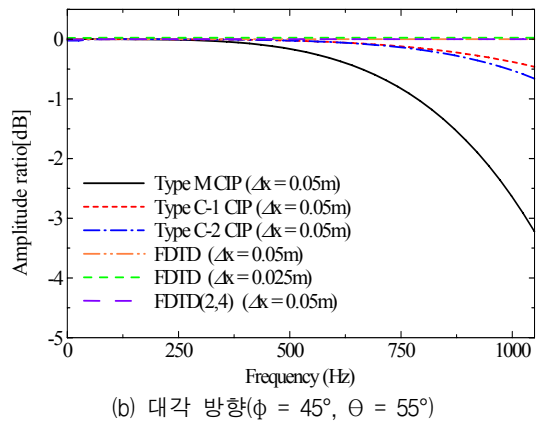
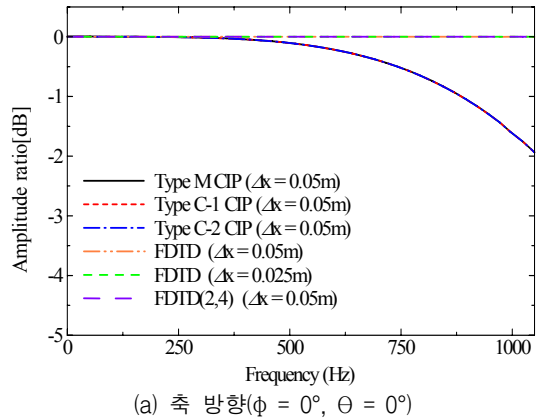


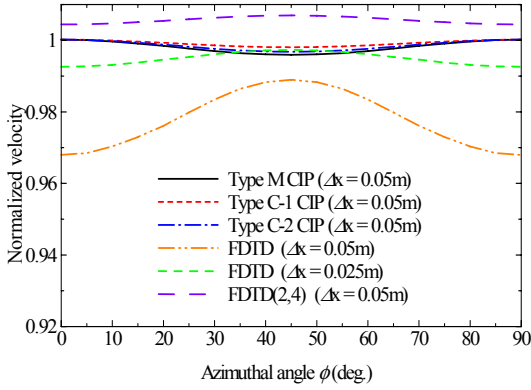
그림 7. 주파수에 대한 진폭비  
Fig. 7 Amplitude ratio versus frequency.

$OQ = 7.5m$ 인 두 점의 진폭비를 계산하고 그 값에서 이론값에서 계산한 진폭비의 값을 줄인 값으로 나타내고 있다. 횡축에 대해서는 (a)가  $x$  축에서의 각도  $\phi$ , (b)가  $z$  축에서의 각도  $\theta$ 로 하고 있다. 그리고 주파수는 1024Hz(p.p.w. = 6.7)의 경우를 나타내고 있다.

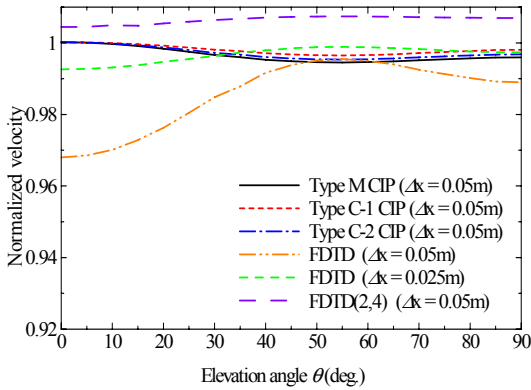
그림 9에서는 FDTD의 진폭비는 축 방향과 대각방향에서의 전 방향에 대해서 이론값과 거의 일치한다. CIP법에 의한 해석결과에는 수치적인 진폭의 감쇠가 생긴다. 그리고 전체적으로 보면 C형 CIP법의 결과가 M형 CIP법보다도 진폭의 감쇠가 작다. 즉 C형 CIP법의 해석결과는 축 방향에서 대각 방향으로 향해서 감쇠가 작아지며 대각 방향에서 가장 작아지는 반면 M형 CIP법의 해석결과는 대각 방향에서 축 방향으로 향해서 감쇠가 작아지며 축 방향에서 가장 작아진다.

마지막으로 각 해석법에 대한 메모리와 계산시간에

대하여 검토를 하였다. 표 2에 각 해석법에 대한 필요한 메모리와 계산시간을 나타내었다. 여기서  $x, y$ 와  $z$  방향의 격자수를 각각  $N_x, N_y$  와  $N_z$  로 하고  $N_x = N_y = N_z = N$ 라 하면 각 해석법의 메모리는 사용한 변수와 총 격자수( $N^3$ )의 곱으로 구하여진다. 단, 이 결과



(a) xy평면( $\Theta = 90^\circ$ )



(b) 3차원 격자의 대각선을 포함한 평면( $\phi = 45^\circ$ )

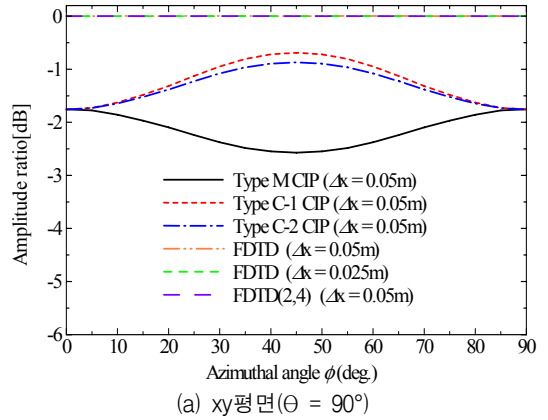
그림 8. 전파방향에 대한 규격화된 음속(주파수 : 1024Hz)

Fig. 8 Normalized velocity versus azimuthal angle and elevation angle.

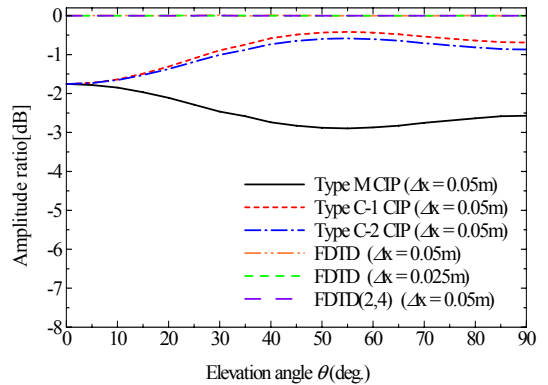
는 외부 흡수경계조건에 대해서는 고려를 하지 않고 있다. 즉, 실제의 자유공간영역을 계산할 경우의 FDTD법 계산에서는 반드시 흡수경계가 필요하므로 그에 따른 메모리와 계산시간이 더 필요해진다.

표에서 같은 이산화조건에서는 FDTD법의 메모리와 계산시간이 가장 적다는 것을 알 수 있다. 그러나 지금까지의 결과에서 알 수 있듯이 CIP법은 FDTD법

에 비해서 압도적으로 수치분산성이 적고, 이 두 해석법으로 같은 정밀도를 실현할 것 같으면 CIP법이 계



(a) xy평면( $\Theta = 90^\circ$ )



(b) 3차원 격자의 대각선을 포함한 평면( $\phi = 45^\circ$ )

그림 9. 전파방향에 대한 진폭비(주파수 : 1024Hz)

Fig. 9 Amplitude ratio versus azimuthal angle and elevation angle.

산의 손실이 적다. 한편으로 C-1형 CIP법과 C-2형 CIP법을 비교하면 C-1형은 사용메모리와 계산시간 모두 C-2형보다도 많고, 계산 정밀도도 고려해서 종합적으로 생각해보면 C-2형의 쪽이 우위성이 있다고 말할 수 있다. 그리고 M형 CIP법과 C-2형 CIP법을 비교해보면 사용메모리는 동등하고 계산시간은 M형 CIP법이 적지만 계산 정밀도에서는 C-2형 CIP법이 높다. 이 두 해석법의 사이에는 계산시간과 계산정밀도의 교환 조건이 있고 계산대상에 따라서 선택할 필요가 있을 것이다.

표 2. 각 해석법에 대한 메모리와 계산시간  
Table 2. Memory and Run-time for each method.

방법	메모리 (×4bytes)	계산 시간
Type C-1 CIP( $\Delta=0.05\text{mm}$ )	$32N^3$	1(1559 min)
Type C-2 CIP( $\Delta=0.05\text{mm}$ )	$10N^3$	0.74
Type M CIP( $\Delta=0.05\text{mm}$ )	$10N^3$	0.371
FDTD( $\Delta=0.05\text{mm}$ )	$4N^3$	0.022
FDTD( $\Delta=0.025\text{mm}$ )	$32N^3$	0.366
FDTD(2,4)( $\Delta=0.05\text{mm}$ )	$4N^3$	0.026

#### IV. 결론

본 논문에서는 C형 CIP법을 이용한 3차원 음장 해석의 정밀도에 관해서 검토를 하였으며, 위상특성과 전파방향의 영향을 명확히 하였다. 즉 같은 이산화조건에서 C형 CIP해석은 FDTD해석에 비하여 수치분산성이 적지만 많은 사용 메모리와 계산시간이 필요하다. 그리고 C-1형과 C-2형 CIP법은 입방체 격자의 대각 방향에서는 축 방향에 비하여 정밀도가 약간 저하하는 것을 알 수 있었다.

그리고 C-2형 CIP법은 C-1형 CIP법보다 사용 메모리와 계산시간이 적고, 계산정밀도도 고려해서 보면 유효한 해석법이라는 것이 명확하였다. 이 해석법은 종래의 해석법에 비하여 수치분산성이 적고 펄스적인 음원에 대한 시간영역에서의 해석에는 우위적인 해석법이 될 것으로 기대된다.

#### 참고 문헌

[1] K. S. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving maxwell's equations in isotropic media", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. AP- 14, No. 4, pp. 302-307, May 1966.  
 [2] K. S. Kunz and R. J. Luebbers, "The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics", CRC Press, pp.15-34, 1993.  
 [3] D. Botteldooren, "Finite-difference time-domain simulation of low-frequency room acoustic problems", J. Acoust. Soc. Am., Vol. 98, No. 6, pp.3302-3308, 1995.  
 [4] Mohammed F. Hadi and Melinda Picket-May,

"A modified FDTD (2, 4) scheme for modeling electrically largestructures with high-phase accuracy", IEEE Trans. Antennas Propag., Vol. AP-45, No. 2, pp.254- 264, Feb. 1997.

[5] H. Takewaki, et al., "Cubic interpolated pseudo-particle method(CIP) for solving hyperbolic-type equations", J. Comput. Phys., Vol. 61, pp.261-265, 1985.  
 [6] T. Yabe, et al., The constrained interpolation profile method for multiphase analysis, J. of Comput. Phys., Vol. 169, pp.556-593, 2001.  
 [7] T. Yabe, et al., CIP method, Morikita Pub. Co., pp.6-43, 2003.  
 [8] K. Okubo and N. Takeuchi, "Analysis of an Electromagnetic Field Created by Current Using Constrained Interpolation Profile Method", IEEE Trans. Antennas Propag., pp. 111-119, Jan. 2007.  
 [9] K. Okubo, et al., "Consideration on Boundary Condition Between Different Media in the CIP Electromagnetic Field Analysis", Proc. Of the 2006 Inter. IEEE Intl. Symp. on A.P., pp. 76-81, July 2006.

#### 저자 소개



#### 이채봉(Chai-bong Lee)

1985년 2월 : 동아대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

1988년 3월 : 동북대학교 대학원 전기통신공학과 졸업(공학석사)

1992년 3월 : 동북대학교 대학원 전기통신공학과 졸업(공학박사)

1993 ~ 현재 : 동서대학교 전자공학과 부교수

※ 주 관심분야 : 신호처리, 음향공학



#### 오성관(Sung-qwan Oh)

2007년 3월 : 동서대학교 전자공학과 졸업 (공학사)

2007년 3월 ~ 현재 : 일본 아가다현립대학 재학

※ 주 관심분야 : 신호처리, 유한요소 해석