



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.

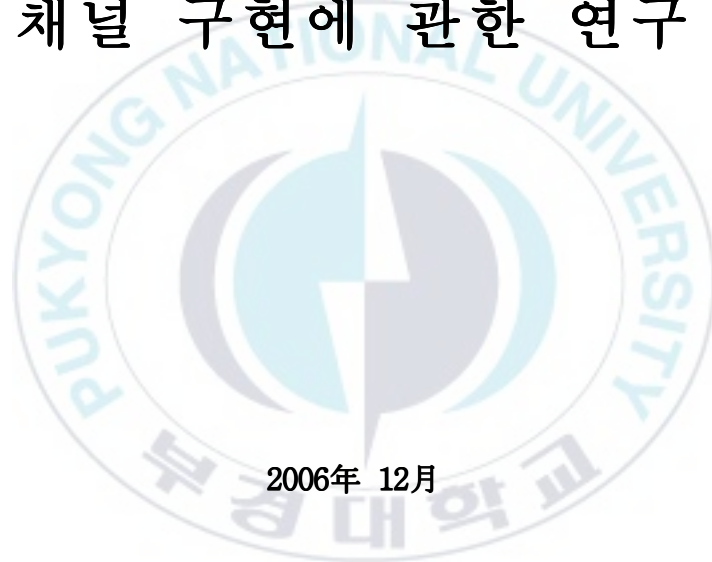
이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

TLM 모델링을 이용한 수중 통신

채널 구현에 관한 연구



2006年 12月

釜慶大學校 産業大學院

情報通信工學科

梁 宇 殖

工學碩士 學位論文

TLM 모델링을 이용한 수중 통신

채널 구현에 관한 연구

指導教授 朴 奎 七

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2006年 12月

釜慶大學校 産業大學院

情報通信工學科

梁 宇 殖

이 論文을 梁宇殖의 工學碩士
學位論文으로 認准함



主 審 工學博士 尹 鍾 樂 (印)

委 員 工學博士 鄭 信 一 (印)

委 員 工學博士 朴 奎 七 (印)

목 차

I. 서론.....	1
II. 2차원 TLM모델의 도출	2
II-1 TLM 모델링.....	2
II-2 파동방정식에 따른 음향계와 전기계의 대응.....	3
II-3 산란알고리즘의 도출.....	6
III. 수치시뮬레이션.....	8
III-1 동일 매질에서의 음파전달.....	8
III-2 다른 매질이 존재하는 경우.....	13
III-2-1 음속이 다른 경우.....	13
III-2-2 밀도가 다른 경우.....	17
IV. 수중 통신 채널 구현.....	22
IV-1 Image법과 TLM법의 비교.....	22
IV-1-1 Image Method.....	22
IV-1-2 TLM(Transmission Line Matrix).....	25
IV-2 TLM에 의한 구현.....	27
IV-2-1 연속파,1주기파,3주기파.....	27
IV-2-2 매질이 물인 경우.....	33
IV-2-3 매질이 공기와 물일때.....	37
IV-2-4 매질이 공기,물,진흙일 때.....	43
V. 결 론.....	48

그 립 목 차

[그림 2.1] 2차원 TLM공간.....	2
[그림 2.2] 2차원 TLM요소.....	3
[그림 2.3] TLM요소에 대한 산란.....	7
[그림 3.1] 2차원 TLM상에서의 분산요소.....	11
[그림 3.2] 속도와 밀도가 일정할 때.....	12
[그림 3.3] TLM 가변음속요소.....	15
[그림 3.4] 속도가 2:1인 경우.....	16
[그림 3.5] 속도가 1:2인 경우.....	16
[그림 3.6] 밀도가 다른 매질이 존재하는 경우.....	17
[그림 3.7] 요소간의 펄스반사.....	19
[그림 3.8] 밀도가 2:1인 경우.....	20
[그림 3.9] 밀도가 1:2인 경우.....	20
[그림 4.1] Multipath Model.....	24
[그림 4.2] Image Multipath Model.....	24
[그림 4.3] Image Method에 의한 임펄스응답.....	25
[그림 4.4] TLM에서의 상관함수.....	26
[그림 4.5] TLM에서의 시간파형.....	27
[그림 4.6] TLM에 의한 임펄스응답.....	28
[그림 4.7] 연속파.1주기.3주기.....	29

[그림 4.8] 연속파에 따른 결과.....	30
[그림 4.9] 1주기파에 따른 결과.....	31
[그림 4.10] 3주기파에 따른 결과.....	32
[그림 4.11] Multipath Model(물).....	33
[그림 4.12] 매질이 물에서의 결과.....	35
[그림 4.13] 자기상관과 상호상관(물).....	36
[그림 4.14] 시간파형(물).....	36
[그림 4.15] 임펄스 응답(물).....	37
[그림 4.16] Multipath Model(공기,물).....	38
[그림 4.17] 공기,물에서의 결과.....	40
[그림 4.18] 자기상관과 상호상관(공기,물).....	41
[그림 4.19] 시간파형(공기,물,진흙).....	41
[그림 4.20] 임펄스 응답(공기,물).....	42
[그림 4.21] Multipath Model(공기,물,진흙).....	43
[그림 4.22] 공기,물,진흙에서의 결과.....	45
[그림 4.23] 자기상관과상호상관(공기,물,진흙).....	46
[그림 4.24] 시간파형(공기,물,진흙).....	46
[그림 4.25] 임펄스 응답(공기,물,진흙).....	47

A Study on Implementation of Underwater Acoustic Communication Channel using TLM Modelling

Woo-Sik Yang

*Department of Telematics Engineering
Graduate School of Industry,
Pukyong National University*

Abstract

We can easily build up a sound channel with a Image Method, while the speed of sound and the surface of water , the ocean floor are same. On the contrary ,We can build up it with a Ray Method, while the speed of sound and the surface of water, the ocean floor are different, like the real ocean.

We use TLM modelling to make it up a propagation channel of sound wave characteristic . First , we investigated the efficiency of TLM through simulation show from the changes of medium. and compared the result of Image Method with simulation is being used TLM Modelling in each environment from medium. according to as above, we will find out that we can build up a communication channel in the water, while the source and the receiver move , like a real ocean environment.

I . 서 론

전파가 전달되지 않는 수중에서의 통신에는 트랜스듀서를 사용한 음파가 이용된다. 공기중에서와는 달리 수중에서의 음파전달채널은 수심에 따라 온도, 수압, 염분도가 변화므로 음파의 전달 속도가 일정치 않으며, 수면과 해저와의 경계, 시간적 공간적인 해양환경변화에 의해 변화한다. 음속은 통상 온도에 의존하기 때문에 온도가 일정하지 않은 음장에서는 음속도 일정하지 않게 되기 때문에 음파전달은 특징적인 경로를 나타낸다. 그리고 해양에서는 온도가 깊이에 대해서 복잡하게 변화하기 때문에 몇가지 특징적인 전달 경로가 있는데, 이 특징적인 해양에서의 음파전달을 고찰하기 위해 2차원 TLM 모델링에 의해 시뮬레이션을 행하였다.

음속, 수면, 해저의 반사면이 일정한 때는 Image Method를 사용하면 간단히 음향채널을 구성할 수 있고, 실제 해양과 같이 음속이 일정치 않은 경우, Ray Method를 사용하여 구현이 가능한데 여기서는 TLM 모델링을 이용하여 모의해 보고 Image Method와의 비교를 통하여 TLM 모델링의 채널 구현에 대한 가능성을 확인해 본다.

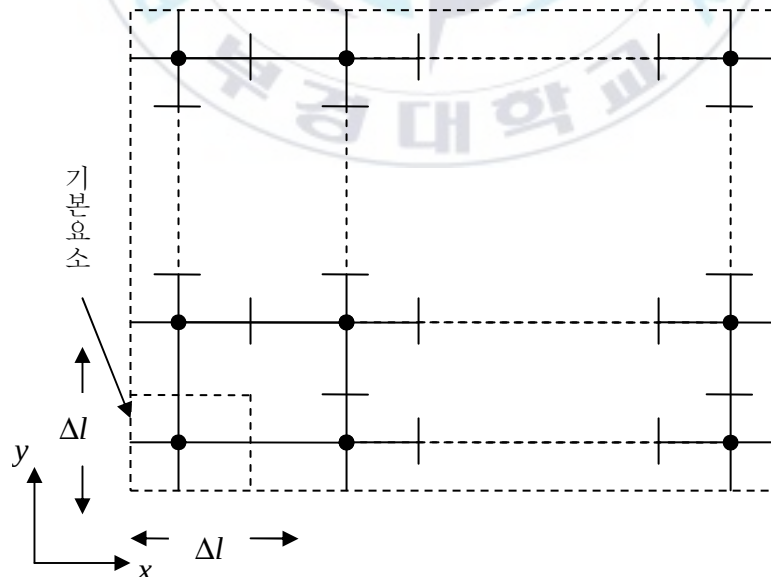
또한, TLM 모델링은 그 알고리즘이 간단하고 다수의 리시버와 소스를 임의의 위치에 배치할 수 있어, 소스나 리시버의 이동 등 두 위치간의 임펄스 응답의 변화에도 적용 가능할 것으로 여겨진다.

여러 입력파를 이용하여 음파전달에 가장 적합한 파형을 찾아, 실제 해양환경과 같은 수면 및 바닥의 효과를 고려한 음파 전달 시뮬레이션을 통해 파의 반사, 위상의 변화, 진행파의 움직임등의 효과가 포함된 음향채널환경의 구현 가능성에 대해서 알아본다.

Ⅱ . 2차원 TLM모델의 도출

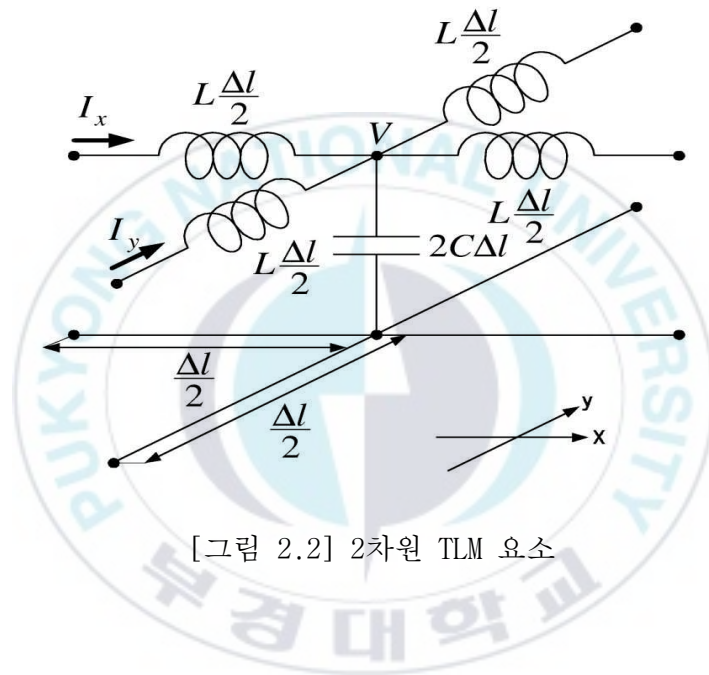
Ⅱ-1 TLM 모델링

Huygens 원리에 바탕을 두고 있는 TLM(Transmission Line Matrix) 모델은 FDTD(Finite Differnece Time Domain)와 같이 파의 산란을 이용한 시간 영역 해석기법으로, 회로 방정식에 맥스웰 방정식을 대응시켜 전파의 전달 해석에 사용되는 해석 방법이다. 이 원리를 음향 신호의 전달에 적용하기 위해서는 회로 방정식에 음향계의 파동방정식을 대응시켜야 한다. 2차원 음장의 계산에 TLM 모델을 적용시키기 위해서는 해석 대상을 [그림2.1]과 같이 기본 요소라 불리는 가장 작은 단위로 분할하는 것이 필요하다.



[그림 2.1] 2차원 TLM 공간

각 기본요소는 [그림2.2]와 같으며, 2차원 TLM요소를 [그림2.1]과 같이 평면적으로 나열시키면 2차원 음장을 구성할 수 있다. 각 요소의 입력전압 및 입력전류를 인접한 요소로부터의 출력전압 및 출력전류로 나타냄에 따라 전달선로상을 전달하는 파동의 해석이 가능하게 된다.



[그림 2.2] 2차원 TLM 요소

II-2 파동방정식에 따른 음향계와 전기계의 대응

이 절에서는 앞 절의 회로 [그림2.2]에 음향계의 파동 방정식을 대응시키는 것에 대해 기술한다.

음장내의 임의의 점에 대한 음압을 p , 입자속도를 u , 매질밀도를 ρ , 체적탄성률을 k 라고 하면 p 와 u 의 관계는 다음 두 개의 식을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$-\nabla u = \frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (\text{연속방정식}) \quad (2.1)$$

$$-\nabla p = \rho \frac{\partial u}{\partial t} \quad (\text{운동방정식}) \quad (2.2)$$

이 식을 2차원으로 확장을 시키면, x, y 에 대해 각각 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial u_x}{\partial x} - \frac{\partial u_y}{\partial y} = \frac{1}{k} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} \quad (2.4)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = \rho \frac{\partial u_y}{\partial t}$$

식(2.3), (2.4)에 의해 음압 p 에 대한 다음 파동방정식을 얻을 수 있다.

$$-\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \frac{\rho}{k} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.5)$$

이 파동 방정식에 앞 절의 회로 [그림2.2]를 대응시키기 위해 회로 방정식을 구성하여야 한다. [그림2.2]의 회로를 보면 Δl 의 길이를 가진 2쌍의 선로가 서로 교차한 형태를 취하고 있고, 단위 길이에 대한 캐패시턴스와 인덕턴스를 각각 C, L 로 하면 요소중앙절점에 대해 전압 V 와 전류 I 의 관계는 다음 두 식으로 나타낼 수 있다.

$$-\frac{\partial I_x}{\partial x} - \frac{\partial I_y}{\partial y} = 2C \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial V}{\partial x} &= L \frac{\partial I_x}{\partial t} \\ -\frac{\partial V}{\partial y} &= L \frac{\partial I_y}{\partial t} \end{aligned} \quad (2.7)$$

식(2.6), (2.7)에 의해 요소에서의 전압 V 에 대한 회로 방정식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 2LC \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (2.8)$$

여기서, 식(2.5), (2.8)을 비교하면 음향계와 전기계를 다음과 같이 대응시킬 수 있다.

$$\begin{aligned} p &\equiv V \\ u_x &\equiv I_x \\ u_y &\equiv I_y \\ \rho &\equiv L \\ 1/k &\equiv 2C \end{aligned} \quad (2.9)$$

식 (2.9)에 의해 TLM 요소내의 음속 c 는

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}} = \frac{1}{\sqrt{2LC}} \quad (2.10)$$

로 주어진다. 이상과 같이 음향계에서의 음파전달을 전달선로로 나타냄으로써 음향문제를 전기적 등가회로로 변환해서 해석할 수 있다.

II-3 산란알고리즘의 도출

[그림2.3]과 같이, 하나의 요소에 대한 산란의 형태를 생각한다. 선분1에서부터 전압펄스P를 입사시켰을 때 절점의 반사계수를 s 라고 하면, 선분1에는 sP 의 펄스가 반사되고, 다른 선분에는 $(1+s)P$ 펄스가 산란한다. 이때, 선분 절점을 본 입력임피던스를 Z_i , 출력임피던스를 Z_o 라고 하면, 반사계수 s 는

$$s = \frac{Z_o - Z_i}{Z_o + Z_i} \quad (2.11)$$

으로 나타낼 수 있다. 같은 요소내에서는 각 특성임피던스를 Z 라고 한다면, 출력임피던스는 $Z/3$ 이기 때문에 반사계수 s 는 식(2.11)에 따라

$$s = \frac{Z/3 - Z}{Z/3 + Z} = -\frac{1}{2} \quad (2.12)$$

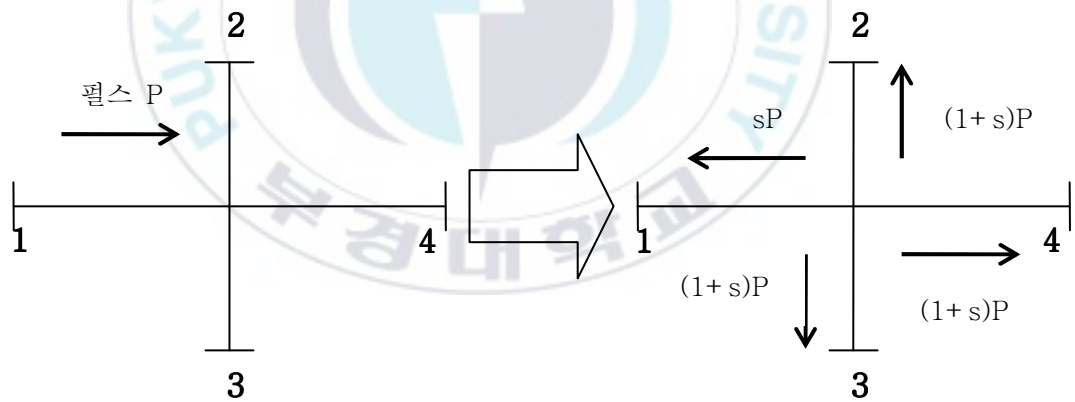
이 된다. 다른 선분 2~4에 대해서도 같은 형태이고, 각 선분으로부터의 입사펄스와 반사펄스 서로간의 중첩에 따라 산란펄스가 결정된다. V 를 절점전압, P_n 을 선분 n 으로의 입사펄스, S_n 을 선분 n 으로의 반사펄스라고 하면 절점에 대한 산란 알고리즘은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V = \sum_{n=1}^4 (1+s)P_n = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 P_n \quad (2.13)$$

$$S_n = V - P_n$$

단, 식(2.13)은 균질매질에 대해서만 성립한다. 다른매질이 존재하는 경우는 각 요소간 펄스의 반사가 발생하기 때문에 S_n 의 식이 다르게 된다.

이상과 같이, 각 요소간의 절점에 대한 전압펄스의 응답을 구하면, 음파를 펄스열에 치환함에 따라 음파전달의 형태를 시뮬레이션할 수 있다.



[그림 2.3] TLM요소에 대한 산란

Ⅲ. 수치시물레이션

Ⅲ-1 동일 매질에서의 음파전달

수치시물레이션은 산란알고리즘식(2.13)에 기초하여 행하여 진다. 2차원 음장을 [그림2.2]의 TLM요소가 [그림2.1]과 같이 x, y 방향에 접속한 모델로 치환할 수 있다.

선분1은 이웃한 요소의 선분3에 접속하고, 선분2는 이웃한 요소의 선분4에 접속하고 있기 때문에 시간 t 에 대한 격자점 (x_i, y_i) 에서의 각 선분방향으로 부터의 입사펄스는 하나 이전의 시간스텝 $t-1$ 에서의 반사펄스에 따라 표현할 수 있고 균질한 매질에서는

$$\begin{aligned} P_1(x_i, y_j)_t &= S_3(x_{i-1}, y_j)_{t-1} \\ P_2(x_i, y_j)_t &= S_4(x_i, y_{j+1})_{t-1} \\ P_3(x_i, y_j)_t &= S_1(x_{i+1}, y_j)_{t-1} \\ P_4(x_i, y_j)_t &= S_2(x_i, y_{j-1})_{t-1} \end{aligned} \quad (3.1)$$

으로 표현된다. 식(2.13), (3.1)으로 수치시물레이션에 대한 산란 알고리즘을 산출하면,

$$\begin{aligned}
V(x_i, y_j)_t &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 P_n(x_i, y_j)_t \\
P_1(x_i, y_j)_t &= V(x_{i-1}, y_j)_{t-1} - P_3(x_{i-1}, y_j)_{t-1} \\
P_2(x_i, y_j)_t &= V(x_i, y_{j+1})_{t-1} - P_4(x_i, y_{j+1})_{t-1} \\
P_3(x_i, y_j)_t &= V(x_{i+1}, y_j)_{t-1} - P_1(x_{i+1}, y_j)_{t-1} \\
P_4(x_i, y_j)_t &= V(x_i, y_{j-1})_{t-1} - P_2(x_i, y_{j-1})_{t-1}
\end{aligned} \tag{3.2}$$

가 된다. 각 시간마다 임의의 절점에서의 임펄스응답은, 식(3.2) 을 반복 이용해서 구할 수 있다. 요소간의 거리는 Δl , 단위시간은 Δt 이므로 요소간 공간적, 시간적 관계를 생각하면, 식(3.2)은 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned}
V(x, y)_t &= \frac{1}{2} \sum_{n=1}^4 P_n(x, y)_t \\
P_1(x, y)_{t+\Delta t} &= V(x - \Delta l, y)_t - P_3(x - \Delta l, y)_t \\
P_2(x, y)_{t+\Delta t} &= V(x, y + \Delta l)_t - P_4(x, y + \Delta l)_t \\
P_3(x, y)_{t+\Delta t} &= V(x + \Delta l, y)_t - P_1(x + \Delta l, y)_t \\
P_4(x, y)_{t+\Delta t} &= V(x, y - \Delta l)_t - P_2(x, y - \Delta l)_t
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$P_1(x, y)_{t+\Delta t} \sim P_4(x, y)_{t+\Delta t}$ 의 합을 취하고 P 를 소거하고 차분방정식으로 나타내면

$$\begin{aligned}
&V(x - \Delta l, y)_t + V(x + \Delta l, y)_t + V(x, y - \Delta l)_t + V(x, y + \Delta l)_t - 4V(x, y)_t \\
&= 2\{V(x, y)_{t-\Delta t} - 2V(x, y)_t + V(x, y)_{t+\Delta t}\}
\end{aligned} \tag{3.4}$$

게다가, 이 식의 각 항을 $V(x, y)_t$ 를 중심으로 테일러 급수전개하고, 미분방정식을 이끌어 내면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = & \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \\ & - \frac{2}{\Delta l^2} \left\{ \frac{\Delta l^4}{4!} \left(\frac{\partial^4 V}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 V}{\partial y^4} \right) + \frac{\Delta l^6}{6!} \left(\frac{\partial^6 V}{\partial x^6} + \frac{\partial^6 V}{\partial y^6} \right) + \dots \right\} \\ & + \frac{4}{\Delta l^2} \left\{ \frac{\Delta t^4}{4!} \frac{\partial^4 V}{\partial t^4} + \frac{\Delta t^6}{6!} \frac{\partial^6 V}{\partial t^6} + \dots \right\} \end{aligned} \quad (3.5)$$

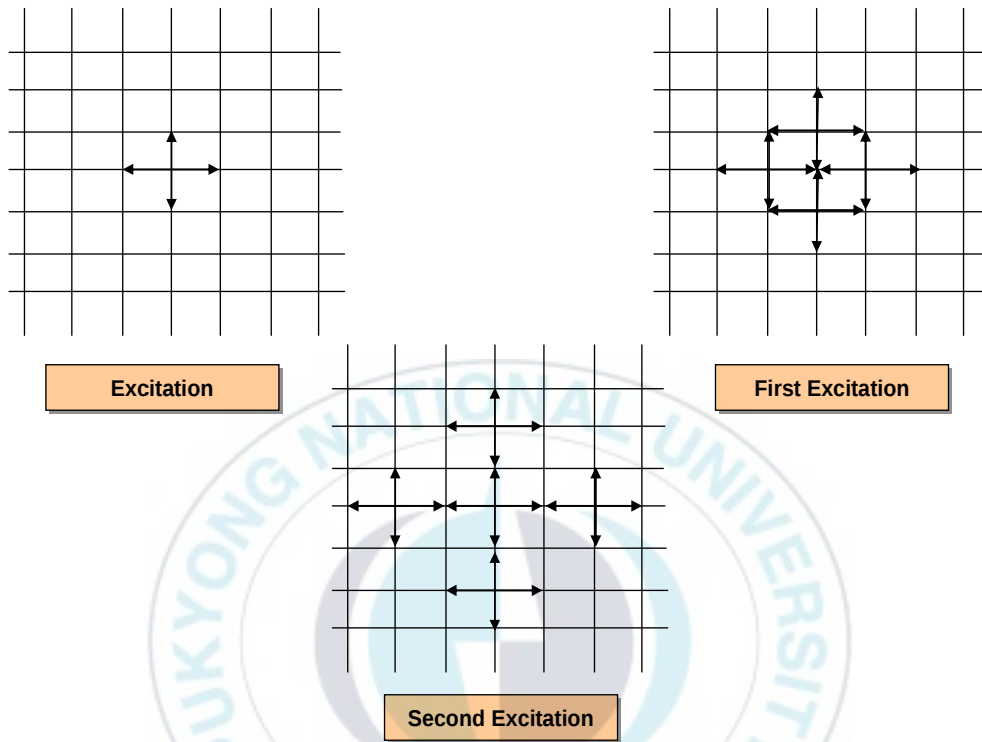
단,

$$c = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\Delta l}{\Delta t} = \frac{c_o}{\sqrt{2}} \quad (3.6)$$

이 된다. 이 미분방정식은 파동방정식에 우수차의 미분항으로 구성된 오차항이 부가한 형태가 되어 있다. 파동방정식에 주목하면, 식(3.6)과 같이 속도가 자유공간속도의 $1/\sqrt{2}$ 이 되어 있지만 이는 II-1장에서

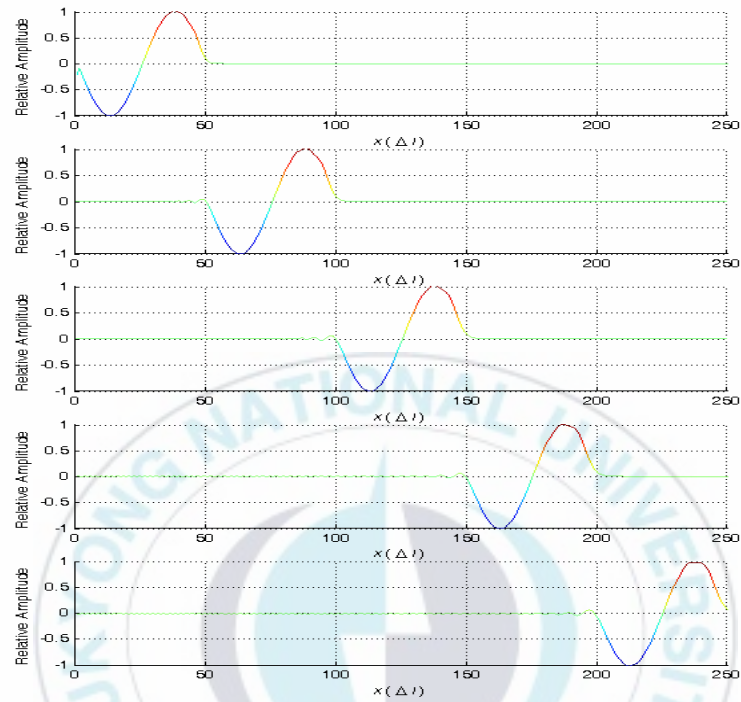
기술한 것과 같이 TLM법 고유의 것이다. 또, 오차항이지만 이는 이산화에 따른 오차항이고, 이에 따라 음압이 급격히 변화하는 장소에서는 큰 진동 오차성분이 나타난다.

[그림3.1]은 2차원 TLM네트워크상에서의 파의 분산형태를 잘 보여주고 있다.



[그림 3.1] 2차원 TLM상에서의 분산형태

[그림3.2]은 매질이 일정할 경우이다. 즉, 속도와 밀도가 일정할 때의 결과를 나타낸다.



[그림 3.2] 속도와 밀도가 일정할 때 ($\rho_1 = \rho_2, c_1 = c_2$)

[그림3.2]에서 두 매질이 같다고 가정한 상태이므로 파의 변화없이 전달되어 가는 것을 볼 수 있다.

Ⅲ-2 다른매질이 존재하는 경우

Ⅲ-2-1 음속이 다른 경우

일반적으로 [그림2.2]과 같은 요소를 이용하면 2차원장에서의 음속은 식(2.10)와 같이 일정하게 되고 음속을 변화시킬 수 없다. 여기서 TLM법으로 음속이 다른 매질을 나타내기위해 [그림3.3]과 같이 요소의 절점에 길이 $\Delta l/2$, 특성임피던스 Z/η 의 5번째선로를 더한 TLM가변음속요소를 생각한다. 여기서, Z 는 다른 선분의 특성임피던스이고, η 은 음속을 결정하는 변수이다. 선분 1~4에대한 반사펄스 S_n 과 선분5에 대한 반사펄스 S_5 는 식(2.11)으로부터

$$\begin{aligned} S_n &= \frac{(Z/\eta) // Z // Z // Z - Z}{(Z/\eta) // Z // Z // Z + Z} = -\frac{\eta + 2}{\eta + 4} \\ S_5 &= \frac{Z // Z // Z // Z - (Z/\eta)}{Z // Z // Z // Z + (Z/\eta)} = \frac{\eta - 4}{\eta + 4} \end{aligned} \quad (n=1 \sim 4) \quad (3.7)$$

이 된다. 여기서 $//$ 는 정수 a_1, a_2 에 대한 다음의 식으로 정의되는 연산기호이다.

$$a_1 // a_2 = \frac{a_1 a_2}{a_1 + a_2} \quad (3.8)$$

산란알고리즘은 식(2.13), (3.7)으로부터

$$V = \frac{2}{\eta+4} \sum_{n=1}^4 P_n + \frac{2\eta}{\eta+4} P_5 \quad (n=1 \sim 5) \quad (3.9)$$

$$S_n = V - P_n$$

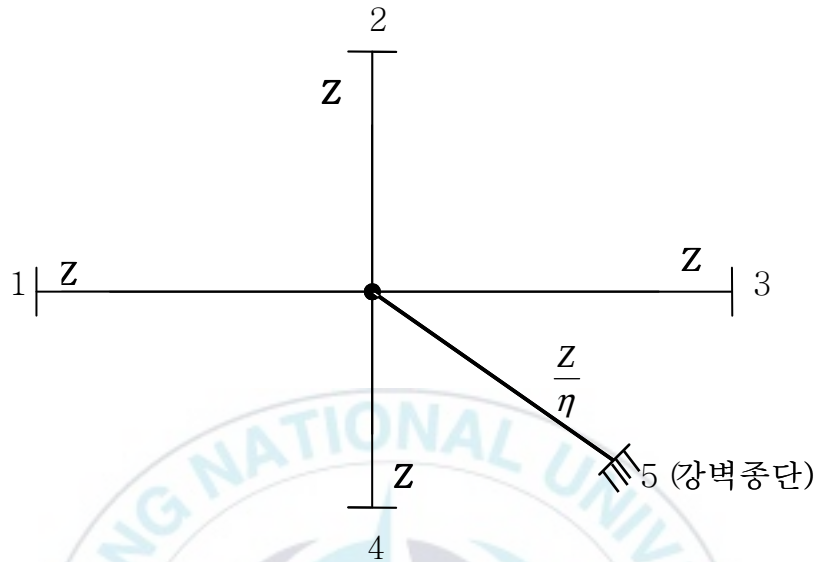
이 된다. 이 산란알고리즘에 따라 미분방정식을 산출하면,

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} &= \frac{\eta+4}{2} \frac{\Delta t^2}{\Delta l^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \\ &- \frac{2}{\Delta l^2} \left\{ \frac{\Delta l^4}{4!} \left(\frac{\partial^4 V}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 V}{\partial y^4} \right) + \frac{\Delta l^6}{6!} \left(\frac{\partial^6 V}{\partial x^6} + \frac{\partial^6 V}{\partial y^6} \right) + \dots \right\} \\ &+ \frac{\eta+4}{\Delta l^2} \left\{ \frac{\Delta t^4}{4!} \frac{\partial^4 V}{\partial t^4} + \frac{\Delta t^6}{6!} \frac{\partial^6 V}{\partial t^6} + \dots \right\} \end{aligned} \quad (3.10)$$

이 된다. 이 식에 따라 음속은,

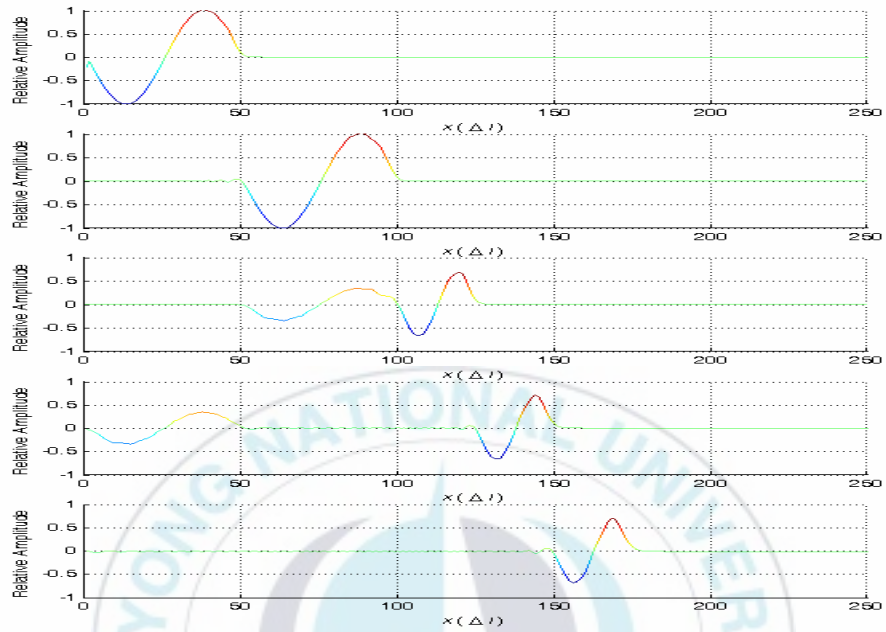
$$c = \sqrt{\frac{2}{\eta+4}} c_0 \quad (3.11)$$

이 되고, η 의 값에 따라 음속을 임의로 설정할 수 있다. 다만, 2차원의 전달선로장에 대한 음속은 $c_0/\sqrt{2}$ 를 넘을 수 없다.

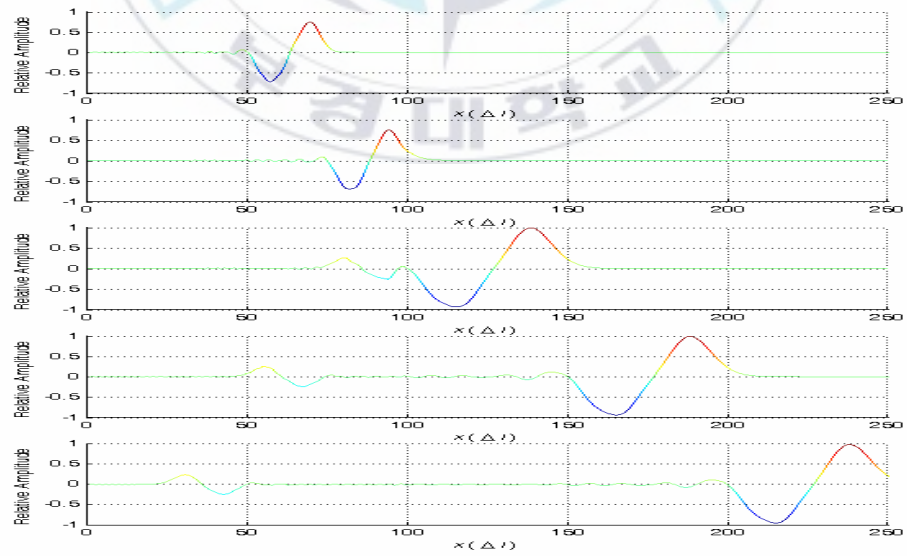


[그림 3.3] TLM 가변임피던스요소

[그림3.4]와 [그림3.5]에서는 두 매질의 속도차가 각각 2:1, 1:2인 경우 시뮬레이션을 행 하였다. $x(\Delta l)=100$ 인 지점에서부터 임피던스 부정합에 의해 반사파가 존재하는 것을 볼 수 있다. 먼저 [그림3.4]를 살펴보면 매질의 속도차가 2:1이므로 반사계수는 $\frac{1-2}{1+2}=-\frac{1}{3}$ 로 위상이 반전되어 있는 것을 알 수 있으며, 진행파는 $1-\frac{1}{3}=\frac{2}{3}$ 의 진폭을 가지고 있는 것을 알 수 있다. 그리고 [그림3.5]는 매질의 속도차가 1:2이므로 반사계수는 $\frac{2-1}{2+1}=\frac{1}{3}$ 이고, 진행파는 $1+\frac{1}{3}=\frac{4}{3}$ 의 진폭을 가지고 있는 것을 알 수 있다.



[그림 3.4] 속도가 2:1 인 경우($c_1 : c_2 = 2:1$)

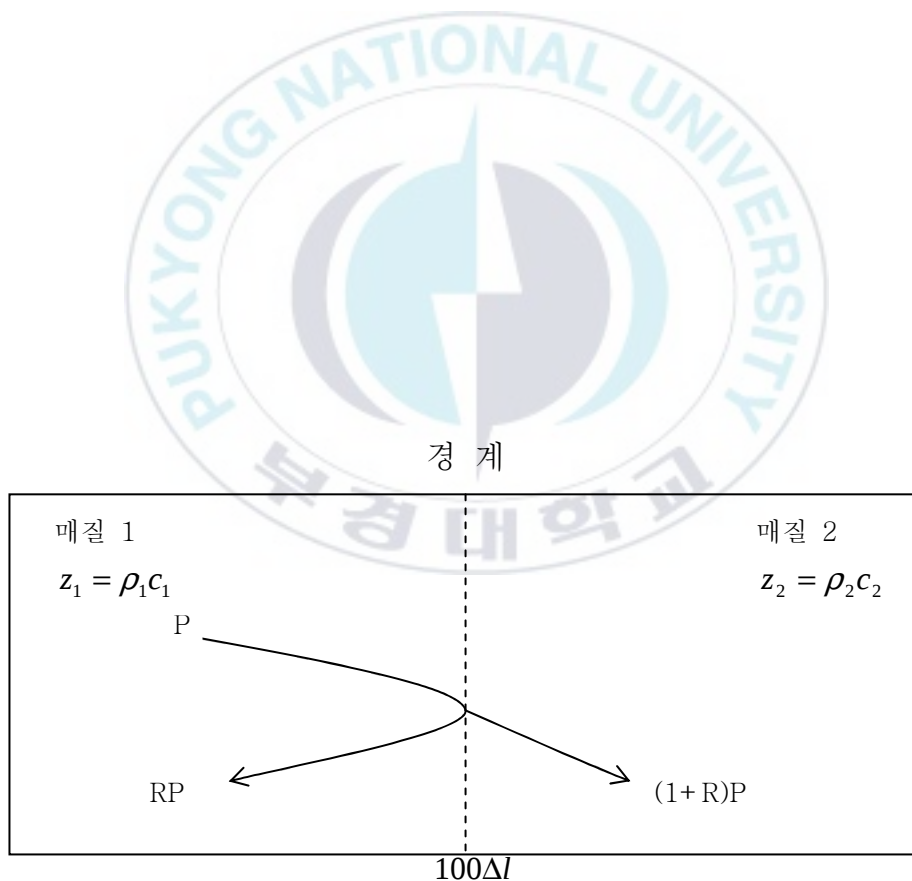


[그림 3.5] 속도가 1:2 인 경우($c_1 : c_2 = 1:2$)

Ⅲ-2-2 밀도가 다른 경우

TLM공간상에 [그림3.6]와 같이 밀도가 다른 매질이 존재하는 경우를 생각한다.

이때, 매질1부터 매질2까지의 반사펄스를 P , 매질1에서 본 경계에서의 반사계수를 R 이라고 하면, 매질1로는 RP 의 펄스가 반사되고, 매질2로는 $(1+R)P$ 의 펄스가 투과한다.



[그림 3.6] 밀도가 다른 매질이 존재하는 경우 ($\rho_1 \neq \rho_2$)

식(2.9)에 따라 매질밀도 ρ 는 인덕턴스 L 에 대응하기 때문에 다른매질의 표현은 각 매질중 요소인 L 을 변화시킴에 따라 행할 수 있다. 매질1에서의 밀도를 ρ_1 , 매질2에서의 밀도를 ρ_2 라고 하면, 반사계수 R 은

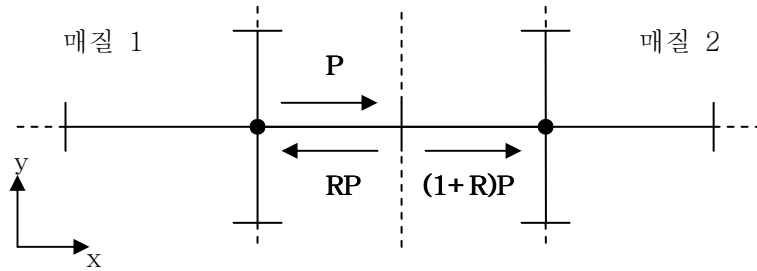
$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{\rho_2 c - \rho_1 c}{\rho_2 c + \rho_1 c} \quad (3.12)$$

이 된다. 이때, 요소상에는 [그림3.7]과 같이 요소간에는 펄스의 반사가 일어난다. 식(3.12)에 따라 각 선분방향에 대한 반사계수를 구할 때 계산알고리즘중에서 입사펄스 P 와 반사펄스 S 와의 관계는

$$\begin{aligned} P_1(x_i, y_j)_t &= R_1 S_1(x_i, y_j)_{t-1} + (1 - R_1) S_3(x_{i-1}, y_j)_{t-1} \\ P_2(x_i, y_j)_t &= R_2 S_2(x_i, y_j)_{t-1} + (1 - R_2) S_4(x_i, y_{j+1})_{t-1} \\ P_3(x_i, y_j)_t &= R_3 S_3(x_i, y_j)_{t-1} + (1 - R_3) S_1(x_{i+1}, y_j)_{t-1} \\ P_4(x_i, y_j)_t &= R_4 S_4(x_i, y_i)_{t-1} + (1 - R_4) S_2(x_i, y_{j-1})_{t-1} \end{aligned} \quad (3.13)$$

이 된다. R_n 은 n 번째 선분방향의 반사계수이다. 이 반사를 산란알고리즘에 집어넣음에 따라 밀도가 다른 매질이 존재하는 경우의 계산을 할 수 있다.

이상과 같이, 음속과 매질밀도는 각각 독립적인 설정이 가능하고 음속과 매질밀도가 모두 다른 경우는 [그림3.3]의 요소를 이용하여 요소간의 관계식에 식(3.13)을 이용하면 좋다. $c^2 = k/\rho$ 이므로 k 가 다른 경우에도 이 알고리즘을 그대로 사용할 수 있다.



[그림 3.7] 요소간의 펄스반사

[그림3.8]과 [그림3.9]는 두 매질의 밀도차가 각각 2:1, 1:2인 경우 시뮬레이션을 행하였다.

먼저 [그림3.8]과 같이 밀도가 2:1인 경우 식(3.12)를 이용하면,

반사계수는 $\frac{1-2}{1+2} = -\frac{1}{3}$ 로 위상이 반전되고, 진행파는 $1 + (-\frac{1}{3}) = \frac{2}{3}$ 의

진폭을 가진다.

그리고 [그림3.9]은 밀도가 1:2이므로 반사계수가 $\frac{2-1}{2+1} = \frac{1}{3}$ 이고

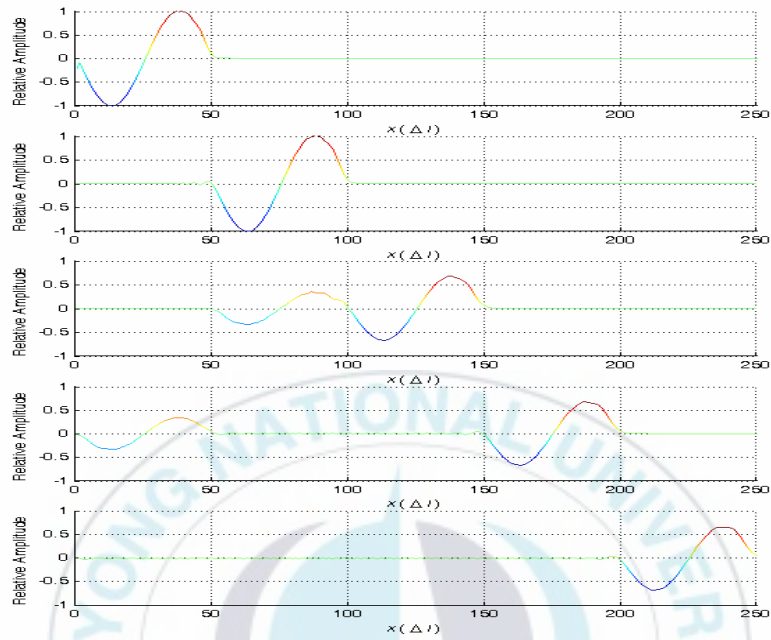
진행파는 $1 + \frac{1}{3} = \frac{4}{3}$ 의 진폭을 가지는 것을 알 수 있다.

마지막으로, [그림3.10]는 두 매질의 속도 및 밀도가 다른 경우를 나타낸다. 속도와 밀도가 각각 2:1인 경우로 이때, 반사계수는

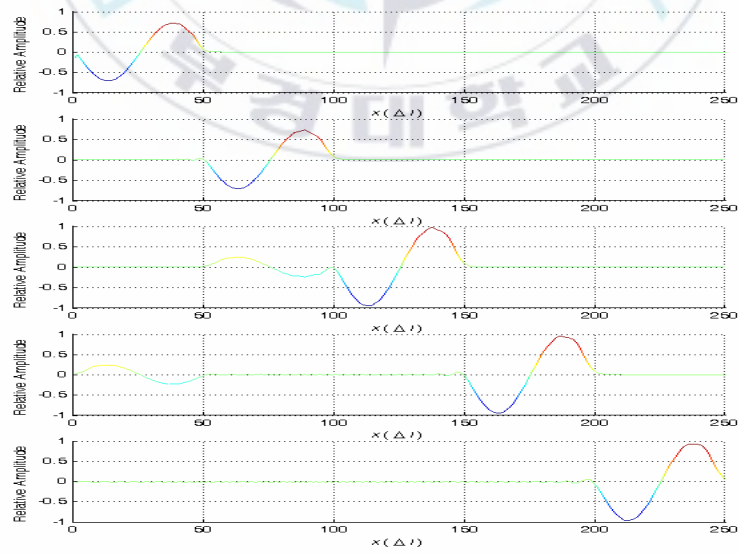
$R = \frac{1 \cdot 1 - 2 \cdot 2}{1 \cdot 1 + 2 \cdot 2} = -\frac{3}{5}$ 으로 위상이 반전되어 있는 것을 알 수 있으며

진행파는 $S = 1 + (R) = 1 + (-\frac{3}{5}) = \frac{2}{5}$ 의 진폭을 가지고 있는 것을 알 수

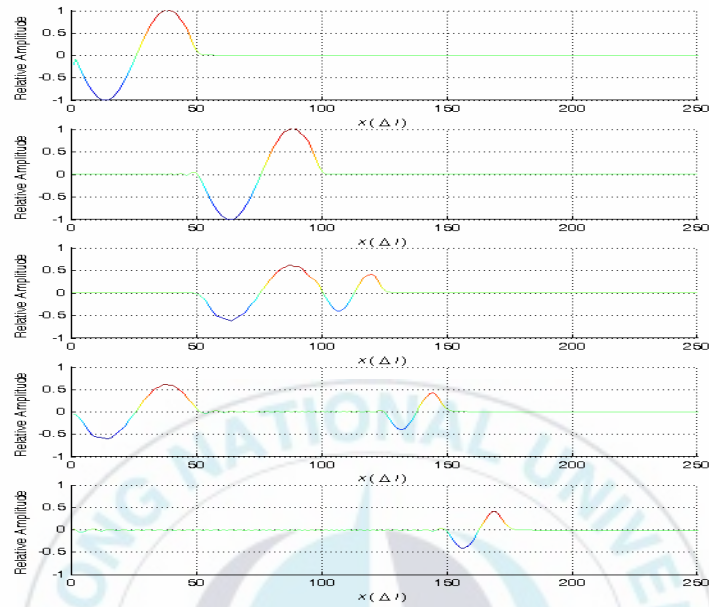
있다.



[그림 3.8] 밀도가 2:1 인 경우 ($\rho_1 : \rho_2 = 2:1$)



[그림 3.9] 밀도가 1:2 인 경우 ($\rho_1 : \rho_2 = 1:2$)



[그림 3.10] 속도/밀도가 2:1인 경우 ($\rho_1 : \rho_2 = 2:1, c_1 : c_2 = 2:1$)

이상과 같이, 밀도와 속도의 변화에 따른 파의 전달에 대한 음장의 시뮬레이션을 알아봄으로써 TLM의 유효성을 확인할 수 있다.

IV. 수중 통신 채널 구현

4장에서는 image법과 TLM에 의한 수중에서의 통신 채널 구현을 행한다. 음속, 수면, 해저의 반사면이 일정한 때는 Image Method를 사용하면 간단히 음향채널을 구성하고, 실제 해양과 같이 음속이 일정치 않은 경우, 즉 매질이 공기, 물, 진흙일때를 각각 TLM으로 시뮬레이션 한다. 음파전달채널 모의를 위해, TLM 모델링 및 상관함수를 이용하여 Image Method와 비교해 보고 채널 구현이 가능함을 알아보고 각 매질에서의 TLM모델링을 이용하여 임펄스 응답을 도출하여 수중 통신 채널 구현에 대한 가능성을 알아본다.

IV-1 Image법과 TLM법의 비교

IV-1-1 Image Method

Image method를 이용하여 음원과 receiver와의 거리를 산출한다.

[그림 4.1]과 같은 환경에서 시뮬레이션이 이루어 졌다. ①:공기, ②:물, ③:진흙인 경우이다.

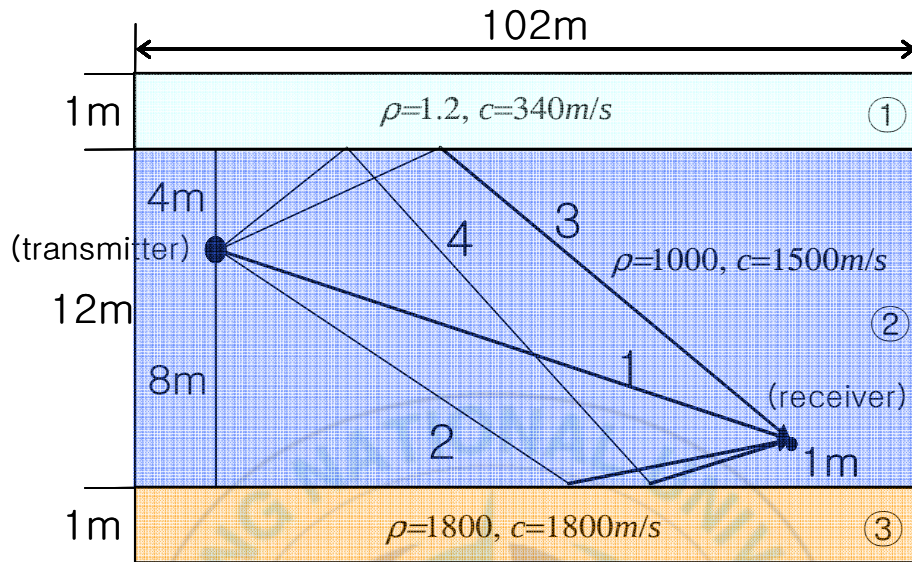
음원으로부터 방사되어 receiver로 바로 전달되는 파(1번파)와 표면에 한번 반사되어 전달되는 파(2번파), 그리고 바닥에 반사되어 전달되는 파(3번파), 마지막으로 표면과 바닥에 반사되어 전달되는 파(4번파)를 [그림4.2]에 나타내고 있다. 이 수신복조된 신호의 샘플들은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$r_i = s_i h_0 + \sum_{n=1}^g s_{i-n} h_n + N_i \quad (4.2)$$

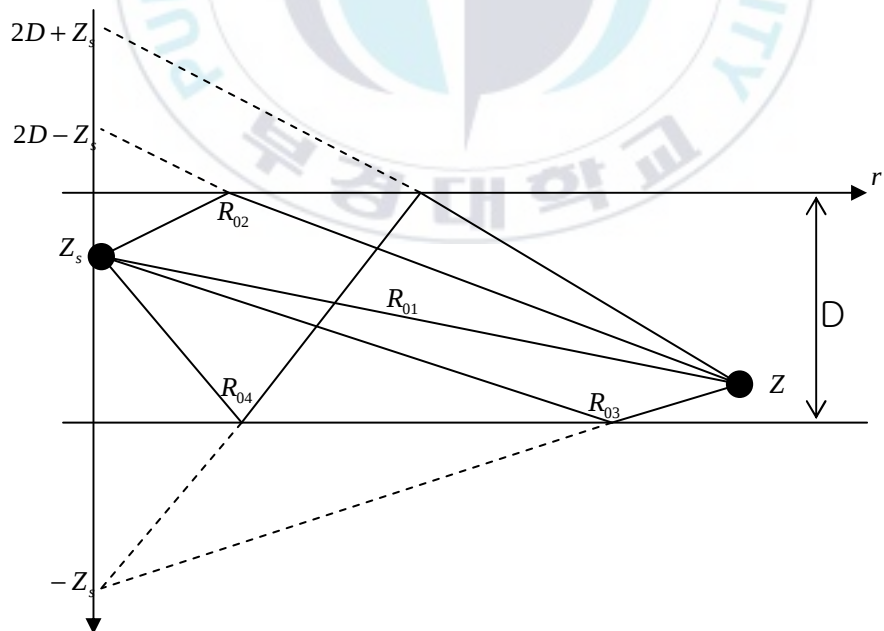
$$\begin{aligned} R_{mn} &= \sqrt{r^2 + z_{mn}^2} \\ Z_{m1} &= 2Dm + z - z_s \\ Z_{m2} &= 2D(m+1) - z - z_s \end{aligned} \quad (4.3)$$

식(4.2)에서 $s_i h_0$ 는 요구한 신호이고, $\sum_{n=1}^g s_{i-n} h_n$ 은 심볼간 간섭, 여기서 g 는 직접파를 제외한 경로의 수, N_i 는 노이즈이다.

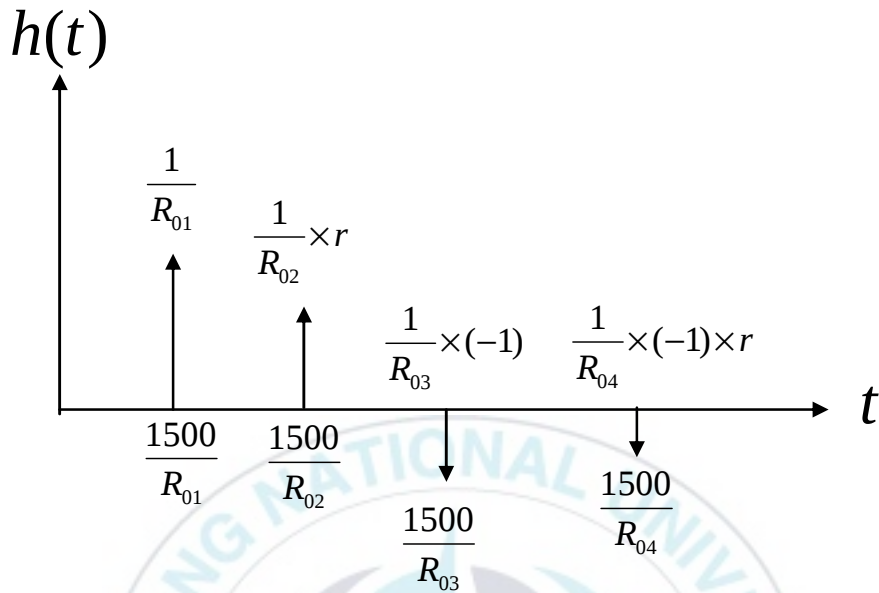
이렇게 표면이나 바닥에 반사되어 receiver에 도달하는 파는 첫번째 반사점으로 receiver의 일직선상까지 연장시켜 피타고라스 정리를 이용하여 그 거리를 산출함으로써 음원과 receiver와의 거리를 산출해 낸다. 이러한 기법이 Image Method이다. 이는 식(4.3)을 이용한다.



[그림 4.1] Multipath Model



[그림 4.2] Image multipath model



[그림 4.3] Image Method에 의한 임펄스 응답

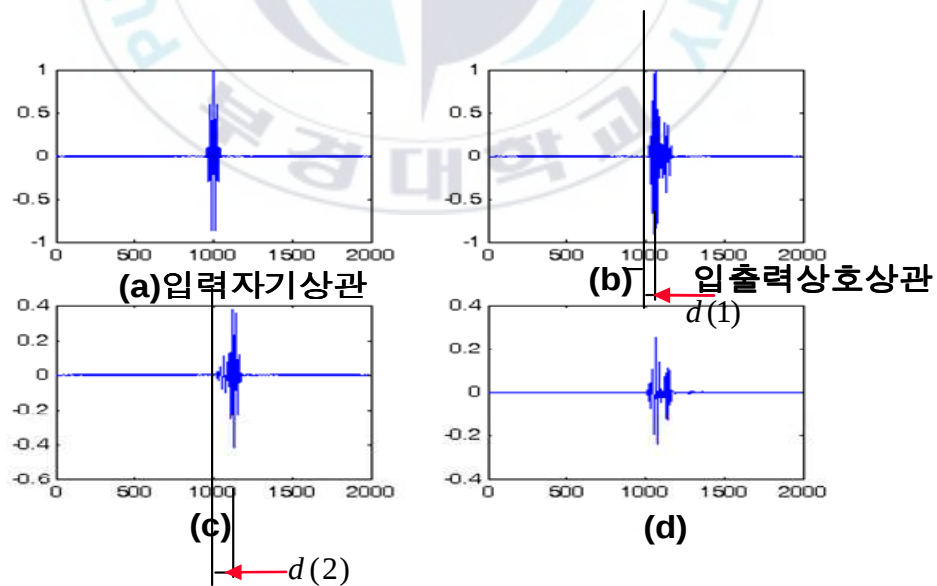
[그림4.3]은 식(4.2)(4.3)을 이용하여 리시버와의 거리를 계산하여 시간에 따른 진폭을 이용한 임펄스 응답을 도출해 낸 것이다. 3번파와 4번파의 위상이 바뀌는 것은 매질간의(공기와 물) 반사계수가 -1에 근사하기 때문이다.

IV-1-2 TLM(Transmission Line Matrix)

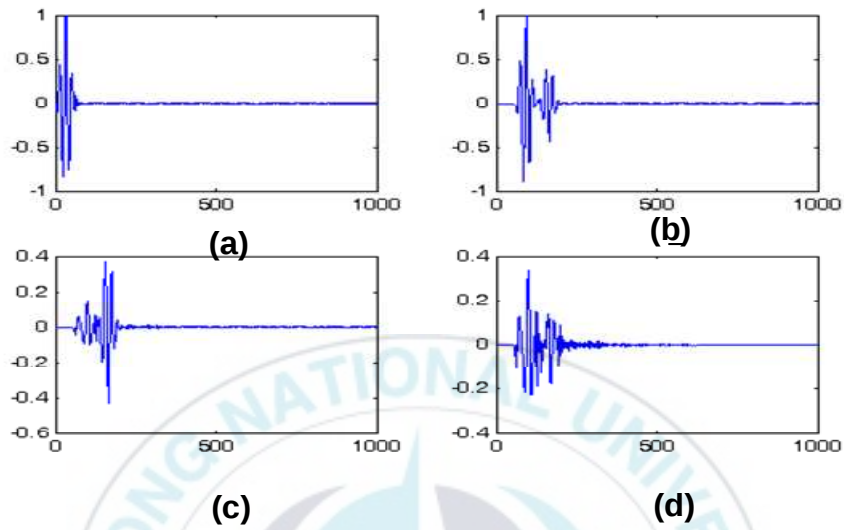
TLM으로 음향 시뮬레이션을 통한 채널 구현 방법을 알아 본다.

이를 위해 먼저 [그림 4.4]와 같은 파장이 있다고 가정했을 때, 먼저 입력자기상관(a)와 입출력상호상관함수(b)를 구하여 입력자기상관(a)를 입출력상호상관(b)의 $d(1)$ 만큼 딜레이시켜 입력자기상관(a)를 상쇄시키면 (c)와 같은 결과값을 얻을 수 있다. 이때 딜레이값이 첫번째

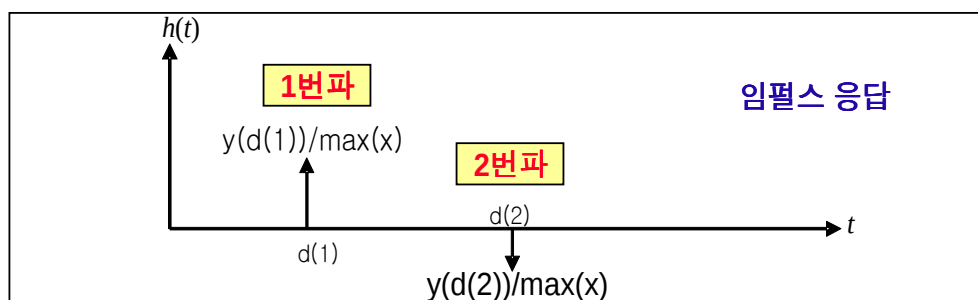
파장의 이동거리이다. 두번째 파장도 마찬가지로 방법으로 입력자기상관(a)를 $d(2)$ 만큼 딜레이시켜 입력자기상관(a)를 상쇄시키면 (d)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 그리고 [그림4.5]는 이를 시간파형으로 나타낸 것이다. 이동거리를 최대진폭으로 나눔으로써 각각의 파장진폭을 구해낼 수 있다. 이상과 같은 방법으로 딜레이와 진폭을 이용하여 [그림4.6]과 같이 TLM을 이용한 임펄스 응답을 도출해 낼 수 있다.



[그림 4.4] TLM에서의 상관함수



[그림 4.5] TLM에서의 시간파형



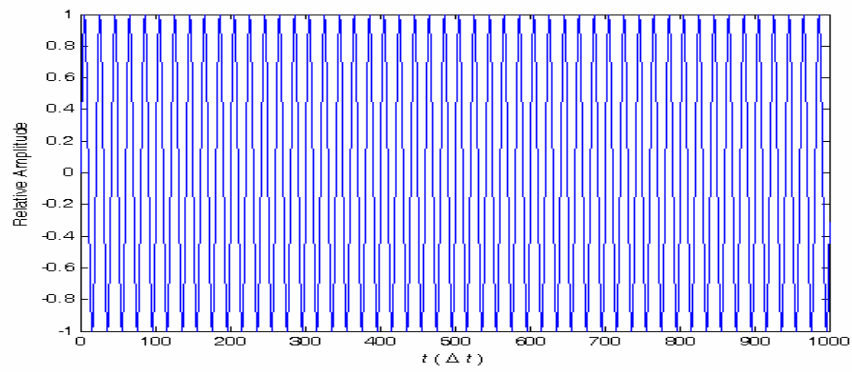
[그림 4.6] TLM에 의한 임펄스 응답

IV-2 TLM에 의한 구현

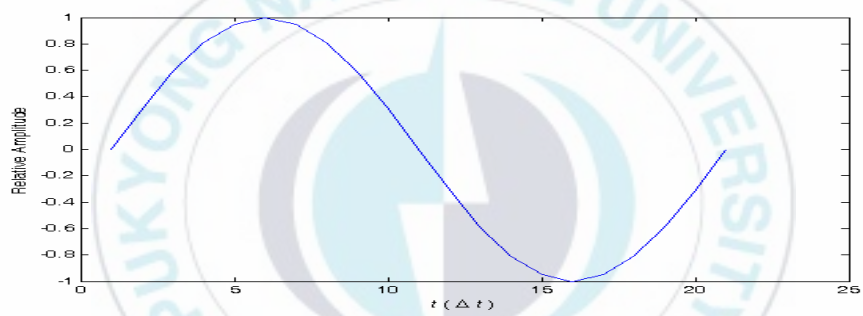
우리는 먼저 연속파, 1주기파, 3주기파를 각각 시뮬레이션 하여 채널에 가장 적합한 파를 알아 본다. 이 중 가장 적합한 파를 찾아 이번 실험에 적용해 보고 각 매질에 따른 음파 전달 시뮬레이션에 대해 파의 반사, 위상의 변화, 진행파의 움직임등을 알아 보고, 입력자기상관과 입출력상호상관함수를 이용하여 임펄스 응답을 이끌어 내도록 한다. 또한 Image Method에 의한 결과값과 비교해 보고 TLM의 수중 통신 채널 구현 가능성을 알아 보자.

IV-2-1 연속파, 1주기파, 3주기파

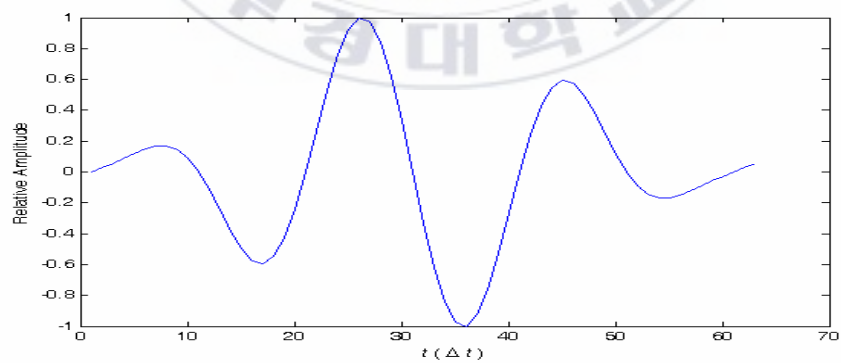
이번 실험을 위해 [그림4.7]과 같은 세가지 다른 형태의 입력파중 가장 적합한 파를 찾아 실험에 적용해 보기로 한다. 그리고, [그림4.8], [그림4.9], [그림4.10]은 세가지 형태의 입력파에 대한 음파전달 시뮬레이션을 행한 결과 시간에 따른 파의 움직임을 잘 보여주고 있다. 이 결과에 따라 연속파는 연속적인 파형으로 인해 분별이 어려움을 알 수 있고, 1주기파는 노이즈의 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 따라서, 이중 뚜렷하고 특색있는 3주기파가 실험에 가장 적합하다고 판단이 된다.



[연속파]

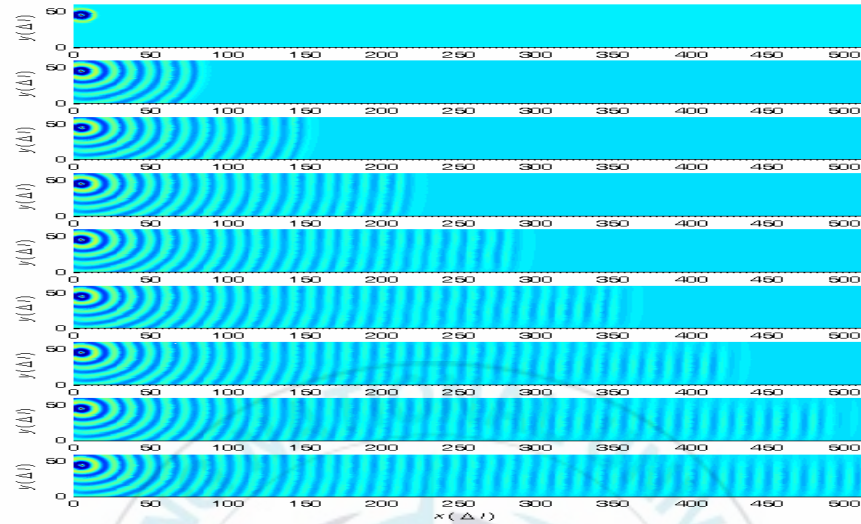


[1주기파]

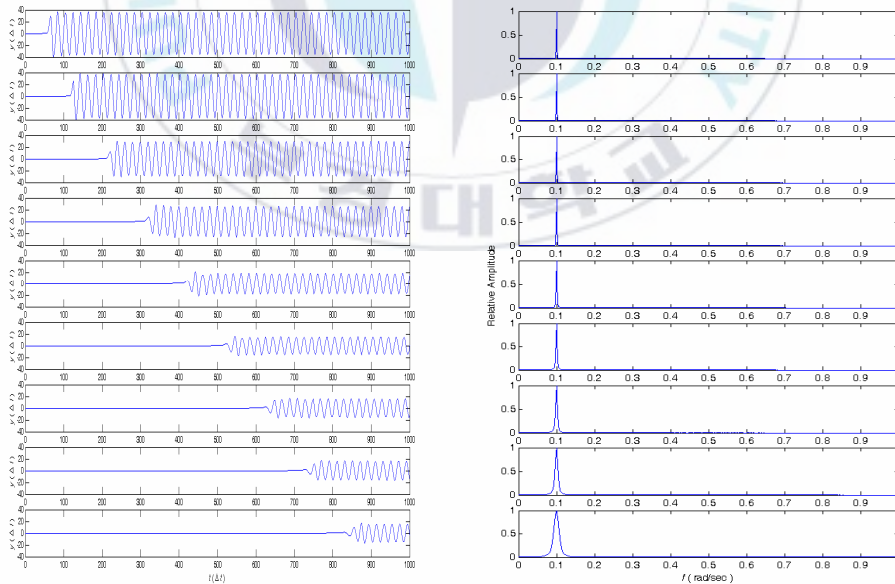


[3주기파]

[그림 4.7] 연속파.1주기.3주기

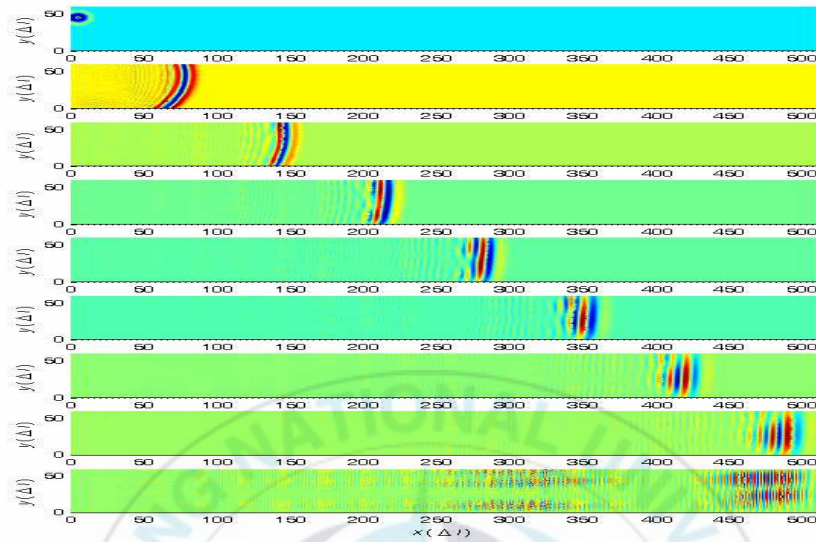


[Free Space - 연속파]

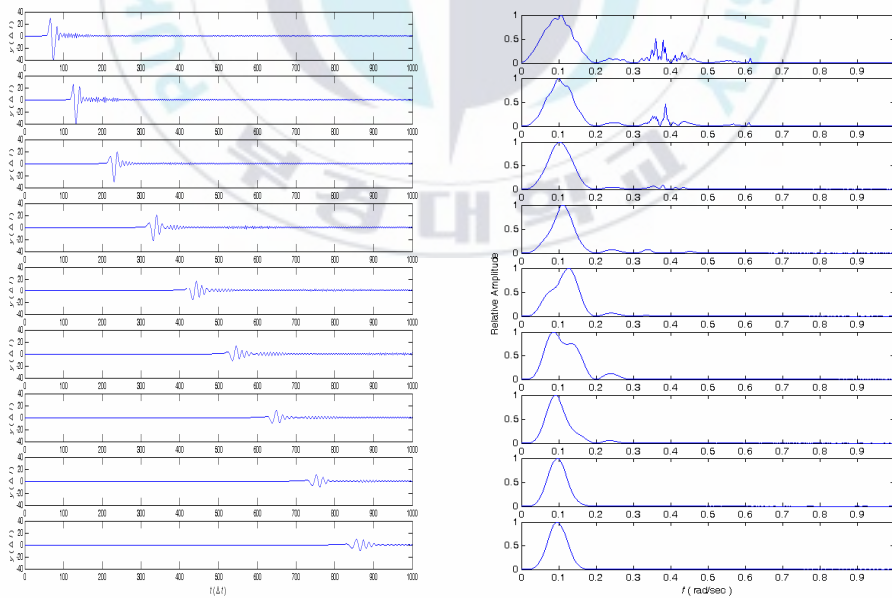


[Free Space - 연속파의 임펄스 응답] [Free Space - 연속파의 FFT]

[그림 4.8]연속파에 따른 결과



[Free Space - 1주기]

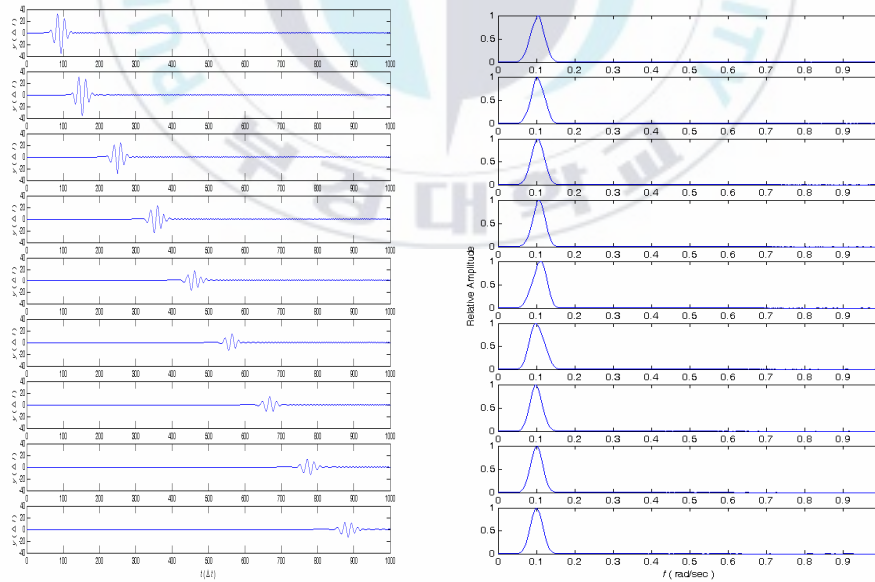


[Free Space - 1주기의 임펄스 응답] [Free Space - 1주기의 FFT]

[그림 4.9] 1주기파에 따른 결과



[Free Space - 3주기]



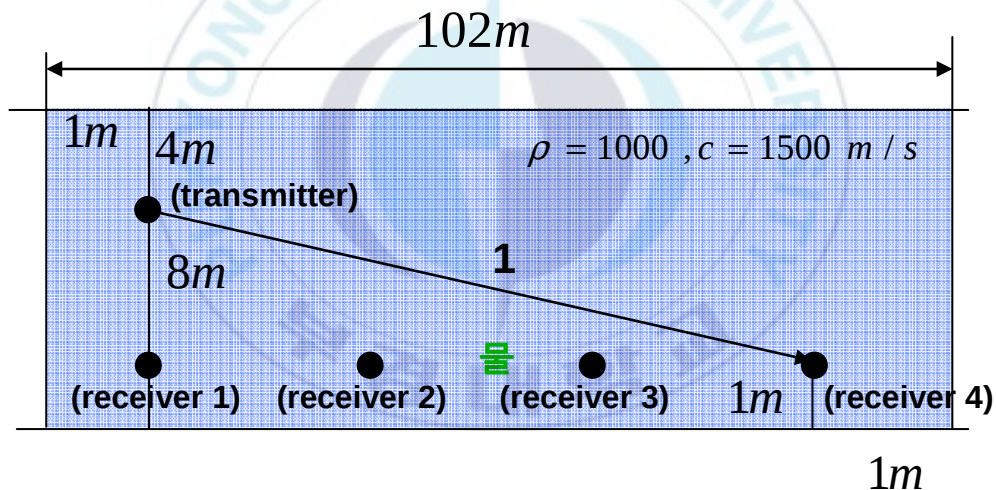
[Free Space - 3주기의 임펄스 응답] [Free Space - 3주기의 FFT]

[그림 4.10] 3주기파에 따른 결과

따라서, 앞으로의 실험에서 우리는 특색있는 3주기파를 사용하기로 한다.

IV-2-2 매질이 물인 경우

음원에서 리시버로 직접파를 방사하는 가장 단순한 형태이다. [그림4.11]에서 매질 ①②③이 모두 물인 경우에 음원에서 한번에 리시버로 방사되는 1번파를 시뮬레이션 한다. 각 요소간 $\Delta l = 0.2m$, 총분할 수는 509×70 , 입력파주기는 $4m$ 이다.



[그림 4.11] Multipath Model(물)

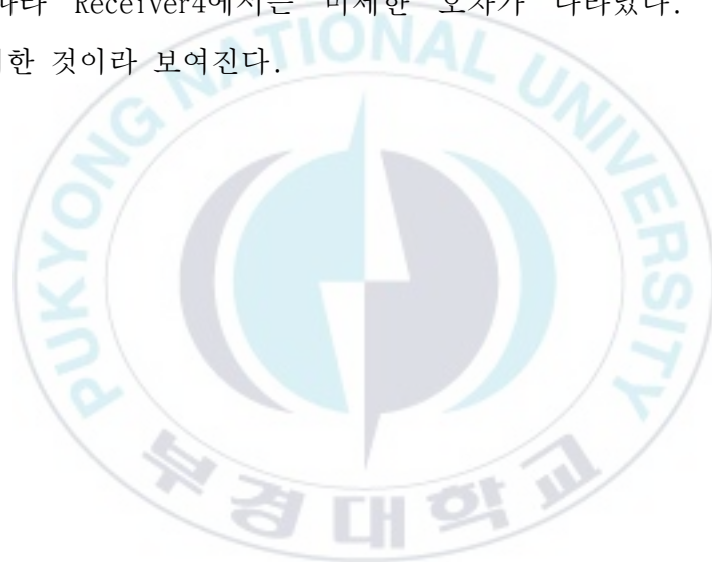
이때의 시간에 따른 1번파의 움직임을 [그림4.12]에서 잘 보여주고 있다. 반사없이 리시버로 바로 전달되기 때문에 시간에 따라 조금의 감쇄만 있을뿐 아무런 변화없이 전달되어가는 것을 볼 수 있다.

[그림4.13]의 (a)는 입력자기상관을 나타내고 (b)는 입출력상호상관을

나타낸다. (b)를 (a)만큼 딜레이 시켜서 자기상관을 빼버리면 (c)가 된다. 이를 시간파형으로 나타낸 것이 [그림4.14]이다. 그 결과, 딜레이와 진폭을 알고 임펄스 응답을 구해 낼 수 있다.

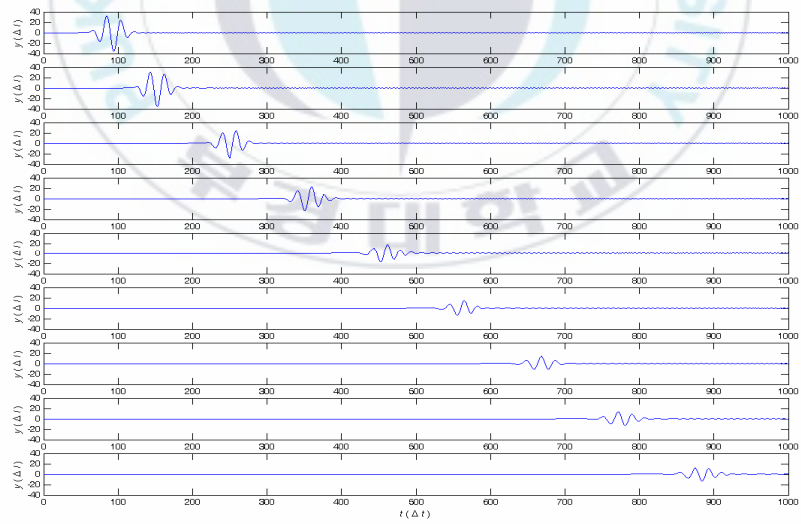
결과값은 딜레이가 62이고 진폭이 $\frac{-35.6429}{-486.8958} = 0.073$ 임을 알 수 있다.

위 시뮬레이션 결과 임펄스 응답은 [그림4.15]과 같다. 또한 Image법과 비교결과를 나타내고 있다. Receiver3까지는 거의 일치했고 시간이 지남에 따라 Receiver4에서는 미세한 오차가 나타났다. 이는 파의 왜곡에 의한 것이라 보여진다.



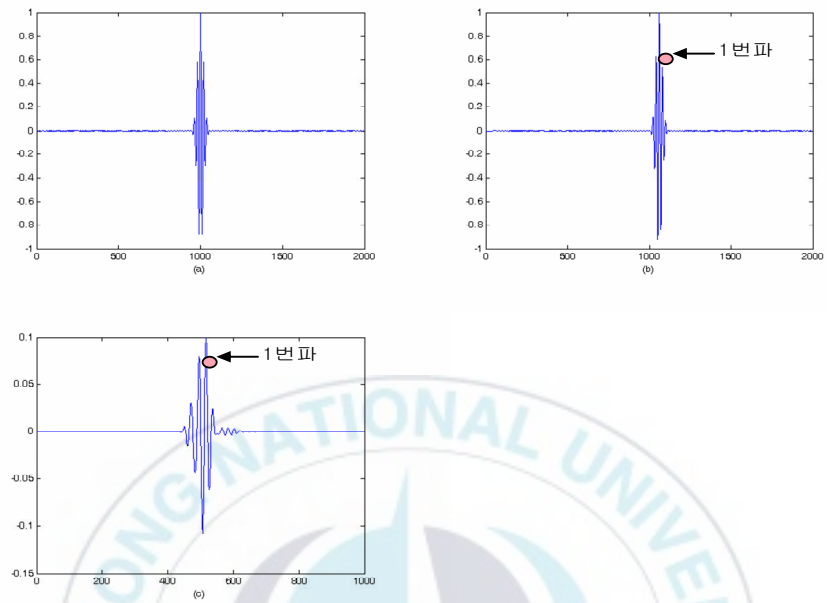


[매질이 물일 때]

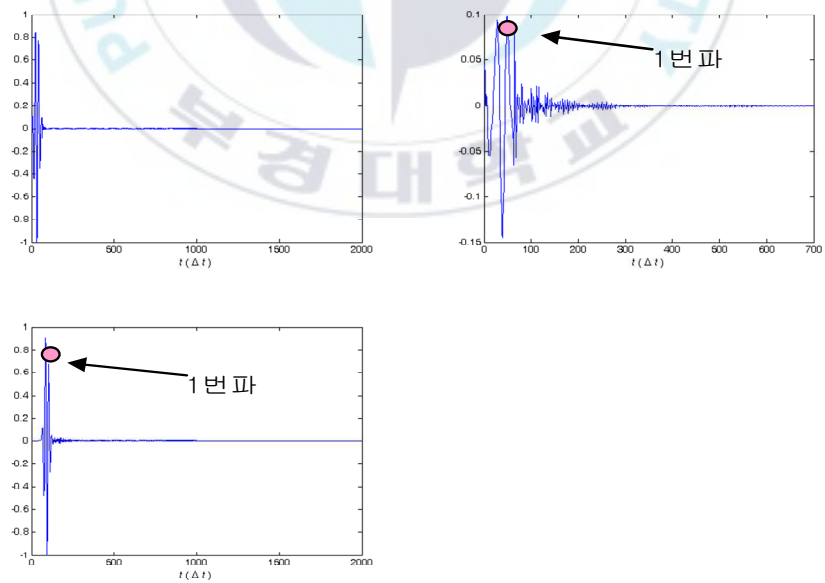


[매질이 물일때의 임펄스 응답]

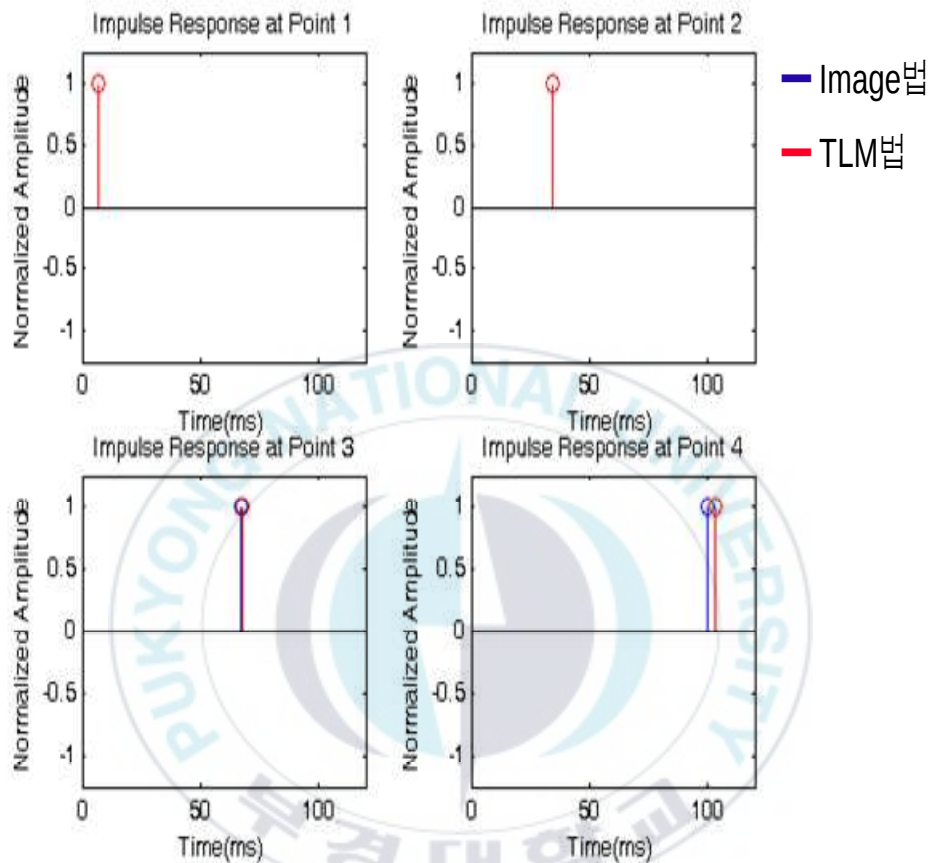
[그림 4.12] 매질이 물에서의 결과



[그림 4.13] 자기상관과 상호상관(매질이 물일 때)



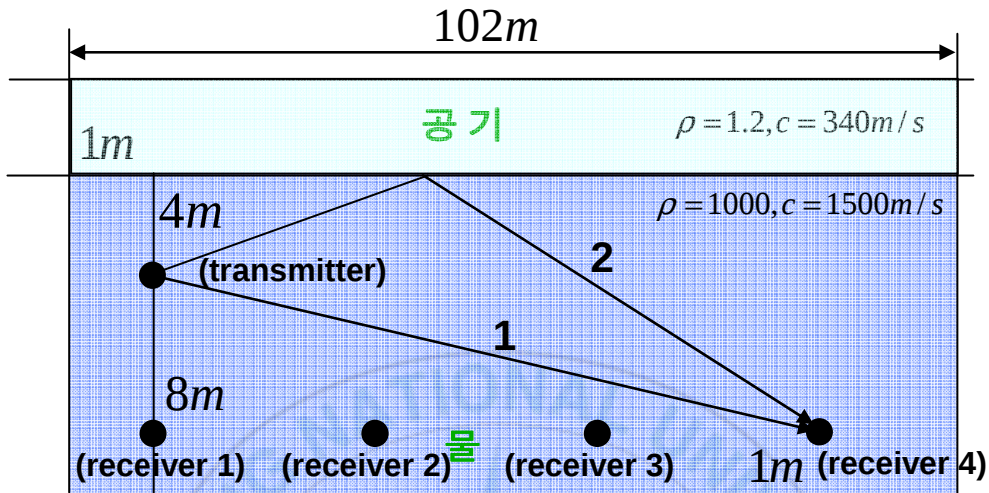
[그림 4.14] 시간파형(매질이 물일 때)



[그림 4.15] 임펄스 응답(매질이 물일 때)

IV-2-3 매질이 공기와 물일 때

[그림4.16]과 같이 매질이 공기와 물로 구성되었을 경우의 1번파와 2번파를 실험해 보았다. 1번파는 리시버에 곧바로 전달된 것이고 2번파는 위쪽 공기층에 한번 반사되어 리시버로 전해진 파이다.



[그림 4.16] Multipath Model(물+공기)

1번파와 2번파의 시간에 따른 변화를 [그림4.17]에 나타내고 있다. 2번파가 1번파와 약간의 시간적 간격을 두고 나타나고 시간이 갈수록 그 간격이 좁혀져 receiver4에 도달할 때 쯤엔 거의 파가 합쳐져 있음을 확인할 수 있다.

[그림4.18]의 (a)는 입력자기상관, (b)는 입력과출력의 상호상관이다.

(a)에서 1번파를 (b)만큼 이동시켜서 자기상관을 상쇄시키면 (c)가 된다. 또 (c)에서 2번파를 다시 만큼 이동시켜서 자기상관을 상쇄시키면 (d)가 된다. 여기서 우리는 딜레이를 알 수 있다.

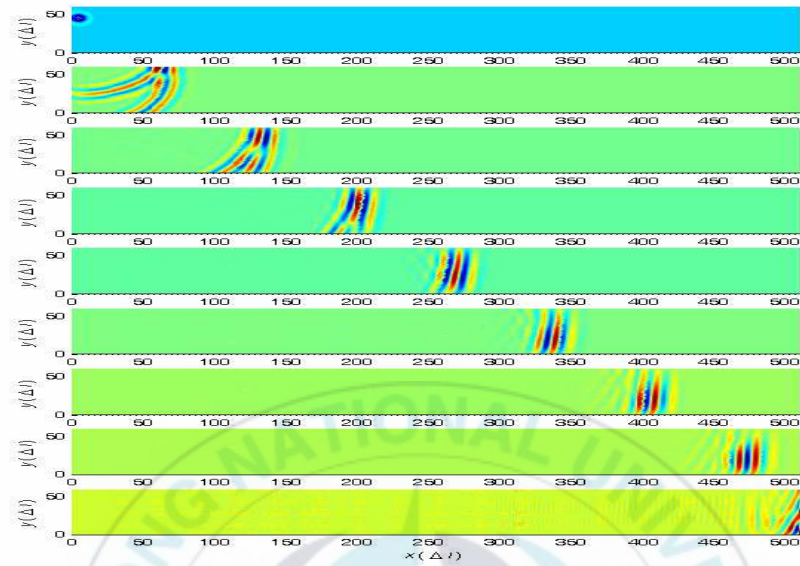
그리고 [그림4.19]의 시간파형을 의해 진폭을 구해 낼 수 있다.

1번파의 거리는 62이고 진폭이 $\frac{-35.6429}{-486.8958} = 0.073$ 이고,

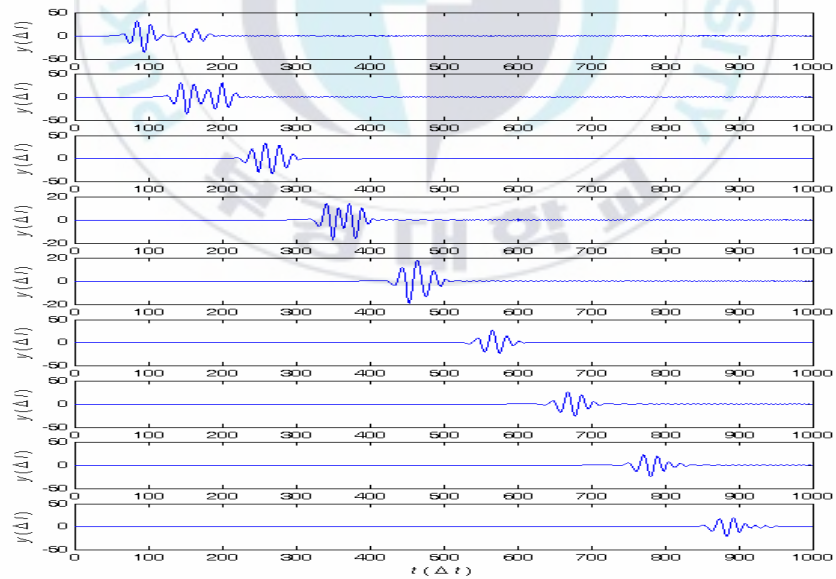
2번파의 거리는 133이고 진폭이 $\frac{15.4344}{-486.8958} = -0.03$ 이다. 이 값을

이용하여 임펄스 응답을 구한 것이 [그림4.15]이다. Image법에 의한 결과와 비교해 볼 때 거의 일치했고 시간이 지남에 따라 왜곡에 따른 약간의 거리오차와 위상의 변화를 확인할 수 있다.



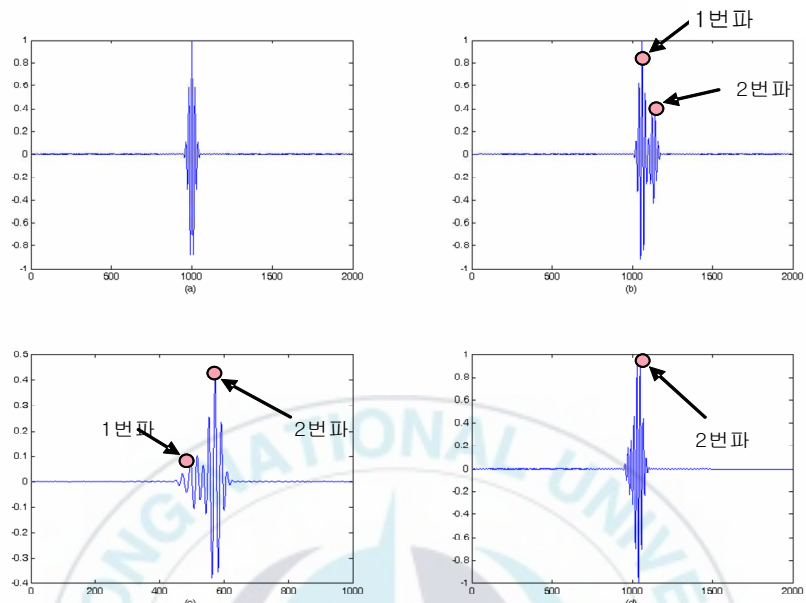


[공기 + 물]

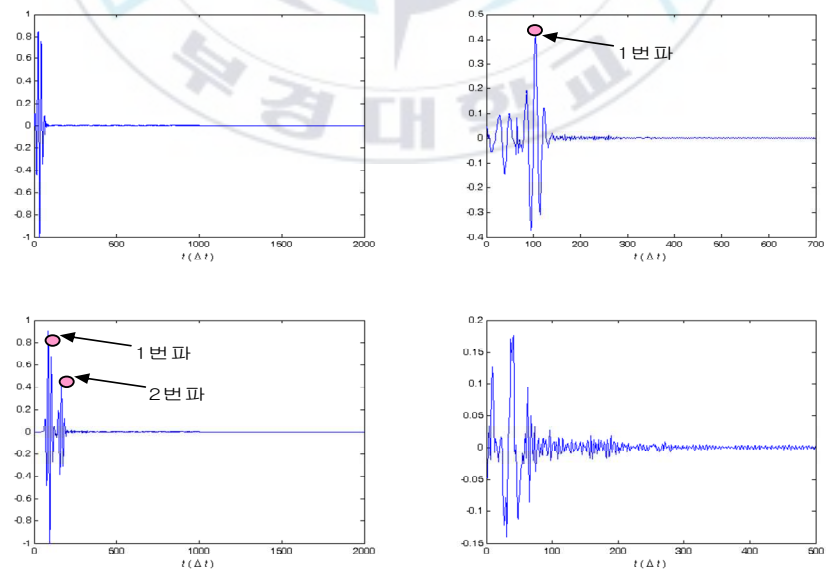


[공기 + 물에서의 임펄스 응답]

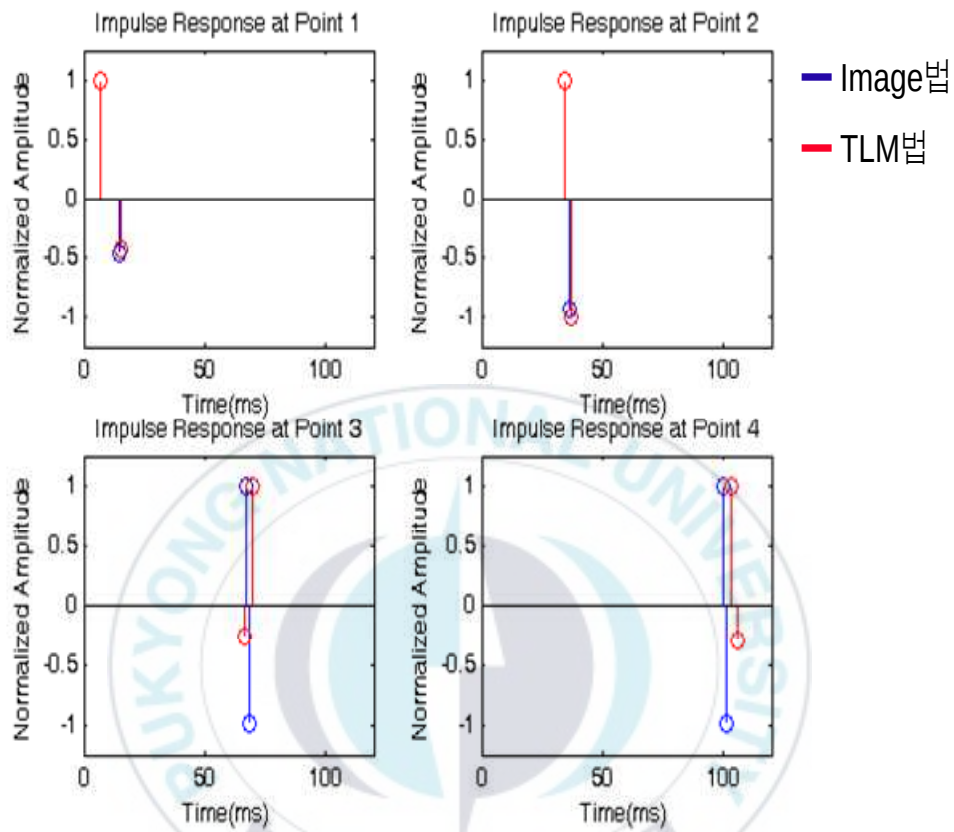
[그림 4.17] 공기 + 물에서의 결과



[그림 4.18] 자기상관과 상호상관(매질이 공기와 물일 때)



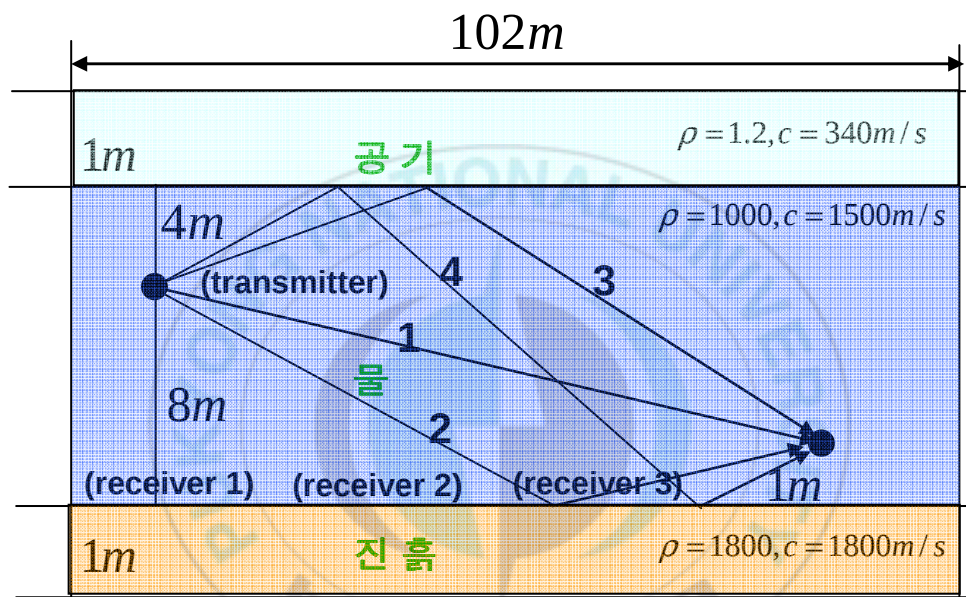
[그림 4.19] 시간파형(매질이 공기와 물일 때)



[그림 4.20] 임펄스 응답(매질이 공기와 물일 때)

IV-2-4 매질이 공기,물,진흙일 때

마지막으로 실제 해양환경과 가장 유사한 매질이 공기,물,진흙으로 구성되었을 때의 시뮬레이션을 행한다.



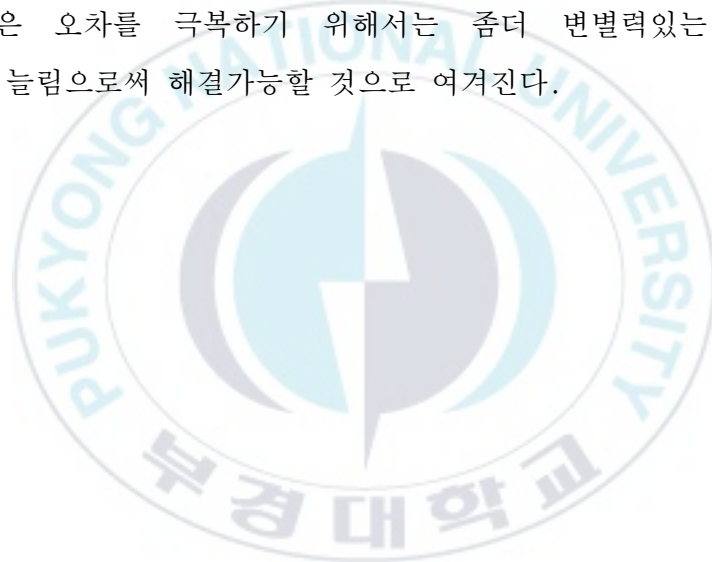
[그림 4.21] Multipath Model(공기+물+진흙)

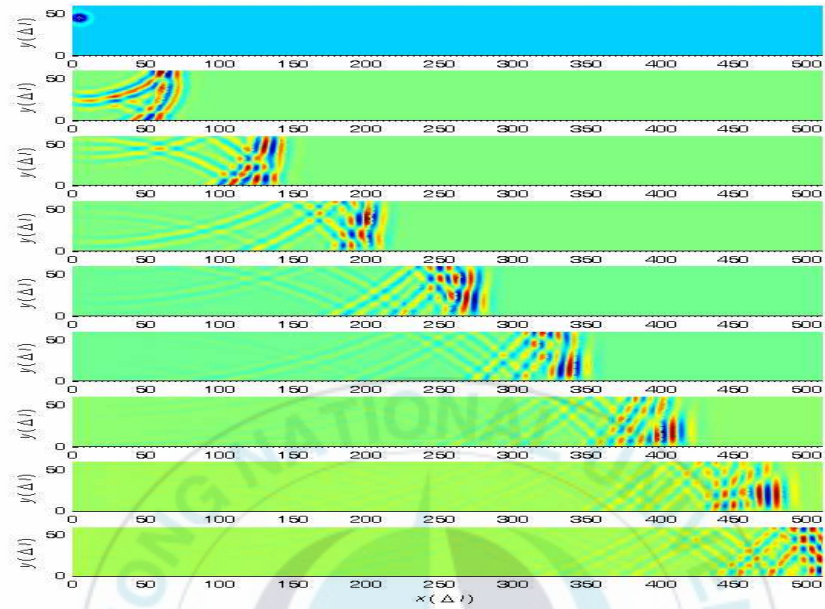
이때 [그림4.21]에서 1번파,2번파,3번파,4번파의 각각의 진행형태를 알아보기로 하자. 앞서 실험했던 바와같이 1번파는 리시버로 곧바로 전달된 파, 2번파는 공기중에 한번 반사된 파이고, 3번파는 진흙에 한번 반사된 파, 4번파는 공기중과 진흙에 한번씩 반사되어 리시버에 전달된 파를 나타낸다. [그림4.22]에서는 위 네가지 파의 시간에 따른 움직임을 잘 나타내고 있다. 딜레이와 진폭을 구하는 방법 또한 앞서 사용한 방법과 동일하다. [그림4.23]에서 입력자기상관과 입력과 출력의

상호상관함수를 이용해 딜레이를 구한다. [그림4.24]은 시간파형을 나타낸 것이다. 각 파장마다 차례씩 이동시켜 자기상관을 상쇄하면서 1,2,3,4번파의 딜레이와 진폭을 추적한다.

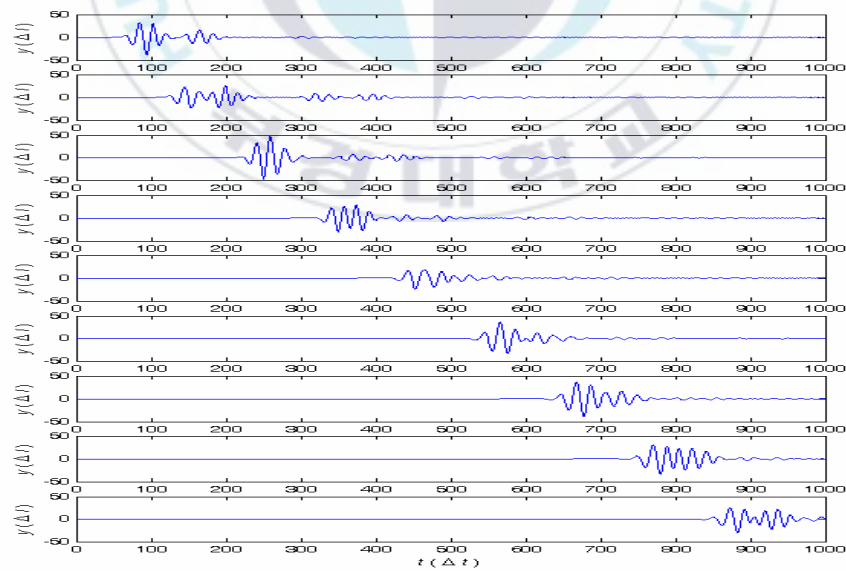
이 결과에 따른 임펄스 응답이 [그림4.25]이다. Image법과의 결과비교에서 볼때 시간이 지남에 따라 위상왜곡에 의해 위상이 변화되어 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만 거리와 진폭에 있어서 두 결과값은 거의 일치함을 알 수 있다.

위와 같은 오차를 극복하기 위해서는 좀더 변별력있는 입력파나 분할수를 늘림으로써 해결가능할 것으로 여겨진다.



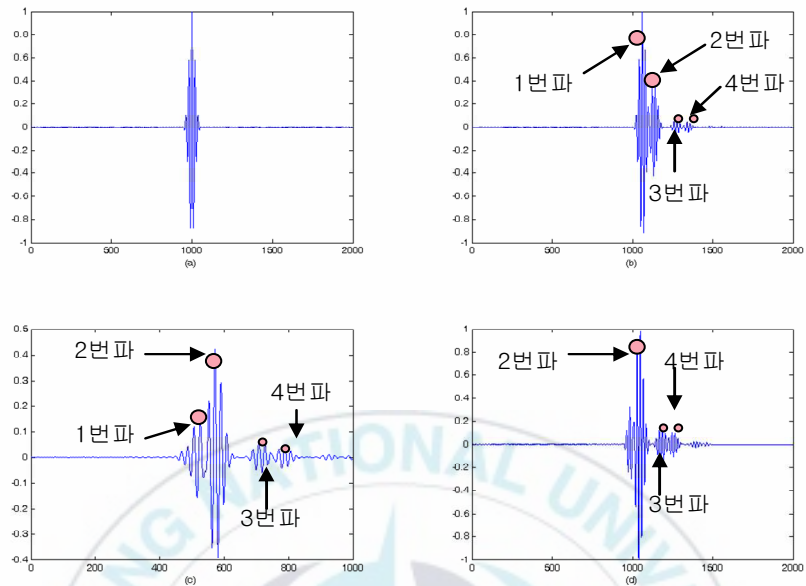


[공기 + 물 + 진흙]

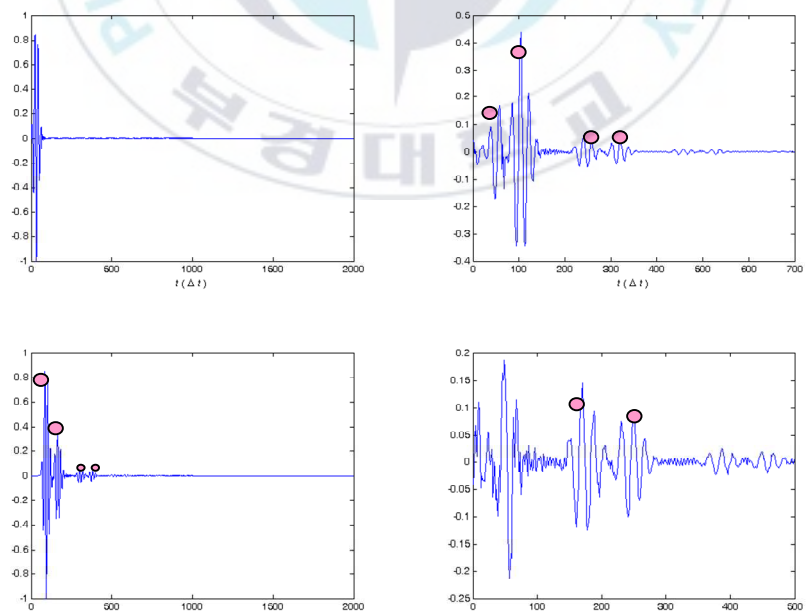


[공기 + 물 + 진흙에서의 임펄스 응답]

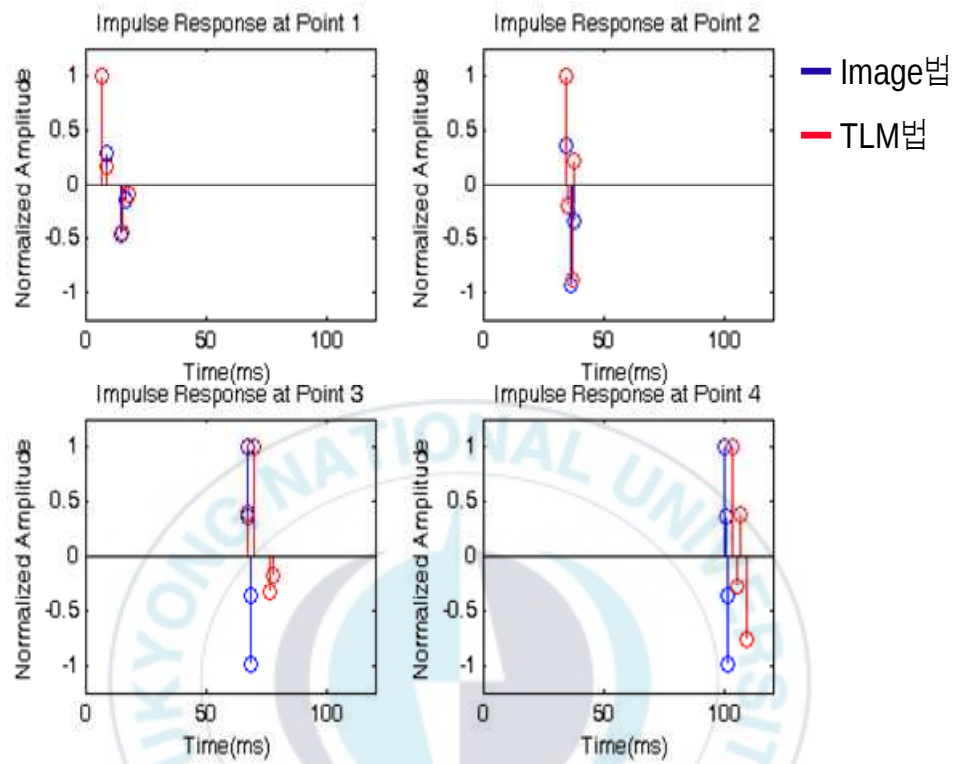
[그림 4.22] 공기 + 물 + 진흙에서의 결과



[그림 4.23] 자기상관과 상호상관(매질이 공기, 물, 진흙일 때)



[그림 4.24] 시간파형(매질이 공기, 물, 진흙일 때)



[그림 4.25] 임펄스 응답(매질이 공기, 물, 진흙일 때)

V. 결 론

수중에서 음파 전달의 해석 방법으로 시간 영역 해석 기법인 TLM 모델을 적용시켜 해석했다. 세가지의 다른 형태의 입력파에 대해 음파 전달 시뮬레이션한 결과, 먼저 음속과 밀도의 변화에 따른 파의 전달에 대한 음장의 시뮬레이션에 의해 TLM 모델링의 유효성을 확인할 수 있었다.

음파의 전달 채널을 모의하기 위해서는 음속이 일정한 곳에서는 Image Method가 적용가능하고, 실제 해양과 같이 깊이에 따라 음속이 바뀌는 경우에는 Snell의 법칙에 의한 Ray Method가 주로 사용되는 데, 여기서는 TLM 모델링에 의해 모의를 해 보았다. 위에서 사용한 입력파 중 3 주기파를 이용한 경우에 대해서 수면 및 바닥의 효과를 고려한 음파 전달 시뮬레이션을 행한 결과, 파의 반사, 위상의 변화, 진행파의 움직임 등의 효과를 확인할 수 있었고 음파전달채널 모의를 위해 TLM모델링 및 상관함수를 이용하여 Image Method와 비교해 본 결과 채널 구현이 가능함을 확인할 수 있었다. 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 변별력이 있는 입력파나 분할수를 늘림으로써 해결가능할 것으로 판단된다.

또한, TLM 모델의 source나 receiver를 여러 위치에 임의로 배치할 수가 있어 해양에서 source나 receiver가 움직일 경우의 음파 전달 채널의 구현이 가능함을 알 수 있었다.

간단한 음속분포를 가지는 모델을 해석했지만, 실제 환경에서와 같이 깊이에 따라 음속 분포가 변하는 경우의 해양음향모델에 적용하는 것도

가능하리라 사료된다. 다만, 근거리 음장이 아닌 원거리 음장의 계산의 경우에는 상당히 거대한 영역을 대상으로 하지 않으면 안된다. 따라서, 컴퓨터 메모리, 계산속도면의 제어에 대한 프로그램의 개량이 요구 될 것이다.



參 考 文 獻

- [1] Y.Kagawa, T.Tsuchiya, B.Fujii and K.Fujioka, 1998. Discrete Huygens' model approach to sound wave propagation. Jour. Sound & Vib. 218(3) pp.419-444
- [2] Y.Kagawa, T.Tsuchiya, K.Fujioka and M.Takeuchi 1999. Discrete Huygens' model approach to sound wave propagation. –Reverberation in a room, sound source identification and tomography in time reversal Jour.Sound & Vib. 225(1) pp.61-78
- [3] Matthew N.O. Sadiku, Numerical Techniques in Electromagnetics, CRC Press, 1992
- [4] Christos Christopoulos, The Transmission-Line Modeling Method : TLM, IEEE Press, 1995
- [5] Kyu-Chil Park, Yukio Kagawa and Takao Tsuchiya, The TLM Modelling of Surface Acoustic Waves Devices, Proc. Of the 19th Computational Electromagnetics and Electronics Symposium (JSST), 1999, pp.167-170
- [6] K.V.Mackenzie 1981. Nine-term equation for sound speed in the ocean, J.Acoust,Soc.Am., 70-3, pp.807-812
- [7] MARINE ACOUSTICS Fundamentals and applications, The marine acoustics society of Japan, 1984. pp.66

감사의 글

사회생활과 학업을 병행하면서 많은 어려움을 극복하고 마침내
결실을 맺게 되어 가슴이 벅차 오릅니다.

이 학위 논문이 있기까지 모든 면에서 자상한 지도와 보살핌을
주신 박규철 교수님의 은혜에 진심으로 감사드립니다. 또한 본
논문이 책으로 출판되기까지 아낌없는 충고와 조언을 해 주신
심사위원 윤종락 교수님과 정신일 교수님께 깊이 감사드립니다.

그 동안 2 년여간의 석사과정을 통하여 많이 느끼고 배웠습니다.
힘들때나 기쁠때나 함께 해준 우리 학우 여러분들께도 이글로
감사의 마음을 대신합니다. 그리고 음향정보처리 연구실의 모든
학우들에게도 앞날에 축복이 있기를 기원합니다.

항상 아낌없는 사랑과 용기를 주시고 제가 버틸수 있는 원천적
힘을 주시는 부모님께 감사드리고 적극적으로 지지해주고
격려해준 나의 사랑 지현이에게도 고마움을 전합니다.

다가오는 2007 년 새해 모두 복 많이 받으시고 하시고자 하는 일
다 성취하는 한 해가 되시길 바랍니다. 감사합니다.

2006년 12월
양 우 식