

# 실시간 특정 주파수의 수중음 인식에 관한 연구

이철원\*, 오영석, 우종식  
대우중공업(주) 조선해양부문

## A Study on the Realtime Detection of the Underwater Sound having Specific Frequency

Lee Chul-Won\*, Oh Young-Seok, Woo Jong-Sik  
Daewoo Heavy Ind. Ltd.  
E-mail: cwlee77@daewoo.dhi.co.kr

### 요약문

본 논문은 수중음의 안정적 실시간 인식을 위한 새로운 음원 인식 알고리즘을 다루고 있다. 본 논문에서 이용된 주파수인식 알고리즘은 크게 네 부분으로 구성되어 있는데 1) 입력된 음파 신호를 duty cycle 50%의 디지털 신호로 바꾸고 기준 주파수의 음원을 duty cycle 50%, 위상차 0도 90도 180도 270도의 디지털 신호를 생성하는 부분, 2) 입력된 음파신호를 4가지 위상의 각 기준신호와 배타적 논리합을 구하는 부분, 3) 두 번째에서 만들어진 각 신호를 적분회로에 통과시키는 부분, 4) 세 번째에서 발생한 각 신호중 최대값을 추출하여 입력된 음파신호의 주파수를 인식하는 부분으로 이루어져 있다. 이 회로에 대한 수치 해석을 통하여 각 부분의 특성치에 대한 최적 값 및 성능을 검증하였으며, 이의 결과를 각각 computer 수치 시험, 실제 회로 실험과 비교하였다.

### 1. 서론

육지 자원의 고갈에 따른 해양 개발의 중요성은 21세기를 여는 현 시점에서 더욱 강조되고 있다. 해양 개발에 있어 개발 해역에 대한 기초 환경 조사는 개발의 효율성 및 개발 지역의 선택에 있어 가장 중요하다. 일반적으로 해양 개발은 그 성격상 해양 환경의 장시간의 조사를 필요로 한다. 이를 위해서는 일반적으로 다양한 해양 계측 장비를 해양에 장시간 설치할 필요성이 있다. 이러한 목적을 위해서는 탐사 선박이 장시간 해상에 머무를 수 없으므로 해저면에 탐사 장비를 설치하고 일정 기간이 지난 후에 이를 다시 회수하는 방법이 가장 적합하다. 이러한 계측 방식에 있어서 가장 중요한 점은 측정 장비의 회수에 대한 신뢰도와 장시간 운용을 위한 저전력 작동이다. 일반적으로 해양 환경에서 각 장비간 통신은 전달 손실등의 문제로 수중음을 이용하여 이 방식에서 가장 중요한 요소는 여러 노이즈등의 외란 요소에 영향받지 않는 안정적 음원 인식이다. 또한 다중 음원을 사용하는 AUV(Autonomous Underwater Vehicle), ROV(Remotely Operated Vehicle) 등 수중 잠수체의 실시간 위치 추적 및 이들과의 통신을 하는데 필수적인 요소는 수중음의 실시간 주파수 인식이다. 본 논문은 저전력에서 작동하는 간단

한 회로 요소들로 구성된 새로운 음원 인식 알고리즘을 제안하였고 이를 수학적 모델, 전산기 수치 시험을 통하여 각 요소들의 최적값과 회로의 성능을 예측하였으며 이를 바탕으로 실제 회로를 제작하여 회로 실험 결과와 수치 시험 결과를 비교하여 회로의 신뢰성과 성능을 검증하였다.

### 2. 회로의 전체적 구성

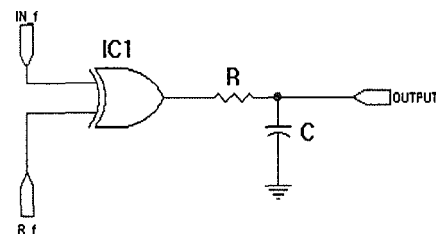


그림 1 음원 인식 회로

음원 인식 회로는 크게 네부분으로 구성되어 있으며 전체 회로도에는 그림 1에 나타내었다.

음원 인식 회로의 각 단계별 기능은 다음과 같다.

①단계 1

입력된 음파 신호를 duty cycle 50%의 디지털 신호로 바꾸고 기준 주파수의 음원을 duty cycle 50%, 위상차 0도 90도 180도 270도의 디지털 신호로 생성

②단계 2

입력된 음파신호를 4가지 위상의 각 기준신호와 베타적 논리합을 구함

③단계 3

각 신호를 적분회로에 통과시킴

④단계 4

발생한 각 신호 중 최대값을 추출하여 입력된 음파신호의 주파수를 인식

### 3. 단계별 수식적 표현

#### 3.1 단계 1의 수식적 표현

서로 비교되어지는 기준 주파수의 신호( $F_{r,d}$ )와 입력 신호의 파형( $F_{i,d}$ )은 다음과 같은 간단한 형태의 단위 스텝 함수의 합으로 표현되어 질 수 있다.

$$F_{r,d}(t) = \sum_n u[t - 2nT_r + d] - u[t - (2n+1)T_r + d]$$

$$F_{i,d}(t) = \sum_n u[t - 2nT_i + d] - u[t - (2n+1)T_i + d]$$

$2T_r$ ; 기준 신호의 주기

$2T_i$ ; 입력 신호의 주기

$d$ ; delay

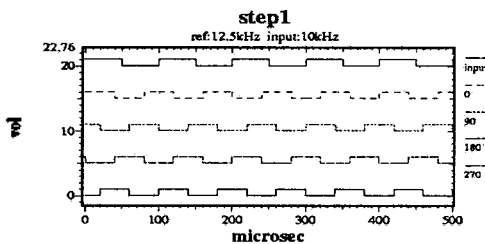


그림 2 10kHz의 입력 신호

#### 3.2 단계 2의 수식적 표현

단계 1로부터 입력된 두 신호의 베타적 논리합은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g(t) = g(F_{r,d}(t), F_{i,d}(t)) = F_{r,d}(t) + F_{i,d}(t) - 2F_{r,d}(t) * F_{i,d}(t) \quad (2)$$

식 (2)에 의해서 계산되어진 베타적 논리합의 결과는 기준 주파수와 입력 주파수가 같은 경우와 다른 경우로 나누어질 수 있다.

#### ①입력 주파수와 기준 주파수가 같은 경우

$T_r = T_i = T$ 라 하면 베타적 논리합의 결과는 그림 3에 나타낸 바와 같이 기준 주파수의 주기의 반인 주기  $T$ 를 갖는데 위상차가  $T$ 보다 적은 경우에는 pulse width가 위상 차에 해당하는 크기를 가지며 위상차가  $T$ 보다 큰 경우에는  $2T-d$ 에 해당하는 pulse width를 갖는다. 실제 위상차 135도 12.5kHz의 주파수에 대한 수치 시험 결과는 그림 4와 같다.

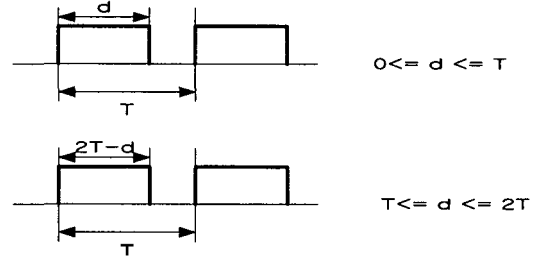


그림 3 같은 주파수인 경우의 베타적 논리합

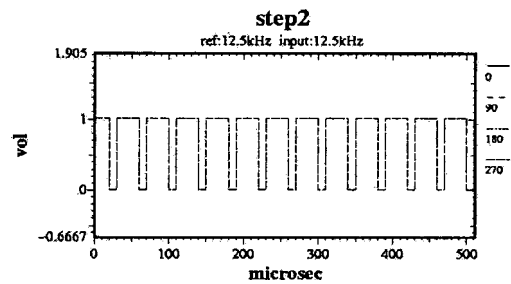


그림 4 12.5kHz, 위상차 135도의 베타적 논리합 수치 시험 결과

#### ②입력 주파수와 기준 주파수가 다른 경우

$T_r - T_i = \delta T, 0 < \delta T < T_r$ 이라 하면 주기가  $2T_r * (\frac{T_r}{\delta T} - 1)$ 인 신호가 되는데 신호의 형태는 그림 5와 같으며 입력 신호 10.0 kHz 위상차 0도, 기준 신호 12.5 kHz의 수치 시험 결과는 그림 6과 같다.

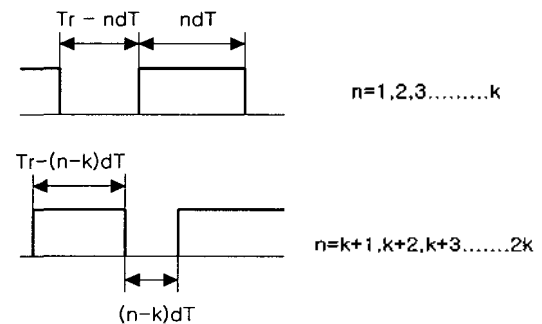


그림 5 다른 주파수인 경우의 베타적 논리합

$$(k = \frac{T_r}{\delta T} - 1)$$

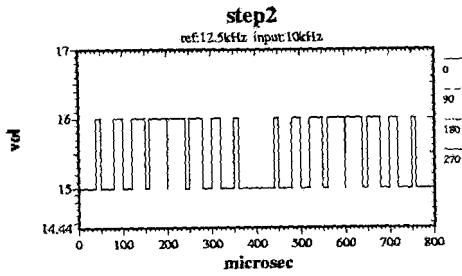


그림 6 기준 주파수 12.5kHz 입력 주파수 10.0kHz의 배타적 논리합

3.3 단계 3의 수식적 표현

적분 회로의 충전식은 E가 인가 전압, E<sub>i</sub>는 초기 전압, RC는 시정수라 할 때 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Vol = E(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) + E_i e^{-\frac{t}{RC}} \quad (3)$$

마찬가지로 방전식은 다음과 같다

$$Vol = E_i e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)로부터 적분 회로를 통과한 신호를 기준 주파수와 입력 주파수가 같은 경우와 다른 경우로 나누어 각각 구할 수 있다.

① 입력 주파수와 기준 주파수가 같은 경우

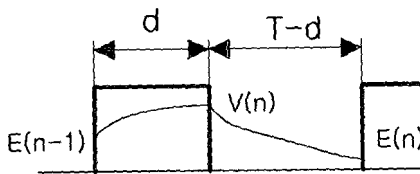


그림 7 기준 주파수와 입력 주파수가 같은 경우의 배타적 논리합

식 (3), 식 (4)와 그림 7로부터 다음 관계식을 구할 수 있다.

$$V_n = E(1 - e^{-\frac{d}{RC}}) + E_{n-1} e^{-\frac{d}{RC}} \quad (5)$$

그림 7과 식 (5)로부터 다음을 알 수 있다.

$$E_n = E(e^{-\frac{T-d}{RC}} - e^{-\frac{T}{RC}}) + E_{n-1} e^{-\frac{T}{RC}} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 적분 회로를 통과한 신호는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$Vol(nT) = E_i + (EK_r + r_r E_i - E_d) \frac{1 - r_r^n}{1 - r_r} \quad (7)$$

$$r_r = e^{-\frac{T}{RC}}$$

$$K_r = e^{-\frac{T-d}{RC}} - e^{-\frac{T}{RC}}$$

② 입력 주파수와 기준 주파수가 다른 경우

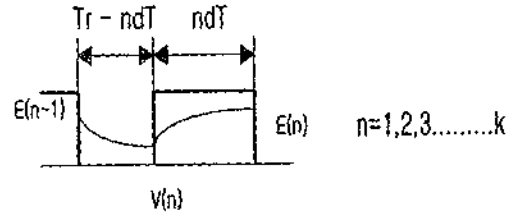


그림 8 입력 주파수와 기준 주파수가 다른 경우 배타적 논리합

식 (3), 식 (4)와 그림 8로부터 다음을 알 수 있다.

$$V_n = E_{n-1} e^{-\frac{T_r - ndT}{RC}} \quad (8)$$

식 (8)과 그림 8로부터 다음을 유도할 수 있다.

$$E_n = E - E e^{-\frac{ndT}{RC}} + E_{n-1} e^{-\frac{T_r}{RC}} \quad (9)$$

식 (9)로부터 다음을 알 수 있다.

$$E_k = r_r^k E_i + E \left( \frac{r_r^k - 1}{r_r - 1} - c \frac{r_r^k - c^k}{r_r - c} \right) \quad (10)$$

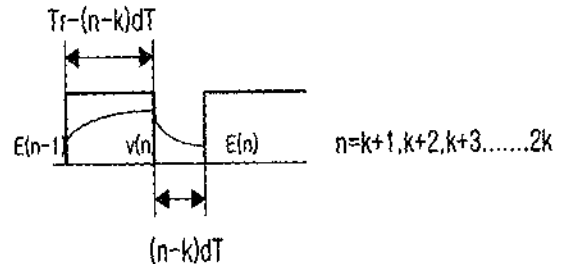


그림 9 입력 주파수와 기준 주파수가 다른 경우 배타적 논리합

그림 9와 식 (3), 식 (4)로부터 다음을 알 수 있다.

$$V_n = E(1 - e^{-\frac{T_r - ndT}{RC}}) + E_{n-1} e^{-\frac{T_r - ndT}{RC}} \quad (11)$$

식 11과 그림 8로부터 다음을 알 수 있다.

$$E_{2k} = r_r^k E_k + E \left( c \frac{r_r^k - c^k}{r_r - c} - r_r \frac{1 - r_r^k}{1 - r_r} \right) \quad (12)$$

식 (10)과 식 (12)로부터 다음을 알 수 있다.

$$Vol(T_0 n) = E_i + (EK_r + r_r E_i - E_d) \frac{1 - r_r^n}{1 - r_r} \quad (13)$$

$$T_0 = T_r * 2 * \left( \frac{T_r}{\delta T} - 1 \right)$$

$$r = r_r^{2k}$$

$$K = \frac{(r_r^k - 1)(r_r^k - r_r)}{r_r - 1} + c \frac{(r_r^k - c^k)(1 - r_r^k)}{r_r - c}$$

#### 4. 수치적 검증

##### 4.1 극한

① 입력 주파수와 기준 주파수가 같은 경우 식 (7)로부터 다음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{nT \rightarrow \infty} Vol(nT) &= E_i + (EK_r + r_r E_i - E_i) \frac{1}{1-r_r} \\ &= \frac{EK_r}{1-r_r} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\frac{dVol(nT)}{dnT} = \frac{EK_r + r_r E_i - E_i}{RC(1-r_r)} r_r^n \quad (15)$$

식 (15)로부터 다음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} E_i > \frac{EK_r}{1-r_r} &\rightarrow \frac{dVol(nT)}{dnT} < 0 \\ E_i < \frac{EK_r}{1-r_r} &\rightarrow \frac{dVol(nT)}{dnT} > 0 \end{aligned} \quad (16)$$

식 (14)와 식 (16)으로부터 입력 주파수와 기준 주파수가 같은 경우 극한값은 신호의 여러 성분 중 오로지 위상차의 영향만 있고 초기값  $E_i$ 와는 무관함을 알 수 있으며 위상차에 따른 극한값은 그림 10에 나타내었다.

또한 초기값  $E_i$ 가 극한값  $\frac{EK_r}{1-r_r}$  보다 작고 한 주기당 전압은 단조 증가하며 초기값  $E_i$ 가 극한값  $\frac{EK_r}{1-r_r}$  보다 크면 한 주기당 전압은 단조 감소함을 알 수 있다.

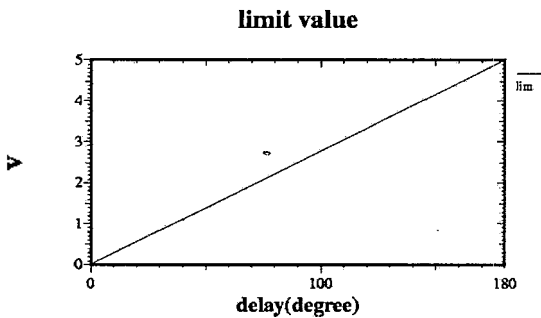


그림 10 위상차에 따른 극한값

② 입력 주파수와 기준 주파수가 다른 경우 식 (13)으로부터 다음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \lim_{nT_0 \rightarrow \infty} Vol(nT_0) &= E_i + (EK_r + r_r E_i - E_i) \frac{1}{1-r_r} \\ &= \frac{EK_r}{1-r_r} \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)로부터 입력 주파수와 기준 주파수가 다른 경우 한 주기당 전압량의 극한값은 초기 값  $E_i$ 에 관계없이 위상차가 0인 경우 오직 입력 주파수에 따라 변화함을 알 수 있다. 기준 주파수 12.5kHz, 위상차 0도, 인가 전

압 5V인 경우에 입력 주파수에 따른 극한값을 그림 11에 나타내었다.

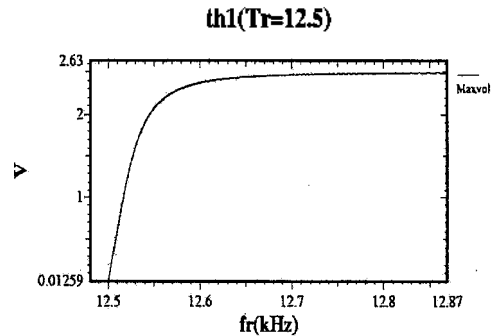


그림 11 입력 주파수에 따른 극한값

식 (17)로부터 다음을 알 수 있다.

$$\lim_{f_r \rightarrow f_r} \frac{EK_r}{1-r_r} = 0 \quad (18)$$

그림 11과 식 (18)로부터 입력 주파수가 기준 주파수로부터 멀어질수록 극한값은 인가전압의 반으로 수렴함을 알 수 있다. 이로부터 회로의 초기에는 불규칙한 노이즈가 들어온다고 가정할 경우 회로의 초기전압은 인가전압의 반이 됨을 알 수 있다.

식 (13)으로부터 다음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} E_i > \frac{EK_r}{1-r_r} &\rightarrow \frac{dVol(nT_0)}{dnT_0} < 0 \\ E_i < \frac{EK_r}{1-r_r} &\rightarrow \frac{dVol(nT_0)}{dnT_0} > 0 \end{aligned} \quad (19)$$

식 (19)로부터 초기 전압  $E_i$ 가 극한값  $\frac{EK_r}{1-r_r}$  보다 작으면 한 주기당 전압은 단조 증가하고 초기 전압  $E_i$ 가 극한값  $\frac{EK_r}{1-r_r}$  보다 크면 단조감소함을 알 수 있다.

결국 입력 주파수와 기준 주파수가 서로 다른 경우는 항상 인가 전압의 반으로 수렴하는 성질이 있음을 알 수 있다.

##### 4.2 시초값

단계 4는 위상차 0도, 90도, 180도, 270도의 기준 주파수의 신호와 입력 주파수의 신호를 각 단계를 통과시킨 후 이들 중 최대값이 시초값을 넘으면 기준 주파수의 신호로 인식하는 부분이다. 이때 시초값은 초기 전압이 0인 경우에 기준 주파수와 같은 입력 신호와 각 위상차의 기준 신호와의 결과값 중 최대값이 최소인 경우보다는 적고 기준 주파수와 다른 주파수의 입력 신호의 각 위상차의 기준 신호와의 결과값의 최대값중 최대보다는 크게 설정하면 된다.

시초값을  $V_r$ 이라할 때 기준 주파수와 다른 주파수의

입력 신호의 주기당 전압의 최대값은 식 (19)로부터 극한값이 되고 순간 전압의 최대값은 인가 전압이 5V인 경우 주기당 전압의 극한값보다 0.5V이상 크지 않으므로 인가전압이 5V인 경우 시초값의 최소 값은 식 (17)로부터 다음과 같음을 알 수 있다.

$$V_r > \frac{EK}{1-r} + 0.5 \quad (20)$$

그림 11로부터 인가 전압이 5V인 경우 주기당 전압의 극한값은 2.5V이므로 시초값의 최소값은 3V임을 알 수 있다.

입력 신호의 주파수가 기준 신호의 주파수와 같은 경우 위상차에 따른 각 기준신호에 해당하는 pulse width는 표 1과 같다.

위상차	$0 < d < T/2$	$T/2 < d < T$	$T < d < 3T/2$	$3T/2 < d < 2T$
기준 신호				
0	d	d	2T-d	2T-d
90	T/2-d	d-T/2	d-T/2	5T/2-d
180	T-d	T-d	d-T	d-T
270	T/2+d	3T/2-d	3T/2-d	d-3T/2

표 1 위상차에 따른 pulse width

표 1로부터 위상차에 따른 최대 pulse width는 그림 12와 같다.

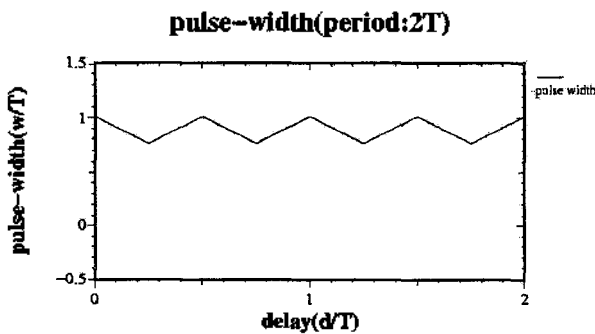


그림 12 위상차에 따른 최대 pulse width

식 7로부터 입력 신호와 기준 신호의 주파수가 같은 경우 출력 전압은 pulse width에 비례하므로 각 기준 신호별 출력 전압의 최대값의 최소값은 그림 12로부터 pulse width가 최소인  $d = \frac{3}{4}T$ 인 경우이며 식 (16)으로부터 전압의 최대값은 주기당 전압의 극한값이 된다. 따라서 식 (14)로부터 시초값  $V_r$ 은 다음을 만족함을 알 수 있다.

$$V_r < \frac{E(e^{-\frac{T}{4RC}} - e^{-\frac{T}{RC}})}{1 - e^{-\frac{T}{RC}}} \quad (21)$$

식 (20)과 식 (21)로부터 인가 전압이 5V인 경우 시초값의 범위는 다음과 같음을 알 수 있다.

$$\frac{EK}{1-r} + 0.5 < V_r < \frac{E(e^{-\frac{T}{4RC}} - e^{-\frac{T}{RC}})}{1 - e^{-\frac{T}{RC}}} \quad (22)$$

## 5. 수치 시험 및 회로 실험 결과

### 5.1 수치 시험

경우 1) 음원 인식 속도가 가장 늦은 경우 시정수 0.00616, 기준 주파수 12.5kHz, 인가 전압 5V일 때 음원 인식 속도가 가장 늦은 경우는 기준 주파수와 입력 주파수가 같은 경우는 출력이 최소인 위상차 45도 초기 전압 0V인 경우이고 서로 다른 주파수(12.8 kHz)인 경우는 초기 전압 5V인 경우이다. 이의 수치 시험 결과는 그림 13과 같다.

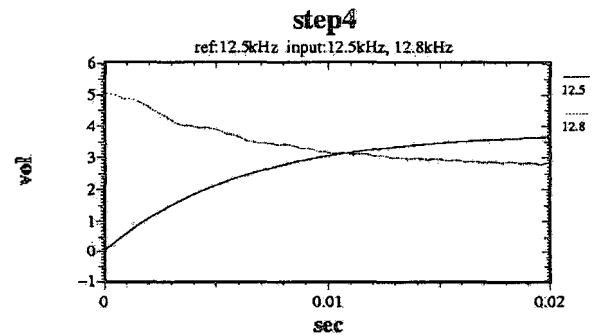


그림 13 경우 1)의 수치 시험 결과

경우 1의 수치 시험 결과로부터 시초값을 3.2V로 하면 최대 음원 인식 시간은 약 10msec 정도임을 알 수 있다.

경우 2) 일반적인 음원 인식 상황

식 17과 그림 11로부터 시정수 0.00616, 기준 주파수 12.5kHz, 인가 전압 5V일 때 일반적인 상황에서 초기 전압은 약 2.5V 정도임을 알 수 있다. 또한 입력 신호의 평균적 위상차를 22도로 가정할 때 입력 신호 12.5kHz, 12.8kHz의 수치 시험 결과는 그림 14와 같으며 그림 14로부터 일반적인 상황에서 시초값을 3.2V로 하면 음원 인식 속도는 약 2msec 정도임을 알 수 있다.

### 5.2 회로 실험

수치 시험 결과와 회로 실험 결과를 서로 비교하여 음원 인식 알고리즘의 타당성을 검증하였으며 회로 실험 환경은 다음과 같다.

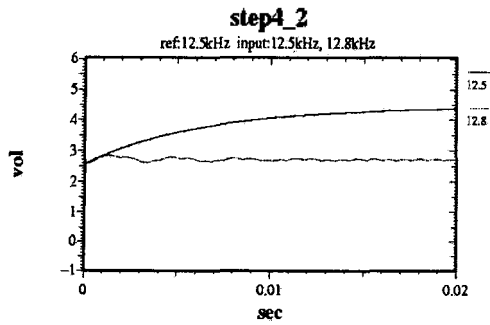


그림 14 경우 2)의 수치 시험 결과

**\*회로 시험 환경**

기준 주파수: 12.5 kHz

시정수: 0.00616

인가 전압: 4.56V

초기 전압: 2.54V

회로 실험은 입력 주파수 12.4kHz, 12.5kHz에 대하여 시행하였으며 결과는 각각 그림 15, 16에 나타내었다.

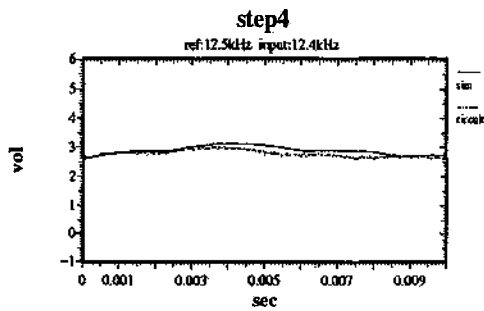


그림 15 12.4kHz의 회로 실험 결과

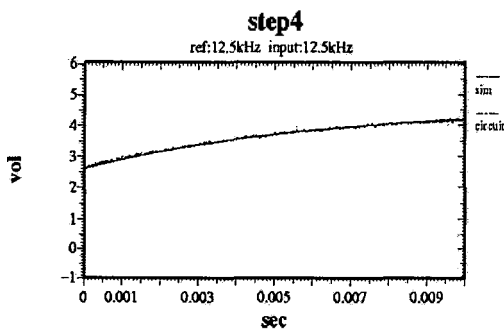


그림 16 12.5kHz의 회로 실험 결과

그림 15의 수치시험과 회로 실험의 차이는 입력 신호의 위상을 알 수 없었기 때문에 입력 신호의 위상을 임의로 정한 때문으로 보이며 입력 신호의 위상을 알 수 있는 그림 16의 결과는 서로 잘 일치함을 알 수 있다.

**6. 결론**

본 고에서는 간단한 회로를 이용하여 저전력에서 2msec 정도의 음파 인식 속도를 갖는 효율적인 음원 인식 회로를 작성하였으며, 이의 신뢰성을 수학 모델, 수치 시험, 회로 실험을 통하여 검증하였다. 이 회로는 응용 분야로서 저전력에서 작동하여야만 하는 AUV의 원격 음파 제어장치, 해저 착탈 장치, 음파 위치 추적 장치등이 있으며 향후 인식속도를 좀더 향상시키면 수중에서의 음파 통신 장치에도 응용될 수 있다.

**참고 문헌**

- [1] 대우중공업(주) 선박해양기술연구소, "무인잠수정 (AUV)'OKPO-6000' 개발", 1999
- [2] A. D. Waite, "SONAR FOR PRACTISING ENGINEERS", Ferranti Thomson Sonar Systems Ltd., UK 1996
- [3] Albert W. Cox, "Sonar and Underwater Sound", Raytheon Company, London, 1982
- [4] 谷本茂, "OP 앰프 실전기술", 도서출판 세운, 1988
- [5] 오성균, 유용희, 공하성, "전기이론", 성안당, 1999
- [6] M. H. RASHID, "POWER ELECTRONICS", Prentice-Hall International, Inc., 1988
- [7] MOTOLORA, "High-Speed CMOS Data", 1998
- [8] 양선모, "저항 콘덴서 코일", 도서출판 세운, 1993
- [9] 박상희, 이문기, "기초 回路理論", 진영사, 1995
- [10] A. P. Malvino, "Electronic Principles", 보성문화사, 1990