

# 微小試料의 高精度 超音波音速 測定에 관한 연구

李 殷 邦\* · 大槻茂雄

## 〈目 次〉

- |                           |                 |
|---------------------------|-----------------|
| I. 서 론                    | 3. 주파수의 영향      |
| II. 位相法의 測定原理와 補問         | IV. 측정시스템과 실험결과 |
| 1. 局所位相法의 측정원리            | 1. 측정시스템        |
| 2. 직교성분의 補問               | 2. 액체 시료의 측정결과  |
| III. 계산기 시뮬레이션에 의한 精度의 검토 | 3. 비선형계수의 측정    |
| 1. 진폭의 영향                 | V. 결 론          |
| 2. 잡음 및 파형변형의 영향          | 참고문헌            |

## I. 서 론

초음파에 관한 연구는 1912년 Titanic호의 빙산 충돌 사건이후 海中에서 초음파의 빙산에 대한 방향 탐지가가능성이 발표된 이래, 제1차 세계대전 중에는 잠수함의 탐지를 위한 군사용으로, 전후에는 측심기, 어군탐지기 등으로 실용화되기 시작하였다. 현재 초음파는 단층촬영, 비파괴 검사 세정, 모터, 가공 등 넓은 분야에 걸쳐 이용되고 있으며 새로운 분야의 응용을 위해 여러 각도로 연구가 활발히 진행되고 있다.

그중의 한분야가 물질의 음향 특성(음속, 산란, 흡수, 비선형 등)에 관한 연구이다. 모든 물질은 고유의 음향 특성을 가지고 있으므로 이것의 정확

한 계측으로 물질의 성질 및 구조에 관한 정보를 얻을 수 있다. 특히, 의학분야에서 생체조직의 음향 특성의 계측으로 조직 감별과 병리 상태를 확인할 수 있으면, X선 등 기존의 진단 장치와는 다른 형태의 진단 정보로 병리 현상의 조기진단 및 치료에 크게 공헌하리라 생각된다.

초음파의 생체중 전파속도는 대부분 1,400m/s~1,600m/s의 범위이므로 조직 감별을 위해서는 아주 작은 음속차를 검출하지 않으면 안된다. 생체조직의 분균일성과 병리 조직의 크기를 고려하면 미소 시료에서의 음속을 高精度로 계측하는 시스템의 개발이 필요하다. 측정 시료가 미소하기 때문에 펄스 투과법에서는 시간 분해능의 저하 또는 연속파법에서는 다중반사 등으로 전파시간의 測定

\* 정회원, 일본동경공대 박사과정

精度에 큰 영향을 준다.

본 연구에서는 짧은 시간 영역내의 버스트(burst)파를 주파수분석 한 후 송·수신파 신호의 위상을 각각 구하여 송·수신파의 위상차로부터 음속을 구하는 국소위상법(局所位相法)을 고안하였다. 이 방법은 종래의 위상분석법과는 달리 적은 데이터로 위상을 구할 수 있다.

본 논문에서는 국소위상법의 측정원리를 설명하고 계산기 시뮬레이션으로 測定 精度를 分析한다. 또 실제의 액체 시료에서의 음속과 비선형계수를 측정하고 그 결과를 분석하고자 한다.

## II. 局所 位相法의 測定原理와 補問

### 1. 局所位相法의 측정원리

상대음속의 精度는 송·수신파 위상의 測定精度에 의해서 정해진다. 일반의 위상분석법에서는 송·수신파의 相互相關(상호상관)를 취해 위상을 구하기 때문에 송·수신신호의 유효 Data 수의 최소제한을 받는다. 따라서 다중반사 등의 원인으로 송·수신신호의 Data를 충분히 얻을 수 없을 경우에는 이 方法을 이용하기 어렵다. 따라서 여기서는 짧은 시간영역에서 高精度로 위상을 구하는 방법으로 정현파의 직교성분을 이용한 局所位相法을 설명한다.

受波信號  $f(t)$ 는 복소수평면에서 식(1)과 같이 표현된다.

$$f(t) = A \cdot e^{j(\omega t + \phi)} \dots\dots\dots (1)$$

단, A : 진폭,  $\omega$  : 각속도,  $\phi$  : 수파의 위상각

샘플링(sampling) 주파수, 송신주파수를 각각  $f_s$ ,  $f$ 라 하면 샘플링(sampling)의 위상각도는  $\theta_0 = 2\pi \frac{f}{f_s}$  이고 k번째의 Sampling의 성분 U와 이것과의 교성분 V는 다음과 같다.

$$U = A e^{j(\phi + K\theta_0)} \dots\dots\dots (2)$$

$$V = A e^{j(\phi + K\theta_0 + \frac{\pi}{2})} \dots\dots\dots (3)$$

$R_c U = u$ ,  $R_c V = v$ 에 의해 2개의 직교성분의 진폭 u, v는

$$u = A \cos(\phi + K\theta_0) \dots\dots\dots (4)$$

$$v = -A \sin(\phi + K\theta_0) \dots\dots\dots (5)$$

이다.

(4)식과 (5)식을 전개하여 정리하면 정현파의 위상  $\phi$ 는 식 (6)으로 구한다.

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{v \cdot \cos K\theta_0 + u \cdot \sin K\theta_0}{v \cdot \sin K\theta_0 - u \cdot \cos K\theta_0} \right) \dots\dots\dots (6)$$

즉, 정현파의 어떤 샘플링 값과 이것의 직교성분의 값을 이용하면 이 정현파의 위상을 구할 수 있다.

위상을 계산하는데 필요한 4개의 요소중 u, sin  $K\theta_0$ , cos  $K\theta_0$ 는 선택한 샘플링의 위치로 구할 수 있으나 직교성분 v는 직교성분과 가장 가까이 있는 2개의 샘플치로부터 補問할 필요가 있다. 여기서 샘플링의 精度, 보간치의 신뢰성 등은 위상 계산의 精度에 큰 영향을 주므로 K번째의 샘플치의 선택은 매우 중요하다. 본 연구에서는 k번째 샘플치를 정현파의 Peak치 부근에서 선택하였다. Peak치 부근에서 샘플치로 선택한 이유는 peak 부근의 샘플값은 위상의 변화에 대해서 그 변동이 적고, 잡음의 영향이 적다. 뿐만 아니라, 피크치와 직교하는 값은 영(Zero)점 부근으로 정현파의 이부분을 거의 직선으로 근사시킬 수 있으므로, 보간값을 선형근사 하여도 高精度로 구할 수 있기 때문이다.

### 2. 직교성분의 補問

그림 1은 초기위상이  $\phi$ 인 정현파 신호를 나타낸다. R번째의 Peak 부근의 샘플링값 u와 u의 직교성분  $v_1$ 을 사이에 둔 2개의 샘플링값을  $m_1$ ,  $m_2$ 라고 하면 직교성분  $v_1$ 는 다음과 같은 보간법으로 할 수 있다.

u,  $m_1$ ,  $m_2$  3개의 샘플의 진폭은 각각 다음 식과 같다.

$$u = A \cos \phi \dots\dots\dots (7)$$

$$m_1 = -A \sin(\phi - \alpha) \dots\dots\dots (8)$$

$$m_2 = -A \sin(\phi + \theta - \alpha) \dots\dots\dots (9)$$

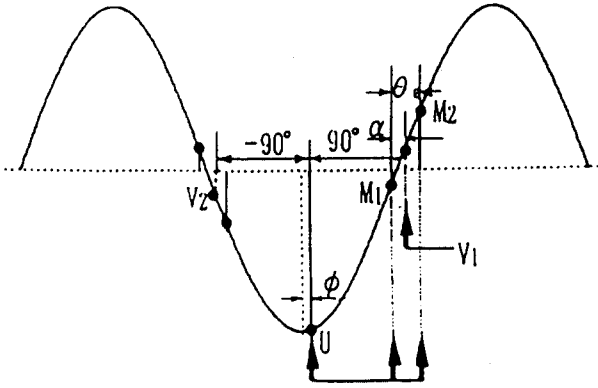


그림 1. 국소위상법의 원리

단,  $\alpha$ 는 식 (10)으로 구하며 직교성분  $v_1$ 과 샘플링 값  $m_1$ 과의 회전각도를 나타낸다.

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \theta_0 \cdot \text{int} \left( \frac{\pi}{2\theta_0} \right) \dots\dots\dots (10)$$

여기서,  $\text{int} \left( \frac{\pi}{2\theta_0} \right)$ 는  $\frac{\pi}{2\theta_0}$ 를 넘지 않는 최대 정수

Peak 부근의 샘플링 값  $u$ 와 영점부근 2개의 샘플링값에 의해 2개의 보간치  $k_1, k_2$ 를 각각 (11)식, (12)식으로 구한다.

$$k_1 = A \sin \phi = \frac{u \cdot \sin \alpha - m_1}{\cos \alpha} \dots\dots\dots (11)$$

$$k_2 = A \sin \phi = \frac{m_2 - u \cdot \sin(\theta_0 - \alpha)}{\cos(\theta_0 - \alpha)} \dots\dots\dots (12)$$

만약, 잡음이 없을 경우에는  $k_1 = k_2$ 가 되나 잡음이 있는 경우에는 Peak 부근의 샘플링값에서  $+\frac{\pi}{2}$  떨어진 곳의 보간치  $V_1$ 는  $K_1$ 과  $K_2$ 의 평균으로 구한다. 한편, Peak 부근의 샘플링 값에서  $-\frac{\pi}{2}$  떨어진 곳에서의 보간치  $V_2$ 는 위와 동일한 방법으로 구한다. 위상계산에서 사용한 직교성분  $V$ 는  $V_1$ 과  $V_2$ 의 평균값으로 한다.

종래의 위상법에서는 진폭변화를 다루기 어려웠으나 본 측정법에서는 Peak 부근에 대해 2개의 직교성분의 평균을 이용하여 受波波形과 같이 진폭이 변화하는 波形에 대해서도 진폭변화분이 거의 상쇄되므로 高精度로 位相을 구할 수 있다.

### III. 계산기 시뮬레이션에 의한 測定 精度의 검토

계산기 시뮬레이션을 통해서 진폭변화, 잡음 및 파형의 변화, 주파수의 변화등이 본 測定方法의 精度에 주는 영향에 관하여 분석검토 하기로 한다.

#### 1. 진폭의 변화

(13), (14)식은 각각 同振幅信號  $f_1(t)$ , 變振幅信號  $f_2(t)$ 를 나타낸다.

$$f_1(t) = A \sin(2\pi f \cdot t + \phi) \dots\dots\dots (13)$$

$$f_2(t) = A \sin(2\pi f \cdot t + \phi) \cdot \sin\left(2\pi \cdot \left(\frac{f}{30}\right) \cdot t\right) \dots\dots\dots (14)$$

그림 2는 同振幅 信號  $f_1(t)$ 와 變振幅 信號  $f_2(t)$ 를 나타낸 것이다. 여기서 주파수와 샘플링 주파수는 각각 1MHz, 20MHz로 하였으며  $\phi$ 는  $-\pi \sim \pi$ 의 범위에서 변화시켰다.

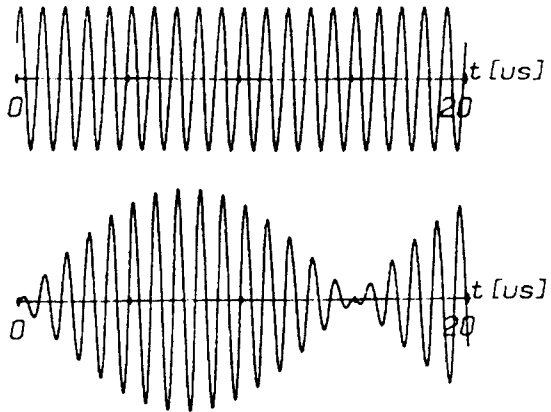


그림 2.  $f_1(t), f_2(t)$ 의 波形

그림 3은  $f_1(t), f_2(t)$ 의 계산 위상  $\phi_1, \phi_2$ 와 入力 位相  $\phi$ 의 差分과  $\phi$ 와의 관계를 나타낸다. 位相差는 25개의 Peak 부근의 샘플값으로 구한 결과의 평균값과  $\phi$ 의 차이이다. 진폭이 일정할 경우의 평균 위상은 입력위상  $\phi$ 와 완전히 일치하고 진폭의 변동이 있을 경우는 위상차가  $0.18^\circ$ 범위내에서 변동하였다. 진폭변동에 의한 오차는 적으며 음속의

精度로 환산하면 0.05m/sec의 분산에 해당한다.

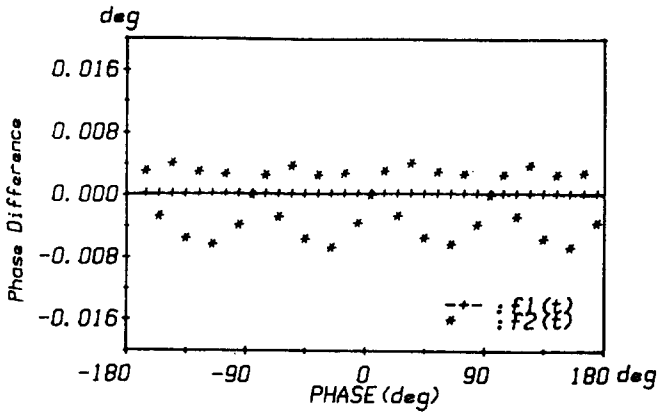


그림 3. 진폭에 의한 위상측정오차의 영향

### 2. 잡음 및 파형변형의 영향

變振幅信號  $f_2(t)$ 에 잡음의 최대치와 최대진폭 A와의 比가 1/10, 1/20, 1/100의 잡음을 첨가하였을 때 위상분산을 그림 4에 나타냈다. 여기서 초기 위상을 30°, 최대진폭을 3으로 설정하였다.

본 측정법의 위상분산이 잡음의 크기에 따라 변화하며 1/10의 경우 위상의 최대분산은 0.4°이었고 음속으로는 0.12m/sec의 精度에 영향을 준다.

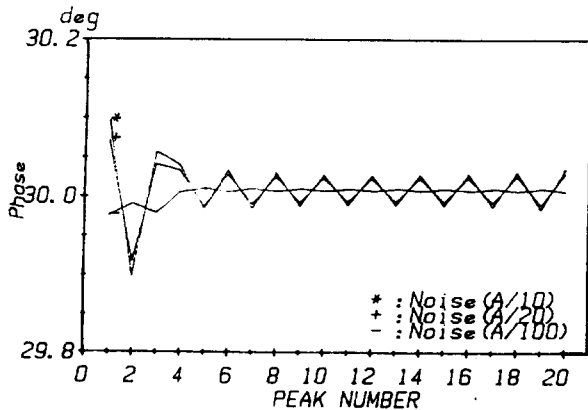


그림 4. 잡음에 의한 측정정도의 영향

또한 (15)식과 같은 찌그러짐이 있는 파형에 대해서 精度를 검토하였다.

$$f_s(t) = \tan^{-1}(\cos(2\pi ft + \phi)) \dots\dots\dots (15)$$

$\phi$ 을  $0 \sim \pi/2$ 에 변화시켰을 때 입력위상  $\phi$ 에 대해서 계산으로 구한 위상과의 차를 그림 5에 나타냈다. 입력신호는 peak 부근에서 약 10% 정도의 찌그러짐이 있고, 중심측부근에서는 거의 없으므로 위상계산오차는 peak 부근의 샘플링오차에 의한 것으로 생각된다. 10% 정도의 찌그러짐에 의한 위상계산의 최대오차는  $\pm 2^\circ$ 로 음속으로 0.6m/sec 정도의 영향을 준다.

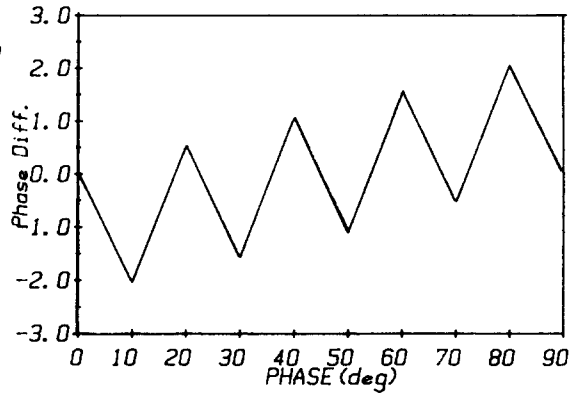


그림 5. 파형의 변형의 영향

### 3. 주파수의 영향

국소위상법을 이용할 때 신호주파수  $f$ 와 샘플링 주파수  $f_s$ 는  $f \leq \frac{1}{6} f_s$ 의 조건을 만족하지 않으면 안 된다. 여기서는 變振幅信號  $f_2(t)$ 에서 주파수변화로 인한 위상계산의 영향을 조사하였다. 주파수 0.8 MHz-3.4MHz 범위에서  $\omega$ 가 0.1MHz의 단계로 변화시켰을 때의 구한 위상과 입력위상의 초기위상 ( $\phi$ )과의 差와 주파수와의 관계를 그림 6에 나타냈다.

주파수가 증가함에 따라 위상의 분산이 커지는 것이 관찰되었다. 원인은 샘플링간격이 넓어짐에 따라 보간할 때 선형근사의 가정이 부적당하여 생기는 오차로 생각된다. 넓은 범위의 주파수 변화에 대해서 위상변화가 0.2°이내이므로 주파수의 변화가 본 측정법의 計測精度에 큰 영향을 주지 않는 것을 알았다.

#### IV. 측정시스템과 실험결과

##### 1. 측정시스템

그림 7은 국소위상법에 의한 음속과 비선형계수의 계측을 위한 측정시스템의 block diagram이다. 초동파진동자는 직경 6mm, 초점거리 10mm, 공진 주파수 1MHz의 PIT 凹면 진동자를 사용하였다. 송신파는 동기된 5circle의 burst파를 이용하였으며, 실제 얻은 受波波形은 그림 8과 같다.(그림 8의 설명)

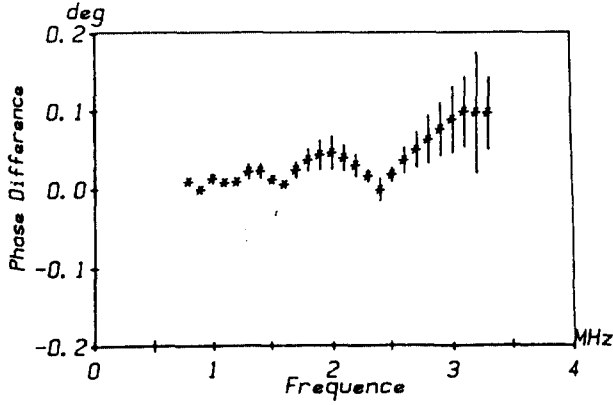


그림 6. 주파수에 의한 위상측정 정도의 영향

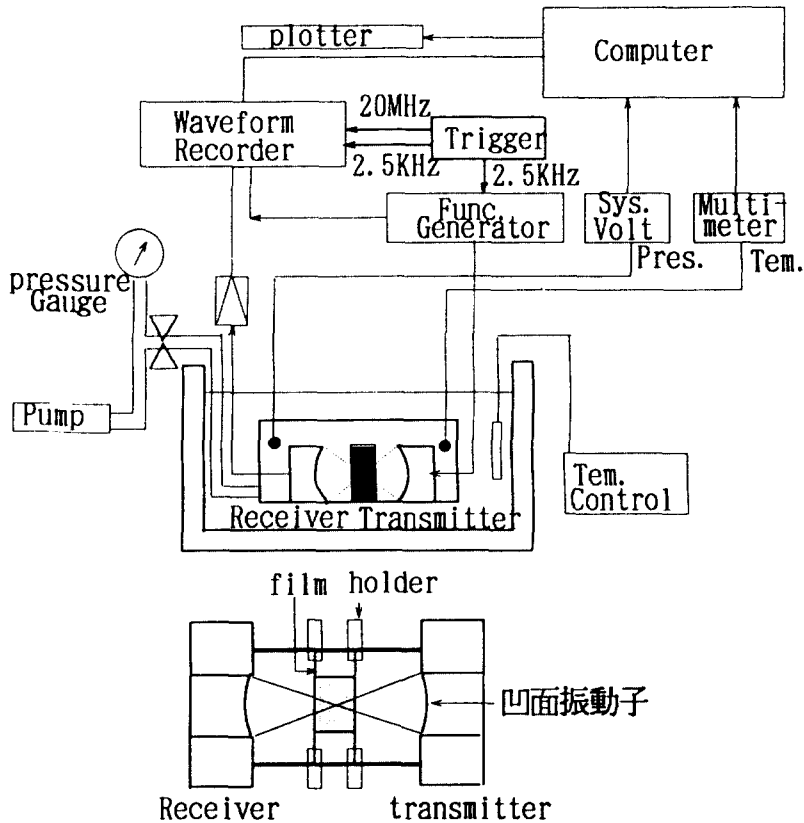


그림 7. 음속, 비선형계수의 측정 block diagram

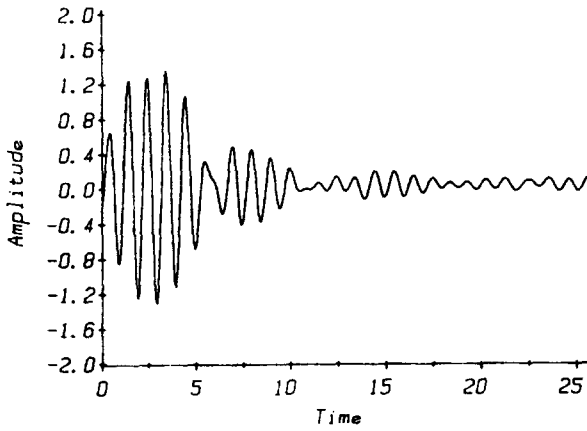


그림 8. 受波波形

### 2. 액체 시료의 측정결과

측정법의 유용성을 실험하기 위해 Greenspan의 음속을 기준으로 몇 종류의 액체시료에 대하여 음속을 측정하였다. 그림 9는 물에 대한 음속 측정 결과이다. 음속은 30회 측정값의 평균치이며, 30회 측정값은 최대분산은 그림 10과 같이 0.2m/sec 범위내 있었으며, 문헌값과 비교하여 0.02%의 精度로 음속 측정이 가능하였다.

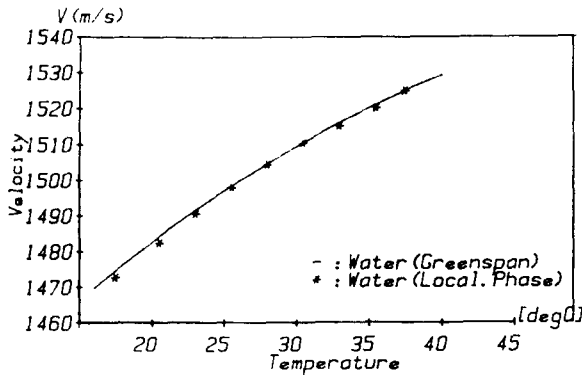


그림 9. 물의 음속 측정결과

### 3. 비선형계수의 측정

일반적으로 음향학에서는 압력과 밀도간에 선형적인 관계가 성립하는 파동방정식이 이용되고 있으나, 실제에는 양자간의 비선형적인 관계가 존재한다. 이를 나타내는 계수로서 비선형계수(B/A)가

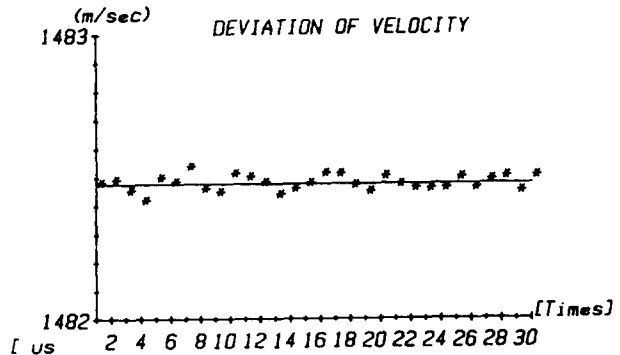


그림 10. 음속의 분산

있다.

$$B/A \doteq z \rho_0 C_0 \left( \frac{\partial C}{\partial p} \right)_T$$

$\rho_0$  : 밀도

$C_0$  : 평형상대음속

$\frac{\partial C}{\partial p}$  : 압력에 의한 음속변화

T : 일정온도

이와 같은 미약한 비선형 현상의 계측을 위해서는 압력변화에 의한 적은 음속의 변화를 계측하여야 한다.

그림 11은 물의 비선형계수의 측정결과이다. 국소위상법의 미약한 음속의 측정에 유용성을 확인하였다.

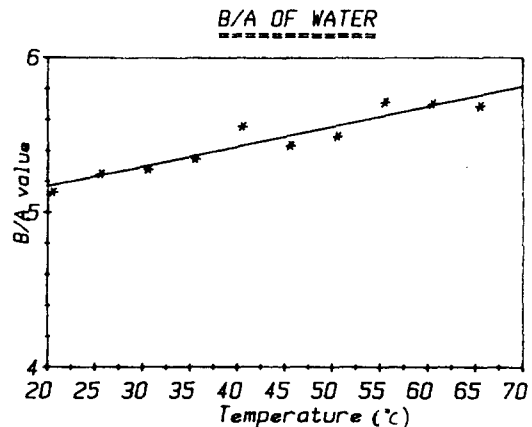


그림 11. 물의 비선형계수 측정결과

## V. 결 론

본 연구에서는 미소한 시료의 음속을高精度로 측정하기 위한 국소위상법을 제안하였다. 국소위상법의 원리 및 Data의 처리방법을 설명하였고, 진폭변화, 잡음, 파형의 변형 및 주파수 변화에 대해 계산기 시뮬레이션을 통하여精度를 분석 검토하였다. 실제 균일매질의 음속을 측정하여 본 연구에서 제안한 국소위상법이 짧은 전파시간에도高精度의 측정이 가능함을 보였으며, 미약한 비선형 계수를 측정하여 생체조직과 같은 작은 시료의 음속측정법으로 유용함을 입증하였다.

## 참 고 문 헌

- 1) 實吉純一, 菊池喜充, 能本之彦, 超音波技術便覽, pp. 1-8, 1990.
- 2) 海洋音響研究會, 海洋音響(基礎と應用), pp. 2-10, 1984.
- 3) Kazuhike Imano, Daitaro Okuyama and Noriyoshi Chubachi "A technique of measuring relative sound velocity changes using a frequency variable type ultrasonic correlation system", J. A. S. J[E] 13, 3, pp. 181-186, 1992.
- 4) D. E. Robinson, J. Ophir, L. S. Wilson and C. F. Chen, "Pulse echo ultrasound speed measurements: Progress and prospects", ultrasound in Med & Biol, Vol. 17, No. 6, pp. 633-646, 1991.