

# 지방질에 대한 초음파 비선형 파라메타 B/A의 의존성

## Dependence of Ultrasonic Nonlinear Parameter B/A on Fat

김 정 구\*, 배 종 립\*\*

(Jeong-Koo Kim\*, Jong-Rim Bae\*\*)

### 요 약

광대역 고분자 초음파 변환기를 이용한 초음파 비선형 파라메타 B/A 측정장치를 이용하여 생체조직에서 지방질의 농도에 대한 B/A의 의존성을 알아보기 위하여 계란의 흰자와 노른자의 혼합에 대하여 조사하였다. 이들 두 성분에 대한 음속과 밀도가 서로 1% 정도임에도 불구하고 yoshizumi 등에 의해 제시된 선형성보다 이차적 의존성이 더 있음을 확인하였다. 이것은 생체조직을 fat과 nonfat의 두 부분으로 나누어 지방질의 농도에 대한 초음파 비선형 파라메타 B/A와 음속의 크기에 대하여 본 연구에서 제시한 이론식과 잘 일치하였다. 또한 지방질이 없는 skim milk의 다양한 용해도 성분에 대한 B/A와 음속을 측정한 결과 용해도의 농도가 클수록 B/A와 음속의 값이 커짐을 알 수 있었으며, 이들에 영향을 주는 것은 단백질 등으로 예상된다.

핵심어: 초음파 비선형 파라메타 B/A, 지방질, 생체물질, 음속, PVDF 초음파 변환기

분류번호: 초음파 및 탄성과 분야(4.6)

### ABSTRACT

This study deals with the relationship between the magnitude of ultrasonic nonlinear parameter B/A, sound speed of amount of fat present in biological media for measuring B/A system using a wide band ultrasonic transducer. To represent this case, mixtures of egg white and egg yolk were studied. Even though the differences in density and sound speed of the two egg components were within 1% of each other, B/A were increases parabolically as a function of the fat density, which is not in agreement with the Yoshizumi et al's suggestion. In skim milk that does not contain fat, both the B/A and the sound speed increase with the solubility. It is proposed that protein could affect these values.

Key words: Ultrasonic nonlinear parameter B/A, Fat, Biological media, Sound speed, PVDF ultrasonic transducer.

### I. 서 론

물질의 특성을 나타내는 물질 고유의 값인 초음파 비선형 파라메타 B/A는 초음파와 매질 사이의 비선형 상호작용의 크기를 나타내는 파라메타로서, 매질에 대한 물성 연구에 많이 이용된다. 그중 생체조직에 대한 B/A의 측정은 생체조직의 특성을 나타내는데 있어 중요한 역할을 한다고 알려져 있다[1,2,3,4]. 생체조직에 대한 B/A 측정이 새로운 의학적인 진단법으로서 최근 큰 주목을 받고 있다[5,6,7,8]. Muir는 인체조직의 초음파 비선형성을 의학적인 진단에 이용하자는 제안을 처음 하였으며,[9] Ichida 등은 이 정보를 더욱 정밀하고 생동감있게 표현하기 위한 영상화를 제안하였다[10]. 또한 Dunn 등은 몇몇 생물학적

매질에 대한 초음파 비선형 파라메타 B/A를 측정하였다 [11,12,13]. 이와 같이 매질의 특성에 대한 초음파 비선형 파라메타 B/A에 관한 이러한 관심의 증가에도 불구하고 인체의 병리학적 상태가 B/A에 어떠한 영향을 미치는가에 대해 아직 충분히 알려지지 않고 있다. 일반적으로 생체조직은 거의 물, 지방, 단백질, 탄수화물로 이루어진 다층구조를 갖는다. 생체조직에서 지방질 성분에 따른 B/A의 변화는 의학적인 진단에 매우 중요한 역할을 할 것으로 여겨진다. 따라서 본 연구에서는 의학적인 진단장치에서 초음파 비선형성에 대한 이용성을 높이기 위하여 본 실험실에서 자체 제작한 고분자 압전 박막인 PVDF 변환기를 이용한 초음파 비선형 파라메타 B/A 측정 시스템을 이용하여 생체조직에 있어 지방질의 양과 B/A의 관계를 실험적으로 확인하여 보았으며, 지방농도가 일정한 물질에서 B/A에 영향을 미치는 요인에 대하여 조사하여 보았다.

\* 한서대학교 초음파의학과

\*\* 대구대학교 물리학과

접수일자: 1999년 7월 29일

II. 이 론

생물학적 조직에서 지방질의 양과 생체조직의 초음파 비선형 파라메타 B/A 사이의 양적 관계를 결정하기 위하여 생체조직을 지방질과 비지방질의 두 성분으로 구분하였다. 생체조직에 있어 두 성분에 대한 혼합에서 음속 c와 초음파 비선형 파라메타 B/A는 아래의 방정식에 의해 그 성분을 구분한다[14].

$$\frac{1}{c} = \frac{(1 - X_f)}{c_n} + \frac{X_f}{c_f} \tag{1}$$

$$\frac{B}{A} = [\rho c^3] \left[ \frac{(\frac{B}{A})_n}{(\rho c^3)_n} (1 - X_f) + \frac{(\frac{B}{A})_f}{(\rho c^3)_f} X_f \right] \tag{2}$$

여기서 아래첨자 f,n은 각각 지방질과 비지방질 성분을 각각 표시하며, X는 체적분율을 나타낸다. 식 (1), (2)는 두 성분의 음속과 밀도의 관계에 기초하여 두 가지 경우로 생각한다.

먼저 지방질과 비지방질의 음속과 밀도가 같은 경우, 즉

$$c = c_n = c_f \quad \text{and} \quad \rho = \rho_n = \rho_f \tag{3}$$

일 때, 식 (2)를 간단히 하면 다음과 같다

$$\frac{B}{A} = (\frac{B}{A})_n + [(\frac{B}{A})_f - (\frac{B}{A})_n] X_f \tag{4}$$

이것은 두 성분중 하나의 체적비에 선형적으로 관계하는 경우의 B/A이다. 식 (4)는 물의 두가지 상태에 대한 Yoshizumi 예[15] 의해 제안된 혼합법칙으로 해석한 것이다. 두번째 경우, 두 성분의 음속과 밀도가 서로 다른 경우, 즉

$$c \neq c_n \neq c_f \quad \text{and} \quad \rho \neq \rho_n \neq \rho_f \tag{5}$$

일때, 혼합체의 음속과 밀도는 다음과 같이 표현된다.

$$\rho = \rho_n + (\rho_f - \rho_n) X_f \tag{6}$$

$$c^3 = c_n^3 \left[ -1 + 3\left(\frac{c_n}{c_f} - 1\right) X_f \right]^{-1} \tag{7}$$

또한 식 (7)을 이항전개에 의해 오른쪽 항을 전개하고 고차항을 무시하면, (7)식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$c^3 = c_n^3 \left[ 1 + 3\left(1 - \frac{c_n}{c_f}\right) X_f \right] \tag{8}$$

식 (2)에 식 (6)과 식 (8)을 이용하여 B/A식을 다시 쓰

면 다음과 같다.

$$\frac{B}{A} = (\rho_n + (\rho_f - \rho_n) X_f) \left\{ c_n^3 \left[ 1 + 3\left(1 - \frac{c_n}{c_f}\right) X_f \right] \left[ \frac{(\frac{B}{A})_n}{(\rho c^3)_n} + \left[ \frac{(\frac{B}{A})_f}{(\rho c^3)_f} - \frac{(\frac{B}{A})_n}{(\rho c^3)_n} \right] X_f \right] \right\} \tag{9}$$

식 (9)에 대하여 고차항을 무시하면, 지방질과 비지방질에 대한 두 성분의 음속과 밀도가 서로 다른 경우 B/A가 생체조직의 지방농도에 대한 이차함수로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\frac{B}{A} = K_1 + K_2 X_f + K_3 X_f^2 \tag{10}$$

여기서

$$K_1 = (\frac{B}{A})_n$$

$$K_2 = (\rho_n c_n^3) \left[ \left( \frac{(\frac{B}{A})_f}{(\rho c^3)_f} - \frac{(\frac{B}{A})_n}{(\rho c^3)_n} \right) + \left( \frac{B}{A} \right)_n \left[ 3\left(1 - \frac{c_n}{c_f}\right) + \left( \frac{\rho_f}{\rho_n} - 1 \right) \right] \right]$$

$$K_3 = (\rho_n c_n^3) \left[ 3\left(1 - \frac{c_n}{c_f}\right) + \left( \frac{\rho_f}{\rho_n} - 1 \right) \left[ \left( \frac{(\frac{B}{A})_f}{(\rho c^3)_f} - \frac{(\frac{B}{A})_n}{(\rho c^3)_n} \right) + \left( \frac{B}{A} \right)_n \left[ 3\left( \frac{\rho_f}{\rho_n} - 1 \right) \left( 1 - \frac{c_n}{c_f} \right) \right] \right] \right]$$

이다.

III. 실험 방법

3.1. 비선형 파라메타 B/A 측정

먼저 생체조직의 지방농도에 대한 B/A의 측정은 광대역의 특성을 지니는 PVDF로 제작된 초음파 변환기를 이용한 방법을[16] 이용하였다. 그림 1은 광대역 초음파 변환기를 이용하여 B/A를 측정하는 장치의 개략도이다. 먼저 송신계는 burst 파를 발생시키는 펄스발생기(HP 8116A)와 감쇄기(TRA-601D), 약한 burst 파를 증폭시키는 고주파용 파워앰프(ENI A150)와 PZT 변환기로 구성되며, 수신계는 PVDF 변환기, 스펙트럼 아날라이저(ADVENTEST R4131C)로 구성된다. 수신용 초음파 변환기에 PVDF를 사용한 이유는 PVDF 변환기에 AC 펄스를 인가할 경우 광대역의 특성을 지니고 있어, 이차 고조파를 관측하기 위하여 변환기를 교체할 필요없이 한번에 이차고조파를 포함한 고차고조파를 기본파와 함께 관측할 수 있는 장점이 있기 때문이다. 제작된 PVDF 변환기는 지름 10mm, 길이 50mm인 바늘형태의 알루미늄이 backing 물질로 삽입되었으며 여기에 두께가 52μm인 PVDF 고분자 얇은 필

름이 부착되어 있다.[17] 송신용 초음파 변환기는 전기기계 결합계수가 좋아 송신용으로 적합한 PZT 초음파 변환기를 이용하였으며, 공진 주파수는 3.2MHz이다. 매질을 투과한 파를 PVDF 변환기로 수신한 다음 스펙트럼 아날라이저를 이용하여 기본파와 이차 고조파의 진폭해석을 통하여 비선형 파라메타 B/A를 측정하였다. 또한 시료셀은 크기가 60 × 90 × 60mm인 스테인레스 재질이며 셀 내부의 온도를 조절하기 위하여 셀의 외부로 물이 순환하는 이중구조로 되어 있다.

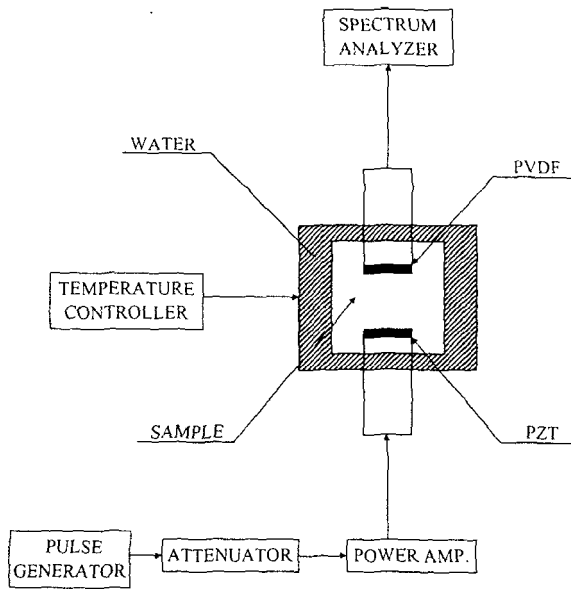


그림 1. 광대역 초음파 변환기를 이용한 B/A 측정 시스템의 개략도

Fig. 1. Block diagram of B/A experiment system using windband ultrasonic transducer.

3.2. Pulse-Echo Overlap법에 의한 음속 측정

지방농도에 따른 음속은 Pulse-Echo Overlap법으로 측정하였다. 그림 2는 본 실험에서 사용한 실험장치의 개략도이다. CW oscillator에서 나온 구형파의 주파수를 분주기(divider)를 거쳐 분주하고, 이 신호로 pulser를 trigger하여 초음파 펄스를 여기한다. 시료를 전파한 초음파 펄스와 펄스에코들은 수파측의 수정 진동자에 의해 수신되고 증폭기를 통하여 오실로스코프의 화면상에 관측된다. 초음파 펄스는 평행으로 고정된 2개의 수정진동자간을 왕복하면서 감쇠 하지만, 제3, 제4,....에코가 완전히 감쇠하지 않는 중에 다음의 펄스를 여기하면 앞의 에코펄스들과 간섭이 일어나 펄스의 형태가 변화한다. 따라서 CW oscillator의 주파수를 액체의 흡수계수에 따라 분주기의 적당한 분주율을 선택하여 이 영향이 나타나지 않도록 한다. 또한 제 1펄스와 제 2펄스가 중첩되면, 제3, 제4,.... 펄스도 같은 위치에서 중첩되므로 측정하기 곤란하다.

따라서 제 1펄스와 제 2펄스만이 오실로스코프 화면상에 관측되도록 펄스로 오실로스코프에 trigger한다. 시간측 trigger의 주파수를 CW oscillator로 조절해서 제 1펄스와 제 2펄스의 carrier 파형이 중첩되어 보이도록 하면, trigger의 주기는 초음파 펄스가 1회 왕복하는 시간과 같다. 이 주기는 counter에 의해 정밀히 측정되어 음속  $C=2L/T$ 로부터 음속이 구해진다. 이때 음속측정의 정확도는 0.1%이다. 그림 3의 (a)는 오실로스코프상에 걸쳐 나타난 제 1, 2펄스를 나타내고 있으며, (b)는 펄스의 선두 위상 부분에 대해 시속의 척도를 확대한 것이다. 진동자의 공진주파수는 3MHz이다. 초음파 cell의 개구경은 12mm로 음원의 유효반경보다 크도록 제작하였으며, cell 내부의 양단을 약간 오목하게 하여 화절에 의한 손실을 줄이도록 하였다. 이 초음파 cell 전체를 항온조에 넣어 온도를 조절하였다.

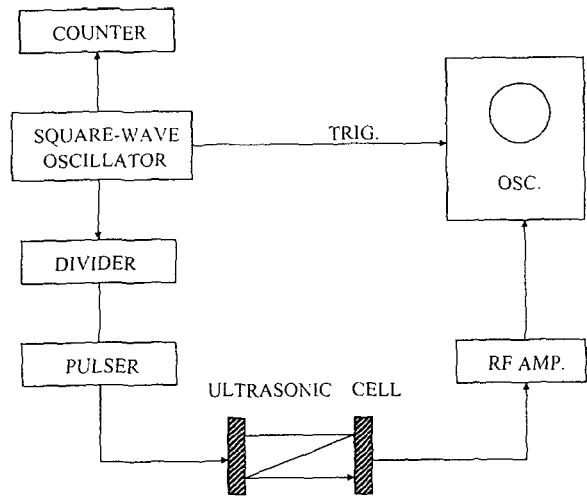
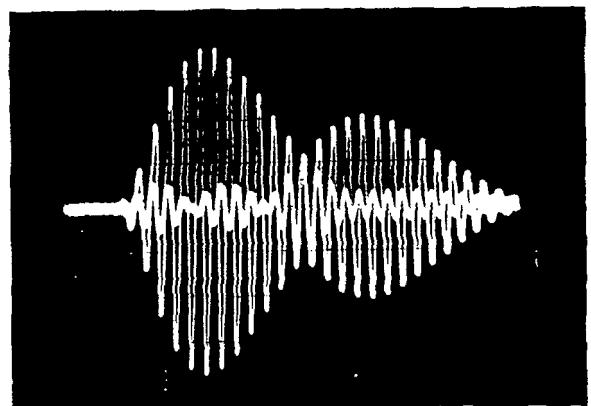
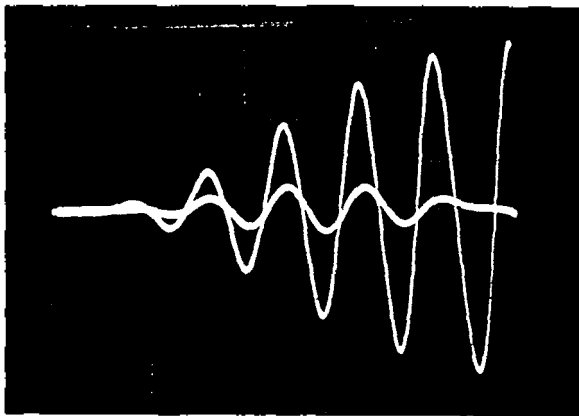


그림 2. 음속 측정시스템의 개략도

Fig. 2. Block diagram of sound speed experiment system.



(a)



(b)

그림 3. (a) 3 MHz에서 CRT에 나타난 펄스의 쌍  
(b) 시간축을 확대하였을 때 두 파에 대한 위상의 매칭  
Fig. 3. (a) Pair of pulse displayed on CRT at 3MHz,  
(b) Showing cycle-for-cycle phase matching in expanded time scale.

3.3. 시료의 제작

지방농도에 따른 초음파 비선형 파라메타 B/A 와 음속과의 관계를 알아보기 위한 시료로, 구하기 쉬우며 천연 단백질을 함유하는 계란을 선택하였다. 계란흰자에는 지방이 없으며, 노른자는 약 30%의 지방농도를 가지며 음속과 밀도가 서로 1% 정도의 차이가 난다(표 1).

표 1. 계란흰자와 노른자의 밀도, 음속, 비선형 파라메타 B/A와 지방질의 구성성분

Table 1. Density, sound speed, nonlinear parameter B/A and constituents of egg white and egg yolk.

Parameters	Egg white	Egg yolk
Fat percent	0	30
Water percent	86	48
Residue percent	14	22
Density $\rho$ (g/m)	1.03	1.025
Sound speed C(m/sec)	1521.1	1496.2
B/A	5.22	9.15

먼저 계란흰자와 노른자의 혼합물에 따른 B/A와 음속을 측정하기 위하여 계란에서 흰자와 노른자 성분을 분리하였다. 사용한 계란은 산란후 아들이 지난 무정란으로, 계란 흰자의 경우 분리된 것을 다시 채로 걸러 순수한 액체성분만을 모았으며, 분리된 노른자에 기포가 생기는 것을 방지하기 위하여 거품이 발생하지 않도록 조심스럽게 저었다. 이들 중의 일부분을 이용하여 음속측정에 사용하였다.

지방농도에 따른 B/A의 관계를 알아보기 위해서는 계란 노른자의 지방농도가 30%밖에 안되므로 광범위한 지방농도에 따른 B/A의 관계를 알아보기 위해서는 계란 혼합만

으로는 불가능하다. 따라서 지방농도가 100%인 물질인 Sigma사의 com oil에 대한 B/A값을 측정하였다. 또한 지방이 없는 생물학적 물질에서 초음파 비선형 파라메타 B/A에 영향을 미치는 요인을 알아보기 위하여 skim milk의 용해도 차에 따른 B/A와 음속의 값을 측정하기 위하여 DIFICO사 skim milk를 사용하였다. 여기에 다시 5%, 10%, 15%, 20%의 nonfat dry milk를 혼합해 각각의 다른 용해도를 지니는 skim milk를 만들었다.

IV. 결과 및 논의

계란의 흰자와 노른자에 대한 B/A는 PVDF 변환기를 이용한 장치를 사용하여 측정하였고, 음속은 Pulse-echo overlap법을 이용한 장치로 측정하였으며 결과를 표 1에 나타내었다. 계란 흰자와 노른자는 1% 범위 내에서 거의 같은 밀도와 음속을 갖지만 B/A는 매우 큰 차이를 보인다. 이것은 계란흰자와 노른자에 대한 지방농도의 차이가 매질의 초음파 비선형성에 영향을 끼쳤다고 생각된다.

그림 4에서는 계란 흰자와 노른자의 혼합매질의 B/A를 측정하여 노른자의 체적비로 나타내었다. 86%의 물과 14%의 단백질 성분을 갖는 계란 흰자의 B/A는 5.22이며 Law등이 보고한 값과 잘 일치한다[11]. 여기에 계란 노른자를 첨가함에 따라 B/A는 선형적으로 계속 증가하다가 30%의 지방성분을 갖는 순수 노른자의 B/A는 9.15로 측정되었다. 지방농도가 증가함에 따라 B/A도 증가하였으며, 이 측정결과는 식 (4), (9)으로 계산된 이론치와 잘 일치함을 알 수 있다.

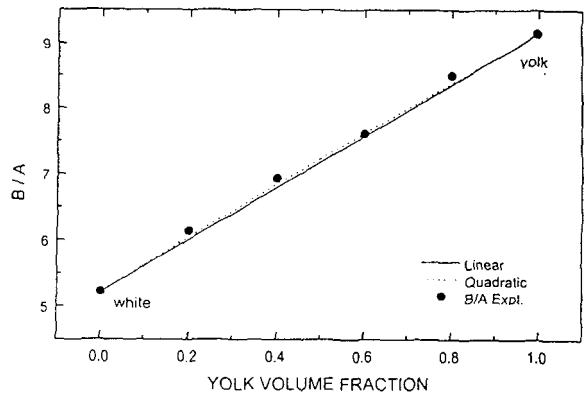


그림 4. 계란 흰자와 노른자의 혼합에 대한 B/A 값  
Fig. 4. Values B/A of mixtures of egg white and egg yolk.

그림 5는 계란 흰자와 노른자의 혼합매질에 대한 음속을 측정하여 노른자의 체적비로 나타낸 것이다. 지방의 농도가 증가함에 따라 음속은 선형적으로 감소함을 알 수 있었으며, 식 (1)으로부터 계산된 이론치와 잘 일치하였다. 여기서 측정된 음속값을 지방의 농도에 대한 B/A의 측정에 사용하였다.

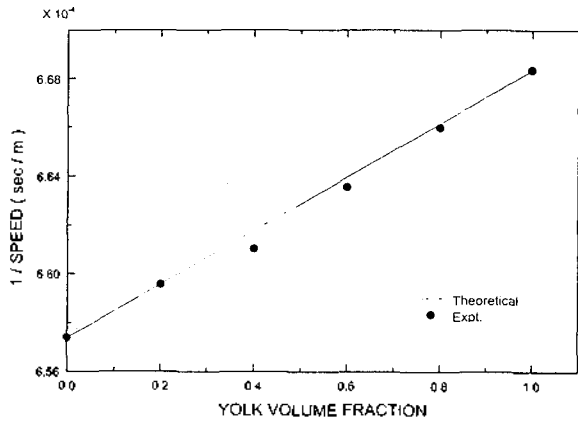


그림 5. 계란 노른자의 체적비의 함수에 대한 음속의 역수 값  
Fig. 5. Inverse sound speed as function of egg yolk volume fraction.

그림 6은 계란 노른자의 지방농도가 30% 밖에 되지 않으므로 계란 노른자와 흰자의 혼합과 간[9], 지방조직 [11], 및 옥수수 기름에 대한 초음파 비선형 파라메타 B/A를 전체 지방의 체적비에 대한 함수로서 나타낸 것이다. 실선은 각각의 B/A의 값에 대해 식 (9)에 의해 fitting하여 나타낸 것이다. 처음 30% 이내의 지방농도에서 B/A는 5에서 9까지 증가하다가, 70% 이상의 지방농도에서는 실질적인 증가는 없었다. 이것으로 미루어 Yoshizumi 등이 [15] 가정 한 선형법칙보다는 본 이론식에서 유도된 이차방정식이 더 적합함을 알 수 있다.

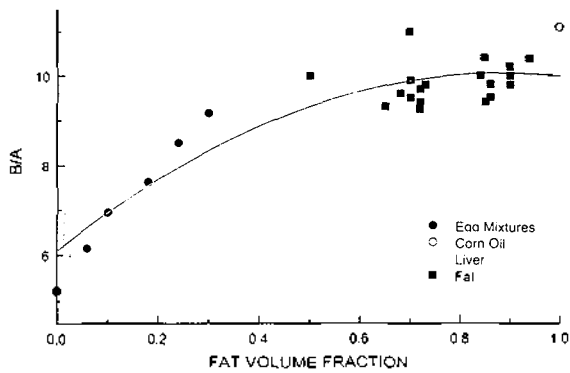


그림 6. 계란의 구성성분과 옥수수 기름 및 다른 참고문헌에 대한 지방질의 체적비의 함수에 대한 B/A 값  
Fig. 6. B/A as function of fat volume fraction in egg constituents, corn oil, and other reference.

지금까지 물질을 지방과 비지방의 두 성분으로 나누어 지방농도에 대한 초음파 비선형성을 알아보았으며, 생체 조직에서 지방을 제외한 다른 성분에 의한 B/A에 대한 영향을 조사하기 위해 지방이 없는 탈지유에 탈지분유를 녹인 혼합용액에 대하여 조사하였다. 표 2에 탈지유와 탈지분유 및 옥수수 기름에 있는 지방, 물, 나머지 성분 (residue)을 각각 나타내었다. 탈지유에 탈지분유를 적당

히 용해시켜 residue의 비율을 조절한 몇가지 매질에 대한 음속과 B/A를 측정하여 그림 7과 8에 나타내었다. 탈지유에 대한 residue의 질량비가 증가함에 따라 음속과 B/A가 증가함을 알 수 있다. 이와같이 음속과 B/A가 증가하는 것은 혼합매질내에 있는 단백질 등의 농도의 변화에 기인한 것임을 알 수 있다. 즉 지방 이외의 성분 또한 B/A값에 영향을 미치므로, 이러한 데이터의 측정은 의학적인 진단에서 유용하게 이용될 수 있다.

표 2. 탈지유, 탈지분유와 옥수수 기름에서 물, 지방질 및 나머지 성분의 함량

Table 2. Weight percent of water, residue, and fat in skim milk, non fat dry milk and corn oil.

Medium	Weight percent		
	Water	Residue	Fat
Skim milk	91	9	0
Non fat dry milk	4	96	0
Corn oil	0	0	100

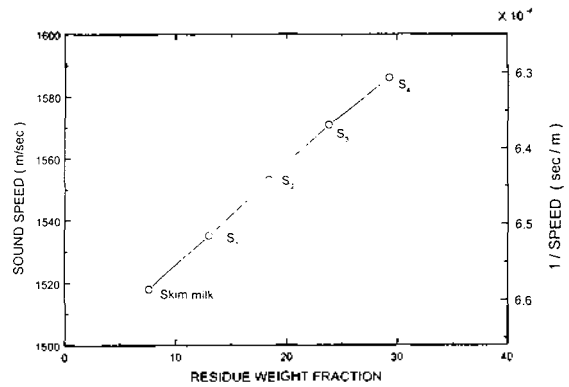


그림 7. 탈지유의 질량비에 대한 음속 값  
Fig. 7. Sound speed of residue weight percent of skim milk solution.

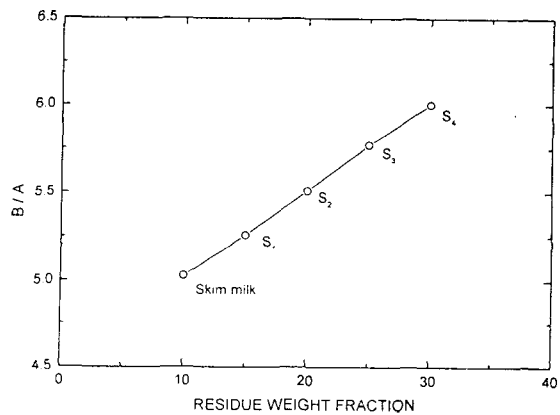


그림 8. 탈지유의 질량비에 대한 B/A 값  
Fig. 8. B/A as a function of residue weight percent of skim milk solution.

## V. 결 론

본 실험실에서 제작한 광대역 고분자 초음파 변환기를 이용하여 생체조직의 지방의 농도에 따른 B/A 및 음속을 측정하고 이들의 관계를 알아보았다. 계란 흰자와 노른자의 혼합매질의 B/A 값은 지방농도가 증가할수록 커졌으며, Yoshizumi 등에 의해 제시된 선형성을 갖지 않고 이차적 의존성을 나타내었으며, 이것은 생체조직을 지방과 비지방의 두 부분으로 나누어 지방의 농도에 대한 초음파 비선형 파라메타 B/A와 음속의 크기에 대하여 본 연구에서 제시한 이론식과 잘 일치하였다. 또한 달지유에 대한 residue의 질량비가 증가함에 따라 음속과 B/A가 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 음속과 B/A가 증가하는 것은 혼합매질내에 있는 단백질 등의 농도 변화에 기인한 것임을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. A. P. Sarvazyan, T. V. Chalikian, and F. Dunn, "Acoustic Nonlinearity Parameter B/A of Aqueous Solutions of Some Amino Acids and Proteins," *J. Acoust. Soc. Am.*, 88, pp. 1555-1561, 1990.
2. C. M. Sehgal, R. C. Bahn, J. F. Greenleaf, "Measurement of the acoustic nonlinearity parameter B/A in human tissues by a thermodynamic method," *J. Acoust. Soc. Am.*, 76, pp. 1023-1029, 1984.
3. R.E. Apfel, "Prediction of tissue composition from ultrasonic measurements and mixture rules," *J. Acoust. Soc. Am.*, 79, pp.148-152, 1986.
4. Z. Zhu, M.S. Roos, W.L.Cobb, and K. Jensen, "Determination of the acoustic nonlinearity parameter B/A from phase measurement," *J. Acoust. Soc. Am.* 74, pp.1518-1521, 1983.
5. G. Xiu-fen, Z. Zhe-ming, S. Tao, and H. Jian-hong, "Determination of the Acoustic Nonlinearity Parameter in Biological Media Using FAIS and ITD Method," *J. Acoust. Soc. Am.*, 86, pp.1-5, 1989.
6. 遠藤新行, 茂木龍太, "生體組織の非線形 パラメ測定的基础研究," *日本超音波醫學會講演論文集*, pp.43-444, 1987
7. 佐藤拓実, 山越芳樹, "生體組織における音波の非線形現象とその 應用," *日本音響學會誌*, 44, pp.700-705, 1988.
8. J. Zhang, M. S. Kuhlenschmidt, and F. Dunn, "Influences of Structural Factors of Biological Media on The Acoustic Nonlinearity Parameter B/A," *J. Acoust. Soc. Am.*, 89, pp.80-91, 1991
9. E. L. Carstenson, W. K. Law, N. D McKay, and T.G. Muir, "Demonstration of nonlinear acoustical effects at biomedical frequencies and intensities," *Ultrasonic Med. Biol.*, 6, pp.359-368, 1980.
10. N. Ichida, T.Sato, and M. Linzer, "Imaging the nonlinear ultrasonic parameter of a medium," *Ultrasonic Imaging* , 5, pp.295-299, 1983.
11. W.K.Law, L.A.Frizzell, and F. Dunn, "Ultrasonic determination of the nonlinearity B/A for biological media," *J. Acoust. Soc. Am.*, 69, pp.1210-1212, 1981.
12. W. K. Law, L.A. Frizzell, and F. Dunn, "Determination of the nonlinearity parameter B/A of biological media," *Ultrasound Med. Biol.*, 11, pp.307-318, 1985.
13. W. K. Law, L.A. Frizzell, and F. Dunn, "Comparison of thermodynamic and Finite Amplitude Methods of B/A Measurements in Biological Materials," *J. Acoust. Soc. Am.*, 74, pp.1295-1297 1983.
14. C. M. Sehgal, G.M. Brown, R.C. Bahn, and J.F. Greenleaf, "Measurement and use of acoustic nonlinearity and sound speed to estimate composition of excised livers," *Ultrasound Med. Biol.*, 12, pp.865-874, 1986.
15. K. Yoshizumi, T. Sato, and N. Ichida, "A physicochemical evaluation of the nonlinear parameter B/A for media predominantly composed of water," *J. Acoust. Soc. Am.*, 82, pp.302-305, 1987.
16. 김정구, 배종림, "광대역 고분자 초음파 변환기를 이용한 초음파 비선형 파라메타 B/A의 측정," *응용물리*, 9, pp.278-283, 1996.
17. 김정구, 배종림, "고분자 압전 Film을 이용한 초음파 변환기의 응답특성," *응용물리*, 8, pp.398-402, 1995.

▲ 김정구(Jeong-Koo Kim)

한국음향학회지 제17권 제6호 참조

▲ 배종림(Jong-Rim Bae)

한국음향학회지 제17권 제6호 참조