

초음파의 지연 시간을 이용한 두부 조직의 물성변화 예측에 관한 연구

김학정¹ · 김병용^{1*} · 함영태²

¹경희대학교 식품가공학과, ²중앙대학교 생물공학과

초록 : 응고제 양, 두유 가열 온도, 성형 압력과 같은 두부 제조 공정에 따른 두부의 조직 강도를 파손강도와 초음파의 지연시간 측정을 이용하여 측정하였다. 응고제 양은 0.3%에서 두유 가열 온도는 95°C에서 최대 파손강도를 나타내었고 성형압력은 압력이 증가할수록 파손강도가 증가하였으며 그에 상응하는 초음파의 잔존시간은 파손강도와 반비례하여 감소하는 경향을 나타내었다. 각 제조공정을 변수로 하여 중회귀 분석을 한 결과 초음파의 잔존시간으로 예측된 예측 파손강도와 실측정한 파손강도 값들 사이에는 유사함을 나타내어 초음파를 이용한 초음파 잔존시간의 변화는 식품조직의 변화에 따라 민감한 변화를 나타내므로 식품 제조 공정중 품질관리 측면에서 초음파의 사용이 기대되어진다(1995년 4월 6일 접수, 1995년 7월 6일 수리).

서 론

대두가공 식품으로 우리나라에서 가장 많이 이용하는 두부는 대두를 자비하여 가용성분을 추출하고 이에 염화물 등을 첨가하여 그 중의 단백질 성분을 침전 응고시킨 후 성형한 것이다.¹⁾ 이러한 두부의 제조과정중 두부의 조직형성에 영향을 주는 주요 공정으로는 두유의 가열온도,^{2,3)} 응고제 종류²⁻⁵⁾ 및 양,⁶⁾ 압착시 압력⁷⁾ 등을 들 수 있다. 이런 주요 공정을 통하여 제조된 여러 두부에 분포되어 있는 내부 응력의 측정에는 비파괴 검사 방법의 일종인 초음파(ultrasonic wave)가 이용되어 진다.

초음파란 2 MHz~5 MHz 범위의 높은 주파수를 가진 음파로서 고체내의 내부응력을 비파괴적으로 검사하는데 응용되기 때문에 초음파진단은 석유산업⁸⁾ 등에도 이용되고 있다. 최근에는 식품분야에서도 품질관리의 지표나 잔존응력의 예측에서 초음파의 이용이 대두되고 있으나 아직은 미비한 상태이다. Miles 등⁹⁾은 -50~100 °C의 온도 범위에서 초음파를 이용하여 지방조직내에서 고형성분이 차지하는 비율을 측정하여 지방조직의 부패를 결정할 수 있는 식을 제시하였고 Nasoni 등¹⁰⁾은 초음파 속도에 대한 온도상수 값과 지방함량과의 관계를 제시하였다. McMaster 등¹¹⁾은 초음파 속도와 extruder 내에서 가공중인 식품의 탄성 성질 사이에 관련이 있다고 밝혔다. 국내에선 윤 등¹²⁾이 생선단백질 gel내의 잔존응력을 가공조건을 변화시키면서 초음파를 이용하여 왕복주행시간을 측정하고 파괴시험을 통해 파손강도를 측정 후 중회귀분석을 통하여 파손강도 예측식을 제시하여 초음파의 품질관리 측면에서 이용 가능성을 구체화 시켰다.

본 연구에서는 가공조건에 따라 변하는 두부 조직의 강도변화와 초음파 왕복주행시간 즉, 지연시간(delay

time)을 측정하여 저장액에 담겨 있는 두부조직의 품질검사에 조직의 비파괴측정방법 이용 가능성을 연구하고자 하였다.

재료 및 방법

재료

실험에 사용한 콩은 수입산 미국대두를 사용하였으며, 두부 응고제는 CaCl₂ (Sigma Chemical, Co.)을 사용하였다.

두부의 제조

깨끗이 수세한 대두(300 g)를 12시간 수침, 팽윤시킨 후 blender에서 5분간 마쇄하여 충분히 마쇄된 콩을 여과포에 넣고 두유를 압출 여과하였다. 가수량은 원료 대두의 10배로 하였다. 얻어진 두유액을 95°C에서 10분간 끓인 후 끓인 두유액에 응고제를 첨가하였다. 응고제 첨가 후 20분 방치하여 배보를 간 성형틀(12×12×20 cm)에 응고물을 옮긴 후 일정무게로 압착, 성형하고 냉각 후 물성변화를 측정하였다.

파손강도(failure stress)의 측정

두부의 내부조직 강도를 나타내는 파손강도는 시료의 크기를 일정하게(2×2×2 cm) 자른 후 rheometer(Sun, Co. CR-200D, Japan)를 이용하여 10 kg load cell에 부착시킨 후 압축속도 200 mm/min, 변형율(strain) 0.4에서 파손강도를 측정하였다.

초음파의 지연시간의 측정

각 제조 공정에 의해 제조된 두부를 이용하여 윤 등¹²⁾의 방법으로의 초음파 지연시간을 측정하였다.(Fig. 1)

찾는말: 두부, 초음파, 파손강도, 지연시간

*연락처자

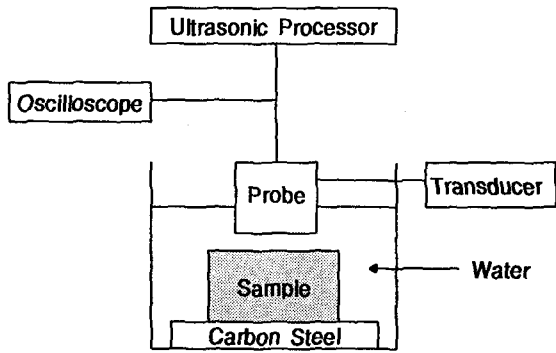


Fig. 1. Block diagram of experimental system for ultrasonic wave measurement.

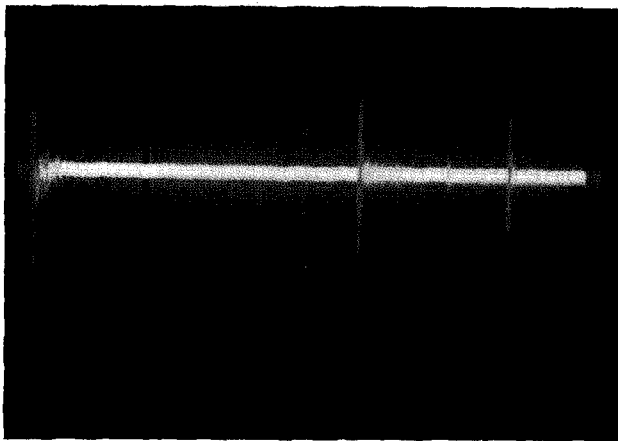


Fig. 2. Delay time of two signal reflected from the front surface and back of unloaded specimen.

즉 중심주파수 5 MHz, 비대역폭 40%인 구면형 변환기를 사용하여 종파를 물속에 잠겨있는 두부 조직내에 여진시켰다. 발생된 초음파는 두부 표면과 후면에서 각각 반사되어 돌아온다. 돌아온 초음파는 트랜듀서를 거쳐 파형분석기(oscilloscope)에서 지연시간과 증폭으로 주사하여 구하였다.(Fig. 2) 처음의 신호가 두부의 표면신호이고 두번째 약한신호가 두부의 배면신호이며 마지막 신호가 탄소강의 배면신호를 나타낸다. 각 신호의 최대 진폭 사이를 지연시간으로 계산하여 실온에서 5초 이내에 측정하였다. 음향파의 반사에 영향을 주는 잡음(noise)을 피하기 위해 시료까지의 매질은 물로 하였고 시료의 후면반사 신호를 정확히 잡기위하여 시료 밑에 탄소강을 깔고 변환기를 주사하면서 5군데에서 5회 측정을 하였다.

지연시간을 이용한 파손강도의 예측식

각 가공처리 공정과 지연시간과 파손강도와의 관계를 요인배치법(factorial design)으로 처리한후에 통계 분석용 SAS를 이용하여 중회귀분석(multiple regression analysis)을 하였다. 즉 지연시간을 종속변수로 하고 각 처리공정 조건을 독립변수로 하여 selection max. R square를 사용하여 분석하였다. 또한 파손강도를 종속변

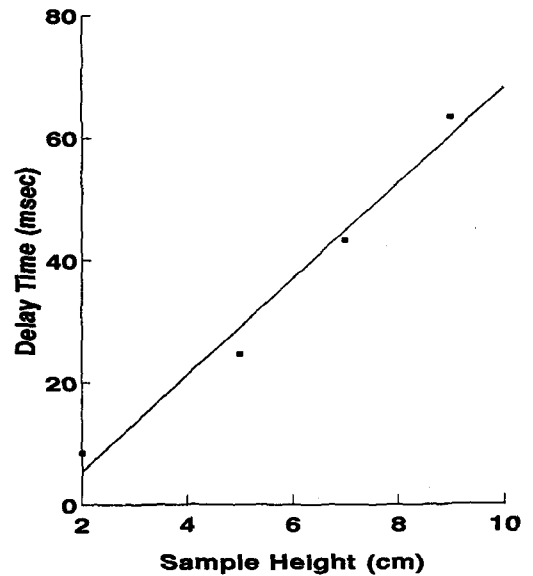


Fig. 3. Linear relationship between sample height and delay time of ultrasonic wave.(corr.=0.9673)

수로 하고 지연시간과 각 처리공정을 독립변수로 하여 같은 방법으로 분석하였다.¹³⁾

결과 및 고찰

가공공정에 따른 조직변화의 초음파 측정

두부조직의 균질성과 방향성을 조사하기 위해 두부 시료의 높이에 따른 초음파의 지연시간을 측정된 결과는 Fig. 3과 같다. 두부 시료의 높이를 2, 5, 7, 9 cm로 증가시켰을때 초음파의 지연시간이 각각 8.43 msec, 16.20 msec, 18.60 msec, 20.29 msec로 증가함을 나타내었다. 두부 시료의 높이에 따른 지연시간의 변화는 직선적으로 나타났으며(상관계수=0.9673) 형성된 조직내부의 밀도와 방향성은 균일한 것으로 보여진다. 이러한 직선적 관계하에서 신호가 가장 명확하게 잘 나타나는 2cm를 시료의 지연시간 측정높이로 일정하게 잡았다.

서로 다른 농도의 응고제 CaCl₂로 만든 두부의 파손강도와 초음파 지연시간과의 관계는 Fig. 4와 같다. 0.2% 응고제 농도를 첨가시 초음파의 지연시간은 14.89 msec를 나타내었고 0.3% 응고제 첨가시에는 8.43 msec의 최저치를 나타내었으며 0.5% 응고제 농도 첨가시에는 다시 13.33 msec로 증가하였다. 반면 파손강도는 응고제 농도 0.2%에서 16.07 kPa를 나타내었으며 0.3%의 농도로 증가시 33.01 kPa의 파손강도를 보였으나 응고제 농도가 더욱 증가시 다시 직선적으로 감소하여 0.5%에서는 12.50 kPa를 나타내었다. 이는 단백질과 결합하는 Ca염의 양이 다르기 때문에 과잉의 응고제를 사용하면 결합에 사용된 이외의 염은 전해질로 작용해 단백질 양이 온은 알카리분해를 음이온은 산분해를 일으켜 도리어 단백질과 염의 결합을 방해하기 때문에 두부조직의 강도가 약해져서 0.3%응고제농도 이상에서는 파손강도가 감소

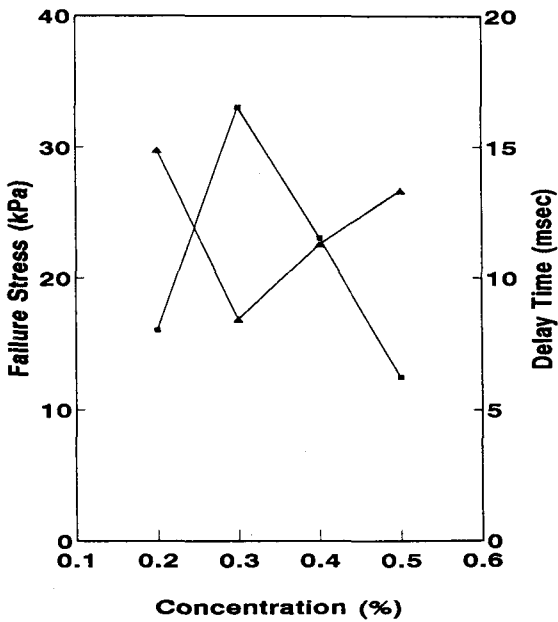


Fig. 4. Changes in delay time of ultrasonic waves and failure stress of made at various coagulant concentrations. ■—■, failure Stress; ▲—▲, delay time.

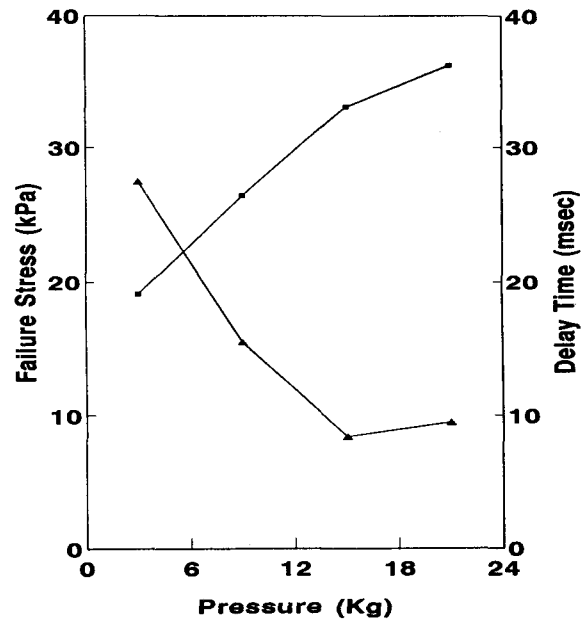


Fig. 6. Changes in delay time of ultrasonic waves and failure stress at various molding pressures. ■—■, failure Stress; ▲—▲, delay time.

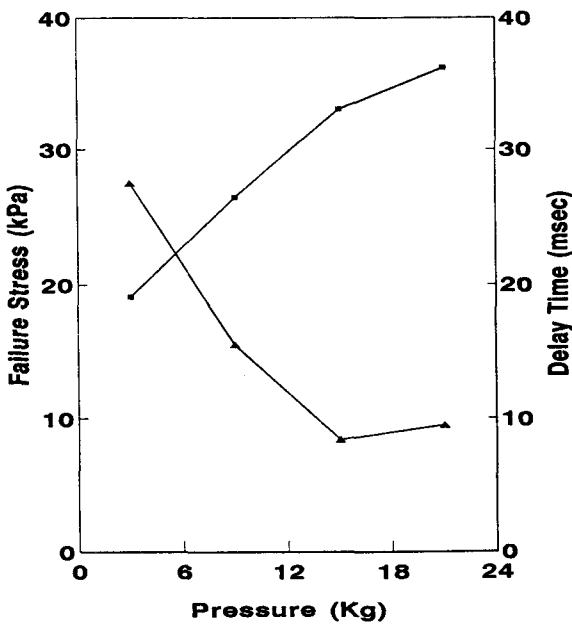


Fig. 5. Changes in delay time of ultrasonic waves and failure stress of at various heating temperature. ■—■, failure Stress; ▲—▲, delay time.

한 것으로 여겨진다.¹⁴⁾ 또한, 지연시간은 파손강도와는 반비례하는 경향을 보였는데 이는 조직이 강할수록 내부조직의 구조배열이 조밀하고 내부 기공없이 단단하여 초음파가 되돌아오는 지연시간이 짧게 나타나고 반면 조직이 약할수록 조직의 분자배열도 엉성하며 내부기공이 존재하여 지연시간이 길게 나타나는 것으로 추론되어진다.¹⁵⁾

두유 가열온도에 따른 두부조직의 파손강도와 지연시간의 변화는 Fig. 5와 같다. 가열온도를 80℃에서 100℃까지 증가시키며 측정한 초음파의 지연시간은 80℃에서는 12.00 msec, 90℃에서는 9.67 msec, 95℃에서는 8.43 msec, 100℃에서는 6.73 msec로 나타났으며 반면 파손강도는 80℃에서 11.11 kPa, 90℃에서 24.21 kPa, 95℃에서 33.01 kPa의 최대치를 나타내었고, 그 이후로는 100℃에서 30.45 kPa로 감소하는 경향을 나타내었다. 이와같이 가열 온도의 증가에 따라 두부 조직은 강하게 나타나며,¹⁶⁾ 고밀도의 조직 변화를 일으켜 짧은 초음파의 왕복 지연시간을 보이며, 이는 위에서 의 응고제 농도에 따른 조직 변화와 같은 현상을 보여주기도 한다. 또한 초음파의 지연시간은 가장 짧은 8.43 msec를 나타내어 파손강도와 초음파의 지연시간과는 반비례하는 경향을 볼 수 있었다.

두부제조시 성형압력을 달리하면서 제조한 두부의 지연시간과 파손강도의 변화는 Fig. 6과 같다. 지연시간은 성형압력이 3 kg에서 2 kg으로 증가할수록 27.50 msec에서 9.50 msec로 감소하는 경향을 보였고 파손강도는 19.11 kPa에서 36.26 kPa로 증가하는 경향을 보였다. 이는 위와 같은 다른 제조 공정과 마찬가지로, 성형압력이 증가할수록 두부조직내의 수분함량이 감소하여 단백질 응고물간의 결합면이 증가되어 두부 조직이 단단해지기 때문으로 사료된다. 위와 같은 결과로 볼 때 (Fig 4~6) 두부조직의 초음파 지연시간은 두부조직의 변화에 따라 민감하게 변하며 두부조직의 파손 강도와는 반비례함을 알 수 있어 초음파의 지연시간이 식품조직의 예측에 적용될 수 있음을 알 수 있다. 지연시간을 이용한

Table 1. Comparison of the real and predicted stresses at different processing conditions.

Processing condition	Predicted failure stress (kPa)	Measured failure stress (kPa)	Measured delay time (msec)
Coagulant concentration (%)	0.2	18.30	16.07 ^a (1.04) ^b
	0.3	31.27	33.01 (1.87)
	0.4	26.99	23.08 (3.32)
	0.5	11.78	12.50 (2.00)
Heating temperature (°C)	80	13.46	11.11 (0.87)
	90	25.30	24.21 (1.32)
	95	31.27	33.01 (1.87)
	100	37.52	30.45 (1.59)
Molding pressure (Kg)	3	19.45	19.11 (0.99)
	9	26.89	26.46 (3.30)
	15	31.27	33.01 (1.87)
	21	30.60	36.26 (1.02)

^aThe value is the mean value of 5 times measurements. ^bThe value in parenthesis is the standard deviation.

파손강도의 예측식 응고제 농도, 가열온도, 성형압력 등의 각 처리조건과 지연시간 및 파손강도와의 관계를 요인배치법으로 처리한 후 통계분석용 SAS를 이용하여 중회귀분석을 하였다. 각 지연시간을 종속변수로 하고 각 처리조건을 독립변수로 하여 PROC regression 내의 max. R-square를 사용하여 공정처리 조건에 대한 초음파의 지연시간 예측식을 만들었으며 다시 파손강도를 종속변수로 하고 지연시간과 각 처리조건을 독립변수로 하여 위와 같은 처리방법으로 분석한 결과는 다음과 같다.

$$\text{Failure stress} = A(\text{delay time}) + B(\text{concentration}) + C(\text{temperature}) + D(\text{concentration})^2 + E$$

$$\text{where } A = -0.62 \text{ kPa/msec, } B = 376.25 \text{ kPa, } \\ C = 1.04 \text{ kPa/}^\circ\text{C, } D = -573.15 \text{ kPa, } \\ E = 126.3 \text{ kPa}$$

$$R\text{-square} = 0.8586, \text{ Prob} > F; 0.0043$$

위의 식을 이용하여 얻은 예측 파손강도와 실 측정된 파손강도와 초음파 지연시간과의 관계는 Table 1과 같다. 0.2% 응고제 농도의 경우 예측파손강도가 18.30 kPa 실측정 파손강도가 16.07 kPa이었고 0.3% 경우 31.27 kPa과 26.99 kPa이었고 0.4% 경우 26.99 kPa과 23.08 kPa이었고 0.5% 경우 11.78 kPa과 12.50 kPa로 예측파손강도와 실측정 파손강도와는 일치성을 보였다. 또한 각 조건별 파손강도의 경향과 초음파의 지연시간의 경향은 반비례함을 알 수 있었다. 따라서 위 표에서 볼 수 있듯이 초음파의 지연시간과 같은 비파괴적인 방법을 이용하여 두부 가공공정에 따른 조직의 변화를 예측함

으로써 물에 잠긴 상태로 포장되는 두부는 초음파의 측정이 쉬운 형태여서 앞으로 대량생산시 품질관리 및 품질유지에 많은 이용이 기대되어 진다.

감사의 글

본 연구는 현장애로사항의 지원비에 의하여 수행된 일부로서 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 최서규 (1989) 두부 제품에 있어서의 당면과제. 한국콩연구회지 **1**, 5-9.
2. Saio, K. (1979) Tofu-relationship between texture and fine structure. *Cereal Food World* **24**, 342-348.
3. Hashizume, K., M. Maeda, and T. Watanabe (1978) Relationship of heating and cooling condition to hardness of tofu. *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi* **25**, 387-391.
4. Chung, R. A., J. Y. Lu, and E. Chrier (1980) Use of calcium salts for soybean curd preparation. *J. Food Sci.* **45**, 32-34.
5. 문수재, 손영희, 김영희 (1979) 각종 응고제에 따른 두부의 texture 특성에 관한 연구. 대한가정학회지 **17**, 11-19.
6. 변진원, 김현숙, 박찬경, 황인경 (1991) 응고제의 함량과 첨가물질이 두부의 특성에 미치는 영향. 한국식품과학회지 **8**, 15-23.
7. 이명환, 안혜숙 (1983) 두부 제조시 응고제 및 성형압력이 미치는 영향. 서울여자대학 논문집 제 12호, 345-359.
8. 박선호 (1993) 초음파의 개요. 전자과학 **1**, 202-232.
9. Miles, C. A., G. A. J. Fursey, and R. C. D. Jones (1985) Ultrasonic estimation of solid/liquid ratio in fats, oils and adipose tissue. *J. Sci. Food Agri.* **36**, 215-228.
10. Nasoni, R. L., T. Bowen, W. G. Connor and R. R. Sholes (1979) *In vivo* temperature dependence of ultrasound speed in tissue and its application to non-invasive temperature monitoring. *Ultrasonic Imaging* **1**, 34-42.
11. McMaster, T. J., A. Senouci, A. C. Smith and P. Richmond (1990) The use of ultrasonic probes for the monitoring of food extrusion system. In 'Automatic Control and Optimization of Food Process.' Ed. Renard, M. and J. J. Bimbenet, Elsevier App. Sci. 17-30.
12. 윤원병, 김병용, 김명환 (1993) 초음파를 이용한 단백질 식품질의 물성변화의 예측에 관한 연구. 한국식품과학회지 **25**, 632-636.
13. SAS (1992) 'User's Guide Statics', SAS Institute, Inc., USA, 223-259.
14. 고순남, 김우정 (1992) 분리대두단백두부의 물리적 속성에 미치는 응고온도 및 응고제의 영향. 식품과학회지 **24**, 154-160.
15. Kinsella, J. E. (1976) Functional properties of proteins in foods. A survey. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **7**, 219-280.
16. Lee, C. H. and C. K. Rha (1978) Microstructure of soybean protein aggregate and its relation to the physical and texture properties of the curd. *J. Food Sci.* **43**, 79-83.

Prediction of the Failure Stress of Tofu Texture Using a Delay Time of Ultrasonic Wave

Hak-Jung Kim¹, Byung-Yong Kim^{1*} and Young-Tae Hahm², (¹*Department of Food Processing, Kyung Hee University;*
²*Department of Biological Engineering, Chung-Ang University, Korea*)

Abstract : Changes in the physical properties of soybean curd upon the processing conditions such as coagulant concentration, heating temperature and molding pressure were determined by using a failure stress and residual delay time of ultrasonic wave(5 MHz). Maximum failure stress of Tofu was obtained at the 0.3% CaCl₂ coagulant concentration, 95°C heating temperature and greater molding pressure, respectively, whereas the delay time is inverse proportion to the failure stress value. The results of the multiple regression analysis with factorial design showed that the model equation consisted with delay time and processing conditions gave the good prediction of the Tofu failure stress.

*Corresponding author