

식물 씨앗의 착유과정에 있어서 초음파의 적용

Application of Ultrasonic Wave to the Squeezing Process From the Seeds

김 정 순*, 이 회 옥**, 김 무 준**, 하 강 렬**

(Jung-Soon Kim*, Hui-Uk Lee**, Moo-Joon Kim**, and Kang-Lyeol Ha**)

*동명대학교, **부경대학교

(접수일자: 2009년 12월 1일; 수정일자: 2010년 1월 18일; 채택일자: 2010년 1월 28일)

본 연구에서는 식물의 씨로부터 착유하는 기존의 착유방법에 있어서 착유 효율의 한계를 개선하기 위하여 초음파를 이용한 부가 에너지의 적용 가능성을 실험적으로 확인 하였다. 그 결과, 기존의 압착방식에 의한 착유 방식에 란주반형 트랜스듀서로부터 방사되는 초음파 진동에 의한 압력을 부가함으로써 기존의 단순압착 방식의 착유효율이 15 %인 경우 25 %로 증가하여 적지 않은 효율의 증가를 보였다. 초음파에 의한 부가 압력을 해석하기 위하여 착유시료의 음향임피던스 및 초음파 트랜스듀서의 진동속도를 측정하여 방사되는 초음파의 음압진폭을 구한 결과 단순압착 정압의 약 2.8 %에 불과했으나 초음파 주기에 따른 압력의 변화는 착유효율증가에 매우 효율적임을 확인할 수 있었다.

핵심용어: 초음파 트랜스듀서, 착유효율, 압착, 진동속도, 음향임피던스

투고분야: 초음파 및 탄성파분야 (4.3)

To improve the limit of efficiency of squeezing oil in a conventional method, which seeds are compressed simply, the adoptability of the additional energy by the ultrasonic wave was investigated experimentally. As the results, using the ultrasonic vibration from the Langevin-type transducer, the efficiency was increased up to 25 %, whereas the conventional method has 15 % efficiency. To investigate the additional pressure by the ultrasonic wave, the acoustic impedance of the sample and the vibration velocity of the transducer were measured. Although the amplitude of the ultrasonic is about 2.8 % of the compression pressure, the efficiency is increased a lot as mentioned above because the pressure is changed according to ultrasonic period.

Keywords: Ultrasonic Transducer, Squeezing Efficiency, Compression, Vibration Velocity, Acoustic Impedance

ASK subject classification: Ultrasonic and Elastic Waves (4.3)

I. 서론

최근 참살이 (웰빙)식품에 대한 관심이 증가됨에 따라 식물로부터의 착유(搾油) 혹은 착즙(搾汁)의 기술에 대한 관심이 집중되고 있다. 일반적으로 식물의 씨앗으로부터 기름 혹은 액즙을 얻기 위해서는 열을 가하여 표피 및 세포막의 수분을 제거함으로써 가압(加壓)시 취성 파괴(脆性破壞)가 쉽게 일어나게 하여 내부의 액즙을 용이하게 얻어내고 있다 [1]. 그러나 이 과정에서 가열된 씨앗은 조직의 변화 및 성분변화를 야기할 수 있다. 가열하지 않은 씨앗에 대하여 분쇄 및 단순 압출식 착유방법으로는

섬유질에 포함된 수분과 점성에 의해 내부의 액즙 및 유액이 용이하게 추출되기 어려워 착유효율이 매우 떨어지게 된다. 본 연구에서는 이러한 비가열식 압출방법의 한계를 개선하기 위하여 초음파를 이용한 부가 에너지의 적용가능성을 실험적으로 조사하였다.

II. 초음파에 의한 부가 압력

시판되고 있는 착유장치 (녹즙기 등)에 의한 식물의 씨앗으로부터 착유되는 과정은 분쇄 및 압출의 과정으로 이루어지는 것이 일반적이다. 1차 분쇄된 식물의 씨앗은 쌍으로 이루어진 기어 사이에서 압착과 진행과정을 거쳐 금속 그물에 의해 착유된다. 이 과정 중 압착의 과정에 가해지는 기계적인 압력의 크기는 한계가 있어 초음파에

책임저자: 김 무 준 (kimmj@pknu.ac.kr)
608-737 부산시 남구 대연3동 599-1
부경대학교 자연과학대학 물리학과
(TEL: 051-629-5572; FAX: 051-629-5549)

의한 반복적인 압력을 부가하여 착유효과를 개선할 수 있다. 즉, 압착과정에서의 기계적인 정압의 크기를 p_0 라 두고 초음파 음압의 진폭을 p_s 라 두면 피착유 매질에 가해지는 총 압력은 다음과 같이 된다.

$$p_t = p_0 + p_s e^{j\omega t} \quad (1)$$

여기서 t 는 시간, ω 는 각속도로, 초음파 트랜스듀서의 구동주파수를 f 라 할 때 $2\pi f$ 로 주어진다. 이 관계는 트랜스듀서의 진동면에 있어서의 입자진동속도로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다 [2].

$$v_t = p_0 + Z_s u_s e^{j\omega t} \quad (2)$$

단, 여기서 Z_s 는 착유매질의 음속을 c_s , 밀도를 ρ_s 라 두었을 때 특성 음향임피던스로, $Z_s = \rho_s c_s$ 로 나타낼 수 있다. 또 u_s 는 진동속도의 진폭이다. 일반적으로 란주뱅형 (Langevin type)의 초음파 트랜스듀서는 착유매질의 음향임피던스에 비해 충분히 큰 음향임피던스를 갖는 금속의 헤드메스 (Head mass)를 갖기 때문에 진동속도는 매질에 영향을 받지 않고 일정하다고 볼 수 있다. 즉, 공기 중에서 진동할 때의 진동속도 진폭을 u_0 라 두면 $u_s \approx u_0$ 이다.

III. 실험

3.1. 착유장치의 구성

착유작용에 있어서 초음파의 부가압력이 미치는 영향을 확인하기 위하여 그림 1과 같은 착유장치를 제작하였다. 나사의 회전에 의해 진행되는 금속 피스톤은 금속 원통형 그물망내부에 착유를 위해 1차 단순 분쇄된 시료를 압착하게 된다. 압착된 시료로부터 나온 액즙 및 유액은 금속 원통형 그물망의 그물눈을 통하여 착유된다.

3.2. 진동속도측정

착유기의 착유과정에서 초음파 트랜스듀서에 의한 부가 압력을 산출하기 위하여 레이저 도플러 진동속도 측정기를 사용하여 트랜스듀서 방사면의 진동진폭을 측정한다. 레이저도플러진동속도계 (Graphlec AT3500)의 레이저 유닛과 초음파 트랜스듀서의 방사 면과의 거리가 약 0.5 m가 되도록 설치하고 착유시의 가진 조건과 동일하

게 신호발생기 (Function generator 33220A, Agilent)의 진동수 및 파형의 진폭 그리고 증폭기 (High speed bipolar amplifier HSA4014, nf corporation)의 증폭률을 설정한다. 초음파 트랜스듀서에 인가하는 전압 및 전류가 각각 70 Vrms, 100 mA 이며 주파수가 29.2 kHz일 때 초음파 트랜스듀서의 진동표면의 진동속도 진폭은 0.096 m/s로 나타났다.

압착된 시료의 음향임피던스를 Z_s 라 두면 초음파에 의한 부가 압력의 진폭은 위의 식 (2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p = Z_s u_s = 0.096 Z_s \quad (3)$$

3.3. 압착매질의 음향임피던스 측정

음향임피던스의 측정을 위하여 다음의 관계를 이용한다. 압전진동자의 동 어드미턴스 Y_m 과 기계임피던스 z 와의 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$$Y_m = \frac{A^2}{z} = \frac{A^2}{z_0 + z_x} \quad (4)$$

단, A 는 진동면을 부하매질에 접촉시켰을 때의 역계수이고 z_0 는 진동자 자체의 기계임피던스, z_x 는 진동면에서 부하매질의 기계임피던스 즉, 방사임피던스이다 [3]. 따라서 방사임피던스의 저항성분을 r_x , 리액턴스성분을 jx_x 라고 두면

$$z_x = r_x + jx_x \quad (5)$$

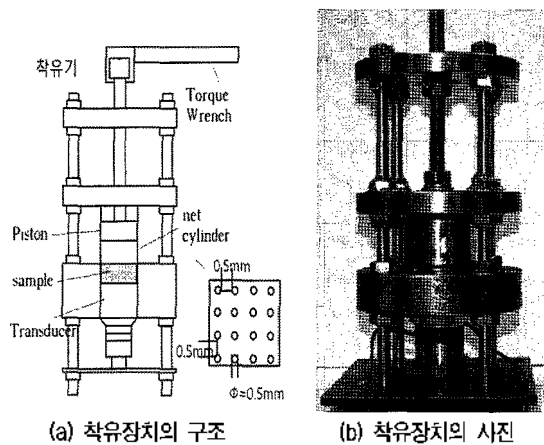


그림 1 착유장치의 구성도
Fig. 1. Construction of the squeezing oil device.

이다. 또 z_0 는 공진주파수 부근에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$z_0 = r_0 + j\omega m_0 + \frac{s_0}{j\omega} \quad (6)$$

여기서 r_0 는 진동자의 내부손실, m_0 는 등가질량, s_0 는 등가 스티프네스이다.

진동면에 기지의 임피던스로서 m_0 에 비해 매우 작은 질량 m_k 를 부착하였을 경우 m_k 에 의해 생긴 공진주파수의 변화분을 Δf_k 라 하면 m_0 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_0 = \frac{m_k f_0}{2 \Delta f_k} \quad (7)$$

또한 r_0 와 m_0 와는 다음의 관계를 갖고 있다.

$$r_0 = \frac{2\pi f_0 m_0}{Q_0} \quad (8)$$

진동면을 부하매질에 접촉시켰을 때 부하매질에 의한 공진주파수의 변화분을 $f_0 - \Delta f_x$ 라 하면 이때의 기계적 품질계수 Q_x 는 다음 식으로 나타낼 수 있다 [4].

$$Q_x = \frac{2\pi f_0 m_0 + x_x}{r_0 + r_x} \approx \frac{2\pi f_0 m_0}{r_0 + r_x} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)로부터

$$\frac{r_0 + r_x}{r_0} = \frac{Z_{m0}}{Z_{mx}} = \frac{Q_0}{Q_x} \quad (10)$$

가 되어 음향저항 r_x 가 구해지고

$$\frac{x_x}{\omega} = 2m_0 \frac{\Delta f_x}{f_0} = \frac{\Delta f_x}{\Delta f_k} m_k \quad (11)$$

에 의해 음향 리액턴스 jx_x 가 구해진다.

이상으로부터 압착된 시료의 음향임피던스를 구하기 위하여 트랜스듀서의 공기중에서의 입력어드미턴스와 방사면에 부착한 부가 질량으로 $m_k = 1$ g의 분동을 접촉한 경우의 입력 어드미턴스를 각각 측정하여 그림 2에

나타내었다.

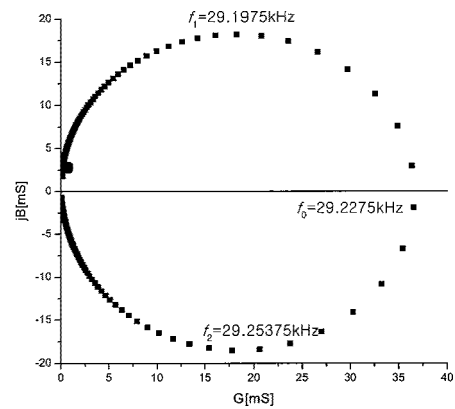
그림 2의 결과로부터 식 (7) 및 (8)의 관계를 이용하여 유효질량 m_0 및 진동자의 기계적 내부 저항 r_0 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$m_0 = 0.1771, \quad r_0 = 62.5923$$

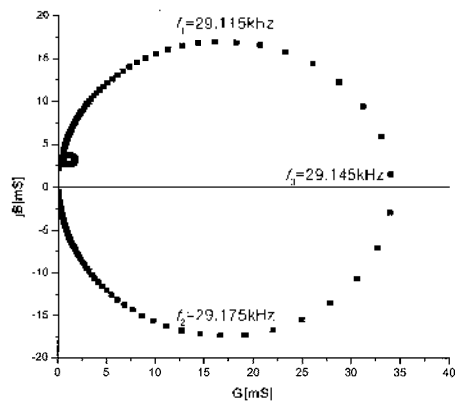
압착된 시료를 음향임피던스로 하였을 때의 어드미턴스 로커스는 그림 3과 같이 측정되었다.

그림 3의 결과와 식 (10)의 관계로부터 압착된 시료의 음향임피던스는 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$Z_s = \frac{r_x}{S} = 2.042 \times 10^6 \quad (12)$$



(a) 공기중에서의 어드미턴스 로커스



(b) 부가질량을 접착한 상태에서의 어드미턴스 로커스

그림 2. 부가질량에 따른 어드미턴스 로커스의 변화
Fig. 2. Admittance locus change by mass loading.
(a) Admittance locus with air load,
(b) Admittance locus with mass loading.

여기서 S 는 트랜스듀서의 방사면적으로 $2148.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 이고 음향임피던스는 실수부인 음향 저항만을 고려하였다.

3.4. 회전력의 압력으로서의 변환

본 연구에서는 스트레인 게이지 (Strain gauge)를 사용하여 회전력에 의한 압력을 정량화 하였다 [5]. 120 Ω의 스트레인 게이지소자를 두께 3.4 mm, 직경 40 mm인 베이클라이트 판에 접착하여 고정하고 같은 크기의 베이클라이트 판을 덮어 에폭시 접착제로 접착하였다. 이렇게 만든 압력센서를 그림 4에 나타낸 휘스톤브리지 회로에 연결하였다. 또한 압력에 의한 스트레인 게이지의 굴곡변위를 생성시키기 위하여 속이 빈 알루미늄 원통 위에 압력센서를 놓고 중앙부가 돌출되어 있는 덮개를 올려놓아 상부에서의 수직 압력을 압력센서의 굴곡변형으로 바꾸어 주게 한다. 이와 같은 압력센서, 알루미늄원통 그리고 돌출부가 있는 덮개를 하나의 조합으로 변형-압력변

환기라 부르기로 한다. 이 변형-압력 변환기를 그림 5에 나타낸 것과 같이 착유기의 시료대신에 장착하고 회전력에 의한 압력을 측정한다. 착유기의 회전손잡이에 토크렌치 (Torque Wrench, 3/8" DRIVE 2.8~22.0 Nm, TORQUEWORLD)를 부착하고 회전력을 증가시켜가며 이때 나타나는 휘스톤브리지 회로의 전류계를 읽어 변형에 의한 전류의 변화를 측정한다. 이 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 결과를 보면 토크렌치에 의해 가해진 회전력의 변화에 따라 휘스톤브리지의 전류는 선형적으로 증가함을 나타내고 있으며 이는 회전력에 의한 압력센서부의 스트레인 게이지의 변형도 증가함을 알 수 있다. 그리고 전류변화와 직접적인 압력변화와의 상관관계를 알아보기 위하여 압력계를 이용하여 압력의 변화에 따른 변형의 변화를 측정하였다. 앞서 설명한 변형-압력 변환기를 압력계에 장착하고 압력을 가해가며 휘스톤브리지

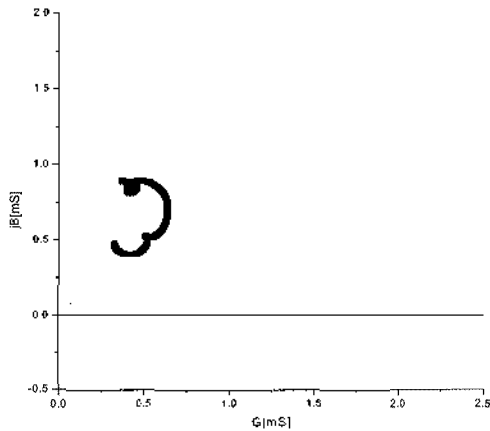


그림 3. 압착된 시료를 음향임피던스로 하였을 때의 어드미턴스 로커스
Fig. 3. Admittance locus with expressed sample.

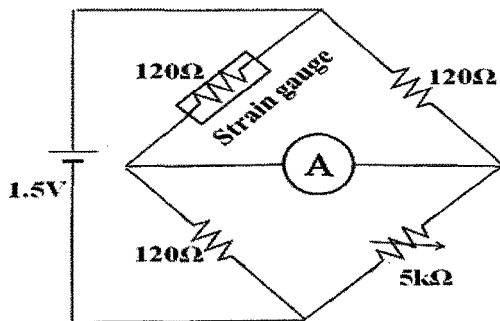


그림 4. 입력측정을 위한 휘스톤브리지 회로
Fig. 4. Wheatstone's bridge circuit for pressure measurement.

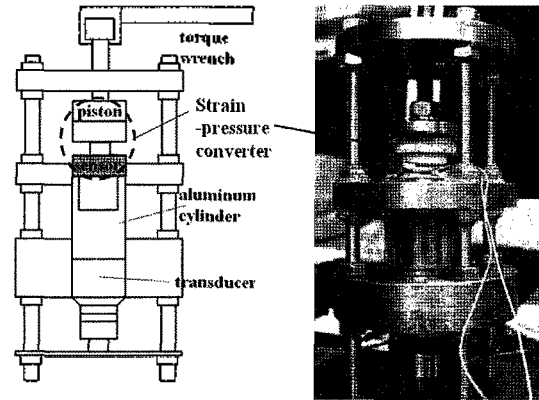


그림 5. 변형-압력변환기를 착유기에 장착한 모습
Fig. 5. Strain-pressure converter in the squeezing device.

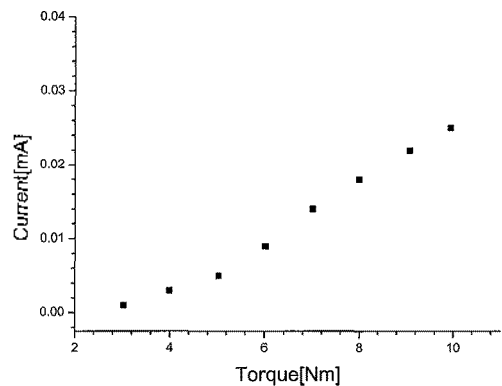


그림 6. 회전력 변화에 의한 휘스톤 브리지 회로의 전류변화
Fig. 6. Current change with torque in Wheatstone's bridge circuit.

의 전류변화를 측정하였다. 이 때 앞서 착유기의 회전력 변화에 따른 전류변화를 기준으로 동일한 전류변화가 나타나도록 하는 압력 변화를 찾는다. 그 측정결과를 그림 7에 나타내었다. 이 결과를 보면 앞서 회전력의 변화에 의해 나타났던 휘스톤브리지 회로의 전류변화를 나타내기 위해서는 0 ~ 1000 lb/in²의 압력변화를 주어야만 된다는 것을 나타내고 있다. 이상의 결과로부터 회전력의 변화에 의한 압력변화로 환산한 결과를 그림 8에 나타내었다. 착유기에 가해주는 회전력의 증가에 따라 압력이 선형적으로 증가함을 확인할 수 있으며 회전력이 약 10 Nm인 경우 가해지는 압력은 약 6.9×10⁶ Pa임을 알 수 있다. 이상의 결과와 상술한 식 (3) 및 식 (12)의 결과를 식 (2)에 적용하여 초음파를 사용한 착유기로부터 착유시료에 가해지는 총 압력을 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_t = 6.9 + 0.196e^{j\omega t} \text{ MPa} \quad (13)$$

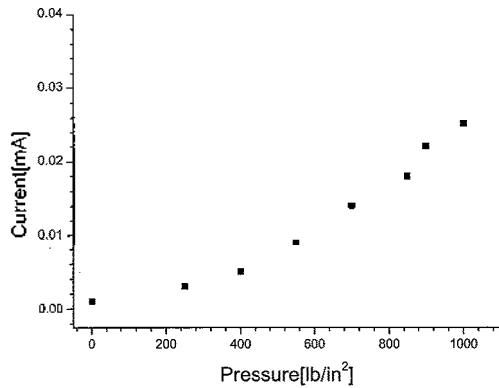


그림 7. 압력 변화에 따른 휘스톤브리지 회로의 전류변화
Fig. 7. Current change with pressure in Wheatstone's bridge circuit.

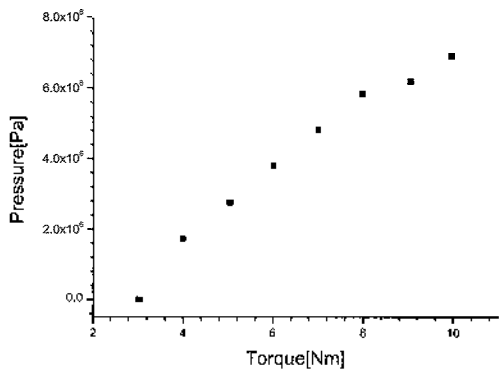


그림 8. 입력변화로 환산된 회전력의 변화
Fig. 8. Relation between pressure and torque.

3.5. 착유결과

본 연구에서는 일차 단순 분쇄된 들깨시료를 이용하여 착유시 초음파의 영향을 정량적으로 평가하였다. 초음파 트랜스듀서의 공진주파수는 29.812 kHz 이었으며 인가 전압 및 전류는 70 Vrms, 100 mA이었다. 초음파를 지속적으로 가하며 매 1분마다 착유기의 실린더를 토크렌치를 이용하여 회전시켜 10 Nm의 회전력을 가하였다. 이 때 시료로부터 액즙이 금속 실린더의 그물망을 통해 배출되며 남은 시료의 질량을 측정한다. 후 초음파 트랜스듀서를 구동하여 남은 시료에 초음파를 3분간 가한다. 이 때 초음파의 부가 압력에 의해 남은 시료는 다시 압착되어 액즙이 배출되고 그 질량은 감소하게 된다. 이러한 초음파 유무에 따른 남은 시료의 질량변화를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 횡축은 착유대상 시료의 질량을 나타내고 있으며 종축은 남은 시료의 질량을 나타내고 있다. 그림으로부터 착유대상 시료의 질량이 많을수록 초음파에 의한 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 초음파의 유무에 따른 착유효율을 나타내면 그림 10과

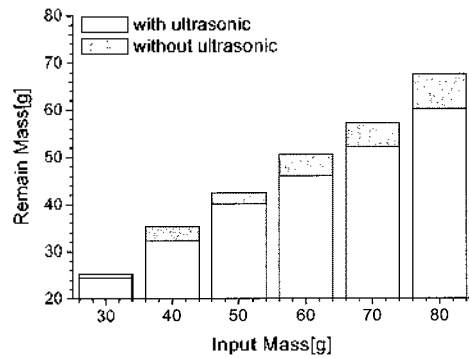


그림 9. 착유기에 입력한 시료의 질량에 대한 착유 후 남은 질량
Fig. 9. Remained mass versus input mass.

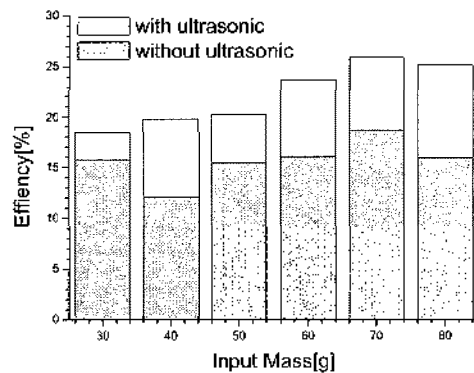


그림 10. 초음파의 유무에 따른 착유 효율의 변화
Fig. 10. Efficiency change by ultrasonic wave.

같다. 즉, 초음파에 의한 효율의 변화는 입력시료의 질량이 60 g 이상이 되면 약 10 % 전후의 효율증가를 기대할 수 있음을 확인할 수 있다. 상술한 식 (13)의 결과에서 회전력에 의해 가해지는 정압에 대하여 초음파에 의해 부가되는 압력의 진폭은 약 2.8 %에 불과하나 이 부가압력의 초음파의 주기에 따른 변화는 착유효율증가에 더욱더 효율적임을 확인 할 수 있다. 이는 압력의 주기적인 변화에 따른 착유매질 입자의 재배열에 의한 효과로 사료되며 향후 과제로 진행할 것이다.

초음파의 조사시간에 따른 착유효과를 확인하기 위하여 입력시료 70 g일 때에 대하여 상술한 조건의 전기입력 신호로 구동하는 초음파 트랜스듀서를 구동하여 초음파의 방사시간을 변화시켜 가며 착유효율을 측정할 결과를 그림 11에 나타내었다. 측정방법으로는 동일한 질량의 시료를 장착하고 토크렌치를 이용하여 착유기에 10 Nm의 회전력을 가하여 착유된 효율을 측정한다. 여기에 초음파를 가하면 부가 착유가 진행되어 10 Nm의 회전력을 가하기 위해서는 다시 토크렌치를 회전하여 피스톤을 진행시켜 주어야 한다. 이러한 과정을 매 1분마다 반복하여 초음파의 조사시간에 따른 잔여 시료의 질량을 측정하여 효율을 산출하였다. 그림 11의 결과를 보면 초음파를 가하지 않은 경우로부터 초음파를 가하는 시간이 증가함에 따라 대수적인 증가를 보이고 있으며 11분 이상의 범위에서는 효율의 증가율은 포화되어 일정한 착유효율을 보이고 있다.

V. 결론

본 연구에서는 식물의 씨앗에서의 착유기술에 있어서 초음파에 의한 영향을 검토하기 위해 시험용 착유기를

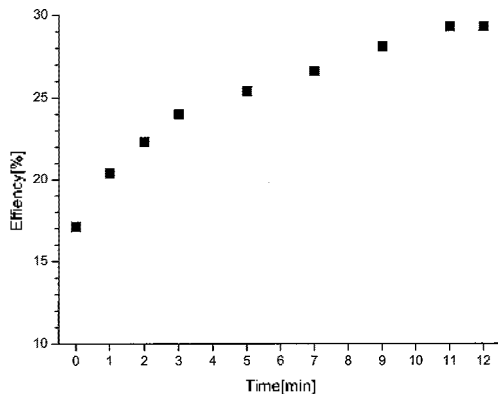


그림 11. 초음파의 조사시간에 따른 착유 효율의 변화
Fig. 11. Squeezing efficiency change with ultrasonic radiation time.

제작하고 이를 이용하여 초음파에 의한 착유 효율의 증가를 정량적으로 조사하였다. 0.196 MPa의 진동압력 진폭을 갖는 란주반형 초음파 트랜스듀서를 착유기에 부착하여 그 효과를 검토하였다. 이때 착유기 만에 의한 기계적 압력은 약 6.9 MPa이었다. 이로부터 얻어진 착유효율은 입력시료의 질량이 30~70 g인 경우에 대하여 최대 27 %의 착유효과를 나타냈었으며 초음파에 의한 효율은 그 중 약 3~10 %임을 알 수 있었다. 이상의 결과로부터 기존의 압착방식에 의한 착유기술에 있어서 초음파에 의한 진동을 부가함에 의해 착유효율의 증대를 기대할 수 있으며 향후 관련 제품 개발에 유익한 기초자료를 제공할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 주식회사 엔젤 및 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2008-313-C00367).

참고 문헌

1. 민용규, 정현상, "온도와 압력이 들깨종자의 압착착유에 미치는 영향," 한국식품기술학회, 제25권, 1호, 28-32쪽, 1993.
2. L. E. Kinsler, Austin R. Frey Alan B. Coppens James V. Sanders, *Fundamental of acoustics*, JohnWiley&Sons, 1980.
3. 이기욱, 김무준, 하강렬, "정방형 트랜스듀서의 방사임피던스에 의한 특성 변화," 한국음향학회 2009년도 추계학술발표대회 논문집 제19권 2호, 265-268쪽, 2004.
4. Adachi, Kazunari, Konno Yuji, Masaki Shingo, "Development of bolt-clamped Langevin-type transducer with high mechanical quality factor for excitation of large torsional vibration," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol 33, no.2, pp.1182-1188, 1994.
5. 이성철, *정밀계측공학*, 동명사, 1985.

저자 약력

•김 정 순 (Jung-Soon Kim)

한국음향학회지 제25권 제3E호 참조

•이 희 옥 (Hui-Uk Lee)

2009년 2월: 부경대학교 물리학과 이학사
~현재: 부경대학교 음향진동공학협동과정 석사1년차
※ 주관심분야: 응용음향

•김 무 준 (Moo-Joon Kim)

한국음향학회지 제25권 제3E호 참조

•하 강 렬 (Kang-Lyeol Ha)

한국음향학회지 제25권 제3E호 참조