

초음파 자극이 현미발아 촉진에 미치는 영향

이 준 임기택 홍지향 이양봉 이종욱 정종훈

Effects of Ultrasound Stimuli on Acceleration of Brown Rice Germination

J. Lee K. T. Lim J. H. Hong Y. B. Lee C. O. Rhee J. H. Chung

Abstract

The effects of ultrasound stimuli on the germination and sprout growth of brown rice were investigated. Ultrasound was applied to brown rice at the frequencies of 28, 40, and 60 kHz before germination test and it was germinated in three methods (Type I, II and III). Type I was to soak brown rice into water for 60 hours. Type II was to expose brown rice to air for 48 hours after soaking them into water for 12 hours. Type III was a repetitive method of water-soaking and air exposure for 12 hours respectively. The most effective method for the germination was Type III without ultrasound. However, Type I was a best method after ultrasound treatment. As power of ultrasound increased, sprouts grew faster after brown rice were treated in 40%, 70%, and 100% power (0.137, 0.241, and 0.344 W/cm²) at 40 kHz. The good treatments for fast sprout growth of brown rice at each frequency were the 28 kHz-10min group, the 40 kHz-5min group, and the 60 kHz-20min group of Type I. The best effective treatment was the 40 kHz-5min group at 0.344 W/cm² and at that condition the time required for sprout growth of 2.5 mm was 51.9 hours. The ultrasound stimuli was very effective in the beginning of the rice germination, and the germination ratio was more than 95% in all ultrasound treatments.

Keywords : Water-soaking, Air-exposure, Ultrasound stimuli, Germination ratio, Sprout length

1. 서론

현미는 과피(pericarp), 종피(seed coat) 및 호분층(aleurone layer)으로 구성된 미강과 배(embryo) 및 배유(endosperm)로 이루어져 있다. 또한 일반적으로 이들의 비율은 미강 5~6%, 배 2~3%, 배유 92% 정도로 구성된다. 현미는 백미에 비하여 지방, 단백질, 비타민 B₁, B₂가 풍부하고 식이 섬유 함량이 약 2배 정도 높으며 칼슘과 철분을 비롯한 각종 무기질의 함유량도 백미보다 높아 건강 보조 식품의 원료로 사용 가능하다. 이와 같이 백미에 비해 현미가 건강에 관심이 많은 현대인들에게 몸에 좋다는 것은 널리 알려진 사실이다(Juliano and Bechtel,

1985; Kim and Cheigh, 1979; 이, 1998; 이, 1999).

현재 발아현미 생산 공정을 단축시키는 적정 발아기술 및 시스템 개발이 필요한 실정이다. 종자의 발아는 종피의 산소투과성, 삼투성, 배의 생리적 불안전 등과 연계된 휴면, 종자의 충실도 등에 영향을 받으므로 이러한 요인들을 타파하기 위한 물리적 처리로서 초음파 자극이 필요하다. 초음파는 석영과 같은 압전성 물질의 판 양면에 크기가 같고 방향이 반대인 전하를 교대로 걸어주어 그 물질이 수축과 팽창을 반복하게 하여 발생한다. 초음파 발진기를 통해 전기적인 신호를 발생시킨 후, 진동자로 보내지고 진동자를 통해 탄성과 관성에 따라 파동을 발생한다. 이러한 초음파를 액체매질 속으로 조사하면 공동화(cavita-

This study was conducted by the research fund supported by Agricultural R&D Promotion Center (ARPC). The article was submitted for publication in July 2006, reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in December 2006. The authors are Jun Lee, Graduate Student, Chonnam National University, Ki Tack Lim, Graduate Student, Ji Hyang Hong, Visiting Researcher, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Yang Bong Lee, Associate Professor, Pukyong National University, Choung Ouk Rhee, Professor, Chonnam National University, and Jong Hoo Chung, Associate Professor, Dept. of Biosystems & Biomaterials Science and Engineering, Seoul National University, Korea. Corresponding author: Jong Hoon Chung, Associate Professor, Dept. of Biosystems & Biomaterials Science and Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea; Tel & Fax: +82-2-880-4601; E-mail: <jchung@snu.ac.kr>.

tion) 로 인해 미세한 공동화기포(cavitation bubble)로 성장하며, 충분히 성장한 기포가 폭발적으로 파열하는 진행과정을 거치게 된다. 그런데 기포가 성장하는 과정에 수용액의 증기가 기포 내로 유입되고 또한 기포 내에 에너지가 축적되어 기포내부의 온도와 압력이 높아진다. 충분히 성장된 기포가 폭발적으로 파열될 때 기포내의 고온고압가스가 순간적으로 방출되면서 충격파를 발생한다. 이와 같은 작용을 이용하여 현미표면의 이물질을 세척하고 발아촉진을 위한 자극을 줄 수 있다(김 등, 2001). 초음파를 세척용으로 이용하기 위해서는 주파수가 15 kHz 이상이 되어야 하지만 40 kHz를 넘어서면 초음파가 대상물을 통과한다. 초음파의 강도는 파의 진행방향에 대하여 직각인 단위 면적을 통하여 전달되는 에너지 율, 즉 초음파 진동체의 단위면적당 전달 일을 말한다. 초음파의 출력을 $P(W)$, 진동체의 면적을 $A(cm^2)$ 라고 하면, 초음파의 강도 $I(W/cm^2)$ 는 진동체의 면적에 대한 출력(P/A)이다.

육과 박(1985)은 한국 자생품란의 뿌리 생장에 미치는 물리적 자극의 효과를 관찰하기 위해서 초음파, 자기장, 전기장, 저주파 전류를 주사하였다. 특히, 25 kHz 고정 주파수의 초음파를 조사시켰을 때 측당 발근율을 3.7개로 약 한달 사이에 급격한 변화를 보이고 있다. 또한 초음파를 장시간 조사시켜도 일정 시간이 경과하면 발근되지 않고 뿌리의 성장속도 역시 계속해서 증가하는 것이 아니라 일정기간에 급성장 하다가 성장 곡선이 완만해 지면서 정지한다고 보고하였다. 초음파 처리한 경우 측당 발근율 및 성장속도가 무처리군에 비해 각각 2.3배 3.0배로 높았다. 김(2001) 등은 초음파를 이용하여 발아효율과 식품학적 가치를 향상시킨 발아현미를 제조하는 방법으로 다음과 같이 보고하였다. 선별된 현미를 흐르는 수돗물에 세척 후 수온이 20±1°C 된 물에 8시간 수침(10~180분 28 kHz 초음파 처리)후 8시간 대기발아의 반복실험을 하였으며 발아제배 24시간이 지난 후 120분 동안 초음파를 처리한 군이 무처리(수침)군보다 발아율이 약 2배 정도 높았다.

Suzuki와 Maekawa(1999) 등에 의하면 액상보다 공기의 기체상태에서의 현미뿌리(유근)발아가 더 빠르고, 액상에서는 뿌리의 발아가 억제되며 현미썩(유아)발현이 더 빠르다. 물의 온도는 약 30°C가 적합하고 용존산소량 3.5~4.5 mg/L이 적합하다고 보고한 바 있다. 이(2001) 등은 수중발아와 대기발아를 최적 조건으로 반복 적용하여 현미를 발아시킴으로써, 유근의 발생이 억제되고 균일한 발아가 가능하다고 하였다.

따라서 본 연구에서는 수중 및 대기의 발아방법에 따라 초음파 자극이 현미발아 촉진과 발아율에 미치는 영향을 구명하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 공시 재료

본 실험에 사용된 현미는 2004년산(품종:동진)으로 전남 장성 진원농협 미곡처리장에서 구입하여 5°C로 유지되는 저온 저장고에 보관하면서 실험하였다. 시료는 배아가 모두 붙어있는 정선된 현미 50립을 사용하였고 현미 함수율은 14±1%(w.b.)이다.

나. 실험 장치

초음파 발생장치(Table 1)를 이용하여 28, 40, 60 kHz에서 현미에 초음파 자극을 주었다. 이때 장치 내 수온은 25°C이었고 80% 까지 증류수를 채워서 사용하였다. 함수율은 함수율 측정기 K305(Kett Electric Laboratory, Tokyo City, Japan)를 이용하여 무작위로 채취한 시료를 3반복 측정하였다. 항온항습기(GCS, Labtech, Co., USA)의 처리 온·습도는 각각 25±1°C 상대습도 80% 이다. 발아된 현미 유아의 길이는 디지털 버니어캘리퍼스(CD-15CD, Mitutoyo Co, Japan)를 사용하여 12시간마다 측정하였다.

다. 실험 방법

1) 초음파 자극실험

초음파 자극이 발아촉진에 미치는 영향을 구명하기 위해서 세 가지 형태(Type I, II, III)의 발아실험을 실시하였다(Fig. 1). Type I은 초음파 자극을 각각 처리 후 60시간 동안 증류수에서 계속 수중발아 하는 방법이고, Type II는 초음파 자극을 각각 처리 후 12시간 동안 증류수에 수중발아 후 48시간 동안 대기 발아 하는 방법이며, Type III는 초음파 자극을 처리 후 12시간 증류수에 침중 후 12시간 대기발아를 하는 수중 및 대기발아의 12시간씩 반복하는 발아 방법으로 초음파도 12시간마다 반복 적용하였다.

가) 28 kHz 초음파 자극

초음파 발생장치(28 kHz, 100 W, SD-200H, Seong dong Co., Korea)를 이용하여 수중에서 현미에 초음파 자극을 주었다. 이때 장치 내 수온은 25°C이었고 80%까지 증류수를 채

Table 1 Specification of the ultrasound stimulus equipment

Model	Cap. Liters	Tank dimension (mm)			Generator power / Frequency	Weight (kg)
		Depth	Length	Width		
SD-200H	3.3 L	100	240	140	100 W/28 kHz	3.5
SD-D250H	6 L	150	290	150	150 W/40 kHz	5.8
Sonic 9420	22 L	150	500	300	400 W/60 kHz	12.5

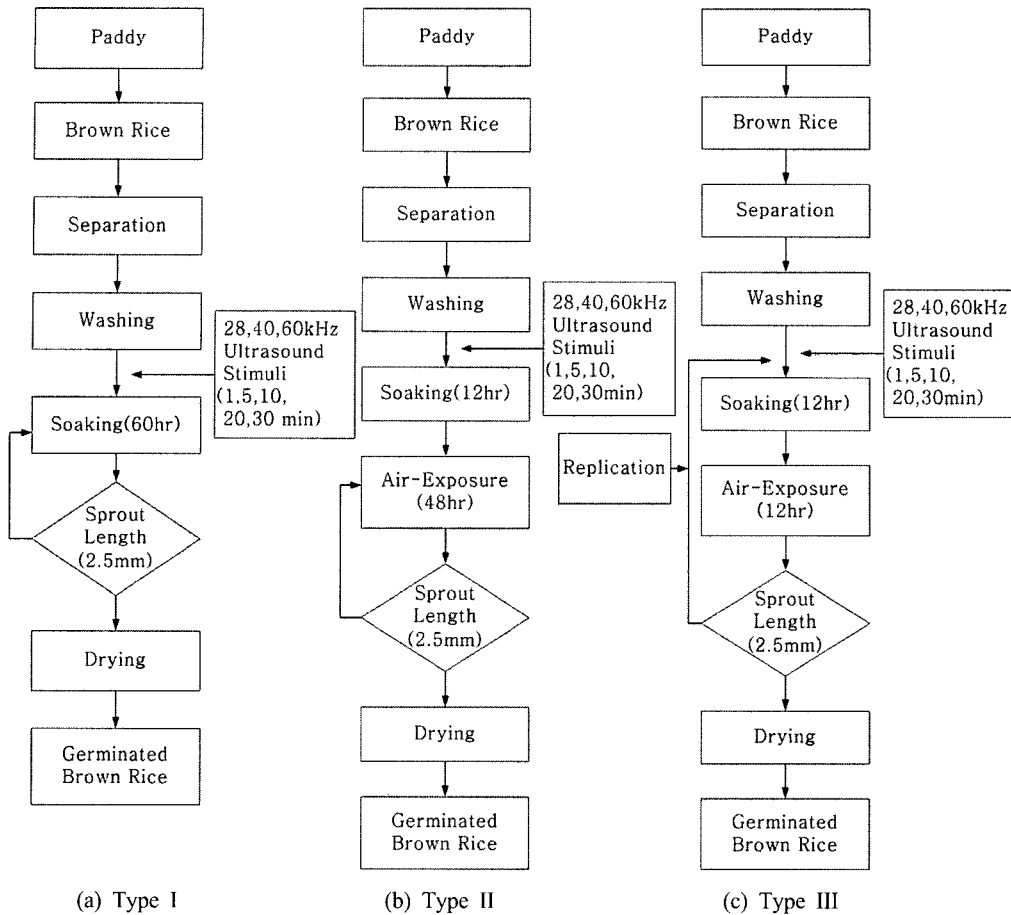


Fig. 1 Flow chart of germination tests of brown rice.

Type I: Soaking in water for 60 hours

Type II: Air-exposure for 48 hours after soaking in water for 12 hours

Type III: Repetitive method with 12hr soaking in water and 12 hr air-exposure

위서 사용하였다. 현미는 장치의 맨 하단부에서 침지시켜 자극을 주었다. 초음파 발생장치는 발진부와 진동부로 구성되어 있고, 진동부에는 2개의 진동자(B.L.T:Bolt Clamped Langevin Transducer)가 부착되어 있다. 진동체의 면적이 336 cm² 출력이 100 W이므로 초음파 강도는 0.297 W/cm²이었다. 또한 25°C 증류수에서 초음파의 진행속도는 약 1500 m/s 이므로 초음파의 파장은 5.3 cm 이었다. 초음파 자극을 1, 5, 10, 20, 30분 처리 후 흡습지가 2장 깔린 페트리디시에 25°C 증류수를 77 g 씩 부어 50립의 현미를 침종시켰다. 침종시킨 현미는 온습도가 25°C, 80%인 항온항습기에 넣어 발아실험을 실시하였다.

나) 40 kHz 초음파 자극

초음파 발생장치(40 kHz, 150 W, SD-D250H, Daihan Co., Korea)를 이용하여 자극을 주었다. 장치 내 수온은 25°C이었고 80%까지 증류수를 채워서 사용하였다. 초음파 발생장치는 발진부와 진동부로 구성되어 있고, 진동부에는 3개의 진동자가 부착되어 있다. 초음파 자극시간은 각각 1, 5, 10, 20, 30분으로

설정하였다. 또한 출력을 40%, 70%, 100%로 3단계로 조절하여 자극을 주었다. 진동체의 면적이 435 cm², 출력이 각각 60, 105, 150 W이므로 초음파 강도는 각각 0.137, 0.241, 0.344 W/cm²이었다. 또한 25°C 증류수에서 초음파의 진행속도는 약 1500 m/s 이므로 초음파의 파장은 3.7 cm 이었다. 초음파 자극 처리 후 발아실험은 28 kHz 초음파 자극에서의 발아방법처럼 하였다.

다) 60 kHz 초음파 자극

초음파 발생장치(60 kHz, 400 W, Sonic9420, Gowon Co., Korea)를 이용하여 자극을 주었다. 이때 장치 내 수온은 25°C이었고 80%까지 증류수를 채워서 사용하였다. 초음파 발생장치는 발진부와 진동부로 구성되어 있고, 진동부에는 8개의 진동자가 부착되어 있다. 초음파 자극시간은 각각 1, 5, 10, 20, 30분으로 하였다. 또한 출력은 각각 약과 강으로 2단계로 조절하여 자극을 주었다. 진동체의 면적이 1500 cm² 출력은 100% 에서 400 W이므로 초음파 강도는 0.266 W/cm²이었다. 또한 25°C 증류

수에서 초음파의 진행속도는 약 1500 m/s이므로 초음파의 파장은 2.5 cm이었다. 초음파 자극 처리 후 발아실험은 28 kHz 초음파 자극에서의 발아방법처럼 하였다.

2) 발아관찰 및 측정

발아시험은 AOSA(Association of Official Seed Analysts, 1993)기준에 의하여 실시했으며, Petri-dish(직경:90 mm, 높이:15 mm)바닥에 여과지(TY2, Advantec Co., Japan)를 2장씩 깔았다. 발아 관찰 및 측정은 종자를 치상 후 60시간동안 하였으며, 발아개체 판정은 싹(sprout, 유아)의 돌출이 육안으로 판별된 것으로 하였다. 최종발아율에 대한 50% 발아에 소요되는 시간(T50)은 Coolbear 등(1984)의 방법으로 계산하였다. 현미의 성장은 현미 50립의 싹 길이를 측정하여 평균값으로 계산하였다. 발아실험은 모든 처리당 3회 반복하였다.

라. 통계처리

현미 발아 촉진에 주는 영향을 구명하기 위해서 시간대별로 각 처리에 따른 성장 길이를 통계 처리하였다. 실험을 통해 측정된 싹의 길이는 SAS(Ver. 8.02, Statistical Analysis System, U.S.A)를 이용하여 통계분석 하였다. 통계분석은 분산분석(ANOVA)를 이용하여 유의성 검증을 하였다. 이때 종속변수는 성장 길이, 발아율 각각의 처리들은 독립변수로 하여 일원분산을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 침지발아(Type I)

1) 28 kHz 초음파 자극

초음파 처리장치를 이용하여 처리 시간에 따른 현미의 발아 및 성장은 그림 2와 같이 나타났다. 각각의 처리 중 28 kHz 초음파와 10분 처리군이 60시간 발아 후 3.75 mm로 가장 빠른 성장률

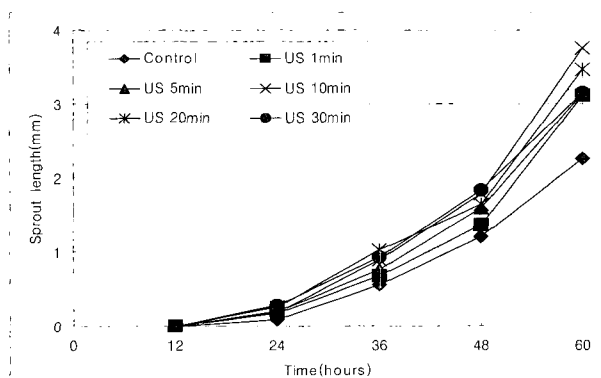


Fig. 2 Effect of 28 kHz ultrasound(US) on the germination of brown rice in Type I.

을 보여 주었다($p < 0.01$). 현미싹 길이 2.5 mm에 도달하는 시간 비율($T_{2.5}$ ratio)은 초음파 자극시간 10, 20, 30, 5, 1분의 처리 순으로 점차 높게 나타났는데, 이는 초음파 자극 10분이 가장 효과적이어서 싹 성장이 빠름을 의미하였다. 따라서 28 kHz 초음파 자극 시 10분간의 처리가 가장 효과적으로 나타났다.

2) 40 kHz 초음파 자극

수중에서 1, 5, 10, 20, 30분 동안 각각 40 kHz 초음파 처리 후 시간과 강도(100%)에 따른 현미의 발아 및 성장은 그림 3과 같이 나타났다. 초음파 강도 40%(0.137 W/cm^2)에서는 60시간 발아 후 초음파 20분 처리군이 2.53 mm 성장하였고, 초음파 강도 70%(0.241 W/cm^2)에서는 10분 처리군이 3.60 mm, 초음파 강도 100%(0.344 W/cm^2)에서는 5분 처리군이 3.84 mm로 초음파 강도가 높을수록 빠른 성장을 보였다($p < 0.01$). 초음파 강도 100%에서 $T_{2.5}$ ratio는 각각 5, 10, 20, 30, 1분 순으로 높은 값을 나타내어, 초음파 5분, 10분 처리군에서 싹 성장이 빨랐다. 모든 초음파 처리군이 무처리에 비하여 발아 촉진 효과가 있음을 관찰할 수 있었다. 이는 적정 시간이상 자극을 주면 곡립 내부온도 상승에 따라 생체조직 손상으로 성장촉진 효과가 줄어드는 것으로 사료되었다.

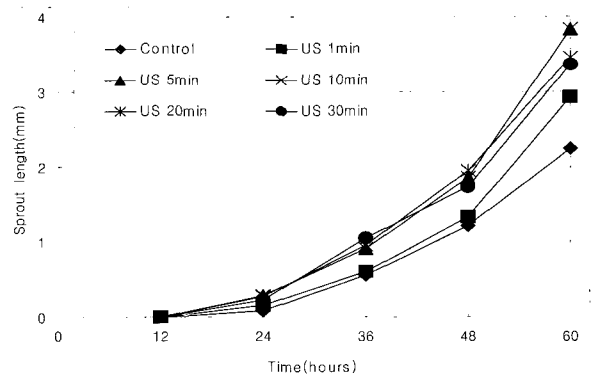


Fig. 3 Effect of 40 kHz ultrasound(US) strength 100% treatment on the germination of brown rice in Type I.

3) 60 kHz 초음파 자극

60 kHz 초음파의 강도를 약과 강으로 두 수준에서 실험해 본 결과 60시간 발아 후에 강도 약에서는 30분 처리군에서 2.90 mm, 강도 100%(Fig. 4)에서는 20분 처리군에서 3.99 mm 성장하여 40 kHz 처리에서처럼 강도가 클수록 빠른 성장을 나타내었다($p < 0.01$). 60 kHz 초음파의 강도 100%에서 $T_{2.5}$ ratio는 각각 30, 1, 20, 10, 5분순으로 나타났다. 즉, 초음파 30분 처리군은 2.5 mm까지의 성장을 비교해 볼 때 대조군에 비하여 발아시간이 1.2배 단축되었고, 다른 처리군도 대조군에 비해서는 발아가 촉진되었다.

초음파 자극이 현미발아 촉진에 미치는 영향

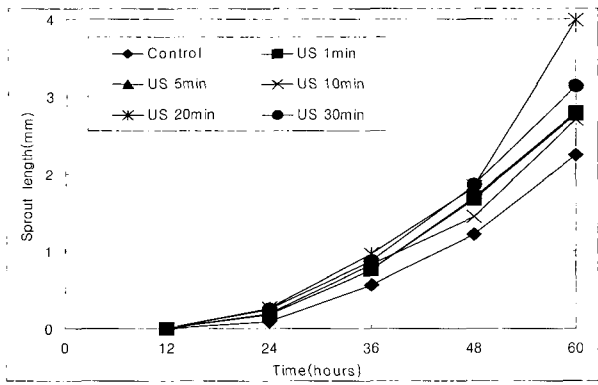


Fig. 4 Effect of 60 kHz ultrasound(US) strength 100% treatment on the germination of brown rice in Type I.

그림 5는 각각의 초음파 자극에 따른 현미의 발아율을 나타낸 그림이다. 초기 24시간 동안의 무처리군의 발아율은 약 40% 인데 그림에서 보는 것과 같이 초음파 처리군에서 발아율이 약 70% 까지 높아지는 것을 알 수 있었다. 60시간후에는 모든 처리군에서 전체적인 발아율은 약 96% 이상을 나타냈다. 그림 6에서처럼 초음파 처리에 따른 현미의 성장 길이를 살펴보면 초음파 28, 40, 60 kHz에서 성장이 제일 빠른 처리는 각각 10, 5,

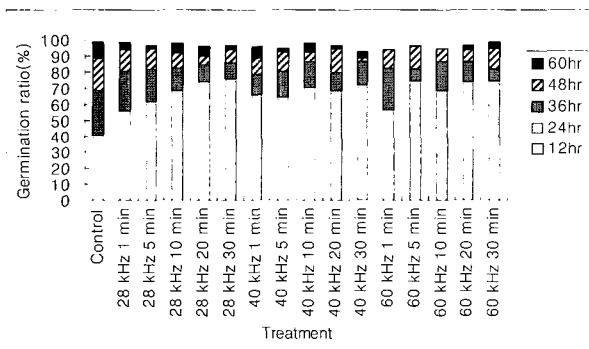


Fig. 5 Effects of 28, 40, 60 kHz ultrasound on the germination ratio of brown rice in Type I.

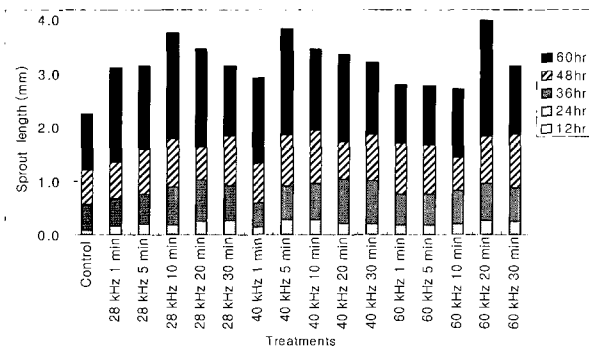


Fig. 6 Effects of 28, 40, 60 kHz ultrasound on the sprout length of brown rice in Type I.

20분 자극을 주었을 때이었다. 특히 초음파 적용 시간 등을 고려할 때 초음파 40 kHz 5분 처리한 실험군이 최적으로 판단되었다. 60시간 발아후 싹 성장 길이는 3.84 mm 이었다. 또한 $T_{2.5}$ ratio가 0.825로 무처리에 비하여 발아시간이 약 1.2배 단축되었다. 초음파 40 kHz 5분 처리하였을 때와 무처리의 시간에 따른 싹의 성장 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$M_{40k-5} = 0.0019t^2 - 0.0563t + 0.4682 \quad (1)$$

$$M_0 = 0.001t^2 - 0.0275t + 0.1758 \quad (2)$$

t: time(hr), M_{40k-5} , M_0 : sprout length(mm)

여기서 M_{40k-5} 는 초음파 40 kHz 5분 처리 후에 60시간 동안 싹의 성장 길이(mm), M_0 는 무처리의 60시간 동안 싹의 성장 길이(mm)에 대한 예측식이다. 예측식 (1)과 (2)의 결정계수는 각각 0.9941과 0.9993이었다.

나. 침지 후 대기발아(Type II)

1) 28 kHz 초음파 자극

침지후 대기발아 방법으로 28 kHz 초음파 자극후 시간에 따른 현미의 발아 및 성장을 분석한 결과(Fig. 7, 8), 시간에 따른 현미 발아율을 비교해 보면 24시간 후 초기 발아율은 무처리군 32%에 비하여 70%까지 높게 상승했다($p < 0.01$). 이는 초음파 자극이 초기 발아율을 상승시켰으며, 싹 성장도 무처리군에 비해 약간의 촉진효과가 있었으나 Type I에 비해 적게 나타났다. 12시간 침지 후 48시간 대기발아 방법(Type II)에서도 초음파 자극이 발아 및 성장촉진에 영향을 줄 수 있었다. $T_{2.5}$ ratio는 각각 20, 5, 30, 10, 무처리, 1분 처리 순서로 점차 높은 값을 나타내어, 20분 초음파 처리에서 가장 싹 성장이 빨랐다.

2) 40 kHz 초음파 자극

40 kHz 초음파 자극이 현미의 발아 및 성장에 미치는 영향을 분석한 결과(Fig. 7, 8), 발아 초기에 무처리군의 32%에 비해 발아율이 약 60%까지 상승하였다. 또한 싹 성장에서도 60시간 경과후 무처리군의 싹 길이 약 2 mm에 비해 초음파 자극군은 약 2.5 mm까지 성장하여 싹 성장 촉진효과도 있었다. $T_{2.5}$ ratio는 각각 30, 20, 10, 1, 5분 처리 순서로 점차 높은 값을 나타내어, 초음파 30분 자극에서 가장 싹 성장이 빨랐다 ($p < 0.05$).

3) 60 kHz 초음파 자극

60 kHz 초음파 자극에서도 초기에 발아율 상승을 가져왔

으며 싹 성장촉진에도 효과가 있었다(그림 7, 8). $T_{2.5}$ ratio는 각각 1, 30, 20, 5, 10분 순으로 점차 높은 값을 나타내어, 초음파 1분 처리에서 가장 성장이 빨랐다. 60 kHz 초음파 자극에서는 초음파 처리시간에 따른 발아와 성장촉진에 대해서는 유의성을 나타내지 못하였다($p < 0.1$). 또한 대기발아실험 48 시간 경과 후부터는 Suzuki 와 Maekawa(1999) 등이 언급한 바와 같이 유근(root)이 출현함을 관찰할 수 있었다.

그림 7은 침지후 대기발아 방법에서 초음파 처리에 따른 현미의 발아율을 나타낸 것이다. 그림에서 초기 24시간 동안의 발아율은 전체적으로 상승하였으며, 특히 28 kHz 처리에서는 초음파 자극시간이 길어질수록 대체적으로 점점 좋아지는 것을 알 수 있었다. 그림 8에서 초음파 처리에 따른 현미의 성장 길이를 살펴보면 초음파 28, 40, 60 kHz에서 성장이 제일 빠른 처리는 각각 20, 30, 1분 자극을 주었을 때이었다. 각각의 처리 중 초음파 60 kHz 1분 처리한 실험군이 2.72 mm로 가장 좋은 성장률을 보였다. 그리고 초음파 60 kHz 1분 처리하였을 때와 무처리의 시간에 따른 싹의 성장 길이는 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

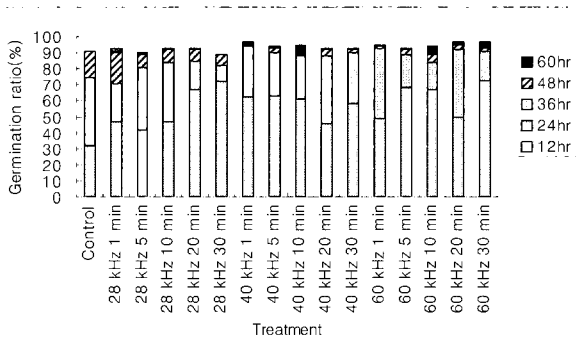


Fig. 7 Effects of 28, 40, 60 kHz ultrasound on the germination ratio of brown rice in the method of air-exposure after soaking, Type II.

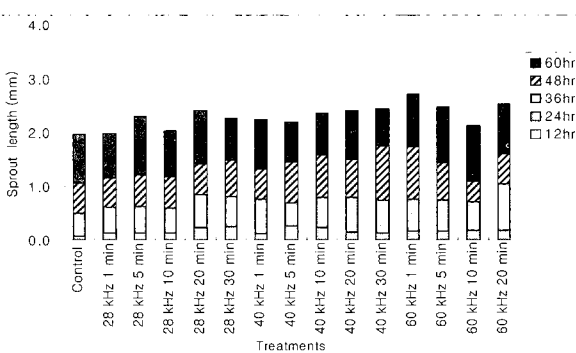


Fig. 8 Effects of 28, 40, 60 kHz ultrasound on the germination length of brown rice in the method of air-exposure after soaking, Type II.

$$M_{60k-1} = 0.001t^2 - 0.0132t - 0.0218 \quad (3)$$

$$M_0 = 0.0009t^2 - 0.0235t + 0.1444 \quad (4)$$

t : time(hr), M_{60k-1} , M_0 : sprout length(mm)

여기서 M_{60k-1} 은 60 kHz 초음파 1분 처리 후에 60시간 동안 싹의 성장 길이(mm), M_0 은 무처리의 60시간 동안 싹 성장 길이(mm)에 대한 예측식이다. 예측식 (3)과 (4)의 결정계수는 각각 0.9964와 0.9988이었다. 결론적으로 Type II에서 초음파의 자극효과는 있었으나 Type I에 비해 적게 나타났다.

다. 침지·대기발아 반복실험(Type III)

1) 28 kHz 초음파 자극

12시간마다 수중에서 1, 5, 10, 20, 30분 초음파처리 후 시간에 따른 현미의 발아율 및 싹 성장을 분석하였다. 그림 9와 10에서 처럼 침지와 대기 발아의 반복처리 발아방법이 무처리 대조군에서 다른 발아방식 Type I과 Type II에 비해 우수하여, 전반적으로 초음파 자극에 따른 초기발아율의 증가와 싹 성장촉진은 상대적으로 미비하게 나타났다. 이는 12시간마다 28 kHz 초음파의 반복처리가 종자에 스트레스를 주어서 발아와 성장의 효과가 없는 것으로 사료되었다. $T_{2.5}$ ratio는 각각 10, 5, 무처리, 1, 20, 30분 처리 순서로 점차 높은 값을 나타내어, 10분 초음파 처리에서 가장 싹 성장이 빠른 것으로 나타났다. 그림 10을 보면 현미 싹 성장은 무처리와 거의 비슷하거나 초음파 자극시간이 20분 이상되면 저하되는 것을 관찰할 수 있었다. 특히 28 kHz 초음파 20분 이상의 반복자극은 60 시간 후 측정 결과 무처리에 비하여 성장을 1.16배(9.4시간) 지연시켰다.

2) 40 kHz 초음파 자극

12시간마다 수중에서 1, 5, 10, 20, 30분 동안 각각 40 kHz

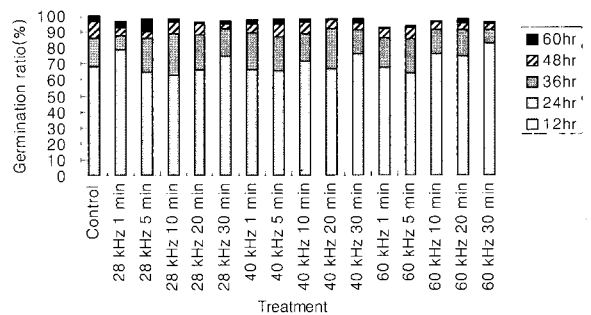


Fig. 9 Effects of 28, 40, 60 kHz ultrasound on the germination ratio of brown rice in the repetitive method of soaking & air-exposure, Type III.

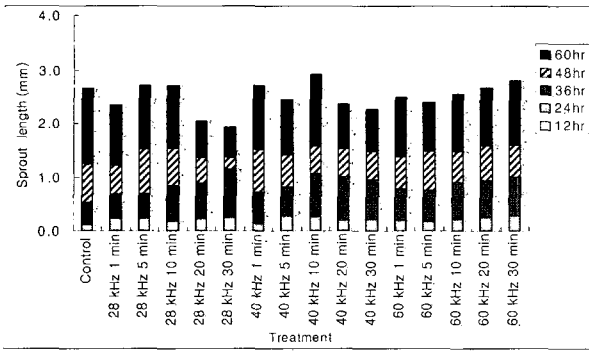


Fig. 10 Effects of 28, 40, 60 kHz ultrasound on the sprout length of brown rice in the repetitive method of soaking & air-exposure, Type III.

초음파를 처리 후 시간에 따른 현미의 발아 및 성장을 분석하였다. 초음파 자극에 의한 발아율의 상승효과는 거의 나타나지 않았다. $T_{2.5}$ ratio는 각각 10, 1, 무처리, 5, 20, 30분 처리 순서로 점차 높은 값을 나타내어, 10분 초음파 자극에서 가장 싹 성장이 빨랐다. 40 kHz 초음파의 반복처리는 종자의 성장에 스트레스를 주어서 발아와 성장을 지연시키는 것으로 사료되었다. 특히 자극 시간이 20분 이상으로 늘어났을 때에는 무처리에 비하여 성장을 약 1.05배(3.2시간) 지연시켰다. 침지 및 대기 발아의 반복적용 방식(Type III)에서 각각의 초음파 자극중 초음파 40 kHz 10분 처리한 실험군이 최종 싹 길이 2.93 mm로 가장 좋은 성장률을 보였다(그림 10). 초음파 40 kHz 30분 처리군은 싹의 길이에 대한 표준편차가 0.58로 가장 작았으므로 균일한 성장을 하였음을 알 수 있었다. 초음파 40 kHz 10분 처리하였을 때와 무처리의 시간에 따른 싹의 성장 길이는 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$M_{40k-10} = 0.0009t^2 - 0.0061t - 0.0599 \quad (5)$$

$$M_0 = 0.0014t^2 - 0.0489t + 0.4128 \quad (6)$$

t: time(hr), M_{40k-10} , M_0 : sprout length(mm)

여기서 M_{40k-10} 은 40 kHz 초음파 10분 처리 후에 60시간 동안 싹 성장 길이(mm), M_0 은 무처리의 60시간 동안 싹 성장 길이(mm)에 대한 예측식이다. 예측식 (5)와 (6)의 결정계수는 각각 0.9882와 0.9966이었다.

3) 60 kHz 초음파 자극

수중에서 1, 5, 10, 20, 30분 동안의 60 kHz 초음파 자극 후 시간에 따른 현미의 발아 및 성장을 분석하였다. 초음파 자극이 24시간후의 초기 발아율에 상승효과를 가져왔으나 싹 성장에는 효과가 거의 없게 나타났다. $T_{2.5}$ ratio는 각각 30,

20, 무처리, 10, 1, 5분 순으로 0.969, 0.99, 1, 1.012, 1.026, 1.048로 나타났다. 이는 무처리와 비슷한 싹 성장을 나타냄을 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 수중 및 대기의 발아방법에 따라 초음파 자극이 현미발아 촉진과 발아율에 미치는 영향을 구명하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같았다.

- 가. 세가지 발아방식 중에서 발아와 싹 성장에 대한 초음파 자극의 효과는 침지발아 방식 Type I에서 매우 유의성이 높았고, Type II에서도 효과적이었으나 Type I에 비해 줄어들었다. 그러나 Type III에서는 그 효과가 발아 초기에는 어느 정도 있었으나 후기에는 미비하여 유의성이 없었다.
- 나. 세 가지 발아방식 중 무처리군만을 비교해 보면 Type III인 침지 및 대기 발아의 반복적용 처리방법이 우수하여 최고 26.2시간 빠른 성장 촉진효과를 나타내었다.
- 다. 초음파 40 kHz 강도별로 40, 70, 100%(0.137, 0.241, 0.344 W/cm²) 처리를 하였을 때 초음파 강도 100% (0.344 W/cm²)일 때 가장 좋은 싹 성장을 나타내어 초음파 강도가 클수록 싹 성장이 좋았다.
- 라. 모든 처리군 중에서 싹 2.5 mm에 소요되는 시간인 $T_{2.5}$ 가 낮은 처리군, 즉 성장이 빠른 처리군은 Type I 처리의 28 kHz 10분, 20분 처리 40 kHz 5, 10분 처리, 60 kHz 20분 처리이었다($p < 0.01$). 이는 현미 싹의 성장에는 초음파 주파수에 비하여 강도가 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 초음파 적용시간 등을 고려할 때 최적 초음파 주파수, 강도, 적용시간은 40 kHz 0.344 W/cm², 5분이었다. 이때 싹의 길이가 2.5 mm까지 성장하는데 소요되는 시간, $T_{2.5}$ 는 51.9시간 이었다.
- 마. 초음파 자극이 발아 초기의 휴면 타파에 효과적이어서 초기에 높은 현미 발아율 상승을 가져왔다. 모든 초음파 처리군에서 약 95% 이상의 좋은 발아율을 보였다.

참 고 문 헌

1. Association of Official Seed Analysts (AOSA). 1993. Rules for testing seeds. J. Seed Technol. 16:1-113.
2. Coolbear, P., A. Francis and D. Grierson. 1984. The effect of low temperature pre-sowing treatment on the germination performance and membrane integrity of artificially aged tomato seeds. J. Exp. Bot. 35:1609-1617.

3. Juliano, B. O. and D. B. Bechtel. 1985. The rice grain and its gross composition. Rice Chemistry and Technology. The American Association of Cereal Chemists. Inc., Minnesota. p.17.
4. Kum, J. S., B. K. Choi, H. Y. Lee, J. D. Park and H. J. Park. 2004. Physicochemical properties of germinated brown rice. Korean J. Food Sci. Technol., Vol. 11(2): 182-188. (In Korean)
5. Kim, S. K. and H. S. Cheigh. 1979. Radial distribution of calcium, phosphorous, iron, thiamine and riboflavin in the degermed brown rice kernel. Korean J. Food Sci. Technol., 11:122-126. (In Korean)
6. Kim S. S. and W. J. Lee. 1997. Characteristics of germinated rice as a potential raw materials for Sikhe production. Korean J. Food Sci. Technol., 29(1):101-106. (In Korean)
7. Oh, S. H. and Y. G. Choi. 2000. Production of the quality germinated brown rices containing high r-aminobutyric acid by the chitosan application. Korean J. Biotechnol. Bioeng. 15: 615-620. (In Korean)
8. Suzuki, K. and T. Maekawa. 1999. Analysis of on sprouting control of brown rice. Japan J. of Soc. of Agri. Struc. Vol. 30 (1):1-10.
9. 김명환. 2001. 현미 발아방법 및 현미 발아장치. 국내공개특허 제 10-2001-0023887.
10. 김일두, 김문식, 남대성, 주명수, 최명환. 2001. 초음파를 이용한 발아현미 제조방법. 국내공개특허 제 2001-0074128.
11. 육근철, 박근영. 1985. 한국 자생풍란의 뿌리 생장에 미치는 물리적 자극의 효과. 월간 난과 생활 11월호-1월호:84-97.
12. 이은용. 1999. 수도작. 향문사.
13. 이창순, 김선영, 임동규. 2001. 발아현미 생산을 위한 공정 및 장치. 국내공개특허 제 10-2001-0025150.
14. 이창호. 1998. 현미의 기능성. 식품기술. 11(1):3-6.