



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

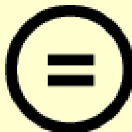
다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

이 학 석 사 학 위 논 문

초음파가 분체 시료의 충전에 미치는 영향 해석



2020년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

심 민 섭

이 학 석 사 학 위 논 문

초음파가 분체 시료의 충전에 미치는 영향 해석

지도교수 김 무 준

이 논문을 이학석사 학위논문으로 제출함.

2020년 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

물 리 학 과

심 민 섭

심민섭의 이학석사 학위논문을 인준함.

2019년 2월 21일



위 원 장 공학박사 하 강 렬 (인)

위 원 이학박사 장 재 원 (인)

위 원 공학박사 김 무 준 (인)

목 차

Abstract	vii
I. 서론	1
II. 시료 높이에 따른 영향	4
II-1. 분체 시료의 높이에 따른 밀도	4
가. 높이에 따른 충전 밀도	4
나. 초음파에 의한 충전 밀도 변화	8
II-2. 실험방법	11
가. 분체 시료	11
나. 초음파 진동의 유무에 따른 충전	12
다. 트랜스듀서의 특성	15
II-3. 결과 및 논의	19
가. 안식각 측정	19
나. 분체 시료의 마찰계수 도출 및 초음파에 의한 충전효과 변화	21
다. 초음파에 의한 음향특성 변화	24
라. 논의	27

III. 정압에 따른 충전율의 변화	28
III-1. 분체 시료의 정압에 따른 밀도	28
III-2. 실험방법	30
III-3. 결과 및 논의	32
가. 충전된 시료의 내부 모습	32
나. 정압에 따른 충전 밀도 및 유효 마찰계수 변화	33
다. 초음파 특성에 의한 음향 특성 변화	36
라. 논의	38
 IV. 수치해석법을 이용한 음향특성 확인	 39
IV-1. 해석 모델	40
IV-2. 음향 특성	42
가. 어드미턴스 특성	42
나. 측정된 음압과의 비교	44
다. 측정된 음향 특성과의 비교	47

V. 분광분석법을 이용한 감마계측	50
V-1. HPGe 검출기	51
V-2. 토양 시료의 방사성 측정	51
V-3. 결과 및 논의	52
 VI. 결론	 54
참고문헌	56



표 목차

표 1. PZT-5H의 물성값	41
표 2. 알루미늄, 철, 아크릴의 물성값	41
표 3. 인가된 정압에 따른 충전된 시료의 밀도 및 음속	45
표 4. 수치해석법을 이용한 충전된 시료의 파장 비교	49



그림 목차

그림 2-1. 원통형 용기에서의 분체 시료	5
그림 2-2. 안식각 측정	7
그림 2-3. 시료의 충전에 있어서 초음파 효과의 모식도 (a) 초음파가 없는 경우, (b) 초음파로 가진한 경우	9
그림 2-4. 토양 시료의 현미경 사진	12
그림 2-5. 초음파를 이용한 충전 및 음향 특성 시스템	13
그림 2-6. 충전 과정	14
그림 2-7. 란쥬반 트랜스듀서의 어드미턴스 특성 (a) 서셉턴스 (b) 컨덕턴스	17
그림 2-8. 매질에 따른 어드미턴스 특성 변화	18
그림 2-9. 안식각 측정을 위한 실험장치	20
그림 2-10. 초음파의 유무에 따른 충전 질량의 변화	21
그림 2-11. 초음파 가진 시 초기높이에 따른 충전 밀도변화.....	25
그림 2-12. 초음파 가진 시 초기높이에 따른 감소율 변화	26
그림 2-13. 초음파 가진 시 초기높이에 따른 음속 변화.....	26
그림 3-1. 초음파 유무에 따른 충전 밀도변화	31
그림 3-2. 충전된 시료 내부모습 (a) 초음파가 없는 경우, (b) 초음파로 가진한 경우	32
그림 3-3. 초음파 가진 시 정압에 따른 충전밀도 변화.....	35
그림 3-4. 유효마찰계수의 감소 효과	35
그림 3-5. 초음파 가진 시 정압에 따른 음속 변화.....	37
그림 3-6. 초음파 가진 시 정압에 따른 수신전압진폭 변화.....	37

그림 4-1. 란쥬반 트랜스듀서의 규격	40
그림 4-2. 란쥬반 트랜스듀서의 어드미턴스 비교	43
그림 4-3. 트랜스듀서에 인가된 입력 신호	45
그림 4-4. 수신 전압진폭과 음압	46
그림 4-5. 수치해석법을 이용한 시료 내부의 음압 분포 가해진 정압 : (위) 0.5 MPa, (아래) 0.9 MPa	48
그림 4-6. 수치해석법을 이용한 정압에 따른 음속 비교	46
그림 5-1. 에너지 준위에 따른 카운트	53



Analysis of ultrasonic effect on compaction of powder sample

Minseop Sim

Department of Physics, The Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

Powder compacting technique using ultrasound has been used in various industrial fields, such as pharmaceutical, metal metallurgy, and environmental radioactive sample preparation. Such powder compacting technique needs to be compacted with sufficient pressure during the manufacturing process of the product for various purpose such as increasing density or increasing durability. Machines for increasing the density by applying pressure, such as a pressing machine or a compaction machine, use ultrasound to increase the compaction rate in the compaction process. Ultrasonic compaction is widely used in various fields such as metallurgy, ceramics and pharmaceuticals. For example, it is known that the compaction with ultrasound in manufacturing process of tablets has brought to increase the relative density of tablets by decreasing the porosity in the tablets and it is utilized increasing the drug efficiency per unit volume or the dissolution time of the drug. However, the theoretical interpretation of the compaction effect by ultrasound is insufficient. Therefore, in this study, we investigate the theoretical and experimental compaction effects in the powder sample using ultrasound by using friction coefficient reduction effect. Furthermore, in order to derive the optimum driving condition, analysis of compaction effect by ultrasonic vibration under various static pressure and initial

height is required. The density of the compacted powder depends on the Janssen equation using the angle of repose and the pressure depends on the effective friction coefficient. If the ultrasound emitted from the transducer is applied to the powder sample, ultrasonic vibration reduces the friction coefficient inside the sample. Reduction of the effective friction coefficient caused by ultrasound leads to the increase of elastic modulus by decreasing porosity in the powder. Therefore, the compaction rate is improved. In order to experimentally confirm the compaction rate by the ultrasonic effect, the sample is compacted using Langevin type ultrasonic transducer, which has a resonant frequency of 28.8 kHz, and an acoustic intensity of 3793 W/m². As a result, the friction coefficient inside of the compacted powder with the ultrasonic vibration of 28.8 kHz decreases by three times compared with that of the compacted sample without ultrasound and the compaction mass increases by about 10%. To find the optimal height using compaction with ultrasound, the acoustic properties of the initial height of the sample are compared. The speed sound according to the initial height of the sample compacted with ultrasound is about 12% faster at 3.5 cm, and the compaction rate according to the initial height is also the largest at about 30% at 3.5 cm. Thus, the optimum height in a given range is 3.5 cm. In addition the optimum static pressure is derived using the reduction of the effective friction coefficient. The reduction of the effective friction coefficient is always greater than 1 within the given static pressure range. Therefore, the friction coefficient of the sample compacted with ultrasound is smaller within the given static pressure range. Also, as the applied static pressure increases, the sound speed and the received voltage amplitude of the compacted sample is larger. This shows that the compaction rate increases as the static pressure increases within the range. We use numerical method to check the inside of the sample and to verify the properties of the sample perfectly homogeneous. The sound speed of the sample, which was assumed to be perfectly uniform using numerical method is 70 ~ 400 m/s larger than the sound speed of the actual sample compacted with ultrasound. In addition, it is

possible to visually check the internal state when the sample was compacted using ultrasound. Also, we can confirm that the compaction rate is high when the powder sample was compacted using ultrasound using numerical method. To validate the suggested method, we actually applied the suggested method to the environmental solid radioactive sample. In the conventional sample compaction method, the sample is compacted according to the force applied by a technician using an acrylic pestle. The density of the compacted sample in the container is thus inhomogeneous. Therefore, the result of radionuclide analysis of the compacted samples by the suggested method is compared with that by the conventional method. The compacted sample put in a high-purity germanium detector (HPGe), and the radionuclides are measured by γ -ray spectroscopy. In the suggested method, the number of counters corresponding to the energy levels of radionuclides increased. This means that there was a high probability of finding radionuclides. In addition, radionuclide Ra-223 can only be detected in the sample compacted with ultrasound. As a result, the suggested method found various radionuclides and increased the probability of finding radionuclides.

I. 서론

분말 상태의 시료를 분말 압축 성형기에 넣고 압축하는 가공법인 분말 압축 성형 기술은 제품의 밀도를 높이거나 내구성을 높이는 등 다양한 사용 목적에 맞추어 사용되고 있다. 제약, 분말 야금, 세라믹, 연료, 환경방사능 샘플 제조와 같이 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 일반적으로 분말 압축 성형 기술은 프레스 머신 또는 컴팩션 머신과 같은 밀도를 높이기 위한 기계들을 사용하며, 충전 과정에서 그 효율을 높이기 위하여 초음파를 이용한 충전 방법이 제안되어 왔다[1]. 다양한 산업 분야에서 초음파를 이용한 분말 압축 성형 기술의 활용을 살펴보면 다음과 같다[2~4]. 약을 정제하는 과정에서 초음파를 이용하여 충전할 경우 정제 내의 공극을 줄여 상대밀도를 증가시키며 단위 부피당 정제의 효율을 높이거나 약물의 분해시간을 높이는 데 활용된다. 그뿐만 아니라 수용 가능한 유효 기간, 용량의 정확성 및 제어 능력을 향상시키는 것으로 알려져 있다[5~9]. 또한, 세라믹 충전에 있어 초음파를 사용하여 충전할 경우 소결시 온도를 낮춘다. 그 결과 결합제가 필요하지 않을 뿐만 아니라 밀도의 변화 없이 분말을 압축할 수 있다[10]. 단일 고체 연료 전지의 경우 초음파 공정을 이용하면 전기적 특성을 향상시키며, 오염물질을 없앨 수 있다[11].

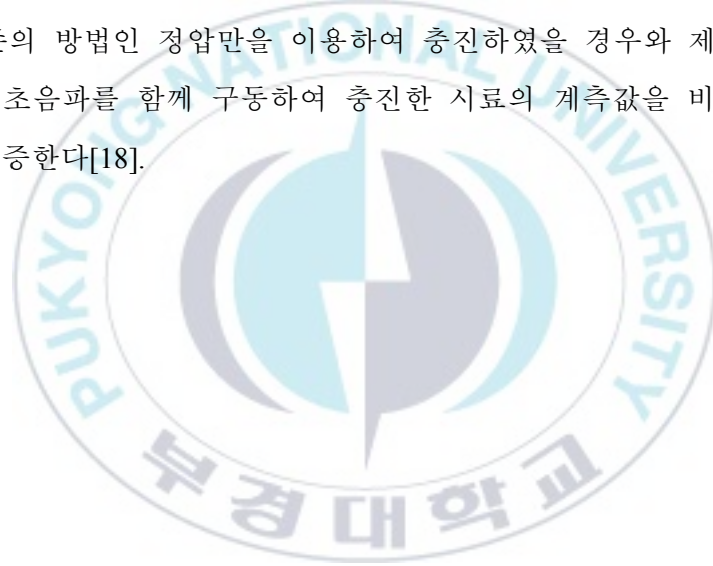
최근 원자의 핵분열에 의해 전기를 생산하는 원자력발전소에 관한 관심이 증가함에 따라 이를 감시하고 확인하는 과정 역시 관심이 날로 증가하고 있다. 따라서 인간에 대한 방사능을 의미하는 환경방사능 시료의 정확한 방사능 측정이 필요하다. 토양, 물, 공기, 돌과 같은 환경방사능 시료 중 토양과 같은 고체 상태의 방사성 시료의 경우, 일반적으로 정해

진 표준용기에 시료를 충전 후, 고순도 저마늄 방사선 검출기 (HPGe, high purity germanium detector) 에 충전된 시료를 두고 측정한다[12]. 하지만 토양과 같은 환경방사능 시료는 HPGe를 통해 검출되는 방사성 핵종의 양이 매우 작다. 따라서 검출되는 방사성 핵종의 양을 늘려 정확한 계측을 위해서는 많은 양의 시료가 필요하다. 즉, 부피가 일정한 정해진 표준용기에 많은 양의 시료를 충전하면 할수록 검출되는 방사성 핵종의 양이 많아져 계측의 정확성이 높아진다. 따라서 환경방사능 시료를 충전할 경우 밀도를 높이는 것이 필요하다[13~14].

이와 같이 초음파를 이용한 분말 시료의 압축 성형 기술은 널리 행하여지고 있다. 하지만 초음파에 의한 충전 효과의 이론적 해석은 충분치 않다. 따라서 본 연구에서는 마찰계수 감소 효과를 이용하여 초음파 효과에 의한 분체 시료 내부의 충전 효과를 이론적으로 알아보며 이를 실험적으로 고찰한다. 더 나아가 초음파를 이용하여 분체 시료를 충전할 경우의 최적 조건을 찾고자 한다. 분체 시료가 용기 내부에 있는 경우 그 응력은 용기 벽면의 영향을 강하게 받는다. 이것은 분체자체의 무게 일부가 마찰계수들에 의한 마찰력에 의해 지지되고 있기 때문이다[15]. 따라서, 분체 시료 내부에서의 압력은 얀센 (Janssen) 방정식을 이용하여 표현할 수 있다. 분체 시료의 경우 시료 내부의 압력은 깊게 내려갈수록 일정한 값으로 수렴한다. 분체 시료의 얀센 방정식을 표현하기 위하여 분체 시료의 안식각으로부터 얀센 계수를 구하여 표현한다. 또한, 초음파를 이용하여 분체 시료를 충전할 경우 얀센방정식의 마찰계수가 감소하여 시료 내부의 압력이 달라지므로 초음파에 의해 감소되는 마찰계수를 측정하여 충전되는 질량과의 관계를 알아본다[16~17].

초음파를 이용하여 분체 시료를 충전할 경우 충전 효율이 가장 높은 최적의 조건을 찾는 것이 필요하다. 이를 확인하기 위하여 시료의 높이

를 바꾸어보거나 인가되는 정압을 바꾸어가며 충전된 시료의 충전율과 음향 특성을 해석한다. 또한, 실제 실험을 통해서도 시료 내부의 특성 변화를 확인할 수 없고 충전된 시료의 내부가 완벽하게 균일하다고 할 수 없다. 따라서 수치해석법을 이용하여 완벽하게 균일하다고 가정한 시료와 실제로 충전한 시료의 차이를 시료 내부의 음속을 통하여 확인한다. 또한, 초음파에 의해 충전된 시료의 내부모습을 시각적으로 확인하여 파장의 변화를 알아본다. 더 나아가 본 연구에서 제안한 방법의 활용 중 하나로 환경방사능 시료를 실제로 계측하여 초음파의 효과를 확인한다. 기존의 방법인 정압만을 이용하여 충전하였을 경우와 제안된 방법인 정압과 초음파를 함께 구동하여 충전한 시료의 계측값을 비교하여 활용성을 검증한다[18].



II. 시료 높이에 따른 영향

II-1. 분체 시료의 높이에 따른 밀도

프레싱 머신 (pressing machine) 또는 컴팩션 머신 (compaction machine) 과 같이 밀도를 높이기 위한 기계들은 충진 과정에서 충진 효율을 높이기 위하여 초음파를 이용한다[19~21]. 초음파를 사용하여 충진할 경우 시료의 마찰계수가 감소하여 충진 효율이 향상하기 때문이다[22]. 하지만 초음파의 효과에 의해 감소하는 분체 시료의 마찰계수에 대한 이론적 해석은 충분치 않다. 따라서 본 연구에서는 초음파의 효과에 의한 분체 시료 내부의 마찰계수 감소 효과의 이론적인 모델에 대해 제안하고, 이를 실험적으로 고찰한다. 또한, 초음파를 이용하여 시료를 충진할 경우 최적의 높이를 알아본다.

가. 높이에 따른 충진 밀도

원통형 용기에 들어있는 분체 시료는 그림 2-1과 같이 표현할 수 있다. 분체층이 용기 내부에 있는 경우 그 응력은 용기 벽면의 영향을 강하게 받는다. 액체의 경우는 깊이에 비례하여 압력이 증가하는 반면, 분체의 경우는 깊게 내려갈수록 일정한 값에 도달하게 된다. 이는 분체 자체의 무게 일부가 용기 벽과의 마찰력에 의해 지지되고 있기 때문이다. 시료에 작용하는 마찰계수들의 합을 μ_e , 원통형 용기의 직경을 D_T , 분체 시료의 높이를 H 로 둔다면 임의의 높이 h 에서의 입자가 받는 압력은 안센 방정식으로 다음 식과 같이 표현할 수 있다[23].

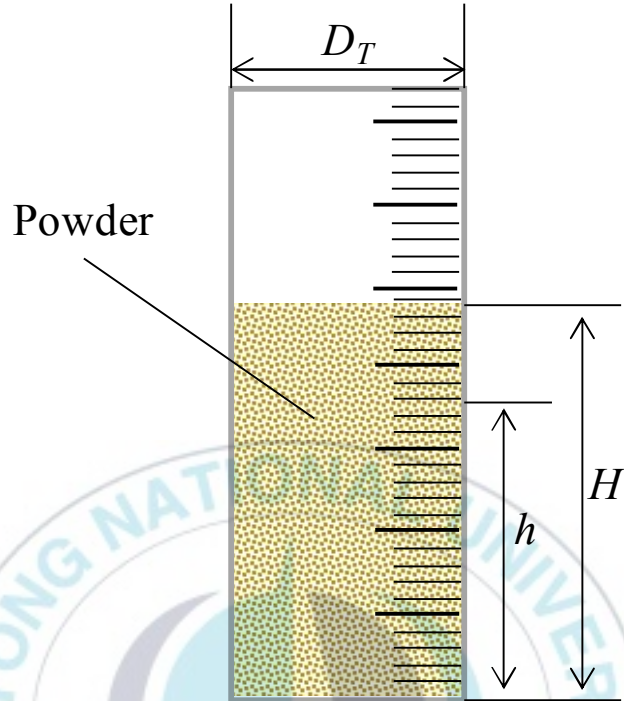


그림 2-1. 원통형 용기에서의 분체 시험

$$P_v = \frac{\rho_B g D_T}{4\mu_c K_a} \left(1 - e^{-\frac{4\mu_c K_a}{D_T}(H-h)} \right). \quad (2-1)$$

이 때, ρ_B 는 입자의 체적밀도 (bulk density), g 는 중력 가속도 그리고 K_a 는 얽힘 계수이다. 얽힘 계수 K_a 는 분체압 계수를 의미하여 다음 식을 이용하여 안식각을 통해 구할 수 있다[24].

$$K_a = \frac{1 - \sin\Theta_r}{1 + \sin\Theta_r}. \quad (2-2)$$

여기서, θ_r 은 안식각 또는 내부마찰각을 의미한다. 안식각 θ_r 을 구하기 위해 그림 2-2와 같이 깔때기 (funnel) 를 이용한다. 주위에서 흔히 구할 수 있는 분체 시료인 토양 시료를 분쇄기와 건조기를 이용하여 부드럽고 균일하게 만든 후 깔때기에 붓는다. 깔때기에서 토양 시료를 평면으로 부드럽게 흘러내리게 되면 토양은 그림과 같이 원뿔 모양으로 퇴적하게 된다. 이 원뿔 모양의 평면과 퇴적층이 이루는 각 θ_r 을 안식각이라고 부른다. 따라서, 실제로 안식각을 측정하여 토양 시료의 안센 계수 K_a 를 구할 수 있다.

임의의 높이 h 에 따라 시료가 받는 압력이 달라짐을 식 (2-1)의 안센 방정식을 통해 확인하였다. 이를 통해 시료의 수직밀도 변화 역시 높이에 따라 달라짐을 알 수 있는데 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta\rho_h = \rho_B e^{-\frac{4\mu_c K_a}{D_r}(H-h)} \quad (2-3)$$

이를 통해 전체 밀도분포 ρ_h 는 수직밀도의 변화분 $\Delta\rho_h$ 와 입자의 체적밀도 ρ_B 의 합으로 구할 수 있으며 이는 식 (2-4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\rho_h = \rho_B + \Delta\rho_h = \rho_B \left(1 + e^{-\frac{4\mu_c K_a}{D_r}(H-h)} \right) \quad (2-4)$$

또한, 토양 시료를 임의의 높이 h 에서 높이 H 가 될 때까지 채웠을 경우의 질량은 단면적 S 와 식 (2-4)의 밀도분포 ρ_h 를 이용하여 식 (2-5)와 같이 표현할 수 있다.

$$m_H = S \int_0^H \rho_h dh = \rho_B S \left(H + \frac{1 - e^{-\alpha H}}{\alpha} \right). \quad (2-5)$$

여기서, $\alpha = 4\mu_e K_a / D_T$ 이다.

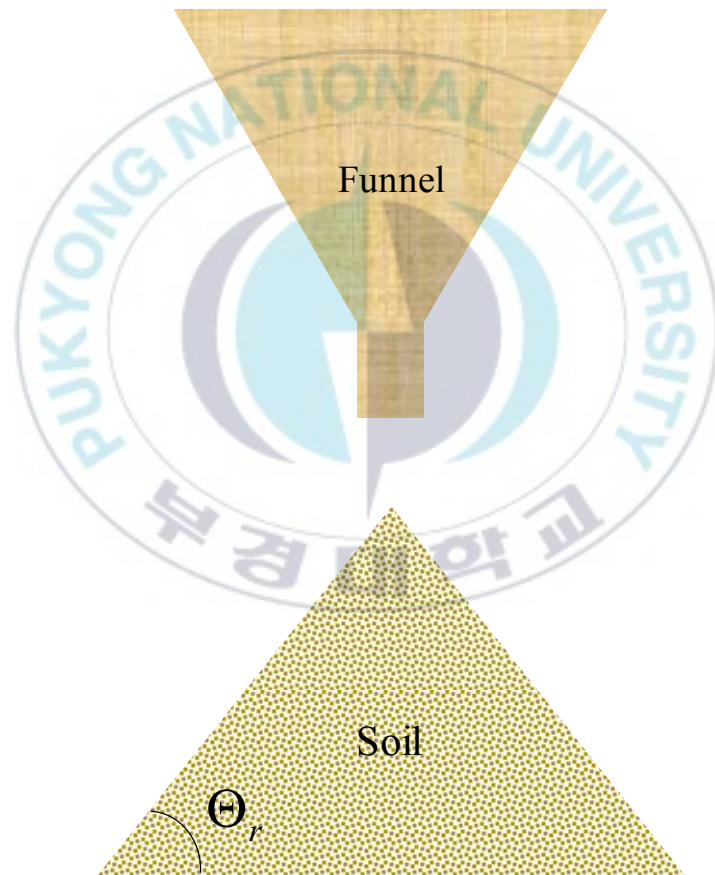
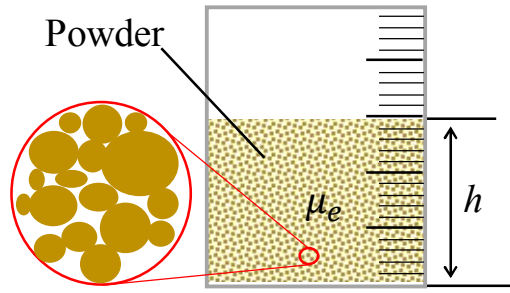


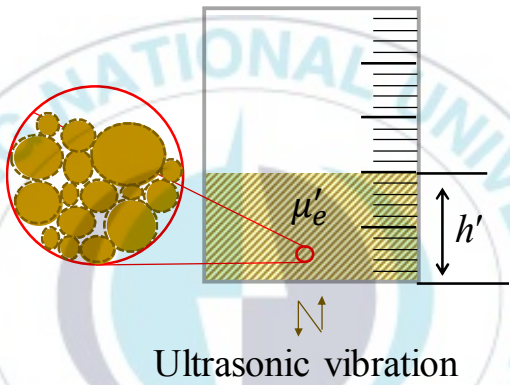
그림 2-2. 안식각 측정

나. 초음파에 의한 충전 밀도변화

초음파 유무에 따라 충전되는 시료는 그림 2-3과 같이 나타낼 수 있다. (a)는 시료를 높이 h 만큼 채운 원통형 용기를 나타내고 있으며, (b)는 시료를 높이 h 만큼 채운 용기에 초음파를 가하여 시료의 높이가 h' 만큼 충전된 용기를 나타낸다. 그림 (a)에서 시료의 밀도는 식 (2-4)에서의 체적밀도와 수직밀도 변화분의 합 ρ_h 로써 표현할 수 있다. 시료 내부 살펴보면 용기 내의 분말 시료는 마찰력 및 수직항력이 중력과 평행상태에 도달할 때까지 충전된다. 이 때, 그림 (b)와 같이 용기 아래 초음파가 가해지면 시료 내부의 유효 마찰계수를 감소시켜 시료 내부의 밀도가 증가하게 된다. 여기서 유효 마찰계수란 용기와 입자 사이의 마찰계수, 입자와 입자 사이의 마찰계수를 의미한다. 이와 같이 초음파에 의해 유효 마찰계수가 감소하게 되면 시료는 평행상태에 도달하기 위하여 더 충전되게 된다. 따라서 유효마찰계수를 비교해보면 초음파 없이 충전한 경우 (μ_e)가 초음파를 이용하여 구동했을 경우 (μ_e')보다 큰 것을 확인할 수 있다. 이를 바탕으로 충전된 시료 내부에서 입자들의 상태를 유추해볼 수 있다. 그림 (a)와 같이 크기가 다른 시료의 입자들은 입자들 사이에 공극이 존재한다. 이 때, 그림 (b)와 같이 시료의 입자들에 초음파가 인가된 경우 진동에 의해 유효마찰계수가 감소하여 입자 사이의 재배치가 일어난다. 따라서, 원안의 모습과 같이 초음파의 진동으로 인해 공극의 크기가 줄어들게 되며 시료의 높이도 낮아진다.



(a)



(b)

그림 2-3. 시료의 충전에 있어서 초음파 효과의 모식도
(a) 초음파가 없는 경우, (b) 초음파로 가진한 경우

이를 바탕으로 마찰감소 효과 μ_l 은 다음과 같이 초음파의 유무에 따른 유효마찰계수의 비로써 구할 수 있다.

$$\mu_l = \frac{\mu'_e}{\mu_e}. \quad (2-6)$$

만약 시료에 초음파가 인가된 경우의 시료의 입자속도를 v_u , 시료 용기의 속도를 v_b 라 둔다면, 마찰감소 효과는 다음과 같이 쓸 수 있다[25].

$$\mu_l = \frac{2}{\pi} \sin^{-1} \left(\frac{v_b}{v_u} \right). \quad (2-7)$$

또한, 식 (2-6)으로부터 초음파를 이용하여 구동했을 경우의 시료 내부의 마찰계수 (μ_e')는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mu_e' = \mu_l \mu_e. \quad (2-8)$$

그러므로 초음파를 원통형 용기에 인가하면, 임의의 높이 h' 에서 전체 시료의 높이인 H 까지 채웠을 경우의 시료의 밀도는 식 (2-4)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\rho_h' = \rho_B + \Delta \rho_h' = \rho_B (1 + e^{-\alpha'(H-h')}). \quad (2-9)$$

여기서, $\alpha' = 4\mu_e' K_a / D_T = 4\mu_l \mu_e K_a / D_T = \alpha \mu_l$ 이다.

이와 같이 초음파를 이용하면 시료를 충전할 경우 밀도가 바뀌게 되므로 충전되는 질량 역시 바뀌게 되는데, 이는 식 (2-10)과 같다.

$$m_H' = S \int_0^H \rho_h' dh = \rho_B S \left(H + \frac{1 - e^{-\alpha'H}}{\alpha'} \right). \quad (2-10)$$

II-2. 실험방법

가. 분체 시료

실험에 사용된 시료는 주위에서 흔히 구할 수 있는 토양 시료를 사용한다. 직접 채취한 토양 시료에 나뭇잎이나 나뭇가지 그리고 불순물 등을 제거한 후 건조기를 사용하여 120 °C의 고온에서 10시간 건조 후 분쇄기를 이용하여 분쇄한다. 이와 같은 과정을 거친 토양 시료의 입자 크기를 측정해 보면 그림 2-4와 같다. USB 현미경 (USB digital microscope)을 통하여 토양 시료의 입자 크기를 확인해 본 결과 입자의 최빈값(mode)은 약 20 μm 이다.



그림 2-4. 토양 시료의 현미경 사진

나. 초음파 진동의 유무에 따른 충전

그림 2-5는 초음파의 유무에 따른 충전율의 변화를 알아보기 위한 실험장치를 나타낸다. 내경이 46.00 mm이고, 외경이 56.00 mm, 높이가 197.0 mm인 아크릴 형태의 원통형 용기에 그림 2-4의 건조된 토양 시료를 둔다. 그 후, 시료 용기 아래에 란주반 (Langevin) 타입의 초음파 트랜스듀서를 고정시킨다. 이 때, 트랜스듀서는 고무링과 테프론 (teflon)에 의해 지지되고 있는데 이는 초음파 구동 중 공진모드의 변화를 막기 위함과 구동 중 안정성을 유지하기 위함이다.

또한, 그림 2-5는 측정하고자 하는 물리량에 따라 진동자에 연결하는 장치를 다르게 할 수 있는데 이는 그림의 스위치 숫자로 확인할 수 있다. 시료를 충전하는 시스템의 경우 스위치의 ①과 같이 아래 진동자에는 신호 파워 발생기를 연결하여 진동자로부터 초음파를 방사한다. 위 진동자에는 약 0.17 kg의 테프론을 위치시키는데 이는, 초음파 진동에 의한 분체의 분출을 방지하며, 시료의 표면을 평탄하게 하여 높이를 정확하게 측정하기 위함이다.

①과 같은 방식을 이용하여 시료를 충전한 후, 충전된 시료를 이용하여 음향 특성을 확인한다. 이를 확인하기 위하여 스위치의 ②와 같이 아래 진동자에는 함수발생기를 연결하고 위 진동자에는 오실로스코프를 연결하여 준다. 아래 진동자로부터 28.80 kHz의 주파수와 1 V의 진폭 10 주기의 톤 버스트 (tone burst) 를 인가시키고, 이를 위 진동자에서 수신한다. 이와 같이 측정하고자 하는 물리량에 따라 스위치를 바꾸어가며 실험을 진행한다.

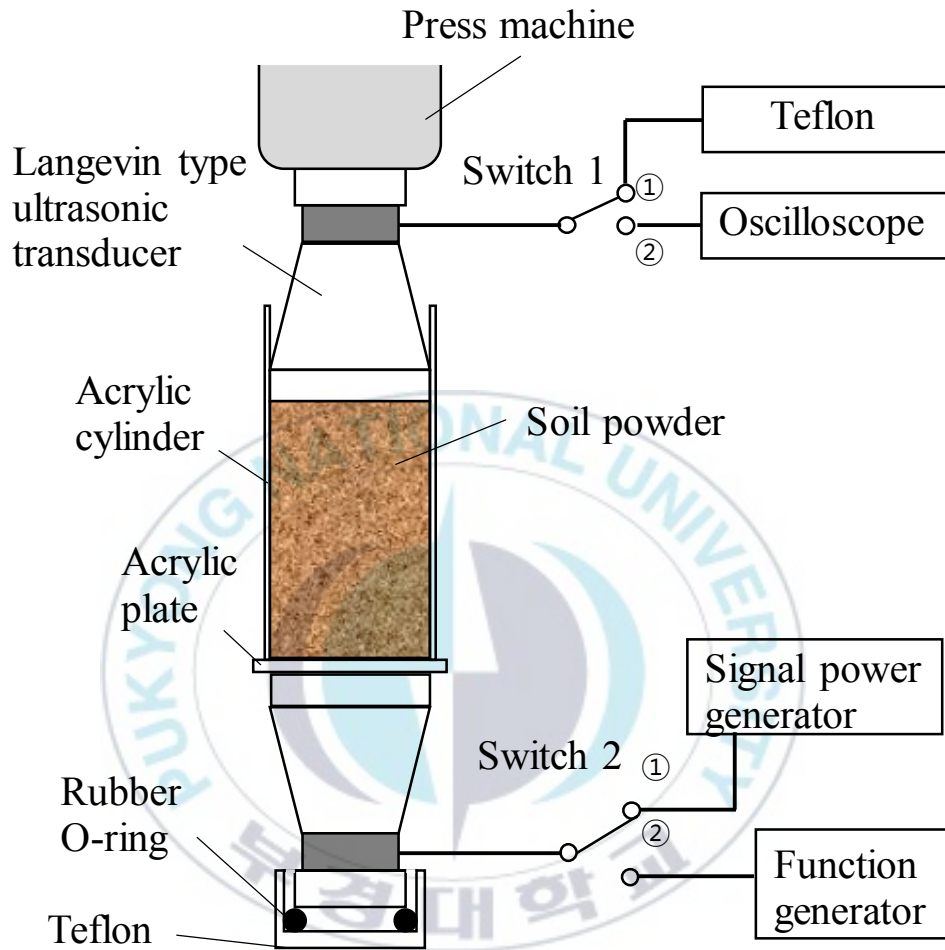


그림 2-5. 초음파를 이용한 충전 및 음향 특성 시스템

그림 2-6은 토양 시료를 충전하는 과정을 나타낸 그림이다. 우선 그림 (a)와 같이 테프론 커버에 의해서 충전된 시료의 초기 높이를 h_0 , 채운 토양 시료의 양을 m_0 로 둔다. 그림 (b)는 아래 진동자에서 방사된 초음파에 의해 시료가 충전되는 모습을 나타내고 있으며, 충전된 시료의 높

이를 h_1 으로 둔다. 그 후, 그림 (c)와 같이 다시 초기높이 h_0 까지 시료를 채우며 채운 시료의 질량은 m_1 으로, 충진된 시료의 높이로부터 기존의 초기높이까지의 높이 차이를 Δh 로 둔다. 마지막으로, 그림 (d)와 같이 다시 초음파를 사용하여 시료를 충진한다. 이와 같은 과정을 최종적인 높이가 초기높이가 될 때까지 반복 측정한다. 또한, 트랜스듀서로부터의 파열과 용기에 의해 형성된 정재파 (standing wave) 로 인한 불균인한 충진을 방지하기 위하여 신호 파워 발생기를 30 초씩 구동한다. 그림 2-6 을 통하여 충진되는 질량의 합은 식 (2-11)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta m = \sum_i m_i = m_0 + m_1 + m_2 + \dots \quad (2-11)$$

초음파를 이용하여 충진하는 경우와 초음파 없이 충진하는 경우에 따라 충진되는 질량 및 음향 특성을 측정 및 계산하여 이를 비교 분석한다.

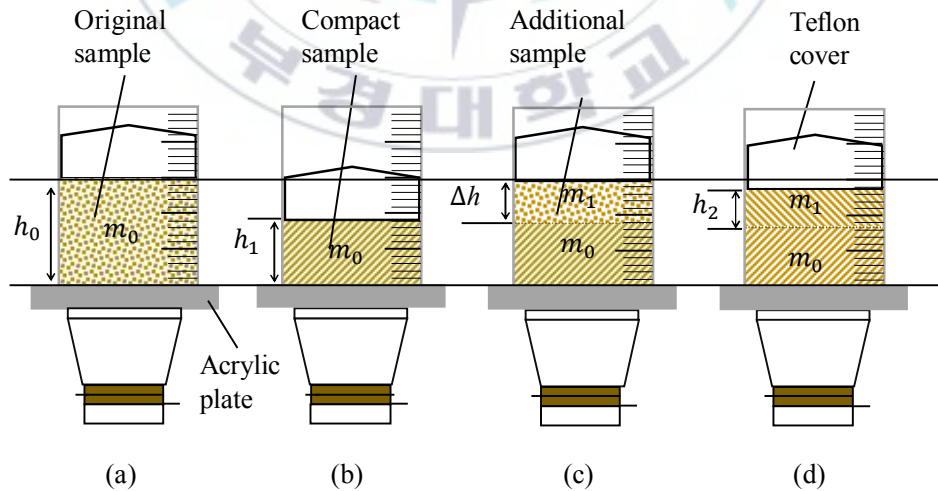


그림 2-6. 충진 과정

다. 트랜스듀서의 특성

그림 2-5에서 사용한 란쥬반 타입의 초음파 트랜스듀서의 특성을 확인하기 위해 어드미턴스를 측정하면 그림 2-7과 같다. 그림 2-7에서 점선은 매질이 공기일 경우를 의미하며 실선은 토양 시료의 경우를 의미한다. 그림 2-7의 (a)는 주파수에 따른 어드미턴스의 허수부인 서셉턴스 (susceptance) 를 의미하며 (b)는 주파수에 따른 어드미턴스의 실수부인 컨덕턴스 (conductance) 를 의미한다. 진동자의 공진, 반공진 주파수를 계산하기 위하여 매질이 공기일 경우를 보면, 그림 (a)를 통해 반공진 주파수는 약 28.30 kHz임을 알 수 있으며, 그림 (b)를 통해 공진 주파수가 28.80 kHz임을 알 수 있다. 또한, 그림 2-7에서 구한 어드미턴스의 실수부와 허수부를 따로 그리면 그림 2-8과 같이 표현할 수 있다. 그림 2-8은 토양 시료를 충전할 경우 변환 효율을 알아보기 위하여 복소좌표로 나타낸 어드미턴스이다. 이로부터 변환효율 η_{ea} 는 다음 식으로 구할 수 있다.

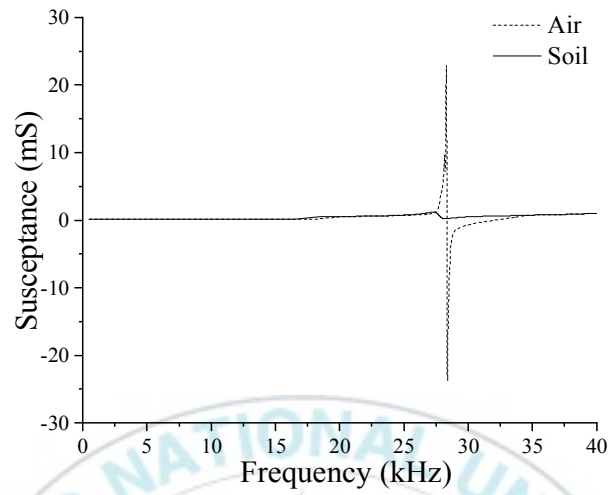
$$\eta_{ea} = \frac{|Y_{sf_0}|}{G_{sf_0}} \left(1 - \frac{|Y_{sf_0}|}{|Y_{af_0}|} \right) \times 100. \quad (2-12)$$

여기서, $G_{sf_0}, Y_{sf_0}, Y_{af_0}$ 는 공진주파수에서의 값들을 의미하며, 각각 토양에서의 입력 컨덕턴스와 어드미턴스 그리고 공기중에서의 입력 어드미턴스를 나타낸다. 그림 2-7로부터 각 요소를 구하면

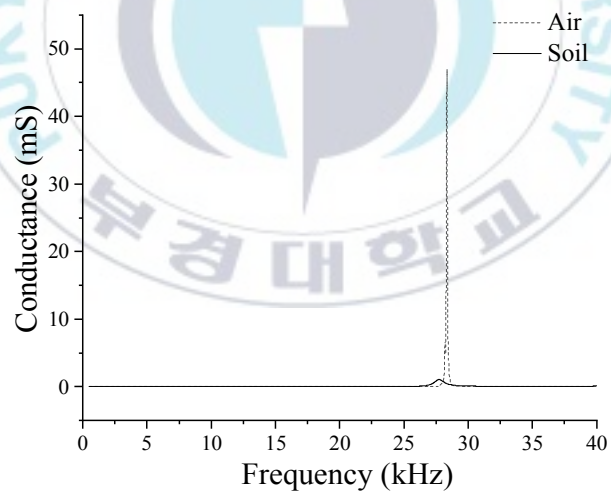
$$G_{sf_0} = 1.16 \text{ mS}, \quad |Y_{sf_0}| = 1.10 \text{ mS}, \quad |Y_{af_0}| = 46.74 \text{ mS}$$

이다. 이들을 대입하여 변환효율 η_{ea} 를 구하면 그 값은 92.85%가 된다. 즉, 원통형 용기에 토양 시료를 두어 진동자를 구동할 경우, 토양 시료가 없는 매질이 공기일 경우와 비교하여 92.85%의 변환효율을 가진다는 것을 알 수 있다.

앞에서 구한 변환효율과 진동자의 전기적인 파워를 구하여 진동자의 음향 파워를 구할 수 있다. 전기적인 파워는 란쥬반 타입의 트랜스듀서의 전압과 전류의 곱으로 구할 수 있다. 전류 프로브 (3276, HIOKI, Japan)를 이용하여 구한 전기적인 파워는 5.850 W이다. 따라서 음향파워 P 는 변환효율과 전기적인 파워의 곱으로부터 $0.9285 \times 5.850 = 5.432$ W이다. 음파의 진행 방향에 수직한 단위면적을 단위시간에 통과하는 음향 에너지를 의미하는 음향강도를 구해보면 3797 W/m^2 임을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 2-7. 란쥬반 트랜스듀서의 어드미턴스 특성
(a) 서셉턴스, (b) 컨덕턴스

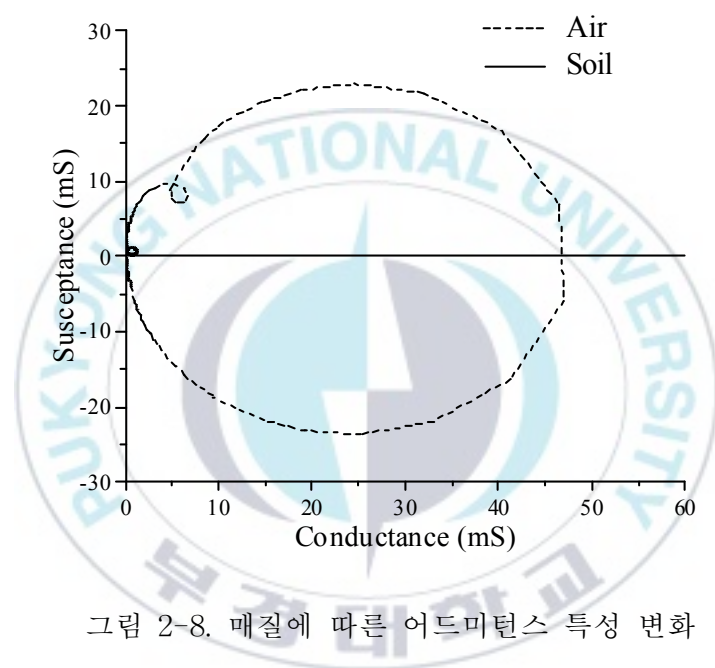


그림 2-8. 매질에 따른 어드미턴스 특성 변화

II-3. 결과 및 논의

가. 안식각 측정

식 (2-2)에서 언급된 안센계수를 구하기 위하여 안식각을 측정한다. 그림 2-2에서 언급한 바와 같이 깔때기를 이용하여 일정한 속도로 토양 시료를 흘려보내며 원뿔 모양으로 퇴적된 시료의 안식각을 측정한다. 실제 실험 모습은 그림 2-9와 같으며 깔때기 대신 구멍을 이용하여 토양 시료를 흘려보낸다 그 후, 원뿔 모양으로 퇴적된 토양 시료의 각도를 계산하여 안식각을 측정한다. 축적된 토양 시료의 가로길이는 15.00 cm이며, 세로길이는 5.50 cm이다. 이를 이용하여 안식각을 구하면 $\theta_r = 36.25^\circ$ 이고, 안식각과 식 (2-2)를 이용하여 안센 계수를 계산하면 $K_a = 0.26$ 이다.

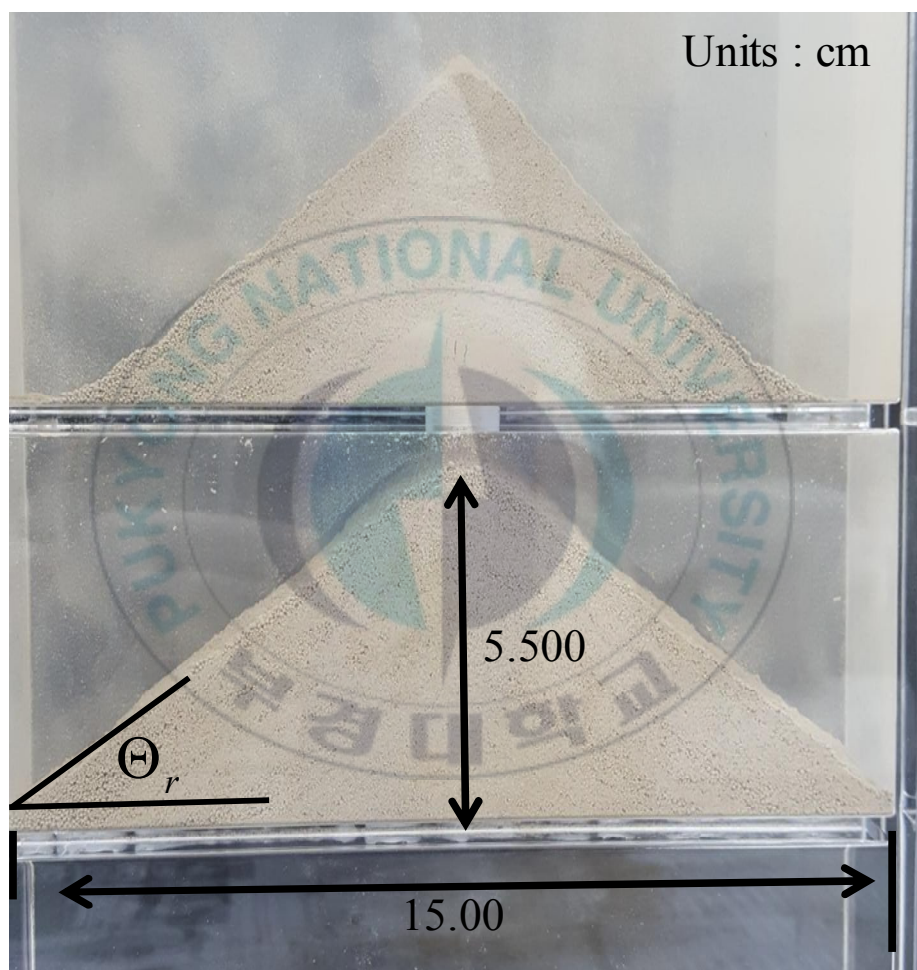


그림 2-9. 안식각 측정을 위한 실험장치

나. 분체시료의 마찰계수 도출 및 초음파에 의한 충전효과 변화

앞서 언급한 방법을 통해 초기높이 h_0 에 따른 충전 질량 Δm 을 알아 보면 그림 2-10과 같다. 그림 2-6과 같은 방법을 통해 최종적으로 충전 된 질량을 8개의 지정된 높이에 따라 표시한 그림이다. 지정된 높이란 0.05 m에서부터 0.40 m까지 0.05 m씩 올린 8개의 지점을 말한다. 따라서 충전 질량을 구하기 위해 식 (2-11)을 이용하여 8개의 지점에서 그 값을 측정한다.

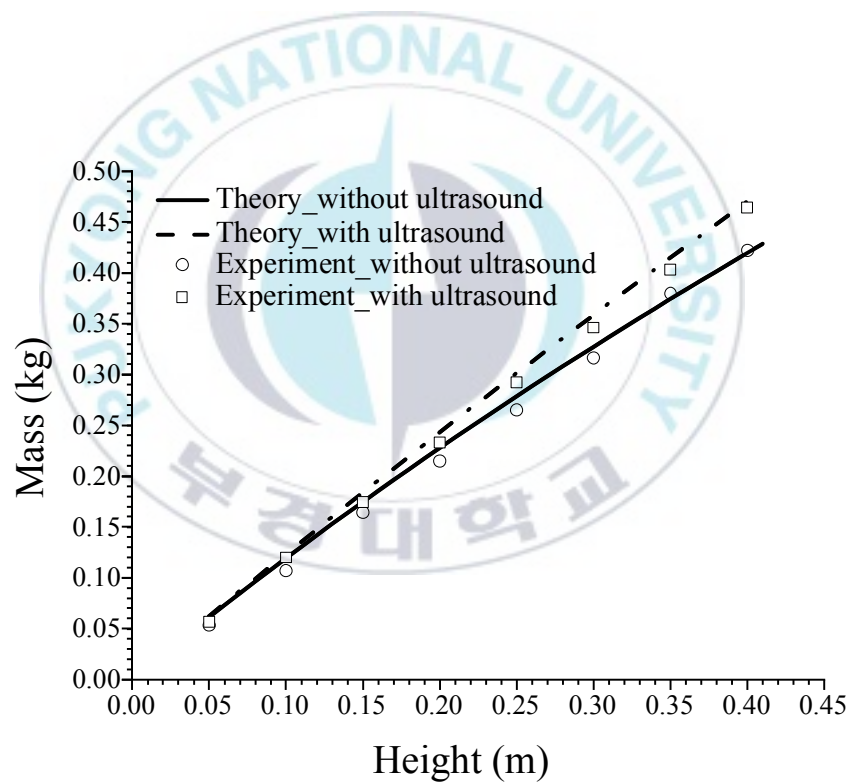


그림 2-10. 초음파의 유무에 따른 충전 질량의 변화

직선과 원형 점은 초음파 없이 충전한 시료의 높이에 따른 충전 질량이며, 점선과 사각 점은 초음파와 함께 구동할 경우의 높이에 따른 충전 질량 결과이다. 시료의 높이가 0.05 m일 경우 초음파의 유무에 따른 충전 질량의 차이는 3.02 g 차이가 나지만 0.40 m일 경우 42.18 g으로 그 차이가 크다. 즉, 시료의 높이가 올라갈수록 초음파의 효과에 의해 충전되는 질량의 양이 커지는 것을 알 수 있다. 초음파 없이 충전한 경우의 이론값인 실선은 식 (2-5)를 사용한 회귀곡선이며, 이로부터 구한 α 는 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{4\mu_e K_a}{D_T} = 2.20. \quad (2-13)$$

식 (2-13)에서의 α 와 위에서 측정한 원통의 지름 D_T 는 0.03 m, 안센 계수 K_a 는 0.26이므로 이를 바탕으로 초음파 없이 측정한 경우의 마찰 계수 μ_e 를 구해보면

$$\mu_e = \alpha \times \frac{D_T}{4K_a} = 2.20 \times \frac{0.03}{4 \times 0.26} = 0.07 \quad (2-14)$$

임을 알 수 있다.

초음파를 이용하여 구동하였을 경우의 실험 결과는 그림의 사각 점을 의미하며, 이론값인 점선은 식 (2-10)을 사용한 회귀곡선이며 이로부터 구한 α' 은 식 (2-15)와 같다.

$$\alpha' = \frac{4\mu_w K_a}{D_T} = 0.75. \quad (2-15)$$

식 (2-14)와 마찬가지로 초음파를 이용한 마찰계수 μ_e' 를 구하면 식 (2-16)과 같다.

$$\mu_e' = \alpha' \times \frac{D_T}{4K_a} = 0.75 \times \frac{0.03}{4 \times 0.26} = 0.02. \quad (2-16)$$

즉, 초음파의 유무에 따른 마찰계수를 비교해보면 식 (2-14)의 초음파 없을 경우의 마찰계수 μ_e 가 식 (2-16)의 초음파와 함께 구동했을 경우의 마찰계수 μ_e' 보다 큰 것을 알 수 있다. 결과적으로 초음파를 사용하여 충전할 경우 시료 내부의 마찰계수가 줄어들어 추가적인 충진이 일어나게 된다.

다. 초음파에 의한 음향 특성 변화

초음파 진동에 의한 음향 특성 변화를 확인하기 위하여 그림 2-5의 스위치 ②와 같이 아래 진동자에는 함수발생기를 연결하고 위 진동자에는 오실로스코프를 연결하여 준다. 또한, 수신용 진동자에는 0.3 MPa의 일정한 정압을 가해준다. 아래 위 진동자 사이에는 그림 2-6과 같은 방법을 통해 최종 높이가 초기높이가 될 때까지 충진된 시료를 위치시킨다. 초기높이를 2.00 cm부터 5.00 cm까지 0.50 cm씩 올리며 음향특성을 확인하며 그 결과는 그림 2-11, 2-12, 2-13과 같다. 이들 그림에서 점선은 초음파를 이용하여 충진한 시료의 경우를 나타내며, 실선은 초음파 없이 정압만을 인가한 시료의 결과이다.

그림 2-11은 초기높이 h_0 에 따른 충진 밀도를 나타내고 있다. 초음파를 이용하여 시료를 충진한 경우 시료의 밀도는 평균 약 1.60 g/cm^3 이고, 초음파 없이 충진한 경우 평균 약 1.45 g/cm^3 로 초음파를 이용하여 충진한 경우에 시료의 밀도가 약 0.15 g/cm^3 더 큰 것을 알 수 있다. 이를 통하여 초음파를 이용하여 충진한 시료의 상태가 더 균질하다는 것을 알 수 있으며, 시료 내의 공극의 크기 역시 작다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림에서 알 수 있듯이, 모든 높이에 무관하게 밀도가 거의 일정한 것을 알 수 있는데, 이는 부피대비 질량의 양이 높이에 상관없이 일정하다는 것을 알 수 있다.

그림 2-12는 초기높이에 따른 감소율을 나타내고 있다. 감소율이란 그림 2-6에서 초기높이 h_0 대비 줄어든 높이 Δh 의 백분율을 의미한다. 즉, 이를 통해 충진효율이 가장 좋은 높이를 구할 수 있다. 초기높이가 2.00 cm인 경우 초음파에 의해 감소율의 차이가 보이지 않지만, 초기높이가 증가함에 따라 초음파를 이용하여 충진하였을 때 감소율이 더 큰

것을 확인할 수 있는데, 그 수치는 5 ~ 12% 큰 것을 알 수 있다. 또한, 두 경우 모두 초기높이가 3.50 cm일 때 가장 감소율이 큰 것을 보인다. 따라서 초음파를 이용하여 시료를 충전할 경우 최적의 높이는 3.50 cm임을 알 수 있다. 이는 구동한 초음파의 파장과 관계가 있는 것으로 생각된다.

그림 2-13은 초기높이 h_0 에 따른 음속의 변화를 나타내고 있다. 음속은 각 지점의 높이를 송신용 진동자에서 수신용 진동자 사이의 도달 시간으로 나눈 것을 의미한다. 즉, 음속이 크다는 것은 그만큼 음파가 잘 전달된다는 의미이며, 이는 시료의 공극이 줄어들어 시료 내부의 상태가 더 균질한 것을 알 수 있다. 특히, 감소율이 제일 좋은 3.50 cm에서는 음속이 약 30.00 m/s 차이가 난다.

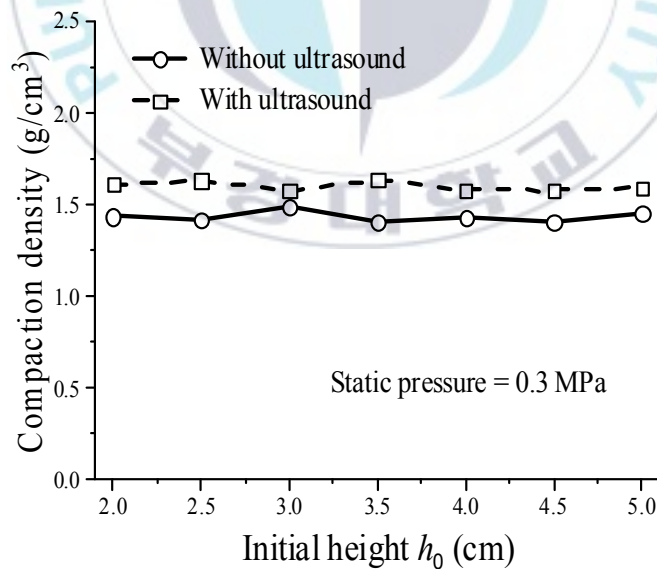


그림 2-11. 초음파 가진 시 초기높이에 따른 충전 밀도변화

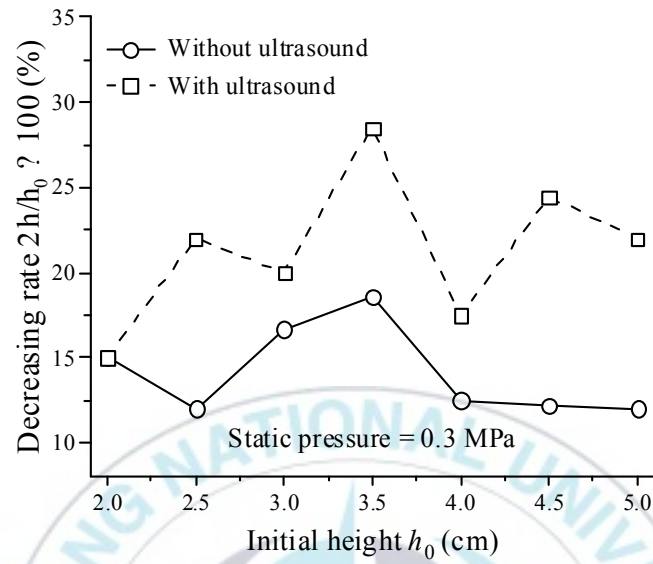


그림 2-12. 초음파 가진 시 초기높이에 따른 감소율 변화

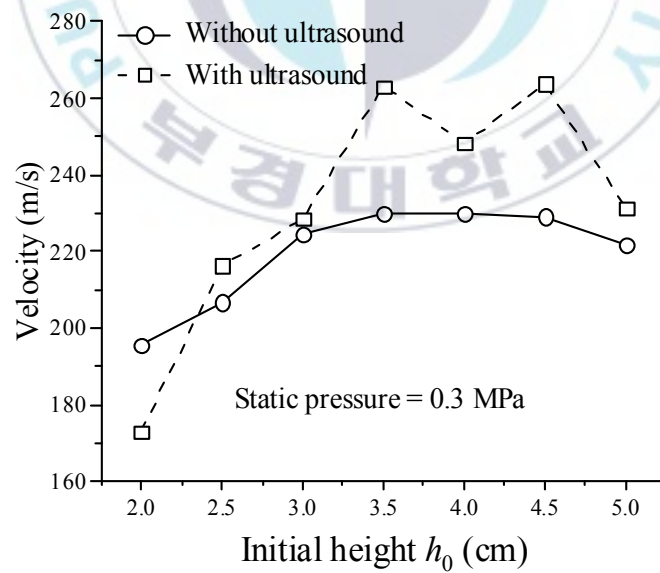


그림 2-13. 초음파 가진 시 초기높이에 따른 음속 변화

라. 논의

정압과 초음파를 함께 구동하여 분체 시료를 충전할 경우 정압만을 구동하여 충전하였을 경우보다 약 3배로 마찰계수가 감소하였다. 이를 통하여 충전되는 질량을 확인해 보면 초음파를 이용하여 충전할 경우, 주어진 범위 내에서 약 10% 더 충전되는 것을 알 수 있다. 또한, 음향 특성인 밀도와 음속을 확인해 보면 초음파를 이용하여 충전할 경우, 밀도는 약 0.15 g/cm^3 더 커졌으며, 음속은 주어진 범위 내에서 약 12% 더 빨라졌음을 알 수 있다. 이를 통해 초음파를 이용하여 충전할 경우 시료 내의 공극이 줄었음을 알 수 있으며, 시료 내부의 상태가 균일하다는 것 또한 확인할 수 있다. 즉, 초음파의 효과로 인해 마찰계수가 감소하여 충전효율이 커짐을 확인할 수 있다. 초음파를 이용하여 충전할 경우 주어진 범위 내에서는 높이 3.50 cm에서 가장 최적의 효율임을 알 수 있다.

III. 정압에 따른 충전율의 변화

III-1. 분체 시료의 정압에 따른 밀도

앞 장에서 언급한 바와 같이, 분체 시료의 충전 과정에서 초음파를 이용하여 충전 한 경우, 시료의 마찰계수를 감소시켜 충전 효과가 증가함을 확인하였다. 또한, 시료를 충전하는 과정에서 정압과 함께 초음파를 구동하므로 최적의 충전 조건을 구축하기 위해서는 정압에 따른 충전 효과를 확인하는 것이 필요하다. 이를 확인하기 위하여 시료에 인가되는 정압을 다양하게 하는 조건 아래에서 초음파 진동에 의한 분말 시료의 충전 효과 과정을 분석하여 물리적, 음향학적 특성 변화를 조사한다.

정압에 따른 밀도변화분은 입자의 공극의 양에 비례하는데 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial P} = \beta(1 - \rho). \quad (3-1)$$

여기서, ρ , $1 - \rho$, P , β 는 각각 상대밀도, 공극의 양, 인가된 정압, 그리고 비례상수를 의미한다. 식 (3-1)로부터, 밀도는 정압 P 의 함수로서 표현할 수 있으며 이를 나타내면 식 (3-2)와 같다.

$$\rho = 1 - (1 - \rho_0)e^{-\beta P}. \quad (3-2)$$

여기서, ρ_0 는 인가된 정압이 없을 경우의 상대밀도를 의미한다. 식

(2-4)에서와 같이 높이가 일정한 경우의 충전된 시료의 밀도는 유효마찰 계수, 얇센계수 그리고 용기의 직경에 의존함을 알 수 있다. 만약 용기의 직경과 얇센 계수가 상수라고 가정한다면, 밀도는 유효마찰계수에 의존함을 알 수 있으며 밀도와 유효마찰계수는 반비례의 관계임을 알 수 있다. 즉,

$$\rho \propto \frac{1}{\mu}. \quad (3-3)$$

또한, 식 (2-6)에서 언급한 바와 같이 마찰감소 효과 μ_l 은 초음파의 유무에 따른 유효마찰계수의 비로써 구할 수 있었다. 그 후, 분체를 충전함에 있어 정압을 고려한 마찰계수감소 효과 μ_{lP} 는 식 (3-2)와 (3-3)을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mu_{lP} = \frac{\mu_P}{\mu_u} = \frac{1 - (1 - \rho_{0u})e^{-\beta_u P}}{1 - (1 - \rho_{0P})e^{-\beta_P P}}. \quad (3-4)$$

여기서, μ_u , ρ_{0u} , β_u 는 정압과 초음파를 함께 구동했을 경우의 유효 마찰 계수, 정압이 없을 경우의 상대밀도, 비례상수를 의미하고, 반대로 μ_P , ρ_{0P} , β_P 는 오직 정압만을 인가했을 경우의 값을 의미한다.

III-2. 실험방법

그림 3-1은 초음파 유무에 따른 충전 밀도변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보듯이, 프레스 머신을 이용하여 위 진동자에 정압을 인가하였을 경우 시료의 밀도가 변하는 것을 관측할 수 있다. 우선, 높이가 h_0 가 될 때까지 아크릴 원통에 토양 시료를 채운다. 그 후 첫 번째 그림과 같이 토양 시료의 표면에 진동자를 올린다. 이때의 밀도는 정압을 가하지 않았을 경우의 밀도인 ρ_0 로 둘 수 있다. 그 후, 두 번째 그림과 같이 프레스 머신을 이용하여 정압을 인가한다. 정압이 인가된 시료의 밀도는 ρ_p 가 되며 정압과 초음파를 함께 인가하였을 경우의 시료의 밀도는 마지막 그림과 같이 ρ_u 가 된다. 즉, 기존의 밀도인 ρ_0 에서 정압이 가해지면 ρ_p 로 밀도가 증가하게 되며 초음파와 함께 구동하여 시료를 충전하면 밀도는 ρ_u 로 증가하는 것을 확인할 수 있다.

시료의 충전과 음향 특성을 관측하기 위하여 II장에서 언급한 바와 같이 정압과 초음파에 의해 시료를 충전한 후, 초기높이까지 시료를 채우는 과정을 반복한다. 이와 같은 과정을 최종적으로 충전된 높이가 초기 높이가 될 때까지 반복한다.

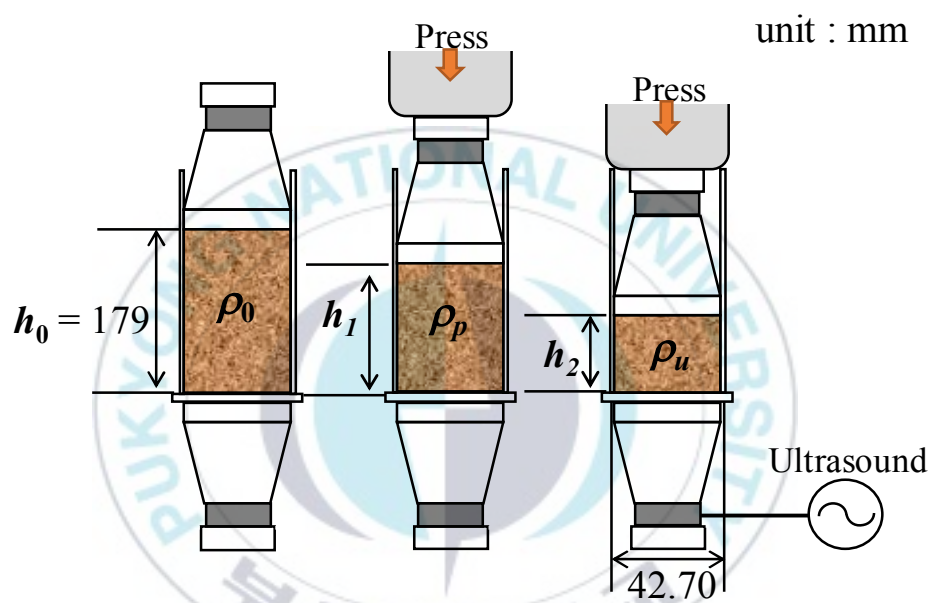


그림 3-1. 초음파 유무에 따른 충전 밀도변화

III-3. 결과 및 논의

가. 충전된 시료의 내부모습

그림 2-6과 같은 방법을 통해 충전된 시료의 내부모습을 살펴보면 그림 3-2와 같다. 그림 3-2는 USB 현미경을 통하여 관측되었으며 0.4 MPa의 정압을 시료에 인가하였을 경우 충전된 시료의 내부모습을 나타내고 있다. 그림 (a)는 정압만을 가한 그림 3-1의 밀도 ρ_p 를 나타내고 있으며 (b)는 정압과 초음파를 함께 가한 밀도 ρ_u 를 나타내고 있다. 그림 3-2로부터 초음파를 이용하여 충전한 경우의 시료인 (b)의 공극이 정압만을 이용하여 충전한 경우의 시료인 (a)보다 작다는 것을 알 수 있다.

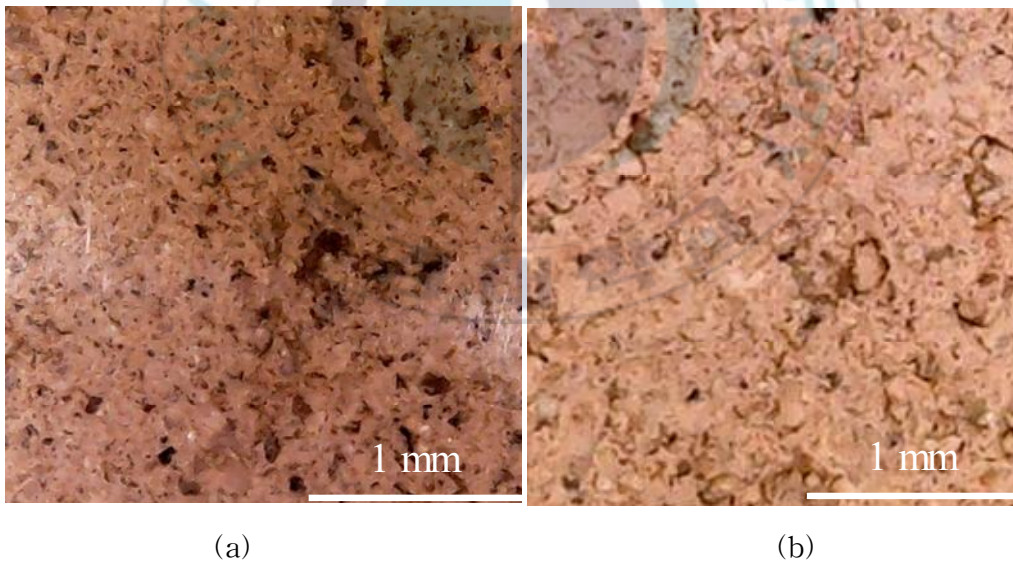


그림 3-2. 충전된 시료 내부 모습
(a) 초음파가 없는 경우, (b) 초음파로 가진한 경우

나. 정압에 따른 충전 밀도 및 유효 마찰계수 변화

그림 3-3은 프레스 머신의 압력을 0 ~ 1 MPa로 바꾸어가면서 측정한 충전 밀도를 나타낸 그림이다. 0 MPa의 경우 프레스 머신 없이 진동자만을 올렸을 경우를 의미하며 이는 ρ_0 를 의미한다. II장에서 사용한 최소 압력이 0.3 MPa의 프레스 머신 대신 최소 압력이 0.4 MPa인 새로운 프레스 머신으로 교체한 후 실험을 진행한다. 따라서, III장에서는 0.1 ~ 0.3 MPa의 정압은 나타나지 않는다. 그림 3-3에서, 원형 점은 정압만을 가했을 경우의 충전 밀도 ρ_p 를 나타내며, 사각 점은 정압과 초음파를 함께 구동했을 경우 충전 밀도 ρ_u 의 결과이다. 그림의 결과로부터 알 수 있듯이, 평균 밀도는 정압이 커질수록 커지고 그 증가율은 감소함을 알 수 있다. 충전 밀도의 결과를 살펴보면 초음파를 사용하여 충전할 경우 정압만을 가한 경우보다 최소 20.00 kg/m³에서 최대 150.00 kg/m³ 만큼 평균 밀도가 더 커진다. 또한, 그림 3-3의 직선은 식 (3-2)에서 초음파를 사용하지 않았을 때를 의미하며 $\beta = 3.50$ 으로 두었을 경우의 회귀곡선 결과이며, 점선은 초음파를 사용한 경우의 회귀곡선으로 $\beta = 3.00$ 으로 두었을 경우의 결과를 의미한다. 그림 3-4는 식 (3-4)에서 언급한 초음파에 의한 유효마찰계수의 감소 효과 μ_{lp} 를 나타낸 그림이다. 삼각점은 그림 3-3에서 실험적으로 구한 ρ_u 와 ρ_p 의 비로써 측정한 유효마찰계수의 감소 효과를 의미한다. 직선은 그림 3-3에서의 회귀곡선들의 밀도를 이용한 유효마찰계수의 감소 효과를 나타낸다. 그림 3-4에서 알 수 있듯이, 정압에 의한 유효마찰계수 μ_{lp} 의 값은 주어진 범위내에서 1.00이 넘는 것을 알 수 있다. 식 (3-4)에서 마찰감소 효과의 값이 1보다 크다는 것은 초음파를 이용하여 충전한 경우의 시료가 정압만을 이용하여 충전한 경

우의 시료보다 마찰계수감소 효과가 더 크다는 것을 알 수 있다. 결과적으로 초음파를 이용하여 시료를 충전할 경우 마찰계수가 더 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한, 유효마찰계수의 감소 효과는 정압이 커질수록 점진적으로 감소하는데, 특히 0.5 MPa로 넘어갈 경우 일정하게 수렴하는데 그 값은 약 1.03이다.



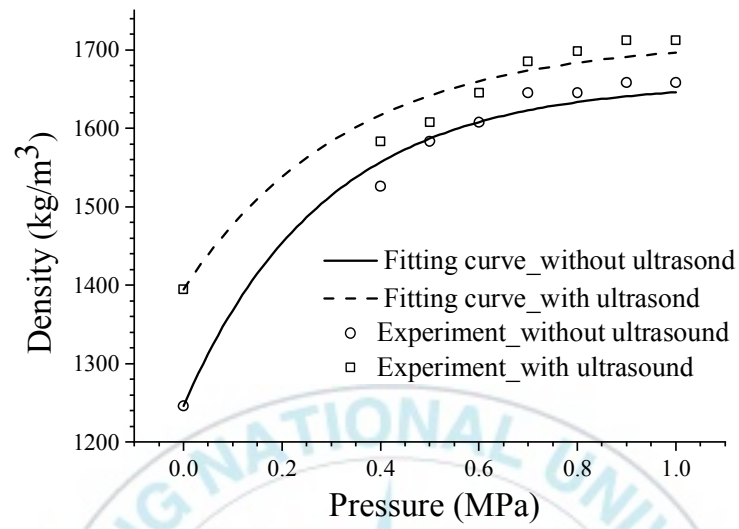


그림 3-3. 초음파 가진 시 정압에 따른 충전밀도 변화

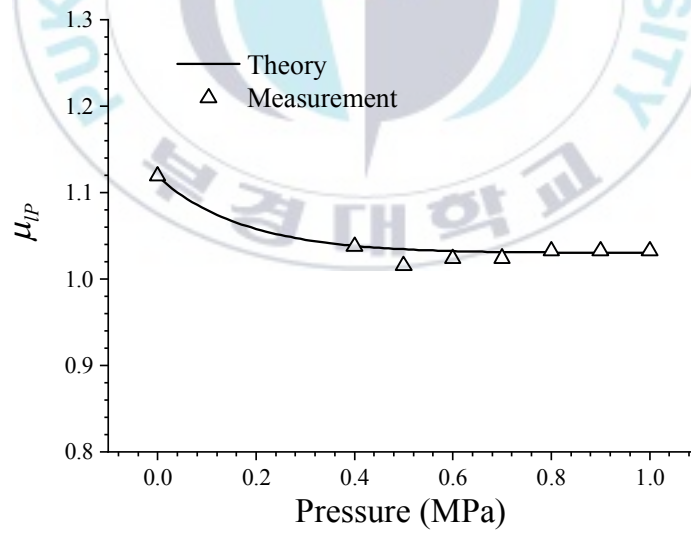


그림 3-4. 유효마찰계수의 감소 효과

다. 초음파 특성에 의한 음향 특성 변화

정압이 변하는 조건 아래, 토양 시료의 물리적인 특성 변화를 조사하여 분말 시료에 대한 초음파의 효과를 확인한다. 이를 확인하기 위하여 그림 2-5의 스위치 ②와 같이 아래 진동자에는 함수발생기를 연결하고 위 진동자에는 오실로스코프를 연결한다. 아래 진동자인 송신용 진동자에 28.80 kHz의 주파수와 1 V의 진폭 10 주기의 톤 버스트 신호를 인가시킨다. 신호는 충전된 시료를 통과하여 송신용 진동자에 도달하게 되며 수신용 진동자에 연결된 오실로스코프를 이용하여 확인한다. 인가된 정압은 0.4 MPa부터 1.0 MPa까지이며 그림에서 직선은 정압만을 이용하여 시료를 충전한 경우를 의미하며, 점선은 정압과 초음파를 함께 구동하여 시료를 충전한 경우를 의미한다.

그림 3-5는 정해진 범위 내에서 초음파의 유무에 따른 충전된 시료의 음속을 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 충전된 시료의 음속을 살펴보면 초음파 없이 정압만을 가했을 경우 200 m/s 이하로 정압의 변화에도 그 값은 현저한 변화가 없다. 하지만 초음파를 이용하여 시료를 충전하였을 경우, 분말 시료의 탄성이 증가하여 충전된 시료내의 음속이 300 m/s에서 1100 m/s로 증가한다. 즉, 초음파가 시료에 인가되면 감소된 유효 마찰계수에 의해 탄성률을 증가시키는 것을 알 수 있다.

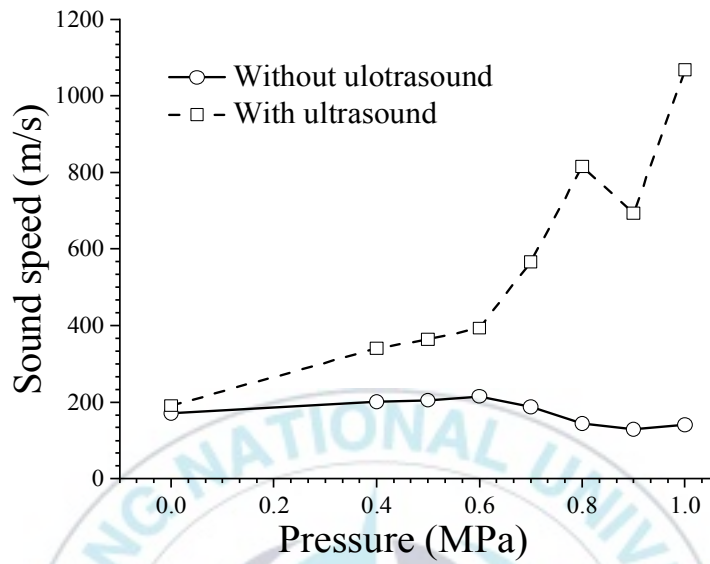


그림 3-5. 초음파 가진 시 정압에 따른 음속 변화

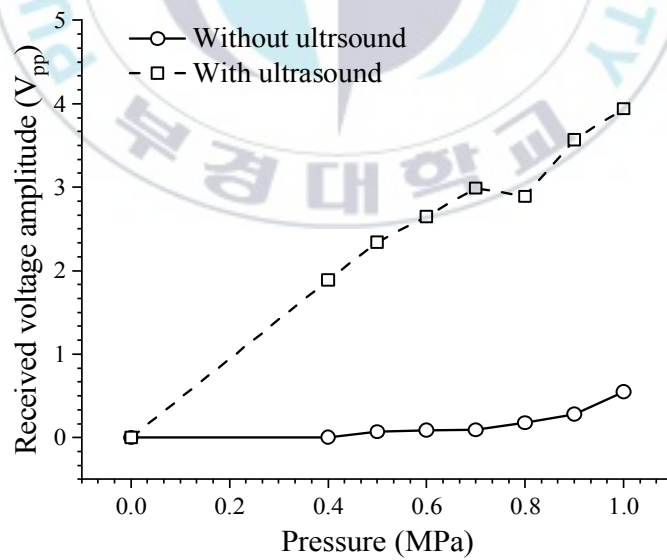


그림 3-6. 초음파 가진 시 정압에 따른 수신전압진폭 변화

그림 3-6은 충전된 시료의 정압에 따른 수신 전압진폭을 나타낸 그림이다. 인가되는 정압이 커질수록 수신전압진폭은 커지는데 이는 정압이 증가할수록 시료 내부의 공극이 감소하여 균질성이 올라갔기 때문이다. 초음파를 사용하지 않고 충전한 시료의 경우, 정압이 증가할수록 수신전압진폭 역시 증가하지만, 그 진폭의 크기가 매우 작으므로 정압이 변할지라도 그 의미를 찾기가 어렵다. 이는, 입자들 사이 또는 입자와 용기 벽면 사이의 높은 정적 마찰력으로 인해 정압이 증가하더라도 공극이 많이 감소하지 않기 때문이다. 하지만 초음파를 이용하여 시료를 충전한 경우 수신전압진폭의 값은 많이 늘어남을 알 수 있다. 이는 시료에 인가된 초음파에 의해 마찰계수가 감소하여 시료 내부의 공극이 줄어들었기 때문이다.

라. 논의

정압이 변하는 조건 아래, 초음파를 이용한 분체 시료의 충전 과정에서 충전된 샘플의 물리적, 음향학적 특성 변화를 조사하였다. 28.80 kHz의 진동자를 사용하여 충전할 경우, 초음파 없이 정압만을 가했을 경우보다 충전 밀도가 3 ~ 12% 증가하였으며 마찰계수감소 효과는 3 ~ 10.6% 감소하였다. 또한, 음속의 경우 주어진 범위 내에서 약 6배 더 빨라졌음을 알 수 있으며 수신전압진폭 역시 약 5배 커짐을 확인할 수 있었다. 초음파를 이용하여 시료를 충전할 경우 주어진 범위 내에서는 정압이 커질수록 그 효율이 커짐을 확인할 수 있다.

IV. 수치해석법을 이용한 음향 특성 확인

충진된 시료의 음향 특성을 확인하기 위해서는 그림 2-5와 같이 함수 발생기를 이용하여 송신용 진동자로부터 28.80 kHz의 주파수와 1 V의 진폭 10 주기의 톤 버스트 신호를 인가하여 오실로스코프를 이용해 수신용 진동자에서 그 결과를 확인한다. 하지만 오실로스코프를 이용하여 측정하는 경우는 시료 내부의 상태가 아닌 수신용 진동자에 도달했을 시의 최종적인 결과값만을 알 수 있다. 또한, 전기적인 신호를 입력하고 출력하는 오실로스코프와 함수발생기를 이용하여 특성을 확인하기 때문에 실제로 음파를 인가했을 시의 음향적인 결과가 아닌 전기적인 결과를 확인한다. 예를 들어, 그림 3-6과 같이 정압에 따른 수신전압진폭은 송신용 진동자에 인가된 펄스를 수신용 진동자에서 수신한 전기적 진폭을 나타낸다. 따라서 실제로 송신용 진동자에서 음파를 시료에 인가했을 시의 음향적인 진폭 값은 확인할 수 없다. 또한, 그림 3-5에서 충진된 시료의 음속을 이용하여 파장을 구할 수 있지만, 실제로 시료 내부에서의 파장은 확인할 수 없다. 따라서, 시료 내부의 특성 및 상태를 확인하기 위해서는 수치해석법을 사용하여야만 한다.

IV-1. 해석 모델

수치해석법을 사용하기 위하여 실제 모델과 같은 규격의 해석 모델을 설정하여 준다. 그림 2-5에서 나타난 란쥬반 타입의 초음파 트랜스듀서를 해석 모델로 설정하여 사용한다. 그림 4-1은 본 연구에서 사용한 란쥬반 타입의 트랜스듀서의 구체적인 모습과 규격을 나타낸다. 두께가 5.40 mm인 압전 진동자 두 장의 아래위로 알루미늄을 두고 중간에 철이 삽입된 형태이다.

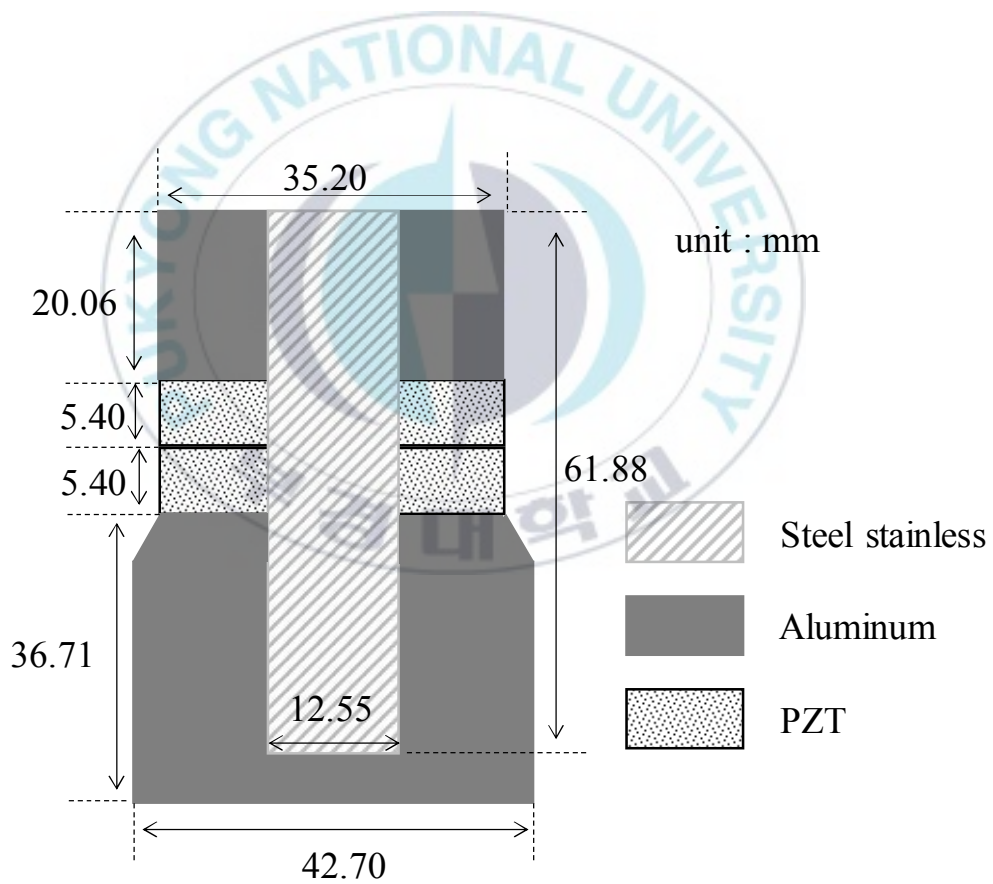


그림 4-1. 란쥬반 트랜스듀서의 규격

수치해석법에 사용된 란쥬반 트랜스듀서의 물성은 프로그램에 존재하는 물성값을 사용하였으며 이는 표 1, 2와 같다. 표 1은 PZT-5H의 물성값을 나타내며, 표 2는 알루미늄, 철 그리고 아크릴의 물성값이다.

표 1. PZT-5H의 물성값

Elastic constant	$c^E (\times 10^9 \text{ N/m}^2)$	$\begin{bmatrix} 127.20 & 80.21 & 84.67 & 0 & 0 & 0 \\ 80.21 & 127.20 & 84.67 & 0 & 0 & 0 \\ 84.67 & 84.67 & 117.40 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 22.99 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 22.99 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 23.47 \end{bmatrix}$
Relative permittivity	ϵ^S/ϵ_0	$\begin{bmatrix} 1704.40 & 0 & 0 \\ 0 & 1704.40 & 0 \\ 0 & 0 & 1433.60 \end{bmatrix}$
Piezoelectric constant	$e (\text{C/m}^2)$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 17.03 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 17.03 & 0 & 0 \\ -6.623 & -6.623 & 23.24 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
Density	$\rho (\text{kg/m}^3)$	7350

표 2. 알루미늄, 철, 아크릴의 물성값

	Aluminum	Steel stainless	Acrylic plate
Young's modulus (MPa)	7000×10	2050×10^2	3200
Poisson's ratio	0.33	0.28	0.35
Density (kg/m ³)	9700	9850	1190

IV-2. 음향 특성

가. 어드미턴스 비교

수치해석 방법의 유효성을 검증하기 위하여 해석 모델의 트랜스듀서와 실제 실험에 사용한 란쥬반 타입 트랜스듀서의 어드미턴스 특성을 비교한다. 시료의 매질은 공기로 설정해 주었으며 압전 진동자의 방사면에 1 V의 전압을 설정하며 양 후면은 그라운드로 설정해준다. 그림 4-2는 란쥬반 타입의 압전 진동자의 입력 어드미턴스 특성을 20 ~ 60 kHz범위에서 계산한 결과를 나타낸 그림이다. 점선은 실제 진동자를 임피던스 아날라이저 (E4990A, Keysight, USA) 를 이용하여 측정한 어드미턴스를 의미하며 실선은 수치해석법을 이용하여 계산된 어드미턴스이다. 실제 측정결과 란쥬반 타입 트랜스듀서의 어드미턴스는 약 28.80 kHz였으나, 수치해석법을 이용하여 계산된 어드미턴스 값은 약 30.44 kHz로 나왔다. 이는 실제 사용된 트랜스듀서와 수치해석법에서 사용한 PZT-5H와 알루미늄 철의 물성값이 정확히 일치하지 않아서 생긴 차이이다. 따라서, 수치해석법을 이용하여 진폭과 음속을 측정할 경우 30.44 kHz의 공진 주파수를 사용하며 실제 실험에서는 28.80 kHz를 사용한다.

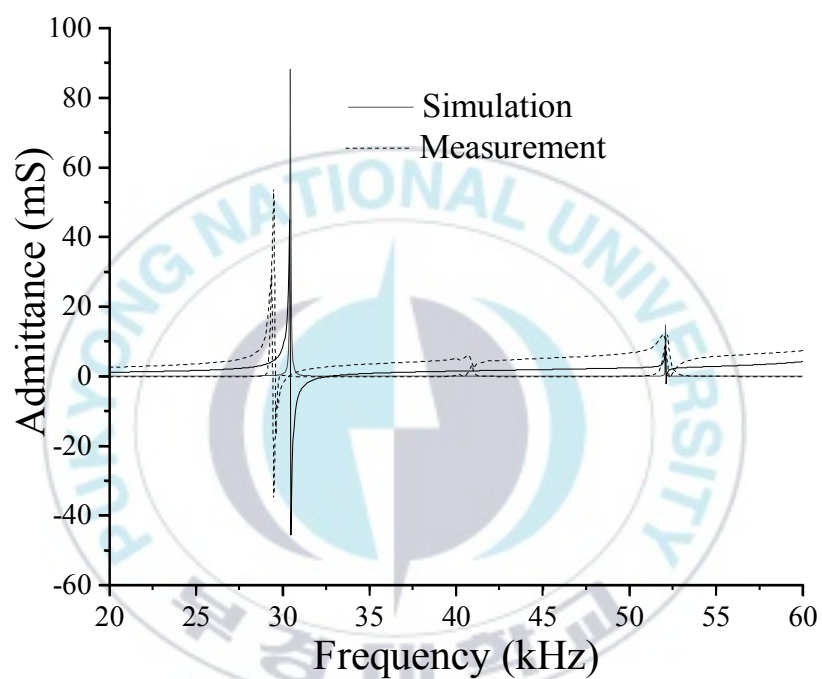


그림 4-2. 란쥬반 트랜스듀서의 어드미턴스 비교

나. 측정된 음압과의 비교

앞서 언급한 바와 같이 전기적인 진폭이 아닌 음향학적 특성을 확인하기 위해 수치해석법을 이용하여 음압을 확인한다. 이를 위하여 그림 4-1의 란쥬반 타입의 트랜스듀서를 이용하여 그림 2-5와 같이 위아래에 진동자를 두고 사이에 토양 시료가 들어있는 아크릴 원통을 위치시킨다. 토양 시료의 물성값은 정압을 고려한 값을 기입한다. 즉, 그림 3-3에서의 밀도 값과 그림 3-5에서의 음속 값을 토양 시료에 기입하여 주는데 이는 표3과 같다. 그 후, 송신용 진동자에 입력신호를 인가해주는데 이는 그림 4-3과 같다. 진폭이 1 V이며 주기는 0.33 ms이며 10 주기의 입력신호를 인가하여 준다. 그림 4-3의 입력신호를 아래 진동자에 인가하여 주고 이를 토양 시료와 수신용 진동자의 경계면인 토양 시료의 표면으로부터 측정한 음압을 그림 3-6에서의 정압에 따른 수신전압진폭과 같이 그리면 그림 4-4와 같다. 사각 점은 그림 3-6에서 언급한 정압과 초음파를 함께 구동하였을 경우의 수신전압진폭을 의미하며, 삼각점은 수치해석법을 이용하여 계산한 수신음압을 의미한다. 두 결과값 모두 정압이 증가함에 따라 그 값들이 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 수치해석법으로 계산한 음압의 경우 시료 내부가 완벽하게 균일하다고 가정한 결과 값이다. 즉, 완벽하게 균일하다고 가정한 음압의 경향과 실험 결과의 진폭 경향이 일치하므로 실험의 상태는 충분히 균일하다고 할 수 있다. 하지만, 전기적인 진폭과 음향학적인 진폭을 비교하였으므로, 직접적인 비교는 어렵다. 따라서, 실제 실험 결과의 경향과 수치해석법의 경향이 비슷하다고 해서 실제로 충진된 시료의 상태가 균일하다고는 할 수 없다.

표 3. 인가된 정압에 따른 충전된 시료의 밀도 및 음속

Pressure (MPa)	Density (kg/m ³)	Sound speed (m/s)
0	1394	335
0.4	1583	340
0.5	1607	363
0.6	1645	393
0.7	1684	566
0.8	1698	815
0.9	1712	692
1.0	1712	1067

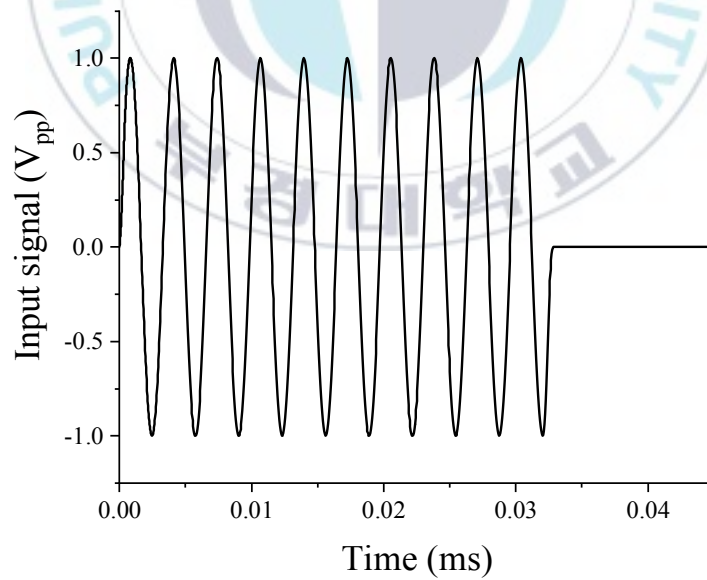


그림 4-3. 트랜스듀서에 인가된 입력 신호

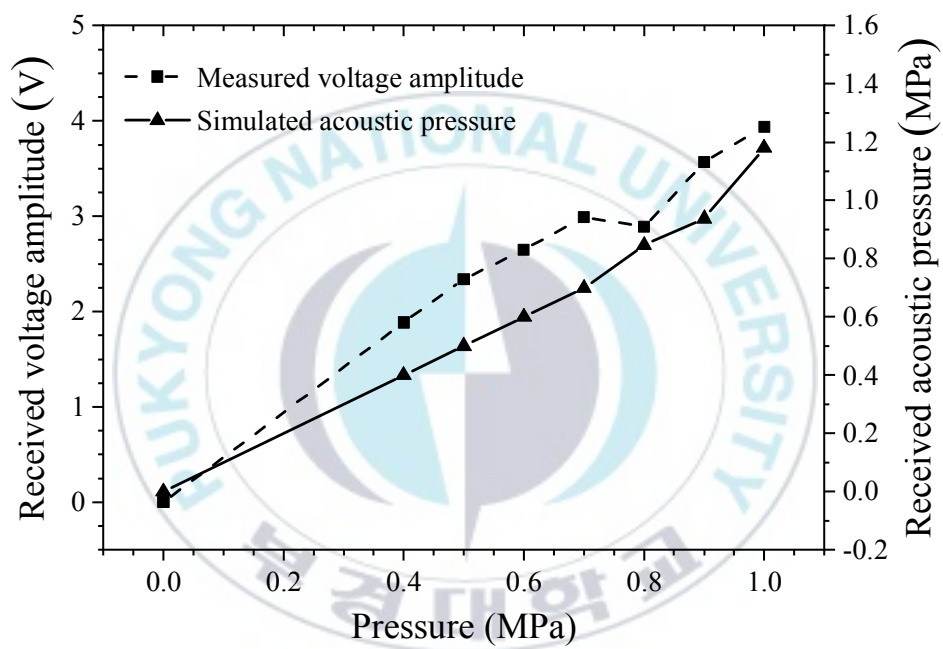


그림 4-4. 수신 전압진폭과 음압

다. 측정된 음향 특성과의 비교

수치해석법을 사용하여 시료 내부의 모습을 살펴보면 그림 4-5와 같다. 본 연구에서 제안한 방법인 정압과 초음파를 인가하였을 경우의 시료 내부모습을 의미한다. 30.44 kHz의 공진주파수를 인가하였을 경우의 음압분포를 나타내는 것이며 그 중, 위의 그림은 정압이 0.5 MPa일 때의 모습이며 아래는 0.9 MPa일 때의 모습이다. 다음 그림에서 알 수 있듯이, 위의 그림인 정압이 0.5 MPa일 경우보다 아래 그림인 0.9 MPa일 경우 파장의 길이가 길다는 것을 알 수 있다. 이를 그림 3-5의 정압에 따른 음속을 통하여 구한 파장과 비교해보면 표 4와 같다. 측정된 파장은 $\lambda = c/f$ 를 이용하여 구하며 수치해석방법은 30.44 kHz의 공진주파수를 이용하며, 실제 측정방법은 28.80 kHz의 공진주파수를 이용한 결과이며, 0.4 MPa부터 1.0 MPa까지 변할 때의 파장을 나타낸 표이다. 정압이 증가할수록 파장이 커짐을 알 수 있다. 또한, 수치해석방식과 실제 측정결과 파장의 경향이 비슷함을 확인할 수 있으며 파장을 이용하여 음속을 구하면 그림 4-6과 같다. 수치해석 방식으로 구한 음속이 실제 계산결과 음속보다 평균 184 m/s 더 큰 것을 알 수 있다. 이는 앞서 언급한 물질의 물성값들이 정확히 일치하지 않는 점과 수치해석법은 완벽하게 균일하다고 가정한 경우이기 때문에 실제 계산 결과와 다르게 나타난다.

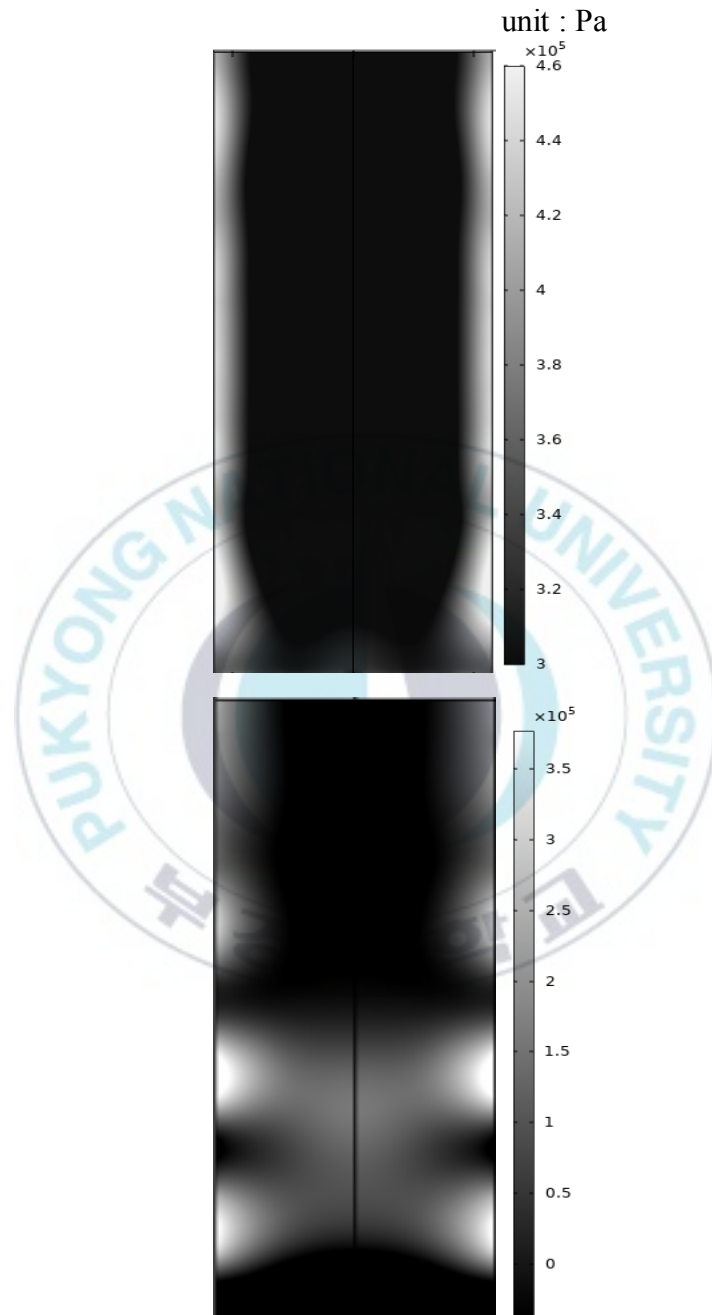


그림 4-5. 수치해석법을 이용한 시료 내부의 음압 분포
가해진 정압 : (위) 0.5 MPa, (아래) 0.9 MPa

표 4. 수치해석법을 이용한 충전된 시료의 파장 비교

Pressure (MPa)	Wavelength λ (mm)	
	Simulation (Driving frequency : 30.44 kHz)	Measurement (Driving frequency : 28.80 kHz)
0.4	12.48	11.72
0.5	15.40	12.54
0.6	17.45	13.56
0.7	24.88	19.52
0.8	29.33	28.13
0.9	34.41	23.88
1.0	37.63	36.82

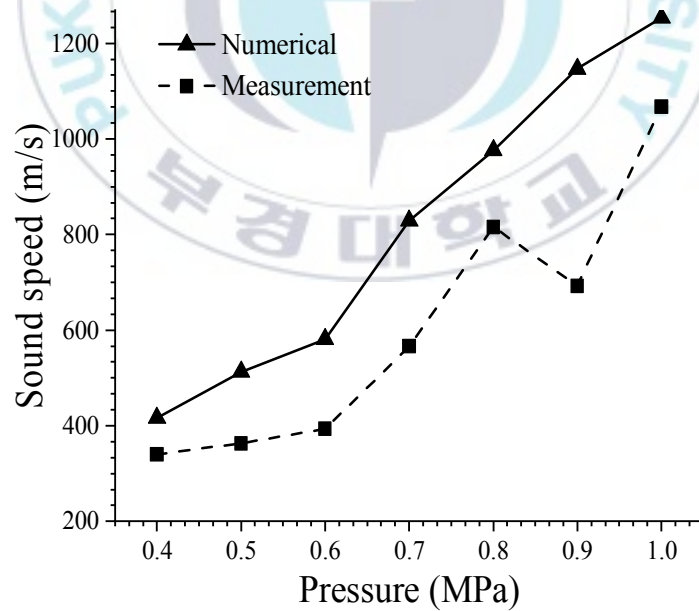


그림 4-6. 수치해석법을 이용한 정압에 따른 음속 비교

V. 분광분석법을 이용한 감마계측

양성자, 중성자로 이루어진 원자핵은 그 비율에 따라 안전한 원자핵을 만들기도 하지만 불안정한 원자핵을 만들기도 한다. 불안정한 원자핵은 알파입자, 전자, 감마선, X선 등을 내놓고 안전한 원자핵으로 바뀌게 되며, 이 때 방출한 물질들을 방사선 (radiation) 이라고 한다. 또한, 방사선을 방출하여 원자핵이 다른 원자 핵종으로 바뀌는 능력을 방사능 (radioactivity) 이라고 한다. 최근, 인간에 대한 방사능을 의미하는 환경방사능에 관한 관심이 날로 증가하고 있다. 따라서 이를 감시하고 확인하는 과정 역시 관심이 증가하고 있다. 그러므로 인간에 대한 방사능을 의미하는 환경방사능 시료의 정확한 방사능 측정이 필요하다. 토양, 물, 공기, 돌과 같은 환경방사능 시료 중 토양과 같은 고체 상태의 방사성 시료의 경우, 정해진 표준용기에 시료를 충전 후, HPGe를 사용하여 방사선 시료를 계측한다[24]. 이 때, 정해진 표준용기에 가능한 한 많은 시료를 넣는 것이 좋다. 이는 시료의 양이 많으면 많을수록 방사성 핵종 (radionuclide) 의 발견확률이 높아지기 때문이다. 기존의 환경방사능 시료를 충전하는 방법으로는 정해진 표준용기에 아크릴 봉을 이용하여 사람의 완력에 의해 시료를 충전한다. 이와 같은 기존의 방법은 사람의 완력에 의존하기 때문에 충전된 시료의 밀도가 불균일하다. 또한, 매번 시료를 충전함에 있어 그 양이 일정치 않기 때문에 토양 시료를 계측할 경우 그 값은 다르게 나온다. 따라서, 정해진 용기에 더 많은 양의 시료를 넣으며, 충전된 시료의 밀도를 균일하게 하기 위하여 초음파를 이용하여 환경방사능 시료를 충전하는 방법을 제안하고자 한다.

V-1. HPGe 검출기

감마 핵종분석기는 고순도 저마늄 방사선 검출기 (HPGe 검출기) , 다중과고분석기, 증폭기, 고전압공급기, 컴퓨터 및 주변기기로 구성되어 있다. 방사성 동위 원소들은 고유한 에너지의 감마선을 방출한다. 따라서 에너지를 측정하여 그 에너지를 방출하는 동위 원소의 종류와 방사능을 역으로 알 수 있다. 방출되는 에너지들은 감마선 분광 분석법을 통하여 검출 및 분석될 때, 에너지 스펙트럼을 생성하며, 이를 통해 감마선 방출 핵종과 방사선 양을 관측할 수 있다. 특히, HPGe 검출기는 다른 검출기들에 비해 에너지 분해능이 우수한 특징을 가지고 있다. 10 cm 두께의 납으로 된 벽을 가진 실린더에 충전된 시료를 배치시키며, 실린더의 외부 금속벽은 장비 밖에서 생성되는 감마선 광자를 차폐하여 검출기를 보호한다. 이러한 특징을 바탕으로 환경방사능 측정 분야에서 보편적으로 널리 사용되고 있다[25].

V-2. 토양 시료의 방사성 측정

주위에서 흔히 구할 수 있는 토양 시료를 채취하여 분쇄기를 이용하여 토양 시료를 고르게 분쇄한다. 그 후, 건조기를 이용하여 120 °C의 고온에서 10시간 건조시킨다. 그 후, 토양 시료의 방사선 계측을 위해서는 직경은 50.34 mm이며 높이는 60.38 mm인 정해진 표준용기에 토양 시료를 충전한다. II장의 그림 2-6과 같은 방법으로 토양 시료를 정해진 높이 50.00 mm 가 될 때까지 용기 안에 둔다. 그 후, 0.5 MPa의 정압과 초음파를 인가하여 시료를 충전한다. 그 후, 다시 초기높이 50.00 mm까지 시료를 넣은 후 충전하는 과정을 최종 높이가 초기높이가 될 때까지

반복한다. 이 때, 트랜스듀서로부터의 과열과 용기에 의해 형성된 정재파로 인한 불균일한 충진을 방지하기 위해 진동자는 30초만 구동한다. 이와 같이 기존의 방법으로 충진한 토양시료와 제안된 방법으로 충진한 토양시료를 HPGe 검출기에 넣고 15만초 계측한다.

V-3. 결과 및 논의

위와 같은 방법으로 충진된 토양 시료는 HPGe 검출기를 이용하여 분광분석법으로 시료를 계측하며 그 결과는 그림 5-1과 같다. 그림 5-1은 토양 시료의 방사성 계측 결과 에너지 준위에 따른 검출빈도를 의미하는 카운트를 나타낸다. 에너지 준위에 따른 카운트란 방사능 핵종을 발견할 확률을 의미하며 카운트가 높다는 것은 그만큼 발견할 확률이 높다는 것을 의미한다. 그림에서 빗금은 본 연구에서 제안한 초음파를 이용하여 충진한 방사능 시료의 계측 결과를 나타내고 있으며, 검은색은 기존의 방법인 정압만을 가했을 경우의 방사능 시료의 계측 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이, 초음파를 이용하여 충진한 경우, 방사능 핵종의 카운트 수가 더 큰 것을 알 수 있다. 예를 들어, 238 keV의 에너지 준위를 가지고 있는 Pb-212의 경우 정압과 초음파를 이용하여 충진할 경우 4205의 카운트 수를 가지지만 정압만을 가했을 경우 4037의 카운트를 가진다. 또한, 154 keV의 에너지 준위인 Ra-223의 경우 정압만을 가하여 충진한 경우 나타나지 않았지만, 초음파를 이용하여 충진한 경우 432의 카운트가 나타나는 것을 알 수 있다. 이와 같이 기존의 방법으로는 발견되지 않는 방사성 핵종이 초음파를 이용하여 충진 할 경우 발견될 수 있다.

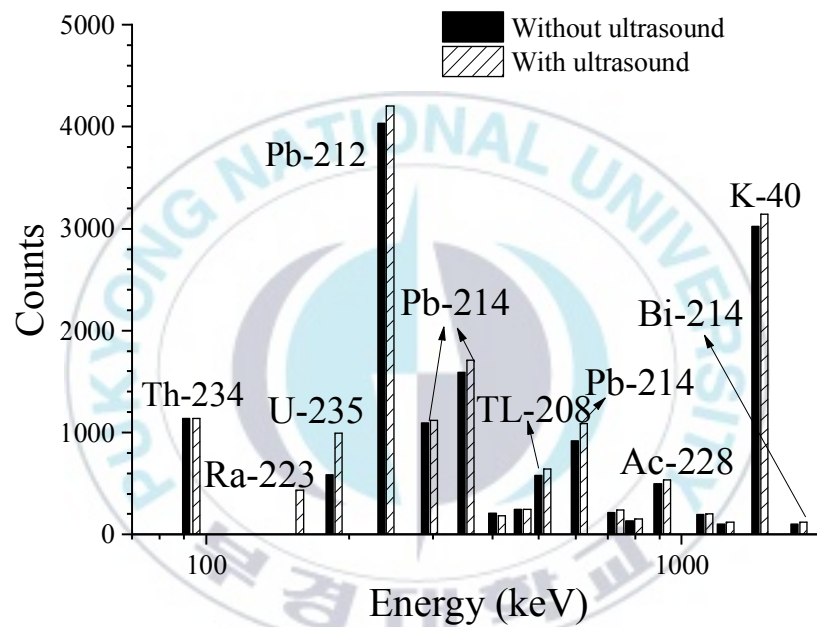


그림 5-1. 에너지 준위에 따른 카운트

VI. 결론

본 연구에서는 초음파에 의해 분체 시료가 충전될 경우의 이론적 해석을 제안하며 초음파를 이용하여 시료를 충전할 경우의 최적 조건을 찾는다. II장에서는 분체 시료의 높이를 다르게 하여 초음파의 효과에 의한 최적 높이를 확인한다. 분체 시료의 안식각을 측정하여 구한 안센 계수를 바탕으로 임의의 높이에서의 압력을 안센 방정식으로 표현하였다. 분체 시료가 용기 내부에 있을 경우 그 응력은 용기 벽면의 영향을 강하게 받게 된다. 이것은 분체자체의 무게 일부가 시료의 입자와 입자 사이의 마찰계수, 용기의 벽면과 시료 입자 사이의 마찰계수들에 의한 마찰력에 의해 지지되고 있기 때문이다. 만약 트랜스듀서로부터 방사된 초음파가 시료에 인가되면 초음파의 진동에 의해 마찰계수가 감소하게 된다. 결과적으로 마찰계수가 감소하게 되면 전체적인 마찰력이 감소하여 시료의 추가적인 충전이 일어난다. 28.80 kHz의 공진주파수를 가지며 음향강도가 3793 W/m²인 란쥬반 타입의 초음파 트랜스듀서를 이용하여 시료를 충전할 경우 정압만을 가하여 충전한 경우보다 마찰계수가 3배 감소하며 줄어든 마찰계수에 의해 충전되는 질량이 약 10% 더 증가함을 알 수 있었다. 또한, 초음파를 이용하여 시료를 충전할 경우의 최적 높이를 찾기 위하여 높이에 따른 음향 특성을 비교하였다. 초기높이에 따른 음속의 경우 3.5 cm에서 약 12% 더 빨라졌음을 알 수 있었고 이를 통해 주어진 범위에서 최적의 높이는 3.5 cm임을 알 수 있다. III장에서는 초음파에 의한 정압에 따른 마찰계수의 변화를 확인하였다. 정압에 무관하게 항상 유효 마찰계수감소의 감소 효과는 1이 넘었으며 이를 통해 정압이 커지더라도 초음파를 이용하여 충전한 경우의 마찰계수가 더

작다는 것을 확인하였다. 즉, 초음파에 의해 감소되는 마찰계수는 정압에 상관없이 항상 작은 것을 알 수 있다. 또한, 초음파를 이용하여 시료를 충전할 경우 최적의 정압 조건을 찾기 위해 정압에 따른 음속을 살펴보면 정압이 증가함에 따라 음속 역시 커짐을 알 수 있다. 이를 통해 정해진 범위내에서 정압이 클수록 충전 효율이 높아짐을 알 수 있다. IV장에서는 수치해석법을 이용하여 시료가 충전되는 과정에서의 내부모습을 시각적으로 확인하며 완벽하게 균일하다고 가정한 시료의 음향 특성을 확인하였다. 충전된 시료 내부의 음속을 비교하여 실제 실험과의 차이를 알아볼 수 있는데, 수치해석을 이용하여 완벽하게 균일하다고 가정한 시료의 음속이 초음파를 이용하여 충전한 시료의 음속보다 184.62 m/s 더 큰 것을 알 수 있다. 더 크게 나왔다. V장에서는 본 연구에서 제안한 방법의 활용 중 하나로 환경방사능 시료를 실제로 계측하였다. 이를 위해 본 연구에서 제안한 방법과 기존 방법의 계측 결과를 비교하여 제안된 방법의 유효성을 검증하였다. HPGe 계측기를 통하여 계측된 시료의 에너지 준위에 따른 카운트 수를 비교해보면 제안된 방법의 경우 카운트 수가 더 높게 나오는 것을 알 수 있다. 또한, 기존의 방법으로는 검출되지 않는 핵종이 제안된 방법을 이용하면 검출됨을 확인하였다. 이를 통해 방사능 핵종을 발견할 확률이 높다는 것을 알 수 있었으며, 이를 통하여 부피가 정해져 있는 용기일지라도 제안된 방법을 이용하면 더 많은 핵종을 발견할 확률이 높다는 것 또한 확인할 수 있었다. 이와 같이 초음파를 이용하여 시료를 충전할 경우 충전 효과가 크다는 것을 알 수 있으며 초음파를 이용하였을 경우의 최적 조건을 바탕으로 환경방사능 계측뿐만 아니라, 약의 정제, 세라믹, 금속 야금에도 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] E. Emeruwa, J. Jarrige, J. Mexmain, M. Billy, and K. Bouzouita, "Powder compaction with ultrasonic assistance," *Journal of materials science*, 25(2), 1459~1462 (1990).
- [2] A. Feeney, S. Sikaneta, P. Harkness, and M. Lucas, "Ultrasonic compaction of granular geological materials," *Ultrasonics*, 76, 136-144 (2017).
- [3] V. Fartashvand, A. Abdullah, and S. Sadough Vanini, "Effects of high power ultrasonic vibration on the cold compaction of titanium," *Ultrasonics sonochemistry*, 36, 155-161 (2017).
- [4] J. Tsujino and H. Suzuki, "Ultrasonic vibration press of powder using 20 kHz upper and lower vibration punches and a vacuum compacting die," *Japanese Journal of Applied Physics*, 31(S1), 290 (1992).
- [5] M. Levina and M. Ribinstein, "The effect on ultrasonic vibration on the compaction characteristics of paracetamol," *Journal of pharmaceutical sciences*, 89(6), 705-723 (2000).
- [6] M. Millan-Jimenez, E. Galdon, C. Ferrero, and I. Caraballo, "Application of ultrasound-assisted compression in pharmaceutical technology. Design and optimization of oral sustained-release dosage forms," *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 42, 119-125 (2017).
- [7] P. More, K. Khomane, and A. K. Bansal, "Flow and compaction

- behavior of ultrafine coated ibuprofen,” *International journal of pharmaceutics*, 441(1-2), 527-534 (2013).
- [8] A. Michrafy, D. Ringenbacher, and P. Tchoreloff, “Modelling the compaction behaviour of powders : application to pharmaceutical powders,” *Powder Technology*, 127(3), 257-266 (2002).
- [9] C. Wu, O. Ruddy, A. Bentham, B. Hancock, S. Best, and J. Elliott, “Modelling the mechanical behaviour of pharmaceutical powders during compaction,” *Powder Technology*, 152(1-3), 107-117 (2005).
- [10] O. Khasanov, Y. Pokholkov, Y. Ivanov, L. Ljubimova, and A. Makeev, “Effect of ultrasonic compaction of nanopowder on structure and fracture character of zirconia nanoceramics,” *Fracture Mechanics of Ceramics*, 505-532 (2002).
- [11] S. Sulisty, S. Arifin, and S. Mahzan, “The effect of pretreatment powder using ball mill and ultrasound on the properties of single cell solid oxide fuel cell,” *Applied Mechanics and Materials*, 315, 972-976 (2013).
- [12] J. Kim, J. Kim, J. Jung, M. Kim, and K. Ha, “Concentration of liquid sample for gamma-ray spectroscopy with ultrasonic nebulization,” *Japanese Journal of Applied Physics*, 54, 7S1 (2015).
- [13] K. Wong, G. Brown, and V. Noshkin, “A rapid procedure for plutonium separation in large volumes of fresh and saline water by manganese dioxide coprecipitation,” *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 42(1), 7-15 (2010).

- [14] Y. Fajardo, J. Avivar, L. Ferrer, E. Gomez, M. Casas, and V. Cerda, "Automation of radiochemical analysis by applying flow techniques to environmental samples," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 29(11), 1399-1408 (2010).
- [15] E. Emeruwa, J. Jarrige, J. Mexmain, M. Billy, and K. Bouzouita, "Powder compaction with ultrasonic assistance," *Journal of Materials Science*, 25(2), 1459~1462 (1990).
- [16] H. Cha, K. Nakamura, "3P-33 Analysis of densification mechanism under ultrasonic compaction using force balance model," In *Proceeding of Symposium on Ultrasonic Electronics*, 31, 521-522 (2010).
- [17] R. Heckel, "Density-pressure relationships in powder compaction," *Trans Metall Soc AIME*, 221(4), 671-675 (1961).
- [18] D. Bagster, "A note on the pressure ratio in the janssen equation," *Powder Technology*, 4, 235-237 (1971).
- [19] 정혜윤, "감마핵종분석기(HPGe)를 이용한 부산금정산지역 환경방사능 분석," 부산대학교 대학원 석사학위 청구 논문, (2016).
- [20] A. Suzuki, M. Kihara, Y. Katasumata, N. Kikuchi, and J. Tsujino, "Configurations of ultrasonic motors using multiple longitudinal transducers," *IEEE Ultrasonics Symposium*, 3, 2267-2270 (2004).
- [21] H. Cha, S.Jeon, K. Kim, and K. Nakamura, "A factors affecting compressibility of ultrasonic compaction for high efficiency electrical motor core fabricated soft magnetic composite," *2009 International Conference on Electrical Machines and Systems. IEEE*, 1-4 (2009).

- [22] P. Sancin, O. Caputo, C. Cavallari, N. Passerini, L. Rodriguez, M. Cini, and A. Fini, "Effects of ultrasound-assisted compaction on ketoprofen/eudragit® S100 mixtures," *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 7(3), 207-213 (1999).
- [23] V. Kumar and I. Hutchings, "Reduction of the sliding friction of metals by the application of longitudinal or transverse ultrasonic vibration," *Tribology International*, 37(10), 833-840 (2004).
- [24] J. Kim, J. Kim, J. Jung, M. Kim, and K. Ha, "Concentration of liquid sample for gamma-ray spectroscopy with ultrasonic nebulization," 54, 7S1 (2015).
- [25] 김수현, "교차분석 시료를 이용한 HPGe 검출기의 동시합성효과 평가," 부경대학교 대학원 석사학위 청구 논문, (2017).