

초음파 센서의 1차 정합층 두께에 따른 가스탱크 미세누설 수신특성

서원준¹ · 손성진² · 임석연^{3*}

¹충남대학교 대학원 기계공학과 박사과정생
²충남대학교 대학원 융복합시스템공학과 석사과정생
³충남대학교 기계·재료공학교육과 부교수

Gas Tank Microleakage Reception Characteristics According to Thickness of the First Matching Layer of Ultrasonic Sensor

Wonjun Seo¹, Seongjin Son² and Seokyeon Im^{3*}

¹Ph.D. Student, Graduate School, Dept. of Mechanical Engineering, Chungnam National University

²Master Student, Graduate School, Dept. of Convergence System Engineering, Chungnam National University

³Associate Professor, Dept. of Mechanical and Materials Engineering Education, Chungnam National University

(Received August 18, 2021 ; Revised September 5, 2021 ; Accepted September 7, 2021)

Abstract – Ultrasonic sensors show various reception characteristics based on the density of the measurement medium; hence, they are used in various fields to benefit from the characteristics of ultrasonic signals. In this study, the reception characteristics according to the thickness of the first matching layer are compared and analyzed for application to gas tank microleak detection. Accordingly, three types of sensors are manufactured with varying thicknesses of the first matching layer, namely 4.8 mm, 5.1 mm, and 5.5 mm; further, a direct measurement method is used wherein the sensor is attached to the inside of the chamber. Experiments are conducted to observe the phase change due to microleakage, which is the most linear in the sensor with the 4.8 mm thick first matching layer. This is assumed to be the result of stable signal transmission and reception with little phase deviations over time because the first matching layer is closest to the ultrasonic wavelength. The other sensors show nonlinear results with increasing thickness of the first matching layer. Through this study, it is found that appropriately selecting the thickness of the first matching layer of the ultrasonic sensor can greatly influence sensor reliability.



© Korean Tribology Society 2021. This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License(CC BY, <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction of the work in any medium, provided the original authors and source are properly cited.

Keywords – gas density(가스 밀도), gas fuel(가스 연료), gas storage(가스 저장소), microleakage(미세 누설), ultrasonic sensor(초음파 센서)

Nomenclature

*Corresponding author: Seokyeon Im
Tel: +82-42-821-8655, Fax: +82-42-821-8732
E-mail: imsy@cnu.ac.kr
<http://orcid.org/0000-0002-0187-4397>

Z_L : Acoustic Impedance (MRayl)
 ρ : Density (g/cm^3) (밀도)
 C : Velocity of sound (mm/s) (음속)

T : Transmission coefficient (투과계수)

R : Reflection coefficient (반사계수)

1. 서 론

현대사회에서 화석연료의 사용은 불가피한 실정이다. 하지만 전 세계적으로 환경오염, 석유 자원의 고갈 등의 문제가 대두되고 있으며, 탄소 중립 및 배출가스 규제 또한 강화되고 있다. 이러한 이유로 천연자원의 효율적인 사용 및 대체에너지에 대한 관심과 연구가 증가하고 있다[1].

천연가스는 유해가스 저감 및 높은 발열량을 가지며 Particular Matters(PM), NO_x, CO₂의 배출이 적은 장점이 있다. 이러한 천연가스는 저장형태에 따라 Compressed Natural Gas(CNG), Liquefied Natural Gas(LNG), Adsorbed Natural Gas(ANG) 등으로 구분되며, 이중 CNG는 차량에 접목되어 사용되고 있다[2].

대체에너지 중 수소는 연료전지 차량의 에너지원으로 사용되고 있으며, 기존의 석유 연료와 달리 배출가스가 발생하지 않아 친환경 에너지원으로 가장 적합하다[3].

위의 두 가지 에너지원의 경우 기체 형태로 저장 탱크에 저장된다. 수소연료전지의 경우 700~800bar의 초고압으로 압축하여 저장되며, CNG의 경우 200bar의 고압으로 충전하여 사용된다[4]. 그러나 수소 및 천연가스는 기존의 석유자원에 비해 폭발위험계수가 높은 인화성 기체로 사회적으로 부정적인 인식이 높다[5]. 이러한 인식 개선을 위해서는 정밀도 높은 연료 레벨 계측 및 미세누설 감지 시스템의 개발은 필수적인 요소이지만 이에 대한 연구는 미비한 실정이다.

현재 고압가스 연료의 연료량 및 미세누설 계측에는 압력센서의 사용이 의존적이다. 하지만 압력센서의 경우 연료라인의 레귤레이터에 부착되어 있다. 이러한 이유로 온도, 습도와 같은 환경조건 변화에 따라 오차가 발생한다.

따라서, 가스 연료의 정확한 연료량 및 미세누설 여부를 판단할 수 있는 새로운 계측방안의 제시가 필요하다.

초음파는 측정 매질의 밀도에 따라 다양한 수신특성을 보인다. 이러한 초음파의 특징을 이용하여 통신기기, 의료기기, 액추에이터, 트랜스듀서 및 정밀 센서와 계측기기 등 광범위하게 사용되고 있다[6]. 또한, 비파괴 검사(Non-destructive testing, NDT)[7], 구조적 상태 모니터링(Structural health monitoring, SHM) 시스템[8], 가스 누출 감지 시스템[9] 분야에서 사용되고 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 초음파의 특성을 이용하여 기존의 압력센서 대신 가스탱크의 미세누설 측정

에 초음파 센서를 사용하고자 하였다.

음파는 물리적 진동에 의해 매질을 구성하는 입자의 압축 변형에 대한 탄성에 의해 발생하는 파동을 말한다. 음파는 진동의 방향에 따라 종파, 횡파, CODA wave, 표면파로 나눌 수 있다. 또한, 주파수에 따라 세 가지로 분류할 수 있다. 20 Hz 미만의 진동 주파수는 저주파, 20 Hz ~20 kHz 범위의 주파수는 가청 주파수, 20 kHz 이상의 주파수는 초음파로 정의된다[10]. 초음파는 파동 에너지로 분산, 회절 등의 현상이 발생하며, 다른 매체로 이동하는 과정에서 일부 에너지의 손실이 발생할 수 있다. 초음파는 광파와 유사하게 이동하지만 진공에서 이동할 수 있는 광파와는 다르게 탄성 매체가 필요하다[10].

이러한 초음파를 인공적으로 발생시키기 위해서는 높은 진동수의 발음체가 필요하다. 발음체는 물체의 전기적인 성질을 이용하여 물체의 양단에 고주파 교류 전압을 인가해 물체의 진동을 통해 초음파를 발생시킨다.

현재 가장 보편적으로 사용되는 발음체는 티탄산납(PbTiO₃)과 메타니오브산납(PbNb₂O₆)을 일정한 비율로 혼합하여 고온에서 소결해 만든 티탄산지르콘산납(Piezoelectirc transducer, PZT)이다[11].

PZT는 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 변형시키는 정압전현상, 전기적 에너지를 기계적인 에너지로 변형시키는 역압전 현상을 일으키며 상호변환이 가능하고 두 가지 현상을 압전효과(Piezoelectric Effect)라 한다.

초음파는 전파과정 중 매질과 매질 사이의 경계층에서 투과, 반사하며 진행한다. 이때 투과계수 및 반사계수는 음향 임피던스에 의해 결정되며, 음향 임피던스는 매질의 밀도에 음속을 곱한 값으로 매질의 밀도에 의해 결정되는 변수이다. 따라서, 높은 효율의 초음파 센서의 설계에 있어 음향 임피던스를 고려한 정합층의 선정은 중요한 요소로 작용한다.

따라서, 본 논문에서는 초음파 센서를 가스탱크 미세누설 감지 시스템에 적용하고자 초음파 센서의 1차 정합층의 두께에 따른 가스탱크 미세누설 수신특성을 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 초음파 센서

초음파 센서 제작에 있어 먼저 압전소자를 선정하였다. 압력, 온도, 진동수, 제작 용이성을 고려하여 메트시스사의 MS-21(BaTiO₃, 디스크형식)을 사용하였다.

초음파 센서의 설계에 있어 에너지의 감쇠를 최소화하기 위해 음향 임피던스를 고려한 정합층의 선정은 중

요한 요소로 작용한다. 음향 임피던스는 음파의 진행을 방해하지는 성질을 의미하며[12] 다음과 같이 계산된다[13].

$$Z_L = \rho \times C \quad (1)$$

여기서, Z_L 은 음향 임피던스, ρ 는 밀도, C 는 음속을 의미한다.

초음파 에너지가 매질 면에 방사될 때 투과, 반사가 발생하는데 이는 두 매질의 임피던스 차에 의해 결정된다. 이때 반사계수는 다음과 같이 계산된다[14].

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 - Z_2} \quad (2)$$

여기서, R 은 반사계수, Z_1 과 Z_2 는 각각의 음향 임피던스를 의미한다.

반사계수와 투과계수의 합은 항상 1이기 때문에 투과계수는 다음과 같이 계산된다[14].

$$T = 1 - R = 1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (3)$$

여기서, T 는 투과계수를 의미한다.

본 연구에 사용된 초음파 센서는 두 가지 정합층으로 이루어져 있기 때문에 1차 정합층을 통과한 음파 중 일부는 2차 정합층의 경계면에서 반사되어 돌아온다. 이때 왕복 투과율은 다음과 같이 계산된다[14].

$$T_r = 1 - R = 1 - \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

여기서, T_r 은 왕복 투과율, T_1 과 T_2 는 각 정합층의 투과계수이다.

이에 본 연구에 사용된 초음파 센서의 1차 정합층은 Chemical Wood(CW, SP-170), 2차 정합층은 Etylene-vinyl acetate(EVA)를 사용하였다. 2차 정합층의 두께는 모든 타입의 센서에서 2 mm로 동일하게 제작하였다.

1차 정합층 두께의 적절한 선정 또한 초음파 센서 설계에 있어 중요한 요소로 작용한다. 본 연구와 같이 공기 매질을 측정하는 초음파 센서의 1차 정합층은 주파수 파장 길이의 1/4에 해당하는 두께로 선정하는 것이 가장 이상적이다[15]. 하지만, 주파수 파장 길이의 1/4 두께로 정합층을 가공하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 1차 정합층의 두께를 파장 길이에 가까운 4.8 mm로

Table 1. Property of chemical wood(SP-170)

Material properties	Value
Density (g/cm ³)	0.65
Shore D hardness	75±2
Compressive strength (MPa)	51
Tensile strength (MPa)	37
Flexural strength (MPa)	50
Flexural modulus (MPa)	2,149
Acoustic impedance (MRayl)	1.85

Table 2. Property of ethylene-vinyl acetate

Material properties	Value
Density (g/cm ³)	0.92
Shore D hardness	67
Tensile strength (MPa)	51.0
Flexural modulus (MPa)	503
Acoustic impedance (MRayl)	1.69

제작을 하였으며, 두께에 따른 경향을 파악하기 위해 5.1, 5.5 mm 정합층을 추가적으로 제작하였다. 본 연구에 사용된 초음파 센서 정합층의 물성치는 Table 1과 2에 나타내었다.

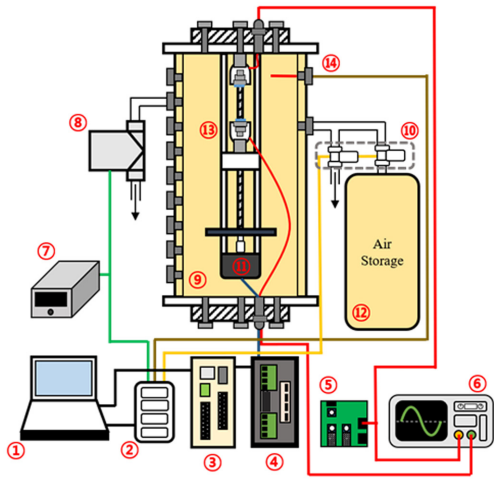
PZT는 교류 전압을 인가할 경우 변형과 복원을 반복하면서 초음파를 발생한다. 따라서 초음파 방사면 반대 방향으로도 초음파를 발생시킨다. 이러한 반대 방향의 초음파를 흡음하지 않으면 센서 내부의 진동으로 인해 신뢰성 있는 결과를 기대하기 어렵다.

따라서, 본 연구에 사용된 초음파 센서에는 코르크와 고무를 겹층으로 쌓아 방사면 반대 방향에 부착함으로써 반대 방향으로 발산하는 초음파를 흡음하였다.

2-2. 실험장치

현재 사용되고 있는 비금속 라이너와 탄소섬유 복합 재료로 이루어진 이중재질의 Type-4 탱크를 개조할 수 없는 한계로 인해 임의로 미세누설을 발생시킬 수 있는 챔버를 용량에 초점을 맞춰 제작하였다. CNG 차량에 사용 중인 연료 탱크의 용량은 64~70 L로 본 연구에 사용된 챔버는 이를 모사하여 약 67 L로 제작하였으며, 챔버에 타공된 구멍을 통해 Mass Flow Controller(MFC)를 이용하여 임의 미세누설을 발생시켰다.

실험장치의 구성요소는 크게 3가지로 나눌 수 있다. 송수신 센서 간 거리를 조절하기 위해 리니어모터가 부착되어있는 거리제어부, 일정한 체적 챔버 내부에 압축공기를 충전하기 위한 압축공기 충전부, 센서 및 실험장비



- | | |
|-----------------|------------------------|
| 1. Computer | 8. MFC |
| 2. cDAQ | 9. Chamber |
| 3. Controller | 10. Solenoid valve |
| 4. Driver | 11. Stepping motor |
| 5. T-1 board | 12. Air storage |
| 6. Oscilloscope | 13. Temperature sensor |
| 7. MFC unit | 14. Ultrasonic sensor |

Fig. 1. Experimental system.

에 전기적 신호값을 제어할 수 있는 제어부로 구성하였다. 초음파 센서의 제어는 Airmar사의 T-1 Board를 사용하여 초기전압강도, 주파수, 펄스를 고정하였으며, 이외의 제어는 Labview를 이용하여 cDAQ로 제어하였다. 수신 초음파의 특성은 Keysight사의 DSO1072B 오실로스코프를 사용해 데이터를 수집하였다. Fig. 1은 실험장치의 사진이며, 실험에 사용된 장치의 사양을 Table 3에 표시하였다.

2-3. 수신신호 분석을 위한 필터 적용

노이즈는 보편화된 문제로 다양한 요인으로 인해 발생하며, 특정 신호를 불분명하게 할 수 있다.

본 연구의 경우 송신 초음파 센서에서 매질을 통과해 수신 초음파 센서로 파동에너지가 전달되는 과정을 거친다. 이러한 과정 중 내부 기체의 유동으로 인해 불필요한 신호도 동반하게 된다. 따라서 이러한 노이즈 신호를 제거할 필요가 있다.

노이즈는 주파수 차단 영역에 따라 구분된다. 본 연구에

Table 3. Specification of experimental equipment

Item	Specification
Chamber	Volume : 67 L
	Material : Stainless
Linear motor	Type : Ball-screws
	Rod stroke : 0 ~ 530 mm
Solenoid valve	Pressure range : 0.3 ~ 10 kgf/cm ²
	Rated voltage : AC 220 V 50/60 Hz
Thermocouple	Type : K-type
	Limits of error : 1.1°C or 0.4%
	Temperature range : -200 ~ 1250°C
Oscilloscope	Sampling speed : 1 GSps
	Bandwidth : 70 MHz

서는 f_c (Cutoff Frequency Lower)과 f_h (Cutoff Frequency High) 사이 영역 이외의 주파수를 차단하는 대역통과필터(Band Pass Filter)를 사용하였다.

초음파 센서를 챔버 내부에 부착한 형태로 미세누설 실험을 진행할 경우, 수신 초음파 신호의 수신 전압, Creating point부터 Threshold 지점까지인 Increase area, Threshold 지점부터 감쇠하는 구간인 Decrease area, 울림 영역인 Tail area가 복합적인 변화를 보인다. 따라서 본 연구에서는 신호 변화의 확률 분포를 분석하는데 주로 사용되는 Gaussian Distribution을 이용하여 수신 초음파 신호의 포락선(Envelope) 에너지를 분석하였다.

Gaussian 식을 이용하여 포락선 에너지를 분석하기 위한 식은 다음과 같다[16].

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{(x-x_0)^2}{w^2}} \quad (5)$$

여기서, y_0 는 실험을 통해 얻어진 기초데이터 값, A 는 정규 분포에 대한 면적으로 정의되며 w 는 반치전폭(FWHM, Full Width at Half Maximum)을 자연로그 4의 제곱근으로 나눈 값을 의미한다.

2-4. 실험조건

본 연구에서는 1차 정합층 두께에 따른 미세누설 특성을 분석하고자 하였다. 송신 초음파 센서의 초기 전압은 396 V, 펄스는 3 Hz로 고정하여 실험하였으며, 충전 압력은 5 bar로 고정하였다. 예비 실험을 통해 PZT의 주파수 84.7 kHz에서 원활한 수신 감도를 보이는 것을 확인하였다. 이를 토대로 주파수는 84.7 kHz로 고정하여 실

Table 4. Experimental condition

Parameter	Value
Initial voltage	396 V
Initial frequency	84.7 kHz
Pulse rate	3 Hz
Distance between sensor	85 mm
Charging pressure	5 bar
Micro-leakage flow rate	3.81 Liter/h
Sensor type	4.8, 5.1, 5.5
Experimental start temperature	24.5 ± 0.5°C
Gas type	Air

험을 진행하였다. 초음파 센서의 1차 정합층인 Chemical wood는 주파수 파장 길이를 고려하여 4.8 mm, 5.1 mm, 5.5 mm로 총 3가지 타입의 센서를 이용하여 실험을 진행하였다. 송수신 센서 간 거리는 불감지역인 송신 초음파 신호의 Ringing tail area를 고려하여 85 mm로 설정하였다. 미세 누설량은 챔버에 부착된 Mass Flow Controller(MFC)의 밸브 열림량을 제어하여 3.81 Liter/h로 고정하였다. Table 4에 실험조건을 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 센서 타입 4.8 mm에서의 위상변화 특성

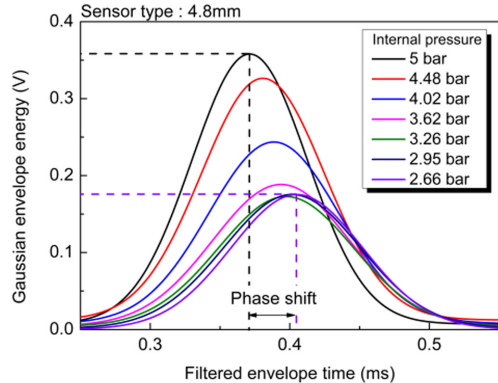
Fig. 2는 미세누설 발생 후 센서 타입 4.8 mm의 수신 초음파 신호의 포락선 신호를 Gaussian distribution으로 Curve fitting한 결과를 나타낸 것이다.

초음파 에너지의 전달과정 중 손실을 최소화하기 위해 센서 간 거리를 가장 가까운 85 mm로 고정하여 실험을 진행한 결과이다.

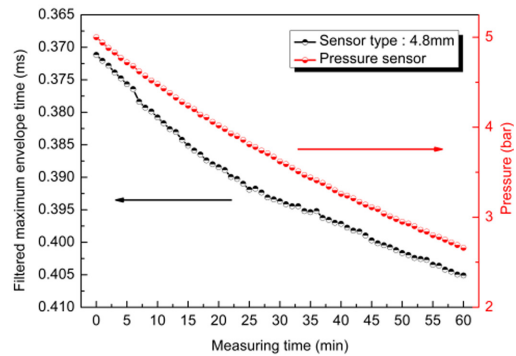
센서 타입 4.8 mm, 초기 충전 압력 5 bar에서의 최고 전압의 시간적 위치는 0.371 ms이며, 미세누설 발생 후 10분이 지난 시점에서는 0.381 ms, 20분 시점은 0.388 ms, 30분 시점은 0.394 ms, 40분 시점은 0.397 ms, 50분 시점은 0.402 ms, 미세누설 종료 시점인 60분에는 0.405 ms를 나타내었다. 0~60분까지 총 0.034 ms 증가하였으며, 10분 간격으로 평균 0.0057 ms씩 증가하였다.

실험결과, 센서 타입 4.8 mm는 내부 압력 변화에 따라 선형적으로 최고 전압을 나타내는 시간적 위치가 증가하였다.

이는 압전소자에 부착된 1차 정합층의 두께가 주파수 파장 길이에 가장 가깝기 때문에 초음파가 정합층을 통과할 때 위상 변화가 적어 안정적으로 내부 밀도 변화에 대응한 결과로 판단된다.



(a) Filtered envelope signal of type 4.8 mm



(b) Phase shift of type 4.8 mm

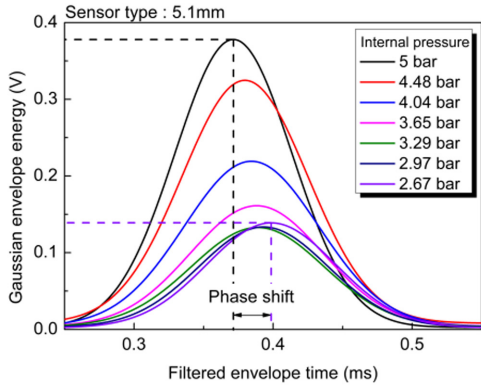
Fig. 2. Phase shift of the sensor type 4.8mm envelope signal filtered through Gaussian distribution.

3-2. 센서 타입 5.1 mm에서의 위상변화 특성

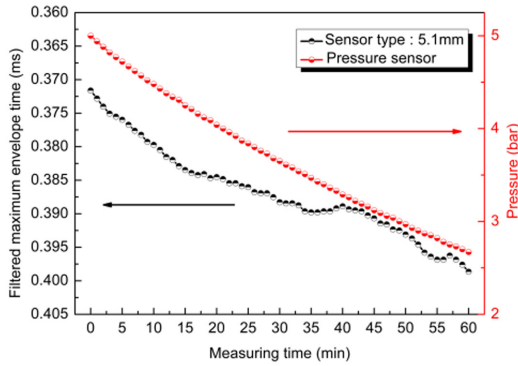
Fig. 3은 미세누설 발생 후 센서 타입 5.1 mm의 수신 초음파 신호의 포락선 신호를 Gaussian distribution으로 신호 처리과정을 거친 결과의 위상변화를 나타낸 것이다. 센서 타입 이외의 조건은 4.8 mm와 동일하게 진행하였다.

센서 타입 5.1 mm, 초기 충전 압력 5 bar에서의 최고 전압의 시간적 위치는 0.372 ms, 미세누설이 발생하고 10분이 지난 시점에서는 0.380 ms, 20분 시점은 0.385 ms, 30분 시점은 0.388 ms, 40분 시점은 0.389 ms, 50분 시점은 0.393 ms, 60분 시점은 0.399 ms로 총 0.027 ms 증가하였으며 평균 0.0045 ms 씩 이동하였다.

센서타입 5.1 mm의 경우 챔버 내부의 압력변화에 따라 수신 최고 전압의 시간적 위치가 센서 타입 4.8 mm 대비 비선형적으로 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 타입 5.1 mm 센서의 경우 1차 정합층의 두께가 주파수 파장 길이보다 두껍게 때문에 초음파가 정합층을 통과할 때 파동의 머루나 골이 아닌 부분에서 통과하게 된다. 이



(a) Filtered envelope signal of type 5.1 mm



(b) Phase shift of type 5.1 mm

Fig. 3. Phase shift of the sensor type 5.1mm envelope signal filtered through Gaussian distribution.

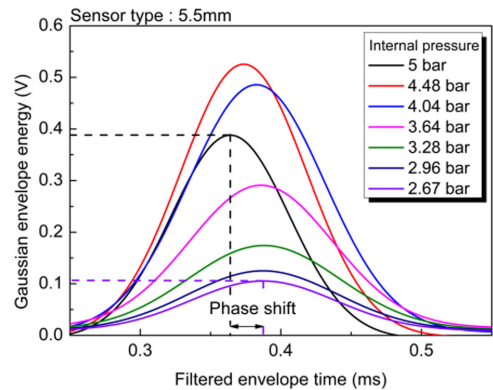
러한 파동의 통과 위치가 마루가 골이 아닌 경우 신호를 안정적으로 송수신 할 수 없으며 일정한 위상을 기대하기 어렵다. 따라서, 센서 타입 5.1 mm를 사용할 경우 챔버 내부 충전량 및 미세누설 감지에는 사용이 어려울 것으로 판단된다.

3-3. 센서 타입 5.5 mm에서의 위상변화 특성

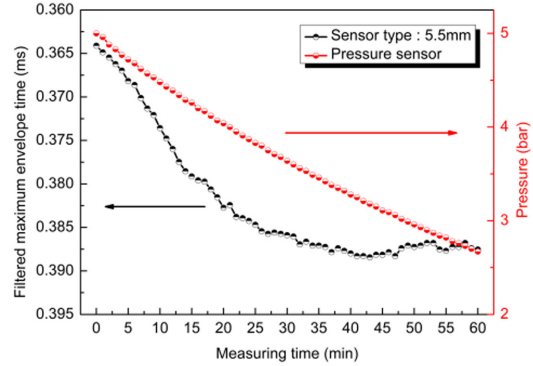
Fig. 4는 미세누설 발생 후 센서 타입 5.5 mm의 수신 초음파 센서의 포락선 신호를 Gaussian distribution으로 신호 처리한 결과를 나타낸 것이다.

센서 타입 5.5 mm, 초기 충전 압력 5 bar에서의 수신 최고 전압의 시간적 위치는 0.364 ms로 나타났으며, 미세누설 종료 시점인 60분에서는 0.388 ms로 나타났다. 총 0.024 ms 증가하였으며, 평균 0.004 ms 씩 이동하였다.

센서 타입 5.5 mm의 경우 다른 센서들에 비해 최고 전압의 시간적 위치는 가장 비선형적으로 변화한 것을 확인할 수 있다. 이는 주파수 파장 길이보다 1차 정합층



(a) Filtered envelope signal of type 5.5 mm



(b) Phase shift of type 5.5 mm

Fig. 4. Phase shift of the sensor type 5.5mm envelope signal filtered through Gaussian distribution.

이 두껍기 때문에 초음파가 정합층을 통과할 때 시간에 따른 위상 변화의 편차가 가장 크고, 신호를 안정적으로 수신하지 못한 결과로 판단된다.

그리고 5.5 mm 타입의 센서의 경우 수신 전압이 미세누설 발생 후 10분 시점까지 증가한 결과를 확인할 수 있다. 이는 초음파의 지향성 측면에서 1차 정합층이 두껍고, 챔버 내부 밀도가 높을수록 기체 매질과 접하는 부분에서 초음파 신호는 넓은 영역으로 발산하게 되는데, 이러한 넓은 영역으로 발산된 초음파 신호가 리니어 모터 레일에 반사되어 미세누설 발생 후 내부 압력 약 4.5 bar 까지 수신 신호에 영향을 준 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 논문에서는 초음파 센서의 1차 정합층 두께에 따른 미세누설 특성을 비교 분석하였다. 연구를 진행하기 위해 고압가스 탱크 용량에 맞춰 챔버를 제작하고 초음

과 센서를 챔버 내부에 부착하는 직접 계측 방식을 사용하였으며, 이러한 실험 과정을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

미세누설 발생 후 초음파 센서로 수신되는 포락선 신호를 Gaussian distribution으로 Curve fitting 한 결과, 위상 변화에 있어 센서 타입 5.1 mm, 5.5 mm는 비선형적인 결과를 보였기 때문에 미세누설 감지용 센서로 사용하기에는 적합하지 않다.

센서 타입 4.8 mm의 경우 챔버 내부 압력변화에 따라 비교적 선형적인 결과를 보였다. 이는 1차 정합층의 두께가 주파수 파장 길이에 가장 가깝기 때문에 시간에 따른 위상 편차가 적고 신호를 안정적으로 송수신 한 결과로 판단된다.

본 연구를 통해, 초음파 센서의 1차 정합층 두께의 적절한 선정은 센서에서 나타나는 신호의 신뢰성에 향상에 큰 영향을 미친다는 것을 확인할 수 있었다. 1차 정합층을 파장 길이의 1/4에 해당하는 두께로 제작을 할 경우, 이상적인 결과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다. 하지만, 현실적으로 가공이 어렵고 정합층의 두께가 두꺼워 질수록 신호의 지향성, 음파가 정합층을 떠날 때 신호간 위상차 문제로 인해 신뢰성 있는 결과를 나타낼 수 없을 것으로 판단된다.

측정 매질의 변화로 인해 음향 임피던스가 변화할 경우, 해당 매질의 음향 임피던스를 고려하여 임피던스 프로파일을 구성 해야 한다[14]. 이러한 임피던스 프로파일을 토대로 적절한 정합층을 선정할 경우, 다른 기체 매질에서도 미세누설 감지센서로 활용할 수 있을것이라 판단된다.

또한, 수신 초음파 센서의 포락선 신호를 Gaussian distribution으로 신호 처리하여 위상 변화에 따른 결과를 계측 방법으로 사용할 경우 내부 압력변화에 따라 선형적인 결과를 얻을 수 있으므로 가스 탱크의 새로운 계측 방식으로 사용할 수 있을 것이라 판단된다.

References

- [1] Ma, F., Wang, Y., Liu, H., Li, Y., Wang, J., Zhao, S., "Experimental study on thermal efficiency and emission characteristics of a lean burn hydrogen enriched natural gas engine", *Int. J. Hydrogen. Energy*, Vol.32, Issue.18, pp.5067-5075, 2007, <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.07.048>
- [2] Kim, J. Y., Park, W. O., Chung, S. S., Ha, J. Y., "The Comparison of Performance and Emission Characteristics between CNG Engine and Gasoline Engine", *Transactions of KSAE*, Vol.11, No.2, pp.16-21, 2003.
- [3] Hames, Y., Kaya, K., Baltacioglu, E., Turksoy, Y., "Analysis of the control strategies for fuel saving in the hydrogen fuel cell vehicles", *Int. J. Hydrogen. Energy*, Vol.43, Issue.23, pp.10810-10821, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.150>
- [4] Veiga, M. R., Mansano, R. D., Silva, R. L., "Injection system for tri-fuel engines with control of power by simultaneous use of CNG and ethanol or gasoline", *Soc. Automot. Eng. Tec. Pap.*, 2010-36-0195, 2010, <https://doi.org/10.4271/2010-36-0195>
- [5] Li, Y., Bi, M., Li, B., Zhou, Y., Hwang, L., Gao, W., "Explosion hazard evaluation of renewable hydrogen/ammonia/air fuels", *Energy*, Vol.159, pp.252-263, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.174>
- [6] Vellekoop, M. J., "Acoustic wave sensors and their technology", *Ultrason.*, Vol.36, Issue.1-5, pp.7-14, 1998, [https://doi.org/10.1016/S0041-624X\(97\)00146-7](https://doi.org/10.1016/S0041-624X(97)00146-7)
- [7] Choi, J. Y., Truong, N. T. P., Pham, V. H., Boc, M. T., Kim, B. G., Oh, J. H., "Fabrication of High Frequency Transducer for Nondestructive Testing", *The J. of the Korean Soc. for Power Syst. Eng.*, Vol.24, No.3, pp.36-42, 2020, <http://doi.org/10.9726/kspe.2020.24.3.036>
- [8] Gao, Z., Huang, T., Schröder, K. U., "Development of a Piezoelectric Transducer-Based Integrated Structural Health Monitoring System for Impact Monitoring and Impedance Measurement", *Appl. Sci.*, Vol.10, Issue.6, 2062, 2020, <https://doi.org/10.3390/app10062062>
- [9] Wang, T., Wang, X., Hong, M., "Gas Leak Location Detection Based on Data Fusion with Time Difference of Arrival and Energy Decay Using an Ultrasonic Sensor Array", *Sens.*, Vol.18, Issue.9, 2985, 2018, <https://doi.org/10.3390/s18092985>
- [10] Cheek, J. D. N., *Fundamentals and Applications of Ultrasonic Waves*, 2nd Edition, pp.1-2, CRC press., 6000 Bronken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742, USA, 2017. (ISBN 978-1-4398-5498-3)
- [11] Lee, J. Y., Oh, H. T., Choi, K., Lee, H. Y., "Effect of the Electrode Type on the Dielectric and Piezoelectric Properties of Piezoelectric PMN-PZT Single Crystals", *J. of the Kor. Ceram. Soc.*, Vol.52, No.1, pp.77-82, 2015, <https://doi.org/10.4191/kcers.2015.52.1.77>
- [12] Fatemi, M., Greenleaf, J. F., "Ultrasound-stimulated vibro-acoustic spectrography", *Sci.*, Vol.280, Issue.5360, pp.82-85, 1998, <https://doi.org/10.1126/science.280.5360.82>
- [13] Tone, M., Yano, T., Saito, K., *Piezoelectric ultrasonic transducers having acoustic impedance-matching layer*, Panasonic Corp., US Patent No. 4,523,122, 1985
- [14] Pedersen, P. C., Tretiak, O., He, P., "Impedance-matching properties of an inhomogeneous matching layer with continuously changing acoustic impedance", *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol.72, Issue.2, pp.327-336, 1982,

<https://doi.org/10.1121/1.388085>

- [15] Alvarez-Arenas, T. E. G., “Acoustic impedance matching of piezoelectric transducers to the air”, *Inst. of Electr. and Electron. Eng. Ultrason. Ferroelectr. and Freq. Control.*, Vol.51, Issue.5, pp.624-633, 2004, <http://doi.org/10.1109/TUFFC.2004.1320834>
- [16] Kim, K. S., Choi, D. S., Im, S. Y., “The application of ultrasonic waves and envelope energies in a closed chamber based on an air/methane mixture”, *Ultrason.*, Vol.91, pp.91-102, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2018.07.009>