

가우스알고리즘에 의한 초음파의 가스연료레벨 계측

김홍주¹, 최두석^{2*}

¹공주대학교 대학원 기계공학과, ²공주대학교 기계자동차공학부

Gaseous Fuel Level Measurement of Ultrasonic Wave based on Gauss Algorithm

Hong-Ju Kim¹, Doo-Seuk Choi^{2*}

¹Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Kongju National University

²Division of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University

요 약 CNG 차량의 경우 압력센서를 이용하여 CNG의 양을 계측하고 있다. 그러나 주변 환경 조건에 따라 정확한 양을 파악하는데 어려움이 있어 운전자에게 불안감을 조성하게 된다. 본 연구는 CNG 연료 시스템에서 CNG의 양을 정밀하게 측정하기 위한 기초 연구로써 CNG 연료량 검출 시스템을 모사하여 측정방법을 제시하고자 한다. 실험은 Type-3의 CNG 탱크에 초음파 센서를 적용한 연료량 검출 모사장치 구현하였다. 그리고 내부의 압력은 압축공기를 이용하여 100 bar에서 0 bar 까지 5 bar 단위로 저감시키면서 초음파 센서의 수신 신호를 검증하였다. 그 결과 탱크 내 압력이 감소함에 따라 초음파 센서의 출력 신호가 감소하는 것을 알 수 있었고, 다소 차이는 있었지만 선형성을 띄고 있는 것을 확인할 수 있었다.

주제어 : 감쇠특성, 외부 부착식, 압축천연가스, 밀도, 압력, 초음파 센서

Abstract The amount of CNG was measured using a pressure sensor in the case of CNG vehicles. However, the current measurement method causes anxiety to the driver because it is difficult to measure the detailed amount of CNG according to various environmental conditions. This study was performed to measure the amount of CNG in CNG fuel system, and presented the method of measurement by simulating the detection system of CNG. In this experiment, a detection simulator with an ultrasonic sensor in CNG tank of Type-3 was designed, and the reception signal of the ultrasonic sensor was verified by reducing the pressure from 100 bars to 0 bars (increment=5 bars) using compressed air. As a result, the output signal voltage of the ultrasonic sensor decreased as the pressure in the tank decreased, and the it was verified that the shape of the graph was linearity.

Key Words : Attenuation characteristic, Clamp-on type, CNG, Density, Pressure Ultrasonic sensor

1. 서론

강화되는 배출가스 규제 및 석유자원의 고갈 문제 등으로 인하여 천연자원의 효율적인 사용과 대체연료 사용에 대한 관심과 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이에 따

라 자동차 연료로서 CO₂ 규제 대응, 석유자원대체 및 초저공해 자동차에 적합한 청정가스 연료의 사용 또한 증가하고 있는 추세이다[1].

천연가스는 풍부한 매장량 및 경제성, 저공해성을 모두 갖춘 연료이다. 그리고 자동차 연료 측면에서 가솔린

*This study was financially supported by the Industrial Core Technology Development Program, No. 10052094, A fuel-gauge development of efficiency for CNG vehicle with leak detections and active safeties, funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MI, Korea).

*Corresponding Author : Doo-Seuk Choi (dschoi@kongju.co.kr)

Received March 2, 2018

Revised April 1, 2018

Accepted April 20, 2018

Published April 28, 2018

엔진과 동일한 연소방식인 불꽃점화엔진에 적합하며, 특히 옥탄가가 높기 때문에 일반적인 가솔린 엔진보다 압축비를 높이고도 노킹 없이 운전이 가능하여 열효율과 출력향상을 도모할 수 있다[2,3].

저장방법에 따라 천연가스는 약 200~250 bar 로 압축하여 저장되는 CNG (Compressed Natural Gas), -161.5 °C 이하로 냉각시켜 액체 상태로 저장하는 LNG (Liquefied Natural Gas), 활성탄 등의 흡착제에 약 30~60 bar 로 압축하여 저장하는 ANG (Adsorbed Natural Gas) 로 분류된다.

CNG 버스와 달리 CNG 승용차량의 경우 구조변경 위주로 보급되어 고압상태로 충전된 탱크가 차량의 적재함 또는 하부에 위치함으로써 안전성 측면에서 볼 때 연료량의 측정과 누설감지가 매우 중요하다. 그러나 기존 방식은 레귤레이터에 부착된 압력센서를 통하여 CNG의 양을 계측하고 있으며, 이는 정확한 양을 파악하기에는 어려움이 있다[4-6].

초음파 센서는 기체, 액체, 고체가 존재할 때 음파의 파장으로부터 반사될 수 있는 매질(경계면)의 밀도 차를 이용하여 측정대상에서 발생하는 진동, 거리 등의 변동 특성을 계측할 수 있는 보편화된 측정기술로서, 환경, 공업 및 의학 등 다양한 분야에서 측정 장치로 응용되고 있다[7-13]. 하지만 CNG와 같이 기체 상태로 저장되어 있는 연료레벨 측정에는 아직까지 적용되고 있지 않고 있는 실정이다.

본 연구에서는 CNG 연료 시스템 중 CNG 탱크 (Type-3) 내부의 가스 량을 측정하기 위한 기초 단계 연구로서 비등방성체로 구성된 Type-3에서 초음파의 에너지 특성을 적용하여 압력변화에 따른 출력 신호의 결과를 확인하고, 앞서 언급한 문제점을 보완할 수 있는 개선 방안을 제시하고 한다.

2. 초음파 센서의 설계 및 제작

Fig. 1 은 실험을 진행하기 위하여 설계된 초음파 센서의 구조이다. 초음파 센서는 온도, 외부압력 그리고 진동수 등을 고려해야 하므로 티탄산염 (PbTiO₃)계열의 니오브산납 (PbNb₂O₆)세라믹을 선정하여 음파의 노이즈를 최소화시킬 수 있으면서 원활하게 전달할 수 있는 구조로 설계하였다. 최종적으로 MS-21 방식으로 소형화된

크기와 두께를 갖추고 있는 Disk 타입의 압전 세라믹 (Piezoelectric ceramic)을 중심으로 결합층 (Matching layer)과 흡음층(Backing layer) 구성하였다.

압전 세라믹과 결합층은 앞서 언급한 환경적 변화 등을 견딜 수 있도록 고강도 탄성 접착제로 고정하였다. 그리고 측면부는 자체적인 진동에 의하여 생성되는 불필요한 신호를 흡수할 수 있도록 코르크(Cork) 재질을 접착하여 음향에너지가 강화될 수 있도록 설계하였다[12]. 또한 흡음층은 코르크와 고무(Rubber) 재질을 선정하여 후단부로 발생하는 진동을 억제시킬 수 있도록 설계하였다.

공진현상에 의한 균형을 유지하기 위하여 센서 하우징 내부에 추가적으로 코르크를 부착하였고, 서미스터 (Thermistor)를 부착하여 탱크의 주변 온도를 파악할 수 있도록 하였다. 그리고 하우징 내부는 유연성을 가지는데폭시를 주입하여 하우징에 전달되는 진동을 최소화할 수 있도록 하였다.

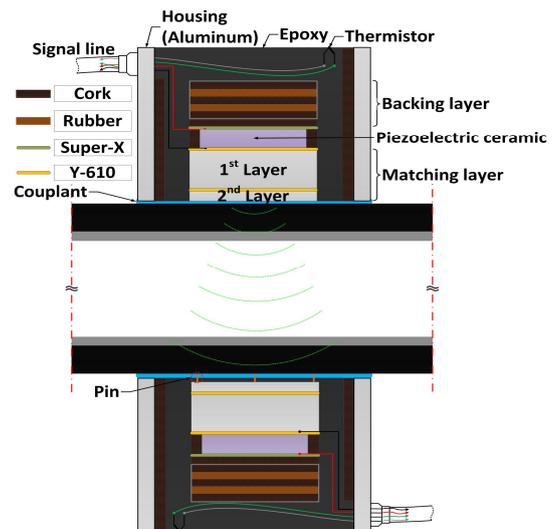


Fig. 1. Structure diagram of ultrasonic sensor

Fig. 2는 실험을 진행하기 위하여 제작한 초음파 센서이다. 실제 CNG 탱크 외벽에 장착하여 에너지를 전달할 경우 탱크의 진동 노이즈와 혼합되면서 비정상적인 수신 신호가 발생하게 된다. 이를 제거하기 위해서 수신부의 방사면을 에폭시로 마감하였으며, 3 개의 접지를 통해 구조적으로 회피하도록 설계하였다. 이와 같이 제작된 초음파 센서의 세부적인 사양들은 Table 1 과 같이 명시하였다.

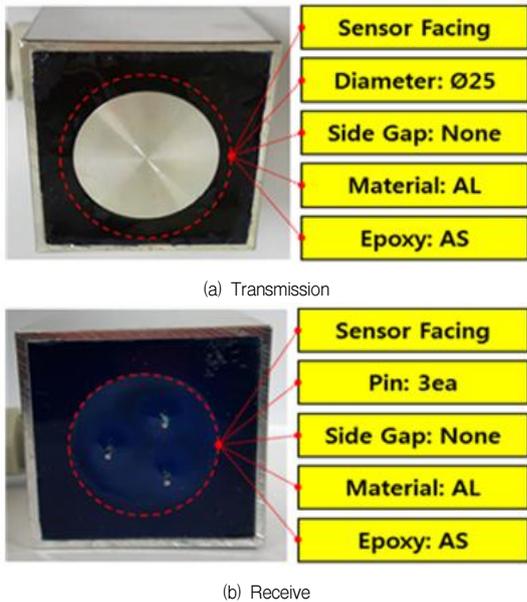


Fig. 2. Prototype of ultrasonic sensor

Table 1. Specifications of ultrasonic sensor

Material	Specification
Piezoelectric element (PZT)	MS-21 Density : $7.90 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ Diameter : $\varnothing 21$ Thickness : $2t$
Matching layer	Aluminum Density : $2.70 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ Diameter : $\varnothing 25(\text{Fixed})$ Thickness : $4 + 1t(\text{Worked})$
1 st Adhesive	Super-X Elastic adhesive Modified acrylic silicone resin Breaking strength : 1.6 N/m^2
2 nd Adhesive	Y-610 Conductive adhesive Higit-strength type Breaking strength : 19 N/m^2

3. 실험 장치 및 방법

Fig. 3은 CNG 차량에 적재되는 CNG 탱크를 사용하여 연료 계측 모사장치를 설계한 개략도이다. CNG 탱크는 Table 2와 같이 4 종류를 사용하고 있으며, 강철 또는 알루미늄과 같이 단일 매질로 구성되어 있는 Type-1, 강철 라이너와 라이너의 몸통 부분만 유리섬유로 둘러싸인 Type-2, 알루미늄 라이너와 라이너 전체를 둘러싸고 있

는 탄소 섬유로 이루어진 Type-3, 마지막으로 비금속 복합소재로 구성된 Type-4로 구분할 수 있다.

실험에 사용한 Type-3의 경우 국내에서 CNG 경용차량으로 구조 변경 시 가장 많이 사용되고 있으며, 동일한 체적의 경우 탱크의 질량, 가격, 안전성 등을 고려하여 선정하였다.

기존 시스템의 경우 레귤레이터에 부착된 압력센서로 CNG의 양을 계측하는 방식으로 구성되어 있다. 하지만 원활한 실험 진행을 위해서 별도의 압력게이지를 설치하여 탱크 내 상태를 파악하였고, 초음파 센서의 출력신호를 검증하였다.

탱크 특성상 센서를 부착하고자 별도의 가공을 하는 것은 어려움이 따르기 때문에 제작된 초음파 센서는 탱크를 중심으로 송·수신부를 외부 부착식(Clamp-on type)으로 고정하였다[14-17].

초음파 센서의 제어 회로는 전압, 주파수 그리고 펄스를 변화할 수 있도록 설계하였다. 그리고 음파(Acoustic wave)를 통하여 송·수신부의 신호를 확인할 수 있도록 제어하였다. 또한 송신부의 설정 전압 및 주파수, 펄스의 상태를 오실로스코프(DSO1072B)를 활용하여 확인하고, 압력 저감에 따라 변화하는 수신부의 출력 신호를 파악하기 위한 데이터를 검출하였다.

Table 3은 압력 저감에 따른 초음파 센서의 수신 신호를 파악하기 위하여 주요 설정 조건을 보여주고 있다. 안전사고의 대한 위험요소를 방지하기 위하여 탱크 내부의 압력은 CNG를 대신하여 압축공기를 사용하였고, 최대 충전 압력은 100 bar로 제한하였다.

송신부의 전압은 DC 200 V로 고정하여 신호의 감도를 조절하였으며, 주파수는 단품 실험을 통하여 센서 내부의 공진특성이 원활하게 발생하는 69.8 kHz로 설정하였다. 그리고 초음파 센서의 불감지 영역을 최소화하기 위하여 펄스 폭 범위를 약 120 μs 로 설정하였다.

정밀 제어는 오실로스코프를 통하여 최적의 주파수를 설정하면서 실험을 진행하였다. 그리고 탱크 내 압력은 100 bar에서 0 bar까지 5 bar 단위로 변화하여 각각의 압력에 따른 초음파 센서의 수신 신호를 확인하였다.

CNG 탱크 주변의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 항온항습기를 사용하여 상온($25 \pm 1^\circ\text{C}$)으로 설정하였고, 탱크 내부의 압력을 변경한 후 정확한 출력 신호를 확인하기 위하여 약 90초 후에 데이터를 검출하였다.

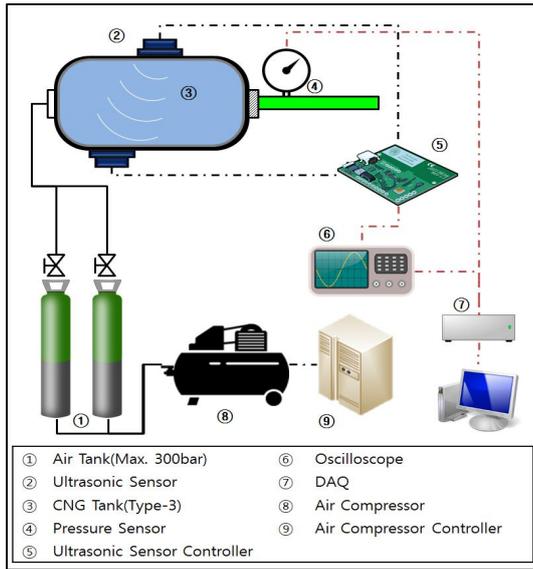


Fig. 3. Schematic diagram of experimental device

Table 2. Types of CNG Tank

Classification	Material
Type-1	Steel / Aluminum
Type-2	Steel + Glass Fibre
Type-3	Aluminum + Carbon Fibre
Type-4	Composite

Table 3. Specifications of experimental condition

Parameter	Value
Target fluid	Air
Pressure(bar)	100 to 0 from 5unit
Voltage adjust(V)	200
Resonance frequency(kHz)	69.8
Pulse rate select(Hz)	3
Pulse width adjust(μs)	120
Temperature(°C)	25±1

Fig. 4는 연속적인 신호들의 변화에 따라 확률 분포를 분석하는 데 가장 보편적인 Gaussian 정규 분포의 구성 요소(algorithm)를 보여준다.

실제 수신부로 전달되는 탄성파(종파+횡파)는 복잡한 형상으로 인하여 정밀한 값을 확인하기에 어려움이 있다. 이로 인해 그래프의 구성요소는 포락선 데이터로 변경한 값(수신신호)을 입력(Input)으로 표시하였고, Gaussian 정규분포에 의하여 필터된 데이터는 출력(Output) 경로로 표시하였다.

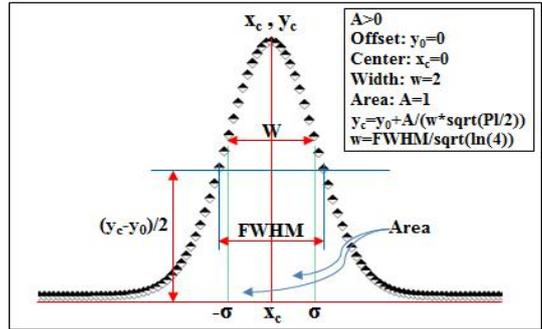


Fig. 4. Gaussian equation for envelope energy

Gaussian 식을 적용하여 실험에 의한 실제 초음파의 포락선 에너지에 관한 데이터가 어떻게 차별화 되었는지를 분석하였으며, 초음파의 포락선 에너지는 다음과 같은 식에 의하여 계산되었다.

$$y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} e^{-2 \frac{(x - x_c)^2}{w}} \quad (3-1)$$

여기서 y_0 는 초음파 센서로부터 수신된 포락선 에너지의 변동 값이며, A 는 정규분포에 대한 최대값으로 정의된다. 또한, w 는 표준편차에 대한 값이며, x 는 평균 또는 중심점의 값으로 정의된다.

4. 결과 및 고찰

CNG 차량의 연료시스템을 모사하여 상온에서 실험을 진행하였고, 다음과 같은 결과를 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 초음파 센서 중 송신부의 주파수를 69.8 kHz로 설정한 후 수신부의 출력신호를 검출한 결과를 보여준다. 또한, 감쇠특성이 확연히 차이가 나는 약 1,450 μs 부근에서 100 bar, 75 bar, 50 bar, 25 bar, 0 bar의 상태에서 서만 표시한 것은 초음파 신호의 감쇠특성을 구간별로 보다 쉽게 확인하기 위하여 다섯 구간만 정의되었다.

그 결과 100 bar와 비교하여 탱크 내 압력이 저감될수록 수신신호도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 감쇠특성은 탱크의 압력이 저감함에 따라 발생하는 밀도차에 의하여 초음파 센서의 공진주파수 진폭이 감소되는 결과로 분석되었으며[18], 압축과 팽창을 교대로 반복하는 종파의 특성에 의하여 공기의 구성입자(원자)가 파의

진행방향으로 진동하게 되고, 진동에 의한 연쇄 반응으로 이와 같은 결과가 나타나는 것으로 판단된다.

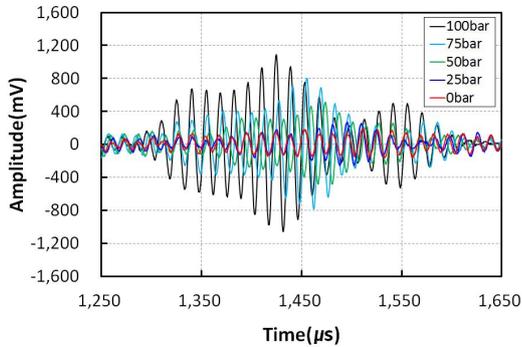


Fig. 5. Response curve of ultrasonic sensor

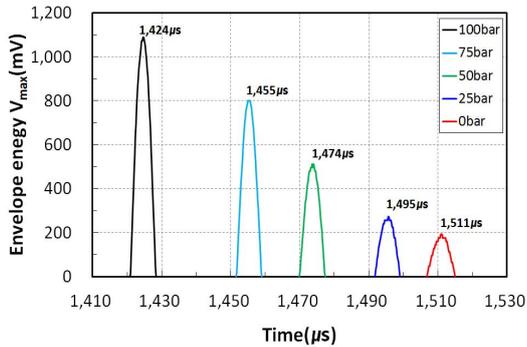


Fig. 6. Phase difference of ultrasonic sensor

Fig. 6 은 감쇠 특성을 보다 정확하게 확인하기 위하여 추출된 가장 이상적인 구간을 보여주고 있다. 각 압력별로 최대전압이 계측된 구간을 확인한 결과 약 1,424 μ s 에서 100 bar 일 때 약 1,088 mV 로 최대 출력 전압을 나타 내었고, 100 bar에서 75bar로 저감될 때 약 31 μ s 로 가장 큰 위상차를 확인할 수 있었다. 또한, 75 bar에서 0 bar까지 800 mV, 512 mV, 272 mV 그리고 192 mV 로 감소되는 결과를 확인할 수 있었다. 결과적으로, 밀폐된 용기에서 기체의 경우 압력이 감소하게 되면 밀도도 감소하기 때문에 분자간의 거리가 증대하게 된다. 이러한 특성은 탱크 내 압력 변화에 따라 발생하는 공기의 밀도 차에 의하여 수신부로 전달되는 초음파에 간섭이 발생되어 이와 같은 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

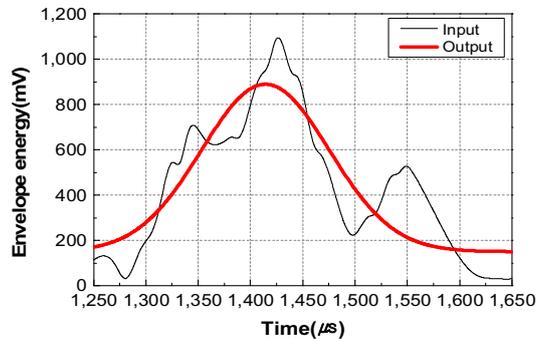
Fig. 7 은 Gaussian 정규 분포에 의해 필터된 포락선 에너지의 차별화된 결과를 보여주고 있다. CNG 탱크의

압력에 따라 변화된 수신에너지의 Gaussian 정규분포 값은 불특정한 신호들이 소거되어 안정화된 포락선 에너지가 계산되는 데이터 값을 확인할 수 있었다.

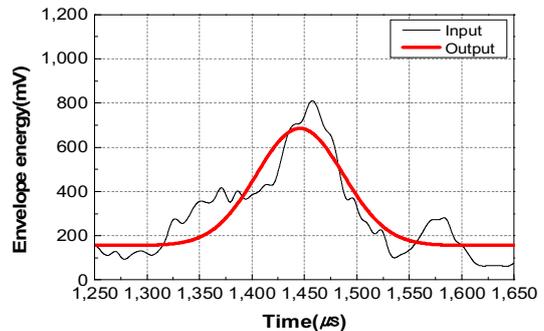
0 bar를 제외한 에너지의 면적에 대한 분석 결과 100 bar(113,173 mV^2), 75 bar (54,959 mV^2), 50 bar (41,167 mV^2) 그리고 25 bar (11,416 mV^2) 순으로 CNG 탱크의 압력이 감소됨에 따라 면적도 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 포락선 에너지의 중심점(X_c)은 100 bar (1,414 μ s), 75 bar (1,445 μ s), 50 bar (1,458 μ s), 25 bar (1,489 μ s) 그리고 0 bar (1,493 μ s) 순으로 CNG 탱크의 압력이 감소됨에 따라 중심점이 지연되는 변화 특성의 결과를 확인할 수 있었다.

이러한 지연특성은 탱크 내부에 충전된 압력으로 밀도가 축적되고, 고밀도로 변화되는 저항성분에 영향을 받아 수신되는 파의 에너지가 변화된 것이라 판단된다. 하지만 노이즈 등의 불특정한 신호에 의하여 발생하는 오차를 줄일 수 있는 과정이 필요하다.

결과적으로 에너지의 면적 및 위상차 등을 이용한다면 기체 상태로만 충전되어 있는 연료의 양을 확인할 수 있으며, 추가적인 공정을 통하여 보다 원활하게 계측할 수 있을 것이라 사료된다.



(a) 100 bar



(b) 75 bar

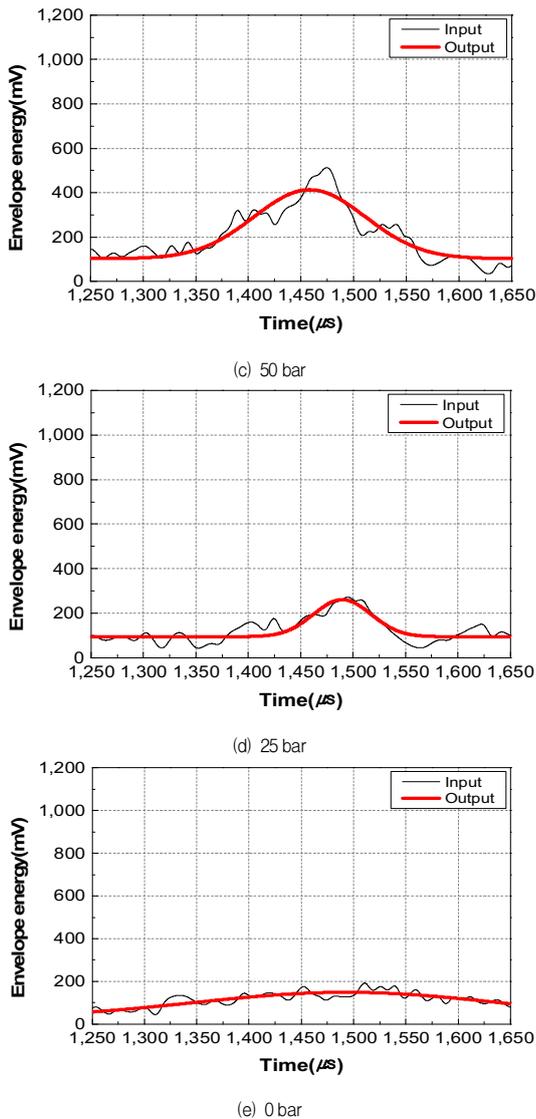


Fig. 7. Filtered result of gauss envelope energy

5. 결론

가우스알고리즘에 의한 초음파의 가스연료레벨 계측에 관한 실험적인 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 탱크 압력이 감소됨에 따라 초음파 센서의 수신신호는 선형적으로 감소하는 특성을 확인할 수 있었으며, 초음파 센서에 의한 측정방법은 CNG 연료에 대한 레벨계측방법에도 측정가능하다는 점을

예측할 수 있었다.

- (2) 초음파 센서의 측정은 CNG 탱크의 직경에 대한 한정적인 거리 차이가 있음에도 불구하고, 탱크 직경에 설치된 초음파 센서는 특정시간대의 영역 (약 1,450 μ s) 을 검출할 수 있다는 점을 확인할 수 있었다.
- (3) 음향에너지에 대한 수신신호는 구조적 측면보다는 탱크 내부의 압력 변화에 따라 발생하는 공기의 밀도 차에 의하여 초음파의 감쇠 특성이 발생하는 것으로 판단된다.
- (4) 비등방성 매질로 구성된 Type-3의 탱크는 경계면에서 종파와 횡파가 결합된 복잡한 형상이 분석되었으나, 가우스 알고리즘에 의하여 추출된 데이터는 실험의 오차를 줄이고, 정밀한 데이터를 확보할 수 있다는 점을 관찰할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] S. W. Lee, G. H. Lim, C. W. Park, Y. Choi & C. G. Kim. (2015). Characteristics of Combustion and Emission for Synthetic Natural Gas in CNG Engine. *Journal of the Korean Institute of Gas*, 19(6), 8-14
- [2] G. A. Karim & I. A. Ali. (1975). Combustion, knock and emission characteristics of a natural gas fuelled spark ignition engine with particular reference to low intake temperature conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 189(1), 139-147.
- [3] K. Kato et al. (1999). Development of engine for natural gas vehicle. *SAE Technical Paper*.
- [4] S. Y. Hwang, J. S. Seo & J. K. Park. (2007) Uncertainty Evaluation of Ultrasonic Flowmeter Varied with Temperature and New Improvement Method. *Proceeding of the KFMA Annual Meeting*, 503-508.
- [5] K. S. Kim, D. S. Choi, Y. C. Kim & J. U. Cho. (2013). Study on Relation of Optimum Resonant Frequencies between Piezo Ceramic and Matching Layer. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 14(7), 3191-3196.
DOI : 10.5762/KAIS.2013.14.7.3191
- [6] C. S. Eun & Y. C. Lee. (2016) Compensation of the Non-linearity of the Audio Power Amplifier Converged with Digital Signal Processing Technic. *Journal of the Korea Convergence Society*, 7(3), 77-85.
DOI : 10.15207/JKCS.2016.7.3.077

[7] G. C. Park, S. H. Lee, C. S. Park, D. W. Kim, W. T. Kim & G. R. Jeon. (2014). Study on the Development of Sensors for Distance Measure Using Ultrasonic. *Journal of Sensor Science and Technology*, 23(1), 46-50.

[8] J. N. Som. (1994) Study on the Calibration of the Transit-time Ultrasonic Flowmeter. *Journal of Pure and Applied Ultrasonics*, 17(4), 114-120.

[9] L. K. Oh. (2007) Fiber sensor based on piezoelectric ultrasonic wave. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 19(3)

[10] R. T. Higuti & J. C. Adamowski. (2002) Ultrasonic densitometer using a multiple reflection technique. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, 49(9), 1260-1268.

[11] T. George, E. Rufus, C. Zachariah & Alex. (2016) Quality Analysis of Transformer Oil in Hermitically Sealed Tank using Ultrasonic Lamb Wave Sensor. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(20)

[12] V. Shah & K. Balasubramaniam. (1996) Effect of viscosity on ultrasound wave reflection from a solid/liquid interface. *Ultrasonics*, 34(8), 817 - 24.

[13] B. S. Kim & O. H. Kang. (2014) Design and Implementation of a Range Measuring Sensor Network with Z-Stack on CC2530. *Journal of Digital Contents Society*, 15(2), 167-172.
DOI : 10.9728/DCS.2014.15.2.167

[14] K. S. Kim, D. S. Choi, Y. C. Kim & J. U. Cho. (2013). Study on Relation of Optimum Resonant Frequencies between Piezo Ceramic and Matching Layer. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 14(7), 3191-3196.

[15] H. J. Chun & P. S. Jang. (2001) Ultrasound Wave Propagation in Thick Composites with Uniform Fiber Waviness. *Journal of Korean Society for Nondestructive Testing*, 21(3), 288-298.

[16] Y. J. Lee & J. I. Im. (2006). Development and Evaluation of the piezoelectric transducer for the transit-time ultrasonic flowmeters. *The Institute of Electronics Engineers of Korea - System and Control*, 43(4), 30-34.

[17] J. S. Lim. (2017) Design of Wideband RF Frequency Measurement System with EP2AGX FPGA. *Journal of the Korea Convergence Society*, 8(7), 1-6.
DOI : 10.15207/JKCS.2017.8.7.001

[18] J. Y. Lee, H. T. Oh, K. Choi & H. Y. Lee. (2015). Effect of the Electrode Type on the Dielectric and Piezoelectric Properties of Piezoelectric PMN-PZT Single Crystals. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 52(1), 77-82.
DOI : 10.4191/KCERS.2015.52.1.77

김 홍 주(Kim, Hongju)

[정회원]



- 2009년 2월 : 공주대학교 자동차 공학과(공학사)
- 2012년 2월 : 공주대학교 기계공학과(공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 기계공학과(박사과정)
- 관심분야 : 플라즈마, 연소제어, 내연기관, 대체에너지
- E-Mail : end5687@kongju.ac.kr

최 두 석(Choi, Dooseuk)

[정회원]



- 2011년 2월 : 충남대학교 기계공학과(공학사)
- 1983년 2월 : 충남대학교 기계공학과(공학석사)
- 1996년 2월 : 충남대학교 기계공학과(공학박사)
- 1996년 2월 ~ 현재 : 공주대학교 기계자동차 공학부 교수
- 관심분야 : 플라즈마, 연소제어, 내연기관, 대체에너지
- E-Mail : dschoi@kongju.ac.kr