

차량의 변속기 오일레벨 측정을 위한 FPGA 기반 초음파 레벨 측정기 개발

강문호^{1*}, 박윤창¹
¹선문대학교 정보통신공학과

A FPGA-based Development of Ultrasonic Level Meter for Measuring Oil Levels of Vehicle Transmissions

Moon-Ho Kang^{1*} and Yoon-Chang Park¹

¹Department of Information and Communication Engineering, Sunmoon University

요 약 본 논문에서는 자동차 변속기 오일레벨을 정확하고 손쉽게 측정할 수 있는 초음파 오일레벨 측정기를 개발하고 실험을 통하여 유용성을 보였다. 초음파 프로브 구동 펄스 생성과 오일레벨 연산을 비롯한 모든 디지털 신호 처리가 하나의 FPGA에 의해서 이루어지도록 하여 측정기의 단순화와 고성능화를 이루었고, 모든 프로그램을 FPGA 프로젝트 IDE상에서 제작하여 측정기 개발 시간을 줄일 수 있었다. 또한, 저-레벨의 초음파 에코 신호를 처리하기 위한 송수신 스위치회로, 다단 능동 필터회로 및 포락선 검출회로 등을 설계하였고, 실험을 통하여 설계된 측정기가 약 1mm 이내의 측정 정확도를 가짐을 확인하였다.

Abstract In this paper a ultrasonic level meter for accurately and simply measuring oil levels of vehicle transmission is developed and its effectiveness is shown by experiments. By using a FPGA, all digital signal processes for the oil level calculation is fulfilled, and the programming on a FPGA project IDE enables very short developing time. And besides, analog circuits including a transmit/receive switch, multi-stage active filters and an envelope detect circuit are designed to process low-level ultrasonic echo signal. Under experiments, the designed level meter has proven to have the accuracy of about within 1[mm] scale.

Key Words : Ultrasonic, Oil Level Meter, Vehicle Transmission, FPGA(Field Programmable Gate Array)

1. 서론

차량의 누유, 변속충격 및 변속성능 이상의 일차적인 원인이 변속기 오일레벨의 변동 및 오염도에 기인하므로 변속기의 적정한 오일레벨과 상태는 매우 중요하다. 이를 위해 변속기 출하시 조립 라인에서 변속기내에 적정량의 오일이 있는지를 검사하는데, 현재는 변속기의 중량을 측정하는 방식을 사용하고 있다. 이 경우, 변속기 부품(하우징, 케이스, 기어류 등)들의 중량차이가 크에도 불구하고, 일률적으로 기준 중량을 설정하여 전체 중량에서 기준 중량을 차감하는 방법을 사용하기 때문에 정확하게 오일레벨을 측정하기가 어렵다.

본 논문에서는 종래의 자동차 변속기 오일레벨 측정방식을 개선하여 오일레벨을 정확하고 손쉽게 측정하여, 차량의 품질을 향상시키고 효율적인 A/S에 기여할 수 있는 초음파 오일레벨 측정기를 개발하고 실험을 통해 유용성을 보인다. 종래의 초음파를 통한 비파괴 측정 사례들을 분석하여[1-3] 초음파 프로브를 변속기 오일 케이스 하부에 부착함으로써 변속기에 어떠한 변형도 없이 정밀한 오일레벨 측정이 가능하고, 저렴하여 기존의 변속기 조립 라인이나 A/S에 신속히 적용할 수 있는FPGA(Field Programmable Gate Array)를 기반으로 한 새로운 오일레벨 측정기를 개발하였다.

FPGA로는 Xilinx 사의 XC3S200을 사용하여[4] 오일

*Corresponding Author : Moon-Ho Kang

Tel: +82-10-8837-5349 email: mhkang64@gmail.com

접수일 12년 07월 27일

수정일 (1차 12년 08월 30일, 2차 12년 10월 30일)

게재확정일 12년 11월 08일

레벨 측정기에 필요한 모든 디지털 신호 처리부들을 하나의 FPGA내에 구현하여 고성능화를 이루었고, 필드에 서의 요구 조건에 따른 프로그램 변경이 용이하도록 하였다. 한편, AD(Altium Designer)에서 제공하는 FPGA 프로젝트 IDE상에서[5] 초음파 측정기에 필요한 프로그램 들을 블록 다이어그램 형태로 작성하여 프로그램을 최적 화하고 개발 시간을 줄일 수 있었다. 개발된 측정기의 성 능과 유용성을 확인하기 위하여 실제 자동차 자동 변속 기오일레벨을 반복 측정한 결과 측정기가 약 1mm 이내 의 정확도를 가짐을 확인하였다.

2. 변속기 오일레벨 측정

2.1 매질에서의 음파 특성[6]

음향 임피던스가 각각 Z_1 과 Z_2 이고 서로 맞닿아 있는 두 매질에 수직으로 음파를 입사할 때, 두 매질의 경계면 에서 반사되는 음파의 세기는 식(1)과 같이 음압반사계수 (R)에 의해 결정되어, R 이 클수록 증가한다.

$$R = \left| \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \right| \quad (1)$$

Z_1 : 매질1 (입사매질)의 음향 임피던스 [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

Z_2 : 매질2의 음향 임피던스 [$\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$]

여기서, 반사율은 $R^2 \times 100[\%]$

매질내에서 전파되는 음파의 세기는 식(2)와 같이 음 파의 이동거리에 따라 지수 함수적으로 감소한다. 파라미 터 b 는 매질에 따른 음파의 흡수정도를 나타내는 것으로 주파수 증가에 따라 급격히 커지는 특성을 가진다.

$$I_2 = I_1 e^{-2b(x_2 - x_1)} \quad (2)$$

I_1 : $x_1[\text{m}]$ 에서의 초기 음파의 세기 [Wm^{-2}]

I_2 : $x_2[\text{m}]$ 에서의 음파의 세기 [Wm^{-2}]

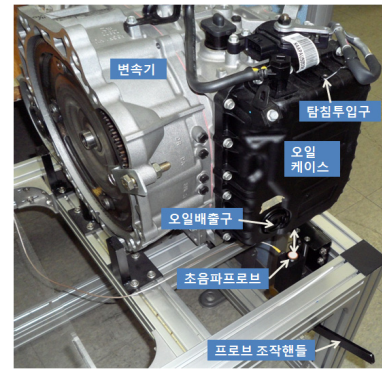
b : 음파 흡수 파라미터 [Npm^{-1}]

한편 동일 매질에서의 음파속도가 매질의 온도에 따라 변하는데, 자동차 오일의 경우에는 오일의 종류와 사용기 간에 따라 약간의 차이가 있지만 오일의 온도가 증가할 수록 음파의 속도가 줄어드는 특성을 가진다.[2,3]

2.2 오일레벨 측정 방법

그림 1은 본 연구에서의 측정대상인 자동차 변속기를

보인 것으로, 변속기 본체와 변속기 오일이 저장되는 플 라스틱 케이스로 구성되어, 케이스에는 오일레벨 측정을 위한 오일 탐침 투입구와 오일의 일부를 배출하기 위한 오일 배출구가 상, 하부에 각각 설치되어 있다. 초음파를 이용하여 케이스의 변형이 없이 오일에 비접촉식으로 오 일의 량을 측정하기 위해서는 초음파 손실을 최소로 하 면서 오일레벨을 정확히 측정할 수 있도록 초음파 프로 브를 배치하는 것이 중요하다. 이를 위해 오일 케이스 안 밖의 구조를 고려하여 케이스의 좌측 하부를 적절한 프 로브 위치로 선정하였다.



[그림 1] 변속기와 초음파 프로브

[Fig. 1] Transmission and ultrasonic probe

그림 2는 변속기 오일레벨의 측정방법을 보인다. 초음 파 프로브를 변속기 오일 케이스 하부에 위치시켜 초음 파를 발생시키면 초음파는 프로브 커플러와 변속기 케이 스를 거쳐 오일로 입사되고, 오일을 투과한 후 공기층에 도달하면 프로브로 반사된다. 따라서 이 기간 동안의 시 간을 측정하면 오일내의 초음파 속도로부터 식(3)과 같이 오일 레벨 $L_{oil}[\text{m}]$ 을 계산할 수 있다.

$$L_{oil} = \frac{1}{2}(\Delta t - t_{off}) v \quad (3)$$

Δt : 프로브에서의 초음파 발생으로부터 프로브로의 반사까지 소요된 시간[s]

t_{off} : 초음파의 케이스와 커플러 왕복에 소요된 시간 [s]

v : 오일에서의 초음파 속도 [ms^{-1}]

초음파 커플러를 통과한 4MHz 초음파는 식(1)과 표1 의 매질 특성에 의해[2, 7-8] 약 23%가 케이스면에서 반 사되고, 나머지 77%가 오일로 진입한다. 이때, 초음파의 약 20%가 오일면에서 다시 반사되고, 이후 오일을 투과 하는 과정에서 상당량의 초음파가 흡수 된 후 공기면에

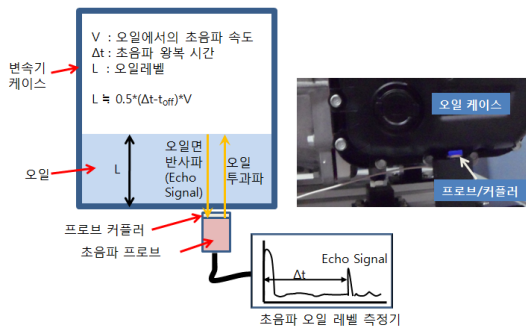
도달하면 전량이 프로브로 반사된다. 공기면에서 반사된 초음파 에코신호는 동일한 과정의 반사와 흡수과정을 거쳐 프로브에 도달한다. 따라서 최초로 발생된 초음파의 극히 일부만이 수신되어 적절한 에코신호의 증폭이 필요하다. 한편, 표1의 값들로부터 초음파가 커플러와 케이스를 왕복하는데 약 $4\mu s$ 가 소요되므로 이 값을 식(3)의 t_{off} 에 적용한다. 오일에서의 초음파 속도 v 는 $20^\circ C$ 를 가정하여 약 $1450ms^{-1}$ 로 설정하였다.

【표 1】 매질의 음파 특성

【Table 1】 Acoustic characteristics of mediums

특성 매질	음향임피던스(Z) [$10^6 \times kg\ m^{-2}s^{-1}$]	음파속도(v) [ms^{-1}]
커플러 ¹	1.4(두께 1mm)	940
케이스 ²	4.0(두께 3mm)	2530
오일	1.5	1450 ($20^\circ C$)
공기	0.0004	356 ($20^\circ C$)

1. 실리콘고무, 2. 유리강화나일론

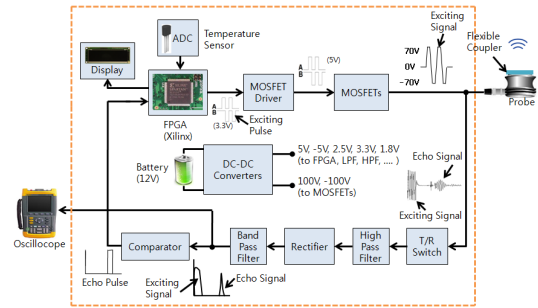


【그림 2】 초음파 오일레벨 측정방법

【Fig. 2】 Ultrasonic oil level measuring scheme

3. 오일레벨 측정기 설계

그림3은 측정기 전체 구성을 보이는 그림으로, FPGA를 이용하여 4MHz의 A, B 펄스열을 생성한 후 MOSFET로 증폭하여 초음파 프로브를 구동시킬 고전압 펄스를 생성하는 부분, T/R(Transmit/Receive) 스위치를 이용하여 고전압 펄스를 초음파 에코 신호와 분리시킨 후 에코 신호를 처리하는 부분, 배터리로부터 DC-DC 변환기를 통해 필요한 전원들을 생성하는 부분, 오일의 온도를 측정하기 위한 온도센서와 AD변환기 및 LCD 등으로 나누어진다.

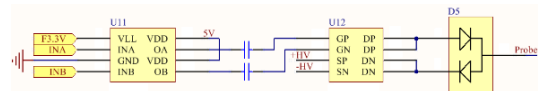


【그림 3】 초음파 오일레벨 측정기 구성

【Fig. 3】 Ultrasonic oil-level meter configuration

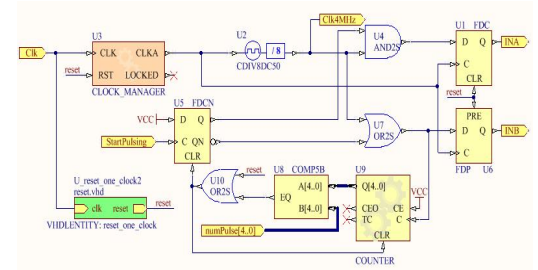
3.1 FPGA를 이용한 초음파 구동 펄스 발생

그림4는 초음파 프로브 구동을 위해 고전압 펄스를 생성하는 회로이다[9]. 먼저, FPGA에서 프로브의 공진주파수와 일치하는 INA/INB의 두 가지 디지털 신호들 만들고, MD1211을 통해 MOSFET의 게이트를 구동할 수 있는 전압레벨로 변환한 후, MOSFET 증폭기(TC6320)에서 초음파 프로브를 구동하는 양극 고전압 펄스를 생성한다. FPGA는 Xilinx 사의 XC3S200을 사용하였다[4]. 그림5는 INA/INB 생성을 위한 스키매틱으로, AD의 IDE를 이용하여 FPGA 프로젝트를 생성한 후, 필요한 컴포넌트들을 호출하여 작성하였다[5]. 스키매틱에서 기준클럭(Clk)는 50MHz이고 이로부터 프로브의 공진주파수와 일치하는 4MHz INA/INB 신호를 발생시킨다. D-플립플롭의 클럭 입력에 연결된 StartPulsing은 2Hz의 클럭 신호로서 이 신호의 상승에지에서 INA/INB 신호가 발생되어, 이 시점이 초음파 프로브의 구동시점, 즉 초음파의 TOF(Time of Flight) 개시 시점이 된다.



【그림 4】 초음파 프로브 구동 펄스 생성회로

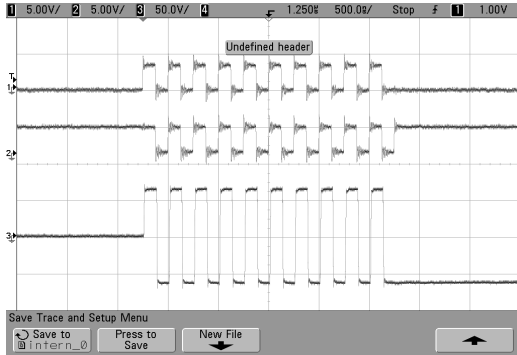
【Fig. 4】 Circuit for ultrasonic probe drive pulse



【그림 5】 INA/INB 신호 생성을 위한 스키매틱

【Fig. 5】 Schematic for INA/INB signals

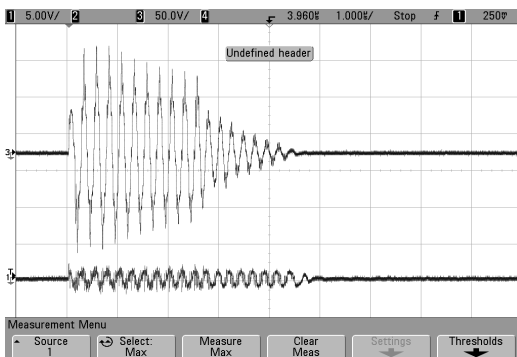
그림6은 INA, INB 및 MOSFET증폭기 출력 파형을 보인다. 초음파 프로브는 연결하지 않았고, MOSFET 전원 전압은 $\pm 70V$ 이다. 0.5초 마다 INA/INB 신호 10 사이클이 반복되도록 설정하였다.



[그림 6] INA(상), INB(중), MOSFET증폭기 출력(하)
[Fig. 6] INA(top), INB(middle) and output of MOSFET amplifier(bottom)

3.2 에코신호 처리

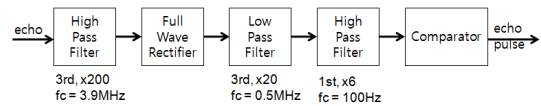
고전압의 프로브 구동 신호로부터 에코신호 처리회로를 보호하기 위한 T/R스위치가 에코신호 처리부 전단에 필요하다.[10] 그림 7은 프로브 전압과 에코신호를 보이는 것으로, 프로브 구동 전원이 $\pm 70V$ 인 상태에서 프로브 회로의 공진에 의해 프로브 전압이 $\pm 150V$ 이상 증가하는 모습(그림 7(상))을 보인다. 이 경우, 사용된 T/R 스위치(MD0100)의 최대 전압정격을 초과하기 때문에 2개의 T/R 스위치를 직렬로 연결하였다.



[그림 7] 프로브 전압과 에코신호
[Fig. 7] Probe voltage and echo signal

그림 8은 에코신호 처리부 각 단계에서의 이득과 차단주파수(fc)를 보인다. 첫 번째 단계의 3차 HPF는 프로브 구동

신호의 주파수인 4MHz를 고려하여 3.9MHz로 차단주파수를 설정하였다. 세 번째 단계에서는 차단주파수가 0.5MHz인 3차 LPF를 이용하여 에코신호 포락선을 검출한다. 네 번째 단계에서는 차단주파수가 100Hz 인 1차 HPF를 통해 출력전압 레벨을 조정하고 직류 오프셋 전압을 제거한다. 마지막 단계에서는 비교기를 통해 출력전압과 기준 전압을 비교하여 디지털 신호(echopulse)를 생성한다. echopulse는 FPGA에 인가되어 초음파의 TOF 계산에 사용된다.



[그림 8] 에코신호 처리부
[Fig. 8] Echo signal processor

3.3 오일레벨 계산

그림 9는 오일레벨을 계산하기 위한 스키마틱을 보인다. 카운터(U9)는 초음파 진행시간을 측정하기 위해 10 비트 타이머로 사용되어, 2MHz 기준클럭을 사용하여 $512\mu s$ 까지의 시간을 측정할 수 있다. 이 값은 오일에서의 초음파의 속도를 약 $1450ms^{-1}$ 이라고 할 때, 초음파가 약 371mm를 왕복하는데 걸리는 시간에 해당한다. $U_{justone}$ 은 VHDL(Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language)과 AD의 심볼을 이용하여 작성한 VHDL 심볼로[5], 초음파 구동 개시 신호(Start)를 입력받아 상승에지에서 트리거 펄스를 만든다. $U_{callevel}$ 심볼은 이 트리거 펄스와 에코신호 처리부(그림 8)의 비교기 출력신호를 입력받아(Pulses) 두 신호사이에 발생한 카운터 출력 증가분을 계산한 후, 이로부터 다음과 같이 오일레벨을 계산한다.

식(3)으로부터 오일레벨을 [mm]로 환산하여 표현하면 식(4)와 같고, 카운터 클럭주기는 $0.5\mu s$ 이므로 이 값을 식(4)에 대입한 후 정리하면 식(5)와 같다.

$$L_{oil} = \frac{1}{2} \{ v \times 10^{-3} \times (n \times T_{dk} - t_{off}) \} \quad (4)$$

$$L_{oil} = \frac{v \times (n - 2t_{off})}{4000} \quad (5)$$

L_{oil} : 오일레벨[mm], v : 오일내 초음파 속도[ms^{-1}], n : TOF동안의 카운터증분, T_{dk} : 카운터 클럭주기[μs], t_{off} : 초음파의 케이스와 커플러 왕복에 소요된 시간[μs]

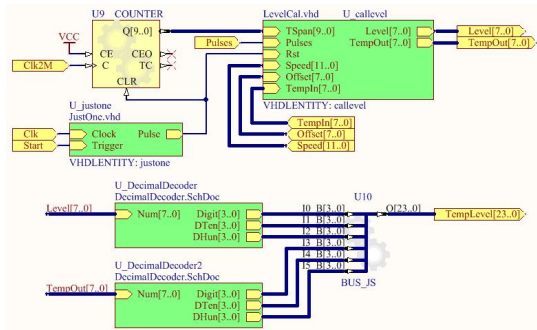
FPGA는 나뉜셈시 제수가 2의 배수이어야 하므로 식(5)를 식(7) 또는 식(8)과 같이 근사화 한다. 식(7)로는 식(5)에 의한 계산 결과의 약 2% 오차로 결과 값을 구할 수 있고, 식(8)로는 식(5)에 의한 계산 결과의 약 0.7% 오차로 결과 값을 구할 수 있다.

$$L_{oil} = \frac{v \times (n - 2t_{off})}{4096} \times 1.024 \quad (6)$$

$$L_{oil} \approx \frac{v(n-2t_{off})}{4096} = \frac{v(n-2t_{off})}{2^{12}} \quad (7)$$

$$L_{oil} \approx \frac{v(n-2t_{off})}{4096} + \frac{v(n-2t_{off})}{4096 \times 32} \quad (8)$$

$$= \frac{v(n-2t_{off})}{2^{12}} + \frac{v(n-2t_{off})}{2^{18}}$$



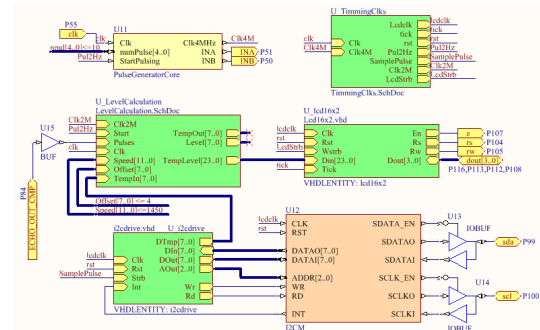
[그림 9] 오일레벨 계산을 위한 스키매틱
[Fig. 9] Schematic for oil-level calculation

그림 10은 오일레벨 측정기의 전체 스키매틱을 보인다. PulseGeneratorCore는 그림 5에 대한 코어이고[5], U_TimmingClks은 스키매틱에서 사용되는 타이밍클록들을 생성하는 심볼이다. U_LevelCalculation은 그림 9에 대한 심볼이고, U_Lcd16x2는 LCD 구동을 위해 작성한 심볼이다. U_i2cdrive 심볼과 I2CM 컴포넌트는 온도측정을 위해 ADC와 인터페이스를 담당한다.

4. 실험 및 고찰

측정기 시험에 앞서 오일 탐침을 이용하여 변속기 오일레벨을 측정하여 약 84mm가 됨을 확인하고 기준 오일레벨로 설정하였다. 표2는 식(7)과 (8)을 이용하여 오일레벨을 10회 반복 측정한 결과를 보인다. 식(8)을 이용하는 경우가 식(7)을 이용한 경우에 비해 평균적으로 약 2mm 정도 오일레벨이 크게 측정되어 예상대로 기준 오일레벨

에 더 가까운 결과를 가짐을 확인하였다.



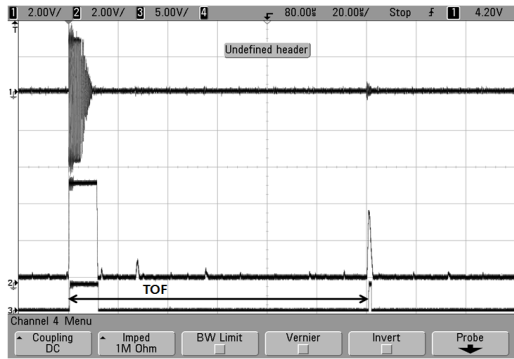
[그림 10] 오일레벨 측정기 전체 스키매틱
[Fig. 10] Entire schematic of oil-level meter

그림 11은 그림 8의 에코신호 처리부 각단의 출력을 오실로스코프로 측정한 결과이다. 첫 번째 파형(상)은 에코신호 처리부의 첫째 단 HPF의 출력파형으로 초음파 에코신호가 200배 증폭된 결과이다. 두 번째 파형(중)은 에코신호 처리부의 네 번째 단 HPF의 출력파형으로, 200배 증폭된 에코신호가 전파정류기와 LPF를 거쳐 포락선이 검출된 후, 차단 주파수 100Hz의 HPF에 의해 직류 오프셋이 제거된 결과를 보인다. 세 번째 파형(하)은 마지막 단인 비교기 출력파형으로, 앞단의 HPF 출력을 2V 기준 전압(Vcom)과 비교한 결과로 FPGA로 인가되어 초음파의 TOF 계산에 사용된다.

그림 12는 그림 11에서 예코신호가 발생하는 부근을 확대한 것이다. 두 번째와 세 번째 파형으로부터 예코신호의 발생 시점으로부터 비교기 출력의 상승에지 사이에 약 650ns 의 시간지연(t_d)이 보이는데, 초음파 TOF 계산시 오차원인으로 오일레벨로 환산하면 약 0.5mm에 해당한다. 따라서 고속의 비교기를 사용하여 t_d 를 감소시키거나, t_d 를 식(8)의 t_{off} 에 포함하여 보상할 수 있지만 현재는 오차범위 이내로 판단하여 무시하였다. 세 번째 비교기 출력파형으로부터 초음파 TOF가 약 120.85 μ s 임을 알 수 있다. 그림 13은 오일레벨 측정기 사진으로 오일레벨과 온도 측정치를 LCD에 보여주고 있다.

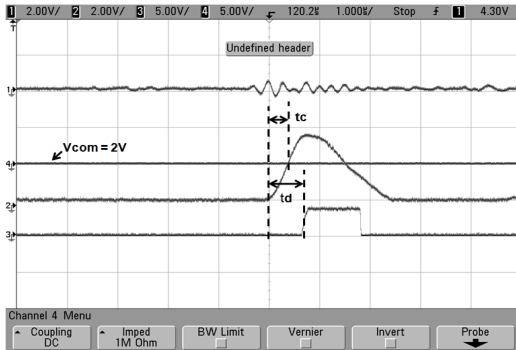
[표 2] 오일레벨 측정결과
[Table 2] Oil-level measurement result

측정 횟수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$L_{oil}[mm]$ (식(7))	81	81	81	82	81	82	81	81	82	81
$L_{oil}[mm]$ (식(8))	83	83	83	84	84	83	84	83	84	84



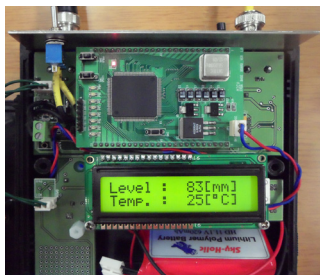
[그림 11] 에코신호 처리부 각단 출력 파형: 3차 HPF(상), 1차 HPF(중), 비교기(하)

[Fig. 11] Output waveforms of the echo signal processor: 3rd-order HPF(top), 1st-order HPF(mid.) and comparator(bot.)



[그림 12] 그림 11의 에코신호 확대 파형. ($t_d \approx 650\text{ns}$, $t_c \approx 450\text{ns}$)

[Fig. 12] Magnified waveforms of the signals of Fig. 11 ($t_d \approx 650\text{ns}$, $t_c \approx 450\text{ns}$)



[그림 13] 오일레벨 측정기

[Fig. 13] Oil level meter

5. 결 론

본 논문에서는 자동차 변속기 오일 량을 측정하기 위

한 초음파 오일레벨 측정기를 개발하고 실험을 통하여 유용성을 보였다. 초음파 프로브 구동 펄스 생성, TOF와 오일레벨 연산, 온도센서와 LCD 인터페이스 등 모든 디지털 신호 처리부가 하나의 FPGA에 의해서 이루어지도록 하여 측정기의 단순화와 고성능화를 이루었고, AD의 FPGA 프로젝트 IDE상에서 프로그램을 제작하여 측정기 개발 시간을 줄일 수 있었다. 개발된 측정기의 성능을 확인하기 위해 실제 자동차 자동 변속기오일레벨을 반복 측정한 결과 측정기가 약 1mm 이내의 정 정확도를 가짐을 확인하였다. 향후에는 개발된 장치의 성능을 실제 변속기 작업라인에서 검증하고 상용화의 타당성을 연구하고자한다.

References

- [1] B. Henning, J. Rautenberg, "Process monitoring using ultrasonic sensor systems", Ultrasonics, Vol.44, pp.e1395-e1399, Dec., 2006.
- [2] W. Volker, R. Hans-Peter, "Measurement of ultrasound speed in several car engine oils as a function of temperature", IEEE Ultrasonics Symposium proceedings, pp.369-372, 2007.
- [3] V. I. Bardyshev, P. A. Kolobaev, "Experimental Researches Temperature Dependences of Speed of Ultrasonics in the Water Selected from Crude Oil and Density of This Water", Session of the Russian Acoustical Society, November 14-18, pp.337-339, 2005.
- [4] "Spartan-3 FPGA Family", Data Sheet, Xilinx, Inc., DS009-4, Dec., 2009.
- [5] "Altium Designer, FPGA Design Basics", Document Version 1.2, Altium, February, 2008.
- [6] T. G. Leighton, "What is ultrasound?", Progress in Biophysics and Molecular Biology, Vol. 93, Issues 1 - 3, pp. 3-83, 2007.
- [7] "Plastic Material's acoustic properties", <http://www.ndt.net/links/proper.htm>
- [8] "Acoustical Properties Of Common Materials", http://www.ndt.com/Reference/Velocity_Table/velocity_table.html
- [9] Ching Chu, Sr., "High Voltage Pulser Circuits", Application Note, AN-H53, Supertex inc., 2009.
- [10] "High Voltage Protection T/R Switch, MD0100", Doc.# DSFP-MD0100, Supertex inc., 2010.

강 문 호(Moon-Ho Kang)

[정회원]



- 1990년 2월 : 고려대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1995년 8월 : 고려대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1995년 9월 ~ 1997년 8월 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 1997년 9월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야>

센서네트워크, 지능제어

박 윤 창(Yoon-Chang Park)

[정회원]



- 1983년 2월 : 부산대학교 기계공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 한국과학기술원 생산공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 한국과학기술원 정밀공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야>

정밀측정, 동작기계