

## 초음파와 전기전도 센서를 이용한 우레아 탱크 수위, 농도 및 온도의 동시 측정 방안

# Simultaneous Measurement of Liquid-level, Concentration and Temperature of a Urea Tank using Ultrasonic and Electrical Conductivity Sensors

최병철\* · 김태욱\*\*

Byungchul Choi\* and Taewook Kim\*\*

(Received 02 August 2017, Revision received 27 September 2017, Accepted 28 September 2017)

**Abstract:** The purpose of this study is to propose the basic data for the development of a sensor capable of simultaneously measuring the liquid-level, concentration and temperature of a urea tank using ultrasonic and electrical conductivity sensors for diesel vehicles with a urea-SCR system. It was found that the liquid-level of the urea tank using the ultrasonic sensor showed a good linearity with the actual liquid-level, and the urea concentration maintained good linearity in the range of 32.5 wt% to 10 wt%. It was an effective measurement of urea concentration to use the electrical conductivity sensor in the temperature range of  $-10\sim 22^{\circ}\text{C}$  and to use the ultrasonic sensor at  $22^{\circ}\text{C}$  or more. Simultaneous measurement of concentration, liquid-level and temperature of the urea tank will be possible by attaching the electrical conductivity sensor and the ultrasonic sensor (split-type) to one sensor together.

**Key Words :** Urea-SCR, Liquid-level, Urea Concentration, Ultrasonic Sensor, Electrical Conductivity Sensor

## 1. 서 론

디젤자동차의 배출가스 규제가 강화되면서 디젤자동차로부터 배출되는 질소산화물질( $\text{NO}_x$ )의 효과적인 점감 방법에는 요소수(urea,  $\text{NH}_2\text{CONH}_2$ )를 환원제로 SCR(Selective Catalytic Reduction) 촉매에 공급하는 urea-SCR 방식이 있다. Urea-SCR 시스템은 SCR 촉매, 환원제를 분사하는 분사기, 환원제 압송 펌프, 환원제 보관용 탱크 모듈, 환원

제 탱크의 수위를 감지하는 수위 센서 및 우레아 농도/온도 센서, 그리고 이들 센서의 신호를 이용하여 환원제 공급을 제어하는 제어장치로 구성되어 있다<sup>1-3)</sup>.

우레아 환원제는 연료와 별도로 구매 후 주입해야 하는 번거로움 때문에 운전자들이 종종 빈 탱크로 운행하거나, 환원제 대신 물을 주입하여 주행하는 경우가 발생할 수도 있다. 이와 같이 정상적인 요소수 환원제를 주입하지 않고 주행하는

\*† 최병철(교신저자) : 전남대학교 기계공학부

E-mail : bcchoi@jnu.ac.kr, Tel : 062-530-1681

\*\*김태욱 : 전남대학교 대학원 기계공학과

\*† Byungchul Choi(corresponding author) : School of Mechanical Engineering, Chonnam National University.

E-mail : bcchoi@jnu.ac.kr, Tel : 062-530-1681

\*\*Taewook Kim : Chonnam National University, graduate student of Depart. of Mechanical Engineering.

것은 불법에 해당하는 것으로, 환경부 고시 제 2008-108호(제작자동차 인증 및 검사 방법과 절차 등에 관한 규정)에는 요소수 환원제 탱크에 충전된 요소수 용액을 전부 사용한 경우와 요소수 용액에 이물질이 혼입한 경우에는 자동차 출력이 제한 되도록 해야 한다는 규정이 있다. 그리고 이렇게 되면 SCR 환원촉매는 NOx를 정화시킬 수 없어 심각한 대기오염을 유발하는 원인이 된다. 따라서 환경부의 규제를 따르기 위해서는 우레아 환원제 탱크의 환원제 잔량 수위를 알려주는 장치와 우레아 농도, 온도를 측정하여 우레아 분사나 차량제어에 이용할 수 있는 센서가 필요하다.

현재 요소수 관련 센서 뿐만 아니라 자동차용 센서 전반의 세계 시장 매출규모는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 2016년 기준으로 약 210억 달러에 달하고, 매년 자동차용 센서 시장의 성장률은 증가하여 2016년에는 8.64%에 달했다<sup>4)</sup>. 자동차용 요소수 농도 센서에 관한 개발은 현재까지 국내에서는 자동차에 적용할 수 있는 신뢰성과 가격경쟁력을 갖춘 사례는 없다. 미국의 Measurement사(Tuning fork 기술)와 스웨덴 Wema사(전기전도도법), 그리고 일본 SUN-A사(액체 열전도율 측정 기법)가 대표적으로 차량용 요소수 농도센서를 생산, 판매하고 있는 상황이다. 그 외에 일본의 Mitsui사는 액체 열전도율 측정 기법, Sentelligence사는 광학 스펙트럼을 이용한 기술을 각각 개발하였다. 이들 센서는 농도, 혹은 농도와 온도를 동시에 측정하는 기술이며, 농도, 수위, 온도를 동시에 측정하는 기술 예는 없다.

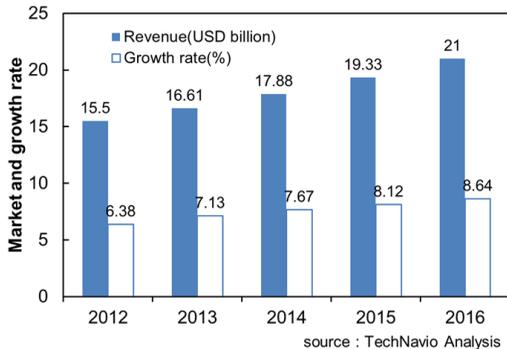


Fig. 1 Global automotive sensors market 2012-2016<sup>4)</sup>

이 연구의 목적은 디젤자동차용 SCR 시스템의 우레아 탱크의 수위, 농도 그리고 온도의 동시 측정을 위하여 초음파와 전기전도도 센서를 하나로 제작한 장치의 기본 데이터를 확보하는 것이다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 우레아 용액 준비

우레아 용액은 시판용 디젤자동차 urea-SCR 촉매 환원제인 요소수(32.5 wt%, Eurox, Lotte 정밀화학(주))를 사용하였으며, 희석은 체적기준으로 증류수 혹은 수돗물을 이용하여 소정의 농도로 혼합하여 조정하였다.

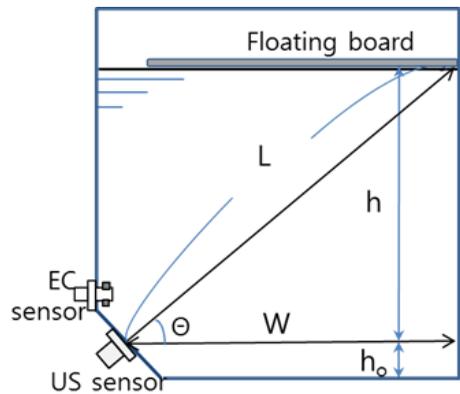


Fig. 2 Schematic diagram of urea tank with electrical conductivity(EC) and ultrasonic(US) sensors

Fig. 2는 초음파센서를 이용하여 우레아 수용액의 농도, 수위 및 온도를 측정하기 위해 아크릴로 제작한 사각 탱크(340×400×100 mm)이다. 초음파(ultrasonic sensor) 센서는 수위 측정을 위해서 바닥에서 수직으로 부착하기도 하고, 수면과 45° 각도로 기울어진 상태로 설치하였다. 그리고 우레아 수용액의 농도 측정을 위해서는 초음파센서를 측면에 설치하여 탱크의 폭(W=340 mm)를 일정하게 통과하도록 한다. 탱크의 수면 위에는 부유판이 들어가 있다. 이는 경사진 면의 초음파센서로 거리를 측정할 경우 발진 음파가 수면에 도달한 후

되돌아오는 음파가 산란되어 수신부에 도달하는 신호가 약해지므로, 부유판이 반사판 역할을 하여 수신신호를 강하게 만든다. 전기전도도(electrical conductivity) 센서는 전극부가 탱크 내부에 들어가도록 수평으로 설치하였다. 우레아 온도는 냉각의 경우는 탱크 전체를 냉동고에 넣어 -10℃에서 8시간 이상 방치 후, 초음파센서 출력과 전기전도도를 측정하고, 그 후 전기히터를 용액에 삽입하여 교류 전압조정기로 전압을 조정하면서 온도를 서서히 올린 후 소정의 온도에서 온도변화가 0.1℃ 이내일 때 전기전도도와 초음파 속도를 측정하였다.

실험에 사용한 초음파 센서(SN1309, Sen Sonic)는 음파의 송신과 수신을 동시에 할 수 있는 타입이며, 동작전압은 DC 9-36 V, 송신전압은 100 mV 이하, 동작전류 55 mA 이하(측정 정밀도 0.5%), 출력전압 1-5 V이다. 전기전도도 측정에는 전기전도도계 HI 2300 EC/TDS/Nacl meter(Hana Instruments, resolution at range 300-3000 μS/cm, 1 μS/cm, accuracy ±1% of reading)를 사용하였다. 우레아 센서의 출력전압 측정에는 디지털 멀티미터 GDM-8200A(Gw Instek)를 사용하였다. 실험에서 전기전도도, 초음파 센서의 출력전압의 측정은 3회 이상 측정하여 그 평균값을 사용하였다.

## 2.2 센서의 특성

### 2.2.1 초음파 센서

초음파를 이용한 우레아 농도측정에는 초음파 진동자 중 Fig. 2의 바닥과 수평하게 음파를 발진하게 진동자를 설치하였다. 초음파를 우레아 탱크 측면에서 반대방향의 벽면으로 발진한 초음파 경로가 탱크 폭(W)를 지나 탱크 벽에서 반사되어 되돌아오는 시간, 즉 우레아 용액 내에서 음속(C<sub>ve</sub>)을 측정하여 우레아 농도를 계산한다. 즉 초음파의 음향임피던스(Z)는 매질의 밀도(ρ<sub>u</sub>)와 용액 내에서의 초음파의 음속(C<sub>ve</sub>)의 곱에 비례하여, 다음 관계식 (1)이 성립한다<sup>5)</sup>.

$$Z = \rho_u \times C_{ve} \quad (g/m^2s) \quad (1)$$

우레아의 농도(C<sub>c</sub>)는 우레아 밀도(ρ<sub>u</sub>)에 비례하므로(도 3 참조), 식 (1)에서 밀도를 구하여 우레아 농도를 다음 식 (2)에 의해 계산할 수 있다.

$$C_c = k_1 \rho_u = k_1 Z / C_{ve} \quad (wt\%) \quad (2)$$

여기서 k<sub>1</sub>은 우레아 밀도에 따라 구한 상수이다.

우레아 농도 32.5wt%에서 C<sub>ve</sub>는 약 1610 m/s이고, 물에서 음속은 1490 m/s이므로, 우레아 농도 0에서 32.5 wt% 범위의 음속변화 범위는 1490 < C<sub>ve</sub> < 1610 m/s라는 것을 알 수 있다. 따라서 이 음속의 범위를 벗어나는 경우는 우레아 탱크에 이물질이 혼입된 것으로 판단할 수 있다.

초음파를 이용하여 온도측정을 할 수 있다. 액체 내에서 음속 C<sub>ve</sub>는 다음 관계식 (3)이 성립한다<sup>6)</sup>.

$$C_{ve} \approx \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_u \beta_s}} = \frac{1}{\sqrt{\rho_u \beta_s}} \quad (m/s) \quad (3)$$

여기서 γ는 비열비로 C<sub>p</sub>/C<sub>v</sub>(정압비열/정적비열)이며, ρ<sub>u</sub>는 우레아 용액의 밀도, β<sub>s</sub>는 단열 압축성계수(adiabatic compressibility)이다. 온도 변화에 따른 우레아 용액의 밀도는 다음 식으로 나타낼 수 있다<sup>7)</sup>.

$$\rho_u(t) = -1.62819 \times 10^{-6}t^2 - 0.000428345t + 1.10001 \quad (g/cm^3) \quad (4)$$

여기서 t는 온도(℃)이며, 적용 범위는 -10℃ < t < 100℃다.

식 (4)의 우레아 용액 밀도를 식 (3)에 대입하여 정리하면 온도를 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$t = \sqrt{692905.7 - \frac{14178.9}{C_{ve}\beta_s}} - 131.54 \quad (^\circ C) \quad (5)$$

우레아 용액의 온도는 초음파로 측정한 음속(C<sub>ve</sub>)과 단열 압축성계수(β<sub>s</sub>)와의 관계식으로 나타낼 수 있다. 단 여기서 C<sub>ve</sub>와 β<sub>s</sub>는 온도의 함수이다. 그 외에 표준상태에서 우레아 용액의 열전도율

(thermal conductivity)은 0.570 W/(m.K), 점도 (viscosity)는 1.4 mPa.s, 표면장력은 65 mN/m이다. 정압비열( $C_p$ )은 다음식이 성립한다<sup>7)</sup>.

$$C_p(t) = 8 \times 10^{-6}t^2 + 0.0027t + 3.4345 \quad (J/(g.K)) \quad (6)$$

### 2.2.2 전기전도도 센서

일반적으로 전해질 용액의 전기전도도는 이온의 농도와 전극 사이의 거리, 전극의 단면적, 이온의 전하 크기, 온도 등에 의해 영향을 받는다. 여기서는 이온 농도와 온도를 변수로 한다. 우레아 농도와 전기전도도의 관계는 식 (7)과 같이 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$C_c = a E_c^2 + bE_c + c \quad (wt\%) \quad (7)$$

여기서 a, b, c는 전기전도도의 상수로 우레아 용액의 온도에 따라 다른 값을 가진다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 우레아 용액의 특성

식 (1)과 같이 초음파 임피던스(Z)는 용액 내에서 음속과 용액의 밀도의 곱에 비례 관계를 가지며, 이들 값은 온도에 따라 변한다. Fig. 3은 온도 26°C에서 우레아의 용액 농도와 소금물의 농도에 따른 밀도 변화를 나타낸 결과이다. 동일한 농도에서 소금물의 밀도가 우레아 용액보다는 높은 것을 알 수 있다. 우레아의 농도 0과 32.5 wt% 사이의 밀도차는 약 0.09 g/cm<sup>3</sup>이다.

### 3.2 초음파 센서의 측정 결과

Fig. 4는 초음파 센서에 의한 우레아 탱크의 수위(수직 방향, 센서 탱크 바닥에 위치)를 측정할 결과이다. 우레 용액의 높이에 따른 초음파 센서의 출력은 직선성을 가지고 있음을 알 수 있다. 여기서 초음파센서의 출력( $P_{us}$ )과 수위(h)는 위 관계식 (8)이 성립한다.

$$h = 0.27831P_{us} - 275.13 \quad (mm) \quad (8)$$

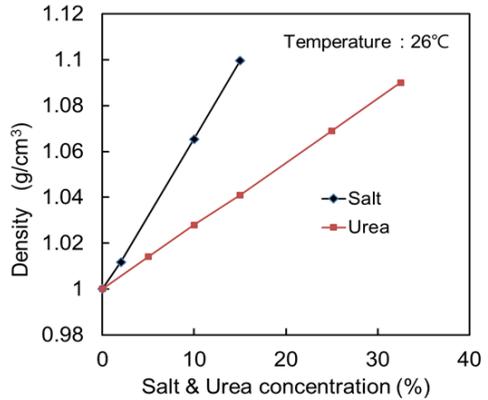


Fig. 3 Density of urea-water solution and salt-water solution

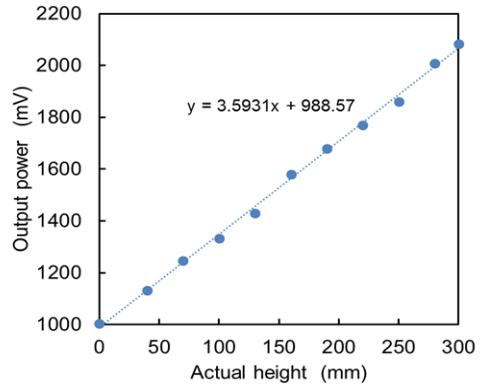


Fig. 4 Output power of ultrasonic sensor according to height of 32.5 wt% urea

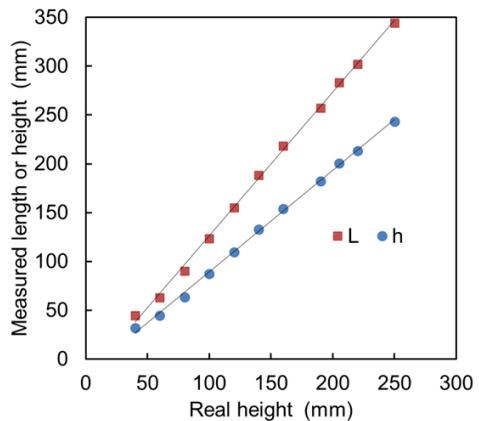


Fig. 5 Measurement length or height of urea tank level(32.5 wt%) by vertical(h) and inclined plane of 45°(L)

Fig. 5는 Fig. 2에 나타난 것과 같이 초음파센서를 수면과 45° 경사지게 우레아 탱크 하부측면에 설치한 경우 측정 경사면의 길이(L)과 실제 탱크의 수위(h)를 비교한 결과이다. 경사면에서 측정된 길이는 실제 수직거리의  $1/\sqrt{2}$ 에 거의 비례함을 알 수 있다. 이와 같이 측면에서 초음파센서를 경사지게 측정할 경우에는 수면 위에 부유물을 띄워 초음파의 수신 방향으로 반사음파의 강도를 향상시켜 줄 필요가 있다.

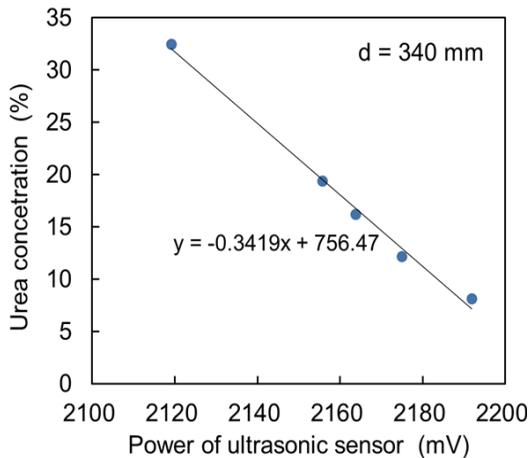


Fig. 6 Output power according to urea concentration at distance 340 mm

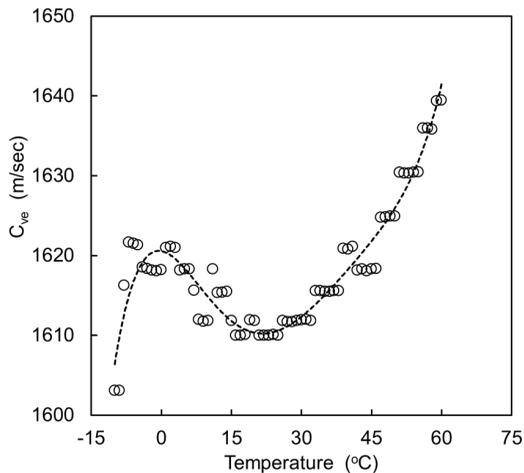


Fig. 7 Sound velocity( $C_{ve}$ ) according to urea temperature at distance(d) = 340 mm

초음파를 이용한 우레아 농도측정은 초음파 센서를 우레아 탱크 측면에 설치하여 초음파가 탱크 폭(340 mm)을 통과하여 벽에서 반사되어 되돌아오는 시간을 측정하여, 즉 우레아 수용액 내에서 음속( $C_{ve}$ )을 측정하여 식 (2)에 의해 우레아 농도를 계산할 수 있다. 즉 우레아 농도는 초음파의 음향임피던스(Z)에 비례하고, 음속( $C_{ve}$ )에 반비례한다<sup>5,6</sup>. Fig. 6은 초음파 센서에 의한 우레아 농도 측정 결과이다. 우레아 농도 32.5 wt%와 8 wt% 사이에서 농도와 초음파센서 출력값은 양호한 반비례 직진성을 가졌다.

Fig. 7은 32.5 wt% 우레아 용액의 온도를 -10°C에서 60°C까지 변화시켰을 경우 초음파 센서에 의한 음속( $C_{ve}$ ) 측정결과이다. 초음파의 도달 거리는 340 mm이다. 참고로 32.5 wt% 우레아 용액의 동결점은 -11.2°C이다. -10°C에서 0°C까지는 온도가 올라가면 음속도 증가하다가, 0°C에서 22°C 범위에서는 다시 음속이 감소하며, 22°C 이상에서는 온도가 올라가면 음속이 빨라지는 경향이 있다. 보통 물속에서 음속은 다음 식 (9)와 같이 온도에 대해 선형적으로 증가하는 경향이 있다<sup>7</sup>.

$$C_{ve,water}(t) = 1402.385 + 5.03522t - 58.3087 \times 10^{-3}t^2 + 345.3 \times 10^{-6}t^3 - 1645.13 \times 10^{-9}t^4 + 3.9625 \times 10^{-9}t^5 \quad (9)$$

물의 밀도는 4°C에서 1 g/cm<sup>3</sup>, 60°C의 경우 약 0.98 g/cm<sup>3</sup>로 온도에 대한 밀도변화는 -0.0037 g/cm<sup>3</sup>/°C 정도이다. 32.5 wt% 우레아 용액의 0°C에서 밀도는 1.1 g/cm<sup>3</sup>, 60°C에서는 1.068 g/cm<sup>3</sup>로, 온도에 대한 밀도변화는 -0.00053 g/cm<sup>3</sup>/°C으로 변화폭은 물의 약 1/7 수준으로 작다. 즉 우레아 용액의 밀도가 우레아 용액 내에서 음속  $C_{ve}$ 에 미치는 영향이 크지 않다는 것을 예측할 수 있다. 식 (3)에서 음속에 영향을 미치는 요소는 단일 압축성계수( $\beta_s$ )이다. Fig. 7에서 온도에 따라 측정된 음속을 기준으로 온도에 따라 변하는 모든 물성치를 고려하여 압축성계수( $\beta_s$ )를 구한 결과가 Fig. 8이다. 우레아 수용액의 압축성계수는 물의 압축성계수보다 약간 작은 값을 가진다<sup>8,9</sup>. 예를 들어 20°C에서 물의 압축성계수는 약  $4.6 \times 10^{-5}$

( $\text{bar}^{-1}$ )이다<sup>9)</sup>.

우레아 용액이 32.5 wt%로 정상상태일 경우, 초음파 센서로 측정한 음속으로 그 용액의 온도는 식 (5)에서 측정한 음속과 Fig. 8의 압축성계수( $\beta_s$ )를 이용하면 구할 수 있다. 단순히 음속만으로 우레아의 온도를 구하려면, Fig. 7의  $-10\sim 22^\circ\text{C}$  온도 범위에서 음속의 변화가 역 2차 곡선으로 나타나 구하기가 어렵다. 그러나  $22\sim 60^\circ\text{C}$ 의 범위에서는 온도와 음속이 선형적으로 나타나 쉽게 구할 수 있다.

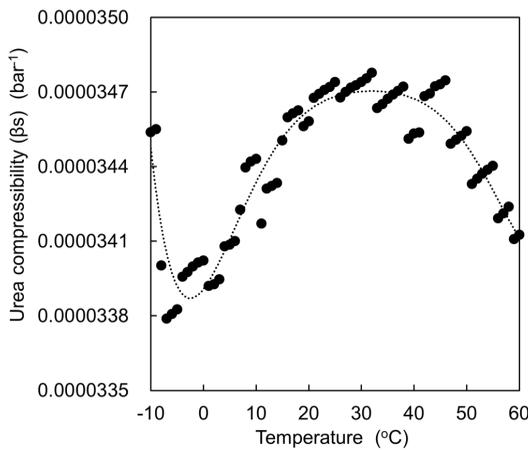


Fig. 8 Adiabatic compressibility ( $\beta_s$ ) of urea-water solution according to temperature

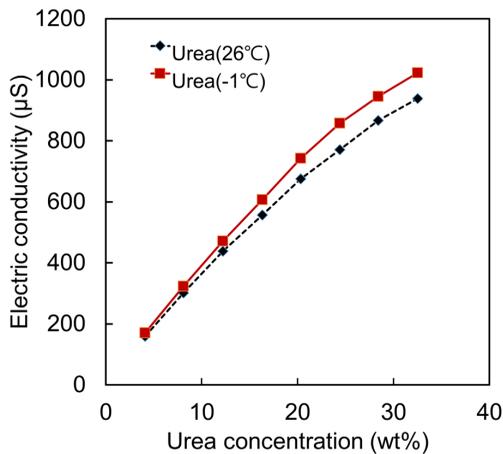


Fig. 9 Electric conductivity according to urea concentration according to temperatures

### 3.3 전기전도도 센서의 측정 결과

Fig. 9는 전기전도도 센서에 의한 온도 변화에 따른 우레아 농도를 측정하는 결과이다. 측정한 우레아 농도범위 ( $5\sim 32.5$  wt%)에서 전기전도도( $E_c$ )는  $200 < E_c < 1000$  ( $\mu\text{S}$ )임을 알 수 있다. 온도( $-1^\circ\text{C}$ )가 낮은 경우가 높은 경우( $26^\circ\text{C}$ )보다 전기전도율이 높게 나타나고 있다. 저농도에서 온도차에 의한 전기전도차는 작지만 농도가 높을수록 온도에 의한 전기전도차가 커지고 있다. 따라서 디젤자동차에 우레아를 사용할 경우는 온도범위  $-10\sim 60^\circ\text{C}$ 에서 온도에 따른 전기전도도를 보정해 주어야 한다. 온도  $26^\circ\text{C}$ 의 경우 식 (7)에서 상수 a는  $-2 \times 10^{-5}$ , b는 0.0184, c는 0.9619이다. 디젤자동차용 urea-SCR 시스템의 우레아 농도는  $30\sim 32.5$  wt%를 사용하여야 하므로(정상농도 32.5 wt%), 이 농도 범위의 전기전도도 값은  $894 < E_c < 940$   $\mu\text{S}$ 이므로, 이 범위를 벗어나는 경우는 우레아 탱크에 이물질이 혼입된 것으로 판단할 수 있다.

Fig. 10은 온도  $26^\circ\text{C}$ 에서 우레아 용액의 농도에 따른 전기전도율을 나타낸 결과이다. 이 때 우레아 농도를 증류수를 사용하여 희석한 경우와 수돗물을 이용하여 희석한 결과를 비교하고 있다. 수돗물에는 염소나 미네랄성분이 포함되어 있기 때문에 전기전도도가 증류수를 사용하여 희석한 경우보다 약간 높게 나타났다.

Fig. 11은 우레아 농도별 온도에 따른 전기전도도를 나타내고 있다.  $32.5$  wt%일 때 전기전도도는  $-10^\circ\text{C}$ 에서 가장 크고 온도가 올라갈수록 전기전도도는 작아지며, 온도  $24^\circ\text{C}$  부근에서 최소값을 나타내고 있다. 그 이후 전기전도도는 온도가 올라갈수록 약간씩 다시 커지는 경향이 있다. 우레아 농도가 묽어질수록 전기전도도는 작아지는 경향을 보이고 있다. 따라서 이 전기전도도로부터 온도를 비교적 정확하게 판단할 수 있는 범위는  $-10\sim 22^\circ\text{C}$  범위이다. 이 온도 범위에서 전기전도도( $E_c$ )에 따른 온도는 다음 3차식으로 나타낼 수 있다.

$$t = -0.007E_c^3 + 0.4228E_c^2 - 9.4165E_c + 1041 \quad (10)$$

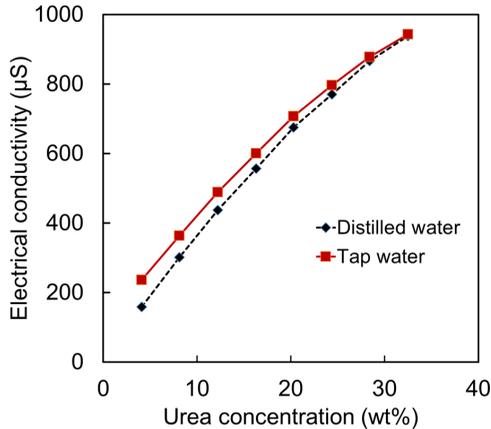


Fig. 10 Electric conductivity according to urea concentration for controlled by distilled water or tap water

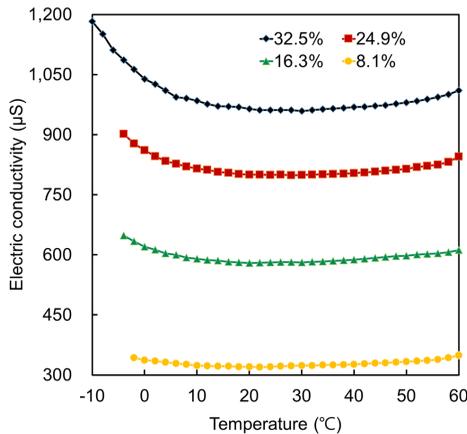


Fig. 11 Electric conductivity of 32.5 wt% according to temperatures

이상의 결과로부터 디젤자동차용 우레아의 농도, 수위, 온도를 동시에 측정할 수 있는 방법은 한 개의 센서에 전기전도도 센서와 초음파 센서(분할형 센서)<sup>9)</sup>를 하나의 센서로 제작하여 상기 실험결과를 응용하면 가능하다<sup>10)</sup>. 예를 들어 우레아 탱크의 잔량을 나타내는 수위는 초음파센서를 이용하여 식 (8)로부터 구할 수 있다. 우레아의 농도는 원래 농도 32.5 wt%보다 낮은 경우 초음파 센서(Fig. 6)와 전기전도도 센서(Fig. 9)의 두 신호를 동시에 이용하여 구할 수 있다. 온도는 온도범

위 -10~22°C에서는 전기전도도(Fig. 11) 센서를 이용하고, 그 이상에서는 초음파센서(Fig. 7)를 이용하여 구할 수 있다. 이렇게 두 센서를 사용하면 특정 온도 영역에서 한 센서의 취약 부분을 상호 보완해주는 효과가 있다. 이들 두 종류의 센서의 가격은 기존 상용 우레아 농도, 수위센서에 비교하여 가격이 비싸지 않아 측정값의 신뢰성과 가격경쟁력을 동시에 확보하기 위해서는 두 센서를 하나로 제작할 충분한 가치가 있다.

## 5. 결 론

디젤자동차 urea-SCR 시스템용 우레아 탱크의 수위, 농도 그리고 온도의 동시 측정을 위하여 초음파와 전기전도도 센서를 하나로 제작할 장치의 기본 데이터를 확보하기 위한 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초음파 센서를 이용한 우레아 탱크 수위는 실제 높이와 좋은 직선성을 보였으며, 우레아 농도는 32.5~10% 범위에서 좋은 직선성을 유지하였다.
- 2) 온도측정은 -10~22°C 범위에서 전기전도도를 이용하고, 22°C 이상에서는 초음파센서를 이용하는 것이 효율적이다.
- 3) 디젤자동차용 우레아의 농도, 수위, 온도의 동시 측정은 한 개의 센서에 전기전도도 센서와 초음파 센서(분할형 센서)를 동시에 부착하면 가능하다.

## 후 기

이 논문은 2015년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2015R1A4A1041746)이다.

## References

1. R. V. Helden and M. V. Gendereren, 2002, "Engine Dynamometer and Vehicle Performance of a Urea SCR-System for Heavy-duty Truck

- Engines", SAE paper No. 2002-01-0286.
2. T. V. Johnson, 2006, "Diesel Emission Control in Review", SAE paper No. 2006-01-0030.
3. C. K. Seo and J. Bae, 2015, "De-NOx Characteristics of V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> SCR According to the Ratio of TiO<sub>2</sub> Crystal Structures", Journal of the Korean Society for Power System Engineering, Vol. 19, No. 6, pp. 26-32.
4. Technical report, 2014, "2012-2016 Global Automotive Sensors Market", Technavio Insights, p. 10.
5. H. J. Lee and D. M. Seo, 2009, "Ultrasonic Flaw Detecting Test", Enplebooks, Seoul, pp. 36-44.
6. D. Ensminger and L. J. Bond, 2012, "Ultrasonics", CRC Press, pp. 33-34.
7. Technical Leaflet, 2006, "AdBlue (BASF)", pp. 1-6.
8. R. A. Fine and F. J. Millero, 1973, "Compressibility of Water as a Function of Temperature and Pressure", The Journal of Chemical Physics, Vol. 59, No. 10, pp. 5529-5536.
9. A. T. J. Hayward, 1971, "How to Measure the Isothermal Compressibility of Liquids Accurately", Applied Physics, Vol. 4, pp. 938-950.
10. B. C. Choi, 2017, "A Measuring Device of Level and Concentration of Urea-water Solution Tank of a Urea-SCR System for Automotive Diesel Vehicles using Ultrasonic", Korea patent No. 10-1725108.