<응용기술논문> ISSN 2288-3991(Online)

R-BENCH TOOL 을 이용한 상용차용 정전용량 방식의 연료 센서의 소프트웨어 검증 평가

김상우*†· 이주형*· 손정현**· 이수호***· 이덕진****
* 타타대우상용차㈜, ** 대우전자부품㈜, *** BTS 테크놀로지스㈜, ****군산대학교

Capacitance Fuel Sensor for Commercial Vehicle Software Verification Through R-BENCH TOOL

Sang Wo o Kim*†, Ju Hyoung Lee*, Jung Hyun Son**, Soo Ho Lee*** and Duck Jin Lee****
* TATA DAEWOO Commercial Vehicle Inc. Co., Ltd, ** DAEWOO Electronic Components Co., Ltd,
*** BTS Technologies Inc., **** Kunsan Nat'l Univ.

(Received November 12, 2013 ; Revised January 21, 2014 ; Accepted January 28, 2014)

Key Words: Capacitance Fuel Sensor, R-BENCH, Programmable Capacitor Board, HILS

초록: 최근 차량이 기계장치 중심에서 전기전자 장치 중심으로 발전하고 있으며, 상용차량 역시 전기전자 장치가 증대되고 있다. 정전용량 방식의 연료 센서는 연료의 레벨을 정전용량 값으로 측정하여 센서 내 MCU 를 통해 연산과정을 거쳐 최종 전압값의 신호로 출력해 주는 센서이다. 기존의 세라믹 저항을 이용한 센서보다 내구성이나 연료 측정 정확성이 향산된 진보된 센서로 센서에 대한 소프트웨어 검증을 위하여 가변 커패시터 보드를 제작하여 R-BENCH TOOL 을 통해 test case 를 자동으로 생성시킨 후 연료 센서의 소프트웨어 검증을 시도하였다. 또한 결론으로 98% 이상의 높은 소프트웨어의 신뢰도가 있음을 확인하였다.

Abstract: Recently vehicle development trend changes from machinery vehicle to the electrical and electronic devices. As well the electrical and electronic devices commercial vehicles are increasing more than machinery system. The capacitance fuel sensor is a sensor that, by measuring the capacitance value of fuel level sensor MCU operating for the final voltage value of the signal output. That is increasing durability and fuel measurement accuracy more than conventional ceramic resistor type. For Sensor software verification R-BENCH TOOL generated test case automatically. We make the programmable Capacitor board for test. And it was confirmed that more than 98% of the high reliability of the software.

1. 서 론

요즘 차량에 전기전자 장치의 비중이 점차 증가하고 있으며 상용차량 역시 증가율은 승용차량 못지 않다. 특히, 대형상용차량의 경우 1,000,000km 이상의 차량수명과 과도한 차량진동 및 주행환경등이 열악하고, 연료탱크가 사각 혹은 원형 type 으로 승용차량 대비 연료의 운동 에너지가 훨씬 크다. 즉, 기존 접점식 저항 측정 방식으로는 고 내구성을 추구할 수 없다. 이에 차량 계기판 즉 Meter Cluster 에 연료량을 표현하기 위한 연료량 측정 센서의 경우 기존의 세라믹 저항 측정 방식에서 정전용량 방식의 연료량 측정 방식으로 진화하고 있다.

대형 상용차량의 연료 탱크의 경우 연료량 즉 연료 체적 공간이 크기 때문에 연료 탱크 높이에 따른 연료량의 변화는 승용차량보다 크다. 또한 순간 연비, 구간 연비, 평균 연비 등 다양한 연비 측정이 상용차량에서 더욱 필요하기 때문에 무엇보다도 연료 센서의 내구성과 정확성이 상용차량에서 더욱 요구된다.

† Corresponding Author, swkim@tata-daewoo.com
Ⓒ 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

정전용량 방식의 연료 센서의 경우 Floater 의 움직임에 의한 세라믹 저항의 Resistance 변화에 의해 측정되는 방식이 아니라 알루미늄 관에 유입되는 유량에 따라 변화하는 Capacitance data 를 측정하는 방식이기 때문에 연료 센서의 내구성 및 정확성이 향상된다.

차량의 움직임에 따른 연료 유동이 발생하고, 연료 유동에 의한 Capacitance 변화량을 Meter Cluster 에 전송하기 위해서는 센서 내 별도의 소프트웨어 로직(Logic)이 필요하다.

세계 자동차 업계는 소프트웨어의 신뢰성 및 안전성 확보를 위해 ISO26262 규격 제정 및 AUTOSAR 표준 소프트웨어 플랫폼 제정 등 노력을 기울이고 있다. 하지만 현재 우리나라 자동차 업계 특히 상용차 업계에서 표준에 맞춰 프로그래밍하는 것은 현재 소프트웨어 인력 등을 고려했을 때 결코 쉽지 않은 것이 현실이다.

시스템을 구성하고 있는 개발 단계에서 저비용으로 하드웨어 및 소프트웨어 신뢰성을 확보하기 위한 모델을 제시하고자 HILS 기반의 R-BENCH TOOL 을 사용하여 정전용량 방식의 연료 센서의 시뮬레이션 검증을 시도하였다.

2. 정전용량 연료 센서 원리

모든 물질은 전기적인 에너지를 어느 한 지점에서 다른 지점으로 흐르지 못하게 하는 힘, 즉 Impedance 를 가지고 있다. 이러한 Impedance 중에는 Capacitance 즉 정전용량은 물질의 고유 상수인 유전율에 ε에 의해서 결정된다.

균질의 유전체로 채워져 있는 두 도체가 +Q 와 –Q 로 서로 대전되어 있고, 두 도체 사이의 전위차가 V 라 할 경우 정전용량 C 는 다음과 같다.

$$C = \frac{V}{Q}[F] \tag{1}$$

이상적인 정전용량은 전극의 면적 S 비례하고 전극 사이의 거리 d 에 반비례 한다. 양극 사이 유전체의 유전율을 ε라 하면 정전용량 C 는 다음과 같다.

$$Q = \oint_s \vec{D} \cdot d\vec{S} = \rho_s \cdot S \tag{2}$$

$$V = -\int_d^0 \vec{E} \cdot d\vec{L} = -\frac{\rho_s}{\varepsilon} \cdot l\Big|_d^0 = \frac{\rho_s}{\varepsilon} d \tag{3}$$

식 (1)에 식 (2)와 식 (3)을 대입하면 정전용량과 전극 면적, 전극 사이, 유전율의 관계를 얻을 수 있다.

$$C = \varepsilon(\frac{S}{d}) \tag{4}$$

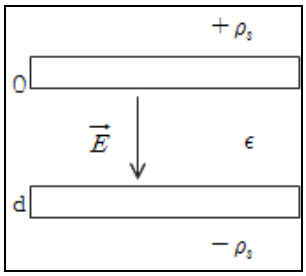

Fig. 1 Parallel plates capacitance

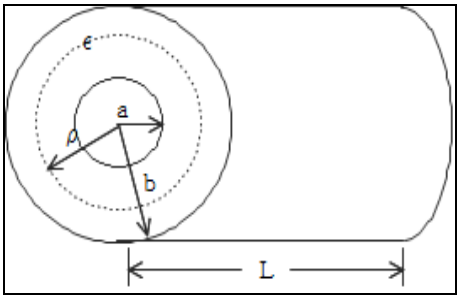

Fig. 2 Cylindrical plates capacitance

물질의 고유 상수인 유전율은 공기 유전율을 1 로 하였을 때 물의 유전율은 65 이며, 경유(Diesel)의 유전율은 2.88 이다.

원통형 정전용량의 경우 반지름이 a 인 내부도선과 반지름이 b 인 외부도선 사이에 ε_r 의 유전체가 채워져 있는 커패시터를 모델링 하면 된다.

원통형 커패시터의 정전용량을 구하기 위해 내부 도선에 $+\rho_L$ [C/m]의 선전하를 주고, 외부 도선에 $-\rho_L$ [C/m]의 선전하를 주면 ρ 지점에서 전계 $\vec{E}$ 는 가우스 법칙에 의해 다음과 같다.

$$\overline{E} = \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon \cdot \rho}\vec{a}_\rho \quad [\mathrm{V/m}] \tag{5}$$

전압 V 는

$$\begin{aligned} V &= -\int_b^a \vec{E}\cdot d\vec{L} = -\int_b^a \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon\cdot\rho}\cdot d\rho \\ &= -\frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon}\ln\rho\Big|_b^a = \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon}\ln\frac{b}{a} \end{aligned} \tag{6}$$

그러므로 길이가 L 인 원통형 커패시터 정전용량은 식 (5)와 식 (6)으로부터 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$C_l = \frac{Q}{V} = \frac{2\pi\varepsilon\cdot L}{\ln\frac{b}{a}} \quad [\mathrm{F}] \tag{7}$$

연료 센서를 구상하기 위해 하기 그림과 같이 원통형 전극판을 형성했을 경우 극판 높이 h 에 대해 총 정전용량은 경유로 인해 발생되는 정전용량에 나머지 높이에 있는 공기로 인하여 발생되는 정전용량 의 합으로 구성이 가능하다. 높이에 따른 정전용량의 변화율을 크게 하기 위해서는 극판의 사이 간격을 줄이면 된다.

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0 h}{\ln(r_2/r_1)} + \frac{2\pi(\varepsilon-\varepsilon_0)h_x}{\ln(r_2/r_1)} \tag{8}$$

$$A = \frac{2\pi\varepsilon_0 h}{\ln(r_2/r_1)} \tag{9}$$

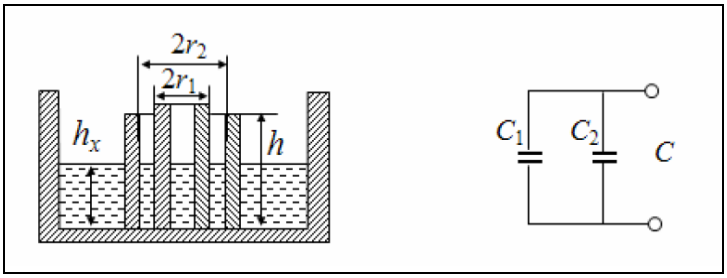

Fig. 3 Capacitance modeling for fuel sensor and equivalent circuit

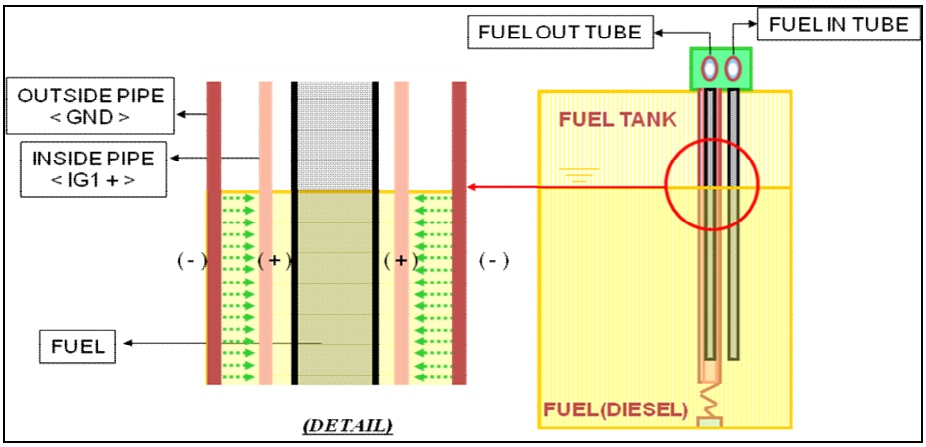

Fig. 4 fuel sensor concept

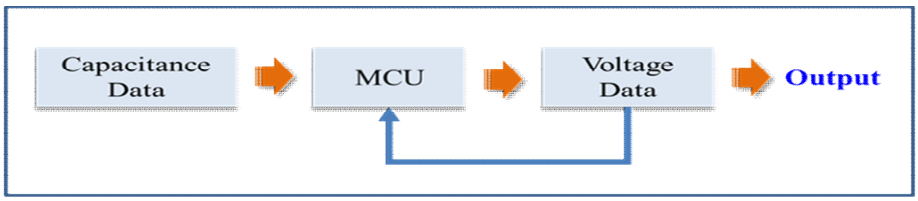

Fig. 5 Block diagram for capacitance fuel sensor

$$K = \frac{2\pi(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\ln(r_2 / r_1)} \tag{10}$$

식 (9)와 식 (10)을 식 (8)에 대입하면 하기와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$C = A + Kh_x \tag{11}$$

식 (11)에 의해 연료 탱크 내 연료량의 변화에 따라 정전용량의 값이 변화됨을 알 수 있고 정전용량의 변화를 통해 연료량을 센싱할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4 의 연료 센서 컨셉도를 보면 Outside Pipe 와 Inside Pipe 사이에 연료가 유입되도록 구상하였다. Inside Pipe 내 연료의 Suction Pipe 를 적용하여 연료 탱크 내 별도의 Suction 과 Return Port 를 추가할 필요 없이 구상하였다. 유입된 연료량은 다음과 같은 프로세스에 따라 처리된다.

상기 그림과 같이 연료 탱크 내 연료량에 의한 정전용량 값은 연산과정을 거쳐 전압 값의 신호로 출

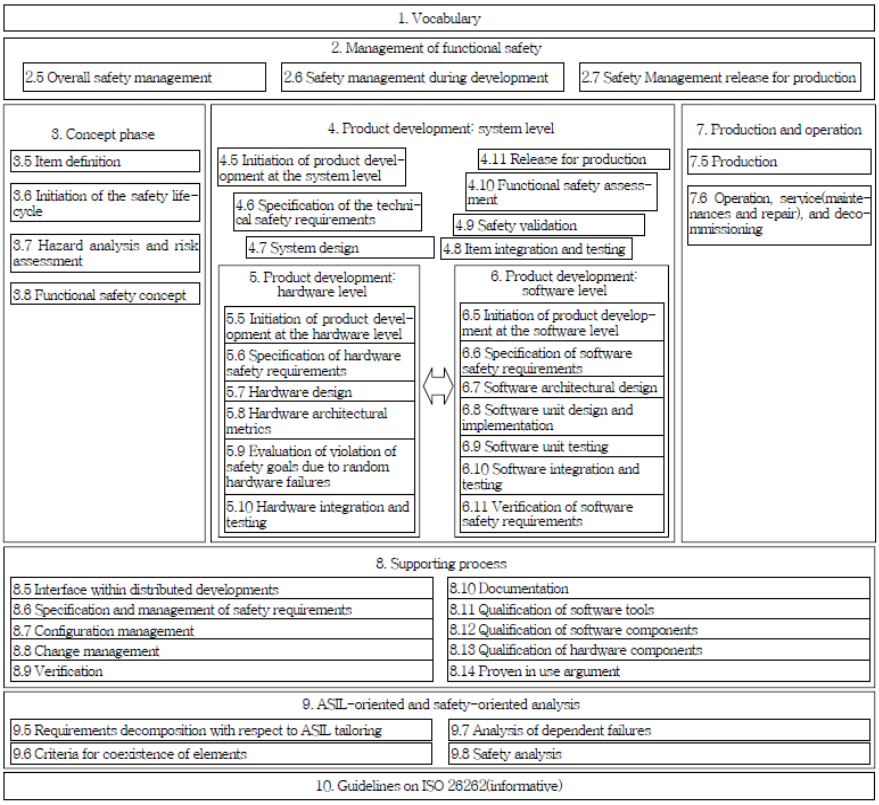

Fig. 6 ISO26262 Structure

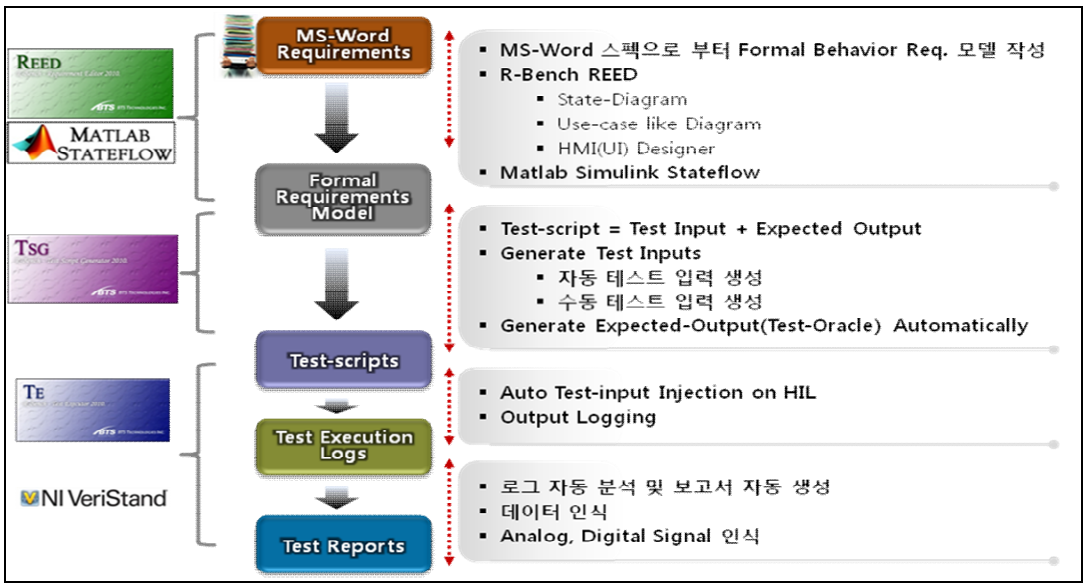

Fig. 7 R-BENCH Procedure

력하게 된다. 입력된 전압 값을 통해 Meter Cluster 내 연료 게이지에 연료량을 표현하여 운전자에게 알린다. 연료량을 측정하는 Capacitance 데이터는 250 μs 주기로 MCU 에 입력된다. 하지만 차량 주행 조건에서 연료 레벨은 변동되고 이에 센싱되는 데이터의 편차는 실제 심하기 때문에 안정된 출력 전압을 송출하기 위해 출력되는 전압 값을 다시 MC 로 되먹임(Feedback)하여 출력 데이터가 수렴할 수 있도록 연산한다.

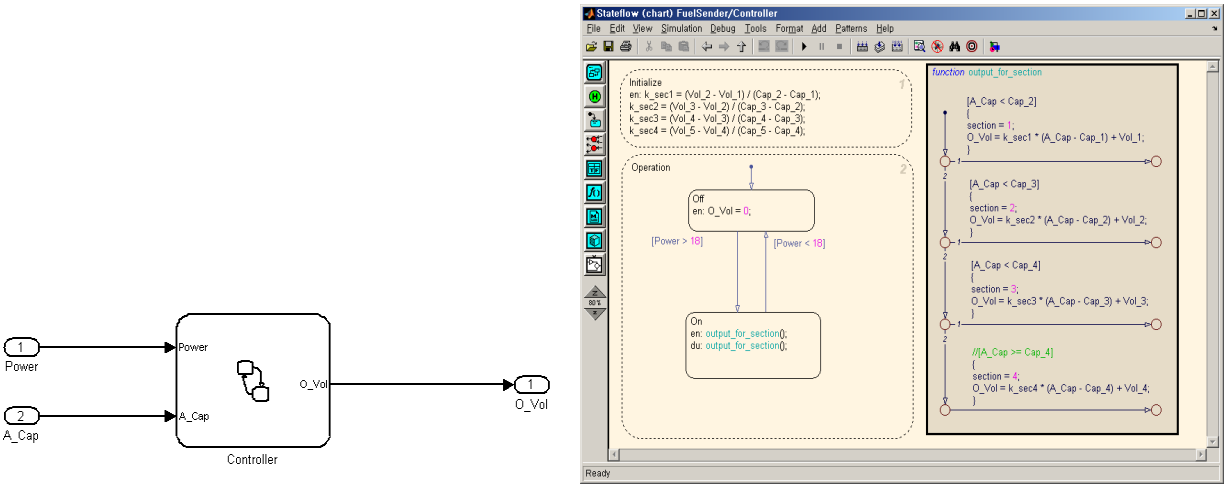

Fig. 8 Fuel Sensor Modeling by MATLAB Simulink

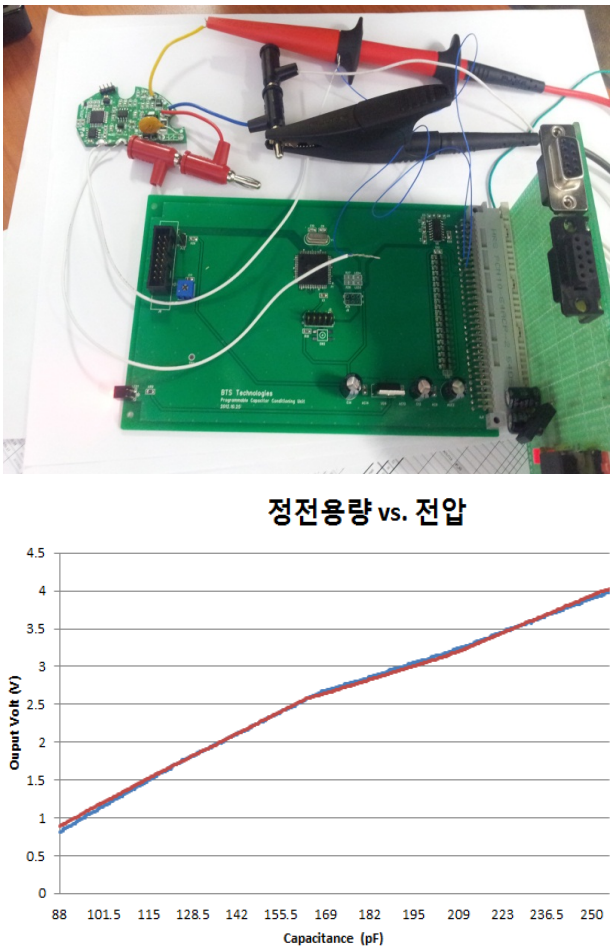

Fig. 9 Programmable Capacitor Board & Output Signal

3. HILS 기반 R-BENCH 모델링& Test

차량 안전에 관하여 전통적으로 차량의 기능 별로 관련 규정과 지침 및 형식 승인을 통해 차량 안전 보장을 요구해 왔으나, 최근 차량이 기계 장치 중심에서 전기전자 장치 중심으로 발전하고 차량 기능

간 통합 및 교류가 증가하면서 선진국을 중심으로 기존의 기계장치 중심의 형식승인을 전자장치 중심으로 강화한 규정 및 지침 필요성이 대두되었고, 차량의 전기전자 장치의 기능 안전성에 관한 요건을 정의한 표준으로 ISO26262 가 공표되었다.

ISO26262에서 V 주기모형을 따르고 있으며, 하드웨어 및 소프트웨어 구성요소를 모두 고려한 시스템 수준에서 독립적인 제품개발 단계(Fig. 6 development: system level)를 통해 시스템을 설계한 후 하드웨어와 소프트웨어 개발이 독립적으로 병행될 수 있는 구조로 구성되어 있다.

ISO2626에 따르는 각 단계별 TOOL은 여러 가지가 있으며, 각 TOOL에 대한 구매 비용은 그리 만만치 않다는 것 또한 현실이다. 국내 BTS 테크놀로지스 사에서 개발한 R-BENCH TOOL은 저비용으로 Requirement 그리고 HILS 기반의 검증을 위하여 소프트웨어 Coding부를 제외한 개발 초기 단계에서 소프트웨어와 하드웨어에 대한 신뢰성을 확인할 수 있다.

정전용량 연료센서의 시뮬레이션을 통한 신뢰성 검증을 위해 먼저 Fig. 8와 같이 MATLAB Simulink를 통해 모델링 작업이 필요하다. 이 모델링은 자동 테스트 케이스 생성을 위해서 필요한 작업이다.

Simulink 모델 기반의 R-BENCH TSG(Test Scripts Generator)를 이용하여 Test Case를 자동으로 생성시키기 위해 가변 커패시터 보드 제작이 필요하다. 왜냐하면 실제 연료량의 변화를 주기 위해 연료 탱크 내 별도의 유압펌프를 이용하여 연료 변화를 주는 지그 제작은 현실적으로 어려울 뿐 아니라 시간적 Loss도 심하기 때문이다. 가변 커패시터를 활용하여 연료 변화와 유사하게 모델링한 보드를 제작하면 HILS 구현이 용이하고 문제점에 대한 Feed back도 빠르게 진행할 수 있다. 가변 커패시터는 MAXIM사의 MAX1474를 활용하였고, MCU는 ATMEL사의 ATMega128를 이용하였다.

가변 커패시터 보드를 통한 출력값과 실제 연료센서의 유량 변화를 통한 출력값이 거의 동일하게 출력되는 것을 상기 Fig. 9를 통해 알 수 있다. 이는 가변 커패시터의 변화가 실제 정전용량을 이용한

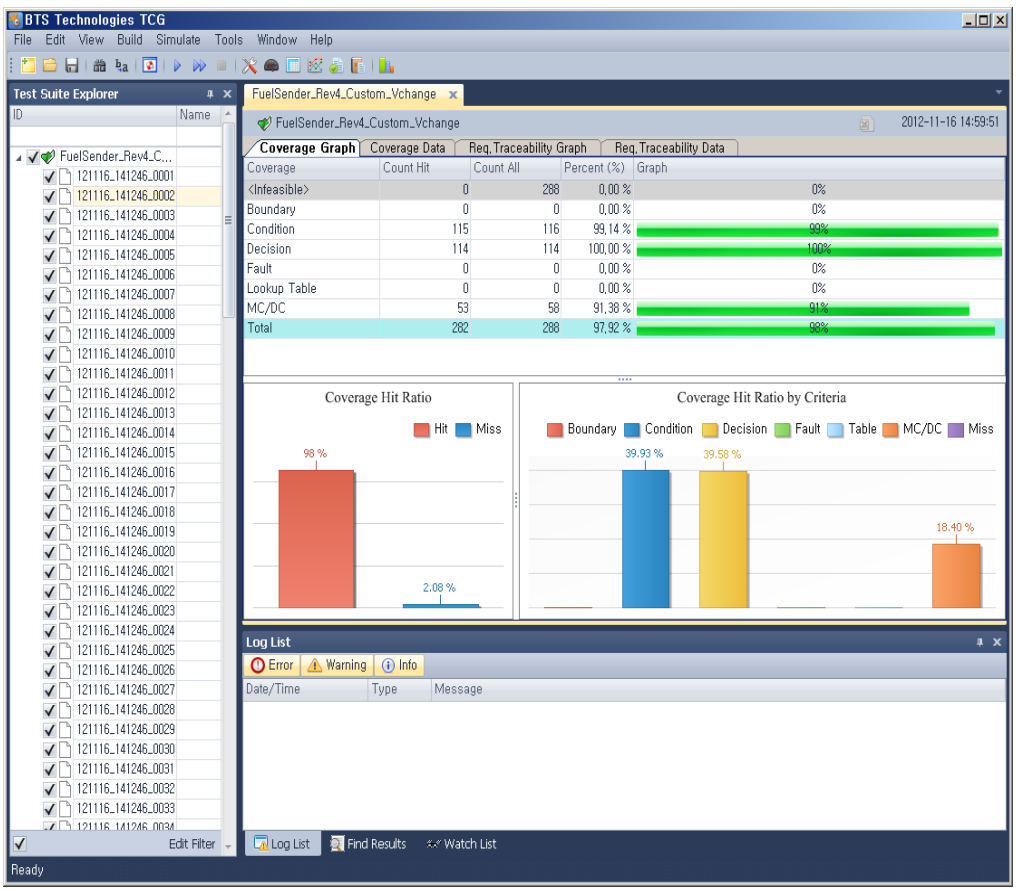

Fig. 10 R-BENCH Test Case Generation & Result

연료센서의 커패시터 변화와 거의 동일함으로써 가변 커패시터의 커패시터 변화량이 연료의 변화량과 매칭된다고 가정할 수가 있다. 이 가정을 근거로 가변 커패시터 보드를 이용한 소프트웨어 신뢰성 검증이 정전용 유효하다는 것을 알 수 있다.

R-BENCH TSG를 이용한 테스트 케이스를 자동으로 생성을 하니 총 120개의 테스트 케이스가 생성이 되었다. 그리고 Fig. 10의 TE를 통해 자동 테스트한 결과 98% 이상의 신뢰도를 확인하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 120개의 테스트 케이스 중 7개의 케이스에서 Fail이 발생하였고, 실차 조건에서는 발생할 수 없는 상황이기 때문에, 실차 적용에 적합한 소프트웨어 및 하드웨어에 대한 높은 신뢰도를 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

부품 개발에 있어서 HILS 기반의 R-BENCH를 이용하여 소프트웨어 및 하드웨어에 대한 시뮬레이션을 통해 얻은 신뢰성 결과를 활용하여 비용과 개발 기간을 단축할 수 있음을 본 연구를 통해 확인하였다.

참고문헌
(References)

(1) Han, T.M. and Cho, J.H., 2010, "Technology Trends in Automotive Electronic Control Units" *Electronics and Telecommunication Trends* Vol. 25, No. 4, pp. 69~81.

(2) Cho, S.C., Dong, D.H., Yoon, M.K. and Ryu, J.I., 2002, "A Development Capacitance Sensor for Stability Measurement of W/O Type Emulsified Fuel*," The Korean Society of Automotive Engineers conference*, pp. 1525~1530.

(3) Yang, S.I. and Lee, N.H., 2012, "The Case Study of ISO26262 Product Requirements Analysis applying Requirements Engineering," *The Korean Society of Automotive Engineers conference*, pp. 2609~2615.

(4) Baxter, L. K., 1997, "Capacitive Sensors / Designs and Application," *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, pp.1~2.

(5) Hayt, W. H. Jr. and Buck, J. A., 2012, "Engineering Electromagnetic" *McCraw Hill Korea*, pp.151~163

(6) Lee, R.D., 1989, "The Application and Principle of an Improved Capacitive Level Sensor" *Journal of Korea Electric Association* Vol.148 pp.37~41