

# Sensor Fusion을 이용한 전자식 조향장치의 Fail Safety 연구

論 文

57-8-10

## A Study on the Fail Safety of Electronics Power Steering Using Sensor Fusion

金柄禹<sup>†</sup> · 許眞<sup>\*</sup> · 趙賢德<sup>\*\*</sup> · 李永碩<sup>\*\*</sup>

(Byeong-Woo Kim · Jin Her · Hyun-Duck Cho · Young-Seok Lee)

**Abstract** - A Steer-by-Wire system has so many advantages comparing with conventional mechanical steering system that it is expected to take key role in future environment friendly vehicle and intelligent transportation system. The mechanical connection between the hand wheel and the front axle will become obsolete. SBW system provides many benefits in terms of functionality, and at the same time present significant challenges - fault tolerant, fail safety - too. In this paper, failure analysis of SBW system will be performed and than sensor fusion technique will be proposed for fail safety of SBW system. A sensor fusion logic of steering angle sensor by using steering angle sensor, torque sensor and rack position sensor will be developed and simulated by fault injection simulation.

**Key Words** : steer-by-wire system, mechanical steering system, fault tolerant, sensor fusion

### 1. 서 론

최근 자동차에 적용되는 전자화 비율이 증대되면서 제동, 조향, 현가장치를 포함하는 자동차 차시 시스템의 전자화가 급속하게 발전되고 있다. 특히, 자동차 조향장치의 전자화가 진행되면 연비 및 환경오염 개선 측면에서 기존대비 5% 내외의 향상을 가져오게 된다. 이 때문에 선진 자동차 업체 및 연구기관에서는 기계적인 구조물 기반에 모터가 탑재된 모터 구동방식의 전자식 조향장치의 상용화는 물론이고 이를 한 단계 향상시킨 steer by wire(SBW)에 대한 연구를 활발하게 추진하여 2013년 이후에 상용화를 목표로 하고 있다.[1],[2],[3] 현재, 자동차 SBW 시스템에 대한 연구는 일반적인 기능구현을 위한 다양한 연구를 주로 실시하여 시제품에 대한 필드 실험을 실시하고 있는 상황이다.[4] 이처럼 SBW 시스템의 일반적인 기능구현 측면에서는 괄목할만한 성장을 나타내고 있지만 SBW 시스템의 고장이나 결함에 의하여 발생될 수 있는 사고를 미연에 방지할 수 있는 대응 기술 개발은 초보적인 수준에 머물러 있다.[5],[6]

차량의 조향 시스템은 제동 시스템과 더불어 차량 안전성에 결정적인 영향을 미치는 중요한 대상으로서 구성 요소의 전기 및 기계적 결함으로 인해 본연의 정상적인 기능 구현이 불가하게 될 수 있을 것이다. 이 같은 최악의 경우를 고려하여 사고를 예방하거나 최소한의 자동차 운전성이 유지

되도록 하는 fault tolerant 기능 부여가 요구된다. 이를 구현하기 위해 SBW 시스템에 대한 정확한 분석과 이해를 통하여 발생 가능한 고장에 대한 정의, 고장의 종류, 고장분석을 실시하고 근본적으로 발생고장을 제거하거나 대응하는 기술 개발이 요구된다. 특히, 자동차 조향장치의 상황을 감지하는 조향각과 조향 토크, 조향 변위 센서 등의 핵심 요소의 오작동이나 고장은 시스템 전체의 치명적 고장을 유발시킬 수 있기 때문에 시스템의 최소한의 기능구현 또는 근본적 원인 제거를 위한 fail safety 방안 연구가 필수적이다.

본 연구에서는 자동차 조향장치에서 발생하는 다양한 고장모드를 분석하고 고장 발생 시, 대응 가능한 센서융합 방안을 연구하여 조향 시스템에 대한 fault tolerant 방안을 제시하고자 한다.

### 2. Steer By Wire 시스템 구성

자동차용 SBW 시스템은 현재 사용되고 있는 기계식 조향장치와 달리 조향 휠과 조향기어 사이의 기계적 연결 장치인 기계적 지지대(column)가 제거되고 전기적인 통신선과 전력선이 연계되는 구조를 갖고 있다. 이 같은 구조적인 특성 때문에 충돌 성능이 우수하고 조향 안정성 확보가 가능하다. 또한, 자동차 조향장치의 모듈화가 용이하고 차량 공간의 활용성 증대와 최적 운전상태 구현이 가능하게 된다.[2],[3]

자동차 SBW 시스템이 정상적으로 구동되기 위해서는 제 1차와 제 2차 조향 각 센서(SAS), 조향 휠 토크 센서(HWTS), 모터 엔코더, 랙 위치 센서(RPS) 등이 필요하다. 자동차 SBW 시스템의 기본적 동작은 운전자의 핸들 조작에 따른 조향 각 입력이 ECU로 전달되고, 이로부터 ECU는 전륜 조향 각을 계산하고 계산 결과에 따른 전류가 조향 구동기(FAA)에 인가되어 조향장치가 구동되게 된다.

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 蔚山大學校 電氣電子情報시스템學科部 助教授 · 工博

E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr

<sup>\*</sup> 正會員 : 蔚山大學校 電氣電子情報시스템學科部 助教授 · 工博

<sup>\*\*</sup> 學生會員 : 蔚山大學校 電氣電子情報시스템工學部 碩士課程 接受日字 : 2008年 3月 14日 最終完了 : 2008年 7月 22日

그림 1, 2와 같은 자동차 SBW 시스템의 적용 센서가 다양하고 복잡한 것은 기존 기계식 조향장치에 비하여 시스템의 이상상태를 미리 예측하기 위함이다. 그러나, 자동차 SBW 시스템에 보다 많은 수의 여분 센서를 장착하는 전통적인 안전장치 수립 방법은 경제성 측면에서 문제가 발생할 수 있기 때문에 S/W적인 안전장치 수립이 경제적이고 현실적이다. 이를 위해서는 지속적인 시스템 모니터링을 위한 알고리즘과 시스템의 동작 중에 발생 가능한 전기적 결함을 감지 판단하고 대응할 수 있는 제어로직 연구가 필요하다.

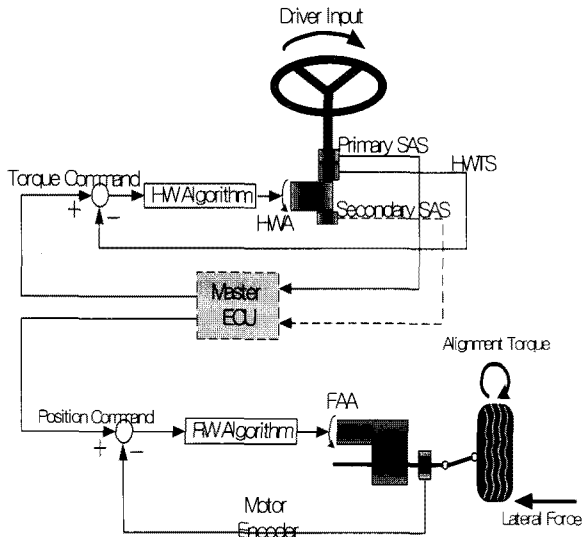


그림 1 SBW 시스템의 구성도  
Fig. 1 System diagram of steer by wire

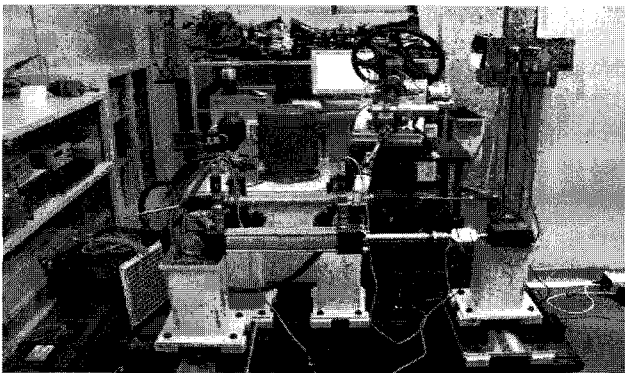


그림 2 SBW 테스트 벤치의 실제 외형  
Fig. 2 External appearance of the SBW test bench

본 연구에서는 자동차 조향장치의 조향 각 센서, 토크 센서, 변위 센서를 중심으로 실제 자동차에서 발생 가능한 신호 계측 및 모사가 가능한 테스트벤치를 그림 2과 같이 제작하였다. 전자식 조향장치에서 가장 핵심적인 조향 각 정보를 측정하기 위하여 포텐서미터를 이용하였다. 자동차 조향장치는 최대 3 회전(900° 내외)까지 회전이 가능하기 때문에 자동차에서 발생 가능한 최대 조향 각 변위를 감지하기 위한 Vishey사 포텐서미터(최대 회전 각 : 3,600°)를 활용하여 아날로그 출력이 발생되도록 하였다. 또한, 조향장치 조작에

따른 랙바(rack bar)의 변위를 감지하기 위한 LVDT 변위 센서, 조향 킬림의 토크 감지를 위한 저항 방식의 토크 센서를 장착하여 실제적인 센서 신호를 계측하여 고장검출 및 분리방법을 조사하였다.

표 1 조향 각 센서의 일반 사양

Table 1 General specification of steer angle sensor

Angle sensor parameter	Value
Resistance range	10kΩ
Standard tolerance	± 5%
Linearity	± 0.25%
Rotation	3,600°±10%

### 3. 모델 기반의 센서 융합 및 고장분리

자동차 조향장치에서 발생할 수 있는 센서 신호를 수학적으로 모델링하게 되면 논리적인 중복 부분을 검출하여 고장을 인식할 수 있다. 실제 조향장치의 신호에서 계측된 실측값과 표준 신호 값의 차이를 비교한 잔류 신호 값(residual value)이 일정 이상의 값을 갖게 되면 조향 센서 이상여부를 판단하게 된다. 자동차 조향장치의 고장 검출과 관련된 모델기반 고장 검출 방법으로 가장 많이 적용되고 있는 것은 limit-checking 방법이다.[7],[8]

limit-checking 방법은 조향장치에 적용된 센서의 계측값이 임계값 또는 경향을 비교하여 고장유무를 판별하게 된다. 일반적으로 판단 기준 임계값은 상한과 하한 값을 갖게 되는데, 정상인 상태에서는 식 (1)과 같게 된다.

$$Y_{min} < Y(t) < Y_{max} \tag{1}$$

여기서,  $Y_{min}$  : 정상유무 판단을 위한 하한 값  
 $Y_{max}$  : 정상유무 판단을 위한 상한 값  
 $Y(t)$  : 대상 센서의 실측 값

전자식 조향장치에 적용되는 특정 대상 센서의 신호거동은 다음과 같이 가정할 수 있다.

$$y = f_1(u_{11}, \dots, u_{1m}) + \Delta_1, PS \in \Omega_1 \tag{2}$$

$$\vdots$$

$$y = f_n(u_{n1}, \dots, u_{nm}) + \Delta_n, PS \in \Omega_n,$$

여기서,  $y$  : 대상 센서의 출력 신호  
 $u_{ij}$  : 이미 알고 있거나 측정된 이상 신호  
 $f_n$  : 수학적 함수(sub-model)  
 $\Delta_n$  : 모델의 불확실성  
 $PS$  : 연산 상태  
 $\Omega_n$  : 특정 sub-model의 안전 영역

식 (2)를 이용하여 대상 센서가 이상이 발생할 경우에 대안으로 활용할 수 있는 해석적 여분(redundancy)을 도출할 수 있다.

$$\hat{y}_1 = f_1(u_{11}, \dots, u_{1m}), PS \in \Omega_1 \quad (3)$$

⋮

$$\hat{y}_n = f_n(u_{n1}, \dots, u_{nm}), PS \in \Omega_n,$$

대상 센서의 실제 신호 식 (2)와 해석적 여분 식 (3)에서 잔류 신호(residual signal)는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r = y - \hat{y}_i \quad (4)$$

이 같은 기본 원리에 입각하여 SBW 시스템에 적용되는 조향 각 센서(SAS), 토크 센서(HWTS), 랙 변위 센서(RPS)에 대한 모델 기반의 로직을 그림 3에 나타냈다. 그림 4는 전자식 조향장치에서 가장 중요한 역할을 담당하는 조향 센서의 예러 발생을 가정하여 결함검지 및 대안 신호 발생에 대한 로직 흐름도를 나타낸 것이다.

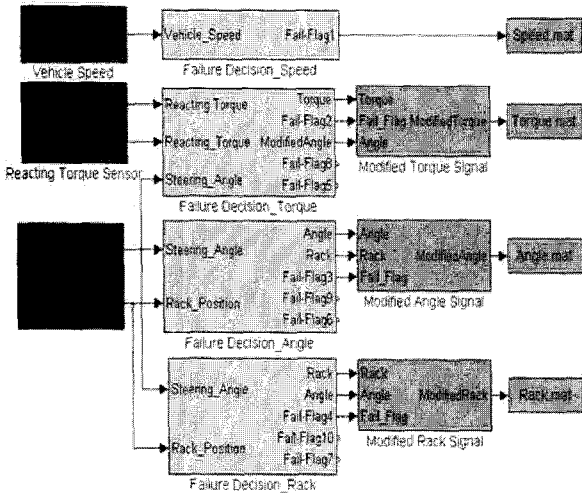


그림 3 Matlab을 이용한 예러검지 제어로직 블록도  
Fig. 3 Simulation block for error detecting using Matlab

그림 4의 순서도는 SBW 조향장치에 대한 결함 검지 및 대체 방안을 보여주고 있다. 자동차 조향 시스템에 적용된 센서 출력이 센서 사양을 만족시키는지 여부에 대한 판단이 이루어지고 센서의 출력이 임계값 내에 존재하지 않거나 급격한 변동이 발생하는 경우에는 다른 정상 작동중인 센서의 출력과 비교 분석하여 해당 센서 출력의 타당성을 판별하도록 하였다. 특정 센서의 출력이 다른 센서와 비교했을 때, 주어진 범위 이상의 값을 나타내게 되면 이를 센서의 오작동 또는 결함으로 판별하여 결함 센서의 출력을 배제하고 다른 센서의 출력으로부터 시스템의 기능 구현이 가능하도록 하였다. 또한, SBW 조향 각 센서의 이상 상태를 가정하여 SBW에 적용되는 다른 센서로부터 이상 조향 각 정보를 능동적으로 추론할 수 있도록 하였다.

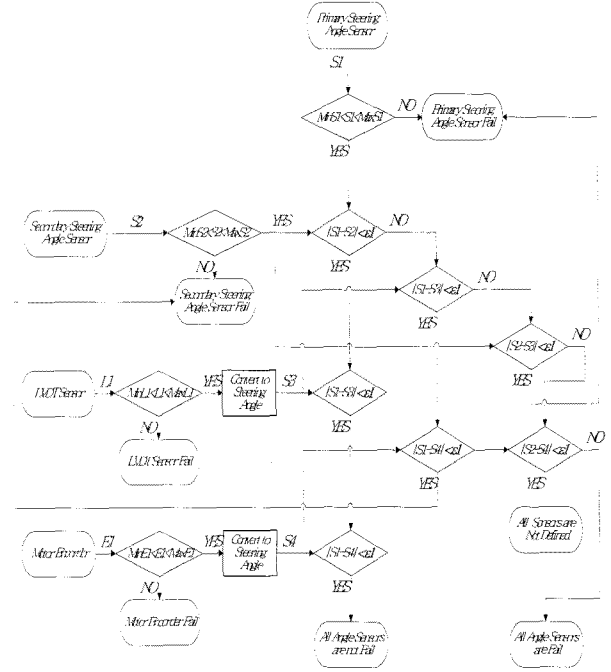
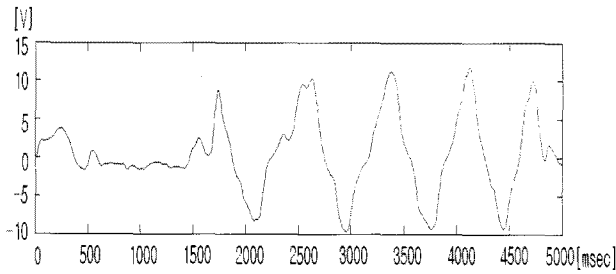


그림 4 SBW 시스템의 센서 결함검지 및 분리  
Fig. 4 Fault detection and isolation of SBW system

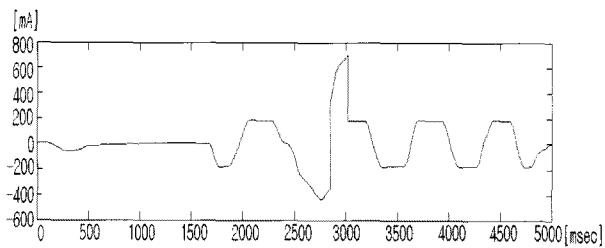
#### 4. 결과 및 분석

그림 5(b)는 SBW 시스템에 장착된 조향 각, 조향 토크, 랙 변위 센서의 실제 값을 실제로 측정하고 조향 각 센서의 신호 출력에 램프(ramp) 입력을 부가하여 오작동 신호를 발생시킨 것이다. 이 조향 각 센서의 이상 신호를 보정하기 위하여 정상적으로 작동되고 있는 랙 위치 센서의 출력을 활용하여 기존에 발생된 조향 각 센서의 신호 대체 가능성을 나타낸 것이다. 그림 5 (b)에서 알 수 있듯이, 전자식 조향장치의 조향 각 센서의 크기가 식 (1)에서 제시한 기준 임계값보다 크게 되었을 경우에 그림 5 (a), (c)와 같은 조향 토크, 랙 변위 센서 변위 값을 이용하여 조향 각 센서의 대체 가능성을 조사하였다. 일반적으로 정상 신호 레벨 Y(t)는 Ymin < Y(t) < Ymax 라 할 수 있는데, 그림 5 (b)는 조향 각 센서의 이상 신호를 나타내는 것으로서 정상신호 200mA 보다 2-3배 높은 비정상적인 값을 나타내고 있다. 이 같은 조향 각 센서의 이상 신호를 대체하기 위하여 랙 변위와 토크 센서의 특성을 나타낸 것이 그림 5 (a), (c) 이다. SBW용 조향 각 센서가 이상 동작을 나타내기 시작한 2,750msec에서 랙 변위 센서는 10V로 급증하는 반면에 토크 센서는 -10V로 급격히 저하되었다. 따라서, SBW 시스템의 fail safety 로직에서는 그림 5와 같은 조향 각 센서의 입력에 이상이 발생할 경우, 랙 변위와 토크 변화량의 규칙적인 절대 값 크기와 방향성을 이용하여 운전자의 조향 상태를 정량적으로 추정할 수 있을 것이다. 또한, 그림 6에서는 조타 반력을 재생하기 위한 hand wheel torque sensor에서 발생된 실제 토크 크기가 식 (1)에서 정의한 기준 임계값을 상회했을 때 조향 각 센서와 변위 센서 정보를 활용하여 부정확한 토크 센서 신호의 대체 가능성을 나타낸 것이다. 이 때

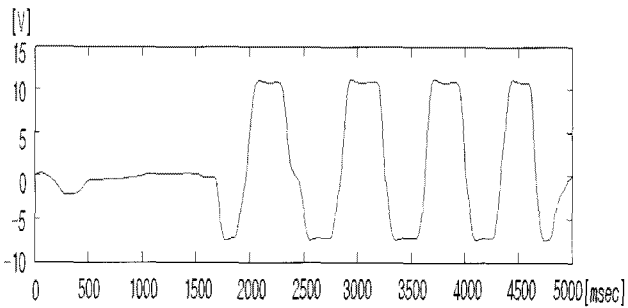
조향 각 및 토크 센서 값은 이미 상용화되어 H사의 C차량에 옵션 사항으로 장착되어 있는 C-EPAS(column type electric power assistant steering system)의 실제 시험 데이터를 분석하여 적용하였다. SBW 시스템의 토크 센서 신호가 2,500msec에서 정상 신호보다 5V 높은 이상 신호가 발생되었을 때, 조향 각 신호는 -180mA, 랙 위치 신호는 -7.5V를 나타내어 절대 값 크기와 동일 방향성을 갖는 규칙적인 연계성을 확인할 수 있었다. 따라서, 조향 각과 랙 변위 센서의 출력 값에서 도출한 다양한 시험과 정보를 활용하게 된다면 조향 토크 센서 이상으로 인한 시스템 불능 상황을 예방할 수 있을 것이다. 그림 7 (c)에서는 랙 위치 센서가 기준 값 이상으로 동작되었을 때, 이에 대한 대체 신호의 발생 가능성을 나타내고 있다. SBW 랙 변위 센서 신호가 2,500msec에서 이상 상태를 나타냈을 때, 조향 각 센서는 동일 상황에서 -180mA로 상승하고 토크 센서는 10V로 상승되었다. 따라서, 랙 변위 센서가 이상상태를 나타냈을 때, 조향 각과 토크 센서 신호의 방향성과 절대 값을 이용하여 랙 변위 센서를 대체하여 비상 모드로의 전환 가능성을 확인하였다.



(a) Modified Torque Sensor Signal



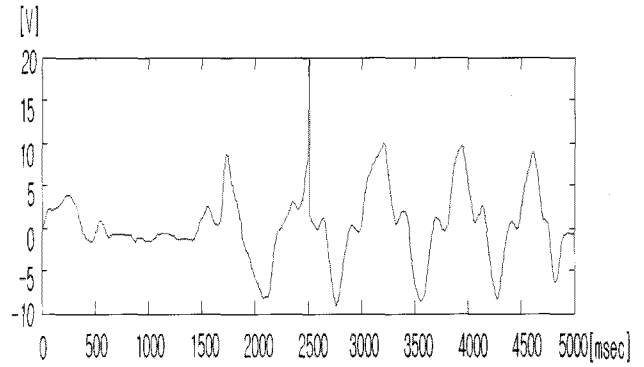
(b) Modified Steering Angle Sensor Signal



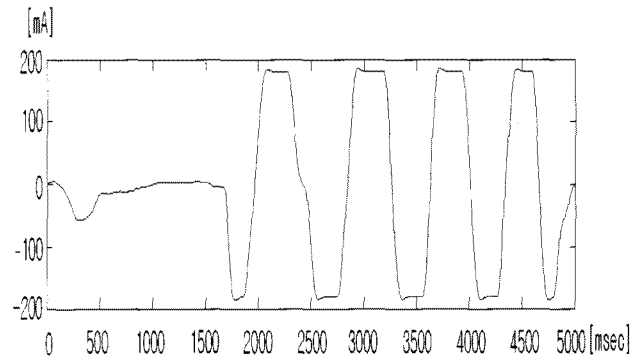
(c) Modified Rack Position Sensor Signal

그림 5 Angle Sensor를 이용한 대체 신호 발생

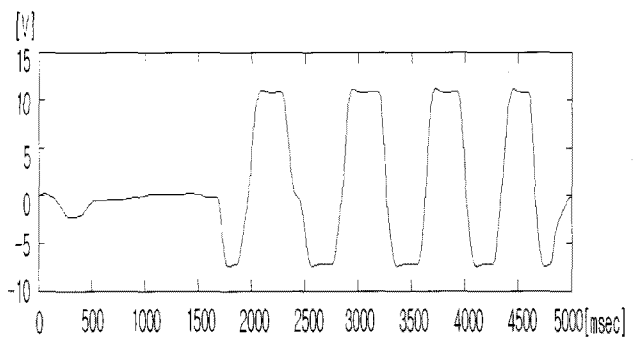
Fig. 5 Generation of the replacement signal using angle sensor



(a) Modified Torque Sensor Signal

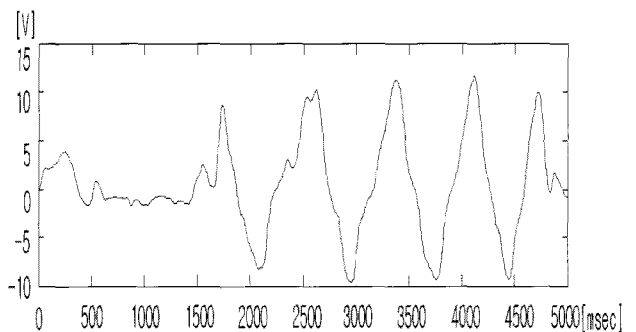


(b) Modified Steering Angle Sensor Signal



(c) Modified Rack Position Sensor Signal

그림 6 Hand Wheel Torque Sensor를 이용한 대체 신호 발생  
Fig. 6 Generation of the replacement signal using torque sensor



(a) Modified Torque Sensor Signal

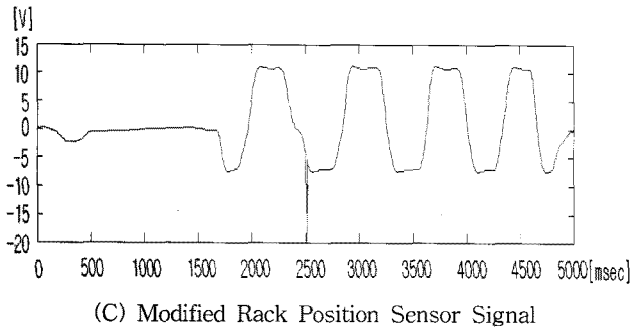
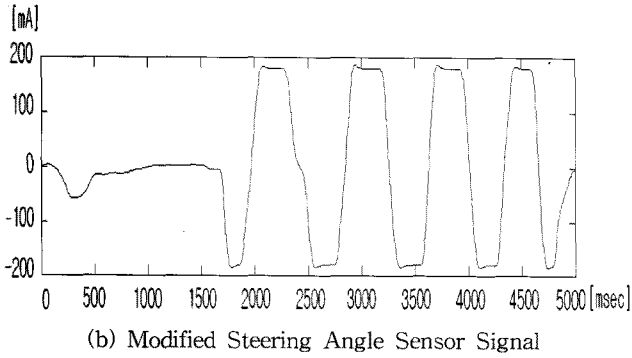


그림 7 Rack Position Sensor를 이용한 대체 신호 발생  
 Fig. 7 Generation of the replacement signal using position sensor

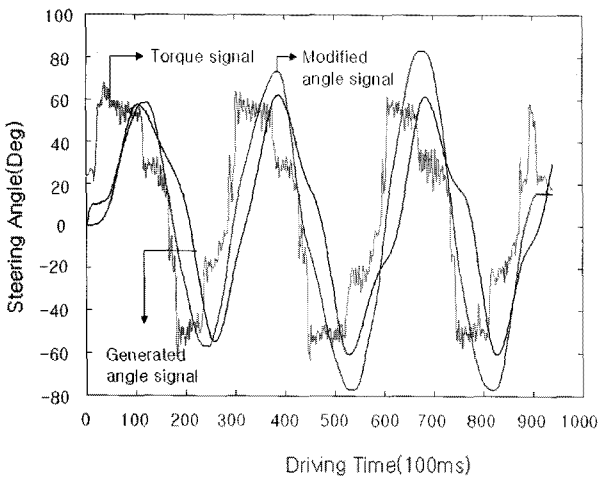


그림 8 센서 융합을 이용한 조향 각 센서 신호 발생  
 Fig. 8 Generation of the new signal using sensor fusion

앞서 언급한 연구내용들은 특정 SBW 센서가 이상 동작을 나타냈을 때, 다른 대체 신호 활용 가능성을 검토한 것인데 반하여 그림 8은 조향 각 센서가 이상 상태를 발생시켰을 때, 실측된 토크 센서를 활용하여 새로운 조향각 센서 신호의 발생 가능성을 확인한 것이다. 새로이 발생된 신호(generated angle signal)는 실측된 정상적인 조향 각 센서 신호(modified angle signal)에 비하여 약 20msec 정도의 시간지연이 발생되고 있는데, 이는 제어기 필터의 시간지연에 의하여 발생된 것이다. 이를 통하여 전자식 조향장치의 센서 고장이 발생되었을 경우에 새로운 대체 신호 발생을 통하여

근본적인 fail safety 확보 가능성을 확인할 수 있었다.

향후 연구에서는 전자식 조향 장치의 조향 각 센서 고장이 발생하는 순간의 천이 영역을 고려한 fail safety 기술이 요구된다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 SBW 시스템의 fault tolerant 기능을 구현하기 위한 PHA, FTA, FMEA 등을 수행하였고 SBW 시스템에서 발생 가능한 고장이나 오류의 원인을 분석하여 전자식 조향장치에 적합한 센서 융합 방안을 제시하였다. 특히, SBW 시스템의 전체 운영에 큰 영향을 미치는 조향 각, 토크, 랙 변위 센서의 고장에 대한 대안 기술로서 제어로직 측면에서 해결방안을 확인할 수 있었다. SBW 조향 각과 랙 변위 센서에 대한 신호를 이상상태로 발생시키면 조향 각에 상응하는 토크와 랙 변위 신호, 랙 변위에 상응하는 조향 각과 토크 신호는 급격한 방향 전환 특성이 나타나는 반면에 SBW 토크 센서인 경우에는 조향 각과 랙 변위 신호가 동일한 방향의 -180mA, -7.5V를 나타냈다. 따라서, SBW에 적용되는 특정 센서의 고장이 발생되면 예러 신호를 보정할 수 있는 대체 신호 가능성을 확인하였다.

또한, 전동식 SBW 시스템의 fault tolerant 확보에 필요한 결함 분석을 실시하여 SBW 장치의 능동적인 사고예방 방안을 제시할 수 있었다. 본 연구에서는 다수의 복합 센서로부터 조향 각 센서 신호를 대체하는 방법은 물론이고 토크 센서를 이용한 새로운 조향 각 신호의 발생이 가능하였기 때문에 조향장치는 물론이고 제동, 현가장치에 대한 응용도 가능할 것이다.

향후 연구에서는 전자식 조향장치의 핵심인 조향 각 센서의 대안 센서 및 신호 발생 기술을 기초로 하여 센서가 고장되는 순간의 천이 영역에 대한 안전 확보방안 마련이 요구된다.

### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지역혁신인력양성사업과 핵심기반기술개발사업으로 수행된 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] H. D. Heitzer, "Development of a Fault-Tolerant Steer-By-Wire Steering System," Auto technology, Vol. 4, pp. 561-60, 2003.
- [2] E. Dilger, T. Muller, S. Poledna, "The X-By-Wire Concept," SAE Technical Paper 98055, 1998.
- [3] S. Ambarkar, F. Bolourchi, Jon Demerly and S. Millsap, "A Control System methodology for Steer By Wire Systems," SAE, 2004-01-1106, 2003.
- [4] X. Ding, P. M. Frank, "Enhancement of Robustness in observer based fault detection Systems," J. of Process Control, pp. 403-424, 1997.
- [5] R. M. Verschuren, H. M. Duringhof, "Design of a

- Steer-by-wire Prototype,” SAE, 2006-01-1497, 2006.
- [6] D. Cesiel, M. Gaunt, B. Daugherty, “Development of a Steer-by-wire System for the GM Sequel,” SAE, 2006-01-1173, 2006.
- [7] R. Isermann, “Fault Diagnosis Systems,” Springer,” 2003.
- [8] P. Johannessen, J. Torin, “System Safety Design of the SIRIUS 2001 Drive-By-Wire Car,” Proceeding of 21st International Safety Conference, pp. 319-328, 2003.

저 자 소 개



김 병 우 (金柄禹)

1965년 4월 15일생. 1987년 한양대학교 기계공학과 졸업. 1990년 한양대학교 정밀기계공학과 졸업(석사). 2002년 한양대학교 정밀기계공학과(박사). 1989년 일본 KOSAKA연구소 초빙연구원. 1994~2006년 자동차부품연구원 전장기술연구센터장. 2006년~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부 조교수.

Tel : 052-259-1287  
 Fax : 052-259-1686  
 E-mail : bywokim@ulsan.ac.kr



허 진 (許眞)

1968년 11월 13일생. 1999년 한양대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1999~2000년 Texas A&M Univ., Post-doctoral Research Associate, 2000~2001년 한양대학교 전기공학과 BK 연구교수, 2002~2008년, 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터장, 2008~현재 울산대학교 전기전자정보시스템공학부, 조교수, 2004~ 현재 IEEE Senior member, IEEE Trans. on Power Electronics, Associate Editor. 대한전기학회 B부문, 국제이사.

Tel : 052-282-1282  
 Fax : 052-282-1686  
 E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr



조 현 덕 (趙賢德)

1980년 03월 08일생. 2006년 울산대학교 전기전자정보시스템공학부졸업. 2007년~현재 울산 대학교 대학원 전기 전자 정보 시스템공학부 석사과정.

Tel : 052-259-1287  
 Fax : 052-259-1686  
 E-mail : hyunduck@gmail.com



이 영 석 (李永碩)

1981년 11월 17일생. 2008년 울산대학교 기계자동차공학부졸업. 2008년~현재 울산 대학교 대학원 자동차선박기술대학원 석사과정.

Tel : 051-204-6865  
 Fax : 052-259-1686  
 E-mail : suhoai@naver.com