

Fault-Tolerant Steer-By-Wire 제어 시스템의 개발

김재석·황운기·이운성*

국민대학교 자동차공학전문대학원

Development of a Fault-Tolerant Steer-By-Wire Control System

Jaesuk Kim · Woongi Hwang · Woon-Sung Lee*

Graduate School of Automotive Engineering, Kookmin University, Seoul 136-702, Korea
(Received 14 March 2005 / Accepted 14 March 2006)

Abstract : The Steer-By-Wire (SBW) system replaces complex mechanical linkages of the current steering system with electric motors, sensors, and electronic control units. However, the SBW system should guarantee its safety and reliability before commercialization, and therefore, a reliable and robust fault-tolerant technology has to be implemented. This paper proposes a fault-tolerant control algorithm for the SBW system. Based on careful analysis on propagation effects of sensor faults, a reliable fault-tolerant control strategy has been developed. The fault-tolerant controller consists of a fault detection part that monitors and detects faults in the steering wheel and road wheel sensors, and a reconfiguration part that switches to normal sensor signal based on fault detection information. It has been demonstrated by simulation that the proposed algorithm detects sensor faults accurately and enables reliable steering control under various dynamic fault situations.

Key words : Steer-by-wire system(전자제어 조향 시스템), Fault-tolerant control system(결함허용 제어시스템), Fail-safe system(고장 안전 시스템), Dynamic redundancy(동적 중복구조), Fault-detection controller(결함 감지 제어기)

1. 서론

Steer-By-Wire(SBW) 시스템은 기계적인 링크로 이루어진 기존의 조향 시스템을 전기식 액추에이터와 센서로 교체하고, 그 동작이 ECU에 의해 이루어지도록 구성된 미래의 조향 시스템이다.¹⁾ 이는 기계적인 링크의 감소로 인한 안전성 향상, 다양한 조향 토크 구현, 가변 기어비 적용, 그리고 지능형 차량과의 통합이 용이한 장점을 가지고 있다. 그러나 SBW 기술은 By-Wire의 특성상 전기적인 신호가 끊어지거나 시스템 내 구성 요소들에 Fault가 발생할 경우 시스템이 정상적인 기능을 유지할 수가 없게 되어,

안전 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 By-Wire 시스템에서 Fault가 발생하더라도 시스템의 정상적인 조향 제어가 이루어지고, 차량 내 다른 시스템에 영향을 주지 않도록 유지함으로써 신뢰성과 안전성을 보장할 수 있는 Fault-Tolerant 제어 시스템을 구축하는 것이 필수적이다.²⁾

이와 관련하여 Fault-Tolerant 시스템에 대한 기본적인 원리가 1996년부터 1998년까지 운영된 유럽 BriteEuRam III R & D 프로젝트 기간에 유럽 X-by-Wire(XBW) 콘소시엄에 의해 규정되었으며, SBW에 대하여 시스템 형태로 처음 발표되기 시작하였다.³⁾

본 연구의 목적은 SBW 시스템의 안전성과 신뢰

*Corresponding author, E-mail: wslee@kookmin.ac.kr

성을 확보하기 위한 Fault-Tolerant 제어 알고리즘을 개발하는 데 있다. 이를 위하여 본 연구팀이 이미 개발한 SBW Hardware-In-the-Loop Simulation(HILS) 시스템의 조향 핸들 부와 로드 휠 부에 제어를 각각 구성하고, CAN 통신을 통해 제어기 간의 데이터 전송을 처리하도록 개선한다. SBW 시스템의 센서에 대한 명확한 Fault 전파 분석을 수행하여 SBW 시스템의 신뢰성과 안전성을 확보할 수 있는 Fault-Tolerant 제어 전략을 수립한다. 이를 토대로 SBW 시스템의 센서에 Fault가 발생하는 상황에서도 정상적인 조향 제어가 가능하도록 Fault-Tolerant SBW 제어 알고리즘을 개발하고, SBW HILS 시스템을 이용하여 성능을 평가·검증함으로써 신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 실시간 SBW HILS 시스템의 구성

2.1 하드웨어 구성

SBW HILS 시스템의 전체 모습은 Photo. 1에 보이는 바와 같다. 이 시스템은 조향 핸들과 로드 휠 부, Data Acquisition(DAQ) 시스템, 운영 시스템 및 모니터링 시스템 등으로 구성되어 있는데, SBW 시스템에서 조향부만을 하드웨어로 구성하고 차량을 포함한 그 외 부분은 소프트웨어로 모델링하였다.^{4,5)}

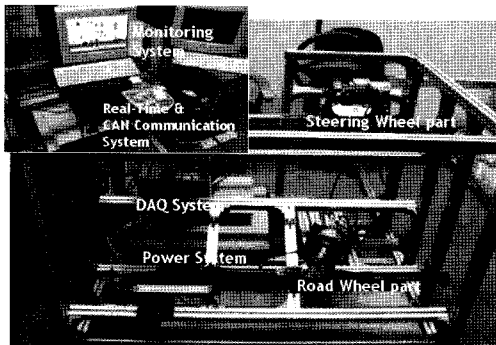


Photo. 1 Hardware configuration of SBW HILS system

2.2 소프트웨어 구성

Fig. 1은 SBW HILS 시스템을 블록 다이어그램으로 도식화한 것이다. 운전자의 조향 입력은 CAN 버스를 통해 로드 휠 제어기로 전송되어 SBW 시스템의 조향 제어가 이루어지고, 조향 모델을 거쳐 차량

모델로 전달된다. 조향 핸들 제어기에서는 운전자의 조향 각도, 조향 제어 각도 그리고 타이어 모델에서 계산된 얼라이닝 토크를 통해 반력 토크를 생성하여 운전자에게 피드백한다.

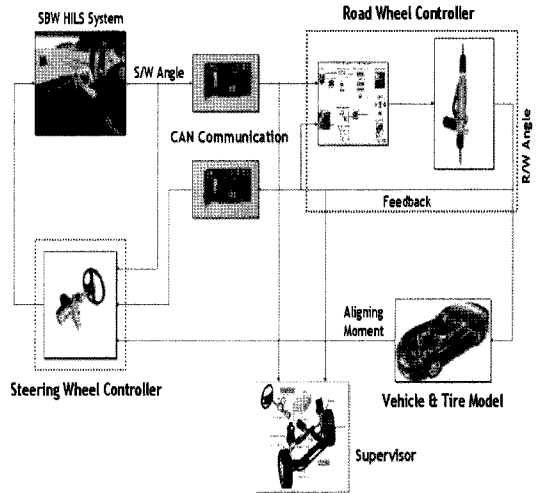


Fig. 1 Software configuration of SBW HILS system

2.3 실시간 시뮬레이션 시스템 구축

MATLAB SIMULINK, xPCTarget과 Real-Time Workshop을 이용하여 실시간 시뮬레이션 시스템을 구축하였다(Fig. 2). 실시간 시스템을 위한 MATLAB xPCTarget은 Host PC와 Target PC로 구성된다. Host PC는 제어 알고리즘을 구현하고, 외부 인터페이스 장치를 위한 소프트웨어를 다룬다. Target PC는 외부 장치와 인터페이스를 수행하며 실시간으로 데이터를 처리한다.⁶⁾

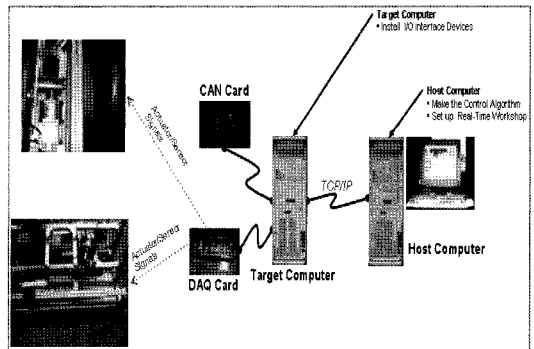


Fig. 2 MATLAB xPCTarget configuration

3. Fault-Tolerant SBW 제어 시스템 개발

3.1 SBW 시스템의 Fault 분석

Table 1은 본 연구를 수행하는데 있어서 SBW 시스템을 구성하는 조향 핸들 부, 로드 휠 부와 통신 시스템에서 발생할 수 있는 Fault의 종류를 보인다.⁷⁾

Table 1 Fault-contents of SBW system

| Part | | Fault type |
|---------------------|----------|-------------------------------------|
| Steering wheel part | Sensor | Signal fault |
| | Actuator | Torque current fault |
| | ECU | ROM, RAM or relay fault |
| Road wheel part | Sensor | Signal fault |
| | Actuator | Current fault |
| | ECU | ROM, RAM or relay fault |
| Communication part | | CANCommunication send/Receive fault |

SBW 시스템은 조향 핸들 부와 로드 휠 부가 서로 전기적인 신호를 주고받으며 동작한다. 각 서브 시스템에서 발생한 Fault는 다른 서브 시스템으로 전파되어 SBW 시스템이 정상적인 기능을 수행하지 못하게 되고, 이로 인해 시스템의 안전성 문제가 일어나게 된다. SBW 시스템이 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해서는 센서의 Fault로 인해 다른 서브 시스템으로 전파되는 Fault 신호를 정확하게 분석할 필요가 있다.⁸⁾

Fig. 3은 SBW 시스템을 구성하는 센서에서 발생한 Fault 신호의 전파 흐름을 나타낸 것이다. 조향 부

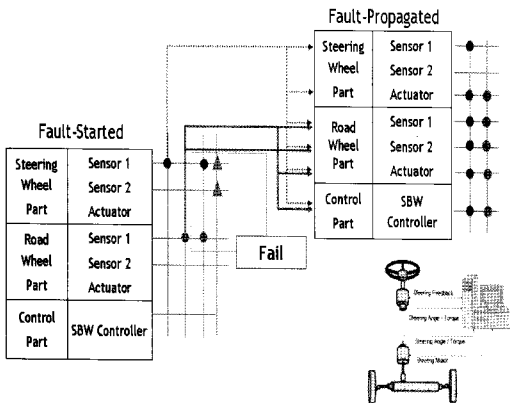


Fig. 3 Sensor fault propagation analysis

에서의 Fault는 로드 휠 부로 전파되어 조향 핸들 부, 제어기와 로드 휠 부가 Fault가 된다. 하지만 로드 휠 부의 Fault는 다른 부분으로 전파가 되지 않는다.

본 연구에서는 조향 핸들 부와 로드 휠 부의 각각의 센서에서 동시에 Fault가 발생하거나 각 부의 2개 센서에서 동시에 Fault가 발생할 경우, SBW 시스템의 정보만으로는 Fault-Tolerant 제어를 수행하는데 있어 정보가 부족하므로 Fail로 간주한다. 이에 대처하기 위해서는 Fault-Tolerant 제어 시스템 외에 Fail-Safe 시스템을 구축해야 한다.

3.2 SBW 시스템의 Fault-Tolerant 제어 전략

SBW 시스템의 Fault-Tolerant 제어 전략은 Fig. 4에 보이는 바와 같다. SBW 시스템이 작동되면 각 서브 시스템의 Fault-Tolerant 제어기를 작동시켜 실시간으로 그 정보를 모니터링하고, 만일 Fault가 감지되면 필수적인 기능을 유지할 수 있도록 모드를 전환하고, 그 정보를 모니터링 한다.

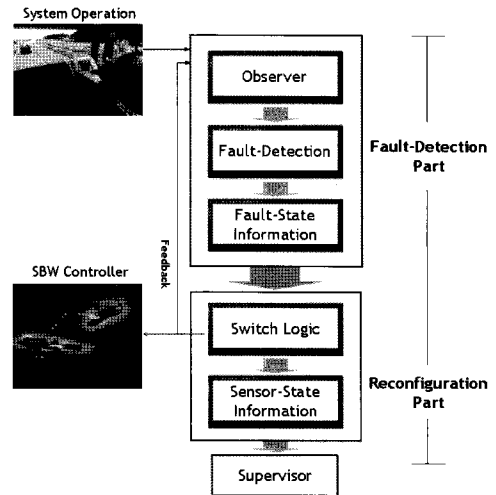


Fig. 4 Strategy for fault-tolerant SBW control

Fault-Tolerant 시스템을 위하여 구성하는 하드웨어의 요소 중 센서에 대한 중복 구조는 DAQ 신호로부터 1개의 센서 신호를 2개의 채널로 받음으로써 소프트웨어적으로 중복 구성을 하였다. 이러한 중복구조는 시스템의 요소에 대해 Fault 추정과 보상을 하기 위해 사용이 된다. Fig. 5에서는 SBW 시스템의 센서에 대한 동적 중복 구조를 보인다.⁹⁾

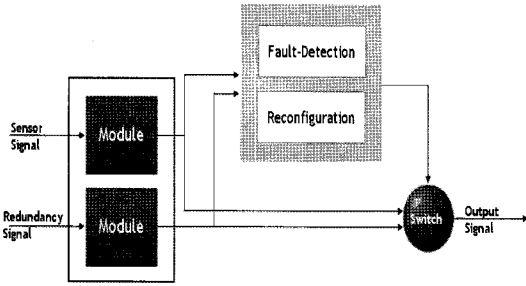


Fig. 5 Dynamic redundancy for sensors

3.3 Fault-Tolerant SBW 제어 알고리즘

Fig. 6은 MATLAB SIMULINK로 구성한 SBW 시스템의 Fault-Tolerant 제어 알고리즘의 블록 선도를 보인다. 이는 센서와 전기식 액추에이터 사이의 신호를 주고받는 아날로그 입출력블록, 시스템의 상태 정보를 제공하는 디지털 출력 블록, Fault 여부를 판단하는 Fault-Detection 블록, Fault가 발생 시 신호를 재구성하는 Reconfiguration 블록과 CAN 통신을 위한 메시지 블록으로 구성되어 있다.

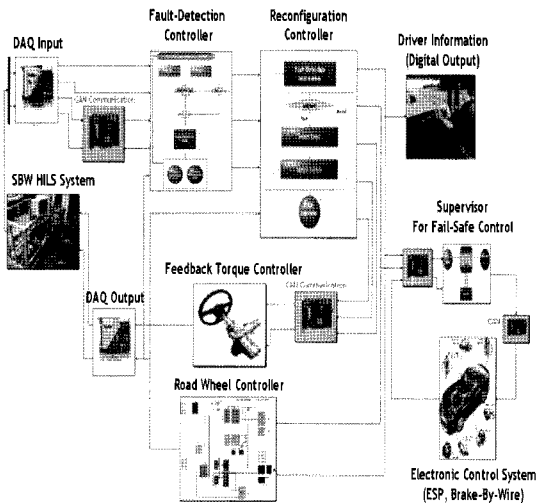


Fig. 6 Control block diagram for fault-tolerant SBW system

3.3.1 관측기 설계

2개의 센서를 사용하는 경우 Fault의 추정과 보상을 하기 위해서는 1개의 정보가 더 필요하게 되는데 이는 조향 모델을 사용해 관측기를 설계하였다.

기존의 4자유도 조향 모델에서 컬럼 부분을 제외한 3자유도 조향 모델을 기본 선형 모델로 구성하였

고, 하드웨어로부터 받아들이는 신호의 잡음을 고려하여 칼만 필터를 설계하였다.¹⁰⁾

$$\hat{x} = A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x})a \quad (1)$$

Fig. 7은 MATLAB SIMULINK로 구성한 칼만 필터의 블록 다이어그램을 보인다.

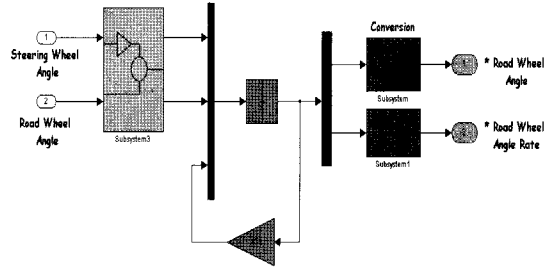


Fig. 7 Block diagram of Kalman filter using MATLAB

3.3.2 Fault-Detection 부

SBW HILS 시스템이 작동되는 동안 조향 모델과 이를 기반으로 설계된 관측기 모델을 이용하여 센서 신호의 Fault 여부를 판단한다.

Fig. 8은 운전자의 조향 의지를 측정하는 조향 핸들 부의 센서에 대한 Fault-Detection 알고리즘의 신호 흐름을 보인다. 조향 핸들 부와 로드 휠 부 센서의 신호가 관측기 모델에 입력됨으로써 센서의 Fault 감지가 시작된다. 그러나 조향 핸들 부의 센서 신호에 Fault가 발생하면, 잘못된 신호가 다른 서브시스템으로 전파되어 SBW HILS 시스템의 정보만으로는 첫 번째 센서 신호에 대한 Fault 여부를 판단하는 것이 불가능하게 된다. 이를 위해 조향 핸들 부의 센서 신호를 동시에 관찰한다. 관측기 모델의 출력 오차와 변화율 등을 관찰하여 첫 번째 센서 신호의 정상 여부를 판단한다. 만일 정상이면 Reconfiguration 부에서 센서를 교체하지 않고 그대로 유지하며, Fault이면 두 번째 센서로 교체가 이루어지도록 정보를 Reconfiguration 부에 전달한다. Fault-Tolerant 제어가 수행된 후 교체된 센서에 대해 지속적으로 Fault-Detection을 수행하는데 있어 알고리즘을 재구성하지 않고, Fault-Detection 부의 입력신호의 순서를 변경함으로써 보다 효율적으로 알고리즘을 구성하였다.

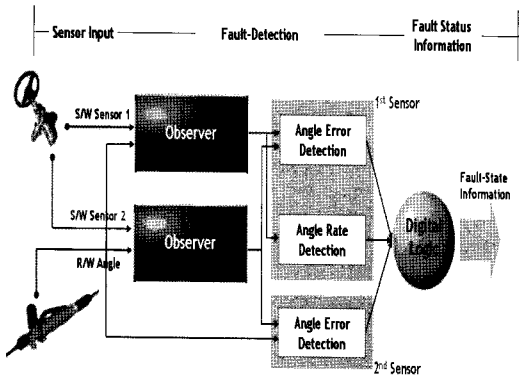


Fig. 8 Fault-detection algorithm of steering wheel sensors

Fig. 9는 로드 휠 부의 센서에 대한 Fault-Detection 알고리즘의 신호 흐름을 보인다. 조향 핸들 부와 로드 휠 부의 센서 신호를 DAQ 시스템으로부터 입력 받아 조향 모델과 관측기 모델로 전달한다. 모델의 출력값과 센서 신호와의 오차 등을 관찰하여 Fault 여부를 판단하고, 그 정보를 디지털 로직을 통해 Reconfiguration 부로 전달한다.

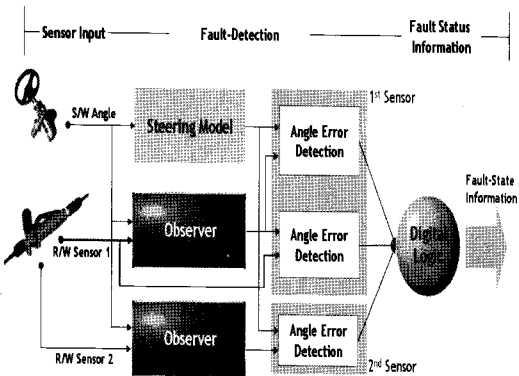


Fig. 9 Fault-detection algorithm of road wheel sensors

3.3.3 Reconfiguration 부

Fig. 10에서는 Fault-Detection 알고리즘의 수행결과 정보를 입력 받아 정상적인 센서의 신호로 재구성하는 Reconfiguration 알고리즘의 신호 흐름을 보인다.

Reconfiguration 부에서는 Fault-Detection 부로부터의 출력 신호를 받아 센서의 Fault 여부를 판단한다. 만일 센서가 Fault라고 판단되면 Reconfiguration 알고리즘을 통해 여분의 센서로 교체되고, 교체된

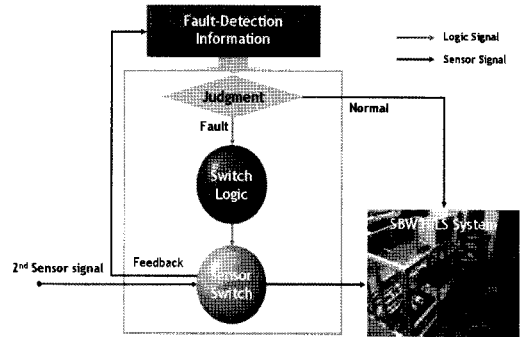


Fig. 10 Reconfiguration algorithm of S/W and R/W

신호는 조향 제어와 조향 반력을 위한 SBW 제어기로 전달됨과 동시에 Fault-Detection 부로 피드백 된다. 이 때 첫 번째 센서가 Fault가 발생하여 두 번째 센서로 교체되면, 교체된 센서 신호의 상태를 지속적으로 관찰한다. 만일 두 번째 센서에서도 Fault가 발생할 경우 첫 번째 센서의 정상 복귀 여부에 따라 Fault-Tolerant 모드 또는 Fail-Safe 모드가 결정된다.

3.4 성능 평가

이 장에서는 센서에 Fault 신호가 발생하는 상황에 대해 시뮬레이션을 수행함으로써 본 연구에서 개발한 Fault-Tolerant SBW 제어 시스템의 성능 평가를 수행하였다. SBW 시스템의 조향 핸들 부와 로드 휠 부의 센서 신호에 대해 Single-Fault를 포함하는 Dynamic-Fault 상황에 대해 Fault 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 조건은 차량의 속도가 60Km/h 이고, 운전자가 직접 조향을 수행하여 조향 입력을 제공하였다.

조향 핸들 부와 로드 휠 부의 센서에서 모두 Fault 신호가 발생하고, 또한 교체된 센서에서도 Fault 신호가 발생하도록 센서의 Fault 신호를 Fig. 11과 같이 구성하였다. SBW 시스템이 작동되고 5초가 되는 순간 조향 핸들 부의 첫 번째 센서에서 Fault 신호가 발생하고, 15초에서 두 번째 센서에 역시 Fault 신호가 발생한다. 로드 휠 부의 첫 번째와 두 번째 센서는 시뮬레이션 시작 후 각각 10초, 20초에서 Fault 신호가 발생한다. 조향 핸들 부의 센서 신호에 대한 Fault 신호 값은 0.1 볼트(10.8 도)이고, 로드 휠 부는 0.2 볼트(1.27 도)이다.

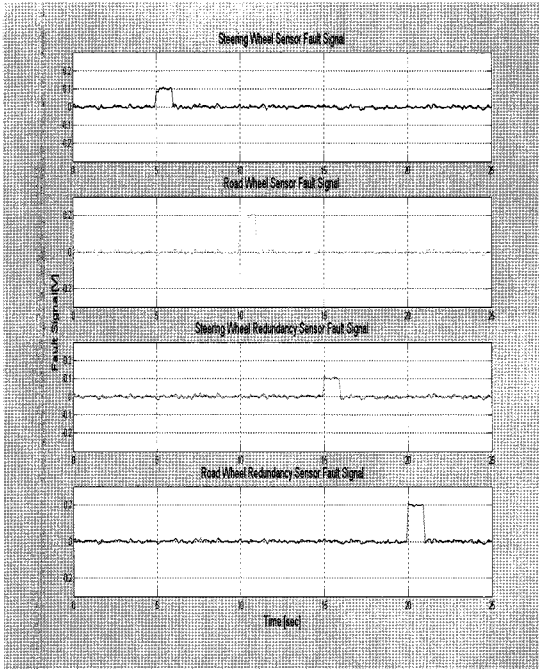
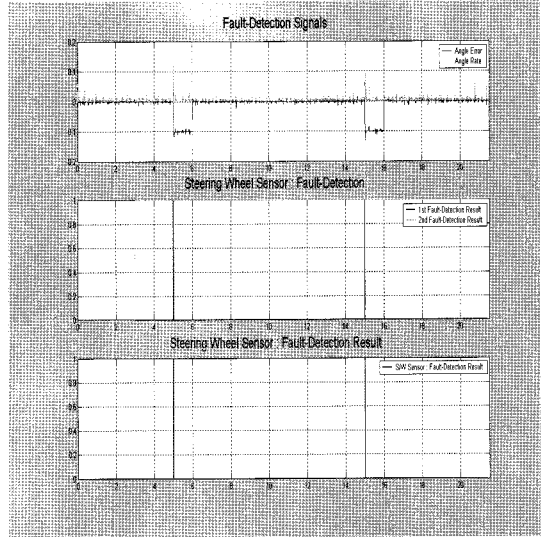


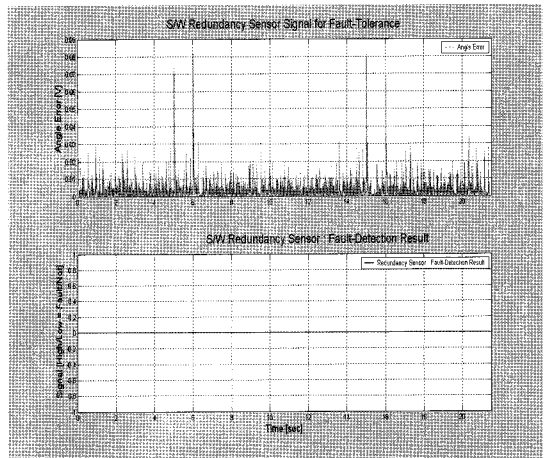
Fig. 11 Fault signals for steering wheel and road wheel sensors

Fig. 12는 시뮬레이션 결과를 보이는 데, 센서에 Dynamic-Fault가 발생하더라도 Fault-Tolerant SBW 제어 시스템을 통해 SBW HILS 시스템의 정상적인 조향 제어가 가능함을 확인할 수 있다. Fig. 12의 (a)와 (d)는 조향 핸들 부와 로드 휠 부의 첫 번째 센서에서 Fault 신호가 발생할 때 Fault-Detection 부에서 정확하게 그 시점과 위치, 그리고 Fault 여부를 판단하는 것을 보인다. Fig. 12의 (b)와 (e)는 조향 핸들 부와 로드 휠 부의 중복 센서인 두 번째 센서의 신호가 정상인지를 감시하는 것으로써, 각각의 중복 센서 신호가 정상임을 보인다. Fig. 12의 (c)와 (f)는 Reconfiguration 부에서 Fault-Detection 부로부터 첫 번째 센서 신호에 대한 Fault 정보를 받아 두 번째 센서로 교체하여 사용함으로써 SBW HILS System이 정상적으로 작동하고 있음을 보인다.

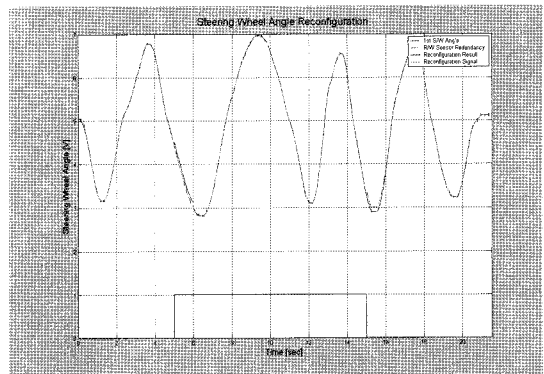
Fault-Detection부와 Reconfiguration 부에서의 각각의 출력 신호는 4가지로 구성된다. 첫 번째와 두 번째 신호 값은 Fault-Detection 제어기 내에서의 Fault 판단 결과 값을 나타낸다. 이 값들이 동시에 High Level이 되면 세 번째 신호 값에서 High Level



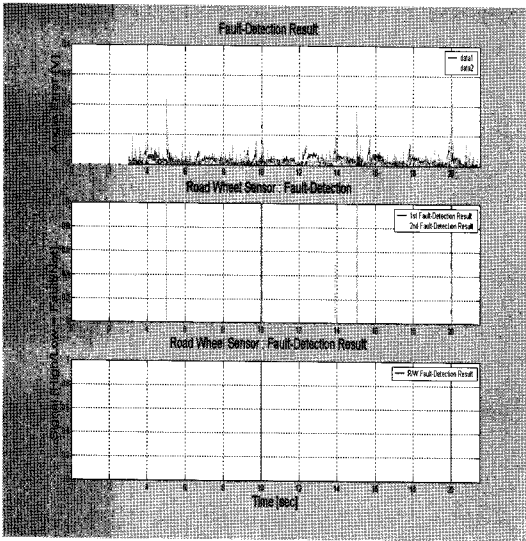
(a) Fault-detection for steering wheel primary sensor



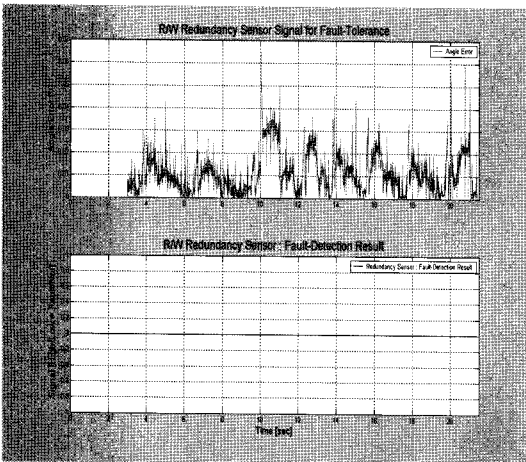
(b) Fault-detection for steering wheel secondary sensor



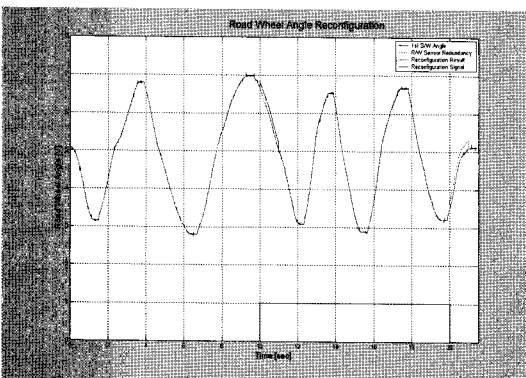
(c) Reconfiguration of steering wheel sensor



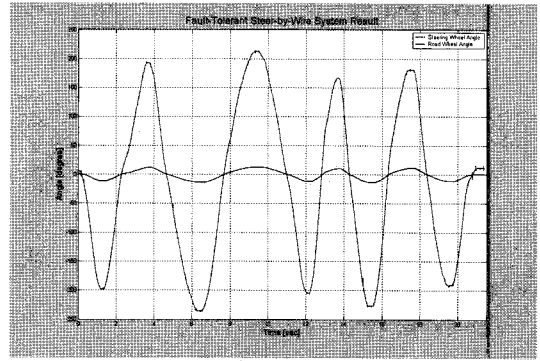
(d) Fault-detection for road wheel primary sensor



(e) Fault-detection for road wheel secondary sensor



(f) Reconfiguration of road wheel sensor



(g) Performance of fault-tolerant SBW control
 Fig. 12 Simulation of dynamic-fault situation

값을 출력으로 내보내게 되고, 동시에 네 번째 신호 값도 High Level로 바뀌게 된다. 이 때 Fault-Tolerant 제어를 통해 두 번째 센서로 교체가 이루어지는 것이 아니라, 두 번째 센서 신호의 정상 여부를 실시간으로 관찰한다. 두 번째 센서가 정상이면 교체가 이루어지고, 교체된 센서에 Fault가 발생할 때까지 지속적으로 High Level 값을 유지하여 SBW 시스템이 정상적으로 작동하게 되고, 첫 번째 센서는 지속적으로 상태를 관찰한다. 그리고 10초와 20초가 되는 순간 교체된 센서에서 다시 Fault 신호가 발생하고, 이 때 첫 번째 센서가 정상적인 상태로 복귀됨을 확인하여 Fail-Safe 시스템으로 전환하지 않고, 첫 번째 센서로 정상적인 조향 제어가 이루어진다.

Fig. 12의 (g)는 SBW 시스템의 센서에 Fault가 발생하더라도 로드 휠 부의 조향각이 조향 핸들 부의 조향 핸들각을 17:1의 기어비로 잘 추종하고 있음을 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 SBW 시스템의 신뢰성과 안전성을 확보하기 위해 개발된 실시간 SBW HILS 시스템을 이용하여 센서에 대한 Fault 전파 분석을 수행하고, Fault-Tolerant 제어 전략을 수립하였다. Fault-Detection 알고리즘과 Reconfiguration 알고리즘으로 구성된 Fault-Tolerant 제어 알고리즘을 개발하고, 실시간 SBW HILS 시스템에 적용함으로써 최종적으로 Fault-Tolerant SBW 제어 시스템을 개발하였다. HILS 시스템의 시뮬레이션을 통해 성능을 평가, 검

증하였다.

향후에는 차량 내 다른 전자제어시스템과의 정보를 공유함으로써 보다 높은 신뢰성과 안전성을 갖춘 Fault-Tolerant SBW 제어 시스템을 개발할 계획이다. 더 나아가 SBW 시스템을 구성하는 액추에이터와 제어기에 대한 Fault-Tolerant 제어 알고리즘을 개발하고, 본 연구 결과와 통합된 Fault-Tolerant SBW 제어 시스템을 개발할 계획이다.

References

- 1) S. Feick and M. Pandit, "Steer-By-Wire as a Mechatronic Implementation," SAE 2000-01-0823, 2000.
- 2) E. Dilger, L. A. Johanson, H. Kopetz, M. Kopetz, M. Krug, P. Liden, G. McCall, P. Mortara, B. Müller, U. Panizza, S. Poledna, A. Schedl, J. Söderberg, N. Strömberg and T. Thurner, "Towards an Architecture for Safety Related Fault Tolerant Systems in Vehicles," ESREL-97, International Conference on Safety and Reliability, pp.1021-1030, 1997.
- 3) J. S. Jang and Y. H. Yoon, "Research Trend and Development Situation of the Steer-by-wire System," Transactions of KSAE, Vol.26, No.1, pp.33-41, 2004.
- 4) T. Y. Chung, J. S. Kim and W. S. Lee, "Development of a Steer-by-Wire Hardware-In-the-Loop Simulation System," Fall Conference Proceedings, Vol.I, KSAE, pp.565-570, 2003.
- 5) T. Y. Chung, Development of a Steer-by-Wire Hardware-In-the-Loop-Simulation System, M. S. Thesis, Kookmin University, Seoul, Korea, 2003.
- 6) Mathworks, xPCTarget For Use With Real-Time Workshop, Mathworks, Natick, 2002.
- 7) J. G. Kim, J. H. Lee, C. G. Choi, H. T. Moon and H. S. Jin, "Fault-Tolerant Steer-by-Wire System Design," ITS Symposium, KSAE, pp.14-20, 2002.
- 8) M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze and M. Staroswiecki, Diagnosis and Fault-Tolerant Control, Springer, Berlin, 2003.
- 9) R. Isermann, R. Schwarz and S. Stolz, "FAULT-TOLERANT Drive-by-wire Systems," IEEE Control Systems Magazine, Vol.22, Issue 5, pp.64-81, 2002.
- 10) F. L. Lewis, Applied Optimal Design and Estimation, Prentice-Hall International, New Jersey, 1992.