Brake-by-Wire System 연구 개발 동향 및 전망

Technology Trends and Perspectives of Brake-by-Wire System

윤 팔 주 / Paljoo Yoon
만도 책임연구원
Mando Corporation

1. 서론

자동차 산업의 급속한 발전과 복잡한 도로교통체계의 변화에 따라 자동차의 안전성과 안락한 승차감에 대한 소비자의 관심과 요구가 더욱 커지고 있다. 또한 날로 강화되고 있는 자동차에 대한 환경 및 안전규제를 만족할 수 있는 기술개발이 현재 국내·외의 자동차업계 뿐만 아니라 관련 연구기관들이 당면한 최대 연구과제이다.

차량의 안전도 관련 기술은 전자기술이 본격적으로 적용되기 시작한 1970년대부터 많은 발전을 거듭하여 왔으며, 전자 및 제어분야의 기술의 접목을 통하여 능동안전시스템으로 더욱 발전을 거듭하고 있다. 특히 자동차의 사고방지를 통한 승객의 안전확보 측면에서 Brake System 이 차지하고 있는 비중은 매우 크다고 할 수 있다. 이를 위하여 현재의 자동차는 매우 효율적이고 신뢰성이 높은 제동장치를 장착하고 있지만, ABS (Antilock Brake System), EBD (Electronic Braking Force Distribution), TCS (Traction Control System) 및 ESP (Electronic Stability Program)와 같은 전자제어시스템과의 조합에 의해서만 한계운전상황에서 차량의 안정성 (Stability) 및 조종성 (Steerability)을 확보할 수 있다.

운전의 안전성 향상 및 교통흐름의 원활화를 위해 날로 증가하고 있는 이러한 능동안전제어시스템 (Active Safety Control System)은 더욱 다양한 제동장치의 기능을 필요로 하고 있다. 따라서 향후의 제동장치는 더욱 복잡하고 다양한 형태로 신속히 각 바퀴의 압력을 제어할 수 있어야 한다. 이와 동시에 Pedal Feeling의 측면에서 보면, 더욱 작은 Pedal 답력과 짧은 Pedal Stroke에서 최대 제동력을 얻을 수 있는 시스템이 요구되고 있으며, ABS 제어시 Brake Pedal의 진동 (Kick-back) 현상도 운전자의 불쾌감을 유발하는 것으로 알려져 있다. 위와 같은 문제점의 해결을 위하여 운전자에 의해 제동압력이 발생되는 기존의 시스템과는 달리 별도의 제동력 발생부를 구비하여 운전

자를 Brake로부터 분리시키는 시도가 여러 선진업체에서 활발히 연구되고 있다[1-5]. 그 예로, 독일의 Bosch와 Mercedes-Benz는 1990년대 중반부터 유압식 Brake-by-Wire (BbW) 시스템인 EHB(Electro-Hydraulic Brake)를 공동으로 개발하여 2002년부터 SL500, E-Class 및 Maybach 등의 차종에 SBC (Sensotronic Brake Control)라는 상품명으로 양산 적용 중이며[6], 일본의 Toyota도 Hybrid 자동차인 Estima에 ECB (Electronically Controlled Brake)라는 이름으로 EHB를 적용 중이다[7]. 이 외에 미국의 GM은 자사의 연료전지 Concept Car인 Hy-Wire에 스웨덴의 SKF와 공동으로 Brake-by-Wire 및 Steer-by-Wire 시스템을 개발하여 시연한 바 있다[8].

이번 원고에서는 향후 자동차용 차세대 제동장치로 기대되는 BbW 시스템의 종류 및 작동원리를 기술하였으며, 현재까지의 국내외 최신 연구동향 및 향후의 BbW 기술의 전망을 살펴보았다.

2. Brake-by-Wire System의 정의 및 분류

2.1 Brake-by-Wire System 이란?

X-by-Wire 시스템은 기계적 연결에 의해 물리량이 전달되는 방식인 기존 시스템을 Micro-Computer와 전기신호 및 모터와 같은 전기구동장치를 이용하여 기계적인 제어기능을 대체하는 시스템이다. 이를 통하여 각 Chassis 시스템들을 유기적으로 연결하여 제어할 수 있기 때문에 차량의 전반적인 운동성능 및 안전성능 등을 획기적으로 개선시키는 것이 가능해지며, 동시에 자동차의 설계 및 제조과정에서의 유연성도 크게 향상될 수 있다.

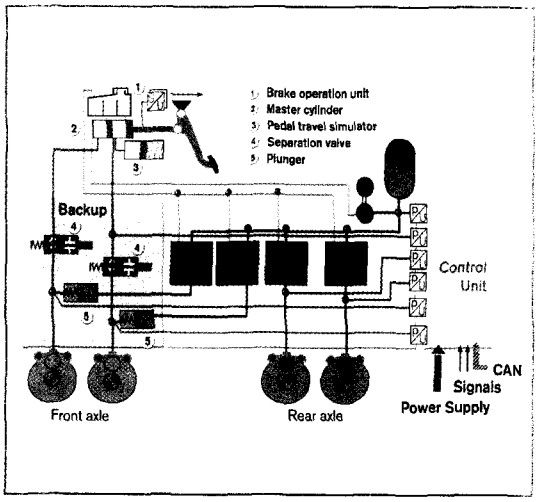
BbW 시스템에서 운전자의 제동의지는 Brake Pedal Unit에 장착된 복수개의 센서에 의해 인지되며, 측정된 센서 신호들을 기반으로 하여 ECU (Electronic Control Unit)에서 각 바퀴에 최적의 제동력이 발생되도록 명령을 내린다. 운전자의 제동명령이 전기신호의 형태로 Brake 시스템에 전달되기 때문에 이와 같은 시스템을 BbW 시스템이라 부른다. BbW 시스템은 각 바퀴에 제동력을 전달하는 방법에 따라 전기유압식 (Electro-Hydraulic)과 전기기계식 (Electro-Mechanical)으로 분류된다[9]. 기존 유압식 Disk Brake는 운전자가 Brake Pedal을 밟는 것에 의해 발생한 유압이 Caliper 내의 Pad를 압착하여 Pad와 Disk의 마찰력에 의해 차량을 정지시킨다. EHB는 이와같은 기존 유압식 제동장치와 EMB의 중간단계로 볼 수 있는 유압식 BbW 시스템으로 유압 Pump와 축압기 (Accumulator)를 가지며, 축압기에 저장된 유압(통상 140~160bar)을 전자 비례밸브에 의해 제어하여 각 바퀴의 제동력을 발생시킨다. 이에 비하여 EMB는 42V 전원으로 구동되는 Motor에 의해 제동력을 발생시키며, 유압을 전혀 사용하지 않는 진정한 의미의 Brake-By-Wire 시스템이라 할 수 있다. 각 BbW시스템 별 특징을 〈표 1〉에 요약하여 나타내었다.

2.2 Wet Type BbW System

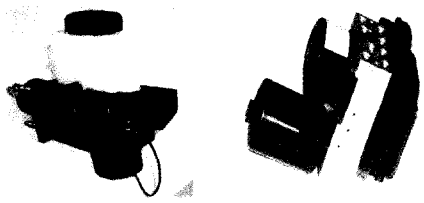
EHB는 by-Wire 시스템의 구조를 가지지만, 여전히 유압을 사용하기 때문에 Wet Type BbW System으로 불린다. 〈그림 1〉은 Bosch의 SBC 시스템[6, 10]으로, BOU (Brake Operation Unit), HCU (Hydraulic Control Unit) 및 ECU (Electronic Control Unit)로 구성된다. BOU는 Brake Pedal, 운전자의 제동의지 판단을 위한 Pedal Travel Sensor, Backup

제동력 발생을 위한 Master Cylinder, 정상 작동상태에서 운전자에게 기존 제동장치와 동일한 느낌을 주기 위한 Pedal Travel Simulator로 구성된다. HCU는 6개의 내장형 압력센서, 유압발생부 (Motor, Pump 및 고압 Accumulator) 및 각종 유압 Valve류로 구성된다. ECU는 운전자의 제동의지에 따라 각 바퀴의 압력을 최적의 상태로 제어하는 역할을 수행하며, 동시에 별도로 장착된 차량 운동 제어 ECU와의 통신을 통하여 ABS, TCS 및 ESP와 같은 상위 제어기의 명령에 따라 각 바퀴의 제동력을 제어하게 된다. 또한 EHB는 유압 발생부 또는 전자제어장치 등과 같은 핵심 부품의 고장시에도 운전자의 Brake Pedal 조작력에 의해 최소한의 제동력을 확보할 수 있는 Backup 제동기능을 보유하고 있으며, 〈그림 1〉에 표시된 SBC의 경우 Backup 제동 기능 수행시 전륜에만 유압이 전달되는 구조를 채택하고 있다.

〈그림 2〉는 만도에서 개발 중인 EHB 시스템으로 (a)는 Pedal Stroke Sensor가 내장된 BOU를, (b)는 HCU와 일체형 ECU를 각각 나타낸 것이다.



〈그림 1〉 Schematic diagram of Bosch EHB System[6]

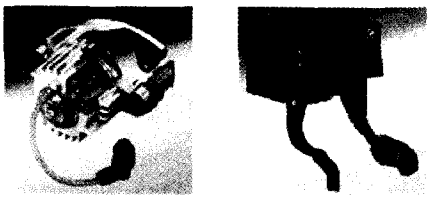


(a) (b)

〈그림 2〉 EHB from Mando[2]

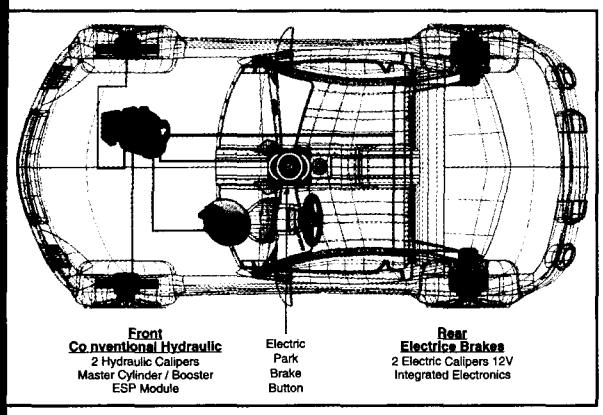
2.3 Dry Type BbW System

Dry Type BbW System은 유압을 전혀 사용하지 않는 친환경 시스템으로 각 Wheel의 제동장치로 EMB Module (또는 Electric Caliper, Electro-Mechanical Disk Brake)을 사용한다. 운전자의 제동명령이 BOU에 내장된 복수개의 Sensor에 의해 인지되면서 제동이 시작되며, 이에 따라 각 Wheel에 장착된 EMB Module에서 전기적인 신호가 Clamping Force 또는 제동 Torque로 변환되어 차량을 정지시키게 된다. 그러나, 이러한 방식은 각종 부품의 마모 및 가혹한 작동환경에 따라 제동효율의 변동이 심한 단점이 있으며[11], 전륜의 제동을 위해서는 상대적으로 큰 Power가 필요하기 때문에 42V 전원시스템을 필요로 한다. 또한 이 방식의 시스템은 기계적인 Backup 수단이 없기 때문에 Fault-Tolerance 확보를 위해 다양한 형태의 Redundancy가 Hardware 및 Software에 구현되어야 한다. Dry Type BbW System의 각 요소



(a) (b)

〈그림 3〉 EMB from Continental Teves[12]



〈그림 4〉 Hybrid Electric Braking System from Delphi[13]

기술 별 개발 동향을 3절에 상술하였다. 〈그림 3〉은 독일 Continental Teves에서 개발 중인 EMB Module 및 Pedal Feel Emulator를 포함하는 BOU의 외관이다.

2.4 Hybrid Brake System

Hybrid Brake System은 EHB와 함께, Dry Type BbW System 적용 이전의 중간단계 기술로 볼 수 있다. 이 시스템은 〈그림 4〉에 도시된 바와 같이 전륜에는 기존 제동장치에 사용되는 Vacuum Booster를 이용한 유압식 제동장치를 적용하고, 후륜에는 EMB를 채택한 방식이다. 일반적으로 후륜의 경우는 제동시 큰 Torque를 필요로 하지 않기 때문에 기존 14V 전원을 이용한 EMB Module의 적용이 가능하며, 기계적인 Latch 기구부를 포함하면 전자제어 주차제동장치(EPB: Electric Parking Brake)의 기능도 쉽게 구현이 가능하다는 장점이 있다. 또한 전륜에는 기존 유압식 제동장치를 그대로 사용하기 때문에 EHB에 비해 향상된 Fail-Safe 성능을 기대할 수 있으며, ABS 또는 ESP 등의 제어기능을 2 Channel HCU로 구현할 수 있기 때문에 시스템 가격도 절감할 수 있는 효과도

〈표 1〉 각 BbW System별 특징

항목	Wet Type (EHB)	Dry Type (EMB)	Hybrid Brake
Brake System	· Hydraulic Unit with Pump and Accumulator · Conventional Brake	· Electric Caliper	· Front : Conventional Brake (with ESP) · Rear : Electric Caliper
Actuation Unit	· No Vacuum booster · Wet Type Brake Pedal Unit with Feel Emulator · Pedal Stroke Sensor	· No vacuum booster · Dry Type Brake Pedal Unit with Feel Emulator · Pedal Stroke Sensor	· Smaller Vacuum Booster · Master Cylinder · Pedal Stroke Sensor
Control Functions	· Normal Braking · ABS/TCS/ESP…	· Normal Braking · ABS/TCS/ESP… · Integrated EPB	· ABS/TCS/ESP… · Integrated EPB
Controllability of Brake Forces	· Proportional Control (Pressure-Based)	· Proportional Control (Position/Force-Based)	· Front : Proportional Control (Limited, Slip-Based) · Rear : Proportional Control (Position/Force-Based)
System Safety	· Fail-Safe	· Fault-Tolerant	· Fail-Safe
Backup Capability	· Front only or 4 Wheel Hydraulic Backup Brake	· No Backup Brake	· Conventional Brake in Front Axle
System Voltage	· 14 V	· 42 V	· 14 V

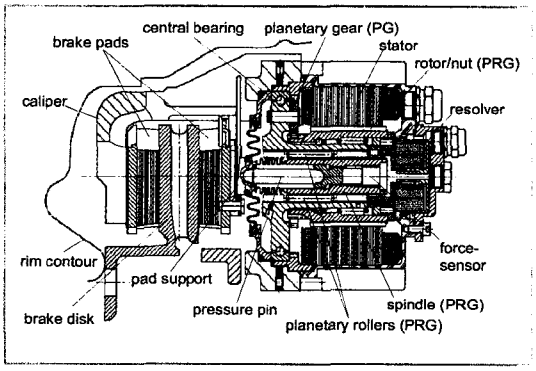
있다. 이 외에도 후륜쪽의 유압 배관부가 삭제되기 때문에 차량 설계 및 제작시 유연성이 크게 향상될 수 있으며, 분산 제어 구조 및 EMB Module 등과 같이 향후 Dry Type BbW System 개발을 위한 필수 기술에 대한 경험 확보 차원에서도 중요한 의미를 가진다.

3. Brake-by-Wire 연구개발 동향

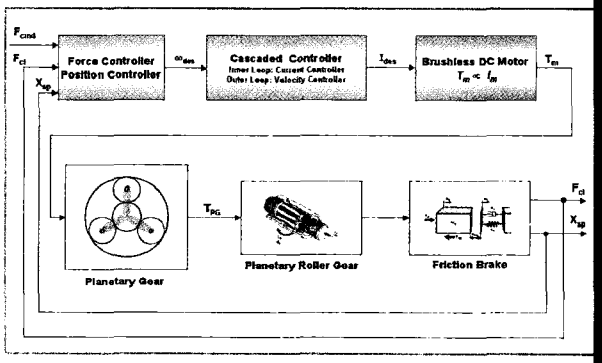
3.1 EMB (Electro-Mechanical Brake) Module

EMB의 설계를 위해서는 고효율화, 장착공간의 최소화, 경량화 및 열악한 환경조건에 대한 강인성 확보 등이 우선적으로 고려되어야 한다. 〈그림 5〉는 Continental Teves의 3세대 EMB로 기존 제동장치 수준의 내구수명 확보를 위해 Brushless Motor가 사용되었으며, 피스톤에 의해 작동되는 기존 유압식 제동장치와는 달리, 스핀들 기구에 의해 작동된다. Planetary Roller Gear의 Nut는 Planetary Gear를 통하여 Motor에 의해 구동되며, 이에 따라 Motor의 Torque가 Spindle에 의해 축방향 힘으로 변환되어 작용하게 된다. 즉, Motor의 Torque는 Spindle Gear에 의해 디스크에 작용하는 마찰력으로 변환되며, 이에 따라 제동력이 발생하게 된다.

그러나, 이와 같은 제동력 발생과정에서는 온도 변화 및 각 부품간의 마찰에 따른 마모에 따라 Motor Coil의 저항, 감속기의 강성 및 마찰력 등이 크게 변동하게 된다. 이를 보상하기 위하여 전체 EMB에서 제동 Torque 또는 Clamping Force 제어기의 구조는 〈그림 6〉에서와 같이 전류 및 속도제어기를 하위 제어기로 하는 Cascaded Loop의 형태를 가지게 된다[14]. 이러한 구조는 Clamping Force 또는 제동 Torque의 측정을 위해서 고가의 특수한 Sensor를 필요로 하기 때문에, 그 대안으로 EMB의 동적 모델을 기반으로, 전압, 전류 및 DC Motor의 위치만을 측정하여 Clamping Force 또는 제동 Torque를 추정하는 방법이 연구되고 있다[11].



〈그림 5〉 Sectional View of Electromechanical Disk Brake[11]



〈그림 6〉 Force Control Structure of EMB System

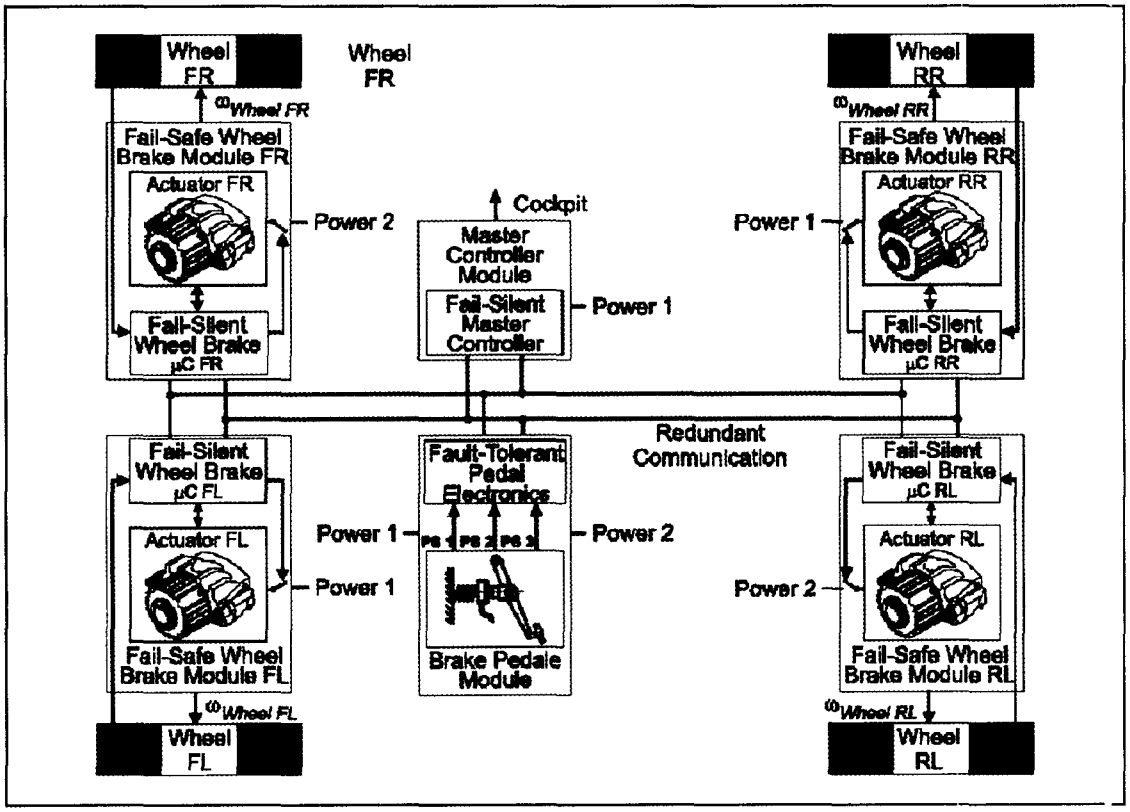
3.2 System Architecture

BbW 시스템의 구조는 요구되는 안전성, 신뢰성, 가격 및 성능 등의 수준에 따라 다양한 형태로 구현이 가능하며, 제어기의 수, 통신 방식 및 전원 분배 등을 고려하여 선택될 수 있다[4]. 전형적인 BbW 시스템은 〈그림 7〉에 나타낸 바와 같이 각각의 제어기 (Local Computer)를 포함하는 4개의 EMB Module, Brake Pedal Module, 이중 통신선로 및 중앙 제어기 (Central Computer)로 구성되는 실시간 분산형 제어 시스템이다[4, 17]. 〈표 2〉는 시스템의 성능저하 단계에 대한 정의를 나타낸 것이다[16, 17]. Fail-Operational 이란 시스템에서 고장 (Failure) 발생시 Safe State로

전환이 불가능하지만 최소한의 기능만은 수행할 수 있는 시스템을 말하며, Fail-Safe는 고장 발생시 능동적 또는 수동적으로 안전한 상태로 유도가 가능한 시스템으로, ESP 및 EHB 등이 이에 속한다. Pedal Module은 운전자의 제동 의지를 감지하는 중요한 역할을 수행하기 때문에 Sensor, 신호처리 회로 및 통신 선로 등에서 한가지의 고장 후에도 Fail-Operational 하여야 하며, 이를 위해서 Triplex 또는 Duo-Duplex 구조를 갖는 것이 바람직하다. ABS, TCS 및 ESP와 같은 상위 레벨의 제동 관련 기능과 BbW 시스템 전체의 감시기능을 담당하는 중앙 제어기는 Fail-Silent한 구조를 가지며, 각 EMB Module의 제어기는 고장 발생시 Fail-Silent 상태로 전환된다.

〈표 2〉 System Performance Degradation Steps

Degradation Step	Definition
Fail-Operational (FO)	· One failure is tolerated (i.e., the component stays operational after one failure). · This is required if no Safe state exists immediately after the component fails.
Fail-Safe (FS)	· After one (or several) failure(s), the component directly reaches a Safe state (passive fail-Safe, without external power) or is brought to a Safe state by a special action (active fail-Safe, with external power)
Fail-Silent (FSIL)	· After one (or several) failure(s), the component exhibits quiet behavior externally (i.e., stays passive by switching off) and therefore does not wrongly influence other components.



〈그림 7〉 Architecture of Brake-by-Wire System[16]

3.3 Communication Protocol

최근 출시되는 대부분의 자동차에는 각 ECU 간 (특히 Powertrain 및 Chassis ECU)의 Data 교환을 위하여 비동기식 (CSMA/CA) 직렬 통신 방식인 CAN (Controller Area Network)[18]이 표준으로 사용되고 있다. 그러나 CAN은 전송매체로 Twisted-Pair wire를 사용하기 때문에 최대 전송속도가 제한을 받게 되며, 또한 실시간으로 ECU 및 통신선로의 고장을 검출할 수 없기 때문에 Fail-Safe System에 적합한 통신방식으로, X-by-Wire와 같은 Safety-Critical System에는 부적절하다. 이에 비하여 동기식 (TDMA) 통신방식인 TTP (Time-Triggered Protocol)[19]는 전송매체로 Optical-Fiber를 사용하기 때문에 고속 전송이 가능하며, 실시간으로 ECU 및 통신선로의 고장을 검출할 수 있기 때문에, 항공기 및 철도 등의 Network으로 적용이 되고 있다. 그러나 자동차 분야에서는 현재 완성차 업체들의 참여가 미미하여, 향후 X-by-Wire System의 표준으로 자리잡기 위해서는 많은 어려움이 따를 것으로 보인다. 한편, BMW와 DaimlerChrysler는 기존 통신방식으로는 X-by-Wire System을 포함한 차세대 전자제어 시스템의 요구조건을 만족시킬 수 없다고 판단하고, 반도체 업체인 Philips, Motorola와 함께 고속의 Fault-Tolerant Bus System 개발을 목적으로 2000년 9월에 FlexRay Consortium을 결성하였다[20]. 이 Consortium에는 현재 Bosch, GM, Ford와 같은 자동차 산업에 영향력이 큰 업체들이 가입하면서, TTP와의 경쟁에서 우위를 점하기 시작했다. FlexRay는 동기 및 비동기식 통신방식을 모두 지원하며, 2004년 Motorola에서 첫번째 반도체가 출시될 예정이다.

4. Brake-by-Wire System의 전망

현재 BbW 시스템은 많은 장점에도 불구하고, 그 시장의 대량 확대를 위해서는 몇 가지 선결되어야 할 과제가 존재한다. EHB의 경우는 기존 ESP에 비하여 압력센서 및 축압기와 같은 부품이 추가적으로 필요하며, 또한 Service Braking이 전자제어되는 방식이기 때문에 대부분의 유압 또는 전자부품의 대폭적인 내구성능향상을 전제로 하며, 이에 따라 가격이 상승하게 된다. 그러나 가격 상승에 비하여 실제로 운전자가 성능향상을 느끼는 부분은 ABS 제어시와 같이 제한적인 경우를 제외하고는 그리 크다고 볼 수 없기 때문에 기존 방식의 자동차에서는 대폭적인 시장확대를 기대하기 어려울 것으로 보인다. 그러나, Hybrid 자동차용 회생제동장치로 EHB를 적용한 Toyota의 예에서 알 수 있듯이, Hybrid 또는 연료전지차와 같은 저공해 자동차의 시장이 수년 내로 크게 확대될 것으로 기대되기 때문에 여전히 그 존재가치는 충분한 것으로 판단된다. EMB가 사용될 경우 전륜의 경우 1kW 수준의 큰 Power가 요구되기 때문에 기존 14V 전원 시스템으로는 곤란하며, 현재 표준화 논의가 진행 중인 42V 시스템을 필요로 한다. 또한 기계적인 보조제동장치가 없기 때문에 고장 발생시 효과적으로 대처가 가능하도록 복수의 전원, 통신선로 및 Sensor 등을 사용하는 Redundant Structure가 필수적이며, 동시에 통신규약 자체도 TTP (Time-Triggered Protocol) 또는 FlexRay와 같이 ECU 및 통신선로의 고장을 실시간으로 검출 가능한 구조를 지원할 수 있어야 한다. 그러나, 이러한 부분은 현재 국제적인 표준화가 진행 중이며, EMB와 같은 형태의 제동장치가 차량에 장착되기 위해서는 관련 법규의 개정도 필수적이다. 이러한 이유로 현재 대부분의 완성차 또는 부품업체에서는 EMB 시스템의 상용화 시기를 2010년 이후로 예측하고 있다. 이에 비하여 Hybrid Brake는 안전성, 기능 및 가격의 측면에서 상당한 경쟁력이 있을 것으로 판단되며, 2010년 이전에 상용화가 이루어 질 것으로 예상된다.

5. 맺음말

X-by-Wire 기술의 완전 상용화에는 아직도 극복해야 할 많은 장애물이 존재하고 있다. 이 기술의 도입에 따른 차량 생산비용 증가, 전장부품의 신뢰성 확보, 기술의 표준화 문제 등이 대표적인 것 들이다. 이들 외에도 소비자들이 과연 이러한 시스템들을 선호할 것인가 하는 문제가 남지만, X-by-Wire 기술이 지속적으로 자동차에 도입될 것이라는 기본 방향은 분명하고 할 수 있다. 그러므로, 국내의 업계 및 연구 기관들도 X-by-Wire 관련 기술의 표준화 제정 과정에 적극적으로 참여하면서 기술 변화의 추세를 정확히 파악하고, 상용화 가능한 기술 개발을 체계적으로 수행해야 할 필요가 있다.

(윤팔주 책임연구원 : pjyoon@mando.com)

참고문헌

[1] D. Schenk, R. Wells, and J. Miller, "Intelligent Braking for Current and Future Vehicles", SAE Paper No. 950762, 1995
[2] 윤팔주, 강형진, 정호기, 손영섭, 송상호, 이상철, 황인용, "Brake-by-Wire 시스템 개발", 제 1회 미래형자동차기술개발 논문집, pp.127~134, 2003
[3] N. A. Kelling and P. Leteinturier, "X-by-Wire: Opportunities, Challenges and Trends", SAE Paper No. 2003-01-0113, 2003
[4] N. A. Kelling and W. Heck, "The BRAKE Project - Centralized Versus Distributed Redundancy for Brake-by-Wire Systems", SAE Paper No. 2002-01-0266, 2002
[5] 정희식, "X-by-Wire 기술 실현시기, 유럽과 일본의 이견", 자동차경제, 2003
[6] U. Stoll, "Sensotronic Brake Control (SBC) - The Electro-Hydraulic Brake from Mercedes-Benz", VDI-BERICHTE, No. 1646, pp. 825~836, 2001
[7] M. Soga, M. Shimada, J. Sakamoto, and A. Otomo, "Development of Vehicle Dynamics Management System for Hybrid Vehicles: ECB System for Improved Environmental and Vehicle Dynamic Performance", JASE Review, No. 23 pp. 459~464, 2002
[8] http://evolution.skf.com
[9] H. Leffler and W. Foag, "Prospects and Aspects of an Integrated Chassis Management ICM", SAE Paper No. 2000-01-0105
[10] W. Jonner, H. Winner, L. Dreilich, and E. Schunck, "Electrohydraulic Brake System - The First Approach to Brake-by-Wire Technology", SAE Paper No. 960991, 1996
[11] R. Schwarz, R. Isermann, J. Bohm, J. Nell, and P. Rieth, "Clamping Force Estimation for a Brake-by-Wire Actuator", SAE Paper No. 1999-01-0482, 1999
[12] http://www.conti-online.com
[13] http://delphi.com
[14] R. Schwarz, R. Isermann, J. Bohm, J. Nell, and P. Rieth, "Modeling and Control of an Electromechanical Disk Brake", SAE Paper No. 980600, 1998
[15] J. Scobie, M. Maiolani and M. Jordan, "A Cost Efficient Fault Tolerant Brake-by-Wire Architecture", SAE Paper No. 2000-01-1054
[16] R. Isermann, "Fault Tolerant Components for Drive-by-Wire Systems", VDI-BERICHTE, No. 1646, pp. 739~765, 2001
[17] T. Bertram and M. Torlo, "Global Dynamic Fault Tolerance, Networked Systems as a Basis for Safe X-by-Wire Systems", ATZ, Vol. 104, 2002
[18] www.can.bosch.com
[19] www.tttech.com
[20] www.flexray.com