

연료전지차 제어

이 기 준

현대자동차 연구개발기획팀

1. 연료전지차 소개

지난 세기는 기계 문명이 꽃을 피우는 시기였고 자동차가 그 중심에 있었다. 심지어는 기계 구조의 작동 원리를 가리키는 미케니즘이라는 단어는 오늘날 대부분의 자연 및 사회 현상에서 어떤 특정 현상이 발현하게 되는 절차 또는 원리를 가리키는 말로 쓰이게 되었다. 이렇게 자동차가 인류의 많은 것을 바꾸어 놓은 최근 100여년의 세상을 자동차 시대라고 한다면, 그 자동차 시대의 초기에 전기차와 내연기관차가 서로 경쟁을 했다는 것은 참으로 재미있다. 비록 초기에 전기차는 성능 측면에서 내연기관차에 비해 너무 부족한 것이 많았고, 따라서 내연기관차에 영광의 시대를 내주고 커튼 뒤로 퇴장해야만 했다.

그렇다고 전기차가 완전히 사라진 것은 아니었다. 우주 시대의 시작과 함께 운송 수단으로서의 전기차의 개발, 도시 문명의 상징인 전철의 실용화에 전기차 기술은 쓰이고 있다. 심지어 디젤 기차가 전기 모터로 구동된다는 것은 잘 몰랐던 사람에게는 놀라운 일이기도 하다. 휴대용 전자 기기의 사용이 하나의 문명 현상으로 자리 잡은 10여 년 전에도 이차전지의 비약적인 발전에 힘입어 전세계에 전기차 개발 붐이 일어났었다. 이때 전기차 개발의 구동력은 환경 문제였다. 그러나 인류의 기술이 자연이 오랜 시간 동안 만들어 놓은 것을 순식간에 파괴하거나 사용해서 없애는 분야에는 많이 발달해 있지만, 에너지를 정해진 공간에 손쉽게 가두어 두는 기술이 자동차에 쓰이기에는 아직 부족하다. 자동차에 쓰이는 화석연료는 지구가 오랜 세월 동안 만들어낸 에너지원이지만, 이에 비해 전기를 가두어 두는 우리의 기술은 실용화를 위해서는 아직 난제들이 많이 있다. 전기차의 실용화가 더딘 근본적인 기술적 이유이기도 하다.

그런데 최근 연료전지를 자동차의 동력원으로 적용하기 위한 노력이 시도되고 있다. 연료전지차는 구동의 관점에서 보면 전기차이지만, 동력의 발생이라는 관점에서 보면 내연기관차에 가깝다. 연료에서 전기를 생산하는 연료전지라는 에너지 변환 장치가 들어간다. 여러 종류의 연료전지 중에서도 현재 자동차 구동용으로 그 응용이 가장 활발히 시도되고 있는 것은 프로톤 교환막 연료전지인데, 프로톤 교환막 연료전지는 다른 종류의 연료전지 보다 작동온도가 80°C 내외로 낮고, 출력밀도가 크기 때문이다. 현재

의 연료전지차 개발 단계를 보면, 기술 탐색 단계를 지나 시범 운행 및 양산을 위한 기술 개발 단계로 진입했다고 할 수 있다. 내연기관차, 전기자동차 각각의 장점을 결합시켜 놓은 연료전지차의 장점에 의해, 기술 개발과 동시에 보급 촉진을 위한 수소 인프라 구축과 양산 규모 확보 정책이 적극적으로 모색되고 있다.

연료전지차의 상업화 노력이 진행되면서 자동차 제어 부문에는 두 가지 기술적 진보가 예상된다. 먼저, 자동차 구성 시스템의 전기구동화 및 이에 따른 전자제어화가 활발히 진행될 것이다. 이미 배터리 전기차에서도 진행되어 왔지만, 내연기관차의 연비향상과 패키징의 자유도를 높이기 위한 시도와 맞물려, 연료전지차의 실용화와 더불어 그 완성이 예상된다. 또, 차량의 통합제어를 위한 각 시스템제어기와 차량제어기 사이의 통신 및 제어 신뢰성을 높이기 위한 노력이 진행될 것으로 보인다. 이론적으로나 경험적으로나 현재 도로 위를 지배하고 있는 내연기관차의 신뢰성에 새로운 전자 기술이 얼마큼 근접하거나 능가할 것인가가 연료전지차 실용화의 관건이라고 할 수 있다. 본 논문에서는 작성 취지상 연료전지차에서 다루어지고 있는 제어 및 통신에 대한 기초적인 내용을 전반적으로 다루고자 한다. 각각의 상세한 학문적, 기술적 내용은 각각의 전문가들의 몫일 것이다.

2. 연료전지차 시스템 구성

수소와 산소로부터 전기를 생산하는 연료전지 스택은 연료를 연소하여 운동에너지로 바꾸어 주는 내연기관의 엔진본체에 비유될 수 있다. 동력발생장치인 내연기관에 연료 및 공기 공급, 냉각, 배기를 위한 장치로 구성된 엔진 운전 장치가 있듯이, 전력발생장치인 연료전지 시스템에도 같은 기능을 하는 스택 운전 장치가 있다. 열 및 물질 수지 개념을 중요시 하는 화학 공정에서는 이를 Balance of Plant (BOP)라고 하기도 한다. 프로톤 교환막 연료전지 시스템의 스택 운전 장치는 크게 공기 공급 및 배기계, 연료공급계, 물관리 및 냉각계 등으로 구성되어 있다.

한편, 연료전지 자동차의 구동장치는 배터리 전기차와 같이 모터 및 감속기로 구성되어 있다. 연료전지 시스템을 내연기관 자동차의 엔진에 비유한다면, 전기구동장치는

내연기관 자동차의 동력전달장치와 같은 역할을 한다고 볼 수 있다. 다만 동력이 전기이고 전기구동장치는 전기에너지를 운동에너지로 변환시킨다는 것이 다른 점이라고 할 수 있다.

3. 연료전지시스템 제어

주어진 온도 및 압력 조건에서, 연료전지 스택의 효율은 이론적으로 전류가 없는 개회로에서 최대이다. 프로톤 교환막 연료전지에서 개회로에서 약 75%에 이르고, 반응이 일어나고 전류가 흐름에 따라 확산 손실, 저항 손실 등에 의해 그 효율이 감소한다.

스택 운전 장치를 포함한 연료전지 전체 시스템의 효율을 고려할 경우, 아이들 상태에서는 연료전지 발전 전력을 모두 시스템 운전에서 사용하고 밖으로는 일을 하지 않기 때문에 0 (영)이고, 출력이 증가함에 따라 증가한다. 내연기관에서는 최대 출력 가까운 곳에서 효율이 최대이지만, 연료전지 시스템에서는 최대 출력의 10~20%에서 그 효율이 최대인 것이 내연기관과 가장 큰 차이라고 할 수 있다. 수소를 연료로 사용하는 프로톤 교환막 연료전지 시스템의 최대 효율은 약 60%에 이른다. 최대 효율 출력은 대개 연료전지 스택의 운전 소비 전력에 따라 달라지는데, 운전 소비 전력의 대부분을 차지하는 공기공급기의 효율이 이를 결정한다. 일반적으로 시스템 운전 압력이 낮을수록 최대 효율 출력이 낮아진다.

도심을 주행하는 승용차의 경우, 엔진의 실부하 평균은 전체 출력의 10% 미만으로 알려져 있다. 이 영역은 연료전지시스템의 최대 효율 운전 영역에 해당하므로, 최대 효율 영역이 최대 출력에 가까운 곳에 있는 내연기관에 비해 운전 특성 자체도 훨씬 유리하다고 할 수 있다.

4. 드라이브트레인 (Drivetrain) 제어

연료전지차의 드라이브트레인은 모터 및 감속기와 모터 제어로 구성되어 있는데, 이중 모터제어기는 모터의 회전속도와 토크를 제어하는 장치이다. 연료전지차 에너지원인 연료전지시스템은 일정한 전압을 가지는 직류 전압원으로 동작하기 때문에 모터를 제어하기 위해서는 모터에 인가되는 전압을 가변적으로 제어해야 한다. 전기자동차용 모터로는 주로 교류모터가 사용되기 때문에 모터제어기는 결국 가변 전압, 가변 주파수의 교류 전압을 물리적으로 출력하는 기능을 한다. 모터제어기의 내부는 인버터와 제어로 구성된다. 인버터는 직류전원을 교류전원으로 변환시키는 장치를 말하는데, 전력용 반도체가 주요

역할을 담당한다. 제어기는 모터 제어에 필요한 연산처리와 차량 주행 제어를 위한 각종 입출력 신호를 처리하는 부분으로서 중앙연산처리장치와 주변회로로 구성된다. 모터 제어를 위해서는 모터의 모델에 근거한 제어기법이 사용되는데 교류모터의 경우 자속기준제어가 보편화된 제어기법으로서 적용되고 있다. 이처럼 모터제어기는 제어기술과 디지털 회로기술 및 전력용 반도체 기술이 유기적으로 결합된 장치라고 할 수 있다.

5. 하이브리드 운전 제어

이차전지의 충전 기능을 활용한 연료전지차의 효율을 높이는 시스템 구성이 진행 중이다. 내연기관/모터 하이브리드차 전기자동차의 실용화가 연료전지차에 선행할 것으로 예상되기 때문에, 내연기관/모터 하이브리드차의 주요 시스템을 공용화 하고 주요 제어 전략을 활용한 연료전지/이차전지 하이브리드 전기자동차 개발이 한창 진행 중에 있다. 지금은 연료전지차라고 하면 연료전지/이차전지 하이브리드 운전을 기본으로 생각하고 있을 정도이다. 하이브리드 운전의 주요 제어 대상은 모터제어기, 연료전지, 하이브리드용 배터리, DC/DC 컨버터 등이다. 이들 사이의 전력 흐름을 전체 차량 효율이 극대화 될 수 있도록 제어하는 것이 하이브리드 운전의 관건이라고 할 수 있다. 전반적으로 제어 전략은 내연기관/모터 하이브리드 전기자동차와 유사하나, 하이브리드용 배터리는 물론 수백개의 단위전지가 직렬로 연결되어 있는 연료전지 스택의 재료 및 전기화학적 특성을 고려하여 성능과 수명을 극대화할 수 있는 제어전략의 수립이 관건이라고 할 수 있다.

6. 수소 사용 및 안전

연료전지차의 연료로 지금은 대부분 수소가 쓰이고 있다. 한때 현재의 연료 인프라를 고려하여 연료변환기를 장착한 연료전지차 개발이 고려되었지만, 긴 시동시간 및 응답 특성, 효율 제한과 같은 기술적 문제와 수소 사회로의 이행 지연이라는 전략적 이슈 때문에 지금은 수소를 직접 사용하는 연료전지차 개발이 대부분이다. 그런데, 수소를 자동차에서 사용한 경험이 없기 때문에 수소의 안전에 대한 염려가 많아 자동차에서의 수소 안전에 대한 대책이 설계 및 제어 관점에서 이중 삼중으로 세워져 있다. 특히 수소 누설 감지 및 대응은 차량의 안전과 직결되는 문제이므로 차량 제어에 있어 신중히 고려되어야 하는 부분이다. 현재 자동차에서 수소 사용 및 안전에 관한 국제 표준 수립이 진행 중에 있으므로 설계 및 제어 측면의 가이드 라

인이 확보될 것으로 보인다.

7. 수소 충전 및 통신

실용적인 측면에서 고압의 수소 가스 탱크가 초기 실용화 단계에서 연료전지차에 쓰일 것으로 예상된다. 제한된 부피 속에 더 많은 수소를 저장하기 위해 저장 압력을 높이는 개발이 시도되고 있다. 현재는 약 350기압이 시범운행용 차량의 수소 저장 압력이 일반적이는데, 이것은 이미 실용화된 천연가스차의 200기압보다도 더 높은 수준이다. 나아가 현재의 내연기관차 보다 동등 이상의 주행거리를 확보하기 위해 700기압의 수소 탱크를 개발 중에 있다. 이렇게 수소탱크의 고압화가 진행되면서 수소 충전시 안전이 신중히 고려되고 있다. 충전 속도에 따라 수소탱크 내 온도 상승 속도가 달라지므로 수소탱크의 열충격 사이클을 최대한 완화하여 수소탱크의 안전을 보장하는 것이 충전시 고려사항 중 하나이다. 이를 위해 차량과 수소 충전소는 수소 탱크의 압력과 온도 정보를 서로 주고 받으며 충전시의 안전을 확보하기 위한 근거리 통신이 필요하고, 시연되고 있다.

8. 전기구동 사시 시스템의 제어

연료전지차는 전기차의 일종이므로 연비, 패키지 용이성, 편의성 등이 강화된다면 차내의 가능한 한 모든 부품을 전기로 구동하는 것이 자연스러운 발전 방향으로 보인다. 실제로 내연기관차에서도 이를 위해 전통적으로 기계장치로 구동되는 부품 또는 시스템들이 전기로 구동되도록 하는 것이 시도되고 있다. 고도의 신뢰성이 요구되는 제동, 조향 장치들도 전기로 구동되면서 동시에 기구로 제어되는 것이 아닌 통신으로 제어되도록 하는 개발이 한창 진행 중에 있다.

9. 시범운행 단계에서의 데이터 수집

현재 연료전지차는 시장 경쟁력을 갖기 위한 기술 개발이 한창 진행 중이고, 수소 인프라 시범사업과 연계되어 제한된 지역에서 제한된 운전자에 의한 시범 운행이 진행되고 있다. 개발 단계의 차량 운행이기 때문에 다양한 운전자에 의한 다양한 환경에서의 운행 정보는 다시 기술 개발에 반영되어야 하므로 매우 중요하다. 실제로 시험 및 시범 운행에서 연료전지차에서는 실시간으로 엄청난 분량의 데이터가 수집되고 보관된다. 이 데이터를 실시간으로

까지 기술 개발자들에게 전달될 필요는 없지만, 데이터의 양이나 유지보수 관점에서 가능한 한 빨리 전달되어 분석되는 것이 필요하다. 이를 위해 차량 운행 후 정해진 차고지로 돌아 왔을 때 근거리 무선 통신을 통해 차량 운행 데이터가 자동으로 서버에 등재되도록 하는 것이 적용되고 있다.

한편, 차량 구성 시스템의 유지보수 주기에 대한 평가 결과나 경험이 부족하기 때문에 차량의 시범운행 단계에서는 차량의 주요 운행 정보를 실시간으로 모니터링 하는 것이 필요할 수 있다. 예를 들면 차량의 위치 정보, 차속, 경고 및 고장 신호 등이 그것이다. 이를 위해 운행 지역의 무선 통신망을 활용하여 주기적으로 차량 정보를 수집하여 관계자에게 실시간으로 전달한다.

10. 통합 제어

자동차를 구성하고 있는 시스템 각각에는 각 시스템을 제어하는 제어기가 있고, 이 시스템 제어기들을 통합적으로 제어하고 유저의 의도를 파악하고 전달하고 고장을 진단하고 조치를 취하는 차량 통합 제어기가 있다. 기존의 자동차와는 달리 유저의 의도가 통신에 의해 각 시스템에 전달되게 된다. 여기에서 통신 신뢰성 및 안전성 확보에 대한 염려가 있다. 기구에 의한 제어는 오랜 기간 동안 실생활에서 그 신뢰성과 안전성이 검증되어 왔다. 더군다나 항공기에 적용되어 온 통신에 의한 분산 제어 기술이 자동차에도 필요한가 그리고 안전성을 확보할 수 있는가 하는 질문들이 제기되고 있다. 항공기에 비해 응답 속도가 빨라야 하는 자동차의 경우에는 통신의 신뢰성과 안전성 확보는 하나의 과제라고 할 수 있다. 차량 구성 시스템의 통합 제어를 위한 통신의 신뢰성과 안전성에 대한 이분들이 정리되고 있고 이를 구현하기 위한 기술적 대안들이 수립되고 있다. 그러나 유저들의 신뢰 수준에 도달하기 위한 지루한 검증 작업까지 포함하면 실용화에 도달하기 까지 아직 해야 할 일이 많다고 할 수 있다.

한편, 향후 연료전지차에서 모든 구성 시스템이 각각의 제어기로 제어될 경우, 차량의 주행 안정성을 위한 각 시스템의 정밀 제어 및 유기적 제어를 위한 아이디어가 제시되고 적용을 위한 평가가 진행될 것으로 보인다. 구성 시스템의 전기 구동 원리상 제어 자체가 각종 측정 신호의 실시간 처리를 바탕으로 하기 때문에, 차량 각 부분의 운전 및 작동 정보를 더욱 풍부하게 수집할 수 있다. 이들 정보와 차량 동역학의 결합을 통해 차량 주행 안정성 제어에 대한 획기적 기술들이 차량에 적용될 것이다.

----- 저자약력 -----



《이 기 준》

- 1990년 서울대학교 무기재료공학과 졸업 (공학사).
- 1992년 동대학원 공학석사.
- 1997년 동대학원 공학박사 (세부전공:

Solid State Ionics).

- 1997년~2004년 현대자동차 연료전지개발팀.
- 2004년~현재 현대자동차 연구개발기획팀.
- 주요 관심 분야 : Fuel Cell Vehicle Design and Integration
Energy/Environment Scenarios and Prospects.