

전기자동차 구동 시스템의 개발 동향과 전망



최진민

(수송기계실장)

- '75. 2 서울대학교 공과대학 기계과 (학사)
- '77. 2 서울대학교 대학원 기계과 (석사)
- '92. 8 경북대학교 대학원 기계과 (박사)
- '77. 2-'78. 4 효성중공업
- '78. 4-현재 한국기계연구원 수송기계실



구정서

(수송기계실 선임연구원)

- '85. 2 부산대학교 공과대학 기계공학과 (학사)
- '87. 2 KAIST 기계공학과 (석사)
- '87. 3-'91. 2 KIST 기계시스템실
- '91. 3-현재 한국기계연구원 수송기계실



고병천

(한국자동차부품종합기술연구소 차체구조연구실장)

- '75. 2 서울대학교 공과대학 기계과 (학사)
- '79. 3-'81. 2 서울대학교 대학원 기계설계과 (석사)
- '82. 9-'88. 8 Univ. of Michigan 응용역학 (박사)
- '81. 3-'82. 8 한국과학기술연구소 CAD/CAM실
- '77. 7-'79. 7, '88. 11-'92. 3 한국기계연구소
- '92. 4-현재 한국자동차부품종합기술연구소

1. 서론

전기자동차는 무공해성, 고에너지 효율, 에너지원의 다양성 등 호감이 가는 장점이 많음에도 불구하고, 내연기관 자동차를 대체하려면 여러가지 해결되어야할 기술적인 문제가 많이 있다. 즉, 1회 충전 주행 거리가 짧은 것과 주행 성능이 나쁜 것 외에도 축전지, 전동기, 제어기 등 전장 부품의 가격이 너무 높고, 축전지 수명이 짧아서 유지 보수 비용의 부담이 추가되는 등, 경제성 있는 전기자동차의 개발이 어렵다. 또한 축전지, 전동기, 제어 장치, 동력전달 기구 등을 경량화, compact화 하여 차량의 무게를 줄이고 공간 이용 효율을 높이는 문제, 그리고 가솔린 자동차와 동등한 수준으로 파워 스티어링(power steering), 냉난방 장치 등을 구비하여 좋은 운전성(driveability)과 쾌적한 승차감을 제고하는 문제 등이 해결되어야할 과제이다. 미국의 에너지부(DOE)에서는 자동차 개발 회사들의 전기자동차 개발 연구를 촉진하고, 실용화 시기를 앞당기기 위하여, 미국 연방정부 전기자동차 프로그램(U.S. Government Electric Vehicle Program)을 실시중인데, 축전지 개발 연구와 함께 구동 시스템(power train) 개발에도 많은 노력을 기울이고 있다. 기존의 가솔린 자동차와 경쟁할 수 있는 전기자동차가 출현하기 위해서는 획기적인 성능을 가진 축전지가 실용화되어야 함은 두말할 나위도 없지만, 경량 고효율 구동 시스템의 개발도 그 시기를 앞당기는데 기여할 것이다. 실제로 DOE의 프로그램이 시작된 1977년과 ETX-I의 개발이 끝난 1985년의 구동 시스템 효율을 비교하면, 주행 에너지 소모율이 63%나 감소되었음을 알 수 있다. 이것은 축전지의 효율이 상승한 이유도 있으나, 우수한 전력 소자의 개발에 따른 전동기 및 제어 기술의 향상, 경량

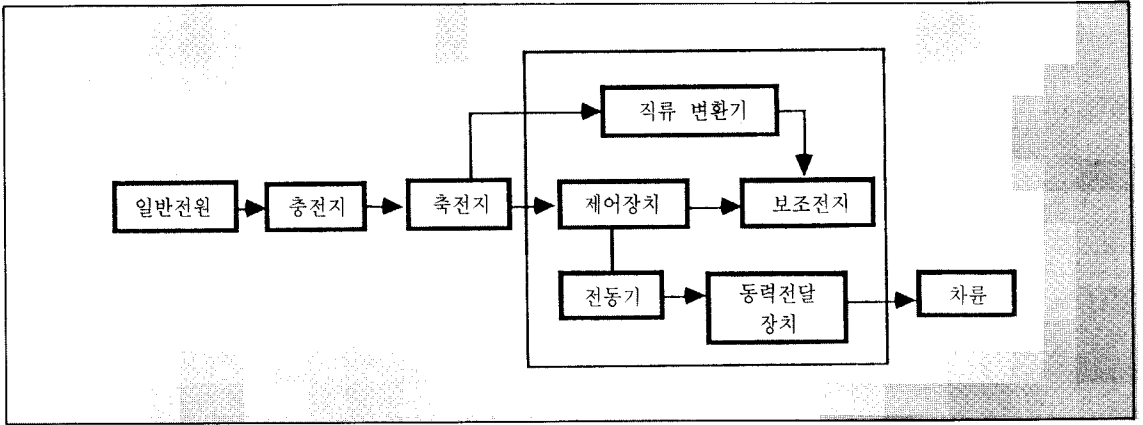


그림 1. 전기 자동차 추진장치

고효율의 동력전달 장치(transaxle) 개발, 차체 경량화 및 주행저항 저감 분야의 기술혁신에 힘입은 바가 크다할 것이다. 그림 1은 전기자동차의 핵심 부분인 추진시스템(propulsion system)의 개요를 나타낸 것으로 크게 축전지와 구동 시스템으로 나눌 수 있으며, 전기자동차 개발의 성공여부는 이들 시스템, 즉 고성능 축전지와 우수한 구동 시스템의 개발에 달려 있다고 할 수 있다. 여기서는 구동 시스템에 대하여 선진 각국의 개발 동향과 앞으로의 발전방향을 분석함으로써 1990년대 중반 이후에 실용화를 목표로 국책 사업으로 개발 추진중인 국산화 전기자동차에 적합한 구동 시스템의 개념 정립에 기여하고자 한다.

2. 구동 시스템의 분석

전기자동차의 구동 시스템은 축전지로 부터 공급되는 전기 에너지를 기계적 에너지로 바꾸어 주는 전동기, 전동기의 회전수 및 토크를 변화시키기 위한 제어 장치와 전동기에서 얻어진 토크를 적절한 구동력으로 변화시켜 차륜에 전달하는 동력전달 장치로 구성되어 있으며, 이 구동 시스템은 전동기의 종류, 제어방법 그리고 동력 전달 장치의 구성에 따라 표 1과 같이 분류할 수 있다.

표 1. 전기 자동차 구동 시스템의 분류

분류	전동기 종류	제어방식	동력전달 시스템
(I)	직류 직권 전동기	SCR/TR chopper 제어용 컴퓨터	3단 이상의 변속기어 differential gear, clutch
(II)	직류 타여자 (또는 분권) 전동기	TR chopper 제어용 컴퓨터	1단 이상의 변속기어 differential gear clutch (1단인 경우는 없음)
(III)	직류 무정류자 전동기	inverter 제어용 컴퓨터	차륜을 직접 구동
(IV)	직류 무정류자 전동기	inverter 제어용 컴퓨터	1단의 감속기어 전기적 회로 연결 (자속 변화용 보조코일의 직렬 및 병렬 변환)에 의한 2단 토크 변환 장치 differential gear(2-motor/controller 방식에서는 생략)
(V)	교류 유도 전동기	inverter 제어용 컴퓨터	2단의 변속기어 differential gear, clutch
(VI)	교류 동기 전동기	inverter 제어용 컴퓨터	2단의 변속기어 differential gear, clutch
(VII)	2개의 교류 동기 전동기	inverter 제어용 컴퓨터	1단의 감속기어

(가) 시스템 (I)

이 시스템의 직류 직권 전동기는 기동 토크가 큰 이상적인 구동 특성을 가지기 때문에 상용화된 전인용 전기자동차에 널리 사용되고 있다. 그러나 이 전동기는 고속 회전 영역에서 토크 특성이 나쁘고, 대개 전력 용량이 큰 SCR chopper를 사용하므로 제어 효율이 낮고 회생 제동에 어려움이 있다. 따라서 이 시스템에서는 최대 주행 속도, 가속 성능을 향상시키기 위해서 3단 이상의 변속 기어를 사용하는 것이 보통이다. 직류 직권 전동기는 전체적으로 직류 분권이나 직류 타여자 전동기보다 효율이 낮아서 기존 가솔린 자동차(ICE)의 동력 전달 장치를 그대로 이용한 개조형 전기자동차에는 사용되지 않지만, 전기자동차 전용 구동 시스템 개발에는 별로 사용되지 않는다. 특히 이 전동기는 무부하 운전시 전동기가 과속으로 회전하기 때문에 대단히 위험하고, 주기적으로 brush를 보수하여야 하는 단점이 있다. 이러한 구동 시스템은 일본의 구주 전력에서 개발한 상업용 van인 Nissan EV(3단 기어)와 Fiat의 Panda Eletta (5단 기어)가 있다.

(나) 시스템 (II)

이 시스템의 직류 전동기들은 교류 유도 전동기와 유사하게 저속 회전 영역에서 일정 토크(constant torque) 특성을, 중고속 회전 영역에서는 일정 일률(constant power) 특성을 가지며, 비교적 제어 영역이 넓고 효율이 높기 때문에 1단의 감속 기어만을 사용한 경우가 많지만, 등판 성능 및 가속 성능을 향상시키기 위하여, 2-3단의 변속 기어나 flywheel을 사용하는 수도 있다. 이 전동기는 직류 직권 전동기보다 동력 효율, 회생 제동 효율이 양호하나 비교적 가격이 높고, brush의 보수와 소음 문제가 있다. 그림 2는 직류 타여자 전동기를 사용한 추진 시스템의 개요를 나타낸 것이다. 대다수의 유명한 직류 전동기형 전기자동차가 직류 타여자 전동기를 사용하고 있으며, 대표적인 것으로는 Vehma사의 G-van과 Chrysler의 TE-van을 들 수 있다. 직류 분권 전동기로 구성된 시스템으로는 Daihatsu의 HIJET van이 있다.

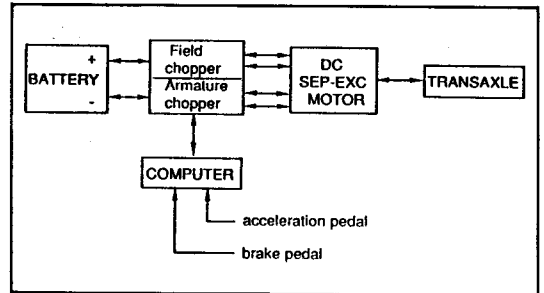


그림 2. 직류 타여자 전동기를 사용한 추진 시스템

(다) 시스템 (III) 및 (IV)

시스템(III) 및 (IV)의 직류 무정류자 전동기(BLDC)는 출력 밀도와 효율이 극히 높고, 제어가 용이하다. 예를 들어 Unique Mobility사의 제품은 3.3kW/kg의 출력 밀도에 전체 작동 영역에서 90% 이상의 효율을 가진 획기적인 것이다. 이러한 출력 밀도는 기존의 직류 전동기에 비하면 5배 이상이고, 심지어 가솔린 기관과 비교하여도 더 우수할 정도이다. 특히 기존의 직류 전동기 뿐만 아니라 교류 유도 전동기에 비하여도 소음이 적고 정속하다. 그리고 전동기와 제어를 동시에 생각하면 오히려 다른 시스템보다 저렴하기 때문에 전기자동차의 실용화에 가장 기여할 수 있는 전동기로 보여진다. 1990년 GM의 지원으로 실시된 플로리다와 디트로이트 간의 sunrace에 참가한 32개 대학팀의 절반이 이 회사의 전동기/제어기를 사용하였을 정도로 인정을 받고 있다. (III)의 시스템은 이 전동기가 소형, 경량하면서도 고출력인 특징을 이용하여 2개 또는 4개의 차륜에 내장하고 직접 구동하여 차량을 추진함으로써, 기계적 동력 전달 손실을 없애고 전체적으로 경량화를 달성할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방식은 시내 주행과 같이 잦은 정차/발차의 반복 및 저속 주행이 필요한 경우에는 동력 효율이 낮아지며, 기어 감속을 하지 않으므로 토크 증대 효과가 없어져 차량이 등판이나 가속을 필요로 할때 충분한 토크를 얻기가 어렵다. 또한, 이 방식은 차륜의 무게가 증가하여, 진동에 의해 승차감이 저하되는 등의 문제가 있다. 한편, (IV)의 시스템으로는 Unique Mobility사에서 개발한 일체형 구동 시스템(differ-

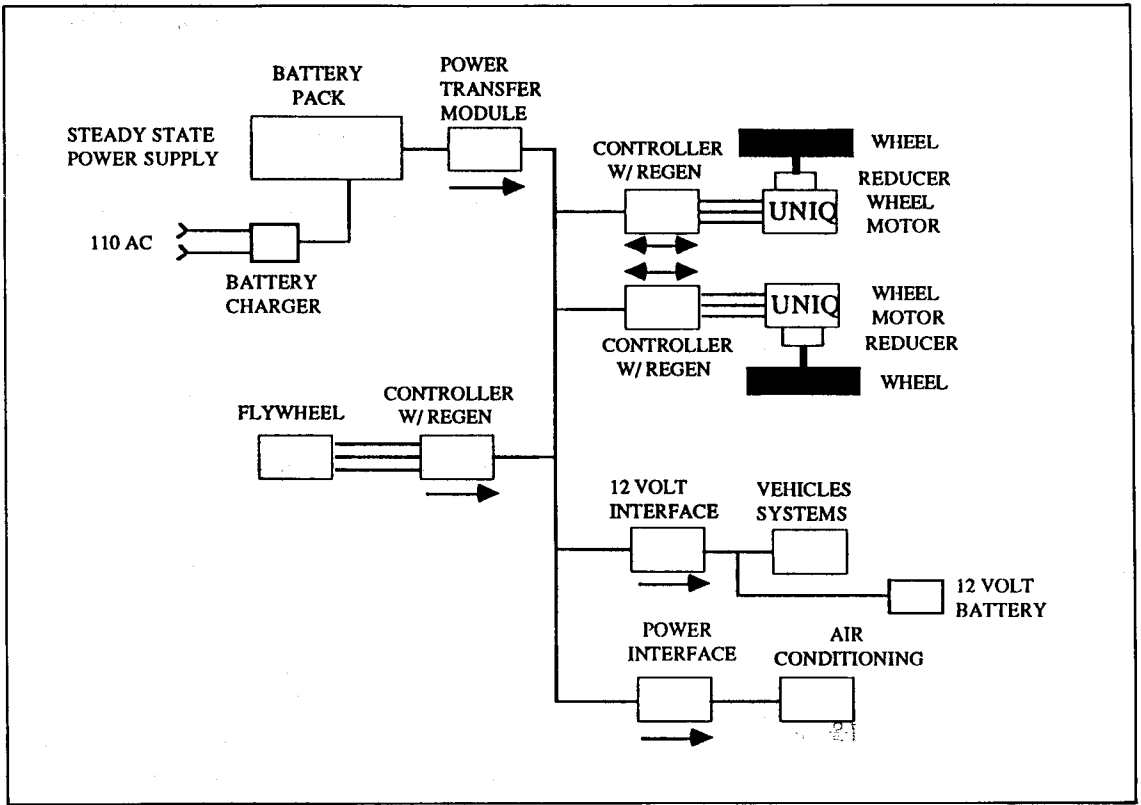


그림 3. Unique Mobility사의 2-motor/controller형 추진 시스템 개요

ntial gear 사용)과 2-motor/controller형 구동 시스템 (flywheel을 선택적으로 사용)을 들 수 있는데 초경량, 고효율, 양호한 토크 특성, 우수한 회생제동 효율을 가진 획기적인 시스템이다. 이 구동 시스템은 BMW의 E1개발에 사용되어 우수한 주행 성능이 입증되었다. 그림 3은 Unique Mobility사가 개발한 전기자동차인 MPV(Multi-Purpose Vehicle)에 사용된 2-motor/controller형 추진 시스템의 개요이다.

(라) 시스템 (V) 및 (VI)

시스템(V), (VI)의 구동 시스템은 미국 에너지부의 전기자동차 추진 시스템 개발 사업에 의하여 많은 연구가 이루어 졌다. 교류 전동기는 가격, 유지 보수의 편의성, 고속 회전에 의한 고회전 밀도, brushless특성 등, 상당한 장점이 있으므로 장래에 실용화 전망이 매우 높다. 교류 전동기는

출력 특성이 직류 타여자 전동기와 유사하지만 저속 영역에서의 토크는 상대적으로 낮은 편이며, 최고 회전 속도는 높게 할 수 있다. 따라서 충분한 등판 성능과 가속 성능을 확보하고, 출력 밀도가 높은 소형의 고속 회전 전동기를 사용하기 위해서는 2단의 변속 기어를 사용하는 것이 보통이다. 그러나 JPL(Jet Propulsion Lab)에서 개발한 구동 시스템 (JPL AC-system)과 같이 교류 유도 전동기에 1단의 감속 기어만 사용한 경우도 있는데, 이러한 시스템은 2단기어를 사용한 시스템보다 상대적으로 큰 전동기를 필요로 한다. JPL AC-system은 최고속도 12000rpm, 정격출력 30kW인 GE사의 전동기와 도시바(Toshiba)의 상용 inverter를 사용하였다. 그림 4는 교류 유도 전동기를 사용한 추진 시스템의 개요를 나타낸다. (V)의 시스템은 DOE에서 연구 지원하고 Ford/GE에서 개발한 단일축 구동 시스템(ETX-I)과 Eaton사에서 개발한 이중축 구동 시스템(DSEP)이 대표적이며,

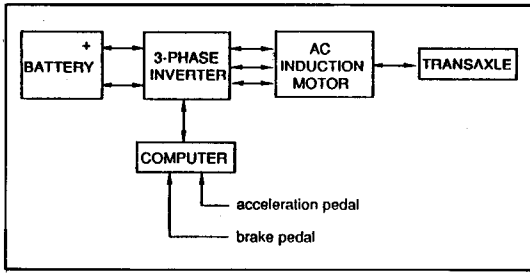


그림 4. 교류 유도 전동기를 사용한 추진 시스템

1개의 구동용 전동기를 사용하기 때문에 differential gear가 필요하다. 이들 시스템은 비교적 compact하고 경량화된 자동 변속 구동시스템들로서 운전성과 동력 전달 효율이 높은 편이나 변속 기어, 클러치, 차동 기어 등으로 구성되어 있으므로 구조가 복잡하다. ETX-I은 전동기와 변속기를 단일 축상에 배치하여 일체화시킨 구성이며, DSEP은 전동기와 변속기를 2개의 평행한 축상에 배열하고 두 축사이의 동력전달은 체인(chain)을 사용하는 방식이다. 한편 (VI)의 시스템으로는 ETX-II를 들 수 있는데, 이것은 ETX-I을 mini-van의 구동에 적합하도록 개량한 것으로서 교류 유도 전동기 대신에 교류 동기 전동기를 사용한 후륜 구동 방식이다. 이 전동기는 회전자에 영구자석을 사

용하여 저항 손실을 막을 수 있기 때문에 교류 유도 전동기에 비하여 효율이 약간 더 높다. 그러나 고가의 고성능 영구자석을 사용하여야 하고, 전동기 제작이 복잡한 단점이 있다.

(마) 시스템 (VII)

최근에 개발되고 있는 원형 전기자동차는 낮은 공기 저항, 낮은 전동 저항, 초경량 구조 등을 실현하고 있으므로 1단의 감속 기어만을 사용하여도 전동기 제어 기술로써 만족할 만한 주행 성능에 도달할 수 있다. 이 시스템은 2개의 전동기를 사용하여 비교적 큰 구동력과 출력을 얻고, 좌우에 배열된 전동기를 독립적으로 제어하여 차동 기어에 의한 기계적 손실을 줄이고 섬세한 선회 주행이 가능하도록 하였다. Nissan의 FEV, GM의 Impact에서 이 방식을 사용하였는데, 기존의 가솔린 자동차에 비하여 큰 손색이 없는 주행 성능 (FEV의 경우, 최고 속도 130km/h, 0-40km/h의 가속 시간 3.6초, 동판능력 35%)을 얻을 수 있었으며, 주행 성능이나 가격 측면에서 실용화에 가장 근접해 있다고 볼 수 있는 우수한 구동 시스템이다. 그림 5는 FEV 구동 시스템의 개요를 나타낸 것

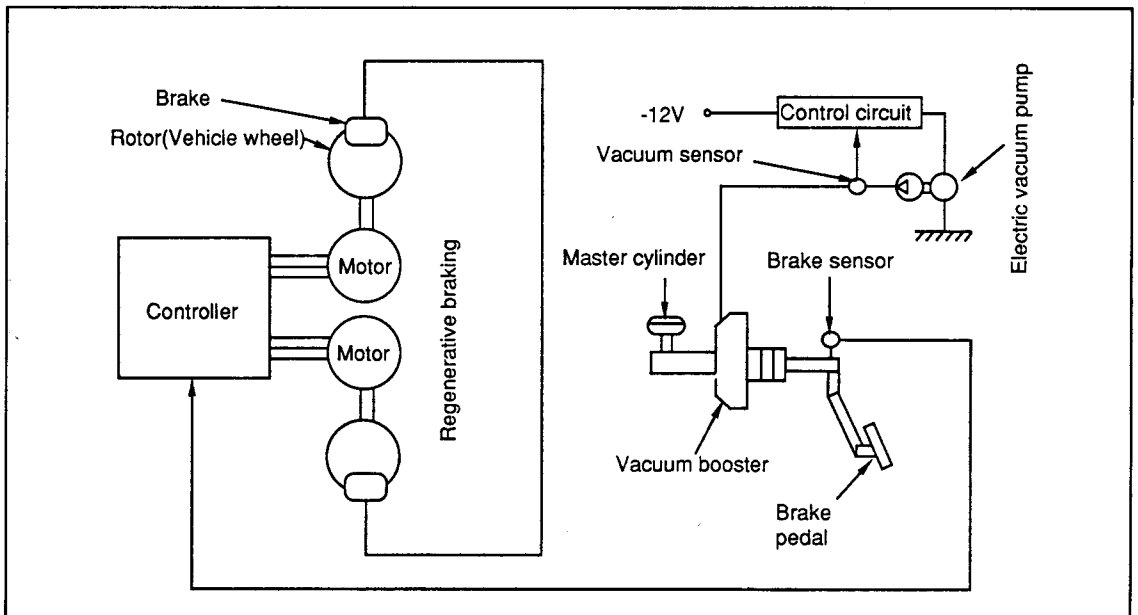


그림 5. FEV구동 시스템의 개요

이다.

이상으로 살펴본 구동방식 이외에도 토크 변환기(torque converter)를 사용한 CVT방식, 상호 보완적인 특성을 가진 직류 직권 전동기와 직류 분권 전동기를 동시에 사용하여 주행 성능을 제고시킨 방식 등이 있으나 효율과 실용적 측면에서 많은 연구가 필요한 것으로 생각된다.

3. 구동 시스템의 개발 추세와 전망

(가) 구동용 전동기의 경향 분석

현재 가장 많이 사용되고 있는 전기자동차 구동용 전동기는 직류 전동기(주로 직류 타여자)이다. 이것은 SCR/TR-chopper에 의하여 쉽게 제어할 수 있고, 적절히 잘 설계하면 만족할만한 주행 성능 및 회생 제동을 얻을 수 있다. 그러나 1회 충전 주행 거리와 연비를 높이고, 상업적 경쟁력이 있는 전기자동차를 개발하기 위해서는 새로운 기술의 전동기 개발 및 적용이 강력히 요구되고 있다. 전동기의 소형화, 경량화, 고효율화, 내구성 및 고신뢰성, 설계/제작의 용이함, 비용 저감 등은 중요한 연구개발 과제이다. 우선 이러한 특성을 만족시키려면 정류자가 없는 전동기의 적용이 요긴한 것으로 생각되어 왔는데, 최근에 급속히 발전하고 있는 반도체 분야의 기술 혁신에 의하여 상대적으로 제어가 어려운 교류 전동기를 전기자동차 개발에 적용할 수 있게 되었다. 주로 연구의 대상이 되고 있는 교류 전동기는 유도형 비동기 전동기, 영구 자석(Sm-Co 또는 Nd-Fe-B가 주로 사용됨)형 동기 전동기이며, 직류 전동기와 중량, 성능, 가격 등을 비교한 연구가 최근 유럽에서 수행된 바(European Action COST 320)있다. 여기에서 비교한 전동기는 10kW, 15kW, 40kW 급이며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 교류 전동기와 직류 전동기의 중량비는 0.4-0.5 정도이며, 이것은 정류자의 유무와 정류자에 의한 최고 속도 한계 때문에 생기는 출력 밀도의 차이에서 기인한다.
- 전동기에 필요한 제어기(inverter 또는 chopper)

의 중량을 비교하면 직류의 경우보다 1.5배 정도로 교류의 경우가 무겁다. 그러나 전력 소자의 소형 고성능화로 시스템에서 차지하는 제어기의 중량은 감소하는 추세이다.

- 전동기와 제어기를 합한 시스템의 중량은 교류의 경우가 직류의 0.5-0.7배 정도로 유리하고, 교류 전동기는 소형이면서 정류자가 없기 때문에 냉각 시스템 등 부수적인 장치가 간단하므로, 이러한 장치들의 중량까지도 고려하여 비교하면 더욱 유리하다.
- 교류 전동기는 직류 전동기에 비하여 효율이 높는데, 특히 동기 전동기인 경우에는 효율이 85%이상으로, 직류 전동기보다 5-6% 정도 높고 출력 및 회전 속도 변화에 대하여 덜 민감한 장점이 있다.
- 비동기 방식 교류 시스템(motor+inverter)의 가격은 직류 시스템(motor+chopper)의 가격과 비교할 때 거의 비슷한 수준이고, 동기 방식 교류 시스템의 가격은 직류 시스템의 가격과 비교하여 1-1.2배 정도 비싸게 된다.
- 각 시스템의 경우, 전자장치(power electronics and micro electronics)가 전체 시스템에서 차지하는 가격을 대비해 보면, 교류 비동기 시스템은 0.8, 교류 동기 시스템은 0.67, 직류 시스템은 0.5정도이다.
- 교류 전동기는 무정류자형이므로 설계/제작이 용이하고, 신뢰성이 높으며, 출력 변수(토크, 속도) 상호간의 'trade-off'를 고려한 다양한 설계를 할 수 있어, 원리적으로는 저속 고토르크, 고속 저토크의 이상적인 특성을 갖는 전동기의 개발이 기대된다.

이상의 결과를 종합해 보면, 현재는 교류 시스템에 비하여 직류 시스템의 가격이 약간 낮은편이지만 교류 시스템에 많이 사용되고 있는 각종 전자 장치들의 가격이 급격히 하락하고 있으므로 가까운 장래에 교류 시스템이 가격 측면에서 유리해질 것으로 보인다. 특히 교류 시스템은 중량, 크기, 효율, 신뢰성, 설계의 다양성 등의 장점이 있고, 미래의 기술 혁신은 주로 전자 분야에서 선도할 것이므로, 장래의 전기자동차 실용화에

표 2. 각종 전동기/제어기의 특성 비교

Motor-controller concepts	Requirements			
	Spec. power output	Starting torque	Efficiency	Cost
DC motor	Low	Adequate	Unsatisfactory	Unsatisfactory
Three phase motor	Adequate	Adequate	Satisfactory	Unsatisfactory
Permanent-magnet motor	Very high	Low	Good	Unsatisfactory
DC motor with electronic commutation and integral controller	High	High	Very good	Satisfactory

기여할 것으로 생각된다.

또한 최근에 전기자동차의 구동용 전동기로 각광을 받고 있는 직류 무정류자 전동기는 직류 전원을 그대로 사용하기 때문에 inverter가 필요 없고, 고성능이면서도 제어가 용이한 장점이 있어서 매우 실용성이 높다. 그리고 출력 밀도는 가솔린 기관을 능가할 정도로 (3kw/kg 이상) 높아 소형 경량으로도 큰 구동력을 얻을 수 있다. 또 전기적인 회로를 변환하는 방법으로 저속에서의 토크를 높일 수 있는 방법(전기적 변속 장치)이 개발되어 있기 때문에 장래에 가장 유망한 구동용 전동기가 될 것으로 보인다.

결론적으로 말하면 미래의 전기 자동차 실용화는 교류전동기와 직류 무정류자 전동기에 의하여 주도될 것이다. 표 2는 각종 구동용 전동기와 제어기의 특징을 비교한 것이다.

(나) Transaxle 개발의 경향 분석

Transaxle의 중요한 기능은 전동기에서 생성된 기계적 회전 운동을 차량 구동에 필요한 회전수로 저감시켜서 차륜에 전달하는 것이다. 통상의 경우, 전동기의 속도는 운행에 필요한 차륜의 속도보다 10배 정도 높고, 토크는 10배 정도 낮으므로, transaxle에서 기어열을 사용하여 속도를 변환함으로써 이러한 구동력 및 속도 특성에 적합한 동력으로

변환시킬 수 있다. 특히 변속기의 단수 및 기어비를 잘 설계하면 전동기/제어기의 효율이 매우 높은 영역에서 운전을 할 수 있어 전반적으로 연비를 향상시킬 수 있다. 그러나 이러한 설계에는 현실적으로 고려하여야 할 변수 및 제한 조건이 많이 있으므로 충분한 검토와 'trade-off study'를 수행하여 전체 시스템 관점에서 최적 설계를 도출하는 것이 중요하다. 즉, 기어 단수를 많이 사용하면, 전동기와 제어기의 효율이 높은 영역을 선택하여 사용할 수 있고 등판 능력을 향상시킬 수 있으나, 기어에 의한 기계적 동력 손실과 transaxle의 무게가 증가하여 전체적인 효율이 나빠질 우려가 있고, 반대로 기어를 사용하지 않으면, 큰 토크가 요구되는 등판이나 가속시에 쉽게 전동기에 과부하가 걸려서 주행 성능이 떨어지고 저속 주행 시에는 전동기의 효율이 나빠질 수도 있다. 따라서 transaxle의 설계에서 변속기의 단수 및 기어비는 전동기 및 제어기의 출력과 상호 연계되어 있고, 주행 성능에 결정적인 영향을 주는 설계 변수이므로, 이들을 결정하기 위해서는 구동 시스템의 효율, 성능, 운전성 등이 종합적으로 고려된 컴퓨터 시뮬레이션 기법을 사용하여 세심한 분석을 하여야 한다.

전기자동차의 변속 기어 단수는 내연 기관의 경우와 상당히 다르게 되는데, 그 이유는 전동기의 효율이 내연 기관과 비교하여 상대적으로 넓은

영역에서 거의 일정하므로(그림 6 참조), 동력 효율을 높이기 위해 여러 단의 변속을 필요로 하지 않는다. 또한 기어의 단수를 증가시키면, 등판 성능이 좋아지는 것은 명백한 사실이지만 가속 성능이 항상 좋아진다고 말할 수는 없다. 그림 7과 그림 8은 DSEP의 설계시 수행한 'trade-off study' 결과의 일부인데, 그림 7은 변속 기어를 3단으로 가정한 경우, 각 단에 대한 가속 성능 곡선을 나타낸 것이다. 저속 기어는 출발 직후의 가속이 매우 좋으나 최고 속도의 수준이 낮고, 고속 기어는 그 반대의 주행 특성을, 그리고 중간 속도의 기어는 두 경우를 평균한 것과 같은 주행 특성을 보여준다. 따라서 실용적인 주행 성능을 얻으려면, 2단 이상의 변속 기어를 사용해야 됨을 알 수 있고, 3단의 변속 기어가 매우 이상적일 것으로 생각된다. 그러나 적당한 기어비를 사용하여 설계된 2단과 3단의 변속기에 대하여, 컴퓨터 시뮬레이션을 수행한 결과를 비교해보면(그림 8 참조), 오히려 2단 변속의 경우가 출발 가속 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 이것은 3단 변속의 경우가 2단 변속의 경우에 비하여 변속 시간이 추가로 더 필요하기 때문이다. 실제로 ETX-I/II, DSEP, TE-van 등과 같은 개조형 전기자동차는 거의 2단 변속 방식을 채용하고 있다.

그러나 2단 이상의 변속 장치는 clutch와 이것을 작동시키기 위한 부수적인 장치들이 필요하게 되어 구조가 복잡(A/T인 경우는 더욱 심함)해지

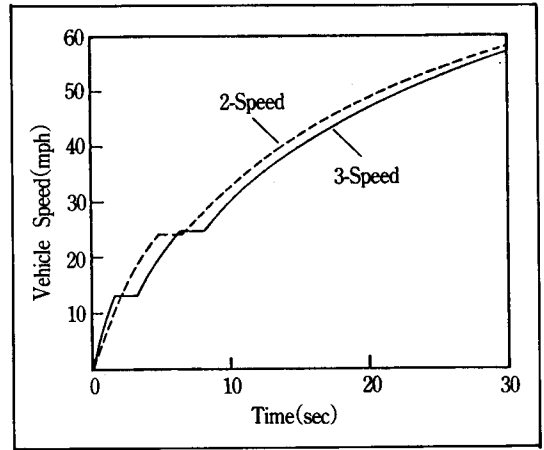


그림 7. DSEP 차량의 각 단에서의 가속 성능

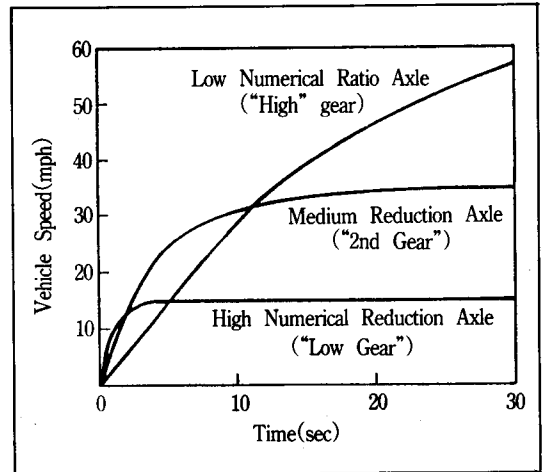


그림 8. DSEP 차량에서 2단 변속과 3단 변속의 출발 가속 성능 비교

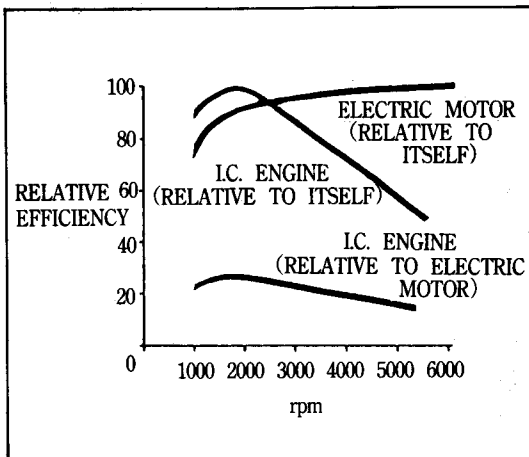


그림 6. 전동기와 내연 기관의 효율 비교

므로, transaxle의 경량화, 고효율화에 어려움이 따른다. 그래서 clutch가 필요없는 1단의 감속 기어로 된 transaxle의 개발이 필연적인 추세가 되고 있으며, 전동기/제어기의 성능 향상과 더불어 경량 차체 설계, 낮은 공기 저항의 외형 설계, 낮은 전동 저항의 타이어 개발로 실용 가능성이 매우 높아졌다. 표 3은 여러가지 종류의 변속기를 개념적으로 비교한 것인데, 1단 변속기가 경량화 및 효율면에서 가장 우수하나 속도 변환 영역이 좁으므로 이 경우에는 넓은 영역의 속도 제어가 가능하고 큰 구동력을 얻을 수 있는 전동기/제어기 시스템의 개발이 필요하다.

표 3. 각종 변속기의 특성 비교

Transmission concepts	Requirements				
	Conversion range	Efficiency	Power density	Easy of operation	Costs
Manual-shift gear box(ICE)	Good	Moderate	Good	Poor	Satisfactory
Automatic transmission (ICE)	Good	Poor	Poor	Adequate	High
CVT	Moderate	Poor	Very poor	Good	High
Fixed-ratio transmission(EV)	Inadequate	Very good	Very good	Very good	Very low
2-speed manual-shift gear box	Adequate	Good	Good	Adequate	Low
2-speed Automatic-shift gear box(EV)	Adequate	Good	Good	Good	Satisfactory

또한 최근에는 CVT를 사용한 구동 시스템의 개발 연구도 보고되고 있는데, 1991년 Epilogics사에서 개발한 전기자동차용 CVT는 감속 기어를 제외한 CVT만의 효율이 89%정도이고, 변속영역(1/1-1/4)도 넓다. 이 시스템의 크기와 무게는 4단 변속기와 유사하며, 저속 주행시에도 회생 제동 효율이 높은 것을 장점으로 들고있다. 이 구동 시스템은 연구 자료의 미비로 충분한 검토가 불가능하였으나 경량화와 동력전달 효율의 측면에서 불리한 것으로 생각된다. 그리고 transaxle없이 전동기로 직접 차륜을 구동하는 wheel-in-moter 방식은 경량화와 기계적 손실을 없앨 수 있다는 측면에서는 매우 좋은 방법이지만, 차량의 구동 특성에 적합한 토크(500-600Nm/ton)와 출력(15-20kW/ton)을 만족시킬 수 있고, 저속 회전 영역에서 효율이 저하되지 않는 혁신적인 전동기의 개발이 있어야 실용화가 가능하리라 본다. 실제로 감속 기어를 사용하는 것이 소형의 전동기로서도 큰 구동력을 얻을 수 있고, 전동기의 작동효율을 높일 수 있으므로 자연스러워 보인다. 요즘은 기계 설계 및 가공 분야에서도 큰 발전이 있어서

감속 기어의 효율이 대개 95% 이상이고 소형 경량화되어 있으므로 구동 시스템의 효율 제고 측면에서도 감속 기어를 사용하는 것이 오히려 유리할 것으로 생각된다. 표 4는 1986년도에 발표된 JPL의 교류 전동기 구동 시스템의 설계분석 결과인데, 감속기의 효율과 중량이 어느 정도인지를 파악할 수 있는 참고 자료이다.

한편, 차량의 등판 성능 및 가속 성능을 향상시킬 목적으로 flywheel을 사용하는 것을 여러 구동 시스템(ETV-II, Unique Mobility의 MPV, BMW의 구동 시스템)에서 발견할 수 있는데, 이때 flywheel은 대개 1단의 감속 기어(BMW경우 2단)만 사용한 경우에 일시적으로 부족한 출력을 보충하기 위한 보조 동력장치(power boost)의 기능을 한다. 몇몇 연구 결과에 의하면 flywheel은 회생 제동에 의한 에너지 회수율을 높이는데 효과가 있고, 시내 주행시와 같이 단속 운전이 빈번한 경우에는 축전지와 전동기의 부하를 평균화할 수 있어서 주행거리를 상당히 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다. Unique Mobility사가 개발한 UNIQ electric flywheel이 사용된 2-moter/control-

표 4. JPL 교류 구동시스템의 설계 요소 분석

	Cont.PWR (kw)	Peak PWR (kw)	Weight (kg)	Volume (l)	Cost (\$)	Specific ¹ Cost(\$/kw)	Specific ¹ Wt.(kg/kw)	Eff. ² (%)
Inverter	30	60	18	20	1200 ^a	40	0.6	96.5
Motor	30	60	68	25	350 ^b	11.7	2.3	95
Reduction Gear	30	>60	7	6.3	120 ^b	4.0	0.23	95
System	30	60	93	-	-	56	3.1	87

¹Based on continuous power rating = 30kw.

²Under 15kw, 55mph conditions

^aComponent costs in lots of 100 ; 1984 prices

^bManufacturing cost in lots of 1000

ler방식의 구동 시스템을 시험 차량(MPV의 전선)에 적용한 결과를 보면, 회생 제동에 의한 에너지 회수율은 90%(중전 80%), 가속 성능은 0-48km/h에 5초(중전 9초), D-cycle의 주행 거리 132km(중전 118km), C-cycle의 주행 거리 250km(중전 155km) 등으로 상당한 효과가 있음을 알 수 있다. 이 실험에서, flywheel이 있는 경우에는 685kg의 Ni-Fe 축전지와 45.36kg의 flywheel이 사용되었고, flywheel이 없는 경우에는 730kg의 Ni-Fe 축전지만이 사용되었다. 이 결과에 의하면, flywheel의 사용은 주행 성능 향상을 위해 매우 효과적인 방법으로 생각되는데, 경량화 관점을 고려하면 좀 더 많은 검토가 있어야 하겠다.

앞에서도 언급된 바 있지만 2개 이상의 전동기를 사용한 구동 시스템은 전동기 제어만으로도 선회 주행을 정교하게 할 수 있어서 차동 기어를 꼭 필요로 하지는 않는다. 이러한 방식을 채택한 전기자동차에는 MPV(Unique Mobility), Impact(GM), FEV(Nissan) 등이 있고, 우수한 주행 성능을 기록하고 있다. 그러나 단기적으로 차동 기어 방식과 2-motor/controller 방식을 정밀하게 비교 분석을 해 볼 필요가 있고, 중장기적으로 보면 전자 분야의 기술이 급속히 발전하고 있으므로, 차동 장치의 사용은 줄어들 것으로 생각된다. 이상의 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 전동기의 구동 특성, transaxle의 중량 및 효율을 고려하여 1단의 감속기어를 사용하는

구동방식이 유망하게 생각되며, 혁신적인 전동기의 성능 향상이 있어야 transaxle을 배제시킨 wheel-in-motor 방식의 실용화가 가능할 것이다.

- Clutch는 전동기/제어기의 성능향상과 함께 사용되지 않을 것으로 전망된다.
- 현재는 차동 기어가 많이 사용되고 있으나 중장기적으로는 사용되지 않을 것이다.
- Flywheel의 사용은 시내 주행시, 주행 성능과 주행 거리의 제고에 도움을 주는 것으로 생각되며, 더 많은 연구 분석이 필요하다.

(다) 국산화 전기자동차에 적용 가능한 구동 시스템

EV-Cort(직류 타여자), Penda Eletta(직류 직권) 같이 직류 전동기에 가솔린 자동차 변속 장치를 그대로 사용한 전기자동차는 변속 장치가 무겁고 동력전달 효율이 매우 낮아서(대략 80% 정도), 동력 손실이 많다. 이런 경우에는 5단 기어에 후진 기어, 차동 기어, clutch 등을 모두 사용하게 된다. 그러나 전기자동차용으로 특별히 개발된 transaxle의 경우는 거의 1-2단이며, 기구 설계를 단순화시켜 고효율, 경량화를 달성하고 있다. 동력 전달 장치 설계는 자동차의 주행 성능을 원하는 수준으로 유지시키면서 동력전달 효율을 높이는데 있으므로, 차체의 중량, 공기 저항, 전동 저항 등과 같이 주행 성능에 직접적인 영향을 주는 차량 설계와 독립적으로 생각할 수 없다. 가령 1단

변속으로 개발된 차량이라도 ETV-I/II는 주행 성능이 나쁘지만, Impact나 FEV는 매우 우수한 특성을 보여주고 있다. 따라서 후자와 같은 첨단 신소재, 신기술을 사용한 원형 전기 차량은 1단의 감속 기어만으로도 충분한 주행성능을 얻을 수 있지만, ETX-I/II, DSEP, TE-van등과 같이 기존의 차량을 전기자동차용 구동 시스템으로 개조하는 경우에는 2단의 변속 기어를 사용하는 것이 좋다. 그러나 미래 지향적인 관점에서 보면 축전지, 전동기/제어기의 성능이 계속 향상되고 있으므로, 1단의 감속 기어에 2-motor/controller방식을 채택하여, clutch 및 차동 기어 등의 부수적인 기계 장치를 대폭 제거하는 것이 경량화 및 고효율화 면에서 유리할 것이다.

그리고 transaxle을 완전히 배제시킨 wheel-in motor방식은 동력전달 효율은 우수하지만 등판 성능, 가속 성능이 미흡하고 차량 진동 및 승차감 문제, 전동기의 냉각 문제 등 기술적인 문제의 해결에 상당한 시간이 소요될 것으로 사료된다. 또한 flywheel의 사용은 경량화 측면에서 바람직하지 못한 시스템 구성이지만, 1단 감속 기어를 사용한 구동 시스템의 보조 동력 장치로 시도해 볼 가치는 있는 것으로 보인다. 이상에서 살펴본 국산화 전기자동차에 적합한 구동 시스템을 요약하면 다음과 같다.

- 기존의 차량을 개조한 전기자동차는 차체 중량과 주행 저항이 크고, 동력전달 효율이 낮으므로 실용성 있는 등판 성능(30%) 및 가속 성능(8초 : 0-48km/h)을 얻기 위해서는 교류 전동기 시스템에 2단 정도의 변속기 및 차동 기어를 사용하는 것이 좋다.
- 초경량 차체, 획기적인 주행 저항 저감을 달성한 원형 전기자동차의 구동 시스템은 아래와 같은 몇가지 방식이 타당해 보이며, 좀 더 정밀한 시스템 분석 연구를 통해서 결정해야 할 것이다.
 - 교류 전동기 시스템, 1단의 감속 기어, 차동 장치 및 필요에 따라 flywheel로 구성된 시스템 (예, JPL)
 - BLDC, 1단의 감속 기어, 차동 기어로 구성된

시스템(예, Unique Mobility)

- 2개의 교류 전동기(또는 BLDC) 시스템 및 1단의 감속 기어로 구성된 시스템(예, FEV, Impact, Unique Mobility)

이렇게 원형 전기자동차 용으로 개발되는 구동 시스템은 30% 이상의 등판 성능, 5초(0-48km/h) 이하의 출발 가속 성능, 140-160km/h정도의 최고 속도를 달성할 수 있어야 할 것이다.

4. 결 언

최근의 전기자동차 개발 동향은 기존의 가솔린 자동차에 축전지와 특별히 제작된 구동 시스템을 탑재한 개조형 차량에서 차량 중량과 주행 저항을 최소화하면서 이에 적합한 구동 시스템을 개발, 적용한 원형 전기자동차(purpose-built EV)로 바뀌어 가고 있다. 이런 원형 전기자동차의 구동 시스템은 동력전달 장치를 최소화하여, 기계적 손실을 줄임과 동시에 경량화를 추구하는 방향으로 개발되고 있다. 이 경우, 대개 1단의 감속 기어만을 사용(1단 변속장치)하게 되는데, 이때 감속 기어는 전동기의 고회전, 저토크 특성을 보완하여 차량의 구동 특성에 적합하도록 해 주는 기능을 한다. 한편, 구동 시스템에 2단 이상의 기어를 사용(고단 변속 장치)하면, 전동기의 차량구동 특성은 향상시킬 수 있으나 클러치(clutch)를 비롯하여 부수되는 작동 장치가 많이 필요하게 되어 동력전달 장치가 복잡하고 무거워진다. 1단 변속 장치는 고단 변속 장치에 비하여 토크의 변화 폭이 작으므로 등판이나 가속 등 큰 구동력을 필요로 하는 주행시에는 성능이 저하되는 문제점이 있다. 그러나 이러한 문제점들은 경량화 및 주행 저항 저감 설계와 고성능의 축전지, 전동기/제어기 개발에 의하여 거의 해결 될 전망이다. 또한 1단 변속 장치는 2-motor/controller 방식에 의하여 차동 기어(differential gear)를 생략할 수 있으므로 설계의 다양성이 높고, 전기 전자 분야의 기술개발에 부응하여 실용화 가능성이 높은 방법으로 생각된다. 한편, 감속 기어를 사용하지 않고 전동기가 직접 차륜을 구동(wheel-in-motor)하는 방법도 연구되고 있는데, 이 방법은 저속에서 고효율,

고토크 특성을 가진 전동기의 개발과 아울러 전동기의 열상승 문제, 차량 진동 문제 등에 대한 기술적인 해결이 있어야 할 것으로 보인다. 그래서 단기적인 실용화보다는 중장기적인 측면의 연구가 바람직하다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. Electric Vehicles : A decade of Transition, PT-40, SAE, 1992
2. Electric Vehicle Technology, SP-817, SAE, 1990. 2
3. Electric Vehicle, R&D, SP-880, SAE, 1991. 9
4. Electric Vehicle, Design and Development, SP-862, 1991. 2
5. Recent Advances in Electric Vehicle Technology, SP-793, SAE, 1989. 8
6. 전기자동차 : 그 기술개발의 현황, (일) 자동차 기술회, Symposium 자료, 1992. 1. 31
7. 아메리카·유럽의 전기 자동차 사정, (일) 통상 산업성 기계 정보 산업국, 전기 자동차 협의회, 해외 조사 보고서, 1990. 2
8. 자동차 공학(종합이론), 중원사 자동차 연구회 편저, 1982
9. 전기자동차 적용에 관한 조사 연구, 한전기술 연구원 보고서, 1990. 12
10. 전기 자동차 개발, 한국자동차부품종합기술연구소, 연구 기획 보고서, 1992. 5
11. Electric Vehicles : Getting the Lead Out, Mechanical Engineering, 1991. 12
12. 전기 자동차의 현상과 장래 전망, Masato Fukino & Namio Irie, 일본 자동차 학회지, No.8, PP 35-41, 1991
13. The Electronics Industry : One Perspective, automotive Engineering, 1992. 3