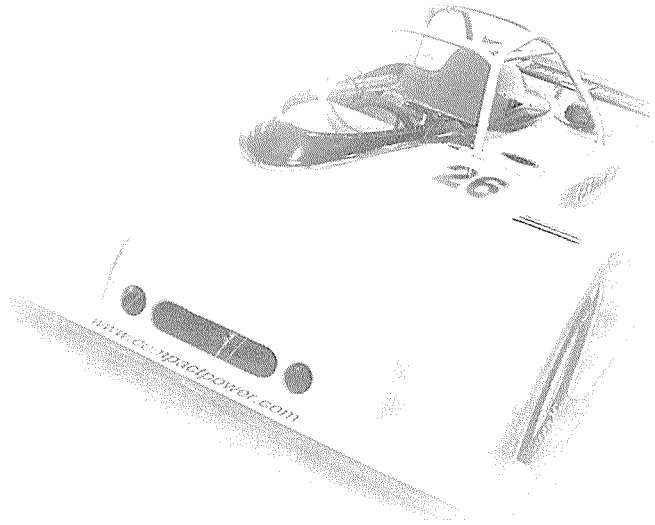
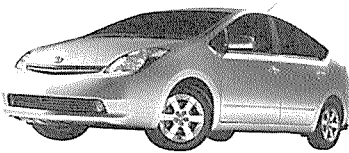


SPECIAL-2

논단
& 특집

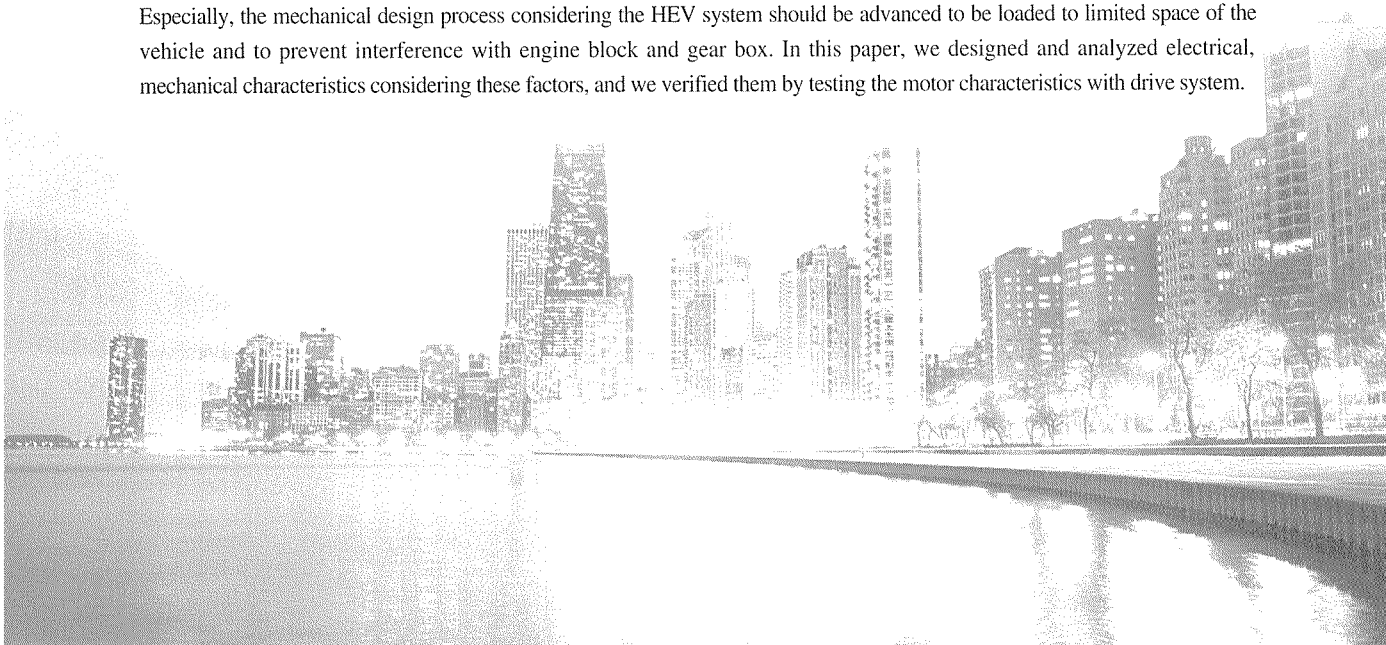


하이브리드 전기자동차의 시장동향과 영구자석 전동기 고유모델 개발

Market trend of hybrid electric vehicle and development of
permanent magnet synchronous motor

현대중공업(주) 기계전기연구소 이갑재 책임연구원

Abstract - To apply the permanent magnet synchronous motor to Hybrid Electric Vehicle, it must have the characteristics such as high torque capacity in low speed range, high efficiency capacity, high speed ability and light weight and low noise capability. Especially, the mechanical design process considering the HEV system should be advanced to be loaded to limited space of the vehicle and to prevent interference with engine block and gear box. In this paper, we designed and analyzed electrical, mechanical characteristics considering these factors, and we verified them by testing the motor characteristics with drive system.





1. 서론

석유는 세계의 산업을 비롯한 자동차의 에너지원이지만, 지구환경오염의 주요 원인이고 매장량이 고갈될 위기에 직면함에 따라 대체에너지 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 자동차 회사들은 지난 10년간 대체에너지를 이용한 환경차량 개발을 위하여 많은 연구를 수행하여 왔다. 미래형 환경차량의 에너지원은 다양하지만 상용화를 이루기에는 아직도 많은 연구가 필요한 단계이다. 지금까지 연구의 관심을 모았던 환경차량으로는 배터리를 전원으로 이용하는 전기자동차(Battery Electric Vehicle; 이하 BEV), 연료전지를 에너지원으로 사용하는 전기자동차(Fuel Cell Electric Vehicle; 이하 FCEV) 및 가솔린과 배터리를 같이 사용하는 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle; 이하 HEV)가 있다. EV는 완전 무공해를 실현할 수 있으나, 1충전 주행거리가 짧고 충전시간이 길게 소요되므로 고성능 배터리 기술의 실용화라는 과제를 떠안고 있다. 그러므로 최근에는 연료전지와 FCEV에 대한 관심과 더불어 엔진과 전기모터를 구동원으로 하는 HEV 개발에 대한 연구가 많이 수행되고 있다[1]. 따라서 하이브리드 전기자동차(Hybrid Electric Vehicle; HEV)의 필요성은 자동차 제작사에서 오랜 기간동안 개발 추진하여온 무공해차량(Zero Emission Vehicle; ZEV) 개발의 기술적 한계성으로 인하여 보다 현실적으로 실현 가능한 저공해 자동차(Low Emission Vehicle; LEV)를 우선 상용화함으로써 심각해지고 있는 지구 대기환경을 보존하고자 하는 것이다.

그리고 자동차 왕국인 미국이 캘리포니아주를 중심으로 10%의 무공해 자동차 혹은 이와 동등한 효과가 기대되는 저공해 차량의 판매를 의무적으로 규정하고 있는 대기보전법(Clean Air Act)의 영향에 따라 HEV 개발에 대한 연구가 많이 수행되고 있다. 세계의 자동차 제작사들은 환경성은 물론 경제성을 만족시키기 위한 조건으로 3리터에 100km를 주행할 수 있는 자동차 개발을 목표로 하고 있으며, 특히 일본의 도요타사와 혼다사는 수년전부터 HEV를 판매하기 시작하여 현재는 세계적으로 유일하게 양산단계에 접어들고 있는 자동차 메이커로 자리매김을 하고 있다. 이러한 세계적 흐름에 대응하기 위하여 국내에서도 자동차

회사를 중심으로 하여 HEV를 개발하기 위한 차량 및 부품에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 당시에서는 1990년부터 축적한 전기자동차 구동용 전동기와 영구자석형 동기 전동기 설계기술을 이용하여 하이브리드 전기자동차에 최적의 전동기를 개발한 바, 이에 본고에 당사에서 개발한 HEV 구동용 영구자석전동기 개발내용을 소개하고자 한다.

2. 하이브리드 전기자동차 시장규모 및 기술동향

2.1 시장규모

2.1.1 전기자동차 세계시장 규모 예측

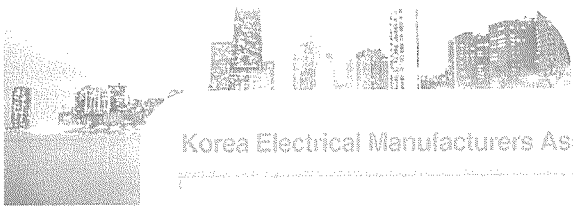
Environment Business Journal과 SRI Consulting 자료에 의하면 1999년도의 세계 자동차 시장은 약 1조 370억불정도로 산출하고 있다. 따라서 이것의 약 10%정도를 저공해 및 전기자동차로 대체한다는 가정 하에 1037억불(약 125조)의 시장을 예측할 수 있으며 전기자동차의 구동장치용 전장품의 구성비 전체 자동차 재료비에 10%정도 산정하게 되면 약 13조원 정도로 추산할 수 있다.

2.1.2 하이브리드 전기자동차 미국시장 규모

2000년도에 미국에 판매된 자동차 대수를 기준으로 예상한 HEV 판매수량은 다음의 표 1과 같다. 표 1에 나타낸 바와 같이 저공해차량 10% 의무기준을 적용하면 미국의 HEV는 연간 약 175만대에 이를 것으로 추정된다. 미국 내에서 현대/기아자동차가 판매하는 시장점유율은 약 3%인 50만대 수준이며, 이중에서 10%인 5만대를 HEV로 수출할 수 있을 것으로 예상된다.

표 1. 미국의 자동차 시장규모(2000년)와 HEV 시장규모 예측
Table 1 Market volume of automobile and prediction of HEV market in America(2000)

구분	미국 HEV 시장규모 (저공해차량 10% 의무기준 적용)	
	자동차 판매대수	HEV 예상 판매수량(10%)
미국시장	1750만대	175만대



2.1.3 국내업계의 하이브리드 전기자동차 생산규모 예측
 2002년과 2003년도 현대자동차의 생산대수를 기준으로 산출한 하이브리드 전기자동차의 예상 생산규모는 표 2와 같다. 표 2에서 2010년도의 현대자동차의 하이브리드 전기자동차의 생산대수가 60만대로 추산되며, 소요되는 전장품으로는 구동모터, 드라이브, BMS(Battery Management System) 등이다. 그리고 4륜 구동인 경우에는 전동기 및 드라이브가 2대가 장착되고, 하이브리드 자동차 기술의 성공은 10% 제한조건에 머무르지 않고 급격한 팽창이 될 것으로 예상되므로 전장품 규모는 더 증가할 것으로 사료된다.

표 2 현대자동차의 하이브리드 전기자동차 예상 생산규모
 Table 2 Prediction of HEV production scale in yundai Motor Company

구분	자동차생산대수 (10%신장)	HEV 예상 판매대수 (예상비율)
2002년	2,751,000	시제품단계
2003년	3,125,000	초도시험단계
2004년	3,437,500	내구시험단계
2005년	3,781,250	500
2006년	4,159,375	5,000
2007년	4,575,313	137,259 (3%)
2008년	5,032,844	251,642 (5%)
2009년	5,536,128	276,806 (5%)
2010년	6,089,741	608,974 (10%)

2.1.4 중국 자동차 시장의 급성장
 2001년 중국의 자동차 판매수량은 2백30만대이고, 2002년에는 2백60만대가 판매되어 연간 10% 이상의 성장률을 기록하여 세계의 자동차 업체들이 중국시장에 많은 관심을 가지고 있다. 이중에서 저공해 차량의 비율을 10% 기준으로 산정하면 전동기 시장은 약 26만대 규모이다. 그리고 중국 자동차시장의 급격한 신장과 더불어 환경차량 개발에

대한 연구와 기대가 집중되고 있어 향후 시장전망을 더욱 밝게 해준다.

2.2 국내외 기술동향

2.2.1 해외 업계동향

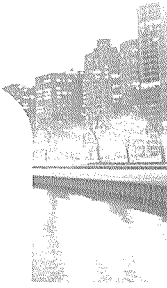
(1) 미국

미국의 Ford사는 매년 4000대의 전기자동차 생산계획을 가지고 시작하였으나 성능 및 고객의 한정으로 인한 수익성 악화로 'THINK' 전기자동차사업부 폐쇄를 하였다. 그러나 연료전지를 이용하는 전기자동차가 당분간 저공해 차량으로써 미래형 차량으로 상용화가 가능하다고 판단하여 혼합연료차(FCHEV) 개발에 주력하고 있다. 하이브리드 전기자동차 기술은 일본이 앞서감에 따라 Nissan 등 일본 업계와의 기술협력관계를 유지하고 있는 것으로 파악되며, 최근 일본 Toyota 자동차와 전략적 제휴관계를 맺고 상품화를 추진할 것으로 발표된 바 있다.

(2) 일본

전략적으로 일본의 전기자동차는 구동용 모터로써 영구자석형 전동기를 많이 채용해 왔으며 이는 Toyota사의 Prius 하이브리드 전기자동차의 상용화가 성공됨에 따라 여기에 적용된 영구자석형 전동기의 기술이 더욱 주목을 받는 계기가 되었다. Toyota사의 Prius와 Honda사의 Insight는 하이브리드 자동차로써 지난 수년간 소량 판매단계를 거쳤으며, 2003년 양산모델을 출시하면서 월 1만대 이상이 판매되는 등 일본과 미국에서 선풍적인 인기를 끌고 있다.

그림 1은 전기자동차용 전동기에 대하여 일본 동경 모터쇼에 출품된 수량을 종류별로 구분하여 나타내고 있다. 그림 1에서 1990년대 초에는 전기자동차 분야에 응용되는 전동기로서 유도전동기와 영구자석 전동기가 비슷한 비율의 대수가 이용되었으나, 1990년대 후반 들어 HEV 개발이 본격화된 이후에는 영구자석 전동기가 주류를 이루고 있음을 알 수 있다. 일본 동경 모터쇼에서 2000년도 이후에 출품된 EV와 HEV 구동용 전동기로 영구자석 전동기만이 전시



될 만큼 영구자석 전동기의 중요성은 증대되고 있다[2]. 그리고 그림 2는 Toyota社 HEV 자동차에 적용된 전동기의 변화를 보여주고 있다. 물론 영구자석 전동기가 적용되고 있으며, 회전자 형태가 표면부착 자석형에서 영구자석 매입형으로 변화시켜 전동기의 출력밀도를 향상시키고 있음을 알 수 있다.

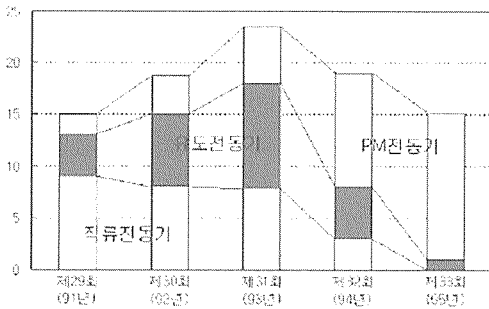


그림 1 일본의 전기자동차용 전동기 개발 추이
Fig. 1 Development tendency of motor for EV in Japan

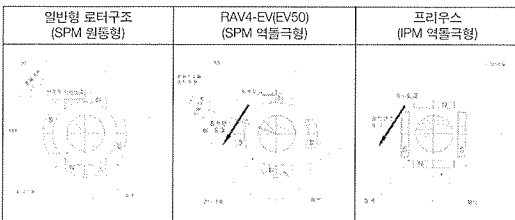


그림 2 도요타 자동차의 영구자석 전동기 적용 현황
Fig. 2 Present state of permanent magnet motor in Toyota

2.2.2 국내동향

현대자동차는 EV 및 FCEV로 신타페에 적용하여 하와이 주 정부 및 캘리포니아에서 20대 이상 Field Test를 진행하여 양호한 결과를 얻고 있다. 여기에는 당사에서 개발한 60, 65kW 수냉식 유도전동기가 적용되었다. 또한 영구자석 전동기와 엔진으로 구동되는 하이브리드 전기자동차를 2005년 목표로 개발하고 있다. 국내의 소형 업체들은 도심주행용이나 골프카용으로 전기자동차를 개발하고 있으며, 대표적인 업체로는 한성 에코넷, ATT R&D와 코브코 등이 있다.

3. HEV용 전동기의 분류 및 특성 비교

3.1 전동기의 분류

EV와 HEV 구동용으로 사용이 가능하거나 사용되었던 전동기는 표 3과 같이 분류된다[3]. HEV용 전동기가 다른 용도에 비교하여 고려되어야 할 사항으로는 효율, 출력밀도, 소형화, 가격, 제어성, 환경성(내열, 내진동) 및 보수성 등이 있다.

표 3 전기자동차용 전동기의 분류
Table 3 Classification of motor for electric vehicle

Structure	Motor type	Classification
Brush type	Direct current motor	Separately excited, shunt, Series, Compound, PM type
	Induction motor	Squirrel cage motor
Brushless type	PM motor	Brushless DC motor PM synchronous motor
	Reluctance motor	Switched reluctance motor, Synchronous reluctance motor

3.2 전동기에 따른 특성

직류전동기는 기동토크가 크고 구동장치가 간단해서 전기자동차용 뿐만 아니라 운송용으로 이미 채용되어 왔다. 그러나 브러시, 정류자로 인하여 유지보수 및 고속회전의 부적합성 때문에 교류기로 대체되고 있는 실정이다. 현재는 소용량, 저속 이용 장치(전동 휠체어) 등에 영구자석 구조의 직류 전동기가 이용될 뿐이다. 중용량에는 타여자식, 분권 및 직권전동기가 이용되어 전기배송차 등의 실용 예가 있다.

유도기는 구조가 간단하고 가격이 싸고, 보수 측면도 용이하여 산업계에서 널리 응용되고 있는 전동기이다. 유도전동기는 슬립, 극수 및 주파수에 의하여 속도를 변화시킬 수 있다. 그러나 슬립을 크게 하면 효율이 저하되고, 극수의 변화는 특수한 권선을 필요로 하므로 인버터를 이용하여 주파수를 변화시킴에 따라 속도제어를 하는 방식이 가장



널리 사용된다. 전기자동차에는 일반적으로 넓은 범위의 속도 제어가 필요하고, 기저속도까지는 정토크 제어, 그 이상에서는 정출력 제어가 수행된다. 그러나 영구자석 전동기와 같이 회전자에 동손이 발생되지 않는 전동기에 비해서 효율 측면에서 불리하다. 전기자동차에서는 구조가 간단하고 보수가 불필요한 농형 유도전동기가 주로 사용되고 있으며, 소형?경량화를 위하여 수냉식 냉각방식이 도입되고 있다. 또한 경부하로 운전되는 경우가 많으므로 동손에 대하여 철손의 비율이 적은 설계로서, 경부하시의 효율을 향상시키는 방법이 수행되고 있다.

영구자석형 전동기는 구동전원 방식에 의하여 BLDC 전동기와 PMSM으로 분류되며, 또한 영구자석의 형상과 배치에 따라서 다양하게 분류된다. 영구자석형 전동기는 회전자에 자석을 사용하여 여자회로로 이용하며, 회전자 손실이 무시될 만큼 적기 때문에 유도전동기와 비교하여 효율이 높은 특징을 가진다. 그리고 고성능 영구자석이 채용될수록 출력밀도와 회전자의 이너저가 작아지기 때문에 다른 전동기에 비하여 소형화 측면에서 유리하다. 전기자동차용 전동기는 광범위한 속도제어가 요구되므로 보통 기저속도의 약 3~4배 속도까지 정출력으로 운전시킬 수 있어야 한다. 그러나, 영구자석형 전동기는 회전수가 고속이 되면, 역기전력이 인버터 출력전압에 근접하게 되어 전류제어를 하지 못하는 경우가 발생하므로 전기자전류에 의한 반작용 기저력을 이용하여 약계자 제어를 수행해야 한다.

릴렉턴스 전동기는 회전자가 회전하는 것에 의해 자기저항이 변화하는 것을 이용하여 토크를 발생하는 전동기를 지칭하며, 따라서 회전자는 돌극구조로 구성된다. 그리고 구동전원에 따라 스위치드 릴렉스 전동기와 싱크로너스 릴렉턴스 전동기로 구분된다. 스위치드 릴렉턴스 전동기는 1상 여자방식을 사용하며, 싱크로너스 릴렉턴스 전동기는 고정자 철심과 권선은 유도전동기와 거의 같은 3상권선이 감겨져 있다. 스위치드 릴렉턴스 모터는 회전자 구조가 간단하여 기계적으로 강건하고 제작도 용이하다. 따라서 대폭 제작비를 줄일 수 있다. 그러나, 회전자 고정자가 돌극 구조이므로 진동 및 소음이 크다는 단점이 있다. 또한 전류가 한 상만 통전되는 방식으로 제어되므로 인버터의 회로

형식이 유도기등과는 다르다. 그리고 유도기의 경우처럼 등가회로가 존재하지 않고, 싱크로너스 릴렉턴스 모터처럼 돌극비 및 벡터도도 없다. 이 때문에 제어측은 불명확점이 많아 필연적으로 복잡하고, 전동기 각각의 구조에 크게 의존하는 경향이 많아서 제어 기법은 know-how로 축적되고 있는 경우가 많다. 한편, 싱크로너스 릴렉턴스 모터는 스위치드 릴렉턴스 모터와는 달리 토크리플도 적고 수학적 모델도 해결되고 있으며, 전동기 정수가 도출된다면 제어기의 설계도 용이하게 된다. 또한 인버터 회로도 통상의 유도전동기와 같은 회로로 해결된다. 그러나, 전기자동차에 응용하기 위해서는 역률을 높이기 위해 돌극비를 높일 필요가 있다. 이 때문에 회전자 구조를 연구하는 것이 불가분의 관계에 있어 구조가 복잡하게 될 우려가 있다. 회전자 구조가 복잡하게 되면, 회전자의 생산방법도 연구되어야 하며, 전동기의 가격이 증가하게 된다.

3.3 HEV 적용을 위한 전동기의 장단점 비교

HEV용 전동기를 선정하기 위해 전술한 전동기의 특성을 기준으로 하여 구조, 효율, 출력밀도, 소형화, 가격, 제어성, 환경성(내열, 내진동) 보수성 및 센서의 필요성 측면에서 비교한 결과를 표 4에 나타내었다.

표 4 전동기의 장단점 비교

Table 4 Comparison of characteristics of motor

Items	DC motor	Induction motor	PM motor	Rel. motor
Structure	complex	simple	normal	simple
Efficiency	normal	normal	high	high
Power density	low	normal	high	high
Size	large	medium	small	small
Cost	expensive	inexpensive	expensive	inexpensive
Control	easy	normal	normal	difficulty
Durability	normal	durable	normal	durable
Environment	normal	durable	normal	durable
Maintenance	necessary	unnecessary	unnecessary	unnecessary
Sensor	unnecessary	necessary	necessary	necessary



이와 같은 특성비교를 통하여 유도전동기와 영구자석 전동기의 특성이 우수함을 확인할 수 있었으며, 따라서 현재 전기자동차 응용으로 유도기와 영구자석 전동기가 주로 사용되는 이유이기도 하다. 그러므로 이 두 전동기에 대한 특징을 토대로 자동차에 응용하기 위한 특성을 살펴볼 필요가 있다. 영구자석 전동기는 회전자에 자석이 존재하므로 유도전동기 비하여 약계자 운전, 코깅토크, 저가격 및 내열성 측면에서 불리하다. 그러나 이너셔가 작고 출력밀도가 높아서 소형화가 가능하므로 장착공간을 줄일 수 있고, 효율 특성이 아주 우수하여 인버터 용량을 작게 할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 표 5에 제시한 바와 같이 두 전동기는 전기자동차에 응용되는 분야를 다소 다르게 적용할 수 있음을 알 수 있다. 표 5의 비교결과에서 알 수 있듯이 HEV에서는 엔진과 전동기가 함께 사용되어 좁은 장착공간이 요구되고 있고, 연비를 향상시키기 위하여 고효율 특성을 가진 전동기가 필요하기 때문에 HEV 구동용 전동기로서는 영구자석 전동기가 가장 적합한 것으로 사료된다.

표 5 유도기와 영구자석 기기 비교 및 응용분야
Table 5 Comparison and application of IM and PM motor

Items	nduction Motor	PM motor
Strong point	1. mechanical structure 2. efficiency at high speed 3. Low cost	1. efficiency at low speed 2. size and power density 3. Regeneration
Weak point	1. efficiency at low speed, load 2. controllability at low speed 3. Regeneration	1. temperature 2. field weakening 3. magnet pole position sensing
Application	1. high speed application 2. wide space 3. EV and HEV for large car	1. medium speed application 2. narrow space 3. EV and HEV for small car

3.4 HEV 적용을 위한 영구자석 전동기의 특징

하이브리드 전기자동차에 응용이 가능한 영구자석 전동기의 회전자 형태를 그림 3에 나타내었다. 하이브리드 전기자동차용 전동기의 형태를 선정하기 위해 고려할 사항으

로는 기계적 안정성의 의한 신뢰성 확보가 가장 중요한 문제이며, 다음으로 전동기의 성능 지표인 출력밀도, 효율 등을 고려해야 한다[4][5]. 그림 3에서 (a)의 표면자석형은 성능이 우수하여 제어용 전동기로 가장 널리 사용되지만, 회전자 표면에 부착되어 있는 영구자석의 이탈을 방지하기 위하여 화이버 글라스 등으로 자석표면을 감싸주어야 하는 구조적인 불리함을 가지고 있으므로 공극이 커지는 단점을 가지고 있다. 또한 자석의 투자율은 거의 공기와 같으므로 전기적인 공극이 증가하므로 인덕턴스도 작아져서 약계자 제어측면에서도 불리하다. 그림 3 (b)의 IPMSM은 출력밀도 및 기계적 안정성이 우수하여 고속응用に 유리하여 특히 EV나 HEV용으로 적합하다. 그러나 제어가 다소 까다롭고 고조파의 영향이 크게 나타난다. 그림 3 (c)의 IPMSM은 가장 출력밀도가 높지만 회전자 구조상 고속운전측면이 불리하다. 그림 3 (d) Outer Rotor 형태는 출력밀도가 높고 자석의 비산대책 측면에서 유리하지만, 이너셔가 높고 구조적 안정성이 필요하다.

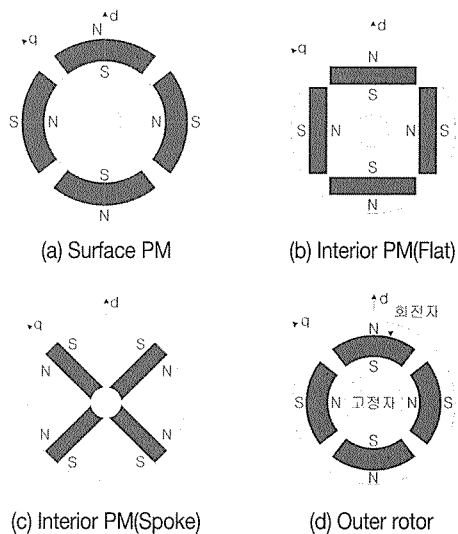


그림 3 영구자석 동기 전동기의 회전자 영구자석구조

Fig. 3 PM configuration of permanent magnet synchronous motor

4. 전동기 개발사양 및 개발품

4.1 전동기 개발 사양

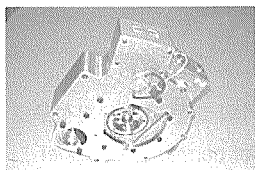
당사에서 개발사양으로 선정한 전동기는 4륜 구동용 SUV와 승용차급의 HEV 적용을 목표로 하고 있다. 4륜 구동용 SUV의 전륜 구동용 전동기는 12kW(모델 JMF-M1)와 후륜 구동용 20kW(JMR-M2)로 구분되며, 승용차급 HEV 구동용 전동기는 12kW(모델 TBF-B)이다. JMF-M1와 JMF-M2는 엔진과 감속기 사이에 장착되어 엔진의 토크를 보조하는 역할을 수행하며, 20kW는 후륜부에 장착되어 전동기 단독으로 차량에 동력을 제공한다. 개발사양은 표 6과 같다.

표 6 HEV용 전동기 개발 사양
Table 6 Motor specification of HEV

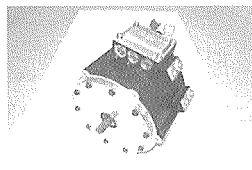
Items	Unit	JMF-M1	JMR-M2	TBF-B	Remarks	
Max	Power	kW	12	20	12	60[sec]
	Torque	Nm	76.4	76	76.4	60[sec]
	Speed	rpm	6,000	8000	6,000	
Magnet		Nd-Fe-B	Nd-Fe-B	Nd-Fe-B		
Insulation class		H Class	H Class	H Class		

4.2 전동기 제작사진

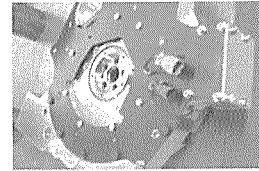
본 연구를 통하여 개발된 시제품은 그림 4에 나타내었다. 전동기를 제작하는데 있어서 고려한 점으로써는 차량 장착 공간의 온도조건을 고려하여 H중 절연으로 규정하였으며, 고 출력화를 위하여 최적의 권선설계와 영구자석의 형상 설계를 수행하였고, 환경조건과 내구성을 고려하여 가변 릴럭턴스방식의 레졸버를 채용하였다.



(a) JMF-M1



(b) JMF-M2



(c) TBF-B

그림 4 HEV용 영구자석 동기전동기 개발품
Fig. 4 Picture of permanent magnet motor for HEV

5. 전동기 특성시험 결과 및 분석

5.1 전동기 특성시험

5.1.1 시험장치 구성

전동기 시험결과는 당사 개발모델중 TBF-B 모델을 대상으로 나타내기로 한다. 그림 5는 본 연구에서 실험을 위해 사용된 HEV용 IPMSM 구동시스템의 구성도이다. IPMSM에 부하를 인가하기 위한 장치로는 인버터로 구동되는 유도전동기가 사용되었으며, 발생토크와 속도를 검출하는 Torque Transducer의 검출범위는 최대 토크 500[Nm], 최대 속도 12,000[RPM]까지 가능하며, 측정 정밀도는 0.1%이다. 신호 전송방식은 계측된 신호가 10kHz의 고주파로 변환되어 전송하므로 노이즈에 대한 영향이 매우 적고, 앰프의 분해능이 20bit이므로 아주 정밀한 계측이 가능하다. 그림 6은 HEV용 IPMSM과 토크 트랜스듀서, 부하용 전동기를 장착한 부하시험장치의 사진이다.

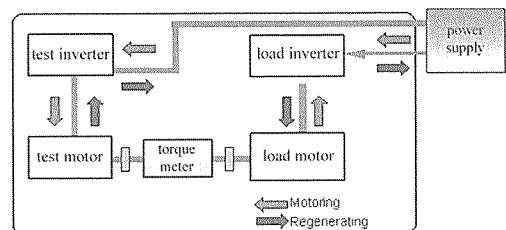


그림 5 실험장치 구성도

Fig. 5 Diagram of the experimental equipment

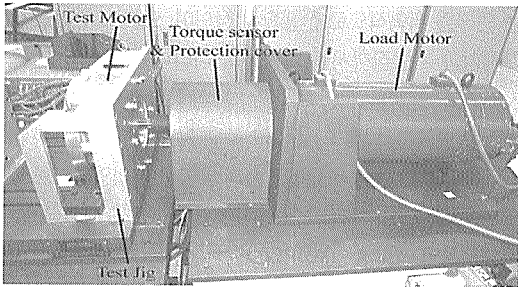


그림 6 부하시험기

Fig. 6 Experimental equipment for the load test

5.1.2 시험결과 및 분석

PMSM 전동기의 특성을 결정하는 파라미터로는 권선저항, 인덕턴스, 역기전력, 코깅토크 등이 있으며, 그밖에도 전동기의 내전압 특성, 절연저항 등이 기준치를 만족하여야 한다. 이러한 특성치중에서도 전동기 특성과 제어특성에 가장 중요한 요소인 역기전력 파형과, 저속의 제어특성에 영향을 줄 수 있는 코깅토크의 측정결과만을 해석치와 비교하였다. 또한 드라이브 및 엔진과의 조합시험결과에 비교분석을 하였다.

(1) 역기전력 파형

그림 7은 전동기를 정격속도 1500rpm으로 운전시킬 때의 역기전력의 측정파형을 나타내고 있다. 시험결과 역기전력 파형은 계산결과와 파형과 거의 동일한 결과를 나타내고 있으며, 실험결과의 최대치는 30.6V로써 계산결과는 다소 작게 나타났다. 영구자석의 잔류자속밀도 특성의 편차와 전동기 운전시 온도조건을 고려한다면 계산치와 실측치의 이와 같은 차이는 적절한 오차범위로 사료되며, 따라서 토크나 전류특성이 계산결과와 잘 일치할 것으로 예상된다.

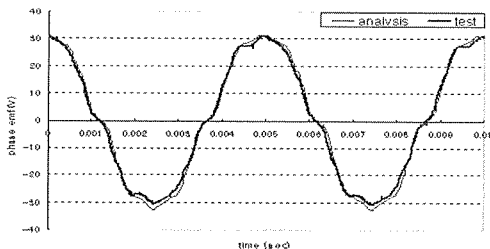


Fig. 7 Experimental waveform of back-EMF(at 1,500rpm)

(2) 코깅토크

그림 8은 회전자를 저속으로 회전시킬 때 토크센서에 계측된 코깅토크 파형이며, 해석결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 전동기의 용량분야에 따라 영구자석형 전동기는 코깅토크가 설계 제약조건이 될 만큼 중요하지만 자동차 구동용 전동기는 그렇게 엄격히 규제할 필요는 없다. 그러나 HEV용 전동기에서도 코깅토크가 지나치게 높으면 차량의 기동을 어렵게 하고 토크리플을 발생시키며, 소음과 진동의 원인이 될 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 정격토크의 5% 이하로 설계하는 것을 기준으로 삼았으며, 시험결과 최대값이 0.7Nm로 설계기준을 만족하는 것으로 나타났다.

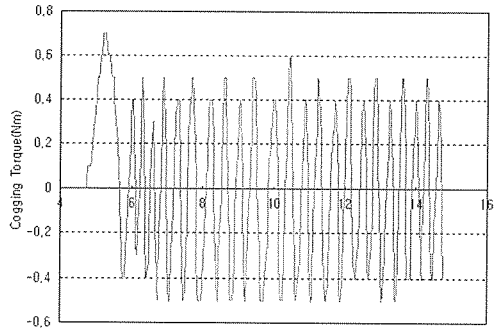


그림 8 코깅토크 측정 파형

Fig. 8 Experimental waveform of cogging torque

(3) 운전영역 시험(속도-토크특성)

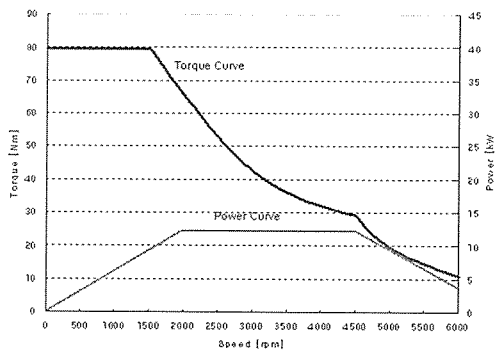


그림 9 특성곡선 설계 기준치

Fig 9. Design value of characteristics curve

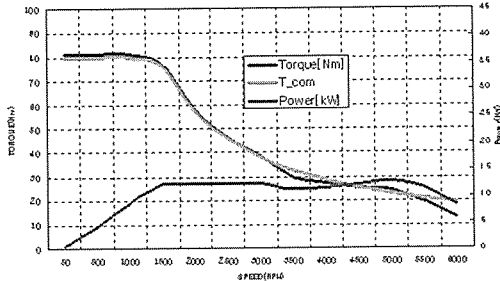


Figure 10 속도-토크특성 측정결과(Motoring)
Fig 10. Measured value of characteristics curve

설계된 전동기는 그림 9와 같이 1500rpm까지는 정토크 특성, 1,500-4,500rpm에서 12kW의 정출력 특성을 가지며, 최대 운전속도 6,000rpm에서도 토크를 발생할 수 있도록 설계되었다. 제작된 전동기와 드라이브에 의하여 설계특성이 구현되는가를 측정하였다. 시험결과 그림 10에서와 같이 정토크 영역의 특성을 만족시키는 것을 확인하였으며, 드라이브의 제어특성을 향상시켜서 5,500rpm까지 정출력 영역을 확장시켰다.

6. 결 론

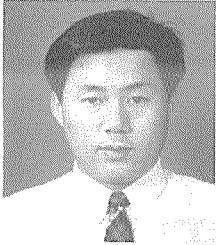
대체에너지원의 개발과 환경문제로 인하여 하이브리드 전기자동차에 대한 세계적인 기술개발 현황과 흐름으로 볼 때 전동기 국산화 개발은 필수적인 것으로 판단된다. 따라서 본 고에서는 하이브리드 전기자동차 기술동향에 대해 살펴보았으며, 독자설계 및 제작기술에 의하여 개발된 영구자석형 동기전동기 개발현황을 소개하였다. 또한 최대출력 12kW 영구자석 동기전동기에 대한 특성시험결과를 토대로 하이브리드 전기자동차 구동용으로 적용이 가능함을 제시하였다. 그리고 본 연구를 통하여 HEV용 영구자석 동기 전동기 독자설계 모델과 설계프로그램의 확보, 분할코어방식 고정자의 설계 및 제작기술, 고 점적률 권선설계 기술, 영구자석의 형상설계 기술 등을 확립할 수 있었다. 향후에는 전동기의 성능 및 출력밀도를 더 향상시킬 수 있

는 연구를 지속적으로 진행할 예정이며, 또한 드라이브 결합시험과 차량장착시험을 통하여 나타나는 문제점 분석, 시스템과 연계된 전동기 설계, 제작특성 등을 고려하여 HEV용 영구자석 동기 전동기의 설계기술을 완성하고자 한다. 따라서 본 연구 개발품은 현재 유망한 사업영역으로 떠오르고 있는 하이브리드 전기자동차 시장에 대비한 국산 부품으로서의 역할이 가능하리라 예상된다.

[참 고 문 헌]

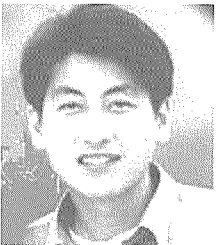
- [1] M.Velicescu, R.Zoller, "Electric Drives for automotive applications based on sintered Nd-Fe-B Magnets" in Proc. of 29th ISATA Florence, 1996
- [2] 久保, "トヨタの EV/HEV モータの開発経緯と自動車への適用," トヨタ自動車(株) Techno Frontier Symposium 2003
- [3] P. Pillay, R. Krishnan, "Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless dc motors for servo drives," IEEE, pp. 380-390, 1987
- [4] Yoji Takeda, Shigeo Morimoto, "Comparison of Control Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motors with Several Rotor Configurations", in T. IEE Japan, Vol. 114-D, No. 6, 1994
- [5] J. Cros, P. Viarouge, "Synthesis of High Performance PM Motors with Concentrated Windings", in IEEE 1999.





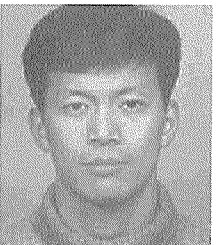
이 갑재(李甲在)

- 1965년 2월 17일 생
- 1988년 한양대 전기공학과 졸업
- 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
- 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사)
- 1990~ 현재 현대중공업 기계전기연구소 전력기기연구실 책임연구원
- Tel. (031) 289-5184
- Fax. (031) 289-5050
- E-mail, kjlee@hhi.co.kr



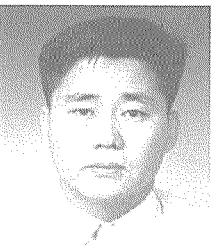
김기찬(金起贊)

- 1996년 한양대 전기공학과 졸업
- 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
- 1998~ 현재 현대중공업 기계전기연구소 전력기기연구실 선임연구원
- Tel. (031) 289-5186
- Fax. (031) 289-5050
- E-mail, kckim92@hhi.co.kr



이종인(李鍾仁)

- 1967년 11월 28일 생
- 1990년 홍익대학 기계과 졸업
- 1992~ 현재 현대중공업 기계전기연구소 전력기기연구실 연구원1급
- Tel. (031) 289-5187
- Fax. (031) 289-5050
- E-mail, ljimisun@hhi.co.kr



김근웅(金斤雄)

- 1965년 4월 25일 생
- 1988년 한양대 전기공학과 졸업
- 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
- 2000~ 현재 현대중공업 기계전기연구소 전력기기연구실 책임연구원
- Tel. (031) 289-5183
- Fax. (031) 289-5050
- E-mail, kkw@hhi.co.kr



권중록(權重緣)

- 1960년 8월 18일 생
- 1985년 영남대 기계공학과 졸업
- 1995년 경희대 대학원 기계공학과 졸업(석사)
- 1985년~ 현재 현대중공업 기계전기연구소 전력기기연구실장
- Tel. (031) 289-5180
- Fax. (031) 289-5050
- E-mail, jlk0818@hhi.co.kr