

Optimal Performance Characteristic of Axial Flux Motor by Controlling Air Gap

吳 星 哲\*  
(Sung Chul Oh)

**Abstract** - Since axial flux motor has an advantage over more conventional radial flux type motor such as high power density, it can be used as a power train for hybrid electric vehicle and electric vehicle. Also operating range can be extended and efficiency can be improved by changing air gap. Optimal operating air gap is estimated based on the measured efficiency at different air gap. Motor model is developed based on estimated optimal air gap and efficiency. Motor/controller performance is analyzed through simulation. Possible application area of axial flux motor was explored through simulation.

**Key Words** : Axial flux motor, Hybrid power train, Variable gap motor, Vehicle simulator

1. 서 론

두 개의 디스크가 마주보는 형태로 되어있는 axial flux 전동기는 기존의 radial flux 전동기에 비하여 다음과 같은 이점을 가지고 있다. 첫째, radial flux 전동기의 경우에는 회전자의 많은 부분이 토크 발생에 영향을 주지 않으므로 axial flux 전동기의 전력밀도가 높다. 둘째, 공극의 기계적인 제어가 가능하므로 기계적인 약계자 운전이 가능하다. 또한, 효율 측면에서도 공극을 조정함으로써 동손이 증가하지만 자속 밀도가 감소함으로써 철손을 줄이는 효과를 얻을 수 있다. 일반적인 전동기의 경우에 공극의 선정은 전동기의 출력과 역기전력에 직접 관련된 중요한 설계 변수이다. 기존의 radial flux 전동기는 공극이 특정 운전점에서 최적화되어 있다. 그러므로, 다른 동작점에서 효율은 최적화 되어 있지 않다. 그러나, axial flux 전동기는 회전자와 고정자의 공극을 조정함으로써 특정 운전점에서 전동기 성능과 효율을 최적화 할 수 있는 특징이 있다. 그림1에는 전동기의 구조를 간략하게 나타내고 있다.

현재까지 axial flux 전동기는 높은 토크 저속 영역에서 주로 사용되고 있으면 태양전지 자동차의 구동 장치로 많이 사용되고 있다.[1] 또한, IAS(Integrated Alternator Starter)에 응용하기 위한 연구가 진행되고 있다.[2]

본 논문은 하이브리드/전기자동차 차량 시스템 개발자의 관점에서 새로운 방식의 전동기/제어기를 차량에 장착했을 경우의 특성을 상대적으로 기계시스템에 비하여 전기 시스템의 시정수가 작으므로 efficiency map을 이용한 시뮬레이션으로 확인하는 절차를 제시하였다. 즉 새로운 엔진이나 전지의 특성도 efficiency map을 이용하여 시뮬레이션에 적용 할 수 있다. 또한 기존 방식의 차량 시뮬레이터에 쓰이는 전동기 모델은 전동기의 1상한 특성만 측정하고 4상한 특성을 1상한과 대칭으로 가정하여 취급하는데 본 논문에서는 4상한 특성을 직접 측정한 결과를 사용하였으며 대상 전동기의 4상한 특성은 1상한과 대칭이 아님을 실험으로 확인하였다. 본 논문에서는 상용화된 axial flux 전동기를 전기자동차/하이브리드 자동차의 구동장치(power train)에 적용하였을 경우의 전동기의 특성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 특히, 공극이 고정되었을 경우에 비하여 공극을 제어함으로써 전동기의 동작 범위(토크, 속도)를 넓힐 수 있어서 전동기의 최대 속도를 증가시킬 수 있으며 또한 일부 동작 영역에서는 전동기 효율도 향상시킬 수 있다.

전동기의 여러 가지 동작점(토크, 속도, 입력전압, 공극, 동작 상한)에서의 전동기, 제어기 종합효율을 측정하고 이를 바탕으로 대상 전동기를 장착한 차량 운전 특성 및 전동기/제어기 특성을 차량 성능 시뮬레이터를 이용하여 분석한다. 차량 성능 시뮬레이터에서 전동기/제어기 모델은 수학적 모델은 사용하지 않고 주어진 속도, 토크에 대한 효율을 조건표(look up table)의 형태로 활용하며 전동기의 속도/토크의 최대치, 제어기의 최대 전류 등에 의하여 구동 장치의 성능이 제한된다.

\* 正 會 員 : 韓 國 技 術 教 育 大 學 校 情 報 技 術 工 學 部  
副 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 2002年 11月 1日  
最 終 完 了 : 2003年 10月 6日

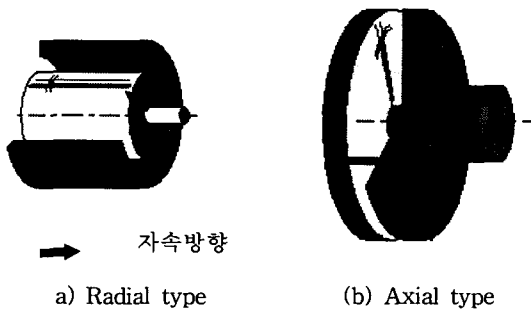


그림 1 전동기의 구조  
Fig. 1 Structure of motor

2. Axial flux 전동기의 특성

2.1 Axial flux 전동기의 정격

제조사에서 제시한 대상 전동기의 정격은 표 1과 같다. 또한, 효율을 비롯한 각종 특성들은 시험을 통하여 구해지게 된다.

표 1 시험 전동기의 정격  
Table 1 Specification of test motor

연속정격(KW)	3.2
정격속도(RPM)	300
정격토크(Nm)	102
냉각방식	공냉식
최소/최대 공극(mm)	1.8/6
전동기 지름(mm)	31.5
전동기 폭(mm)	70
무게(kg)	20
형식	Permanent Magnet Brushless DC motor

2.2 Axial flux 전동기의 특성 평가

전동기의 4상한 운전 특성을 시험하기 위한 시험장치는 다음 사항을 고려하여 구성되었다.[3]

- 1) 양방향 직류 전원 장치: 역행 시 전류는 전원에서 전동기로 회생 시는 전동기에 전원으로 흐를 수 있어야 한다.
- 2) 부하장치(다이내모미터): 전동기의 부하 장치는 전동기의 속도 및 토크 방향에 따라 능동적인 변동이 가능하여야 한다. 즉, 속도와 방향이 원하는 운전 상한에 따라 제어되어야 한다.
- 3) 시험 데이터는 자동으로 수집되어야 한다.

시험 장치의 구성은 시험 전동기, 부하전동기, 직류 전원 장치, 데이터 수집을 위한 신호처리 시스템으로 구성되어 있다.

전동기의 속도 및 토크에 따른 각 운전 상한(1, 4 상한)은 표2 와 같이 정의된다. 특성 시험을 위해서 시험 전동기와 부하 전동기는 표2에 따라 운전되어야 한다. 효율 측정 시 시험 전동기는 토크 제어 모드로 부하전동기는 속도 제어 모드로 동작하였다.

표 2 1-4상한 운전 모드  
Table 2 1st-4th quadrant operating mode

1st quadrant Torque: Positive Rotation : Forward Motor mode : Throttle Motor direction : Forward Load direction : Forward	4th quadrant Torque : Negative Rotation : Forward Motor mode: Regeneration Motor direction: Forward Load direction: Forward
--	--

2.3 시험 결과

2.3.1 공극 변화에 대한 최대 토오크

각 공극 및 속도에 대한 최대 토오크를 측정 한 결과는 그림 2와 같다. 최대 토오크를 측정하기 위해서는 토크 명령을 출력 토크가 포화 될 때까지 증가시키며 그 점에서 출력 토크를 최대 토오크라 정의한다. 최대 속도를 측정하기 위해서는 속도 명령을 출력 토크가 0이 될 때까지 증가시키며 이 점에서의 속도를 최대 속도라고 정의한다. 최대 토오크는 공극이 증가함에 따라 감소하며 최대 속도는 공극이 증가함에 따라 증가한다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시험 전동기의 운전 범위는 공극 1.5[mm], 속도 400[rpm]에서 최대토크 136[Nm], 공극 6[mm]에서 최대 속도는 1200[rpm] 이다.

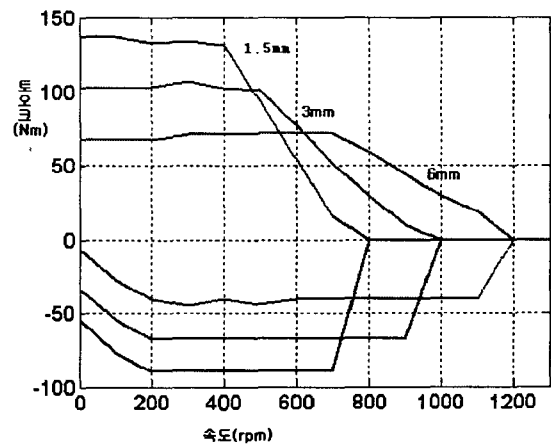


그림 2 공극 변화에 대한 토크 속도 곡선  
Fig. 2 Torque speed curve at different air gap

2.3.2 공극 변화에 따른 효율 측정

공극을 변화시키면서 각각의 속도 토크에 대한 효율을 측정하였다. 그림3과 같이 효율은 속도가 증가함에 따라 증가한다. 효율은 토크가 일정값까지 증가함에 따라 증가하지만 그 이후는 감소한다. 최대 토크 근방에서는 효율이 비교적 낮다. 또한, 공극이 증가함에 따라 효율은 낮은 토크 영역을 제외하고 감소한다. 낮은 토크 영역에서는 공극을 조절함으로써 효율을 증가시킬 수 있음을 알 수 있다.

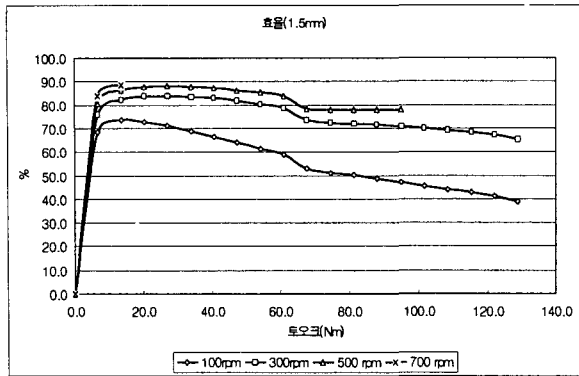


그림 3 공극 1.5 mm에서의 효율 분포  
Fig. 3 Efficiency distribution at 1.5mm air gap

2.3.3 각 동작점에 대한 최적 공극의 추정

시험 결과를 바탕으로 각 동작점(속도, 토크)에 대한 최적 공극을 추정 할 수 있다. 최적 공극을 정의하기 위해 각 동작점에서의 시스템 전력손실을 계산하며 중간점에 대해서는 보간법으로 추정한다. 그림4는 주어진 토크, 속도에서 공극 변화에 대한 전력손실을 나타낸다. 제 1 상한에서의 전력 손실은 전기적 입력(입력 직류 전압×입력 직류 전류)와 기계적 출력(전동기 속도×전동기 토크)로 정의 된다. 대부분의 경우에는 전력 손실은 공극이 증가함에 따라 증가한다. 그러나, 낮은 토크 영역에서는 공극이 최소가 아닌 점에서 최대 효율로 동작하게 된다.

그림 4에서 최적 공극은 전력 손실이 최소인 점 3.9[mm]로 정의된다. 경부하에서는 공극을 증가시킴으로서 고정자 자속을 감소시킬 수 있으며 부하에 관계되는 손실(고정자 회전자 손실)과 부하와 무관한 손실(철손)과의 관계를 조정함으로써 효율을 증가시킬 수 있다. 영구자석 전동기의 경우는 실험에 의한 손실의 분류가 어려우므로 시스템 효율을 최적화하였다. 또한, 토크가 증가하게 되면 필요한 자속도 증가하게 되어 공극을 증가시킴으로써 효율을 증가시킬 수 없게 된다.

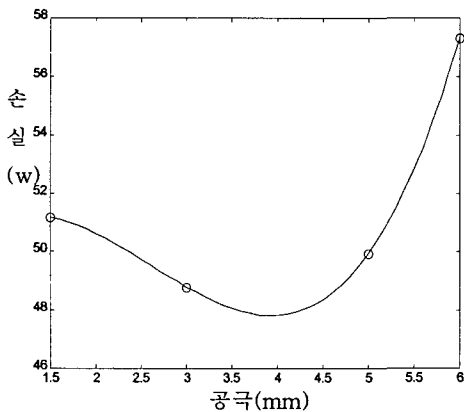


그림 4 공극 변화에 따른 전력손실  
Fig. 4 Power loss at different air gap (200[rpm], 6.8[Nm])

그림 5에는 위의 방법으로 구한 각 동작점에서의 최적 공극을 나타내었다. 속도가 증가함에 따라 최적 공극은 증가하게 된다. 이 경우의 최적 공극은 운전 범위를 만족시키기 위한 공극 증가로 해석 할 수 있다. 반면 작은 토크 영역에서의 최적공극은 상대적으로 크게 된다. 각 최적 공극에서의 효율은 그림 6과 같다. 일반적으로 높은 효율을 비교적 속도가 빠른 영역에서 얻을 수 있음을 알 수 있다.

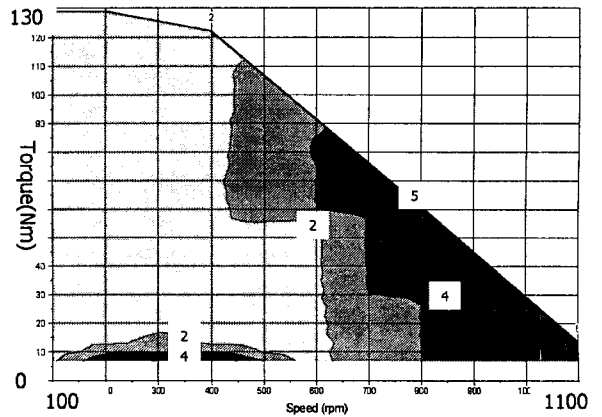


그림 5 최적 공극의 분포  
Fig. 5 Distribution of optimal air gap

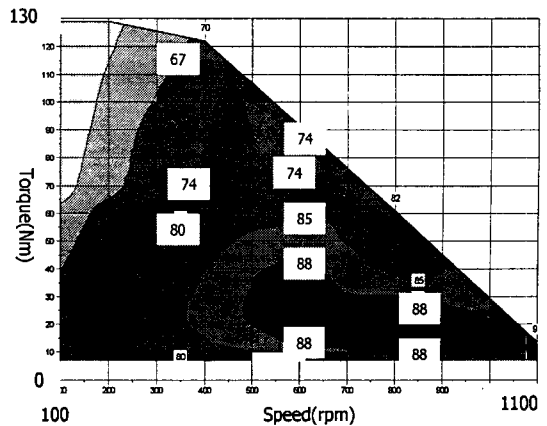


그림 6 최적 공극에서의 효율의 분포  
Fig. 6 Efficiency distribution at optimal air gap

2.3.4 제 4 상한 동작 특성 및 최적 공극의 추정

일반적인 차량 시뮬레이션에서 사용되는 전동기 모델은 차량의 회생 제동시의 제 4상한 운전시의 동작 특성을 제 1 상한 동작 특성과 대칭이라고 가정한다. 그러나, 실제의 전동기의 제 2상한에서의 동작 특성은 컨트롤러의 세팅에 따라 제 1상한의 동작 특성과 다른 특성을 나타낸다.

제 4상한 동작시 각 공극 및 속도에 따른 최대 토크를 그림 2에 나타내었다. 그림 2과 같이 제 4상한에서의 토크

크 분포는 1상한 운전에 비하여 더욱 사각형에 가까우며 최대 토오크는 감소하게 된다(137[Nm]>89.5[Nm]). 그 이유는 회생 영역이 전동기의 역기전력에 의하여 제한되는 것으로 추정된다.

이 모드는 전기적인 제동에서 발생한다. 공극이 증가함에 따라 제동 토오크는 감소한다. 회생제동이 가능한 최대 속도는 공극이 증가함에 따라 증가한다. 만일 이 특성이 제동 제어 전략에 반영된다면 전체 효율은 향상 될 수 있다. 즉, 제동 토오크에 따라 공극을 변경시킴으로서 효율을 향상 시킬 수 있다.

각 동작점에 대한 효율도 측정하였다. 회생시에는 효율을 기계적인 입력(전동기 속도× 토오크)와 전기적인 출력(직류 전압 × 전류)의 비로 정의한다.

공극 변화에 따른 효율 분포는 그림7, 8과 같다. 그림 7은 공극 1.5[mm]일때의 속도 변화에 따른 효율분포를 그림 8에는 공극 5[mm]일때의 속도에 따른 효율 분포를 나타내고 있다.

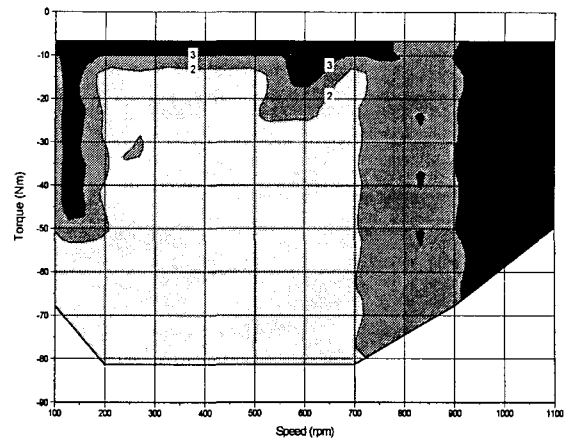


그림 9 회생시 최적 공극의 분포  
Fig. 9 Distribution of optimal air gap during regeneration

2.3.5 입력 전압 변동에 따른 특성의 변동

만일 2차 전지가 전동기의 전원으로 사용되었다면 버스 전압은 운전 중 변동된다. 정확한 모델링을 위해서는 입력 전압의 변동에 따른 영향을 분석하는 것이 필요하다. 즉, 입력 전압 변동에 따른 최대 토오크를 측정하였다. 각 공극에서 입력 전압 변동에 따른 최대 토오크를 그림 10에 나타내었다.

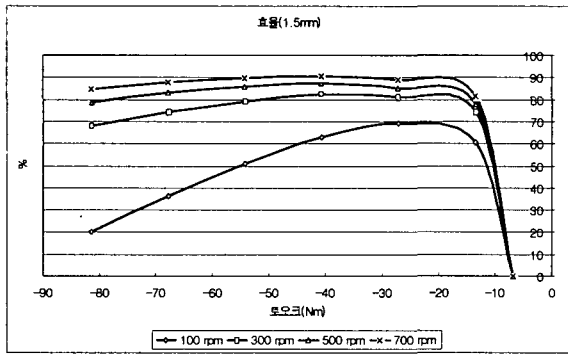


그림 7 회생시 효율의 분포(1.5mm 공극)  
Fig. 7 Efficiency distribution during regeneration (1.5mm air gap)

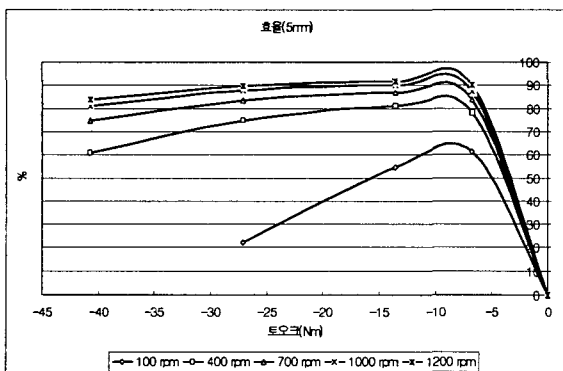


그림 8 회생시 효율의 분포(5mm 공극)  
Fig. 8 Efficiency distribution during regeneration (5mm air gap)

효율의 분포는 제 1상한의 효율 분포와 비슷하지만 전반적으로 회생시의 효율이 역행시의 효율보다 높음을 알 수 있다. 제 1상한에서 구한 방법과 같은 방법으로 제 4 상한 운전시의 최적 공극을 구하였다. 그림 9는 제 4 상한 동작시 즉 회생 운전시의 최적 공극을 나타낸다

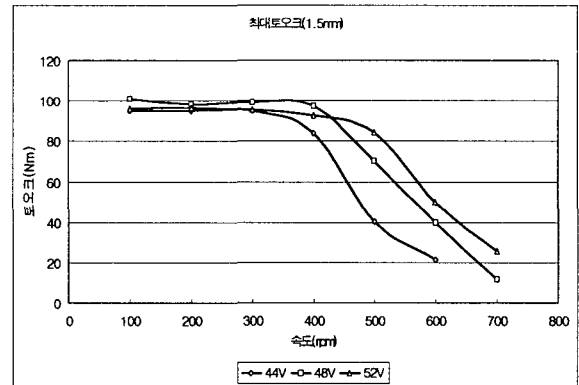


그림 10 입력 전압 변동에 따른 최대 토오크(1.5mm 공극)  
Fig. 10 Maximum torque at different input voltage (1.5mm air gap)

각 공극에서 저속에서의 최대 토오크는 입력전압에 관계 없이 일정하였다. 그러나, 속도가 증가함에 따라 입력 전압이 증가함에 따라 최대 토오크도 같이 증가하였다.

입력전압 변동에 따른 효율의 분포는 그림 11,12와 같다. 저 전압 낮은 토오크 영역에서의 효율이 다른 경우와 비교하여 약간 높았다. 다른 영역에서는 입력 전압의 변동과 관계 없이 효율은 거의 같았다.

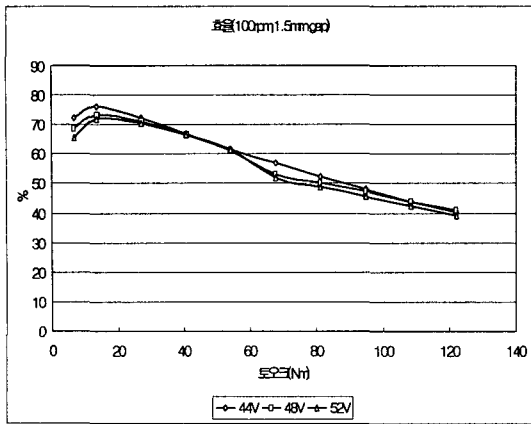


그림 11 입력 전압 변동에 따른 효율의 분포 (1.5mm 공극, 100 rpm)

Fig. 11 Efficiency distribution at different input voltage(1.5mm air gap, 100 rpm)

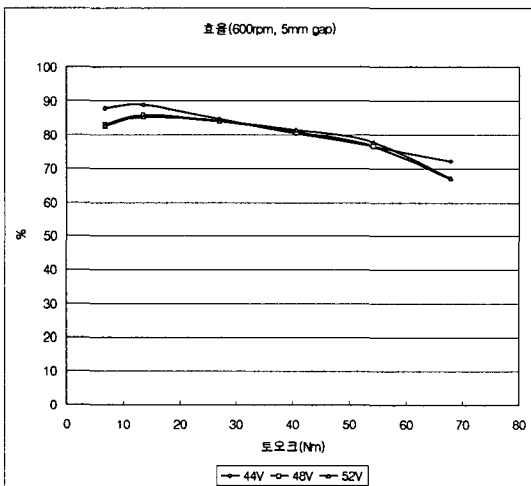


그림 12 입력 전압 변동에 따른 효율의 분포(5mm 공극, 600 rpm)

Fig. 12 Efficiency distribution at different input voltage (5mm air gap, 600 rpm)

### 3. 차량 성능 시뮬레이터에 의한 전동기 성능 평가

시험 결과를 바탕으로 시험 전동기를 구동 장치로 사용한 하이브리드 자동차의 성능을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에 사용된 차량의 구동 장치의 구성은 그림 13과 같다.

Axial flux 전동기는 낮은 속도에서 토크가 높은 특징이 있으므로 낮은 출력에도 불구하고 wheel 전동기 타입으로 사용될 수 있다. 즉, 4개의 axial flux 전동기가 각 바퀴를 직접 구동 할 수 있다. 여러 가지 하이브리드 구동장치 형태 중 직렬 타입의 구동 장치에 적합한 특성을 가지고 있다. 구동장치의 구성은 엔진에 의하여 발전기를 구동하고 발전기 출력은 구동 모드에 따라 전력변환기를 거쳐 일부는 전지로 일부는 전인 전동기를 구동하는데 사용된다.

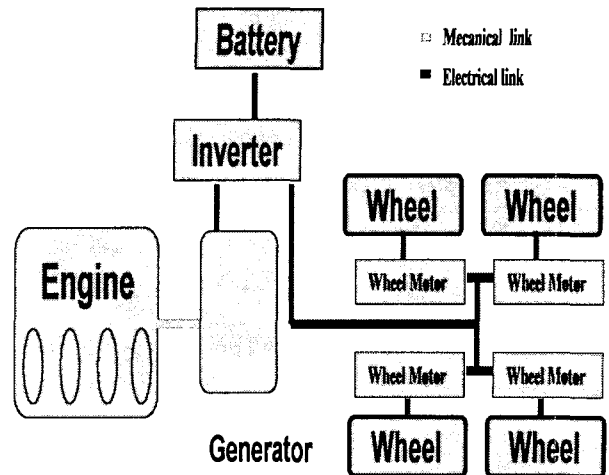


그림 13 차량 구동 장치의 구성

Fig. 13 Power train configuration

제어 방식으로는 엔진을 차량 구동에 관계없이 최적 효율 점에서 운전할 수 있는 특징이 있으나 발전기 및 전동기의 용량이 커지는 단점이 있다. 시뮬레이션에 사용된 차량 및 부품의 제원은 표4와 같다.

표 4 차량 및 부품 제원

Table 4 Specification of vehicle and components

차량 무게(kg)	1798
Cd(주행저항계수)	0.25
전면단면적(m <sup>2</sup> )	1.8
엔진용량(kw)	41
발전기용량(kw)	35
전동기무게(kg)	99(24.86×4)
전동기 최대 전력(kw)	17.2(4.3×4)
전동기 관성 모멘트(kgm <sup>2</sup> )	0.0782

그림 13의 구동 방식으로 구동되는 차량의 성능 시뮬레이션 결과는 그림 14와 같다. 직렬 방식으로 구동되었을 경우의 사용 전동기의 특성을 나타내었다. 차량은 FHDS (Federal Highway Driving Cycle)로 구동하였다. 그림 14(c)의 전동기 속도가 주행 모드의 속도 명령을 추종함을 알 수 있다. 전동기 속도의 속도 명령에 추종함은 전동기 속도가 속도 명령과의 차이가 1% 이상인 구간으로 정의하는데 시뮬레이션에서 이 구간이 존재하지 않았다.

그림 14 (b)는 주행 모드 운전중 공극의 변화를 나타낸다. 최적 공극의 선택은 그림 6, 9의 속도, 토크, 상한에 따른 최적 공극 데이터를 look-up table의 형태로 저장하였다가 운전 조건에 따라 최적 공극점으로 제어하게 되어있다. 그림 15는 주행모드 운전중 전동기 운전점이다. 전동기가 비교적 고속 영역에서 운전됨을 알 수 있다.

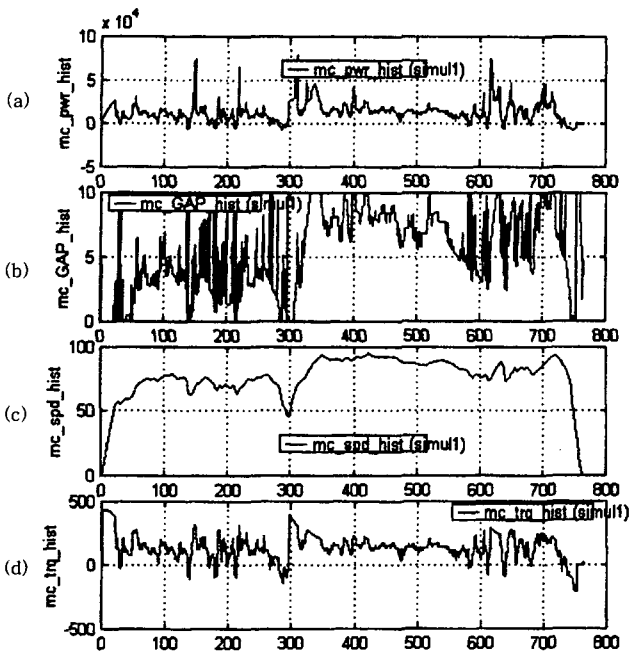


그림 14 FHDS cycle 운전 모드에서 전동기 특성  
 Fig. 14 Motor Performance during FHDS cycle  
 (a) 전동기 출력(motor power): [W]  
 (b) 전동기 공극(motor air gap):[mm]  
 (c) 전동기 속도(motor speed): [rad/s]  
 (d) 전동기 토크(motor torque) : [Nm]

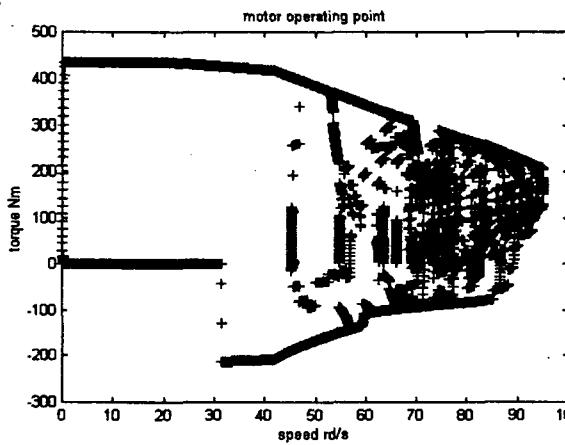


그림 15 전동기 운전점  
 Fig. 15 Motor operating points

### 3. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 전기 자동차 및 순 전기 자동차의 구동장치로 사용이 가능한 axial flux 전동기의 운전 특성을 검증하였다. 즉, 차량 운전 조건에서의 전동기 특성을 시뮬레이션을 통하여 분석하였다. 시뮬레이션을 위한 전

동기/제어기의 모델 개발을 위하여 각 운전점(상한, 토오크, 속도, 입력전압)에 대한 효율을 측정하였다. 측정된 효율을 바탕으로 각 운전점에서의 최적 운전을 위한 공극을 추정하였으며 이를 바탕으로 전동기/컨트롤러의 모델을 개발하였다. 최적 공극에서의 운전은 고속으로의 전동기 운전 영역의 확장과 일부 영역에서의 효율 증대의 역할을 하고 있다.

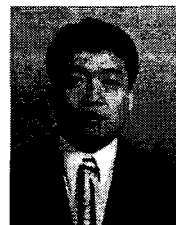
제안된 방식으로 차량 구동 장치 개발 시 시뮬레이션을 통하여 다양한 형태의 구동방식(직렬, 병렬, power split, 부품 용량)에 적용되었을 때의 전동기/제어기의 특성을 분석할 수 있으며 이를 통하여 최적의 구동 방식 설계를 수행할 수 있다.

향후 과도 특성을 분석하기 위한 전동기/제어기의 모델 개발이 요구되며 실제로 차량에 탑재하지 않고 전동기/제어기의 특성을 분석하기 위한 HIL(Hardware in the Loop)을 응용한 구동 장치 분석에 대한 지속적인 연구가 요구된다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. Patterson and R. Spee, "The Design and Development of an Axial Flux Permanent Magnet Brushless DC Motor for Wheel Drive in a Solar Powered Vehicle", IEEE Trans. on IA, Vol 31. No.5, pp. 1054-1061, 1995
- [2] F. Caricchi, F. Crescimbeni, F. Capponi and L. Solero, "Permanent-Magnet, Direct-Drive, Starter/Alternator Machine with Weakened Flux Linkage for Constant-Power Operation Over Extremely Wide Speed Range", Proc. of IAS 01, pp 626-633, 2001
- [3] S. Oh, J. Kern, T. Bohn, A. Rousseau and M. Pasquier, "Axial flux Variable gap Motor : Application in Vehicle Systems", paper No. 2002-01-1088, SAE World Congress, 2002

### 저 자 소 개



#### 오 성 철(吳 星 哲)

1958년 1월 23일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 미 Univ. of Florida(박사). 1982년-1994년 한국전기연구소 선임연구원. 2001년-2002년 미 알콘연구소 방문연구원, 1994년~ 한국기술교육대학교 정보기술공학부 부교수  
 Tel: 041-560-1165, Fax: 041-564-3261  
 Email : scoh@kut.ac.kr