ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 31(3), 97-108 (2021) https://doi.org/10.4283/JKMS.2021.31.3.097

Development Process and Technology Trend of Permanent Magnet Motor System for Electric Vehicle

Yunyong Choi*
DRIVETECH Co., Ltd., Bucheon 14558, Korea

Eunsil Han
MOASOFT Co., Ltd., Seoul 05770, Korea

Chunseong Lee
MANDO Co., Ltd., Sengnam 13486, Korea

(Received 20 June 2021, Received in final form 25 June 2021, Accepted 25 June 2021)

Beyond the 4th industrial revolution, the beginning of the eco-friendly era has begun. Carbon neutrality with the last means regarding to climate change, has begun. In this reason, the electric motor industry rapidly emerged as the center of the industrial trend toward zero carbon. In particular, the eco-friendly automobile industry is the center of change for the automobile drive system. In other words, the driving core of automobiles is in a state of great transition from the internal combustion engine to the electric motor. In this paper, the development process of the motor drive system, which is the core technology of eco-friendly vehicles, and the design verification case of the motor system using CAE are described. Finally, the future technology development direction for the motor drive system of eco-friendly vehicles are introduced.

Keywords : EV, driving motor, motor system, CAE, process

전기자동차 구동용 영구자석 모터 시스템의 개발 프로세스 및 기술 동향

최윤용*
드라이브텍 주식회사, 경기 부천시 조마루로 385번길 80, 14558

한은실
모아소프트 주식회사, 서울시 송파구 오금로 422, 05770

이충성
(주)만도 xEV센터, 경기 성남시 분당구 판교로 255번길 21, 13486

(2021년 6월 20일 받음, 2021년 6월 25일 최종수정본 받음, 2021년 6월 25일 게재확정)

4차산업혁명을 넘어 친환경 시대의 개막이 열렸다. 기후변화 대응의 마지막 수단인 탄소 중립의 선언을 시작으로 탄소 제로를 향한 산업 트렌드의 중심에 전기 모터 산업이 급부상하고 있다. 특히, 친환경 자동차 산업이 그 변화의 중심이다. 바꾸어 이야기하면, 자동차의 중심이 엔진에서 전기 모터 구동으로 대 전환기를 맞이하고 있는 상황이다. 이에 친환경 자동차의 핵심 기술인 모터 구동 시스템에 대하여 차량 관점의 개발 프로세스와 CAE를 활용한 모터 시스템의 설계 검증 사례를 기술하였고, 최종적으로는 친환경 자동차용 모터 구동 시스템의 향후 기술 개발 방향을 소개하였다.

주제어 : EV, 구동용 모터, 모터 시스템, CAE, 프로세스

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-32-222-0456,
Fax: +82-32-222-0457, e-mail: gipson12@drivetech.kr

I. 서　　론

최근 자동차 산업 패러다임은 기후변화 대책 방안으로 환경 규제 강화와 탄소 중립 및 이를 넘어 탄소 제로화를 목표로 하는 자동차의 성능에 초점이 맞추어져 있다. 이 탄소 배출 감소 중심에 친환경 자동차의 역할이 중요한 위치를 차지하고 있다. 플러그인 하이브리드, 전기자동차, 수소연료전지 자동차와 같은 전력기반차(xEV)의 개발 및 상용화가 본격화되면서 자동차 산업의 트렌드가 엔진에서 모터로 대 전환을 맞이하고 있다. 이것은 기름에서 전기로의 단순한 전환이 아닌 자동차 산업, 에너지 산업, 사회 인프라 등 산업 전반에서 변화를 일으키고 있다. 본 원고에서는 이러한 친환경 차량(전동 모빌리티)에서 배터리와 더불어 가장 핵심 요소인 모터 구동 시스템에 대한 전반적인 개발 과정을 소개하고, 특히 IT 발달로 기술 개발의 효율성을 배가시키고 있는 상용 소프트웨어를 활용한 적용 사례 중심의 개발 프로세스를 서술하고, 향후 개발 전망을 고찰 해 보고자 한다[1]. 그리고, 본 원고는 타 분야 관련 연구자들과 학생층의 이해를 돕고자 학술적인 면보다 전반적인 기술 소개 형식으로 작성을 하였다.

II. 모터 구동 시스템의 개발 프로세스 소개

전기자동차에서 모터 구동 시스템의 개발은 설계적인 측면, 제작적인 측면, 시험적인 측면에서 나누어 생각할 수가 있다. 본 원고에서는 개발 대상 차량의 선정에서 설계단계, 제작단계, 최종 시험까지의 전반적인 개발 흐름과 CAE를 활용한 설계 및 가상 검증의 사례를 소개하고자 한다.

1. 모터 구동 시스템의 개발 프로세스 소개

아래 Fig. 1은 전기구동 자동차의 모터 구동 시스템을 개발하기 위한 전반적인 프로세스이다[2].

프로세스는 전동기와 제어기로 나누어 생각할 수 있다.

모터 구동 시스템은 첫 단계로 적용 대상이 될 차량의 사양(차량 형식, 구동 타입, 사용 용도, 차량 중량, 최고 속도, 등판 능력 등)을 바탕으로 전동기에 걸리는 부하에 따라 구동이 가능한 모터 기본 필요 성능(속도, 용량, 출력)를 산출하고, 차량의 주행 패턴과 환경을 고려한 운전 조건을 선정한다.

이 결과를 기반으로 전동 시스템의 전반적인 구성도(감속기를 포함한 기계적 기능, 전기적 기능을 포함) 및 사양 결정하고, 개발에 대한 전체적인 수행 계획을 수립한다.

두 번째 단계로 전동 시스템 구성도를 기반으로 다음과 같은 단계를 거쳐 최종 도면을 작성한다.

① 전동기 단품의 사양(모터 타입, 자석의 종류/특성, 권선

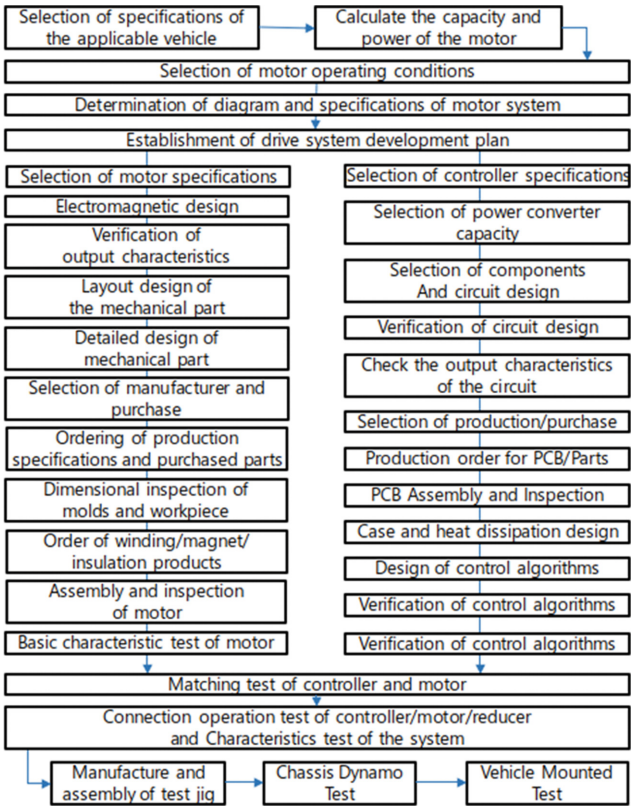


Fig. 1. (Color online) Development process of motor drive system for EV.

방식 등)을 선정

② 전자기 설계를 통해 로터와 회전자의 형상, 출력특성(속도, 토크, 효율,

③ 환경조건(분진, 온도, 진동), 주 구동점 분석 또는 주행 패턴에 따른 확률 적 효율점 분석)을 분석 결정

④ 고정자 및 회전자에 대한 형상 및 적층 길이 결정

⑤ 기구부(샤프트, 베이링, 고정 및 지지부품, 외곽 케이스, 커버 등)에 대한

⑥ 상세한 설계 구성과 각 구성품의 특성(열, 진동, 강도, 간섭, 단위 무게당 출력비)을 검토

⑦ 제작 조립을 고려한 세부 설계를 통해 최종 도면을 작성

제작 검토용 도면과 제작 사양서를 제작 후보 업체에 사전 검토용으로 송부하여 제작 가능성과 일정 및 비용을 상호 협의 후, 최종적인 도면과 사양서를 정식으로 발행하여 금형 및 가공 제작을 진행한다. 추가적으로 재질과 성형방법(와이어 컷 또는 프레스 금형), 자석 종류/등급에 따른 수급 상황(희토류의 중국 수급 문제), 착자기의 제작 유무, 적층 및 조립 지그등을 포함하여 제작 후 완성품의 최종 치수 검사 및 재질 확인을 실시한다. 완성된 모터 단품의 최종 구성품을 확인하고, 우선적으로 절연 처리를 기본으로 권선 작업을 한 후에 코어들은 함침용 챔버를 이용한 함침 공정을 통해 권선

단락 보호 및 절연성 확보하고, 코어에 자석 삽입(착자 방식에 따라 삽입 전 또는 후에 착자 수행)후 기구부 부품들과의 순차적으로 전동기 조립을 완성한다. 조립후에는 외관적인 검사를 기본으로 동작 시험, 간단한 무부하 작동시험을 통해 조립에 따른 검증(간섭 및 이음 등)을 실시한다.

세 번째 단계로 제어기의 사양(선정된 전동기의 특성을 고려하여 시스템의 제약 조건 내 제어기 및 전력변환기의 요구사양 및 설계 조건을 도출)을 선정, 이를 기반으로 전력변환기의 용량 선정한다. 다음으로 구성할 기본 부품선정(제약 조건 내의 데이터 시트 기반 선정) 및 회로 설계 후 설계 회로의 작동성 검증과 회로 출력 특성을 확인(온도와 환경 조건, 회로 동작 조건과 동일한 입력을 모사하여 출력 특성 확인)한다. 그리고, 제작 업체와 부품 구매 업체를 선정하고, PCB 및 구성 부품 제작에 대한 발주 후, PCB 조립 및 검사(PCB Artwork 특성인 EMC, 방열)를 실시한다. PCB와 구성 부품 제작 시에는 제약 조건 내에서 기초 자기 회로를 참조하여 전동기 기본 구조, 설계 노이즈, 용량 등을 고려하여 라우트의 위치, 굵기 등을 고려해야 한다. 다음으로 제어기 케이스 및 방열 구조 설계(외부 노이즈로부터의 취약점, 발열의 집중, 과도한 필터의 사용 등을 방지), PCB 고장 분석 및 수명 예측이 가능한 제어 알고리즘 설계 및 검증(제작된 제어기에 구현된 알고리즘을 블록 또는 코딩을 이용하여 사전에 구현)하여 제어기 개발 시간을 단축, 고장진단 모드 분석, 수명 예측이 가능하게 해야 한다.

네 번째 단계로 전동기와 제이기의 단품 검증 결과를 기반으로 시스템적인 시험 검증 과정이다. 먼저 전동기와 제어기의 매칭 판정을 위한 특성시험인 무부하 운전시험(기본 동작 시험)을 실시하여 모터의 기본특성 및 작동 상태를 확인하고, 다음으로 전동기 부하 특성시험(정-가변부하(S-T))을 통해 제어기와 모터의 기본 매칭성을 확인한다. 최종적으로 응답 특성 시험(가변속, 정-가변부하)을 통해 차량 운전 모드의 특성을 분석 확인한다. 초기 시스템 특성시험은 차량 조건의 샤시다이나모 시험을 위한 사전 확인 단계로 실제 감속 시스템을 부착하여 기본 시험을 실시하고, 실차 단위의 시험 평가를 위해 구동모듈(모터 + 드라이버)외 핵심부품(배터리, 전원장치) + 평가 활용 배터리 시뮬레이터 + 온도 챔버 + 샤시다이나모 + 풍부한 Sensor(구동 중 운전조건(속도/도로/경사/온도/배터리) 모사 및 결과의 정량화 측정), 샤시다이나모에 모터 시스템 장착을 위한 가공 및 조립, 샤시다이나모 부하모드 시험 및 알고리즘의 수정 및 보완을 위해 최종적으로 차량에 탑재하여 실재 도로 주행을 통한 주행 모드별 시험, 극저온의 콜드 시험에서 열대 지역의 극고온 시험등을 포함한 차량이 노출되는 다양한 환경상에서 실제 주행 시험을 통해 최종적으로 판단을 하는 순서이다.

2. CAE를 활용한 모터 시스템의 설계 프로세스

전동기의 설계 및 해석 단계는 일반적으로 등가 회로 기법을 이용하였고, 등가회로에 필요한 파라미터를 FEM 해석을 이용하여 산정하였다. 최근, 컴퓨터 성능이 향상되고 해석 기법의 발전에 힘입어 등가 회로와 FEM을 Coupling 하여 Transient 해석을 수행하게 되면서 비교적 전동기 초보자라고 하더라도 모터 성능 해석을 수행할 수 있게 되었다. 하지만 Transient 해석의 경우 해석 시간이 긴 단점을 가지고 있으므로 전통적인 등가 회로 기법을 사용하는 방법이 여전히 많이 활용되고 있다[3].

전기자동차의 전체 시스템 개략도는 아래 Fig. 2와 같다[4].

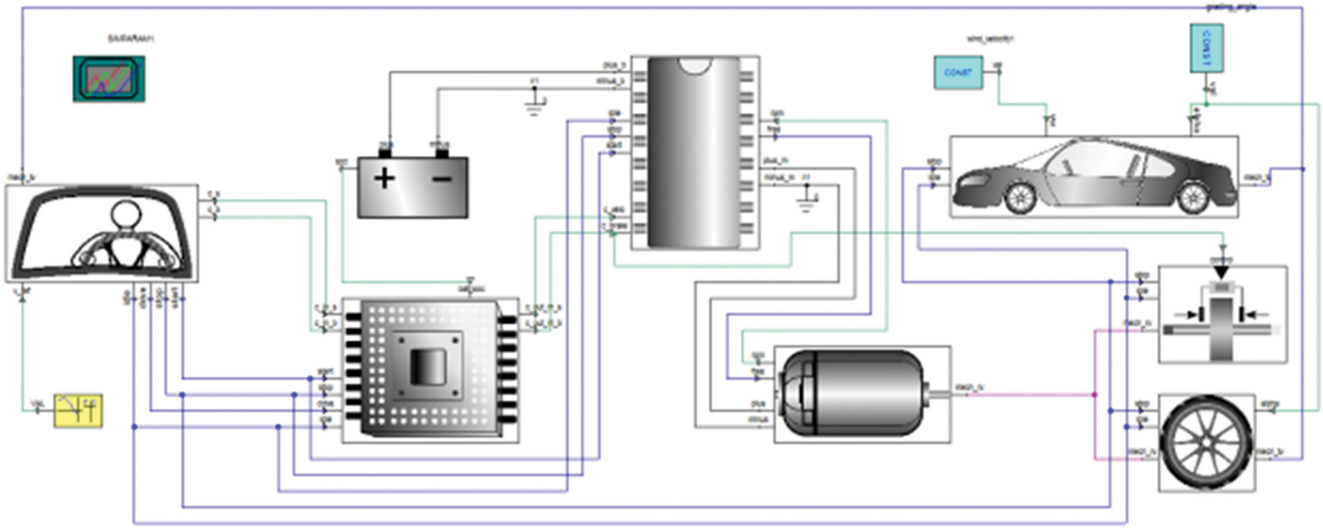


Fig. 2. (Color online) EV system block diagram.

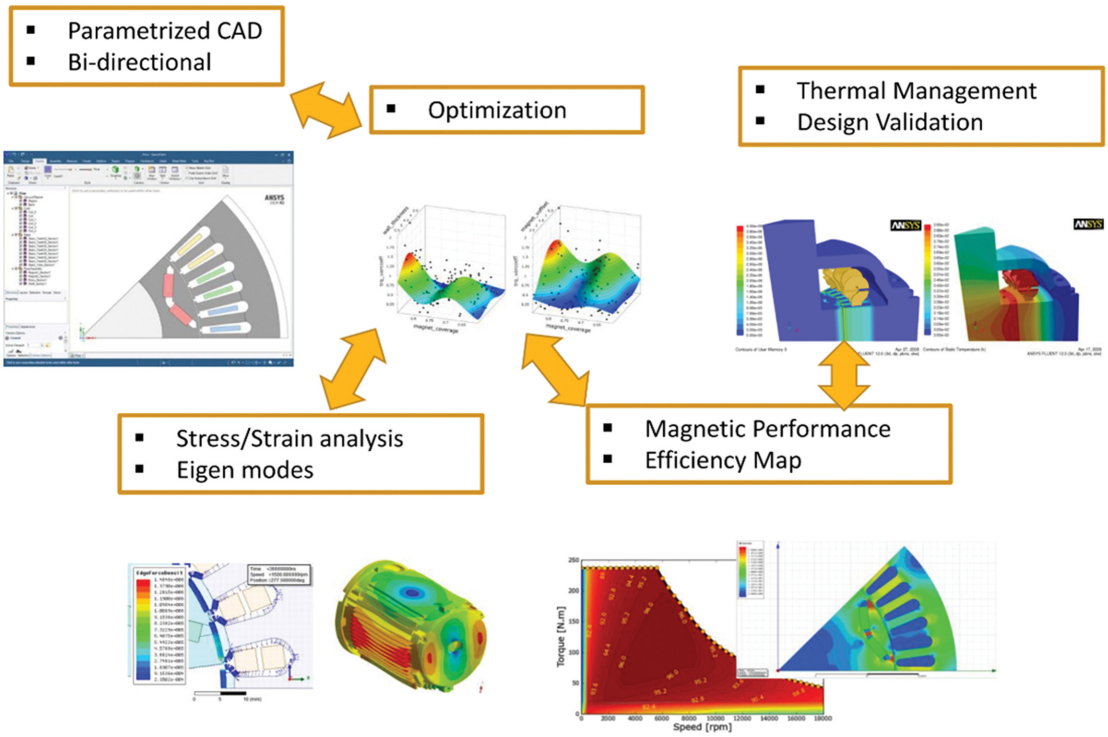


Fig. 3. (Color online) EV traction motor simulation process.

구성 요소는 운전자, 드라이빙 사이클, 주 컨트롤러, 모터 컨트롤러, 구동 모터, 배터리, 클러치, 브레이크, 바퀴, 그리고 차체 총 10개의 구성으로 볼 수 있다. 이 그림에는 전력 변환 제어 장치와 전력을 공급하는 케이블 및 Harness 부분들은 빠져있다.

본 원고에서 살펴볼 전기자동차용 구동 시스템 설계할 때에 원칙적으로는 위의 구성 요소들을 모두 고려해야만 하지만, 이 중에서 모터와 모터 컨트롤러, 그리고 전력변환장치 부분의 설계 개발 프로세스만 고려하기로 한다.

Fig. 3은 모터 설계에 관한 CAE(Computer-Aided Engineering)를 도입하여 대표적으로 해석하는 과정이다.

Fig. 3의 내용을 IPMSM모터를 기준으로 상세하게 설명하면 아래와 같다.

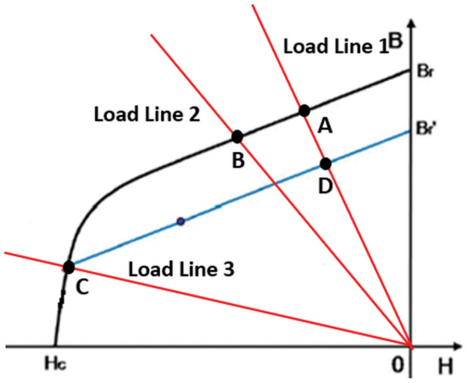
(1) 전자장 해석 - 무부하 해석: 영구자석형 모터의 경우, 무부하 해석을 통해 Cogging Torque와 역기전력을 얻는다. Cogging Torque 감소를 위해 영구자석에 대하여 극수 및 자석 형상/갯수/층수 등을 다양하게 변화해 가면서 적합한 조건을 찾는 것이 중요하다.

(2) 전자장 해석 - 부하 해석: 모터의 효율맵, Id, Iq, Ld, Lq, 각종 손실을 구해야 하며, 또한 온도 변화에 따른 물성 변화를 고려한 해석이 필요하다. 부하 해석을 하는 경우, 사전에 두 가지의 해석이 필요하게 된다. 스위칭 소자의 Vector PWM을 고려한 전류 파형과 영구 자석의 온도 상승에 따른 불가역 감자 특성을 파악해야 한다.

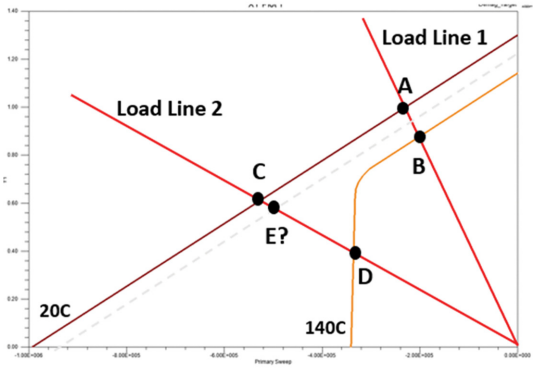
특히, 영구자석은 온도 상승으로 인하여 감자가 더 두드러지기 때문에 반드시 전자장-열해석을 연동한 해석이 필요하다. 온도가 상승하면 자석의 불가역 감자 특성이 Fig. 4(b)와 같이 달라지기 때문이다.

Fig. 4(a)는 Load Line1과 Load Line2의 경우 A점과 B점에서는 외부 자장이 감소하게 되면 원래의 잔류 자속 밀도인 Br로 복귀할 수 있지만, Load Line 3의 경우 외부 자장의 세기가 너무 커서 C지점에서 외부 자장이 감소하더라도 Br보다 적은 Br'으로 복귀하는 것을 보여준다. 이는 외부 자장에 의한 불가역 감자가 발생했다는 것을 의미한다. 하지만, Fig. 3(b)에서 보듯이 20도일 때와 140도일 때 온도의 영향으로 이미 잔류자속밀도 Br 값과 보자력 Hc 값이 보라색과 노랑색처럼 차이가 많다. 이는 Load Line 1의 경우에, A와 B 위치에서 외부 자장이 감소하면 자석은 감자가 되지 않지만, Load Line 2의 C와 D 지점에서 외부 자장이 감소하면 20도일 때는 감자가 일어나지 않지만, 140도일 때는 불가역 감자가 발생함을 의미한다. 구동 모터처럼 수백 A의 전류가 흐르는 상황에서 자기장이 크게 발생하기 때문에 자석의 불가역 감자가 발생할 확률이 높아진다. 따라서, 모터 제작 전에 CAE 기법을 활용하여 감자 특성을 해석적으로 평가할 필요가 있다.

다음은 온도에 따른 Br과 Hc 값의 변화 수식이다[5].



(a) Demagnetization by external magnetic Field



(b) Demagnetization by external magnetic Field depending on Temperature

Fig. 4. (Color online) Irreversible demagnetizing process.

$$B_r(T) = B_r(T_0)\cdot[1 + \alpha(T - T_0)] = B_r\cdot p(T)$$
$$H_{ci}(T) = H_{ci}(T_0)\cdot[1 + \beta(T - T_0)] = H_{ci}\cdot q(T) \quad (1)$$

여기서, α, β는 각각 Coefficient Induction과 Coefficient Coercivity를 의미한다. 이 데이터는 Fig. 5와 같이 자석 제조업체로부터 입수해야 한다[6].

Fig. 6은 이상적인 3상 전류 파형과 PWM 제어기를 사용한 경우의 전류 파형을 비교한 것이다.

Fig. 6(b)와 같이 고조파 성분이 증가하면, 철손이 증가하게 된다. 철손의 계산 수식은 DC bias에 의한 철손 식을 뺀 나머지 철손 계산은 다음과 같다[7].

$$P_v = P_h + P_c + P_e$$
$$= K_h f(B_m)^2 + K_c(fB_m)^2 + K_e(fB_m)^{1.5} = K_1 B_m^2 + K_2 B_m^{1.5} \quad (2)$$

여기서,

* B_m: the amplitude of the AC flux component
* f: the frequency
* K_h: the hysteresis core loss coefficient
* K_c: the eddy-current core loss coefficient
* K_e: the excess core loss coefficient.

$K_1 = K_h f + K_c f^2$

$K_2 = K_1 f^{1.5}$

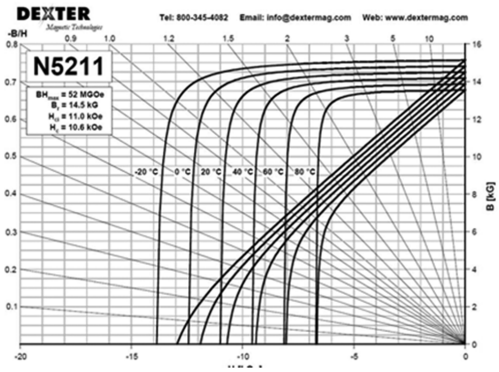
강판 1장의 도전율과 두께를 감안한 K_c 값은 다음과 같다.

$$K_c = \pi^2 \cdot \sigma \cdot \frac{d^2}{6} \quad (3)$$

수식에 나타난 바와 같이 주파수 성분이 철손과 밀접한 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

(3) 모터 열해석

모터가 구동할 때에 다양한 손실이 발생하게 된다. 대표적으로 철손과 동손, 그리고 영구자석의 도전율에 따른 와전류 손실 및 베어링 손실 등이 있다. 이 손실들은 모두 열로 변화하기 때문에 모터의 발열이 이슈가 된다. 철손과 영구자석의 와전류 손실은 전자기장 CAE 툴로부터 구할 수 있다. 하지만, 동손의 경우 소선까지 감안한 손실을 구하기는 어렵다. 이유는 소선들을 모두 그려 넣을 수가 없기 때문이다. 따라서, 정확한 동손을 구하기 위해서는 권선의 저항값을 알아야 한다.

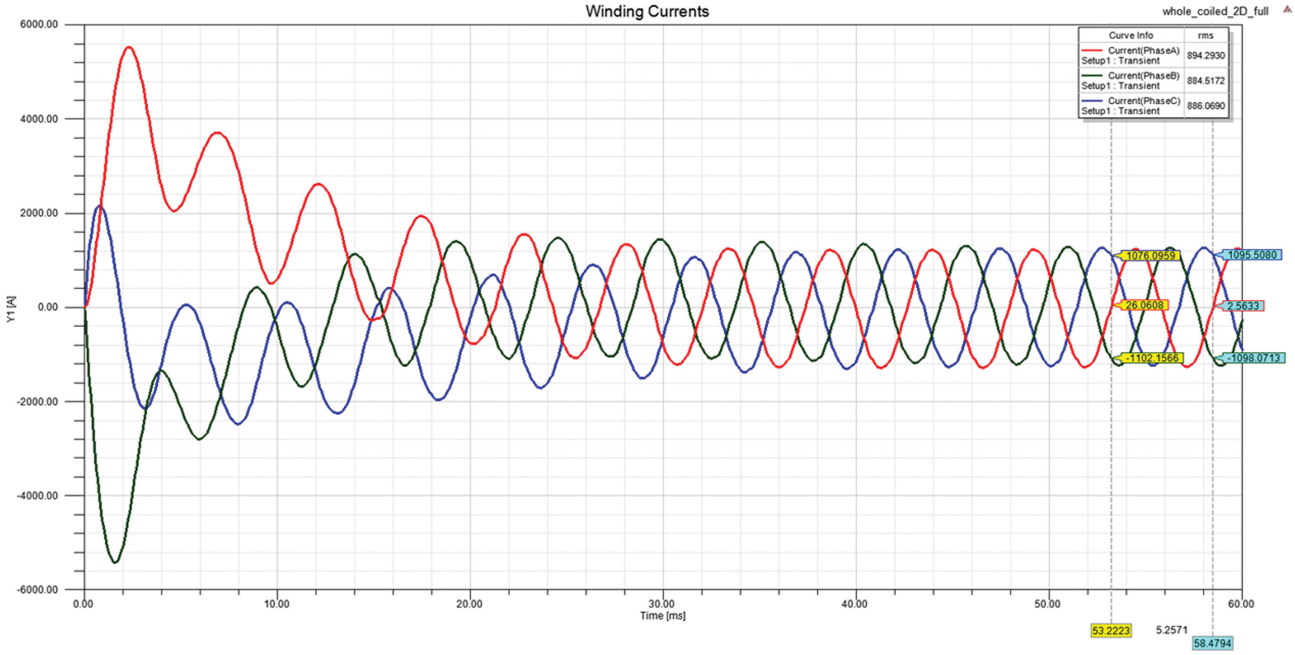


Nd-Fe-B

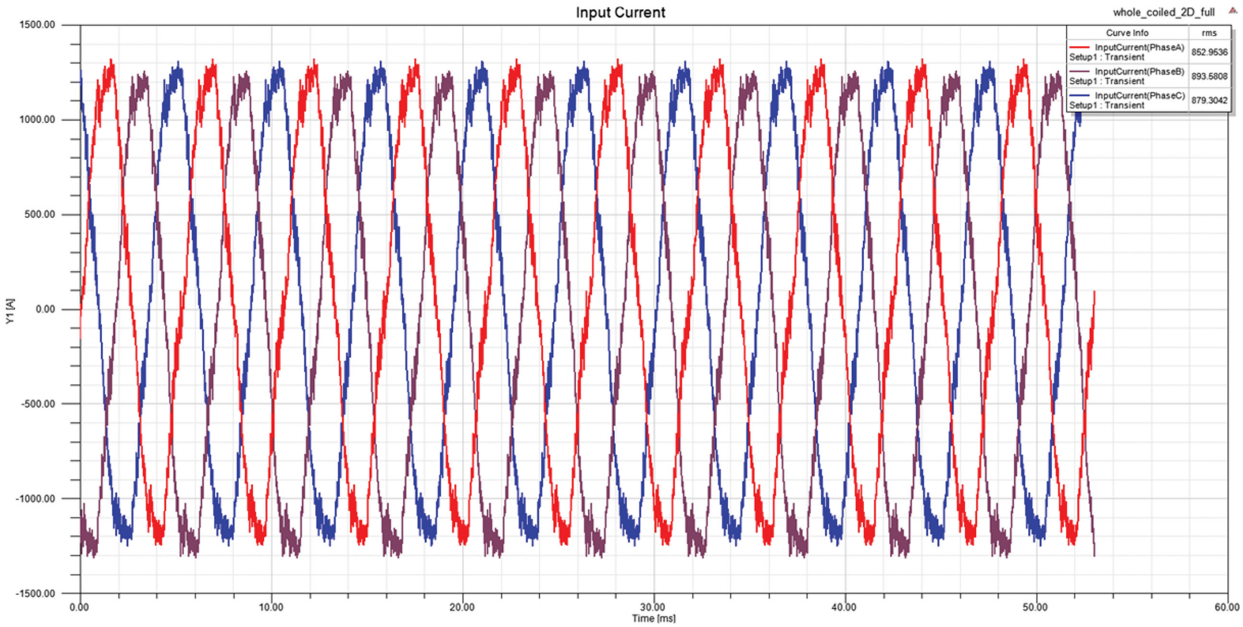
DEXTER Magnetic Technologies

Grade	Maximum Energy Product BH_{max}	Residual Induction B_r	Minimum Intrinsic Coercivity H_{cJ}	Coercivity H_c	Maximum Operating Temp T_{mo}	Curie Temp T_c	Coefficient Induction [20-150 °C] α	Coefficient Coercivity [20-150 °C] β
	MGOe	kG	kOe	kOe	°C	°C	% / °C	% / °C
N5211	52	14.5	11	10.6	50	310	-0.12	-0.65
N5011	50	14.3	11	10.6	50	310	-0.12	-0.63
N4811	48	13.9	11	10.6	50	310	-0.12	-0.63
N4511	45	13.6	11	10.5	50	310	-0.12	-0.63
N4812	48	14.0	12	11.4	80	310	-0.12	-0.63
N4512	45	13.5	12	11.3	80	310	-0.12	-0.63
N4212	42	13.0	12	11.2	80	310	-0.12	-0.63
N4012	40	12.8	12	11.1	80	310	-0.12	-0.63
N3812	38	12.4	12	10.9	80	310	-0.12	-0.63
N3512	35	12.0	12	10.8	80	310	-0.12	-0.63
N5014	50	14.2	14	12.6	80	310	-0.12	-0.63

Fig. 5. Magnet data sheet.



(a) Ideal current waveform using equation



(b) Current waveform using PWM controller

Fig. 6. (Color online) Current waveform using equation and PWM circuit.

이와 같은 손실에 의한 모터의 발열을 해석하기 위해서 Fig. 7과 같이 전자장과 열유동 해석을 연계하여 해석하는 것이 필요하다. 구조 해석 툴에서 제공하는 일반 열전달 해석으로 하려면 정확한 열전달 계수값을 알아야 한다. 이 데이터를 구하기 어렵기 때문에 열유동 해석을 이용하는 것이다. 또한, 모터의 쿨링 자켓을 포함하여 냉각 채널과 외부 유동까지 고려하여 모터 온도 특성을 구하게 된다.

이 프로세스를 1-way 방식으로 진행하면 온도에 따른 전자장 변화를 볼 수 없기 때문에 열 평형을 이룰때까지 2-way 방식으로 해석을 진행해야 한다. 온도 데이터를 전자장 해석에서 받아들여 재질 특성들이 바뀐 온도로 반영되어 해석하고, 이 때의 손실들을 다시 유동해석을 하면서 이런 폐루프

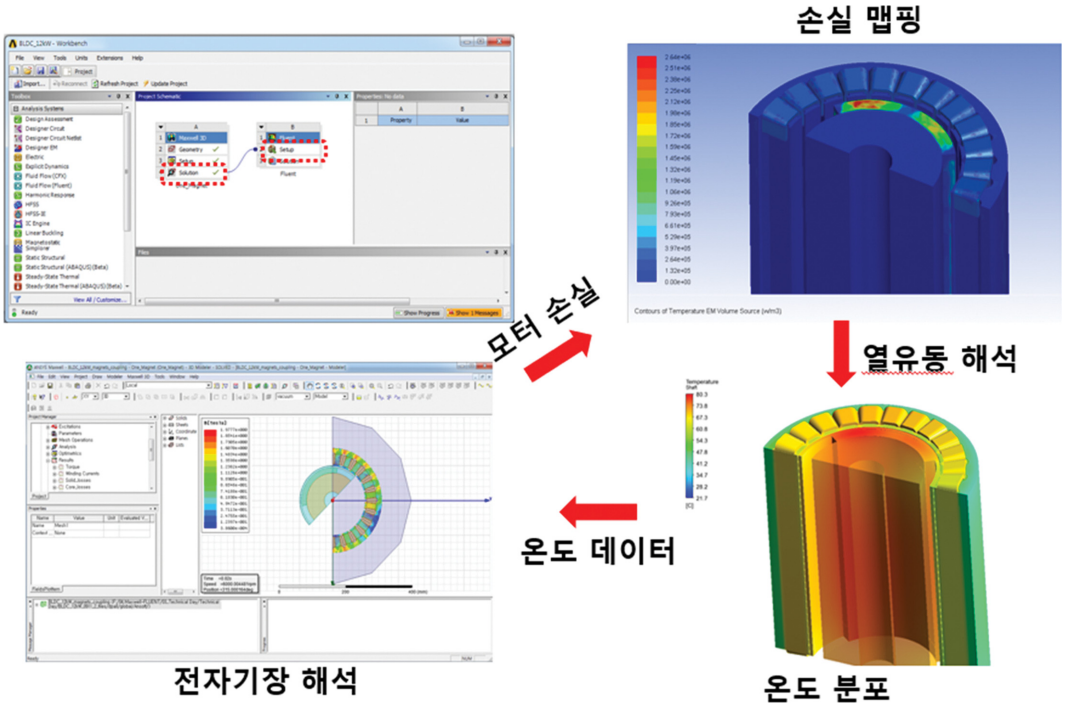


Fig. 7. (Color online) Electromagnetic-thermal fluid coupling analysis process.

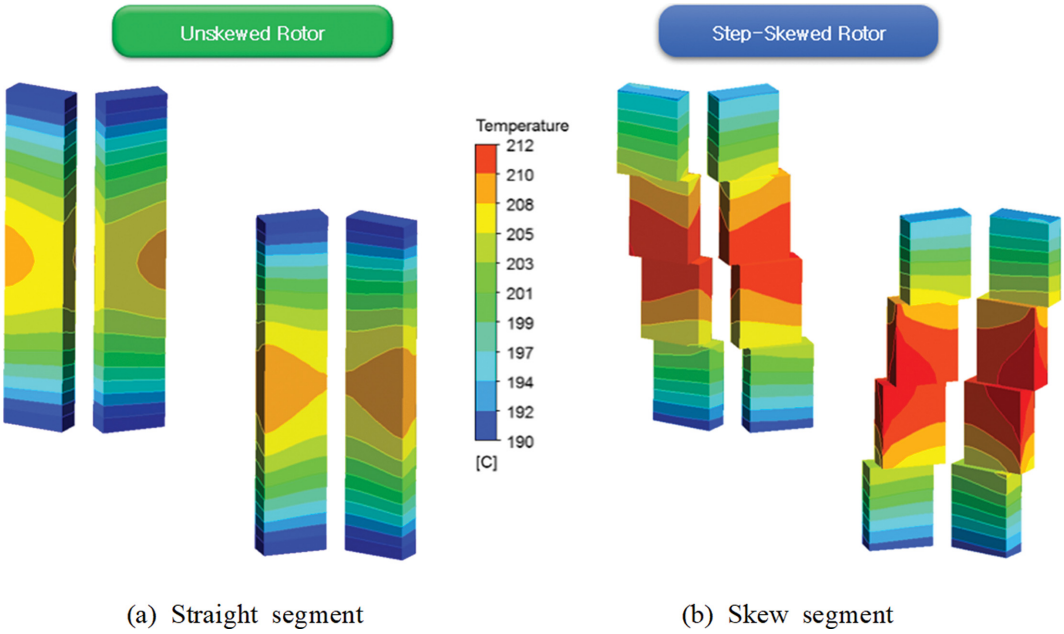


Fig. 8. (Color online) Temperature distribution of magnets of EV traction motor.

를 온도 변화가 평형을 이룰때까지 반복 해석하는 것이 필요하다.

Fig. 8은 이과 같은 과정을 거쳐서 얻게된 구동 모터의 영구자석 온도 분포이다. 구동 모터의 영구자석은 한 개의 자석을 사용하지 않고, 분할(segment) 자석으로 사용한다. 이유는 와전류 손실을 줄이기 위해서이다. 분할된 자석을 일자로 붙여서 사용하지 않고, (b)의 그림처럼 skew를 주는 경우가 많다. 이 때, 주의할 점은 분할된 자석간에 절연을 고려해야 한다. NdFe 계열이나 SmCo 계열의 자석을 사용하는 경우는 도전율을 가지고 있기 때문이다.

또한, 모터는 열에 의해 Fig. 9와 같이 열변형을 가져오게 된다. 이를 구하기 위해서 열유동 해석과 구조해석의 연성 해

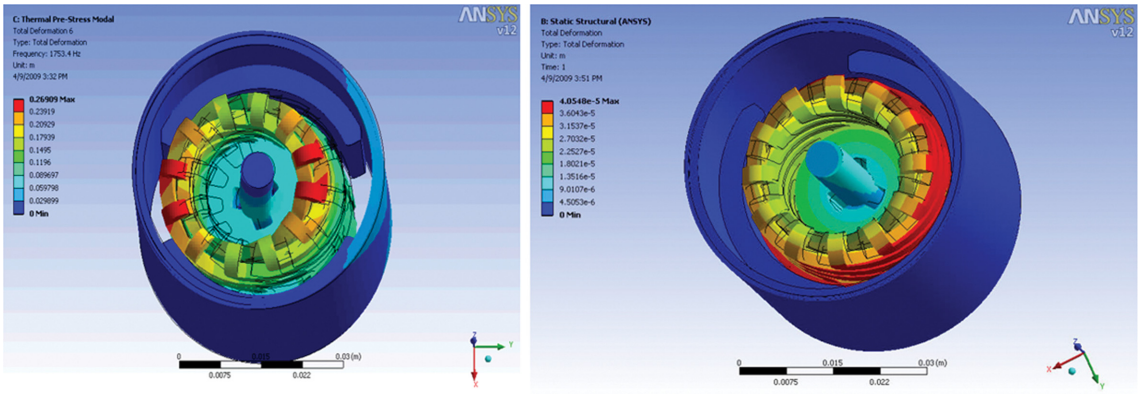


Fig. 9. (Color online) Thermal deformation of motor.

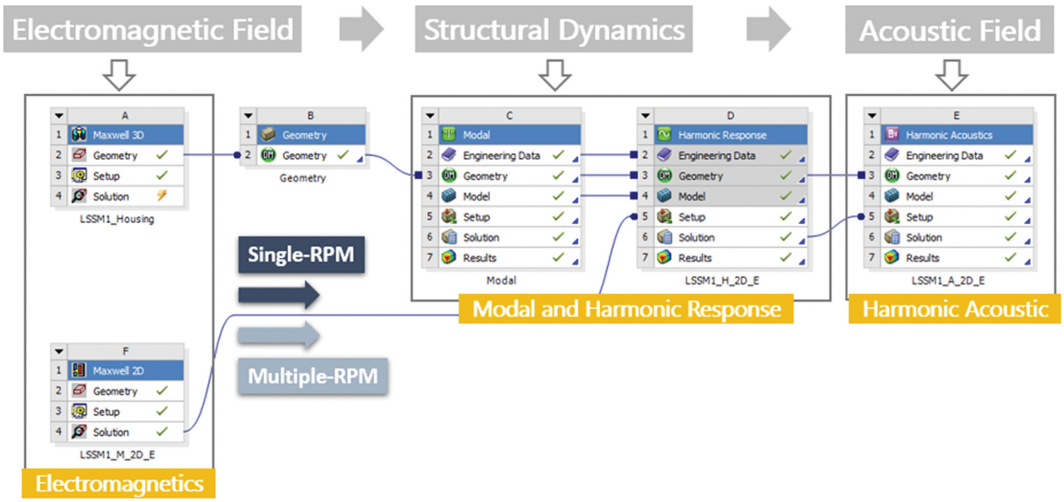
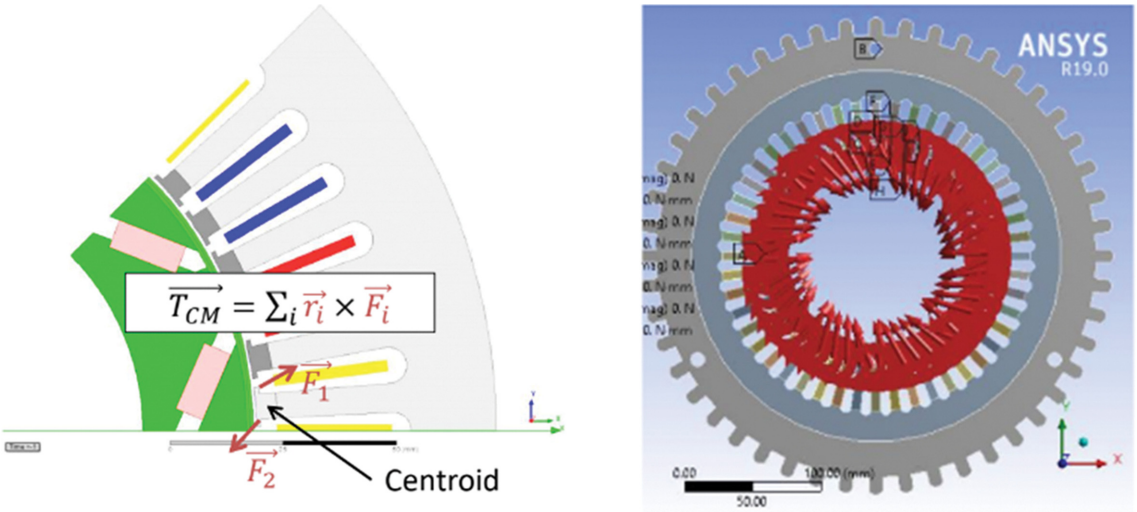


Fig. 10. (Color online) Electromagnetic-vibration/acoustic analysis process.



(a) Electromagnetic Force Extraction on the Stator Teeth

(b) Mapping from Electromagnetic to Mechanical

Fig. 11. (Color online) Electromagnetic force on the stator teeth.

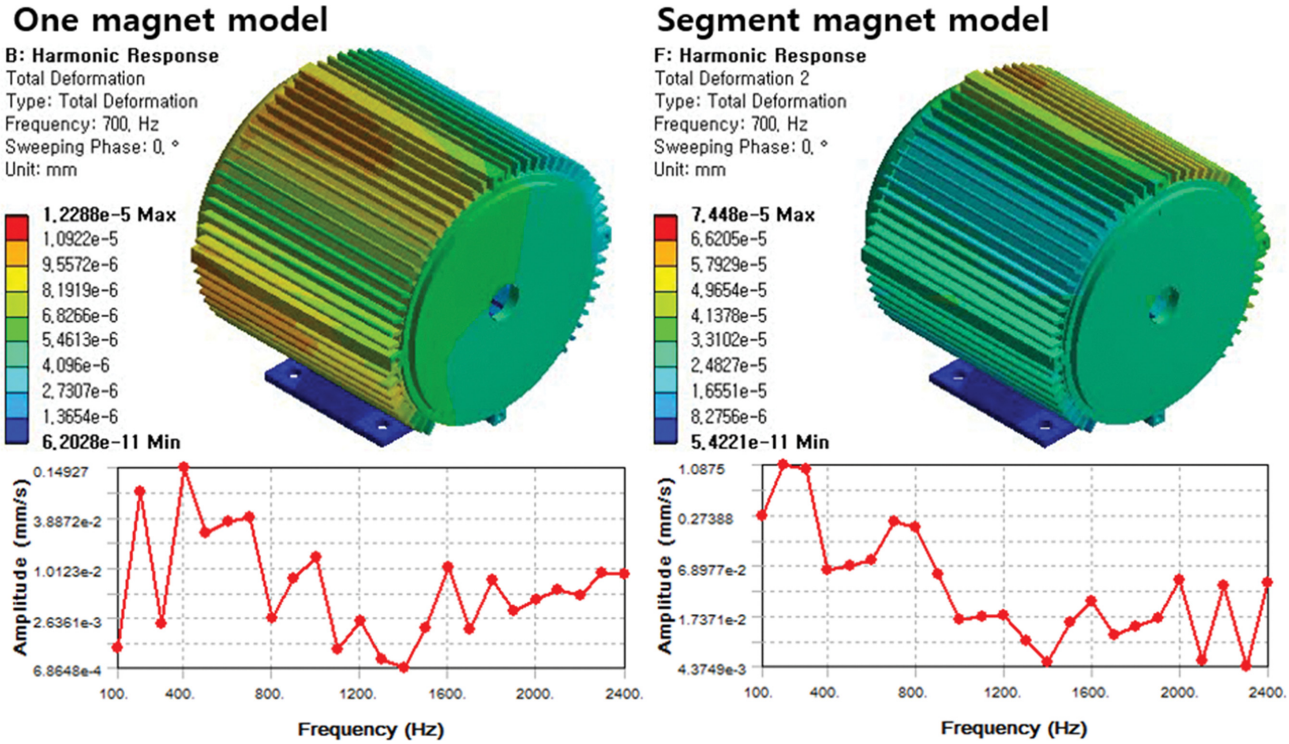


Fig. 12. (Color online) Harmonic response results.

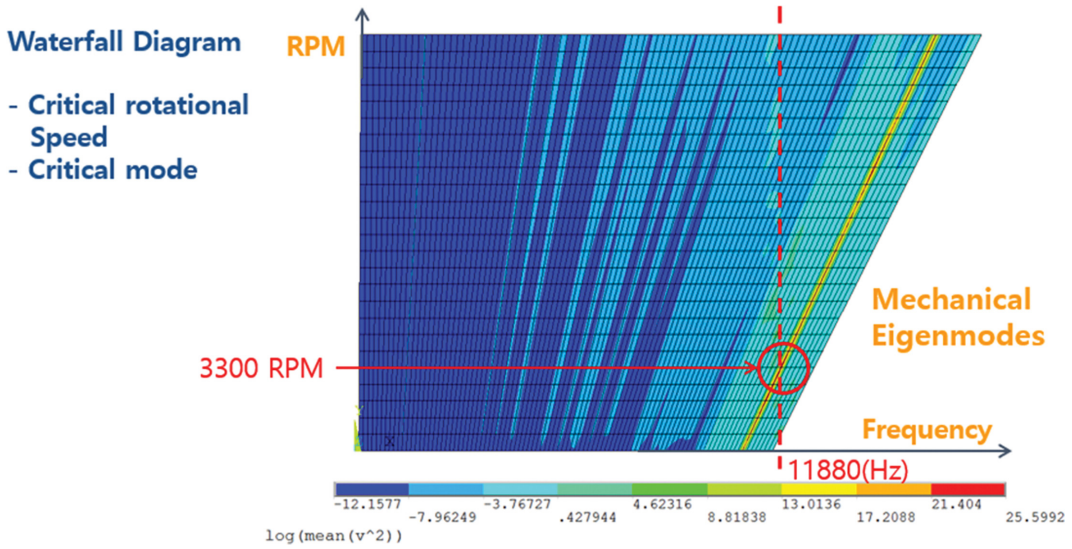


Fig. 13. (Color online) Waterfall diagram.

석이 필요하다.

(4) 모터 진동 소음 해석

모터의 Stator 끝단에서 전자기력(Electromagnetic Force)이 불균형을 이루게 되어 모터가 진동하면서 소음을 일으키게 된다. 특히, 모터가 회전할 때에 정가운데 회전축을 유지하면서 회전하지 못하고 편심이 발생하는데, 이 편심에 의해 전자기력은 더 불균형이 증가하게 된다. 이것을 CAE 툴로 확인하기 위해서는 Fig. 10과 같은 해석 과정이 필요하다. 모터의 구조/진동/음향 해석을 위해서는 Fig. 11과 같이 Stator edge에서 Radial Force와 Tangential Force를 구하고, 이를 구조 해석툴과 맵핑한다[8]. 다만, Ansys 제품에서는 이를 자동으로 맵핑해준다.

Fig. 12는 하모닉 응답 해석을 통하여 전자기력에 의한 가진력을 주파수 영역에서 구한 것으로, 자석이 하나로 이루어

진 경우와 분할 자석을 사용한 경우의 결과가 다름을 보여준다. 진동 해석으로부터 구한 음향 해석의 결과로 Fig. 13과 같은 Waterfall diagram을 얻을 수 있다.

III. 결　　론

위에서 소개한 모터 구동 시스템 개발 프로세스를 기반으로 전기자동차 기술 개발은 1회 충전 주행거리 향상을 위한 구동시스템의 평균효율 향상, 출력밀도 향상, 희토류 영구자석 사용량의 최소화, 권선(코일)의 일체화, 전동기/인버터/감속기의 일체형 구동 시스템화가 주요 산업적 이슈이다. 특히, 친환경자동차 분야에서 구동용 모터는 소형화, 경량화, 고효율화가 요구로 영구자석을 이용한 모터의 사용이 지속적으로 증가하고 있다. 또한 에너지 저감 및 환경 친화형 녹색성장 사업에서 화두가 되고 있는 친환경차량에 구동모터로 영구자석 모터가 적용되면서 영구자석 모터에 대한 중요성은 더욱 부각되고 있다. 영구자석 모터를 개발하는데 있어 향후적으로 궁극적인 전기자동차의 활성화를 위해 필요한 기술은 소재기술 + 설계기술 + 제작기술의 융합, 즉 일체화된 개발 시스템의 구축일 것이다.

마지막으로 영구자석 모터의 개발 트렌드를 소개한다. *d-q* 축 등가회로를 이용한 영구자석 동기 모터의 토크 T는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T_m + T_r = P_n \Psi_d i_q + P_n (L_d - L_q) i_q i \tag{4}$$

수식(4)에서 T_m은 마그네틱 토크, T_r은 릴럭턴스 토크, P_n는 극쌍수, Ψ_d는 영구자석에 의한 쇄교자속, L_d 및 L_q는 dq축상에서의 인덕턴스, 그리고 i_d 및 i_q는 dq축상에서의 전류를 나타낸다. 영구자석 동기모터의 성능은 회전자의 자석 배치에 따라 속도, 출력 및 효율 등이 달라지며, 이는 L_d 및 L_q의 차이로 기인한다. Fig. 14과 같이 $L_d = L_q$의 경우는 회전자에 표면에 자석이 부착된 형태로, SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Machine, 표면형 영구자석 동기모터)이라 불린다. 또한 $L_q > L_d$인 경우는, 회전자의 내부에 자석이 부착된 형태로, IPMSM(Internal Permanent Magnet Synchronous Motor, 매입형 영구자석 동기모터)라 불린다. SPMSM은 코깅 토크 및 토크리플이 적어 높은 위치 정밀도가 필요한 로봇 액츄에이터, 조향감이 매우 중용한 품질 인자인 전동식 조향장치 모터로 주로 사용된다. 반면 IPMSM은 마그네틱 토크 뿐만 아니라, 릴럭턴스 토크도 사용할 수 있기 때문에, 고속

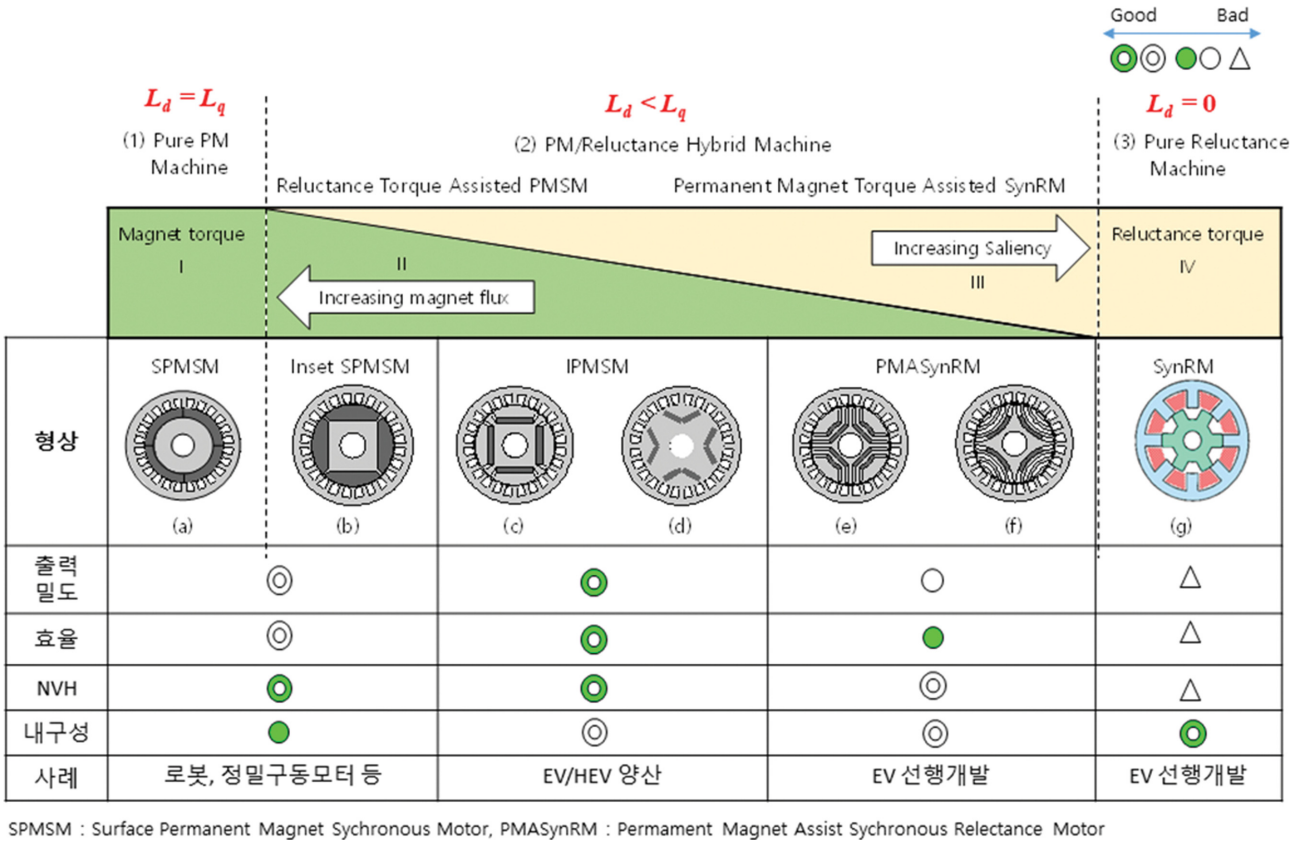


Fig. 14. (Color online) Permanent magnet synchronous motor type [9].

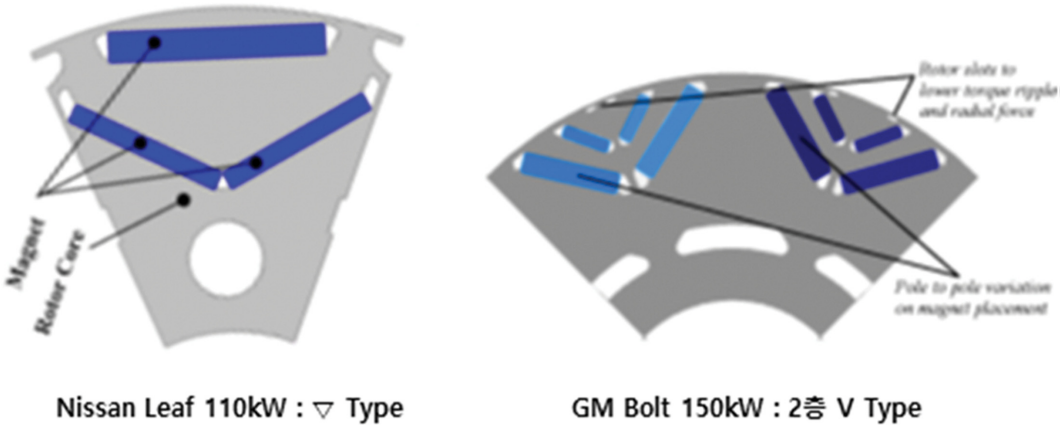


Fig. 15. (Color online) Development example of IPMSM for EV traction motor [10,11].

운전이 가능하다. 또한 자석 사용량을 줄일 수 있는 장점이 있기 때문에, EV 모터에서 주로 적용되어 양산 중에 있다.

EV 모터의 선행 연구 사례로는 릴럭턴스 토크를 더욱 적극적으로 사용하여 영구자석 사용량을 줄이는 PMASynRM (Permanent Magnet Assist Synchronous Machine) 이 최근 주목을 받고 있다. 또한, 릴럭턴스 토크만을 사용하는 SRM (Switched Reluctant Machine)이 있으나, NVH로 인해 현재 EV 구동모터로 양산 사례는 보고되지 않았다. SRM은 주로 NVH 규제가 심하지 않은 건설기계, 가정용 청소기에 적용되고 있다. 최근에는 작동이 빈번하지 않은 EV용 Parking Actuator에 사용되고 있다.

Fig. 15은 IPM 방식의 모터를 사용한 대표적인 EV 전동기이다. Nissan Leaf의 경우, 자석을 ∇ Type으로 배치하였고, GM Bolt의 경우 2층 V Type으로 각각 배열하였다. 각 제조사 마다, 로터 자석 배치 형상에 대한 특허를 등록하였고, 주 목적은 토크 증대 및 토크리플 저감이다.

Fig. 16는 PMASynRM 개발 사례이다. BMW i3의 경우, 자석을 2층으로 수평 배열하고 자석 주위로 다수 개의 자속장벽(Flux Barrier)를 설치하여, 릴럭턴스 토크를 적극 사용하였다. Mavel사의 경우 자석을 3층으로 배열하였고, 자석 장벽을 BMW i3에 비해 더욱 적극적으로 사용하였다. 현재 이 모터는 선행 연구 중에 있다. PMASynRM의 경우, IPMSM 대비 자석을 적게 사용하는 장점이 있으나, 역기전력의 THD 증가로 인해, 토크리플이 악화가 되는 단점이 있다. 향후 PMASynRM의 토크리플 저감 설계도 기대되고 있다.

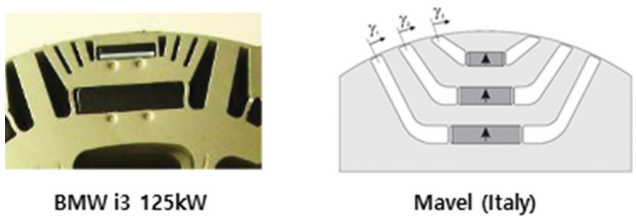


Fig. 16. (Color online) Development example of PMASynRM for EV traction motor [12,13].

Fig. 14과 같이 현재 EV 전동기의 대부분은 IPMSM방식을 사용한다. IPMSM에서 사용하는 영구 자석은 가격의 변동이 심한 희토류 자석을 사용한다. 희토류 자석 사용량을 줄이기 위해, Fig. 16와 같이 PMASynRM을 사용한 연구가 현재 개발 중이다. 또한 영구자석을 사용하지 않은 예로 Tesla의 유도기가 있으며, 프랑스 르노의 ZOE는 계자권선형 전동기를 사용한다. 이러한 사례에서는 영구자석을 사용하지 않아 가격 저감의 장점이 있으나, 유도기의 경우 영구자석 전동기 대비 출력밀도 및 효율 감소의 단점이 있다. 계자권선형 전동기의 경우, 회전자의 자속생성을 위해 브러쉬 및 슬립링을 사용하는데, 브러쉬 및 슬립링의 마모로 인한 신뢰성 문제 및 장착 공간의 증대 등에 대한 문제가 있다.

References

[1] E. Lee and I. Kim, KIEE **45**, 11 (1996).
[2] T. Kim, Daegu Mechatronics & Materials Institute, Report on technology development procedure and evaluation method for driving electronic components of vehicle (2012).
[3] J. Hong and J. Huh, KIEE **59**, 20 (2010).
[4] ANSYS Twin Builder 2021 R1 EV example (2021).
[5] ANSYS Maxwell 2021 R1 Help (2021).
[6] https://www.dextermag.com/products/permanent-magnets/nd-magnets-n5211/ (2021).
[7] ANSYS Maxwell 2021 R1 Help - Technical Note (2021).
[8] ANSYS Solutions for Electric Machine NVH, Paul Lausen (2021).
[9] Y. Murata and S. Morimoto, Design and control of IPMSM, ohm express (2001).
[10] G. Maiki, SAE International, doi : 10.4271/2018-01-0461 (2016).

[11] F. Momen, K. M. Rahman, Y. Son, and P. Savagian, SAE International, doi : 10.4271/2016-01-1228 (2016).
[12] T. Burress, Oak ridge national labortory, URL https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/06/f32/edt006_burress_2016_o_web.pdf (2016).
[13] B. Gaussens, J. Bosson, and A. Adelli, International conference on electrical machines and systems (2017).