



가솔린 엔진에서 저압방식 배기가스 재순환 시스템의 밸브 모터 성능 저감 현상 예측을 위한 수치적 연구

김정현¹⁾ · 주강민²⁾ · 김영권³⁾ · 박정수^{*1)}

조선대학교 기계공학과¹⁾ · 조선대학교 기계공학과 대학원²⁾ · 코렌스글로벌 미래사업전략팀³⁾

Numerical Study on the Prediction of Valve Motors Performance Degradation in a Low Pressure-Exhaust Gas Recirculation System for Gasoline Engines

Jeonghyeon Kim¹⁾ · Kangmin Ju²⁾ · Youngkwon Kim³⁾ · Jungsoo Park^{*1)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

²⁾Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

³⁾Future Business Strategy Team, KORENS Global, 116 Eogokgongdan-ro, Yangsan-si, Gyeongnam 50591, Korea

(Received 12 March 2025 / Revised 14 April 2025 / Accepted 18 April 2025)

Abstract : Low Pressure-Exhaust Gas Recirculation(LP-EGR) is a combustion technology designed to reduce NOx emissions in internal combustion engines. However, the DC motor used to control the EGR valve undergoes performance degradation due to the extreme environmental conditions within the EGR system. This study numerically investigated the performance degradation of the DC motor over time at temperatures of 25 °C, 160 °C, and -20 °C. A 0D mathematical model was developed to predict performance degradation and validated using convective heat transfer coefficients obtained from continuous current test results provided by KORENS Global. In particular, the time required to reach a steady-state temperature was determined based on the inverse relationship between the heat transfer coefficient and the thermal time constant. The results showed faster stabilization at -20 °C and accelerated performance degradation at 160 °C. During maximum output operation, temperature distribution was visualized through CFD analysis using CONVERGE, which revealed the occurrence of thermal stress at the stator-rotor interface.

Key words : Computational fluid dynamics(전산 유체 역학), Continuous rated current(연속 허용 전류), Convective heat transfer coefficients(대류 열전달 계수), Performance degradation(성능 저감), Thermal time constant(열 시간 상수)

Nomenclature

- CFD : computational fluid dynamics
- DC : direct current
- FEA : finite element analysis
- GDI : gasoline direct injection
- LP-EGR : low pressure-exhaust gas recirculation
- LPTN : lumped parameter thermal network
- NOx : nitrogen oxide

1. 서론

지구온난화와 대기오염 문제가 가속화되면서 수송 산업은 주요 온실가스 배출원으로 지목되고 있다. 이에 따라 여러 선진국을 중심으로 자동차 배기가스 규제가 강화되면서 자동차 산업에서는 후처리 기술인 Three-Way Catalyst(TWC), Selective Catalytic Reduction(SCR)과 연소 과정 기술인 Exhaust Gas Recirculation(EGR) 등을 적용하여 배기가스를 저감하기 위해 노력하고 있다.¹⁻³⁾ 대표적으로 EGR 기술은 배기가스 일부를 EGR valve를 통해 재순환시켜 연소실 내 O₂ 농도를 낮추는 희석 효과와 연소

*Corresponding author, E-mail: j.park@chosun.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

온도 상승을 억제하는 열적 효과를 통해 Nitrogen Oxide (NOx)를 효과적으로 줄인다. 이때 EGR rate는 엔진 부하 조건에 따라 달라지므로 이를 정밀하게 제어하기 위한 EGR valve actuator가 필수적으로 사용된다.^{4,6)}

EGR valve actuator로는 Direct Current(DC) 모터가 높은 토크 구동력, 높은 정밀도와 저렴한 가격으로 인해 주로 사용되고 있다. 하지만 EGR valve는 고온의 배기가스 라인에 인접하여 간접적인 열 부하를 받으며, 겨울철에는 극심한 저온 환경에 노출되어 작동하게 된다. 이러한 EGR valve의 열악한 작동 환경요인은 모터에 지속적인 열 부하를 누적시켜 모터의 성능 저감(Performance degradation)으로 이어질 수 있다.^{7,8)}

성능 저감은 EGR system의 오작동을 유발하여 엔진 성능 저하 및 배기가스 배출량 증가 등의 차량 이상으로 이어질 수 있으며, 과도한 열이 가해질 경우 모터 내부 권선(Coil)의 절연과피를 일으켜 권선 단락을 일으킬 수 있어 Valve actuator인 DC 모터의 안정적인 작동을 보장하기 위한 연구가 필요하다.^{9,10)}

특히 모터의 작동 환경은 모터 설계 시 핵심 고려 요소 중 하나이며, 표준 모터 절연 시스템의 온도 수명 곡선에 따르면 권선 온도가 10 °C 상승함에 따라 절연 수명이 절반으로 감소하는 것으로 조사되었다. 또한 85 °C와 105 °C의 환경 조건에서 DC 모터의 가속수명시험을 진행한 연구 결과에 따르면 85 °C에 비해 105 °C에서 수명이 약 1/4 정도로 감소되었으며 이는 모터의 작동 환경이 장기적인 성 및 수명 저하에 결정적인 영향을 미친다는 점을 시사한다.^{11,12)}

성능 저감을 방지하기 위해 모터의 열관리 및 예측에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 Yang 등¹³⁾은 전기 기계의 손실 분류와 열분석 접근 방식을 논의하였고 전기 기계의 온도 상승은 재료의 열적 특성에 의해 제한되며, 특히 손실 비율의 70 % 이상은 I²R 손실이 가장 큰 비중을 갖는 것을 보여주었다. I²R 손실이란 전류의 공급과 도체 내부 저항의 곱으로 나타내며, 모터에 전압이 가해졌을 때 Coil의 자유 전자들이 원자와 충돌하며 운동에너지를 열에너지로 변환되는 Joule heating을 통해 발생한 손실이다. 또한 모터의 열분석 방식으로 Lumped Parameter Thermal Network(LPTN)과 Finite Element Analysis (FEA) 그리고 Computational Fluid Dynamics(CFD)를 비교 분석하였을 때 CFD 분석 방법이 가장 정확하게 온도를 예측할 수 있음을 확인하였다.

모터의 성능을 예측하기 위한 연구들도 진행되었는데, mNm 단위의 작은 출력을 내는 소형 DC 모터에서는 동력계를 통해 기계적 출력을 측정하는 데 어려움이 있어 동일한 특성의 두 개의 모터를 직결하여 효율 예측을

위한 연구가 진행되었다. 이는 소형 모터는 실험을 통해 측정되기 어려워 해석적 접근 방법이 필요함을 보여주며 Yoon 등¹⁴⁾은 100 W급 DC 모터의 효율을 손실계수가 포함된 계산식과 부하 시험 결과의 높은 정확도를 통해 시뮬레이션 효율 수식을 검증하여 효율맵과 전압맵을 도출하였다.¹⁵⁾ 기존 연구들은 EGR valve actuator인 소형 DC 모터의 성능을 예측하기 위해 수학적 모델을 통한 수치해석적 접근 방식의 필요성을 제시하였다.

특히 내연기관에서는 연속 허용 전류를 설정할 수 있어 인가 전류 및 작동 시간에 따른 모터의 열적 상태를 예측하는 것이 중요하다. 그러나 시간 및 환경조건에 따른 모터 온도를 분석하고, 이를 바탕으로 성능 변화를 파악하는 연구는 아직 미흡한 실정이다. 따라서 시간, 환경 조건, 인가 전류에 따른 모터의 열 특성을 정량화하고 모터의 성능 저감을 예측할 수 있는 수치적 모델을 구축해야 할 필요가 있다.

본 연구는 LP-EGR 내 작동하는 DC 모터의 성능 변화를 극한 조건의 주변 환경을 고려하여 시간에 따라 예측할 수 있는 수학적 모델을 제안하였다. 특히, 실험 데이터에서 도출된 대류 열전달 계수를 반영하여 모델의 예측 정확도를 검증하였으며, CFD 해석을 통해 모터 내부의 온도 분포도를 확인하였다. 연구의 주요 목표는 다음과 같다.

- 1) 극한의 환경 조건에서 시간과 전류에 따른 모터의 성능 저감을 정량적으로 예측할 수 있는 수학적 모델을 구성하고자 한다.
- 2) 구축된 모델을 활용하여 모터의 환경조건에 따른 온도 변화 및 성능 저감의 경향성을 파악하고자 한다.
- 3) CFD 해석을 통해 모터 내부의 온도 분포를 시각화하고 각 구성 요소별 국부적인 온도를 확인하고자 한다.

본 연구 결과는 EGR 시스템의 안정성 및 최적화에 활용될 수 있으며, 추가적인 DC 모터의 기술 고도화를 검토해 볼 수 있을 것으로 판단된다.

2. 방법론

2.1 대상 모터 작동 조건 및 특성

본 연구에서 사용된 모터는 IGARASHI社의 SG 2846 DC 모터이며 대상 모터는 LP-EGR이 장착된 1.6 L급 4기통 Gasoline Direct Injection(GDI) 엔진의 EGR cooler 후단 밸브에 부착되어 구동되며 이는 배기파이프 근처에 장착하여 지속적인 열적 부하를 받는다. 모터의 권선의 소재는 AIW 폴리이미드이미드선이 적용되었으며 C중 절연 등급으로 180 °C 이상의 온도에서 버틸 수 있는 절연체가 사용되었다.

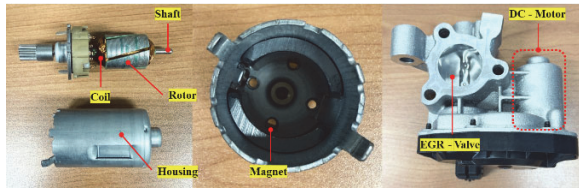


Fig. 1 Configuration of LP-EGR and DC motor

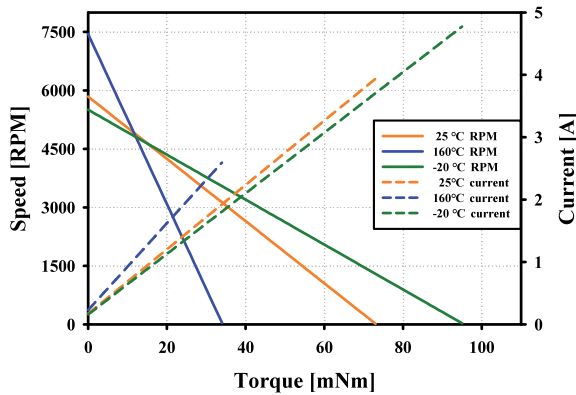


Fig. 2 Motor T-N-I curve through continuous current test

Table 1 DC-Motor specifications and optimal operating conditions

Item	Unit	Value
Rated voltage	V	12
Rated load torque	mNm	22
Rated load current	A	1.3
Rated load revolution	RPM	4,086
No load revolution	RPM	5,842
Outer diameter of the motor	mm	28
Axial length of the motor	mm	68
mass	g	101

Table 2 LP-EGR specifications

Item	Unit	Value
LP-EGR Heat exchanger area	m ²	0.36
Number of tube	-	4
Fine type	-	Wavy fin
Coolant type	-	Antifreeze

모터의 구성요소와 모터가 적용되는 EGR valve 형상은 Fig. 1과 같다. 또한 모터와 LP-EGR의 제원을 Tables 1, 2에 나타내었다. 모터는 환경 챔버 내 제어된 온도 조건

에서 온도 상승이 정지될 때까지 전류를 점진적으로 증가시키는 연속 전류 시험을 통해 실행되었으며 그 결과 모터의 토크, 속도, 전류의 관계를 나타내는 성능 지표인 T-N-I 곡선이 Fig. 2와 같이 도출되었다.

특히 160 °C의 고온 조건에서 상온 및 저온 조건 대비 무부하 조건에서 회전수가 높은 현상이 관찰되었는데, 이는 온도 상승에 따른 권선 저항 증가로 인해 동일 전압에서 흐르는 전류가 감소하였기 때문이다. DC 모터는 일반적으로 전류와 회전수가 반비례하고, 전류와 토크는 비례하는 특성을 가지므로 감소한 전류로 인해 회전수가 상대적으로 상승하는 동작 특성이 반영된 결과로 판단된다.

2.2 성능 저감 예측 모델 수립

모터의 열 유동 해석에는 일반적으로 CFD 기법이 주로 사용되고 있으나 복잡한 형상 정의 및 경계 조건 설정, 계산 시간이 길어 고성능 컴퓨터가 요구되는 한계점이 존재하여 설계 초기 단계나 시스템 수준 분석에는 한계가 있다. 이에 본 연구에서는 빠른 계산 속도를 통해 해석관적인 모델링이 가능한 0D 기반의 성능 저감 예측 모델을 제안하였다. 0D 해석은 복잡한 시스템을 간단하게 모델링하여 짧은 시간 내에 결과를 얻을 수 있어 효율적인 해석이 가능하며 비용 절감이 가능하다는 장점이 있다. 본 연구에서는 0D 해석을 통해 전체적인 모터의 온도변화 메커니즘을 분석하고, 급격한 온도 상승 구간을 파악하여 다양한 시나리오의 예측이 가능한 계산식을 수립하는 것을 목표로 하였다.¹⁶⁾

모터 내부 회전운동을 담당하는 회전자(Rotor)를 감싸고 있는 권선(Coil)에 전류가 흐르게 되면 전류의 공급과 저항의 곱으로 나타낼 수 있는 I²R 손실이 일어난다. 이는 열에너지로 변환되며 최종적으로 Housing의 표면에서 자연대류를 통해 열전달이 일어나게 된다. 권선과 회전자는 매우 근접하여 열평형 상태를 이룬다고 가정하였으며, Newton의 냉각 법칙을 정리하여 식 (1)-(3)과 같이 정상상태의 온도(T_{steady})를 도출하였다. 여기서 Q는 발생하는 열량이며, I는 인가 전류, R은 권선저항, h는 대류 열전달 계수(Convective heat transfer coefficient)를, A는 모터 하우징의 표면적으로 0.004 m²가 적용되었으며, T_{ambient}는 주변 온도를 나타낸다.

$$Q = Losses = I^2 R \quad (1)$$

$$Q = hA(T_{steady} - T_{ambient}) \quad (2)$$

$$T_{steady} = \frac{I^2 R}{hA} + T_{ambient} \quad (3)$$

본 연구의 핵심인 시간에 따른 성능 저감을 파악하기 위한 지배방정식으로 열역학 제1 법칙을 바탕으로 한 1 차 선형 미분 방정식인 식 (4)가 사용되었다. 이 식은 모터의 열 모델을 단순화한 형태로 손실을 통해 발생하는 열인 $I^2 R$ 항과, 발생된 열이 시스템 내부에 저장되는 $C \frac{dT(t)}{dt}$ 항, 열이 외부로 방출되는 $HT(t)$ 항의 균형을 나타낸다. 위 식을 풀이하면 식 (5)와 같이 지수함수의 형태인 모터의 열적 한계 곡선으로 나타낼 수 있으며 이를 통해 시간에 따른 모터의 온도($T_{transient}$)를 정량화할 수 있다.

여기서 t 는 시간이며, C 는 열용량(Heat capacity)으로 손실이 일어나는 권선의 재질인 구리의 비열(Specific heat of copper)과 질량(Mass)의 곱으로 나타낼 수 있고, H 는 열전달률(Thermal transmittance)로 대류 열전달 계수와 표면적의 곱으로 나타낼 수 있다. 이때 식 (6)인 τ 는 열 시간 상수(Thermal time constant)로 열용량과 열전달률의 역수의 곱으로 표현 가능하며 물체의 온도가 변화할 때 최종 온도의 약 63.2%까지 변하는 데 걸리는 시간을 의미한다. 열 시간상수를 활용하여 급격한 온도 상승을 예측할 수 있다.^{17,18)}

$$I^2 R = C \frac{dT(t)}{dt} + HT(t) \quad (4)$$

$$T_{transient} = T_{steady} * (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + T_{ambient} \quad (5)$$

$$\tau = \frac{C}{H} \quad (6)$$

온도 상승에 따른 성능 저감을 파악하기 위해 식 (7)~(14)가 사용되었다. 모터는 전기적인 입력이 기계적 출력으로 변환되는 시스템으로 전기적 입력은 전압과 전류의 곱으로 나타낼 수 있으며, 기계적 출력은 토크와 회전각의 곱으로 나타내어 식 (9)와 같이 손실을 고려한 효율을 표현할 수 있다. 이때 온도 상승에 따른 회전자 저항 변화를 추정하는 식인 식 (10)에 식 (5)의 과도상태 온도를 적용하여 식 (11)~(12)와 같이 시간에 따른 성능 저감을 예측하였다.

예측을 위한 회전자의 저항은 DC 모터의 전기적 회로 방정식인 식 (13)을 통해 계산되었다. V 는 인가전압이며,

N 은 회전수를 나타내고, R_1 은 초기 저항, R_2 는 온도 상승 후 저항을 나타낸다. 또한 연속 허용 전류를 설정하여 시간에 따라 전류가 변화하지 않는다고 가정하여 인덕턴스 항인 $L \frac{dI}{dt}$ 를 계산에서 제외하였으며 모터가 회전할 때 자기 유도에 의해 생성되는 역기전력 e_b 는 식 (14)를 통해 계산되어 $\omega_{no load}$ 는 무부하 각속도, ω 는 시스템의 각속도이다.¹⁹⁾

$$P_{in} = VI \quad (7)$$

$$P_{out} = 2\pi \frac{N}{60} T \quad (8)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - Losses}{P_{in}} \quad (9)$$

$$R_2 = R_1 \{1 + \sigma (T_{transient} - T_{ambient})\} \quad (10)$$

$$Predictive loss = I^2 R_2 \quad (11)$$

$$Predictive Efficiency = \eta = \frac{VI - I^2 R_2}{VI} \quad (12)$$

$$V = RI + L \frac{dI}{dt} + e_b \quad (13)$$

$$e_b = \frac{V}{\omega_{no load}} * \omega \quad (14)$$

모델링된 수식을 통해 전체적인 온도 변화를 분석하고, 주변 온도에 따른 성능 변화를 파악하고자 하였다. 특히 열 시간상수를 통해 성능 저감을 조기에 파악하여 연속 허용 전류를 제시하는 것을 목표로 하였다.

2.3 3D CFD 해석 조건 설정 및 해석 과정

본 연구에서는 모터 구성요소의 온도를 정확하게 파악하기 위해 3D CFD 해석을 수행하였다. CFD 해석은 미세한 온도 변화와 열 흐름을 시뮬레이션 가능하고 특히 실험으로 파악하기에 어려운 내부 구성요소의 온도 분포를 가시화하고자 하였다. CFD 해석프로그램은 CONVERGE 3.0이 사용되었으며 CONVERGE는 열역학 및 열전달 해석에 특화되어 있는 프로그램이다. 특히 계산 과정에서 격자를 자동 생성하여 효율성이 향상되고

복잡한 형상에 대한 해석이 용이하다. 또한 직교 격자가 사용되어 유동 현상 분석에 이상적이라는 장점이 있다. 본 연구는 CONVERGE를 통해 모터의 내부 온도 분포를 시각화하고 국부적인 고온 영역을 파악하고자 하였다.

2.3.1 형상 및 격자 제어

모터의 형상은 실제 모터를 기반으로 Fig. 3(a)에 나타내었다. 밀도, 비열, 열전도도 등 주요 물성치가 적용되었으며 Table 3에 사용된 물성치를 나타내었다. 해석을 위한 격자는 Fig. 3(b)와 같으며 Base grid의 크기를 dx, dy, dz = 0.0005 m로 설정하여 총 124,434개의 정육면체 격자가 해석을 위해 사용되었다.

특히 고정자와 회전자 사이 간극 영역은 모터 내 열 전달 현상이 집중적으로 발생하는 구간으로, 해석의 정확도를 높이기 위해 식 (15)와 같은 embedding 기법이 적용되었다. 이때 Base grid는 전체 계산 영역의 기본 격자 크기이며, n은 해당 위치의 격자 세분화 수준을 의미하는 정숫값이다. n이 증가할수록 해당 영역의 격자 크기가 작아져 해석 정밀도는 향상되지만 계산 시간이 증가하게 된다. 본 연구에서 n≥2는 격자 수 급증으로 전체 시뮬레이션 시간이 비약적으로 증가하는 경향을 고려하여, 열전달 거동을 충분히 해상하면서 계산 효율을 유지할 수 있는 n값으로 1이 적용되어 계산 시간과 해석 정밀도 간의 균형을 확보하고자 하였다.

$$embedded\ grid = \triangle grid / 2^n \tag{15}$$

Table 3 Key properties of components

Item	Density [kg/m ³]	Specific heat [J/kg · K]	Conductivity [W/m · K]
Copper	8,930	385	401
Iron	7,870	447	80.2

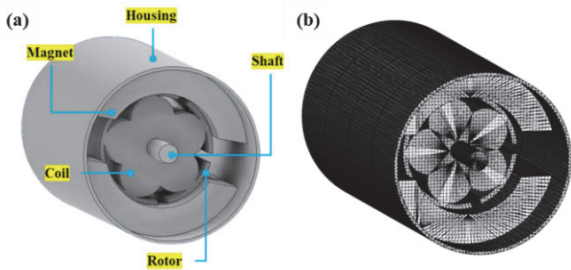


Fig. 3 (a) DC-motor layout, (b) grid domain

2.3.2 경계조건과 지배 방정식

해석에 사용된 경계 조건은 Table 4와 같으며 상온, 상압 조건의 내부 열전달 현상을 수치적으로 해석하였다. 해석에 적용되는 지배방정식은 아래 절에 나타내었으며, 모터 내부의 열전달은 에너지 평형 식(Energy euqilibrium) 식 (16)과 푸리에 열전도 법칙(Fourier’s law of conduction) 식 (17)을 통해 유도되는 열 확산 방정식(Heat diffusion equation) 식 (18), (19)를 통해 제어되며 해석 시간은 예측모델에서 급격한 온도 변화가 관찰된 10분으로 설정하였다. ΔE_{element}/Δt는 유한요소의 에너지 변화율, c는 비열(Specific heat), k는 열전도도(Thermal conductivity) ρ는 밀도(Density)이다.²⁰⁾

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{generation} = \Delta E_{element} / \Delta t \tag{16}$$

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x}, q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y}, q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} \tag{17}$$

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \tag{18}$$

$$k \nabla^2 T + \dot{q} = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \tag{19}$$

Table 4 Operating condition

Item	Unit	Value
Input power	W	23
Pressure	atm	1
Temperature	K	300
Time	min	10

2.4 변수 선정

Table 5는 본 연구에서 사용된 변수와 그 범위를 제시한다. 대기 온도(T_{ambient})는 EGR valve 내부의 극한 환경을 모사하기 위해 상온(25 °C), 고온(16 °C), 저온(-20 °C)의 세 가지 조건으로 설정하였으며, 인가 전류(I)는 정격 토크 22 mNm를 기준으로 증가하며 예측을 진행하였다. EGR valve actuator 용 DC 모터는 Valve를 정밀하게 제어하기 위해 다양한 속도 및 부하 조건 운용되지만, 모든

Table 5 Variable selection and scope

Item	Unit	Value		
T _{ambient}	°C	25	-20	160
I	A	1.3, 2, 2.5, 3.3	1.3, 2, 3, 4.2	1, 1.5, 2.5

출력 조건에서 해석을 수행하는 데에는 어려움이 있다. 이에 따라, 최대 부하가 발생하는 최대 출력 조건을 운전 시나리오로 선정하여 CFD 해석을 진행하였다.

3. 결과 및 논의

3.1 실험 결과 분석

본 연구에서는 예측 모델 및 CFD 해석의 타당성을 검증하기 위해 연속 전류 시험이 진행되었다. Fig. 4는 제어된 온도 환경 (25 °C, 160 °C, -20 °C)에서 전류를 인가하여, 주변 환경에서 전류 증가에 따른 모터의 한계온도를 나타내는 그래프이다.

이때 전류는 무부하 전류인 0.4 A 부근에서 권선이 단락될 때까지 증가하며 실험이 진행되었다. 권선 단락은 210 °C 부근에서 발생하였으며 상온에서 온도 변화율이 가장 높게 나타났다. 또한 고온에서 최대 허용 전류가 가장 낮았으며, 저온의 환경에서는 2.81 A의 가장 높은 값을

기록했다. 이는 저온 환경에서 열 발산이 용이하여 모터의 열적 부하가 감소하여 더 높은 전류를 견딜 수 있기 때문으로 판단된다. 위 실험 데이터를 바탕으로 대류 열전달 계수를 산출하여 Fig. 5에 나타내었다.

인가된 전류를 열원으로 하여 식 (2)를 적용한 결과, 대류 열전달 계수는 전류와 반비례하는 경향성을 확인하였다. 특히, 1A 이하의 저 전류 영역에서 높은 대류 열전달 계수가 확인되었는데, 이는 Fig. 2에서 확인 가능하듯이 무부하 조건에서 높은 회전수를 가지게 되어 고속 회전에 따른 주변 공기와의 강제 대류 효과가 증가하여 나타난 결과로 확인된다. 이러한 경향은 고온 조건에서 더욱 뚜렷하게 나타났으며 160 °C에서 가장 높은 대류 열전달 계수가 기록되었지만, 전류 증가에 따라 빠른 속도로 감소되었다. 연속 전류 시험을 통해 도출된 전류 상승에 따른 대류 열전달 계수를 활용하여 고정된 전류에서 성능저하를 확인할 수 있는 0D 예측 모델의 타당성을 검증하고자 하였다.

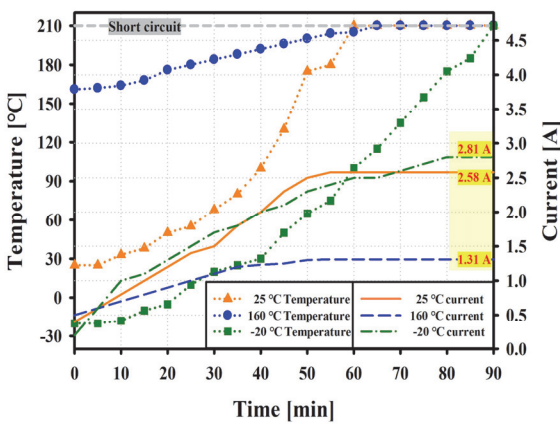


Fig. 4 Continuous current test at various ambient temperatures

3.2 해석 결과 분석

열역학 및 열전달 원리를 기반으로 모터의 성능저감을 예측가능한 모델이 수립되었다. 이 모델은 실험을 통해 도출된 대류 열전달 계수를 적용하여 신뢰성을 확보하였으며 연속 허용 전류 인가 시 주변 환경을 고려하여 시간에 따른 모터의 온도 및 성능저감을 예측할 수 있도록 설계되었다. Fig. 6(a~c)은 주변 온도 조건에서 정격전류를 기준으로 전류를 인가하여 모터의 온도 변화를 나타내는 열적 한계 곡선이다. 모터 권선의 허용 온도인 210 °C에 도달하는 전류까지 총 1,000 s 동안 예측되었으며 이를 통해 특정 전류 조건에서 모터의 안전 작동 시간을 예측할 수 있다.

상온 25 °C 환경에서 온도를 예측하여 Fig. 6(a)에 도시하였다. 온도 상승은 지수함수의 형태로 나타났으며 정격 전류의 약 2배에 해당하는 전류까지는 전류 증가에 따라 열적 평형 상태인 정상상태에 도달하는 시간이 선형적으로 증가하는 경향을 확인하였다. 특히 2.5 A 이하의 전류 범위에서는 전류 증가에 따라 정상 상태 도달 시간이 약 3배까지 지연되는 현상이 관찰되었다. 이는 대류 열전달 계수가 전류에 반비례하여 감소함에 따라 열 시간 상수가 증가했기 때문에 발생한 결과로, 모터의 작동 한계가 확장되었음을 의미한다. 3.3 A 이상의 전류에서는 250 s에서 권선이 단락되어 열 시간 상수가 반영된 정상상태 온도가 측정되지 않았다.

Fig. 6(b)은 -20 °C의 저온 환경에서 모터 온도 변화를 나타낸다. Fig. 6(a)과 유사한 경향성을 나타내며, 모터의 전류 한계가 상온 대비 약 27 % 증가하였으며 정격전류

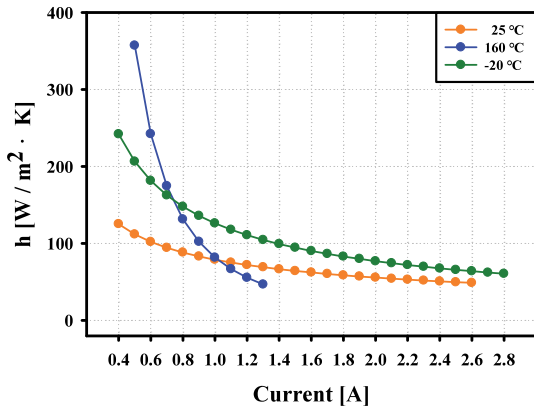


Fig. 5 Convective heat transfer coefficient by current

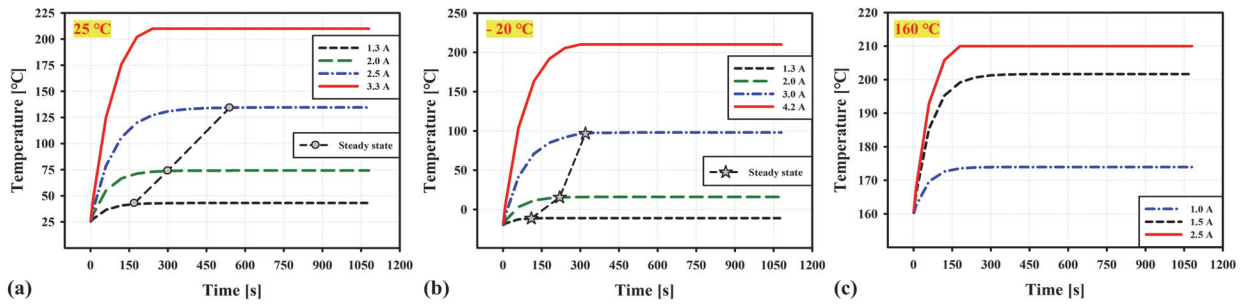


Fig. 6 Thermal behavior of a DC motor (a) $T_{ambient} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $T_{ambient} = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) $T_{ambient} = 160\text{ }^{\circ}\text{C}$

기준 2.9 A 이상의 전류를 인가할 수 있음을 보여준다. 이는 주변 환경과의 온도 차이에 의한 냉각 효과의 결과로 해석된다. 특히, 저온 환경에서 모터가 정상 상태에 더 빠르게 도달하는 것이 확인되었는데, 이는 Fig. 5의 1 A 이상의 전류 영역에서 확인된 바와 같이, 저온에서 대류 열전달 계수가 증가하여 열 시간 상수가 감소했기 때문에 생긴 결과로 판단된다. 이러한 특성은 저온 환경에서 전류 운용 범위가 확대될 수 있지만, 열 시간 상수 감소로 인해 온도 변화율이 빨라질 수 있으므로 급격한 온도 변화에 따른 시스템 운용에 주의를 기울여야 함을 의미한다.

Fig. 6(c)은 160 °C의 고온 환경에서의 모터 온도 변화를 예측한 결과이다. 정격 전류인 1.5 A에서 구동 시 권선 온도가 허용 온도 한계에 근접하여, 고온 환경에서 5분 이상 연속 작동 시 열적 손상의 위험이 높아짐을 시사하며 연속 허용 전류 2.5 A에서 단락이 일어났다. Fig. 7은 모터의 전체적인 작동 영역에서 초기 상태와 온도가 수렴되었을 때의 성능 상태를 예측 모델을 통해 비교한 결과이다. 정격 토크 22 mNm를 기준으로 25 °C에서는 5%의 효율 감소가 확인되었다. -20 °C 환경에서는 효율 감소가 확인되지 않았지만 160 °C에서는 15%의 효율 감소가 파악되어 이는 고온 환경에서 연속적인 EGR 운용 시 적절한 관리가 요구된다는 것을 의미한다.

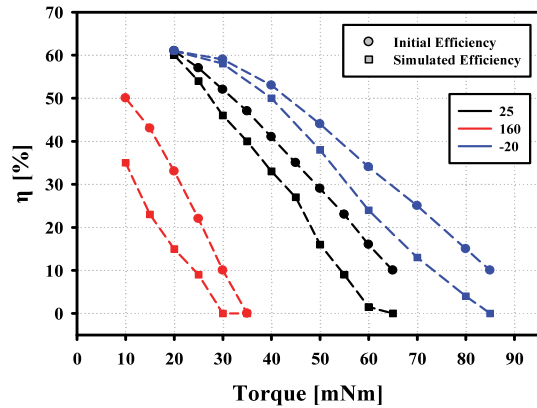


Fig. 7 Performance degradation at various ambient temperatures

모터 내부의 온도 분포를 상세히 확인하기 위해 상온에서 최대출력을 내는 시나리오로 CFD 해석이 진행되었다. 모터에 4A의 연속 허용 전류가 인가되어 15 RPM, 74 mNm의 토크로 작동하는 모터 단면의 온도 분포장을 50초 간격으로 Fig. 8과 같이 나타내었다. 250 s에서 회전자의 온도가 권선의 허용 온도인 210 °C에 도달해 권선의 단락이 발생하여 해석이 종료되었으며 해석 결과, 권선에서의 온도는 회전자 전체로 균일하게 분포되었으며, 고정자 자석의 온도는 110 °C에서 안정화되는 것을

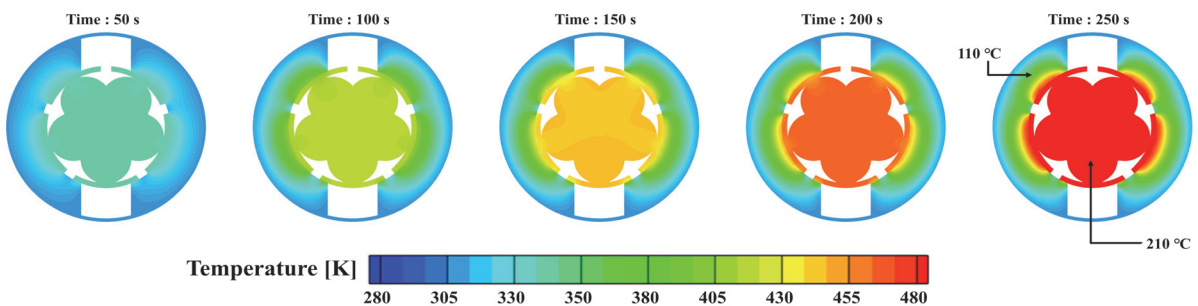


Fig. 8 Temperature distribution of motor

확인하였다. 특히 권선 단락 시 고정자와 회전자 사이의 계면에서 집중적인 열 발생이 관찰되었는데, 이는 부하 증가에 따른 고온 환경에서 자석의 자기 특성 저하 가능성을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 LP-EGR valve actuator인 DC 모터에서 온도 변화 및 성능 저하 현상 예측에 관한 해석을 상온, 고온, 저온 조건에서 수행하였으며, 모터에 인가되는 연속 허용 전류를 변경하고 그 영향을 고찰하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 실험 데이터 및 열역학적 지배방정식을 기반으로 개발된 0D 예측 모델은 시간과 전류 변화에 따른 모터의 구동 온도를 정량적으로 예측할 수 있도록 수립되었으며 이는 모터의 열적 한계와 안전 작동 시간을 평가하는 데 도움이 될 수 있다.
- 2) 3D CFD 해석을 통해 최대 출력 조건에서의 모터 내부 온도 분포를 시각화하였다. 이를 통해 구성 요소별 온도를 명확히 파악하였으며, 특히 고정자와 회전자 계면에서 국부적인 온도 상승을 확인하여 자석의 자기 특성 저하 가능성을 도출하였다.
- 3) 대류 열전달 계수는 소형 DC 모터의 특성으로 인해 전류와 반비례하여 변화하였다. 이는 시스템의 열 시간 상수 및 정상 상태 도달 시간에 직접적인 영향을 미치며, 특히 상온 대비 저온 환경에서 정상 상태에 빠르게 도달하는 현상을 확인하여 대류 열전달 계수가 시스템 작동 한계를 결정하는 주요 변수임을 확인하였다.
- 4) 본 연구의 0D 예측 모델은 모델 수렴성 확인을 위해 연속적으로 운전하는 모터의 단기 성능 저하를 중심으로 분석하였으나 장기 누적 열 부하 조건에서도 유효하게 적용될 수 있다. 후속 연구를 통해 LP-EGR 내 응축수에 의한 온도 변동을 반영하여 장기 열화 예측 모델로 확장할 계획이다.

본 연구는 모터의 설계 및 운용 시 온도 및 부하 조건에 따른 열 관리의 중요성을 강조하며 시스템 최적화 및 향후 DC 모터 기술 고도화에 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술 평가관리원(KEIT)과 (과제번호: 20018492), 민군협력진흥원(ICMTC) (과제번호: 21-CM-AU-14)의 지원에 의해 수행된 연구결과임.

References

- 1) S. H. Park, C. H. Lee, M. K. Jung and S. C. Yeom, "Diagnostic Study on the Status of Implementation of 2030 National Determined Contribution through Analysis of a Local Energy Master Plan and Greenhouse Gas Emissions," *Journal of Climate Change Research*, Vol.15, No.3, pp.327–341, 2024.
- 2) M. V. Kumar, A. V. Babu, Ch. R. Reddy, A. Pandian, M. Bajaj, H. M. Zawbaa and S. Kamel, "Investigation of the Combustion of Exhaust Gas Recirculation in Diesel Engines with a Particulate Filter and Selective Catalytic Reactor Technologies for Environmental Gas Reduction," *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol.40, Paper No.102557, 2022.
- 3) J. S. Park, K. S. Lee, S. H. Song and K. M. Chun, "Optimization of Diesel Engine Performance with Dual Loop EGR Considering Boost Pressure, Back Pressure, Start of Injection and Injection Mass," *Transactions of KSAE*, Vol.18, No.5, pp.136–144, 2010.
- 4) K. M. Ju, J. S. Kim and J. S. Park, "Numerical Prediction of the Performance and Emission of Downsized Two-Cylinder Diesel Engine for Range Extender Considering High Boosting, Heavy Exhaust Gas Recirculation, and Advanced Injection Timing," *Fuel*, Vol.302, Paper No.121216, 2021.
- 5) S. Laghrouche, F. S. Ahmed, M. El Bagdouri, M. Wack, J. Gaber and M. Becherif, "Modeling and Identification of a Mechatronic Exhaust Gas Recirculation Actuator of an Internal Combustion Engine," *American Control Conference*, pp.2242–2247, 2010.
- 6) E. S. Seo and H. B. Shin, "Modeling of EGR Valve Actuator," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol.22, No.5, pp.390–396, 2017.
- 7) C. W. Park and C. G. Kim, "A Study on the Characteristics of the Electronic EGR Valve for Gasoline Engine," *Transactions of KSAE*, Vol.16, No.1, pp.127–133, 2008.
- 8) V. Madonna, P. Giangrande and M. Galea, "Influence of Insulation Thermal Aging on the Temperature Assessment in Electrical Machines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.36, No.1, pp.456–466, 2021.
- 9) H. D. Jo, "Diagnosis and Cause Analysis of Intermittent Engine Hesitation of Diesel Vehicle by EGR System Failure," *Transactions of KSAE*, Vol.26, No.1, pp.11–19, 2018.

- 10) J. Y. Koo, J. H. Kwak, S. M. Lee, J. S. Kim and H. D. Kim, "Analysis of Dielectric Breakdown in Stator Windings of High Voltage Motor Due to Turn Shorted," KIEE Annual Conference Proceedings, pp.70–71, 2023.
- 11) A. H. Bonnet, "Operating Temperature Considerations and Performance Characteristics for IEEE 841 Motors," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.37, No.4, pp.1120–1131, 2001.
- 12) T. G. Lee, J. S. Moon H. S. Yoo and J. H. Lee, "Thermal Reliability Analysis of BLDC Motor in a High Speed Axial Fan by the Accelerated Life Test," Korea Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.17, No.12, pp.1169–1176, 2005.
- 13) Y. Yang, B. Bilgin, M. Kasprzak, S. Nalakath, H. Sadek, M. Preindl, J. Cotton, N. Schofield and A. Emadi, "Thermal Management of Electric Machines," IET Electrical Systems in Transportation, Vol.7, No.2, pp.104–116, 2017.
- 14) M. H. Yoon, S. N. Kim and J. J. Lee, "A Study on the Operating Region and Efficiency Characteristics of DC Motors According to Voltage," KIEE Annual Conference Proceedings, pp.1079–1080, 2021.
- 15) S. H. Won, "A Study on a Simple Efficiency Estimation of Small DC Motor," The Transactions of the KIEE, Vol.63, No.3, pp.143–148, 2014.
- 16) J. S. Kwon and K. Y. Huh, "0D Simulation of Diesel Engine Combustion Based on CMC Model," KOSCO Annual Conference Proceedings, pp.168, 2021.
- 17) S. E. Zocholl and G. Benmouyal, "Using Thermal Limit Curves to Define Thermal Models of Induction Motors," 28th Annual Western Protective Relay Conference Spokane, pp.1–14, 2001.
- 18) C. K. Chang, "Improving Motor Protection Using Thermal Model," The Transactions of the KIEE, Vol.64, No.3, pp.473–479, 2015.
- 19) S. B. Lee, T. G. Habetler, R. G. Harley and D. J. Gritter, "An Evaluation of Model-Based Stator Resistance Estimation for Induction Motor Stator Winding Temperature Monitoring," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.17, No.1, pp.7–15, 2002.
- 20) Converge, Converge 3.1 Manual, ConvergeTM.