

## No-load and Load Testing Methods Using Motor Dynamometer

Byeong-Choel Bae, Ji-Hoon Lee, and Moo-Hyun Sung

*Department of Automotive Engineering (Automotive-Computer Convergence), Hanyang University, Seoul 04673, Korea*

Hyun-Jeong Hong and Myung-Seop Lim\*

*Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04673, Korea*

(Received 14 August 2023, Received in final form 24 August 2023, Accepted 25 August 2023)

Motors are used in automobiles and many other applications and account for a significant portion of total power consumption. Therefore, it is important to design highly efficient motors and accurately evaluate their performance. However, the finite element analysis (FEA) used for motor design cannot fully reflect the actual test environment. Therefore, it is necessary to validate the design by comparing the FEA and test data through motor testing at the final stage of motor design. Among various motor test methods, in this paper, a 15 [kW] dynamo is used to reach the measured operating point through speed control of the load motor and current control of the test motor. The back electromotive force obtained from the no-load test of motor was measured and compared to the back electromotive force constant and torque constant values calculated from the FEA. These constants allowed the torque to be predicted without performing complex load tests of motor. Mechanical losses can be calculated by separating iron losses and permanent magnet (PM) eddy current losses from the no-load losses obtained from the no-load test. The mechanical losses are reflected in the FEA results and compared with the test results to accurately evaluate the performance of the motor design.

**Keywords :** Back emf, FEA (Finite Element Analysis), mechanical loss, motor testing

## 모터 다이내모를 이용한 무부하 및 부하시험 방법

배병철 · 이지훈 · 성무현

한양대학교 미래자동차-SW융합전공, 서울시 성동구 왕십리로 222, 04763

홍현정 · 임명섭\*

한양대학교 미래자동차공학과, 서울시 성동구 왕십리로 222, 04763

(2023년 8월 14일 받음, 2023년 8월 24일 최종수정본 받음, 2023년 8월 25일 게재확정)

모터는 자동차 및 기타 다양한 애플리케이션에 사용되며 전체 전력 소비의 상당 부분을 차지한다. 따라서 고효율 모터를 설계하고 성능을 정확하게 평가하는 것이 중요하다. 그러나 모터 설계에 사용되는 유한요소해석은 실제 테스트 환경을 충분히 반영할 수 없다. 따라서 모터 설계의 최종 단계에서 모터 시험을 통해 유한요소해석과 시험 데이터를 비교하여 설계를 검증하는 것이 필요하다. 본 논문에서는 15 kW급 다이내모를 이용하여 부하 모터의 속도제어와 시험 모터의 전류제어를 통해 측정 운전점에 도달한다. 무부하 시험을 통해 얻은 무부하 손실에서 무부하 철손과 무부하 영구자석 외전류 손실을 분리하여 기계적 손실을 계산할 수 있다. 기계적 손실을 유한요소해석 결과에 반영하여 테스트 결과와 비교하며 모터 설계의 성능을 정확하게 평가할 수 있다.

**주제어 :** 역기전력, 유한요소해석, 기계손, 모터시험

## I. 서 론

최근 지구온난화에 따른 전 세계적인 탄소중립 및 탈탄소 활동이 이어지며 여러 분야에서 신재생 에너지의 활용 및 전기기기의 고효율 특성이 요구되고 있다. 모터는 자동차, 가전 등 다양한 제조업 분야에 사용되며 2018년 기준 우리나라 전체 전력 소비량의 54%를 차지한다[1]. 산업계에서 주로 사용되는 모터는 전력 소비량의 다수를 차지하는 만큼 고효율을 달성할수록 에너지 절약 효과가 크다. 고효율 달성을 위해 정해진 사양 내에서 모터를 설계하고 검증하는 과정이 필요하다.

모터 설계 과정에서 전자계 Finite Element Analysis(FEA)를 진행하여 모터의 출력 및 특성을 예측한다. 이후 모터의 무부하 시험 및 부하 시험을 통해 FEA 결과를 검증하는 과정과 FEA 값과 시험 결과의 비교가 이루어진다.

무부하 시험과 부하 시험은 다이나모를 활용하여 진행된다. 무부하 시험에서 특정 속도 및 전류일 때의 역기전력 상수 및 토크 상수 계산을 통해 역기전력과 토크를 예측할 수 있으며 모터 운전 시 기계손을 계산하여 FEA에 반영한다[2]. 또한, 부하 시험을 통해 특정 운전점에서의 실제 효율, 토크, 인가 전류 등의 결과값과 FEA 결과값을 비교한다.

본 논문은 15 kW급 다이나모를 활용해 부하 모터의 속도 제어와 시험 모터의 전류제어를 할 수 있는 모터의 시험 환경에 대하여 소개하고, 시험 방법에 대해서 다룬다. 먼저 무부하 시험을 통해 1000 rpm에서 역기전력을 측정하여 FEA를 통해 계산한 역기전력 상수 값과 비교하였다. 또한 무부하 손실을 측정하여 기계손을 계산 후 이를 FEA에 반영하였다. 결과적으로 부하 시험을 통해 측정한 인가전류, 손실을 반영한 효율과 FEA 결과값이 일치함을 확인하였다.

## II. 시험 개요

모터 시험은 다양한 방법으로 진행될 수 있는데, 본 논문에서는 FEA 결과를 기반으로 특정 운전점을 결정해 Fig. 1과 같은 프로세스로 진행된다. 모터 시험을 위해 성능을 평

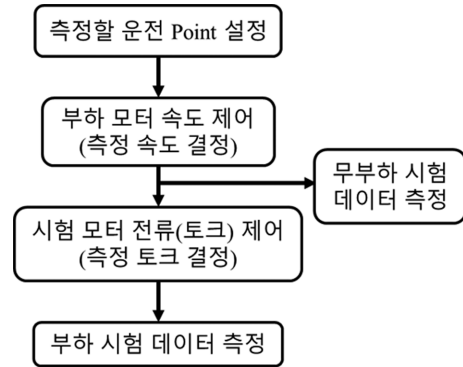


Fig. 1. Flow chart of motor testing.

가할 운전영역이 결정되며, 결정한 운전영역을 기반으로 그에 맞는 속도와 토크를 설정한다. 무부하 시험에서는 부하 모터의 속도제어만 사용하며 설정된 속도에 맞춰 목표한 운전 속도에 도달하도록 부하 모터를 속도제어 한다. 반대로 시험할 경우, 속도가 수렴하지 않을 시 시험 모터에 전류가 계속 인가됨에 따라 모터의 고장이 발생할 수 있어 주의해야 한다.

부하 시험의 경우 부하 모터의 속도제어와 더불어 시험 모터의 전류제어(토크 제어)를 사용한다. 식(2)를 통해 확인할 수 있는 것처럼 토크와 전류는 비례관계를 가지므로 전류제어를 통해 토크를 제어할 수 있다. 무부하 시험과 동일하게 부하 모터의 속도제어로 목표 속도로 구동한다. 시험 모터의 전류제어(토크제어)는 목표 토크에 도달할 수 있는 지령 전류를 인가한다.

### 1. 무부하 시험을 통한 역기전력 측정

시험 모터의 무부하 시험을 통해 무부하 손실과 선간 역기전력을 측정하여 역기전력 상수 및 토크 상수를 계산할 수 있다.

무부하 시험 구성은 Fig. 2와 같이 시험 대상 모터(Test Motor)와 이를 구동하는 부하 모터(Load Motor)를 커플링(Coupling)을 이용해 체결한 후 진행한다. 부하 모터의 속도 제어를 통해 일정한 속도로 시험 모터를 구동하며 역기전력

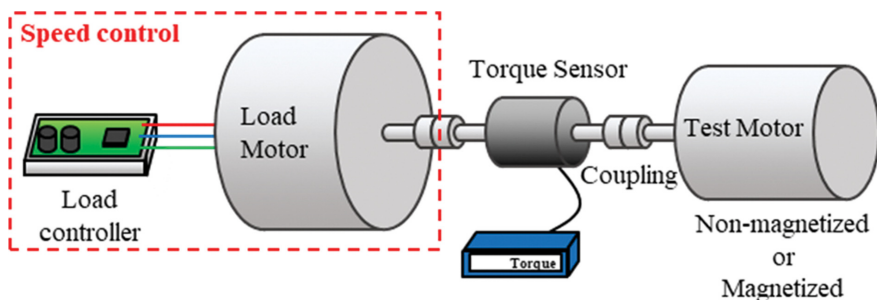


Fig. 2. (Color online) Schematic of no-load testing.

상수 및 토크 상수를 계산한다.

모터의 역기전력 상수를 계산하기 위해 부하 모터의 속도 제어를 통하여 특정 속도에서 시험 모터의 선간 역기전력을 측정한다. 모터의 역기전력 상수  $k_E$ 는 식(1)과 같이 계산할 수 있으며  $e_{LL, peak}$ 는 선간 역기전력의 기본과 최대치,  $\omega_m$ 은 모터의 기계적인 각속도이다. 이 때, 무부하 시험에서의 선간 역기전력은 전압 프로브를 사용하여 측정한 a상과 b상의 전압 차이와 같다.

$$k_E = \frac{e_{LL, peak}}{\omega_m} \quad (1)$$

모터의 회전에 따라 발생하는 성분인 역기전력은 역기전력 상수에 비례하며, Brushless AC Motor(BLAC)에서 역기전력 상수와 토크 상수는 식(2)와 같은 관계를 가진다.  $I_{L, peak}$ 는 선전류 최대치,  $T$ 는 모터의 축에서 발생하는 토크이다.

$$k_T = \frac{T}{i_{L, peak}} = \frac{\sqrt{3}}{2} k_E \quad (2)$$

계산된 역기전력 상수와 토크 상수를 통해 특정 속도에서 발생하는 역기전력과 특정 입력 전류에서 발생하는 토크를 예측할 수 있다.

## 2. 무부하 시험을 통한 기계손 측정

무부하 시험에서 기계손은 시험 모터의 영구자석이 착자되어 있지 않은 무착자 상태인 경우와 착자되어 있는 착자 상태인 경우에 따라 다르게 계산한다. 무착자 상태의 모터로 무부하 시험을 진행하는 경우 발생하는 무부하 손실은 모두 기계손으로 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며  $T_{no\_load}$ 는 무부하 상태일 때의 토크,  $\omega_m$ 은 모터의 기계적 각속도를 나타낸다.

$$P_{mech} = T_{no\_load} \cdot \omega_m \quad (3)$$

무착자 상태의 모터 시험은 추가 시험 및 비용이 발생하므로 비용 저감을 위해 착자 상태의 모터로 무부하 시험을 진행하여 기계손을 계산할 수 있다. 착자 상태의 모터로 무부하 시험을 진행할 때 발생하는 무부하 손실은 기계손과 철손

및 영구자석 와전류손이 포함되어 있다. 기계손은 무부하 손실값에서 FEA를 통한 무부하 철손 및 영구자석 와전류 손실값을 제거하여 기계손을 얻을 수 있다. 이에 대한 수식은 식(4)와 같다. 이 때, 실제로 도체를 모델링하여 무부하 동손을 예측할 수 있지만 semi-slot opening 구조에서는 무부하 동손에 의한 영향이 매우 작아 본 논문에서는 무부하 동손을 무시한다.

$$P_{mech} = A\omega_m^3 + B\omega_m^2 + C\omega_m = P_{no\_load} - P_{PM} - P_{iron} \quad (4)$$

$\omega_m$ 은 모터의 기계적 각속도로  $A\omega_m^3$  항은 풍손, 항은 베어링손이며  $A, B, C$ 는 보간 계수이다[2,3].  $P_{no\_load}$ ,  $P_{PM}$ ,  $P_{iron}$ 는 각각 무부하 손실, 영구자석 와전류 손실, 무부하 철손이다. 본 논문에서는 착자 상태의 모터를 시험 대상 모터로 선정하여 시험을 진행하였다.

## 3. 부하 시험

시험 모터의 부하 시험을 통해 토크, 인가 전류, 실제 효율 등을 계산하고 FEA 결과와 비교할 수 있다.

부하 시험의 개략도는 Fig. 3과 같으며, 부하 모터의 속도 제어와 시험 대상 모터의 전류제어로 이루어진다. Load controller를 이용해 부하 모터를 속도 제어하고, test motor controller로 시험 모터의 전류 제어를 진행한다. 속도제어 및 전류제어를 통해 일정한 속도를 유지하며 특정 입력 전류를 인가함에 따라 목표 운전점에서의 모터 성능을 평가한다.

부하 시험을 통해 전체 손실을 측정할 수 있으며 손실은 식(5)와 같이 기계손, 동손, 철손, PM 와전류손으로 이루어져 있다.

$$P_{loss} = P_{in} - P_{out} = P_{mech} + P_{core} + P_{copper} + P_{PM\_eddy} \quad (5)$$

이때  $P_{in}$ 는 입력 전력,  $P_{out}$ 는 출력 전력,  $P_{loss}$ 는 전체 손실,  $P_{mech}$ 는 기계손,  $P_{core}$ 는 철손,  $P_{copper}$ 는 동손,  $P_{PM\_eddy}$ 는 영구자석 와전류손이다. 영구자석의 와전류손은 3D FEA를 통해 계산할 수 있고 동손 및 철손은 식(6), (7)과 같다.

$$P_{copper} = 3I_a^2 R_a \quad (6)$$

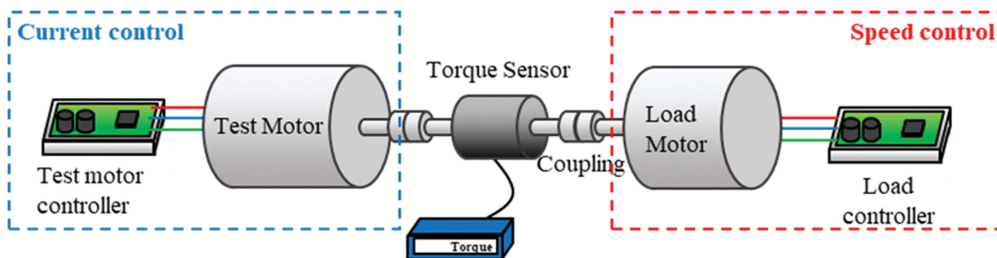


Fig. 3. (Color online) Schematic of load testing.

$$P_{core} = P_{loss} - P_{mech} - P_{copper} - P_{PM\_eddy} \quad (7)$$

$I_a$ 는 전기자 전류,  $R_a$ 는 저항이다. 부하 시험에서 계산한 효율과 FEA 해석에 기계손을 반영해 계산한 효율은 모터의 성능평가에 사용된다. 추가로 부하 시험 인가 전류와 FEA 상의 인가 전류 간의 비교를 통해 전류 및 전압 제한 조건 충족 여부를 함께 확인할 수 있다.

### III. 시험 결과

모터 시험 환경을 구축해 무부하 시험 및 부하 시험을 진행하였다. 무부하 시험에서 측정한 선간 역기전력으로 역기전력 상수 및 토크 상수를 구했으며 식(4)와 같이 기계손을 계산했다. 부하 시험에서 효율 및 전류를 FEA 결과와 비교하였다.

#### 1. 시험 환경

본 시험의 구성은 Fig. 4와 같다. Test motor는 시험 대상 모터이며 15 kW급 다이나모를 이용해 제어 모드에 따라 모터의 효율, 토크, 역기전력 등을 측정한다. 본 연구를 위해 무부하 및 부하 시험에서 무부하 역기전력, 모터의 효율, 모터에 인가되는 전류 등의 모터 성능을 시험하였다.

본 연구에서 사용된 전력분석기는 YOKOGAWA社의 WT1804E이다. NF社의 DC power supply에서 전력 분석기

를 거쳐 Test motor controller로 입력 전압이 인가되어 3상 교류로 전압이 출력된다. 이 출력 전압은 모터에 인가 된 후 다시 전력 분석기를 거치게 된다. 전력 분석기를 두 번 거치는 이유는 모터 인가 전, 후의 차이를 통해 전압 및 효율 등을 계측하기 위함이다. 이렇게 인가된 전압과 전류는 각각의 프로브를 이용하여 측정된다. 모터의 토크는 KISTLER社의 Torque sensor를 사용해 측정된다.

#### 2. 무부하 시험결과

시험 모터의 FEA를 통한 무부하 해석으로 계산한 선간 역기전력 그래프 및 시험을 통해 얻은 선간 역기전력의 그래프와 이를 Fast Fourier Transform(FFT)한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

FEA를 통한 선간 역기전력의 기본파는 19.07 V이며 식(1)을 통해 구한 역기전력 상수는 18.21 mV/(rad/s)이다. 시험을 통해 구한 선간 역기전력의 기본파는 19.90 V이며 식(1)을 통해 계산한 역기전력 상수는 19.00 mV/(rad/s)이다. FEA를 통해 계산한 선간 역기전력의 기본파와 4.33%의 오차를 보인다. 이를 통해 FEA와 시험 결과가 유사한 결과를 보인다.

착자된 시험 모터의 외부 구동을 통해 측정한 무부하 손실은 Fig. 6과 같다. 측정한 무부하 손실로부터 철손을 제외하면 기계손을 계산할 수 있으며 이를 FEA 해석에 반영할 수 있다.

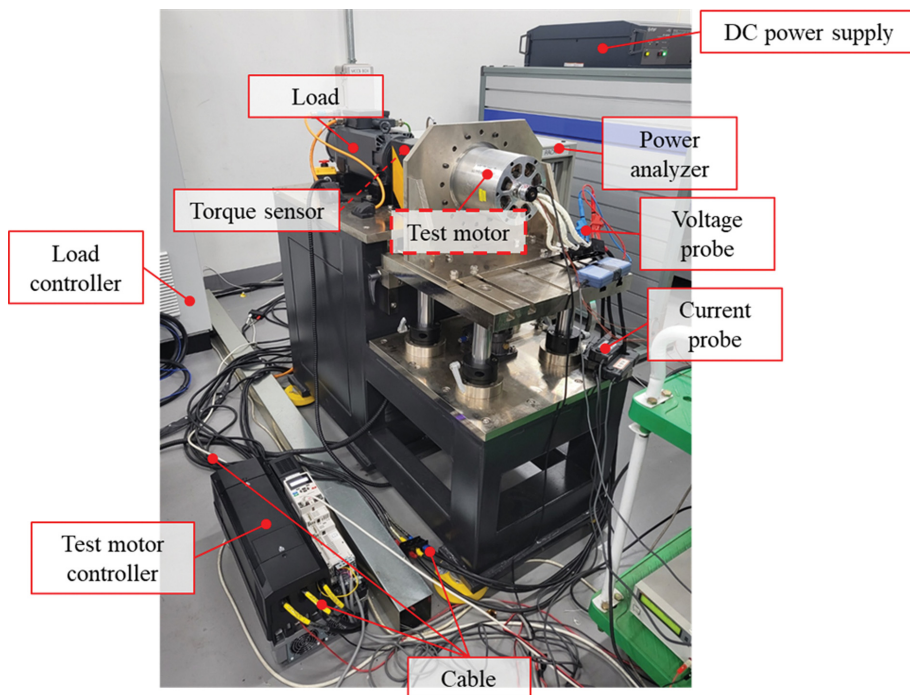


Fig. 4. (Color online) Test set-up.

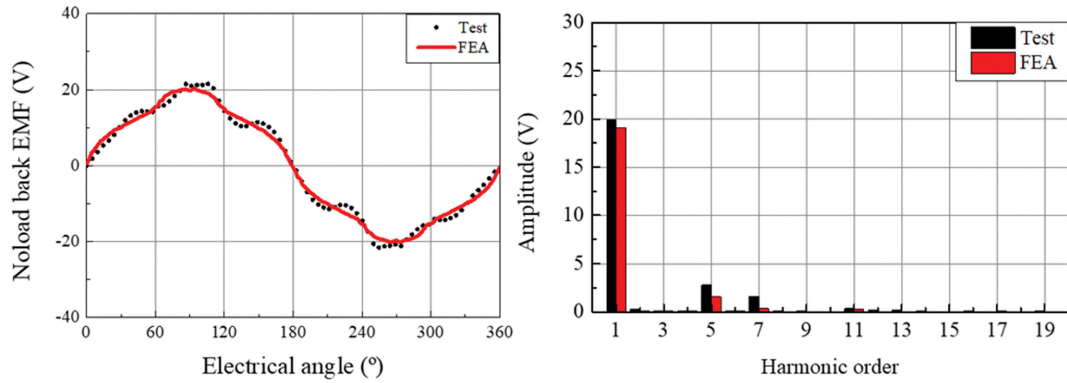


Fig. 5. (Color online) (Left) Waveform of no load back EMF, (Right) FFT of no load back EMF.

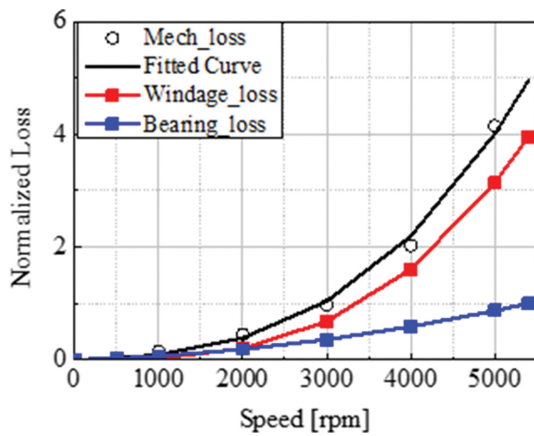


Fig. 6. (Color online) No load loss (Test).

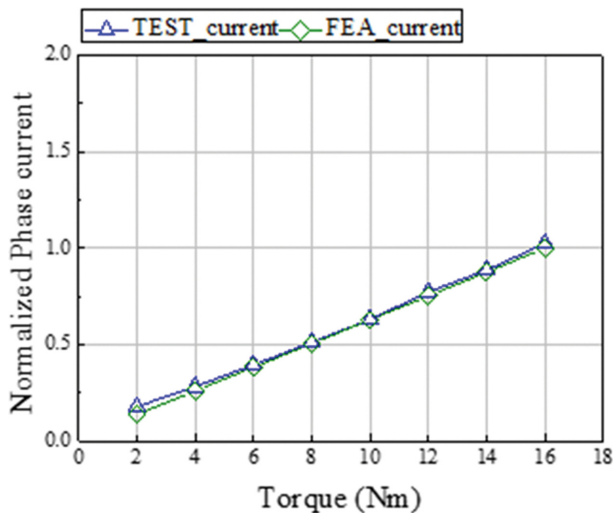


Fig. 7. (Color online) Comparison of phase current (Test, FEA).

### 3. 부하 시험결과

부하시험을 통해 모터 설계를 검증할 수 있으며, 전압 및 전류 제한 내의 목표 토크 및 출력 달성 여부 등을 확인할 수 있다. 부하 시험에서 인가되는 전류값과 전자계 FEA에서

Table I. Operating point of load test

Operating point	Voltage [V]	Current [A]	Power factor
A	76.62	29.68	0.43
B	76.61	35.73	0.44
C	76.90	42.25	0.44
D	76.81	44.72	0.44

Table II. Comparison of predicted torque and experimental torque

Operating point	$T_{exp}$	$T_{pre}$	Error [%]
A	4.90	4.88	0.397
B	5.88	5.88	-0.066
C	7.07	6.95	1.708
D	7.36	7.36	0.005

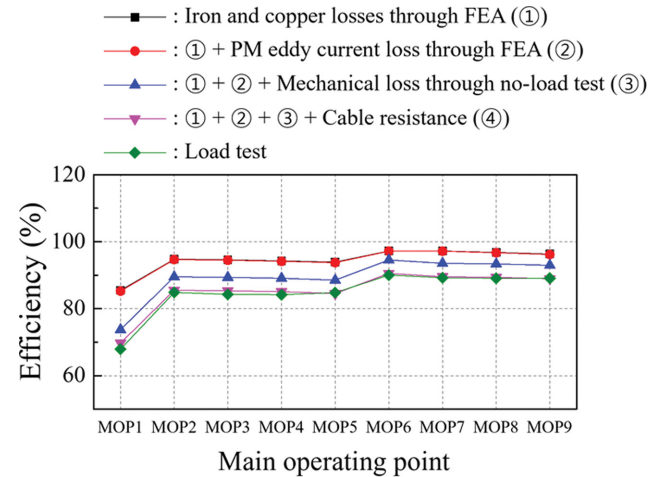


Fig. 8. (Color online) Comparison of efficiency at main operating point.

사용되는 전류값은 유사하며, Fig. 7의 그래프에 나타내었다.

토크 상수를 통한 토크 예측값과 시험으로 측정된 토크 값 비교를 위해 Table I과 같이 네 개의 동작점을 결정하였다.

식(2)를 기반으로 계산한 토크 상수는 0.165 N·m/A로 이를 통해 예측한 토크는 Table II와 같다. 토크 상수를 통해 예측



한 토크와 실험을 통해 얻은 토크 값의 경향이 일치함을 확인하였다.

$T_{exp}$ 와  $T_{pre}$ 는 각각 실험을 통해 측정된 토크와 토크 상수로 예측한 토크이다.

Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 모터 효율은 동손 및 철손만 반영하였을 때보다 다른 손실들을 추가로 반영하였을 때 실제 시험값과 유사함을 알 수 있다. 추가로 반영된 손실은 3D FEA를 이용해 구한 영구자석 와전류손과 무부하 시험에서 계산한 기계손, 케이בל 저항이다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 무부하 및 부하시험의 개요를 소개하고 시험을 통해 무부하 역기전력 및 무부하 손실과 토크, 효율, 인가 전류 등을 측정했다. 무부하 시험과 FEA 해석을 통해 계산한 역기전력 상수 및 토크 상수가 일치함을 확인했다. 무부하 시험의 경우 착자 모터를 사용하기 때문에 기계손을 직접 측정하지 않고 무부하 손실을 측정해 철손 및 영구자석 와전류손을 제외한 후 기계손을 계산하였다. 결과적으로 기계손을 반영하여 계산한 FEA에서의 효율과 부하 시험에서 계산한 효율이 유사한 것을 확인하였으며 목표 사양을 충족하는 것을 검증하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0017120, 2023년 산업혁신인재성장지원사업).

#### References

- [1] MOTIE (2018), "Raising the Minimum Efficiency Standard for Electric Motors to Premium Class [IE3]", MOTIE press release (September 30).
- [2] J. E. Vranick, "Prediction of Windage Power Loss in Alternators", Nat. Aeronaut. Space Admin. (NASA), Washington, DC, USA, Tech. Note TN D-4849, Oct. 1968, pp. 1-18.
- [3] R. Wrobel, P. H. Mellor, M. Popescu, and D. A. Staton, "Power loss analysis in thermal design of permanent-magnet machines—A review", IEEE Trans. Ind. Appl. **52**(2), 1359 (2016).