ISSN 1229-800X The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66P, No. 4, pp. 163~168, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEEP.2017.66.4.163

유한요소 해석을 이용한 3상 유도전동기의 효율 불확도 평가

Evaluation of Efficiency Uncertainty for Three-phase Induction Motor using Finite Element Analysis

이 호 현* · 박 한 석* · 전 희 득** · 우 경 일†
(Ho-Hyun Lee · Han-Seok Park · Hee-Deuk Jun · Kyung-Il Woo)

Abstract - This paper presented an evaluation method for the efficiency uncertainty of a three-phase induction motor using finite element analysis. The motor efficiency in the finite element analysis is calculated by the loss separation method as in the actual test. In the process of evaluating the efficiency uncertainty, the difference between the finite element analysis and the actual test is the method of calculating the type-A/B standard uncertainty of the input quantity to estimate the efficiency and each losses. For the input quantities which can confirm the instantaneous values with respect to time, the type-A standard uncertainty in the finite element analysis is calculated from the RMS values or average values having separate periods in the steady state. And, the type-B standard uncertainty in the finite element analysis is assumed to be zero. Also, this paper compared and analyzed the efficiency uncertainty evaluated by the proposed method and the efficiency uncertainty through the actual test.

Key Words : Efficiency, Finite element analysis, Loss separation method, Uncertainty, Three-phase induction motor

1. 서 론

전동기는 생산된 전기의 약 70[%]를 소비하는 것으로 알려져 있으며, 여러 전동기 중 3상 유도전동기는 국가 전체 전력 소비량의 40[%]를 차지하고 있다. 최근 환경규제가 높아짐에 따라, 세계의 각 정부들은 전동기 최저효율제를 도입하고 있다. 우리나라는 최초 시행된 2008년에 0.75~200[kW]급 전동기에 대해 IE2(고효율)등급을 적용하였으며, 최근 2015년에는 37~200[kW]급 전동기에 대해 IE3(프리미엄)등급을 적용하였다. 향후 2018년 이후에 37[kW]급 이하의 전동기에 대해서도 IE3등급이 적용될 예정이다[1].

0.75[kW]급 이상 375[kW]급 이하의 3상 유도전동기에 적용되는 효율관리기자재 운용규정(산업통상지원부고시 제2015-37호)에 따르면, KS C IEC 60034-2-1의 손실 분리법에 의하여 측정된 전부하 효율[%]을 최저효율기준으로 적용하고 있다. 손실 분리법은 전압계, 전류계, 동력계 등을 포함한 계측기로 측정된 결과를 이용하여 3상 유도전동기의 효율을 계산하는 방법이다. 그러나 반복 시험마다 계측기의 지시값이 달라질 수 있고, 각 계측기마다의 오차 또한 존재하기 때문에, 한 번의 손실 분리법에 의해 계산된 효율을 무한히 신뢰하기에는 어려움이 있다.

이와 관련하여, 실제 시험에서 반복 측정에 의해 발생할 수 있는 불확실한 요인들을 수치화하는 불확도 이론을 적용함으로써 전동기의 효율측정 결과에 대한 신뢰도를 향상시키는 방법이 제시되었다[2]. 하지만, 실제 시험을 통한 전동기의 효율 불확도 평가는 이미 제작된 전동기만을 대상으로 하여 한정적이며, 부수적인 실험 장비들을 포함한 시험 환경이 필수적이라는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 3상 유도전동기의 효율 불확도를 실제 시험이 아닌 유한요소법으로 평가하는 방법에 대해 제시하고자 한다. 유한요소법은 매우 정확하여 신뢰적이고, 특성값이 실제 시험보다 간단하게 얻어지며, 설계중인 전동기에 대해서도 적용이 가능하다. 본 논문에서는 효율에 대한 불확도 사례연구를 위해 0.86[kW]급 3상 유도전동기를 선정한다. 또한, 유한요소 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 선정된 3상 유도전동기를 해석하고, 해석 결과를 바탕으로 손실 분리법을 통해 효율을 계산한다. 그 후, 본 논문에서 제시된 평가 방법을 적용하여 효율 불확도를 평가하고, 실제 시험으로 평가된 효율 불확도와 비교·분석한다.

2. 유한요소 해석을 이용한 효율 계산 및 불확도 평가

2.1 유도전동기의 효율 계산

그림 1은 본 논문의 효율 불확도 사례연구를 위해 선정된 0.86[kW]급 3상 유도전동기의 단면도를 나타내며, 표 1은 그 사양을 나타낸다. 전자기 해석 프로그램인 Maxwell을 이용하여 선정된 전동기를 유한요소법으로 해석하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea
E-mail: cogging@pknu.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea
** Korea Testing Certification(KTC), Korea
접수일자 : 2017년 8월 11일
최종완료 : 2017년 10월 10일

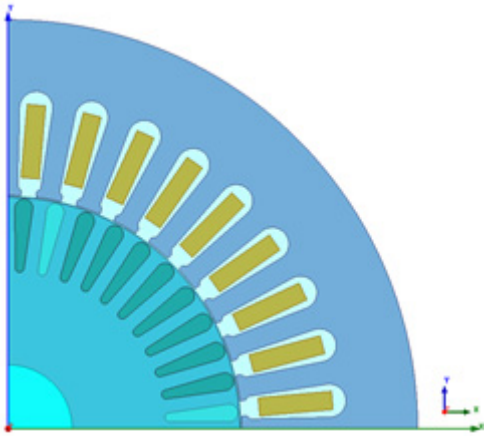


그림 5 유도전동기의 2차원 단면도
Fig. 5 2-D section of induction motor

표 1 유도전동기 사양
Table 1 The spec. of an induction motor

Category[Unit]	Rating
Output Power[kW]	0.86
Voltage[V]	460
Poles	4
frequency[Hz]	60

전동기의 효율은 전기적 입력 에너지에 대한 기계적 출력 에너지의 비로써 나타낸다. 전기적 입력은 전력계 등을 이용하여 측정된 값이며, 기계적 출력은 다이나모미터 등으로 측정된 값이다. 식 (1)과 같이 단순히 입·출력 에너지만을 측정하여 표현한 효율을 실측 효율(actual efficiency)이라 한다. 이 방법은 입력과 출력을 직접 측정하여 효율을 계산하기 때문에 권선 온도를 별도의 기준 온도로 보정할 필요는 없다.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{\tau_{load} \times \omega_m}{P_1} \times 100 \tag{1}$$

여기서, η : 효율[%]
P_2 : 기계적 출력 에너지[W]
P_1 : 전기적 입력 에너지(측정된 값)[W]
τ_{load} : 부하 토크(측정된 값)[Nm]
ω_m : 회전 속도(측정된 값)[rpm]

하지만 전동기 구동 시, 고정자 권선을 비롯한 고정자, 회전자 철심 및 회전자 도체 바 등에서 온도가 상승하며, 전동기를 표현하는 파라미터인 고정자, 회전자 저항은 온도에 대한 함수이다. 따라서 권선 온도를 보정하지 않는 실측 계산은 전동기의 효율을 평가할 때 다소 신뢰성이 부족할 수 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해, 현재 국제적으로 사용되는 방법은 IEC 60034-2-1의 손실 분리법이다. 손실 분리법은 식 (2)와 같이 효율 계산을 위한 시험에서 발생하는 온도 변화에 대해 25[℃]로 보정하여 효율을 제공한다.

$$\eta = \left(1 - \frac{P_{s\theta} + P_{fe} + P_{r\theta} + P_{fw} + P_{LL}}{P_1}\right) \times 100 \tag{2}$$

여기서, η : 최종 효율[%]
P_1 : 입력 전력(측정된 값)[W]
P_{fe} : 철손[W]
P_{fw} : 풍·마찰손[W]
$P_{s\theta}$: 고정자 동손(25[℃]로 보정된 값)[W]
$P_{r\theta}$: 회전자 동손(25[℃]로 보정된 값)[W]
P_{LL} : 표류부하손[W]

3상 유도전동기에서 손실은 고정자 동손, 철손, 회전자 동손, 풍·마찰손, 표류부하손 등 5가지로 분류된다. 손실 분리법은 식 (3)~(6)을 이용하여 언급한 5가지 손실들을 개별적으로 구하고 3상 유도전동기의 효율을 계산한다[3]. 본 논문에서 저항과 온도 값은 유한요소 해석 전에 설정해야 하는 값이므로 전동기의 효율 및 각 손실을 구하기 위한 식 (2)~(6)에서 일정한 상수로 취급하였다. 또한, 표 2는 유한요소법으로 해석한 전동기에 대해 임의의 한 주기를 선정하여 계산한 각 손실 및 효율을 나타낸다.

$$P_k = P_0 - \left(3 \times I_0^2 \times R_1 \times \frac{\theta_{w0} + K}{\theta_1 + K}\right) \tag{3}$$

$$P_{s\theta} = 3 \times I^2 \times R \times \left(1 + \frac{25 - \theta_c}{K + \theta_w}\right) \tag{4}$$

$$P_{r\theta} = (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) \times \left(1 - \frac{N}{60f}\right) \times \left(1 + \frac{25 - \theta_c}{K + \theta_w}\right) \tag{5}$$

$$P_{Lr} = P_1 - \left(2\pi \times T \times \frac{N}{60}\right) - P_{s\theta} - P_{fe} - P_{r\theta} - P_{fw} \tag{6}$$

여기서, P_k : 일정손[W]
P_0 : 무부하 입력 전력(측정된 값)[W]
I_0 : 무부하 시험 전류[A]
R_1 : 초기 권선 저항[Ω]
θ_{w0} : 무부하 시험 시 권선 온도[℃]
θ_1 : 초기 대기 온도[℃]
I : 부하 시험 전류[A]

표 2 유한요소 해석을 이용한 효율 계산
Table 2 The calculation of efficiency using FEA

Category	Symbol [Unit]	Value
Input Power	P_1[W]	1018.56
Stator Copper Loss	$P_{s\theta}$[W]	66.00
Iron Loss	P_{fe}[W]	36.76
Rotor Copper Loss	$P_{r\theta}$[W]	43.71
Friction and Windage Loss	P_{fw}[W]	7.84
Stary Load Loss	P_{LL}[W]	4.47
Efficiency	η[%]	84.41

R : 부하 시험 시 권선 저항[Ω]
θ_w : 권선 온도(포화온도)[℃]
θ_c : 시험 중 대기온도[℃]
P_{Lr} : 잔류손실[W]
N : 전동기 회전속도[rpm]

2.2 유도전동기의 효율 불확도 평가

2.2.1 불확도 평가 절차

측정결과의 신뢰성을 나타내기 위하여 지금까지는 오차, 정확도, 정밀도, 불확도 등의 여러 가지 용어들이 사용되어 왔으나, 분야에 따라 표현방법이 달라서 통일된 지침이 필요하게 되었다. 1993년 국제표준화기구(ISO)에서 측정 불확도 표현 지침서(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)를 발행한 후, 이 지침서에 따라서 측정 불확도를 구하고 표현하는 방법이 전 세계적으로 많은 분야에 확산되어 사용되고 있다[4]. 측정 불확도의 정의에 대해 수차례 수정되어 왔고, 최근 2007년 국제측정용어집(VIM, International Vocabulary Basic and General Terms in Metrology)에서 측정 불확도에 대해 '사용된 정보를 기초로 하여, 측정량에 대한 측정값의 분산 특성을 나타내는 음이 아닌 파라미터'로 정의했다.

불확도 이론을 적용한 3상 유도전동기의 효율 평가는 그림 2의 절차와 같이 시행된다[2].

그림 2에 따르면, 전동기의 효율 불확도를 평가하기 위해 가장 먼저 요구되는 것은 효율 및 각 손실을 측정하기 위한 모델식을 수립하는 것으로 식 (2)~(6)에 해당한다. 그 후, 식 (2)~(6)을 추정하기 위한 입력량인 전압, 전류, 토크, 속도 등에 대한 불확도 요소를 선정하고, 선정된 요소들에 대해 A형 또는 B형 표준 불확도를 산출한다. 입력량의 불확실성에 영향을 주는 요인은 반복 측정에서 기인하는 오차, 측정 장비의 정밀도, 측정 대상의 검·교정 성적서를 포함한 여러 원인이 있으며, 그 중 반복 시험에서 발생하는 오차로부터 산출한 표준 불확도를 A형 표준 불확도라고 정의한다. 반면, 반복 측정에서 기인하는 것이 아닌, 정보나 경험 등의 비통계적 방법으로 산출하는 불확도를 B형 표준 불확도라고 정의한다.

효율 및 각 손실은 단일 입력량만으로 추정되지 않고 여러 개의 다른 입력량으로부터 추정된다. 측정결과가 여러 개의 다른 입력량으로부터 구해질 때, 이 측정결과의 표준 불확도를 합성 표준 불확도라고 정의한다. 입력량 X_i의 함수로 표현되는 추정값 Y의 합성 표준 불확도는 입력량 X_i 의 A형 또는 B형 표준 불확도를 불확도 전파 법칙으로 합성하여 얻을 수 있다. 이 때, 각 인자(입력량)의 변화가 출력(결과량)에 독립적으로 미치는 영향을 편도함수를 이용하여 상수로써 표현한 것을 감도계수라고 한다.

국제표준화기구(ISO)에서 발생한 측정 불확도 표현 지침서(GUM)의 기초가 된 불확도 표현 작업반의 권고안 INC-1(1980)과, 이를 승인하고 재확인해 준 국제도량형위원회(CIPM)의 권고안 1(CI-1981) 및 1(CI-1986)은 측정결과의 불확도를 정량적으로 표현하는 파라미터로서 합성 표준 불확도의 사용을 추천하였다[4]. 하지만, 상업이나 산업 분야의 특정한 경우, 또는 규제에 적용할 경우에는 측정량의 합리적인 추정값이 이루는 분포의 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의 어떤 구간을 정의해 줄 수 있는 불확도의 척도가 필요하다. 이러한 요구조건을 충족시키는 불확도의 추가적인 척도를 확장 불확도라고 한다. 따라서, 전동기에 대한 최종적인 효율 불확도는 확장 불확도를 산출함으로써 평가할 수 있다. 확장 불확도는 결과량 Y의 합성 표준 불확도 $\mu_c(Y)$에 포함인자 k를 곱하여 얻는다. 포함인자 k는 정규 t-분포표에서 그 구간에 대해 요구되는 포함확률 또는 신뢰수준에 따라, 결과량 Y에 대한 합성 표준 불확도의 유효 자유도 ν_{eff} 를 통해 결정된다. 포함인자 k의 값은 보통 2와 3 사이의 값을 갖는다.

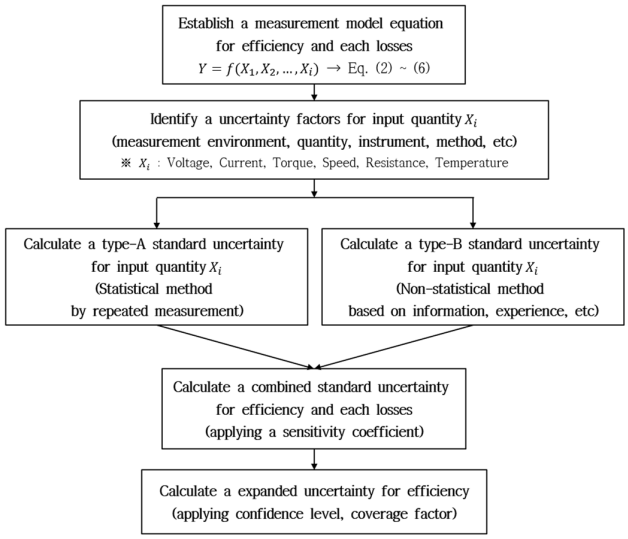


그림 2 효율 불확도 평가 절차
Fig. 2 The evaluation procedure of efficiency uncertainty

2.2.2 유한요소 해석에서의 불확도 이론 적용

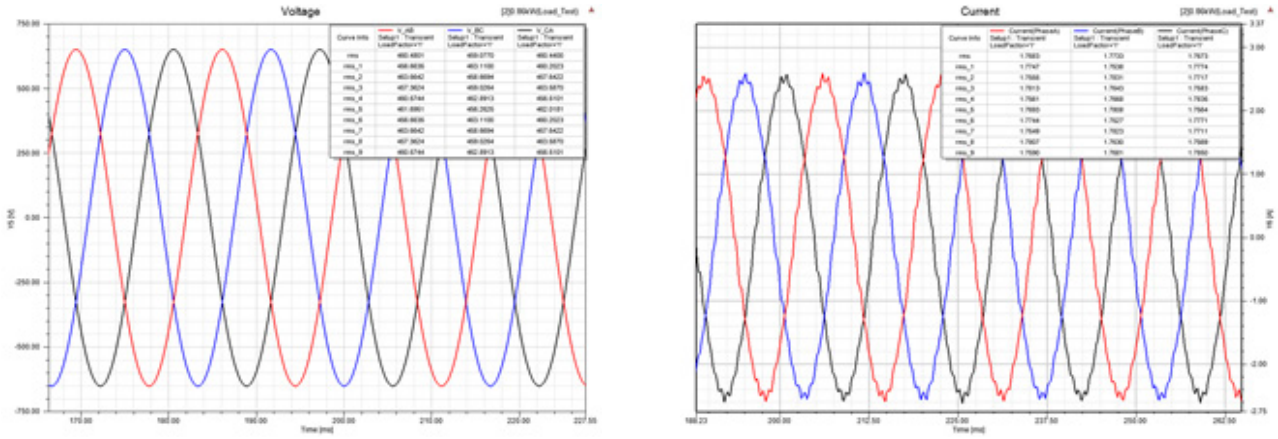
본 논문에서는 유한요소법에서의 전동기 효율을 실제 시험과 같이 손실 분리법으로 추정하였다. 유한요소법에서도 실제 시험과 같이 입력량의 불확실성만 얻을 수 있다면, 각 손실에 대한 합성 표준 불확도의 산출과 확장 불확도를 이용한 효율 불확도 평가가 가능하다. 실제 시험을 통한 효율 불확도 평가와 유한요소법을 이용한 평가의 차이는 효율 및 각 손실의 입력량 X_i에 대한 A형/B형 표준 불확도의 산출 방법이다. 실제 시험에서 입력, 전압, 속도, 토크 등의 A형 표준 불확도는 각 측정장비를 사용하여 n회 측정으로 얻은 raw data의 표준편차로 계산하며, B형 표준 불확도는 측정에 사용한 장비의 정밀도로부터 구할 수 있다[2]. 하지만 유한요소법을 이용할 경우, 효율 및 각 손실을 결정하는 요인들은 측정장비를 사용하여 측정하는 것이 아니므로 실제 시험과는 다른 방법으로 A형/B형 표준 불확도를 산출해야 한다.

그림 3는 전체 해석 설정시간인 0~500[msec] 동안 선정된 전동기를 유한요소법으로 해석하여 정상상태에 도달한 이후만을 나타낸 전압 및 전류 파형이다. 유한요소법에서의 A형 표준 불확도는 그림 3에 나타낸 파형에서 서로 다른 임의의 n개의 주기를 지정하여 실효값 또는 평균값을 계산

하여 얻은 raw data로 산출할 수 있다. 반면, 유한요소 해석은 설계된 전동기와 설정된 파라미터들을 기반으로 정확한 계산에 의해 수행된다. 따라서 유한요소법에서의 B형 표준 불확도는 0으로 간주할 수 있다. 본 논문에서, 손실 분리법의 계산을 위한 전동기 파라미터 중 시간에 대한 순시값으로 파형을 얻을 수 있는 입력, 전압, 전류, 속도, 토크 등은 A형 표준 불확도를 산출할 수 있다. 하지만, 해석 조건으로 설정되는 저항, 온도 등은 A형/B형 표준 불확도를 산출할 수 없으므로, 효율 불확도 평가 과정에서 일정한 상수로 고려하였다. 표 3은 유한요소 해석으로 얻은 각 입력량들에 대해 산출한 A형 표준 불확도를 나타낸 것이다.

2.2.3 효율 불확도 평가

그림 4는 손실 분리법에 의한 효율 추정 시 고려할 수 있는 불확도 연계성을 나타낸 것이다. 그림 4에 따르면, 각 시험에 대한 유한요소법을 통해 입력량을 얻고, 그 입력량들을 통해서 각 손실을 추정한다. 또한, 계산으로 얻어진 손실들은 서로 간의 불확실성에 영향을 준다.



(a) Voltage (b) Current

그림 3 유한요소 해석 결과

Fig. 3 Result of finite element analysis

표 3 유한요소 해석에서의 A형 표준 불확도 계산

Table 3 Calculation of type-A standard uncertainty in FEA

Symbol [Unit]	1	2	3	4	5	Average Value	Standard Deviation	Type-A Standard Uncertainty	Degree of Freedom
	6	7	8	9	10				
1) Analysis under Full-Load Condition									
P_1[W]	1016.7502	1019.3585	1018.0146	1018.6245	1016.4724	1017.8740	0.8997	0.5194	9
	1017.7355	1017.3320	1018.7499	1017.1445	1018.5576				
V_1[V]	459.9990	459.9919	459.9919	459.9919	459.8919	459.9826	2.5954	1.4984	9
	459.9919	459.9919	459.9919	459.9919	459.9919				
I[A]	1.7696	1.7686	1.7701	1.7680	1.7688	1.7689	0.0011	0.0006	9
	1.7688	1.7681	1.7694	1.7669	1.7707				
N[rpm]	1715.1954	1715.1545	1714.9983	1715.1286	1715.2246	1715.1341	0.1006	0.0581	9
	1715.1385	1715.3018	1714.9969	1715.2044	1714.9981				
T[Nm]	4.7885	4.7887	4.7891	4.7887	4.7885	4.7887	0.0003	0.0002	9
	4.7887	4.7883	4.7891	4.7885	4.7891				
2) Analysis under No-Load Condition									
P_0[W]	77.3930	77.8060	77.8318	76.7406	77.7048	77.6109	0.3930	0.2269	9
	77.7542	78.1907	77.6438	77.1544	77.8897				
V_0[V]	459.9990	459.9919	459.9919	459.9919	459.9919	459.9926	2.5551	1.4752	9
	459.9919	459.9919	459.9919	459.9919	459.9919				
I_0[A]	1.2271	1.2265	1.2262	1.2271	1.2272	1.2268	0.0003	0.0002	9
	1.2267	1.2265	1.2265	1.2272	1.2268				
3) Resistor and temperature are considered as constants.									

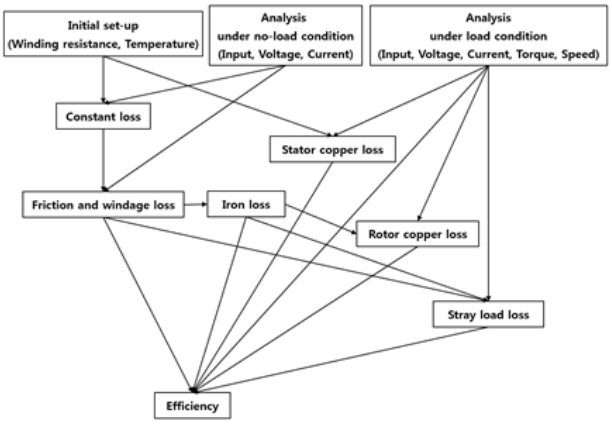


그림 4 각 손실 및 효율의 불확도 연계

Fig. 4 The Uncertainty interrelationship for each loss and efficiency

손실 분리법에 의한 3상 유도전동기의 효율은 식 (2)와 같이 입력과 각 손실로부터 추정할 수 있다. 또한, 최종적인 효율의 합성 표준 불확도($U_c(\eta)$)는 불확도 전파 법칙에 의해 각 손실의 표준 불확도를 합성하여 산출할 수 있다.

표 4는 3상 유도전동기의 입력을 포함한 효율과 각 손실에 대한 불확도 평가표로서, 유한요소법의 결과와 손실 분리법 계산으로 얻은 효율 및 각 손실의 추정값(x_i)과 위에서 제시한 방법으로 얻은 각 손실의 표준 불확도 ($\mu(x_i)$)를 나타낸다. 또한, 유한요소법의 신뢰성을 제시하기 위해 실제 시험으로 얻은 결과도 함께 명시하였다.

표 4 효율 불확도 평가표

Table 4 The uncertainty table for the efficiency

Symbol [Unit]	FEM		Actual Test	
	Value x_i	(Combined) Standard Uncertainty $\mu(x_i)$	Value x_i	(Combined) Standard Uncertainty $\mu(x_i)$
P_1 [kW]	1.018	0.5194	1.023	2.5830
$P_{s\theta}$ [W]	65.87	0.0457	64.01	0.2046
P_{fe} [W]	36.85	0.1806	33.92	0.3511
$P_{r\theta}$ [W]	43.61	0.0409	44.02	0.1278
P_{fw} [W]	7.85	0.2322	6.94	0.3511
P_{LL} [W]	4.33	0.6014	10.72	2.6520
η [%]	84.43	0.0870	84.40	0.2676

각 손실의 표준 불확도 및 감도계수로부터 불확도 전파 법칙을 이용하여 효율의 합성 표준 불확도($U_c(\eta)$)를 0.0870[%]로 산출하였다. 또한, 효율 모델식에 대해 계산된 유효 자유도 ν_{eff}는 37이므로, ∞로 취급하여 정규 t-분포표에서 신뢰수준 k를 2로 찾았다. 따라서, 신뢰수준을 적용한 확장 불확도를 산출하여 식 (7)과 같이 3상 유도전동기의 최종적인 효율 불확도를 평가 할 수 있다. 이는 효율 계산을 위한 100번의 반복해석동안, 95번의 효율 결과가 84.1~84.5[%] 사이에 존재한다는 의미이다. 또한, 표 2에서 계산된 효율도 식 (7)의 구간 내에 포함된 것을 알 수 있다.

$$\eta = 84.3 \pm 0.2[\%] \text{ (단, 신뢰수준 95[\%], } k=2) \quad (7)$$

본 논문에서 유한요소법을 이용한 효율 불확도를 실제 시험과 동일한 절차로 평가하였으나, 다소 상이한 결과가 나타났다. 앞서 언급한 것처럼, 유한요소법은 정밀한 계산을 통해 해석되므로, B형 표준 불확도는 0으로 간주할 수 있기 때문이다. 또한, 유한요소법에서는 순수 정현파의 전압이 인가되었지만, 실제 시험에서는 가변 부하 시험을 위해 변압기를 통해 전압이 인가된다. 실제 시험에 비해 유한요소법에서 고조파 성분이 작으므로 A형 표준 불확도가 감소하게 된다. 이로 인해, 유한요소법으로 평가된 각 손실의 합성 표준 불확도 및 효율의 확장 불확도가 실제 시험에 비해 더 낮은 구간을 가지게 되는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 3상 유도전동기를 해석하고, 손실 분리법으로 계산된 효율에 불확도 이론을 적용하여, 효율 불확도를 간단하게 평가할 수 있는 방법을 제시하였다. 연구 결과, 유한요소법을 이용한 평가와 실제 시험을 통한 평가의 차이는 효율 및 각 손실을 추정하기 위한 입력량의 A형/B형 표준 불확도의 산출 방법이다. 본 논문에서는 A형 표준 불확도는 해석 결과를 바탕으로 서로 다른 주기를 가진 평균값 또는 실효값으로부터 산출하였으나, B형 표준 불확도는 0으로 고려하였다. 하지만, 실제 시험에서 B형 표준 불확도는 분명히 존재하는 값이며 유한요소법을 이용한 불확도 평가의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 이를 적용하기 위한 방법을 고려할 필요가 있다. 또한, 실제 시험과 동일한 평가 환경을 위해 변압기와 연계된 해석이 이루어져야 하며, 평가 과정에서 상수로 취급되었던 저항, 온도에 대한 A형/B형 표준 불확도의 산출 방법에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. : 2015R1D1A1A01058314).

References

[1] ABB, Global MEPS : Energy efficiency regulations for low voltage motors around the world.

[2] Hee-Deuk Jun, Han-Seok Park, Dea-Kyong Kim, Kyung-Il Woo, “Study on the Evaluation of Uncertainty for the Efficiency of 0.75[kW] Class Three Phase Induction Motor,” *The Transaction of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 64, no. 4, pp. 653-659, 2015.

[3] IEC 60034-2-1 Ed. 2.0, “Rotating electrical machines - Part 2-1 : Standard methods for determining losses and efficiency form tests (excluding machines for traction vehicles),” 2014.
[4] ISO, “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(GUM),” 1995.

저 자 소 개

이 호 현(Ho-Hyun Lee)
1993년 01월 17일생. 2016년 부경대 전기공학과 졸업(공학사). 2016년~현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.

박 한 석(Han-Seok Park)
1955년 03월 23일생. 1981년 중앙대 전기공학과 졸업(공학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~현재 부경대학교 전기공학과 교수.

전 희 득(Hee-Deuk Jun)
1975년 05월 20일생. 2000년 한양대 전기전자공학과 졸업(공학사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2002~2005년 중소기업진흥공단 전동기설계실 연구원. 2005년~현재 한국기계전기전자시험연구원 회전기기센터 선임연구원. 2009년~현재 기술표준원 지정 국제표준화기구 IEC/TC 2(회전기) 간사. 2013년~현재 부경대 전기공학과 박사수료.

우 경 일(Kyung-Il Woo)
1969년 09월 06일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업(공학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년~현재 부경대학교 전기공학과 교수.

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
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.