

# 0.75[kW]급 삼상유도전동기 효율의 불확도 평가에 관한 연구

## Study on the Evaluation of Uncertainty for the Efficiency of 0.75[kW] Class Three Phase Induction Motor

전 희 득\* · 박 한 석\*\* · 김 대 경\*\*\* · 우 경 일†  
(Hee-Deuk Jun · Han-Seok Park · Dea-Kyong Kim · Kyung-Il Woo)

**Abstract** - In the last few years, the regulations for efficiency grade of the three phase induction motor are internationally being discussed and upgraded for the protection of environment and energy saving. So the efficiency improvement and the reliable test result are essential to determine the premium grade three phase induction motor. While a study on developing the efficiency motor is active, there is little research about the guarantee for efficiency. So in this paper, the dispersion characteristic of the efficiency is studied using uncertainty theory for the three phase induction motor to improve the reliability of efficiency. The values such as input voltage, current, speed, torque were obtained by loss separation method to evaluate the uncertainty. From the result, it was known that the important loss factor could affect the uncertainty is the stray loss.

**Key Words** : Efficiency, loss separation method, premium grade, three phase induction motor, uncertainty.

### 1. 서 론

삼상 유도전동기는 국내외적으로 고효율 사용의무로 빠르게 변하고 있으며, 이의 효율등급제도는 고효율(IE2)에서 프리미엄급 고효율(IE3)등급으로 강화되고 있는 추세이다[1,2]. 제도변화는 기존 전동기의 효율보다 2~3[%] 정도가 더 높은 효율로 기준이 강화되는 것으로, 프리미엄급 고효율 등급의 전동기 보급이 확대 될 것으로 전망된다. 미국은 EPCAct에서 이 제도가 의무화 되었 으며, 유럽, 중국과 한국은 2015년에 0.75[kW] 이상의 전동기에 대하여 시행될 예정이다[3,4].

고효율 등급과 프리미엄 등급의 효율 차이는 저용량 3.7[kW] 이하의 경우 효율값이 2~3[%]이고, 5.5[kW] 이상의 경우 0.4~2[%] 이다[5]. 이러한 효율 등급은 반복 및 재현시험에 의해서 효율 결과가 변동되고 등급별 기준 차이가 매우 적으므로 변경될 수 있다. 따라서 전동기의 사용자 및 제조자들은 정확하고 신뢰 성 있는 효율값 제시에 대한 욕구가 증가하고 있다[6]. 그러나 전동기의 효율을 높이기 위한 연구는 활성화 되어 있는 반면 효

율측정 결과의 신뢰도에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 논문에서는 효율 평가 시 발생될 수 있는 각 시험 값의 분 산 특성을 고려하여, 정확하고 신뢰성 있는 효율평가를 제시한다. 이러한 효율 제시를 위한 연구는 국제적으로 공인된 통계적 수치 화 방법이 적용된 측정 불확도 추정 방법을 이용한다. 이는 입력 전력, 토오크, 속도 및 측정 환경 등에 의해서 발생 할 수 있는 불확실한 요인들을 효율에 대한 모델식에 적용하여 수치화 하는 방법이다. 먼저 불확도 사례연구를 위해, 샘플 선정은 고효율 등 급 규제의 시작 용량이고 산업용 및 가정용 기기 분야에서 가장 많이 사용되는 0.75[kW]급 삼상 유도전동기를 선정하였다. 선정 된 삼상 유도전기에 대해서 국제적으로 사용되는 IEC 60034-2-1의 손실분리법으로 시험을 실시한다. 시험으로부터 얻 은 데이터를 이용하여 불확도를 평가하고 불확도에 미치는 요인 들을 제시한다.

### 2. 불확도 개념 및 평가 절차

#### 2.1 GUM에서 제시된 불확도 개념

GUM(Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, 1995)은 오차의 관점에서 벗어난 불확도 이론을 사용하여 측정불확실성의 평가와 표현을 정리한 지침이다[7]. 이 지침서에 의하여 불확도를 평가 및 표현하는 방법이 국제적으로 많은 분야에 확산되었고, ISO/IEC Guide 98-2:2008로 채택되었 다[8]. 여기에서 불확도 평가는 최종적으로 확인되어진 측정결과 에 대한 품질 관리 및 보증을 목적으로 사용된다. 또한 국제도량

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea.

E-mail : cogging@pknu.ac.kr

\* Dept. of Rotating Machinery, Korea Testing Certification.

\*\* Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea.

\*\*\* Dept. of Electrical Control Engineering, Sunchon National University, Korea

Received : December 11, 2014; Accepted : March 19, 2015

형국 및 국제시험소인정협력업체 등의 국제기구에서 측정 결과의 상호인정을 위한 필수 요소로 이용되어지는 개념으로 측정 결과의 품질을 표현하는 가장 좋은 수단이라고 할 수 있다.

### 2.2 불확도 평가 절차

국제적으로 인정된 GUM지침서에 의한 불확도 평가는 그림 1의 절차와 같이 시행된다. 국제규격에서 규정한 불확도 평가 과정은 먼저 평가하고자 하는 측정값의 불확도에 영향을 주는 요인들을 선정할 후 요인별 측정값 및 표준오차를 측정하여 합성 표준 불확도를 산출하고, 최종적으로 신뢰 수준 등을 고려하여 확장 불확도를 도출하는 순서로 되어있다[9-12]. 불확도를 표현하기 위해서 측정결과에 대해서 어떤 구간을 정의해 줄 수 있는 척도가 필요하다. 이러한 구간에 대한 요구조건에 대해서 충족시키는 추가적인 척도를 확장불확도라고 표현한다. 확장불확도를 계산하기 위해서 먼저 (1)과 같이 출력량  $Y$ 와 입력량  $X_i$ 사이의 관계식인 측정모델을 세운다. (2)와 같이 입력량의 불확도 요소를 파악한 후, (3)과 같이 각 입력량의 반복측정에 의한 통계적 기법인 A형 표준불확도 및 선택적 기법에 의한 B형 불확도를 산출한다. 그 다음 (4)와 같이 각 표준불확도를 불확도 전파법칙에 따라 합성하여 합성 표준불확도를 구한다. 마지막으로 (5)와 같이 합성 표준불확도에 포함인자를 곱하여 신뢰수준이 적용된 확장 불확도를 산출한다.

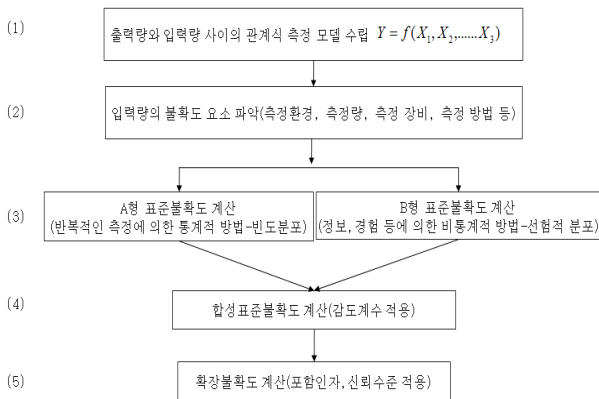


그림 1 불확도 평가 절차  
Fig. 1 The evaluation procedure of uncertainty

불확도 평가는 구하는 방법에 따라 A형 불확도 평가와 B형 불확도 평가로 나눌 수 있다. 그림 2와 같이, A형 불확도 평가는 여러 번의 측정으로부터 구한 측정값들의 평균값을 먼저 구하고, 각 측정값들의 표준편차( $s$ )를 사용해 측정회수( $n$ )의 제곱근으로 나누어 계산한다. B형 불확도는 반복된 측정으로부터 얻어지지 않는 입력량의 추정값에 대한 것이며, 기본적으로 확보되는 장비의 검교정 성적서나 장비 제작시 정확도에 해당되는 항목이며, 시험에서 사용되는 장비(전력계, 토크, 속도계 및 온도계 등)의 주기적인 조사와 관리를 통해 확률함수를 근거로 구한다.

### 3. 삼상 유도전동기의 불확도 평가

#### 3.1 불확도를 위한 수학적 모델식

본 논문에서는 삼상 유도전동기의 효율 불확도를 평가하기 위한 입력 데이터와 출력 데이터를 얻기 위하여 IEC 60034-2-1의 동력계법을 사용하였다[13]. 측정을 위한 기기별 정밀도는 표 1과 같으며 이것은 선택적인 조건에 의해서 B형 불확도를 산출하는데 이용된다. 또한 시험을 통해서 얻은 데이터를 이용하여 효율 불확도의 추정을 위한 수학적 모델식을 설정하고, 설정된 모델식으로 불확도 전파법칙을 이용하여 최종 효율 불확도를 계산한다. 모델식이란 최종 측정량(Measured)은 효율값이 되고, 효율에 영향을 주는 각 시험 및 손실 등이 입력량으로 되어 형성된 함수 관계식이다. 삼상 유도전동기의 효율을 산출하기 위한 수학적 모델식은 다음과 같다. 정격 부하점에서 출력은 측정된 입력에서 전동기의 개별손실의 합산을 뺀 값이 된다. 따라서 효율의 모델식은 식 (1)과 같이 표현 된다.

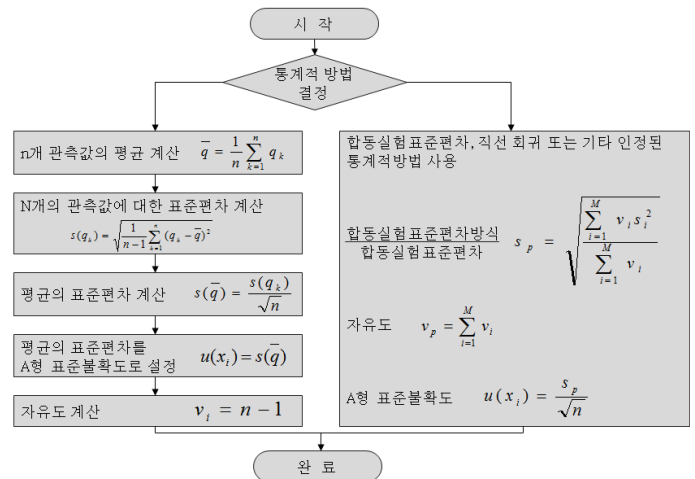


그림 2 A형 불확도 평가 절차  
Fig. 2 The evaluation procedure of A type uncertainty

표 1 측정을 위한 기기별 정밀도  
Table 1 The accuracy of instruments for tests

기기명	측정량	정밀도
전력분석기	전력, 전압, 전류	±1[W]
토크 측정기	토크	±0.072[Nm]
속도측정기	회전속도	±1.0[r/min]
온도계	온도	±0.3[°C]
저항계	권선 저항	±0.001[Ω]

$$\eta = 1 - \frac{(P_{fe} + P_{fw} + P_{s\theta} + P_{r\theta} + P_{LL})}{P_1} \times 100 \quad [\%] \quad (1)$$

여기서,  $P_1$  : 입력 Power(측정된 값) [W]  
 $P_{fe}$  : 철손 [W]  
 $P_{fw}$  : 풍마찰손 [W]  
 $P_{s\theta}$ : 고정자손(25 °C로 보정된 고정자손) [W]  
 $P_{r\theta}$ : 회전자손(25 °C로 보정된 회전자손) [W]  
 $P_{LL}$ : 표류부하손 [W]  
 $\eta$  : 최종 효율 [%]

여기서  $P_k$ : 일정손 [W]  
 $P_0$ : 무부하 입력 전력 [W]  
 $I_0$ : 무부하 시 전류 [A]  
 $R_1$ : 초기 권선 저항 [Ω]  
 $\theta_{w0}$ : 무부하 시 권선 온도 [°C]  
 $\theta_1$ : 초기 대기온도 [°C]  
 $I$ : 전류(부하 시험시) [A]  
 $R$ : 권선 저항(부하 시험시) [Ω]  
 $\theta_w$ : 권선 온도(온도 상승 후 포화온도) [°C]  
 $\theta_c$ : 시험 중 대기온도 [°C]  
 $P_{fe}$ : 철손 [W]  
 $P_{Lr}$ : 잔류손 [W]  
 $s_\theta$ : 25 °C로 보정된 슬립 [p.u]  
 $N$ : 분당회전수 [r/min]

개별손실  $P_i$ 의 구성은 일정손(철손 및 풍마찰손), 고정자손, 회전자손 및 잔류손(표류부하손)으로 되어 있다. 각 개별손실의 불확도를 추정하기 위해서, 각 손실의 추정값은 효율 시험 방법에 따라서 얻어진 측정량에 의해서 결정 될 수 있다. 각 손실과 측정량의 모델식은 식 (2)~(5)로 표현 될 수 있다.

$$P_k = P_0 - (1.5 \times I_0^2 \times R_1 \times \frac{\theta_{w0} + K}{\theta_1 + K}) \quad [W], \quad K = 234.5 \quad (2)$$

$$P_{s\theta} = 1.5 \times I^2 \times R \times (1 + \frac{25 - \theta_c}{K + \theta_w}) \quad [W] \quad (3)$$

$$P_{r\theta} = (P_1 - P_{s\theta} - P_{fe}) \times (1 - \frac{N}{60f}) \times (1 + \frac{25 - \theta_c}{K + \theta_w}) \quad [W] \quad (4)$$

$$P_{Lr} = P_1 - 2\pi \times T \times \frac{N}{60} - P_{s\theta} - P_{fe} - P_{fw} - P_{r\theta} \quad (5)$$

### 3.2 손실의 세부 입력량에 대한 표준불확도

손실분리법에 의해 측정량을 얻어낸 후, 본 논문에서 목표로 하고 있는 삼상 유도전동기 효율의 확장 불확도를 추정하기 위해 각 손실의 불확도를 추정해야 한다. 또한 각 손실의 불확도도 마찬가지로 각 시험에서 발생하는 각 시험 항목 결과와 불확도에 의해서 결정되어진다. 손실의 불확도 추정을 위해서 사용되는 세부 입력량에 대한 불확도 및 유효자유도는 표 2와 같다. 각 시험

표 2 입력량에 대한 불확도 및 유효자유도

Table 2 the freedom and uncertainty values for the test amounts

1) 시험 전 측정								
항목	표기 [단위]	A형			B형		A형+B형 합성	
		측정값	불확도	자유도	불확도	자유도	표준불확도	유효자유도
권선저항	$R_0$ [Ω]	12.874	0.00068	9	0.0005	∞	0.00085	21
초기온도	$\theta_0$ [°C]	22.52	0.03887	9	0.15	∞	0.15495	2272
2) 정격운전 후 온도상승								
권선저항	$R_1$ [Ω]	14.340	0.00512	∞	0.0005	∞	0.00514	∞
권선온도	$\theta_{w1}$ [°C]	51.75	0.01477	9	0.15	∞	0.15072	97411
대기온도	$\theta_1$ [°C]	24.90	0.04216	9	0.15	∞	0.15581	1678
3) 부하 시험								
토크	$T$ [Nm]	4.172	0.01095	9	0.01485	∞	0.01845	73
입력	$P_1$ [W]	909.177	2.26004	9	0.5	∞	2.31468	10
전류	$I$ [A]	1.825	0.00341	9	0.005	∞	0.00605	89
속도	$N$ [r/min]	1726.05	0.22912	9	0.5	∞	0.55000	299
권선온도	$\theta_w$ [°C]	46.97	0.01527	9	0.15	∞	0.15077	85392
대기온도	$\theta_c$ [°C]	23.34	0.0163	9	0.15	∞	0.15088	65598
전압	$V_1$ [V]	379.74	0.01416	9	0.025	∞	0.02873	153
4) 무부하 시험								
전압	$V_0$ [V]	379.76	0.01747	9	0.025	∞	0.03050	84
전류	$I_0$ [A]	1.374	0.00371	9	0.005	∞	0.00622	71
입력	$P_0$ [W]	60.276	0.00819	9	0.5	∞	0.50006	123338642
권선온도	$\theta_{w0}$ [°C]	36.94	0.0163	9	0.15	∞	0.15088	65598

항목의 10회 반복 측정 후 평균값이 측량값으로 표현되었고, 그림 1의 불확도 평가 절차에 따라 A형 불확도와 표 1에 의하여 이미 관측값의 통계적 분석으로부터 얻어진 B형 불확도를 나타내고 있다.

또한 권선의 저항은 정격 운전 직후 전동기 정지 후 시간 및 저항의 변화에 따른 추세를 이용하여, A형 불확도를 추정하였다.

자유도의 경우 A형 불확도는 반복시험회수에 따라 결정되고, B형 불확도의 경우 자유도는 무한대로 표현 할 수 있다. 또한 A형 및 B형의 불확도 합성은 불확도 전파법칙에 의해서 합성되고, 자유도는 최종 효율의 신뢰 구간을 선정하기 위한 중간 과정인 WelchSatterthwaite 공식에 의해서 추정할 수 있다.

### 3.3 각 손실에 대한 불확도

IEC 60034-2-1의 규격에 의해서 효율에 영향을 미치는 손실은 크게 5가지로 분류되어 있다. 이는 고정자손, 회전자손, 철손, 풍손 및 마찰손, 표류부하손이다. 전동기의 효율을 산출할 때, 이 5가지 손실들이 적용되며, 특히 적용하기 힘든 손실은 표류부하손에 포함되어 있다. 따라서 효율의 불확도는 5가지 손실의 불확도를 적용하면 된다. 먼저 각 손실의 불확도를 산출한 후, 불확도 전파 법칙에 의해서 합성하여 최종적으로 효율 불확도를 추정할 수 있다.

풍손 및 마찰손의 불확도를 추정하기 위해서 먼저 일정 손실( $P_k$ )에 대한 불확도를 추정해야 한다. 일정 손실( $P_k$ )의 불확도는 표 2에 제시된 시험 측량값(무부하 시험시 입력, 전류, 권선온도 및 권선 저항)에 대한 불확도( $u(x_i)$ )와 모델식(2)을 통해서 감도계수( $c_i$ )를 산출한 후 합성하여 추정 할 수 있다.

풍손 및 마찰손을 구하기 위해, 무부하 시험 중 정격전압 50% 이하 값 각각에 대하여 무부하 전압의 제곱( $V_0^2$ )에 대한 일정 손실( $P_k$ )의 곡선을 그린다. 무부하 전압의 제곱(x축)과 일정손실(y축)으로 하여 영전압까지 직선을 가정하여 그렸을 때 y축 값이 풍손 및 마찰손( $P_{fw}$ )이다. 무부하 전압의 제곱(x축)과 일정손(y축)의 관계식은  $y = ax + b$ 로 표현 할 수 있다. 풍손 및 마찰손( $P_{fw}$ )의 표준 불확도를 추정하기 위해서 식 (6),(7)과 같은 최소 제곱선 이론을 이용하였다. 풍손 및 마찰손( $P_{fw}$ )의 표준불확도는  $x_i$ 값이 0일 때, 식 (6)를 통해서 구할 수 있다.

$$u(P_{fw}) = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{S_{xx}}} \tag{6}$$

$$\text{여기서 } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_i - (ax_i + b)^2}{n-2}}, S_{xx} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, n=3 \text{ (측정회수)} \tag{7}$$

철손( $P_{fe}$ )은 일정손( $P_k$ ) 및 풍손 및 마찰손( $P_{fw}$ )과 관계에서 불확도 전파법칙에 의한 식 (8)을 이용하여, 식 (9)에 의해서 추

정하였다.

$$u(P_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u^2(x_i)} \tag{8}$$

$$u(P_{fe})^2 = u(P_k)^2 + u(P_{fw})^2 \tag{9}$$

25°C로 보정된 고정자손( $P_{s\theta}$ )과 회전자손( $P_{r\theta}$ )의 불확도는 모델식 (3)과 (4)를 통해 얻어진다. 고정자손( $P_{s\theta}$ )의 불확도 요소는 100 %부하 시험시 전류, 권선온도, 대기온도 및 초기 저항의 표준불확도와 모델식 (2)로 감도계수를 산출한 후 합성하여 추정할 수 있다. 또한 회전자손( $P_{r\theta}$ )의 불확도 요소는 100% 부하 시험시 회전속도, 토오크, 권선온도, 입력 및 고정자손 및 철손의 표준불확도와 모델식 (4)로 감도계수를 산출한 후 합성하여 추정할 수 있다.

표류부하손( $P_{LL}$ )은 잔류손( $P_{Lr}$ )과 토오크( $M$ )의 제곱과 관계에서 회귀분석을 통하여 기울기를 산출 한 후, 식 (10)과 같이 그 기울기와 토오크( $N$ )의 제곱으로 구할 수 있다.

$$P_{LL} = A \times T^2 \text{ [W]} \tag{10}$$

여기서,  $A$  : 회귀분석을 통한 기울기

(입력전력에서 기계적 출력, 고정자손, 철손, 풍마찰손, 회전자손을 빼서 잔류손을 구하고, 그 잔류손( $P_{Lr}$ , Y축)과 토오크( $M$ )의 제곱(X축)과의 관계에서 기울기를 산출한다)

표류부하손은 토오크의 제곱에 대해서 잔류손과 같은 기울기를 가지면서 존재한다. 이에 표류부하손의 불확실성은 잔류손과 같게 존재하므로 불확도도 같다고 가정할 수 있다. 잔류손의 표준 불확도는 고정자손 및 회전자손의 불확도와 마찬가지로 모델식 (5)를 통해서 추정 할 수 있다.

### 3.4 효율의 불확도

그림 3은 각 손실 및 효율의 불확도 연계성을 나타낸 것이다.

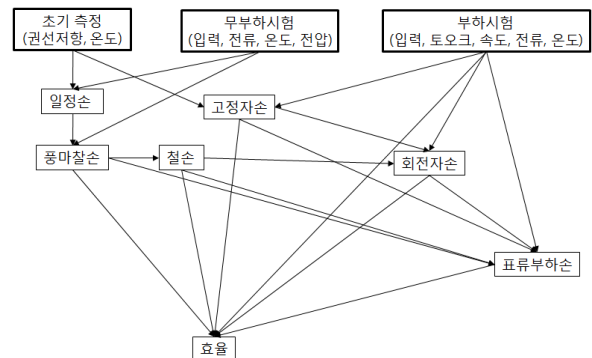


그림 3 각 손실 및 효율의 불확도 연계

Fig. 3 The uncertainty interrelationship for each loss and efficiency

각 시험을 통해 측정량을 얻어내고, 그 측정량들 통해서 각 손실들을 구하게 된다. 또한 서로간의 손실들도 상호 연계를 통해 불확실의 영향을 미치게 된다. 특히 표류부하손의 경우 풍손 및 마찰손, 철손, 회전자손 및 부하시험 시 얻어진 측정량 등의 불확도에 영향을 받게 된다.

효율의 추정값  $\eta$ 은 식 (1)과 같이 각 손실의 입력 추정값들의 함수로 표현될 수 있다. 최종적인 효율의 합성 표준불확도( $U_c(\eta)$ )는 불확도 전파법칙에 의해 식 (11)과 같이 각 손실( $P_i$ )의 표준불확도( $u_i$ )를 합성하여 얻을 수 있다.

$$U_c(\eta)^2 = \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{fc}} u_{fc}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{fw}} u_{fw}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{s\theta}} u_{s\theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{r\theta}} u_{r\theta}\right)^2 + \left(\frac{\partial \eta}{\partial P_{LL}} u_{LL}\right)^2 \quad (11)$$

표 3은 각 손실 및 효율의 대한 불확도 총괄표로서, 불확도 성분의 산출내역 및 불확도 요인들을 나타낸다. 입력을 포함한 각 손실의 추정값( $x_i$ )은 시험으로 얻어진 측정량을 통해서, IEC 60034-2-1의 손실 계산으로 얻어진다. 또한 각 손실의 표준 불확도  $u(x_i)$ 는 위에서 제시된 방법으로 얻어지고, 감도계수는 식 (1)을 통해서 각 손실과 효율의 편도함수  $\partial \eta / \partial P_i$ 로 구할 수 있다. 이 편도함수는 각 손실( $P_i$ )의 변화에 대한 효율( $\eta$ )의 변화를 나타내는 것으로 감도계수라고 한다. 각 손실의 표준 불확도 및 감도계수를 산출하여 효율에 대한 불확도 기여도를 추정하고, 불확도 전파법칙을 통해서 최종적으로 효율의 합성 표준불확도( $U_c(\eta)$ )를 0.5105[%]로 추정하였다.

그림 4는 효율 불확도에 대한 각 손실 인자의 기여율을 나타

내고 있다. 효율의 불확도에 미치는 인자 중에서 표류부하손이 불확도에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 표류부하손은 정격 부하율 25~125[%]의 6점에서 토오크의 제곱과 잔류손의 기율기에 따라서 변경 될 수 있다. 또한 잔류손은 입력전력에서 기계적 출력, 고정자손, 철손, 풍손 및 마찰손, 회전자손을 빼서 구해진다. 이는 표류부하손은 각 손실의 불확도와 기계적 출력의 불확도 영향을 함께 받는 것으로 분석되었다. 따라서 각 손실 및 기계적 출력의 불확도 합성으로 표류부하손의 불확도가 효율 불확도에 기여율이 가장 큰 것으로 나타났다.

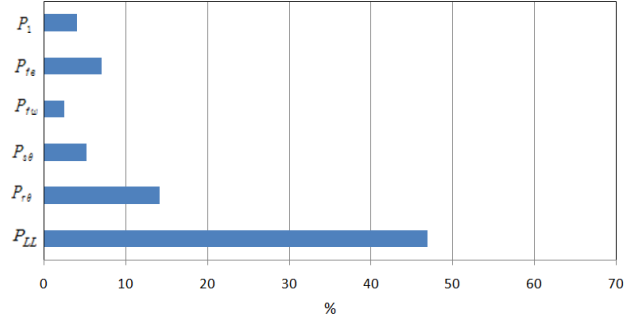


그림 4 각 손실인자 대한 효율 불확도의 기여율

Fig. 4 The ratio of efficiency uncertainty contributions

### 3.5 확장불확도

측정량의 합리적인 추정치가 이루는 분포 대부분을 포함할 것으로 기대되는 측정결과 주위의 구간확도를 확장불확도라 하며, 이를  $U$ 라 표현 한다. 확장불확도( $U$ )는 합성 표준불확도  $U_c$ 에 신

표 3 각 손실의 및 효율의 불확도 총괄표

Table 3 The all-inclusive uncertainty table for the losses and the efficiency

항목	표기 [단위]	추정값 $x_i$	표준 불확도 $u(x_i)$	감도계수 $c_i$	불확도기여도 $c_i u(x_i)$	자유도 $v(x_i)$
입력	$P_1$ [W]	909.17	2.3147	0.0177	0.0409	10
	불확도 요인: 반복측정 결과와 교정성적서에 의한 결과					
철손	$P_{fc}$ [W]	26.13	0.6516	-0.1100	0.0717	668
	불확도 요인: 식(9)에 의한 정손실(무부하 입력, 전류, 권선온도)와 풍마찰손					
풍마찰손	$P_{fw}$ [W]	5.98	0.2275	-0.1100	0.0250	668
	불확도 요인: 무부하 전압의 제곱과 정손실					
고정자손	$P_{s\theta}$ [W]	72.13	0.4806	-0.1100	0.0529	90
	불확도 요인: 부하시험에서 얻어진 전류, 권선온도, 대기온도, 초기저항					
회전자손	$P_{r\theta}$ [W]	33.52	1.3124	-0.1100	0.1443	14
	불확도 요인: 부하시험에서 얻어진 입력, 권선온도, 온도 및 입력, 고정자손, 철손					
표류부하손	$P_{LL}$ [W]	8.22	4.3558	-0.1100	0.4791	67
	불확도 요인: 기계적 출력(회전수, 토오크), 입력, 철손, 풍마찰손, 고정자손 및 회전자손					
효율	$\eta$ [%]	83.9	효율에 대한 합성 표준불확도 $U_c(\eta)$ : 0.5105			83

뢰수준과 자유도에 따라 결정되는 포함인자(coverage factor)  $k$  를 곱하여 식 (12)을 통해서 구해진다.

$$U = kU_c \tag{12}$$

측정의 최종결과는  $\eta$ =효율 추정값  $\pm$  확장불확도( $U_c$ )로 표시되며, 이때에 반드시 포함인자에 대한 정보를 함께 제공한다. 포함인자(k)는 신뢰수준과 유효자유도(effective degree of freedom)의 결정에 따라 t-분포표에 의해 주어지는 상수이다. 측정의 최종결과를 표시할 때 포함인자(k)에 대한 정보는 가능한 한 사용된 계수를 직접 나타내어 표시하며 신뢰수준으로 표시할 때는 결정된 유효자유도를 함께 기술한다.

합성표준불확도  $U_c$ 에 대하여 각 불확도 구성요소의 자유도를 결합시킨 유효자유도가 실제로 매우 작아 단순히  $U_c$ 의 표준편차가 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하여 포함인자(k)의 크기를 2로 사용하는 것이 적절치 못한 경우에는 아래 식 (13)의 Welch-Satterthwaite 공식에 따라 유효자유도를 추정할 수 있다. 유효자유도가 10이상일 경우 정규 t-분포표에서 유효자유도  $\infty$ 로 취급이 가능하다.

$$v(\eta) = \frac{(U_c(P_k))^4}{\sum_{i=1}^n \frac{(c_i u(x_i))^4}{v_i}} \tag{13}$$

따라서 효율의 유효자유도가 83이므로  $\infty$ 로 가정할 수 있다. 이는 신뢰수준 95 [%]에 대한 포함인자를 t-분포표에서 찾으면  $k \approx 2$ 로 할 수 있다. 따라서  $U = k u_c(\eta) = 2 \times 0.5105 = 1.0210$  [%]이다. 최종적으로 효율에 대한 확장 불확도는 결과값의 자리수 뺏음법을 적용하여 소수점 2째 자리 이상은 삭제 할 수 있다. 본 논문에서 선택한 모델의 효율은 83.9[%]이고 확장불확도는 1.0[%] 이므로 최종 효율은 식 (14)와 같이 표현할 수 있다. 이것은 효율을 100번 반복 시험 했을 때, 95번의 효율 결과값이 82.9~84.9[%]사이에 존재 한다는 의미이다.

$$\eta = (83.9 \pm 1.0) [\%] \text{ (신뢰수준 약 95[\%], } k=2) \tag{14}$$

#### 4. 결 론

본 논문에서는 고효율 사용이 의무화된 삼상 유도전동기 효율 값의 신뢰성을 보증하기 위해서, 95[%]의 신뢰수준인 효율 불확도 평가 방법을 제시하였다. 특히, 국제적으로 채택된 불확도 평가 방법인 GUM의 방법과 IEC 효율 측정 방법을 이용하여 불확도 모델식을 결정함으로써, 손실 및 최종 효율에 대한 불확도를 연구하였다. 또한 효율 불확도를 갖는 가장 큰 요인은 불확도 모델식의 연계성 분석을 통해 류표부하손 입을 알 수 있었다.

본 논문에서 제시한 삼상 유도전동기의 손실분리법에 의한 효율 측정의 불확도 추정 방법은 실제 시험 환경에서 발생하는 측정요인의 변동 및 측정 장비의 정확성을 고려하여 신뢰성 있는

결과를 제공할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 향후 연구 및 시험기관에서 효율 결과 산출시 불확도를 추정하고자 할 경우, 본 논문에서 제시한 불확도의 측정 모델식 및 불확도 인자 설정 등의 방법을 응용하면 좀 더 쉽고 확실하게 불확도를 추정할 수 있을 것으로 기대한다.

#### 감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2014년)에 의하여 연구되었음.

#### References

- [1] IEA(International Energy Agency), "Proposed work plan for energy-efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems" 2011
- [2] P. Waide and C. Brunner, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor Systems," IEA, 2011.
- [3] MKE, KEMCO, "Korea Energy Standards & Labeling", 2011
- [4] De Almeida, A.T.; Ferreira, F.J.T.E.; Fong, J.A.C., "Standards for Efficiency of Electric Motors," Industry Applications Magazine, IEEE , vol.17, no.1, pp.12,19, Jan.-Feb. 2011
- [5] IEC 60034-30-1 Ed. 1, "Rotating electrical machines - Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors(IE code)", 2014
- [6] Kyung-II Woo, Han-Seok Park, Hee-Deuk Jun, "A Study on the International Standard and Regulation for Electric Motor and Drivers", KIPE Magazine vol. 63, P.437-443, 2014
- [7] ISO, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement(GUM)",1995
- [8] ISO/IEC Guide 98-2, "Guide to the Expression of Uncertainty in measurement", 2008
- [9] KOLAS, "Guide to the Expression and the evaluation of Uncertainty in Measurement, KOLAS-G-005", 2007
- [10] ISO/ IEC 17025, "General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories", 2005
- [11] EURACHEM/CITAC Guide, "Quantifying Uncertainty in Analytical measurement", 2nd edition, QUAM, 2000
- [12] M H Ramsey and S L R Ellison(eds.) Euranchem/EUROLAB/CITAC/Nordtet/AMC Guide, "Measurement uncertainty arising from sampling: A guide to methods and approaches, First Edition," 2007
- [13] IEC 60034-2-1 Ed. 2.0, "Rotating electrical machines

- Part 2-1:Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)", 2014

## 저 자 소 개



### 전 희 득(Hee-Deuk Jun)

1975년 05월 20일생. 2000년 한양대 전기전자공학과 졸업, 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002~2005년 중소기업진흥공단 전통기설계실 연구원. 2005년~현재 한국기계전기전자시험연구원 회전기기센터 선임연구원. 2009년~현재 기술표준원 지정 국제표준화 기구 IEC/TC 2(회전기) 간사. 2013년~현재 부경대학교 전기공학과 박사과정.



### 박 한 석(Han-Seok Park)

1955년 3월 23일생. 1981년 중앙대 전기공학과 졸업(공학사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996년 한국해양대학교 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~현재 부경대학교 전기공학과 교수.



### 김 대 경(Dea-Kyong Kim)

1972년 9월 27일생. 2001년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(박사). 2001~2005년 삼성전자 가전연구소 선임연구원. 2005~2011년 전자부품연구원디지털컨버전스연구센터 센터장. 2011년~현재 순천대학교 전기제어공학과 조교수



### 우 경 일(Kyung-II Woo)

1969년 9월 6일생. 1995년 한양대 전기공학과 졸업(공학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2002년~현재 부경대학교 전기공학과 교수