

A Study of Design of Outer Rotor Type BLDC Motor for Service Robot Arm

Kim Young Kyoun*

Department of Electrical Engineering, Osan University, Osan 18119, Korea

(Received 16 November 2015, Received in final form 3 December 2015, Accepted 4 December 2015)

This paper presents characteristics Analysis of Outer Rotor type BLDC Motor. To reduce the cogging torque and to make the high back EMF constant of the motor, Not only magnetization directions of a permanent magnet are investigated, but also a tooth chamfer of a stator is optimized. The design and analysis results are verified with experimental results.

Keywords : BLDC motor, cogging torque, response surface method, optimal design, finite element method

유한요소법을 이용한 서비스 로봇관절용 외전형 BLDC 모터설계에 관한 연구

김영균*

오산대학교 전기공학과, 경기 오산시 청학로 45, 18119

(2015년 11월 16일 받음, 2015년 12월 3일 최종수정본 받음, 2015년 12월 4일 게재확정)

본 논문은 서비스 로봇관절 구동에 적용되는 50 W급 외전형 BLDC 전동기의 코깅토크 최소화 설계에 관하여 기술하였다. 코깅 토크 저감 설계를 위해서 반응표면법을 이용하였으며, 반응표면법에 사용되는 관측자료는 유한요소법을 이용하였다. 끝으로 설계결과에 대한 타당성은 실험을 통해서 검증하였다.

주제어 : BLDC 전동기, 코깅토크, 반응표면법, 최적설계, 유한요소법

I. 서 론

BLDC 전동기는 효율이 높고 고출력이 가능하여 여러 분야에 걸쳐 오래전부터 사용되어 왔다. 또한 BLDC 전동기는 응답성이 빠르고 토크제어와 속도제어가 용이하여 로봇구동 시스템에 매우 적합한 전동기라고 할 수 있다[1, 2]. BLDC 전동기는 구조적 특징에 따라서, 내전형과 외전형으로 크게 분류할 수 있으며 일반적으로 회전자 표면에 영구자석을 부착한 구조의 전동기를 BLDC 전동기라고 한다. 내전형 BLDC 전동기의 경우, 회전자 외표면에 영구자석을 부착하므로 원심력에 의해서 영구자석이 비산될 수 있는 단점이 있으며, 이를 대비해야 한다[1-3]. 반면에, 외전형 BLDC 전동기의 경우, 회전자 내표면에 영구자석을 부착하므로 영구자석이 비산될 우려가 없다. 또한 로봇관절 시스템과 같이 전동기 사이즈에 대한 제한이 엄격하고 높은 토크를 필요로 하는 응용

에 있어서는 내전형 BLDC 전동기보다, 외전형 BLDC 전동기를 사용하는 것이 적절하다고 할 수 있다.

한편, BLDC 전동기는 앞서 언급한 것과 같이 여러 가지 장점이 있는 반면에 필연적으로 공극에서 코깅 토크가 발생되며, 이 토크는 전동기의 진동과 소음 발생 인자로 취급되며, 특히 정밀한 동작이 요구되는 로봇관절 구동용 BLDC 전동기에 있어서 반드시 저감되어야 하는 요소이다.

본 논문에서는 서비스 로봇관절 구동에 적용되는 50 W급 외전형 BLDC 전동기 설계에 관하여 기술하였다. 50 W급 외전형 BLDC 전동기 설계는 기본적으로 유한요소법을 이용하였으며, 코깅 토크 저감설계를 위해서 반응표면법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 반응표면법은 여러개의 독립적인 설계변수에 대한 응답(출력)을 추정하는 통계적 근사기법을 기반으로 하는 최적설계법이다[4, 5]. 끝으로 설계결과에 대한 타당성은 실험을 통해서 검증하였다.

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.

*Corresponding author: Tel: +82-31-370-2672,

Fax: +82-31-370-2679, e-mail: kimyk@osan.ac.kr

2. 전동기 설계모델

50 W급 외전형 BLDC 전동기 초기설계는 정격출력 조건과

Table I. Design specifications and results of the initial design.

항목	내용	항목	내용
전압	24 V	극수	16
정격출력	50 W	슬롯수	12
속도	5050 RPM	슬롯 오픈폭	2 mm
외경제한	43 mm	자화방향	Radial 방향
잔류 자속밀도	0.7 T	코깅토크	99.5 mN-m
무부하 유기전압	1.5 V	효율	82 %

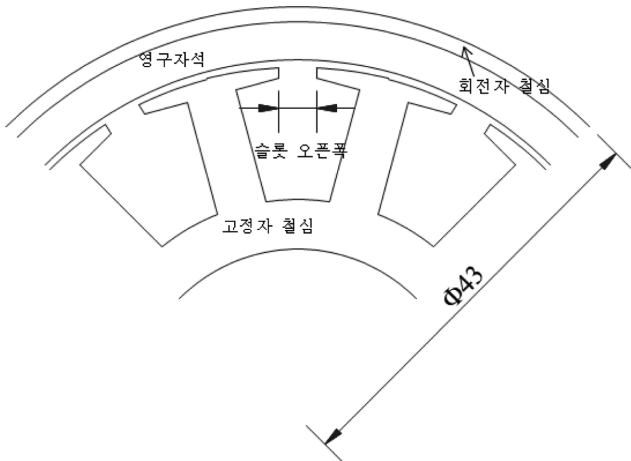
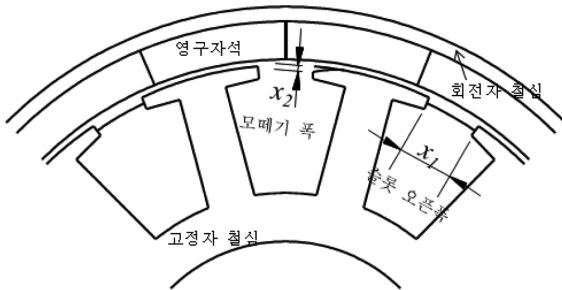
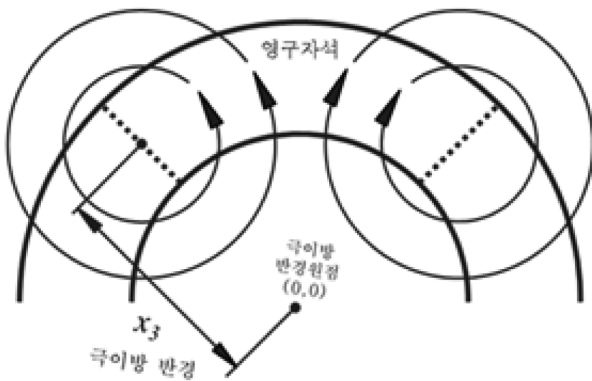


Fig. 1. Shape of the initial design model.



(a) Variables of the shape design



(b) Variable of the magnetizing direction of permanent magnets

Fig. 2. Definition of optimal design variables.

제한사항을 반영하여 등가회로법과 유한요소법을 이용하여 설계하였다. 다양한 극수와 가능한 슬롯수 조합을 고려하여 16극 12슬롯의 외전형 BLDC 전동기를 설계하였으며, Table I에 주요 설계사항과 초기설계결과를 나타내었다.

일반적으로 BLDC 전동기는 영구자석 자화방향으로 래디얼 방향과 패럴 방향을 사용하여, 외전형 BLDC 전동기는 극이방 착자를 사용할 수 있다[1-3]. 초기설계에서는 래디얼 방향을 사용하여 설계를 진행하였으며, 코깅토크 저감을 위한 최적설계 단계에서는 자화방향으로 극이방 착자를 고려하였다.

Table I과 Fig. 1에 나타낸 16극 12슬롯의 외전형 BLDC 전동기 초기설계형상에 대해서 코깅토크 저감을 위한 최적설계를 수행하였다. 최적설계방법은 반응표면법을 이용하였으며, 설계변수는 Fig. 2에 나타내었다.

초기설계 결과로부터 제한조건과 출력사항을 만족하는 코깅토크 최소화 설계를 하기 위해서 치끝단부 모떼기 폭(x_1)과 슬롯오픈폭(x_2)과 같이 고정자 치와 슬롯 형상을 결정하는 설계 변수를 정의 하였다. 또한 최적설계 단계에서는 충분한 공극자속밀도를 확보하고 효과적인 코깅토크 저감설계를 위해서 영구자석의 자화방향을 결정하는 극이방 반경(x_3)을 추가로 정의하여 최적설계를 진행하였다. 극이방 반경은 Fig. 2(b)에 표시한 것과 같이 원점을 기준으로 영구자석 자화패턴의 중심부까지 거리를 나타낸다.

3. 반응표면법

반응표면법은 독립적인 설계변수가 복합적인 작용에 의해서 반응값(출력값)에 변화를 주는 관계를 통계적인 근사방법으로 찾는 기법이다. 반응표면법을 이용한 최적설계 과정은, 먼저 설계변수와 출력값을 정의하고, 설계변수와 출력값 사이의 인과관계 근사에 필요한 관측값을 수집한다. 수집한 관측값으로부터 제약사항과 설계목표를 만족하는 출력값과 설계변수를 찾는 것으로 최적설계를 진행할 수 있다. BLDC 전동기 최적설계를 위해서 관측값 수집은 유한요소법을 이용하여 Fig. 2에서 정의한 설계변수와 출력값 사이의 인과관계를 확보하였다.

반응표면법에서 관측값으로부터 설계변수와 출력값사이의 인과관계는 다음과 같이 정식화 할 수 있다. k 개의 설계변수에 대한 출력값 y 는 식(1)과 같이 표현 할 수 있다[4-5].

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) \tag{1}$$

식(1)과 같이 표현한 출력값 y 는 미지의 함수로 취급되며, 알려져 있다 하더라도 매우 복잡한 함수의 형태로 표현되거나 표현하기가 어려운 경우가 많을 것이다. 따라서, 출력값을 나타내는 함수로서 일반적으로 가정되는 간편하고 실용적인 반응표면모형은 k 개의 설계변수에 대한 중회귀모형(multiple

regression model)이다. 본 논문에서 선택한 반응표면모델은 설계변수에 대한 출력값의 인과관계가 곡면으로 표현될 것이라고 가정하여 근사함수를 2차 모형으로 사용하였다.

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \sum_{i \neq j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (2)$$

여기서 변수 x_1, x_2, \dots, x_k 는 설계변수, β 는 회귀계수, ε 은 관측값에 대한 오차항이며 이를 최소화 함으로써 회귀계수를 추정할 수 있다.

식(2)를 n 개의 관측값에 대해서 행렬의 형태로 표현하면 아래 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

여기서 X 는 설계변수 행렬, β 는 회귀계수 벡터, ε 는 오차 벡터이다.

한편 식(3)에서 회귀계수 벡터는 오차의 제곱합을 최소로 하는 최소자승법을 이용하여 추정할 수 있으며, 최소자승 합수는 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon' \varepsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad (4)$$

위 식이 최소가 되는 조건을 만족하는 회귀계수 벡터를 b 라 하고 이를 추정된 회귀계수 벡터라고 한다. 그리고 이를 사용한 근사화한 출력값을 아래 행렬식과 같이 표현할 수 있다.

$$b = (X' X)^{-1} X' y \quad (5)$$

$$\hat{y} = X b \quad (6)$$

여기서 행렬 X' 는 행렬의 전이행렬이다.

반응표면법에서 관측값을 수집하기 위해서 사용하는 방법

은 실험계획법이 대표적인 방법이다. 본 논문에서는 Fig. 2에서 정의한 3개의 설계변수에 대해서 관측회수를 최소화하고 출력값에 대한 곡면을 최대한 잘 표현할 수 있도록하기 위해서 중심합성계획법(central composite design)을 이용하였다[4, 5]. 중심합성 계획법은 대표적인 실험계획법중에 하나인 2레벨 요인실험 계획에 대해서 중심점과 축점을 추가한 실험계획법으로 적은 관측회수로 곡면을 표현할 수 있는 반응표면법의 대표적인 실험계획법이다.

3. 최적설계 결과

Fig. 2에서 정의한 설계변수에 대해서 50 W급 회전형 BLDC 전동기의 코깁토크를 저감하기 위해서 최적설계를 진행하였다.

앞 절에서 설명한 반응표면법을 이용하기 위해서 아래 Table II에 나타낸 중심합성법에 대한 실험계획을 통해서 관측자료를 수집하였다. 출력 값으로는 코깁토크, 무부하 역기전압, 정격출력, 효율에 대한 값을 검토하였다.

각 출력값에 대한 회귀계수는 오차의 제곱합을 최소로 하는 최소자승법을 이용하여 추정하여 Table III에 나타내었으며, 이것은 설계변수에 대한 출력값의 인과관계를 나타내는 반응표면 모형이라고 할 수 있다. 이 모형을 이용하여 초기 설계한 외전형 BLDC 전동기의 코깁토크 저감을 위한 최적설계를 진행하였다. 최적설계를 위한 목적값과 제한사항은 다음 식과 같이 정의하였다[4-6].

- 목적함수:

$$\hat{y}_1 = 0(mN-m) \quad (7)$$

- 제약함수:

$$\hat{y}_2 \geq 1.6(V) \quad (8)$$

Table II. Sampling datum of the central composite design.

관측번호	x_1 모떼기 폭 (mm)	x_2 슬롯 오픈폭 (mm)	x_3 극이방 반경 (mm)	무부하 역기전압 (V)	코깁 토크 (mN-m)	출력 (W)	효율 (%)
1	0.10	2.00	17.00	1.59	59.2	72.0	85.55
2	0.30	2.00	17.00	1.55	24.2	79.3	85.36
3	0.10	3.00	17.00	1.61	16.6	75.9	85.61
4	0.30	3.00	17.00	1.56	6.2	83.6	85.34
5	0.10	2.00	19.00	1.65	54.7	67.1	85.53
6	0.30	2.00	19.00	1.61	26.5	74.7	85.58
7	0.10	3.00	19.00	1.67	26.7	70.3	85.60
8	0.30	3.00	19.00	1.62	11.4	77.8	85.56
9	0.03	2.50	18.00	1.78	83.6	48.3	83.92
10	0.37	2.50	18.00	1.71	22.3	61.9	85.35
11	0.20	1.66	18.00	1.72	48.7	55.7	84.96
12	0.20	3.34	18.00	1.75	16.5	56.8	84.97
13	0.20	2.50	16.32	1.46	34.6	90.5	84.05
14	0.20	2.50	19.68	1.27	6.6	118.5	78.99
15	0.20	2.50	18.00	1.74	43.6	54.8	84.66

Table III. Response model of sampling datum.

계수	코깅 토크 (mN-m)	무부하 역기전압 (V)	출력 (W)	효율 (%)
b_0	-42.0302	-2786.16	5851.618	-120.63
b_1	-0.10105	-491.719	14.06027	-23.222
b_2	0.088112	-14.8753	-8.00547	-10.0415
b_3	4.8591	329.2413	-645.825	25.03176
b_{11}	0.030217	188.9195	56.23674	38.50811
b_{22}	-0.00942	-21.1609	3.831615	2.008344
b_{33}	-0.13505	-9.53142	18.02685	-0.71538
b_{12}	-0.02751	93.91405	0.655665	-0.42683
b_{13}	-0.00281	2.267785	0.037658	0.572092
b_{23}	-0.00112	4.375628	-0.49386	0.005567

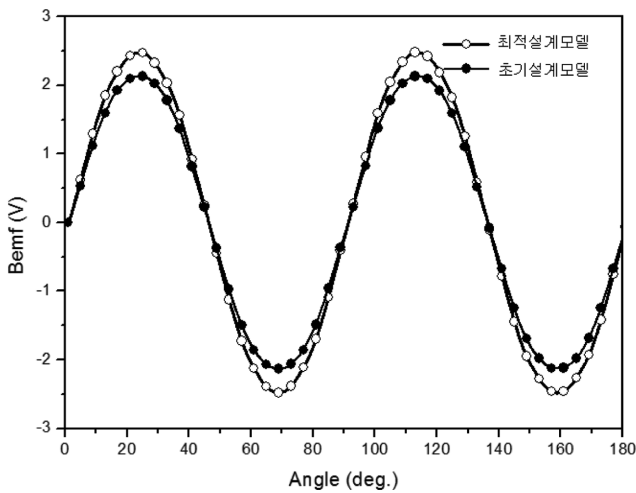


Fig. 3. Comparison of the analysis results of BEMFs.

$$\hat{y}_3 \geq 50(W)$$

$$\hat{y}_4 \geq 85(\%)$$

제한사항으로 출력 50(W) 이상, 효율 85(%) 이상을 만족할 수 있도록 설정하였으며, 최적설계 결과를 Table IV에 정리하여 나타내었다.

4. 설계결과 분석

Fig. 3은 초기설계 모델과 최적설계 모델의 무부하 역기전압 특성을 비교하여 나타내었다. 초기설계 모델 대비 역기

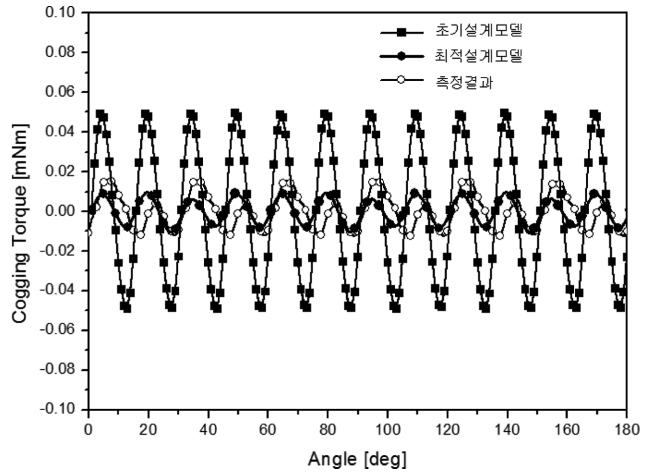


Fig. 4. Comparison of the analysis results of cogging torques.

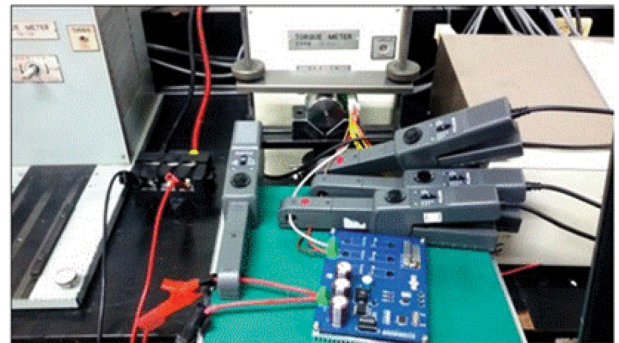


Fig. 5. (Color online) Experimental system of the outer-rotor type 50 W BLDC motor.

전압의 크기는 약 0.2(V) 증가되었다. 그리고 로봇 관절구동용 전동기로서, 향후 정현파 구동방식 사용을 고려하여 무부하 역기전압의 파형을 정현적 형상으로 설계하였다.

Fig. 4는 초기설계 모델과 최적설계 모델의 코깅토크 특성을 비교하여 나타내었다. 코깅토크는 초기설계 모델대비 약 80(%) 저감할 수 있었으며, 실험값은 해석값 보다 다소 높게 측정되었다. 이는 외전형 전동기로서 축계 조립과 영구자석 착자에 대한 정밀도가 영향을 준 것으로 사료된다.

Fig. 5는 최적설계 모델 전동기의 부하시험을 위한 시험장치 구성을 나타내었으며, 정격속도 5050(RPM)에서 출력은

Table IV. Results of the optimal design.

항 목	x_1 모떼기 폭 (mm)	x_2 슬롯 오픈폭 (mm)	x_3 극이방 반경 (mm)	반응표면 모형 값	유한요소 해석 값
\hat{y}_1 코깅 토크(mN-m)				26.9	20.4
\hat{y}_2 무부하 역기전압(V)	0.2	3.0	18	1.75	1.77
\hat{y}_3 출력(W)				56.8	53.9
\hat{y}_4 효율(%)				85.1	84.6

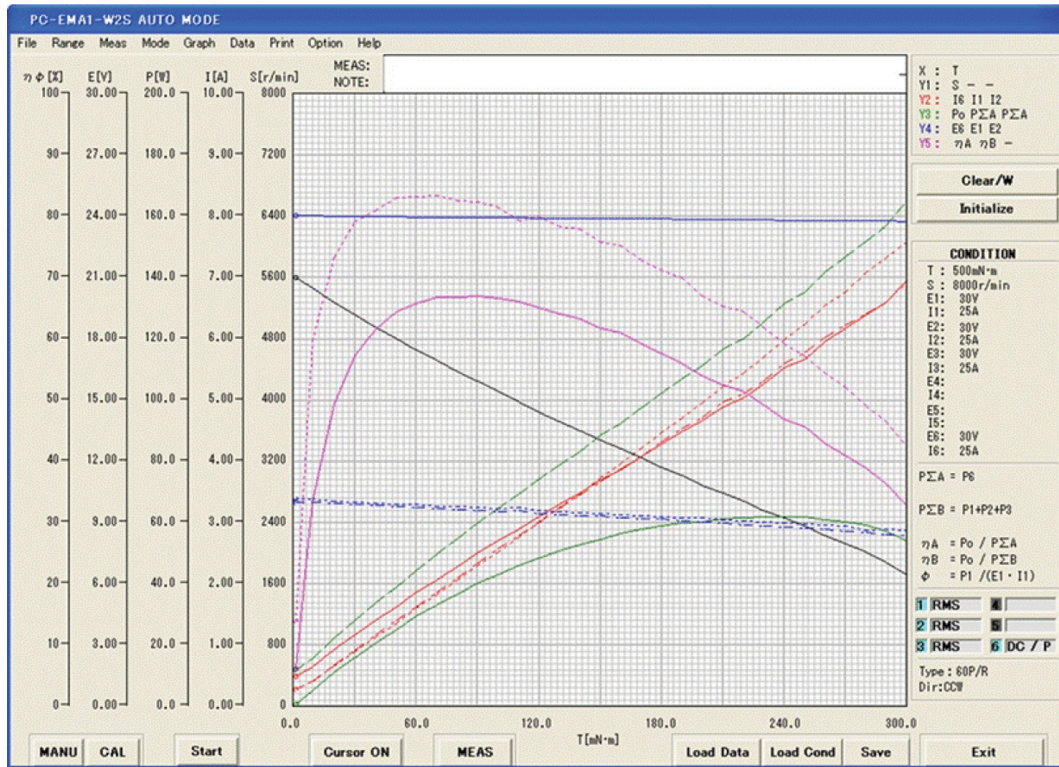


Fig. 6. (Color online) Experimental results of the outer-rotor type 50 W BLDC motor.

54(W), 효율은 약 84(%)를 확보할수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 오산대학교 교내 학술 연구지원비에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

V. 결 론

본 논문은 50 W급 외전형 BLDC 전동기의 코깅토크를 효과적으로 저감하기 위해서 최소한의 설계변수인 치끝단부 모떼기 폭(x_1), 슬롯오픈폭(x_2) 및 영구자석 극이방 반경(x_3)을 선택하였다. 등가회로법과 유한요소법을 이용하여 도출한 초기설계 모델을 대상으로 반응표면법을 적용하여 코깅토크를 최소화 할 수 있는 최적의 설계변수를 도출하였으며, 그결과 치끝단부 모떼기 폭은 0.2(mm), 슬롯 오픈폭은 3.0(mm), 극 이방 반경은 18(mm)로 설계되었다. 그리고, 정격출력 50(W)를 만족함과 동시에 코깅토크는 초기설계 모델 대비, 약 80%를 저감하였다. 50 W급 외전형 BLDC 전동기를 설계함에 있어서, 반응표면법과 유한요소해석법을 이용한 최적설계 기법은 효율적인 설계결과를 제공함을 확인하였다.

References

- [1] C. C. Hwang, P. L. Li, C. T. Liu, and C. Chen, IET on Electric Power Applications **6**, 385 (2012).
- [2] J. R. Hendershot Jr., TJE Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Magna Physics Publishing and Clarendon Press (1994).
- [3] S. J. Lee, S. I. Kim, J. P. Hong, B. Y. Song, and J. W. Park, Proc. of the ICEMS Conf. **1**, 1242 (2010).
- [4] R. H. Myers, Response Surface Methodology, John Wiley & Sons (1995).
- [5] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons (2001).
- [6] N. Umadevi, M. Balaji, and V. Kamaraj, Proc. of the ICEES Conf. **1**, 122 (2014).