

# Design of a High-Speed Single-Phase BLDC Motor in Terms of Asymmetric Air Gap

Byeongjo Kim, Hongsik Hwang, and Cheewoo Lee\*

Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University, Pusan 46241, Korea

(Received 26 February 2018, Received in final form 28 March 2018, Accepted 3 April 2018)

This paper investigates the design of a single-phase brushless DC (BLDC) motor by employing asymmetric air gap to meet the characteristics of vacuum cleaner applications such as low torque and high speed. Also, one of the key objectives has to be reasonable efficiency since it is a disadvantage in a single-phase BLDC motor. Asymmetric stator pole surface needs to be effectively customized to satisfy several important performances such as starting torque and continuous torque at high speeds. Starting torque is modified by using a mechanism of phase difference between cogging torque and back electromotive force. In this paper, two types of asymmetric air gap are designed by changing the ratio of maximum air gap to minimum air gap, and switching on and off angles are determined at the same time after comparing key performances in case of no load and rated operation conditions.

**Keywords** : single-phase BLDC motor, vacuum cleaners, high speed, asymmetric air gap

## 공극 비대칭에 따른 고속 단상 BLDC 전동기 설계

김병조 · 황홍식 · 이치우\*

부산대학교 전자전기컴퓨터공학부, 부산시 금정구 부산대학교로63번길 2, 46241

(2018년 2월 26일 받음, 2018년 3월 28일 최종수정본 받음, 2018년 4월 3일 게재확정)

본 논문은 단상 전동기의 단점인 효율 및 기동특성을 고려하여 청소기에 적합한 고속 단상 BLDC(Brushless DC) 전동기의 설계를 목표로 한다. 단상 BLDC 전동기의 필수 조건인 기동토크 발생을 위해 비대칭 공극을 적용하였다. 무 부하 조건에서 비대칭 비율 정도에 따른 단상 BLDC 전동기의 코깅 토크와 역기전력의 크기 변화와 위상 차이를 분석하였다. 실제 부하 조건에서 단상 BLDC 전동기의 효율을 확인하기 위하여 단상 풀브릿지 인버터의 진상각 제어를 사용하였으며, 비대칭 비율과 진상각 크기에 따른 효율 특성의 비교를 통해 최적 모델을 선정하였다. 본 논문에서는 비대칭 비율에 따른 역기전력 위상 차이가 단상 BLDC 전동기에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 분석하고, 청소기의 부하 조건에서 효율을 극대화할 수 있도록 고속 단상 BLDC 전동기를 설계하였다.

**주제어** : 단상 BLDC 전동기, 청소기, 고속, 비대칭 공극

### I. 서 론

직류 전동기는 브러시와 정류자를 이용하여 기계적인 정류를 하면서 원하는 방향의 토크를 발생시킨다. 그러나 기계적 정류는 소음과 진동을 유발하는 원인이 되고, 기계적인 마찰로 인해 브러시 마모가 발생하므로 꾸준한 유지보수가 필요하게 된다[1, 2]. 직류 전동기를 사용할 경우 모터의 기계적 구조와 전자계 구조의 한계에 따라 낮은 효율, 높은 소음, 마찰로 인한 수명 감소 등의 여러 가지 문제를 야기한다. 이런

단점을 보완하기 위해 브러시와 정류자가 없는 BLDC 전동기의 사용이 증가하고 있다[3]. 가정용과 산업용으로 사용되는 전동기의 경우 고 효율화를 위해 3상 BLDC 전동기를 많이 채택하며, 가격을 고려해야 하는 응용분야에서는 단상 BLDC 전동기의 연구가 필요한 경우도 있다. 그러나 단상 BLDC 전동기의 경우 3상 대비 효율이 낮고, 일반적인 구조에서는 영 토크가 발생하는 구간이 존재하게 된다[4, 5]. 단상 BLDC 전동기에서 영 토크의 발생 문제를 해결하기 위해서는 비대칭 공극과 진상각 제어를 고려한 연구가 반드시 수반되어야 하지만 비대칭 공극과 진상각 제어를 동시에 적용하면서 상호간의 상관관계를 분석하는 연구가 부족한 실정이다. 이에 본 논문에서는 비대칭 공극과 진상각 제어를 함께

고려하면서 청소기의 성능을 만족하는 고속 단상 BLDC 전동기의 설계를 수행하였다.

## II. 본 론

### 1. 단상 BLDC 전동기 설계 목표

청소기 전동기의 경우 소형화와 경량화 설계가 필수적이며 이를 위해 전동기와 인버터를 일체화시킨 구조를 많이 채택하고 있다. 3상 전동기와 비교하여 단상 BLDC 전동기의 경우 고정자 형상 선택이 조금 더 자유롭기 때문에 일체형 인버터에 붙어있는 커패시터의 삽입 공간을 하우징 내부에 만들 수 있으므로 제품 소형화에 유리한 장점이 있다. Table 1은 본 연구에서 목표로 하는 청소기용 단상 BLDC 전동기의 설계 목표를 보여준다. 하우징 내경 52 mm를 기준으로 하여 그 내부에 전동기와 일체형 인버터의 커패시터가 같이 들어갈 수 있도록 고정자와 회전자 구조를 설계하고, 90,000 rpm의 고속 운전 영역에서 최대 효율이 90% 이상이 되도록 비대칭 공극과 진상각을 결정하였다.

Table 1. Specification of a single-phase BLDC motor

최대 출력	330 W
최대 속도	90,000 rpm
효율	90% 이상
적층 길이	7 mm
공극 길이	0.8 mm
하우징 내경	52 mm

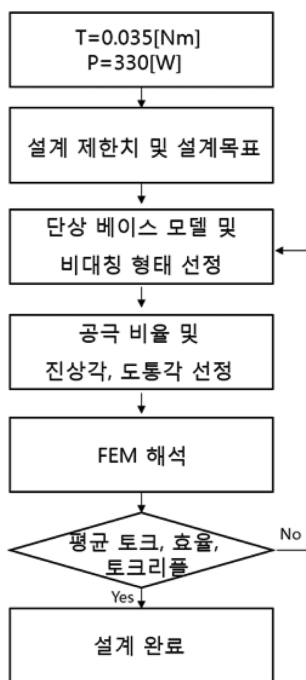


Fig. 1. Design procedure of a single-phase BLDC motor.

### 2. 설계 절차

Table 1에서 제시된 주요 사양 및 목표에 맞춰서 단상 BLDC 전동기를 Fig. 1과 같은 절차를 따라 설계를 수행한다. 단상 베이스모델을 선정하고 비대칭 공극의 형태 및 비율별 무부하 해석을 시작한다. 진상각과 도통각을 적용하고 청소기의 부하가 가해진 조건에서 설계 변수들을 변경함으로써 평균 토크, 효율, 토크리플의 목표를 충족하는 최종 모델을 선정한다.

### 3. 단상 BLDC 전동기 기초 모델

Fig. 2는 제한된 하우징 내경에서 하늘색으로 표시된 커패시터의 위치를 제외하고 나머지 공간에서 구현할 수 있는 단상 BLDC 전동기의 두 가지 전자계 구조를 보여준다. A형과 B형 구조에서 커패시터를 포함한 유로 단면적은 각각 811 mm<sup>2</sup>과 580 mm<sup>2</sup>이며, A형 구조와 비교했을 때 B형은 72% 수준의 단면적을 가지고 있다. 청소기 팬의 효율 관점에서 B형 구조의 경우 흡인된 공기의 비대칭 유로와 작은 유로 공간 때문에 시스템 효율에 불리할 것으로 예상되며 또한 편측으로 치우친 슬롯 공간으로 인해 코일을 감기가 A형 구조보다 어렵다. 따라서 본 연구에서는 대칭 유로를 갖는 A형 전자계 구조를 기초로 하여 단상 BLDC 전동기 설계를 진행하였고, 단상 설계에서 가장 중요한 극호각을 중요 설계변수로 설정하였다. Fig. 3은 단상 BLDC 전동기의 극호각에 따른 코깅토크, 역기전력 실효값, 역기전력 THD(Total Harmonic Distortion) 특성을 비교하였다. 극호각이 커질수록 역기전력 크기는 증가하고 코깅토크는 감소하여 전반적인 성능이 개선되지만 역기전력 THD 특성이 나빠짐을 확인할 수 있다. 극호각이 커질수록 슬롯 공간 확보가 어려우므로 단상 BLDC 전동기의 동손 특성과 THD 특성을 고려하여 120도 극호각을 초기값으로 선정하였다. 고정자 요크 부분의 포화를 고려하면서 슬롯 공간을 최대로 확보하는 방향으로 전자계 구조를 검토하였으며, 그 결과 초기 모델은 Fig. 4와 같으며 자동

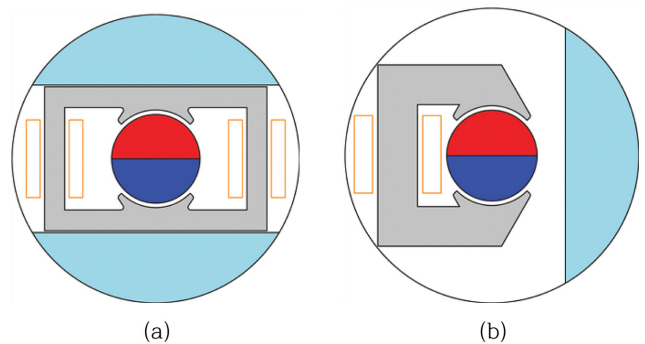


Fig. 2. (Color online) Two electromagnetic structures in integrating an inverter, (a) A-type, (b) B-type.

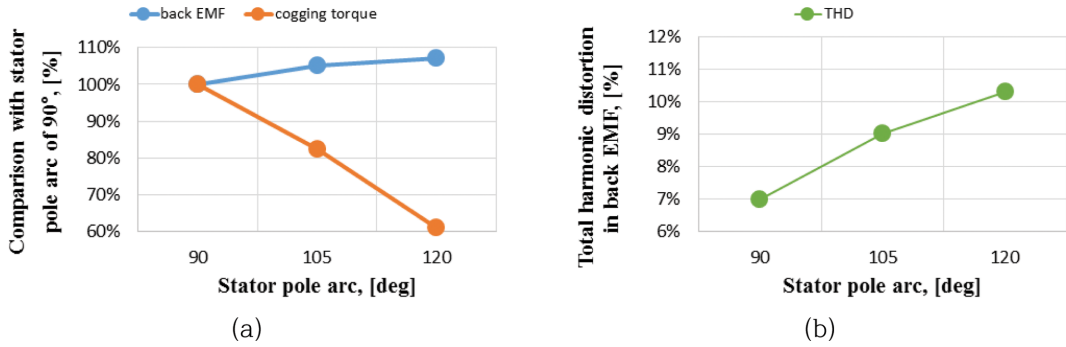


Fig. 3. (Color online) Performances with respect to stator pole arc, (a) back EMF and cogging torque, (b) THD in back EMF.

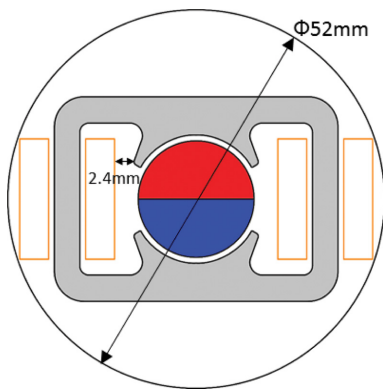


Fig. 4. (Color online) Base design of a single-phase BLDC motor.

으로 권선하는 장치의 비늘이 지나갈 수 있는 공간을 고려하여 고정자 자극 끝단과 권선 사이의 거리를 2.4 mm로 제한하였다. 단, 아직 비대칭 공극은 적용되지 않았으므로 이제부터 이뤄지는 검토가 더 중요하다고 생각된다.

#### 4. 비대칭 공극의 형상과 비율

단상 BLDC 전동기의 기동 토크와 연속 토크 발생을 위해서는 반드시 비대칭 공극을 적용해야 하므로 비대칭 공극의 형상과 비율에 따른 성능의 변화를 분석한다. 단상 BLDC 전동기의 역기전력과 코깅토크는 각각 식(1), (2)와 같다.

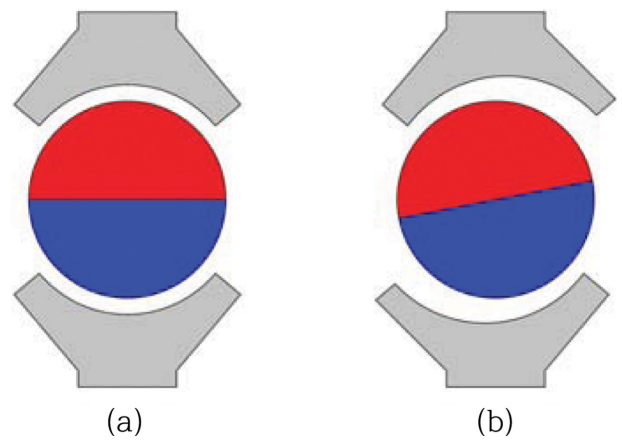


Fig. 5. (Color online) Stator pole surfaces in case of, (a) symmetric air gap, (b) asymmetric air gap.

$$T_{cog} = -\frac{1}{2} \Phi^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (1)$$

$$e = -N \frac{d\Phi}{d\theta} \quad (2)$$

여기서  $\Phi$ ,  $R$ ,  $\theta$ 는 각각 자속, 릴럭턴스, 회전자 위치이다.

두 식으로부터 코깅토크의 위상은 회전자의 위치에 따른 릴럭턴스 변화에 의해 결정되며, 역기전력의 위상은 회전자 위

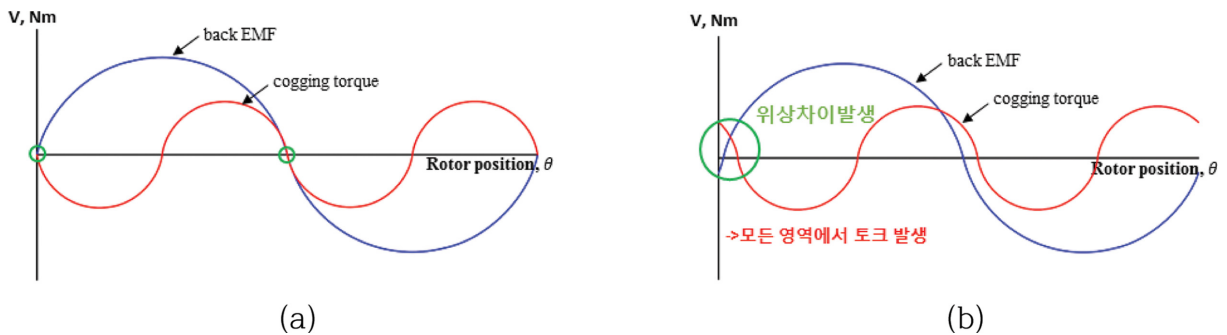


Fig. 6. (Color online) Phase shift between Back EMF and cogging torque in, (a) symmetric air gap, (b) asymmetric air gap.

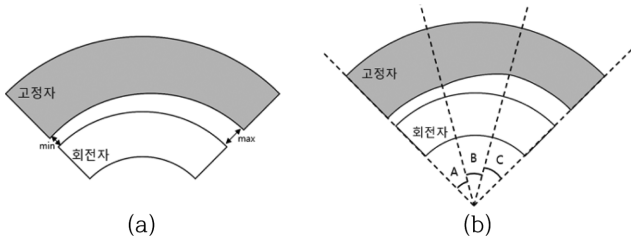


Fig. 7. Two-type stator pole surfaces, (a) tapered structure, (b) stepped structure.

치에 따른 자속 변화에 따라 결정됨을 알 수 있다. 비대칭 공극의 유무에 따른 고정자극 형상, 역기전력과 코깅토크 간의 위상 차이를 Fig. 5와 Fig. 6에서 각각 보여준다. 대칭 공극일 경우 역기전력과 코깅토크가 영이 되는 지점이 일치하게 된다. 전류 인가 시 발생하는 상호 토크(또는 마그네틱 토크)는 역기전력과 동일한 위상을 가지므로 대칭 공극을 사용할 경우 역기전력의 한 주기 동안 토크가 발생하지 못하는 영 토크 지점이 두 곳이나 생긴다. 그러나 비대칭 공극을 사용할 경우 Fig. 6(b)처럼 역기전력과 코깅토크 간에 위상차가 발생하여 상호 토크가 영인 지점에서 코깅토크의 회전을 이용해서 단상임에도 불구하고 연속적인 토크를 발생시킬 수 있으며, 이는 일정한 회전 방향으로 전동기가 기동할 수 있도록 도와주는 역할도 함께 한다. 단상 BLDC 전동기의 비대칭 공극을 만들기 위해서 식(3)과 같이 공극의 최소와 최대 길이 사이의 비율을 설계 인자로 설정하고, 주요 성능에 미치는 영향을 분석한다.

$$\text{공극 비율} = \frac{\text{최대 공극 길이}}{\text{최소 공극 길이}} \quad (3)$$

비대칭 공극을 형성하기 위한 고정자극의 형태는 Fig. 7과 같이 공극 길이가 점진적으로 증가하는 tapered 구조와 최소, 중간, 최대 공극으로 구분하고 단계별로 증가하는 stepped 구조로서 두 가지를 채택하였다. 그리고 stepped 구조의 경우 비대칭 비율 차이에 의한 특성 분석을 정량화하기 위해 Fig. 7(b)처럼 세 구간으로(A, B, C) 구분하였다.

5. 비대칭 공극 형상과 비율에 따른 무부하 특성

단상 BLDC 전동기에 두 가지의 비대칭 공극 구조를 적용하고, 비대칭 공극 형상과 비율에 따른 무부하 특성을 비교하였다. Fig. 8은 공극 형상과 비율에 따른 역기전력, 코깅토크, 역기전력과 코깅토크 간의 위상차를 비교하며, 이때 x축은 비대칭 공극의 비율로서 최소 공극 대비 최대 공극은 1.25배에서 2배까지 변화시킨다. 이때, 5개의 곡선은 1개의 tapered 구조와 4개의 stepped 구조를 나타내며, stepped 구조의 경우 Fig. 7(a)에서 제시된 고정자 극호각 A, B, C 구

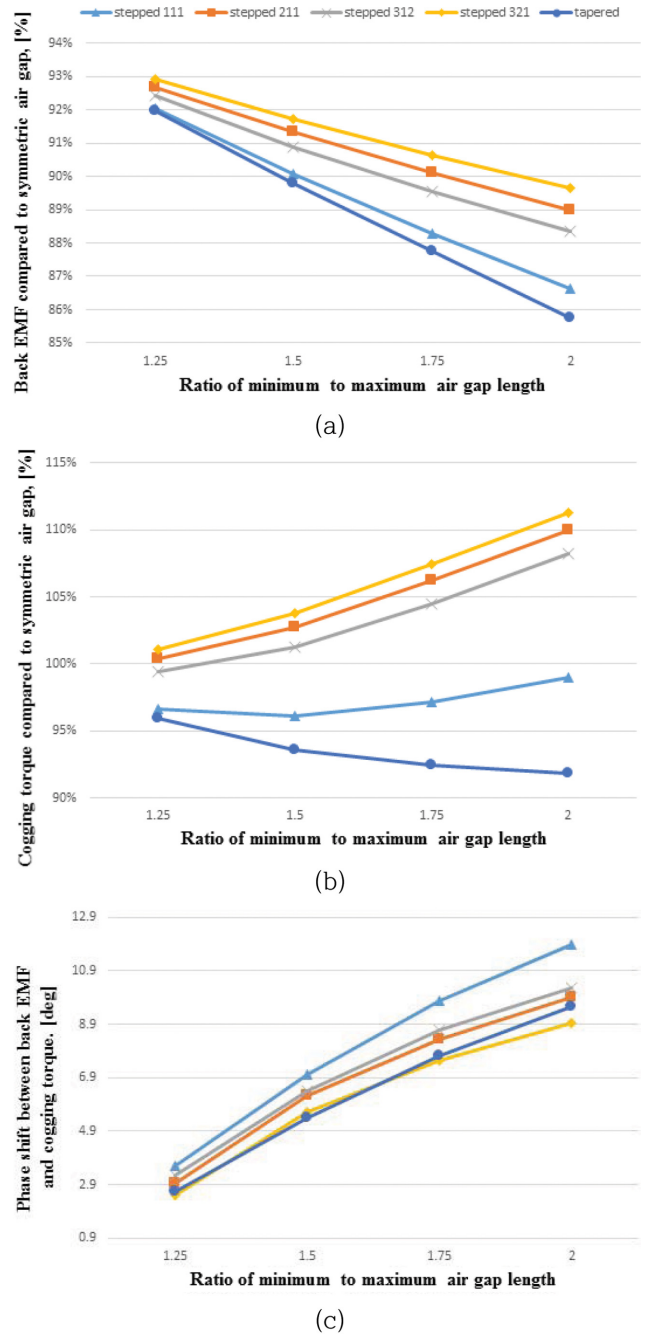


Fig. 8. (Color online) No load performances in five types of asymmetric air gap along with the ratio of maximum to minimum air gap, (a) back EMF, (b) cogging torque, (c) phase shift between (a) and (b).

간의 비율을 변화시키는데 Fig. 8(a)에서 제시된 3개의 숫자는 순서대로 A, B, C 구간의 비율을 나타낸다. Fig. 8(a)에서 알 수 있듯이 비대칭 공극 형상에 상관없이 최소 대비 최대 공극 비율이 커질수록 역기전력은 감소하고, 일정 공극 구간이 존재하는 stepped 구조가 tapered 구조보다 큰 역기전력을 발생한다는 것을 확인했다. Fig. 8(b)를 보면 최소 대비 최대 공극 비율이 증가할수록 stepped 형상의 경우 코깅토크

가 증가하는 반면 tapered는 코깁토크가 감소한다. 이는 릴럭턴스의 변화 관점에서 stepped 타입의 경우 세 구간의 공극이 존재하고 구간이 서로 바뀔 때 마다 큰 폭으로 공극 길이가 변하는데 이와 직결해서 릴럭턴스의 변화가 생기기 때문이다. 반면 taperd 구조에서는 상대적으로 적은 폭의 릴럭턴스 변화율을 보이므로 최소 대비 최대 공극 비율이 증가할수록 코깁토크가 감소한다. 역기전력과 코깁토크 간의 위상차는 역기전력과 반대의 경향성을 나타내며, 형상 및 A : B : C 비율에 따라 소폭의 변화가 확인된다.

6. 비대칭 공극 형상과 비율에 따른 부하 특성

단상 BLDC 전동기의 부하 해석을 위해 Fig. 9의 단상 풀브릿지 인버터를 사용하였으며, 정상상태에서 전압방정식, 역

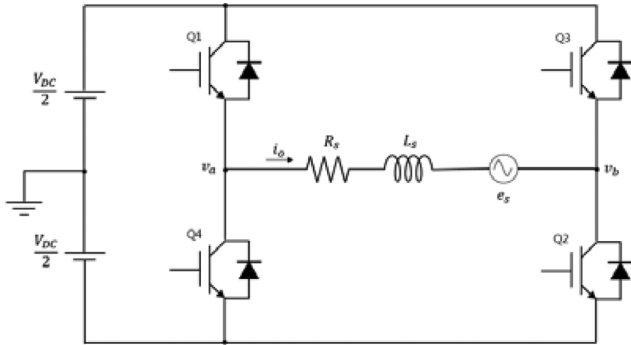


Fig. 9. Inverter topology for a single-phase BLDC motor.

기전력, 토크의 식은 다음과 같다.

$$v_{ab} = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + e_s \tag{4}$$

$$e_s = \frac{d\lambda_{PM}}{dt} = \frac{d\lambda_{PM}}{d\theta_e} \frac{d\theta_e}{dt} = K_e \omega_e \tag{5}$$

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B \omega_m + T_L \tag{6}$$

Fig. 10은 단상 BLDC 전동기의 구동을 위해서 풀브릿지 인버터에서 스위치 온과 오프 각을 제어하는 방법을 보여준다. 정현파 역기전력을 고려하여 준구형파 구동 방식을 사용하며 고속운전 시 전류 지연을 보상하기 위해 진상각 제어기법을 적용하여 부하 특성을 만족시킨다. 두 가지 비대칭 공극 형상(tapered 1개, stepped 4개)에서 청소기 부하가 인가되었을 때 도통각과 진상각을 가변함으로써 발생하는 평균 토크, 효율, 토크 리플을 분석하고, 그것을 Fig. 11에 정리하여 그래프로 나타내었다. 이때, Fig. 8과 같이 각 비대칭 공극의 조건에서 최소 공극 대비 최대 공극의 비율을 1.25배에서 2 배까지 변화시켰을 때 도통각과 진상각에 따른 주요 부하 특성의 변화도 함께 비교하였다. Fig. 11(a)에서 비대칭 공극 형상 및 A : B : C 비율에 따른 평균 토크의 차이는 크지 않지만 최소 대비 최대 공극의 비율이 커질수록 평균 토크가 증가함을 확인할 수 있다. 이는 최대 공극의 비율이 커지면

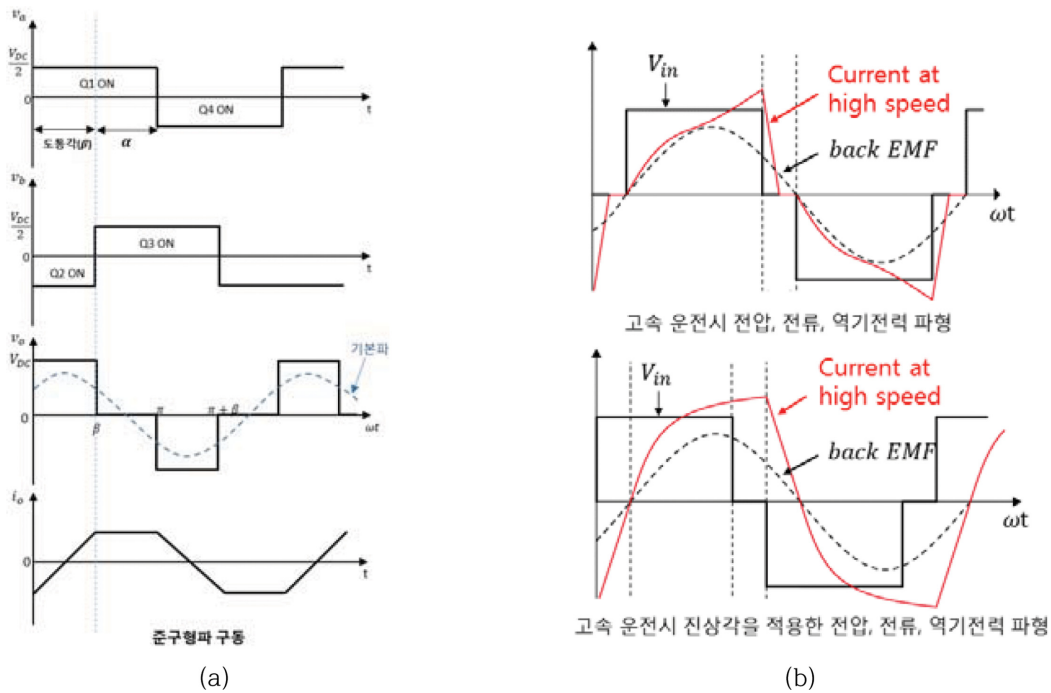


Fig. 10. (Color online) Switch on & off angles in a single-phase inverter, (a) trapezoidal current, (b) advance angle control.



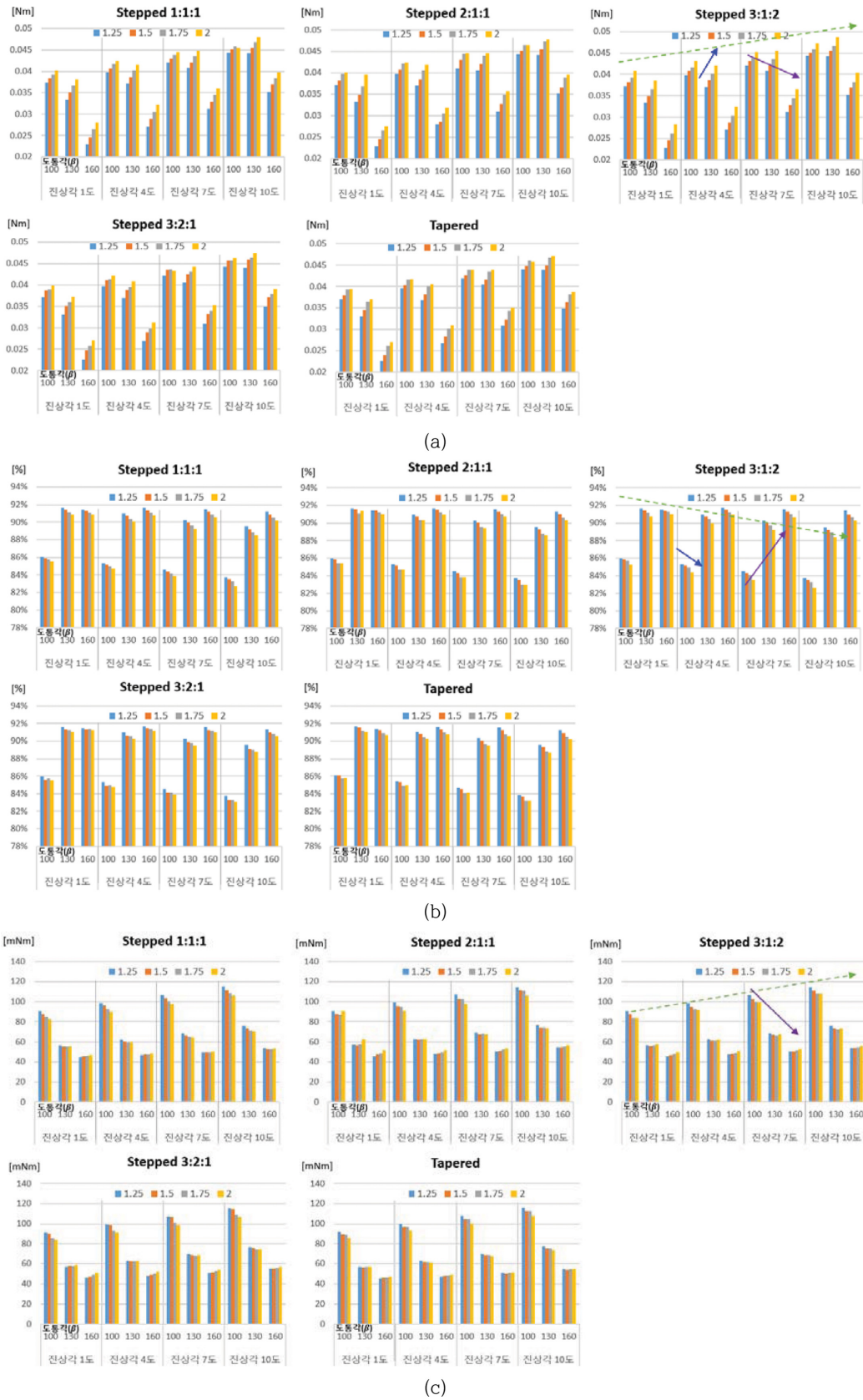


Fig. 11. (Color online) Load performances in five-types asymmetric air gap in terms of dwell and advance angles, (a) average torque, (b) efficiency, (c) torque ripple.

서 역기전력이 감소하기 때문이며, Fig. 8(a)와 같이 공극 형태와 관계없이 최대 공극 비율이 증가할수록 역기전력이 감소하면 동일 전압 인가 시 코일에 흐르는 전류가 커지면서 발생 토크가 증가하기 때문이다. Fig. 11(b)에서 알 수 있듯이 진상각이 커질수록 효율은 떨어지고, 도통각의 경우 130도와 160도 사이에서 높은 효율이 발생된다. 그리고 최소 대비 최대 공극의 비율이 1.25배에서 2배로 증가할수록 효율이 감소하는데 이는 공극의 증가로 인한 역기전력의 감소에 기인한다. Fig. 11(c)에서 도통각이 증가할수록 토크리플이 줄어드는 반면 진상각이 커질수록 토크리플은 증가한다.

Fig. 11의 종합적인 결과로부터 주요 부하 성능의 관점에서 최소 대비 최대 공극 비율은 1.25, 진상각은 10도, 도통각은 160도를 최적 조건으로 선정하고, 비대칭 공극 형상 및 A : B : C 비율에 대한 총 5가지 조건에 대해 평균 토크, 전류, 최소 토크, 토크리플, 효율, 역기전력과 코깅토크 간의 위상차를 청소기 정격 부하에서 정량적으로 분석하고 Fig. 12에 나타내었다. 6개의 주요 성능을 비교한 결과 역기전력과 코깅토크 간의 위상차가 클수록 토크리플이 감소함을 확인하였다. 또한, 평균 토크와 최소 토크도 위상차의 변화와 거의 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 앞서 2.4절에서 언급했듯이 단상 BLDC 전동기의 경우 기동을 위한 영 토크의 제거와 정격속도에서 요구되는 연속적인 토크를 발생하기 위해 반드시 필요한 상호 토크와 코깅토크 간의 매칭이 위상차로 인해 구현되기 때문이다. tapered 공극의 경우 바로 옆에 있는 stepped 공극의 3 : 2 : 1 구조와 비교하여 위상차는 소폭으로 증가하지만 동시에 적은 역기전력 특성을 보이기 때문에 평균 토크와 효율이 상대적으로 떨어짐을 알 수 있다. 결론적으로 비대칭 공극의 관점에서 tapered 보다 stepped 형상이 단상 BLDC 전동기에서 더 유리한 것을 주요 성능을 비교함으로써 확인하였다. 최소 대비 최대 공극 비율은 1.25, 진상각은 10도, 도통각은 160도 조건에서 단상 풀브릿지 인

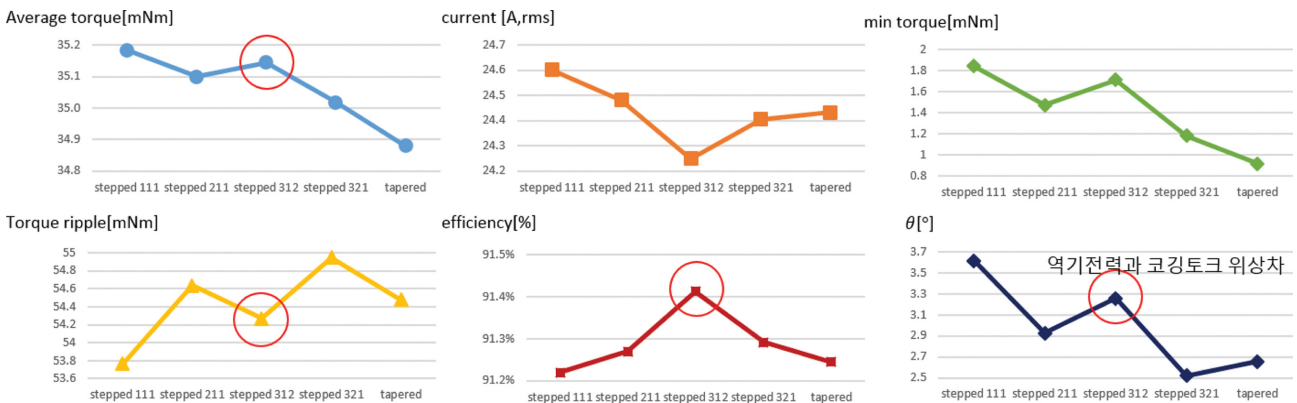
**Table II.** Comparison of three-phase and single-phase BLDC motors.

	3상 BLDC 전동기	단상 BLDC 전동기
평균 토크, mNm	35	35
출력, watts	330.0	331.2
토크 리플, mNm	10 이하	54
동 사용량, %	100 %	91.6 %
철 사용량, %	100 %	59.6 %
동손, %	3.6 %	7.1 %
철손, %	3.2 %	1.5 %
효율, %	93.2 %	91.4 %

버터로 구동한 경우 평균 토크, 전류, 최소 토크, 토크리플, 효율, 역기전력과 코깅토크 간의 위상차를 비교한 결과를 통해 stepped 비대칭 공극의 3 : 1 : 2 비율이 가장 우수하므로 최종모델로 선정하고, 이런 설계 과정은 다른 정격 지점 또는 다른 응용분야에 사용되는 단상 BLDC 전동기에도 동일하게 적용될 수 있다.

**7. 단상 BLDC 전동기 최종 모델 및 특성**

최종적으로 설계된 단상 BLDC 전동기를 동일 출력의 3상 BLDC 전동기와 주요 성능과 주요 재료의 양의 관점에서 비교한 결과를 Table II에서 나타낸다. 동등 출력에서 3상 BLDC 전동기와 비교하면 사용된 동과 철이 상대적으로 적기 때문에 약 2%p 정도의 효율 감소가 있지만 성능과 가격 사이에서 trade-off 가능할 것으로 보인다. 또한 청소기 분야에서 단상 BLDC 전동기를 채택한다면 하우징 안에서 유류 공간이 커지므로 인버터를 일체화 시킬 때 커패시터가 차지하는 공간으로 활용한다면 조립품의 크기가 대폭 감소하므로 전체 제품의 공간 활용도를 높일 것으로 기대된다. Fig. 13은 최종 모델과 극전압( $v_a, v_b$ ), 상전압( $v_{ab}$ ), 상전류, 역기전력을 각각 나타내며, 진상각 제어를 통해 역기전력과 상전류 사이의 위상이 일치함을 확인할 수 있다.



**Fig. 12.** (Color online) Key performances in five types of asymmetric air gap with 1.25 of ratio of maximum to minimum air gap in case of 10 degree of advance angle and 160 degree of dwell angle.

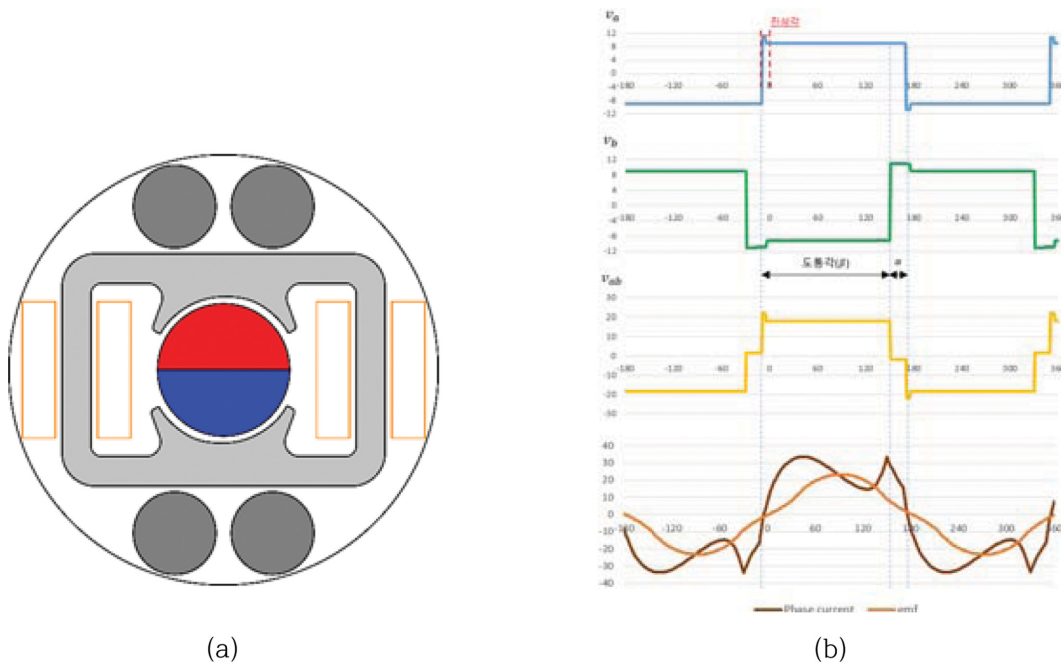


Fig. 13. (Color online) Final design, (a) single-phase BLDC motor, (b) three voltages in inverter ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_{ab}$ ), current, back EMF.

### III. 결 론

본 논문은 저 토크, 고속 특성을 가지는 청소기에 적합한 단상 BLDC 전동기의 설계에 관한 연구이다. 전동기 하우징 내부에 일체화하는 인버터의 경우에서 커패시터의 공간을 확보하는 단상 BLDC 전동기의 구조를 검토하고, 비대칭 공극에 따른 무부하와 부하 성능을 분석하였다. 공극 구조에서 tapered와 stepped 형태의 2가지 비대칭 공극 방식을 채택하고, stepped 구조에서는 3단계로 나누어 그 사이의 비율을 변화시킨다. 또한, 고속에서의 전류 지연을 방지하기 위하여 진상각과 도통각 제어를 적용하였고, 스위칭 각에 따른 부하 특성의 변화를 비교함으로써 주어진 사양에 맞는 비대칭 공극의 구조와 비율을 선정하였다. 결과적으로 동등 출력의 3상 BLDC 전동기 대비 대략 2%의 효율 저감이 예상되나 동과철의 사용량에서 각각 8.4%와 40.4% 정도의 절감이 발생하므로 가격과 성능 사이에서 trade-off 가능하다고 판단된다. 본 연구의 결과로부터 청소기에 사용되고 단상 BLDC 전동기의 설계 과정에 대한 기준을 마련하였으므로 다른 정격 운전 또는 다른 응용분야에 단상 BLDC 전동기가 사용될 경우 본 논문의 사례를 참조하면 해당 연구의 설계 최적화에 기여할 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조부)의 재원으로 한국

연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2015R1C1A1A02037575).

### References

- [1] J. S. Mayer and O. Wasynczuk, IEEE Trans. Energy Conversion **4**, 473 (1989).
- [2] N. Jeon, J. Park, S. Cho, S. Lee, and Y. Kim, Trans. of JKIIICE **5**, 1314 (2001).
- [3] H.-J. Kim, Trans. KIEE **60**, 172 (2011).
- [4] A. Hamler and B. Hribernik, IEEE Trans. Magn. **32**, 1545 (1996).
- [5] S. Bentouati, Z. Q. Zhu, and D. Howe, IEEE Trans. Magn. **36**, 3533 (2000).
- [6] C. Kim, D. Joo, D. Shin, J. Cho, S. Lee, H. Kim, K. Lee, and D. Kim, "Development of a Low-cost Type Single Phase BLDCM and Driver", Power Electronics Annual Conference in KIPE, 565-566 (2011).
- [7] J.-S. Choi, "Modified Phase Advance Method of 3-Phase BLDC Motors for Torque Maximization Control", Master Thesis, Pusan Nation University (2013).
- [8] W. Lee, J. H. Kim, W. Choi, and B. Sarlioglu, "Torque ripple minimization via PWM control technique with GaN-based motor drive for high speed single phase brushless DC motor", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) in IEEE (2015).
- [9] H. Park, S. Jang, and J. Choi, "Electromagnetic Characteristics Analysis of High-speed Brushless DC Motor", EMECS Conference in KIEE, 916-917 (2015).