1kW급 수중로봇 추진용 브러시레스 직류전동기 구동시스템 및 자기커플러 개발

김태형, 하병길*, 안진우**
대구기계부품연구원, 엑슬시스템*, 경성대학교**

Development of 1[kW] BLDC Motor Drive System and Magnetic Coupler for Water Thrust

Tae-Hyoung Kim, Byung-Gil Ha*, Jin-Woo Ahn**
Daegu Mechatronics&Materials Institute, Axle systems*, Kyungsung University**

Abstract - This paper presents 1kW BLDC motor drive system and magnetic coupler for water thrust in ROV. In order to get a high performance and reliability, some design flow is proposed in this paper. The proposed system is verified by the experimental tests.

1. 서 론

일반적으로 운용중인 선박의 경우 건조중인 선박과 달리 선체의 일부가 수중에 위치하게 되므로 부식 및 이물질의 접착에 의한 오염 등이 발생할 경우 이에 대한 파악 및 제거가 매우 어렵다. 따라서 기존에는 잠수부등을 통한 검사 및 오염물 제거 등을 수행해 왔으나, 수중이라는 열악한 작업환경으로 인해 작업의 위험도가 높다는 문제점을 가지고 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 외부에서 조작이 가능한 유삭식 무인잠수정(ROV : Remotely Operated Vehicle) 또는 유·무선 조작형 무인 수중 청소로봇을 사용하여 선체의 하단에 발생한 손상을 점검하거나, 오염물을 제거하는 기술이 활발히 적용되고 있다. 이에 따라 이러한 로봇의 추력 발생을 위한 전동시스템에 대한 수요 역시 꾸준히 증가하고 있다.

본 논문에서는 수중 청소 로봇의 환경적 특성을 고려하여 추력 발생용 1[kW]급 제어기 일체형 BLDC 전동시스템의 요구사양을 제시하고 이에 따른 전동기 및 구동시스템을 제안하고자 한다. 유지보수의 편의성과 로봇의 공간적 자유도를 높이고 신뢰성 향상을 위한 설계 주안점을 설정하여 설계를 수행하고자 하였다. 제작된 수중로봇 추력발생용 1kW급 BLDC 및 구동시스템은 전기동력계를 통한 기초특성시험을 통해 전동기 출력특성을 확인하였으며, 수중운전시험을 통하여 방수 및 동작의 신뢰성을 검증하였다.

2. 수중로봇용 추진시스템의 설계

2.1 수중로봇 추진시스템의 개요

그림 4는 조작형 무인 수중 청소로봇의 구조를 나타내고 있다. 보통 무인 수중 청소로봇의 경우 수직방향과 수평방향의 위치를 조절하는 총 5개의 추력발생기(Thruster)를 가지고 있다. 외부적인 조작에 의해 각 추력발생기의 회전수가 제어되어 로봇선체의 위치를 조작하게 된다. 상기 추진체의 요구사양과 시스템 구성의 편의성, 공간적 문제를 고려하여 고정된 입력조건을 정리하면 표 1과 같다.

<표 1> 수중 추진기용 전동시스템 운전조건

항 목	요구치	단위
추진기 요구출력	1	kW
추진기 출력토크	80	Nm
추진기 회전속도	120	rpm
전동기 입력전압	48	V
직경제한	150 이내	mm

표 1의 수중추진기의 운전 조건은 전동기 측면에서 상당한 부담을 주는 조건이다. 토크는 전동기의 체적에 비례하게 되므로 직접적으로 높은 토크를 가지는 전동기를 설계하기 위해서는 전동기의 체적이 증가하게 된다. 따라서 수중 추진체용 전동기와 같이 체적과 중량이 제한될 경우 기계적 기어를 이용한 간접구동방식이 유리하다.

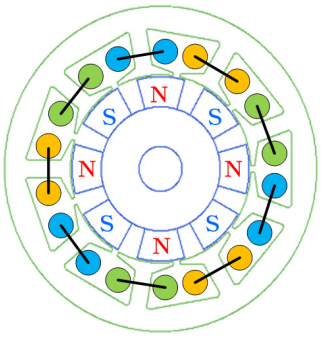
주어진 직경 제한내에서 적용될 수 있는 자기 커플러의 공간과 자기 커플러와의 장착성, 내환경성, 부하토크를 고려할 경우 최대 적용이 가능한 감속기의 기어비는 50:1이므로 운전조건을 바탕으로 한 전동기의 설계사양을 정리하면 표 2와 같다.

<표 2> 전동기 설계사양

항 목	요구치	단위
전동기 정격출력	1	kW
전동기 정격토크	1.6	Nm
전동기 정격속도	6,000	rpm
전동기 입력전압	48	V
직경제한	150 이내	mm

2.2. 전동기 자기적 구조 설계 및 동력전달기구 설계

BLDC는 상권선의 역기전력 형상이 사다리꼴 형태로 나타나며, 구동시 2개의 상에 전원을 여자하여 구동하는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 토크방정식과 기본 자기 방정식을 기초로 하여 부하토크를 발생시키기 위한 자속을 이용하여 고정된 체적하에서 요구되는 기본적인 전동기의 턴수를 산정하였다. 48[V]의 낮은 전압에서 1[kW]의 출력을 얻기 위해서는 최대 20[A]이상의 전류가 요구되므로, 최대한 권선의 단면적확보를 위해 슬롯의 수를 9개로 선정하여 권선수를 기초설계 하였다. 기초설계 데이터를 바탕으로 권선수, 슬롯의 크기를 조정하면서 요구토크를 만족하면서 최대 효율을 가지는 전동기의 설계를 그림 1과 같은 형태로 수행하였다. 실제 자석은 원형자석을 사용하였으며, 부분 착자를 통해 그림의 자극구조를 제작하였다. 회전자와 고정자의 적층길이는 60[mm]이며 재질은 S18, 자석의 경우 본디드 네오디움의 Nd30으로 설계를 수행하였다.

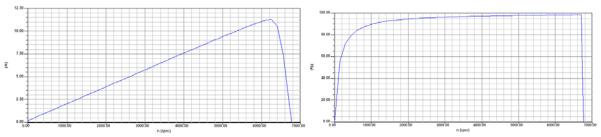


<그림 1> 설계된 시작 전동기의 구조 및 극간배치

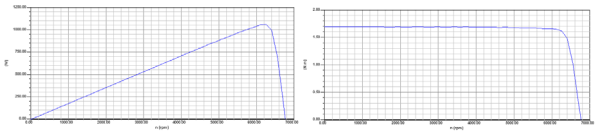
그림 2는 전용설계도구를 이용하여 설계된 시작전동기의 출력을 시뮬레이션 한 결과를 나타내고 있다. 48[V]의 전압을 인가한 상태에서 1[kW]의 정출력 조건에서 6,000[rpm[의 정격속도를 기준속도로 하고, 20~19[A]의 범위에서 전류제한을 수행하였다. 여자는 전기각으로 상당 120[deg]의 통전구간동안 2상에 대한 여자를 수행하였다. 시뮬레이션 조건에서는 전동기의 기계적 마찰손, 풍손, 전력소자에서 발생하는 전압강하 및 손실 또한 고려하지 않았다.

그림 2의 (a)는 정출력 모드에서 요구되는 토크를 발생시키기 위한 전류의 평균값을 나타내고 있다. 최대전류의 제한을 20[A]로 수행하는 경우 실제 평균전류는 최대 11[A]가량 입력되었다. 효율점은 정격운전속도인 6,000[rpm]에서 부근에서 최대가 되도록 설계하였고 최대속도는 정격속도의 110[%] 범위로 선정하였다.

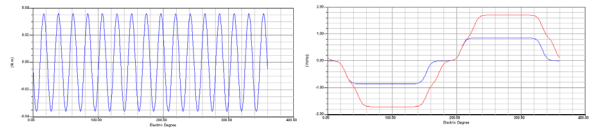
시뮬레이션 결과 효율에서는 그림 2의 (b)와 같이 정격에서 95[%]가량의 효율을 보였으나, 상기 밝힌 바와 같이 제어에 의한 전력소자에서의 손실, 전동기 자체적인 기계적 손실은 포함되지 않았으므로, 실제 전동기를 제작할 경우 시뮬레이션 결과에 비해서는 다소 낮을 것으로 판단된다.



(a) 속도에 따른 전류 (b) 속도에 따른 효율

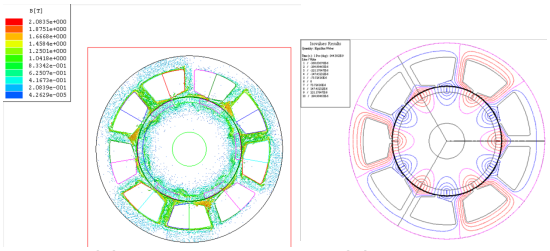


(c) 속도에 따른 출력 (d) 속도에 따른 토크



(e) 전기각에 따른 코깅 토크 (f) 전기각에 따른 상권선 유도전압

〈그림 2〉 시작품 전동기 특성

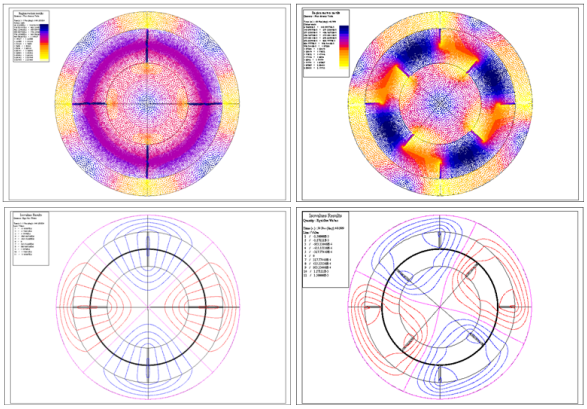


(a) 자속 밀도 및 분포 (b) 자속선도

〈그림 3〉 FEM 해석결과

전동기의 출력토크는 6000[rpm]에서 요구토크인 1.6[Nm]를 충분히 만족하고 있음을 확인할 수 있다. 상권선에 유도되는 역기전력 전압도 이상적인 BLDC에서 가지고 있는 사다리꼴 형태에 가까운 형태를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과를 확인하여 시작품 전동기 효용성을 검증하기 위하여 유한요소 해석을 통한 자계해석을 수행하였으며 자속밀도, 역기전력에서 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

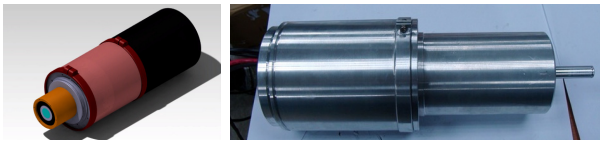
자기 커플링은 전동기로부터 회전력이 전해지는 축과 부하에 연결되어 회전력을 전달하는 축으로 구성되어 있으며, 각 축에는 강력한 자석이 부착되어 있다. 각 축에 부착된 자석은 자석간 인력을 통해 전동기의 회전을 부하측으로 전달하게 된다. 부하측으로 전달이 가능한 최대 토크는 자석의 세기와 자석의 면적에 의해 결정되게 된다. 자석의 세기는 자성체의 특성과 두께에 의해 결정된다.



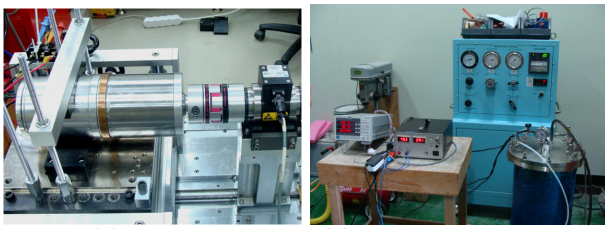
〈그림 4〉 최종모델의 자속 밀도 및 자속 경로

본 연구에서는 유한요소해석법을 이용하여 자기 커플러의 한 쪽이 회전할 때 다른 쪽의 커플러에 미치는 토크를 커플러의 토크로 가정하고 내륜을 로터로 외륜을 스테이터로 가정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 자석은 성능, 체적, 가격, 수급, 양산성을 고려하여 NdFeBr 48로 선정하였고, 시뮬레이션은 자석의 크기를 점진적으로 대형화하여 시뮬레이션을 수행하며 요구사항에 만족하는 모델을 검색하였으며 최종적으로 그림 4의 80Nm의 토크를 가지는 형상으로 설계되었다.

그림 5는 설계된 전동기의 3차원 모델링과 제작된 실제 전동기를 나타내고 있다. 제시하고자 하는 시스템은 제어기 전동기 일체형으로 추진체내에 전력변환기가 포함된 제어기를 삽입하는 형태를 가지고 있다. 따라서 제어기의 하우징 역시 완전한 방수가 이루어져야 하므로 이를 위한 방수형 커넥터의 선정, 연결부위의 재질 및 구조를 사용하였고 외부에서 전원 및 제어신호를 공급하는 부분은 실제 부식이 이루어지지 않는 방수형 부싱을 이용하여 설계하였다.



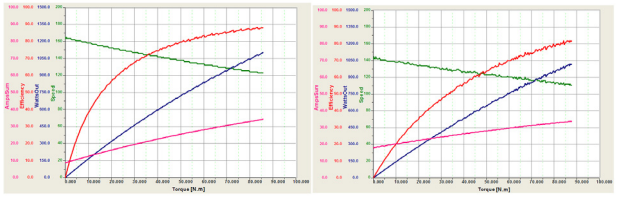
〈그림 5〉 하모닉 드라이브 일체형 전동기 모델링 및 시작품



(a) 전동기출력특성시험 (b) 방수신뢰성시험

〈그림 6〉 전기동력계시험 및 방수신뢰성 시험 장비

그림 7은 전기동력계를 이용하여 측정한 전동기 출력특성을 나타내고 있다. 자기커플링을 장착한 상태와 장착하지 않은 상태를 각각 측정하였으며, 측정결과에서 효율은 저감되나 동력전달특성이 우수하여 전동기의 축력특성과 동일한 추이의 출력을 발생시키고 있음을 확인할 수 있다.



(a)자기커플링 부착전 (b)자기커플링 부착후

〈그림 7〉 전동기 특성곡선

방수에 대한 신뢰성은 수중에서 내부가압을 통해 기본적인 방수 특성 확인한 결과 이상이 없음을 확인하고 공인기관에 의뢰하여 수행하였다. 시험조건은 수심 10m에 해당되는 압력인 2[bar]를 압력 챔버에 인가하여 4시간 동안 연속구동을 수행하여 진행하였고 시간의 변화에도 안정적으로 운전됨을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 수중 청소 로봇의 환경적 특성을 고려하여 추력 발생용 1[kW]급 제어기 일체형 BLDC 전동시스템의 요구사양을 제시하고 이에 따른 전동기 및 구동시스템을 설계하였다. 유지보수의 편의성을 위하여 BLDC형태의 전동기로 설계되었으며, 로봇자체의의 공간적 자유도를 높이기 위해 제어기 일체형으로 설계하였다. 또한 방수를 위하여 완전차폐를 위한 80[Nm] 고토크를 전달할 수 있는 자기 커플러를 설계 적용하였다. 설계된 전동기 및 자기커플러는 유한요소해석법을 통하여 출력특성을 검증 후 제작하였으며, 제어기는 기본적인 제어시뮬레이션을 수행후 제작하였다. 제작된 수중로봇 추력발생용 1kW급 BLDC 및 구동시스템은 전기동력계를 통한 기초특성시험을 통해 요구되는 전동기 출력특성을 만족하고 있음을 확인하였으며, 연속 4시간 운전의 수중운전시험을 통하여 방수 및 동작의 신뢰성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen D. Umans “Electric Machinery-6th edition”, McGrawHill, pp.245~297, 2003

[2] 최형식, 소명옥, 박한일, 박원규, 장하용, 홍성율, "300W급 BLDC모터 기반의 수중추진체 개발", 한국마린엔지니어링학회지, 제34권 제8호, p.p 1128-1134, 2010.11

[3] 임승빈, 김영균, 김주한, 유세현, 정인성, "10kW급 다중동력시스템 구동용 BLDC 모터 설계 및 특성해석", 2009 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회 논문집, pp.14-16, 2009.10