

소형 선박 추진용 축전지 전원 기반 유도모터와 BLDC모터의 부하별 운전 특성 및 효율 비교 분석

Comparison Analysis on Efficiency and Operating Characteristic between Induction and BLDC Motor according to the Load Variation Based on Battery Power Source for Electric Propulsion System of Small Ships

정태영 · 정석권

T. Y. Jeong and S. K. Jeong

(접수일 : 2010년 11월 13일, 수정일 : 2011년 02월 09일, 채택확정 : 2011년 02월 24일)

Key Words : Electric propulsion system(전기추진시스템), Battery source(축전지 전원), Induction motor(유도모터), BLDC motor(BLDC모터), Discharge voltage characteristic(방전 전압 특성)

Abstract : This paper aims at investigation some operating characteristics and energy usage efficiency of a induction motor and a BLDC motor considering electric propulsion system in a small ship based on battery source. At first, performance curves of discharge voltage from the battery and current from each motor according to the load variations were analyzed. Next, variations of motor torque and rotational speed versus load change at each motor were analyzed. Finally, efficiency of energy usage of the battery and available navigation distance were compared each other. Through some comparisons and analyses, it was cleared that the BLDC motor is more suitable for the motor of the electric propulsion system in small ships based on battery source. It is expected that the results can be used as useful data for design of the electric propulsion system with batteries.

1. 서 론

최근, 지구 환경 보호의 관점에서 대기 오염을 방지하는 문제가 사회의 핵심 현안으로 대두하고 있다. 육상에서는 전기 자동차가 이미 상용화 되었으며, 해상에서도 선박의 추진 동력 분야에서 이산화탄소 배출을 획기적으로 줄일 수 있는 전기 추진(Electric Propulsion; EP) 선박의 개발이 적극적으로 이루어지고 있다^{1~4)}. 특히, 그 중에서도 레저 용도의 소형 선박이나, 비교적 짧은 항행 거리의 연안 항해용 특수 목적의 소형 선박을 중심으로 축전지 전원(battery source)만을 사용한 전기 모터 추진 선박에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

종래의 소형 전기 모터 추진 선박의 동력원으로는 제어가 쉽고 기동 토크가 큰 DC모터가 주로 사용되었다. 그러나 DC모터의 문제점, 예컨대 주기적

정비 점검의 필요성, 사용 환경의 제약성, 출력 대비 대용적, 고중량 등으로 인해 현재는 AC모터로 거의 대체되었다. AC모터 가운데서도 유도모터(농형)와 BLDC모터(IPMSM, 120° 통전형)는 성능과 에너지 효율이 뛰어나며, 용적과 중량 대비 출력이 크다. 이러한 장점으로 인해 소형, 저출력 전기 추진선에서는 향후 이들 모터의 장착이 점차 늘어날 것으로 예상된다.

축전지를 기반으로 하여 모터를 구동하는 전기 추진선 설계시, 축전지의 한정된 전기 에너지를 효율적으로 사용하는 문제는 선박의 운항 가능 거리를 결정하는 중요한 요소에 해당한다⁵⁾. 그리고 선박의 설계 단계에서, 장착하고자 하는 모터의 종류에 따른 성능 평가, 전기 에너지 이용 효율의 정량적 분석 등은 가장 기본적인 설계 항목에 속한다. 그러나 이들에 관한 연구 자료는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 논문에서는 축전지 전원을 사용한 전기 추진선 설계를 전제로, 모터의 종류에 따른 부하별 운전 특성을 파악하고, 축전지의 방전 특성에 따

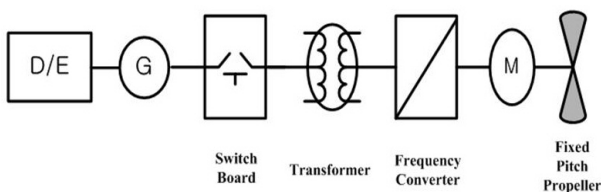
정석권(교신저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : skjeong@pknu.ac.kr Tel. 051-629-6181
정태영 : 부경대학교 대학원 메카트로닉스학과

른 에너지 이용 효율을 비교 검토한다. 이를 위해 범용 유도모터와 BLDC모터 두 가지 타입의 모터에 대해 다양한 실험을 통해 이들의 성능을 상호 비교 분석하여 설계의 기초자료로 제공하고자 한다. 실험에서는 결과의 정량적 상호 비교를 위해 동일 출력의 모터를 사용하였고 정량적 부하 인가 시스템 및 정밀 계측 시스템을 구성하여 각종 데이터를 엄밀히 계측하였다.

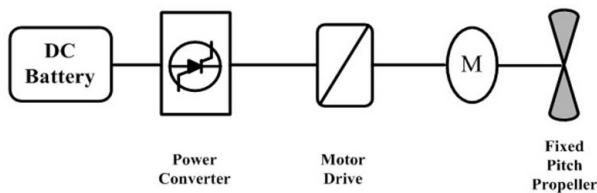
2. 선박의 전기 추진 시스템

전기 추진 시스템은 전기 모터의 힘으로 선박의 추진력을 얻는 추진 방식을 말한다. 일반적으로 선박에서 널리 사용되고 있는 디젤엔진 추진 방식은, 고 압축비에 의한 폭발음과 과급기 등의 여러 가지 보조기기 작동에 의해 심한 소음을 유발한다. 뿐만 아니라 장대형(長大形) 엔진의 불규칙 회전력에 기인한 극심한 선체 진동을 수반하며, 설치 공간을 넓게 차지하는 까닭에 공간 활용도가 낮다. 또한, 저속에서 추력이 미약할 경우 선체 조종 성능이 현저히 저하하는 단점도 갖고 있다. 이러한 연유로 장시간 저속으로 작업을 진행해야 하는 해양탐사선과 같은 조사선이나 거주 환경의 쾌적성을 중시해 선체 운전의 정숙성을 요하는 여객선 등에서는 이미 오래 전부터 전기 추진 방식을 채용해 오고 있는 실정이다.

대표적인 전기 모터 구동 방식의 선박 추진 시스템의 계통도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 디젤엔진으로 발전기를 구동하여 생산된 전기로 유도



(a) Large ship



(b) Small ship

Fig. 1 Block diagram of electric motor driven propulsion system

모터를 돌려 축계로 연결된 프로펠러를 회전시켜 추진력을 얻는다. 반면에 Fig. 1(b)의 경우는 축전지 전원으로부터 전기를 공급받아 모터를 구동하여 추진력을 얻는 방식이다. 전자는 주로 대출력이 요구되는 중·대형 선박용이며, 후자는 소형 선박에 주로 적용되고 있다. 본 논문에서는 디젤엔진 구동 방식의 발전기 대신 상용의 축전지만을 전원으로 하고, 이 전원에 전력변환기를 연결하여 모터를 구동하는 소형 선박용 순수 전기 추진 방식인 Fig. 1(b) 타입을 대상으로 하고 있다. 이 방식은 향후 태양 에너지 또는 풍력으로 발전된 전기 에너지를 상용 전원으로 가공하여 이용하는 대신, 축전지에 저장, 직접 이용함으로써 에너지 손실을 줄이는 고효율 이용법 가운데 하나이기 때문이다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

3.1 실험 장치 구성

실험에 사용한 장치의 개략적인 구성을 Fig. 2에, 장비들의 상세 사양은 Table 1, 2에 각각 나타내었다. 실험 장치는 유도모터와 BLDC모터 장착용 지그, 토크미터, 클러치 유닛, 그리고 부하 조절용 파워더 브레이크를 실험베드 상에 일직선으로 연결하였다. 그리고, 모터를 구동하기 위한 전원은 상용 12V의 축전지 2개를 직렬로 연결하여 24V의 전압을 출력하도록 하였다.

Table 1 Specification of the battery

	Description
Maker	Delkor Corp.
Type	DC12 (deep cycle)
Spec.	Rated current: 5.0A - 14.0 hrs 15.0A - 3.8 hrs 25.0A - 2.0 hrs Capacity: 70AH × 2 Sets

Table 2 Specification of each motor

	BLDC Motor	Induction Motor
Maker	TM Tech Co. Ltd.	OTIS·LG
Type	TM10-A0723	KM101HK1
Spec.	Rated power, rpm 750W×2000rpm	Rated power, rpm 750W×1730rpm
	Rated volt, current AC 220V×3A	Rated volt, current AC 220V×3.5A

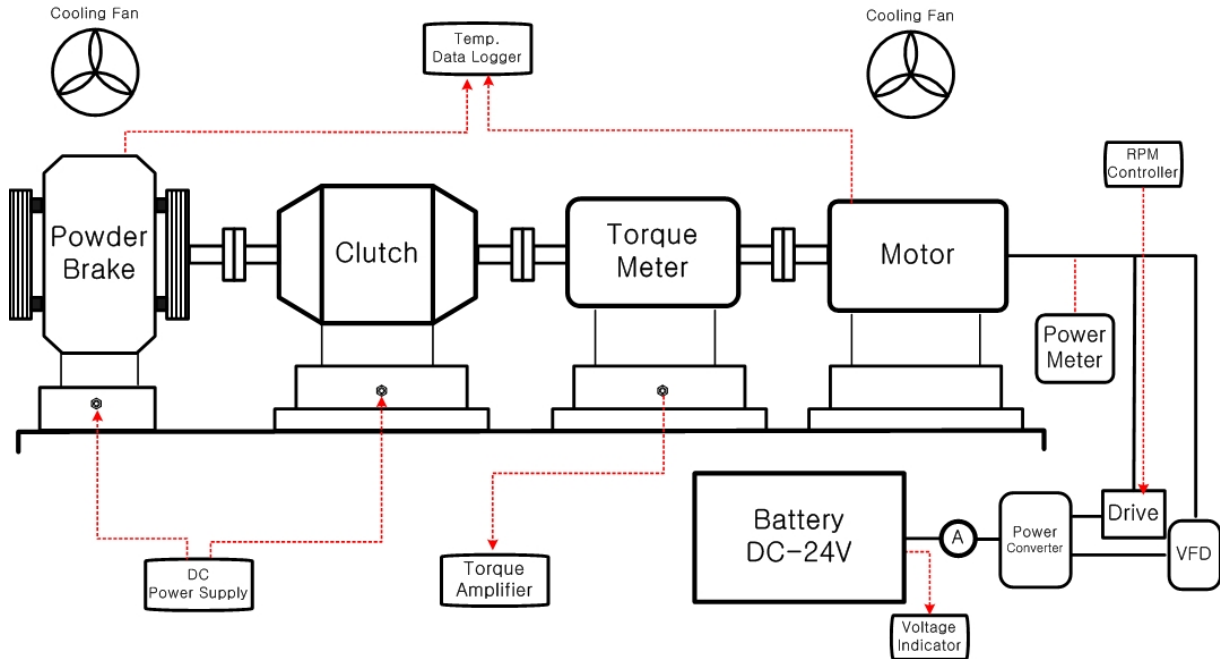


Fig. 2 Experimental system for testing motors operating performances

Fig. 3은 모터 구동을 위한 전원 및 드라이브 시스템의 구성을 나타낸 것이다. 유도모터(3상) 구동 시에는, 축전지로부터 나온 DC전원을 전력변환기로 CVCF(Constant Voltage Constant Frequency) AC 전원(단상/220V)으로 바꾼 뒤, 다시 3상 모터 구동을 위해 VFD(Variable Frequency Drive)인 인버터를 거치도록 시스템을 구성하였다. 반면, BLDC모터 구동시에는 CVCF 전력변환기의 출력단에서 바로 BLDC모터 전용 드라이브를 연결하여 구동하는 시스템으로 구성하였다. 즉, Fig. 2에서 VFD를 제외한 구동 시스템으로 하였다.

축전지의 방전 전압과 전류 측정용 계기, 그리고 모터의 소비전력 측정용 3상전력계, 속도(rpm) 측정용 게이지, 토크 측정용 증폭기, 온도 측정용 센서와 데이터로거를 사용하여 데이터 검출 시스템을 구성하였다. 특히 모터 및 파우더 브레이크의 발열

상태는 열전대(T-type)를 부착하여 데이터로거로 실시간 관측·감시하였다. 장시간의 실험으로 인한 파우더 브레이크와 모터의 온도 상승이 모터의 토크 및 속도 성능 저하를 야기하지 않도록 전기 구동 냉각 팬(fan)을 설치하였다.

3.2 실험 방법

축전지를 사용하여 구동되는 각 모터의 성능과 운전 특성을 부하별로 비교하기 위하여, 부하를 각 모터 정격 출력의 60%, 80%, 100%에 해당하는 크기가 되도록 파우더 브레이크에 인가하는 DC전압으로 조정하였다. 또, 각 부하에 대한 실험 종료 시점은, 전력변환기의 특성과 모터의 출력 상태를 고려하여 축전지의 방전 종지 전압(threshold voltage)을 21V로 설정하였다. 1회 실험을 마친 후 축전지는 충전기로 재충전하여 사용하였다.

유도모터에 대한 실험의 경우, BLDC모터와 회전수 영역이 가장 가까운 주파수로 운전하기 위해서, VFD 인버터의 주파수는 60Hz로 설정하였다. 그리고 각 모터의 회전수는 드라이브로부터 별도의 속도 피드백 루프를 구성하지 않고 오픈 루프로 구성하였다. 성능 분석에 필요한 모든 데이터의 샘플링 주기는 10분으로 설정하여, 유도모터와 BLDC모터에 대해 각각 부하별로 실험을 행하고 필요한 각종 데이터를 취득하였다.

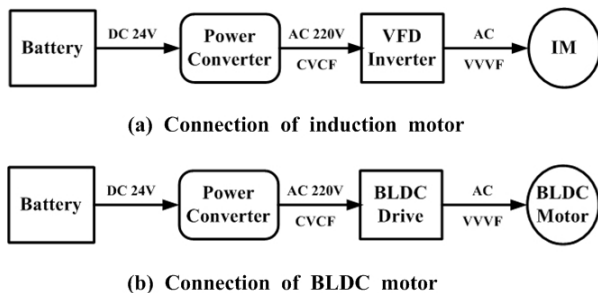


Fig. 3 Driving system of each testing motor

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 축전지 방전 특성

Fig. 4와 Fig. 5는 두 타입의 모터 구동 시, 각 모터의 부하별 사용 시간에 따른 축전지의 방전 전압과 방전 전류 변화를 각각 나타낸다.

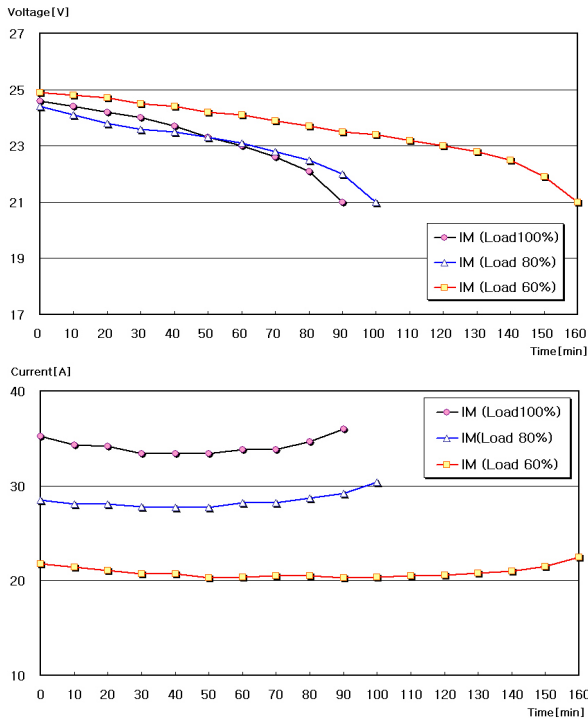


Fig. 4 Discharge characteristics of voltage and current of induction motor versus load variation

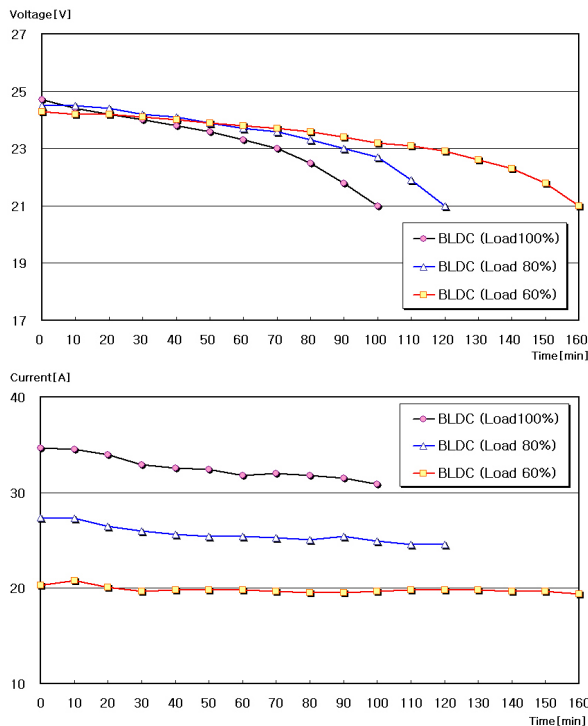


Fig. 5 Discharge characteristics of voltage and current of BLDC motor versus load variation

축전지의 방전 전압 특성은 두 모터가 거의 유사한 형태의 전압 강하 패턴을 보였고, 방전 전류 특성의 경우, 유도모터에서는 축전지의 방전 중지 전압에 가까울수록 전류가 약간 상승하는 경향이 있었지만, BLDC모터는 거의 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 또, 전류값은 부하 20% 증가당 약 6~7A 정도 증가함을 알 수 있었다.

축전지의 사용 시간은, BLDC모터의 구동 시간이 유도모터에 비해 100% 부하일 때 10분, 80% 부하일 경우에는 20분 더 길었다. 그러나 60% 부하에서는 두 모터의 운전 시간이 같게 나타났다. 이는 60% 부하일 경우, 축전지의 평균 방전 전류값들이 거의 차이가 없는 특성을 보였기 때문이다.

Fig. 6은 두 타입의 모터에 대해, 모터 구동부터 종료까지 축전지의 방전 전류를 평균한 값을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이, 동일 부하에서 BLDC 모터의 방전 전류 평균값이 유도모터에 비해 평균 1.1~2.7A 정도 더 낮게 나타났다. 축전지의 용량은 단위가 AH(Ampere Hour)이므로, 동일한 부하에서 높은 전류를 사용하는 모터의 구동 시간이 짧을 수밖에 없다. 이것으로부터, 제한된 전기 에너지를 갖는 축전지로 모터를 구동할 경우, 시간적 측면만을 고려하면 전기 에너지 이용 효율은 BLDC모터가 유도모터에 비해 더 우수함을 실험적으로 확인할 수 있었다.

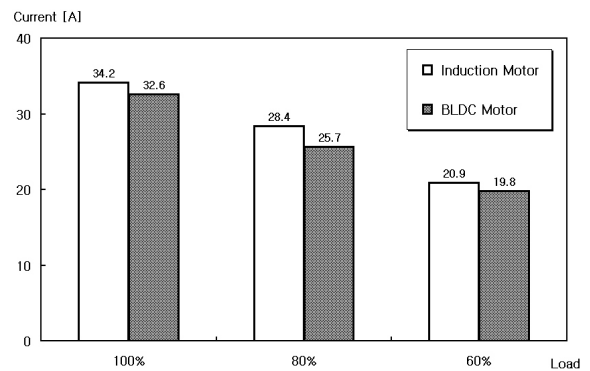


Fig. 6 Average discharge current value of battery against each load

4.2 부하별 토크 특성

Fig. 7은 두 모터의 토크 특성을 나타낸 것으로, 같은 부하에서의 토크는 유도모터에 비해 BLDC모터가 전반적으로 높은 값을 유지하고 있다. 또한 두 모터 사이의 토크 값 차이는 100% 부하의 경우가 다른 부하에 비해 상대적으로 크게 나타났다. 또,

100% 부하에서는 축전지의 방전 전압 강하에 따라 토크가 감소하는 경향이 다소 있었으나, 60% 부하에서는 거의 일정한 값을 유지하고 있음을 볼 수 있다.

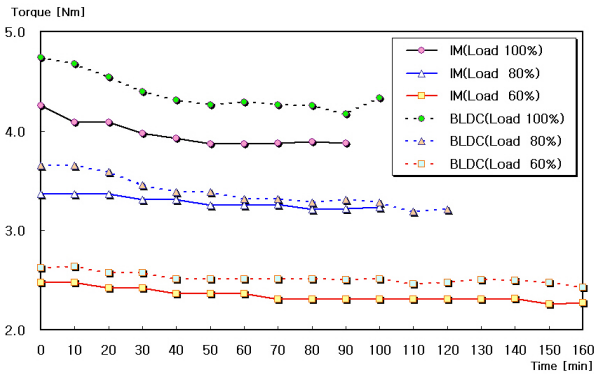


Fig. 7 Torque characteristic of each motor

4.3 모터의 회전수 변화 특성

Fig. 8은 부하별 시간에 따른 두 모터의 회전수 변화를 나타낸 것이다. VFD를 사용하여 주파수를 60Hz로 일정하게 하여 구동한 유도모터의 경우, 모터 구동부터 방전 중지 전압까지 거의 일정한 회전수를 유지하였다. 반면에, BLDC모터의 경우는 방전 전압이 떨어지면서 중지 전압에 가까울수록 회전수가 급격히 떨어짐을 볼 수 있다. 이는 전용 드라이버의 출력이 축전지의 사용 시간에 따른 전압 강하

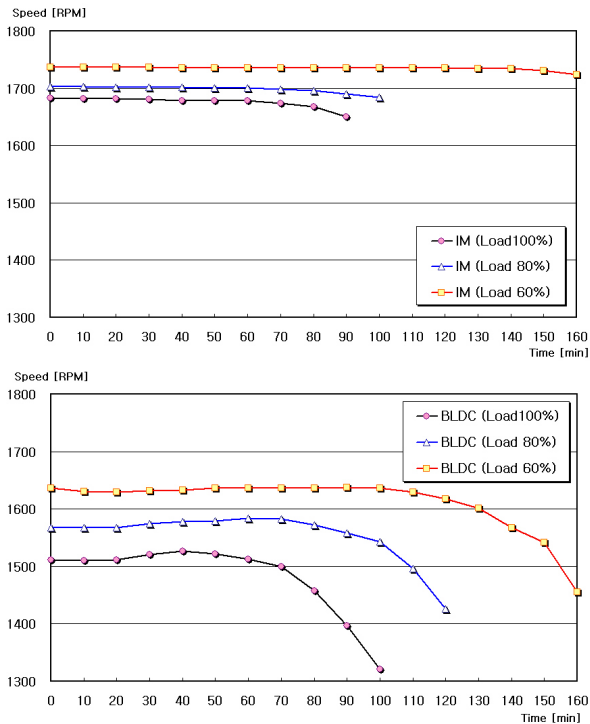


Fig. 8 Motor speed characteristics versus battery discharge time of each motor

와 연동하여 일정 주파수를 유지하지 못한 때문으로 판단된다. 따라서, BLDC모터를 장착할 경우, 이러한 회전수 변화 특성을 고려한 전용 드라이버의 설계가 검토 되어야 할 것으로 생각된다.

4.4 항해 가능 거리 비교 분석

전기 추진선의 설계 단계에서는 부하별 항해 가능거리의 추정이 매우 중요한 요소이다. 여기서는 각 모터의 부하별 회전수 변화 곡선으로부터 추세를 구하고, 모터의 기동에서부터 방전 종료시간까지 이 추세를 적분하여 선박의 총 항해 가능 거리를 구해 비교 분석하였다.

선박의 여러 가지 저항에 따른 슬립을 고려 대상에서 제외하면, 추진기의 항해 속력은 모터의 회전수 N_{load} [rpm]로부터 추진기의 피치를 고려, 식 (1)과 같이 구해진다.

$$v(t) = \frac{P \times \overline{N_{load}} \times 60}{1852[m]} [mile/h] \quad (1)$$

여기서 $v(t)$ 는 추진기의 항해 속력(knot), P 는 추진기의 피치[m]를 각각 나타낸다.

총 항해 가능 거리 $D[mile]$ 는 식 (1)을 적분함으로써 식 (2)와 같이 추정할 수 있다.

$$D = \int_{t_0}^{t_f} v(t) dt \quad (2)$$

여기서 t_0 는 모터 구동 시작 시각, t_f 는 구동 종료 시각을 각각 나타낸다.

Fig. 9에서 그림 내부의 좌측 하단에 나타낸 수식은 각 모터의 회전수 변화 특성 곡선으로부터 구한 추세를 의미하고, 괄호 안의 값은 식 (2)로부터 구한 적분값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 유도모터의 총 항해 가능 거리가 BLDC모터에 비해 100% 부하에서 약 1.3%, 60% 부하에서는 약 7.5% 정도, 더 길게 나타났다. 이는 축전지의 전압 강하에 따른 회전수의 저하 현상이 큰 BLDC모터의 특성에 그 원인이 있는 것으로 판단되고, 80% 부하에서의 경우는 오히려 BLDC모터의 항해 가능 거리가 약 10% 더 길게 나타났다.

이것으로부터 선박의 추진 동력원으로 BLDC모터를 채택할 경우에는, 축전지의 사용 시간에 따라 전압 강하가 발생하더라도 일정한 주파수를 유지할 수 있는 특성을 가진 전용 드라이버가 필요함을 확인할 수 있었다.

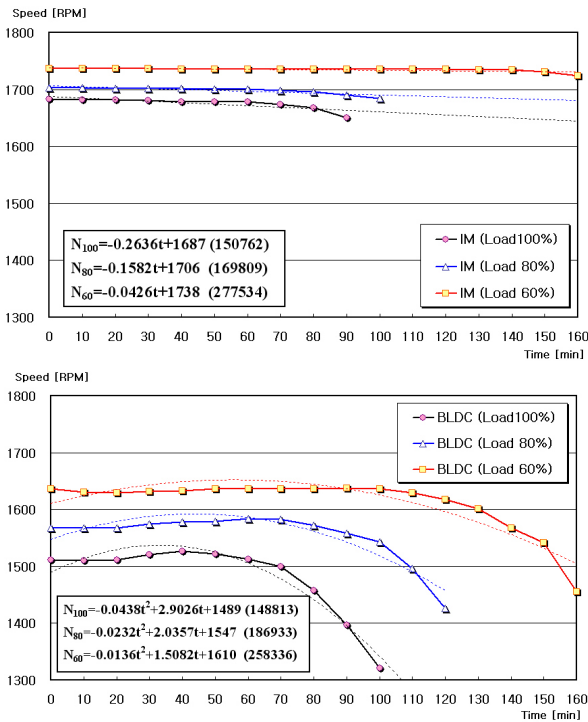


Fig. 9 Comparison analysis chart about total running distance of each motor

5. 결 론

본 논문에서는 축전지 전원을 기반으로 한 소형 선박용 전기 모터 구동 추진 방식에 있어, 향후 EP 시스템의 동력원으로 가장 유력시되는 AC모터의 대표적인 두 타입에 대해, 부하별 운전 특성과 축전지의 방전 특성에 따른 전기 에너지 사용 효율 및 항해 가능 거리를 비교 분석하였다. 본 연구에서 얻은 주요 내용들을 요약하여 정리하면 다음과 같다.

1) 축전지의 에너지 사용 시간 면에서, 평균 방전 전류값이 작은 BLDC모터가 유도모터보다 경제적이고, 오랜 시간 구동할 수 있다. BLDC모터의 운전 시간은 모터 정격의 100% 부하에서 11%, 80% 부하에서 20% 정도 유도모터에 비해 더 길었다.

2) 두 모터의 부하별 사용 시간 분석에 따르면, 60% 부하인 경우가 100% 부하일 때에 비해 사용 시간이 78% 정도 더 길었다. 따라서 축전지의 에너지를 효율적으로 사용하기 위해서는 정격 부하보다 낮은 부하로 운전하는 것이 바람직하다.

3) 동일 부하에서 모터의 토크 특성은 BLDC모터가 유도모터보다 전반적으로 더 양호하다.

4) 항해 가능 거리의 비교 분석에서, 유도모터의 거리가 BLDC모터에 비해, 100% 부하와 60% 부하에서는 약 1.3%, 7.5% 정도 더 길게 나타났으나,

80% 부하에서는 BLDC모터의 항해 가능 거리가 오히려 약 10% 더 길었다.

5) BLDC모터의 경우, 축전지의 전압 강하에 따른 회전수 저하 현상을 최소화 하도록, 속도 피드백을 통한 추가적인 모터 제어 시스템이 탑재된 드라이브의 필요성이 확인되었다.

부하별 방전 전압 특성 분석에 따른 모터의 에너지 이용 효율과 회전수 변화 특성 분석에 따른 선박의 항해 가능 거리 추정 자료는 소형 전기 추진선 설계시 드라이브 구성에 따른 에너지 효율 비교 자료⁵⁾와 더불어 유용한 설계 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대가 된다.

참고 문헌

1. 김종수, 오세진, 김성환, 김현수, 김덕기, 윤경국, 2008, “전기 추진선박의 전력변환장치 성능 분석에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제32권, 제8호, pp. 1278-1284.
2. 장성영, 박정태, 이갑재, 이광주, 김종규, 조성준, 2000, “선박용 전기추진 장치의 기술동향”, 전력전자학술대회논문집(하계), pp. 22-25.
3. 남택근, 2005, “전기 추진 선박의 최근 동향”, 한국마린엔지니어링학회지, 제29권, 제2호, pp. 149-153.
4. 김종수, 오세진, 김성환, 2009, “직접 토크제어에 의한 전기추진선박의 추진전동기 속도 및 토크제어에 관한 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제33권, 제6호, pp. 946-951.
5. 정태영, 정석권, 2010, “축전지 전원을 사용한 소형선박 추진용 BLDC모터의 전력변환방식에 따른 효율 비교 및 성능 추정”, 한국동력기계공학회지, 제14권, 제1호, pp. 27-33.
6. 전원, 왕용필, 정상용, 2008, “선박용 전기추진시스템의 운전조건별 Dynamic 특성 연구”, 한국마린엔지니어링학회지, 제32권, 제8호, pp. 1296-1302.
7. 정훈경, 2005, “LNG 선박의 추진시스템”, 한국마린엔지니어링학회지, 제29권, 제4호, pp. 349-356.
8. 김주완, 이충열, 서근경, 2008, “전기추진선을 위한 고조파제어 사례 연구”, 대한조선학회 특별논문집, pp. 38-45.