

Tread Mill 구동용 BLDC 전동기 제어시스템 설계 및 운전특성

安珍雨^{**}, 李東熙^{*}

Design and Drive Characteristics of BLDC Motor Control System for Tread Mill Application

Jin-Woo Ahn and Dong-Hee Lee

요 약

BLDC전동기는 높은 효율과 출력밀도로 인하여, 현재 산업응용 분야에 널리 적용되고 있으며, 특히 고성능 제어 특성과 저소음 운전특성으로 인하여 가정용 전자제품의 활용도가 높아지고 있다.

본 논문에서는 제한적인 설계조건에서 요구성능을 만족하는 트레드 밀 구동용 BLDC전동기를 설계하고, 이에 적합한 제어를 제작하였다. 전동기설계에서 제한된 고정자 구조에 대하여, 제작의 용이성과 경제성을 고려하여 CAD와 FEM 해석을 통하여 영구자석의 형상을 설계하였다. 설계된 제어기는 트레드 밀의 안정된 구동과 성능을 위하여 운전자의 무게와 회전속도에 따라 학습된 제어기의 이득이 사용되도록 제작되었다. 제시된 트레드 밀 구동용 BLDCM과 제어기는 실험을 통하여 성능을 확인하였다.

ABSTRACT

Brushless D.C. Motor is widely used for industrial application because of high efficiency and high power density. Especially, in home appliance, BLDCM is very useful due to high control performance and low acoustic noise. In this paper, BLDCM and its controller are designed and developed for tread mill application. With the restricted stator structure, permanent magnet rotor is designed for manufacturing and cost effectiveness using CAD and FEM analysis. A ferrite magnetic material is used as a rotor magnet for the cost and temperature advantages. For a stable operation of tread mill, over current and temperature can be detected and protected. The designed BLDCM and its controller was verified by the experimental results.

Key Words : Tread Mill, BLDCM (Brushless DC Motor), DSP Controller

1. 서 론

최근 건강에 대한 현대인의 관심이 급증하고, 걷기와 달리기 인구의 증가에 따라, 적절한 운동 공간이

없는 도시인들에게 러닝머신 (Tread Mill) 에 대한 관심이 고조되고 있다. Tread Mill은 좁은 공간에서 현대인들의 걷기와 달리기 가능하도록 한 벨트 이송장치를 포함하고 있는 운동기구로서 일반적으로 가변속 제어에 용이한 직류 전동기가 많이 사용되고 있다. 일반적으로 기기의 수명은 6년~10년 정도로, 특히 업소용일 경우 거의 24시간 내내 운전하게 되므로 전동기의 수명 및 효율, 전동기의 열화 등의 문제를 고려하지 않을 수 없다. 그러나 일반적으로 직류전동기는 제어기의 구조는 단순하지만 지속적인 유지보수가 필

* 정회원, OTIS-LG 책임연구원

E-mail : dblee5@hanmir.com

** 정회원, 경성대학교 전기전자컴퓨터공학부 교수

접수일자 : 2002. 8.14

1차심사 : 2002. 9.15

2차심사 : 2002.11.11

3차심사 : 2003. 4. 1

심사완료 : 2003. 4.16

요하고, 브러시의 마모로 인한 분진 및 성능저하의 문제가 발생한다. 이에 대한 요구로서 브러시리스 타입의 전동기 채택의 필요성이 대두된다.

Brushless DC Motor (BLDCM)은 영구자석을 사용하는 전동기로 효율이 높고, 특히 가청 대역의 소음 및 진동이 적으며, 높은 전력밀도와 전류(commutation) 방식이 단순하여 광범위한 산업응용분야에 널리 적용되고 있다^[1-3]. 특히 높은 토크 대 관성비의 특성 및 고성능 제어특성을 만족하는 전동기 특성으로 인하여 서보용 전동분야뿐만 아니라, 가전기기분야에서도 그 활용도가 매우 크게 확대되고 있다^[4-6].

본 연구에서는 기존에 장착되었던 3상 AC 모터 대용으로 정격 2.5 [HP] 급의 Tread Mill용 BLDCM을 설계하여 그 특성을 해석하고, 이에 적합한 제어기를 설계하여 그 특성을 실험하였다. 본 연구의 개발에 적용된 BLDCM은 4극 24슬롯 구조의 BLDCM으로, Tread Mill의 구동용으로 개발되었으며, 회전자 자석재료는 가격 및 온도특성을 고려하여 페라이트 재질로 설계되었다. 또한, 제작된 Tread Mill용 BLDCM을 위한 전용 제어기와 구동드라이브를 개발하여 그 특성을 실험하였다. 제어기는 제어기능의 다양성과 가변성을 위하여 DSP인 TMS320F421로 구현되었다. 안정적인 구동을 위하여 과전류 및 온도상승을 검출하는 보호회로를 장착하였다.

제작된 BLDC 제어기는 실험을 통하여 가정용 및 상업용 Tread Mill에 적용 가능함을 검증하였다.

2. 전동기의 설계 제원 및 해석

2.1 전동기의 정격 출력

본 연구에서 설계된 전동기는 Tread Mill 구동용 BLDCM으로 정격출력은 Tread Mill의 구조와 생체역학적 분석에 의한 반복적인 충격부하에 의해 결정된다. Tread Mill의 설계에서는 반드시 사용가능한 최대 속도와 최대 하중이 명시되어야 하며, 이에 따라서 전동기의 정격도 달라지게 된다.

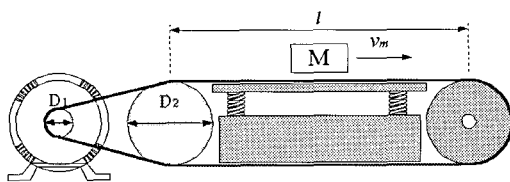


그림 1 Tread Mill의 구조
Fig. 1 General structure of tread mill

그림 1은 본 연구에서 적용되는 Tread Mill의 구조를 나타내고 있다.

그림 1에서 사용자의 발과 접촉하는 이송 벨트(moving surface)는 탄성이 있는 지지대에 의해 고정되어 있는 받침판과 이격되어 롤러에 의해 이동하게된다. 이때, 전동기의 정격 속도는 설계된 Tread mill의 최대 속도와 롤러의 직경에 의해 다음과 같이 계산된다.

$$\omega_{rm} [rpm] = \frac{60 \cdot v_m}{\pi \cdot D_1} \quad (1)$$

단, ω_{rm} : 전동기의 정격속도 [rpm], v_m : Tread mill의 최대 속도 [m/s], D_1 : 롤러의 직경 [m]

또한 구동용 전동기의 정격출력은 Tread mill의 구조를 벨트 컨베어 구조로 가정하고, 사용자가 걷기 또는 달리기를 할 때 이송 벨트(moving surface)의 평균 충격부하에 의해 결정될 수 있다. 사용자의 운동에 의한 Tread mill의 부하 특성은 일반적으로 벨트 컨베어 구조에서 정지된 물체의 하중에 의한 부하와는 달리 사용자의 주행속도와 몸무게에 따라 벨트구조에 가해지는 부하의 크기 및 반복적인 부하의 패턴이 달라지게 되고, 이에 따라 벨트 컨베어 구조로 가정된 Tread mill의 시간당 이송량의 크기가 달라지므로, 전동기의 정격계산에 영향을 미치게 된다. 따라서 Tread mill 구동용 전동기의 요구 동력은 사용자의 최대 하중 및 최대 속도를 가정하여 계산되며, 가속 및 감속 토크는 관련 규격을 만족하는 최대 가속 및 감속시간에 대한 최대 하중의 사용자를 고려하여 계산되어야 한다. 벨트 컨베어 구조로 가정된 Tread mill의 부하측 토크는 다음과 같이 계산된다.

$$T_{L1} = \frac{(\mu \cdot (W_m + W_t) + F_a) \cdot D_2}{2} \quad (2)$$

단, W_m, W_t : 사용자의 하중 및 이송부의 총중량 [Kg]
 μ : 마찰계수, F_a : 추력 [Kgf], D_2 : 벨트롤러 직경 [m]

이때, Tread mill 구동용 전동기측으로 환산된 토크는 다음과 같이 계산된다.

$$T_{L2} = \frac{T_{L1}}{\eta \times n} \quad (3)$$

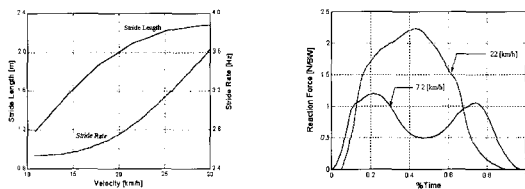
단, η : 기계 효율, n : 감속비 = (D_2/D_1)

따라서 전동기의 요구 토크는 전동기측으로 환산된 부하 토크와 가속 및 감속 토크를 고려하여 계

산된다. 회전 마찰계수는 이송 벨트와 탄성계수를 가지는 받침대와의 마찰을 고려하여 산정된다. 한편, 벨트 컨베이어 구조로 가정된 Tread mill의 사용자 하중은 사용자의 하중과 주행속도에 의존적인데, 사용자의 주행속도와 하중에 대한 이송부의 충격부하는 생체역학적 분석 및 통계자료에 근거하여 가정되었다.

그림 2는 생체역학적 분석과 통계자료에 근거한 일반적인 성인 남성의 하중과 속도에 따른 지면의 수직 반발력과 속도에 따른 보폭과 보폭의 반복 주파수를 나타낸 것이다. 저속으로 주행되는 걷기의 경우에는 한 발에 의한 수직 반발력이 전 보폭 영역에 걸쳐 넓게 분포되지만, 순간적인 충격은 적게 인가되고, 달리기 경우에는 한 발에 의한 수직 반발력은 짧게 분포되지만, 순간적인 충격은 높게 인가되는 형상을 가진다. x축은 반복적인 패턴에 대한 % 보폭 시간을 나타내고 있고, y 축은 수직으로 인가되는 지면반발력을 하중에 대한 P.U.로 표시한 값을 나타낸다.

이러한 반발력의 패턴은 개인차가 심하고, 주행시의 보폭과 패턴이 반복되는 실제 시간의 개인차가 있으므로, 실제 평균부하를 계산하는 데는 최대 운전속도에서의 최대 사용 가능한 체중에 대한 일반적인 패턴에 대한 평균부하에 안전계수를 고려하여 Tread mill의 부하를 계산하게 된다.



(a) Reaction force (b) Stride length and rate

그림 2 주행 속도에 따른 평균적인 지면 반발력과 보폭
Fig. 2 General reaction force and stride length according to stride velocity

2.2 전동기 설계

본 연구에서 설계된 전동기는 Tread Mill 구동용 BLDCM으로 정격 2.5 [HP]/220 [V] 용으로 설계되었다. Tread mill 구동을 위한 전동기구에 대한 국내에서는 정해진 규격이 없지만, 선진 외국에서는 전동기구를 이용한 Tread mill에 대한 광범위한 규격이 정해져 있다. 이 규격에서 규정하는 구동용 전동기구는 미국의 UL1647항을 만족해야 하는 것으로 규정되어 있다. 이 규격에는 전동기의 구체적인 제약조건은 정해져 있지

않으며, 전체적인 구조와 전동기구를 사용한 Tread mill의 안전을 위한 제어조건이 정해져 있다.

따라서, 본 연구에서는 Tread mill의 기구적인 구조를 고려한 설계시의 제약 사항으로 고정자 내경 및 외경이 32 [mm]와 59 [mm]로 고정되었으며, 고정자의 형상도 설계시의 제약사항으로 고려되었다. 본 연구에서 설계된 BLDCM의 제원은 표 1과 같다.

BLDC 전동기에 대하여 일반적으로 가장 적합한 자석 재료는 페라이트 자성재료 또는 세라믹 자성재료, 희토류 자석 등이다^[3]. 이들의 자성재료는 특성곡선이 직선적이고, 기울기는 이론적인 최대값에 근접하며, 감자작용에 대한 저항성이 높기 때문에 영구자석 전동기의 자성재료로 널리 사용되고 있다. 설계된 전동기의 자석 재료는 밀폐된 공간에서의 온도 상승에 따른 감자특성과 제작 가격을 고려하여 페라이트 자성재료로 설계되었으며, 운전 속도 범위가 중속영역이므로 제어성을 고려하여 표면부착형태로 설계되었다. 현재 산업용으로 사용되고 있는 희토류 자석의 경우 잔류자속 밀도는 페라이트 자성재료에 비해 3배정도 높게 착자되어 고효율 및 경량화가 가능하지만, 영구자석 부품의 제작 가격이 10배정도 비싸고, 특히 밀폐된 공간에서의 온도 상승에 따른 감자가 문제 될 수 있다. 본 연구에서 사용된 페라이트 자성재료는 잔류자속 밀도 0.405 [T] 및 보자력 295 [kA/m]의 페라이트가 사용되었다. 특히, 전동기의 회전시에 자석의 탈조를 방지하기 위해 영구자석 표면에는 비자성 재질의 캔(can)을 사용하여 안정성을 높이도록 설계되었다.

회전자에 부착되는 영구자석의 자극은 인접하는 다른 극과 접촉되는 부분을 절삭하는 형상으로 설계되었으며, 절삭의 정도는 FEM 해석을 통하여 최적값을 설정하였다. 그림 3은 본 연구에서 설계된 영구자석 회전자의 설계형상과 설계형상에 따른 역기전력 파형을 도시하고 있다.

그림 4는 인접하는 두 영구자석의 자극 면 길이에 따른 출력 및 코깅 토크를 나타내고 있다.

표 1 설계 전동기의 제원
Table 1 The Specifications of BLDCM

정격 출력	2.5HP	상수	3 상
정격 전압	AC 220V	결선방식	Y 결선
회전수	3000 rpm	극수	4극
철심길이	140 mm	공극	1.0 mm
슬롯수	24	슬롯 깊이	12 mm
자극각	180	자석두께	12 mm
상당 턴수	25	외경	59 mm

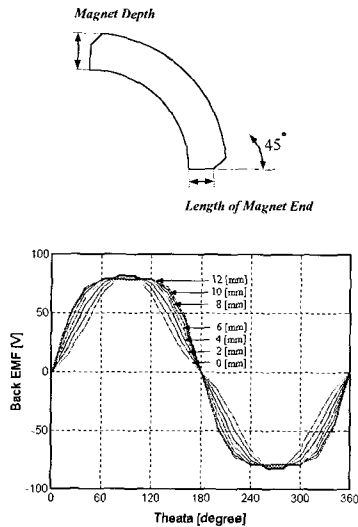


그림 3 영구자석의 형상 및 자극면 길이에 대한 역기전력
Fig. 3 The shape of magnet and back EMF waveform

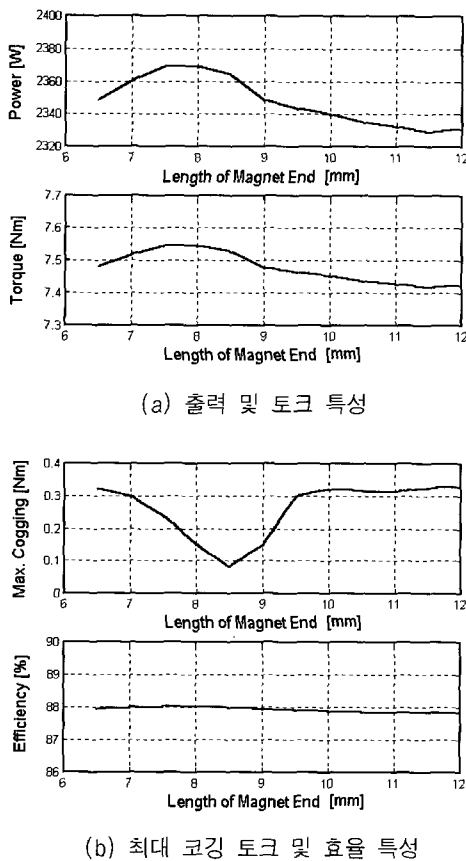


그림 4 인접한 자극면 길이에 따른 특성 해석
Fig. 4 Analysis of output characteristics according to length of end magnet

그림 4에서 인접한 영구자석의 끝 부분의 길이는 약 8 [mm]에서 출력 및 효율이 우수하게 나타나며, 최대 코깅 토크는 9 [mm] 부근에서 제일 작아지는 최적의 길이를 나타내고 있다. 본 연구에서는 인접한 영구자석의 길이가 8 [mm]가 되는 절삭형태로 가공되었다. 연구에 응용된 트레드 밀의 경우 회전자 양끝부분의 축상에 높은 관성을 가지는 휠이 부착된 형태로 동작하게 되므로, 코깅 토크에 대한 영향이 크게 발생하지 않기 때문에, 출력 및 효율의 관점에서, 가공이 쉬운 영구자석의 형상으로 설계되었다.

설계된 전동기의 1상 1극당 슬롯 수는 2이며, 4개의 직렬 연결된 권선이 하나의 상을 구성하며, 1상 1극당 권선의 턴수는 25턴으로 설계되었다. 권선 방식은 집중권으로 설계되었고, Y결선 방식이 사용되었다. 설계된 고정자 스택의 슬롯 면적에 대하여 정격출력을 만족하는 실제적인 권선은 권선의 전류밀도와 슬롯의 점유율 고려하여 선정되었으며, 4개의 0.7Φ 권선을 하나의 도체로 하는 병렬배선이 적용되었다. 1상 당 고정자 저항은 0.75 [Ω]이다.

2.3 설계된 전동기의 특성 해석

설계된 전동기의 해석은 일반적인 수치해석 방식이 적용되었다. 사용된 영구자석의 잔류자속과 기자력은 자석의 성질에 의존적일 뿐만 아니라, 자석의 크기 및 온도에 따라서도 달라지기 때문에 간단한 자기 등가회로보다 복잡해지는 문제가 발생한다. 일반적으로 잔류자속밀도와 기자력은 온도에 따라 그 값이 가변하지만, 본 논문의 해석에는 직선성의 감자 특성곡선을 가진다고 가정하여 해석하였다.

비선형적인 자기회로 해석은 영구자석이 기자력 F_{ma} 와 퍼미언스 P_{m0} 를 가지는 그림 5의 테브난 등가회로로 해석되었다. 각 자기회로에서 회전자와 고정자 및 공극에서의 기자력 감소는 사용된 재료의 B-H 곡선과 퍼미언스 영역으로부터 계산되었다.

영구자석의 퍼미언스 P_{m0} 는 다음과 같이 등가화되었다.

$$P_{m0} = \mu_r \mu_0 \frac{A_M}{L_M} \quad (4)$$

단, A_M 과 L_M 은 영구자석 극면의 유효면적과 영구자석 착자 방향의 길이를 의미한다.

그림 5의 등가회로의 밀력턴스는 유효길이와 유효면적 및 투자율에 의해 근사적으로 계산된다. 공극에서

의 릴럭턴스 R_g 는 다음과 같이 근사적으로 계산된다.

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (5)$$

본 논문에서의 철손은 비선형적 Steinmetz 방정식을 적용하여 근사적으로 단위무게당 손실로 계산되었다. Time step 방식에 의한 설계된 전동기의 일반적인 출력 특성은 표 2와 같다.

그림 6은 해석된 전동기를 120°스위칭 방식에 의한 전류 제어모드에서의 세 상의 전류 파형과 속도-토크 곡선을 나타내고 있다. 설계된 전동기의 해석결과는 설계 요구 조건인 정격속도 3000 [rpm], 정격출력 2.5 HP 및 최고속도 3500 [rpm]을 만족하는 것으로 나타난다.

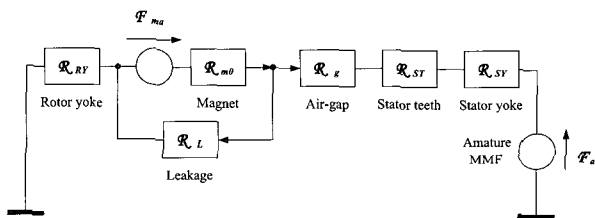


그림 5 비선형 자기회로 해석을 등가회로
Fig. 5 A simple block diagram of nonlinear magnetic circuit

표 2 설계된 전동기의 출력 특성
Table 2 Characteristics of the designed motor

출력 토크	7.532 Nm	정격출력	2.366KW
동손	304 W	철 손	14 W
총 손실	318 W	효율	88%
전류밀도	8.1 A/mm ²	실효치전류	10 A

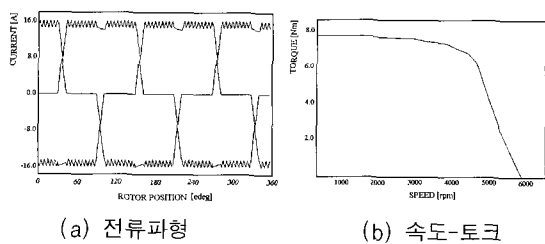


그림 6 설계된 전동기의 전류파형 및 속도-토크 곡선
Fig. 6 Phase current and speed-Torque of the BLDCM

3. 제어기 설계

3.1 지령속도의 패턴 발생

제작된 Tread Mill용 BLDCM 동작특성 검토 및 해석을 위한 제어기는 DSP인 TMS320F241을 사용하여 설계되었다. 설계된 제어기는 BLDCM과 결합되어 정해진 규격에 적합한 동작특성을 만족해야 한다. 전동기구를 사용하는 Tread mill에 대한 전동기와 제어기에 해당하는 국제규정에서, 롤러에 의해 이송되는 이송 벨트(moving surface)의 초기 기동속도는 2.4 [km/h] 미만으로 규정되어 있으며, 최대 가속은 무부하 조건에서 3.2 [km/h/s] 미만으로, 최대 감속은 90 [kg]에 해당하는 무게 또는 사용자의 정격 최대 하중을 가지고 정지할 경우, 어느 경우이든지 9.7 [km/h/s] 미만으로 규정된다. 따라서, 전동기를 제어하는 제어부에서는 사용자의 하중과 속도를 고려하여 속도 패턴을 발생할 때, 이러한 규정에 만족하는 속도 패턴을 발생하여야 한다.

따라서 본 연구에서는 사용자의 요구속도에 대한 구동부의 지령속도에 규정을 만족하는 가속비와 감속비를 가지며, 부드러운 운전을 위하여 지령속도의 패턴을 발생하도록 설계하였다.

그림 7은 본 연구에 적용된 Tread mill의 구동을 위한 가속시의 지령속도의 발생부를 나타내고 있다. 그림에서 ω_{com}^* 과 ω_{ref}^* 은 차례로 사용자의 입력된 지령속도와 제어기 내부의 지령속도를 나타내며, α_{ref} , α_{act} , α_{lim} 은 각각 제어기의 가속비, 실제 가속비 및 제한된 가속비를 나타낸다. 본 연구에서는 제어기의 가속비는 안정성을 위하여 전동기의 기계적 시정수와 안전계수를 고려하여, 외국 규격보다 낮은 2.8 [km/h/s]로 설계하였다. 실제 가속비 α_{act} 는 전동기의 검출된 홀센서 U, V 및 W 신호의 펄스간격 차이를 매번 비교하여 계산하였으며, 계산된 실제 가속비가 3.0 [km/h/s] 이상 증가하는 경우에는 지령속도 발생부에서 가속비를 제한하여 발생하여, 규정치를 만족하도록 설계되었다.

사용자가 속도지령을 현재 속도보다 감속시키는 경우와 정지 및 비상정지의 경우에 대해서도, 감속패턴에 따라 지령속도가 발생되며, 제어기의 감속비는 6.0 [km/h]로 설계되었다. 전원이 오프된 정전상태에 대해서는 전동기의 축상에 부착된 플라이휠과 롤러에 의한 기계적 에너지에 의해 감속되도록 기구적으로 설계되었다.

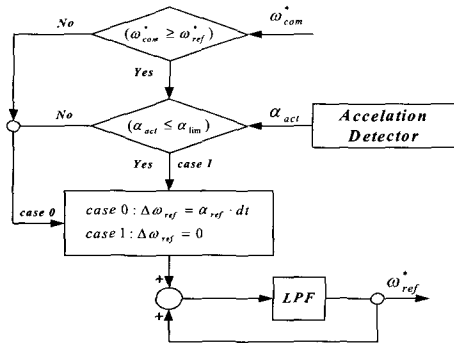


그림 7 지령속도 발생부 블록도
Fig. 7 Block diagram of reference speed generation

3.2 속도 제어기

제어기의 지령속도를 추종하는 속도제어기는 PI 제어 방식을 적용하였다. 속도제어기의 이득은 사용자의 하중과 속도 지령에 따라 내부적으로 설계된 이득을 사용하며, 운전 중 적분항의 누적에 대한 과도상태 응답특성과 안정성을 고려하여 antiwind-up을 가지는 적분기를 적용하였다. 또한 전동기의 가속 및 감속 상태를 검출하여, 제한된 가속 및 감속이 이루어지지 않도록 토오크 제한을 하여, 지령속도 발생부의 가감속 제한과 더불어 안정성을 고려하였다. 그림 8은 본 연구에서 적용된 속도 제어기의 블록도를 나타낸다.

속도제어기에 의한 출력은 홀센서의 펄스간격차이에 의한 실제 가감속비와 가감속 제한치에 의한 제한과 제어기의 최대 토오크 제한에 의하여 내부적으로 제한된다.

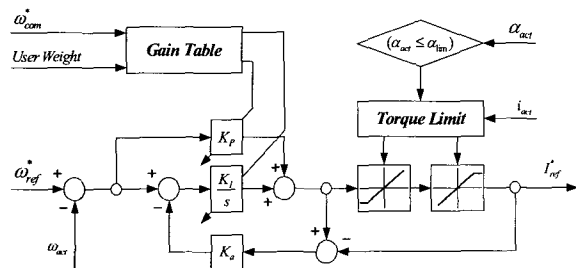


그림 8 속도 제어기 블록도
Fig. 8 Block diagram of speed controller

3.3 DSP기반 제어기구현

BLDCM의 스위칭 패턴은 전동기에 치부된 디스크형 자석에 의한 홀 센서신호를 이용하여 발생하도록 하였다. 각 상의 스위칭 패턴은 반 시계 방향으로 A상 → B상 → C상의 순서로 스위칭 패턴이 발생하게 되며, 도통각은 120° 도통 방식이 적용되었다. 센서 신호

에 의한 스위칭 패턴은 속도 제어를 위한 PWM 신호와 조합되어 게이트 앰프로 출력된다. 전동기의 속도 제어는 PWM 제어 방식이 적용되었으며, 전동기의 기본적인 스위칭 패턴과 속도 제어를 위한 PWM 제어 신호를 조합하여 게이트 신호로 사용되었다. 그림 9는 전동기와 전력 변환부를 포함한 제어 시스템을 나타내고 있다.

전동기의 회전속도는 DSP의 캡처 기능을 사용하여 측정된다. TMS320F241에 내장된 캡처 기능은 16비트 레지스터로 3상의 센서신호를 각각 캡처 할 수 있다. 과전류 검출을 위한 전류센서로는 TAMURA사의 L16P025 전류센서를 사용하였고, 센서의 출력단의 필터신호와 과전류 제한치의 비교에 의해 프로세서의 동작 및 게이트 앰프의 신호를 차단하도록 설계하였다.

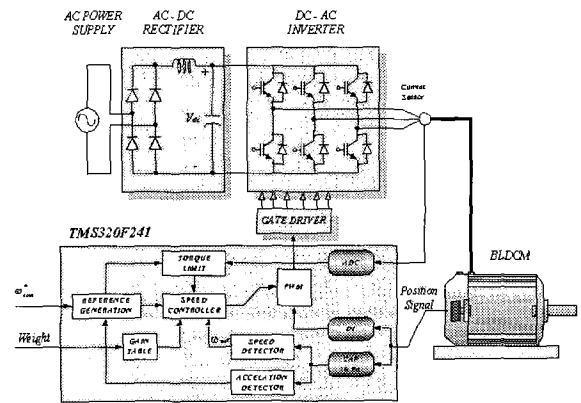


그림 9 TMS320F241 제어 시스템의 블록도
Fig. 9 Block diagram of control system using TMS320F241

4. 실험 결과 및 검토

본 연구에서 제작된 프로토타입 전동기의 고정자 스택의 하우징은 열발산 및 자기차폐를 고려하여 알루미늄 하우징 구조로 설계되었으며, 회전자는 홀 센서용의 링 마그네트가 장착되어 있고, 고속회전시 마그네트의 파손방지를 위해 캔을 씌운 형태이다.

제작된 시험용 전동기의 특성 실험을 위하여, 다이 나모미터 부하에 연결하여 출력을 실험하였다. 실험에서 제어기의 샘플링 시간은 50 [μs] 이며, 속도제어는 5 [ms] 주기로 수행되었다.

그림 10은 부하 인가시의 정격속도 기동 특성을 나타내고 있다. 정격속도에서 인가된 부하는 1.5 [kW] 부하이다. 기동후 150 [ms] 내에 안정적으로 정상상태에 도달함을 보이고 있으며, 정상적인 전류 파형을 나타

내고 있다.

그림 11은 각각 지령속도 500 [rpm]에서의 부하 변동에 따른 속도 응답을 나타내고 있다. 전동기의 운전 영역에서 부하 변동에 대하여 안정적인 속도 응답을 나타내고 있으며, 정상적인 기동 및 부하변동이 가능함을 보이고 있다.

그림 12에서는 가감속시의 전동기의 속도와 토크를 나타내고 있다. 실험은 하중 85 [Kg] 인 성인 남성을

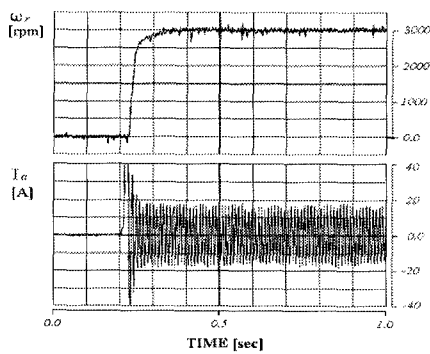
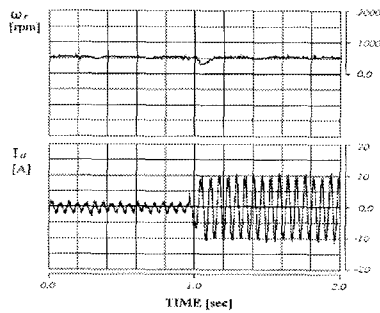
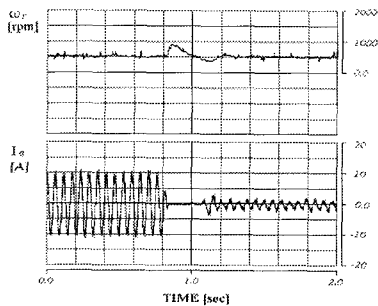


그림 10 정격속도에서의 기동특성
Fig. 10 Starting characteristics at rated condition



(a) 부하 인가시



(b) 부하 소거시

그림 11 지령 속도 500 [rpm]에서 부하응답 특성
Fig. 11 Speed response with load disturbance at 500 [rpm]

대상으로 실행되었다. 실험에서 가속 및 감속 패턴은 제어기의 설계치를 잘 추종하고 있으며, 실제 Tread mill의 장착 실험에 대해서도 잘 동작하고 있음을 보이고 있다.

그림 13은 걷기와 달리기에 대한 속도와 토크 파형을 나타내고 있다. 걷기는 약 4 [Km/h]에서 달리기는 7 [Km/h]에서 실시되었으며, 실험대상의 하중은 약 85 [Kg]이다.

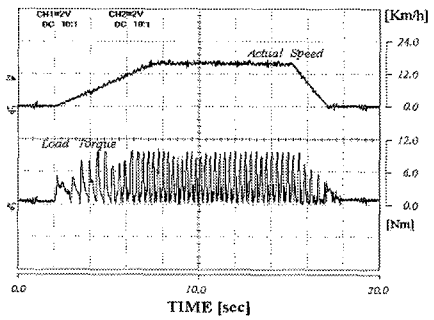
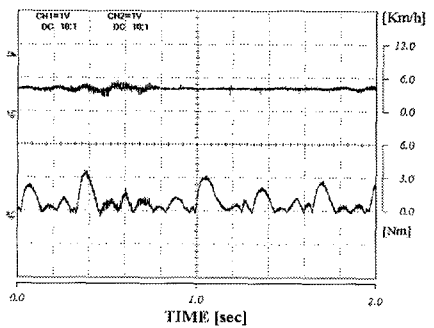
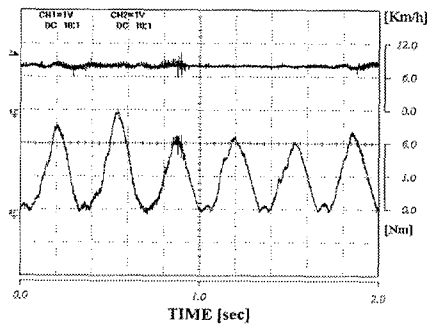


그림 12 운전속도 16 [Km/h]에서의 가감속 운전 특성
Fig. 12 Acceration and deceleration response at 16 [Km/h]



(a) 걷기 (4 [Km/h])



(b) 달리기 (7 [Km/h])

그림 13 걷기와 달리기에 대한 운전 특성
Fig. 13 Walking and running response

그림 14는 실측된 전동기의 효율과 속도-토크 곡선을 나타내고 있다. 실측된 전동기의 효율과 토크는 정격속도 3000 [rpm]에서 설계치 보다 다소 낮은 87 [%]와 7.3 [Nm]이다. 이는 착자된 회전자에 영구자석이 설계치 보다 다소 낮게 착자되었기 때문으로 사료된다. 하지만, 실제 제작상의 오차를 고려하더라도 전동기의 출력토크는 설계 파라미터를 만족하는 출력특성을 보인다.

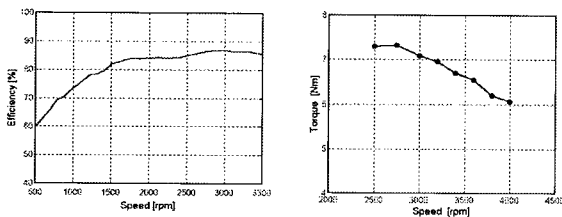


그림 14 효율 및 속도-토크 특성
Fig. 14 Efficiency and Speed-torque characteristics

5. 결 론

본 연구에서는 정격 2.5 [HP]급의 Tread Mill용 BLDC 전동기를 제작하고 제어기를 개발하였다. 제작된 전동기의 해석을 통하여 초기의 설계자의 요구에 적합한 출력 특성을 만족함을 알 수 있으며, 상용 제작의 시행착오를 감소하기 위하여 전동기의 권선은 턴수를 변환하여 해석결과와 실험 결과를 비교하였다. 고정자의 형상이 제한된 설계조건에서, 회전자에 부착되는 영구자석은 FEM 해석을 통하여 출력 및 코깅토크를 고려하여 적합한 형상을 선정하였다.

안정적인 기동 및 운전을 위하여, 사용자의 무게하중과 지령속도에 따라 진화전략에 의해 학습된 제어이득을 사용하여 전 운전영역에서의 안정된 운전특성을 구할 수 있었으며, 과전류 및 온도상승을 검출하는 보호회로가 장착되었다. 제작된 BLDCM 및 전용 제어기는 실험을 통하여 가정용 및 상업용 Tread Mill에 적용 가능함을 확인하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제 (00-역-01) 임.

참 고 문 헌

[1] A.T. Morgan, General Theory of Electrical Machines,

Heyden & Son Ltd. 1979.
 [2] Peter Vas, Vector Control of AC Machines, CLARENDON Press, 1990.
 [3] Miller TJE, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Oxford Univ. Press, 1994.
 [4] P. Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford Univ. Press, 1998.
 [5] Rasmussen KF, "Analytical Prediction of Magnetic Field from Surface Mounted Permanent Magnet Motor", IEEE IEMDC Conference, Seattle, pp. 34~36, May, 1999.
 [6] Rasmussen KF, Miller TJE, Davies JI, McGilp M, and Oлару M, "Analytical and Numerical Computation of Airgap Magnetic Fields in Brushless Permanent-Magnet Motors", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Oct. 1999.
 [7] Slemon GR and Liu X, "Core Losses in Permanent Magnet Motors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 26, No. 5, pp. 1653~1655, Sept. 1990.
 [8] Jin-Woo Ahn et al, "An Analysis of Optimal Link Voltage of VS-SVPWM for Current Harmonics Reduction", KIPE Proceedings pp. 342~346, 2002.
 [9] Jin-Woo Ahn et al, "High Efficiency Drive of SRM using GA-Neural Network", J. of Power Electronics Vol. 2 No. 1, pp. 19~24, 2002. 1.

저 자 소 개



안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~

현재 경성대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 당 학회 학술이사.



이동희(李東熙)

1970년생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2001년 경성대 공학기술연구소 박사후 연구원. 2002년 거제대 전임강사, 2002년 10월~현재 OTIS-LG 책임연구원.