2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2001.7.18-20

비접촉 구동용 마그네트 기어 토크 특성 해석

오영진, 하경호, 홍정표, 오영진*
창원대학교 전기공학과, (주)에스에프에이*

Characteristic Analysis of Touch Free Gear Using Permamant Magnet

Young-Jin Oh, Kyung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong, Young-Jin Oh
Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ., S.F.A Corporation*

Abstract - This study investigates the characteristics of touch-free permanent magnet gear according to design parameters. The effects of the design parameters on the magnetic torque is analyzed by using 3 dimensional Finite Element Method (FEM). The considered parameters are magnetization thickness, skew angle, stack length, inner and outer diameter and the number of pole. And the validity of analysis method is confirmed by the experimental results.

1. 서 론

현재 반송 시스템에 사용되는 헬리컬 기어 또는 타임 벨트는 충분한 구동력 전달과 구동축 간격을 크게 할 수 있지만 접촉 구동에 의한 분진 발생 및 구동 소음으로 인해 환경, 소음 등의 규제 강화에 대응할 수 없다. 이러한 기존 방식의 문제점을 보완하기 위해 공정용 반송 시스템에 마그네트 기어를 이용한 비접촉 구동 장치를 적용함으로써 기존 방식의 단점을 보완할 수 있다.

본 논문에서는 비접촉 구동용 마그네트 기어를 대상으로 자계 해석을 수행하여 시스템 사양을 만족하는 비접촉 마그네트 기어를 설계하고자 한다. 비접촉 마그네트 기어는 두 개의 영구자석을 직교하게 배치함으로써 구동 토크를 발생시킨다. 헬리컬형으로 자화된 영구자석을 이용한 마그네트 기어는 기하학적 구조를 고려한 3차원 해석이 필요하다. 따라서, 2차원으로는 그 특성해석의 어려움이 있어 3차원 유한 요소 해석을 통해하여 해석을 수행하였으며 이의 결과를 실제 간이 제작 모델의 실험치와 비교하여 검증하였다. 또한 영구자석의 각 파라미터(자화 두께, 스큐 각도, 축방향 길이, 내·외경, 극수) 변화에 따른 해석을 통해 마그네트 기어의 구동 토크 특성을 파악하였다. 이로부터 구동 특성을 만족하는 마그네트 기어를 설계하고자 한다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

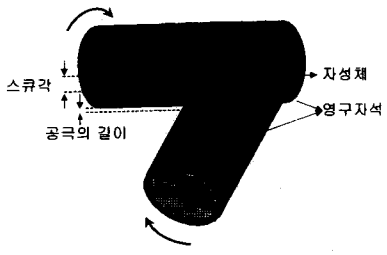


그림 1. 마그네트 기어의 구조

그림 1은 본 논문에서 해석한 마그네트 기어의 구조를 나타낸 그림이다. 마그네트 기어는 헬리컬형으로 자화된 영구자석이 서로 직교하여 구동축 영구자석을 회전시키면 영구자석의 흡인력에 의해 피동축 영구자석이 따라 회전하는 구조를 가진다. 이러한 마그네트 기어의 3차원 자기적 현상을 반영하기 위하여 3차원 유한 요소 해석을 사용하여 구동특성을 분석하였다. 본 해석 모델의 마그네트 기어용 영구자석의 잔류 자속밀도는 0.682 [T], 비투자율은 1.18로서 스큐를 가지고 있다.

2.2 해석 이론[1,2]

3차원 정자계(Magnetostatic field)의 지배방정식의 표현은 자계를 표현할 수 있는 계변수로서 포텐셜을 사용하면 벡터 포텐셜을 이용한 경우와 스칼라 포텐셜을 이용한 경우가 있다. 벡터 포텐셜보다 스칼라 포텐셜을 이용하면 한 요소에서의 미지 절점을 줄일 수고 계산 시간과 컴퓨터의 메모리량을 줄일 수 있는 이점이 있으므로 3차원 해석시 스칼라 포텐셜을 많이 이용한다.

일반적인 정자계 영역에서 변위전류를 무시한 멕스웰 방정식 및 보조방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \tag{3}$$

여기서, $\vec{H}$는 자계의 세기, $\vec{B}$는 자속밀도, $\vec{J}$는 전류밀도, μ는 매질의 투자율,

해석 영역에 전류가 존재하지 않으므로 식 (1)을 자기 스칼라 포텐셜 Ω을 정의하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \tag{4}$$

$$\vec{H} = -\nabla \Omega \tag{5}$$

식 (5)를 식 (2)의 멕스웰 방정식에 대입하면 식 (6)이 되고 벡터 연산을 통하여 정리하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \Omega = 0 \tag{6}$$

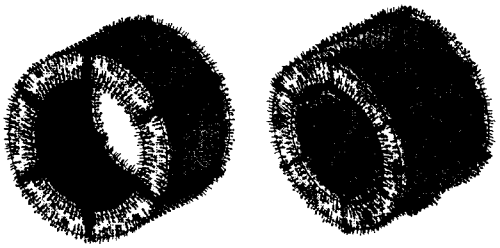
$$\mu \nabla^2 \Omega = 0 \tag{7}$$

2.3 시작기의 특성 분석

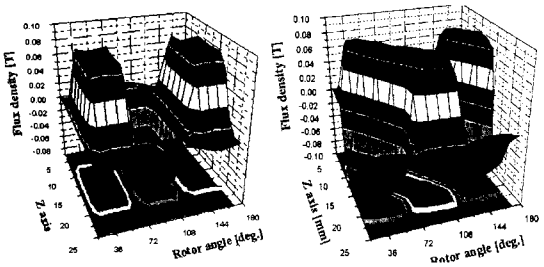
2.3.1 스큐의 영향 분석

스큐를 고려한 해석이 필요하나 해석의 편의상 실제 영구자석 모델을 그림2의 (b)와 같이 스큐를 고려하기 위해 영구자석을 다섯 등분으로 나누고, 각 등분은 회전시켜 스큐가 있는 것과 같은 형태가 되도록 배치하였다. 등분 수는 실제 스큐각에 의한 공극자속밀도의 분포에 영향이 미치지 않도록 선택하였다. 그림 2는 스큐 유·무에 따른 영구자석의 자속밀도 분포와 자속의 방향을

나타낸 것이다. 그림 3은 3차원 공극자속밀도 분포를 비교한 것으로 스큐의 영향을 볼 수 있으며 공극자속밀도가 연속적으로 분포하고 있다.



(a) Non-Skew Model (b) Skew Model
그림 2. 영구자석의 자속밀도 분포



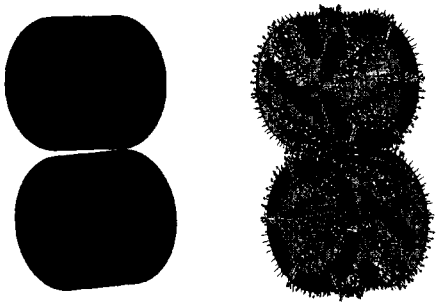
(a) Non-skew Model (b) Skew Model
그림 3. 공간적 자속 밀도 분포(Normal 성분)

2.3.2 구동 토크 해석

그림 4는 마그네트 기어의 3차원 유한 요소 해석 결과로서 (a)는 요소 분할도를 나타내고 (b)는 자속밀도 분포 및 자속의 흐름을 나타낸 것이다. 그림 5는 구동축의 회전에 따른 피동축에서의 발생 토크의 양상을 보기 위하여 구동축의 마그네트를 0 [deg.]와 60 [deg.] 사이에서 회전 간격을 10 [deg.]로 하여 해석을 수행하였다. 그 결과 기계적으로는 30 [deg.], 자기적으로는 피동축과 구동축의 영구자석 자극이 서로 90 [deg.]일 때 발생 토크가 최대가 됨을 알 수 있다.

2.3.3 구동 토크 측정

마그네트 기어를 대상으로 한 3차원 유한 요소 해석의 신뢰성을 확보하기 위해 해석 모델과 동일한 마그네트 기어를 간이 제작하였다. 간이 제작 모델은 토크 측정 실험을 수행할 때 구동축의 회전 위치에 따른 정밀



(a) 요소분할도 (b) 자속밀도 분포
그림 4 마그네트 기어의 3차원 해석결과

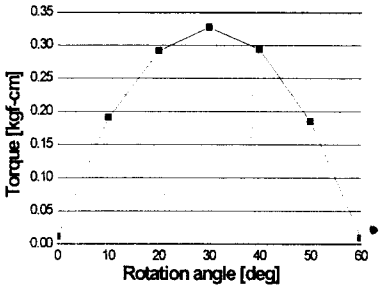


그림 5 회전각도에 따른 토크

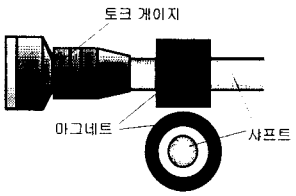


그림 6 측정 구성도

표 1 해석치와 실험치

측 정 치	0.35 ~ 0.4 ≒ 0.375 [kg · f-cm]
해 석 치	0.3273 [kg · f-cm]

실험은 어렵지만 마그네트 기어의 최대 토크를 제시함으로써 스큐를 고려한 3차원 유한 요소 해석 결과와의 비교를 통해 본 논문에서 수행하는 3차원 해석 방법의 신뢰성을 검증하였다. 측정 방법은 직접적으로 토크를 측정하는 토크게이지를 마그네트 기어의 구동축에 연결하여 최대 발생 토크를 측정하였다. 그림 6은 측정 구성도이며, 실험치와 측정치의 결과는 표 1에 나타내었다. 이론치와 측정치의 차이는 측정 장치의 공극 불균일에 의한 것으로 사료된다.

2.3 파라미터 변화에 따른 특성 분석

요구사양을 만족하는 마그네트 기어용 영구자석을 설계하기 위하여 기어의 구동토크에 주요하게 영향을 미치는 파라미터들을 결정하고 각 파라미터의 변화가 구동 특성에 미치는 변화 양상을 분석하였다. 파라미터는 직접적으로 영구자석의 성능에 영향을 주는 영구자석 두께, 극 수 등으로 정하여 해석을 수행하였다. 표 2는 마그네트 기어가 취부되는 환경을 고려하여 설계 가능한 범위를 설정한 치수들이며, 이 제한 범위 내에서 각 파라미터들의 치수를 변화시켰다.

표 2 설계 조건

영구자석 최대 외경	35 [mm]
구동축 최대 외경	20 [mm]
구동축 재질	Stainless steel
영구자석간 공극	0.5 [mm]

가. 극 수 변화에 따른 토크 변화

그림 7은 극 수 증가에 따른 구동 토크를 나타낸 것이다. 극 수가 증가할수록 구동 토크가 큰 폭으로 증가하는 양상을 나타내었다. 극 수가 증가하면 영구자석의 피미언스계수가 증가함으로서 동작점의 자속이 증가해 비례적으로 토크도 크게 증가함을 알 수 있다.

나. 스큐 각도 변화에 따른 토크 변화

그림 8은 스큐각의 변화에 따른 구동 토크 양상을 나타낸 것으로 스큐 각도는 45 [deg]일 때 가장 큰 구동 토크가 나타나는데 이는 구동축과 피동축 영구자석의 유효 단면적이 가장 크기 때문이다.

다. 직경 변화에 따른 토크 변화

그림 9는 직경 변화에 따른 구동 토크의 변화 추이를 나타낸 결과로서 직경 변화의 경우 유효 단면적은 증가하지만 영구자석 동작점의 감소로 토크가 소폭으로 증가하였다.

라. 축방향 길이 변화에 따른 토크 변화

그림 10은 직교하여 있는 두 개의 영구자석에서 한 개의 영구자석 축방향 길이를 증가시켜 오버행의 영향을 분석한 것으로 영구자석의 축방향 기준치수인 24[mm]에서 36[mm]로 증가할 경우 발생 토크가 약 10[%] 정도 증가하나 그 이상의 증가는 구동 토크 향상에 기여하지 않는다.

마. 자화방향 두께 변화에 따른 토크 변화

그림 11은 영구자석의 자화방향 두께에 따른 토크의 변화 양상을 나타낸 것이다. 영구자석 자화방향의 두께 증가는 동작점의 자속밀도를 증가시켜 길이 증가에 비례하여 다른 파라미터의 변화보다 가장 큰 폭으로 토크가 증가하는 양상을 보였다.

바. 자성체 유무에 따른 토크 변화

마그네트 기어에서 두 영구자석을 지지하기 위하여 구동축을 사용하게 되는데 구동축의 재질에 따른 특성을 그림 12와 같이 분석하였다. 구동축을 자성체로 하게 되면 자기회로가 형성되어 영구자석 퍼미어스 계수의 증가로 비자성체일 때 보다 토크가 크게 향상되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 3차원 유한 요소 해석을 통해 마그네트 기어의 구동토크을 해석하고, 이론치와 해석치를 비교하여 해석 방법의 신뢰성을 검증하였다. 또한 각 파라미터의 변화를 통해 마그네트 기어의 구동토크의 변화추이를 파악하였다. 본 해석 자료는 마그네트 기어의 설계 방향을 제시하여 설계기간을 단축하고 요구사양을 만족하는 마그네트 기어의 설계 자료로 활용할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] 任達鎬, "電氣系의 有限要素法," 東明社, 1995

[2] Sheppard J. Salon "Finite Element Analysis of Electrical Machines," Kluwer Academic,1995.

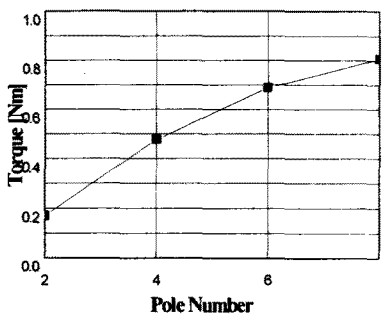


그림 7 극 수 변화에 따른 토크

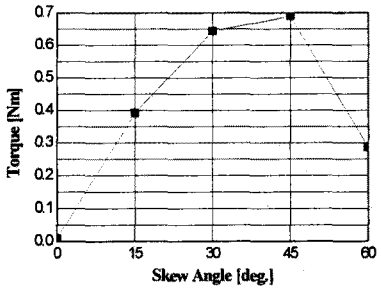


그림 8 스큐 각도 변화에 따른 토크

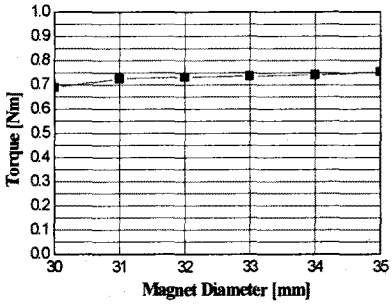


그림 9 직경 변화에 따른 토크(두께 일정)

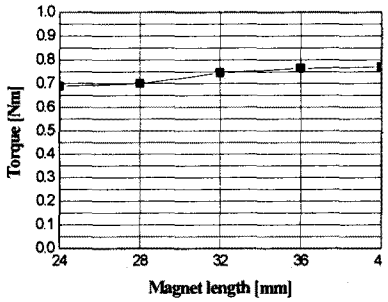


그림 10 축방향 길이 변화에 따른 토크

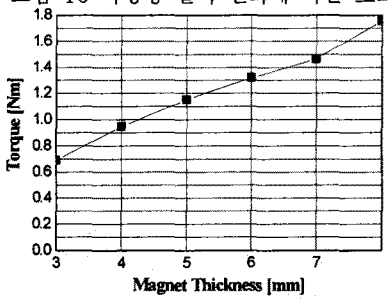


그림 11 자화방향 두께 변화에 따른 토크

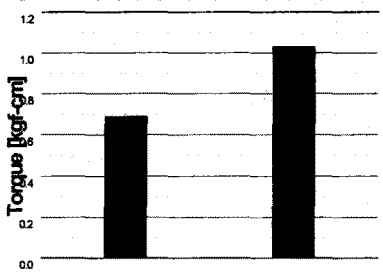


그림 12 구동축 재질에 따른 토크