FEM을 이용한 Micro-Electromagnetic Clutch 토크해석

論 文
54B-2-2

Study on Torque Analysis of Micro-Electromagnetic Clutch by Using FEM

朴 昌 浩* · 趙 鐘 斗† · 金 命 九** · 潘 强***
(Changhao Piao · Chongdu Cho · Myunggu Kim · Qiang Pan)

Abstract - This study tries to analyzes the static friction torque that generated in a micro-electromagnetic clutch by using FEM. For the purpose of design change and optimization of the micro-electromagnetic clutch, the static friction torque prediction is very important. We construct the axi symmetric FEM model for analyze the static friction torque and the real material properties are substituted to the FEM model. For a test, predicted static friction torque is compared with experimental one to discuss the rationality of torque analysis process. The analytical result agrees well to experimental data, explaining the validity of the mathematical process and FEM model.

Key Words : Micro-Electromagnetic Clutch, FEM, Torque Analysis, Magnetic Field

1. 서 론

전자기이론을 이용한 소형전자기클러치(micro-electromagnetic clutch)는 사무용 복사기, 프린터, ATM지페인식기와 같은 기기에 광범위 하게 적용되고 있다.[1] 소형전자기클러치는 각각의 사용 용도와 환경에 따라서 요구에 적합한 소형전자기클러치가 설계되어야 한다. 소형전자기클러치에서 제일 중요시되고 있는 설계인자는 발생하는 토크의 크기와 응답시간이다. 신속한 설계변경과 최적화 설계를 위하여 클러치에서 발생하는 토크를 정확히 예측할 수 있는 유한요소 모델의 구성과 해석방법의 정립이 필요하게 되었다. 그리고 보통 하나의 사무용 기기에 여러 개의 소형전자기클러치가 장착되어 있으며 여러 개의 소형전자기클러치가 유기적으로 작동을 하기 때문에 개개 소형전자기클러치의 빠르고 정확한 응답시간은 전체 기기의 성능에 결정적인 영향을 준다. 때문에 기기 전체의 원활하고 효과적인 작동을 기대하기 위하여 발생하는 토크와 응답시간에 대한 정화한 예측은 필수적이다. 본 논문에서는 소형전자기클러치가 발생하는 토크의 크기를 정확히 예측 할 수 있는 축 대칭 유한요소 모델의 구성과 해석방법을 정립하는데 중점을 두었다. 이것은 소형 전자기클러치의 응답시간을 해석적 방법으로 정확하게 예측할 수 있는 기반연구로 된다. 소형 전자기클러치가 발생하는 토크를 예측하는데 사용된 상용화 프로그램인 ANSYS 에서는 맥스웰 응력(Maxwell stress)과 가상일(virtual work) 원리를 기반으로 한다. 현재 많은 전기기기 연구에서 맥스웰 응력이나 가상일의 원리를 이용한 유한요소 방법으로 전기기기에서 발생하는 자기장의 힘을 해석하였다.[2~7] 자기장의 분포를 수치적 방법으로 해석하는 이론에 관련한 연구는 잘 정리되어 있으나 이런 이론을 이용하여 소형전자기클러치에서 발생하는 토크를 계산해내는 연구는 아직 없다. 소형전자기클러치를 생산하고 있는 생산자는 거의 대부분 직접 실험을 통하여 신제품의 토크의 크기를 측정하는 방법으로 개발한다. 실험을 하기 위하여 반복적으로 새로운 전자기클러치 모델을 만들어야 하기 때문에 개발단계에서 걸리는 시간이 길어지기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 소형전자기클러치의 토크해석은 신제품의 토크를 예측가능하게 하여 연구단계에서 소비하는 시간을 획기적으로 줄여줄 수 있다.

소형전자기클러치는 24V 정격전압에서 10A/m 미만의 비교적 낮은 자기장 세기에서 작동 한다. 자기장의 세기가 큰 경우에는 자기회로를 구성하는 자성체가 포화 상태거나 최대 상대투자율의 범위에서 작동한다. 자기장의 세기가 작은 경우에는 자성체가 주로 초기상대투자율 범위에서 작동 되는데 낮은 자기장에서 작동하는 전기기기의 자기장 해석에서는 재료 상수를 모델에 적용할 때 초기상대투자율 범위의 자기이력곡선을 더 상세하게 표현해주어야 실제 실험에 접근하는 해석결과를 얻을 수 있다. 본 논문은 소형전자기클러치의 축대칭 유한요소 모델을 구성하여 소형전자기클러치에서 발생하는 자기적 힘 즉 수직응력의 크기를 얻어내고 그 힘의 크기를 후처리과정을 통하여 토크로 변환 시켰다. 소형전자기클러치의 전기자는 초기상태에서 회전자에서 0.2mm 정도 떨어져 있다가 전압을 가하게 되면 자기적인 힘에 의하여 전기자는 회전자 쪽으로 끌려가서 회전자에 접촉하여 마찰력에 의하여 토크를 발생하게 된다. 최종적으로 얻어낸 해석 결과와 실험데이터의 비교하였으며 이 비교를 통하여 해석결과의 정확성 여부를 검증하였다.

2. 기본이론과 해석모델

2.1 소형전자기클러치의 구조

사무용기기에 주로 사용되는 소형전자기클러치는 주요하게

† 교신저자, 正會員 : 仁荷大學 机械工學科 敎授
Email : cdcho@dreamwiz.com
* 正 會 員 : 仁荷大學 机械工學科 博士課程
** 正 會 員 : 仁荷大學 机械工學科 博士課程
*** 學生會員 : 仁荷大學 机械工學科 碩士課程
接受日字 : 2004年 5月 19日
最終完了 : 2004年 11月 29日

축(shaft), 코일(coil), 회전자(rotor), 전기자(armature), 하우징(housing)으로 구성되어 있으며 그 구성은 그림.1과 같다. 소형전자기클러치의 축은 부하와 상시 연결되어 있고 전기자는 입력되는 동력과 상시 연결되어 있다. 코일은 보빈(bobbin)에 감겨져 있고 하우징은 이들의 외각이 되어주어 보호 및 자기회로 구성의 역할을 한다. 소형전자기클러치에 작동 전압이 인가되면 동력부와 연결된 전기자가 회전자와 접촉하게 되며 마찰력이 발생하게 되어 토크를 발생한다. 마찰토크에 의하여 축은 동력을 전달받아 부하를 구동하게 된다. 작동전압이 취소되면 전기자는 판스프링에 의하여 회전자에서 떨어지게 되며 외부 동력은 끊어지게 된다. 작동전압이 가해질 때 얼마나 빨리 동력이 전달될 수 있는 가를 확인하는 응답시간과 얼마나 많은 부하를 움직일 수 있는가를 확인하는 토크의 크기는 소형전자기클러치의 주요한 지표이다. 소형전자기클러치는 사무용기기에 장착되어 있는 부품이기 때문에 코일에 가해지는 전압의 세기는 사무용기기의 특성에 의하여 24V 정도로 고정되어 있다. 자기장을 여기(*excitation*)시키는 입력전압이 결정된 상태에서 토크를 크게 하기 위해서는 초기투자율이 높은 연자성체의 선택하는 방법과 전체 구조물의 형상을 최적화 시키는 방법을 선택할 수 있다. 토크해석의 정확성 여부가 확인되면 유한요소 해석으로 구조적인 변경과 재질적의 변경을 통한 토크향상에 관련된 최적화 작업이 쉽게 가능해진다.

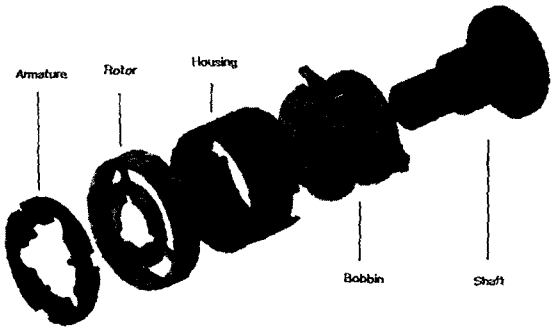

그림.1 소형전자기클러치의 구성

Fig. 1 Construction of micro-electromagnetic clutch

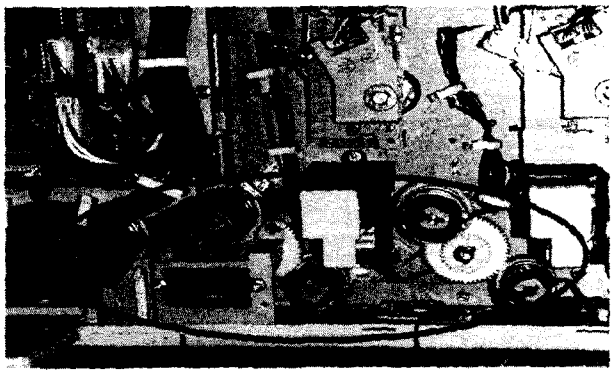

그림.2 프린트에 장착된 소형전자기클러치

Fig. 2 Micro-electromagnetic clutch working on printer

소형전자기클러치의 내부 구성을 더 형상적으로 보여주기 위하여 그림 3과 같이 3차원 모델을 만들어서 보여주었다. 코일은 폴리머로 된 보빈(*bobbin*)에 감겨져 있으며 보빈과 코일은 하우징에 의하여 보호되어 있다. 소형전자기클러치는 회전구조를 갖고 있는 소형 전기 기기이다. 소형전자기클러치의 이러한 구조적 특성으로부터 2차원 축대칭 유한요소 모델을 구성하여 해석에 이용할 수 있다. 실제로 3차원 유한요소모델을 구성한 경우에는 축에서만 15만개 정도의 요소가(element) 필요하게 되어 3차원 유한요소 해석은 많은 시간적인 낭비를 가져오게 되기에 본 논문에서는 2차원 축대칭모델로 해석을 진행했다. 2차원 축대칭 모델의 경우에 최대한 형상이 좋고 조밀한 요소로 모델링 하였을 때 사용된 요소개수는 5만개 정도이므로 현재 보통 사용되고 있는 1~2GHz 급의 컴퓨터로 무리 없이 진행할 수 있다.

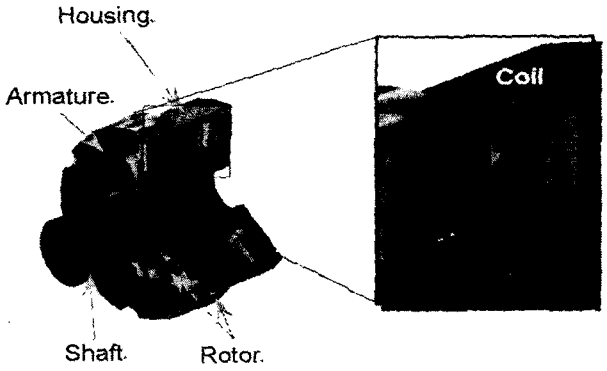

그림 3 소형전자기클러치의 단면도

Fig. 3 Section view of micro-electromagnetic clutch

2.2 정 마찰 토크의 유도

전기자와 회전자가 접촉하게 되면 그림.4와 같은 모양의 접촉면이 발생한다. 두 개의 접촉면의 면적은 전기자와 회전자의 기하학적 형상으로부터 쉽게 알 수 있다. 그리고 이 두 접촉면적에 가해지게 되는 자기적 힘에 의하여 발생하는 수직응력은 유한요소 해석을 통하여 얻을 수 있다.

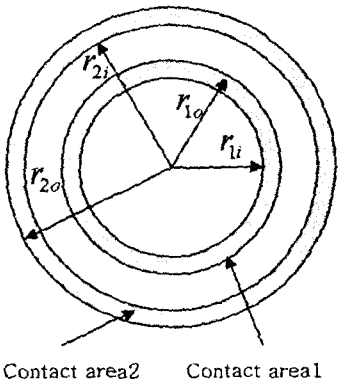

그림.4 회전자와 전기자의 접촉면

Fig. 4 Contact shape between rotor and armature

위의 조건으로부터, 2개의 원환으로 구성된 접촉면에 의하여 발생하는 마찰 토크의 크기는 다음과 같다.

$$T=\int_0^{2\pi}\int_{r_{1i}}^{r_{1o}}\mu\sigma_1 r^2 dr d\theta+\int_0^{2\pi}\int_{r_{2i}}^{r_{2o}}\mu\sigma_2 r^2 dr d\theta \qquad (1)$$

σ_1과 σ_2는 자기적 힘에 의하며 발생하는 내부원환과 외부원환의 수직응력이고 μ는 마찰면의 정 마찰계수이다. 전기자는 오직 축 방향으로만 움직이고 전기자를 끌어당기는 자기적 힘도 축 방향의 힘만 존재한다. 이 자기적인 힘에 의하여 접촉면에 수직응력이 발생하며 이 응력은 마찰력을 형성하여 마찰토크를 발생하게 된다.

2.3 실험방법

소형전자기클러치의 토크를 측정하기 위하여 토크측정기를 특별 제작하였으며 그림.5 a)는 토크 측정에 사용된 측정시스템을 보여준다.

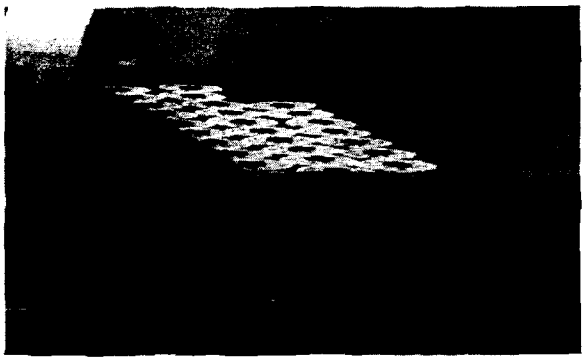

그림.5 a) 토크측정 시스템

Fig. 5 a) Torque test system

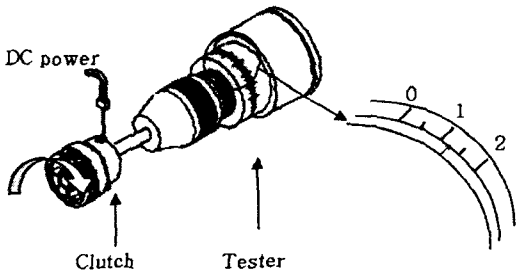

그림.5 b) 토크측정방법 원리에 대한 설명

Fig. 5 b) Schematic view of torque test method

직류전원에서 나오는 일정한 전압이 소형전자기클러치에 가해지게 되면 소형전자기클러치의 전기자가 회전자에 접촉하며 전기자가 회전자에 접촉하는 시점부터 회전자와 전기자 사이에는 일정한 정 마찰토크가 발생한다. 정 마찰토크는 수직응력과 접촉면의 면적 그리고 정 마찰계수에 관계된다. 전기자와 회전자사이에 발생한 정 마찰토크가 얼마인지를 측정해내기 위하여 소형전자기클러치의 축을 토크측정기의 축에 연결시키고 플라스틱 기어를 천천히 회전시킨다. 토크측정기 내부에는 스프링이 들어 있고 스프링이 발생하는 토크의 크기는 회전각도가 증가함에 따라서 선형적으로 증가하며 그 방향은 기어 쪽에서 입력하는 토크와 반대 된다. 초기에는 기어를 돌리면 축은 기어와 함께 일정한 각도를 회전한다. 그러나 어느 정도까지 회전하면 전기자와 회전자사이에서 발생하는 정 마찰토크가 더는 스프링이 발생하는 토크를 당하지 못하게 되여 회전자와 전기자사이에는 슬립(slip)이 발생한다. 일단 슬립이 발생하면 정 마찰토크가 동 마찰토크로 변화되면서 토크측정기의 축은 빠른 속도로 역회전한다. 측정하려고 하는 대상이 정 마찰토크이므로 소형전자기클러치의 기어를 슬립이 발생할 때까지 돌리고 슬립이 발생하는 시점에서 그 눈금을 읽어서 정 마찰토크의 크기로 하였다. 토크측정기에서 토크의 크기눈금을 읽어내는 방법은 그림.5 b)에서 보여준다.

3. 유한요소 해석결과와 분석

3.1 작동원리와 해석 모델의 구성

전압을 가하면 그 전압에 대응되는 자속이 소형전자기클러치에 발생하게 된다. 자속은 코일을 중심으로 폐회로를 구성하여 회전자와 전기자사이의 공극을 관통하게 되며 공극이 작아지면 작아질수록 자기저항이 작아져서 자속의 밀도는 커지게 된다. 초기상태에서 전기자는 회전자에서 일정한 간격을 두고 떨어져 있다. 전압을 가하는 순간부터 전기자는 자기적 힘을 받아서 회전자 쪽으로 끌려가게 되며 회전자와의 접촉한 후에 접촉면의 마찰력에 의하여 토크가 발생하게 된다. 그런데 전기자가 회전자에 접촉되었을 때 완전히 접촉되었다고 볼 수는 없다. 이론적으로 완전접촉이라고 볼 수 있지만 공정상에서 전기자와 회전자 표면의 표면 거칠기에 의하여 미세한 간격이 존재하게 된다. 이 미세간격은 회전자와 전기자의 표면 거칠기에 의하여 결정하였으며 표.1 에서는 회전자와 전기자 표면의 표면 거칠기를 보여준다.

표 1 회전자와 전기자의 표면 거칠기

Table 1 Roughness of surface at rotor and armature

	Rotor(μm)	Armature(μm)
Rmax	9.22	10.42
Ra	1.112	1.621

회전자의 표면 거칠기(Rmax)는 0.01mm에 근사하고 전기자에서의 표면 거칠기도 0.01mm에 근사하다. 위와 같은 표면 거칠기를 유한요소 해석모델에서 반영하기 위하여 최종상태에서 회전자와 전기자는 0.02mm의 간격을 유지한다고 본다. 회전자와 하우징사이의 공극, 하우징과 축 사이에 발생하는 공극도 유한요소 모델에 포함 되었다.

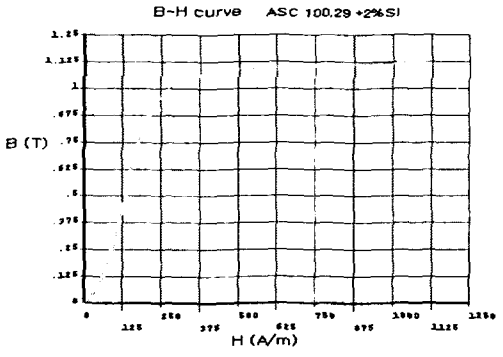

그림.6 ASC 100.29+2%SI 의 자기이력곡선

Fig. 6 Hysteresis curve of ASC 100.29+2%SI

연자성체의 특성은 투자율(permeability)이 크고 보자력(coercive force: Hc)이 작고, 고주파손실(tanδ)이 낮은 것이다. 소형전자기클러치의 축은 ASC 100.29+2%SI로 구성되었으며 그의 자기이력곡선은 그림.6과 같다. ASC의 자기 이력곡선은 실험적인 방법에 의하여 실측된 것이다.[8] 소형전자기클러치는 빠른 시간적 응답성과 최소 에너지 손실, 그리고 작은 외부자계의 작용 하에서의 큰 자화밀도를 얻어야 한다. 때문에 외부자기 유도 신호에 대한 응답이 빠르고 높은 자속밀도를 최소 에너지 손실에서 얻을 수 있는 재질적 특성이 있는 고투자율 연자성체로 소형전자기클러치의 자기회로를 구성한다.

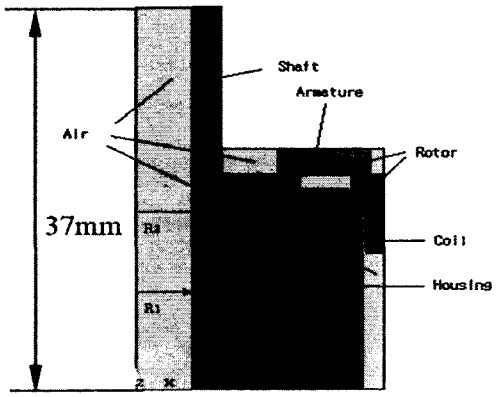

그림.7 소형전자기클러치의 축대칭모델
Fig. 7 Axi-symmetric model of micro-electromagnetic clutch

유한요소 모델 중에서 회전자와 전기자의 표면 거칠기를 표현해 주는 공극을 정확하게 해석하기 위하여 공극 근처의 요소에 특별한 관심을 두고 다룰 필요가 있다. 3차원 모델로 해석을 하려면 공극이 다른 기하학적 형상에 비하여 매우 작은 이유로 그 근처의 요소가 많아져서 해석에 어려움이 따르게 된다. 그러므로 3차원모델에 공극을 표현하는 유한요소해석은 정확성 보다는 시간적 자원적인 낭비가 더 많게 되어 효과적이지 못하다. 이러한 3차원 해석의 어려움을 고려하여 소형전자기클러치의 축대칭모델을 구성하였으며 그 형상은 그림.7에서 보여준다. 해석에 사용된 소형전자기클러치의 축의 길이는 37mm 이고 R_1은 중공축 형상인 축의 내부 구멍의 반경을 표시하며 크기는 4mm이고 R_2는 회전자의 외부 반경을 표시하며 크기는 17.4mm 이다. 그리고 코일에는 24V, 0.16A의 전류가 흐른다. 소형전자기클러치의 축은 ASC 100.29+2%SI로 구성되었고 하우징과 회전자 전기자의 재질은 SPCC이고 상대투자율은 800이다.

3.2 해석결과

24V의 정격전압이 소형전자기클러치에 가해지면 소형전자기클러치에서 자기벡터 퍼텐셜의 분포가 형성되는데 그 형상은 그림 8과 같다. 축대칭 모델의 자기장 해석에서 자기장의 자기벡터 퍼텐셜은 회전방향의 자유도만 가진다. 축대칭 모델에서 0 퍼텐셜 조건을 모델의 경계 주었으며 이것은 모든 자기적인 에너지가 모델 내부에 포함되어 있는 것을 의미 한다. 그러나 자기장은 전기장처럼 재질에 구속되어 있지 않으며 모델 외부에도 자기장이 분포되게 된다. 그러므로 해석 중에 사용하는 경계조건은 자기에너지가 모델 내부에만 존재한다는 가정을 갖게 된다. 자기 벡터 퍼텐셜의 해석 결과로부터 유한요소 해석이 미리 예상하고 있던 결과에 접근함을 보아낼 수 있다.

자속의 흐름은 자기장을 이용하여 작동하는 전기기기에서 발생하는 다양한 현상을 해석하는데 유용하게 사용되는데 그림.9에서는 정격전압에서의 자속의 분포를 보여준다. 우측의 확대된 두 그림은 회전자와 전기자사이의 공극에서 발생되는 자속의 분포를 보여준다. 자속의 흐름에서 보여주는 것처럼 거의 대부분의 자속은 회전자에서 빠져나와서 전기자에 전달되며 다시 전기자에서 회전자, 회전자에서 하우징, 하우징에서 축으로 흘러간다. 자속은 공극을 만나면 자기저항이 작은 경로를 선택하게 되는데 확대시켜서 보여준 그림에서 이것을 확인할 수 있다. 마찰토크의 발생에 유효한 자기적 힘은 그림.9 에서 확대해서 보여준 전기자와 회전자사이의 공극을 관통하는 자속에 의하여 발생하게 된다. 자기장이 전기자와 회전자의 접촉면에 집중 분포되어 있다는 현상을 그림.10에서 도 보여준다. 전기자와 회전자 접촉면이외의 부분에서의 자기장의 세기는 0에 가깝다. 사무용기기는 24V의 전압을 사용하기에 코일는 0.16A정도의 작은 전류가 흐른다. 때문에 발생하는 자속밀도는 20 가우스에 불과하다. 코일의 권수를 늘리거나 전류의 세기를 증가시키는 방법으로도 자속밀도를 증가시켜 정 마찰토크를 증가시킬 수

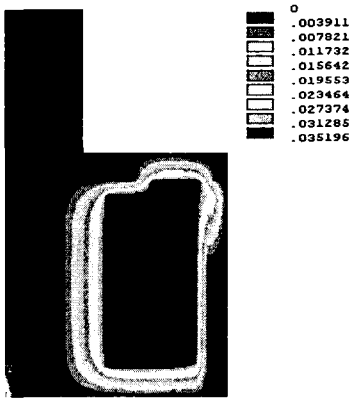

그림.8 24V 정격전압에서의 자기벡터 퍼텐셜분포
Fig. 8 Magnetic Vector potential distribution at 24V

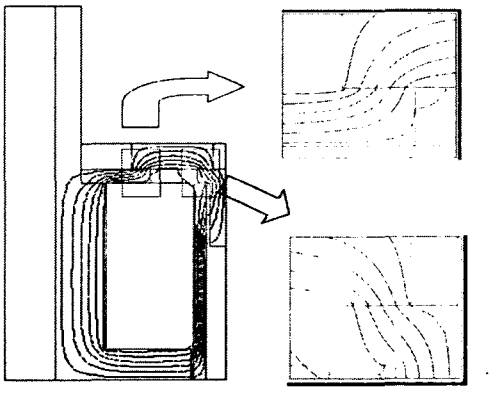

그림.9 24V에서 자속의 분포
Fig. 9 Magnetic flux distribution at 24V

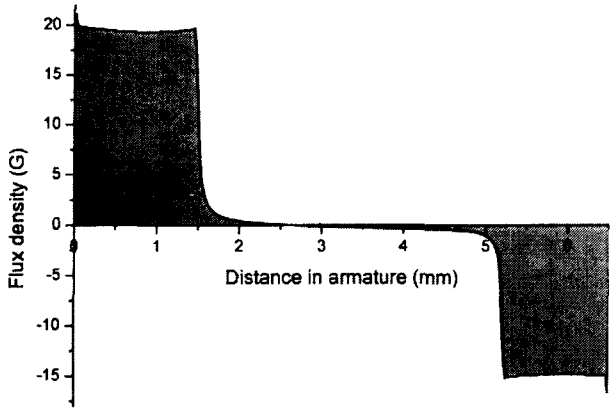

그림.10 전기자와 회전자의 접촉면에서 발생하는 자기장의 세기

Fig. 10 Magnetic flux density at contact area of rotor and armature

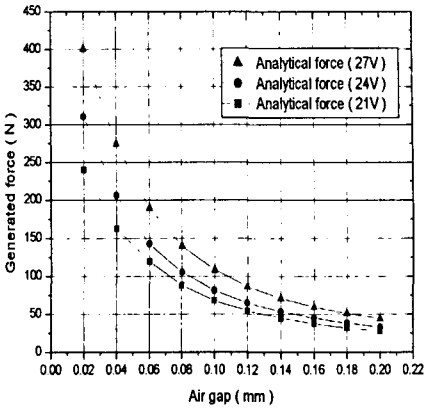

그림.11 공기간극의 변화에 따른 전기자가 받는 자기적 힘의 크기

Fig. 11 Generated magnetic force at armature related with air gap

있으나 전류의 세기가 커지면 열이 많이 발생하기에 사무용기기의 다른 부품에 영향을 주게 되므로 작은 전류 작은 자속 밀도에서 작동시킬 필요가 있다.

3.3 해석과 실험결과의 비교 분석

전압입력이 없는 초기상태에서 공극의 크기는 0.2mm 인데 전압을 주게 되면 공극은 0.02mm로 줄어든다. 공극의 변화는 자기저항의 변화를 수반하게 되고 최종적으로 전기자에 발생하는 자기적 힘의 크기에 변화를 주게 된다. 공극의 변화에 따른 전기자가 받는 자기적 힘의 크기의 변화는 그림.11에서 보여준다. 예상하던 대로 공극이 작아짐에 따라서 자기적 힘이 커지고 전압이 커지면 자기적 힘도 커진다. 해석 결과를 통하여 소형전자기클러치에 24V의 전압을 주었을 때 최종 상태에서 전기자는 $310N$의 힘을 받는다는 것을 예상할 수 있다. 해석에서 전기자가 최종적으로 받게 되는 응력도 쉽게 얻어낼 수 있다. 최종적으로 발생하는 수직응력을 정 마찰계수에 따라서 정 마찰력으로 변환시키고 정 마찰력으로부터 정 마찰토크의 크기를 계산해낼 수 있다. 계산된 정 마찰토크와 실험에 의한 정 마찰토크의 크기는 그림.12에서 보여준다. 전압이 커지면 자속밀도도 따라서 커지며 그 자기밀도에 의하여 정 마찰토크도 증가된다. 정격전압 24V에서 실험에 의하여 얻은 정 마찰토크의 크기는 $0.78N \cdot m$이고 동일한 정격전압 하에서 해석을 통하여 얻은 정 마찰토크의 크기는 $0.84N \cdot m$이다. 이 결과는 정격전압에서 해석과 실험적 결과는 거의 일치함을 보여준다. 정격 전압 뿐만 아니라 16V부터 29V 사이에서의 정 마찰토크해석 결과는 모두 실제 실험데이터와 근사하다. 해석결과가 실험결과보다 모두 약간씩 큰데 이것은 해석 모델을 구성할 때 각각 부품사이에서의 공극의 크기를 최소화 하여 모델링하여 해석상의 자기 저항이 실제 자기저항보다 낮기 때문이라고 예상한다. 실험적 정 마찰토크와 해석적으로 얻은 정 마찰토크의 비교결과는 유한요소 해석을 통하여서도 실험데이터에 근접하는 토크를 예측할 수 있다는 것을 보여준다. 해석적으로 토크의 크기를 구했을 때 그 결과 값이 실험결과와 잘 일치하므로 그림.11에서 보여준 전기자가 받는 자기장의 힘도 실제 자기장의 힘과 근접함을 예측할 수 있다.

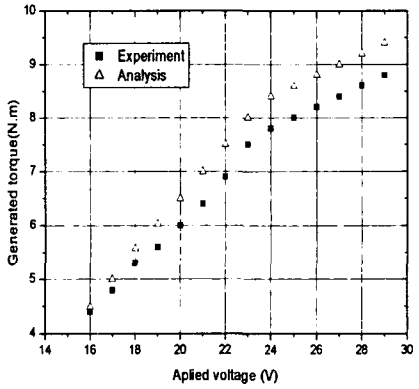

그림.12 정 마찰토크의 실험적 결과와 해석적 결과의 비교

Fig. 12 Comparison between analytic and experimental torque

4. 결 론

본 연구에서는 소형전자기클러치에서 발생하는 정 마찰토크의 크기를 유한요소 방법으로 계산해내고 실험적 방법으로 소형전자기클러치에서 발생하는 정 토크를 측정하여 해석적 방법으로 얻은 결과와 비교하였다. 전기자와 회전자의 사이 공극을 고려한 축대칭 유한요소 해석 모델로부터 얻은 정 마찰토크는 실험적으로 얻은 정 마찰 토크에 비교하여 평균 7.52% 정도 크게 나타났으며 이 비교결과는 해석적 방법으로 실제 정 마찰토크의 크기를 충분히 예측할 수 있다는 것을 보여준다. 개발하려고 하는 모델의 정 마찰토크의 크기를 해석을 통하여 예측하고 그 다음에 실험을 기반으로 보정을 해주면 소형전자기클러치의 개발단계에서 소비되는 시간을 단축시킬 수 있다. 해석을 통하여 소형전자기클러치에 21V, 24V, 27V의 전압을 주었을 전기자가 받는 자기적 힘의 크기와 공극사이의 관계를 얻어내었다. 공극의 거리에 따른 자기적 힘의 변화 그래프는 응답시간을 계산하는 연구에 응용된다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구임.(KRF-2003-041-D20012)

참 고 문 헌

[1] Ogura industrial corp. Japan, "Ogura industrial catalog", www.ogura-clutch.com.

[2] Stephane Balac, Gabriel Caloz, "Magnetostatic Field Computation Based on the Coupling of Finite Element and Integral Representation Methods", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.38,No.2, pp.393-396, 2002.

[3] D.Muller, L.Nicolas, F.Buret, "A C.A.E Package for an Intuitive Approch to Magnetic Circuits", Antennas and Propagation Society International symposium, Vol.1, pp.480-483, 1995.

[4] Chang-Chou Hwang, Y.H.Cho, "Effects of Leakage Flux on Magnetic Field of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.37, No.4, pp.3021-3024, 2001.

[5] Naila Mikhaeil-Boules, "Design Analysis of Electromagnetic Particle Clutch", Industry Application Society Annual Meeting, Conference Record of the 1994 IEEE, Vol.1, pp.357-360, 1994.

[6] Shi Xin Chen, T.S.Low, "Artificially Hardened Model of Soft Magnetic Materials and its Application to Analysis of Magnetic Field", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.30, No.5, pp.2940-2943, 1994.

[7] J.Bigeon, J.C.Sabonnadiere, J.L.Coulomb., "Finite Element Analysis of an Electromagnetic Brake", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.19, No.6, November, pp.2632-2634, 1983.

[8] *Hoganäs* industrial corp. Sweden, "Technical Report Powders for Soft Magnetic Sintered Parts".

저 자 소 개

Changhao Piao (朴 昌 浩)

1978년 중국 연변에서 태여 나서 2001년에 Xi'an Jiaotong Univ.에서 전기공학과 학사 학위를 받음. 2001년 9월에 한국 인하대학교 기계공학과 통합과정에 입학하여 박사 학위 취득과정에 몸을 담고 있으며 현재 전자기장 유한요소 해석, 전자기장을 이용한 센서와 Actuator 분야의 연구를 하고 있음.

Tel : 82-032-860-7321, Fax : 82-032-868-1716

E-mail : changhaopark@hanmail.net

Chongdu Cho (趙 鐘 斗)

1961년 생. 학사와 석사 학위를 서울대학교와 KAIST에서 받고 University of Michigan 에서 박사학위를 받음. 현재 인하대학교 기계공학과 교수로서 구조해석, 복합재료, MEMS등 분야를 연구하고 있음.

Tel : 82-032-860-7321, Fax : 82-032-868-1716

E-mail : cdcho@dreamwiz.com

Myunggu Kim (金 命 九)

1966년 한국 인천에서 태여 나서 1995년에 학사와 석사 학위를 인하대학교에서 받았으며 2002년 인하대학교에서 박사과정에 입학하여 cantilever beam의 비선형 진동, 소음과 진동해석 등 분야의 연구에 주력하고 있음.

E-mail : mgkim21@hotmail.coom

Qiang Pan (潘 强)

1978년에 중국 Liaoning에서 태여 나서 2001년에 학사학위를 Beijing Univ. of Aeronautics & Astronautics에서 받았음. 2001년에 인하대학교 기계공학과 통합과정에 입학하여 고체역학, 유한요소해석, Smart material 연구를 하고 있음.

E-mail : raininwinds@yahoo.com.cn