

다자유도 구동 스피리컬 전동기의 성능 개선 모델에 관한 연구

강동우*, 고성철*, 이호준*, 박현중*, 원성홍**, 이주*
한양대학교*, 동양미래대학**

A study on performance improvement of Multi-degree of freedom spherical motor

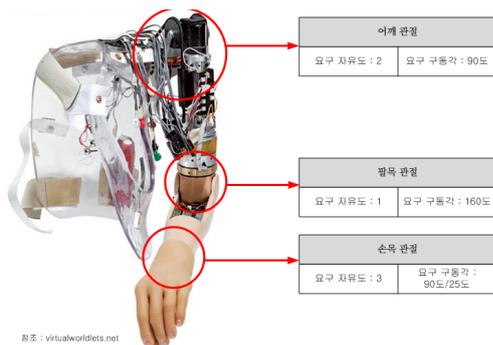
Dong-Woo Kang*, Sung-Chul Go*, Ho-Jun Lee*, Hyun-Jong Park*, Sung-Hong Won**, Ju Lee*
Hanyang University*, Dongyang Mirae University**

Abstract - The spherical motor is very valuable actuator, because the motor can operate as multi-degree of freedom rotation. Especially, the motor is useful machine for robot's joint by reason of high efficiency, compact size, high power, precise control, etc. These characteristics of spherical motor have to require continuously research. Therefore, in this paper, two different types of spherical motor are compared and double-airgap spherical motor as novel structure is introduced.

1. 서 론

스피리컬 전동기는 다자유도 구동이 가능한 전기기기로써 공극의 형태가 구형(Sphere shape)로 되어 있기 때문에 명칭된 명칭이다. 일반적인 회전형 전기기기는 축이 고정자와 외부의 하우징 케이스에 베어링을 통해 연결이 됨으로써 하나의 회전 방향만을 가지는 것이 특징이다. 하지만 스피리컬 전동기는 회전 방향이 하나 이상을 가지게 되므로써 기존의 다자유도 구동을 요구하는 시스템에 여러 모터를 하나의 스피리컬 모터로 대체할 수 있는 혁신적인 기술이다.

특히 그림 1과 같이 휴머노이드처럼 다자유도 구동의 복합체의 경우에는 더욱이 여러 모터와 기어 등을 사용함으로써 시스템의 효율을 저하시키고 시스템의 부피가 커지는 단점을 가지고 있다. 이러한 휴머노이드의 관절에 다자유도 구동이 가능한 스피리컬 전동기를 사용하도록 개발을 하고자 하는 것이 목표이며 여러 구조를 개발해 오면서 보다 효율이 높고 구조적으로 시스템 적용성이 높은 스피리컬 전동기를 개발해 나가고 있다. 따라서 본 논문에서는 그 동안 연구가 되었던 스피리컬 전동기의 구조에 대한 설명과 고효율을 보장하면서도 관절에 사용하기에 적합하도록 연구가 된 이중 공극형 스피리컬 전동기에 대한 연구 내용을 소개하고자 한다.



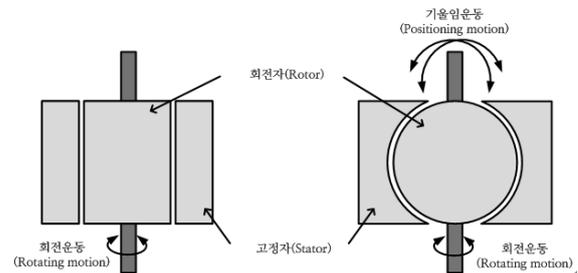
〈그림 1〉 휴머노이드의 다자유도 구동 요구 시스템

2. 본 론

2.1 스피리컬 전동기의 개발 배경

그림 1에서 보는 바와 같이 다자유도 구동이 요구되는 휴머노이드의 관절 부위중 팔의 관절을 예로 살펴보면 어깨의 경우에는 2개의 자유도가 요구되며 1개의 자유도 당 90도가 회전이 되어야 하며 팔목 관절의 경우 1개의 자유도가 요구되고 160도의 구동 범위를 가져야 하며 손목의 경우에는 3개의 자유도가 요구되고 두 방향으로의 회전 각도가 각각 90도와 25도를 회전할 수 있어야 인간의 관절과 근육 움직임을 묘사하는데 무리가 없다.[1]-[3] 이러한 다자유도 구동을 위해 기존 로봇 관절에서는 하나의 자유도를 가지는 전동기와 복합적인 운동이 가능하도록 특수한 기어를 조합하여 인간과 유사한 모션을 구현하기 위해 연구가

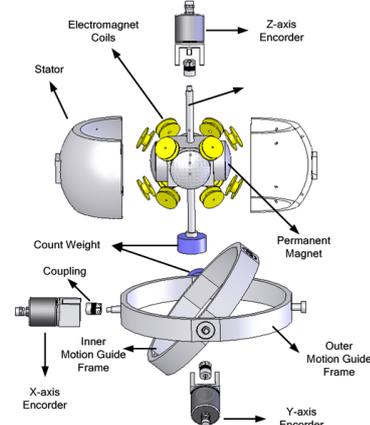
되어오고 있다. 이러한 관점에서 그림 2와 같이 1개 이상의 모터를 대체하여 다자유도 구동을 실현할 수 있는 전동기에 대한 관심이 생겨나고 오늘날 로봇관절용 스피리컬 전동기의 구조와 성능 연구가 활발히 진행 된 계기가 되었다고 볼 수 있다.



〈그림 2〉 다자유도 구동 스피리컬 전동기의 구조 및 특징

2.2 가이드프레임형 스피리컬 전동기와 기술적 한계

초기 연구가 되었던 다자유도 구동 스피리컬 전동기는 그림 3과 같은 구조로 설계가 되었다. 이 구조의 장점은 고정자와 회전자를 분리하면서도 다자유도 구동이 가능하도록 외부에 가이드 프레임링을 설치한 모델이다. 또한 다자유도의 구동에 대한 회전자의 위치 측정을 위해 각 축에 엔코더를 부착하여 임의의 각도로 회전을 하였을 때, 각 위치에서의 센싱된 각도를 피드백함으로써 위치 제어를 하게 된다.



〈그림 3〉 가이드프레임형 스피리컬 전동기의 구조

하지만 이와 같은 구조는 로봇의 관절에 적용하기에 외부의 가이드 프레임에 의한 구조적인 한계가 발생하며 전체 구동 반경을 고려해 보면 가이드 프레임링까지 포함을 해야 되기 때문에 초기 스피리컬 전동기가 나아가야 될 시스템 체적의 최소화 목적을 만족시킬 수 없다는 한계도 존재한다. 더군다나 다수의 모터가 발생하고 있는 출력은 1개의 스피리컬 전동기가 담당을 해야 되기 때문에 출력도 높여야 하고 이러한 출력에서의 손실을 최소화해야 하는 과제를 도출하였다.

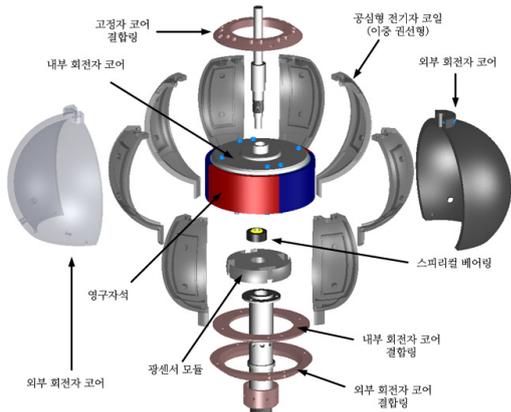
아쉽게도 구형으로 되어 있는 고정자의 철심 구조를 와전류에 의한 손실과 같이 철손을 저감하기 위해 일반적인 전동기에 적용되는 직중구조로 제작이 어려워 높은 속도를 낼 수 없을 뿐만 아니라 높은 와전류 손실로 인해 전체적인 출력이 저하되는 문제점도 발견을 하게 되었다. 이는 빠른 응답성을 위해 고속의 회전 속도를 가져야 하는데 와전류 브레이킹에 의해 속도의 한계를 가지게 되는 부가적인 문제점도 발생하였

다.

2.3 이중 공극형 스피리컬 전동기의 개발

가이드프레임형 스피리컬 전동기의 기술적 한계를 극복하기 위해서 2가지의 큰 테마로 연구를 진행하였다. 첫 번째 연구 테마는 보다 시스템 적용성이 높은 구조의 개발이다. 그림 4에서 보는 바와 같이 이중 공극형 스피리컬 전동기는 고정자의 코어가 권선만 감겨있는 공심형 타입으로 되어 있으며 이를 가운데로 두고 내부와 외부에 회전자를 이중으로 두어 실제 고정자와 회전자 사이에 공극이 두 개가 존재하게 되는 구조로 되어 있다.

특히 회전자의 축이 고정자와 분리되어 자유롭게 다자유도 구동이 가능해야 되기 때문에 전동기의 중심부에 스피리컬 베어링이라고 하는 부품을 사용하여 상단의 회전자 축과 하단의 고정자 축을 연결하고 두 축을 자유롭게 움직일 수 있도록 설계를 하였다. 이는 외부에 가이드 프레임이 존재하던 구조와는 다르게 외전형 타입으로 회전을 하게 되는 외부 회전자에 시스템을 연결할 수 있는 구조적인 개선이 된 모델이다.

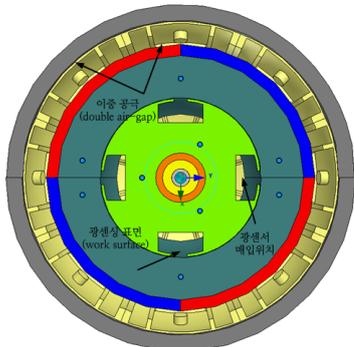


〈그림 4〉 이중 공극형 스피리컬 전동기의 구조

두 번째 연구 테마는 효율을 개선하고 출력을 상승하기 위한 연구이다. 이중 공극형으로 제작된 스피리컬 전동기는 고정자가 공심형으로 되어 있지만 외부에 또다른 회전자가 존재하기 때문에 자료가 확보가 되어 출력이 상승하게 되고 누설을 최소화하기 위해 공심형 코일 구조를 회전형 코일과 포지셔닝 제어용 코일을 이중으로 설계함으로써 출력 상승과 함께 유효 자속량이 증가하였다. 이러한 구조적인 개선 설계로 인하여 와전류 손실이 거의 존재하지 않아 시뮬레이션 결과로 출력 50.5%까지 상승시켰으며 최대 토크 0.9Nm까지 증가시켰다.

2.4 이중 공극형 스피리컬 전동기 주요 연구 과제

이렇게 설계된 연구를 수행함에 있어서 가장 주요하게 생각되는 연구 과제가 바로 회전자의 위치 센싱에 대한 연구가 될 것으로 판단된다. 기존의 가이드프레임형 스피리컬 전동기는 회전자의 위치 센싱을 위해 3축에 연결된 엔코더를 통해 정보를 받아들였지만 외전형으로 설계된 이중 공극형 스피리컬 전동기는 외부에 엔코더를 부착할 수 없는 구조로 되어 있기 때문에 새로운 개념의 위치 센싱 기법이 요구되었다.



〈그림 5〉 이중 공극형 스피리컬 전동기의 위치 센싱 기술

그림 5에서 보는 바와 같이 내부 회전자의 안쪽면을 구형으로 설계하고 이 면을 광센서를 이용하여 발생된 선형의 변위를 측정함으로써 이를 이용하여 가상의 3축에서 발생하는 각도로 변환하여 회전자의 위치를 측정할 수 있는 기술이다. 특히 회전자의 내부 표면이 기울어지기 때문에 이러한 상대적인 운동을 고려하여 복잡한 3자유도 구동각을 계산해내는 알고리즘 연구를 수행하였다.

$$\sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2} = l_{disp.} \quad (1)$$

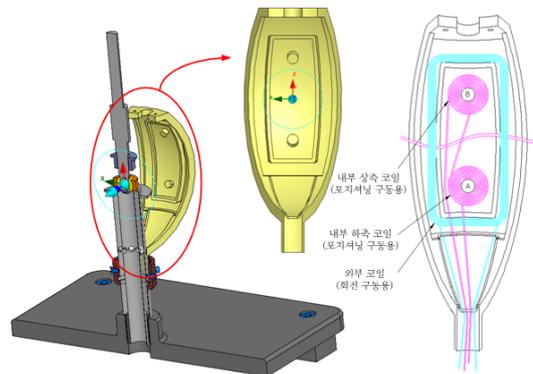
$$\phi = l_{disp.} / R_{ws} \quad (2)$$

$$\beta = \arctan^2(\Delta y_1 / \Delta y_2) \quad (3)$$

$$\delta = \arcsin(M(\delta) / l_{disp., \beta = 90^\circ}) \quad (4)$$

위의 (2)~(4)까지의 수식은 가상의 3축에서 발생하는 회전자의 움직임을 공간상에 표현한 회전각도이다. 여기서 Δx 와 Δy 는 광센서에 의해 측정된 선형의 미소변위 값을 나타내고 있으며 R_{ws} 는 센서 표면까지의 거리, $M(\delta)$ 는 δ 각 만큼 기울어졌을 때, 발생된 각각의 센서의 최대값을 나타내고 있다. 시뮬레이션의 결과로 최대 20도로 회전자가 기울어졌을 때, 오차범위 0.5도 수준으로 계산이 되었다. 향후 이러한 오차 범위 보정을 통하면 기존의 엔코더에 의한 각도 측정 방법을 대체할 수 있을 것으로 판단된다.

이와 함께 그 동안 연구가 되었던 스피리컬 전동기의 고정자 코일 구조가 독립적으로 상하 배치되어 회전자의 영구자석과 사이에서 발생하는 토크로 특정 위치로 포지셔닝을 하였다. 하지만 이렇게 포지셔닝을 하게 되면 회전 토크가 저감되는 문제가 발생을 하기 때문에 포지셔닝 구동시 토크를 저감시키지 않도록 하는 설계가 요구되었다. 이에 그림 6과 같이 외부의 전기자 코일로는 회전 구동을 담당하고 내부에 배치된 8자형의 전기자 코일로는 외부 배치된 전기자 코일에 의한 자기력을 상쇄 또는 증가 시킬 수 있도록 전류를 인가함으로써 회전자의 상하 포지셔닝 위치 제어를 하게 된다.



〈그림 6〉 이중 공극형 스피리컬 전동기에 적용된 이중 권선 코일 구조

3. 결 론

다자유도 구동이 가능한 스피리컬 전동기는 로봇관절에 적용이 되도록 계속적으로 연구가 되어오고 있다. 특히 구조적인 개선을 이중 공극형 스피리컬 전동기를 개발함으로써 보다 효과적으로 달성을 할 수 있었다. 특히 이러한 구조를 달성하기 위해서 필요한 센싱에 대한 기술과 코일 구조의 개선 등 많은 연구 성과를 이룰 수 있었고 향후 지속적인 연구 수행을 통해 실현성 높은 기술로 거듭날 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0060145).

[참 고 문 헌]

[1] Nobuo Sakai, Yoshinori Sawae, Teruo Murakami, "A Development of Joint Mechanism of Robot Arm Based on Human Shoulder Morphology".
 [2] Sathaporn Laksanacharoen, Sunton Wongsiri, "Design of apparatus to study human elbow joint motion".
 [3] Domenico Campolo, Dino Accoto, Fabrizio Taffoni and Eugenio Guglielmelli, "On the kinematics of human wrist during pointing tasks with application to motor rehabilitation", 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008.