

## 영구자석 커플링의 비틀림 강성에 의한 토크 특성

신현재\*, 최장영\*  
충남대학교 전기공학과\*

### Torsional Stiffness Effect of Applied Magnetic Coupling Systems

Hyeon-Jae Shin, Jang-Young Choi\*  
Dept. Electrical Engineering, Chungnam National University\*

**Abstract** - 전동기와 부하시스템은 직결, 혹은 커플링을 통하여 연결이 된다. 이때의 동력을 전달하는 커플링, 기어, 벨트 등의 특성에 따라 전달되는 토크의 특성이 달라진다. 본 논문에서는 동력 축과 부하 축을 기구적으로 분리 가능한 영구자석 커플링을 적용한 구동 전동기-부하 시스템에 축계 시스템 해석을 위하여 유한요소 해석을 통하여 비틀림 각도 변화에 따른 전달 토크를 얻고, 이를 활용하여 기구 해석 모델에 적용해 보고, 전동기-부하 시스템의 토크 변동 가능성에 대해 알아본다.

#### 1. 서 론

일반적인 전동기-부하 시스템은 직결을 통해 연결과 커플링을 통한 연결로 나눌 수 있으며, 직결을 통한 전동기-부하 시스템은 구조 역학적으로 좋은 특성을 가지고 있으나, 시스템을 새로 설계하거나, 부하를 교체할 때에 제조 방법에 대한 문제를 갖고 있다. 커플링을 사용한 시스템은 모든 시스템에 다양하게 적용이 가능하여 부하 교체 시에 재설계가 필요가 없으므로 다양한 산업 분야에서 사용된다. 기어, 벨트, 커플링과 샤프트가 동력 축과 부하 축을 연결해주는 역할을 한다.[1]

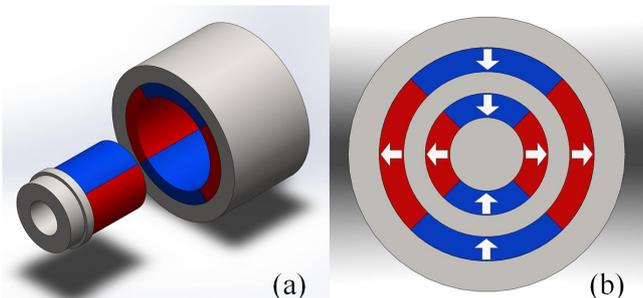
기존의 기어나 커플링의 경우 기계적 접촉을 통하여 동력을 전달하게 됨으로 윤활이 필요하며, 접촉으로 인한 소음과 분진 유지 보수가 필요하게 된다. 영구자석을 이용한 자기 커플링은 기계적인 접촉이 없으므로 앞서 언급한 문제점들이 해결되며, 구동축과 부하축이 격벽으로 분리 가능하여 클린룸, 압력 챔버, 수중 장비 등에 활용이 가능하다. 또한 기계적 커플링의 경우 과부하 상태에서 장시간 동작 시 파손될 가능성이 있으며, 파손 시에는 커플링 부품들이 떨어져 위험할 가능성이 있다. 그러나 영구자석 커플링의 경우 적절한 특성 설계를 통하여 과부하 발생 시 슬립이 발생하여 파손의 위험에서 자유롭다는 장점이 있다.

#### 2. 본 론

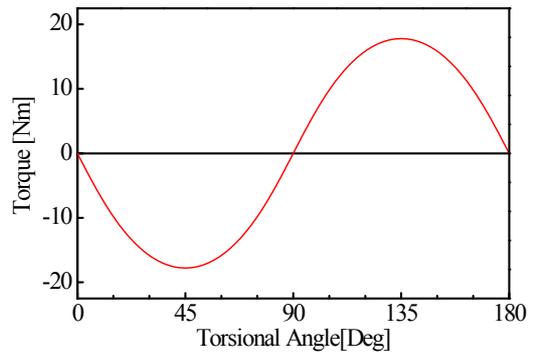
##### 2.1 영구자석 커플링의 구조

영구자석 커플링의 경우 구조에 따라 반경방향으로 착자된 원통형 영구자석을 사용한 원통형 타입과 축방 향으로 착자된 디스크형 영구자석을 사용한 디스크형 타입으로 구분이 가능하며 응용 분야에 따라 적절한 활용이 가능하다. 본 논문에서는 반경방향으로 교번 착자된 영구자석을 사용한 원통형 타입 영구자석 커플링을 기준으로 진행하였다.

그림 1 (a)는 원통형 영구자석 커플링의 구조를 보여주며, 내측과 외측으로 나누어 각각 동력 축과 부하 축에 설치하여 사용이 가능하다. 이때 내·외측 영구자석 사이 공극이 존재하며 이 부분에 격벽이 설치 가능하다. 그림 1 (b)는 영구자석의 착자 방향을 보여주며 내·외측 영구자석이 같은 방향으로 평행하게 착자되어 있다.



〈그림 1〉 (a) 원통형 영구자석 커플링의 대략적인 구조, (b) 내·외측 커플링 자석의 착자 방향



〈그림 2〉 동력 축과 부하 축 비틀림 각도 변화에 따른 영구자석 커플링의 전달 토크

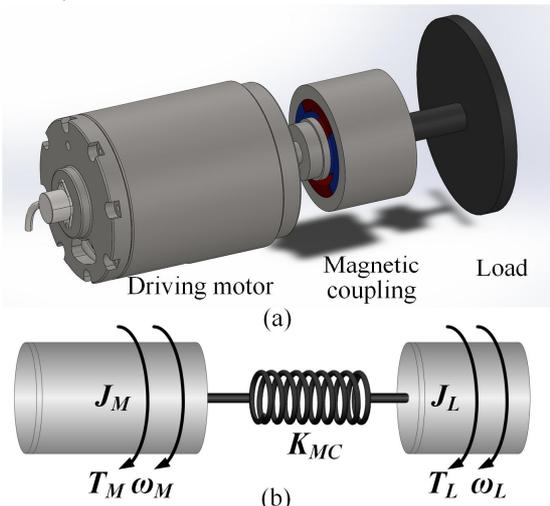
##### 2.2 영구자석 커플링의 토크 특성

영구자석 커플링의 외측을 고정 후 내측을 서서히 회전시키며 비틀림 각도 변화에 따른 전달 토크 변화는 그림 2와 같다. 내·외측 각각 4극의 영구자석을 가지므로 최대 전달 토크는 45°에서 나타난다.

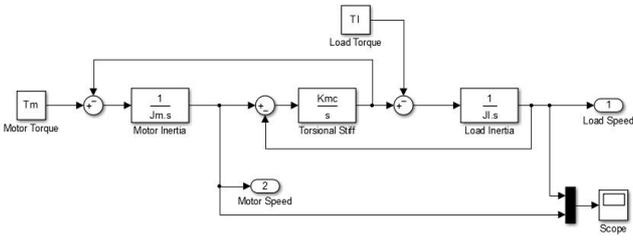
##### 2.3 영구자석 커플링으로 연결된 축계 구조 및 진동 해석

영구자석 커플링으로 연결된 전동기-부하 시스템을 단순화하면 그림 3 (a)와 같다. 동력을 발생시킬 수 있는 구동 전동기와 부하 축 사이에 영구자석 커플링이 있다. 이러한 축계 시스템의 기구적 해석을 위하여 댐핑을 무시한 두 부분의 회전 관성을 갖는 형태로 간략화 하면 그림 3 (b)와 같이 나타낼 수 있다[1].

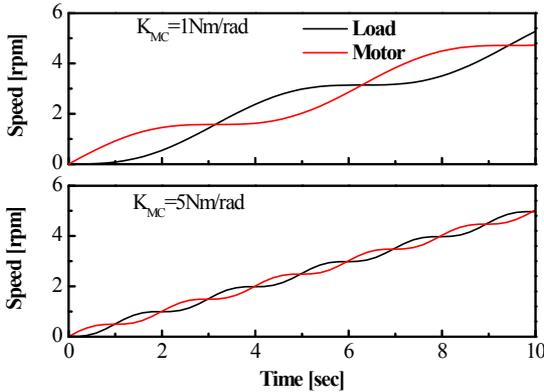
여기서  $J_M, J_L, T_M, T_L, K_{MC}, \omega_M, \omega_L$ 는 전동기의 회전관성, 부하의 회전관성, 전동기 발생 토크, 외란 토크, 영구자석 커플링의 비틀림 강성, 전동기 속도, 부하 속도를 나타낸다.



〈그림 3〉 (a) 동력축 전동기와 부하축이 영구자석 커플링을 이용하여 결합된 구조도, (b) 댐핑을 무시한 두 부분의 회전관성을 갖고 커플링으로 연결된 기구 해석 모델



〈그림 4〉 전동기-부하 회전 관성을 갖는 영구자석 커플링의 블록 선도



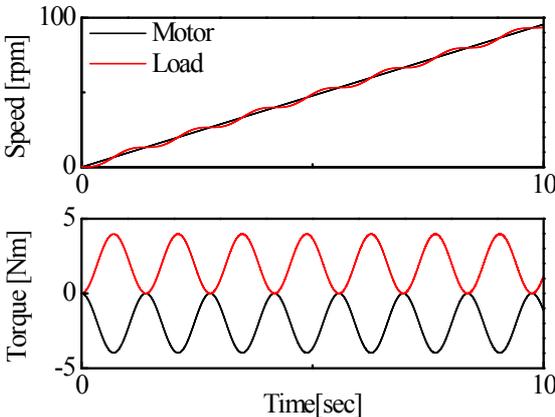
〈그림 5〉 전동기 관성과 부하 관성이 같을 때 블록 선도를 통한 커플링 비틀림 강성 변화에 따른 속도 응답

커플링의 비틀림 강성은 그림 2의 비틀림 각도 변화에 따른 영구자석 커플링의 전달 토크관계를 통하여 Nm/rad 값으로 나타 낼 수 있으며, 전동기 토크와 속도의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\omega_M}{T_M} = \frac{\frac{1}{J_M} \left( s^2 + \frac{1}{J_L} K_{MC} \right)}{s^3 + \frac{(J_M + J_L)}{J_M \cdot J_L} K_{MC} \cdot s} \quad (1)$$

식 (1)을 통하여 공진 주파수  $\omega_{re}$  는

$$\omega_{re} = \sqrt{K_{MC} \cdot \frac{(J_M + J_L)}{J_M \cdot J_L}} \quad (rad/s) \quad (2)$$



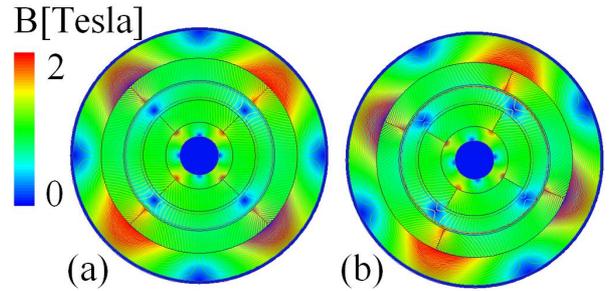
〈그림 6〉 전동기 속도가 0~100rpm으로 선형적으로 증가 시 영구자석 커플링으로 연결된 부하측 속도 응답 (a)시간에 따른 속도, (b)시간에 따른 토크 리플

그림 4는 영구자석 커플링으로 연결된 축계 시스템의 블록선도를 나타내며 전동기와 부하 회전관성이 같다고 가정했을 때 영구자석 커플링 비틀림 강성 변화에 따른 해석 결과는 그림 5에 비교하였다. 따라서 영

구자석 커플링의 비틀림 강성, 전동기·부하 관성에 따라서 공진이 발생 가능하다.

### 2.4 유한요소 해석을 통한 영구자석 커플링 축계 진동

영구자석 커플링은 일반적인 기계 커플링에 비하여 비틀림 강성 값이 작은 것이다. 이로 인해 공진 주파수가 낮은 구간에 위치하게 되며 이로 인해 비틀림 진동발생이 가능하다. 이러한 상황을 가정하여 2차원 유한요소 해석 프로그램 Ansys Maxwell을 이용하여 전동기와 연결된 동력축에는 시간에 따라 일정하게 증가하는 속도를 인가하고 부하 축에는 부하 관성 값  $2 [kg \cdot m^2]$ 로 설정하였다. 그림 6 (a)는 전동기의 속도가 0-100rpm으로 선형적으로 증가 시 부하 관성을 갖는 영구자석 커플링의 부하측 속도 응답을 그래프로 나타내었다. 부하측 속도 응답이 맥동하며 속도가 증가 하며, 이때의 토크는 그림 6 (b) 같이 최대 약 4[Nm] 값이 0.71[Hz]로 주기적으로 변하는 형태로 보여준다. 그림 5는 유한요소 해석을 통한 영구자석 커플링의 자계 분포도를 나타내며 전달 토크가 0[Nm] 인 0초와 최대 토크 4[Nm]인 0.7초 비틀림 각도 7.691°이다.



〈그림 7〉 2차원 유한요소 해석을 통한 영구자석 커플링의 자계 분포도 (a)시간 : 0초, 비틀림 각도 : 0°, (b) 시간 0.7초, 비틀림 각도 : 7.691°

### 3. 결 론

본 논문에서는 영구자석 커플링으로 연결된 축계시스템에서 발생 가능한 토크 맥동에 대하여 알아보고자 2차원 유한요소 해석을 통하여 영구자석 커플링의 비틀림 각도 변화에 따른 영구자석 커플링의 전달 토크를 구하여 이를 바탕으로 비틀림 강성과 관계를 알아보고 해당 시스템과 유사한 참고 문헌의 내용을 바탕으로 하여 댐핑을 무시한 두 부분의 회전관성을 갖는 기구 해석 모델을 적용하였다. 이러한 시스템은 영구자석 커플링의 비틀림 강성, 전동기·부하 관성에 따른 공진 주파수를 갖게 되며, 이를 고려한 유한요소 해석을 진행하였다. 구동 속도가 선형적으로 증가 할 때, 부하 축 속도가 맥동하면서 증가하는 모습을 확인할 수 있었고, 전달되는 토크도 맥동하는 결과를 확인하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2014R1A1A1A05002745)

### [참 고 문 헌]

- [1] Thierry Lubin, Smail Mezani, and Abderrezak Rezzoung, "Experimental and Theoretical Analyses of Axial Magnetic Coupling Under Steady-State and Transient Operations", IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 61, pp. 4356-4365, Aug. 2014.
- [2] Shiang Chih Fu, Stone Cheng, "Analysis and Suppression of Torsional Vibrations for the Permanent Magnet Synchronous Motor-Load System", Proceeding of the 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp. 3359-73, Oct. 2009.
- [3] Valenzuela, M.A., Bentley, J.M., Lorenz, R.D., "Evaluation of torsional oscillations in paper machine sections", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.41, no.2, pp.493-501, March/April 2005.