

# 마그네트 기반 감속기의 민감도 해석

정 광 석\*

한국교통대학교 기계공학과

## Sensitivity Analysis of the Speed Reducer using Magnetic Force

Kwang Suk Jung\*

Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, 50 Daehak-ro, Chungju, Chungbuk 380-702, Korea

(Received 2014. 10. 22 / Accepted 2014. 11. 18)

**Abstract** : Magnet gear transfers a high speed torque of the driving side to a low speed following side. Of course, the torque is amplified as much as a ratio between pole number of magnet gears constituting both sides through ferromagnet modulator. However, the parameters of the overall magnetic system influence the transmitting torque strongly. They include a pole number of permanent magnet, magnet thickness, reducing ratio, harmonic modulator thickness, and open ratio etc. In this paper, the influences of the parameters are analyzed using finite element method tool. By comparison, a desirable design specification is proposed, including a recommended modulator pattern.

**Key words** : Harmonic analysis, Magnet gear, Magnetic field, Parametric analysis, Sensitivity analysis, Speed reducer

### 1. 서 론

현재 산업현장에서 동력전달 시 가장 빈도 높게 사용되는 것은 물리적 접촉에 의한 동력전달이며, 감속장치(Speed reducer) 또는 기어 등에 의한 하드웨어적 접촉을 이용해 동력전달을 사용하고 있다. 그러나 치사이의 기계적 접촉으로 인한 마모와 진동으로 인하여 전달 부품의 수명이 제한되어왔다. 이를 대체하기 위한 방안으로 높은 잔류강도(Residual strength)를 갖는 희토류(Rare-earth) 계열의 영구자석(PM; Permanent magnet)을 이용한 동력 전달 방법이 다양한 토폴로지(Topology)를 기반으로 활발히 연구되고 있으며<sup>1-5)</sup> 일부 개념의 경우 상업화 수준에까지 도달한 것으로 보고되고 있다<sup>1)</sup>. 특히 PM을 이용한 동력전달 장치의 경우 비접촉이기 때문에 마찰이 없어 마모에 따른 소음, 진동이 발생되지 않으며 시스템의 수명이 길다. 또한 극지나 극한 환경에서 운영되고 있는 장비의 경우 오

작동 및 노후로 인하여 고장이 발생할 시 수리 및 교체가 힘들며 막대한 유지 비용이 발생하게 된다. 그러나 PM을 이용한 비접촉 동력전달 장치는 기계적인 접촉이 없기 때문에 접촉에 따라 파생되는 결함이나 고장이 원천적으로 없으며, 간헐적인 오작동 시 시스템 설계에 의하여 설정된 비접촉 동력전달 장치의 최대토크 이상의 부하는 구동축과 종속축 사이에서 슬립되어 버리기 때문에 이 부분에 유의하여 시스템의 안전 계수를 적용해 설계하면 시스템의 하드웨어적인 고장이 발생하지 않아 극지나 극한환경에 효과적으로 적용할 수 있다. 이로 인하여 유지 보수에 따른 막대한 비용의 소요 및 하드웨어적 제품손상과 사고를 막을 수 있어 경제적 손실을 상당히 줄일 수 있다.

기존 논문과 연구사례를 살펴보면 상기 PM을 이용한 감속 장치의 경우 PM 배열간의자기장 동기를 도모하는 고조파 모듈레이터의 경우 분리된 구조로 형상 유지 및 체결이 어려우며 시스템 조립 및 제작에 상당한 비용이 소모된다<sup>3)</sup>. 본 논문은 이러한 하드웨어적인

\*Corresponding author, E-mail: ksjung@ut.ac.kr.

시스템 셋업과 관련하여 하드웨어 구성에 따른 편의성을 대폭 향상시키면서 동시에 전달 토크 밀도 또한 감소되지 않도록 하는 새로운 방식의 모듈레이터 제시와 구성 요소의 설계 제변수 변화에 따른 시스템의 거동 특성에 대해 논의한다.

## 2. 비접촉 감속기의 원리

가장 경쟁력있는 PM 기반 감속기의 구동원리로 알려진 셔터기어 방식의 토폴러지의 기본 개념은 다음과 같다. 구동축과 종속축의 반경방향으로 S극과 N극이 교차로 배열되어 있으며, 구동축과 종속축 사이에 반경방향으로 일정한 공극을 사이에 두고 하드웨어적으로 일체형의 강자성체가 배치되어 있다. 구동축, 강자성체, 종속축 사이에는 각각 R축 방향으로 1mm의 공극을 두고 있으며, 구동축과 고조파 모듈레이터는 베어링에 의해 하드웨어상으로 서로 독립되어 움직이게 되어 있다. 종속축은 마그네틱 감속기의 외형 커버(일반적으로 자기 폐회로 구성을 위한 back-yoke)에 에폭시를 사용하여 영구 결합 되어 있다. 강자성체의 극수(Pole number)는 구동축과 종속축의 PM 극수의 합으로 이루어지며, 본 연구에서는 3극의 구동축, 25극의 강자성체, 22극의 종속축을 갖도록 하였으며 이를 기반으로 전산모의 시험을 실시하였다. 상기 구조의 사시도를 3D Tool로 설계하여 Fig. 1에 나타내었으며, Fig. 2는 마그네틱 기어의 구동축과 종속축의 축방향을 따라 절단된 면에서의 자기장 방향에 대하여 나타낸 것이다. 자기 모듈레이터는 특정한 주파수 성분

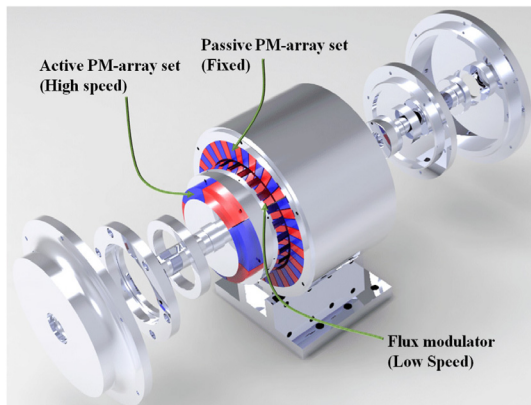


Fig. 1 Concept layout of the proposed magnet gear using the integrated harmonic modulator

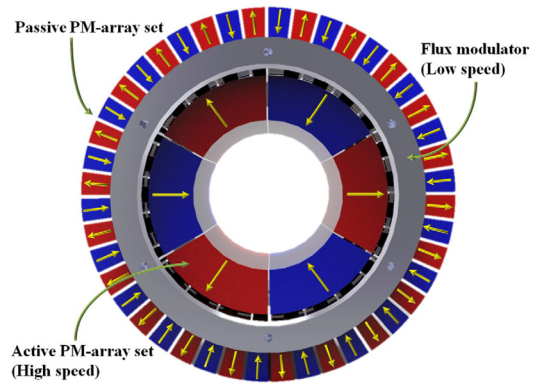


Fig. 2 Polar direction of the magnetic flux at the cross-section of the magnet gear

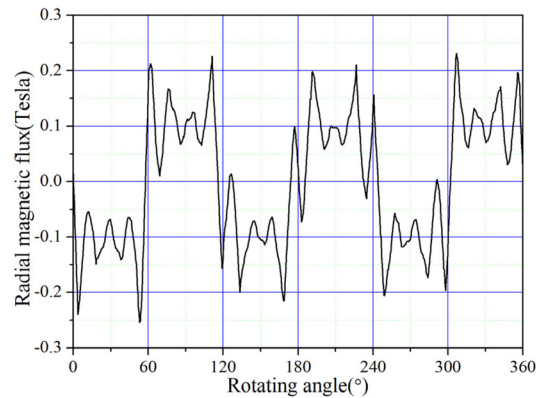


Fig. 3 Magnetic flux at the outer air-gap of modulator showing harmonic components besides pole of driving PMs

을 필터링하거나 통과시키는 전기필터와 등가의 역할을 하는 자기 필터라 할 수 있다. 자기 모듈레이터에 의한 비동기 고조파 자기 성분의 발생은 Fig. 3을 통해 구체적으로 확인할 수 있다. 본 논문의 시스템의 구동축인 PM 어레이 극수인 3극에서 발생한 자기장이 25극의 모듈레이터를 통과한 후 구동축에서의 필터링된 자기 성분은 Fig. 3와 같은 자기 분포를 갖는다. 즉, 구동축 극수인 3극 성분뿐만 아니라 25극에서 3극 성분을 뺀 22극 성분이 지배적인 고조파 극으로 형성됨을 알 수 있는데, 종속축의 PM 어레이 극수를 22극으로 설정해놓으면 결국 구동축이 회전함에 따라 종속축 역시 22극으로 동일하기 때문에 구동축과 동기되어 회전하게 된다. 종속축의 RPM은 구동축의 극수인 3극과 종속축의 극수인 22간의 비율이 적용되어 감속

회전하게 되며, 토크는 반대로 종속축의 극수인 22극을 구동축의 극수인 3극으로 나눈 비율이 적용되어 증폭되어 출력된다. 고조파 모듈레이터를 출력으로 설정시 같은 방향으로 회전하게 되며, 종속축 자석을 출력으로 설정시 반대 방향으로 회전하게 된다.

### 3. 제변수 변화에 따른 민감도 해석

최적설계를 위하여 전자기 상업용 톨인 Maxwell을 이용하여 전산모의실험을 수행하였다. 먼저 마그네틱 기어 외경의 두께는 120mm로 고정시켰으며, PM의 길이도 60mm로 고정하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시스템의 성능에 영향을 미치는 주요 요소로 사전 모의 실험을 통해 자석의 두께, 모듈레이터의 형상, 모듈레이터 두께, 모듈레이터의 공극 비율 등을 선정하였다. 시뮬레이션은 위에서 나열한 순서로 진행을 하였으며, 시뮬레이션을 진행한 후 극부 최적값으로 결정된 값을 다음 시뮬레이션의 기준 공칭값으로 설정하여 진행하였다. 이러한 과정을 통하여 시스템의 최종 설계값을 도출하였다. Fig. 3은 앞서 말한바와 같이 종속축 22극에 적용되는 모듈레이터를 통과한 구동축 3극의 하모닉 성분을 나타낸다. 또한 이와 마찬가지로 구동축 3극에 적용되는 모듈레이터를 통과한 종속축 22극의 하모닉 성분을 구한 후 두 값을 계산하여 제변수 변화에 따라 종속축과 동력축에 적용되는 하모닉 성분을 도출하였다.

#### 3.1 자석 두께에 따른 변화

마그네틱 기어의 영구자석(PM)의 반경축 두께에 따른 변화를 전산모의 실험하였으며, 구동축과 종속축의 영구자석(PM) 두께를 동시에 변화시켜가며 실험을 진행하였다. 하모닉 즉 고조파 성분이 제일 커지는 자석의 반경축 두께는 자석의 외경이 중요한 요소로 작용하게 되지만 초기 설계 시 외경의 크기를 100mm로 고정하였기 때문에 시뮬레이션도 이를 적용하여 진행하였다. 시뮬레이션 결과를 그래프로 나타낸 Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 전산모의실험의 결과를 통하여 외경이 100mm일 경우 반경축에 대한 영구자석의 두께가 12mm일 경우 22극의 자기 강도가 제일 커짐을 알 수 있으며, 상기 두께를 전후로 해서는 22극 성분이 오히려 감소함을 알 수 있다. 이를 통하여 자석의 두께를 12mm 이상으로 설정하는 것은 비효율

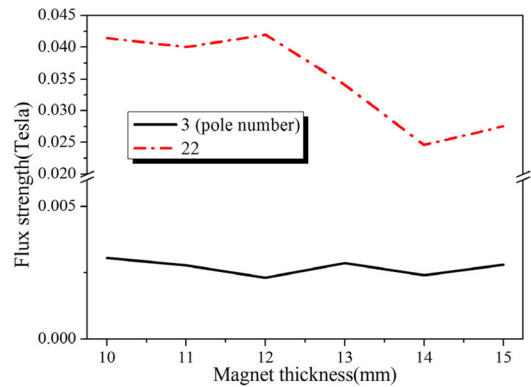


Fig. 4 Harmonic components of magnetic field at each air-gap according to a magnet thickness

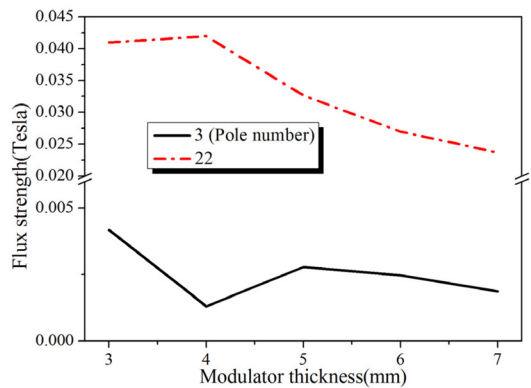


Fig. 5 Harmonic components of magnetic field at each air-gap according to a modulator thickness

적이라는 것을 알 수 있으며 자석 두께는 12mm로 고정하여 이후 전산모의실험을 실행하였다.

#### 3.2 모듈레이터의 두께에 따른 변화

구동축 PM의 반경 방향 두께를 12mm로 고정된 후 고조파 모듈레이터의 두께를 변화시켜가며 시뮬레이션을 진행하였다. 모듈레이터의 두께는 3~7mm의 범위에서 가변 시켜가며 실시하였다. 자석과 모듈레이터 사이에 기계적인 isolation을 위한 최소한의 1mm 공극이 존재해야 하므로 모듈레이터의 외경은 74mm로 고정시킨 상태에서 내경을 변화시켜가며 시뮬레이션을 진행하였다. 모듈레이터의 내경이 변화함에 따라 종속축 자석 외경 또한 동시에 변화시켜가며 설계 조건을 구성하였다. 모의실험 수행 결과 모듈레이터의 두께가 4mm일 경우 종속축에 작용하는 고조파 하모

닉 성분이 제일 크며, 종속축에 부하로 작용될 하모닉 성분 즉, 구동축의 일차 고조파 성분은 적어지는 것을 Fig. 5를 통해서 확인할 수 있다. 따라서 모듈레이터의 두께는 4mm로 고정하였으며 이후 전상모의실험을 시행하였다.

### 3.3 모듈레이터의 개방비(Open-ratio)에 따른 변화

모듈레이터의 공극비율에 따른 전상모의실험을 실시하였다. 모듈레이터는 ANSI 1010계열의 포화이력을 갖는 전기철로 설정하였으며 구동축과의 자기 결합을 위해 25pair-pole로 구성되어 있으며 따라서 1pair-pole이 점유하는 각도는 14.4°이다. Fig. 6에 X축에 표기되어있는 비율은 상기 전기철이 모듈레이터 1pair-pole당 반경방향으로 점유한 비율을 타나내며 개방비(open-ratio)가 0.5면 단위 전기철이 점유하는 각도가 7.2도가 된다. open-ratio는 0.3에서 0.8까지 변화시켜가며 시뮬레이션을 진행하였으며, Fig. 6에서 볼 수 있듯이 open-ratio가 0.5가 될 시 종속축에 출력으로 적용되는 하모닉 성분이 제일 큰 것을 알 수 있으며, 구동축에 부하로 작용하는 하모닉성분도 작다는 것을 알 수 있다, 따라서 모듈레이터의 open-ratio는 0.5로 적용하여 추후 시뮬레이션을 진행하였다.

### 3.4 모듈레이터의 전·후단 링의 여부에 따른 하모닉 성분의 변화

모듈레이터가 각각 분리되어 있는 초기 설계모델 (Type 1)과 모듈레이터의 양 끝단을 링형으로 하여 일체형으로 설계한 모델(Type 2)을 Fig. 7에 나타내었다.

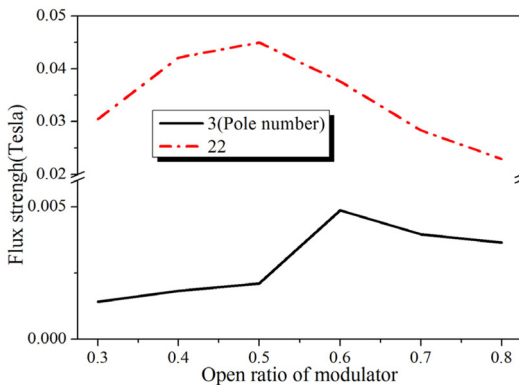


Fig. 6 Harmonic components of magnetic field at each air-gap according to an open ratio of modulator

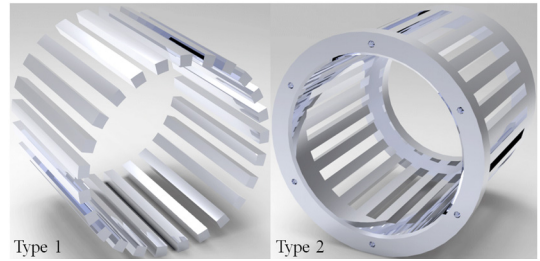


Fig. 7 Two types of harmonic modulators compared in the simulation

모듈레이터를 분할형으로 제작할 시 이를 고정시킬 추가 하드웨어 고정 장치가 필요하고 시스템의 고정도(high accuracy) 체결 역시 많은 어려움이 따르며, 이로 인하여 제작시 많은 비용이 발생하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Fig. 7의 Type2와 같이 모듈레이터의 전·후단을 링모양으로 설계하여 하드웨어적 강성(Axial & torsional stiffness)의 강화와 체결의 편의성을 향상시켰다. 이러한 변화를 반영한 모듈레이터 모델에 대해 구동축과 종속축에 작용하는 하모닉 성분에 대하여 전상모의실험을 실시하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 8에 나타내었는데 분리형 모델의 종속축과 결합하는 고조파 하모닉 성분이 크다. 그러나 Fig. 8에서 구동축에 부하로 작용하는 하모닉 성분 또한 커져지는 것을 볼 수 있는데 이러한 결과를 통해 모터 구동축에 작용하는 부하 역시 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 반대로 일체형 타입의 모델의 경우 비록 출력축에 작용하는 하모닉 성분은 분리형보다 작지만 구동축에 작용하는 하모닉 성분은 분리형에 비해 현저히 작은 것을 볼 수 있다. 결론적으로 하드웨어

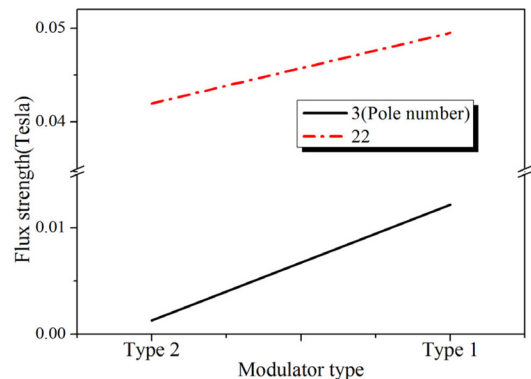


Fig. 8 Harmonic components of magnetic field at each air-gap according to modulator structures

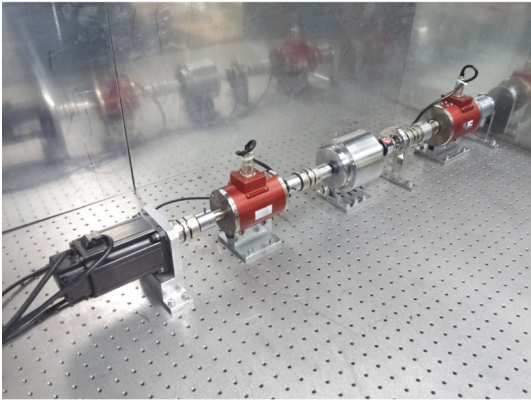


Fig. 9 Hardware setup of magnet gear with the derived design specification

어적 강성의 강화와 체결의 간략화의 장점을 가지며 구동축의 출력은 거의 차이가 없고 동력축에 부하는 적다는 장점을 갖는 Type 2가 고조파 모듈레이터로 적합한 것을 알 수 있다.

도출된 설계 변수의 전역 최적화 여부는 다대한 후속 모의 시험을 통해 검증되어야 할 것으로 판단된다. 또한 상대적으로 박형화된 고조파 모듈레이터의 마그네트 흡인력과 고속 회전에 따른 구조적 안정성 여부에 대한 해석이 추가되어야 한다.

#### 4. 결론

마그네틱 기어의 설계 변수 변화에 따른 민감도 해석을 전산모의실험(maxwell)을 통하여 수행하였으며 해석 결과 자석의 두께와, 모듈레이터의 두께, 모듈레이터의 개방비(open-ratio)의 국부 최적값을 구할 수 있었다. 또한 일체형 모듈레이터와 분리형 모듈레이터에 대하여 마찬가지로 고조파 하모닉 성분의 비교를 통해 민감도 해석을 실시하였는데 해석 결과 분리형 모듈레이터의 경우에는 출력에 해당하는 구동축에 작용하는 하모닉 성분이 일체형 모듈레이터보다 크지만

모터에 작용하는 부하가 크고 하드웨어적 강성이 아주 약하며 체결의 문제점이 있는 것을 알 수 있었다. 반대로 일체형 강자성체는 출력에 해당하는 구동축에 작용하는 하모닉 성분을 조금 적지만 모터에 작용하는 부하는 분리형에 비해 작으며, 하드웨어적 강성을 확보할 수 있고, 체결의 간편함이라는 강점 또한 가지고 있어 일체형 강자성체가 많은 강점을 자지고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 해석 결과를 기반으로 Fig. 9에 나타낸 것과 같은 마그네트 기반의 감속 시스템을 제작하였으며, 추후 동적부하 가변 시스템을 통해 동적 부하에 따른 동력 전달의 효율성 및 구동축 제어기의 강건성 등의 시험을 수행할 예정이다.

#### Acknowledgement

이 논문은 2014년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

#### References

- 1) K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear", IEE Proc. Elect. Power Appl. 151 (2), p.135~143, 2004.
- 2) K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear", IEEE Trans. Magnetics 37 (4), p.2844~2846, 2001.
- 3) M. S. Kim and K. S. Jung, "Magnet Gear with Two-Axial Magnetic Paths", Journal of the Korean Society for Precision Engineering 31 (6), p.543~550, 2014.
- 4) D. E. Hesmondhalgh and D. Tipping, "A multi element magnetic gear", IEE Proc. Elect. Power Appl. 127, p. 129~138, 1980.
- 5) K. Ikuta, S. Makita, and S. Arimoto, "Non-contact magnetic gear for transmission mechanism", Proc. IEEE Conf. on Micro electro mechanical systems, MEMS'91, Nara, Japan, p.125~130, 1991.