

일체형 고조파 조절기를 갖는 마그네트 기어 감속기의 특성 연구

이상준^a, 정광석^{b*}

Characteristic Study of a Magnet Gear Speed Reducer with a Unified Harmonic Modulator

Sang Jun Lee^a, Kwang Suk Jung^{b*}^a Graduate School of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, 50, Daehak-ro, Chungju, Chungbuk-do, 380-702, Korea^b Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation, 50, Daehak-ro, Chungju, Chungbuk-do, 380-702, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	27	January	2015
Revised	6	April	2015
Accepted	14	April	2015

Keywords:

Harmonic modulator
Harmonic analysis
Magnet gear
Noncontact torque transmission
Sensitivity analysis
Speed reducer

ABSTRACT

Using a magnetic gear, the speed and torque of the driving axis can be decreased and increased, respectively, similar to a mechanical speed reducer. In particular, because the driving side can be isolated mechanically from the load side, the magnetic gear was developed for application with environmental constraints. Of the existing topologies used for the magnet gear, the filtering method of a specified magnetic component is the most competitive. In this paper, a novel unified harmonic modulator is applied to filter the specified component. The torque conversion method using this modulator is described in detail, and the key factors of the modulator are derived from the influence on the resulting torque. The experimental setup was constructed and its torque transmission efficiency measured for varying loads. The transient characteristic from an excessive load is compared with the theoretical simulation.

1. 서론

동력을 가감속하여 접촉없이 전달할 수 있는 방법은 구동축과 종속축을 기계적으로 분리해야하는 유해한 환경에 효과적으로 적용될 수 있다. 또한 기어로 대변되는 기존 동력 전달 장치의 마모 등에 기인하는 문제를 근본적으로 배제할 수 있으므로 연안 풍력 발전에서와 같이 상시 유지보수가 곤란하거나 일시적인 셧다운(shut-down)으로 다대한 비용이 소요되는 곳에도 이용될 수 있다^[1,2]. 이중 자기력을 이용한 비접촉 동력 전달 방법은 마그네트 기어(magnet gear)로 통칭되는데 약 100여년동안 다양한 토폴로지

(topology)가 제안되어왔으나 실제 고밀도의 토크 전달 능력을 갖는 기계식 기어를 대체할 수 있는 가능성이 제기된 것은 높은 잔류 자기 강도(residual magnetic strength)를 갖는 희토류 계열의 영구자석(PM: permanent magnet)이 개발된 1990년 중, 후반에 들어와서이다^[3-5].

마그네트 기어는 기계식 기어의 치(tooth) 재질을 단순히 PM 재질로 변화시켜 PM간의 인, 척력을 이용하는 방식이 있고^[6,7] 다상 전원 코일의 이동 자장에 PM 배열을 교차하여 동기시키는 버니어머신(vernier machine) 방식이 있으며^[8,9] PM 배열의 특정 극 성분만을 추출하여 또 다른 PM 배열과 동기시키는 셔터(shutter) 방

* Corresponding author. Tel.: +82-43-841-5135

Fax: +82-43-841-5120

E-mail address: ksjung@ut.ac.kr (Kwang Suk Jung).

식이 있다^[10-12]. 이중 첫 번째 방식은 PM간의 상호 작용 영역이 치 하나에 불과하여 가감속없이 저토크로 동력을 전달하는 반도체 공정 라인 등에 이용되며 두 번째 방식은 감속 기능을 내재한 모터의 통합 구동 원리로 개발이 이뤄지고 있다.

본 논문에서는 토크 집적 밀도 측면에서 가장 우수한 것으로 사료되는 세 번째로 언급한 셔터 방식 마그네트 기어에 관한 것으로 기존의 분리되어 있는 고조파 조절기(harmonic modulator) 대신 사다리꼴 단면을 갖는 단위 치형을 일체화하여 구현한 새로운 방식의 고조파 조절기를 제안하고 이의 타당성을 실제 제작된 시스템을 통해 논의한다. 간략화한 이론 모델에 근거하여 고조파 조절기의 작동 원리가 묘사되고 조절기의 제변수 변화에 따른 토크 전달 밀도도의 민감도가 분석된다. 시스템의 가감속 기능을 포함한 토크 전달 효율이 다양한 가변 부하에 대해 실험적으로 측정되며 비접촉 공극 강성으로 인한 과부하에 따른 슬립 현상이 이론적으로 유도된 지배 방정식을 통한 시뮬레이션과 실험을 통해 묘사된다.

2. 셔터방식 마그네트 기어 작동 원리

기존 기계식 기어의 치 구조가 아닌 원주 전 영역에 걸쳐 자기 상호 작용을 하는 즉, 모든 자기 요소가 토크 생성에 관여하는 셔터 방식 마그네트 기어는 전달 토크 측면에서 우수한 특성을 갖는다. 본 장에서는 제안된 마그네트 기어의 작동 원리를 간략한 수식과 고조파 분석을 통해 묘사한다^[10,12].

논의되는 마그네트 기어는 Fig. 1에 도시한 바와 같이 내측에 반경 방향으로 원주를 따라 교번 자화된 PM 배열이 있고 이의 반경 방향 자기장의 특정 성분을 필터링하는 일체형 고조파 배열이 있고 그 외곽에 또 다른 PM 배열이 놓여 있는 구조를 갖는다. 내측

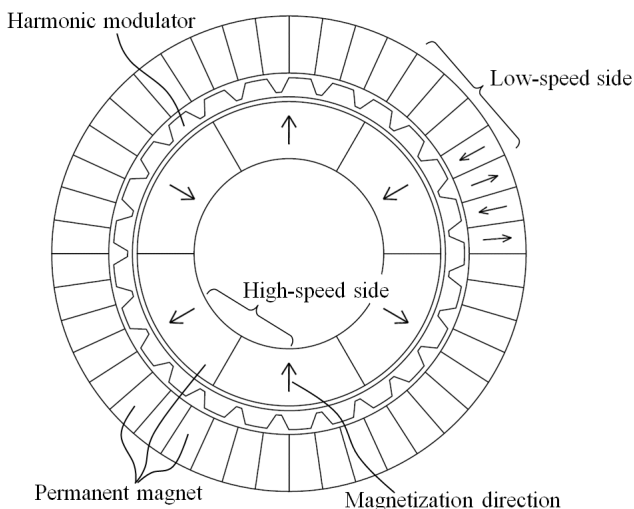


Fig. 1 Cross section diagram of magnet shutter gear adopting a unified harmonic modulator

PM 배열의 주극(main pole) 성분을 q_M 이라 할 때 ω_M 의 속도로 회전하는 내측 PM의 외측 면에서의 임의의 회전각 θ 에서의 반경 방향 자기장은 다음 식과 같이 간략화하여 표현할 수 있다.

$$B_R(\theta) = B_M \sin(q_M \theta - q_M \omega_M t) \quad (1)$$

위 식에서 B_M 은 PM의 외측 면에서의 자화 강도를 나타낸다. 이 자기장이 강자성 재료의 일체형 조절기를 통과하면 자기장 성분이 필터링되고 왜곡되는데 만약 그림에서 조절기의 극수(pole number)가 q_h 라 할 때 조절기 외측 공극(air-gap) 원주 선상에서의 자기장 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_H(\theta) = B_M \sin(q_M \theta - q_M \omega_M t) \times [\rho_0 + \rho_m \sin(q_h \theta)] \quad (2)$$

여기에서 ρ_0, ρ_m 은 내측 영구자석을 기준으로 한 조절기 중심선의 기하학적 윗셋량과 진폭 크기를 각각 나타내는 값이다. 위 식을 전개하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$B_H(\theta) = \rho_0 B_M \sin(q_M \theta - q_M \omega_M t) + \frac{\rho_m B_M}{2} \times [\cos((q_h - q_M)\theta + q_M \omega_M t) - \cos((q_h + q_M)\theta - q_M \omega_M t)] \quad (3)$$

식 (3)의 우측 항에는 기존 내측 PM set의 주극 성분인 q_M 외에도 $(q_h - q_M)$ 과 $(q_h + q_M)$ 의 성분이 생성된 것을 알 수 있다. 따라서 외측 PM set의 극 수를 $(q_h - q_M)$ 이나 $(q_h + q_M)$ 으로 설정하면 외측 PM set은 내측 PM set과 동기되어 회전한다. 이때 외측 PM set의 극수는 내측 PM set 주극의 고조파 성분이므로 서로 1주기의 크기가 다르고 그 회전 비율은 $q_M/(q_h - q_M)$ 나 혹은 $q_M/(q_h + q_M)$ 가 된다. 이러한 방식으로 극수 비만큼 고속 구동측인 내측 PM set의 토크는 기계적인 접촉없이 저속측인 외측 PM set에 확대되어 전달된다.

Fig. 1에 제시된 단면도는 후술하는 실제 제작된 시스템을 축소 반영한 그림이며 실 시스템의 제원을 이용하여 상기 마그네트 기어의 자기 현상을 상용 툴인 Maxwell ver 11.0을 이용하여 분석하였다. 고속측인 내측 PM은 그림에서와 같이 3극이고 내, 외경, 높이가 각각 20 mm, 32 mm, 60 mm이며 저속측인 외측 PM은 22극이고 내, 외경, 높이가 38 mm, 50 mm, 60 mm이다. 내, 외측 PM의 재료는 모두 NdFeB (N35)이다. 전기철 재료의 고조파 조절기는 25극이며 내, 외측 PM set과의 공극은 모두 1 mm이다. 본 논문에서 기술된 시뮬레이션 결과는 모두 위 제원을 기초로 수행된 결과이다. 우선, 내측 PM set에 의한 자기장이 Fig. 1에 묘사된 일체형 고조파 조절기를 통과하기 전과 통과한 후 조절기 내측면과 외측면에서의 반경방향 자기장 분포는 각각 Fig. 2, Fig. 3과 같다. PM 외측 원주에서의 자기장 분포는 Fig. 2에서와 같이 양쪽 에지 부분을 제외하면 PM의 기하학적 형상과 거의 동일한 것을 알 수

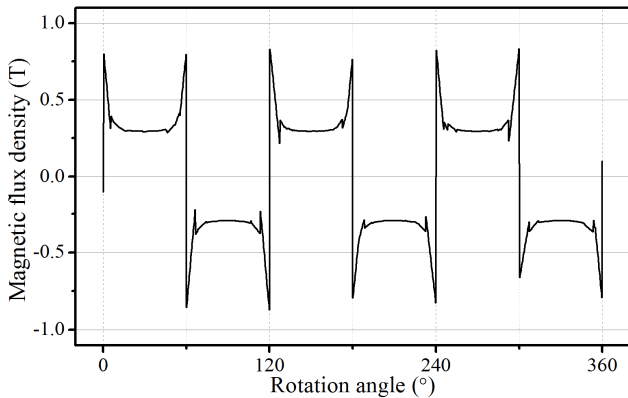


Fig. 2 Radial magnetic flux distribution at upper-side of the inner PM set

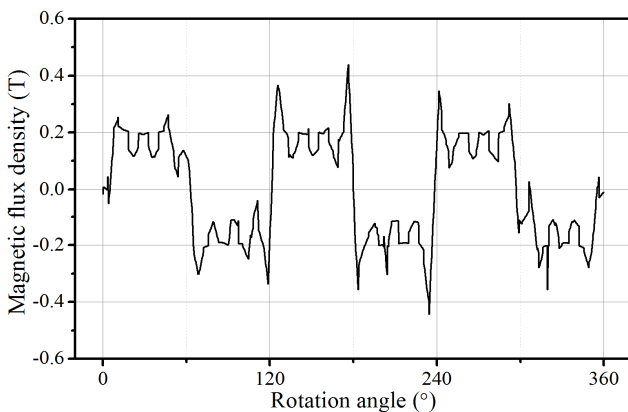


Fig. 3 Radial magnetic flux distribution at outer air-gap of the harmonic modulator by the inner PM set

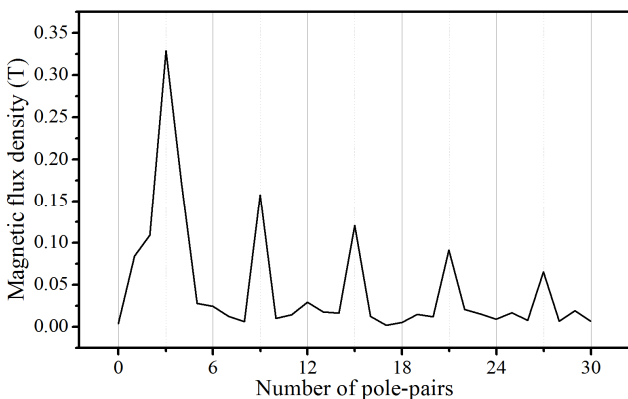


Fig. 4 Harmonic analysis result of the radial magnetic flux by inner PM set shown in Fig. 2

있으나 조절기를 통과한 자기장의 경우 직관적으로 내측 PM set의 주극인 3극 성분이 상당히 왜곡된 것을 알 수 있다. Fig. 2와 Fig. 3의 자기장 성분에 대해 고조파 분석을 해보면 Fig. 4, Fig. 5와 같다. 우선 Fig. 4의 경우 내측 PM set의 주성분인 3극이 지배적으로 나타나지만 주극의 고조파 성분인 9극, 15극, 21극 등이 강도는 저하되지만 순차적으로 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 5의 경우

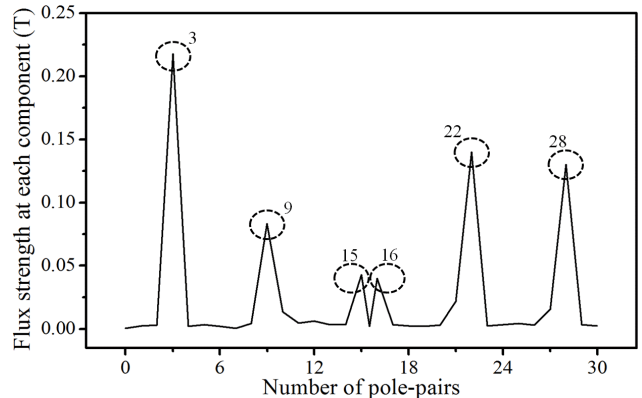


Fig. 5 Harmonic analysis result of the radial magnetic flux at outer air-gap of modulator shown in Fig. 3

내측이 3극이고 조절기가 25극이므로 (3)을 통해 유추하면 3극, 25극, 28극만이 나타나야 하지만 Fig. 4에서와 마찬가지로 (3)은 주극 성분을 고려하여 유도한 결과이고 실제로는 부채꼴 형상의 PM으로 인해 다양한 고조파 성분이 제거되지 않고 발생한다. 즉, 3극의 고조파 성분인 9극, 15극이 발생하고 9극과 25극 조절기간의 차인 16극 성분 역시 의미있는 수치로 나타난 것을 알 수 있다. 그러나 (3)에 예시한 바와 같이 22극, 28극이 가장 지배적인 인자이므로 외측 PM set은 22극으로 설정하였으며 따라서 외측은 22/3의 비만큼 감속된다.

3. 조절기의 기하학적 형상의 영향 분석

내측 PM set에 의해 발생하는 자기장 성분은 조절기에 의해 필터링 되어 외측 PM set과 자기 결합되는데 이 때 외측 PM set에 전달되는 토크는 Fig. 1의 경우 내측 성분 중 22극이 외측 PM set의 주극인 22극에 전달하는 토크이다. 따라서 외측 토크의 크기에 영향을 주는 성분은 내측 PM의 22극 성분이고 결국 조절기를 통해 필터링된 성분이므로 이러한 성분에 영향을 미치는 인자로 Fig. 6과 같은 조절기의 기하학적 형상의 영향을 분석하여 본 장에 기술한다.

조절기의 형상을 결정짓는 인자로 반경 두께 t_1 , 위아래 너비 t_2 , t_3 그리고 하단 두께 t_4 를 들 수 있는데 t_1 에 따른 조절기 외측단에서의 22극 성분을 정규화하여 Fig. 5에 나타내었다. 전술한 바와 같이 외측단 토크의 크기는 내측 PM에 의한 22극 성분과 외측 PM 22극 성분간의 외적에 의해 발생하므로 해당 성분만을 이용하여 고조파 분석한 후에 그 결과를 그림에 도시하였다. 반경 두께가 커질수록 3극 대비 22극 고조파 성분이 Fig. 5에서보다 더욱 상승하는데 두께가 과다하게 커지면 자기 플럭스의 절대 값 자체가 작아져서 22극 성분도 다시 감소하게 된다. Fig. 7에서 최적 값으로 표현된 4 mm는 Fig. 1에 제시된 기준 제원하에서 조절기의 내측

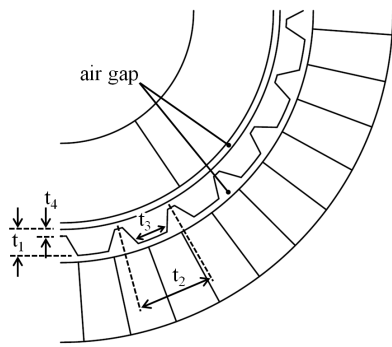


Fig. 6 Geometric factors affecting the magnetic flux filtered through the harmonic modulator

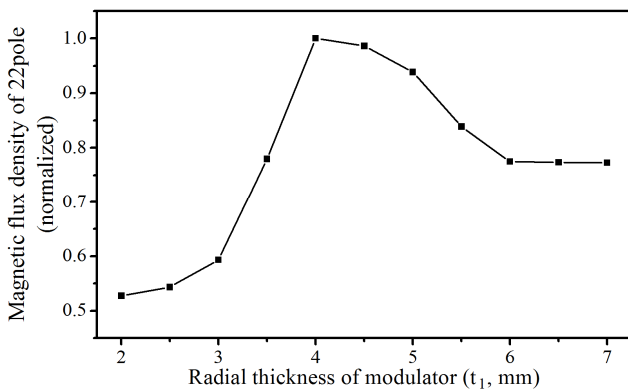


Fig. 7 Variation of 22pole magnetic flux according to the radial thickness of modulator

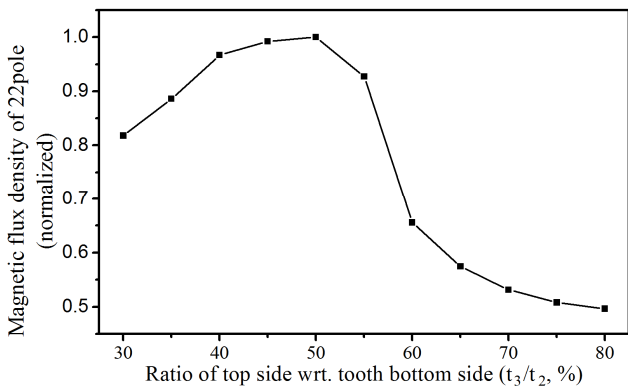


Fig. 8 Variation of 22pole magnetic flux according to the open ratio of modulator

반경을 33 mm로 설정했을 때의 값을 나타낸다.

Fig. 8은 조절기 사다리꼴 치의 위아래 너비 간의 비 t_3/t_2 에 따른 22극 성분을 나타내는데 상당 너비는 극단적인 경우에는 너비 비가 50%인 경우보다 22극 성분이 감소하는 것을 알 수 있다. 비가 작은 경우에는 3극 대비 필터링 되는 값이 작아지고 비가 큰 경우에는 전체적인 자기 플럭스 값이 작아짐에 따른 결과이다. 50%의 비는 전역 최적 비를 의미하는 것은 아니고 초기 설정된 제원에 대해서만 제한적으로 적용되는 값이다.

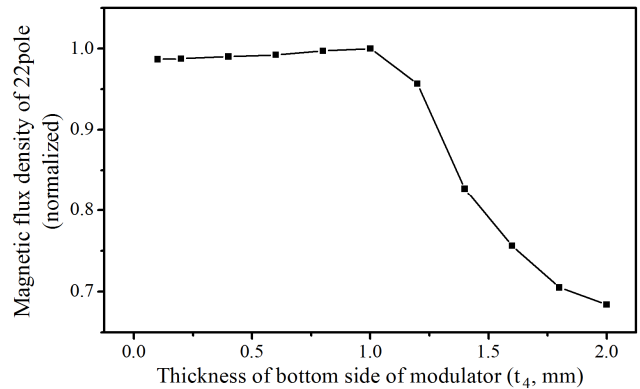


Fig. 9 Variation of magnetic flux according to the bottom thickness of modulator

다음으로 조절기 아랫단 두께 t_4 에 대한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 기존 마그네트 기어에서와 달리 기준 치가 서로 결합되어 일체형을 이루고 있으므로 내측 PM set에 의한 자기 플럭스가 조절기 내부로만 자기회로를 형성하기 때문에 자기포화에 의한 영향이 클 수 있지만 두께가 작을 때에는 누설량(leakage flux)이 상대적으로 많아져 그림에서와 같이 일정 값 이내에서는 그러한 영향을 무시할 수 있음을 알 수 있다. 물론 t_4 의 값이 너무 작으면 강한 토크에 의해 하단에서 비틀림 응력이 커질 수 있지만 생성되는 토크 인가 범위에서의 비틀림 양은 거의 무시할 수 있는 수준이다. 상기 분석 결과를 참고하여 t_1 은 4 mm로 t_3/t_2 는 50%로 t_4 는 1 mm로 설정하여 시스템 제작에 반영하였다.

4. 마그네트 기어 감속 시스템 특성 고찰

일체형 고조파 조절기를 갖는 마그네트 기어 기반 감속 메커니즘의 특성 분석을 위해 Fig. 10과 같은 시스템을 구축하였다. 마그네트 기어의 고속측은 서보모터에 의해 구동되며 저속측 부하의 가변을 위해 와전류 피드백 구조의 파워더 브레이크를 설치하였다. 고속측 비틀림 토크와 저속 부하측 비틀림 토크를 측정하기 위해 토크 센서가 중간에 삽입되어있으며 저속측 속도 측정을 위해 엔코더가 부하측과 일체형으로 구성되어있다. 저속측 부하를 가변시켜가며 토크의 전달효율을 측정하여 Fig. 11에 나타내었다. 일정 부하 이상이 되면 전달효율이 90% 이상에 달하는 것을 확인할 수 있다. 약 40 Nm 이상의 부하 인가시 고속측은 슬립이 발생하며 따라서 슬립 발생 토크는 시스템의 최대 전달 토크에 해당되는 값이다.

4.1 지배 방정식의 유도

Fig. 10에 묘사된 제변수를 이용하여 마그네트 기어의 거동 특성을 분석하기 위해 우선 고속측과 저속측간의 지배 방정식을 유도하였다. 고속측, 저속측 회전관성모멘트를 각각 J_M, J_L 이라 할 때 고

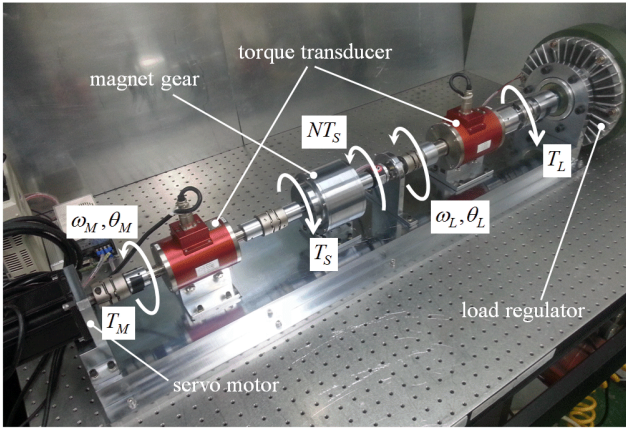


Fig. 10 Photograph of the constructed magnet gear including the parameter description

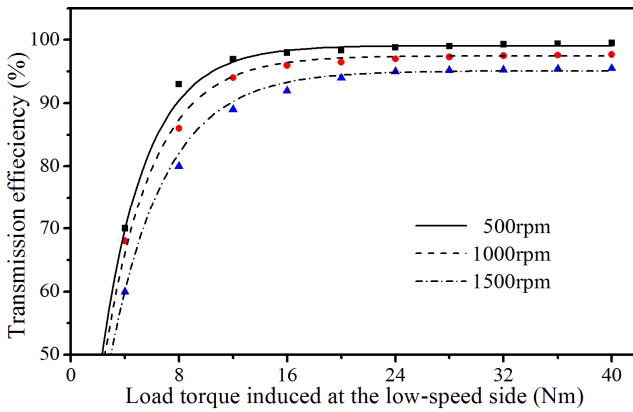


Fig. 11 Variation of torque transmission efficiency for load induced in the low-speed side

속측, 저속측 운동 방정식은 각각

$$J_M \dot{\omega}_M = T_M - T_S \quad (4)$$

$$J_L \dot{\omega}_L = NT_S - T_L \quad (5)$$

이다. 위 식에서 T_M 과 T_L 은 구동측 토크와 부하측 토크이고 N 은 감속비 7.33을 나타낸다. T_S 는 마그네트 기어의 고속측과 저속측 사이의 비틀림 토크를 나타내는데 토크가 감속비만큼 증폭되므로 저속측 운동 방정식에 이러한 증폭비가 고려되고 있다. 상기 비틀림 토크 T_S 는 입출력단 사이의 비틀림 각에 의해 발생되므로

$$T_S = (\theta_M - N\theta_L)k_S \quad (6)$$

로 표현될 수 있다. 식 (4)에서 식 (6)에 걸쳐 묘사된 마그네트 기어 제변수간의 관계를 블록선도(block diagram)로 나타내면 Fig. 12와 같다. 여기에서 k_S 는 고속, 저속측간의 비틀림 모멘트 혹은 토크에 의한 비접촉 강성(stiffness)을 의미한다. 구축된 시스템에서 고속, 저속측간의 기계적인 상대각 변화에 따른 토크를 입력단에서

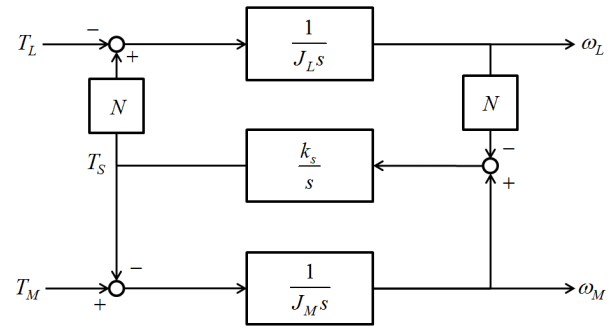


Fig. 12 Block diagram of the speed reducer using the magnet gear

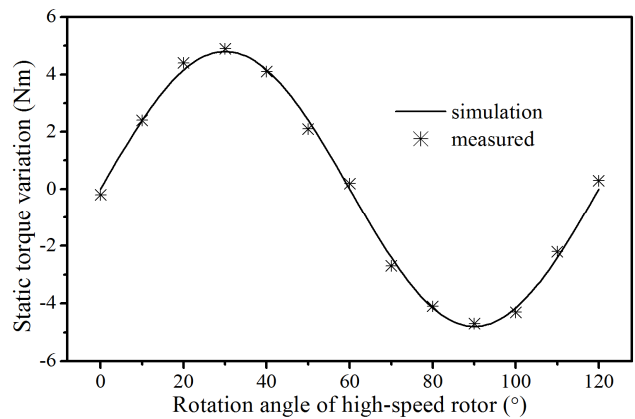


Fig. 13 Variation of static torque according to mechanical shear angle between high-speed side and low-speed side

측정한 결과를 Maxwell 툴을 이용하여 수행한 시뮬레이션과 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 고속측 즉, 마그네트 기어의 내측 PM set이 3극이므로 120도의 주기를 갖고 토크가 조화함수의 형태로 변화되며 슬립이 발생하지 않는다는 전제하에 부하의 크기에 따라 실제 상대각은 30도 이내에서 평형 값으로 수렴되어 결정되기 때문에 Fig. 11에서와 같이 부하에 따라 토크의 전달 효율이 변화한다. 비접촉 강성을 0도에서 위 토크-비틀림각 곡선의 접선 기울기 값으로 상정하여 도출하면 대략 14.4 Nm/rad이다.

4.2 비접촉 비틀림 강성에 따른 제특성 분석

서보모터로 고속측에 발생하는 구동 토크 T_M 에 의해 내부 PM set은 이중 적분기의 동특성을 갖지만 외부 PM set과의 비접촉 공극 강성으로 인해 2관성 공진계와 유사한 동특성을 갖는다. 이를 정량적으로 분석하기 위해 식 (4)-(6)으로부터 입력 토크 T_M 과 구동측 출력 ω_M 과의 전달함수를 구해보면

$$\frac{\omega_M}{T_M} = \frac{s^2 + N^2 \frac{k_S}{J_L}}{J_M s \left(s^2 + \frac{J_M N^2 + J_L}{J_M J_L} k_S \right)} \quad (7)$$

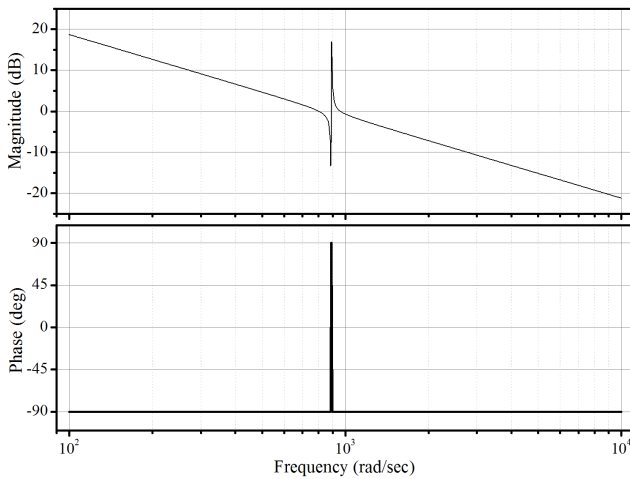


Fig. 14 Bode plot result for the transfer function of the magnet gear system given in (7)

과 같다. 여기에서 s 는 라플라스 변수를 나타낸다. 위 입출력간의 주파수 전달 함수식에서 공진주파수(resonant frequency) ω_n 과 반공진주파수(anti-resonant frequency) ω_{an} 을 각각 구해보면 다음과 같다.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{J_M N^2 + J_L k_S}{J_M J_L}} \quad (8)$$

$$\omega_{an} = \sqrt{N^2 \frac{k_S}{J_L}} \quad (9)$$

Fig. 10에 묘사된 시스템에서 동력 전달 축 커플링과 측정 유닛까지 모두 고려한 고속측, 저속측의 관성모멘트 값은 각각 11.47/104, 12.71/104 kgm^2 인데 이를 이용하여 (8), (9)의 값을 구해보면 대략 780 Hz, 788 Hz이다. 주파수 함수 (7)의 보데선도를 구해보면 Fig. 14와 같은데 계산된 값과 동일한 결과를 확인할 수 있다.

기계식 동력 전달 시스템 대비 비접촉 강성에 따른 상대적인 저강성 문제는 마그네트 기어 시스템의 한계 인자의 하나인데 특히 연속 운동이 아닌 간헐적 운동에서 문제가 될 수 있다. 이러한 사례로 저속측 과부하에 따른 슬립 현상과 이에 따른 잔류 진동 현상이나 고속측의 갑작스런 정지에 따른 저속측의 잔류 진동 등을 들 수 있다. Fig. 15, 16은 전술한 고속측의 슬립에 따른 잔류 진동을 시뮬레이션한 결과와 실제 측정한 결과를 각각 나타낸 그림이다. 일반적으로 기계식 기어 전달 시스템의 경우 과부하가 걸려 고속측에 허용 부하 이상의 값이 인가되면 기어 치의 파손으로 연결되어 다대한 문제를 야기할 수 있지만 마그네트 기어 시스템의 과부하에 따른 슬립 현상은 시스템 보호 측면에서 긍정적인 효과를 가질 수도 있다. Fig. 15, Fig. 16은 일반적인 PI(비례-적분) 제어를 통해 1,000 rpm에 도달한 후 0.5초에서 저속측에 100 Nm 수준의 과부하를 순간적으로 인가했을 때 고속측 응답과 저속측 응답을

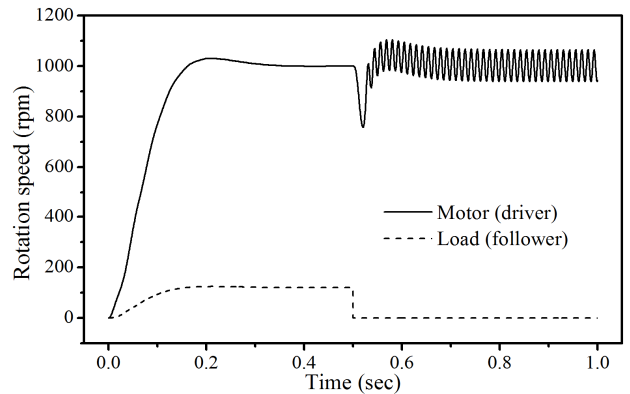


Fig. 15 Simulation result for transient response of magnet gear system due to excessive load given in the low-speed side

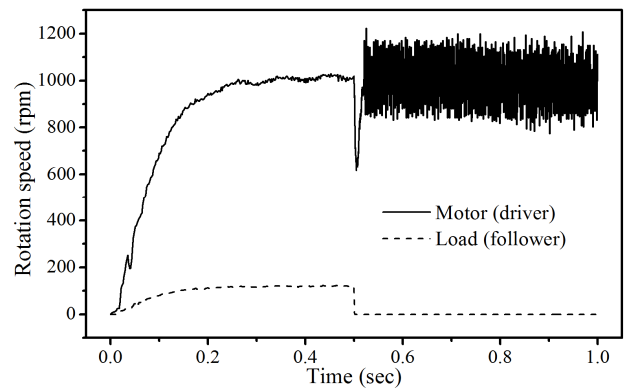


Fig. 16 Experimental result of magnet gear system due to excessive load

도시한 결과이다. 최대 전달 토크 이상의 과부하로 인해 저속측의 경우 순간적으로 정지 상태에 도달하며 고속측은 슬립이 발생하여 1,000 rpm을 기준으로 일정 진폭으로 오실레이션한다. 이러한 진동은 과부하가 해소되면 정상 상태로 회귀하여 소멸된다. 기계 시스템 대비 상대적으로 작은 강성에 따른 문제는 초기 1,000 rpm에 도달하는 상승 시간 등에도 제한을 주는 인자인데 이는 고속측 과도 응답이 저속측 공진 특성에 영향을 주기 때문인데 이러한 측면을 고려한 복잡한 구조의 제어를 굳이 이용하지 않아도 Fig. 16의 초기 응답에서와 같이 상대적으로 오버슈트(overshoot)를 최대한 억제하도록 제어를 구성하여 적용하면 저속측의 진동을 미연에 방지할 수 있을 정도의 강성 수준은 마그네트 기어 시스템이 확보하고 있는 것으로 판단된다. 그러나 과부하 슬립 발생 후 정상 상태로의 회복 속도를 향상시키기 위해서는 저강성 측면을 고려한 다양한 서보 기법의 적용에 따른 잔류 진동과 응답 특성의 개선에 많은 후속 연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

분리된 바 형태의 고조파 조절기를 구비한 기존 마그네트 서터

기어 시스템이 갖는 조절기 자체의 구조적인 저장성 문제와 조립의 난제 등에 대응하기 위해 사다리꼴 치형을 갖는 일체형 고조파 조절기를 이용한 마그네트 기어 시스템을 제안하였다. 시스템은 고속측 3극, 저속측 22극으로 구성되며 7.33:1의 감속비를 갖도록 설계되었으며 대략 40 Nm의 최대 전달 토크치를 갖는다. 고속측, 저속측간의 토크 전달 강성은 대략 14.4 Nm/rad이며 이는 관성치를 고려하면 788 Hz 수준의 공진 주파수 대역을 형성하는 수치에 해당한다.

본 논문에서는 새롭게 제안된 조절기의 기하학적 형상에 따른 토크 민감도를 분석하여 인자의 영향을 분석하였으며 제작된 시스템으로 토크 전달 특성을 측정 분석하였고 비접촉의 비틀림 강성에 따른 과도 응답 특성 결과를 이론적으로 유도된 지배 방정식에 의한 결과와 비교하여 설명하였다.

후 기

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (NRF-2013R1A1A4A01005 675).

References

- [1] Jian, L, Xu, G., Gong, Y., Song, J., Liang, J., Chang, M., 2011, Electromagnetic Design and Analysis of a Novel Magnetic-gear-integrated Wind Power Generator using Time-stepping Finite Element Method, Progress in Electromagnetics Research, 113 351-367.
- [2] Frank, N., 2012, Analysis of the Concentric Planetary Magnetic Gear, A Thesis for a Doctorate, Texas A&M University, USA.
- [3] Rasmussen, P., Andersen, T., Jorgensen, F., Nielsen, O., 2005, Development of a High-performance Magnetic Gear, IEEE Trans. on Industry Applications, 41:3 764-770.
- [4] Nagraial, M., 1996, Performance of Magnetic Couplings using Nd-Fe-B Magnets, Proc. of IEEE IECON(Industrial Electronics, Control, and Instrumentation) Conf., 2 997-998.
- [5] Muruganandam, G., Jayakumar, K., 2012, A Novel Perpendicular Magnetic Gear with High Gear Ratio, European J. of Scientific Research, 69:4 593-598.
- [6] Kikuchi, S., Tsurumoto, K., 1993, Design and Characteristics of a New Magnetic Worm Gear using Permanent Magnet, IEEE Trans. on Magnetics, 29:6 2930-2935.
- [7] Yao, Y., Huang, D., Lin, S., Wang, S., 1996, Theoretical Computations of the Magnetic Coupling between Magnetic Gears, IEEE Trans. on Magnetics, 32:3 710-713.
- [8] Qu, R., Li, D., Wang, J., 2011, Relationship between Magnetic Gears, and Vernier Machines, Proc. of Electrical Machines and Systems (ICEMS) International Conf., 1-6.
- [9] Toba, A., Lipo, T. A., 2000, Generic Torque-maximizing Design Methodology of Surface Permanent-magnet Vernier Machine, IEEE Trans. on Industry Application, 36:6 1539-1546.
- [10] Atallah, K., Howe, D., 2001, A Novel High-performance Magnetic Gear, IEEE Trans. on Magnetics, 37:4 2844-2846.
- [11] Jian, L., Chau, K., 2010, Design and Analysis Of A Magnetic-gear Electronic-continuously Variable Transmission System using Finite Element Method, Progress in Electromagnetics Research, 107 47-61.
- [12] Kim, M. S., Jung, K. S., 2014, Magnet Gear with Two-axial Magnetic Paths, J. Korean Soc. Precis. Eng., 31:6 543-550.