

영구자석형 비접촉식 동력전달 기어의 전달토크에 관한 연구

부광석*, 최영#, 여흥태**, 이종일***

Study on the Torque Calculation of Touch Free Gear Using Permanent Magnet

Kwangsuck Boo*, Young Choi#, Hong-Tae Yeo**, Jongil Lee***

ABSTRACT

Permanent magnetic gears are magneto-mechanical devices that are widely used to replace the ordinary mechanical gear and to transmit torque without the mechanical contact. This study investigates the characteristics of touch free permanent magnetic gear according to the employing systems. The effect of the magnetic torque is analyzed by using 3 dimensional Finite Element Method (FEM). To estimate the transmission torque of FEM model, the numerical results are compared with the experimental results. The influences of geometry size, magnet number on transmission torque are obtained. As results of this paper, it is confirmed that the transmission torque behavior is associated with the configuration of the magnet numbers and the air gap between the two permanent magnetic gears.

Key Words : Permanent magnetic gear (영구자석기어), FEM(유한요소법), Torque sensor (토크센서)

1. 서론

평판 디스플레이 장치인 LCD(Liquid Crystal display)와 PDP(Plasma Display Panel)등은 반도체 생산 기술과 유사한 제조기술로 생산되는 디스플레이 장치로써 반도체 생산환경과 동일한 청정실(Clean Room)에서 제조된다. 반도체의 경우, 제조공정에서 반도체 웨이퍼(Wafer)의 크기가 작고 가벼워 손쉽게 로봇 팔을 이용해서 이동할 수 있으나, PDP 나 LCD 등의 평판(Glass)은 디스플레이 장치의

대형화에 따라 로봇 팔을 대체하는 반송 시스템이 도입되었다. 반송 시스템은 청정실에서 제조하는 평판의 표면오염을 방지하기 위해서 기계적 마찰이 적은 벨트방식의 구동방식을 사용한다. 하지만 벨트방식 또한 기계적 마찰로 분진과 진동으로 평판의 표면을 오염시키는 문제점을 가지고 있다.

벨트구동방식 반송시스템에서 발생하는 분진 및 진동을 개선하기 위해 영구자석을 이용한 비접촉식 구동방식이 이용된다. 영구자석형 구동방식은 구동축(Drive Shaft)과 피동축(Driven Shaft) 간의 동력전달을 자석의 자기력을 통해 전달한다. 두

접수일: 2004년 7월 2일; 게재승인일: 2004년 10월 7일

* 인제대학교 기계자동차공학부

교신저자: 인제대학교 기계자동차공학부

E-mail ychoi@inje.ac.kr Tel. (055) 320-3755

** 동의대학교 기계공학과

*** 인제대학교 수송기계부품 기술혁신센터

축은 기계적 마찰이 없어 벨트방식의 반송 시스템보다 PDP 나 LCD 등의 반송시스템에 적합하다.

또한 기어와 같이 두 축간의 기어비를 얻을 수 있어 구동력 및 속도를 조정할 수 있는 이점이 있다.¹ 하지만, 영구자석형 구동방식은 구동축과 피동축 사이의 간극과 영구자석의 극수에 따라 동력전달의 한계가 있으며, 또한 영구자석의 극수에 따라 피동축에서 발생하는 진동의 크기도 달라진다.² 그러므로 PDP 나 LCD 의 반송 시스템에 영구자석형 구동방식을 사용하기 위해선 정확한 전달토크와 전달토크의 변화에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 PDP 인쇄 전·후 공정에 사용되는 다단 버퍼(buffer) 시스템에 사용되는 영구자석형 동력전달장치의 전달토크 해석 및 예측을 위한 FEM 해석을 제안한다. 다단 버퍼 시스템은 PDP 생산공정에서 평판표면에 회로를 인쇄하는 전·후 공정에 설치되어 생산공정상에 물류의 흐름을 원활히 하기 위한 임시 저장장치이다. 평판 인쇄시에 필요로 하는 공정시간 동안 평판을 임시로 저장하였다가 내보는 역할을 한다.

다단 버퍼 시스템에 사용되는 영구자석의 FEM 해석을 통해 다단 버퍼 시스템의 사양을 만족하는 영구자석형 동력전달장치의 설계인자를 찾고 전달토크를 해석하고자 한다.

이를 위해 영구자석형 동력전달장치의 전달토크 예측을 위한 3 차원 유한 요소 모델을 제안한다. 또한 유한 요소 해석을 이용한 결과를 검증하기 위해 제작된 영구자석형 동력전달장치를 이용하여 전달토크를 측정하였으며, 해석결과와 비교 검증하였다. 그리고 영구자석형 동력전달장치의 극수와 두 축간의 간극을 설계인자로 하여 설계인자 변화에 따른 전달토크를 해석하고 이를 실험을 통해 검증함으로써 구동토크의 특성을 규명하였다.

2. 비접촉식 동력전달장치

2.1 다단 버퍼 시스템

다단 버퍼 시스템은 PDP 공정에서 프린트 공정의 전후에 있는 공정 제어용 시스템으로써 Fig. 1 과 같이 구성되어 있다. 다단 버퍼 시스템은 생산공정상에 원활한 흐름을 제어하고 프린트 공정의 전·후 인쇄 건조 시간 등을 위해 프린트 전후 공정에 배치되어 있다.

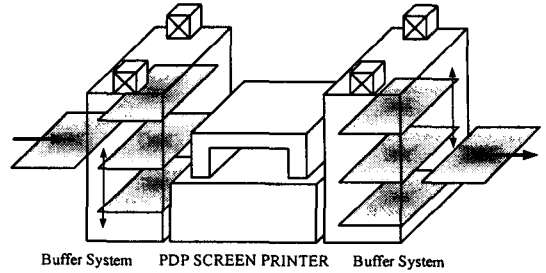


Fig. 1 Multi-Table buffer System

2.2 비접촉식 구동장치

본 연구에서 사용된 영구자석형 동력전달장치는 Fig. 2 과 같다. 각 구동축과 종동축은 그림과 같이 90°의 각도를 이루고 있으며, 각각의 축에는 영구자석형 전달기어가 일정한 간극을 두고 설치되어 있다.

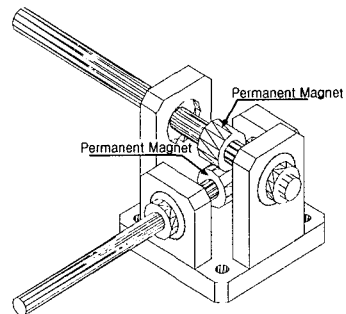


Fig. 2 Schematic of a permanent magnetic gear

2.3 영구자석의 유한요소 모델

비접촉식 동력전달장치에 사용된 8 극 비접촉식 동력전달 기어의 유한 요소 해석 모델은 Fig. 3 과 같다. 비접촉식 동력전달장치는 구동축을 회전시키면 영구자석의 자기력에 의해 피동축의 동력 전달 기어가 따라 회전하는 구조를 가진다.

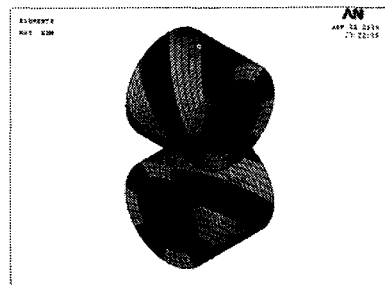


Fig. 3 FEM of permanent magnetic gear

비접촉식 동력전달장치에 사용되는 영구자석형 동력전달 기어는 Fig. 3 와 같이 헤리컬형으로 자화되어 있으며, Fig. 3 에서 동력전달 기어의 두께만큼만 자장이 형성되도록 모델링 하였다. 그리고 Fig. 4 는 자장 발생영역을 포함한 해석모델을 나타낸다.

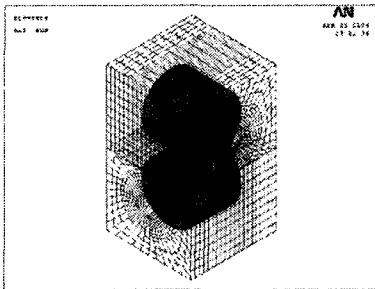


Fig. 4 FEM of Exterior surface flag for Infinite element

비접촉식 동력전달장치의 영구자석형 기어는 유한요소 프로그램인 ANSYS 의 Solid 97 요소를 사용하여 해석 하였다. 동력전달기어의 상호간 자력에 의한 힘을 계산하기 위해 맥스웰(Maxwell) 방정식을 이용하여 MXMF (Maxwell Force Flag)를 자석과 공기가 이웃하는 요소에 부여하였다. Fig. 5 는 MXMF 의 모델을 나타낸다.

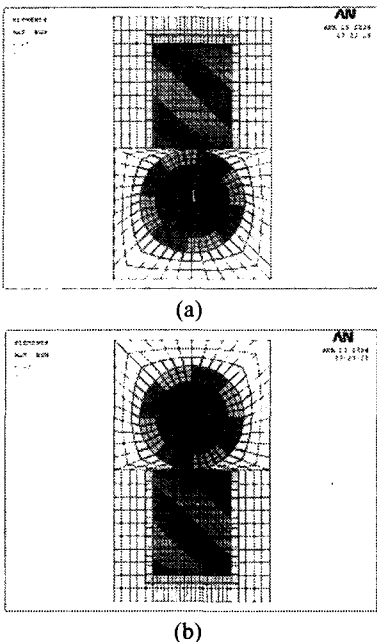


Fig. 5 Model of Maxwell Force Flag

또한 공기를 일부분만 모델링 하여 무한한 것으로 요소를 설정하기 위해 INF (Exterior surface flag for Infinite element)를 부여하였다.

본 연구의 3 차원 정자계(Magneto static Field)의 해석에서는 ANSYS 에서 벡터 포텐셜을 이용 하였다. 그리고 비접촉식 동력전달 기어의 잔류 자속 밀도(magnetic flux density)는 0.145(T), 투자비율(magnetic permeability)은 1.05 로 설정 하였다

3. 영구자석형 동력전달장치의 특성분석

비접촉식 동력전달장치는 기어와 벨트와 같은 접촉식과 달리 구동축과 피동축의 간극과 자석의 극수에 따라 많은 전달토크의 차이를 보인다. 본 연구에서는 FEM 해석을 통해 계산된 자기력 중 축에 대한 회전력을 자석의 면압으로 주어 자석을 회전시켰다. 또한 동력전달장치의 전달토크와 최대 전달토크를 해석하기 위해 피동축을 고정시킨 상태에서 해석 하였다.

3.1 피동축 전달토크 특성

비접촉식 동력전달장치의 최대전달토크를 해석하기 위해 종동축을 고정시키고 자기력을 해석 하였다. 다만 버퍼 시스템의 경우, 다양한 크기의 평판을 이송시키기 위해 충분한 전달토크를 유지해야만 일정한 속도로 평판을 이동시킬 수 있다.

각각의 극수에 따른 최대 전달토크의 특성을 분석하기 위하여 6 극, 8 극 그리고 12 극에 대한 각각의 최대 전달토크를 해석하였다. 또한 두 축간 간극을 조정하여 동일한 극수에서 자석간 간극에 따른 전달토크의 영향을 해석하였다.

ANSYS 를 이용한 비접촉식 동력전달장치의 6 극의 해석결과는 다음의 Fig. 6 와 같다. 다음의 Fig. 6 에서 종동축은 고정시켜 놓은 상태에서 구동축을 회전시켜 두 축간에 발생하는 최대 전달토크를 해석하였다. 초기의 구동축과 종동축은 서로 엇갈린 초기상태에서 상부 구동축의 자력에 의해 하부의 종동축을 밀어주게 된다.

초기 상·하부의 자석은 상호간의 인력이 작용하고 있기 때문에 Fig. 6 에서 회전시 상부측은 음의 전달토크가 발생하며, 구동축이 회전함에 따라 종동축은 토크가 발생하는 쪽으로 이동하는 자기력이 발생한다.

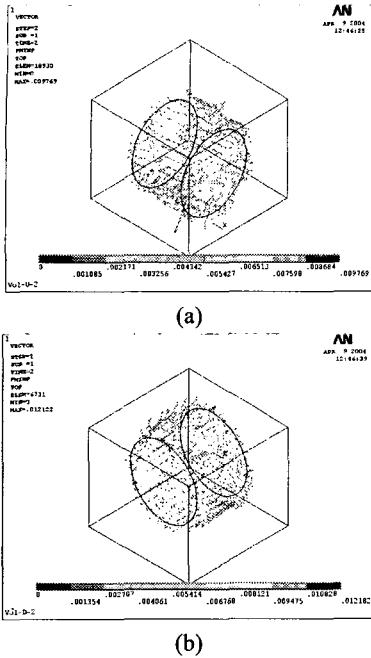


Fig. 6 Transmission Torque vector of 6 pole type permanent magnetic gear

6 극형 비접촉식 동력전달장치의 회전각에 따른 전달토크는 Fig. 7 와 같다. 다음의 Fig.7 은 구동축의 회전각에 따라 발생하는 전달토크를 보여준다. 6 극형 비접촉식 동력전달장치는 서로 다른 극이 60°간격으로 자화 되어 있으므로 60°의 주기로 구동축의 전달토크가 변화하는 것을 볼 수 있다.

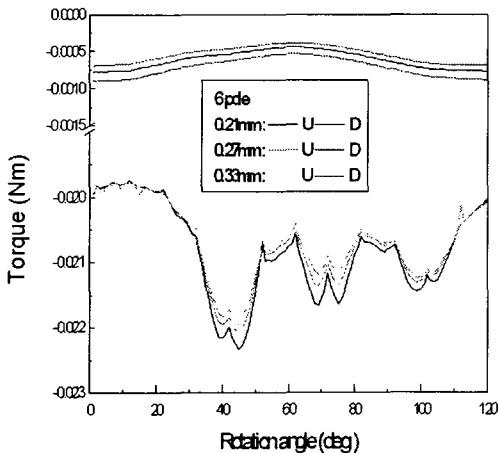


Fig. 7 Characteristics of Transmission Torque versus Rotational Angle

이는 구동축이 회전하여 종동축과 동일한 자장을 형성하게 되므로 서로간의 발생하는 전달토크가 최소가 됨을 알 수 있다.

또한 두 축이 설치되어 있는 간극에 따른 영향을 보면 비접촉식 동력전달장치는 기계적인 힘으로 동력을 전달하지 않으므로 설치되어 있는 간극에 따라 전달할 수 있는 전달토크가 달라짐을 보여준다. 두 축간의 간극이 증가할수록 자기력의 영향이 적어져 전달토크도 같이 낮아진다.

비접촉식 동력전달장치의 전달토크 특성을 보면, 구동축의 회전각이 증가함에 따라 종동축에 작용하는 토크도 커짐을 볼 수 있다. 이는 초기에는 서로 다른 극으로 인력이 작용하나 회전각이 증가하면서 구동축이 종동축을 밀어내는 힘이 작용하기 때문이다. 6 극의 경우에는 동일한 극이 60°마다 반복되므로 60°부근에서 큰 전달토크를 나타낸다.

다음의 Fig. 8 은 8 극형 비접촉식 동력전달장치의 전달토크 벡터를 보여준다.

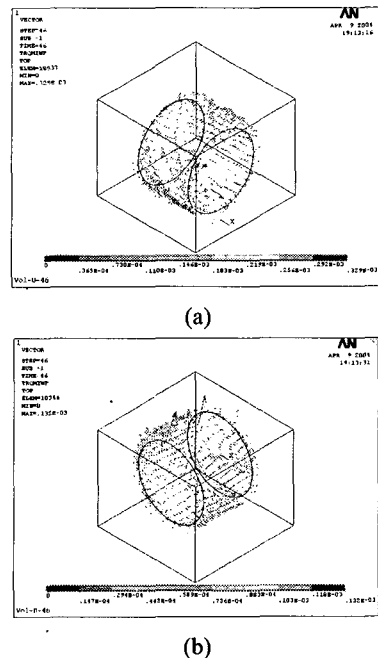


Fig. 8 Transmission torque vector of 8 pole type permanent magnetic

6 극형 동력전달장치의 Fig. 6 과 비교해 볼 때 Fig. 8 의 8 극형의 비접촉식 동력전달장치가 많은

토크벡터를 나타낸다. 그러므로 8 극 형태의 비접촉식 동력전달장치가 6 극 보다 전달토크 변화가 적은 것을 해석의 결과에서 나타낸다.

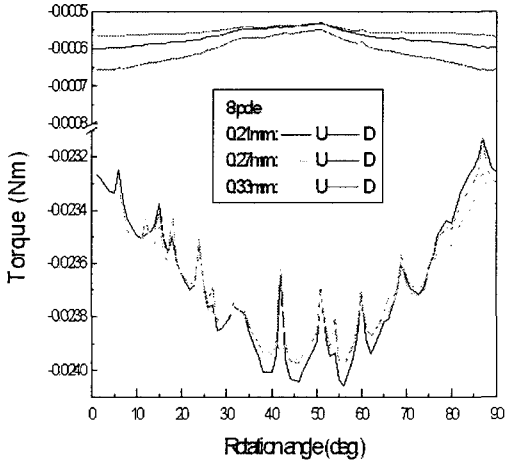


Fig. 9 Characteristics of Transmission Torque versus Rotational Angle

8 극 형태의 비접촉식 동력전달장치의 전달토크 변화는 Fig. 9 와 같다. 8 극의 동력전달장치는 각 극의 변화가 45°마다 변화하므로 전달토크도 주기적인 변화를 보여준다.

6 극 및 8 극 형태의 비접촉식 동력전달장치의 토크변화를 보면, 극수가 증가함에 따라 전달토크의 변화는 적어지나, 최대전달토크의 크기는 극수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

비접촉식 동력전달장치의 극수는 구동축과 종동축 간의 토크전달 특성이 달라짐을 볼 수 있었다. 동력전달장치에 사용된 영구자석의 극수가 증가함에 따라 전달토크가 작아지는 것을 볼 수 있는데, 동일한 영구자석의 원주에서 많은 극수를 제작함에 따라 각각의 극이 가지는 면적이 감소함에 따라 전달토크의 크기도 작아진다. 하지만, 면적이 작아짐에 따라 각각의 극의 변화가 빠르므로 토크의 연속적인 전달로 안정적인 전달토크를 얻을 수 있다.

비접촉식 동력전달장치의 6 극 및 8 극의 해석 결과를 바탕으로 12 극 형태의 비접촉식 동력전달장치의 전달토크는 Fig. 10 과 같다.

6 극 및 8 극 해석결과와 같이 12 극 형태의 비접촉식 동력전달장치는 6 극 및 8 극보다 연속적인

토크의 변화를 보여주었으나, 최대 전달토크는 감소하였다. Fig. 11 은 12 극의 비접촉식 동력전달장치의 토크벡터를 나타낸다.

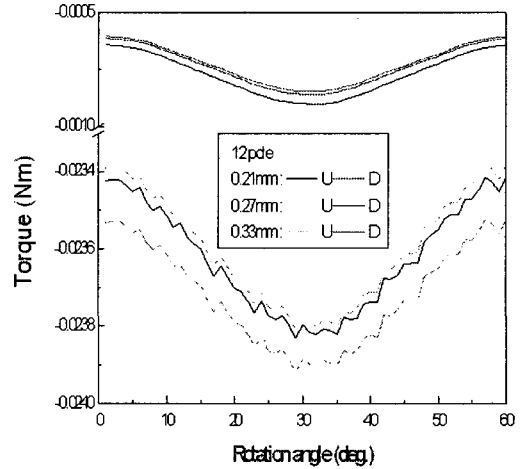


Fig. 10 Characteristics of Transmission Torque versus Rotational Angle

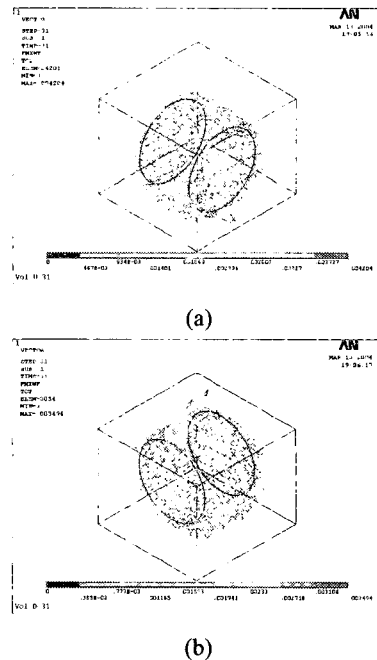


Fig. 11 Transmission Torque vector of 12 pole type permanent magnetic gear

4. 영구자석형 동력전달장치의 실험적 해석

앞절의 다단 버퍼 시스템의 비접촉식 동력전달 장치가 가지는 전달토크 특성을 극수 및 두 축간의 간극을 변화시키면서 해석하였다. 비접촉식 동력전달장치의 FEM 해석의 결과에서 극수가 증가할수록 토크변화는 적어지나, 두 축간의 간극은 크게 영향을 미치지 못함을 보였다. 또한 극수에 따라 주기적인 전달토크의 변화를 보여주었으나, 12극은 다른 극수에 비해 안정적인 전달토크를 보여준다.

본 연구에서 사용된 비접촉식 동력전달 시스템의 전달토크 특성 분석을 위해 FEM 해석결과를 바탕으로 각기 다른 극수를 가진 영구자석을 이용하여 전달토크 해석 결과를 검증 및 비교분석 하였다.

실험을 위해 사용된 비접촉식 동력전달장치는 Fig. 12 과 같이 두 개의 영구자석으로 구성되며, 구동축 및 종동축에 영구자석을 고정하고 서로 수직으로 교차하게 설치되어 있다. 6극 및 8극의 비접촉식 동력전달장치의 크기 및 형태는 동일하며 동일한 구동축 및 종동축에 고정되어 반복적으로 시험 하였다.

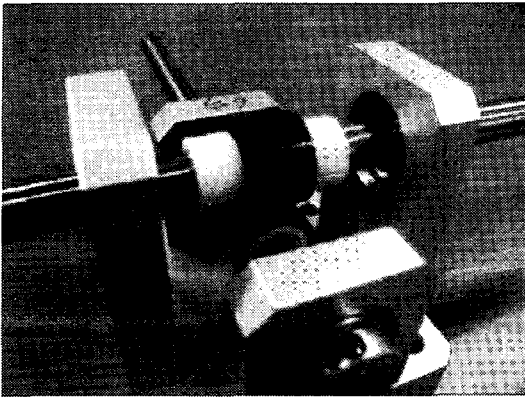


Fig. 12 Figure of touch free Gear

4.1 비접촉식 동력전달장치의 시험장치 구성

비접촉식 동력전달장치의 FEM 해석결과를 검증 및 신뢰성을 얻기 위해 해석결과와 동일한 영구자석을 제작하고 회전위치에 따른 토크측정을 실험을 통해 검증하였다. 전달토크의 측정은 Fig. 14 와 같은 시험장치를 구성하고 이를 이용하여 두 축간

의 전달토크를 측정하였다.

시험장치의 구성은 Fig. 13 과 같이 구성되었다. DC 모터를 이용하여 비접촉식 동력전달장치의 구동축을 일정한 속도로 회전시키고 종동축에 부하장치를 설치하여 비접촉식 동력전달장치에 작용하는 부하를 변경하였다. 그리고 부하장치와 비접촉식 동력전달장치간에 토크 측정장치를 구성하여 최대전달토크와 상시전달토크를 측정하였다.

본 실험에서는 비접촉식 동력전달장치의 FEM 해석결과와 비교하기 위해 3 개의 엔코더가 사용되었다.

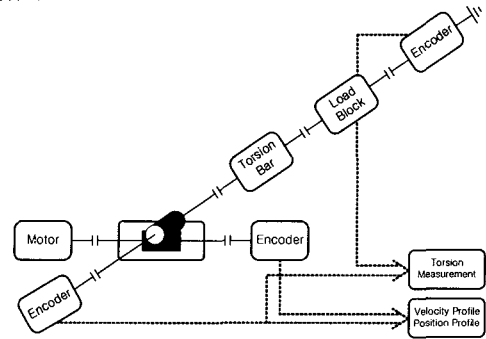


Fig. 13 Diagram of the equipment for experiment

비접촉식 동력전달장치의 회전각 변화에 따른 전달토크를 측정하기 위해 구동축에 한 개의 엔코더를 설치하였다. 또한 종동축에는 토크측정장치를 기준으로 앞과 뒤에 각각 엔코더를 설치하여 구동축과 종동축의 회전각에 따른 전달토크를 측정하였다.

4.2 비접촉식 동력전달장치의 전달토크 실험

4.2.1 6극형 비접촉식 동력전달장치

영구자석형의 동력전달장치의 FEM 해석 결과를 검증하기 위해서 Fig. 14 와 같은 실험장치를 구성하고 구동축과 종동축의 동력 전달력을 측정 하였다.

여기에서 측정된 전달토크를 FEM 해석결과와 비교하여 영구자석형 동력전달장치의 FEM 모델을 검증하였다. 영구자석형의 동력전달장치의 구동축과 종동축 간의 간극 변화에 따른 동력전달을 측정하기 위해 0.21mm, 0.27mm 그리고 0.33mm 의 간극을 설정하여 비교실험을 수행하였다.

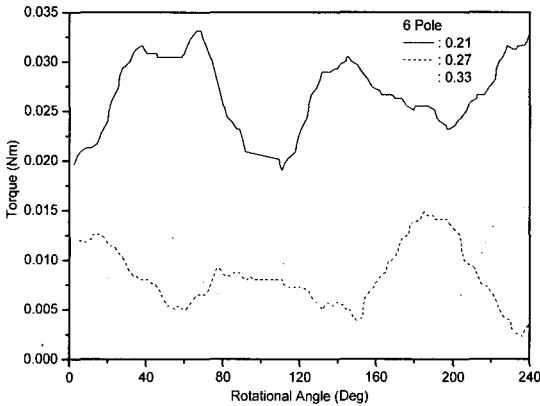


Fig. 14 Characteristics of transmission torque versus rotational angle

6 극형 비접촉 동력전달장치의 전달토크 변화는 두 축간의 간극에 따라 변화한다. 실험의 결과와 해석의 비교결과는 Fig. 15 와 같으며 두 축간의 간극이 증가함에 따라 최대 전달토크는 해석결과와 같은 경향으로 감소함을 Table 1 에서 볼수 있다..

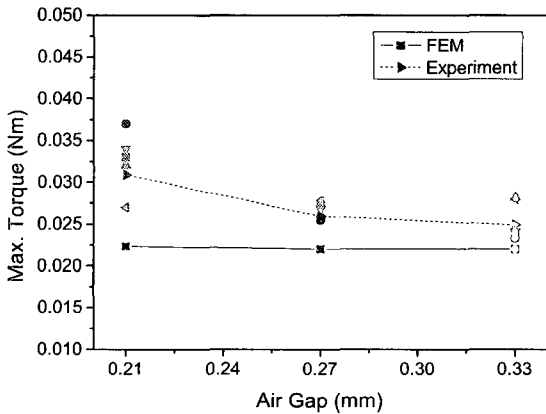


Fig. 15 Characteristics of transmission torque versus air gap

Table 1 Comparison of results of FEM and Experiment

	FEM	Experiment
0.21mm	0.023	0.03088
0.27mm	0.022	0.02593
0.33mm	0.021	0.02493

최대·최소 토크의 변화는 두 축간 간극이 작

아질수록 축에 작용하는 자기력이 커지지만 극간의 자기력 변화도 커지므로 전달토크가 불규칙함을 보여준다. 이는 Fig. 6 의 FEM 해석 결과에서도 두 축간의 간극의 변화에 따라 전달토크가 감소함을 보여준다.

하지만, 해석의 결과와 실험의 결과에서 간극이 증가함에 따라 최대·최소 토크의 변화가 적음을 볼 수 있었다. 실제 시스템에서는 각각의 회전체에 있는 베어링 등과 같은 감쇠요인이 존재하므로 전달토크 변화에 따라 최대 최소토크의 차이가 간극에 따라 변화한다. 그러므로 실제 시스템에서는 해석에서 고려하지 못한 감쇠 등의 요인으로 큰 최대 최소토크의 차이가 나타났다. 그러나 최대 토크를 해석결과와 비교해 볼 때 비슷한 경향을 보여준다.

4.2.2.8 극형 비접촉식 동력전달장치

6 극의 해석결과와 실험결과를 토대로 하여 8 극 형태의 영구자석의 전달토크를 실험으로 검증하였다. FEM 해석의 결과에서는 6 극보다 8 극의 전달토크변화가 적은 것을 확인하였다. 8 극 형태의 영구자석의 실험도 6 극과 동일하게 각기 다른 3 개의 간극을 이용하여 두 축간의 전달토크를 측정하였다.

Fig. 16 의 실험결과는 FEM 해석 결과와 동일하게 45° 간격으로 최대전달토크를 보여준다. 그리고 두 자석간의 간극이 증가함에 따라 최대 및 최소 전달토크가 감소하는 것을 보여준다. 8 극 형태의 영구자석의 전달토크를 FEM 모델과 실험 결과를 비교한 결과는 Fig. 17 과 같다.

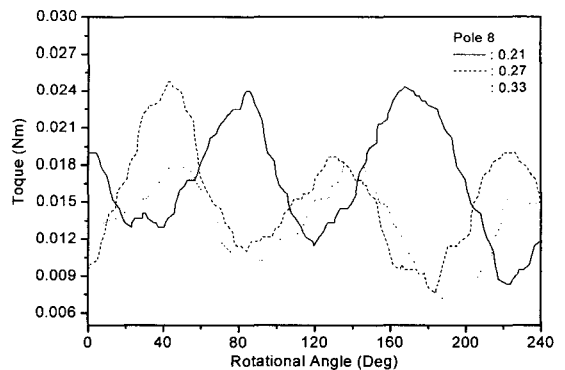


Fig. 16 Characteristics of transmission torque versus rotational angle

FEM 모델의 경우는 6 극의 해석결과와 동일하게 간극이 감소함에 따라 전달토크가 감소는 하나, 자기력의 영향만을 받으므로 감소량이 크지 않은 것을 볼 수 있다.

하지만, 해석의 결과는 축에 작용하고 있는 베어링의 마찰 등의 영향으로 간극이 증가함에 따라 FEM 해석결과와 다소 차이를 보여준다. 하지만, 간극이 증가함에 따라 FEM의 해석결과와 실험결과 모두 같은 경향을 가지고 감소하는 것을 Table 2의 FEM과 실험결과를 비교해 알 수 있다.

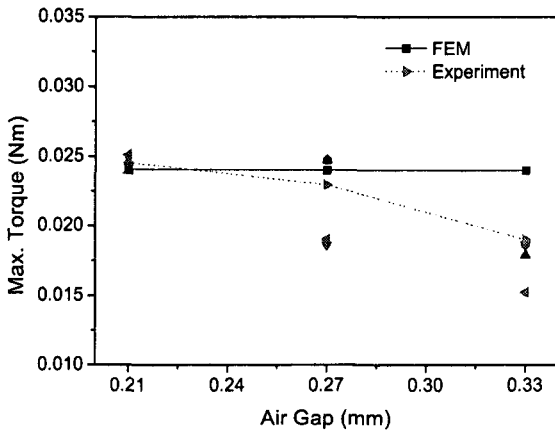


Fig. 17 Characteristics of transmission torque versus air gap

Table 2 Comparison of results of FEM and Experiment

	FEM	Experiment
0.21mm	0.02406	0.02454
0.27mm	0.02399	0.02294
0.33mm	0.02397	0.019

5. 결론

본 연구에서는 영구 자석형 비접촉식 동력전달 기어의 FEM 모델을 제안하고 실험을 통하여 FEM 모델을 검증 및 전달토크를 측정하였다. 본 논문을 통해 6 극 및 8 극 형태의 FEM 모델을 검증하였으며, 실험을 통해 자석의 극수와 두 축간의 간극이 전달토크에 미치는 영향을 해석하였다.

비 접촉식 동력전달장치의 극수는 전달토크의 변화에 영향을 주며, 극수가 증가할수록 최대전달 토크는 감소하나, 토크의 변화율은 적어졌다. 그리

고 두 축간의 간극이 감소할수록 전달토크는 증가 하였으나, 토크의 최대최소 변화가 크게 나타났다.

본 연구를 통해 6 극 및 8 극 형태의 비접촉식 동력전달장치의 해석결과를 실험으로 검증하였다. 또한 6 극 및 8 극 모델의 해석 및 실험 결과를 이용하여 12 극 형태의 비접촉식 동력전달장치의 전달토크 예측을 위한 FEM 모델을 제안한다.

본 연구의 결과를 이용하여 PDP 용 다단버퍼 시스템 설계시 GLASS 를 이송하는데 필요로 하는 비접촉 동력전달장치의 설계 파라미터를 결정할 수 있으며, 이와 유사한 청정실 내의 이송시스템 설계에 필요로 하는 시스템의 설계 기준을 제시 한다.

후 기

본 논문은 산업자원부에서 시행한 기술개발 사업 중 지역특화 개발사업에 의해 지원되었음

참고문헌

- Oh, Young-Jin, Ha, Kyung-Ho, Hong, Jung-Pyo, "Characteristic Analysis of Touch Free Gear Using Permanent Magnet," 2001 Conference in KIEE, pp. 17-20, 2001.
- Kikuchi, Shinki, Tsurumotor, Katsuo, "Trial Construction of A New Magnetic Skew Gear Using Permanent Magnet," IEEE Transactions on magnetics, Vol. 30, No. 6, 1994.
- Yang, Hong, Yang, Zhiyi, Zaho Han, "The FEM Analysis and Torque Calculation of REPM Gear," phys. Stat. Sol. (a) 189, No. 3 pp. 1057-1061, 2002.
- Tsamakis, D.M., Ioannides, M.G., Nicolaidis, G.K., "Torque transfer through plastic bonded Nd2Fe14B magnetic gear," Journal of Alloys and Compounds Vol. 241, pp. 175-179, 1996.