

비접촉형 마그넷기어를 적용한 클린 반송장치의 개발

오영진¹, 노태정^{2*}

¹한국전기연구원 성과확산실, ²동명대학교 메카트로닉스공학과

Development of Non-Contact Conveyor for Clean Process by Applying Magnet Gears

Young-JIn Oh¹ and Tae-Jung Lho^{2*}

¹Performance Diffusion Dept., Korea Electrotechnology Research Institute

²Dept. of Mechatronics Engineering, Tongmyong University

요 약 헬리컬형으로 자화된 영구자석을 이용한 비접촉 마그넷 기어를 개발하기 위하여 3차원 FEM 해석 기법을 활용하였고 마그넷 기어의 자기적 특성 해석 및 설계 요소기술을 확보하였다. 마그넷 기어를 이용한 클린 반송 컨베이어 및 회전장치의 성능평가를 위하여 class 10의 클린부스 환경에서 시험운전을 거쳐, 이송 속도, 최대 허용 토크, 클린도, 최대 이송 중량, 헛팅 유무, 소음도 등을 측정하여 결과 클린도 class 10의 공정까지도 대응이 가능한 것으로 확인되었다.

Abstract For a development of non-contact magnet gear which is magnetized as a helical shape, a method of 3-dimensional FEM analysis is used. An elementary technique required for magnetic property analysis and parts design about magnet gear is ensured. In order to test a performance of clean conveyor and turning device which is composed with magnet gear, a clean class 10 environment booth is used for a trial test. It is verified that the magnet conveyor can be acceptable under a condition of clean class 10 by a result of trial test about transfer speed, maximum torque permission, cleanness, maximum transfer weight, existence of hunting and degree of noise.

Key Words : Magnet-gear, Clean conveyor, Non-contact power Transfer, Magnet with skew angle

1. 서론

초미세 가공을 필요로 하는 반도체 또는 LCD, PDP, OLED 등의 FPD 제조공정에서의 제품 반송시스템은 클린룸 내의 추가적인 오염을 방지하기 위해 먼지와 진동의 발생을 최소화하여야 한다. 헬리컬기어(helical gear) 또는 타이밍벨트(timing belt) 등의 접촉구동방식은 충분한 구동력의 전달과 축 간격 확보에 효율적인 반면 분진 발생과 구동소음 등으로 클린룸 현장의 규제에 대응할 수 없다. 헬리컬 기어의 경우는 장비수명과 소음 등을 고려하여 한쪽을 수지 재료로 대체하여도 원천적으로 분진이 발생하는 구조이다.

이런 구조적인 문제를 해결하기 위하여 하경호[1, 2] 과 심재홍[3]에 의해 비접촉 구동용 마그넷기어의 토크 특성을 이용하는 연구들도 진행되었다. 또한 발생된 분진이 제품에 부착되지 않고 배출되도록 하기 위해 전현주 [4]와 이영종[5]은 운송장치내의 유체 유동해석이나 대전방지제에 대한 연구도 진행하였다. 한편 FPD 제조공정에서 공기 부상을 이용하여 글라스 자체를 이송장치로부터 완전히 이격시켜 이송하는 공기부상 이송 컨베이어 시스템에 대한 연구도 노태정[6, 7, 8]에 의해 최근에 활발하게 진행되고 있다.

마그넷 기어(magnet gear)를 이용하여 비접촉으로 구동력을 전달 할 경우 분진의 발생을 원천적으로 방지할

본 논문은 산업자원부에서 시행한 산업기반기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었음.

*교신저자 : 노태정(tjlho@tu.ac.kr)

접수일 10년 08월 10일

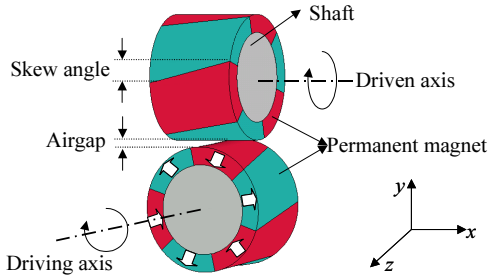
수정일 (1차 10년 09월 07일, 2차 10년 09월 13일)

게재확정일 10년 10월 15일

뿐만 아니라 소음과 진동을 저감하고 보전주기를 연장하여 클린룸의 유지 비용을 줄이고 불량률을 개선하여 원가 경쟁력을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 헬리컬 형상으로 자화된 영구자석을 이용한 마그넷 기어의 기하학적 구조를 고려한 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며 이의 결과를 시제작 모델의 실험치와 비교하여 검증하였다. 또한 영구자석의 자화 두께, 스큐 각도, 길이, 내·외경 및 극수 변화에 따른 해석을 통해 마그넷 기어의 구동 토크(torque) 특성을 파악하였다. 이로부터 구동 특성을 만족하는 마그넷 기어를 개발하였으며, 이를 적용한 클린 반송장치 시제품을 설계·제작하여 스크래치 유발시험 및 성능평가를 통하여 클린 비접촉 구동 반송장치를 개발하였으며, 이를 각종 클린 반송시스템에 확대 적용하였다. 그리고 클린룸 규격에 적합한 클린반송장치의 요소를 선정하고 실제 현장 적용에 필요한 분진, 정전기 및 표면처리 대책과 함께 시스템의 설계과정을 제시한다.

2. 마그넷기어의 수치해석 및 개발

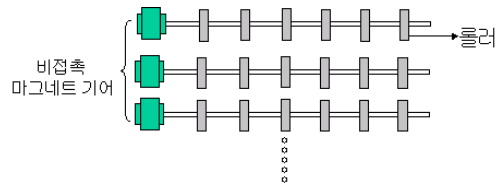


[그림 1] 마그넷 기어의 구조[2]

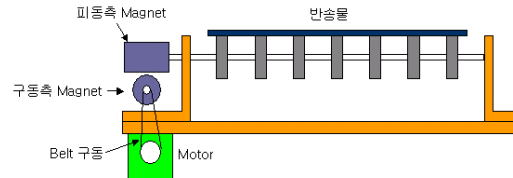
그림 1은 마그넷기어의 구조를 나타낸 것으로서 스큐(skew)를 가지는 2개의 영구자석으로 구성되며, 헬리컬형상의 접촉식기어와 같이 마그넷기어의 영구자석이 스큐 각도를 가지도록 자화(magnetizing)시킨 원통형 영구자석(permanent magnet) 2개를 서로 직교하게 배치하고 영구자석의 중심부에 구동축이 삽입된 간단한 구조를 가진다. 영구자석의 원주 접면에 중심축의 45° 방향으로 N, S극을 번갈아가면서 자화하고 2개의 영구자석 중심축을 90° 방향으로 교차시켜 조합하면 2개의 영구자석의 마주보는 원주면에 자화된 N, S극은 각각 45° 방향으로 기운 면이 같은 방향으로 마주보게 되고 2개의 영구자석 N, S극은 서로 다른 극끼리 끌어당기는 흡인력이 발생하므로 구동부(driving part)의 영구자석을 구동시키면 상단과 하단의

영구자석 사이의 전자기적 힘에 의해 중동부(driven part)의 영구자석이 회전하게 된다[2, 3].

이의 동작원리를 이용하여 반송물의 이송에 필요한 동력을 전달하는 비접촉 기어로 사용하게 된다. 비접촉 기어를 이용한 반송설비 시스템의 개념도는 그림 2와 같다. 그림 2(a)와 같이 반송물을 이송하기 위해 하나의 영구자석과 반송물을 이송하기 위한 다수의 롤러가 부착된 중동축을 이송물이 도달하는 목표지점까지 연속적으로 배치된다. 또 다른 하나의 영구자석이 상단 영구자석과 직교하여 그림 2(b)와 같이 아래에 놓이게 된다. 이때 하단의 영구자석은 모두 하나의 구동축에 연결되어 전동기에 의하여 회전하게 되고 이 회전력은 반송물을 지지하고 있는 상단의 영구자석으로 동력을 전달하게 되어 반송물이 이송하게 된다.



(a) 반송물 이송을 위한 롤러



(b) 구동축의 마그넷 위치



(c) 실제 조립된 모습

[그림 2] 반송설비 시스템 개념도

헬리컬 형태로 자화된 영구자석을 직교시켜 한 축을 회전시키면 영구자석의 흡인력에 의하여 다른 축이 따라서 회전하게 되는 마그넷기어의 3차원의 자계장 해석을

위해서는 3차원 FEM이 사용된다. 자계 스칼라 변수를 가진 준정상계 문제의 자계 지배방정식은 Maxwell의 자계 방정식에 의해 표현될 수 있다. 자계 스칼라 포텐셜에 대한 지배 방정식은 (1)과 같다.

$$\nabla \cdot \mu \nabla \Omega = 0 \tag{1}$$

여기서, μ 는 매질의 투자율(permeability)이다.

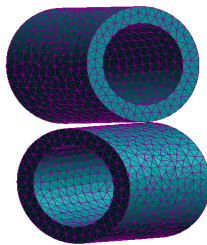
자계해석으로 부터 Maxwell의 스트레스 텐서(stress tensor) 방법은 자계 토크를 계산하는데 사용되며, 그 토크 \vec{T} 는 자석표면을 둘러싸고 있는 공극(air gap) 전체 표면에 대하여 스트레스 텐서 벡터 \vec{P} 를 적분함으로써, 즉 (2), (3)으로 부터 얻을 수 있다.

$$\vec{T} = \oint_s \vec{r} \times \vec{P} ds \tag{2}$$

$$\vec{P} = \frac{1}{\mu} (\vec{n} \cdot \vec{B}) \vec{B} - \frac{1}{2\mu} B^2 \vec{n} \tag{3}$$

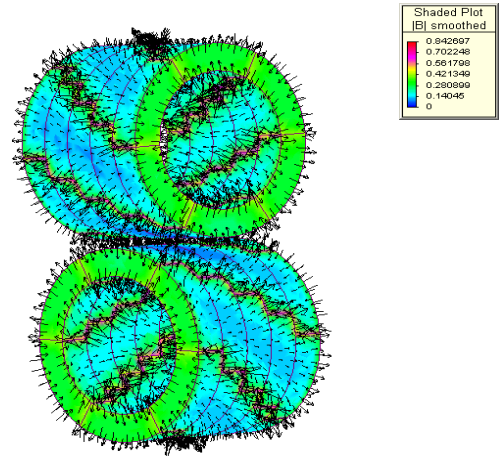
여기서, \vec{r} 은 임의의 한 점에서 회전축까지의 거리 벡터이며, \vec{n} 는 표면에 수직인 단위벡터이며, \vec{B} 는 자계밀도(flux density)이다.[2]

그림 3과 같이 227,090개의 요소로 구성된 mesh generation을 나타내고, Nd-Fe-B 물성치는 N35-grade 이상을 가정하여 비투자율 $\mu_r = 1.05$, 잔류자속밀도 $B_r = 1.2T$ 를 적용하였다.

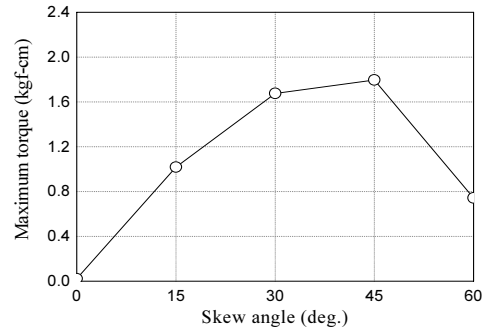


[그림 3] 마그넷기어의 mesh generation 형상

그림 4는 상용프로그램인 Magnet6를 사용하여, 자속밀도 분포 및 자속의 흐름의 3차원유한요소해석의 결과를 나타낸 것이다.

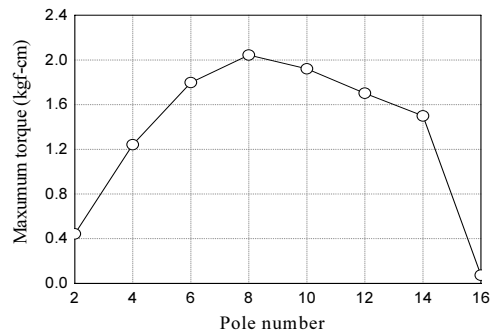


[그림 4] 마그넷기어의 자속밀도 분포 해석결과



[그림 5] Skew Angle에 따른 토크변화 (6 Poles ,Nd-Bonded)

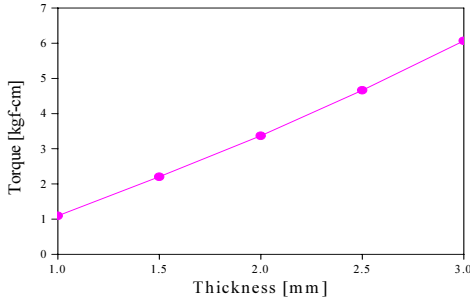
반송장치의 특성에 맞는 경박단소한 마그넷 기어를 찾기 위한 1차 해석의 결과, skew angle 45°에서 극수가 8극일 때 발생토크가 최대가 됨을 그림 5와 그림 6에서 확인하였다.



[그림 6] 극수에 따른 토크변화 (skew45°, Nd-Bonded)

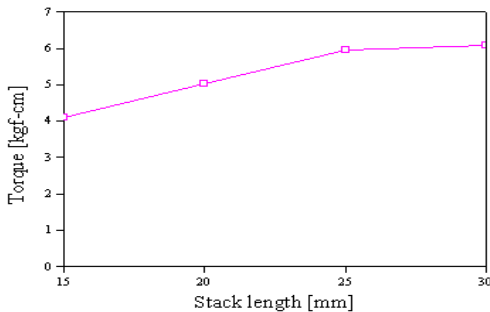
영구자석 회전자의 재질을 Nd-sintered계로 하고, 영구자석간의 공극은 0.5mm, 영구자석의 잔류자속밀도는 1.2T, 회전자 내경은 최소 25mm, 두께는 최대 5.0mm, 길이는 최대 30mm 범위 내에서 최적의 결과를 도출하기 위해 마그넷 기어의 설계 요소 중 극수와 스큐각도는 1차 해석의 결과인 8극, 45°로 고정하고 내경과 외경, 두께, 길이 등을 각각 허용범위 내에서 변화시키며 5.0kgf.cm 이상의 전달토크를 가지는 최적의 조건을 찾는 파라메트릭해석을 활용하였다.

그림 7은 영구자석 회전자의 길이를 30.0mm로 고정하고 설계사양 조건에서 회전자 두께의 변화에 따른 토크의 변화를 나타낸 것이다. 해석 결과를 보면 회전자 두께가 3.0mm 이상이면 설계목표인 최대 발생토크 5.0kgf.cm를 만족함을 알 수 있다.



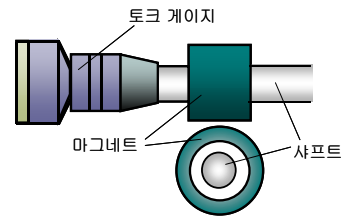
[그림 7] 회전자 두께 변화에 따른 토크 변화

그림 8은 영구자석 회전자의 두께를 3.0mm로 고정하고 설계사양 조건에서 회전자 길이 변화에 따른 토크의 변화를 나타낸 것이다. 해석결과를 보면 회전자 길이가 20.0mm 이상일 때 설계목표인 최대 발생토크 5.0kgf.cm를 만족함을 알 수 있다.



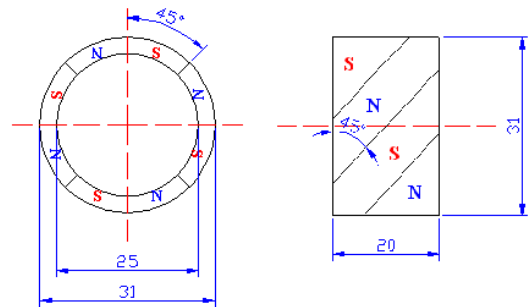
[그림 8] 회전자 길이 변화에 따른 토크 변화

3차원 유한요소 해석의 신뢰성을 확보하기 위해 해석 모델과 동일한 마그넷기어를 제작하였다. 제작 모델은 토크측정 실험을 수행할 때 구동축의 회전 위치에 따른 정밀실험은 어렵지만 마그넷 기어의 최대 토크를 제시함으로써 스큐각을 고려한 3차원 유한요소해석 결과와의 비교를 통해 본 논문에서 제시하는 3차원 해석 방법의 신뢰성을 검증하였다. 그림 9와 같이 토크 게이지를 마그넷 기어의 중동축에 연결하여 전달 토크를 측정하였다. 그 결과 측정값은 해석값과 거의 일치하며, 그 차이는 측정 장치의 불균일한 공극에 의한 것으로 사료된다.[1]



[그림 9] 중동축의 전달토크 측정 구성도[1]

마그넷기어 개발의 결과로서, 그림 10은 최대 발생 토크 5.0kgf.cm를 만족하는 Nd-sintered계 영구자석 마그넷 기어의 형상 및 치수를 나타내었으며, 표 1은 마그넷기어 개발품의 주요 사양을 나타낸 것이다.



[그림 10] 마그넷기어의 형상 및 주요 치수

[표 1] 마그넷기어 개발품의 주요 사양

항 목	사 양
영구자석 재질	Nd-Sintered 계
잔류자속밀도 [T]	1.2
회전자 외경 [mm]	31
회전자 내경 [mm]	25
회전자 길이 [mm]	20
극수	8
스큐 각도 [°]	45
발생 토크 [kgf.cm]	5.03

3. 마그넷기어를 적용한 비접촉구동 반송시스템 개발

FPD 공정장비의 특성은 대형 유리를 취급함에 따라 분진발생을 억제하는 것 외에도 물리적인 충격으로 인한 스트레스를 최소화해야 하고, 제품의 진행방향 변경을 위해 글라스 회전장치 같은 장비가 반송설비 내에 들어갈 수 있도록 롤러의 간격을 충분히 확보해야 한다. 따라서 넓은 간격의 롤러로 대면적 유리판을 저속과 고속에서도 안정적으로 이송하기 위해 고 토크의 마그넷기어를 개발하는 것이 필수적이다.

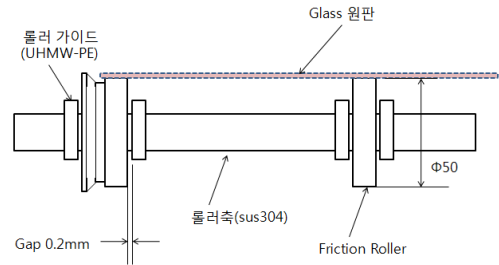
비접촉 영구자석형 클린 컨베이어는 구동축과 종동축의 동력전달에 특수구조의 극성으로 자화된 영구자석을 사용하며, 영구자석의 특성인 극성간 흡인, 반발하는 원리를 이용하여 직접 접촉하지 않는 공간 상태에서 동력을 전달하는 방식으로 마찰이 없기 때문에 분진발생을 최소화할 수 있다.

표 2는 상기 조건을 만족시키기 위한 클린 컨베이어 및 회전장치에 대한 기본적인 설계사양이다.

[표 2] 클린 컨베이어 및 회전장치의 설계 사양

항 목	설계 사양	비 고
이송 속도 [m/min]	0.36~12	Inverter 제어
글라스 폭 [mm]	1,600	
구동모터 용량 [W]	40	
롤러 외경 [mm]	50	UHMW-PE
롤러 피치 [mm]	150~200	
최대 이송중량 [kg]	20	
최대구동토크[kgf-cm]	5.0	
적용 가능한 청정도	Class 10	
회 전 장 치	4분할 90도 (CW, CCW)	Index driver
필터 포집율 [%]	99.97	0.1[μ m]
소 음 도 [dB]	55	

0.7mm 두께의 글라스를 이송과 정지시 발생하는 충격을 최소화하기 위해 롤러 샤프트가 회전하여도 롤러는 부하에 즉각 응답하지 않는 그림 11과 같은 friction roller 구조로 설계하였다. friction roller는 내측으로는 롤러 샤프트와, 외측으로는 유리기판과 닿아서 구동되므로 분진의 발생 뿐 아니라 기판에 스크래치를 유발하지 않도록 한다.



[그림 11] 반송 롤러부 구조 설계

길이 1,600mm의 롤러 샤프트와 마그넷 기어의 고정은 마그넷 양쪽에 쇄기형의 인서트 원터치형의 조립이다. 롤러 샤프트의 재질은 SUS304 스테인레스강이며, 양끝단의 지지는 자동조심베어링을 사용하여 처짐과 조립에서 발생하는 편차를 흡수할 수 있는 구조이다. 마그넷기어 부분을 박스 구조 하우징으로 파티클의 흐름을 차단하고 흡인을 구성 외부로 배기시키는 방법으로 설계하였다.

반송 롤러와 고정 가이드의 마찰에서 미량의 파티클이 발생할 수 있으므로 반송 롤러는 롤러 피치를 150mm로 하고 파티클 발생 억제를 위하여 초고분자 폴리에틸렌(UHMW-PE) GUR4150를 사용하고 샤프트와 열압입으로 조립하여, 회전시 축과 마찰이 없도록 하였고, 또한 양 끝단 지지하는 베어링은 분진차폐를 하여 장비 내측으로 분진의 유입을 차단하였다.

장비 상부는 외측의 분진 유입과 기류변화 현상을 막을 수 있게 투명한 무정전 Polycarbonate 소재로 하였다. 상단에는 99.999997%의 초고포집율 ULPA(Ultra Low Penetration Air) filter를 장착하여 일정한 풍량, 풍속을 상시 공급할 수 있는 클린부스(clean booth)를 장착하였다. 클린부스는 클린도 class 10을 유지하도록 외장 밀폐형 구조로서 전면은 알루미늄 프레임에 무정전 Polycarbonate 소재로서 open door로 설계하고, 환경은 다음과 같이 조성하였다.

- Laminar flow velocity : 0.25 ~ 0.45m/s
- Relative humidity : 45% ± 5%
- Temperature : 23℃ ± 1℃
- Air velocity : 0.35m/s(H-Step)

그림 12는 제시된 설계 사양에 의해 설계, 제작된 비접촉구동 클린 컨베이어 개발 시작품의 외관이다.

4. 개발품의 성능평가 및 적용 사례

반송롤러의 소재인 PEEK, SUS, 초고분자 폴리에틸렌(UHMW-PE)에 대하여 반송롤러 표면의 가공조도 $\nabla\nabla\nabla\nabla$ 와 이송속도 6m/min 조건에서 롤러를 1분 간격으로 연속 회전시켜 글라스에 스크래치가 발생하는지 고배율 LUPE를 활용하여 육안으로 확인하였다. 시험한 결과로서, PEEK 소재가 가장 스크래치가 발생하지 않지만 가격을 고려하여 분자량 3,000,000의 초고분자 폴리에틸렌이 적합한 것으로 판단되었다.

그림 12의 개발 시작품의 성능 평가는 clean class 1000의 클린부스 속에서 시작품 상부에 clean class 10의 ULPA filter를 추가로 설치한 후 시험운전을 거쳐 개발 시작품의 이송 속도, 최대 허용 토크, 클린도, 최대 이송중량, 헌팅 유무, 소음도를 측정하였다. 그 결과는 표 3과 같으며, 만족할만한 성능을 확인하였다.



[그림 12] 클린 컨베이어의 개발 시작품

[표 3] 개발 시작품 성능평가 결과

평가 항목	실측 데이터	측정 기기
정격 가변속도[m/min]	0.3~12	속도계(VM-63)
최고 이송속도[m/min]	15	속도계(DT530)
속도 1.2[m/min]의 헌팅 유무(10Kg부하)	없음	육안 진동계(VM-63)
최대 이송중량[kg] (피치 150[mm])	25	weight
적용 가능한 청정도 (F·S 209D)	Class 10	파티클 카운터
소음도[dB] (속도 15[m/min])	49	sound level meter (CENT320)
최대 허용토크[kgf-cm] (공극 0.5[mm])	4.5	토크 측정기

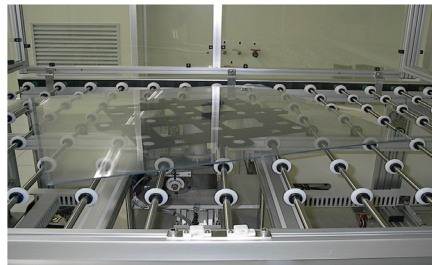
이를 기반으로 하여 마그네틱기어를 이용한 비접촉 구동 방식의 클린 반송장치는 글라스를 날장으로 취급하는 각종 이송용 컨베이어(그림 13 참조), 중간 이송용 리프트(그림 14 참조), 세정장치, 건조장치, 기능필름을 부착하는 Polaroid Film 부착기(그림 15 참조), 카세트 반출입장치 등 다양한 장비에 확대 적용을 하였다. 국내 FPD 제조사의 영향으로 현재는 국내 뿐 아니라 중국이나 대만의 관련 산업계에서도 마그네틱기어를 점차 표준으로 적용해 가고 있는 상황이다.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

[그림 13] 날장 글라스 이송용 컨베이어 적용 사례



[그림 14] 날장 글라스 층간이송용 리프트 적용 사례



[그림 15] Polaroid Film 부착기 적용 사례

5. 결론

본 연구에서는 우수한 성능을 가지는 비접촉 마그네티기어와, 이를 적용한 클린룸용 반송장비를 개발하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 클린 반송설비 시스템에 적합한 헬리컬형으로 자화된 영구자석을 이용한 비접촉 마그네티기어를 개발하기 위하여 3차원 FEM 해석 기법을 활용하여 마그네티기어의 자기적 특성 해석 및 설계 요소기술을 확보하였다.
- (2) Nd-sintered계 영구자석을 사용하여 전달토크 5.0 kg \cdot cm 이상을 만족하는 소형 경량화된 마그네티기

어를 설계, 개발하였다. 개발된 마그네티기어의 규격은 극수 8극, 스쿠각도 45°, 내경 25mm, 외경 31.0mm, 두께 3.0mm, 길이 20mm 이다.

- (3) 마그네티기어를 이용한 클린 반송 컨베이어 및 회전 장치의 성능 평가를 위하여 class 10의 클린부스 환경에서 시험운전을 거쳐, 이송속도, 최대 허용토크, 클린도, 최대 이송중량, 헨팅 유무, 소음도 등을 측정된 결과 클린도 class 10의 공정까지도 대응이 가능한 것으로 확인되었다.
- (4) 마그네티기어를 적용한 비접촉 구동방식의 클린 반송장치는 글라스를 날장으로 취급하는 각종 이송용 컨베이어, 층간 이송용 리프트, 세정장치, 건조장치, 기능필름을 부착하는 Polaroid Film 부착기, 카세트 반출입 장치 등 다양한 장비에 확대 적용되고 있다.

참고문헌

- [1] 오영진, 하경호, 홍정표, 오영진, “비접촉 구동용 마그네티기어 토크 특성 해석”, 대한전기학회 2001하계 학술대회논문집, pp.18-20, 2001.7.
- [2] Kyung-Ho Ha, Young-Jin Oh, Hong, Jung-Pyo Hong, Young-Jin Oh, “Design and characteristic analysis of non-contact magnet gear for conveyor by using permanent magnet”, Proc. of Industry Applications Conference 2002(37th IAS Annual Meeting). Vol.3, pp.1922-1927, 2002.
- [3] 심재홍, “대면적 FPD 글라스 수직이송용 클린 비접촉식 컨베이어 구동부 설계 및 해석”, 반도체및디스플레이장비학회지, Vol.8, No.4, pp.71-76, 2009.
- [4] 전현주, 박찬우, 임익태, “클린룸 내 롤러 컨베이어 운송장치 주위의 유동해석”, 대한설비공학회 2009 하계학술발표대회논문집, pp.1507~1512, 2009.
- [5] 이영중, 하진욱, “열경화성 대전방지 코팅액의 개발 및 응용”, 한국산화기술학회 2004 춘계학술대회논문집, pp.291-293, 2004.6.
- [6] 정희상, 오영진, 노태정, “Labview 이용한 공기부상 FPD 이송장치의 Nozzle 압력측정시스템 개발”, 한국정밀공학회 2006추계학술대회논문집, 2006.10.
- [7] 노태정, 손태영, “공기부상 FPD 이송장치에서 다공질판과 글래스 사이의 공기유동해석”, 한국산화기술학회논문지, 제9권 제4호, pp.878-885, 2008.
- [8] 노태정, 이육진, “FPD용 공기부상 이송컨베이어 시스템 개발”, 한국산화기술학회논문지, 제10권 제1호, pp.39-45, 2009.

오 영 진(Young-Jin Oh)

[정회원]



- 1981년 2월 : 부산대 생산기계공학과 (공학사)
- 1984년 8월 ~ 1998년 12월 : 삼성테크윈 자동화사업부 (부장)
- 1999년 1월 ~ 2006년 3월 : SFA자동화사업부(상무)
- 2004년 8월 : 창원대학교 제어계측공학과 (공학석사)
- 2008년 2월 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 (공학박사수료)
- 2006년 4월 ~ 현재 : 한국전기연구원 성과확산실 전문위원

<관심분야>

FPD Clean반송, Mechatronics, Factory Automation 등

노 태 정(Tae-Jung Lho)

[정회원]



- 1984년 2월 : 부산대 기계설계학과 (공학학사)
- 1986년 2월 : KAIST 생산공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : KAIST 정밀기계공학과(공학박사)
- 1986년 2월 ~ 1999년 2월 : 삼성중공업 기전연구소(수석연구원)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 동명대학교 메카트로닉스공학과 부교수

<관심분야>

Mechatronics, 기계제어자동화, 반도체/FPD 물류자동화, 항만하역설비 자동화, 태양광발전 Module 제조장비 등