

리니어 모터 이송계를 이용한 초고속 라인 센터 개발

백영종*(성광정기주 대표), 허순(성광정기주), 문홍만(성광정기주), 최대봉(한국기계연구원)

Development of a High-speed Line Center using Linear Motor Feed System

Y. J. Back, S. Heo, H. M. Moon(Sung Kwang Electric & Machine Ltd.), D. B. Choi(KIMM)

ABSTRACT

The recent machine tools are requested so high-quality processing and productivity increasing. Therefore, it is so necessary to develop technology for high-speed and high-precision. This thesis touches on the development of high speed and intellectual line center. At first, the line center is necessary that strong structure, compact structure and light weight design for high-speed processing and transfer. So, it is necessary that examination of new materials and structures for light-weight and control devices for precision processing. So, it is going to make mention of the process of 1st model production for the above-mentioned based on test model production and evaluation.

Key Words : Line center (라인 센터), Linear motor (리니어 모터), Structural design (구조 설계), ATC (Automatic tool changer; 자동공구교환기), Magnetic bearing spindle (자기 베어링 주축)

1. 서론

다양화된 산업사회가 되면서 기계산업의 발달과 더불어 초정밀 가공기를 비롯한 공작기계, 자동차, 전자공업 등 기타 제조업에서도 고속, 고강성, 고정밀, 고능률이 요구되고 있다. 특히, 자동차 및 전자제품의 생산공정에서는 다수의 주축을 갖는 전용기를 대체하는 차원에서 하나의 주축에 ATC를 장착하고 트랜스퍼(Transfer) 라인에 적용하여 유연생산 및 비용 절감은 물론 고속·고정도 가공에 대한 요구가 확대되고 있다. 이러한 요구가 근래에는 세계적으로 증가 추세에 있으며 고생산 시스템이 기존의 트랜스퍼 라인에서의 추종 정도를 벗어나 그 이상의 높은 생산성을 요구하고 있다. 따라서, 고속 주축과 고속 이송이 가능한 고강성, 고정밀 라인 센터의 개발이 시급히 요구되고 있다. 최근 초고속 메커니즘(Mechanism)을 이용한 초고속 지능형 라인 센터(Line center)에 대한 관심이 높아지면서 고속 가공을 위한 기본 구조물과 가공기술을 포함한 시스템 구성에 대한 연구가 진행되고 있다.

라인 센터는 기존 전용기 개념의 트랜스퍼 라인에서 발전하여 유연 라인(Flexible line)을 구성하기 위한 핵심적인 기계라 할 수 있다.

본 연구에서는 이러한 요구에 충족될 수 있는 라인 센터를 개발하였다. 설계 시 사이클 타임(Cycle time)이 작고 고능률, 고정밀 가공이 가능하며 일반 머시닝 센터와 트랜스퍼 라인에도 적용이 가능하도록 하였다. 그러므로 전용성과 유연성 그리고, 시장성을 고려한 라인 센터 구조물을 설계하였다.

본 연구는 산업자원부에서 주관하는 “고속·지능형 가공시스템의 개발 연구”의 제3 과제인 “초고속 지능형 라인 센터의 개발” 과제로서 1, 2 차년도에 이어 3 차년도에 수행된 내용을 중심으로 서술하였다.

1 차년도에는 볼 스크류 방식을 채택한 시험모델의 주요 사양 결정 및 운용 기술을 연구하여 주축 회전수가 20,000rpm 인 라인 센터를 설계하였다. 2 차년도에는 1 차년도에 설계된 시험모델을 제작하고, 고속 주축계 설치에 따른 구조물의 안정화 연구 및 라인 센터 제작을 위한 기반 기술 등을 확보하고 시험모델에서 얻은 기술을 바탕으로 라인 센터 시제품을 설계하였다. 3 차년도에는 시험모델을 구동하고 보완 및 개선 사항을 고찰하였으며 리니어 모터를 장착한 라인 센터 시제품을 제작하였

다.

양을 변경하여 진행하였다.

2. 라인 센터 시험 모델(Ball screw 형)

2.1 시험 모델의 구성

1 차 년도에 설계된 시험 모델을 2 차 년도에 제작하였다. Fig. 1은 시험 모델의 구성도를 나타낸 것이다. Fig. 2는 조립중인 라인센터를 보인 것이다. 주요 구조물은 강성의 안정성 확보를 위해 덕테일(Ductile) 주물로 제작되었으며, 이송계는 볼 스크류(Ball Screw)에 의해 이송된다. 이송계는 1G, 45m/min (60m/min)의 속도를 갖고 있으며, 주축 회전수는 24,000rpm 이다. 구조물의 주요 특징으로는 구조물의 지지중심점에서 Y, Z-axis 중심교차 슬라이드 방식이므로 급가속이 가능하고, 이송체(Y, Z-axis) 전 후면에 대하여 4 면 구속이 되도록 가이드를 설치하고 구동 함으로서 피칭(Pitching), 요잉(Yawing), 롤링(Rolling) 등의 오차를 적게 하여 구조물 변형을 억제 할 수 있는 구조로 구성하였다. 전용성 향상을 위해 이동체와 기계의 폭을 가능한 작게 설계하였다. 또한, X 축 슬라이드 위에 Y 축 크래들(Cradle)을 놓고 크래들 안에 Z 축 퀼(Quill)을 겹쳐 구성 함으로서 트랜스퍼 라인 형성시에 주축 이동이 짧도록 하였다. 그러므로 단독기가 아닌 라인 직접투입을 위해 별도 분리형으로 설계하였다.

2.2 시험 모델에 대한 고찰

현재, 시험모델은 고속화에 있어 다소의 불합리함을 가지고 있는데 Table 1에서 나타내었듯이 X, Y 축에 부가되는 하중이 큰 관계로 일정 수준이상 (속도 100m/min, 가속도 1G 이상)의 고속을 구현하기에는 어려움이 있다. 따라서 고속 이송을 위해 리니어 모터를 장착한 이송계 구조가 설득력을 가지고 있다. 그러나 리니어 모터 시스템을 실제 구현하는데 있어서 극복해야 할 문제점들이 있다. 시험 모델에 적용 가능한 추력을 가진 리니어 모터가 상용화되지 않은 상황에서 라인센터의 고속화를 위해서는 경량의 구조설계가 필요하다. 경량화 구조 설계를 위해서는 두 가지 방법으로 요약할 수 있는데, 첫째 복합소재를 이용한 소재의 경량화이다. 둘째로는 새로운 개념의 구조 설계를 검토할 수 있다. 그러나, 채택의 제약성, 안정성 확보의 미비, 제작 비용상승 측면 등의 제반 사항을 고려하여야 하고, 현재 채택 가능한 리니어 모터의 추력 또한 만족할 수 없다. 최고의 부하가 걸리는 X 축의 경우, 부가되는 하중이 4.5 톤으로 70%이상의 경량화를 이루지 않으면 채택이 불가능한 상태이다. 그러므로 본 연구 과제의 목표수정이 불가피하다고 판단된다. 따라서, 시제품 제작에 있어서는 Table 2과 같이 사

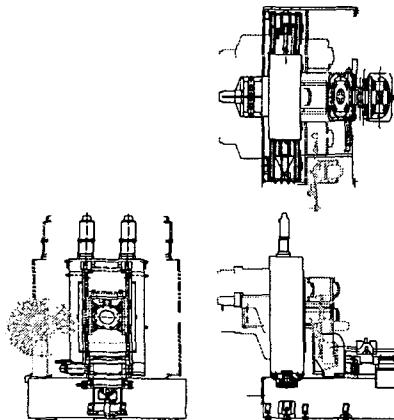


Fig. 1 Test model design of line center

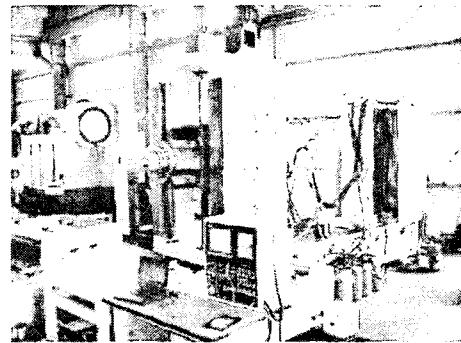


Fig. 2 Test model of Line Center in assembly

Table 1 Load weight of 3 axis structure

Item	X-axis(Kg)	Y-axis(Kg)	Z-axis(Kg)
Quill	600	600	600
Cradle	600	600	-
LM guide(8EA) Ball screw(3EA)	150	80	80
Column	2,600	-	-
Servo motor	150	50	-
Spindle	175	175	175
Etc.	250	150	100
Load Weight(Kg)	4,525	1,655	955
Feed rate(m/min)	45	50	60
Acceleration	1	1	1

Table 2 Change of specifications for line center

Item	Test model	1st model
Stroke	630× 630× 500	500× 500× 400
Tool Holder	HSK63E	HSK40E
Spindle peak Power	29Kw	15Kw

3. 라인 센터 시제품(Linear Motor 형)

3.1 리니어 모터 구동 방식의 구조 설계

볼 스크류 구동방식의 시험모델 제작 경험을 바탕으로 고속이송을 위한 리니어 모터를 장착한 축이 100m/min 의 급이송이 가능하고 35,000rpm 의 고속 회전하는 주축과 ATC, Index table 등의 주변장치들을 탑재한 라인 센터 시제품을 설계하였다.

Fig. 3 은 시제품 라인 센터의 배치도를 보인 것이다. 배면 컬럼(Back Column) 구조로 Z 축 방향의 강성을 강화하였으며, X 축 부하를 감소시켜 고속화에 대응하도록 설계하였다. 라인 전용 기계로의 성능 향상을 위해 기계의 폭을 가능한 작게 하여 1,700mm 이내에서 설계하였다. 또한, X 축 슬라이드 위에 Y 축 크래들(Cradle)을 놓고 크래들 안에 Z 축 퀼(Quill)을 겹쳐서 적층으로 구성하고 트랜스퍼 라인을 형성할 때 주축이동을 짧게 하고, 테이블과의 분리가 가능하도록 설계하였다^[1-3]. 배면 컬럼과 컬럼 그리고 베이스는 경량 설계 구조로서 강성을 충분히 유지하면서, 무게를 줄일 수 있도록 여러 곳에 불규칙적으로 구멍을 두거나 중간에 공간을 두는 형태로 구조물을 설계하였다.

Fig. 4 는 베드를 나타낸 것으로서 주베드와 서브베드가 결합되어 있다. 서브 베드 위에는 인덱스 테이블이 올려지고 공작물을 고정하거나 지지하는 역할을 한다.

Fig. 5 는 X 축 이송계의 구성도로서, 컬럼의 바닥면과 배면 컬럼에 LM 가이드 및 리니어 모터를 설치하도록 설계하고, 리니어 모터는 동기 제어도록 설계하였다.

Fig. 6 은 Y 축과 Z 축의 이송계에 대한 구성도로서, 먼저 Y 축의 경우는 컬럼의 양쪽 면과 크래들 사이에, Z 축의 경우는 크래들 측면과 퀼 사이에 리니어 모터를 마주보게 장착하여 장력이 상쇄되는 구조로 설계하였다. X 축과 마찬가지로 트윈 리니어 모터(Twin linear motor)를 구성하여 불균형(Unbalance)에도 대비도록 배치하였다. 특히, Y 축의 경우 퀼(Quill)이 가공 혹은 이송할 때에 안정성을 확보하도록 LM 가이드의 배치를 저 중심에서 적정 배치하여 설계하였다. 또한, Y 축의 경우 위치제어의 안정성과 운동정도의 향상을 위해 카운트 밸런스(Counter balance)를 장착하였는데, 공압 실린더를 사용한 공압 시스템을 구성하였다.

Fig. 7 은 시제품 모델의 ATC(Auto Tool Changer)를 나타낸 것인데, 고속화를 위한 리니어 모터 채택에 부응하기 위하여, 운전시 사이클 타임의 단축 또한 중요한 사안임을 알 수 있다. 따라서, 공구 교환의 시간을 단축시키고 고속에 걸맞은 ATC 가

요구된다. 이를 위하여 ATC 매가진의 상하운동과 공구 교환을 위한 암(Arm)이 없이 3 축 동시 제어로 빠른 공구 교환이 이루어 지도록 설계하였다

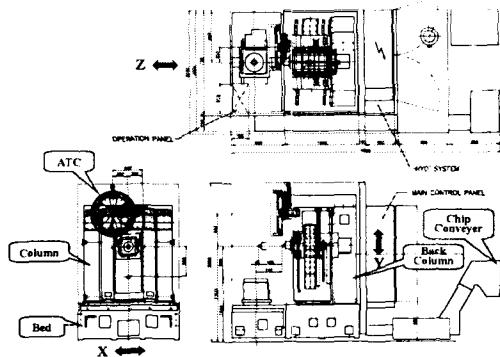


Fig. 3 Lay-out of 1st model for line center

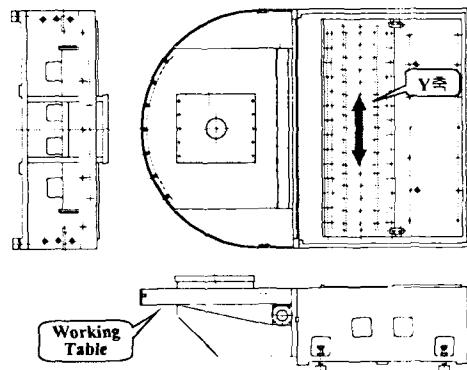


Fig. 4 Working table for 1st line center model

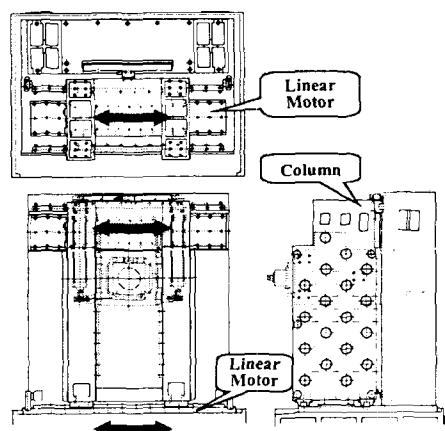


Fig. 5 X-axis feeding system of 1st Line Center

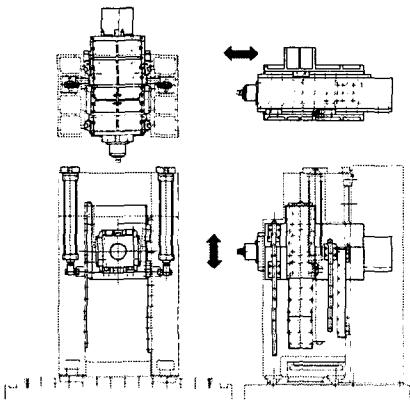


Fig. 6 Y, Z-axis feeding system of Line Center.

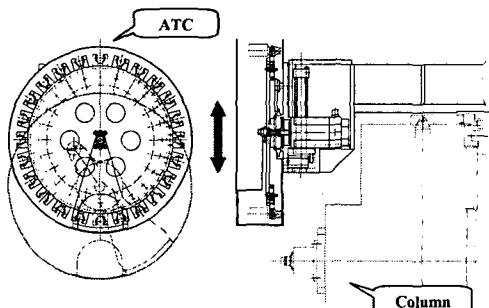


Fig. 7 ATC of Line Center.

2.2 시제품의 구조설계 고찰

시제품의 설계과정에서 여러 번의 설계변경이 있었다. 매 설계 변경 시마다 ANSYS 해석 프로그램을 이용하여 강성을 해석하고 최적의 조건이 되도록 설계하였다. Fig. 8은 구조물 해석결과로서 최종적으로 제작에 적용된 라인센터의 강성 및 중량을 나타낸 것이다. 따라서 현재 상용화된 저추력의 리니어 모터를 적용할 수 있게 되었다. Z 축 하중은 Y, X 축에 부가되는 하중에 지대한 영향을 미침으로 저추력의 리니어 모터 사용을 위해서는 Z 축을 구성하는 퀼, 크래들의 경량화가 요구된다. 경량 소재를 적용함에 있어서, 신소재의 적용보다는 제작의 용의성과 접근성을 감안할 때 설계 안정성과 세계 유수 메이커들이 사용하고 있는 소재들 중에서 알루미늄 합금이 유리할 것으로 판단된다. 알루미늄 합금 중에서도 주조성, 절삭성, 내열성, 내마모성이 좋은 알루미늄 합금을 선택해야 할 것이다. 그 특성을 보면 강성의 손실은 적으면서 중량이 크게 감소되는 소재가 타당함을 알 수 있다.

2.4 리니어 모터 선정

고속화를 위한 리니어 모터 구동방식은 커플링(Coupling)이나 볼 스크류(Ball screw)를 사용한 기계적인 전달요소가 아니므로 휨이나 진동이 발생하지 않으며, 궤적 추종 정밀도가 좋은 이송을 실현할 수 있다. 그러나, 리니어 모터의 사용으로 제작비용이 증가하고 내(耐)환경성 및 고속에 따른 고속 정밀 제어가 요구된다. 이를 위해 기계적인 오차와 환경변화에 따른 열, 진동 등에 기인하는 오차의 측정 및 보정 제어 시스템의 구성이 필요한데 이 또한 제작 비용의 상승 원인이 되고 있다. 그러므로, 라인 센터용 저 추력의 리니어 모터의 사용을 위해서는 하중 경량화에 대한 노력이 필요하다.

Item	수정 전	수정 후	변화량
Bed	X,Y,Z 0.567E-08	0.195E-08	-0.372E-08
	X 0.342E-08	0.143E-08	-0.119E-08
	Y 0.243E-08	0.496E-09	-0.184E-08
	Z 0.374E-08	0.111E-08	-0.263E-08
Column	X,Y,Z 0.776E-07	0.579E-07	-0.197E-07
	X 0.774E-07	0.580E-07	-0.194E-07
	Y 0.223E-08	0.169E-08	-0.540E-09
	Z 0.690E-08	0.480E-08	-0.210E-08
Back Column	X,Y,Z 0.947E-07	0.255E-07	-0.692E-07
	X 0.313E-07	0.165E-07	-0.157E-07
	Y 0.334E-07	0.103E-07	-0.231E-07
	Z 0.113E-06	0.284E-07	-0.846E-07
Item	수정 전	수정 후	변화량
Bed	2,193.00	3,180.50	-987.50
Column	988.69	1,127.32	-138.63
Cradle	272.54	272.54	0.00
Quill	170.13	170.13	0.00
Back Column	996.46	1,639.86	-643.40
Total	4,620.82	6,390.35	-1,769.53

Fig. 8 Stiffness and Load weight of 1st line center

Table 3 Load weight of 1st model

Item	X-axis(Kg)	Y-axis(Kg)	Z-axis(Kg)
Quill	125	125	125
Cradle	280	280	-
LM guide(10EA) Linear motor(6EA)	252	136	67
Column	700	-	-
Spindle	23	23	23
Etc.	50	25	10
Load Weight(Kg)	1,430	589	225

Table 4 Characteristics of Linear motor

축 명칭	X 축	Y 축	Z 축
냉각방식	수냉	수냉	수냉
최고속도[m/s]	3	4	4
최대추력속도범위[m/s]	1.2	2.2	2.2
연속추력[N]	7000	2400	1200
최대추력[N]	15500	6000	3000
자기흡입력[N]	45000	18000	9000
Coil Slide 자중[kg]	48	23	12

Table 3 은 리니어 모터가 장착된 라인 센터의

설계에서 3 축에 부가되는 하중을 나타낸 것이다. Table 2에는 리니어 모터 선정자료를 정리한 것이다. 이를 바탕으로 선정한 각 축의 리니어 모터 특성은 Table 4에 나타내었다.

리니어 모터는 각 축마다 두개씩 장착하고 리니어 모터마다 리니어 스케일을 장착하여 정밀 운동 제어가 가능하도록 구성하였다. 아울러 볼스크류 구조와 달리 기본적인 자기슬라이드의 면적이 지지 혹은 설치면적이 되어 기계의 구조 크게 되는 단점과 자기 흡입력으로 인한 변형 혹은 변위에도 주안점을 두어 설계시 반영하였다. 그리고, 코일 슬라이드에서 발생되는 온도상승으로 인한 열 특성에 대응하기 위하여 물을 이용한 냉각 시스템을 구성하였다.

Z 축 하중은 X, Y 축에 부가되는 하중의 지대한 영향을 미침으로 저 추력의 리니어 모터 사용을 위해 Z 축 설계시에 퀼파 크래들의 경량화에 주안을 두었다. 한편, 본 연구에서는 구조물의 경량화를 위해 경량소재를 발굴하여 적용하였다. 구조물 경량화를 소재 선택에 있어서 신소재보다는 제작이 용이성 및 접근성을 감안할 때 세계 우수 메이커들이 사용하고 있는 알루미늄 합금이 유리할 것으로 판단된다.

2.3 리니어 모터 제조사와의 기술 검토

라인 센터 구조물을 제작하기에 앞서 리니어 모터 생산 회사(FANUC)와 협조하여 기술적인 검토 거친 결과 Fig. 9 와 같은 결론 얻었다. 카운터 밸런서의 경우 고속 응답을 고려할 때 유압보다는 공압이 유리한 것으로 나타났으며, Y 축 모터의 경우 카운터 밸런서가 없는 상태를 기준으로 하여 선정되었다.

● 기술 검토 사항			● Maker 의견		
	X	Y	X	Y	Z
유도스트로크 (mm)	500	500	500	500	400
이동방법(수평, 수직)	수평	수직	수평	수직	-
이동률(교적률포함)(kg)	1,500	600	250	-	-
수즈 캠 베리스의 유무(증류)	-	유	있	-	-
테이블 치수(마이크로, 구름, 절연)	구름	구름	구름	-	-
마찰계수	0.02	0.02	0.02	-	-
가로(Pass)Slide, 자석부	Slide	Slide	Slide	-	-
Slide 폐지(드록, 칙워, 별별, 대합)	벽	덮	대	합	단
Motor 회전수(회전수X축) mm	1,440X260	840X260	720X210	-	-
ON/OFF설정단위(mm)	0.001	0.001	0.001	-	-
교인 속도(mm)	100	100	100	-	-
가속도(G)	1.5	1.5	1.5	-	-
밸브온/밸브오프 (mm/s)	40	40	40	-	-
서보모터 부하トル크 (N)	1,212	302	233	-	-
서보모터 부하トル크 (N)	24,674	9,475	4,261	-	-
제어모터 부하トル크 (N)	1,000	1,000	1,000	-	-
제어모터 부하トル크 (N)	1,400	1,400	1,400	-	-
교인 속도(회전수)/mm	15	15	15	-	-
유도교정 스트로크 (mm)	500	500	400	-	-
유도교정 스트로크 (mm)	15,000C/3	3,000B/4	3,000B/4	-	-

Fig. 9 The check lists of maker for line center

2.4 라인 센터 구조물

Fig. 10 은 제작중인 라인센터 시제품의 베드 (Main Bed)를 보인 것이다. 베드 뒤쪽으로 백컬럼 (Back column)이 놓이고 백컬럼 앞으로는 Y 축과 Z

축을 지지할 컬럼이 올라온다. 컬럼을 지지하고 이동하기 위해 LM 가이드와 리니어 모터가 장착되고 베드 앞쪽에는 작업 테이블(Index table) 지지를 위한 보조 베드가 설치된다. 보조 베드 안쪽에는 칩(Chip) 제거를 위한 스크류가 있어서 칩을 사이드로 밀어낼 수 있도록 구성된다.

Fig. 11 은 백컬럼을 나타낸 것인데 X 축 이송시스템이 병렬형이므로 상부에는 LM 가이드와 리니어 모터가 장착된다. Fig. 12 는 컬럼을 보인 것으로 Y 축 및 Z 축을 지지한다. Fig. 13 은 크래들을 나타낸 것인데 좌우로 LM 가이드 및 리니어 모터가 장착되고 월(Quill)이 결합되어 Z 축을 형성한다. Fig. 14 는 퀼을 보인 것으로 고주파 스픈들이 장착된다.

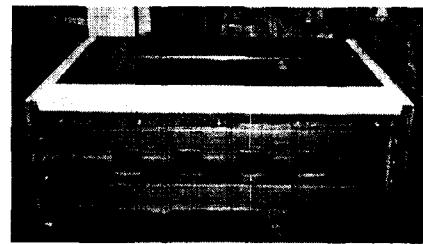


Fig. 10 Main bed for 1st line center

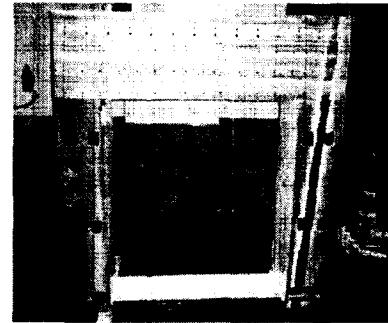


Fig. 11 Back column for 1st line center

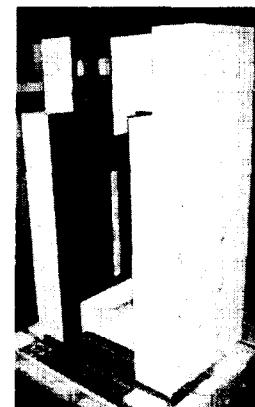


Fig. 12 Column for 1st line center

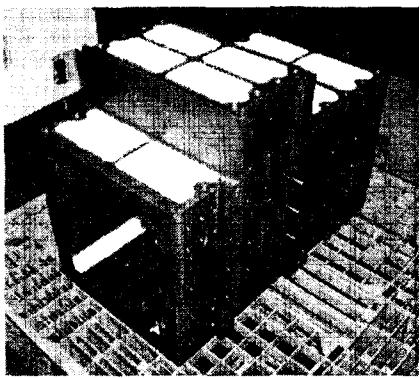


Fig. 13 Cradle for 1st line center



Fig. 14 Quill for 1st line center

2.5 리니어 모터

공작기계 이송계의 이송에 있어서 볼 스크류의 이송한계를 극복하고 초고속 이송을 목적으로 리니어 모터를 장착하였다. 반도체 및 LCD 장비에는 리니어 모터가 장착된 이송계가 보편화 되어있다. 그러나 공작기계에 리니어 모터를 적용한 것은 유럽 및 선진국의 경우 적용단계가 끝나고 사용단계에 이르렀지만 국내에서는 아직 적용 초기단계에 있다. 그러므로 리니어 모터를 이용한 공작기계 이송계 시스템은 선진 기술이라 할 수 있다. Fig. 15~17 은 개발된 라인 센터에 적용될 리니어 모터를 보인 것이다

3. 요약

본 연구는 초고속 지능형 라인센터 개발에 관한 것으로서 1 차 년도 볼 스크류 방식의 시험모델에 대한 종합 검토 결과를 바탕으로 2 차 년도에는 리니어 모터를 채택한 라인센터의 시제품 설계에 있어서 고속화를 위한 방안을 모색하고 컴팩트한 경량의 구조를 지향하는 라인 센터 구조물을 설계하였고, 3 차 년도에는 라인센터의 제작 및 종합적인 시험 평가를 통하여 상품화 모델을 정립하고자 하였다.



Fig. 15 Linear motor set(X) for 1st line center

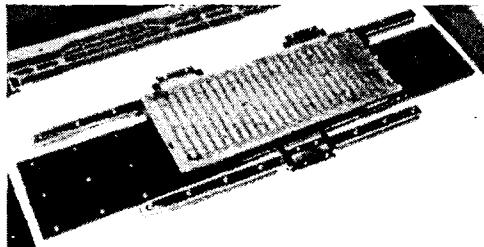


Fig. 16 Linear motor set(Y) for 1st line center

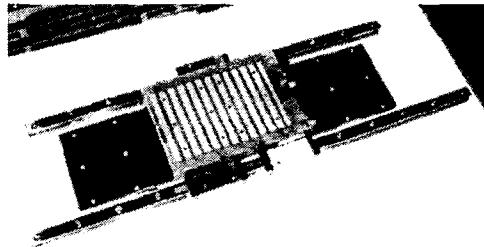


Fig. 17 Linear motor set(Z) for 1st line center

참고문헌

1. M. Yoshimura, "Design Optimization of Machine tool Dynamics Based on an Explanation of Relationships between Characteristics(1st Report)", JSPE, Vol. 53, No. 4, pp. 601-606, 1987.
2. M. Yoshimura, Y. Takeuchi, K. Hitomi, "工作機械構造物の多層最適設計"日本機械學會論文集(C 編), 50 卷, 459, pp. 2210-2218, 1984.
3. 竹内勝彦 外 4 名, 고속 절삭 가공기, 월간 기계설계 제 3 장, 6 월호, pp. 111-115. 2000.