

리니어 모터 이송계와 고속 주축을 적용한 초고속 라인 센터 개발

문홍만* (성광정기㈜), 백영종(성광정기㈜), 조현택(성광정기㈜), 최대봉(한국기계연구원)

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

H. M. Moon, Y. J. Back, H. T. Cho (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), Ceramic bearing spindle (세라믹 베어링 주축)

1. 서론

산업사회가 다양화 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·고정밀 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 라인

에서 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 1단계 1, 2, 3차 년도에 이어 2단계 1차 년도에 수행된 내용을 중심으로 서술하였다.

1단계 1차 년도에는 볼 스크류 방식을 채택한 시험 모델의 주요 사양 결정 및 운용 기술을 연구하여 주축 회전수가 20,000rpm인 라인 센터를 설계하였다. 2차 년도에는 1차 년도에 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 차 년도에는 시험모델을 제작 및 구동하고 보완 및 개선 사항을 고찰하였으며, 2 단계 1 차년도에는 시제품을 보완 및 개선함으로써 종합적인 시험 평가를 통하여 상품화 모델을 정립하였다.

2. 라인 센터 시험 모델(Ball Screw 형)

2.1 시험 모델의 구성

1 차 년도에 설계된 시험 모델을 2 차 년도에 제작하였다. Fig. 1 은 시험 모델의 구성도를 나타낸 것이다. 주요 구조물은 강성의 안정성 확보를 위해 덕테일(Ductile) 주물로 제작되었으며, 이송계는 볼스크류(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 급 가속이 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. 진용성 향상을 위해 이동체와 기계의 쪽을 가능한 작게 설계하였다. 또한, X 축 슬라이드 위에 Y 축 크래들(Cradle)을 놓고 크래들 안에 Z 축 퀴(Quill)를 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

시험모델은 고속화에 있어 다소의 불합리함을 가지고 있는데 Table 1 에서 나타내었듯이 X, Y 축에 부가되는 하중이 큰 관계로 일정 수준이상(속도 100m/min, 가속도 1G 이상)의 고속화를 구현하기에는 어려움이 있다. 따라서 고속 이송을 위해 리니어 모터를 장착한 이송계 구조가 설득력을 가지고 있다. 시험 모델에 적용 가능한 추력을 가진 리니어 모터가 상용화되지 않은 상황에서 라인센터의 고속화를 위해서는 경량화의 구조설계가 필요하다. 경량화 구조설계를 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 불가피

하다고 판단된다. 따라서, 시제품 제작에 있어서는 Table 2 과 같이 사양을 변경하여 진행하였다.

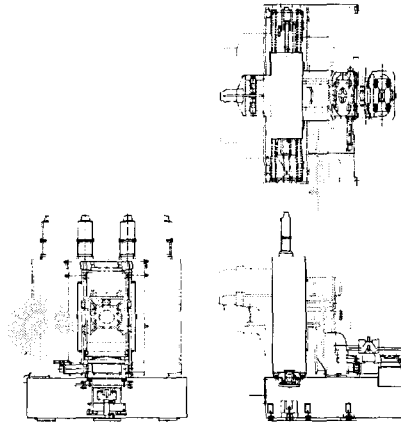


Fig. 1 Test model design of line center

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	13Kw

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 주변장치 들을 탑재한 라인 센터 시제품을 설계하였다.

Fig. 2 는 시제품 라인 센터의 배치도를 보인 것

이다. 배면 칼럼(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 퀴(Quill)를 겹쳐서 적층으로 구성하고 트랜스퍼 라인을 형성할 때 주축이동을 짧게 하고, 테이블과의 분리가 가능하도록 설계하였다. 배면 칼럼과 칼럼 그리고 베이스는 경량 설계 구조로서 강성을 충분히 유지하면서, 무게를 줄일 수 있도록 여러 곳에 불규칙적으로 구멍을 두거나 중간에 공간을 두는 벌집형 구조의 형태로 구조물을 설계하였다. Fig. 3은 X 축 이송계의 구성도로서, 칼럼의 바닥면과 배면 칼럼에 LM 가이드 및 리니어 모터를 설치하도록 설계하고, 리니어 모터는 동기 제어되도록 설계하였다. Fig. 4은 Y 축과 Z 축의 이송계에 대한 구성도로서, 먼저 Y 축의 경우는 칼럼의 안쪽 면과 크래들사이, Z 축의 경우는 크래들 측면과 퀴 사이에 리니어 모터를 마주보게 장착하여 장력이 상쇄되는 구조로 설계하였다. X 축과 마찬가지로 트윈 리니어 모터(Twin linear motor)를 구성하여 불균형(Unbalance)에도 대비토록 배치하였다. 특히, Y 축의 경우 퀴(Quill)가 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. 5은 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 단축 시키고 고속에 걸맞은 ATC가 요구된다. 이를 위하여 ATC 매가진의 상하운동과 공구 교환을 위한 암(Arm)이 없이 3 축 동시 제어로 빠른 공구 교환이 이루어 지도록 설계하였다.

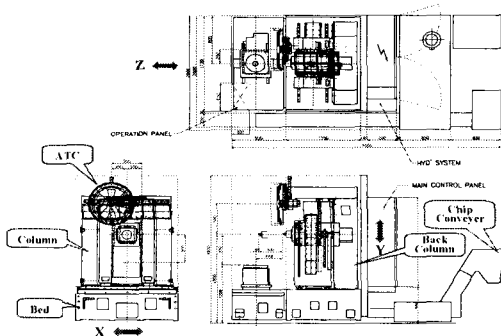


Fig. 2 Lay-out of 1st model for line center

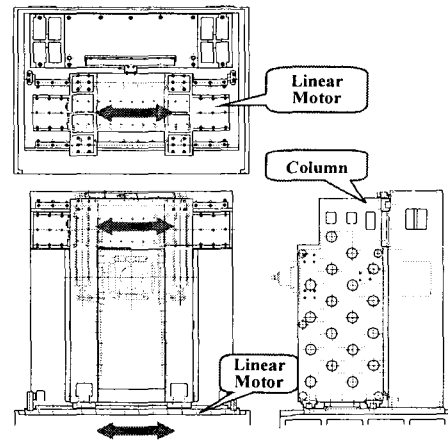


Fig. 3 X-axis feeding system of 1st Line Center

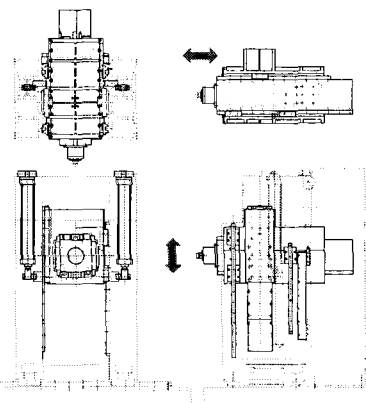


Fig. 4 Y, Z-axis feeding system of Line Center.

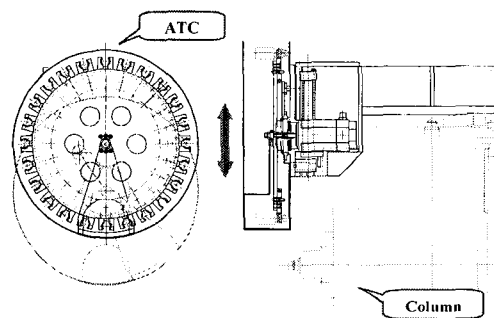


Fig. 5 ATC of Line Center.

3.2 시제품의 구조설계 고찰

시제품의 설계과정에서 여러 번의 설계변경이 있었다. 매 설계 변경 시마다 ANSYS 해석 프로그램을 이용하여 강성을 해석하고 최적의 조건이 되도록 설계하였다. Fig. 6은 구조물 해석결과로서 최종적으로 제작에 적용된 라인센터의 강성 및 중량을 나타낸 것이다. 따라서 현재 상용화된 저 추력

의 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 퀴, 크래들의 경량화가 요구된다. 경량 소재를 적용함에 있어서, 신소재의 적용보다는 제작의 용이성과 접근성을 감안할 때 설계 안정성과 세계 우수 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.

강성 해석 결과	수정 전				수정 후				변화량
	Item	X,Y,Z	0.567E-08	0.195E-08	0.567E-08	0.195E-08	-0.372E-08		
Bed	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					
	X,Y,Z	0.776E-07	0.579E-07	-0.197E-07					
Column	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					
	X,Y,Z	0.947E-07	0.255E-07	-0.692E-07					
Back Column	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					
	X,Y,Z	0.947E-07	0.255E-07	-0.692E-07					

중량	수정 전		수정 후		변화량
	Item	2,193.00	3,180.50	-987.50	
Bed	988.69	1,127.32	-138.63		
Column	272.54	272.54	0.00		
Cradle	170.13	170.13	0.00		
Quill	996.46	1,639.86	-643.40		
Back Column	4,620.82	6,390.35	-1,769.53		
Total					

Fig. 6 Stiffness and Load weight of 1st line center

3.3 리니어 모터 선정

고속화를 위한 리니어 모터 구동방식은 커플링(Coupling)이나 볼 스크류(Ball screw)를 사용한 기계적인 전달요소가 아니므로 웜이나 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.

Table 3 은 리니어 모터가 장착된 라인 센터의 설계에서 3 축에 부가되는 하중을 나타낸 것이다. 이를 바탕으로 선정된 각 축의 리니어 모터 특성은 Table 4 에 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 구조가 크게 되는 단

점과 자기 흡입력으로 인한 변형 혹은 변위에도 주안점을 두어 설계 시 반영하였다. 그리고, 코일 슬라이드에서 발생하는 온도상승으로 인한 열 특성에 대응하기 위하여 물을 이용한 냉각 시스템을 구성하였다.

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

축명칭	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

Z 축 하중은 X, Y 축에 부가되는 하중의 지대한 영향을 미침으로 저 추력의 리니어 모터 사용을 위해 Z 축 설계시에 퀴(Quill)와 크래들(Cradle)의 경량화에 주안을 두었다. 한편, 본 연구에서는 구조물의 경량화를 위해 2 단계에는 경량소재를 발굴하여 적용할 것이다. 구조물 경량화를 소재 선택에 있어서 신소재보다는 제작이 용이성 및 접근성을 감안할 때 세계 우수 메이커들이 사용하고 있는 알루미늄 합금이 유리할 것으로 판단된다.

4. 라인 센터 시제품의 성능평가

4.1 고속 주축의 회전수 측정

라인센터 시제품에 적용된 고속 주축은 FAEMAT사의 FAI-120CUV 제품으로 세라믹 볼 베어링 타입이며 Max Speed는 40,000 rpm 까지 구동 가능한 제품이다. 회전수 측정은 비접촉 회전 게이지인 HT-4100(Measuring Range:30 rpm ~ 50,000rpm, Measuring Accuracy:±4rpm)을 이용하여 주파수대역폭이 1,000 Hz 일때 30,000 rpm, 1,334 Hz 일때 40,000 rpm 까지 측정하였다. Fig. 7 은 Power 에 따른 Torque 선도

를 나타낸 그래프이며 Power 는 13 kw, Tension 은 350V 로 동일하고 30,000 rpm 일때 Torque 는 4 Nm, 40,000 rpm 일때 3 Nm 을 나타내고 있다.

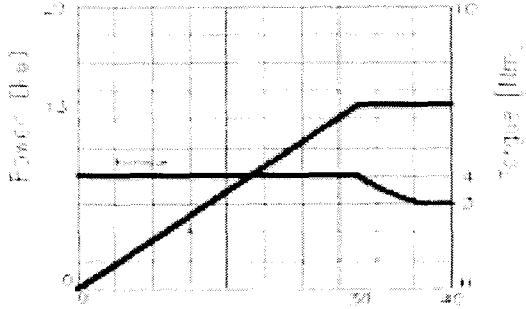


Fig. 7 Power and Torque Diagram of Spindle

4.2 고속 주축의 열변형 오차 측정

측정은 주축의 Z 축 샤프트(Shaft)의 변위와 주축 하우징(Housing) 정면과 상대변위, 하우징의 인장은 크래들(Cradle) 정면에서의 열변위, 주축의 Y 축 방향은 외부 테이블에서 열변위를 각각 측정하였다. 주축은 내장형 주축이고 오일(Oil) - 에어(Air) 윤활 방식으로써 모터 및 베어링 외부 자켓에 오일을 순환시키는 구조이다.

주축의 안정화 및 최적 조건을 분석하기 위해 단계적으로 실험을 수행한 결과 입출력 배관의 길이 5m, 오일 토출 간격 3 min, 필요 공기압 1 bar, 자켓에 공급되는 쿨링(Cooling)유의 유량 1.5 l/min, Cooling Unit System 을 실온 동조형과 유사하게 셋팅(Setting)하기 위해서 설정 온도를 대기온도 기준으로 +1℃ ~ +2℃ 정도로 설정하는 것이 최적상태로 분석되었다.

Fig. 8 은 주축이 최적 안정화된 후 각 부위별로 측정된 온도 측정 데이터(Data)이다. 온도 상승의 측정은 단계적으로 35,000 rpm 까지 회전수를 변화시키면서 온도 및 변위가 안정화 될 때까지 측정하였다. 30,000 rpm 에서 실온대비 2℃ 증가하였고, 35,000rpm 에서는 Cooling Unit 의 설정 온도 2℃로 셋팅 된 값에 따라 2℃사이의 변화 폭을 나타내고 있다.

Fig. 9 는 20,000 rpm 구동 시 측정된 열변형 오차를 나타낸 것이다. 전체 변위 측정 결과는 Z 축 방향의 주축 샤프트(Shaft) 부분은 20,000rpm 에서 12 μm, 30,000rpm 에서 14 μm, 35,000rpm 에서 16 μm으로 변화하였으며 하우징(Housing) 부위는 35,000rpm 에서 약 12 μm정도의 변위량이 측정되었다. 대기온도에 따른 온도차와 주축 자체의 발생되는 온도차에 보상 알고리즘을 적용한다면 8 μm 이내에서 관리가 가능하게 될 것으로 보인다.

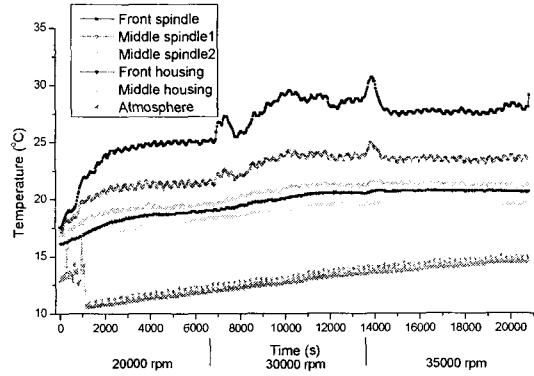


Fig. 8 Temperature Measurement of Spindle

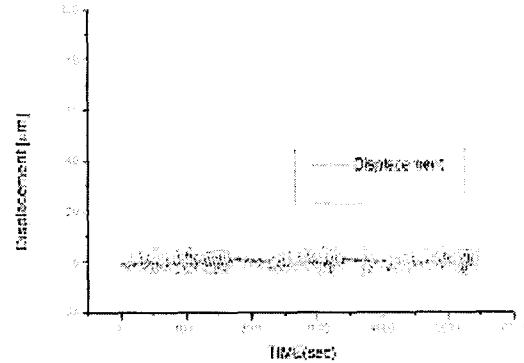


Fig. 9 Displacement Measurement of Spindle

4.3 X, Y, Z 축의 급이송 속도 측정

각 축의 급이송 속도 측정은 Fanuc Servo Guide 를 운용하여 NC 지령 시 그 결과를 분석하였다.

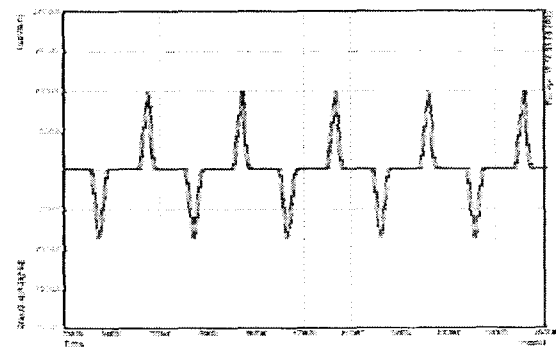


Fig. 10 Rapid Feed Velocity Measurement of Z-axis

Fig. 10 은 Z 축의 급이송 속도를 측정 한 결과를 벨(Bell)형 함수로 나타내었다. 이동거리가 250mm 일때 급이송 속도는 100 m/min 으로 측정되었으며, 그때의 가속도는 1.5g 로 분석되었다. 또한 Y 축, X

축은 HRV2(High Response Velocity) 제어 방식으로 각각 80m/min 에서 90m/min 까지의 급이송 속도가 측정되었다.

4.4 X, Y, Z축의 절삭이송 속도 측정

각 축의 절삭이송 속도 측정은 Fanuc Servo Guide 를 운용하여 NC 지령 시 그 결과를 분석하여 벨(Bell)형 함수로 나타내었다.

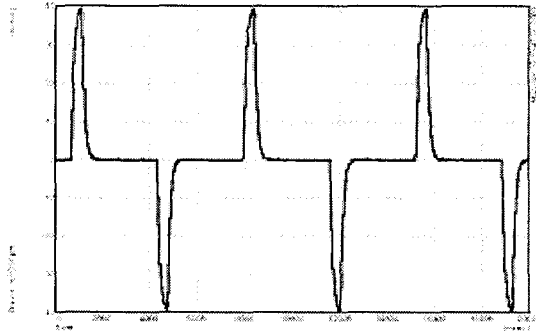


Fig. 11 Cutting Feed Velocity of X-axis

Fig. 11 은 X 축의 절삭이송 속도를 측정된 결과이다. 이송거리 350mm 구간에서 절삭 이송 속도는 40m/min, 그때의 가속도는 0.51g 로 분석되었다. 또한 Y 축, Z 축의 절삭이송 속도도 40m/min 으로 측정되었다.

4.5 이송계의 원호 보간 정밀도

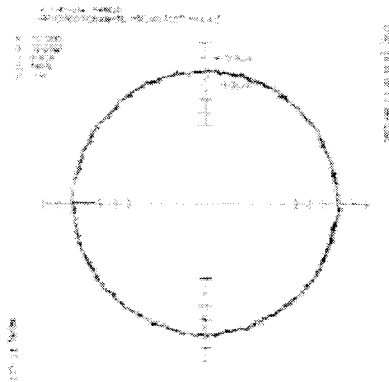


Fig. 12 Circular Deviation Measurement

Fig. 12 는 이송축의 원호보간 시 정밀도를 측정된 결과이며 XY 평면에서 R10 에 대하여 이송속도 100mm/min 으로 NC 지령하여 Circular Deviation 이 $\pm 3.5 \mu\text{m}$ 로 분석되었다.

4.6 이송계 위치 정밀도 측정

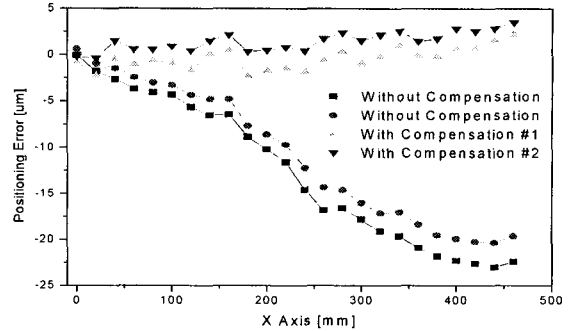


Fig. 13 Positioning Error Measurement of X-axis

전체 이송계에는 분해능이 $0.1 \mu\text{m}$ 인 리니어 스케일을 장착하였으며, X 축의 반복 정밀도 측정은 Fig.13 에서 보는 바와 같이 이송거리 500mm 간격 내에서 측정 하였다. #1, #2 의 그래프는 Positioning Error 보정 전의 데이터로써 약 $\pm 10 \mu\text{m}$ 이다. 보정 후의 선도에는 약 $\pm 1 \mu\text{m}$ 정도의 수치 데이터를 보여 주고 있다.

5. 요약

본 연구는 초고속 지능형 라인센터 개발에 관한 것으로서 1 단계 1 차 년도의 볼 스크류 방식의 시험모델에 대한 종합 검토 결과를 바탕으로 2 차 년도에는 리니어 모터를 채택한 라인센터의 시제품 설계에 있어서 고속화를 위한 방안을 모색하고 콤팩트(Compact)한 경량의 구조를 지향하는 라인 센터 구조물을 설계하였고, 3 차 년도에는 라인센터를 제작하였다. 2 단계 1 차년도에는 종합적인 시험 평가를 통하여 상품화 모델을 정립하였다. 또한, 2 단계에서는 Honeycomb 형태의 구조물을 설계 및 구조해석 후 라인센터 시제품 2 호기를 제작 할 것이다.

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, 월간기계 설계 제 3 卷, 6 월호, pp. 111-115, 2000.