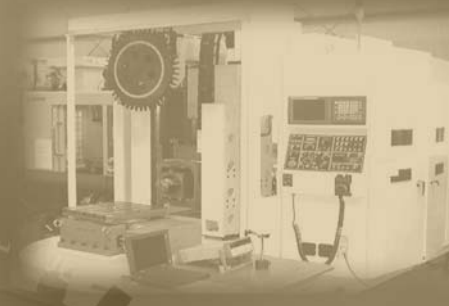
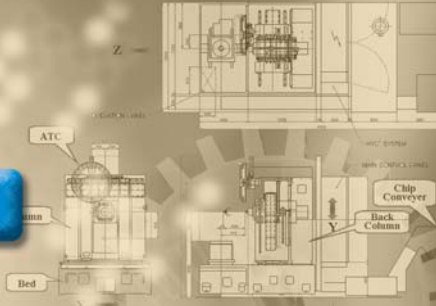


# 특 집



## 초고속 지능형 라인 센터 개발



조 현 택

□성광정기(주)연구소  
연구소장/상무이사  
□skem1@unitel.co.kr



문 홍 만

□성광정기(주)연구소  
□hong10000@hanmail.net

관심  
분야

■국내 공작기계 산업의 활성화 및  
수출 증대에 관한 기술적인 연구

■국내의 신기술의 활용도와 신기술의 연구

### 1. 서 론

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 비용절감은 물론 고속·고정도 가공에 대한 요구가 확대되고 있다. 이러한 요구가 근래에는 세계적으로 증가추세에 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 라인센터(Line center)에 대한 관심이 높아지면서 고속 가공을 위한 기본 구조물과 가공기술을 포함한 시스템 구성에 대한 연구가 진행되고 있다.

### 2. 연구 개발 목표 및 연구과제의 개요

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 산업자원부에

서 주관하는 “고속·지능형 가공시스템의 개발 연구”의 제3과제인 “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 시험 모델에서 얻은 기술을 바탕으로 라인 센터 시제품을 설계하였다. 3차 년도에는 시험모델을 제작 및 구동하고 보완 및 개선 사항을 고찰하였다.

이어서 당해 년도인 2단계 1차 년도에는 시제품 1호기의 제작과정에서 얻은 노하우(know-how)를 바탕으로 라인 센터 시제품2호기의 설계 방향을 결정하였다. 시제품2호기는 과제의 최종 개발 목표(주축 회전수 60,000rpm, 급이송속도 150m/min)에 부합되도록 설계되었으며 충분한 성능의 유닛(Unit)들이 응용되었다.

### 3. 연구 내용

#### 3.1 Linear Motor 선정에 관한 연구

1단계에서 개발한 라인센터 시제품 1호기에 리니어 모터를 적용함으로써 그 결과를 분석 및 종합적인 검토를 수행하여 시제품 2호기에 적용, 리니어 모터의 필요 요구 특성과 적용상의 문제점을 검토하여 세부적인 구조물을 설계하였다. 리니어 모터를 동작기계에 적용하기 위한 필요 요구 특성을 살펴보면 첫째, 서브  $\mu\text{m}$  ~ 수  $\mu\text{m}$ 의 위치결정이 가능하고 절삭저항 등의 외란에 대한 지시된 위치를 유지할 수 있을 것. 둘째, 이동체를 고속, 고 가속으로 움직일 수 있는 충분한 추력을 가질 것. 셋째, 이송속도의 난조 없이 동시 2축 또는 3축 가공을 하여 자유곡면을 높은 정밀도로 창생할 수 있을 것. 넷째, 쿨런트 미스트 분진에 대해 내환경성이 있을 것. 다섯째, 기계본체

에 열이 전달되지 않는 구성을 실현할 수 있을 것. 또한, 리니어 모터 적용의 문제점을 들면 모터의 추력이 상당히 약하고 제어계의 높은 게인화 및 방진보호가 필요, 자기흡인력에 의한 구조물 변형이 발생하며 중력축에 카운트 밸런스 설치와 보조적인 제어 및 안정장치가 필요하다.

리니어 모터 적용을 위해 각 축에 부과되는 중량을 검토하였다. 시제품 1호기에 적용된 이송체의 중량을 검토한 결과 표 1에서 나타난 중량검토 사항을 시제품 2호기에 적용할 경우 리니어 모터의 추력을 높인다 하여도 실제 적용할 수 있는 리니어 모터의 추력이 약하므로 적용이 불가능 하였다. 따라서 본 연구에서는 X, Y, Z축에 부가되는 하중이 큰 관계로 급이송속도 120m/min ~ 150m/min의 고속화를 구현하기 위해서 중량 감소 방안을 연구 고찰하였다.

표 1 ~ 표 3은 리니어 모터, LM GUIDE, 주축, 전선, 브라켓 등의 중량을 포함한 결과이다. 표 2는 주철기준으로 설계상 20%의 중량을 감소한 결과이고 표 3은 Quill에 알루미늄 합금 적용, Column에 Honey comb sandwich 구조를 적용한 중량 해석 결과이다.

따라서, 경량화 구조설계 방안으로는 두 가지로 요약하면 첫째, 소재의 경량화로 복합소재를 채택하고 둘째, Steel 구조자체의 경량화를 검토하였고 중량 결과를 토대로 리니어 모터의 추력을 검토하여 선정하였다. 경량 소재를 적용함에 있어서 알루미늄 합금 중에서도 구조성, 절삭성, 내열성, 내마모성이 우수하고 강성의 손실은 적으면서 중량감소가 용이한 소재를 선택하였다. 표 4는 리니어 모터의 선정 결과이며 X축은 병렬구조 Y, Z축은 대향 구조로 선정하여 설계하였고, 카운트 밸런스의 경우 고속응답 시에 공압 시스템이 유리한 것으로 판단되었으며 중력축인 Y축의 리니어 모터 선정은 공압 실린더 내의 공기압의 특성을 고려하여 추력을 검토하였다. 또한 방진보호 대책으로 슬라이드 커버의 취부 공간을 고려 설계하였고, 자기흡인력에 의한 구조물 변형의 대책으로 ANSYS(위탁과제 : 창원대학교)로 구조해석 후 설계수행 하였다.



표 1. 시제품 1호기의 3축 부하하중

Item(kg)	X-axis	Y-axis	Z-axis
Quill	220	220	220
Cradle	452	452	-
Column	1322.5	-	-
Load Weight	1994.5	672	220

표 2. 시제품 2호기의 3축 부하하중(20%중량감소)

Item(kg)	X-axis	Y-axis	Z-axis
Quill	183	183	183
Cradle	388	388	-
Column	971	-	-
Load Weight	1542	571	183

표 3. 시제품 2호기의 3축 부하하중(특수소재 기준)

Item(kg)	X-axis(kg)	Y-axis(kg)	Z-axis(kg)
Quill(AL 합금)	183	183	183
Cradle	388	388	-
Column(Honeycomb구조)	751	-	-
Load Weight(kg)	1322	571	183

표 4. FANUC Linear Motor 선정 결과 및 자료

축명칭	단위	X	Y	Z
모델 사양	-	17,000 S/2	9000 S/2	4500 S/2
연속 추력	N	6,800	3,600	1,800
최대 추력	N	17,000	9,000	4,500
최고 속도	m/sec	4	4	4
자기 흡인력	N	51,000	27,000	13,500

### 3.2 고속 주축의 선정에 관한 연구

라인센터에 적용 가능한 SPINDLE은 라인작업 중 만나게 될 다양한 작업용 소재에 대응하고 그 특성상 중 절삭 및 정삭 보링작업에도 그 기능을 충분히 수행 하여야 하는 기계적 특성을 감안하여 고속에서 우수한 생산성을 실현할 수 있고, 고 정밀도와 높은 절삭 속도를 요구하는 고 부가가치의 공정을 높은 생산성으로 실현할 수 있어야 한다. 따라서 고속 고풍력 주축으로 60,000rpm의 10kw의 출력을 발휘하는 SPINDLE을 선정하였다.

고속 주축의 선정은 FAEMAT사의 고속 주축을 선정하였고, 자기베어링 타입의 고속 주축은 외관 및 출력 특성을 고려하여 70,000rpm급의 고속 주축을 성립(주)에 요청 진행 중이다. 선정된 주축의 사양은 SPEED : 60,000 [rpm], FREQUENCY : 333 ~ 2000 [Hz], POWER : 10 [KW], TORQUE : 1.6 [Nm], BEARING TYPE : CERAMIC BALL Type, LUBRICATION : OIL- AIR으로 2차 년

도에 라인센터 시제품 2호기에 조립될 것이다.

### 3.3 시제품 2호기 구조물 경량화 방안

현재 고속회전 고속이송의 실현을 위해 주요공작기계 Maker에서는 종래의 구조물과 동일한 또는 그 이상의 정강성 및 동강성을 유지하면서 열변형이 작은 소재를 사용하여 운동체의 관성력을 줄이는 것을 목표로 단위 체적당의 질량을 감소시키면서 비강성 및 비 탄성율을 올리기 위한 연구가 진행되고 있다.

현재의 경량화 방안으로 첫 번째로는 현재의 부재인 Steel을 사용하여 단면의 형상에 따른 단면 2차 모멘트 값의 증대를 통한 비강성의 증가를 도출해 내는 방법이고 다른 하나는 현재와는 다른 신소재나 복합소재를 사용하여 비강성을 높이는 방안이 되겠다. 1차 구조물 설계에 있어서 경량화 방안으로 첫째, Quill은 Steel소재로 하여 Rib의 두께를 줄여서 중량을 약 20%~25% 정도 감소시킬 수 있었다. 둘째, Cradle은 Steel을 적용하여 설계하여 중량을 감소시켰다. 셋째, Column은 현 Steel소재를 적용한 구조와 Honeycomb Sandwich 구조의 두 가지 경우를 검토하였다.

#### 3.3.1 Quill의 경량화

Quill에 Steel소재를 적용한 구조를 선정하였으며 Rib 및 불필요한 요소를 제거하여 중량을 시제품 1호기와 대비하여 약 20% ~ 25%정도로 감소시켰다. Quill의 선단에는 고속 주축이 장착되고 측면에는 Linear Motor가 장착되는 구조로 설계하였다.

#### 3.3.2 Cradle의 경량화

Cradle에 AL합금을 적용하여 설계를 진행하였다. 표 5~6은 재료의 등가 설계치와 비강성을 조사한 내역이다. 재료의 물성치를 분석하면 강은 정적 하중에서 높은 강성을 가지며 인장, 비틀림, 굽힘 하중에서 높은 비강성을 가진다. 주철은 강에 비해 높은 감쇠성을 가지며 마찰 특성이 양호하다. 따라서 강은 비강성이 가장 크고, 주철은 강에 비해 비강도가 절반 수준으로 종탄성 계수가 작다.





표 5. 소재에 따른 등가 설계

구 분	영 른	질 량	밀 도	비강도	등 가 질량비	등 가 부피비	등 가 설계강도
알루미늄	390.0	3.980	30.980	98.0	0.27	0.14	7.08
알루미늄(87%)	235.0	3.400	3.400	39.1	0.38	0.33	3.01
지르콘(PSZ)	200.0	6.050	6.050	33.1	0.79	0.82	1.22
저탄소강	206.0	7.860	7.860	26.2	1.00	1.00	1.00
회주철	106.0	7.130	7.130	14.9	1.76	3.43	0.29

표 6. 재료의 비강성 조사표

재 료	E(종탄성계수)kgf/cm <sup>2</sup>	r(비중)kgf/cm <sup>3</sup>	E/r(비강성)	P(인장강도)kgf/mm <sup>2</sup>
저 탄소강	2.0 x E <sup>6</sup>	7.8 x E <sup>-3</sup>	2.56 x E <sup>3</sup>	37~45
중 탄소강	2.1 x E <sup>6</sup>	7.8 x E <sup>-3</sup>	5.69 x E <sup>3</sup>	48~62
합금강	2.1 x E <sup>6</sup>	7.8 x E <sup>-3</sup>	2.69 x E <sup>3</sup>	100~
회주철	1.2 x E <sup>6</sup>	7.2 x E <sup>-3</sup>	1.67 x E <sup>3</sup>	-
두랄루민	0.75 x E <sup>6</sup>	2.8 x E <sup>-3</sup>	2.68 x E <sup>3</sup>	-
주강	2.15 x E <sup>6</sup>	7.85 x E <sup>-3</sup>	2.68 x E <sup>3</sup>	35~70
주철	1.0 x E <sup>6</sup>	7.8 x E <sup>-3</sup>	1.38 x E <sup>3</sup>	25~35
황동주물	0.80 x E <sup>6</sup>	8.6 x E <sup>-3</sup>	0.93 x E <sup>3</sup>	15
알루미늄 주물	0.7 x E <sup>6</sup>	2.7 x E <sup>-3</sup>	2.59 x E <sup>3</sup>	6~9

두랄루민은 주철에 비해 비강도는 2배이나 체적부  
분에서는 3배가 커진다. 따라서 단위 체적당 주철에  
비해 상당히 불리함이 검토되었다. Line Center 시  
제품 2호기의 Cradle에 알루미늄 합금을 적용할 경  
우 체적이 늘어나므로 이송계의 고속화에 맞지 않다.  
따라서 주철을 적용하여 RIB 및 불필요한 요소를 제  
거하고 중량을 20%정도 감소시켜 2차 설계를 하였다.

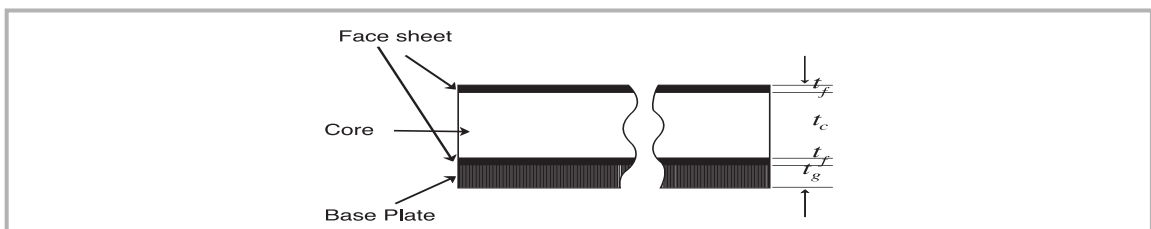
### 3.3.3 Column의 경량화

Column은 현 Steel소재를 적용한 구조와  
Honeycomb Sandwich 구조의 두 가지 경우를 검토  
하였다. Honeycomb 구조 및 기타 Core 구조의 적  
용 시 실제 원 소재로서 제품에 비해 비강도적인 측  
면은 우수하나 실제 동일형상으로 가공 및 제작하  
기 어렵고 실제 동일형상으로 가공하였을 경우 표 7

구 분	영 른	질 량	밀 도	비강도	등 가 질량비	등 가 부피비	등 가 설계강도
허니컴코어 구조	11.7	0.311	0.315	37.1	0.61	10.77	0.08
황철 원통코어구조	19.2	0.611	0.511	37.6	0.73	7.86	0.13
종열 원통코어구조	14.1	0.671	0.561	25.1	1.10	16.00	0.07
알루미늄 판	67.9	3.210	2.800	24.3	1.09	3.30	0.31
저 탄소강	206.0	8.950	7.860	26.2	1.00	1.00	1.00

▼ 그림 1. Honeycomb Sandwich 구조의 간략도

▲ 표 7. 구조에 따른 등가 설계



에 나타나듯이 등가설계 강도는 현저히 떨어진다. Honeycomb Sandwich 구조는 강성을 목적으로 하는 설계가 아닌 공간적 충진을 위한 구조물에 적합한 것으로 판단되나 만약 고 강성 재료를 사용하여 이러한 구조를 취한다면 그 경량화 효과는 탁월하게 발휘할 수 있을 것으로 판단된다.

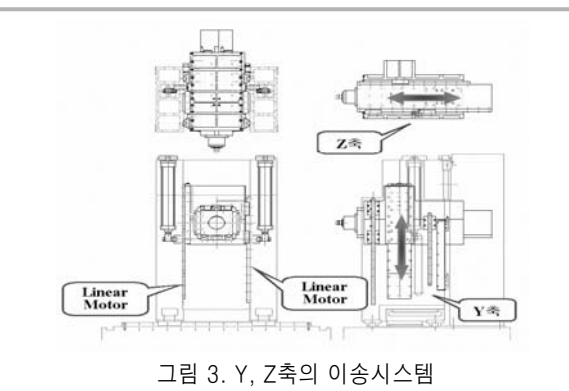
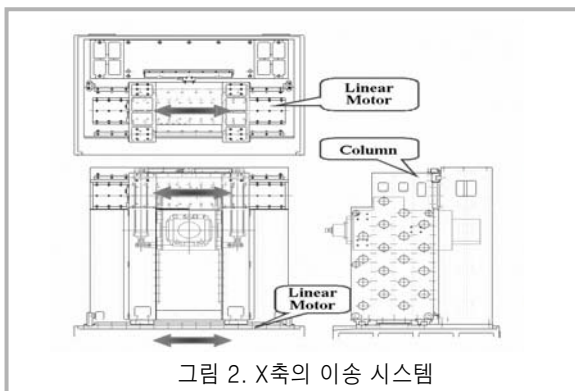
그림 1은 Honeycomb Sandwich 구조의 간략도이며 Base Plate는 Steel, Face sheet는 Aluminum, Core는 Phenolic Resin의 재질로 선정되었다. 각 층의 두께는 가변적이고 최대 47.58%의 중량감소 효과를 낼 수 있다. 스틸 빔의 체적 V1, Composite Beam의 체적 V2라 할 때  $V1/V2 = 4.5$ 로 체적비가 증가하여 불리하나 체적비를 1.5로 설정하면 약 16%의 중량 감소효과를 가져온다. 이 수치를 적용하여 최적구조로 설계(Honeycomb Sandwich 구조)하였고, 향후 구조물에 문제점 발생을 대비하여 현재의 부재인 Steel을 사용하여 단면의 형상에 따른 단면 2차 모멘트 값의 증대를 통한 비강성을 증가시켜 Steel 구조를 적용하여 추가적인 설계를 수행하였다.

### 3.4 시제품 2호기 이송 시스템의 설계

시제품 1호기를 보완 및 개선하면서 조립 작업 시 발생된 문제점과 기술적인 검토를 수행하여 시제품 2호기는 초고속에 부합되는 이송시스템을 설계하였다. 그림 2는 X축 이송계의 조립도로서, 칼럼의 바닥면과 배면 칼럼에 LM 및 리니어 모터를 설치하도록 설계하고, 리니어 모터의 동기 제어를 하도록 설계하

였다. 그림 3은 Y축과 Z축의 이송계의 조립도로서, 먼저 Y축의 경우는 칼럼의 안쪽면과 크래들(Cradle)사이에, Z축의 경우는 크래들 측면과 쉘 사이에 리니어 모터를 마주보게 장착하여 장력이 상쇄되는 구조로 설계하였다. 또한, Z축과 마찬가지로 트윈(Twin) 리니어 모터를 구성하여 언밸런스(Unbalance)에도 대비토록 배치하였다. 특히, Z축의 경우 쉘이 가공할 때나 혹은 앞으로 빠져나왔을 때 안정성을 확보하도록 LM의 배치를 저중심 설계를 감안하여 적정 배치 설계하였다. Y축의 경우 장시간 정지 시에 리니어 모터의 과열 방지를 위해서 카운트 밸런스(Counter balance)를 구성하였다. 밸런서나 메카 브레이크 기구가 없는 상태로 수직축에 리니어 모터를 사용하는 경우 리니어 모터 자체의 연속 정격추력으로 그 위치를 유지시킬 필요가 있다.

따라서 연속 정격 추력 이상의 힘으로 장시간 정지하는 경우, Over Heat가 발생할 가능성이 높아진다. 또한 기계의 정전대비에 대한 대책이 필요하다. 카운터 밸런서(Counter Balancer)는 공압 실린더를 장착한 공압 시스템으로 구성함으로써 정지시 모터의 과열방지, 정전시 대비, 축의 반전동작(운동 방향의 반전)시 백래쉬(Backlash)를 방지할 수 있는 구조이다. ATC는 가공 시에 사이클 타임을 최소화 하고 공구 교환용 암(Arm)이 없는 상태로 구성되었다. 공구교환 시 매가진(Magazine)이 실린더 이송으로 내려오고 Z축은 안으로 들어가서 나오면서 공구를 빼고 들어가고, 매가진이 돌고 다른 공구를 위치시키고 다시 Z축이 나오고 들어가면서 공구를 교환하는 메커니즘이 가능하도록 설계하여 사이클 타임을 줄이도록 하였다.





### 3.5 라인센터 시제품 2호기 설계

그림 4는 라인센터 시제품 2호기의 Lay-out이다. 시제품 1호기와 같이 배면 컬럼(Back Column) 구조로 Z축 방향 강성의 강화와 X축 부하 하중을 감소시켜 고속화가 가능하게 설계하였다. 구조 전용성의 향상을 위해 이동체 폭을 적게 하여 전체적으로 기계의 폭을 가능한 작게 설계하였다. 또한, 시험 모델과 동일하게 X축 슬라이드 상의 Y축 크래들(Cradle)을 통해 Z축 퀴(Quill)를 겹쳐 적층으로 구성함으로써 트랜스퍼 라인을 형성할 때 주축 이동이 짧게 이동하고, 테이블과 별도 분리 가능하도록 설계하였다.

그림 5는 베드에 장착된 작업 테이블을 보이고 있다. 주요 특징으로는 구조물의 지지중심점에서 고가속 이송이 실현(Y, Z axis 중심교차 슬라이드)되고 이송체(Y, Z axis) 전후면에 대하여 4면 구속하여 가이드를 안내하여 구동함으로써 피칭(Pitching), 요잉(Yawing), 롤링(Rolling) 등의 오차를 작게 하였다. 또한 기계의 폭을 가능한 작게 설계하여 구조물의 변형이 최소화되거나 억제될 수 있도록 하였다.

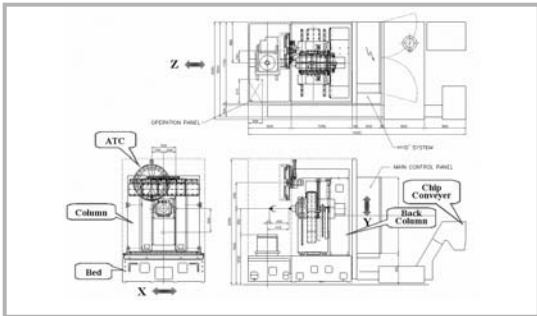


그림 4. 라인센터 레이아웃

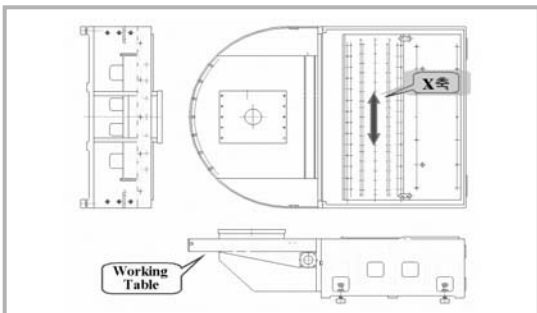


그림 5. 라인센터 서브 베드

X축 슬라이드 위에 Y축 크래들(cradle)을 놓고 Z축 퀴(quill)를 겹쳐 구성함으로써 공작물(트랜스퍼 라인)을 가공할 때 주축이동을 짧게 하였으며, 단독기가 아닌 라인 직접투입을 위해 분리가 가능하도록 설계하였다.

### 3.6 라인센터 구조물 및 완성된 시제품 1호기

그림 6은 제작중인 라인센터 시제품의 베드(Main Bed)를 보인 것이다. 베드 뒤쪽으로 백컬럼(Back column)이 놓이고 백컬럼 앞으로는 Y축과 Z축을 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.

그림 7은 퀴(Quill)를 나타낸 것으로 상하로 LM 가이드가 부착되고 좌·우측면에 리니어 모터가 장착되며 퀴의 선단에 고주파 스피들이 장착되어 Z축을 형성한다.

그림 8은 백컬럼(Back column)을 나타낸 것인데 X축 이송시스템이 병렬형이므로 상부에는 LM 가이드와 리니어 모터가 장착된다. 그림 9는 1단계에서 개발 완료된 라인센터 시제품 1호기의 모습이다.



그림 6. 메인 베드

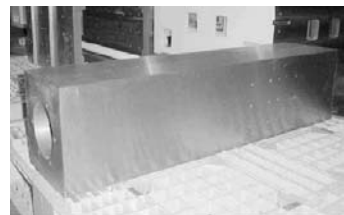


그림 7. 퀴



참 고 문 헌



그림 8. 백 컬럼



그림 9. 라인센터 시제품 1호기

4. 요약

본 연구는 산업자원부가 시행하는 “고속·지능형 가공시스템의 개발” 과제의 제3과제로서 1단계 1차 년도에서는 Ball Screw 방식의 시험 모델의 주요 사양 결정 및 기술 연구, 주축회전수가 20,000rpm인 라인 센터 설계를 하였고, 2차 년도에서는 시험모델 제작 및 고속 주축계에 설치에 따른 구조물의 안정화 증대 기술 연구, 라인 센터의 제작을 위한 기반 기술 등을 습득하였다. 3차 년도에는 Ball Screw 방식의 시험 모델을 개선하는 차원에서 설계 변경 및 운영을 달리하여 시제품1호기를 제작하였다. 이어서 당해 년도인 2단계 1차 년도에는 시제품 1호기의 제작과정에서 얻은 노하우(know-how)를 바탕으로 라인 센터 시제품2호기의 설계 방향을 결정하였다. 시제품2호기는 과제의 최종 개발 목표에 부합되도록 설계되었으며 충분한 성능의 유닛(Unit)들이 응용되었다. 또한, 2단계 2차 년도에는 라인센터 시제품제작, Line Center의 설계 및 제작 기술 정립, 종합성능평가 및 상품화 모델을 확립하고자 한다.

- [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, 고속절삭 가공기, 월간기계설계 제3장, 6월호, pp. 111-115. 2000.
- [4] J.S. Chen, et al, Thermal Error Modeling for Volumetric Error Compensation, Sensors and Signal Processing for Manufacturing, PED-Vol.55, ASME, 1992.
- [5] M. Yang, J. Lee, Measurement and Prediction of thermal Error of a CNC Machining Center using Two Spherical Balls, J. of Materials Processing Technology, Vol.75, No.1-3, 1998.
- [6] Bryan, J.B., International Status of Thermal Error Research (1990), Annals of the CIRP, Vol.39, No.1, 1990.
- [7] JaeJong Lee, MinYang Yang, Modeling and Measurement of Volumetric Thermal Errors for CNC Machining Center using On-the-Machine Measurement System, X Workshop on Supervision and Diagnostics of Machining system, 1999.
- [8] JaeJong Lee, MinYang Yang, Measurement of the Volumetric Thermal Errors for CNC Machining Center using the Star-type-styluses Touch Probe, Int. J. of KSPE, Vol.1, No.1, June, 2000.
- [9] 이재중 외3, 열적 환경변화에 의한 공작기계의 구조적 특성, 한국정밀공학회 2000년 춘계학술대회논문집
- [10] 이재중, 박현구, CNC머시닝센터의 열변형 오차 측정 및 실시간 보정, 대한기계학회 2000년도 동역학 및 제어부문 하계학술대회