

## 문형5축 머시닝센터 개발에 대한 연구(I)

### A Development of a 5 Axis Double Column Type Mchining Center ( I )

이시다<sup>1</sup>, 편 영식<sup>2</sup>

<sup>1</sup>통일중공업 Mechatronics 연구소, <sup>2</sup> 선문대학교 기계 및 시스템공학부

#### <요약>

항공기 부품, 터빈용 임펠라나 브레이드, 자동차나 가전제품용의 대형금형류의 정밀가공과 생산성 향상에는 5축의 NC가공이 기존 3축의 NC가공보다 많은 이점을 갖고 있다. 제1차 선도기술개발사업을 통해 C형의 5축머시닝센터를 성공적으로 개발한 실적을 바탕으로 제2차 선도기술개발사업을 통해 작업이송거리 12,000\*3,500\*1,500(X\*Y\*Z), 위치정밀도  $\pm 0.005\text{mm/M}$ , 주축동력 30/45Kw의 대형, 강력, 정밀형의 문형5축머시닝센터 개발을 목표로 추진하고 있다.

#### 1. 서론

항공기 부품, 터빈용 임펠라나 브레이드, 자동차나 가전제품용의 대형금형류의 정밀가공과 생산성 향상의 측면에서 기존 3축의 NC가공보다 5축의 NC가공이 갖고 있는 이점을 정리하면 [표-1]과 같다.

[표-1] 5축가공의 이점

순	주요특징	내용
1	One Setting 다면가공	-Setting변경 시마다 누적공차 방지 -지그수량 감소
2	곡면가공용이	-공구경사로 큰 MRR -가공정밀도 향상 및 사상성 향상
3	깊은 Rib 가공용이	- 짧은 공구 사용가능 - 동일공구의 다용도 작업
4	경사면, 경사홀 가공용이	-3축가공시 필요한 Angle Attachment 등 불요

제1차 선도기술개발사업을 통해 C형의 5축머시닝센터를 성공적으로 개발한 실적을 바탕으로 제2차 선도기술개발사업을 통해서도 작업이송거리 12,000\*3,500\*1,500(X\*Y\*Z), 위치정밀도  $\pm 0.005\text{mm/M}$ , 주축동력 30/45Kw의 대형, 강력, 정밀형의 문형5축머시닝센터 개발할 것을 목표로 세우고 추진하고 있다.

1-1. 시장분석을 바탕으로한 개발사양 설정  
미, 일, 독, 러등 4개국 10여개 선진공작기계업체의 신규개발기종과 통일중공업의 국내의 영업망을 활용한 유사기종 사용자들을 방문하여 조사한 자료와 제2차 선도기술개발사업 기획팀의 조사분석보고를 통해 요청된 개발 요구사항을 바탕으로 하여 기본적인 개발사양을 [표-2]와 같이 결정하였다.

[표-2] 개발목표 사양

주요사양	규격
Effective Width between Columns	4,700mm
Distance from Spindle Center to Table Top	400 ~ 1,900mm
Working Table	3,150*15,000
Spindle Taper	NT 50
Spindle Speeds	0-12,000RPM
Spindle Motor	30/45Kw(15min)
Torque	190/285Nm
Ram Section	630*630mm
Ram Travel	1,500mm
Rapid Traverse Speed	X,Y:20M Z:10M
ATC	30,60,120
Tool Change Time	6-8 Sec.
AWC - Fixed Type	2 Table(6,000)
CNC	PC-NC
Positioning Accuracy	X,Y,Z: $\pm 0.005$ A,C: $\pm 5\text{Sec}$

1-2. 개발목표 사양 결정을 위한 구조 및 시스템 개념설계

1) 작업물의 부하와 관계없이 항상 일정한 부하와 관성력에 의한 위치 및 가공 정밀도 유지를 위해 Gantry Travel(X axis), Table 정지형, Cross Carriage Travel(Y axis), Vertical Ram Travel(Z axis) 채택

2) 기존의 AWC방식에서의 단점인 긴 작업물 교환시간, 넓은 작업장 소요, 교환시의 정밀도 유지등의 문제를 고려하여 고정테이블 방식을 채택

하면서 이의 길이를 15,000mm 하고 작업의 특성에 따라 2개이상의 작업테이블로 분할하여 작업할 수 있도록 설계하였다. 물론 작업 중에도 작업물은 셋업이 가능하도록 하여 AWC시간은 거의 무시할 수 있도록 하였다.

3) 습동면 형식과 급이송속도는 신규 공작기계 개발의 흐름이 고속, 정밀, 강력절삭이라는 세 마리 토끼를 한번에 잡는 방식을 취하고 있으므로 이에 따라 Linear Roller Bearing을 채택하고 X, Y축은 최고 이송속도 20M/min, 최대가공속도 10M/min로 Z축은 Ram Type의 4면 8지지가되므로 최고 이송속도와 가공속도를 공히 10M/min로 설정하였다.

4) 고속화 가공에 맞는 스피들시스템 설계를 위해  $d \cdot n$ 값이  $120 \cdot 10^4$ 인 세라믹 스피들베어링에 Oil-Air윤활방식을 채택하고 스피들 모터는 A축과 C축이 주축부위에서 제어되어야 하므로 Built-In Type을 채택하였다.

5) 고속하에서 강력절삭이 가능케 하기 위해, 특히 최대 주축장(1,500mm Ram)에서 최대이송력 8KN이 가능하도록 각축의 구조와 이송계를 설계하였다. 이를 위해서 주축모터와 주축시스템은 190 / 285 Nm(45%)의 최대 토크가 가능하게 설정하고, X축에는 28,5KN, Y축에는 32.5KN, Z축에는 61KN의 최대 이송력이 가능하도록 이송모터와 이송계를 설정하였다.

## 2. 세부사양설계 및 해석

위와 같은 개념설계를 통해 설정된 규격과 사양에 의해 기계조립도를 구성하면 <그림 1-3>와 같다. 주요 구성Unit들에 대한 기본적인 세부 설계가 정리되면 설계품질의 향상을 위해 주축시스템, X,Y축 이송계, 테이블, 칼럼, 램슬라이드계 등의 정적 및 동적부하에 따른 거동과 열의 발생에 따른 변형특성을 분석하여 구체적인 세부설계사양을 확정해 나간다. 금번의 개발보고에서는 이들중 가장 중요한 주축시스템에 대한 세부사양설계 및 해석내용에 대하여 설명하고 나머지 부분에 대한 세부사양설계와 해석내용에 대하여는 다음번 학술대회나 학회논문집을 통해 발표할 계획이다.

## ◇ 주축시스템 해석 및 세부설계

주축시스템은 다음과 같은 성능을 만족할 수 있도록 세부설계되어져야한다.

1) 주축의 정밀도는 Radial Runout이  $2.0 \mu\text{m}$ (ISO1940 First Class)를 만족해야한다.

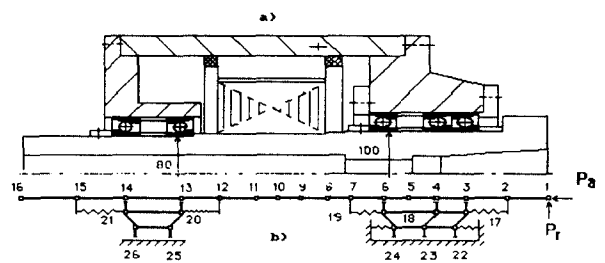
2) Face Cutter류에 의한 고속강력절삭이 이루어지는 2000RPM범위에서의 주축단에서의 Radial Stiffness가 약  $600\text{N}/\mu\text{m}$ 이 되어야하고 소형 Endmill에 의한 초고속 강력절삭이 기대되는 12,000RPM에서의 주축단에서의 Radial Stiffness가 약  $400\text{N}/\mu\text{m}$ 이 되도록 설계되어져야 한다.

3) 베어링 수명과 스피들의 열변형을 최소화하기 위해서 최고속도(10,000-12,000RPM)에서 3시간을 연속하여 작업할 경우에도 주축 베어링의 온도가 섭씨  $50^\circ\text{C}$ 이내가 되어야하며 이를 위해서는 발열로 인한 온도상승이  $8-10^\circ\text{C}$ 정도가 되도록 베어링과 윤활류냉각시스템을 설계해야한다. Built-In Type주축모터로부터의 발열량도 고려하여 윤활유의 냉각시스템 설계시 고려한다.

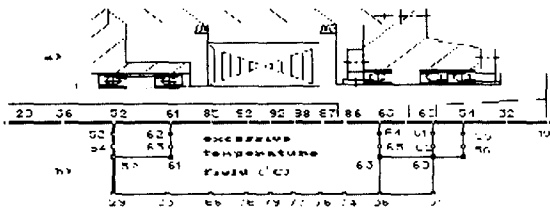
4) 주축베어링의 수명은 초고속주축인 경우에서 전 작업범위내에서 연속 5,000시간이 되도록 설계되어져야한다.

### 2-1: 스피들베어링 및 구조선정

위와 같은 성능을 만족시키기 위하여 SKF의 UP급 세라믹 볼 베어링( $d \cdot n = 1.6 \cdot 10^6$ )이 선정되었다. 주축의 Quasi-Static Stiffness, Dynamic Stiffness, Spindle Rotation Accuracy 등의 해석을 위한 구조와 해석모델을 <그림-4>와 같이 설정하였고, 열에 의한 변위와 안정성을 해석하기 위한 구조와 해석모델은 <그림-5>와 같이 설정하였다.



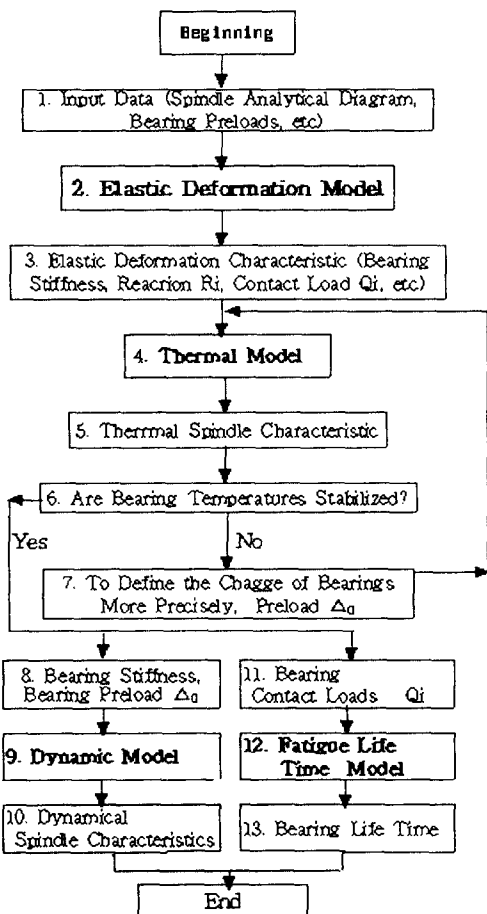
<그림-4> 주축의 구조<sup>a)</sup> 및 강성 해석모델<sup>b)</sup>



<그림-5> 주축의 구조<sup>a)</sup> 및 열 해석모델<sup>b)</sup>

2-2. 설계해석 및 보완

이와 같은 구조로 설계된 주축이 요구하는 성능을 만족하도록 하는 적절한 설계였는가를 분석하고 성능 향상을 위해 보완해야할 점을 찾아내기 위하여 사용하는 주축설계해석 소프트웨어의 기본적인 구조와 계산의 흐름을 정리하면 <그림-6>와 같다.



<그림-6> 주축설계해석 소프트웨어의 기본적인 구조와 계산의 흐름

주축의 요구성능, 기본설계를 통해 구해진 스피indle등 부품의 자료, 선정한 베어링의 특성치, 윤활조건, Built-in Motor의 특성등을 입력자료로하여 설계된 주축의 성능을 분석하고 요구성능에 맞도록 세부설계를 보완한다.

1) 10,000-12,000RPM의 초고속 가공시 7-8KN의 Radial방향의 추력을 받게되면 베어링 볼의 Gyroscopic Moment에 의해 베어링의 마모와 발열의 문제가 발생할 것이 분석되었다. 이를 방지하기 위해 Front Support Bearings들은 Axial Preload를 3.8KN, Rear Bearings들은 Axial Preload를 0.5KN를 걸어 주어야한다.

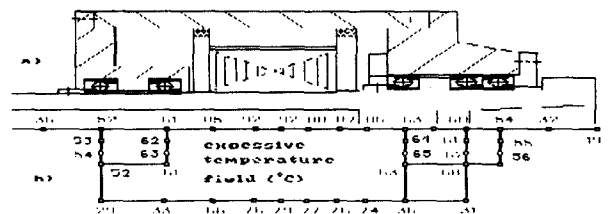
2) 주축베어링의 수명은 일반적인 작업영역에서는 수명이 5,000시간이 충분히 초과하였다. 단지 RPM10,000-12,000의 초고속 엔드밀이나 드릴 작업시 Radial이나 Axial Force가 6KN이상 걸리는 중질삭인 경우가 발생시만 수명이 2,000시간 정도 되었다.

3) 주축의 Runout은 전회전수범위에서 2μm 이내이므로 요구성능을 충분히 만족한다.

4) 주축의 정강성 해석 결과 2000RPM범위에서 주축단에서의 Radial Stiffness가 600N/μm이상이 되었고, 12,000RPM에서 주축단에서의 Radial Stiffness도 400N/μm이상이 되어 초고속 강력 절삭이 가능한 주축의 특성을 확보하게 되었다.

5) 주축의 동특성을 해석한 결과 5,200, 8,100, 12,000RPM부분에서 회전 및 위치제어 정밀도를 해치는 진동변형이 예측되므로 이 회전속도 범위에서는 정밀위치제어나 가공 특히 정밀가공이 이루어지지 않도록 PC-NC에 안전장치를 설치할 예정이다

6) 주축의 열특성을 해석한 결과 RPM12,000에서 안정에 소요되는 시간이 3시간정도 소요되었다. 이때의 각부분의 온도를 예측하면 <그림-7> 과 같다.



<그림-7> RPM12,000, 안정후의 온도분포

베어링부분의 온도상승을 50 °C 이내로 관리 하려면 스피들 전체부위에 8-10 °C의 냉각수 6 l/min 이상을 순환시키면서 베어링 자체에는 Air-Oil냉각유회환시스템을 설치하여야한다.

7) 이러한 설계분석결과를 반영하여 최종적으로 완성한 주축의 조립도는 <그림-8>과 같다.

3. 1차보고서를 마무리하면서

학술발표대회 논문의 지면관계상 구체적인 계산식이나, 입력자료, 계산결과등은 생략하였다. 또한 X,Y축 이송계, 테이블, 칼럼, 램슬라이드계 등의 설계해석과 이들을 통합한 최적설계는 다음 보고서나 학회논문으로 발표하겠다.

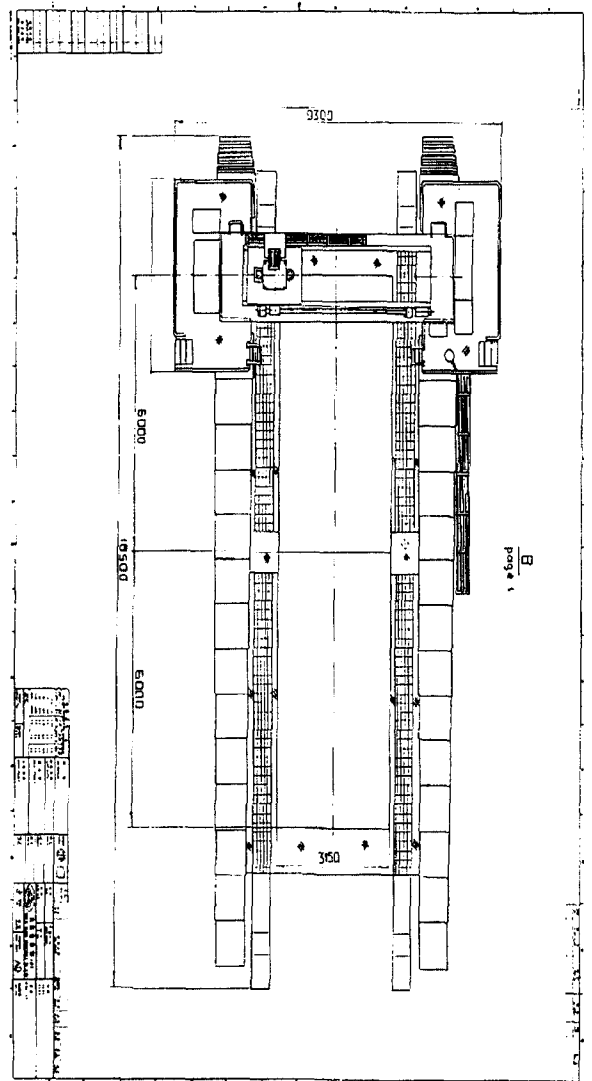
<참고문헌>

1. 통일중공업, "문형5축머시닝센터 기술개발에 관한 연구", 통일중공업, 1997, 9
2. Harris T.A. "Rolling Bearing Analysis", John Wiley, 1984, 1991
3. Jones A.B. "Ball motion and sliding friction in ball bearings", ASME Trans., Series D.,v.81, 1959, 1. p.1-12.
4. Jones A.B. "General theory for elastically constrained ball and radial roller bearings under arbitrary load and speed conditions", Trans. ASME. v.82, 1960, p. 309-320.
5. Kingsbury E., "First order ball-bearing kinematics", ASLE Trans, 1985, v.28, 2.
6. Liu J.Y. et al. "Dependance of bearing fatigue life on film thickness to surface roughness ratio", Trans. ASLE, 1975, v.18, 2 p. 144-152.
7. Mason F., "5\*5 for high productivity airfoil milling", American Machinst, Nov.,1991, p37-39
8. Tonshof H. K., Hernandex-Camacho, "Die manufacturing by 5 and 3 axes milling" J. of Mechanical Working Technology, Vol. 20, 1989, p.105-119
9. Venkatraman V. "Analysis of spindle running accuracy", Mach. and prod. eng., January p.66 - 69; February p.146 - 150; April p.359 - 364, 1975.

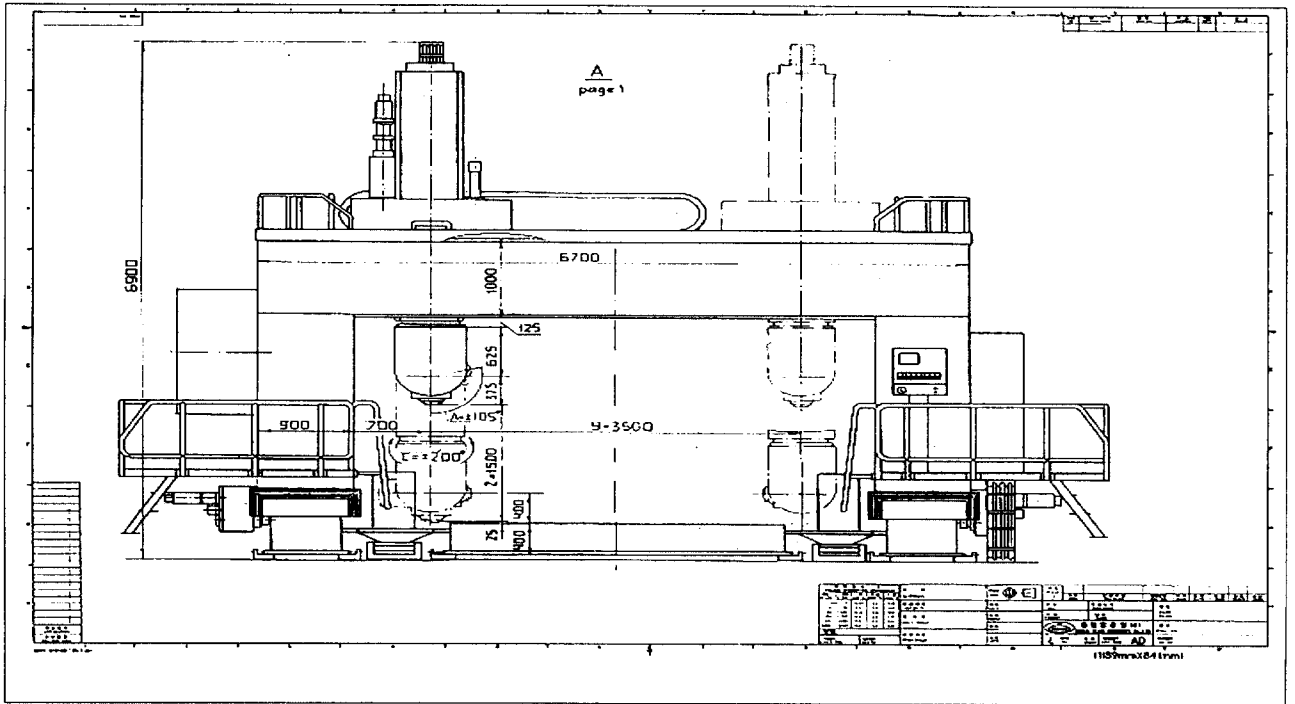
10. Weck M., Handbook of MACHINE TOOLS Vol.1-4, JOHN WILEY & SONS, 1984.

11. Zverev I.A. and Balmont V.B. "Modelling of spindle vibration caused by ball bearings", Vibration Engineering, N3. 1989, p.249-257

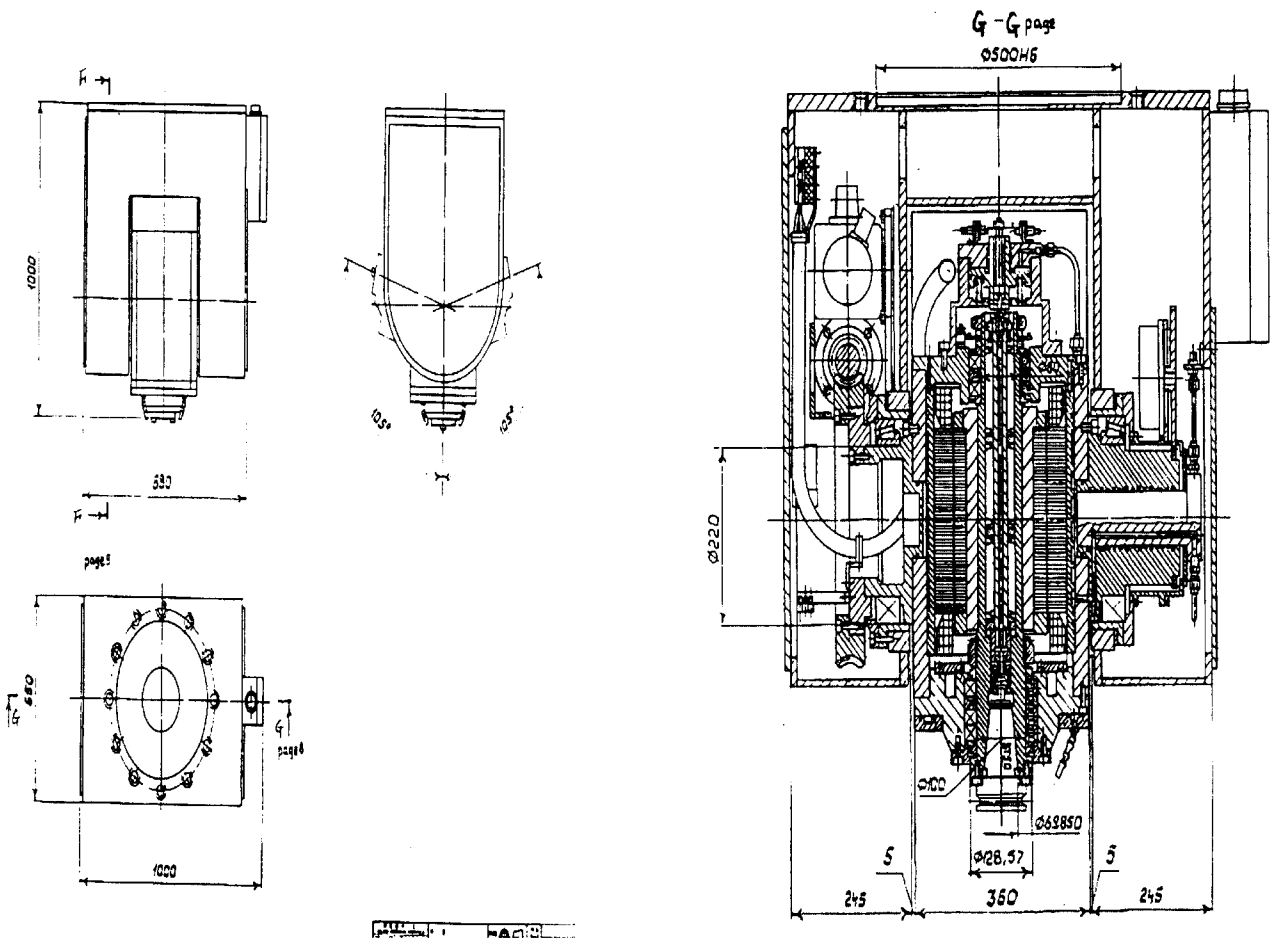
이 논문은 통산산업부와 과학기술처에서 시행한 선도개발사업의 지원에 의해 시행된 연구결과입니다.



<그림-1> 총 조립도 (평면도)



<그림-2> 총 조립도 (측면도)



<그림-3> 주축 조립도

<그림-8> 주축의 조립 단면도