

◆ 특집 ◆ 초대형 부품가공용 복합가공기 기술

고정밀 대형 부품가공용 복합가공기 원천기술 개발

Development of Core Technologies of Multi-tasking Machine Tools for Machining Highly Precision Large Parts

장성현¹, 최영휴^{2,✉}, 김수태², 안호상³, 최학봉⁴, 홍종승⁵
Sung Hyun Jang¹, Young Hyu Choi^{2,✉}, Soo Tae Kim², Ho Sang An³, Hag Bong Choi⁴
and Jong Seung Hong⁵

¹ 창원대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Changwon National Univ.)

² 창원대학교 메카트로닉스공학부 (School of Mechatronics Engineering, Changwon National Univ.)

³ 한국정밀기계주 (HNK Machine Tool Co., Ltd.)

⁴ ㈜기흥기계 (Kiheung Machinery Co., Ltd.)

⁵ ㈜남선기공 (Namsun Machinery Corporation)

✉ Corresponding author: yhchoi@changwon.ac.kr, Tel: 055-213-3623

Manuscript received: 2011.12.20 / Accepted: 2012.1.9

In this study, three types of large scale multi-tasking machine tools together with core technologies involved have been developed and introduced; a multi-tasking machine tool for large scale marine engine crankshafts, a multi-tasking vertical lathe for windmill parts, and a large scale 5-axis machine tool of gantry type. Several special purpose devices has been necessarily developed for the purpose of handling and machining big and heavy workpieces accurately, such as PTD (Pin Turning Device) with revolving ring spindle for machining eccentric crankshaft pins, hydrostatic rotary table and steady rest for supporting and resting heavy workpieces, and 2-axis automatic swiveling head for high-quality free surface machining. Core technologies have been also developed and adopted on their detail design stage; 1) structural design optimization with FEM structural analysis, 2) theoretical hydrostatic analysis for the PTD and rotary table bearings, 3) box-in-box type cross-rail and octagonal ram design to secure machine rigidity and accuracy, 4) constant spindle rpm control against gravitational torque due to unbalanced workpiece.

Key Words: Multi-tasking Machine Tools (복합가공기), Pin turning Device (핀 터닝 장치), Rotary Table (회전테이블), 2-axis Automatic Swiveling Head (2축 자동선회헤드), Hydrostatic Bearing (유정압 베어링)

1. 서론

최근 조선 기자재 생산, 풍력 발전, 태양광 발전 설비, 인프라 정비 관련 등 소위 중후장대(重厚長大)형 산업에서의 대형 공작기계에 대한 수요가 점차 증대되고 있다. 특히, 거대 선박엔진, 풍력발전기의 핵심부품을 깎는 대형 공작기계는 일본,

독일 등 일부 선진국의 10 여 개의 제조회사에 독점적으로 생산되고 있다. 이는 대형 공작기계에 대한 기술 요구가 워낙 높은데다가 주문형 생산방식으로 인해 전문적인 기술력을 보유하지 않고서는 쉽게 시장에 진입하기가 어렵기 때문이다. 또한 신재생에너지 산업과 조선 해양플랜트 산업 등의 성장으로 공작기계 세계시장에서 대형 공작기

계의 수요 증가되고 있고, 고 부가가치성도 인정되고 있으나, 대형 공작기계의 경우 기술개발에 막대한 연구개발비와 전문 인력이 필요하고 시장 진입의 많은 위험 요소들로 인해 신규업체들의 진입이 매우 어렵기 때문에 특정 업체들의 독점이 계속되고 있는 실정이다. 이러한 사정으로 우리나라가 조선 및 해양플랜트 산업과 대형 선박엔진 및 풍력 부품 생산 분야에서 세계 수위를 하고 있음에도 불구하고 그 생산 장비인 대형 공작기계는 전량 수입에 의존하고 있다. 또한 국내 공작기계 산업은 이미 지난 50 여년간 중·소형 범용 공작기계 중심으로 세계 4 위권의 생산 및 소비 국가로 성장하였으나 대형 공작기계는 최근 몇 년 동안 해외 제품을 모방하는 초보적인 기술개발이 이루어진 정도로서 저가제품 위주로 국내외 시장에 진입을 시도하고 있는 단계이다. 그러므로 중·소형 공작기계 분야에서 쌓은 기술력을 바탕으로 대형 공작기계 기술의 원천기술은 개발하고, 세계시장에서 우리나라가 수위를 점하고 있는 조선·해양플랜트, 선박엔진, 신재생에너지 산업의 생산제조 장비인 대형 공작기계의 국내 수요를 수입 대체한다면 대형 공작기계 세계시장의 시장진입은 물론 주도권 장악할 수 있다. 이를 위해서는 대형 공작기계의 핵심원천기술인 설계기술 개발과 공정기능의 복합화 및 다기능화로 수 미터급의 다양한 대형 부품을 가공할 수 있는 대형 복합가공기의 개발이 필수적이다.

그러므로 본 연구에서 개발 대상으로 하는 대형 복합가공기는 밀링, 선삭, 연삭, 특수가공 중 2 개 이상의 절삭기능이 하나의 장비에 일체화된 복합 가공시스템을 말하며, 다양한 축 구성과 다기능형 주축헤드 및 공구 터렛 등의 기능적 유연성이 가미되어 고품위, 고생산성 가공이 가능한 대형 가공장비이기 때문에 고부가가치가 높은 장비이다.

본 연구에서는 적용 산업분야를 고려하여 개발 대상 대형 복합가공기를 세 가지 종류로 한정한다. 즉, 급변하는 세계 조선시장의 흐름과 친환경 선박(eco-ship or green-ship) 개발의 활발한 조류에 대응하기 위한 '5 만 마력급 대형 선박엔진용 크랭크샤프트 가공기'^{1,2)}와 미래 발전 에너지로 각광받고 있는 풍력 발전 시장의 '5MW 급 풍력 발전기 Yaw & Pitch 베어링 가공용 복합 수직선반'³⁾ 및 각종 산업의 복합형상, 고품위, 고정밀 대형 부품가공을 위한 'Gantry 형 대형 5 축가공기'를 아우르는 '고

정밀 대형 부품가공용 복합가공기'⁴⁾의 개발로서 관련 기술 개발 내용을 소개한다.

2. 고정밀 대형 부품가공용 복합가공기

2.1 대형 크랭크샤프트 가공기

대형 크랭크샤프트 가공기는 Fig. 1 과 같이 선반의 기본구조에 핀 터너(pin turner), 스카이빙(skiving) 공구 등의 보조 가공 메커니즘을 추가시켜 대형 선박엔진용 핵심부품인 길이 10,000 mm, 직경 $\phi 3,500$ mm 급 초대형 크랭크샤프트를 한 대의 가공기에서 한 번의 셋업으로 필요한 가공을 모두 수행할 수 있는 복합 정삭 가공기이다. 이 가공기는 5 만 마력급 선박엔진용 초대형 크랭크샤프트의 최종 정삭 가공을 수행할 수 있는 장비로서 주요 가공 부위로는 크랭크샤프트의 저널부와 편심축인 크랭크 핀부이다. 저널부는 공작물을 회전시켜 가공하는 일반적인 선삭가공이 수행되고, 핀부는 저널부로부터 1,000 mm 의 먼 편심거리를 가지기 때문에 별도의 스피들이 내장된 핀 터닝 장치(pin turning device)를 이용하여 공작물을 회전시키는 대신 공구를 회전시켜 선삭하는 형태로 가공이 이루어진다.²⁾

본 논문의 대형 크랭크샤프트 가공기는 길이 27 m, 폭 10 m, 높이 6 m 의 대형 장비로서 주축대(headstock) 및 면판(faceplate), 방진구(steady rest)가 공작물 베드(work bed)와 일체형 구조를 이루어 가공물인 초대형 크랭크샤프트를 설치하게 되고, 이와 분할된 이송 베드(carriage bed)에서 핀 터닝 장치와 공구대(tool post)가 독립적으로 이송한다.

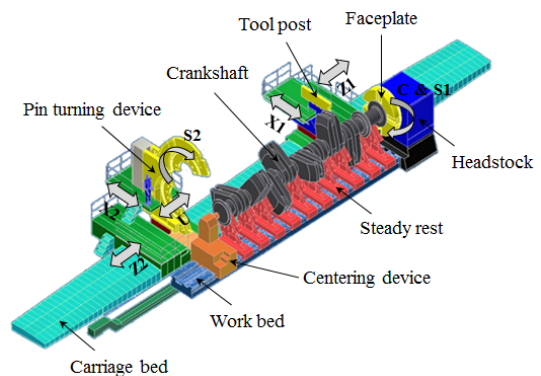


Fig. 1 Multi-tasking machine tool for large scale marine engine crankshaft

Table 1 Specifications of the multi-tasking machine tool for large scale marine engine crankshaft

Item	Specification
Machine size	27(L)×10(W)×6(H) m
Max. swing diameter	φ 3,500 mm
Max. workpiece length	10,000 mm
Max. workpiece weight	100 tons
Faceplate diameter	φ 1,750 mm
Steady rest load capacity	20 tons
X1 & X2 axis stroke	1,600 mm
Z1 & Z2 axis stroke	14,000 mm
U axis stroke	80 mm
C axis index precision	0.001°

핀 터닝 장치와 공구대의 X 축 이송거리는 1,600 mm 이고 Z 축 이송거리는 14,000 mm 이다. 핀 터닝 장치에 의한 편부 정삭 시 U 축 이송거리는 80 mm 이며, 면판의 C 축의 분할 정밀도는 0.001° 이다. 또한 방진구는 최대 20 톤의 하중을 지지할 수 있으며 대상 공작물인 100 톤의 초대형 크랭크 샤프트를 지지하기 위해 10 개의 방진구가 설치된다.

2.2 풍력 발전기 부품가공용 복합수직선반

Fig. 2 의 대형 복합수직선반은 5 MW 급 대형 풍력 발전기의 핵심부품인 피치 베어링(pitch bearing), 요우 베어링(yaw bearing) 및 타워 플랜지(tower flange)를 한 대의 기계에서 가공할 수 있도록 복수의 헤드와 하드터닝(hard turning) 기능을 갖춘 수직형태의 복합기능 선반이다.³ 대형 복합수직선반은 가로 12 m, 세로 8 m, 높이 4 m 의 크기를 가지며, C 축 회전 테이블(rotary table), Z 축 램(ram), X 축 크로스레일(crossrail) 이송계, 틸팅헤드(tilting head) 및 자동헤드 교환장치(auto head changer, AHC) 로 구성된다.

C 축 회전테이블은 최대중량 300 kN, 최대크기 φ 5,000×500 mm, 높이 500 mm 의 대형 가공물을 장착하고 회전시켜주는 역할을 하며, 인택싱 기능을 통해 특정 위치에서의 보링(boring), 드릴링 등의 작업을 가능하게 한다. 또한 회전테이블은 고중량의 가공물을 지지해야 하기 때문에 유정압 베어링(hydrostatic bearing)을 사용하고 최대 130 rpm 으로회전할 수 있다.

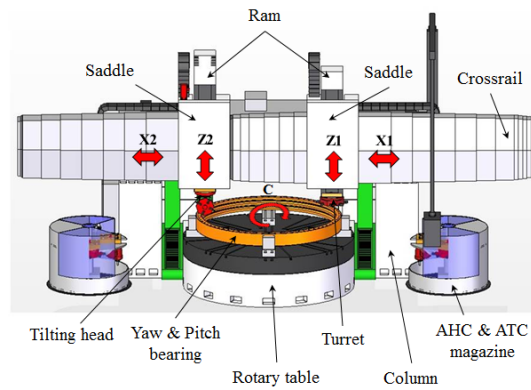


Fig. 2 Multi-tasking vertical lathe for windmill parts

Table 2 Specifications of the multi-tasking vertical lathe

Item	Specification	
Machine size	12(W)×8(B)×4(H) m	
Workpiece size	5,000(D)×500(H) mm	
C axis	Bearing	Hydrostatic
	Table diameter	4,000 mm
	Load capacity	500 kN
	Static stiffness	3,000 N/μm
	Rotation speed	130 rpm
X axis	Resolution	10 μm
	Bearing	LM guide
	Stroke	3,000 mm
Z axis	Resolution	1 μm
	Bearing	Box type slide guide
	Stroke	600 mm
AHC	Resolution	1 μm
	Clamping type	Hydraulic & spring
	Positioning mechanism	Curvic coupling
Tilting head	Accuracy	10 μm
	Clamping type	Hydraulic
	Tilting mechanism	Bevel gear
	Positioning mechanism	Curvic coupling
	Accuracy	3 sec

X 축 크로스레일 이송계는 회전테이블과는 별도로 두 개의 컬럼(column)에 의해 지지되며, 두

개의 램을 X 축 방향으로 최대 3,000 mm 이송한다.

Z 축 램은 공구를 장착하고 상하방향으로 이동하면서 공구의 상하방향 위치를 설정하는 역할을 하며, 램 하단에 설치된 자동헤드 교환장치를 통해 베어링의 구면 가공용 킬팅헤드, 선삭용 보조 터렛 및 밀링헤드 등을 자동으로 교환하면서 곡면 가공, 보링, 밀링, 드릴링, 선삭 등의 작업을 수행한다. 램의 최대 수직 이송거리는 600 mm 이며, 박스 형태의 슬라이드 가이드(slide guide)를 사용한다.

킬팅헤드는 베어링 레이스(bearing race)의 구면 가공 시에 소재의 구면과 절삭 팁(tip)의 간섭을 회피하기 위하여 절삭 팁을 부착한 바이트의 각도를 변경시키는 역할을 한다.

AHC 는 Fig. 2 의 Z 축에 대해 킬팅헤드, 터렛, 보링헤드, 앵글러헤드 등 다양한 스핀들 헤드들 고정밀도로 자동 교환하는 장치로서 스핀들과 킬팅헤드에 동력전달 기능도 포함하고 있어서 풍력 발전기용 피치 베어링과 요우 베어링의 복합가공에 매우 효율적인 기능을 발휘할 수 있는 장치 요소이다. Table 2 에는 대형 복합수직선반의 제원을 나타내었다.

2.3 대형 복합형상가공용 갠트리형 5축가공기

Fig. 3 과 같은 갠트리형 대형 5 축 가공기는 5 MW 급 풍력발전기에 소요되는 블레이드(blade), 선박용 대형 프로펠러(propeller), 대형 LCD 판넬 및 항공기 부품 등 대형 5 축 가공을 필요로 하는 제품을 가공하기 위한 장비로서 가공물의 크기가 30 × 3 m 인 장방형 초대형 부품을 가공할 수 있다.⁴

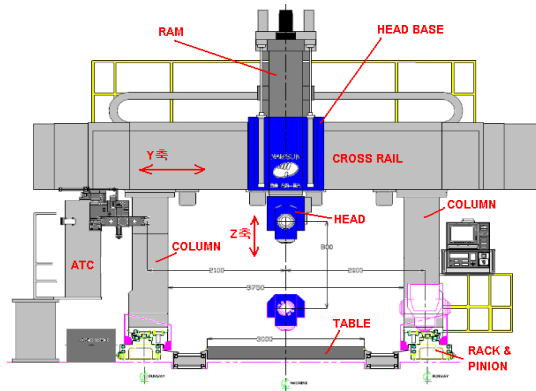


Fig. 3 Large scale gantry type 5-axis machine tool for multi-task machining

Table 3 에 나타낸 갠트리형 대형 5 축 가공기의 제원에서처럼 테이블을 제외한 갠트리 구조의 크기는 가로 7.26 m, 세로 5 m, 높이 6.5 m 로 30 m 이상의 테이블을 랙피니언(rack and pinion) 장치로 이송한다. 이러한 갠트리 구조의 가공기는 일반적인 테이블 이송형에 비하여 길이방향으로 설치면적을 절반 이하로 줄일 수 있고, 볼스크류(ball screw)가 아닌 랙피니언 기어 방식임으로 테이블을 무한한 길이로 확장이 가능하다. 본 논문의 갠트리형 대형 5 축 가공기는 X 축, Y 축, Z 축 직선 이송거리가 각각 31,000 mm, 4,310 mm, 1,500 mm 이다.

또한, 갠트리형 5 축 가공기는 5 축 가공을 위해 최대 15,000 rpm 급 스핀들을 포함한 2 축 자동 선회헤드(2-axis automatic swiveling head)를 장착하고 있으며, A 축 최대선회각도는 ± 110°이고 C 축 최대 선회각도는 ± 360°이다.

Table 3 Specifications of the large scale gantry type 5-axis machine tool

Item	Specification	
Machine size	7.26(W)×5(B)×6.5(H) m	
Workpiece size	30(L)×3(W) m	
Max. spindle speed	15,000 rpm	
Head	Max. turning speed	25 rpm
	Max. turning angle (A axis)	± 110°
	Max. turning angle (C axis)	± 360°
	Index precision	0.001°
X axis	Max. feedrate	20 m/min
	Stroke	31,000 mm
Y axis	Max. feedrate	16 m/min
	Stroke	4,310 mm
Z axis	Max. feedrate	120 m/min
	Stroke	1,500 mm

3. 고정밀 대형 부품가공용 복합가공기의 원천 기술

3.1 변형 최소화 고강성 구조설계 기술

공작기계의 가공정밀도는 가공조건, 스핀들 특성, 결합부 요소, 열적 특성뿐만 아니라 공작기계

의 구조에도 지배적인 영향을 받는다. 이에 가공 정밀도를 향상시키기 위해서는 변형을 최소화하고 강성을 높일 수 있는 구조 설계가 필수적으로 요구된다.

그런데 공작기계를 Fig. 4 처럼 단순한 구조형태로 가정을 하고 동일한 물성치(영률 E , 밀도 ρ)와 단면적 A 을 고려하면 식 (1)에서 보듯이 자중과 작용력 F 에 의한 처짐 δ 은 길이 L 의 세 제곱에 비례함을 알 수 있으며, Fig. 5 에서처럼 중·소 공작기계는 처짐에 대한 설계허용조건을 맞추기가 용이하나 대형 공작기계는 길이에 따른 처짐의 효과가 크게 증가되어 변형 최소화 설계가 상당히 어려운 것을 알 수 있다.

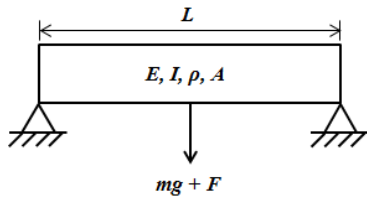


Fig. 4 Simplified machine tool structure

$$\delta = \frac{L^3}{48EI} (mg + F) \quad (1)$$

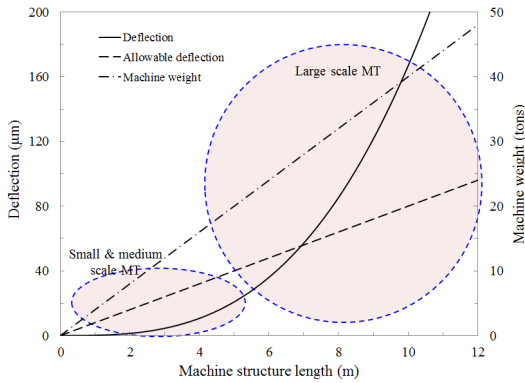


Fig. 5 Size and normalized deflection domain of machine tool structures

이렇듯 공작기계의 변형 최소화, 고강성 구조 설계를 위해서 다양한 방법들이 제시되고 있는데 본 연구에서는 구조 최적화 알고리즘을 통해 고정밀 대형 복합가공기의 구조설계기술을 확립하였다. 특히, 대형 크랭크샤프트 가공기는 100 톤의 대

형 크랭크샤프트를 공작물 베드에 올리고 면판으로 클램핑하여 가공을 수행한다. 이에 본 연구에서는 면판과 방진구, 스핀들과 같은 핵심요소的高강성 설계뿐만 아니라, 면판-주축대-공작물 베드-방진구의 본체 구조물에 대한 구조 최적설계가 요구된다. 본체 구조물에 대한 설계문제와 설계변수를 정의하고, 본 연구에서 개발한 ‘다구찌 기법 기반 순차적 알고리즘(Taguchi method based sequential algorithm, TMSA)’을 이용하여 최적설계를 수행하였으며, 그 결과를 Fig. 6 에서처럼 컴플라이언스 함수로 비교하였다.^{5,6}

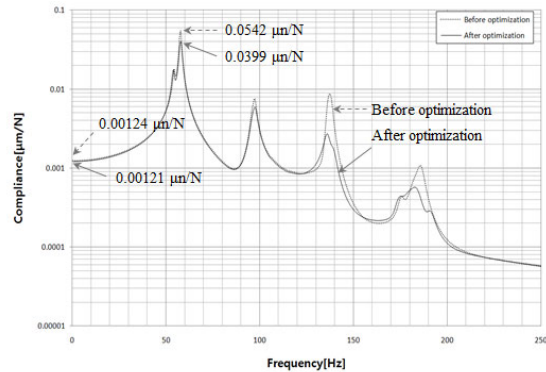


Fig. 6 Comparison of compliance function of main structure before and after optimization

또한 대형 크랭크샤프트 가공기의 핀 터닝 장치는 핀부 주위를 회전하는 공구의 위치에 따라 절삭력의 방향이 지속적으로 변하기 때문에 이에 따라 PTD 구조물의 변형과 구조강성도 변하게 된다.

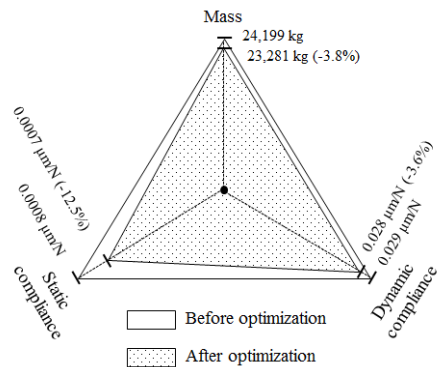


Fig. 7 Comparison of performances of PTD before and after optimization

이에 편 터닝 장치의 고정밀도, 고진원도, 낮은 변형편차를 얻기 위해서는 PTD의 강성을 높일 수 있는 고강성 최적설계가 필요하다. 본 연구에서는 PTD에 대해서도 다루어 기법 기반 순차적 알고리즘을 이용하여 구조 최적설계를 수행하였으며, Fig. 7과 같이 구조 최적설계 후에 PTD의 성능을 개선하였다.⁷

대형 복합수직선반은 풍력발전기용 대형 베어링과 같은 20년 이상 내구성을 가진 난삭재의 초정밀 가공과 더불어 하드 터닝을 수행해야 하므로 고강성 구조가 요구된다. 또한 복합수직선반의 크로스레일은 새들(saddle)과 램의 자중에 의해 뒤틀림이 발생하여 가공정밀도가 크게 저하될 수 있는데 이를 개선하기 위하여 상용 최적설계 소프트웨어인 Optistruct 10.0을 이용하여 크로스레일의 위상 최적화를 수행하였고, Fig. 8과 같은 결과를 통해 크로스레일의 Y축 처짐을 약 55% 줄였다.⁸

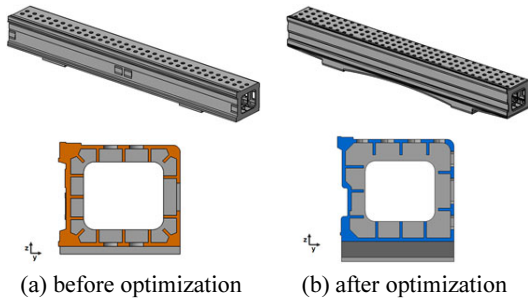


Fig. 8 Comparison of initial and optimized crossrail of multi-tasking vertical lathe

일반적인 수직형 가공기는 Fig. 9(a)와 같이 단일 크로스레일에 새들과 램이 장착되어 편하중에 의한 처짐이 과도하게 발생할 수 있다. 반면 본 연구의 갠트리형 대형 5축 가공기는 Fig. 9(b)와 같은 Box-in-box 형태의 크로스레일 구조로 새들과 램을 크로스레일 사이에 장착함으로써 중심하중의 변화를 없애고 변형과 진동을 최소화하며 고강성과 고정밀도를 유지할 수 있다.⁴

또한 크로스레일의 자중에 의한 처짐량을 해석적으로 도출하고 이를 보상할 수 있도록 크라운 구조의 크로스레일 설계도 제안하였다.¹⁰

갠트리형 대형 5축 가공기의 램 형상은 일반적으로 제작되는 사각형 형태가 아닌 Fig. 10과 같은 팔각형 형상으로 설계되어 Fig. 11(a)에서처럼 공구의 절삭력이 팔각램에 90° 방향으로 분산되어 램의 변형을 최소화할 수 있다.⁴

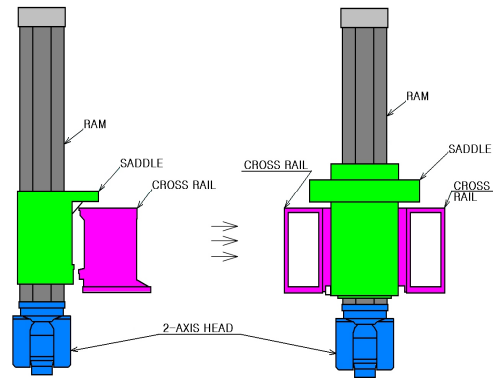


Fig. 9 Comparison of crossrail structures for gantry type 5-axis machine tool

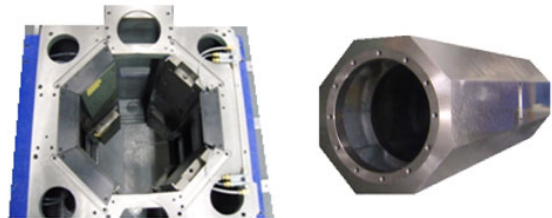


Fig. 10 Octagonal ram of gantry type 5-axis machine tool

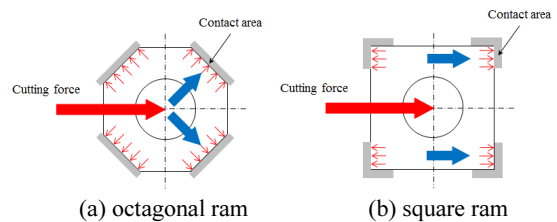


Fig. 11 Comparison of load distribution between two rams

3.2 유정압 베어링 설계 기술

대형 크랭크샤프트 가공기의 편 터닝 장치는 크랭크샤프트 저널부에서 편심이 겨있는 편부를 가공하기 위한 장치로서 크랭크 스로우 사이에 위치한 편을 링 형태의 스핀들이 감싼 채로 링 내측에 부착된 공구를 회전시키면서 편 중심으로 절입이송을 통해 가공을 수행하게 된다. 편 터닝 장치는 고하중을 견디면서 높은 회전정밀도와 가공제품의 형상정밀도를 유지하기 위해 유정압 베어링을 사용한다.

본 연구에서 편 터닝 장치의 유정압 베어링은 Fig. 12는 편 터닝 장치와 유정압 베어링의 단면을

나타내고 있으며, 18 개의 유정압 베어링 패드가 반경 1,200 mm 의 위치에 배치되어 있으며, 편심율, 베어링 간극, 급유량의 변화에 따른 부하지지용량을 해석할 수 있는 소프트웨어를 개발하여 설계 기술을 확보하였다.^{13,14}

핀 터닝 장치의 유정압 해석 소프트웨어를 통해 편심율이 0.4 일 때, 유량변화에 대하여 베어링 간극에 따른 부하용량의 변화를 Fig. 13 과 같이 계산하였으며, 이를 통해 핀 터닝 장치의 작용하중이 2,100 ~ 4,900 kgf 인 범위에서의 유정압 베어링의 간극과 유량을 결정할 수 있다.¹³

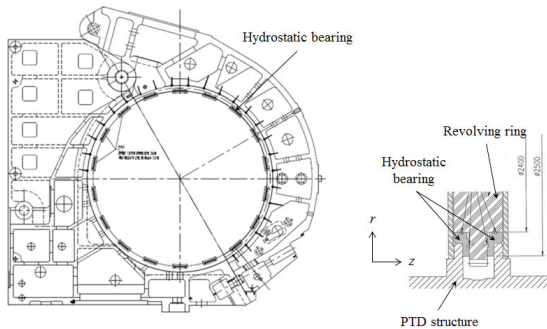


Fig. 12 Hydrostatic bearing of pin turning device

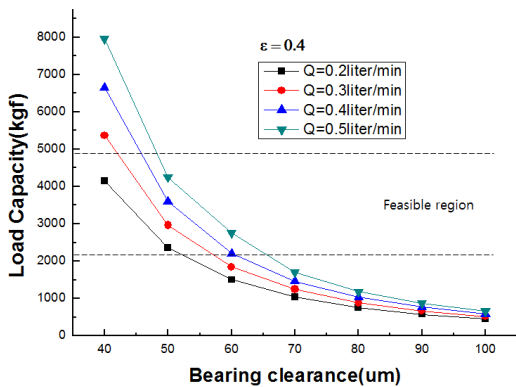


Fig. 13 Resulted load capacity according to hydrostatic bearing clearance and flow rate of PTD

대형 복합수직선반의 핵심요소 중 하나인 회전 테이블은 최대 크기가 $\phi 5,000 \times 500$ mm 이고 최대 중량 250 kN 인 피치 및 요우 베어링과 약 250 kN 의 자중을 견뎌야 하므로 Fig. 14 와 같이 트러스트(thrust) 베어링과 레이디얼(radial) 베어링의 유정압 베어링으로 지지가 된다. 이에 회전 테이블은 최

소 500 kN 의 부하용량이 필요로 하고 3 kN/ μm 의 수직방향 강성이 요구된다.

복합수직선반의 유정압 베어링 설계를 위하여 Fig. 15 와 같은 정유량형 유정압 베어링 설계 소프트웨어를 개발하였으며, 이를 통해 입력된 베어링 형상정보와 윤활유의 점도로부터 부하하중과 간극에 따른 유량을 구하거나 유량과 간극에 따른 부하하중을 구할 수 있고, 편심률 또는 회전속도에 따른 부하하중, 강성 및 온도상승을 계산할 수 있다.¹⁵⁻¹⁷

본 연구에서 대형 복합수직선반의 회전 테이블에 대한 정유량형 유정압 베어링 설계결과, 반경 500 mm 의 위치에 8 개의 내부 유정압 패드(pad)와 반경 1,500 mm 의 위치에 20 개의 외부 유정압 패드를 배치시켰다. Fig. 16 에서처럼 회전 테이블의 최소부하(자중) 시에 설계 간극은 130 μm 이고 수직방향 강성은 5.8 kN/ μm 로 설계하였으며, 500 kN 의 최대부하에서는 간극 102.6 μm 과 15.0 kN/ μm 의 강성을 가지도록 설계되었다.

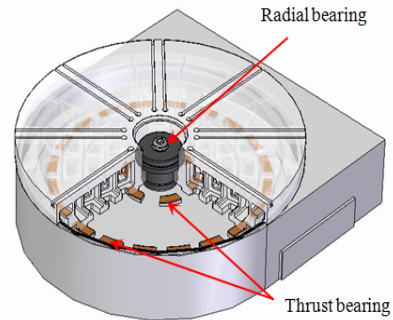


Fig. 14 The rotary table with hydrostatic bearing

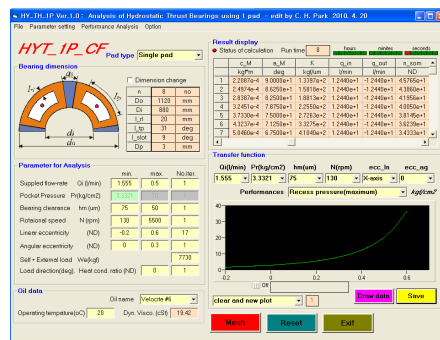


Fig. 15 Software for hydrostatic bearing analysis and design

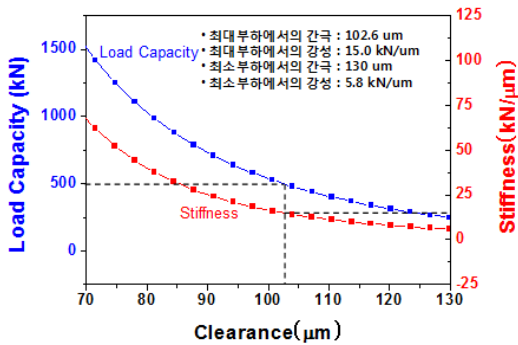
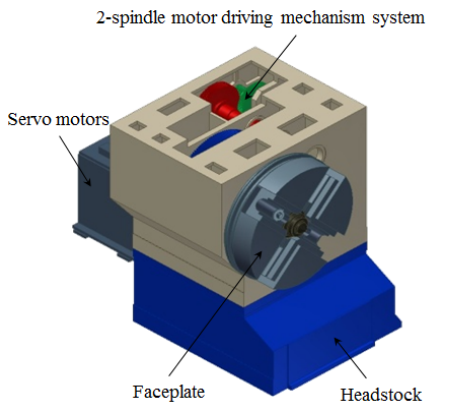


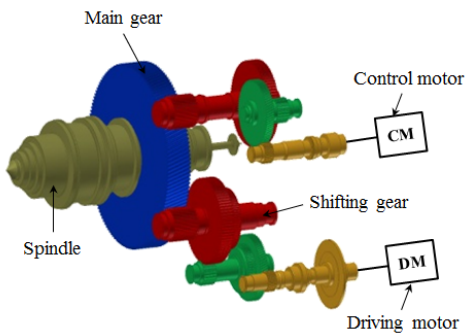
Fig. 16 Resulted load capacity and stiffness according to hydrostatic bearing clearance of rotary table

3.3 핵심 요소의 설계 기술

대형 크랭크샤프트 가공기의 주축대는 3.1 절에서 기술한 변형 최소화 및 고강성 구조 설계기술 뿐만 아니라 중요 핵심기술들이 집적되어 있다.



(a) high rigidity headstock



(b) 2-spindle motor driving mechanism system

Fig. 17 High rigidity headstock of multi-tasking machine tool for large scale marine engine crankshaft

주축대는 Fig. 17(a)에서처럼 면판과 대형 스핀들, 두 개의 스핀들 모터를 구동하기 위한 기어열로 구성된다. 면판은 파워 클램핑 스크류(power clamping screw)를 사용하여 조(jaw) 당 400 kN의 강력 척킹과 광역 척킹이 가능하며, 대형 스핀들은 흔들림 정밀도를 8 μm 이내로 하기 위해 최적 베어링 위치 결정과 열팽창 최소화 기술이 적용되었다. 또한 대형 크랭크샤프트를 정삭 가공할 때, 크랭크샤프트의 편심질량으로 인해 불평형 토크가 발생하고, 이 때문에 회전속도의 변화를 초래하여 가공정밀도를 저하시킬 수 있다. 이에 Fig. 17(b)와 같은 2-스핀들 모터 구동 메커니즘을 제안하여 제어 모터(control motor)로부터 스핀들에 제어 토크를 발생시켜 회전속도를 일정하게 제어할 수 있도록 설계하였으며, 시스템의 비틀림 진동해석과 토크 제어 방안을 통해 저진동 설계 기술을 적용하고 있다.^{2,18-20} 더불어 2-스핀들 모터 구동 메커니즘 시스템은 변속 기어를 통해 고 토크와 고풍출력 범위를 확보하고 있다.

고품위 5 축 가공을 위한 2 축 자동선회헤드의 설계도 중요한 핵심 기술 중의 하나이다. 2.3 절에서 기술하였듯이 Fig. 18의 2 축 자동선회헤드는 15,000 rpm 급 스핀들을 내장하고 있기 때문에 고정밀, 고품위 가공을 위해서는 스핀들의 특성이 매우 중요하다. 이에 스핀들의 절삭 가공에 따른 채터를 예측하고 안정성 평가하였으며, 스핀들의 온도분포와 열변형 및 틸팅 모터부의 발열특성을 파악하여 2 축 자동선회헤드의 설계에 응용하고 있다.²²⁻²⁴ 또한, 본 연구의 자동선회헤드는 토크 모터에 의한 직접구동방식을 제안하여 기존 worm 기어나 베벨(bevel) 기어에 의한 마모와 정밀도 감소현상을 해소하였다.

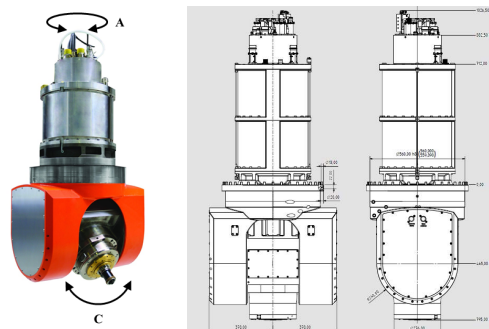


Fig. 18 The 2-axis automatic swiveling head of gantry type 5-axis multi-tasking machine tool

4. 결론

본 논문에서는 고정밀 대형 부품가공용 복합가공기의 일종인 대형 크랭크샤프트 가공기, 풍력발전기 부품가공용 복합수직선반, 대형 복합형상가공용 갠트리형 5 축 가공기의 핵심 원천 기술에 대하여 소개하였다. 가공기와 공작물의 대형화로 인해 일반 공작기계에 비하여 고강성 설계와 높은 기술적 집약이 요구되는 대형 복합가공기의 원천 기술로써 변형 최소화 및 고강성 구조설계 기술과 유정압 베어링 설계 기술에 관하여 고찰하였고, 핵심 요소에 집적된 주요 핵심기술 개발 결과를 소개하였다.

본 연구에서 개발된 다양한 대형 복합가공기의 원천기술은 대형 복합가공기 국산화 개발로 국내 시장 수입대체는 물론 세계시장 진출을 이루는 기반이 될 것이며, 나아가 국내 선박엔진 및 풍력발전기 등 초대형 초정밀 부품 제조 및 가공에 기술적 우위를 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 지식경제부의 산업원천기술개발사업의 “고정밀 대형 부품가공용 복합가공기 개발” 사업의 일환으로 연구되었습니다.(Grant no. 10033509)

참고문헌

- An, H. S., Cho, Y. J., Choi, Y. H. and Lee, D. W., “Development of manufacturing technique of multi-tasking machine tools for large scale marine engine crankshaft,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, pp. 288-289, 2011.
- An, H. S., Cho, Y. J., Choi, Y. H. and Lee, D. W., “Development of multi-tasking machine tools for large scale marine engine crankshaft,” Proceedings of KSMTE Autumn Conference, p. 190, 2011.
- Choi, H. B., Jo, S. G., Lee, J. H. and Shin, H. C., “Optimization of Multi-tasking Vertical Lathe for Windmill Parts,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, pp. 282-283, 2011.
- Kim, T. S., Hong, J. S., Yang, M. Y. and Lee, E. S., “Development of a large scale 5-axis machine tool of gantry type for multi-task machining,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, pp. 296-297, 2011.
- Jang, S. H., Jung, W. Y., Kwon, B. C. and Choi, Y. H., “A Study on Structural Design Optimization using TMSA in Discrete Searching Space,” World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 56, pp. 626-630, 2009.
- Sim, K. S., Jang, S. H., An, H. S. and Choi, Y. H., “High Rigidity Optimization of a Large Scale Multi-tasking Machine Tool by using TMSA,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, p. 15, 2010.
- Sim, K. S., Jang, S. H., An, H. S., Cho, Y. J. and Choi, Y. H., “A Study on the Structural Optimization Design of a Pin Turning Device,” Proceedings of KSPE Spring Conference, pp. 855-856, 2010.
- Sim, K. S., Jang, S. H., Hwang, I. W., An, H. S. and Choi, Y. H., “Dynamic Characteristic Analysis of a High-torque Spindle System for a Heavy Duty Lathe,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, pp. 290-291, 2011.
- Lee, M. G., Song, K. H., Choi, H. B. and Lee, D. Y., “The Displacement Minimization of the Tool Center Point by the Crossrail Structure Improvement of the Portal Machine,” Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 20, No. 3, pp. 310-315, 2011.
- Lee, M. K., Park, J. J., Lee, E. S. and Kim, N. S., “A Study on the Z axis Deflection Compensation of the Crossrail for Gantry Type Machine Tools,” Journal of Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 20, No. 2, pp. 357-360, 2011.
- Lee, E. S., Lee, M. K., Park, J. B., Kim, N. S. and Park, J. J., “Analysis of Angular Motion Control Capacity for Biaxial Concurrent Control System of Gantry Type Machine,” Proceedings of KSMTE Autumn Conference, p. 191, 2011.
- Shin, I. D., Lee, S. M., Ha, Y. H. and Lee, D. W., “The Effect of Roundness Errors of Marine Engine Bearing on the Minimum Film Thickness,” Proceedings of KSTLE the 51st Autumn Conference, pp. 33-34, 2010.
- Ha, Y. H., Shin, I. D., Lee, S. J., Lee, S. M. and Lee, D. W., “Lubrication Analysis of a Hydrostatic Bearing for Pin Turning,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, pp. 294-295, 2011.
- Ha, Y. H., Lee, S. J., Lee, S. M. and Lee, D. W., “Lubrication Analysis of a Hydrostatic Bearing for

- Pin Turning according to Roundness Error of a Journal,” Proceedings of KSMTE Autumn Conference, p. 142, 2011.
15. Oh, J. S. and Park, C. H., “Design of Constant Flow Type Hydrostatic Bearing for Large Rotary Table,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, pp. 284-285, 2011.
 16. Oh, J. S., Park, C. H., Shim, J. Y., Choi, H. B., Shin, H. C. and Lee, J. H., “Basic Performance Evaluation of Large Hydrostatic Rotary Table,” Proceedings of KSMTE Autumn Conference, p. 232, 2011.
 17. Kim, B. S., Song, C. Y. and Park, C. H., “Robust Thermal Error Modeling and Compensation for a Nano Level Thermal Drift in a High Precision Lathe,” International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, Vol. 12, No. 4, pp. 657-661, 2011.
 18. Jang, S. H., Sim, K. S., Lee, S. H., An, H. S. and Choi, Y. H., “Torque Control of a Lathe Spindle System with Unbalanced Workpiece,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, pp. 292-293, 2011.
 19. Guo, R., Jang, S. H., Sim, K. S. and Choi, Y. H., “Torsional Vibration Analysis of a Geared Transmission System of a Large Scale Lathe under Gravitational Unbalancing Torque,” Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, pp. 1302-1307, 2010.
 20. Guo, R., Jang, S. H. and Choi, Y. H., “Torsional vibration analysis of lathe spindle system with unbalanced workpiece,” Journal Central South University Technology, Vol. 18, No. 1, pp. 171-176, 2011.
 21. Yi, W. S., Lee, S. Y. and Lee, J. M., “Dynamic Characteristics Analysis and Chatter Prediction in High Speed CNC Lathe,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 16, No. 7, pp. 151-157, 1999.
 22. Shin, S. B., Lee, H. H., Kim, J. S., Kim, J. Y. and Yang, M. Y., “A Study on Chatter Stability of High Speed Spindle,” Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 19, No. 3, pp. 340-345, 2010.
 23. Lee, H. H., Kim, J. S., Yang, M. Y., Kim, K. H., Park, S. G. and Youn, J. W., “A Study on Dynamic Characteristics of 2-axis Head Spindle for Five-axis Machine Tools,” Proceedings of KSMTE Autumn Conference, p. 155, 2011.
 24. Shin, S. B., Lee, H. H., Kim, J. S., Lee, H. C. and Yang, M. Y., “A Study on Thermal Characteristic of Spindle Tilting Motor System,” Proceedings of KSMTE Spring Conference, p. 300, 2011.
 25. Choi, Y. H., An, H. S., Choi, H. B. and Hong, J. S., “The Development of a Multi-tasking Machine Tool for Machining Highly Precision Large Parts,” Proceedings of KSMTE Autumn Conference, p. 163-166, 2010.