

다축 스피들 헤드 기반의 전용 공작기계 설계

맹희영^{a*}, 박주욱^b, 박홍근^b

Design of Special-purpose Machine Tool Based on a Multi-spindle Head

Heeyoung Maeng^a, Juwook Park^b, Hongkeun Park^b^a Department of Mechanical System Design Eng., Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongreung-ro, Seoul 01811, Korea^b Department of Mechanical System Design Eng., Seoul National University of Science and Technology,
232, Gongreung-ro, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 November 2015
Revised 6 December 2015
Accepted 8 December 2015

Keywords:

Multi-spindle head
Special-purpose machine tool
Power transmission system
Automatic design modules
Accurate clamping
Automatic transportation

ABSTRACT

When many holes on a plane are machined simultaneously, the positional precision and machining efficiency are very important. Multi-spindle heads are typical order making products of which the number of shafts and hole positions vary depending on the size or form of the product. For the automatic design of multi-spindle heads, the design modules for power transmission systems for drive, idle, and spindle shafts were developed, and a design technique the determining the optimum position and number of idle shafts according to gear positions was developed. In addition, for the precise determination of the multi-spindle head, the design methods for the guide planes of columns, and feed mechanisms were devised. In addition, the design modules for accurate clamping and automatic transportation mechanisms were developed. Finally, in order to simplify and standardize the design process, the design analysis and simulation verification modules are integrated.

1. 서론

최근 모바일이나 가전제품의 설계 기술이 컴팩트화 되어 가고 있어서 조립용 체결 구멍의 위치 정밀도와 가공 안정성에 대한 요구도 또한 높아지고 있다^{1,2)}. 이들 양산 제품들의 조립용 체결 구멍은 일일이 개별적으로 가공하는 경우도 있지만, 평면상에 위치한 여러 개의 구멍을 다축 드릴링/태핑 전용 공작기계를 이용하여 한꺼번에 가공하는 경우가 많다³⁾. 평면상의 여러 체결 구멍들을 동시에 가공하게 되면 위치 정밀도뿐만 아니라 가공능률과 생산성도 크게 높아지는 장점이 있다⁴⁾.

다축 스피들 헤드는 가공하려는 제품의 크기나 형식에 따라 축 수와 구멍의 위치가 바뀌기 때문에 설계 내용 또한 변경되어야 하는 전형적인 주문생산 형태이다^{5,6)}. 이에 따라 숙련된 설계 인력이 필요하게 되고, 설계 과정에서 많은 시간이 소비되어 납기를 맞추기 어려운 경우도 자주 발생한다. 특히 축 수가 매우 많거나 위치 정밀도가 높은 경우에는 설계 오류의 발생 가능성도 있어 설계 신뢰도에 문제가 생기기도 한다^{7,8)}.

이러한 문제점을 해결하기 위해, 본 연구에서는 다축 스피들 헤드 기반의 전용 공작기계를 보다 효율적으로 설계할 수 있는 방법론들을 고안하고자 하였다. 다축 스피들 헤드를 자동으로 설계하기

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6363

Fax: +82-2-949-2407

E-mail address: maeng@seoultech.ac.kr (Heeyoung Maeng).

위해 구동축(drive shaft), 전달축(idle shaft), 스피들축(spindle shaft)의 동력 전달계에 대한 체계적 설계 모듈을 개발하였으며, 기어 위치에 따른 전달 기어의 최적 위치와 크기를 선정하기 위한 설계 기법을 개발하였다. 그리고 다축 헤드의 정밀 위치결정을 위해 전용 공작기계 테이블, 컬럼부의 안내면과 정밀 이송기구의 설계 방법⁹⁾을 고안하였으며, 가공물의 정확한 착탈과 자동 운송 메커니즘의 설계 모듈들도 개발하였다. 아울러 전용 공작기계 베이스와 지지 구조물에 대해 정적, 동적 강성을 CAE 해석하였고 그 결과를 이용하여 안정성 있는 구조를 설계하였으며, 3D 종합설계 패키지를 구성하기 위해 AutoCAD, Pro-E, ANSYS 등에서 산출된 설계 DB와 시뮬레이션 검증 모듈들을 통합화하여 설계의 단순화와 표준화, 설계시간을 단축시키는 효과를 거두고자 하였다.

2. 설계 시스템의 구성과 방법론

2.1 전체 시스템의 구성

본 연구에서 대상으로 하고 있는 다축 헤드 전용 공작기계는 Fig. 1에서 보는 바와 같이, 크게 다축 스피들 헤드(A), 피가공물 안내/착탈 장치(B), 정밀 위치결정 장치(C), 그리고 베이스 지지 구조물(D) 등의 4가지 설계 모듈로 구성하였다.

구성 모듈별 기능을 살펴보면, A의 다축 스피들 헤드 모듈은 피가공물 구멍에 대응하는 스피들 위치에 따라 표준기어를 기반으로 한 기어열(gear train)을 입체적으로 구성한 헤드를 설계 하고 구동축으로부터의 동력 전달계를 통해 드릴링/탭핑 가공을 실시하는 모듈이다.

B의 피가공물 안내/착탈 장치는 피가공물이 이송 컨베이어로부터 들어오면 회전 자유도를 갖는 팔렛 교환구에 의해 가공 테이블로 이송되어 유공압 지그바이스를 통해 정밀하게 장착하고 이탈되고 경우에 따라서는 검사도 실시할 수 있는 자동화 모듈이다.

그리고 C의 정밀 위치결정 장치는 실제의 가공작업을 위해 다축 스피들 헤드를 작업 위치로 이동시키고, 가공 구멍의 길이 또는 가공 이송속도에 맞추어서 소요의 정밀도로 가공을 안정적으로 할 수 있도록 위치결정 운동을 일으켜 주는 컬럼과 안내면으로 구성된 모듈 부분이다.

또한 D의 베이스 지지 구조물은 전체의 공작기계 구성요소들이 안정적인 상태 변위를 일으킬 수 있도록 정적, 동적 강성의 구조물

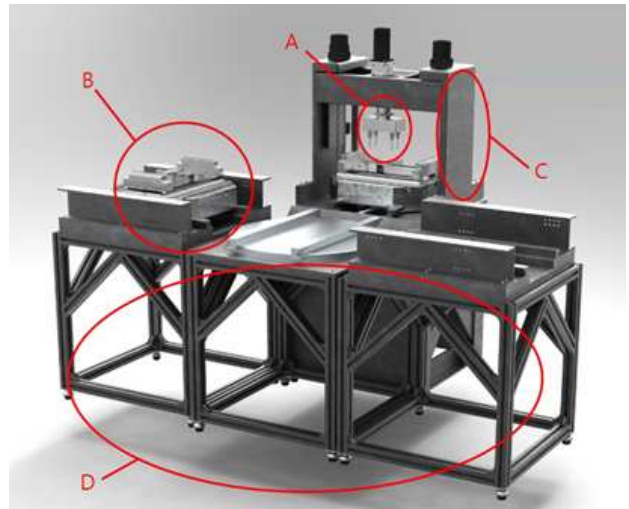


Fig. 1 Pro-E modeling result of overall machine tool

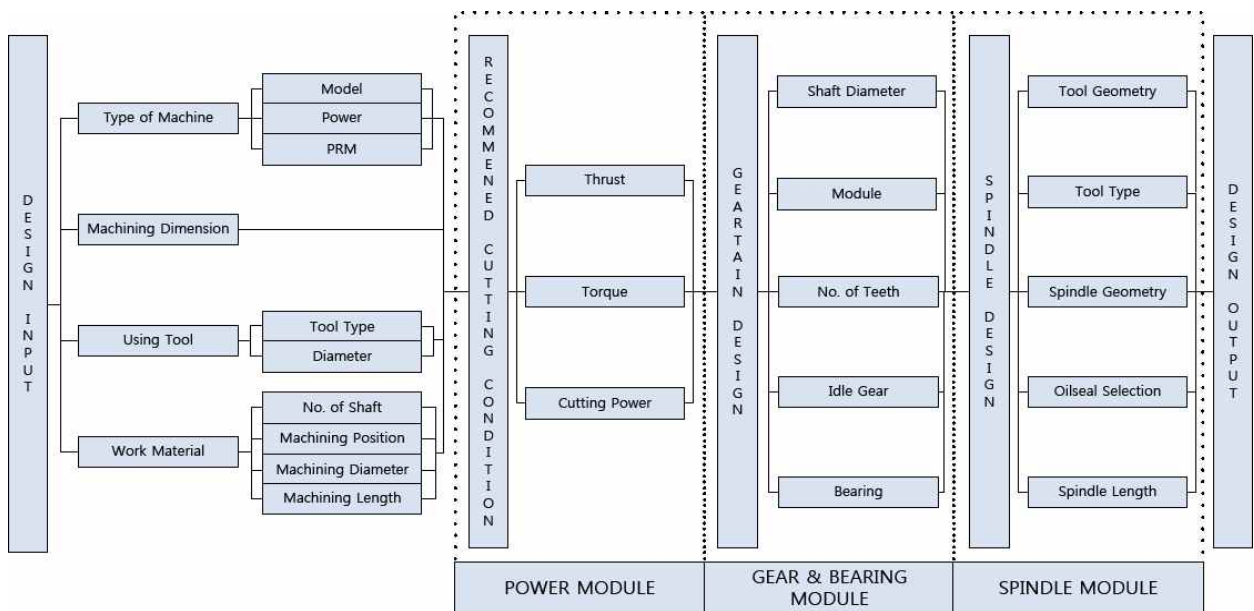


Fig. 2 Configuration of overall design processing modules architecture

로 형성된 베이스 부분이다.

2.2 다축 스핀들 헤드의 주요 설계 모듈

다축 스핀들 헤드 설계를 위한 전체적인 설계 절차와 설계 정보의 흐름 과정, 그리고 각 처리 소프트웨어의 구성은 Fig. 2에서 보이는 것과 같다.

2.2.1 기초 설계자료 구축 모듈

각 축의 토크와 드리프트, 사용 회전수, 전달 동력들은 다음 단계의 상세 설계 모듈에서 사용할 수 있는 데이터베이스로 구축되며, 가공물 재질과 드릴 직경, 구멍길이 비, 사용공구 형식, 기하학적 형상 등을 토대로 이송량, 표준 절삭속도, 절삭력 상수, 추천 절삭유 및 소요 가공정밀도 등이 결정된다. 그리고 이들 자료들은 제품의 설계 시에 필요로 하는 각 축의 회전수, 토크, 드리프트, 전달동력 및 기타 자료에 관한 설계 기준치들을 데이터베이스로 구축하였다.

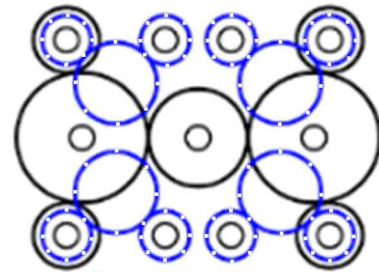
2.2.2 기어열 설계 모듈

다축헤드 동력전달계를 위한 기어열의 설계는 크게 5단계로 구성하였다^{3,4}. 그 첫 번째는 기하학적 설계 단계로 구동 기어, 전달 기어, 스핀들 기어 등이 각 기어의 크기와 위치, 또 이들의 연결 및 배치에 따라 어떻게 연결되는가에 대한 동력 전달계통을 결정하는 것이다. 두 번째는 공학적인 설계를 실시하는 단계로 전달 동력을 고려하여 치폭과 기어 모듈의 결정, 잇수 결정 등이 이루어지는 단계이다. 그리고 세 번째 단계는 전위량의 최적화 단계로써 주어진 축간 거리를 맞추기 위한 전위량을 산출하고 앞의 설계 단계에서 결정된 설계치(잇수와 전달 기어의 위치)를 변화시켜 최적의 전위량을 갖도록 수정하는 단계이다. 또한 네 번째 단계에서는 세 번째 단계에서 확정된 기어열의 설계 결과를 토대로 걸치기 잇수, 걸치기 이두께, 이끝 원지름 등의 구체 설계 데이터를 산출하는 단계이다. 아울러 다섯 번째 단계에서는 스핀들 축의 축경을 산출하고, 베어링과 너트, 와셔 등의 기계요소들을 선정하여 기어열의 설계 과정이 마무리되는 단계이다.

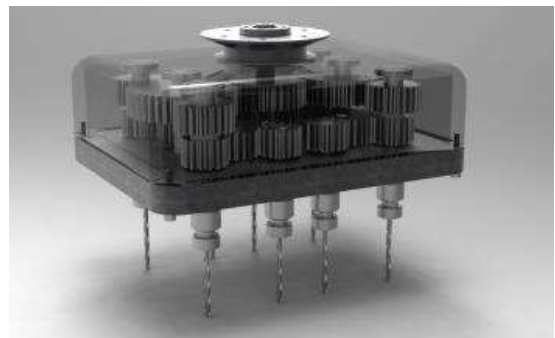
2.2.3 스핀들 설계 모듈

스핀들 설계 모듈에서는 스핀들의 세부 설계 즉, 공구 장착부의 형상과 크기, 오일 씰의 선정, 스핀들 길이 등을 결정할 수 있도록 하였다. 이 설계 모듈의 개괄적 구성은 크게 4단계로 구성하였는데, 그 첫 번째 단계에서는 기본 데이터의 입력 단계로 가공의 종류(드릴 또는 탭), 축수, 공구의 종류, 공구 장착부의 형태, 가공 직경, 가공 깊이, 관통 여부, 스핀들 축의 직경 등에 대한 기초 데이터를 입력하는 단계이다. 두 번째 단계에서는 선정된 공구의 형상과 세

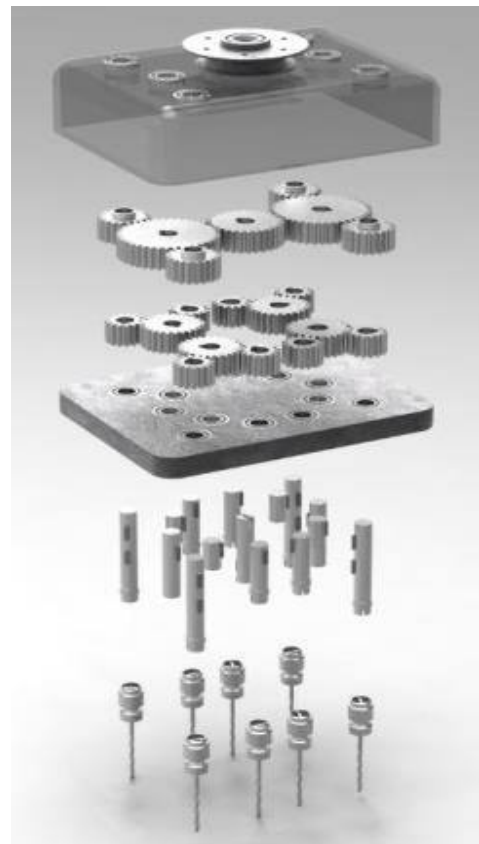
부 치수(생크 직경, 헬릭스 길이 등)를 검색하는 단계이다. 그리고 세 번째 단계는 선정된 공구형상에 맞는 공구 장착부(콜렛, 어댑터,



Blue(- - -) : 1st stage
Black(—) : 2nd stage
(a) Planetary disposition of shaft



(b) Final designed model



(c) Internal assembly of composing elements

Fig. 3 Configuration of overall architecture for design



Fig. 4 Pro-E model of clamping unit using zig vise

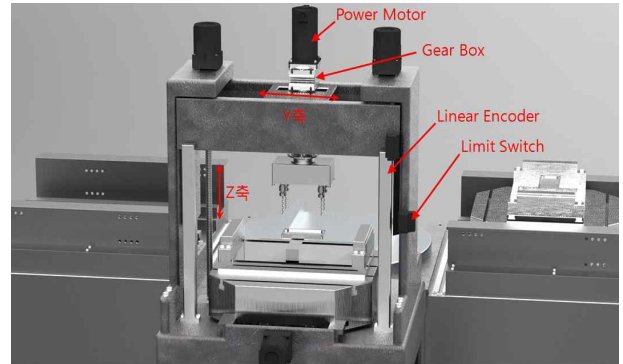


Fig. 5 Pro-E model of clamping unit using zig vise

슬리브, 척)를 설계하는 단계로써 기본적인 형상과 치수는 공구 정착부에 대한 데이터베이스를 검색하여 찾아내고 공구에 따라 가변되는 형상과 치수는 앞의 단계에서 검색된 공구의 형상과 치수로부터 결정된다. 또한 네 번째 단계는 기타의 스펀들 설계치 즉, 스펀들 축과 공구 장착부 사이의 중간턱 부위의 치수, 오일 씰의 선정, 스펀들 길이의 선정 등을 수행하도록 하였다.

이와 같은 과정을 통하여 설계된 2층 구조의 다축 스펀들 헤드의 설계 결과는 Fig. 3에서 보이는 예와 같다. 이와 같은 설계 과정에서는 실제 구동시의 간섭 발생의 여부에 대해서도 체크하도록 하였으며, 이는 층 구조로 모델링이 완료된 후, 구동기어의 피치원 중심으로 형성된 기어 간의 실제 구동 모습을 통해 간섭 여부를 확인할 수 있도록 구성하였다.

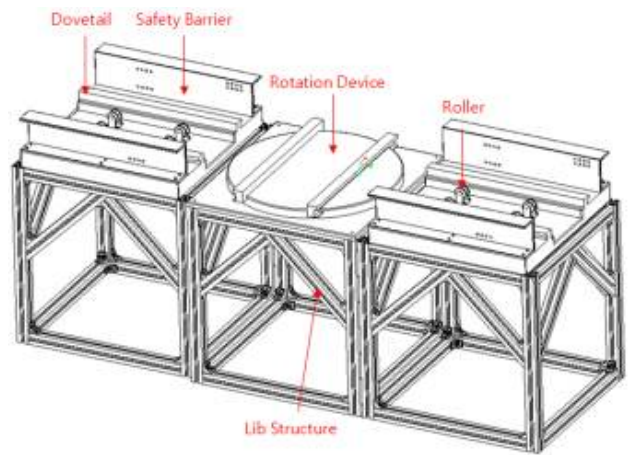


Fig. 6 Pro-E model of clamping unit using zig vise

2.3 피가공물 착탈 장치의 설계 모듈

피가공물을 착탈하는 장치는 유공압 지그 바이스의 장착 특성을 이용하여 설계 모듈을 구성하였다. 피가공물이 흔들림과 견고한 고정을 유공압 지그바이스를 적용하여 2D 설계를 진행하였으며, 진동과 흔들림을 설계 시의 주된 성능지침 인자로 하여 설계하였다.

전체적인 모델링은 Fig. 4와 같이 Pro-E를 사용하여 구속 조건으로 슬라이더 기능을 통해 직선 왕복 운동과 직동 거리를 기준으로 하여 설계하였다. 그리고 클램핑 장치는 T-Slot을 이용해서 이송시 안전성을 고려하여 바이스의 바닥 부분도 가공 시 파손되지 않도록 돌출형 구조를 적용하였다.

2.4 가공 안내기구 및 자동 이송장치의 설계 모듈

가공 안내기구는 드릴링 가공 중 발생하는 하중, 내부 및 외부 열원에 의한 변형 등이 복합적으로 발생하므로 이를 고려하여 충분한 강성을 갖도록 설계하고, 발생하는 진동을 최소화할 수 있는 구조로 설계되도록 하였다. 이 단계의 설계에서는 제품의 안정성을 검토하기 위해 CAE 프로그램을 이용하여 변형 해석을 실시하였고, 그 결과를 반복적으로 치수의 변경 과정에 반영하여 점진적으로 변형량이 줄어들면서 가공 정밀도 또한 향상되는 설계 방법을

적용하였으며, Fig. 5는 Pro-E를 사용하여 설계한 전형적인 대표 유형을 보여주고 있다.

한편 자동 이송장치를 설계하는 데에 있어서는 Fig. 6과 같이 팔레트 구조의 자동화 라인 구성 방식을 바탕으로 이를 설계 요구 조건에 적용시키는 파라메트릭 설계 방식을 적용하였다. 여기서 이송장치를 지지하는 베드 부분은 규격화된 고강성 알루미늄 프로파일을 이용하여 구조 안정화를 기할 수 있는 트러스트 구조물의 일반적인 강성과 변위 산출을 위한 설계 코드를 적용하였다.

3. 설계 결과 및 고찰

3.1 다축 스펀들 헤드 설계 검토

다축 스펀들 헤드가 설계되는 전체 과정을 적용하기 위하여 3층 구조의 복잡한 설계 내용을 대상으로 검토하였다. 기초 설계치와 동력전달계통의 선정을 위한 설계 모듈에서는 기어열 부분과 이에 따른 부품선정 과정에서 설계 자료의 입력과 수정이 원활히 처리되고 있었으며, 구동기어의 크기(직경)와 회전 속도비에 따른 스펀들 기어의 크기가 원만하게 잘 결정되고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 동력전달 계통의 선정(pairing of gear train)에 있어서도 가

공 구멍의 수에 따라 간섭을 고려하여 층 구조로 설계하여 2~3개의 다축 헤드를 하나의 동력 전달계통으로 원활하게 변환하고 있음을 확인할 수 있었다.

동력전달 계통의 선정 작업이 끝나고 기어의 모듈을 결정하는 과정과 최소 잇수를 결정하는 과정에서는 Lewis 공식과 안전계수, 이나비 비를 통하여 기어 이의 모듈 값이 합리적으로 잘 결정되고 있음을 알 수 있었다. 한편 잇수와 피치원 지름을 계산한 다음에는 간섭을 피하기 위한 최저 잇수가 제대로 계산되는지 체크하였는데, 간섭 발생의 우려가 있으면 잇수 증가를 통해 기어의 반경을 늘리거나 모듈을 작게 하는 현상이 나타남을 검토할 수 있었다.

아울러 전달 기어의 위치와 크기를 산출하는 단계에서는 반복설계를 통한 접근 방식을 적용하였는데, 기어의 초기 크기 선정부터 다시 반복하는 경우, 동력전달계통 선정부터 다시 반복하는 경우, 모듈 선정부터 다시 반복하는 경우 등으로 나누어 고정형 전달 기어와 자유형 전달 기어의 구분에 따른 차이를 검증하였는데, 그 결과를 Pro-E 3D 설계 프로그램의 애니메이션 결과를 통해 최종 설계 결과를 확인하여 본 결과, Fig. 7과 같이 설계자가 원하는 대로 간섭을 피하면서 잘 실시되고 있음을 검증할 수 있었다.

3.2 스프링 규격 및 요소 부품의 설계 검토

축경과 전달동력에 알맞은 베어링, 너트, 와셔 등을 선정하는 과정에는 기어열의 위쪽에서는 레이디얼 베어링만이 선택되나 아래에서는 레이디얼 베어링, 드러스트 베어링, 니들 베어링 등이 모두 선정될 수 있음을 검토할 수 있었다. 그리고 축경에 따라 적정 부품이 선정 출력되는 것을 확인할 수 있었으며, 스프링 축용 베어링의 선정에 있어서는 스프링 축의 지지형태에 따라서 상 베어링, 하 베어링, 드러스트 베어링의 순서로 선택되고 있음을 검토할 수 있었다.

한편 스프링들의 세부설계 내용을 검토하는 과정에서는 공구 장착

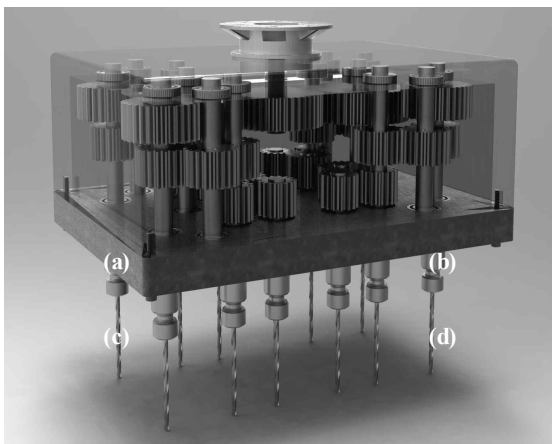


Fig. 7 Pro-E model of clamping unit using zig vise

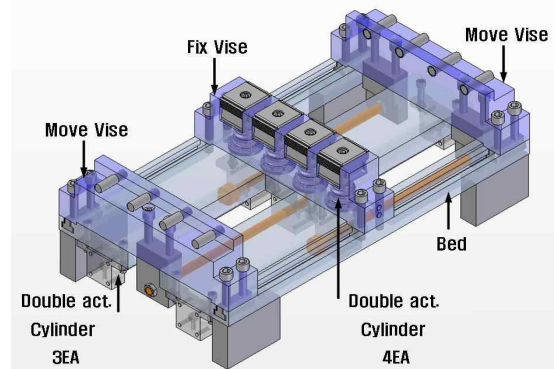
부의 결정, 캡 너트의 선정 및 치수 결정, 오일 쉘의 선정 등을 검증 인자로 하였는데, 표준화된 부품을 우선으로 세부적 형상과 치수를 검토하였다.

3.3 피가공물 착탈 장치의 설계 검토

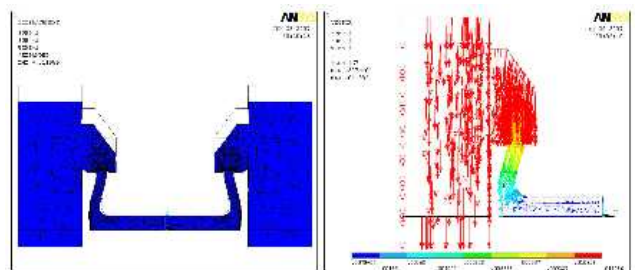
유공압 지그 바이스의 장착 특성을 이용한 피가공물 착탈 장치의 설계 모듈을 검증하기 위하여 우선은 부품 요소의 구성과 모델링에 대한 적합성을 평가하였는데, 이는 Fig. 8(a)와 같이 유기적으로 잘 구성되고 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 Fig. 8(b)와 (c)에서 비교될 수 있는 바와 같이 바이스가 피가공물을 클램핑하기 위해 부상력이 주고 있는데, 해석 결과로 가공물이 있을 때에는 가공물 반대쪽에 이동 바이스(move vise)에 의해 가공물이 완전히 고정된 것이기 때문에 최대변위는 약 0.01 mm로 조오 바디(jaw-body)의 변형은 클램핑 되는 가공물의 반대방향이 완전 고정이라는 가정 하에 약 1/100 mm의 변위 이내로 생김을 확인할 수 있었고 중력방향으로 끌려 내려감으로써 S자 형태로 변형됨을 알 수 있었다.

3.4 자동 이송장치 및 베이스 구조를 설계 검토

자동 이송장치는 크게 척이 움직이는 도브테일(dovetail) 라인과 전용기계로 들어가기 위한 회전 장치(rotation device), 이송을 위한 롤러 가이드(roller guide), 사용자 안전을 위한 안전 방호벽



(a) Modeling result of zig vise



(b) Clamping jaw

(c) Stress analysis

Fig. 8 Pro-E model of clamping unit using zig vise

(safety barrier) 등으로 설계 되어 있어서 이들 각 부위의 기능상의 적합 여부를 검토하였다. 지그 바이스에 의해 장착된 가공물이 팔렛에 의해 가공 위치로 이송하는 과정은 Fig. 9(a)~(d)에서 볼 수 있는 바와 같이 대기 장소에서 독립적으로 가공물을 장착한 후, 회전 장치로 이송되어 90° 회전한 후 작업 위치로 이송하여 작업을 실시하는 과정이 완전하게 구현됨을 검토할 수 있었다.

한편 베이스 구조물의 설계 결과에 있어서는 우선 Y축 기구부에서 안내 포스트(guide post)를 붙여서 설계한 효과로 이송 정밀도와 안정성이 높아짐을 확인할 수 있었고, Z축 기구부는 볼 스크류 2개를 대칭 구조로 설치하여 설계하여 가공 시 모터의 과부하와 가공 시 발생하는 반력을 막아주는 효과가 있음을 검토할 수 있었다. 아울러 베이스 구조물의 설계 결과가 안정성이 있는가를 검토하기 위하여 ANSYS workbench를 이용하여 CAE 해석을 수행하였는데, 그 결과는 Fig. 10과 같은 변위를 보였다. 기존에 사용되고 있는 드릴링 머신의 경우 ‘ㄱ’구조로 구성되어 있는데, 이 방식

을 이용하여 설계 할 경우에는 처짐량이 0.04 mm까지 발생하고 있으나, 본 연구의 설계는 처짐 현상을 막기 위해 Y축과 Z축 이송부를 중앙으로 옮기는 구조로 변경하여 처짐량이 0.003 mm로 대폭 줄어들게 되었음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

이상과 같이 본 연구에서는 다축 스펀들 헤드 기반의 전용 공작기계를 설계할 수 있는 설계 모듈들을 개발하였다. 다축 스펀들 헤드의 동력 전달계에 대한 체계적인 설계 모듈들을 성공적으로 개발하여 그 적합성과 효율성 측면에 있어서 우수함을 검토할 수 있었으며, 선정된 기어의 위치와 크기에 있어서도 최적의 정확도를 나타내고 있음을 확인하였다.

아울러 다축 헤드의 정밀 위치결정을 위한 전용 공작기계의 테이블, 컬럼부의 안내면과 이송기구에 있어서도 고유의 설계 방법을 적용하여 설계의 단순화와 표준화를 기할 수 있었다. 한편 가공물의 착탈과 운송 메카니즘에 관한 설계 모듈들도 모듈화된 단순 설계 과정을 적용하여 설계 시간을 대폭 단축시키고 있는 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 그리고 전용 공작기계 베이스와 지지 구조물을 설계하는 과정은 정적, 동적 강성에 대한 CAE 해석 과정을 연계시켜 반영함으로써 안정성 있는 구조 설계 결과를 도출할 수 있었다.

결과적으로 이렇게 개발된 각각의 설계 모듈들은 3D 종합설계 패키지를 구성하기 위해 AutoCAD, Pro-E, ANSYS 등에서 산출된 설계 DB와 연계시켜서 성공적으로 통합할 수 있었으며, 필요에 따라 시뮬레이션 검증 모듈들을 거치면서 설계 결과의 적합성과 효율성을 검증할 수 있도록 개발하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Lu, K. J., Kota, S., 2006, Topology and Dimensional Synthesis of Compliant Mechanisms Using Discrete Optimization, *Journal of Mechanical Design*, 128:5 1080-1091.
 [2] Im, M., Park, J. Y., Ham, S. Y., 2010, Reliability Based Topology Optimization of Compliant Mechanisms, *Journal of the KSMTE*, 19:6 826-833.
 [3] Yoon, J. Y., Hwang, Y. K., Park, J. S., KO, T. J., Park, J. W., 2002, An

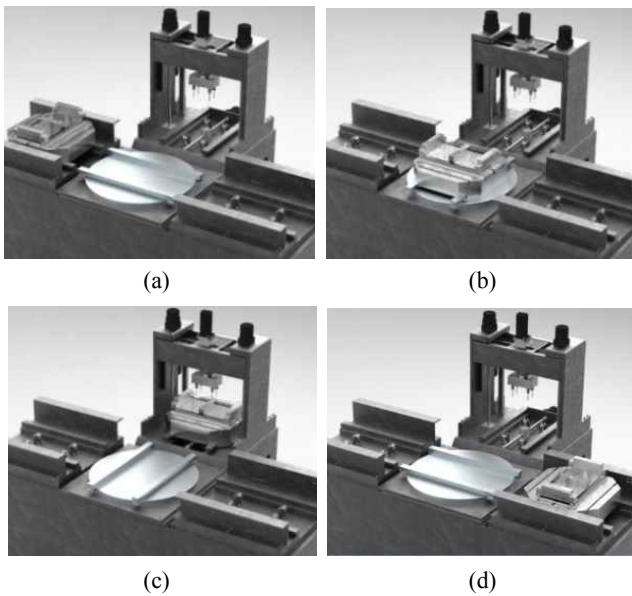


Fig. 9 Pro-E model of clamping unit using zig vise

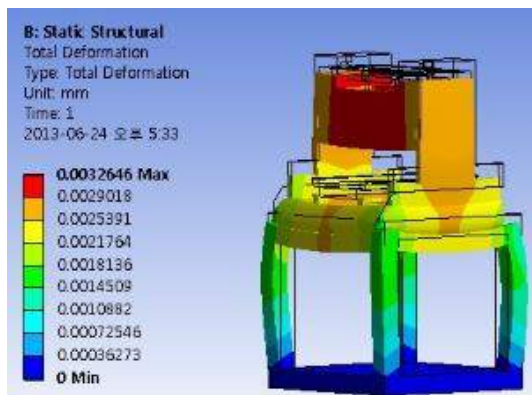


Fig. 10 Pro-E model of clamping unit using zig vise

- Integrated CAD System for Design of Extruder Screw, Journal of Korean Society of Precision Engineering, 19:8 100-107.
- [4] Park, H., Park, Y., Liang, S., 2011, Multi-procedure Design Optimization and Analysis of Mesoscale Machine Tools, The Int. J. of Advanced Manufacturing, 56:1-4 1-12.
- [5] Weikert, S., 2004, R-Test, a New Device for Accuracy Measurements on Five Axis Machine Tools, CIRP Annals-Manufacturing Technology, 53:1 429-432.
- [6] Kim, M. S., Chung, W. J., Jeong, S. W., Jeon, J. Y., 2013, Methodology for Simulation of Trochoid Pump, Journal of the KSMTE, 22:3 465-471.
- [7] Liang, H., Hong, H., Svoboda, J., 2002, A Combined 3D Linear and Circular Interpolation Technique for Multi-axis CNC Machining, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124:2 305-312.
- [8] Brecher, C., Witt, S., 2009, Interactive Analysis of the Structural Mechanic Behavior of Machine Tools, Production Engineering, 3:4-5 475-481.
- [9] Maglie, P., 2012, Parallelization of Design and Simulation: Virtual Machine Tools in Real Product Development, A Thesis for a Doctorate, Swiss Federal Institute of Technology Zurihi, Swiss.