한국기계가공학회지, 제16권, 제5호, pp.47～54(2017.10) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers,Vol.16, No.5, pp.47~54(2017.10) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2017.16.5.047

6축 병렬기구 공작기계의 머신 시뮬레이션과 앵글밀링헤드 적용에 관한 연구

이인수*, 김해지**, 김남경**,#
*한국항공우주산업(주), **경남과학기술대학교 자동차공학과

A Study on the Application of Machine Simulation and Angle Milling Head of a 6-Axis Parallel Kinematic Machine

In-Su Lee*, Hae-Ji Kim**, Nam-Kyung Kim**,#
*Korea Aerospace LTD., **Department of Automotive Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, Automotive Engineering.
(Received 17 August 2017; received in revised form 30 August 2017; accepted 7 September 2017)

ABSTRACT

This study examines the implementation of a kinematic machining tool to evaluate the interference and collision phenomenon of 5-axis machining of wing ribs from airplanes, particularly for a large-size model airplane. We develop a machine simulation model of a parallel kinematic machining tool that can operate in a virtual space, which is equivalent to the authentic conditions in the field. The investigation of the simulation function elements indicates the necessity to generate the 6-axis machining, which attaches an angle head to the main axis of the machine. Using an NC program for the wing ribs, we attempt to verify the correspondence and conformity between the machine simulation model and the actual equipment.

Key Words : Parallel Kinematic Machine(병렬기구 공작기계), Machine Simulation(머신 시뮬레이션), Angle Milling Head(앵글밀링헤드)

1. 서 론

최근 산업분야에서 활발히 적용되는 산업용 로봇이나 공작기계의 기구부 형태는 크게 직렬형(serial)과 병렬형(parallel)으로 구분할 수 있다. 대부분의 산업용 공작기계에 적용되는 직렬형 기구부의 구조는 공작기계의 본체를 구성하는 베이스와 엔드이펙트 사이를 하나로 연결하는 외팔보 구조로써, 폭넓은 작업영역과 운동성, 제품 제작 효율성의 장점과 구동부의 강성, 하중 용량이 병렬형 구동부와 비교하여 낮은 단점을 동시에 가지고 있다.[1] 이와 반대로 병렬형 기구부의 구조는 구동장치가 트러스트구조 형태의 병렬로 연결된 다수의 연결 링크로 인하여 부하가 균일하게 분담되고, 각 구동장치에는 축 방향의 하중만 작용하기 때문에 보다 큰 부하를 견딜 수 있어서 직렬형 기구부에 비해 상대적으로 높은 강성을 가지고 있다. 또한, 이동부의 질량이 작아서 속도와 가속도를 높일 수 있으며, 이를 통한 고속이송이 가능해 작업 생산성을 향상시킬 수 있다. 이러한 장점들로 인하여 항공분야에서 다양

Corresponding Author : nkkim@gntech.ac.kr
Tel: +82-55-751-3642, Fax: +82-55-751-3649

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하게 적용할 수 있는 새로운 공작기계의 구조형태로 많은 관심을 받고 있다.[2]

병렬기구형태의 주축구조를 가진 5축 대형 고속 가공장비를 이용하여 복잡하고 다양한 형상의 항공기 부품을 개발할 경우에는 주축과 다축 공작기계의 주요 구성장치, 공구홀더, 치공구, 공작물 등의 구성 요소와 요소 사이에서 간섭과 충돌이 발생할 가능성이 높은 실정이며, 이런 간섭과 충돌현상을 미리 방지하기 위해 본 제품을 제작하기 전에 충분한 검증과정을 수행하여 간섭과 충돌에 의한 사고를 미연에 방지하여야한다. 특히, 공작기계의 제한된 작업영역과 장비를 구성하는 축의 운동 각도 범위의 한계로 인해 가공할 수 없는 특정한 부위를 가공할 때 주축에 부착하여 사용이 가능한 앵글밀링헤드, 앵글드릴링헤드를 운영할 경우에는 공작기계 구성요소간의 간섭과 충돌이 발생할 확률은 더욱 높아지게 된다.[3] 이와 같이 5축 가공 시 발생하는 공작기계의 간섭 및 충돌 등의 위험요소를 사전에 감지하고 NC 가공 데이터의 적합성을 검증하기 위한 방법의 하나인 공작기계의 머신 시뮬레이션 분야에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.[4-8]

본 연구에서는 항공기 날개 구조물인 대형 윙립 부품의 5축 가공에서 발생할 수 있는 공작기계의 간섭과 충돌을 사전에 검증하기 위하여 가상공간에서 운용 가능한 병렬기구 공작기계의 머신 시뮬레이션 모델을 생성하였다. 5축 공작기계의 주축에 앵글헤드를 부착하여 6축 가공을 구현하고, 시뮬레이션 기능을 접목하여 실제 가공환경과 같은 조건을 갖춘 가상의 생산시스템을 구축하고자 하였다. 구축된 가상의 생산시스템을 이용하여 공작기계의 구성요소간의 상호 운동관계, 간섭 및 충돌현상에 대한 시뮬레이션 과정으로 윙립 가공용 NC 데이터에 대한 최적화를 수행하고, 생산현장에 투입하여 실물 가공단계를 통하여 시뮬레이션 모델의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 병렬기구 공작기계의 머신 시뮬레이션 구현

2.1 머신 시뮬레이션의 개요

가상의 공간에서 머신 시뮬레이션의 적용은 시뮬레이션이 될 공작기계의 구성요소(공작기계, 콘터롤러, 치공구, 가공공구, 공작물 등)들을 동일한 작업환경 조건으로 구현하는 것이다.

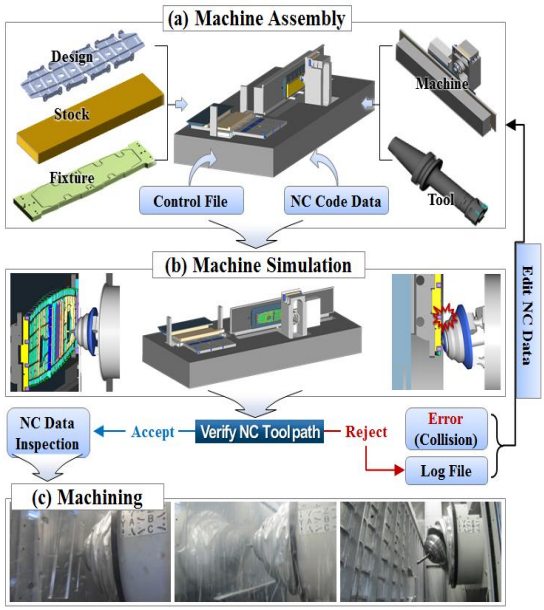


Fig. 1 Machine simulation components and application process

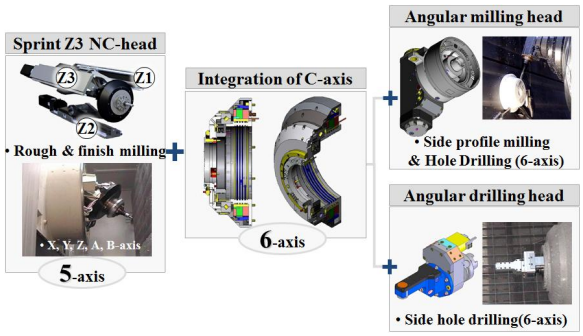
단순히 시뮬레이션을 위한 공작기계와 주요부위의 구성요소들에 관하여 모니터상의 화면 표현에만 그치지 않고, 실제 생산현장에 적용될 공작기계와 동일한 방식으로 작동되어야하며 복잡 다양한 형태의 다축 공작기계를 컴퓨터의 화면으로 구현되어야 한다.[9] Fig. 1에서는 머신 시뮬레이션을 구성하는 요소와 적용 프로세스를 나타내고 있다. Fig. 1(a)의 머신 시뮬레이션 모델은 가상공간에 생성된 공작기계와 절삭공구, 치공구, 피삭재, 제품 형상 모델 등의 하드웨어적인 요소와 공작기계를 움직이는 NC Control 파일, NC Code 파일 등의 소프트웨어적인 요소 등으로 구성되어진다. 복잡하고 다양한 기하학적 정보를 가지는 공작기계의 구성요소들은 우선적으로 WCS 기준 좌표계로 정의되고 있고, 형상조합의 좌표계인 OCS와 서로 연동되어 상대적인 위치 관계에 의해 결합되어 진다. 3차원 공간에서 완성된 공작기계의 가상모델을 이용한 Fig. 1(b)의 머신 시뮬레이션 단계에서는 실제 생산 환경에서 기계가공 시 발생할 수 있는 공구 및 치공구의 간섭, 다축공작기계의 주요부위와 공작물의 간섭 및 충돌을 미리 검증하여 공정의 불량요소를 제거하는 검증 과정을 거친다. 이러한 과정을 통하여 Fig. 1(c)와 같이 가공환경에 최적화되고 장비간섭 및 충돌로부터 검증된 NC 가공 데이타를 생산라인에 적용하게 된다.

2.2 병렬기구 공작기계의 머신 시뮬레이션 모델 생성

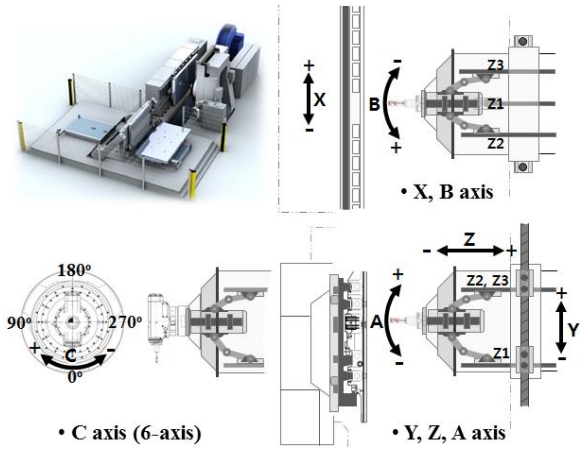
본 연구에서는 항공기 대형 윙립부품의 기계가공에 사용되는 독일 DST사에서 제작된 6축 병렬기구형태의 대형 고속가공기인 Eco-speed F2060 장비를 실험대상으로 선정하여 머신 시뮬레이션 구축하였다. 이 공작기계는 Fig. 2(a)와 같이 Sprint Z3 NC-head라는 병렬기구형태의 독특한 주축 구조를 가지고 있다. Z축에 3개의 병렬기구(Z1-axis, Z2-axis, Z3-axis)가 부착되어 링크의 직선운동으로 5축 가공자세(A, B +/- 40°)를 구현한다. 병렬기구의 5축 자세만으로는 가공이 불가능한 부위의 가공을 위하여 주축에 앵글밀링헤드 또는 앵글드릴링헤드를 결합하여 주축부의 C축이 360° 회전운동을 하는 6축으로의 변환구동이 가능하도록 되어있다. 공작기계의 스핀들로부터 회전력을 전달받아 작동하는 앵글헤드는 일반적으로 공작기계의 주축 스핀들과 동일한 회전수로 전달된 회전력을 직교방향(90°)으로 선회시켜서 공구가 삽입되는 앵글헤드 스핀들 부에 회전력을 전달하는 구조로 되어있다.[10]

주축 스핀들에서 전달된 회전력을 직교방향으로 선회시키기 위해서 일반적으로 spiral bevel gear가 많이 사용되며, 가공 시 간섭을 최소화하기 위해서 슬림한 형태로 제작되어진다. Fig. 2(b)에서는 공작기계를 구성하는 각 축의 운동방향을 나타내고 있다.

시뮬레이션에 사용될 병렬기구장비의 가상공작기계의 모델을 생성하기 위해서 먼저, 3D 설계 소프트웨어인 CATIA를 이용하여 장비설계도면 및 상세사양을 바탕으로 공작기계의 주요 구성장치를 각 부품 별로 3D 모델링 작업을 진행하였다. 시뮬레이션의 처리속도 향상을 위해 비 기능적인 부품은 제외하고, 장비를 구성하는 주요 구성부품에 대해서만 기능 위주로 3D형상화 하였다. 기계원점을 기준으로 부품의 어셈블리과정을 거쳐 공작기계 전체의 형상을 완성하였다. 완성된 공작기계 모델은 상용화된 기계가공 시뮬레이션 검증 소프트웨어인 VERICUT에서 사용이 가능하도록 각 부품 단위로 STL형식의 파일로 변환하고, 기준원점의 좌표계를 기준으로 위치값을 반영하였다. Fig. 3은 6축 병렬기구 공작기계의 시뮬레이션 모델을 구성하는 주요한 장치를 나타낸 것이며, Fig. 4는 가상의 시뮬레이션 모델을 구성하는 전체 요소의 조합과 위치, 상호 운동의 연관성과 종속관계를 표시한 머신 컴퍼넌트 트리(Machine component tree)를 나타내었다.



(a) Sprint Z3 NC-head and attach angle head



(b) Main component axis of machine tools

Fig. 2 The main axis and angle head of parallel mechanism machine

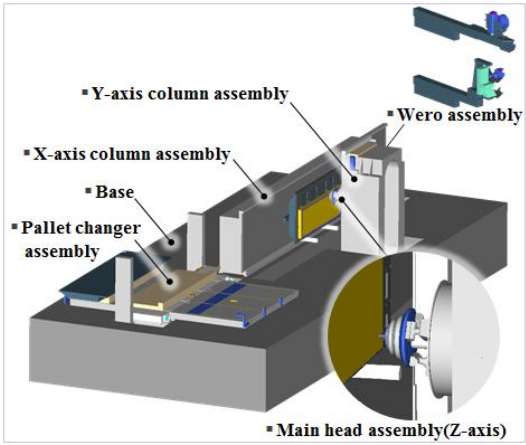


Fig. 3 Major components of 6-axis parallel kinematic machine

시뮬레이션 모델을 구동하기 위해서는 기계의 동적 모델 구성에 대한 정의와 주요 기능 축들의 동작을 수행하는 구성요소간의 관계에 대한 분석이 필요하였다. 다축으로 구성된 공작기계의 축에 대한 동작특성은 일반적으로 선형운동과 회전운동으로 구성되어지며, 본 실험 대상인 6축 병렬기구 공작기계의 경우엔 선형축 X축, Y축, Z축(Z1, Z2, Z3)과 회전축 A축, B축, C축 등으로 구성되어진다. 공작기계의 기본골격인 Base구조물을 기준으로 X축 테이블이송을 담당하는 X축 구성장치, Y축 이송을 담당하는 Y축 구성장치와 Z축, 공구 교환 장치, 공구측정 레이저 센서인 Blum Laser, 팔렛(pallet) 교환 장치가 각각 독립적으로 위치하도록 구성하였다.

주요 축(X, Y, Z, A, B, C)의 구성요소와 상관관계를 살펴보면, Fig. 5(a)와 같이 X축 구성장치 하위에 팔렛 및 치공구, 피삭재, 제품형상 모델이 종속되어 위치되며, Fig. 5(b)와 같이 Y축 구성장치 하위에 Z축과 병렬기구(Z1, Z2, Z3)가 종속되어 위치한다. Z축 내부에는 Fig. 5(c)와 같이 5축 기울기의 방향을 결정하는 가상의 축인 U축과 V축이 존재하고, 하위에 A축, B축, C축, 스핀들, 앵글헤드가 종속관계로 위치하도록 구성하였다.

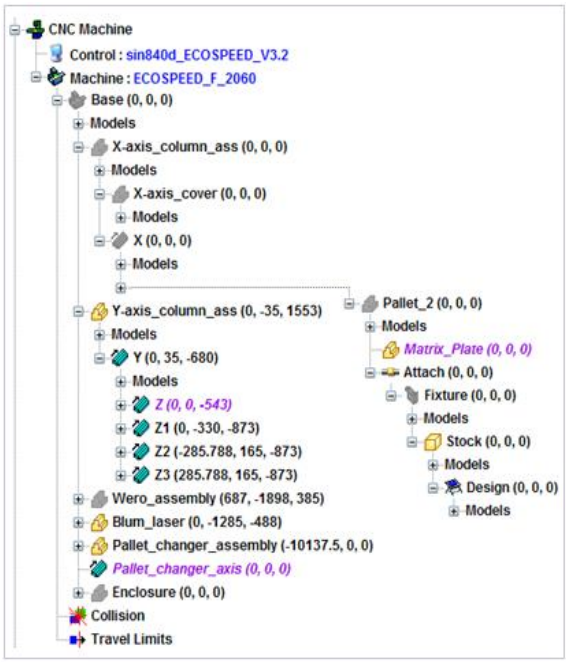
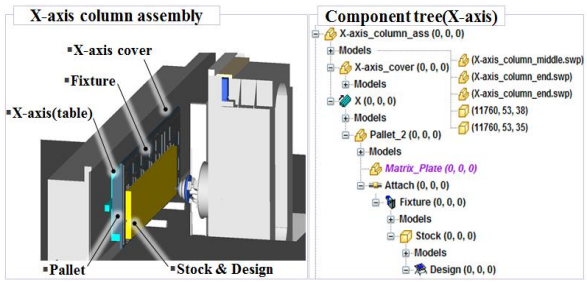
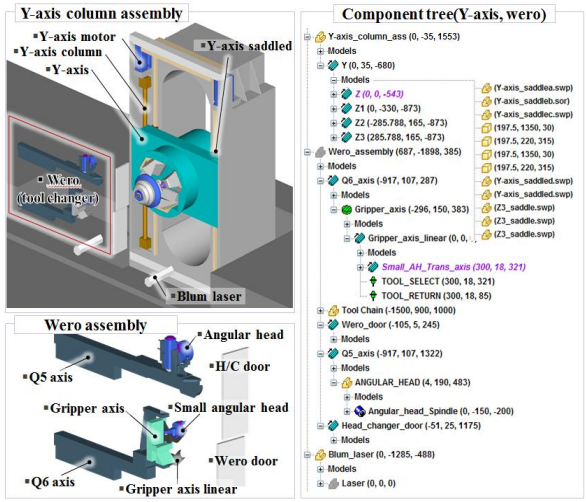


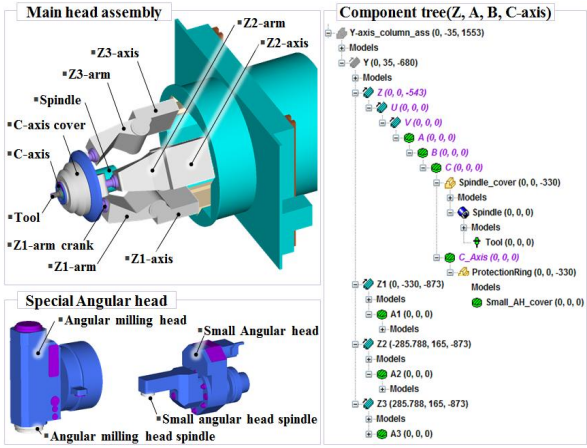
Fig. 4 Component tree of 6-axis parallel kinematic machine



(a) Component tree of X-axis



(b) Component tree of Y-axis and tool changer



(c) Machine head and component tree of Z, A, B, C-axis

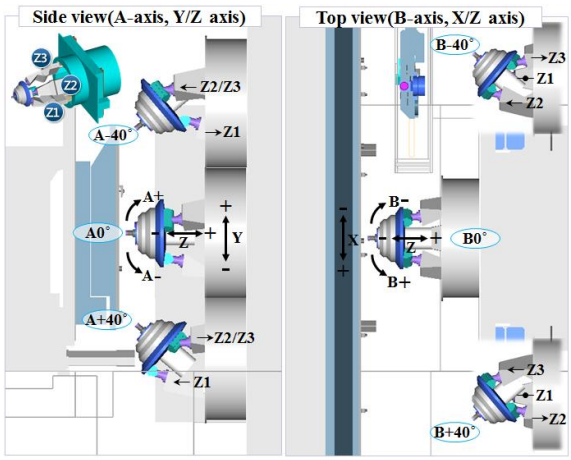
Fig. 5 Components and dependencies of equipment axis

2.3 병렬기구의 운동 정의

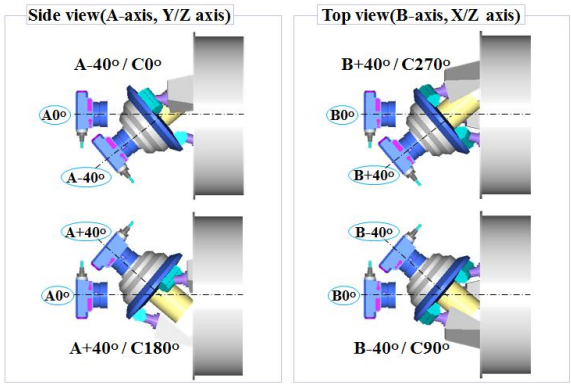
Fig. 6(a)에서는 주축인 Sprint Z3 NC-head의 병렬기구부인 Z1, Z2, Z3축의 직진운동에 따른 A축과 B축의 각도변화를 나타내고 있다. 먼저 A축의 각도 변화는 Z1/Z2/Z3축이 동시에 같은 거리를 이동하면 A축과 B축의 각도는 0°가 되고, Z1축이 전진하고 Z2/Z3축이 동시에 후퇴할 경우에는 A축은 -40°까지 기울어진다. 반대로 Z1축이 후퇴하고 Z2/Z3축이 동시에 전진할 경우에는 A축은 +40°까지 기울어진다. B축의 각도변화는 Z1축이 고정되고 Z2축이 후퇴하고 Z3축이 전진할 경우에는 B축은 +40°까지 기울여지며, Z1축이 고정되고 Z2축이 전진하고 Z3축이 후퇴할 경우에는 B축은 -40°까지 기울여진다. 여기서 중요한 점은 병렬기구부의 정확한 조인트 위치를 결정하는 것이다. 조인트부는 병렬기구에서 각 직선이송 축이 운동할 때 이동에 따른 위치변화를 지지해 주는 역할을 하게 된다. 병렬기구를 기존의 직렬기구와 동일한 5축 NC 데이터를 사용하고 구동하기 위해서는 피벗 포인터를 중심으로 병렬기구에 역 기구학적 해를 구하여 각 축의 움직임을 제어하도록 하였다. Fig. 6(b)에서는 주축에 앵글헤드가 장착될 경우 병렬기구부의 각도변화를 나타내고 있다.

2.4 교환 장치의 시뮬레이션 모델 구현

Fig. 7에서는 병렬기구 주축에 앵글헤드를 결합하는 과정, 공구를 교환하는 과정, 공작물을 셋업하는 로딩 스테이션 장치의 팔렛 교환 과정에 대한 머신 시뮬레이션 모델을 구현한 것을 나타내고 있다. Fig. 7(a)의 앵글헤드와 주축의 결합과정을 살펴보면 헤드교환장치의 도어개방(①) → 앵글헤드가 보관된 Q5-axis 전진(②) → 주축보호커버 탈착(C-axis 회전 ③) → 앵글헤드 결합위치로 주축 이동(Y-axis 이동) → 주축과 앵글헤드 결합(C-axis 회전 ④) → Q5-axis와 앵글헤드 분리(Y-axis 이동 ⑤) → 공구교환장치의 Q-axis 후진 후 도어 닫힘 → 앵글헤드장착 완료(⑥) 등의 순서로 진행된다. Fig. 7(b)의 앵글헤드가 장착된 상태에서의 공구교환 과정을 살펴보면, 교체대상공구가 장착된 공구교환장치의 Q6-axis 전진(①) → 공구교환장치의 홀더 그립부가 90°회전(②) → 기존 공구 탈착(③) → 신규 공구 장착(④) → 레이저측정 장치를 이용한 공구의 치수정보 확인(⑤) 순서로 진행된다. Fig. 7(c)에서는 공작기계의 팔렛 교환과정에 대한 시뮬레이션 모델을 구현한 것을 나타내고 있다.

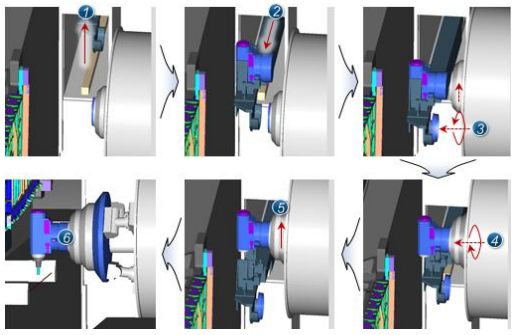


(a) Kinematic motion of sprint Z3 NC-head

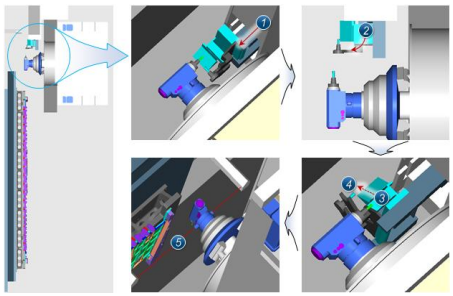


(b) Kinematic motion of angle head

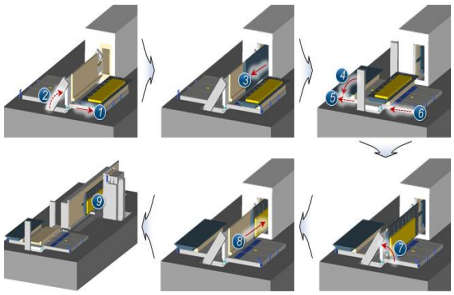
Fig. 6 Kinematic motion of sprint Z3 NC-head and attach angle head



(a) Exchange simulation of angle head



(b) Tool change of attach angle head



(c) Simulation model of pallet changer device

Fig. 7 Simulation model of angle head and pallet changer device

3. 실물가공을 통한 머신 시뮬레이션의 효과 검증

3.1 윙립부품 NC 프로그램 생성

병렬기구 공작기계의 머신 시뮬레이션을 적용 효과에 대한 검증을 하기 위해서 대형 윙립부품 가공용 NC 프로그램을 작성하였다. Fig. 8에서는 NC 프로그램 대상품인 윙립부품의 형상 및 크기, 기능부위에 대한 적용공차를 나타내고 있다.[11]

윙립부품은 항공기 주날개에 작용하는 대부분의 하중을 지지하는 대형 구조물로서 크기는 길이 5,271mm, 폭 1,481mm, 높이 138mm로 수많은 포켓 형상으로 이루어진 복잡한 형상의 고정밀 고속가공기술을 요구하는 대형 부품이다. 윙립부품의 가공은 포켓면 형상의 황삭가공(NC 1st stage), 데이팀면 형상의 황삭 및 정삭가공(NC 2nd stage), 포켓면 형상의 최종 정삭가공(NC 3rd stage) 순서로 이루어진다. 항공기 날개의 외피(skin)와 조립되는 립피트(rib feet)부위의 프로파일형상에 대한 가공은 주축에 앵글밀링헤드를 장착한 후 6축 가공자세로 이루어지며, 포켓부 보강재 측면에 뚫리는 기능 홀은 앵글드릴링헤드를 부착하여 가공하도록 프로그램을 작성하였다.

Fig. 9(a)에서는 윙립부품의 가공 공정별 적용된 치공구 및 기계 가공 전과 후의 형상변화를 나타내고 있으며, Fig. 9(b)에서는 NC 프로그램 작성 과정을 나타낸 것이다. CAD/CAM 소프트웨어인 CATIA의 NC 기능을 이용하여 공구경로를 생성(①)하였고, 이에 대한 간단한 시뮬레이션(②) 검증 과정을 거친 후 APT source파일(③)을 출력하였다.

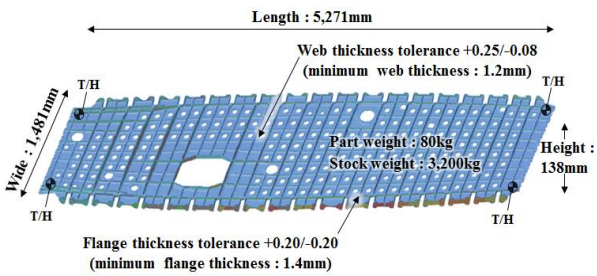
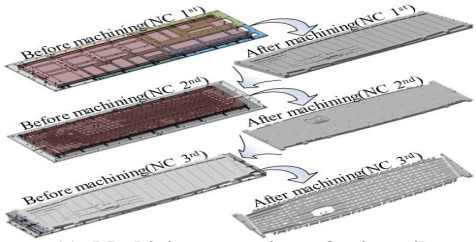
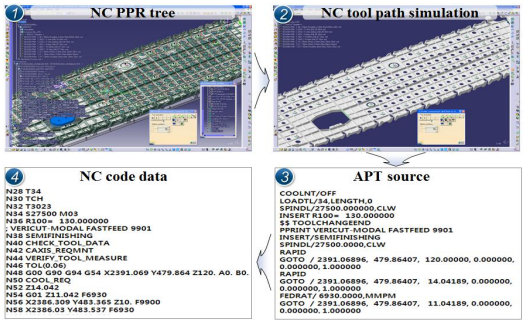


Fig. 8 Shape of wing rib part and main part tolerance[11]



(a) Machining operation of wing rib



(b) Generation process of win rig NC program

Fig. 9 Generation of NC program and wing rib machining process

Post-process 소프트웨어인 P-Works를 이용하여 APT source 파일을 병렬기구 공작기계에 최적화된 NC 코드 파일(④)로 변환하는 과정을 거쳐 NC 프로그램을 완성하였다.

3.2 머신 시뮬레이션을 이용한 NC 프로그램 검증

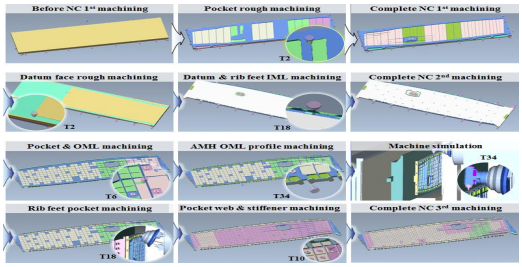
윙립부품의 가공을 위해 생성된 NC 프로그램에 대한 검증 및 최적화 단계로 시뮬레이션 검증 소프트웨어인 VERICUT에서 공구경로 및 가공장비의 간섭에 대한 시뮬레이션 과정을 수행하였다.

Fig. 10(a)에서는 각 가공 공정에 대한 공구경로 및 주요 가공부위의 시뮬레이션 검증 과정을 모습을 나타내고 있으며, Fig. 10(b)에서는 공작기계의 머신 시뮬레이션 적용 모습을 나타내고 있다. 머신 시뮬레이션의 전체적인 모습(①)과 병렬기구부인 Sprint Z3 NC-head가 적용된 상태에서 윙립부품의 포켓 형상부위를 가공하는 모습(②), 앵글밀링헤드가 장착된 상태에서 윙립 측면부위의 프로파일형상을 가공하는 모습(③), 앵글드릴링헤드가 장착된 상태에서 포켓부위 측면에 위치한 홀을 가공하는 모습(④)을 나타내고 있다.

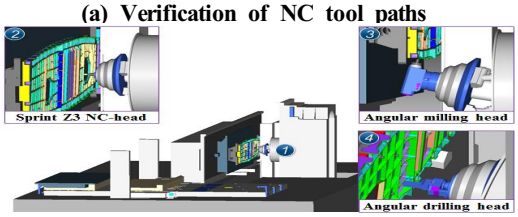
3.3 윙립부품의 실물가공을 통한 머신 시뮬레이션 검증

시뮬레이션과정을 통해 최적화된 NC 프로그램을 생산현장에 투입하여 윙립부품을 실물가공을 함으로써 시뮬레이션 모델이 실제 가공장비와 동일하게 구현되었는지를 비교하였다. Fig. 11에서는 병렬기구 공작기계의 주요 기능에 대한 시뮬레이션 모델과 윙립부품 가공 시 가공장비의 작동모습을 비교하여 나타낸 것이다. 터치 프로브(touch probe)를 이용한 기준면 측정모습(①)과 병렬기구부인 Sprint Z3 NC-head의 5축 가공 모습(②), 앵글밀링헤드를 이용한 측면부 립피트 프로파일형상의 6축 가공 모습(③), 앵글드릴링헤드가 주축에 장착된 모습(④) 등을 비교하여 나타내고 있으며, 모든 구성장치가 동일하게 구현되었음을 알 수가 있다.

Fig. 12에서는 윙립부품의 각 공정별 실물가공 모습과 가공이 완료된 윙립부품의 형상을 나타낸 것이다. 실물가공은 3단계의 가공공정을 거쳐서 완성하였으며, 가공시간은 총 22시간이 소요되었다. 시뮬레이션 단계에서 NC 데이터에 대한 충분한 검증을 통하여 5축 가공 및 앵글헤드를 장착된 상태에서 6축 가공 시 발생할 수 있는 공작기계의 간섭현상이나 충돌로 인한 제품 불량 및 장비의 손상을 사전에 예방할 수 있었고, 양호한 품질의 가공결과를 얻을 수 있었다.



(a) Verification of NC tool paths



(b) Machine simulation of main head and angle

Fig. 10 The simulation of wing rib NC program

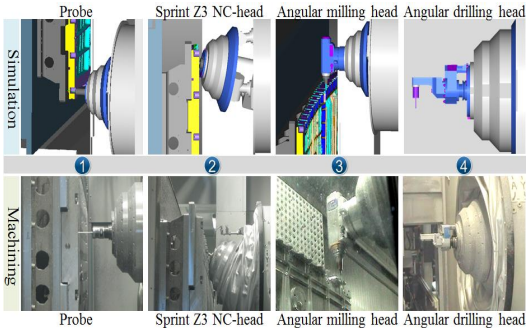


Fig. 11 Comparison picture of actual equipment and simulation model

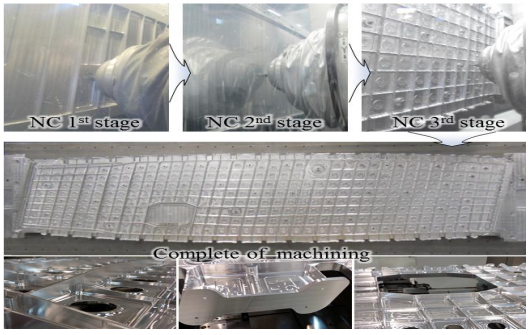


Fig. 12 Machining and complete of wing rib parts

4. 결 론

본 연구는 항공기의 날개 부분인 대형 윙립 구조물의 고속가공에 주로 사용되는 병렬기구 공작기계에 대한 머신 시뮬레이션 모델을 생성 개발하였고, 기존의 장비로는 가공이 불가능한 부위의 가공에 적합한 앵글헤드의 적용을 하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 병렬기구 공작기계의 머신 시뮬레이션을 위한 가상의 공작기계모델을 생성 개발하였고, 이를 통하여 윙립부품 가공 NC 프로그램에 대한 공작기계의 간섭 및 충돌현상에 대한 검증을 하였다.

2. 앵글밀링헤드 및 앵글드릴링헤드, 팔렛 교환 장치 등의 시뮬레이션 모델을 구축하고, 실제 공작기계와 같은 방식의 운동 메커니즘을 구현 실현하였다.

3. 대형 윙립부품의 가공을 위한 NC 데이터를 생성하고, 머신 시뮬레이션 검증 과정을 거친 후 실제 가공을 통하여 이용된 공작기계의 머신 시뮬레이션 모델이 실제 가공환경에서의 공작기계와 동일하게 구현됨을 증명하고, 대형 윙립 부품의 가공으로 머신 시뮬레이션의 적용 효과를 확인하고, 양호한 결과를 얻었다.

후 기

“본 논문은 2016년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Lee, M. K., Kim, T. S., and Lee, W. C., “Study on Parallel-Typed Robot and Machining Tool,” Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No. 7, pp. 9-18, 2001.
2. Shin, H., Ryou, H. S., and Jung, Y. G., “The Evaluation of Machining Accuracy and the Machine Simulation for Parallel Kinematic Machine Tool(PKMT),” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 8, No. 4, pp. 41-47, 2009.
3. Kim, J. S, and Kim, Y. J., “Cutting Performance of a Developed Small-angle Spindle Tool,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 15, No. 2, pp. 111-117, 2016.
4. Kim, H. J., Lee, I. S., and Kim, N. K., “Interference Check and NC Data Optimization through Machine Simulation in 5 Axis Machining of a Vehicle Parts of Aluminum Alloy,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 12, pp. 52-59, 2004.
5. Kim, H. J., Jang, J. H., and Kim, N. K., “A Study on Interference Phenomenon of a Machine Tool When 5 Axis Working with Virtual Machine Tool,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 4, No. 2, pp. 16-23, 2005.
6. Son, H. J., Cho, Y. T. and Jung, Y. G., "The Development of Module for 5-axis Drilling of a Closed Type Impeller," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 1, pp. 1-7, 2014.
7. Son, H. J., Lim, E. S. and Jung, Y. G., "The Improvement of Surface Roughness of Marine Propeller by Continuous Control of Cutter Posture in 5-Axis Machining,"Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 2, pp. 27-33, 2012.
8. Jung, H. C., Hwang, J. D. and Jung, Y. G., "Development of CAM Automation Module(E-ICAM) for 5-axis Machining of Impeller : A Study on Configuration of Module,"Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 4, pp. 109-114, 2011.
9. Suk, H. S., Seo, Y. H., Lee, S. M., Chung, G. S., and Kim, D. Y., “Modeling and implementation of internet-based virtual machine tools,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 20, pp. 1-7, 2003.
10. Hwang, J. D., Kim, J. H., Cho, Y. T., Jung, Y. G., and Ko, H. J., “Development of the Optimized Angle Head for Internal Shape Machining Using Five-Axis Machine Tool,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 1, pp. 123-129, 2015.
11. Lee, I. S., and Kim, H. J., “A Study of High Speed Machining Distortion Characteristics of Aluminum Lithium Alloys Wing Rib,” Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 6, pp. 111-118, 2014.