

공작기계 구조 모델링과 인터넷 기반 구현

홍동표*, 서윤호#, 김인수(고려대 산업시스템정보공학과),
이규봉(한국생산기술연구원), 신동목(울산대학교 수송시스템공학부)

Structure Modeling of Machine Tools and Internet-based Implementation

Dongphyo Hong, Yoonho Seo, Insoo Kim(Industrial Systems and Info. Eng., Korea Univ.),
Gyubong Lee(KITECH), Dongmok Sheen(Trans. System Eng., Univ. of Ulsan)

ABSTRACT

Reconfigurability of machine tools is one of the critical factors to realize the responsive manufacturing systems to satisfy the mass-customization production. This paper presents the methods to model and simulate the machine tools on Internet in response to change in the machining requirements. Specifically, a set of module combination rules and a modeling method of the structure of machine tools using connectivity graph are developed. In response to the user requirements, kinematic relations and structures of machine tools can be derived using the module combination rules and connectivity graph relationships. Internet-based simulator of machine tools is implemented and presented. The developed machine tool simulator can be used to verify the structure of machine tools derived from the user requirements.

Key Words: Machine Tool Modeling (공작기계모형), Virtual Machine Tools (가상공작기계), Structure Design (구조 설계), Internet-based Simulator (인터넷 기반 시뮬레이터)

1. 서론

생산체계에 대한 새로운 패러다임이 등장할 때마다, 이를 구현하기 위해 요구되는 공작기계의 기능은 새롭게 정의된다. 소품종 대량생산체계에서는 특정 제품을 대량으로 생산하기 위해 전용 공작기계가 쓰였고, 대품종 소량생산체계에서는 다양한 작업을 수행하기 위하여 CNC나 머시닝센터와 같은 프로그램이 가능한 공작기계가 사용되었다. 최근 상시 다발적인 수요에 대응하여 단기간 대품종 생산을 요구하는 대량맞춤생산 (Mass-customization) 패러다임에서는 필요에 따라 공작기계를 재구성할 수 있는 모듈러 공작기계의 필요성이 대두되고 있다 [1, 12].

생산 요구사항의 잊은 변화에 따른 공작기계의 대응성을 높이기 위해, 사용자의 요구에 따라 공작기계를 인터넷상에서 신속하게 모델링 및 시뮬레이션 해 볼 수 있는 ‘인터넷 기반 공작기계 시뮬레이

터 (Internet-based Machine Tool Simulator, IMTS)’가 필요하다. 본 연구의 목적은 IMTS를 구현하기 위해 필요한 공작기계 구조 및 동작 모델링 방법을 개발 및 제시하는 것이다.

공작기계의 구조는 타 속성 및 기능에 영향을 끼치기 때문에 공작기계 연구에 기본이 된다 [2]. Vragov는 논리 연산과 multiple-factor theory를 이용하여, 공작기계의 구조를 표시하는 방법을 제안하였고 [3], Shinno and Ito는 공작기계 구성요소의 모듈화를 통해 공작기계의 구조를 생성하기 위한 몇 가지 방법론을 제안하였다. 특히 공작기계 구성 모듈을 조합하는 규칙과 이를 모형화할 수 있는 방향성 그래프를 이용하여 다양한 구조의 공작기계를 자동적으로 생성할 수 있는 이론적인 토대를 마련하였다 [4, 5].

또한 Kitajima and Yoshikawa [6]는 공작기계의 구성요소간의 계층적으로 연결하는 구조 모델을 제안하였고, 이 모델을 구현하기 위한 공작기계 설계

시스템을 개발했다. Chaar et al. [7]은 컴퓨터상의 가상 환경에서 공작기계 기능 및 구조를 자동으로 구성하기 위한 연구로서, 공작기계의 기능 분해 및 구성을 위한 관계 모델을 제시하고, 상용 시뮬레이션 소프트웨어인 ADAMS를 이용하여 제안한 모델을 구현 및 검증했다 [6, 7].

근래에 컴퓨터를 이용한 3차원 그래픽 기술이 향상되고 그 비용이 낮아짐에 따라, 공작기계의 대한 연구는 대부분 컴퓨터 시뮬레이션을 기반으로 하는 가상공작기계 (Virtual Machine Tools)로 초점이 맞춰지고 있다. 미국 MT-AMRI의 Ehmann et al. [8]은 공작기계에 관한 일련의 연구에서 실제 장비를 이용할 때 필수적으로 발생하는 시행착오를 최소화하며 신제품을 개발하기 위해서 공작기계 시뮬레이션은 필수적인 도구라고 밝히고, 가상공작기계의 프레임워크를 제안하였다. 가상공작기계를 이용한 연구 중 절삭공정 모델에 관한 연구가 미국에서 대학 공동 연구로 수행되어 절삭 해석 기술과 관련된 소프트웨어가 개발되었고, 국내에서도 이에 관한 연구 성과가 발표되었다 [8, 9, 13].

최근 협업 개발에 대한 관심이 고조됨에 따라, CAD/CAM 소프트웨어를 크게 단일 작업자 기반 (Single unit based)과 협업 기반 (Collaborative work based)으로 구분하기도 한다. 단일 작업자 기반으로는 Delmia사의 VNC [15], Tecnomatix의 eM-Workplace [16] 등이 있고, 협업 기반으로는 몇 가지 연구 성과가 보고되어 있다. Suh et al. [10]은 웹 기반의 가상공작기계로 머시닝센터를 모델링 및 구현하여 작업자들이 인터넷을 이용하여 공작기계를 공유할 수 있도록 하였고, Seo et al. [11]은 웹 기반으로 NC 파트 프로그램의 검증과 가공 시뮬레이션이 가능한 CAM 시스템을 개발하였다. 이 두 논문에서는 가상공작기계의 표현을 위해 VRML을 사용하였으며, CORBA를 통해 서버용 NC 코드 해석기를 클라이언트 컴퓨터에서 이용할 수 있게 하는 3-tier 구조를 갖고 있다 [10, 11].

본 연구에서는 사용자의 요구에 따라 공작기계의 구조를 신속하게 변경시킬 수 있는 ‘공작기계 구조 모델링’ 방법을 제시하고, 인터넷상에서 이를 시뮬레이션 할 수 있는 ‘인터넷 기반 구조형상 모델러’를 구현하는데 그 목적이 있다.

2. 공작기계 구조 모델링

본 연구는 사용자로부터 공작기계의 기능요소와 구조요소의 요구사항을 입력 받아 사용자가 원하는 구조에 근접한 여러 초기 대안들을 생성시키는 방

법을 제시하는 것이다. 따라서 본 논문에서는 사용자가 원하는 하나의 공작기계 구조를 표시하고 형상화하기 위한 모델링 요소로, 공작기계의 구조모듈, 구조모듈 간 연결 관계 및 Kinematic 관계가 정의될 수 있다.

먼저 공작기계의 구조모듈은 크기, 접합면, 운동의 유무, 운동의 종류 (직선, 회전) 등에 대한 정보를 포함하고 있으며, 모듈 라이브러리에 등록되어 있다. 각 구조모듈의 기능 요소와 형상 요소는 가상공작기계의 형상 표현과 연결 관계 표현 및 Kinematic chain 생성에 활용된다. 구조모듈의 연결관계는 각 구조모듈간의 계층적인 연결 상태를 나타내고, 모듈 조합 규칙과 연결 그래프를 통해 표시된다. 모듈 조합 규칙은 각 구조모듈 간의 연결 가능 여부를 알려주고 연결 그래프를 생성하여, 여러 형태의 구조를 생성하는 역할을 한다. 연결 그래프는 Kinematic chain의 생성에 사용된다. 마지막으로 Kinematic chain은 공작기계의 운동방식을 나타내기 위해 동차 변환 행렬을 이용하여 표현되며, 구조모듈의 기능요소와 연결그래프의 아크로부터 운동 방식을 유도하여 Kinematic chain을 생성한다. 각 모델링 요소를 위해 사용되는 도구 및 방법들과 모델링 요소간의 관계는 Fig. 1과 같이 도식화 된다.

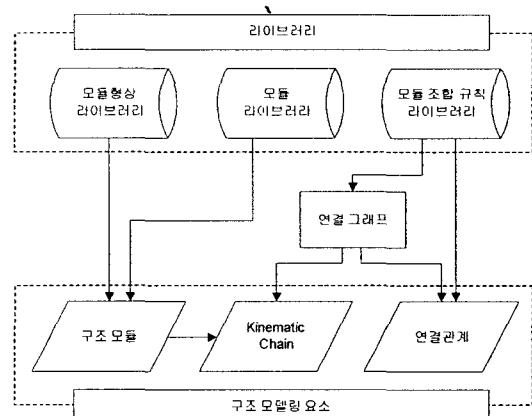


Fig. 1 The element of Structural Modelling

2.1 사용자 요구사항

공작기계의 구조를 정의하기 위해서 사용자로부터 입력받는 정보는 Table 1에 요약되어 있다. 사용자가 의도한 기능요소를 포함하는 모듈이 선택되며 모델링으로 생성되는 공작기계의 초기 대안의 범위를 제한한다. 또한 요청된 구조요소를 충족시키기 위해, 사용자가 원하는 공작기계의 유형만을 초기

Table 1 User Requirements and Processes

구분	입력 사항	처리 사항
기능 요소	<ul style="list-style-type: none"> 모듈의 종류 운동축(X, Y, Z, A, B, C) 모듈의 최소/최대 개수 ATC의 공구 수 	<ul style="list-style-type: none"> 모듈 조합에 이용되는 모듈 접합 선택 운동 기능이 포함된 모듈 선택 공작기계의 복잡도 결정 ATC의 표현을 위한 공구 개수 결정
구조 요소	<ul style="list-style-type: none"> 공구의 방향 결정(수직, 수평) 공작기계 종류(수직, 수평, 문형 등) 가공물의 크기 	<ul style="list-style-type: none"> 공구의 방향을 통해 조합되는 구조 결과의 범위를 제약 발생하는 공작기계 구조의 범위를 제약 생성되는 공작기계의 크기를 결정

대안으로 제공하며, 가공물의 크기를 고려한 시뮬레이션이 이루어지도록 구조의 크기를 조정한다.

2.2 모듈 라이브러리

구조모듈은 미리 정의된 모듈 명세서에 따라 모듈 라이브러리에 등록되며, 각 구조모듈의 입력정보는 기능요소와 형상요소로 분류된다. 기능요소로는 모듈명, 모듈의 종류, 운동의 유무, 운동의 종류가 있고, 형상요소로는 크기(X, Y, Z 방향), 형상모양, 안내면 위치, 접합면, 오프셋이 있다.

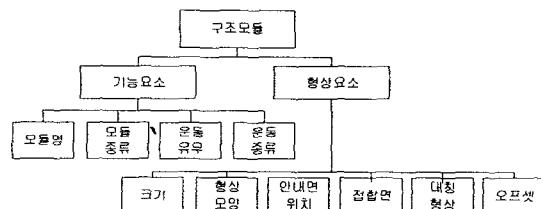


Fig. 2 The element of Structural Module

본 연구에서 사용한 모듈 라이브러리에는 Shinno and Ito [5]가 분류한 공작기계의 기본구조모듈과 최근 공작기계 구조에 사용되는 새로운 종류의 구조모듈을 등록하였다 [17]. 구조형상 모델러에서는 이 외에 새로운 구조모듈을 등록할 수 있는 사용자 인터페이스를 제공한다. Table 2는 모듈라이브러리에 포함된 모듈의 예를 보여준다.

2.3 모듈 조합 규칙

Shinno and Ito [5]는 구조 설계에 관한 일련의 연

구를 통해, 구조모듈을 조합하여 여러 형태의 공작기계 구조를 생성할 수 있다는 것을 개념적으로 밝혀내었다. 본 연구에서는 그들의 조합 방법에 접합면과 모듈의 방위에 대한 규칙을 추가하여, 구조모듈 간의 기하학적인 위치를 명확히 나타냄으로써 공작기계의 형상모델링이 가능하도록 하였다. 두 모듈 간의 가능한 조합 표현과 각 모듈의 표현은 다음과 같다.

(시작모듈)→(끝모듈)

= (시작모듈번호, -/다음 모듈과의 접합면, 모듈의 방위)

→(끝모듈번호, 이전 모듈과의 접합면/-, 모듈의 방위)

시작모듈의 ‘다음모듈과의 접합면’과 끝모듈의 ‘이전모듈과의 접합면’은 구조 형상에서 서로 맞닿아 있는 면을 말하며, 모듈의 방위는 Y축 기준의 방위를 의미한다. 위의 형태로 모듈 조합 규칙 라이브러리에 규칙이 등록되어 있고, 새로운 규칙의 입력이 가능하다. Table 3에 가능한 모듈 조합 규칙의 예를 나타내었다. 예를 들어 모듈번호 1인 Head를 시작모듈로 하여 모듈 #2 Slide, #3 Swivel slide, #6 Cross-slide, #7 Base의 4가지 모듈의 결합이 가능하다. 이때 Head의 면 s4만이 다른 모듈과의 접합면으로 쓰일 수 있도록 정의되어 있다.

각 모듈은 여러 개의 면으로 정의될 수 있으며, 이 중 특정 면이 다른 모듈과의 접합면으로 사용될 수 있다. Fig. 3에 원통 형상 모듈은 3개 면으로 육면체 블록 형상은 6개 면으로 정의됨을 나타내고 있다. 또한 Fig. 4에서와 같이 각 모듈은 y-축 방향에서 4개의 방위를 가질 수 있다.

Table 2 Example of input for Module Library

기능요소				형상요소					
모듈명	모듈종류	운동유무	운동종류	크기	형상모양	안내면위치	접합면	대칭형상	오프셋
Wall-type column	Column	없음	부동	(3, 3, 10)	Block	s1	s2, s4	있음	(0, 0, 0)
Swivel Slide	Slide	있음	회전운동	(3, 3, 1)	Cylinder	없음	s3, s4	없음	(0, 0, 0)

모듈 조합 규칙에 따라 생성된 연결그래프로는 공작기계의 대략적인 구조를 유추할 수 있다. 예를 들어, $(0, -s2, OT1) \rightarrow (1, s1/-, OT1) \rightarrow (2, s3/-, OT1)$ 의 연결 관계는 방위 OT1인 Spindle 모듈 면 $s1$ 이 방위 OT1인 Head 모듈 면 $s1$ 면과 접합되어 있음을, 또 방위 OT1인 Head 모듈의 면 $s4$ 가 Slide의 $s3$ 면과 접합되어 있음을 각각 나타내고 있다.

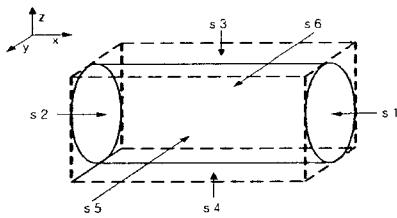


Fig. 3 Definition of surfaces

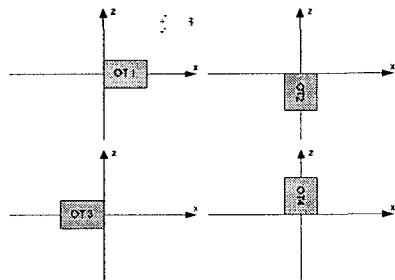


Fig. 4 Definition of 4 orientations

Table 3 Example of Module Combination Rules

번호	모듈명	모듈 조합 규칙
0	Spindle	$(0, -s2, OT1) \rightarrow (1, s1/-, OT1)$
1	Head	$(1, -s4, OT1) \rightarrow (2, s3/-, OT1)$ $(1, -s4, OT1) \rightarrow (3, s3/-, OT1)$ $(1, -s4, OT1) \rightarrow (6, s3/-, OT1)$ $(1, -s4, OT1) \rightarrow (7, s3/-, OT1)$
2	Slide	$(2, -s4, OT2) \rightarrow (4, s1/-, OT1)$ $(2, -s4, OT1) \rightarrow (9, s3/-, OT1)$
3	Swivel Slide	$(3, -s4, OT1) \rightarrow (2, s3/-, OT1)$ $(3, -s4, OT1) \rightarrow (7, s3/-, OT1)$
4	Column	$(4, -s4, OT1) \rightarrow (6, s3/-, OT1)$ $(4, -s4, OT1) \rightarrow (8, s3/-, OT1)$
...
13	Wall-Type Column	$(13, -s4, OT1) \rightarrow (F, s3/-, OT1)$
14	Cross-Bar	$(14, -s4, OT1) \rightarrow (9, s3/-, OT1)$ $(14, -s4, OT4) \rightarrow (13, s1/-, OT1)$

2.4 연결그래프

Fig. 5에 표현된 바와 같이 연결그래프는 구조모

들을 표현하는 노드 집합과 모듈 간 연결 관계를 나타내는 아크 집합으로 구성된 방향성 그래프이다. 연결 그래프에서 모듈은 입력 아크에 연결되어 있는 전위 모듈과 출력 아크에 연결되어 있는 후위 모듈과 연관되어 있다. 각 모듈은 연결그래프의 전위 모듈에 종속되어 있으며, 전위 모듈의 동작에 영향을 받을 수 있다. 또한 같은 논리로 후위 모듈에 영향을 끼친다. Fig. 6과 같이 ATC 등의 부가 장치 및 부속 모듈의 추가, 삭제를 표현할 수 있다. 따라서 연결 그래프로 나타나는 계층 구조와 각 노드(즉 구조모듈)에 포함된 모듈의 접합면, 접합 위치 등 기하학적인 정보를 이용하여 공작기계 구조의 형상 출력이 가능하다. 예를 들어, Fig. 5의 연결 그래프로 그려질 수 있는 공작기계의 형상은 Fig. 6과 같이 유도될 수 있다.

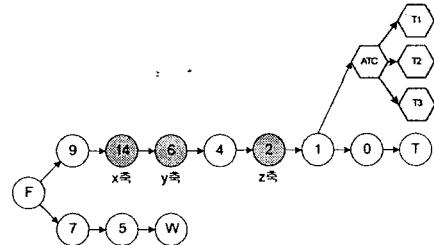


Fig. 5 Connectivity Graph

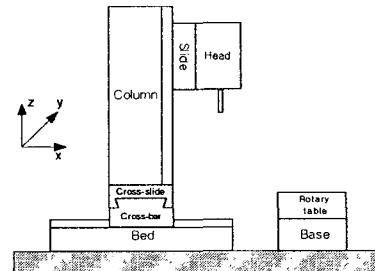


Fig. 6 Machine tool structure derived from Fig 5

2.5 Kinematic 관계 유도

운동 기능이 있는 공작기계를 생성하기 위해 동차 변환 행렬 (Homogeneous Transformation Matrix, HTM)을 이용한다. x , y , z 축을 따라 x , ψ , ω 만큼의 직선 운동은 $T_{x,x}$, $T_{y,y}$, $T_{z,z}$ 로, x , y , z 축을 중심으로 α , β , γ 만큼의 회전 운동은 $R^R_{x,\alpha}$, $R^R_{y,\beta}$, $R^R_{z,\gamma}$ 로 각각 나타낸다고 정하였다.

각 행렬에서 변수는 운동 기능을 갖는 구조모듈의 파라미터를 의미하며, Table 4에 요약되어 있다.

Table 4 Types of HTM

모듈 종류	운동 종류	동차 변환 행렬의 종류
부동 모듈	부동	I
운동 모듈	직선 운동	$T_{xx}, T_{y\varphi}, T_{z\omega}$
	회전 운동	$R_{x\alpha}^R, R_{y\beta}^R, R_{z\gamma}^R$

본 연구에서는 구조모듈의 기능요소와 연결 그래프의 모듈 간 계층구조를 토대로, 동차 변환 행렬 사용하여 구조모듈의 Kinematic 관계를 유도하였다. 기준 좌표계 R 로부터 모듈 i 의 HTM K^R_i 는 전위 모듈 K_p^R 의 HTM과 모듈 i 의 운동에 관한 HTM A^R_i 의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$K^R_i = K_p^R \cdot A^R_i$$

예를 들어, 모듈 번호 9인 Bed의 기준 좌표계로부터 모듈 번호 2인 slide의 HTM K^9_2 는 전위 모듈 K^9_4 와 slide의 운동에 관한 HTM $T_{z\omega}$ 의 곱으로 나타낸다.

$$K^9_2 = K^9_4 \cdot A^9_2 = K^9_4 \cdot T_{z\omega}$$

Shop floor로부터 공구까지의 연결 방향을 tool path (TP)로, shop floor로부터 가공물까지를 workpiece path (WP)로 정의하여, Fig. 6의 공작기계에 대한 Kinematic chain은 Table 5와 Fig. 7과 같이 나타낼 수 있다.

Table 5 Example of Kinematic chains

Kinematic chain of TP	Kinematic chain of WP
Bed ₍₉₎ $K^9_9 = I$	
Cross-bar ₍₁₄₎ $K^9_{14} = K^9_9 \cdot T_{xx}$	
Cross-slide ₍₆₎ $K^9_6 = K^9_{14} \cdot T_{y\varphi}$	Base ₍₇₎ $K^9_7 = I$
Column ₍₄₎ $K^9_4 = K^9_6 \cdot I$	Rotary table ₍₅₎
Slide ₍₂₎ $K^9_2 = K^9_4 \cdot T_{z\omega}$	$K^9_5 = K^9_7 \cdot R^S_{z\gamma}$
Head ₍₁₎ $K^9_1 = K^9_2 \cdot I$	
Spindle ₍₀₎ $K^9_0 = K^9_1 \cdot I$	

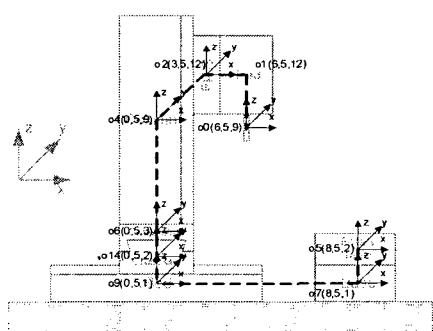


Fig. 7 Example of kinematic chains

3. 구조형상 모델러

3.1 구조형상 모델러의 구현

본 연구에서 제안한 모델링 방법으로 OpenGL과 VC++을 사용하여 인터넷 기반의 공작기계 구조형상 모델러 (Internet-based Machine tool Structural Modeler, IMSM)를 구현하였다. 제안한 모델링 방법을 적용함으로서, 사용자가 필요로 하는 기능과 구조를 갖는 초기 대안을 쉽고 빠르게 생성하도록 하여, 구조 설계 시 요구되는 일률적이고 정규화된 작업을 자동으로 처리하였다. 또한 공작기계 설계가 전문가의 경험을 토대로 이루어진다는 것을 반영하기 위해, 초기 대안의 세부 수정 과정을 둘으로서 경험을 기반으로 한 구조 설계가 이루어지도록 하였다.

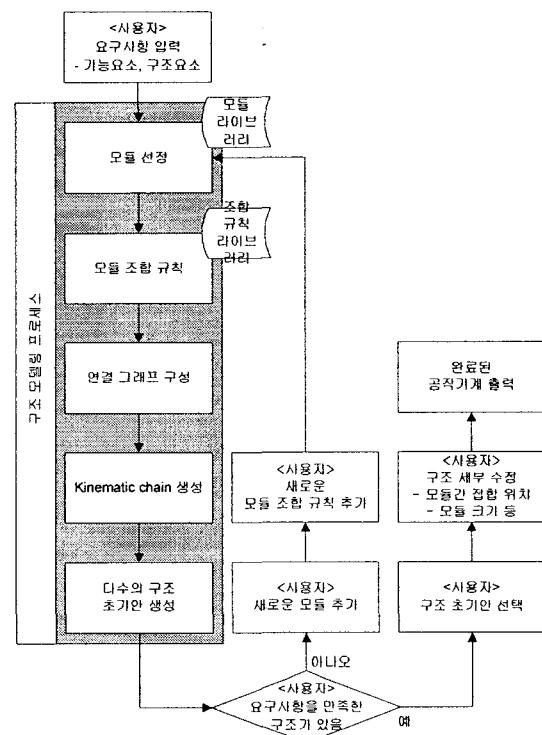


Fig. 8 Flowchart of IMSM

3.2 모듈 및 구조 라이브러리

일반적으로 라이브러리는 정보 공유, 모듈과 구조의 재사용, 표준화를 도모하기 위해 구축된다. 본 모델러에서는 Fig. 9에 보이는 바와 같이 공작기계의 구조모듈을 담고 있는 모듈 라이브러리, 구조모듈 간의 연결 관계를 포함한 모듈 조합 규칙 라이

브러리, 공작기계 모듈의 형상을 담고 있는 모듈 형상 라이브러리, 완성된 공작기계 구조를 갖는 구조 라이브러리가 사용되었다.

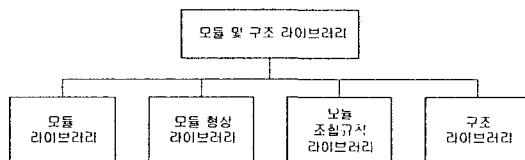


Fig. 9 Types of libraries

3.3 다수의 초기 대안의 생성

사용자가 필요로 하는 기능과 구조를 가진 공작기계의 초기 대안을 생성하기 위해, 사용자로부터 기능요소 및 구조요소 요구사항을 입력 받는다. 사용자의 입력사항으로부터 처리되는 사항은 Table 2와 같으며, 처리된 내용을 기반으로 구조모듈이 선택되고 구조 모델링 방법으로 다수의 초기 대안이 생성된다.

3.4 구조의 세부 수정

자동으로 생성된 여러 형태의 초기 대안 중 하나를 선택하여 사용자의 필요에 따라 세부 수정이 가능하며 키보드 또는 조절 버튼으로 공작기계를 동작시켜 볼 수 있다. 만일 초기 대안 중 사용자가 원하는 구조가 없을 경우 새로운 모듈이나 조합 규칙을 추가하여 다시 생성시킬 수 있다. 본 모델러에서는 세부 수정 작업으로 구조모듈의 크기 수정, 모듈 간 접합 위치 수정, 액세서리 모듈의 추가, 부가 질량 모듈의 추가 등이 지원된다.

3.5 완성된 공작기계의 출력

세부 수정이 완료되면 완성된 공작기계를 동작시켜 구조의 움직임을 검토할 수 있다. 완성된 공작기계에 대한 요구사항과 구조 모델링 요소를 파일로 저장할 수 있으며, 완성된 구조를 구조 라이브러리에 등록하여 추후에 이용할 수 있다.

본 논문에서 제안한 구조 모델링 방법의 실효성을 입증하기 위해 수직 및 수평 구조 형태의 가상 공작기계를 모델링 하였다 (Fig. 11 상단). 차세대 생산시스템 개발 사업으로 개발 중인 Test Bench의 각 구성요소를 분석한 후 새로운 모듈을 추가하여 Test Bench의 기본 구조와 응용 구조를 나타내었다 (Fig. 11 하단).

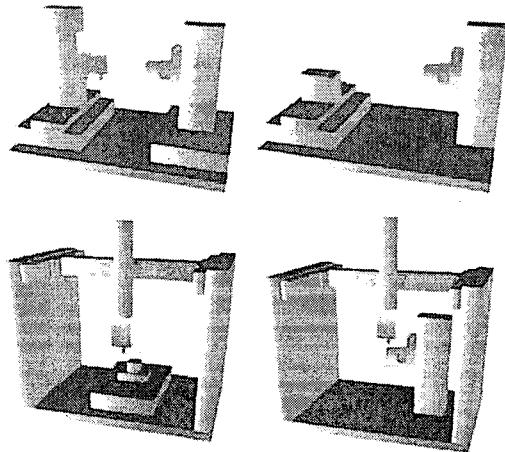


Fig. 10 Result of Modelling

4. 결론

본 논문에서는 사용자의 기능 및 구조 요구사항에 따라 공작기계 구조를 자동으로 생성할 수 있는 구조 모델링 방법을 제안하였다. 본 모델링 방법을 위해 모듈 라이브러리를 통한 구조모듈의 이용, 모듈 조합 규칙과 연결그래프를 이용한 연결 관계 생성, 구조모듈의 기능요소와 연결그래프를 사용한 Kinematic chain의 자동 생성 방법이 사용되었다. 또한 제안한 모델링 방법을 토대로 사용자의 세부 수정이 가능한 인터넷 기반의 구조형상 모델러를 구현하였으며 수직형, 수평형 공작기계 및 Test bench를 생성하여 본 모델링 방법의 실효성을 검증하였다.

제안한 모델링 방법은 대규모 가상 플랜트 (Virtual Plant)의 신속한 구축을 위해 사용될 수 있으며, 재구성 가능한 생산시스템(Reconfigurable Manufacturing System)을 지원하는 공작기계의 CAD/CAM 시스템에 응용될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. M. G. Mehrabi, A. G. Ulsoy, Y. Koren, "Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11, pp. 403-419, 2000
2. Koenigsberger and Tlusty, "Machine Tool Structures", Pergamon press, Vol. 1, 1970
3. Vragov, Yu. D., 빛 structural analysis of Machine-tool layouts? *Machines and tooling*, v.43 no.8, pp.5-8, 1972
4. H. Shinno and Y. Ito, "Generating method for

- structural configuration of machine tools(1st paper, Generation using variant design method)", *Transaction of JSME*, 50(449), pp. 213-221, 1984
5. H. Shinno and Y. Ito, "Generating method for structural configuration of machine tools (3rd paper, Variant design using directed graph)", *Nippon Kikai Gakkai Ronbunshu*, 52(474), pp. 788-793, Feb. 1986.
 6. K. Kitajima and H. Yoshikawa, "HIMADES-1 : a hierarchical machine design system based on the structure model for a machine", *Computer Aided Design*, Vol. 16, No 6, pp. 299-307, 1984
 7. Jamal El Chaar, Claudio R. Bo? , Irene Fassi, Roberto Rinaldi, "Automatic Composition of The Machine Tool Functional Structure in Virtual Environment", *Proceedings of the 31st CIRP International Seminar on Manufacturing Systems Networked Manufacturing : Integrated Design Prototyping and Rapid Fabrication*, 26-28, Berkeley, California, USA, pp.299-302, May 1998
 8. K. F. Ehmann, R. E. DeVor, E. C. De Meter, D. Dornfeld, S. G. Kapoor, J. Ni, K. Rajurkar, Y. Shin, J. Sutherland, "A Framework for a Virtual Machine Tool(VMT)", *Transaction of NAMRI/SME*, Vol. XXI, pp. 143-148, 1997
 9. 조동우, 고정훈, 정영훈, "가상공작기계의 연구동향", *한국정밀공학회지*, 제 19권, 제 6호, pp. 9-14, 2002. 6
 10. Suk-Hwan Suh, Yoonho Seo, So-Min Lee, Tae-Hoon Choi, Gwang-Sik Jeong, Dae-Young Kim, "Modelling and Implementation of Internet-Based Virtual Machine Tools", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 21, pp. 516-522, 2003
 11. Yoonho Seo, Dae-Yong Kim, Suk-Hwan Suh, "Development of Web-based CAM System", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005년 중 출판 예정.
 12. OpenGL, (<http://www.opengl.org>)
 13. NSF Engineering Research Center for Reconfigurable Manufacturing Systems, <http://erc.ingen.umich.edu>
 14. Machine Tool - Agile Manufacturing Research Institute, <http://mtamri.me.uiuc.edu/>
 15. Delmia, VNC, <http://www.delmia.com/>
 16. Tecnomatix, eM-Workplace, http://www.ugs.com/products/tecnomatix/assembly_planning/em_workplace_pc.shtml
 17. 두산인프라코어 <http://www.machinetools.co.kr/> 등
의 공작기계 관련 사이트