

Nutating 헤드 타입 5축 CNC 레이저 절단기용 동작 시뮬레이터

강재관[†]

경남대학교 기계자동화공학부

Cutting Motion Simulator for Nutating Head Type 5-axis CNC Laser Cutting Machine

Jae-Gwan Kang[†]

Division of Mechanical Engineering and Automation, Kyungnam University

5-axis laser cutting has great advantages when it is applied to three dimensional machining requiring high cutting quality. For developing 5-axis CNC laser cutting systems, however, many problems such as rotating a laser head or a working table, 5-axis servo-control mechanism, tool path generation and post-processing, and collision avoidance between a laser head and a work-piece should be solved. In this paper, we deal with developing a motion simulator for 5-axis laser cutting machine with a nutating cutting head whose rotational axis is in an inclined plane. Two essential modules such as post-processor and cutting motion simulator was developed based on a commercial 3D CAD of UG-NX. The developed system was applied to three dimensional cutting products and showed the validity of the developed methods.

Keywords : Laser Cutting, 5-axis CNC Machining, Post-Processor, Cutting Motion Simulation

1. 서론

금속 소재의 3차원 곡면제품은 프레스로 성형 후 가스 절단이나 플라즈마 절단을 이용하여 절단을 하는 경우가 많으나 절단 정밀도가 떨어지고 제품의 열변형이 발생하는 문제점이 있다. 따라서 다품종 소량생산, 단납기로 표현되는 최근의 제품 개발 환경에 따라 <그림 1>과 같은 판재의 다양한 형태를 제품으로 절단할 수 있는 5축 레이저 절단기 기술이 크게 주목을 받고 있다.

5축 레이저 절단기는 기존에 많이 사용되고 있는 2차원 절단기보다 복잡한 머신 구조를 가진다. 일반적으로 공구 또는 공작물의 자세를 결정하는 운동자유도

를 어디에 설치하느냐에 따라 기계 타입이 결정되며 대형 공작물 가공에 유용한 스핀들 틸팅(spindle-tilting) 타입, 소형 공작물 타입에 적합하고 절삭성과 가공속도가 좋은 테이블 틸팅(table-titling)타입, 그리고 중형 공작물 타입에 적합한 스핀들-테이블 틸팅(spindle-table titling) 타입 등 크게 3가지 형태로 분류된다[1].

그러나 최근 들어 스핀들 틸팅 타입 중 <그림 2>와 같은 Nutating 타입이 새로 개발되어 레이저 절단 공정 머신에 크게 활용되고 있다. 이 타입은 앞서 언급한 스핀들에 두 개의 회전축을 부가한 스핀들 틸팅 타입의 변형으로서 두 회전축이 직교하지 않고 45°를 이루기 때문에 스핀들의 두 축이 어떻게 동작하여도 공구의 끝단은 항상 한 점을 지향하는 특징을 가진다[2]. 또한

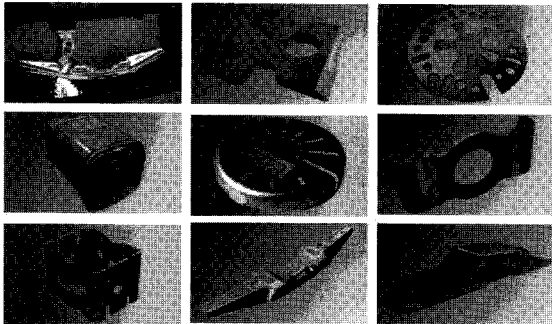
논문접수일 : 2011년 06월 19일 게재확정일 : 2011년 07월 21일

[†] 교신저자 jkkang@kyungnam.ac.kr

※ 본 논문은 2010년 경남대학교 교내 학술연구진흥연구비 지원에 의한 것임.

Nutating 타입은 절단헤드에 모터를 장착하지 않아도 되어 헤드의 크기가 작아지고 구조적으로도 강건(rigid)한 장점이 있다.

산업현장에서 많이 사용되고 있는 2차원 평면 절단과 다른 5축 레이저 절단에서 고려해야 할 중요한 점 중의 하나는 절단 헤드 또는 테이블에 운동자유도가 부가되기 때문에 일반적인 3축 가공과 달리 공구의 운동을 예측하기 어려운 점과 공작물과 공구와의 충돌이 발생하기 쉬운 점이다.



<그림 1> 5축 레이저 절단기를 이용한 절단 제품들



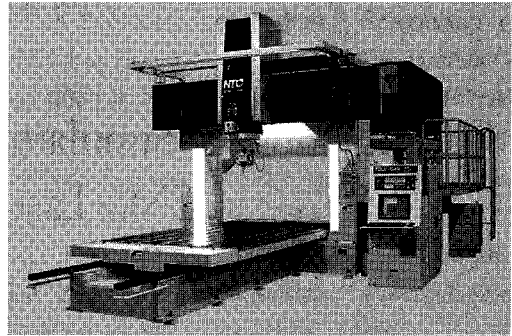
<그림 2> Nutating 절단 헤드

따라서 5축 레이저 절단기와 관련한 응용 S/W를 개발하기 위해서는 정확한 공구 동작을 제어할 수 있는 포스트 프로세서(Post-processor)의 개발과 NC 공구경로를 직접 머신에 적용하기에 앞서 기계의 동작을 컴퓨터 상에 모의 실험할 수 있는 시뮬레이터의 개발이 필수적이다.

5축 머신의 다양한 타입에 따른 포스트 프로세서 개발에 관한 연구는 많이 이루어져 왔으나[2-4] 5축 레이저 절단기와 관련하여서는 가장 간단한 머신 컨피규레이션인 테이블 틸팅 타입에 대한 동작 시뮬레이터 연구가 있으며[5], 레이저 절단과 유사한 메커니즘을 갖는 5축 워터젯 가공기를 위한 전용 CAD/CAM 시스템 개발에 관한 연구[6]가 있다.

따라서 본 연구는 회전 축 방향이 상대적으로 복잡

한 Nutating 타입의 절단 헤드를 갖는 5축 레이저 절단기를 대상으로 포스트프로세서 및 동작 시뮬레이터의 개발을 대상으로 한다. 특히 <그림 3>과 같은 일본 NTC사의 TLM 레이저 절단기를 실제 모델로 하여 동작 시뮬레이터를 개발하고 이를 실제 적용하는데 연구의 목적이 있다.



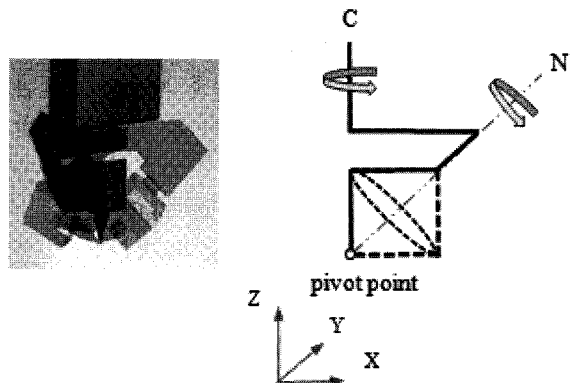
<그림 3> TLM 5축 레이저 절단기

2. 포스트 프로세서

포스트 프로세서란 공구위치 데이터(CL data)를 NC 기계가 동작할 수 있는 데이터 포맷으로 변환해 주는 과정을 말하는데 5축 NC 머신의 경우에는 머신의 타입에 따라 변환과정이 크게 달라진다.

2.1 Nutating 타입의 동작 특성

Nutating 타입은 <그림 4>에서 보는 바와 같이 Nutating 축인 N축이 X축의 양의 방향과 45°를 이루고 있으며 Z축과도 45° 방향인 점이다. 이에 따라 N축을 회전시키면 목표점(pivot point)을 중심으로 절단 헤드가 사선 방향을 축으로 하여 회전하게 된다.



<그림 4> Nutating 절단 헤드 동작

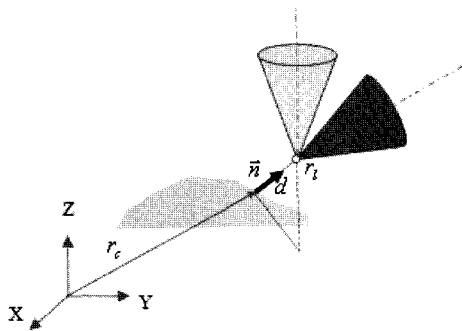
2.2 절단 점과 절단헤드 위치

레이저 절단에서는 절단의 효율을 최대화하기 위하여 레이저 빔이 절단 점에 수직으로 입사하는 것이 필요하다. 그리고 레이저 절단 헤드의 위치는 절단 소재 상의 절단점(cutting point)으로부터 F-theta 렌즈의 초점 거리를 고려한 거리만큼 떨어진 위치에 절단헤드가 위치하여야 한다.

<그림 5>에서 보는 바와 같이 절단점의 위치를 \vec{r}_c , 절단점에서 떨어지는 거리를 d , 절단점에서의 법선벡터를 \vec{n} 이라 하면, 절단헤드의 위치(\vec{r}_i)은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{r}_i = \vec{r}_c + d \cdot \vec{n} \quad (1)$$

그리고 절단헤드의 방향은 절단점에서의 법선벡터 \vec{n} 과 일치해야한다. 따라서 레이저 절단경로를 산출하는 것은 절단 헤드의 방향이 절단 점에서의 법선 벡터(\vec{n})와 일치하도록 \vec{r}_i 의 값과 공구축(C축)과 Nutating 축(N축)의 회전량을 계산하는 것이 된다.

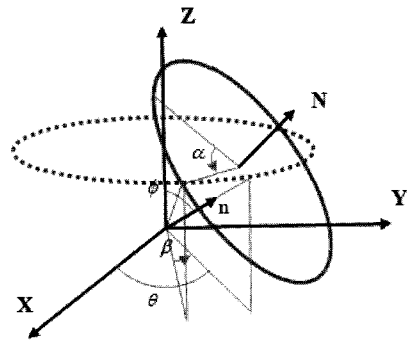


<그림 5> 절단 점과 절단 헤드 위치

2.3 역방향 변환

로봇공학에서 직교좌표계 상의 임의의 위치점에 도달하기 위해서 로봇 관절의 운동범위를 계산하는 것을 역방향변환(backward transformation)이라 한다[7].

먼저 <그림 6>과 같이 법선벡터(\vec{n})의 방위각을 θ, ϕ 라 하고 현재의 절단 헤드의 자세에서 법선벡터와 일치시키기 위해 필요한 회전축의 양을 각각 α, β 라고 하자. 두 회전축의 운동량 α, β 는 N축을 회전시켜 절단 헤드의 방향벡터를 법선벡터의 ϕ 값에 먼저 일치시킨 후, C축을 회전하여 법선벡터의 θ 값과 맞추는 방식으로 계산할 수 있다.



<그림 6> α 값과 β 값

이때 N축의 회전에 따라 절단헤드의 방향벡터가 어떻게 변하는지를 알아보기 위해서는 N축 회전변환행렬의 계산이 필요하다. N축은 XY평면과 45° , Z축과 45° 를 이루고 있으므로 N축의 회전량 α 에 따른 변환행렬은 Y축을 -45° 회전시켜 Z축과 Z축의 방향을 일치시킨 후 Z축을 α 만큼 회전시키고 다시 Y축으로 45° 회전시켜서 얻는다. 따라서 N축 회전변환 행렬은 식 (2)과 같이 표현된다.

$$M_N = R_Y(-\frac{\pi}{4})R_Z(\alpha)R_Y(\frac{\pi}{4}) \quad (2)$$

여기서

$$R_Y(-\frac{\pi}{4}) = \begin{bmatrix} \cos -\frac{\pi}{4} & 0 & -\sin -\frac{\pi}{4} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin -\frac{\pi}{4} & 0 & \cos -\frac{\pi}{4} \end{bmatrix}$$

$$R_Z(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_Y(\frac{\pi}{4}) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\pi}{4} & 0 & -\sin \frac{\pi}{4} \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \frac{\pi}{4} & 0 & \cos \frac{\pi}{4} \end{bmatrix}$$

2.4 N축의 회전량 α 값 계산

따라서 N축을 α 만큼 회전시키면 초기 Z축 방향이었던 레이저 절단헤드의 방향벡터(\vec{t})는 식 (3)과 같이 변하게 된다.

$$\vec{t} = (0, 0, 1)M_N = (-\frac{\cos \alpha}{2}, \frac{-\sin \alpha}{\sqrt{2}}, \frac{-\cos \alpha + 1}{2}) \quad (3)$$

\vec{t} 벡터는 Z축과 이루는 각도가 ϕ 가 되도록 회전해야 하므로

$$\vec{t} \cdot \vec{z} = \cos(\phi) \quad (4)$$

이로부터 N축의 필요회전량 α 는 식 (5)로 표현된다.

$$\alpha = \cos^{-1}(2\cos\phi - 1) \quad (5)$$

2.5 C축 회전량 β 값 계산

C축의 회전량인 β 는 \vec{t} 벡터를 법선벡터 \vec{n} 과 일치시키는 것이므로 \vec{t} 에서 \vec{n} 까지의 각도 값이 되며 식 (6)과 같이 벡터 내적의 성질을 이용하여 계산한다.

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{\vec{t} \cdot \vec{n}}{|\vec{t}||\vec{n}|}\right) \quad (6)$$

단, 식 (6)을 컴퓨터에 구현할 경우에는 arccosine 함수의 리턴값이 0에서 180°로 제한되어 절단 동작을 부드럽게 만들지 못하는 원인이 된다. 따라서 기존의 연구에서 제시한 방법[5]을 이용하여 β 값이 연속적인 값이 되도록 하는 것이 필요하다.

3. 절단 동작 시뮬레이터

5축 절단 시뮬레이터는 제 2장에서 개발한 포스트 프로세서를 이용하여 컴퓨터상에 공작기계의 동작을 구현하는 것이다. 컴퓨터 시뮬레이터를 개발하는 일반적인 방법으로는 컴퓨터 언어인 Visual C++과 그래픽 모델링 툴인 Open GL을 이용하는 방법이 많이 사용되지만 프로그래밍 부담이 매우 크다.

3차원 모델링을 지원하는 상용 3차원 CAD 시스템에는 모델링 및 어셈블리 기능 외에 모션(Motion)기능을 제공하고 있다. 모션기능이란 정적인 상태로 모델링된 형상들에 대하여 동적인 상태의 시뮬레이션을 할 수 있도록 함으로써 각 부품들 간의 구조 및 동작 과정에서 발생하는 문제점과 간섭 및 오류를 사전에 파악할 수 있도록 하는 기능이다.

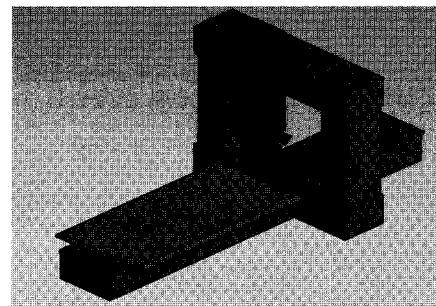
따라서 본 연구에서는 절단 시뮬레이터 개발을 손쉽게 하기위하여 상용 3차원 CAD 시스템인 UG-NX의 모델링(Modeling) 및 조립(Assembly) 기능을 이용하여 머신을 모델링한 후 모션 기능을 이용, 각 축에 실제 머신의 운동과 같이 동작할 수 있도록 하는 방법을 도입하였다.

3.1 머신 모델링

<그림 7>은 대상 머신을 UG-NX상에서 3차원 모델링한 모습이다. 3개의 직교축과 2개의 회전축으로 구성하였으며 정확한 시뮬레이션을 위하여 모델링의 치수 및 동작범위는 <표 1>과 같이 기계 사양에 나와 있는 데이터를 기초로 하였다.

<표 1> 각축의 운동 범위

Axis	Motion range
X	1,000mm
Y	850mm
Z	450mm
C	±180o
N	±35o



<그림 7> 5축 레이저 절단기 모델링 모습

3.2 조인트의 모션 기능 부여

모션을 구현하기 위한 기본적인 명령은 링크(link)와 조인트(joint)의 두 가지 명령이다. 링크는 조인트를 이용하여 구동 조건을 설정하기 이전에 설정해야하는 명령으로 X, Y, Z, N, C 5개의 축 간의 연결을 정의하게 된다. 조인트는 링크로 설정된 부품들이 상호 작용에 의하여 구동될 수 있도록 링크와 링크 사이의 다양한 구동 조건을 결합시키는 과정으로 UG-NX에서는 8개 타입(회전, 슬라이드, 원통형, 나사, 유니버설, 구형, 평면형, 고정)의 선택을 제공한다.

일반적으로 로봇 기구학에서 조인트의 타입은 선형, 직교, 회전, 비틀림, 선회 조인트로 세분하여 분류하지 만[7], UG-NX에서는 선형과 직교조인트는 슬라이더(slider)로 나머지 회전, 비틀림, 선회 조인트는 모두 회전형(revolute)을 사용하여 구현할 수 있다. <표 2>에 각 조인트의 종류와 UG-NX의 모션 기능에서 부여한 옵션의 종류가 나타나 있다.

<표 2> 조인트 타입과 UG-NX 모션 옵션

Joint type	Motion range	UG-NX motion option
O	1,000mm	Slider
O	850mm	Slider
O	450mm	Slider
T	±180o	Revolute
V	±35o	Revolute

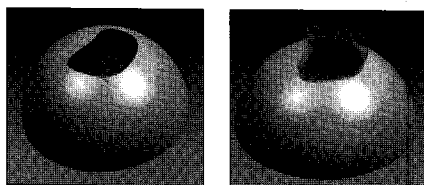
O : Orthogonal, T : Twist, V : Revolving.

3.3 포스트 프로세서와의 연결

UG-NX의 모션기능 사용시 동작에 필요한 운동량 값은 엑셀(excel)파일 형태로 인터페이스 가능하다. 그러므로 제 2장에서 제시한 포스트프로세서의 출력 화일을 모션기능에 맞는 엑셀 포맷으로 변환시키면서 스텝(time step)과 동작 소요시간(elapsed time)을 적절히 부여하면 된다. 여기서 각 스텝은 절단선을 허용공차에 근거하여 세분한 점으로 구성하고 소요시간은 실제 동작시간을 확인하기 위해서는 각 스텝간의 절단선의 길이 값과 사용자가 입력하는 이송속도를 곱한 값을 사용한다.

4. 동작 시뮬레이션 검증

개발된 시스템의 유효성을 검증하기 위하여 <그림 8>과 같이 반구 형상의 공작물 상에 절단곡선을 정의하였다. UG-NX상에서 절단 형상을 모델링하고 절단 선을 정의한 뒤 API(Application Programming Interface) 기능을 이용하여 절단 선으로부터 법선벡터를 구한 뒤 이를 모델링 형상에 나타낸 모습이다.



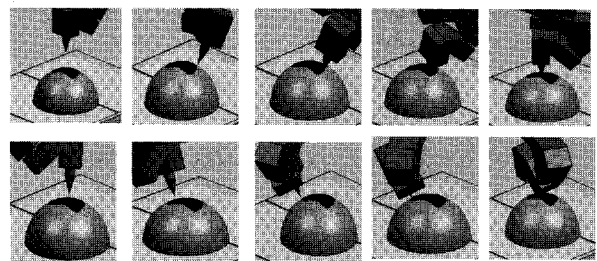
<그림 8> 절단선과 법선벡터

이 법선벡터 방향으로 레이저 초점거리만큼 이동한 점이 레이저 절단헤드가 위치해야할 점이 된다. 절단 헤드 위치 데이터로부터 제 2장에서 제시한 역방향 변환을 이용하여 각 축의 운동량을 계산한 후 시뮬레이터의 입력인 엑셀 포맷으로 표현한 모습이 <그림 9>에 나타나있다. 각 레코드에 X, Y, Z축의 절대 위치값 및 N, C축의 회전량이 기록되어 있다.

Time Step	Elapsed	Mechanisms				Driver	
		drv X, slider	drv Y, slider	drv Z, slider	drv N, revol	drv C, revol	
0	0	0	0	0	0	0	
10	0.1	400	0	400	0	0	
20	0.2	-104,394	0	400	35,96715	77,0729	
30	0.3	-104,394	0	400	35,96715	77,0729	
40	0.4	-104,394	0	221,646	35,96715	77,0729	
50	0.5	-61,7841	0	131,1782	35,96715	77,0729	
60	0.6	-61,8718	1,747946	131,2194	35,9117	75,46997	
70	0.7	-61,5016	3,504622	131,2641	35,85129	73,85445	
80	0.8	-61,274	5,270593	131,3115	35,78726	72,22337	
90	0.9	-60,9898	7,04632	131,3606	35,72097	70,57397	
100	1	-60,6491	8,832152	131,4103	35,65359	68,90374	
110	1.1	-60,2526	10,62834	131,4598	35,58649	67,21027	
120	1.2	-59,8003	12,43502	131,5078	35,52127	65,49148	
130	1.3	-59,2926	14,25226	131,5533	35,45929	63,74552	
140	1.4	-58,7297	16,07999	131,595	35,40236	61,97024	
150	1.5	-58,1119	17,91809	131,6319	35,35209	60,16452	
160	1.6	-57,4392	19,76631	131,6626	35,31008	58,32698	
170	1.7	-56,7119	21,62434	131,6858	35,27835	56,46646	
180	1.8	-55,9302	23,49178	131,7002	35,25871	54,55235	
190	1.9	-55,7566	23,89101	131,702	35,25611	54,14202	
200	2	-54,8552	25,88533	131,7037	35,25393	52,0756	

<그림 9> 엑셀 포맷으로 표현된 입력 데이터

<그림 10>는 제 3장에서 개발된 모션 시뮬레이터를 이용하여 5축 레이저 절단기의 동작을 검증하고 있는 모습이다. 절단기 헤드가 초점거리만큼 움직인 위치에서 절단선에 수직하게 움직이고 있는 모습을 볼 수 있으며 위상반전에 따른 불연속적 공구 동작 없이 절단 곡선을 부드럽게 따라가는 모습을 확인할 수 있다.

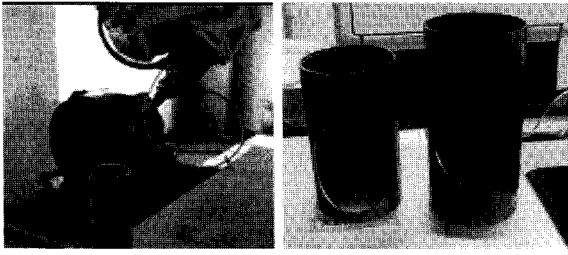


<그림 10> 반구 형상에 절단 모션을 적용한 모습

<그림 11>은 또 다른 예로서 실제 현장에서 수요가 높은 파이프 형상에 대하여 절단기의 동작을 검증하고 있는 모습이다. 그리고 <그림 12>는 개발된 포스트 프로세서 및 동작시뮬레이터를 이용하여 NTC사의 TLM 5축 레이저 절단기에 적용하여 실제 파이프 형상을 절단한 모습을 보여주고 있다.



<그림 11> 파이프 형상에 대한 절단 동작 시뮬레이션



〈그림 12〉 실제 절단 모습

5. 결 론

본 연구는 기존의 5축 머신 컨피규레이션과 다른 타입인 Nutating 헤드를 갖는 5축 레이저 절단기를 위한 절단 동작 시뮬레이터를 개발에 관한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 포스트 프로세서의 개발은 Nutating 타입의 절단 헤드에 대한 기구학적 모델링 및 역방향 해를 구함으로써 해결할 수 있었다.
2. 3D CAD 시스템인 UG-NX에서 제공하는 모션기능을 이용함으로써 기존의 Open GL과 같은 그래픽 툴을 이용하는 것에 비하여 간편하게 시뮬레이터 개발이 가능함을 보였다.
3. 레이저 커팅 동작을 사전에 확인할 수 있도록 함에 따라 실제 현장에서 발생할 수 있는 예기치 못한 기계의 동작에 따른 위험을 줄일 수 있었다.

본 논문은 동작시뮬레이터의 기초 연구로서 충돌이 실제 발생할 경우에 대한 사전 감지 및 동작 수정 기능

등의 보완 등이 향후 연구 될 예정이다.

참고문헌

- [1] Jo, E. J., Hwang, J. D., and Jung, Y. G.; "Study on the Development of Post-Processor for 5-axis NC Machining," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, 15(3) : 53-58, 2006.
- [2] She, C. H. and Chang, C. C.; "Development of a five-axis postprocessor system with a nutating head," *Journal of Materials Processing Technology*, 187-188 : 60-64, 2007.
- [3] Lee, R. S. and She, C. H.; "Developing a Postprocessor for Three Types of Five-Axis Machine Tools," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13 : 658-665, 1997.
- [4] Jung, Y. H., Lee, D. W., Kim, J. S., and Mok, H. S.; "NC post-processor for 5-axis milling machine of table-rotating/tilting type," *Journal of Materials Processing Technology*, 130-131 : 641-646, 2002.
- [5] Kang, J. G.; "Development of Post-Processor and Cutting Motion Simulator for 5-axis CNC Laser Cutting Machine," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 8(4) : 7-13, 2009.
- [6] Kim, Y. I., Kim, D. S., and Jun C. S.; "A CAD/CAM System for Steam Paths of Turbine Generators," *Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers*, 10(4) : 254-261, 2005.
- [7] Groover, M. P.; "Automation, Production Systems, and CIM," 2nd Ed., Prentice-Hall, 2001.