

터빈발전기의 Steam Path 전용 CAD/CAM 시스템

김영일*, 김덕수**, 전차수***

A CAD/CAM System for Steam Paths of Turbine Generators

Kim, Y. I.*, Kim, D. S.** and Jun, C. S.***

ABSTRACT

The purpose of this research is to develop a method for cutting non-circular holes on a bent thick plate. Generally in order to cut the holes on the large plates, a special-purpose 5-axis machine is needed. However, such a machine is unavailable in most of the machine shops. This paper provides a description of such a method that utilizes a general-purpose 5-axis water-jet machine in place of the special-purpose machine. First, the bent piece is transformed into a flat plate, where the shape of the holes is reconstructed by considering deformation during bending. Then, after a 5-axis NC data is generated, the holes on the flat plate are cut using the 5-axis water-jet machine. The final step is to return to its original shape by bending the plate with its newly-cut holes. The proposed methodology is implemented as a dedicated system by customizing a commercial CAD/CAM system. Some illustrations are provided throughout the paper in order to show the validity of the proposed methods and the developed system.

Key words : Hole-Making, 5-axis NC machining, Water-Jet machine, CAD/CAM system, Bending

1. 서 론

터빈 발전기는 증기 터빈을 원동기로 하는 화력 발전기로서 10여 가지의 대형 모듈로 구성되어 있다 (Fig. 1). 터빈 발전기의 부품인 steam path에는 평균 크기와 폭이 각각 1300×300×650 mm와 12 mm 인 후판이 있으며, 그 내부에는 airfoil 형상의 구멍이 200여 개가 있다. 외국의 한 대기업의 경우 전용 5축 레이저 가공기를 이용하고 있으나, 국내에서는 이와 같은 대형의 후판을 가공할 수 있는 5축 가공기가 없으며, 이러한 가공을 위한 별도의 전용기를 만들 수 있는 여건이 되지 못한다. 따라서 굽혀진 상태에서의 구멍 가공은 현실적으로 불가능하며, 본 연구에서는 범용의 5축 물제트(water-jet) 가공기를 이용하여 평

판에서 구멍을 가공하고 이를 굽히는 방법을 제안한다.

평판에서 구멍을 가공하기 위해서는 구멍의 형상을 정확히 전개하는 방법과 5축 가공용 데이터 생성에 대한 기술이 필요하다. 본 연구에서는 언급된 기술들을 바탕으로 상용 CAD/CAM 시스템인 Unigraphics의 API를 이용하여 steam path 모델링 및 가공 데이터 산출 시스템을 개발하였다.

Steam path는 터빈 발전기의 nozzle boxes 모듈 내에 위치하며 증기의 압력을 강하시켜 운동 에너지를 생성시키는 중요한 부품이다. Steam path의 수량은 '단'으로 표현하며 보통 6단에서 20단 사이이다. 한 단의 steam path는 상, 하 두 부분을 따로 만들어 용접한다. Fig. 2는 steam path의 반쪽인데, outer, inner band와 다수 개의 partition들로 구성되어 있는 것을 보여 주고 있다. Steam path의 두 band는 발전기의 사양에 따라 원통 또는 원뿔 형상을 갖는다. Airfoil 형상인 partition은 터빈 발전기의 용량에 따라 최대 200여 개 이상이 조립된다(Fig. 3). Fig. 4는 여러 개의 half steam path를 쌓아 놓은 모습이다.

*정회원, (주)효원시스템 CAD/PLM팀, 경상대학교

**두산중공업(주), 증기터빈상세설계팀

***연락처자, 종신회원, 경상대학교 산업시스템공학부, 항공기부품기술연구센터

- 논문투고일: 2005. 02. 02

- 심사완료일: 2005. 04. 12

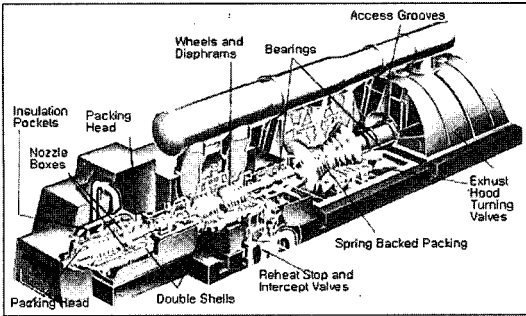


Fig. 1. Steam Turbine Generator^[9].

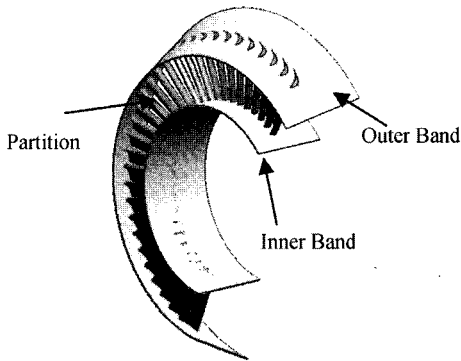


Fig. 2. Upper Half of Steam Path.

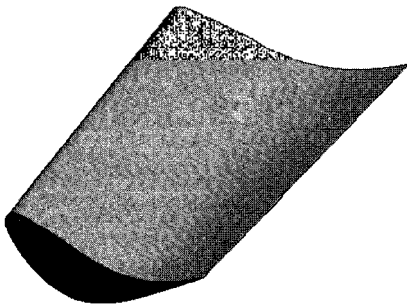


Fig. 3. Partition.

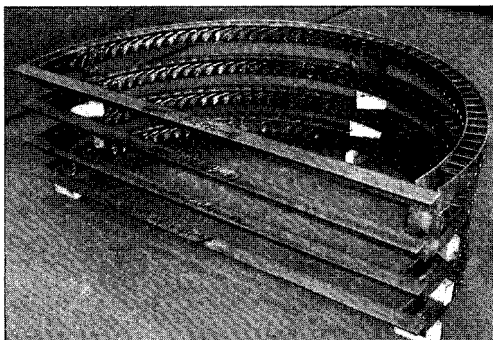


Fig. 4. Halves of Steam Paths.

2. 굽힘 및 전개

굽힘 변형된 판재는 외측으로는 인장, 내측으로는 압축이 발생한다. 외측 면과 내측 면 사이에서 길이가 변하지 않는 가상의 면을 설정하는데 이것을 중립면 (neutral plane)이라고 한다. 굽힘 가공을 하기 전 소재의 크기는 중립면의 크기로 결정된다. 중립면의 위치는 판재 내측 면을 기준으로 판재의 두께 비율로 표현되는데 이 비율을 k factor라고 한다. k factor의 값은 보통 0.33에서 0.5사이이며, 재질 및 두께에 따라 달라진다^[8].

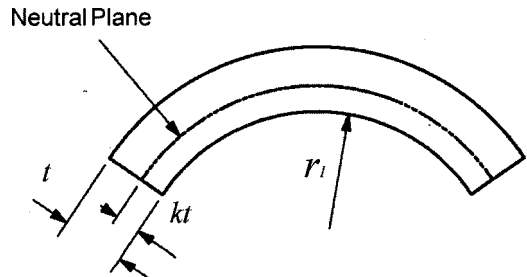


Fig. 5. Bending.

평판을 굽히면 평판 안에 뚫린 구멍의 형상이 변형된다. 따라서 평판에서 구멍을 가공하고 이를 굽히는 가공 방법을 택하기 위해서는 굽혀진 판재 안의 구멍 형상을 얻을 수 있는 평판상 구멍의 형상을 정확히 구하는 것이 필요하다. 우리는 이 과정을 '구멍 형상의 전개'라고 부른다. 이 장에서는 이를 소개하기 전에 중립면의 전개에 대해 먼저 다루고자 한다.

본 연구에서 다루는 steam path band의 기본 형상은 원통과 원뿔이다. 원통은 원뿔의 특별한 경우이므로 여기서는 원뿔의 경우만을 기술한다. 원뿔은 두 반경과 원뿔각(half angle, α)으로 정의할 수 있다. 원뿔각은 원뿔의 중심축과 측면의 사이각이다.

원뿔의 좌표계를 xyz 라 하고 전개된 부채꼴의 좌표계를 $x'y'$ 라고 하자. xyz 좌표계의 원점은 밑면의 중심점, z 축은 원뿔 회전축, 그리고 x 축은 전개 시작선과 원뿔의 밑면이 만나는 점을 지나도록 설정한다 (Fig. 6). $x'y'$ 좌표계는 Fig. 7과 같이 호의 중심점을 원점, 원뿔의 전개 시작선에 해당되는 선분을 y' 축으로 설정한다. 원뿔 상의 한 점 $p(x, y, z)$ 에 대응되는 부채꼴 상의 한 점 $p'(x', y')$ 는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

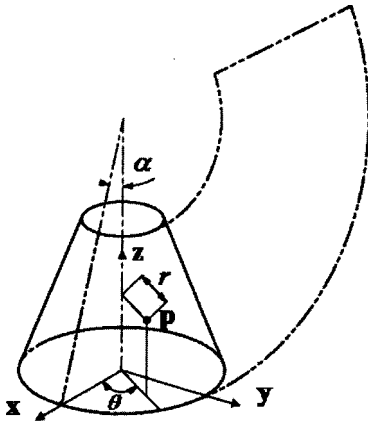


Fig. 6. Cone coordinates.

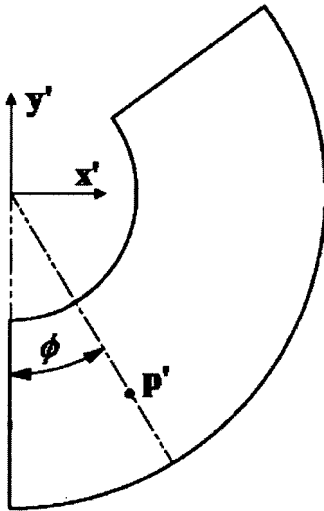


Fig. 7. Development coordinates.

$$\mathbf{p}' = (x', y')$$

$$= \left(\frac{r \sin \phi}{\sin \alpha}, \frac{-r \cos \phi}{\sin \alpha} \right)$$

where, $\phi = \theta \sin \alpha$
 $\theta = \text{atan2}(y, x)$

3. 구멍 형상의 전개

굽혀진 판재 안의 구멍의 형상을 전개하는 것은 판재의 두께 및 재질, 그리고 구멍의 형상 등에 따라 많은 영향을 받으며, 정확한 전개된 형상을 구하는 것은 매우 어렵다. 경우에 따라서는 판금 해석용 시스템을 사용하기도 한다. 본 연구에서는 가공 여유량 및 기존

작업 데이터를 검토한 결과 굽힘 및 전개 시의 변형량은 무시할 수 있다고 판단하고, 다음과 같은 가정을 설정하였다.

[가정 1. 수직 단면 형상의 불변]

중립면에 수직한 단면은 굽힘 변형 후에도 그 모양과 크기가 변하지 않는다.

[정리 1. 굽힘 변형의 형상 전개]

가정 1하에서 굽힘 변형 전후의 중립면 N과 N'가 주어진 경우, 굽혀진 판재 내의 한 점 q에 대응되는 평판 내의 점 q'는 아래의 절차로 구할 수 있으며, Fig. 8은 이 과정을 그림으로 나타내고 있다.

- 1) q를 굽혀진 판재의 중립면 N에 법선 방향으로 투영한 점 p를 구한다.
- 2) 점 p에 대응되는 전개된 중립면 N' 상의 점 p'를 구한다. 원뿔 형상의 경우는 식(1)을 이용한다.
- 3) p'를 중립면 N'의 법선 방향으로 d만큼 이동하여 점 q'를 구한다. 여기서 d는 점 p의 중립면 N으로부터의 법선 방향 거리이다.

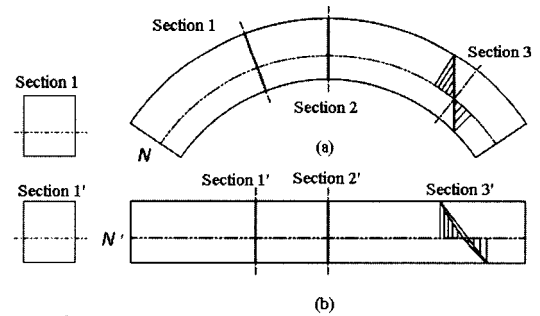


Fig. 8. Center line sections and a non-center line section.

정리 1의 절차는 수직 단면 상의 한 점을 가정 1에 따라 좌표 변환하는 절차이므로 증명은 생략한다.

Fig. 8에서 알 수 있듯이, 중립면에 수직인 단면은 변형이 없으나, 그렇지 않은 경우는 형상이 변하며, (d)는 삼차원 입체 형상의 예를 보여 주는 것이다.

본 연구에서 가공하고자 하는 band의 partition 구멍은 ruled surface이고, 이를 정리 1에 따라 평판으로 정확히 전개된 형상을 구하면 ruled surface는 아니나, 그 오차는 무시할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 판재의 외측 면과 내측 면상의 구멍 외곽선만으로 전개 형상을 구한다.

위의 가정 1을 근거로 굽혀진 판재를 평판으로 전개했을 때 전개된 평판에서의 구멍 형상은 다음과 같이 구할 수 있다.

[알고리즘 1. band 구멍 형상의 전개]

- 1) 주어진 k factor로 중립면(neutral plane)을 결정한다.
- 2) band의 외면 및 내면 구멍 윤곽선을 정리 1에 의해 평판 상의 윤곽선으로 전개한다.
- 3) 전개된 내, 외면 윤곽선의 대응점을 연결하여 ruled surface를 만든다.

4. 5축 물제트 가공기

본 연구에서 사용되는 물제트 가공기는 직교하는 3개의 축과 회전축인 B축과 C축을 가진 ASI사의 5축 가공기이다(Fig. 9). B축과 C축의 회전 범위는 각각 360°와 540°이다. B축과 C축은 서로 45°를 이루며, 일반적인 5축 가공기와는 달리 두 회전축을 연장해서 만나는 점(pivot point 또는 focal point)이 가공점이

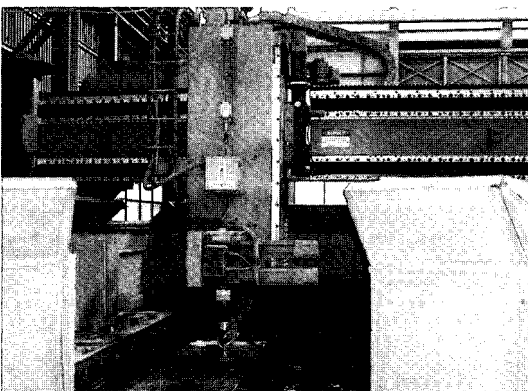


Fig. 9. Water-Jet machine.

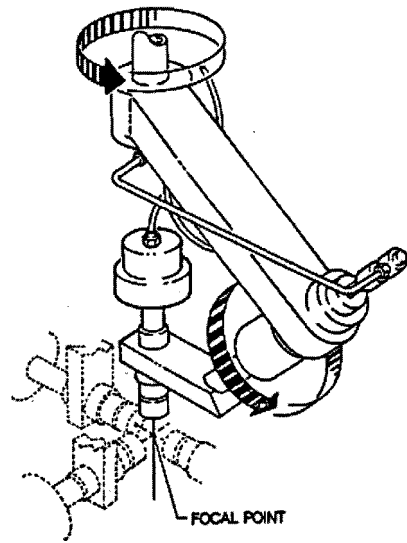


Fig. 10. B axis and C axis^[1].

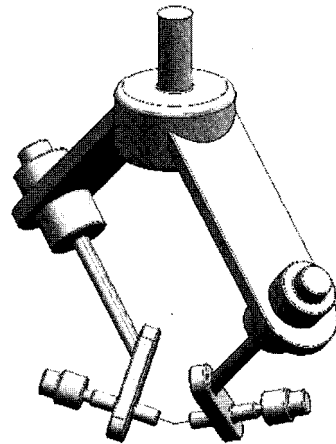


Fig. 11. Nozzle orientation.

된다(Fig. 10). B축의 회전축은 +x 방향으로 기울어져 있다. 이러한 구조로 B, C축 값이 임의로 변해도 가공점(focal point)은 변하지 않는다. Fig. 11은 여러 가지 가공 자세를 보여 주고 있다.

회전 이동 축을 갖고 있는 5축 NC 기계에서는 Cartesian space 상에서의 공구 끝 중심점(CL점)의 이동에 해당되는 기계 축들의 이동량을 파악하는 것이 쉽지 않으며 이의 관계를 명확히 밝히기 위해서는 기계 기구의 모델링(kinematic modeling)이 필요하다. 복잡한 축 구조를 갖는 다축 NC 기계의 경우에는 로봇 공학에서 널리 사용되는 “Denavit-Hatenberg representation”을 이용하는 것이 일반적이며, 간단한

구조를 갖는 경우는 기하학적 방법으로 모델링이 가능하다.

물체 가공기의 분사 방향 벡터를 t , t 와 z 축과의 각도를 θ 라고 하면 먼저 B 축의 회전으로 분사 노즐과 z 축의 각도를 θ 로 만든 후 C 축의 회전으로 t 와 일치하도록 만들 수 있다. x 축과 45° 의 경사를 갖고 있는 B 축의 β 회전은 y 축으로 -45° 회전, z 축으로 β , 그리고 다시 y 축의 45° 회전과 동일하다. 따라서 이에 대한 변환 행렬 M_B 를 구하면 아래와 같다.

$$M_B = R_y(-45)R_z(\beta)R_y(45)$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\cos \beta + 1}{2} & \frac{\sin \beta}{\sqrt{2}} & \frac{-\cos \beta + 1}{2} & 0 \\ \frac{-\sin \beta}{\sqrt{2}} & \cos \beta & \frac{\sin \beta}{\sqrt{2}} & 0 \\ \frac{-\cos \beta + 1}{2} & \frac{-\sin \beta}{\sqrt{2}} & \frac{\cos \beta + 1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

따라서 B 축을 β 만큼 회전 시키면 기준 분사 벡터는 아래와 같이 된다.

$$b = (x_b, y_b, z_b, 1) = (0, 0, 1, 1)M_B$$

$$= \left(\frac{-\cos \beta}{2}, \frac{-\sin \beta}{\sqrt{2}}, \frac{\cos \beta + 1}{2}, 1 \right) \quad (3)$$

b 와 z 축과의 사이각이 θ 이므로 β 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$(x_b, y_b, z_b) \cdot (0, 0, 1)$$

$$= \left(\frac{-\cos \beta}{2}, \frac{-\sin \beta}{\sqrt{2}}, \frac{\cos \beta + 1}{2} \right) \cdot (0, 0, 1)$$

$$= \frac{\cos \beta + 1}{2} = \cos \theta \quad (4)$$

$$\therefore \beta = \cos^{-1}(2\cos \theta - 1)$$

where, $\theta = \cos^{-1}(t \cdot z)$

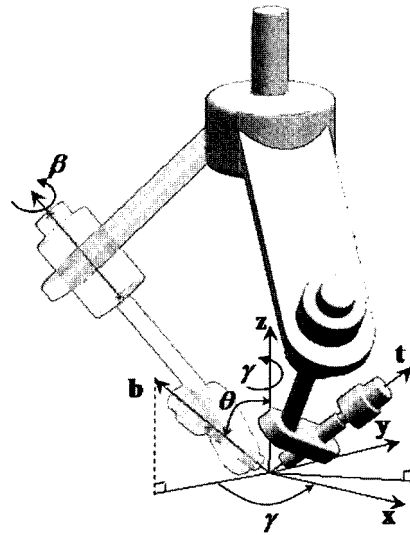


Fig. 12. Kinematic modeling of the machine.

그리고 C 축의 회전량인 γ 는 b 에서 t 까지의 각도이다.

$$\gamma = \text{angle}(b, t; z)$$

5. 시스템 구현

본 연구에서는 상용 CAD/CAM 시스템인 Unigraphics의 API를 이용하여 steam path 모델링 및 5축 불체트 가공기용 NC 데이터를 산출하는 전용 시스템을 개발하였다. 시스템의 주요 출력으로는 band 모델, 전개 모델, 가공 데이터, 그리고 현장 작업용 도면 작업 시 필요한 다양한 치수 및 형상 정보들이 있으며, Fig. 13은 최종 완성된 band의 실물 사진이다.

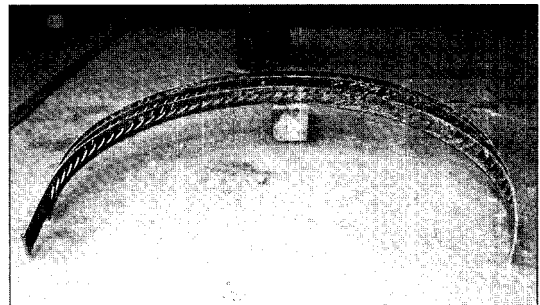


Fig. 13. Bands.

은 두 개의 구멍 윤곽선과 가공 데이터를 그린 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 굽혀진 후판 부품의 구멍 가공에 대한 방법을 제시하고 전용 CAD/CAM 시스템을 개발하였다. 후판이 굽혀진 상태에서는 기계 및 여러 작업상의 제약들로 인하여 구멍 가공이 힘든 경우가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 평판 상태에서 구멍을 가공한 후 굽힘 가공하는 방법을 제시하였다. 중립면에 수직한 단면은 굽힘 변형 후에도 그 모양과 크기가 변하지 않는다는 가정 하에 빔선 방향 투영을 이용하여 구멍의 전개 형상을 구하였다. 그리고 전개 방법은 원뿔의 개발사례를 이용하여 자세하게 설명하였다.

본 연구에서 적용한 가공기는 5축 물체프 가공기이다. 이 기계는 B, C축의 회전량 변화에도 pivot point가 변하지 않는 특징이 있다. 본 연구에서는 이 가공기에 대한 기구학적 모델링을 하고 가공 데이터를 생성하였다.

본 연구에서 제시한 방법은 상용 3D CAD/CAM 시스템인 Unigraphics의 API를 이용하여 구현 하였다. 수십 번의 시험 가공을 통하여 여러 가지 경우의 굽혀진 후판 부품 가공을 했으며, 현재 현업에 적용되고 있다. 터빈 발전기의 제작에 사용되는 steam path는 6~20단이며 steam path내에 들어 가는 구멍의 개수는 inner, outer band를 모두 합쳐 평균 350개 정도이다.

시스템의 개발 전에는 전개 구멍 형상을 구하지 못하여 근사 모델을 이용했으며, 부정확한 가공기의 기구학적 모델링으로 인하여 partition 조립 시 상당한 사상 작업시간이 소요되었다. 그리고, 이러한 작업환경들은 제작비와 발전기 성능에 상당히 많은 악영향을 미쳤다. 본 연구를 통해 개발된 시스템은 두산중공업에서 생산중인 터빈발전기 당진 7, 8호기에 활용되고 있는데 이 시스템의 적용으로 발전기당 5만 人時

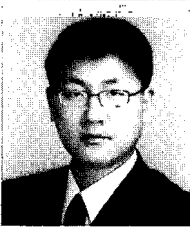
(man hour)를 절약하고 획기적인 품질 향상을 이루고 있는 것으로 평가되고 있다. 그리고 시스템에서 제공하는 각종 산출물을 바탕으로 굽힘 변형에 대한 각종 자료들을 효율적으로 관리할 수 있는 환경을 마련하게 되었다.

감사의 글

본 논문은 과학기술부·한국과학재단의 지역협력 연구센터인 항공기부품기술연구센터의 연구비를 지원 받았습니다.

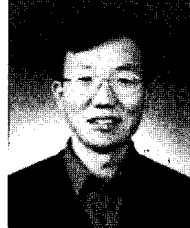
참고문헌

1. ASI Robotic Systems Training Manual, ASI robotics Systems, 1995
2. Unigraphics NX2 Open/API Reference Guide, EDS, 2002.
3. 최병규 외, CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭 가공(3판), 사이텍 미디어, 2003.
4. Shunmugam, M.S. and Kannan, T.R., "Automatic Flat Pattern Development of Sheet Metal Components From Orthographic Projections", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 1415-1425, 2002.
5. Redonnet, J.M., Rubio, W. and Dessein, G., "Side Milling of Ruled Surfaces: Optimum Positioning of the Milling Cutter and Calculation of Interference", *International Journal for Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 14, pp. 459-465, 1998.
6. Menzcl, C., Bedi, S. and Mann, S., "Triple Tangent Flank Milling of Ruled Surfaces", *Computer-Aided Design*, Vol. 36, pp. 289-296, March, 2004.
7. 전차수, 박세형, 전용태, "자유곡면의 5축 NC 가공을 위한 CAM 시스템 개발", 한국정밀공학회지, 제 10권, 제 1호, pp. 52-61, 1993.
8. 프레스 금형 실무과정, LG전자, 1995.
9. Doosan Steam Turbines, 두산중공업, 2000.



김 영 일

1991년 경상대학교 산업시스템공학과 학사
 1996년 경상대학교 산업시스템공학과 석사
 1996년~1999년 LG전자 생산기술센터 금형팀
 1999년~2001년 나라엠앤디(주) M/D설계팀
 2001년~현재 (주)효원시스템 CAD/PLM팀
 2002년~현재 경상대학교 산업시스템공학과 박사과정
 관심분야: Geometric processing, NC machining, CAD/PLM



전 차 수

1983년 부산대학교 기계공학과 학사
 1985년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1989년 한국과학기술원 산업공학과 박사
 1989년~현재 경상대학교 산업시스템공학부 교수
 1993년~1994년 Purdue University 객원연구원
 2001년 North Carolina State University 객원연구원
 관심분야: Geometric modeling, NC machining, e-Manufacturing



김 덕 수

1992년 영남대학교 기계설계공학과 학사
 1992년~현재 두산중공업(주) 증기터빈상세설계팀
 관심분야: Geometric modeling, Water Jet machining, Sheet Metal