

PaperMill - 박막과 마이크로 엔드밀을 사용한 적층조형 시스템

배광모*, 이상욱*, 이병철*, 강경수*, 김형욱*, 홍영정*, 진영성*, 김종철*,
박정화*, 박성민*, 박성환*, 백창일*, 안성훈**

PaperMill - A Layered Manufacturing System Using Lamination and Micro Endmill

Bae, K. M.*, Lee, S. U.*, Lee, B. C.*, Gang, G. S.*, Kim, H. U.*, Hong, Y. J.*, Jin, Y. S.*,
Kim, J. C.*, Park, J. H.*, Park, S. M.*, Park, S. H.*, Back, C. I.* and Ahn, S. H.**

ABSTRACT

A new Layered Manufacturing(LM) system, named PaperMill, is developed applying micro milling technology. A micro endmill(127 μm in diameter) is introduced as the cutter of build material. The selected build material for this system is an adhesive-coated paper roll which provides advantages such as good bonding between layers, machinability, and low material cost. A 3-axis CNC controller and three step-motors are used for the movement of X-Y-Z table of the system. For simplicity of the control of mechanism, the control system for feeding the paper roll is uncoupled from CNC controller. Two code converters are developed for the toolpath generation of the new LM system. The *NC converter* generates a set of NC codes for PaperMill using commercial CAM software while the *SML converter* generates an NC code from Quickslice's SML format. The NC codes generated from the converters consist of a series of profile data and trigger code for paper feeding. Two sample gears were fabricated to prove the concept of the system, which shown that the dimensional errors of the fabricated gears is under 3.4 percent.

Key words : Layered Manufacturing(LM), Rapid Prototyping(RP), PaperMill, Micro Endmill

1. 서 론

적층 조형(Layered Manufacturing) 또는 쾌속조형(Rapid Prototyping)기술은 다양한 적층방식과 재료의 사용 가능성을 제시하고 있다. 최근의 경향은 저가의 소형장비의 개발과 또한 엔지니어링 플라스틱, 금속, 세라믹 등의 기능성 재료의 제작에 관심이 모아지고 있다^[1-4].

여러 적층조형 장비 중 Helisys사의 LOM과 KIRA사에서 만든 PLT은 재료의 윤곽선을 절단하여 제품을 형상화하는 박막 적층법을 이용한 대표적인 시스템이다. LOM 방식은 각 층마다 비닐중합체를 코팅한 종이를 롤러로 열 압착하며 윤곽을 레이저로 절단하

고, PLT는 LOM과 비슷하지만 윤곽 절단에서 나이프를 사용한다는 점이 다르다^[7,8]. 국내에서도 종이를 적층하고 나이프로 윤곽을 절단하는 적층조형기를 연구한 바 있다^[9-11]. 또한 종이보다 두꺼운 판재의 절삭적층을 이용한 장비^[12]와 폼(foam)을 적층하고 열선으로 가공하여 제작속도를 향상시킨 연구^[13]도 실용화의 단계에 이르렀다.

본 연구에서 구현한 적층조형 시스템은 집착제가 도포된 박막을 적층재료로 사용하였고, 절단도구로는 마이크로 엔드밀을 이용하였다.

2. 시스템의 특징

2.1 다양한 형상입력 형식

3차원 형상은 기존의 적층조형시스템에서 실질적 표준(*de facto standard*)으로 사용되는 STL파일을 사용한다. STL은 대부분의 상용 CAD/CAM 소프트웨어

*경상대학교, 기계항공공학부
**중신회원, 경상대학교 기계항공공학부
- 논문투고일: 2002. 12. 09
- 심사완료일: 2003. 04. 29

어뿐 아니라 역공학에 사용되는 3차원 스캐너(3D Scanner)에서 지원하는 파일 형식으로써 삼각형 메시로 복잡한 형상의 표현도 가능하다. 그리고 중간단계에서 입력되는 NC코드, FDM용 SML파일¹⁾도 형상 입력이 가능하다.

2.2 박막형 적층 재료

고가의 재료비는 대부분의 상용 적층조형물의 사용을 저해하는 요인이 되어왔다. 여러 적층조형용 재료 중 집착제가 도포된 종이는 구입이 용이하고, 상온에서도 접착 및 가공이 가능하므로 제품생산의 비용측면에서 장점을 제공한다. 반면에 수지의 경화단계가 생략되어 후처리를 하지 않은 시작품은 적층면의 강도와 종이 자체의 낮은 강도로 인하여 힘을 받는 부분이 있는 시작품에 사용되기 어렵다. 또한 집착면적이 작은 경우에는 가공 중 발생하는 힘에 의해 절단 변형이 발생할 수 있다.

2.3 마이크로 엔드밀에 의한 적층 재료의 절단

기존의 적층조형장치에서 박막의 절단에 사용되는 방법인 나이프나 레이저를 사용하지 않고, 절삭가공에 사용되는 마이크로 엔드밀을 절단도구로 사용하였다. 기존의 LOM이 절단도구로 레이저를 사용하여 장비의 가격이 고가인 반면 마이크로 엔드밀은 대량생산으로 가격이 저렴하고 구입이 용이하다.

공구의 지름이 127 μm 인 마이크로 엔드밀로 윤곽 선을 가공하여 공구직경으로부터 보정해 주어야 하는 오프셋(offset) 값을 무시하도록 하였다(Fig. 1). 기존의 나이프 절단에 비하여 마이크로 엔드밀을 이용함으로써 얻는 이점은 엔드밀 외경의 모든 방향에서 절삭이 일어나서 절삭면이 가공방향의 영향을 받지 않는 점이다. 마이크로 엔드밀의 또 다른 장점은 금속 등 더 높은 절삭력이 필요한 재료의 가공이 가능하다

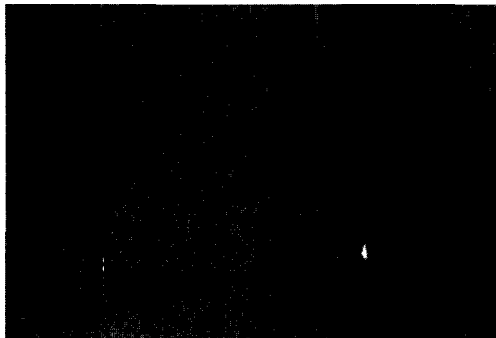


Fig. 1. The picture of micro endmill and its magnified tip.

는 것이다. 참고로 저자의 연구결과에 의하면 127 μm 인 마이크로 엔드밀로 알루미늄 6061T6 합금의 가공시 발생하는 오차(TIR)가 15 μm 이내임이 알려졌기에 종이의 가공에서는 상대적으로 적은 오차가 발생한다고 가정할 수 있다²⁾.

마이크로 엔드밀을 사용했을 경우 발생할 수 있는 분쇄는 공구의 날이 상당히 미세하여, 절단된 종이 칩(chip)과 집착제가 공구날에 집착되어 가공면의 품질을 저하시킬 수 있다는 점이다. 그리고 가공시 발생하는 버(burr)가 적절히 제거되지 않으면 적층면 사이에 누적되어 시작품의 치수정밀도나 접착면 사이의 강도에 영향을 줄 수 있다.

3. 시스템의 구성

3.1 적층 및 절삭공정

PaperMill은 절삭-박막압착-절삭을 하는 기존의 적층조형 방식과 달리 박막압착과 절삭을 동시에 수행한다. Fig. 2-b에서 보이는 압착장치(Pressing Frame)가 Z축 테이블의 상승과 함께 종이를 압착하여 가공을 하므로 별도의 압착공정을 생략하였다. 압착장치는 50 mm×50 mm의 면적에 스프링의 힘으로 가공될 종이를 압착한다. 압착 후 마이크로 엔드밀로 프로파일 절삭을 하며 외곽가공을 한 후 새로운 종이를 이송한다. 이 적층-절삭-이송의 과정을 반복하여 3차원 형상이 생성된다.

3.2 공정계획

PaperMill의 작동을 위하여 두 가지 공정계획

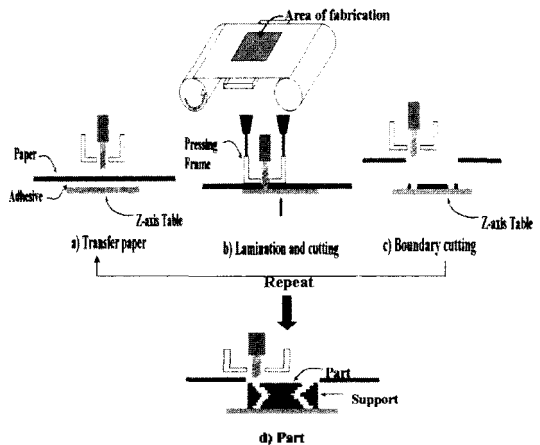


Fig. 2. The schematic diagram of lamination and micro milling process.

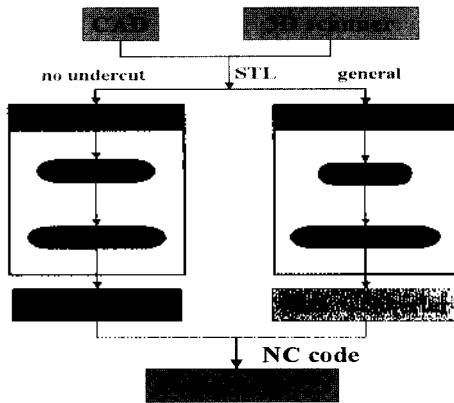


Fig. 3. The diagram of process planning (the left route is CAM-based process and the right route is Quickslice-based process).

```

SML # 2 0 0785 5 - 0 0746 0 1 - 00 0070 ## BFCM PART SLICE ##
M01967 1694
M2095 100 0 #FC D=1
M2 300
# no.0 set Part type Control mach with D=0% Z 0 0736 S 0 0746 (-set)
D= M22 36 36 24 24 36 36
P=1 V=15 L=1
PO D= 25MMAXIME 7MMIN 4MM-10 LUS
AS1 V=4 EC:
M01967 1694
M01967 1694
M01967 1694
M01967 1694
↓
NC code %
N1 G 1734
N2 M3 S018
N3 G90 G49 G60
N4 S01 454 714 3
M5 F300
N6 G43 H1 M6
N7 G43 Z00 Y42 400
N8 Z 0 15
M7 S60 S00 Y42 400
N9 Y48 S05 Y42 105
M8 Y46 G05 Y42 100
N10 Y46 I00 Y42 000
N11 X46 400 Y41 900
N12 M5 T05 Y41 900
    
```

Fig. 5. An example of SML file which is converted to an NC code by the SML converter.

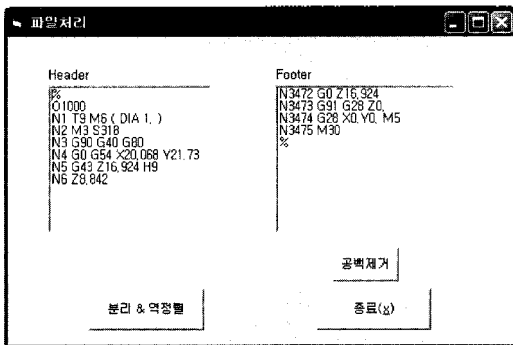


Fig. 4. The user interface of the NC converter.

(process planning)의 방법이 시도되었다. 첫째, 언더컷 (undercut)이 없는 형상의 경우 기존의 3차원 CAM을 사용하여 공구경로를 생성하였다. 상용 3차원 CAM에서 생성된 NC코드는 직삭가공을 위한 공구경로가 생성되므로 한 층씩 쌓아 나가는 적층공정에는 부적합하다. 그러나 본 시스템에서는 절삭공정을 응용하여 프로파일 가공을 하므로 상용 CAM에서 층 단면화하여 계산된 공구경로를 사용할 수 있다(Fig. 3 왼쪽).

본 시스템이 필요로 하는 NC코드는 기존 소프트웨어에서 추출된 NC코드의 역순코드와 한 프로파일씩 분리되어있는 코드가 필요하기 때문에 이를 자동으로 변환해 주는 변환프로그램(NC Converter)을 개발하였다(Fig. 4). 그리고 새로운 적층부의 이송을 위해 부가적으로 필요한 NC코드의 삽입 역시 변환 프로그램이 수행한다.

두 번째 시도는 언더컷의 유무와 상관없는 보다 일반적인 3차원 형상을 가공하는 방법이다(Fig. 3 오른쪽

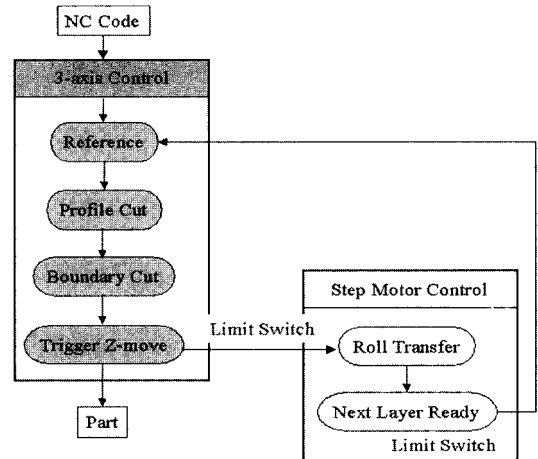


Fig. 6. The control flow of CNC control and step motor control.

쪽). 먼저 Stratsys사의 Quickslice를 사용하여 STL 파일의 층 단면 데이터와 프로파일 데이터(SML파일)를 얻었다. 이를 PaperMill용 NC 코드로 변환하기 위해 SML Converter를 개발하였다(Fig. 5). 이렇게 두 가지 공정계획과정을 사용하는 이점은 다양한 포맷을 입력파일로 사용할 수 있다는 것이다. 형상조건(언더컷의 유무)에 따라 차이가 있으나 STL, 층 단면화 된 프로파일의 NC코드, SML파일 등의 다양한 형식으로 적층조형을 할 수 있는 NC코드를 생성할 수 있다.

3.3 시스템 제어

본 시스템의 제어순서는 Fig. 6에 보인다. 기본적으로 NC코드로 작동하는 3축 X, Y, Z 테이블과 별도

의 스텝 모터 컨트롤러로 각각 절삭가공과 재료이송을 수행하는 시스템이다. 공정계획에서 얻어진 코드(Fig. 3 아래)로 첫 가공편을 가공하고 다음 재료의 이동을 위해 Z축의 직측판이 하강하게 된다. 이때 Z축 프레임에 부착되어 있는 터치스위치 센서가 Z축의 이동을 감지하여 이송 담당 롤러를 구동하는 스텝 모터를 작동한다. 모터의 회전에 의해 이송 담당 롤러가 회전을 하게 되고 이 회전력에 의해 전체적인 재료의 이송이 이루어지게 된다. 이송부의 제어는 터치스위치로부터의 신호를 받아 함수발생기에서 펄스를 생성하여 스텝모터를 구동하고 이 구동력을 제인을 사용하여 롤러에 전달한다.

Z축의 하강을 담당하는 NC코드는 첨가 코드로써 센서의 위치나 재료의 이송량에 따라 하강 거리를 고려하여 작성한다. 이렇게 하여 다음 재료가 가공 공간으로 이송하게 되면 Z축이 상승하게 되고 다음 가공이 이루어지게 된다.

전체적인 시스템의 작동은 초기 세팅 이후 가공 공정이 끝나는 NC프로그램의 종료 시점까지 자동으로 이루어진다. 사용된 컨트롤러는 Micro Proto System이며, X, Y, Z축을 세 개의 스텝 모터로 제어한다.

PaperMill에 사용된 제어의 특징은 3축 CNC 제어와 이송제어의 분리이다. 센서(limit switch)를 사용하여 CNC 제어와 이송제어를 연결(coupling)하여 4축 CNC를 사용하지 않고, NC코드의 변형만으로 모든 제어를 수행하는 단순화된 제어를 시도하였다. 만약 4축 CNC를 사용하여 X, Y, Z축과 볼러를 구동하는 경우 종이이송에 필요한 시간이 절감되어 전체적인 가공속도가 향상될 것이다.

4. 하드웨어 사양

PaperMill의 시작품(prototype)은 Fig. 7에 보여진다. 컨트롤러를 제외한 기기의 크기는 1500 mm 620 mm×813 mm로 탁상용으로 사용할 수 있다. 3축 CNC의 X, Y, Z방향으로 최대 이송범위는 각각 244 mm×160 mm×112 mm이나 사용되는 종이의 크기(폭 140 mm)에 따라 가공영역이 Table 1과 같이 축소되었다.

주축의 모터가 X-축에 부착되어 X-Y평면상을 이동하므로 그 관성에 의해 X-Y축 모터에 걸리는 부하를 감소하기 위하여 낮은 이송속도를 사용하였다.

식 (1)에 의하면 8000 rpm, 390 mm/min일 때 절삭속도 $V=3192 \text{ mm/min}$, f (절삭날당 이송량)=24 $\mu\text{m/tooth}$ 이다. 사용된 절삭속도와 절삭날당 이송량은

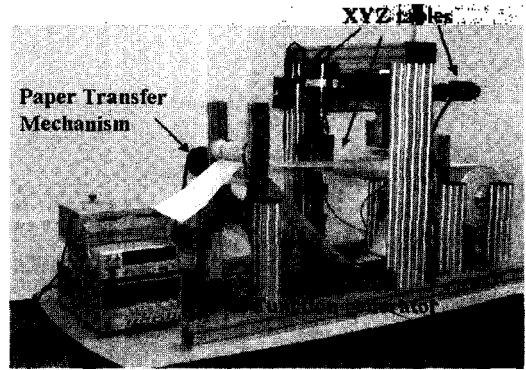


Fig. 7. The picture of table-top PaperMill.

Table 1. The fabrication envelope of PaperMill

가공영역	X	134.5 mm
	Y	93 mm
	Z	110 mm
종이	Width	140 mm
	Thickness	0.15 mm
가공조건	Spindle	8000 rpm
	Feed rate	390 mm/min

절삭력이 필요 없는 종이를 프로파일 가공하기 위해 높게 결정되었으나, 후에 시험할 포켓가공이나 금속성의 박막가공을 위해 안전한 범위로 선정되어야 한다.

$$V = (\pi \times D \times N) \text{ mm/min}$$

$$f_t = F / (Z \times N) \text{ mm/tooth}$$

V : Cutting Speed

D : Diameter of Endmill(0.127 mm)

N : Spindle Speed(8000 rpm)

f_t : Feed per Tooth

Z : Number of Teeth(2)

F : Feed Rate(390 mm/min)

(1)

5. 가공 예

언더컷이 없는 평기어를 CAM을 사용하여 NC 코드를 생성한 예가 Fig. 8에 보인다. CATIA V5.9를 사용하여 기어를 모델링 하였고, VISI-CNC와 변환 프로그램(NC Converter)으로 공구경로를 생성하였다. Fig. 9와 10은 마이크로 엔드밀로 종이누끼의 프로파일을 가공하는 모습을 압착상치를 제거한 상태와 부착한 상태로 보여준다.

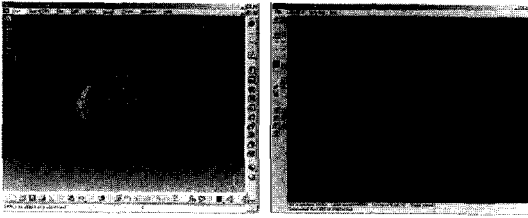


Fig. 8. A CATIA model of plane gear(left) and toolpath simulation by VISI CNC(right).

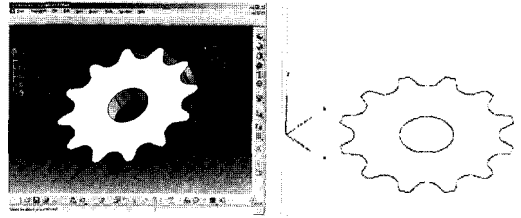


Fig. 12. A helical gear designed(left) and a sliced profile of the gear by Quickslice(right).

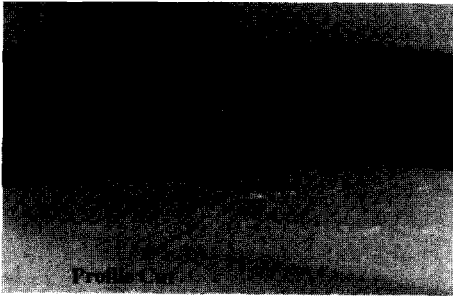


Fig. 9. The cutting process of micro endmill(for clarity of picture, the Pressing Frame was disengaged).

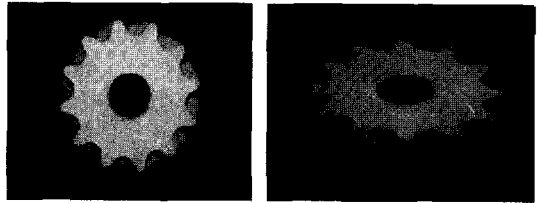


Fig. 13. A helical gear fabricated by PaperMill(left) and its post-processed part(right).

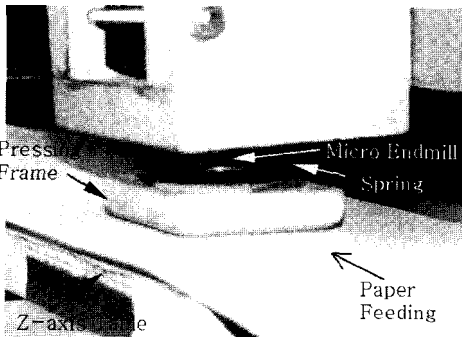


Fig. 10. The simultaneous pressing-and-cutting process with Pressing Frame.



Fig. 11. A gear part fabricated by PaperMill.

PaperMill로 윤곽을 선단하여 70겹을 적층한 기어를 시험가공 하였다(Fig. 11). 직경 75 mm의 기어 한

Table 2. Dimensional error of resin-infiltrated helical gear

Dimension	Design	Measured	Error(%)
Outer diameter	50.59 mm	51.05 mm	0.9
Inner diameter	15.0 mm	14.49 mm	3.4
Height	7.00 mm	6.95 mm	0.7

층을 가공하는데 약 3분이 소요되었다.

언더컷이 있는 헬리컬 기어의 형상이 Fig. 12에 보인다. Fig. 13에는 완성된 헬리컬 기어와 이 종이 헬리컬 기어에 순간접착제(Cyano Acrylate)를 흡수시켜 강도를 향상하는 후처리 공정(post-process)을 기친 시제품이 보인다.

6. 결 론

박막과 마이크로 가공을 이용한 적층가공 시스템인 PaperMill이 제작되었다. 입력형식의 다양화를 위하여 NC코드 또는 SMI 파일을 입력하는 공정계획과 각각의 변환기를 사용하였고, 다양한 재료의 절단을 위해 마이크로 엔드밀을 절단 도구로 사용하였다. 평기어와 헬리컬기어를 시험 가공하여 단순한 형상의 적층조형이 가능함을 증명하였다.

아직은 시스템 설계에서 복표한 사양들을 기초로 하드웨어의 시제품을 제작한 단계이므로 가공속도, 치수 정밀도 등에 대한 추가적인 연구가 요구된다. 그리

고 기어를 시험 제작하는 경우 큰 문제가 되지는 않았으나 두께가 두꺼운 형상의 적층시에는 절삭가공에서 발생하는 칩의 효율적 분산 또는 공구에의 정착 방지 등을 고려해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구를 지원해 주신 경상대학교 METEC 사업단과 BK21 사업단 관계자 여러분께 감사를 드립니다. 또한 연구를 보조해준 정우벽, 추원식, 성미정에게 사의를 표합니다.

참고문헌

1. Wohlers, T. T., Wohlers Report 2001, Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry, Wohlers Associates Inc., 2001.
2. 이관행, "RP 기술의 최신동향 - RP&M 2002 학회 참관기," 한국CAD/CAM학회지, 제8권, 제2호, pp. 41-46, 2002.
3. McMains, S., "Rapid Prototyping of Solid Three-Dimensional Parts," Master Thesis, Berkely, USA, January 1996.
4. 송용익, "금속시제품의 신속제작을 위한 공정기술개발," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 605-609, 1996.
5. 지해성, 서정훈, "레이저를 이용한 직접금속조형(DMD)기술," 한국CAD/CAM학회 학술발표회논문집, pp. 137-141, 2002.
6. 최두선, 이수홍, 신보성, 윤경구, 황경현, 박진용, "레

이지 용접공정과 밀링공정에 의한 폐속 시제품," 한국정밀공학회지, 제18권, 제1호, pp. 104-110, 2001.

7. KIRA Corporation, "KIRA PLT-A4," Rapid Prototyping Report, pp. 2, 1998.
8. Huang, Q. and Wang, Y., "Research on Cutting Meshes in LOM," *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, University of Texas, Austin, August, 1997.
9. 조인행, "관계적층방식의 폐속조형기를 위한 후처리 최소화 공정 및 CAD 시스템의 개발," 석사 학위논문, 서울대학교, 1999.
10. 이관행, 박정옥, "정전기 방식은 이용한 박판 적층형 폐속조형기술에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 767-770, 2000.
11. 최태림, 송용익, 박세형, 강신일, "인터넷 기반의 폐속조형장비 개발," 한국정밀공학회지, 제18권, 제10호, pp. 11-18, 2001.
12. 허성훈, 황재철, 이건우, 김종원, 한동철, 주종남, 박종우, "직층과 절삭을 복합적으로 수행하는 새로운 개념의 관계적층식 폐속 조각 시스템의 개발(1)," 대한기계학회논문집A권, 제24권, 제8호, 2002.
13. 이상호, 안동규, 최홍석, 양동열, 부영복, 채희창, "단속형 가변 적층 폐속조형공장을 위한 단위형상층 생성," 한국CAD/CAM학회 학술발표회논문집, pp. 131-136, 2002.
14. FDM System Document, Stratasys, Inc. Minneapolis, Minnesota, USA. 1998.
15. Lee, K., Ahn, S. H., Dornfeld, D. and Wright, P. K., "The Effect of Run-out on Design for Manufacturing in Micro-machining Process," *Proceedings of the ASME IMECE*, New York, New York, USA, November 11-16, 2001.



배 광 모

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
관심분야: 창의적 공학설계, 솔리드 모델링



이 병 철

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
2002년~현재 주식회사 지니텍
관심분야: 솔리드 모델링, NC가공, CAD/CAM



이 상 욱

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
2003년~현재 경상대학교 TIC <수송기계 부품기술혁신센터>
관심분야: NC가공, 플라즈마 코팅
Rapid Prototyping



강 경 수

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
2002년~현재 주식회사 SONY KOREA
관심분야: CAD/CAM, Rapid Prototyping



김 형 욱

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
2003년 부산대학교 기계설계학과 석사
과정
관심분야: 메카트로닉스, CAD/CAM



박 성 민

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
관심분야: 솔리드 모델링, 프로그래밍



홍 영 정

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
2002년~현재 주식회사 삼송
관심분야: 메카트로닉스, CAD/CAM



박 성 환

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
관심분야: CAD/CAM, 솔리드 모델링



진 영 성

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
2002년~현재 주식회사 위아
관심분야: Rapid Prototyping, NC 가공



백 창 일

2002년 경상대학교 기계항공공학부 학사
2002년~현재 경상대학교 기계항공공학부
석사과정
관심분야: 미세 가공, 사출 성형



김 종 철

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
2002년~현재 주식회사 위아
관심분야: CAD/CAM, 미세 가공



안 성 훈

1992년 University of Michigan, Ann Arbor 학사
1994년 Stanford University 석사
1997년 Stanford University 박사
1997~2000년 University of California, Berkeley 연구원/장사
2000년~현재 경상대학교 기계항공공학부 조교수
관심분야: 인터벤티진 설계 및 생산, Rapid Prototyping, 마이크로 미시닝, 복합 재료, 사출 성형.



박 정 화

2003년 경상대학교 기계항공공학부 학사
관심분야: CAD/CAM, 솔리드 모델링