

절삭가공과 저융점금속에 의한 쾌속제작용 자동충진공정 개발

신보성*, 양동열**, 최두선***, 김기돈****, 이응숙***, 제태진***, 황경현***

Development of Automatic Filling Process using Low-Melting Point Metal for Rapid Manufacturing with Machining Process

B. S. Shin*, D. Y. Yang**, D. S. Choi***, K. D. Kim****, E. S. Lee***, T. J. Je***, K. H. Whang***

ABSTRACT

Recently, the life cycle and the lead-time of a product are to be shortened in order to satisfy consumer's demand. It is thus important to reduce the time and cost in manufacturing trial products. Several techniques have been developed and successfully commercialized in the market of RPM(Rapid Prototyping and Manufacturing). However, most commercial systems currently use resins or waxes as the raw materials. So, the limited mechanical strength for functional testing is regarded as an obstacle towards broader application of rapid prototyping techniques. To overcome these problems, high-speed machining technology is being investigated worldwide for rapid manufacturing and even for direct rapid tooling application.

In this paper, some fundamental experiments and analyses are carried out to obtain the filling time, materials, method, and process parameters for HisRP(High-Speed RP) process. HisRP is a new RP process that is combined high-speed machining with automatic filling. In filling process, Bi58-Sn alloy is chosen as filling material because of the properties of low-melting point, low coefficient of thermal expansion and no harm to environment. Also the use of filling wire is of advantage since it needs simple and flexible mechanism. Then the rapid product, for example a skull, is manufactured for aluminum material by HisRP process with an automatic set-up device for 4-faces machining.

Key Words : High-Speed Machining (고속 가공), Rapid Prototyping Manufacturing (RPM, 쾌속 시삭 및 제작), Automatic Filling Process(자동 충진 공정), Bi52-Sn (비납), Low-Melting Point Metal(저융점 금속), Set-up Equipment(셋업 장치)

1. 서론

금속 쾌속 제작 기술을 구현하기 위한 여러 가지 공정 중에 전통적인 절삭가공에 의한 주축회

전 및 이동속도의 고속화 기술이 활발히 진행되고 있다.^{1),2),5),7)} 이는 다양화되는 소비자의 요구에 대응하기 위해 공업 제품의 개발 사이클이 빨라지고 제품 개발의 기간 단축에 대한 요구에 신속히

2001년 10월 8일 접수
* 한국기계연구원, 한국과학기술원 대학원
** 한국과학기술원 기계공학과
*** 한국기계연구원 자동화연구부
**** 한국과학기술원 대학원

대응하고 최종 제품의 품질을 고급화하고 정밀도를 높일 수 있다.^{3,4)} 특히, 고속 절삭가공에 의한 시제품 패속제작공정에 있어서 가공에 의한 실제 제작 시간은 제품 셋업(setup) 시간의 약 10%에 불과하기 때문에 공작물의 고정구 자동화 내지는 획기적인 단축방법이 절실히 요구된다.^{6,8)} 이러한 절삭 가공에 대한 셋업 공정의 일반적인 연구는 Fig. 1 과 같이 크게 3 가지로 분류된다. 첫째, 테이블 자체의 보조 돌기를 사용하는 방법이 있다. 이는 돌기 자체가 불안하고 댐핑(damping)이 없으며 구조가 복잡해지는 단점이 있다. 둘째, 셋업 유동체를 이용하는 방법으로서 유동체의 간격으로 인한 움직임이 생길 수 있고 반드시 외력을 부가해야 하는 단점이 있다. 그리고 세번째의 방법으로 상변화(Phase change)을 이용한 가공물 셋업 방식이 있다.^{9,10)} 이는 본 연구팀과 MIT의 연구원들에 의하여 개발된 작업물 고정(workholding)의 일반적인 공정으로 저융점의 충전물질을 녹여서 가공물(workpiece)을 감싸서 고정하는 방법이다. 가공작업을 하는 동안은 충전물이 고형화(solidification)되어 가공저항에 충분히 견딜 수 있도록 하여 일반적인 고정구나 지주 없이 가공물을 고정시킬 수 있는 좋은 대안으로 각광 받고있다. 그러나 이 작업은 금속 사출공정과 비슷하여 절삭공정과 별도로 전용 사출 장치가 반드시 필요하게 된다. 그리고 사출 장치 또한 주어진 공작물 크기에 따라 결정되기 때문에 여러 가지 공작물 크기에 따라 유연성(flexibility)이 없고 충전 공정 후 고형화에 필요한 시간이 예측이 불가능한 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위하여 보다 일반적인 자동 충전 공정 설계 공정의 기준을 제시하고, 이를 이용한 다면가공(multi-face machining)의 한 예로서 알루미늄 재료를 이용한 두개골(skull)을 4면 가공한 예를 보이고자 한다.

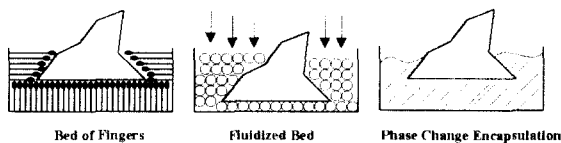


Fig. 1 Universal fixturing techniques

2. 자동 충전 공정

2.1 충전재(filling material)

먼저 적합한 충전재를 선택하기 위한 기준은 다음과 같다. 첫째, 환경에 친화적(environment friendly)이어야한다. 둘째 열변형부가 적어야 하며 액상과 고상 변화시 온도차가 낮아야 한다. 셋째 재료형상이 자동화 및 유연성이 확보에 적합하여야 한다 따라서 충전재는 저융점금속(low melting point metal)을 선택하였으며 Table 1 에서와 같이 가격, 용융온도, 열 팽창계수(CTE) 및 환경친화성 등을 고려하여 비납(lead-free alloys) 중의 Bi58-Sn 합금을 선정하였다. Bi58-Sn 소재는 환경문제를 안고있는 PCB 기판 마운팅에 사용되던 일반적인 땀납(soldering)을 대체하는 소재로 최근 각광 받고 있는 재료이다.¹¹⁾

Table 1 Comparison of filling materials

	Metal Cost/Eg (US \$)	Melting Range (°C)	Tensile Strength(MPa)	Elongation (%)	Wetting Angle (°)	CTE (×10 ⁻⁶ /°C)
Sn-37Pb	5.87	183	19 (21°C)	-	-	21
Bi-42Sn	7.79	130	41	20 (21°C)	43 ±8 (195°C)	15
Sn-20In-2.8Ag	51.63	179-180	46.9	47	44 ±8 (210°C)	20
Sn-0Zn	7.99	199	64.3	*45	*37 ±7 (215°C)	-
Sn-5Bi	8.36	232-240	31 (21°C)	25 (21°C)	37 (-)	-

2.2 충전 공정

Table 2 에서는 보는 바와 같이 본 논문에서 실험중인 자동충진 방법과 충전 공정별 장단점 비교

Table 2 Comparison of filling methods

	Pouring	Single Nozzle	Multiple Nozzles
Apparatus	Simple	Middle	Complex
Cooling Time	Short	Long	Middle
Filling Structure	Coarse	Middle	Dense
Automation	Flexible	Flexible	Fixed
Ambient Condition	Natural Convection	Air-Blow	Conduction, Natural Convection

결과, 양산이 아닌 시제품 생산개념에서는 앞 절에서 언급한 바와 같이 자동화와 유연성이 확보된 선택적으로 충전 가능한 하나의 노즐형태(single

nozzle type)가 적합하다는 것을 알 수 있다.

2.3 선택적 자동 충전 공정

Fig. 2 에서와 같이 충전 노즐은 와이어(wire) 형태의 충전재를 자동 공급함으로써 연속적으로 절삭가공된 캐비티들(cavities)을 선택적으로 충전 가능하다. 이때 수동식 일괄 충전(pouring type)형태와 달리 절삭가공된 공간의 부피를 계산하고 필요한 양만을 자동 공급 충전한다. 노즐에는 열공급부와 온도제어장치가 내장되어있다.

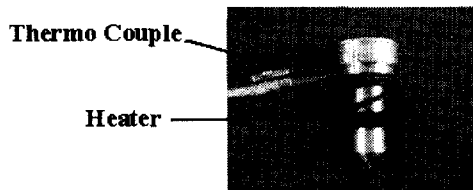


Fig. 2 Automatic filling nozzle

2.4 공정 해석 및 설계

충진공정 최적화를 위해 Fig. 3 과 같이 팬(Fan)의 가공을 위해서 필요한 캐비티의 충전 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 주조 공정 해석 코드인 필란드의 CasTech 사의 CastCAE 3.6 을 사용하였다. 본 해석 공정에서는 비압축성의 3 차원 열 유동 방정식이 사용되었으며 기본 식은 다음과 같다.

연속(continuity)방정식:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \text{ in } \Omega \quad (2-1)$$

Navier-Stokes 방정식:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \sigma_{ji}(u) + \rho f_i \text{ in } \Omega \quad (2-2)$$

여기서, $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu d_{ij}$,

$$d_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad i = 1,2,3, \quad j = 1,2,3$$

그리고 $t, u_i, p, \rho, \mu, f_i$ 는 각각 시간(time), x_i

방향속도(velocity)성분, 압력(pressure), 밀도(density), 점도(viscosity), 내력(internal force)이며 σ_{ij} 는 응력(stress), δ_{ij} 는 변형율 텐서(strain tensor)이다.

에너지(energy) 방정식은 다음과 같고

$$\rho c_p (\dot{T} + u_i T_{,i}) = (kT_{,i})_{,i} + Q \text{ in } \Omega \quad (2-3)$$

여기서 c_p, k, Q 는 각각 비열(heat capacity), 열전도도(thermal conductivity), 열원(heat source)이다.

본 공정의 해석을 위해 사용된 CastCAE 는 유한차분법(FDM)에 기초하여 위의 방정식을 이용해 해석을 수행하게된다.

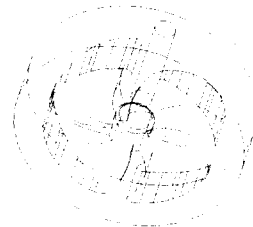


Fig. 3 Cavity shape in single nozzle type

해석에 사용된 재료상수는 Table 3 과 같으며 온도에 따라 변하는 상수를 고려하여 해석을 수행하였다. 주입 온도와 용융점, 그리고 상온에서의 열적 특성을 선형으로 가정하여 재료 상수를 온도에 따른 특성 그래프를 해석에 사용하였다.

Table 3 Thermo-physical properties of material

Temp. Properties	Room Temp. (27°C)	Liquidus Temp. (138°C)	Pouring Temp. (180°C)
Thermal Conductivity (W/m-K)	19	19	17
Density (kg/m ³)	8560	8560	8560
Specific Heat (J/kg-K)	170	180	200
Heat of Fusion (J/Kg)	-	0.55	0.35
Dynamic Viscosity (N-s/m ²)	2000	0.76	0.7

해석에 사용된 몰드(mold)의 재료는 알루미늄

합금이며, 위의 해석 조건들 외에 주변 공기의 온도와 몰드의 온도를 노즐의 크기에 따라 다르게 설정하여 가능한 최소의 노즐 직경과 그에 따른 공정 변수들을 결과로 얻었다. Fig. 4 는 CastCAE 를 이용하여 해석한 노즐 직경 10mm 에 대한 충전 경향, 온도 분포 그리고 충진율 50%에서의 속도 분포를 나타내고 있다.

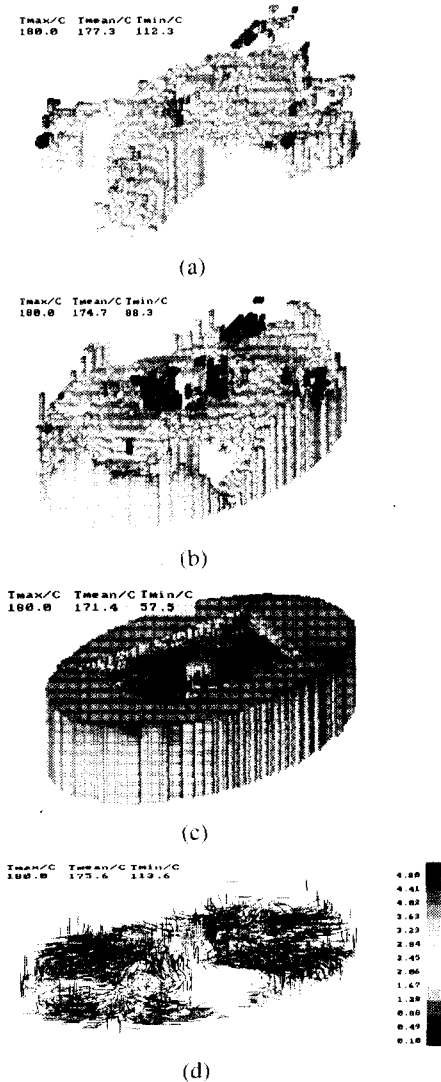


Fig. 4 Filling patterns and temperature fields in single nozzle ϕ 10 mm : (a) filling ratio 30%, (b) filling ratio 60%, (c) filling ratio 90%, (d) velocity fields in filling ratio 50%

일반적으로 많은 열량을 부가하여 용융된 충전재를 주입하는 방법도 있으나, 자동화의 관점에서 충전재가 와이어 형태로 공급되기 위해 제한되는 최대 직경이 있으므로 해석을 통하여 공급재료의 직경을 결정한다.

공정 변수로는 용융 금속의 주입 속도와 몰드의 초기 설정온도 및 공정의 분위기 온도 등이며, 해석 결과로는 노즐의 직경에 따라 충전의 패턴과 완전 충진이 가능한 조건 등이다.

용융 금속의 속도는 노즐의 열용량과 관련이 있는데, 빠른 주입 속도는 완전 충진을 보장하나 노즐의 열용량이 증가하여야 되므로 전체 시스템이 커지게 되는 단점이 있어, 완전 충진이 가능한 저속이 결과로 중요하다고 할 수 있다.

분위기 온도 및 몰드의 초기 설정 온도 역시 높으면 높을수록 완전 충진을 보장하나, 너무 높은 온도의 조건에서 공정이 이뤄지면 용융 금속의 응고가 늦어져서 전체 공정 시간이 증가하게 된다.

이와 같은 공정 해석을 통하여 Table 4 에서와 같이 노즐의 직경을 18.0 mm 에서 2.0 mm 까지 변화시키면서 해석을 수행하여 완전 충전의 조건과 그에 따른 응고 시간 등을 계산하였다.

이들 결과로 부터 노즐의 직경이 작아질수록 충전시간과 고형화 시간이 길어지고, 이에 따라 공작물의 가공 캐비티와 주변 분위기 온도가 적절히 높아야 충전시 응고가 일어나지 않게 됨을 알 수 있다.

이는 초기의 몰드(mould), 즉 캐비티의 온도가 너무 낮기 때문에 순간적으로 급격히 충전재가 굳어버리고 이로 인해 충전이 어렵게 된다.

따라서 노즐 출구에서의 충전 속도는 충전재의 공급 속도와 단면적 수축율에 따라 결정되며 이러한 노즐 출구 속도는 결국 유동성을 부여하게 된다.

실제적으로 Bi58-Sn 재료는 모재의 종류와 상태, 용가재, 산소 분압등과 같은 원인들에 의해 응고되는 현상이 달라진다.

따라서 본 연구에서 실험한 충전 노즐 직경은 직경이 10.0 mm 와 2.0 mm 이며 특히 직경이 2.0 mm 의 경우 완전 충진을 위해서는 충전 주변의 분위기 온도와 캐비티의 온도를 Table 4 에서와 같이 설정하였으며 이로 인해서 완전 응고에 이르는 시간이 가장 많이 소요됨을 알 수 있었다.

Table 4 Analysis results for conditions and filling time

Parameters	Nozzle Diameter				
	φ 18.0 (mm)	φ 10.0 (mm)	φ 7.5 (mm)	φ 5.0 (mm)	φ 2.0 (mm)
Complete Filling	Success	Success	Success	Fail	Success
Filling Time (second)	1.12	1.45	6.46	14.54	91.62
Inlet Velocity at nozzle (m/sec)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Solidification time (second)	20.56	17.34	14.22	-	513
Boundary Temp. (mould)	30°C	30°C	30°C	30°C	140°C
Boundary Temp. (the ambient air)	30°C	30°C	30°C	30°C	100°C

2.5 기초 실험 및 결과

본 실험의 목적은 자동 충전공정에서 가장 알맞은 공정 설계 변수를 설정하는 것이다. 먼저 공급재료의 와이어 형태의 제작 가능성 및 결함발생 그리고 Table 1 에서 보는 바와 같이 상온에서의 연신율에 의해 최소 굽힘 반경을 갖는 와이어 스펙 직경이 결정되었다. Fig. 5 는 충전 와이어 제작 시 나타나는 편석현상을 보여준다. 가열온도에 따른 용융급속의 공급량 관계가 Fig. 6 과 같다. 즉 용융온도가 138 °C 이지만 실제 공급되는 와이어의 양에 따라 요구되는 온도가 상승함을 알 수 있다.



Fig. 5 Segregation of filling wire

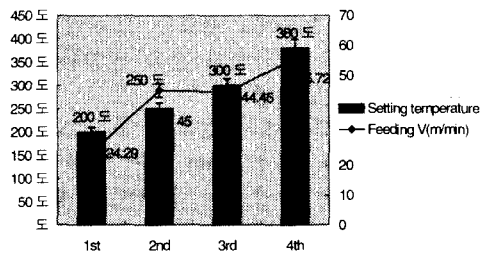


Fig. 6 Feeding speed with setting temperature

즉 와이어 공급 속도가 24.29 m/min 에서 55.72 m/min 으로 증가 할수록 소요되는 열량이 많아지게되고 따라서 설정온도도 200 °C 에서 380 °C 로 높아지게된다. 주변의 열 손실(heat loss)를 고려하여 노즐 장치의 히터는 400 Watt 급으로 제작 사용하였다.

3. 장치 및 시작품 제작

3.1 실험 장치

Fig. 7 에는 본 논문을 위해 설계 제작 중인 고속 가공기를 보여준다. 실제로 절삭가공에 비해 셋업시간이 통산 10%에 해당되는 가공시간이 고속 스피들(spindle)에 의한 고속 이동속도(feed rate)로 거의 5%이내로 줄일 수 있다. Table 5 는 고속 가공기의 사양을 보여주고있다.

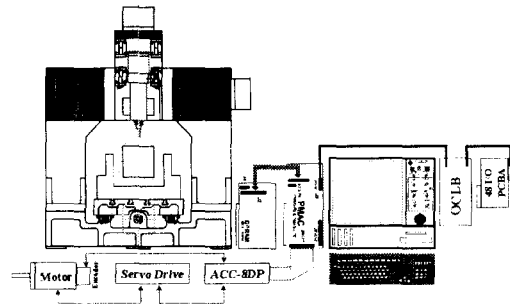


Fig. 7 High-speed machine

Table 5 Specification of HSM

Max spindle speed	60,000 rpm
Max. feed rate	15.0 m/min
Tool holder	WK 16-6 incl. locknut
Envelope size	180 × 120 × 120

3.2 자동 셋업 장치

Fig. 8 에는 가공 중의 회전으로 인한 공작물의 정밀도를 유지하고 가공 중의 셋업 변경으로 인한 셋업 시간을 단축하기 위하여 4 면 가공을 지원하기 위한 장착식 4 면 가공 셋업 장치를 보여준다.

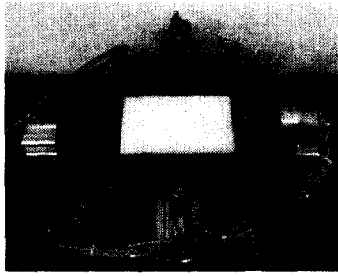


Fig. 8 Automatic set-up device for 4-face machining

3.3 가공 조건

가공급형의 가공경로를 황/중삭, 정삭의 순서로 NC 프로그램하였다. Fig. 9 과 10 에서는 가공 모델과 가공경로들을 각각 보여준다. $\phi 10$ 평 엔드밀을 이용하여 두개골 형상을 황/중삭가공을 한 후 $\phi 8$ 볼 엔드밀로 이용하여 정삭 가공하였다.

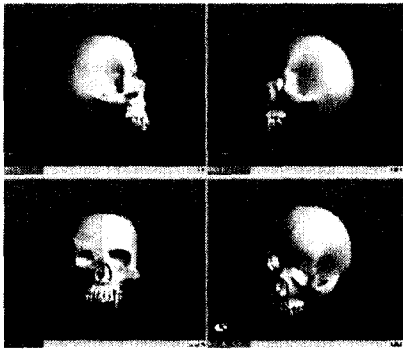


Fig. 9 Skull model

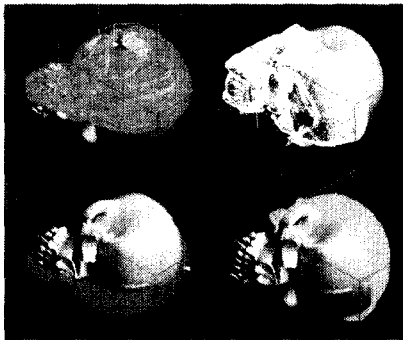


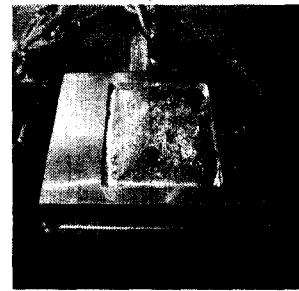
Fig. 10 Tool paths

3.4 시작품 제작

알루미늄 재료를 이용한 패속제품을 제작하는 예로서 두개골(skull)을 제작하였다. Fig.11 과 12 에서와 같이 셋업을 최소화하는 공정 절차를 선정 한 후 제 1 면을 황/중삭 및 정삭 가공하고 그 공간을 충전한 후 회전하는 절차를 4 번 반복하고 최종제품이 완성되면 저융점 충전재를 녹여냄으로써 최종 제품을 분리 완성하였다.



(a)



(b)

Fig. 11 Finished shape (a) after the-1'st-face machining and (b) after filling



Fig. 12 Final aluminum skull after the-4'th-face machining

이때 총 가공시간은 985 분 정도 소요되었으며 이

에 대해 순수 셋업에 필요한 충전과 냉각 시간은 약 30 분 정도가 필요하였다

4. 결론

본 논문에서는 고속가공을 이용한 금속 시제품의 패속제작에 관한 충전공정의 기초 실험에 대한 연구로서 적절한 충전재의 선정기준 및 충전장치치의 최적설계를 위한 상용코드에 의한 해석을 수행하였다. 그리고 임의의 3 차원 형상을 갖는 두께골에 대한 4 면 가공을 수행하여 본 가공법의 유용성을 보여주었다. 또한 자동충진 장치를 설계하고 제작하였으며 이를 이용한 기초 실험을 통해 다음의 결론을 얻었다.

첫째, 충전재는 열 변형부가 적은 저융점 재료인 Bi58-Sn 재료로 선정하였고 자동공급을 위해 이를 5.0mm 경의 와이어 형태로 제작하였다.

둘째, 충전 공정을 시뮬레이션한 결과 하나의 노즐에 의한 충전 방식이 고형화 시간이 길어지나 분위기와 몰드 온도의 조절에 의해 충전이 가능하였고 이때 최적 노즐직경은 2.0mm 이었다.

셋째, 충전재인 와이어 최대 공급속도는 400 Watt 급 히터의 경우 24.29 m/min 에서 55.72 m/min 으로 상승하고 이때 설정온도도 200 °C 에서 380 °C 로 올라간다.

향후 본 연구의 결과를 바탕으로 현재 제작중인 탁상용 고속가공기에 자동 충전 장치를 추가하고 다양한 응용 기술 개발 및 보다 저가형 고속가공기를 제작할 예정이다.

참고문헌

1. 신보성, 양동열, 최두선, 이용숙, 황경현, "자동 충전 공정을 이용한 패속 제작 공정 개발," 한국정밀공학회지, 제 18 권 7 호, pp. 174-178, 2001.
2. 신보성, 양동열, 최두선, 제태진, 이용숙, 황경현, 이종현 "고속가공을 이용한 시작금형 및 시작품의 패속제작," 한국정밀공학회지, 제 18 권 12 호, pp. 124-129, 2001.
3. 이상호, 정준호, 안동규, 양동열, 신보성, "EVA를 이용한 가변 용착 패속 조형 공정의 개발," 한국정밀공학회지, 17 권 9 호 pp. 189 ~ pp. 195, 2000.

4. 안동규, 이상호, 양동열, 신보성, 이용일, "가변 적층 패속 금형 조형 공정 개발을 위한 발포 폴리스티렌 폼의 선형 열선 절단시스템 절단 특성," 한국정밀공학회지, 17 권 12 호 pp. 185 ~ pp. 194, 2000.
5. 임유엽, 김정석, 강명창, 이득우, 정용호, "고속가공을 통한 커넥팅 로드용 금형 가공," 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 926 ~ 929, 2000.
6. 절삭과 충전공정을 이용한 3 차원 제품의 패속 제조방법 및 제조장치, 특허 출원번호 10-2000-0062849, 2000.
7. T.Nakagawa, "High-Speed Milling for Die and Mold Making," Proc. of AFDM'99, pp. 11 ~ 18, 1999.
8. Waldish, M. "On the Edge of the Snake Pit-FMS's Are a Boon If Used with Careful Planning but Few Have Achieved This," Engineer, Vol. 25, Oct., pp. 32-33, 1982.
9. B.S. Shin, D.S. Choi, D.Y. Yang, S.H. Lee, K.K. Yoon, K.H. Whang, S.E. Sarma, E. Lee, "Rapid Prototyping System Using Universal Automated Fixturing Technology," 8th European Conference on RP, May 2000.
10. M.V. Gandhi, B.S. Thompson, and D.J. Mass, "Adaptable Fixture Design: An Analytical and Experimental Study of Fluidized Bed Fixturing," ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design, Vol. 108, pp. 155-121, 1986.
11. Mulugeta Abteu, Guna Sevaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics," Materials Science and Engineering, Vol. 27, pp. 95~141, 2000.