

## 고속가공에 의한 쾌속제작용 자동충진 공정개발

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

### Development of Automatic Filling Process for Rapid Manufacturing by High-speed Machining Process

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

#### ABSTRACT

Recently, in order to satisfy the consumer's demand the life cycle and the lead-time of a product is to be shortened. 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 this 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 process. HisRP is a combination process using high-speed machining technology with automatic filling. In filling process, Bi58-Sn alloy is chosen because of the properties of low-melting point, low coefficient of thermal expansion and environmental friendship. Also the use of filling wire is of advantage in term of simple and flexible mechanism. Then the rapid manufacturing product, for example a skull, is machined for aluminum material by HisRP process with an automatic set-up device of 4-faces machining.

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

#### 1. 서론

금속 쾌속 제작 기술을 구현하기 위한 여러가지 공정 중에 전통적인 절삭가공에 의한 주축회전 및 이동속도의 고속화 기술이 활발히 진행되고 있

다.<sup>1)2)</sup> 이는 다양화되는 소비자의 요구에 대응하기 위해 공업 제품의 개발 사이클이 빨라지고 제품 개발의 기간 단축에 대한 요구에 신속히 대응하고 최종 제품의 품질을 고급화하고 정밀도를 높일 수 있다.<sup>3)</sup> 특히, 고속 절삭가공에 의한 시제품 쾌속

\* 한국기계연구원, 한국과학기술원 대학원  
\*\* 한국과학기술원 기계공학과  
\*\*\* 한국기계연구원 자동화연구부  
\*\*\*\* 한국과학기술원 대학원

제작공정에 있어서 가공에 의한 실제 제작 시간은 제품 셋업 시간의 약 10%에 불과하기 때문에 공작물의 고정구의 자동화 내지는 획기적인 단축방법이 절실히 요구된다.<sup>4)</sup> 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, 셋업유동체를 이용하는 방법으로서 유동체의 간격으로 인한 움직임이 생길 수 있고 반드시 외력을 부가해야하는 단점이 있다. 그리고 세번째의 방법으로 상변화(Phase change)을 이용한 가공을 셋업 방식이 있다.<sup>5)</sup> 이는 본 연구팀과 버클리 의 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 치구 없이 가공물을 고정시킬 수 있는 좋은 대안으로 각광받고 있다. 그러나 이 작업은 금속 사출공정과 비슷하여 절삭공정과 별도로 전용 사출 장치가 반드시 필요하게 된다. 그리고 사출 장치 또한 주어진 공작물 크기에 따라 결정되기 때문에 여러가지 공작물 크기에 따라 유연성(flexibility)이 없고 충전공정후 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 4 면 가공한 예를 보이고자 한다.

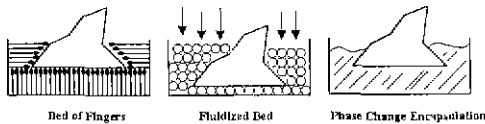


Fig. 1 Universal fixturing techniques

## 2. 자동 충전 공정

### 2.1 충전재(filling material)

먼저 적합한 충전재를 선택하기 위한 기준은 다음과 같다. 첫째, 환경에 친화적(enviroment friendly)이어야한다. 둘째 열변형부가 적어야하며

액상과 고상 변화시 온도차가 낮아야한다. 셋째 재료형상이 자동화및 유연성이 확보되어야한다. 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. 이는 PCB 기판을 마운팅하는 일반적인 뱀납(soldering)을 대체하는 소재로 최근 각광 받고 있는 재료이다.<sup>6)</sup>

Table 1 Comparison of filling materials

	Metal Cost/Kg (\$)	Melting Temp.(°C)	Denside Structure(g/cc)	Evaporation (%)	Wetting Angle(°)	CTE (x10 <sup>-6</sup> /K)
Sn37Bi	587	183	19 (27°C)	-	-	21
Bi-25Sn	779	139	4	31 (21°C)	42.18 (25°C)	15
Sn20In22Ag	51.65	179-189	46.9	47	44.38 (20°C)	21
Sn62In	799	189	64.8	45	47.14 (215°C)	-
Sn58	836	232-240	11 (27°C)	25 (27°C)	37 (-)	-

### 2.2 충전 공정

Table 2 에서는 보는 바와 같이 본 논문에서 실험증인 자동충진 방법과 충전공정별 장단점 비교 결과, 양산이 아닌 시작품 생산개념에서는 앞 절에서 언급한 바와 같이 자동화와 유연성이 확보된 선택적으로 충전 가능한 하나의 노즐형태(single nozzle type)가 적합하다는 것을 알 수 있다.

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

### 2.3 선택적 자동 충전 공정

Fig. 2 에서와 같이 충전노즐은 와이어(wire) 형태의 충전재를 자동공급함으로써 연속적으로 절삭가공된 공간들(cavities)을 선택적으로 충전가능하다. 이때 수동식 일팔 충전(pouring type)형태와 달리 절삭가공된 공간의 부피를 계산하고 필요한 양만을 자동 공급 충전한다. 노즐에는 열공급부와

온도제어장치가 내장되어있다.

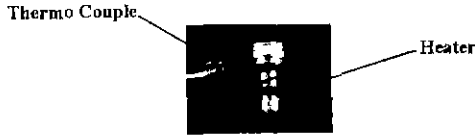


Fig. 2 Automatic filling nozzle

### 2.3 공정 해석 및 설계

충진공정 최적화를 위해 Fig. 3 과 같이 해석 모델을 선택 모델링하고 상용코드 CastCAE(ver.3.6)를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석결과는 Table 3 과 같이 노즐의 직경이 작아질수록 충진시간과 고형화 시간이 길어지고 이에 따른 주변 분위기 온도가 적절히 높아야 응고가 일어나지 않게 됨을 알수 있다. 이는 초기의 몰드(mould)의 온도가 너무 낮기 때문에 순간적으로 급격히 충진재가 굳어버리고 이로 인해 충진이 어렵게된다. 따라서 노즐 출구에서의 충진 속도는 충진재의 공급 속도와 단면적 수축율에 따라 결정되며 이러한 노즐 출구 속도는 결국 유동성을 부여하게된다. 실제적으로 Bi58-Sn 재료는 모재의 종류와 상태, 용가재, 산소 분압등과 같은 원인들에 의해 응고되는 현상이 달라진다.



Fig. 3 Simulation results

Table 3 Analysis results

Parameters	Nozzle Diameter #18.0 (mm)	#10.0 (mm)	#7.5 (mm)	#5.0 (mm)
Complete Filling	Success	Success	Success	Fail
Filling Time (sec)	1.12	1.45	6.46	14.54
Inlet Velocity at nozzle (m/sec)	0.8	0.8	0.8	0.8
Solidification time (sec)	20.56	37.34	14.22	-

### 2.4 기초 실험 및 결과

본 실험의 목적은 자동 충진공정의 공정 설계 변수를 결정하기 위한 것이다. 먼저 공급재료의

와이어 형태의 제작 가능성 및 결합발생 그리고 최소 굽힘 반경을 계산하였다. 그림 4와 Table 1에서 보는 바와 같이 편석과 상온에서의 연신율에 의해 와이어 스폴 직경이 결정되었다. 가열온도에 따른 용융금속의 공급량 관계가 Fig. 5과 같다. 즉 용융온도가 138 °C 이지만 실제 공급되는 와이어의 양에 따라 요구되는 온도가 상승함을 알 수 있다.



Fig. 4 Segregation of filling wire

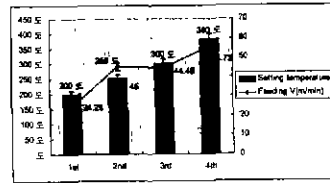


Fig. 5 Feeding speed with setting temperature

## 3. 장치 및 시작품 제작

### 3.1 고속 가공 실험 장치

Fig. 6에는 본 논문을 위해 설계 제작 중인 고속 가공기를 보여준다. Table 4에서와 같이 고속 가공기의 일반적인 사양을 보여주고있다.

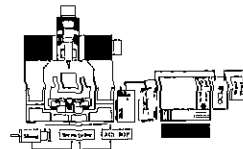


Fig. 6 High-speed Machine

Table 4 Specifaion 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. 7에는 가공 중의 회전으로 인한 공작물의 정밀도를 유지하고 가공 중의 셋업 변경으로 인한 셋업 시간을 단축하기 위하여 4면 가공을 지원하기 위한 장착식 4면 가공 셋업 장치를 보여준다..

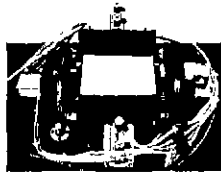


Fig. 7 Automatic Set-up Device for 4-face Machining

### 3.3 가공 조건

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



Fig 8 Working model



Fig. 9 Tool paths

### 3.4 시제품 제작

알루미늄 재료를 이용한 폐속제품을 제작하는 예로서 두개골(skull)을 제작하였다. Fig. 10 과 11 에서와 같이 셋업을 최소화하는 공정 절차를 선정 한 후 제 1 면을 황/중삭 및 정삭 가공하고 그 공간을 충전한후 회전하는 절차를 반복하여 최종제품이 완성되면 저음점 충전재를 녹여냄으로써 최종 제품이 분리완성하였다.



Fig 10 The finished shape of the-1'st-face machining and after filling process



Fig 11 The finished shape of the-4'th-face machining and final aluminium skull

이때 총 가공시간은 985 분정도 소요되었으며 이에 대해 순수 셋업에 필요한 충전과 냉각 시간은 약 30 분 정도가 필요하였다

## 4. 결론

본 논문에서는 고속가공을 이용한 금속 시제품의 폐속제작에 관한 충전공정의 기초 실험에 대한 연구로서 적절한 충전제의 선정기준 및 충전장치의 최적설계를 위한 상용코드에 의한 유한요소 해석을 수행하였다. 그리고 입의의 3 차원 형상을 갖는 두개골(skull)에 대한 4 면 가공을 수행하여 본 가공법의 유용성을 보여주었다.

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

## 참고문헌

1. 신보성, 최두선, 강재훈, 이찬홍, 이종현, "절삭가공에 의한 폐속 시제품 제작 기술", "한국 정밀 공학회 추계 학술 대회, pp. 918-921, 1999
2. 임유업, 김정석, 강명창, 이득우, 정음호, "고속가공을 통한 커빅팅 로드용 금형 가공", 한국 정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.926~929, 2000.
3. 절삭과 충전공정을 이용한 3 차원 제품의 폐속 제조방법 및 제조장치, 특허 출원번호 10-2000-0062849, 2000
4. T.Nakagawa, "High-Speed Milling for Die and Mold Making", Proc. of AFDM'99, pp.11~18, 1999
5. 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, "8<sup>th</sup> European Conference on RP, May 2000.
6. Mulugeta Abteu, Guna Sevaduray, "Lead-free Solders in Microelectronics,"Materials Science and Engineering, vol. 27, pp.95~141, 2000