

# 플라스틱과 금속재료를 이용한 3 차원 박벽 제품의 쾌속 제작

신보성#, 강보식\*, 박재현\*\*, 노치현\*\*

## Rapid Manufacturing of 3D Thin-walled Products using Plastics and Metals

Bo Sung Shin#, Bo Sik Kang\*, Jae Hyun Park\*\* and Chi Hyun Rho\*\*

### ABSTRACT

High-speed machining (HSM) with excellent quality and dimensional accuracy has been widely used to create 3D structures of metal and plastics. However, the high-speed machining process is not suitable for the rapid realization of 3D thin-walled product because it consumes considerably long time in fixturing process of a work piece. In this paper, an effective rapid manufacturing process is proposed to fabricate 3D thin-walled products directly using HSM, phase change filling and ultrasonic welding. The filling process is useful to hold the thin-walled product during the machining step. The ultrasonic welding process is introduced to make one piece product from two piece parts that are machined by HSM and filling process. The proposed rapid manufacturing (RM) process has been shown that the RM process enables to fabricate the 3D thin-walled products using ABS plastics and aluminum metals from 3D CAD data to functional parts.

**Key Words** : Rapid Manufacturing (쾌속 제작), 3D Thin-walled Products (3 차원 박벽 제품), High-speed Machining (고속 가공), Filling Process (충진 공정), Ultrasonic Welding(초음파 용착)

### 1. 서론

우리는 주위에서 인형이나 자동차 부품 등을 자주 볼 수 있다. 그리고 이러한 부품의 대부분은 3 차원 형상의 얇은 벽을 갖는 제품으로써 중앙 부분이 비어있거나 또는, 형상이 복잡하여 각각의 파트가 만들어진 다음 용착 공정으로 접합하여 최종 제품이 완성된다. 이러한 기능성 시제품들을 만드는 방법은 간이 금형을 제작하여 소량 생산하

고, 이의 기능을 시험하여 문제점을 개선함으로써 궁극적으로 대량생산이 가능하게 된다. 그러나 이러한 제작방식으로는 시제품의 기능을 시험하기엔 너무나 많은 시간과 비용이 소모되는 단점이 있다.

본 연구에서는 이러한 사출로 성형되는 3 차원 얇은 벽 제품을 고속가공공정에 초음파 용착 (ultrasonic welding)공정을 추가함으로써 기능성 최종제품을 완성하는 새로운 쾌속제작 공정을 소개 한다. 그리고 상변화 충진공정을 추가함에 따라서

접수일: 2005 년 12 월 23 일; 게재승인일: 2006 년 6 월 16 일  
# 교신저자: 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구소 (ERC/NSDM)  
E-mail bosung@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2787  
\* 한국기계연구원 유공압연구소  
\*\* ㈜소닉스코리아

제품의 형상에 의한 초음파 용착 혼(horn)을 역엔지니어링(reverse engineering) 기술과 고속가공을 이용하여 빠른 시간 내에 완성함으로써 최종제품의 납기를 획기적으로 단축할 수 있다. 널리 알려진 바와 같이 고속가공으로 알루미늄을 가공하는 경우 칩(chip) 자체의 배출에 의하여 가공시 발생하는 열의 대부분이 제거되어 실제 제품에 전달되는 열영향이 적기 때문에 혼의 재질을 알루미늄으로 선택할 경우 용착 혼의 품질이 우수해지는 장점이 있다.<sup>1-2</sup>

본 논문에서는 여러 제품 중 인형의 몸체(body)를 고속가공공정과 초음파 용착공정을 통하여 높은 정밀도를 갖는 플라스틱과 금속재료의 시제품을 신속히 제작함으로써 본 연구에서 제안한 공정의 유용성을 검증하였다.

## 2. 쾌속제작 공정 절차

### 2.1 제작공정

현재 국내의 쾌속조형시스템은 장비 가격이 고가이며 종이, 왁스, 플라스틱 등으로 한정되며, 또한 대부분 적층식 조형방법이 적용되고 있는데, 이 방법은 표면품질이 나쁘고 정밀도가 떨어지며 제품의 강도가 약하여 실제 제품의 요구조건과 다를 수 있다. 본 논문에서는 이러한 적층식 쾌속조형의 단점을 보완하고 속이 빈 형상을 제작할 수 있는 장점을 살리기 위하여 기능성 재료인 플라스틱 및 알루미늄을 사용하여 직접 고속 절삭 가공하는 방법으로 얇은 벽 제품을 여러 번의 절차를 거쳐 빠른 시간 내에 제작하고 이를 접합하는 일련의 공정을 연구하였다. 절삭가공에 응용한 본 공정의 기본개념은 속이 빈 3 차원 형상의 박벽 제품을 3 축 가공이 가능하도록 하기 위하여 하나의 모델링형상에서 어느 한 단면을 기준으로 두개이상의 박벽형상제품으로 자르고 이들은 각각 가공한 후 다시 접합하는 방법이다. 이 방법은 현재 많은 연구가 이루어지고 있는 고속 절삭가공을 적용함으로써 기능성 시제품 제작에 걸리는 공정시간을 단축하고 가공의 후 처리공정을 생략할 수 있는 장점이 있으며 또한 가공면의 품질 및 강도가 기존의 쾌속 조형 공정에 비하여 뛰어나다. Fig. 1 에서는 본 논문에서 제안한 쾌속제작공정을 보여준다.

3 차원 박벽제품을 고속가공, 충전공정 그리고 초음파 용착공정으로 완전한 기능성제품(예: 인형

몸체형상)을 3 축 가공이 가능한 2 개의 분할부품으로 나누고, 고속가공 후 초음파 용착하는 제조 공정들로 구성되어 있다. Fig. 2 의 그림은 역엔지니어링(reverse engineering)을 통한 3 차원 형상 CAD 데이터를 구축하고 고속 가공장비를 이용하여 박벽부품 및 초음파 혼을 제작하는 절차를 보여주고 있다.

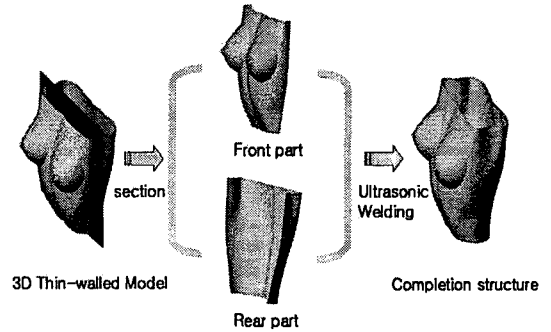


Fig. 1 Rapid manufacturing of 3D thin-walled products

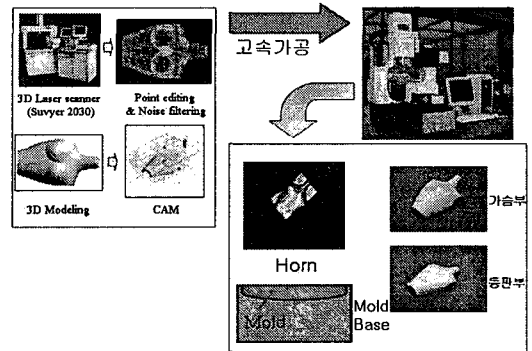


Fig. 2 Rapid manufacturing procedure of 3D thin-walled parts and horn using HSM

본 실험에 사용된 인형모델은 인체와 같이 복잡한 형상의 곡면으로 구성된 3 차원 기하학적인 박벽제품을 선정하였으며, 실험결과를 통하여 다양한 형태의 3 차원 박벽제품의 쾌속제작이 가능하다는 것을 밝히는 것이다. 먼저 제작하고자 하는 인형모델을 3D CAD 시스템의 상용 프로그램인 Solidworks 를 이용하여 입체 설계 하거나 3 차원 스캐너(scanner, 장비명: Suvyer2030)을 이용한 역설계(reverse engineering)하여 모델링 한 후 전체제품 형상을 가공이 가능하도록 두개 이상의 부분제품 형상으로 분할하여 CAM 시스템에서 후처리(Post

processing) 과정을 거쳐 NC 데이터로 변환한다. 공구경로 및 가공절차가 검증된 CAM 데이터는 소형 고속가공기(HisRP M/C)를 통하여 이미 연구되어 발표된 HisRP 공정을 이용하여 고속가공과 저용접소재의 상변화 자동충진공정을 적용하여 분할된 박벽부품을 각각 제작한다. 그리고 최종적으로 가공된 두개 이상의 제품을 분할하기 전의 전체제품형상처럼 초음파 용착장치를 이용하여 접합하여 완성한다.

### 2.2 가공장비

본 연구를 위해 개발, 자체 제작된 소형 고속가공기와 일반적 사양을 Fig. 3 과 Table 1 에 나타내었다. 이 고속 가공기는 높은 회전수와 이송속도 뿐만 아니라 한번의 셋업으로 공작물이 360°회전이 가능하여 가공물을 다면 가공할 수 있다. 가공물의 셋업 및 회전을 위한 셋업장치의 회전동작은 전기식으로 동작하고 회전축에 따라 공작물은 상면을 가공한 뒤 충진 하고 하면가공을 위해 회전하도록 설계되어 있다. 가공재질은 본 실험에서는 ABS, 알루미늄 재질을 사용하였다. 특히 고속의 이송속도와 기계자체의 진동을 방지하고 기계부의 수평을 유지하기 위하여 장비의 바닥을 주물 정반으로 제작하였으며, 특히 공장의 바닥의 방진장치 위에 직접 부착하였다.

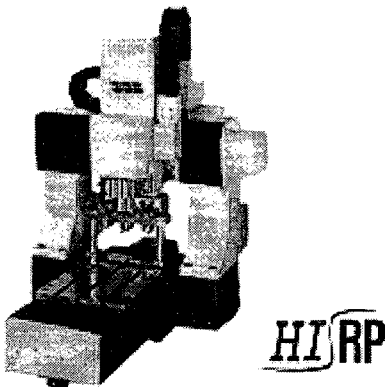


Fig. 3 Compact sized high-speed machining machine (HisRP M/C)

### 3. 적용사례

#### 3.1 플라스틱 3차원 박벽 부품의 쾌속제작

본 실험에서는 엔지니어링 플라스틱 ABS 재료를 사용하여 3차원 박벽 부품을 제작하였다. 우선 박벽 형상의 실물 인형을 최적화된 가공순서에 의하여 황/중삭 및 정삭 등을 가공하고, 가공되어진 공간(cavity)을 저용점 충진재인 왁스(wax)를 이용하여 충진 한 후 180° 각도만큼 회전하여 고속절삭 가공을 반복하여 3차원 박벽부품을 제작한다.

Table 1 Specification of HisRP System

Max. feed rate (m/min)	15.0
Max. spindle speed (rpm)	60,000
Envelope size (mm <sup>3</sup> )	180 × 120 × 120

모든 가공이 종료되면 저용점 충진재를 다시 녹여 분리하게 된다. 왁스를 사용한 상변화 충진의 공작물 고정 방법(workholding method)은 저용점의 충진물질을 녹여서 임의 형상의 가공물을 감싸서 고정하는 방법으로써, 실제로 박벽 부품의 가공 단계의 고속 가공작업 동안은 저용점 충진물은 고형화(solidification)가 되어 프라스틱 박벽 가공물을 충분히 고정시킬 수 있는 좋은 대안임을 알 수 있다. 왜냐하면 제안된 왁스(wax) 충진재는 빠른 시간에 고형화가 가능하고 가공소재와의 결합력이 강력할 뿐만 아니라 용융온도가 65 °C 로서, 가공물인 플라스틱의 용융온도인 220 °C 와 연화온도 160 °C 에 비해 열적 변형을 미치지 않기 때문이다. Fig. 3 은 고속가공으로 완성된 가슴부(upper-side part)와 등판부(lower-side part)의 부품들을 보여주고 있다.<sup>3-4</sup>

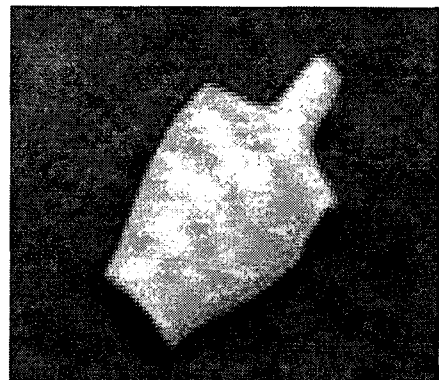


Fig. 4 (a) Finished 3D thin-walled parts (ABS, upper-side part)

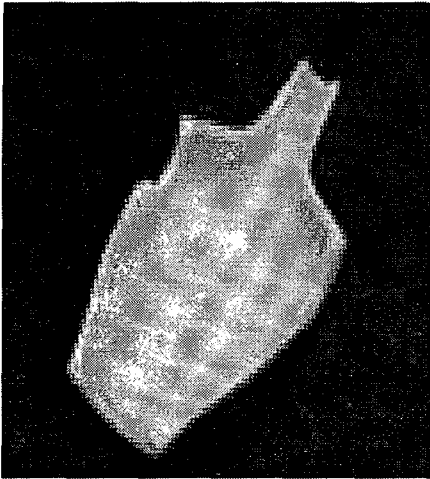


Fig. 4 (b) Finished 3D thin-walled parts (ABS, lower-side part)

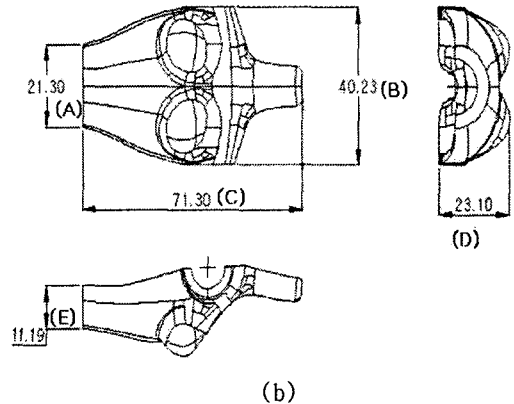


Fig. 5 (b) Dimension accuracy analysis of the measured dimension

Fig. 5 는 고속가공으로 제작된 3 차원 형상의 가슴부 부품의 대표적인 부위의 치수를 비교한 것으로서 설계된 치수와 제작된 후의 제작치수를 표시한 것이며 Table 2 는 이를 정리한 표이다. 오차 범위를 살펴보면, 최대 1.37 % 이내로 정확한 치수 내에서 제작된 것을 알 수 있다. 절대 치수를 비교해 보았을 때에도 0.56 mm 이내로 매우 정확한 가공결과임을 알 수 있으며, 충전공정에 의한 공작물 고정력이 충분하다고 판단할 수 있다.

### 3.2 플라스틱 박벽 부품의 초음파 용착

최종적으로 가공된 두개의 가슴부와 등판부의 박벽부품을 접합하는 과정이다.

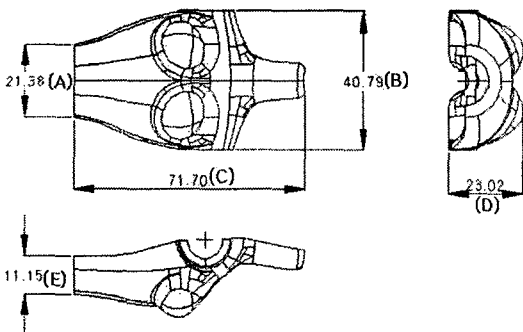


Fig. 5 (a) Dimension accuracy analysis of the designed dimension

이 과정에서 ABS 재질간에 강한 접착력을 위하여, 본 연구에서는 초음파 용착기를 이용하여 최종 제품인 인형을 완성하였다.

Table 2 Comparison of the designed dimension with the measured dimension

	Designed dimension	Measured dimension	Error (mm)	Error ratio (%)
A	21.38	21.30	0.08	0.37
B	40.79	40.23	0.56	1.37
C	71.70	71.30	0.40	0.56
D	23.02	23.10	0.08	0.34
E	11.15	11.19	0.04	0.36

초음파 용착을 위해서는 우선 다음과 같은 몇 가지 기본조건의 충족을 필요로 한다.

첫째, 제품의 접합하고자 하는 용착 면까지 초음파의 손실을 최대한 줄이는 것이다. 이는 초음파 용착방법에 있어 중요한 요소로써, 높은 에너지 손실은 초음파 발생장치 및 부스터(booster)에 부담을 주고 크랙(crack)의 발생 원인이 될 수 있다. 그렇기 때문에 용착면까지 초음파를 전달하는 초음파 혼(horn)의 형상은 가장 먼저 고려해야 할 사항으로 초음파의 전달을 용이하게 하기 위해

제품과 혼이 직접 접촉하는 면의 형상을 상부제품 형상의 음각으로 가공하여 혼의 끝단면이 용착되어지는 면과 근접하도록 한다. 이는 고압의 환경에서 이루어지는 초음파 용착과정에서 제품의 이탈과 고압으로 인한 제품의 변형을 방지효과도 가져오며 이를 위해 혼 베이스(base) 역시 용착하는 하부제품 형상의 음각으로 제작하나, 제작시간의 단축을 위해 폴리우레탄(Polyurethane) 플라스틱 수지를 이용한 충전방법을 적용하여 계속제작하였다.

둘째, 초음파 혼의 재질 선택으로 볼 수 있다. 초음파 혼의 형상과 함께 재질의 선택은 초음파 전달에 많은 영향을 끼치며 또한 접합하고자 하는 용착제품의 재질과도 밀접한 상관관계를 갖는다. 만일 접합될 제품보다 혼의 재질이 녹는점이 낮다면 접합부분보다 먼저 혼과 제품의 용착이 일어나기 때문이다.

본 실험에서는 플라스틱의 접합에 있어서는 녹는점이 낮기 때문에 초음파를 발생하는 진동자로부터 초음파의 전달효율이 높고 가공이 용이한 알루미늄(A17075)을 혼 재료로 선정하여 가공하였다.

Fig. 6 과 7 은 초음파 용착용 혼과 혼 베이스의 제작과정을 각각 보여준다. 예비실험을 통하여 얻어진 플라스틱 용착공정의 최적 조건은 가압력 4bar, 지체시간 0.3 초, 용착시간 0.1 초, 그리고 지지시간 0.33 초로 밝혀졌다.



Fig. 6 (a) Manufacturing process of Ultrasonic welding horn (Rough machining)



Fig. 6 (b) Manufacturing process of Ultrasonic welding horn (Finish machining)

최적 초음파 용착조건을 적용하여 박벽 인형 제품의 초음파 용착실험을 Fig. 8 에서와 같이 실시하였으며 이를 통하여 얻어진 최종 접합이 완성된 제품을 Fig. 9 에 나타내었다.

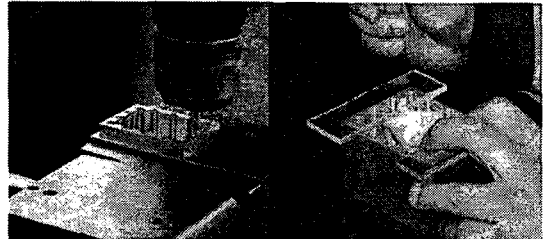


Fig. 7 (a) Manufacturing process of horn base, (set-up of horn stock, inserting of upper-side part into the machined cavity)

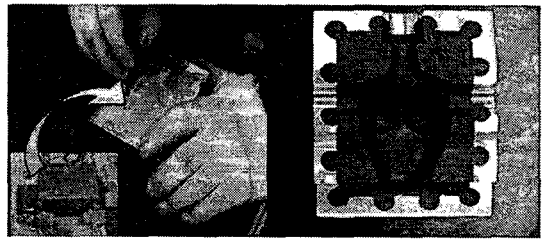


Fig. 7 (b) Manufacturing process of horn base, (removing of upper-side part after the filling of polyurethane, finished ultrasonic welding base)

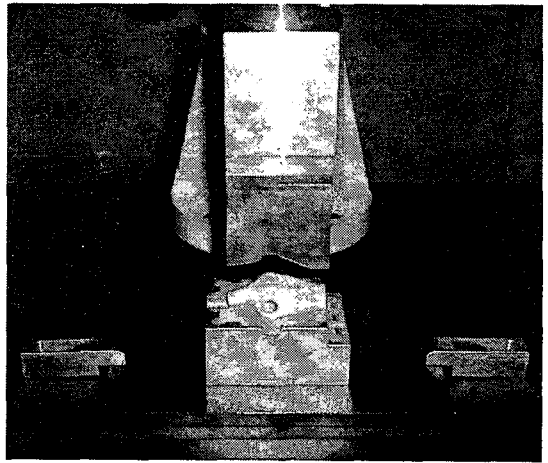


Fig. 8 Ultrasonic welding of 3D thin-walled product

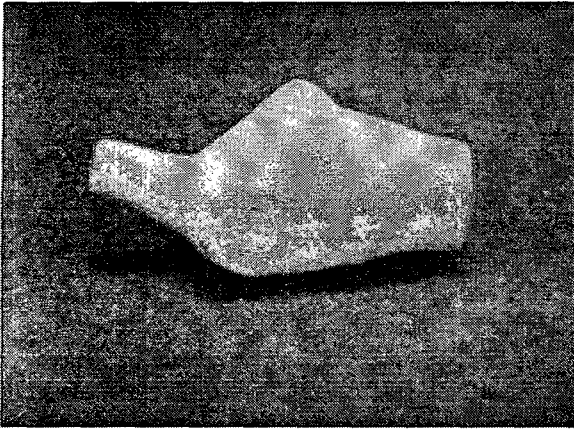


Fig. 9 Finished 3D thin-walled products after ultrasonic welding (ABS)

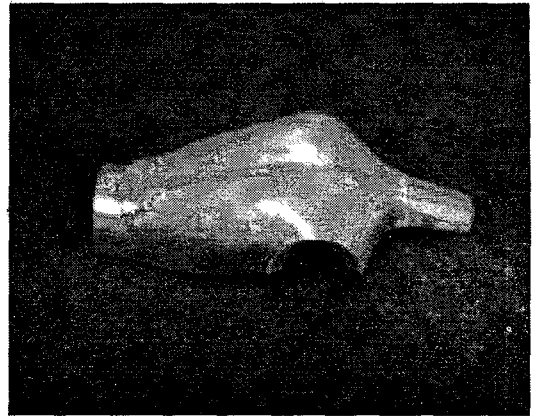


Fig. 10 (b) Finished 3D thin-walled parts (Al)  
(lower-side part)

### 3.3 금속 3 차원 박벽부품의 쾌속제작

플라스틱 이외의 금속제품에 대한 접합실험을 위하여 플라스틱 용착실험에 사용되었던 동일한 형상치수의 박벽 인형모델을 소형 고속 가공기를 통하여 시작품제작 실험을 수행하였으며, 시편의 재질은 알루미늄(Al)을 사용하였다. 가공중의 충전 공정을 포함한 가공공정은 플라스틱 시작품 제작과 동일하게 진행하였으나 충전재는 플라스틱 제품의 경우 왁스의 사용 대신, 용융점이 134℃인 저융점 금속인 BiSn 합금을 사용하였다.<sup>4,9</sup>

Fig. 10 에서는 완성된 알루미늄 박벽 인형 모델을 나타내었으며, 특정형상 부위에 따라 이를 측정 한 값이 Fig. 11 에 있다.

인형 모델의 설계치수와 가공 후의 모델치수 인 Fig. 5 의 값을 Table 3 에서 비교 분석하여 나타 내었으며, 각 부분의 가공정밀도는 가공조건에 따라 미소한 차이는 보이나 Table 2 에서 알 수 있듯이 전체 가공 정밀도에서는 플라스틱 모델과 비슷한 값을 유지하였다.

Table 3 Comparison of the designed dimension with the measured dimension

	Designed dimension	Measured dimension	Error (mm)	Error ratio (%)
A	21.38	21.60	0.22	1.03
B	40.79	40.75	0.04	0.10
C	71.70	71.80	0.10	0.14
D	23.02	23.20	0.18	0.78
E	11.14	11.10	0.04	0.36

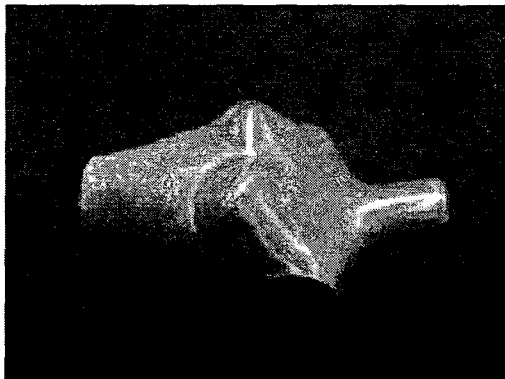


Fig. 10 (a) Finished 3D thin-walled parts (Al)  
(upper-side part)

### 3.4 금속 박벽 부품의 초음파 용착

금속 제품의 초음파 용착 연구에 있어서는 그 시도가 저조하였으나, 본 연구에서 간단한 실험 시편을 사용하여 금속 용착실험을 시도해 봄으로써 그 가능성을 입증하고자 하였다. 금속용착의 기초실험을 통하여 얻은 Cu 와 Al 의 초음파 최적 용착조건은 금속재질이 두께 1.0t 인 구리(Cu)의 경

우 지체시간 0.9 초, 용착시간 0.6 초, 그리고 지지시간 1.5 초이었으며, 두께 1.0t 인 알루미늄(Al)의 경우에 지체시간 0.9 초, 용착시간 0.8 초, 그리고 지지시간 1.5 초로 밝혀졌다.

따라서 초음파를 이용한 Al 금속 용착에서의 초음파 혼의 재질은 본 연구에서는 Al 보다 녹는점이 높고 초음파의 전달력이 우수한 티타늄(Ti)을 선정하여 제작하였고, Fig. 11 에서와 같이 용착이 혼의 길이방향의 수직면에서 이루어지게 설계 및 가공하였다. 알루미늄 금속의 기초용착 실험을 하였으며 Fig. 12 에서와 같이 반구 형태의 알루미늄 시편을 초음파 용착함으로써, 금속용착에 필요한 최적조건을 실험적으로 규명하였다.

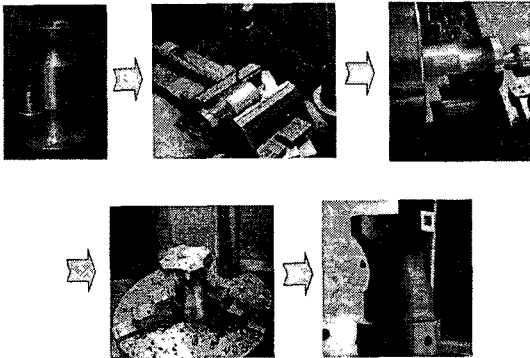


Fig. 11 Manufacturing of ultrasonic welding horn (Ti)

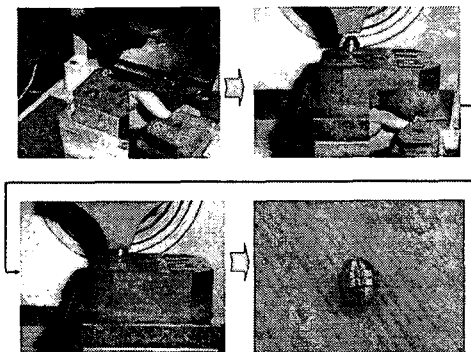


Fig. 12 Ultrasonic metal-welding test process

Fig. 13 에서는 알루미늄을 이용한 박막인형 제품을 초음파 용착을 통하여 접합한 최종제품을 보여주며, 접합된 Al 모델의 금속간 완전한 금속제품으로써의 접합강도가 충분하지 않아 기존의 금속 용착조건 이외에도 금속부품간의 용착성을 높이는

방법으로 재료의 용융 작용을 향상시키는 추가 연구와 금속 용착부의 부분적인 추가 첨가제의 사용도 고려되어야 한다고 사료된다.

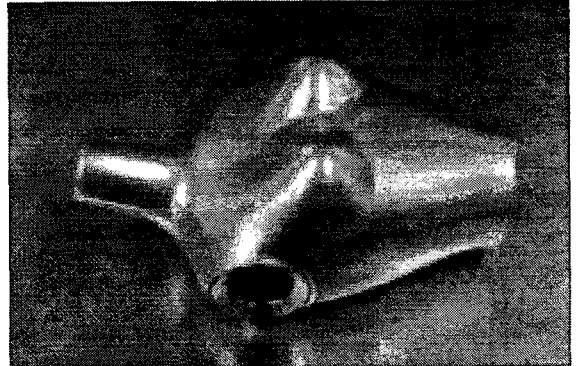


Fig. 13 Finished products after Ultrasonic welding (Al)

#### 4. 결론

본 논문에서는 완전한 의미의 3D 박막 제품을 가공하기 위한 새로운 패속 제작 공정을 제시하고, 일반적인 박막 형상제품을 ABS 플라스틱 재질과 알루미늄 금속재료를 사용하여 빠른 시간 내에 금형없이 제작하고 초음파 용착공정으로 접합하여 일체화 제작함으로써 본 공정의 타당성과 가능성을 보였다.

특히 인형과 같은 실물예제를 대상으로 한 응용 사례를 통하여 향후 보다 다양한 3 차원 형상의 박막 제품을 고속가공을 이용한 패속제작이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 치수분석을 통해 약 1.4%이내의 형상오차 범위 내에 있음을 확인하였고, 초음파를 이용하여 높은 용착 정밀도를 유지하였으며 후가공의 생략을 가능하게 하였다. 즉 본 논문을 통하여 제시된 공정은 지금껏 적층식 패속조형시스템으로만 가능하던 속이 빈 형상의 박막 제품을 고속절삭가공을 통하여 기능성의 플라스틱 및 금속 재질로 단시간에 직접제작 가능하게 되었다.

그러나 이러한 공정을 보다 보편화되기 위해서는 아직 여러 가지 문제점이 여전히 남아 있다. 특히 금속 박막 제품을 보다 쉽게 초음파 용착하는 문제, 용착시 자동 정렬 및 치수 정밀도 보장 등에 대한 연구가 필요하다. 향후 이러한 문제점들의 해결을 위해 보다 효과적인 용착 방법과 조

건 등에 대한 연구가 진행된다면 앞으로의 플라스틱 및 금속 제품의 쾌속제작 분야에 새로운 계기가 될 것으로 기대된다.

### 후 기

본 논문은 과기부 중점연구사업 주문적응형 쾌속제품 개발시스템 사업과 산자부 산업기술개발사업의 지원을 받아 연구되었으며, 또한 한국과학기술원 기계공학과 양동열교수님께 특별한 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. Nakagawa, T., "High-Speed Milling for Die and Mold Making," Proc. of AFDM'99, pp. 11-18, 1999.
2. Shin, B. S., Choi, D. S., Yang, D. Y., Lee, S. H., Yoon, K. K., Whang, K. H., Sarma, S. E. and Lee, E., "Rapid Prototyping System Using Universal Automated Fixturing Technology," 8<sup>th</sup> European Conference on RP, 2000.
3. Gandhi, M. V., Thompson, B. S. and Mass, D. J., "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.
4. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Kim, K. D., Lee, E. S., Je, T. J. and Whang, K. H., "Development of Automatic Filling Process using Low-Melting Point Metal for Rapid Manufacturing with Machining Process," J. of the DSPE, Vol. 19, No. 3, pp. 88-94, 2002.
5. Abtew, M. and Sevaduray, G., "Lead-free Solders in Microelectronics," Materials Science and Engineering, Vol. 27, pp. 95-141, 2000.
6. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Lee, E. S. and Whang, D. H., "Method and Apparatus for Rapidly Manufacturing 3-Dimensional Shaped Products using Machining and Filling Process," Korea Patent No. 0383880, 2003.
7. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Lee, E. S., Je, T. J. and Whang, K. H., "Development of Rapid Manufacturing process by High-Speed Machining with Automatic fixturing," J. Mater. Proces. Technol., Vol. 130-131, p. 363, 2002.
8. Shin, B. S., Yang, D. Y., Choi, D. S., Lee, E. S., Je, T. J. and Whang, K. H., "A New Rapid Manufacturing Process for Multi-face High-speed Machining," Int. J. Adv. Technol., Vol. 22, pp. 68-74 2003.
9. Shin, B. S., "Rapid Manufacturing of Microscale Thin-walled Structures by Phase Change Workholding Method," J. of the KSPE, Vol. 22, No. 9, pp. 188-193, 2005.