

No design for manufacturing

Min-Seang Kim¹, Yun-Mi Kim¹, Adrian Paulo Garcia Avila¹ and Sung-Hoon Ahn[#]

¹ School of Mechanical and Aerospace Engineering & Institute of Advanced Machinery and Design Seoul National University, Seoul, Korea, 151-742
Corresponding Author / E-mail: ahnsh@snu.ac.kr, TEL: +82-2-880-7110, FAX: +82-2-883-0179

KEYWORDS : Fusible alloy, RP printing, Interconnection, Electrical circuit

A fusible alloy, usually eutectic alloy is capable of being fused, as well as being liquefied by heat. Sometimes the term "fusible alloy" is used to describe alloys with a melting point below 150°C. Fusible alloys in this sense are used for solder. And, RP (Rapid Prototyping) is a direct writing technology offering several advantages over subtractive processing, low material consumption, and possibility to make series of customized products. In this study, the design and manufacturing of RP printing were tested. Firstly, variable fusible alloy and its operation condition were tested. Secondly, the bonding strength between fusible alloy and substrate was investigated. Lastly, electrical circuits made by RP printing.

1. Introduction

가용합금 (Fusible alloy) 이란 일반적으로 녹는점이 200°C 이하인 합금을 말하는 경우가 많다. 주성분은 비스무트 • 납 • 주석 • 카드뮴 • 인듐 등으로 3~4 종류를 조합한 것으로, 합금의 조성에 의하여 낮은 온도 범위에서 녹는점을 바꿀 수 있다. 예를 들면, 우드합금은 비스무트 40~50%, 납 25~30%, 주석 12.5~15.5%, 카드뮴 12.5%를 조합한 것으로 녹는점은 60~70°C이다. 이 외에 더운물 속에서 녹는 것도 있다. 가용합금은 화재경보기의 자동스위치, 전기기구의 퓨즈, 또한 납형주형 • 접합용 • 치과용 등 여러 가지 용도로 사용된다. 이러한 특성을 지닌 가용합금을 재료로 쾌속조형 (Rapid Prototyping) 장비를 이용하여 다양한 기관의 표면에 여러가지 디자인을 프린팅 하는 기술을 개발하기 위한 기초실험에 대한 연구로서, 일차적으로 RP 장비를 이용 가용합금을 프린팅 하여 전기회로를 구성하는 실험을 진행하였다.

2. Preliminary research

서론에서 언급한 기술을 개발하기 위해서는 먼저 솔더링에 대한 이해가 필요하다. 솔더링 (Soldering)은 흔히 납땜으로도 불리는데, 전자부품의 기관 실장에 필수적인 기술로써, 최근의 전자기기의 소형화, 경량화와 관련하여 그 중요성은 한층 더 높아지고 있다.

솔더링은 용점 450°C 미만의 용융된 연납 (솔더, solder)을 피접합재(기관)의 틈새에 침투, 퍼지게 하여 접합하는 방법이다. 솔더링은 재료의 접합기술 중 하나로 용접기술의 일종이다. 그러나, 솔더링은 모재는 녹지 않고 솔더만 녹아 접합되는 것이 일반적인 용접과 다른 점이다. 또한, 솔더링된 모재와 솔더 사이에는 금속 화학적 결합이 발생하므로 솔더링은 접착제를 이용한 접합과는 다르다. 양호한 솔더링부를 얻기 위해서는 다음의 3가지 조건이 필요하다.

- 1) 젖음 (wetting): 모재 표면에 접촉된 용융 솔더가 흐르면서 퍼져가는 것이 필요한데, 이 현상을 젖음 (wetting)이라고 한다.
- 2) 모세관 현상: 모재 표면에 적신 솔더는 접합될 부분의

틈새(리드와 기관 홀 사이)로 빨려 들어가야 하는데, 이 현상을 모세관 현상이라고 한다.

- 3) 확산: 용융된 솔더와 모재가 적절히 서로 섞이는 것이 필요한데, 이 현상을 확산 이라고 한다.

솔더는 일반적으로 용점이 낮고, 용융솔더의 표면장력, 점성, 유동성이 적절하여 모재에 잘 젖어야 한다. 또 솔더링 후에는 접합부의 강도나 전기 전도도 등이 사용목적에 부합되어야 한다. 가장 일반적으로 사용되는 솔더는 주석-납 (Sn-Pb)계 솔더인데, 그 밖에도 Sn계, Pb계, Au계, In계, Bi계 등이 있다. 표 1은 각종 솔더의 조성, 용융온도 범위 및 강도를 보여준다[1-4].

영국의 Universit of Bath 대학의 Adrian Bowyer 교수는 스스로 복제되는 3 차원 프린터 (A self-replicating 3D printer)를 개발했다. 이를 "스스로 복제하는 신속한 프로토타입 (self replicating rapid prototyper or RepRap) 라고 하는데, 이는 3 차원 프린터의 비용을 최대한으로 낮출 수 있고 향후 집에서 망가진 물건들이나 예비용들을 그저 재 프린팅하기만 하면 된다. Fig.1 은 저온에서 녹는 합금을 재료로 3 차원 프린터를 이용하여 자율 로봇에 프린트된 금속 서킷을 보여준다[5].

또한, 일렉트로닉스 기술 진보에 따라 우리가 사무실에서 사용하는 잉크젯 인쇄기를 사용하여 컴퓨터 내에 입력된 설계를 리소그래피 작업 없이 전자회로기관에 회로를 직접 인쇄하는 기술이 현실화 되고 있다. 전자회로기관 인쇄의 종래 기술인 리소그래피는 노광을 위한 마스크 형성, 광 레지스트 공정, 노광, 현상, 에칭 등의 여러공정과 유해물질의 사용, 그리고 재료의 많은 손실을 갖는다. 이를 대체하는 잉크젯 인쇄기술은 대기압하에서 한번의 인쇄와 건조의 간단한 공정을 가진다. 따라서, 이 기술은 대형기관에서 높은 경쟁력을 갖고 고객의 취향에 맞는 맞춤형의 다양한 설계, 필요부분만의 인쇄, 단담기, 환경친화형, 재료이용 효율의 향상 등으로 전자회로기관 기술을 혁신적으로 바꾼다[6,7].

KOA 는 잉크젯 (inkjet) 기술을 응용하여 저온소성 세라믹스(LTCC) 다층기관의 미세배선 형성기술을 개발했다. 표면처리를 실시한 세라믹스 스크린 시트 위에 수 nm~수십 nm 의 미립자를 액체중에 분산시킨 잉크를 이용한 잉크젯법에 의해 최소 배선 약 30μm, 피치 60μm 의 배선패턴을 그려,

Table 1 각종 솔더의 조성, 용융온도 범위 및 강도

합금계	표준화합 조성 (mass%)					JISZ 3282의 기호	용융온도범위		인장강도 (MPa)실온		전단강도(Mpa)	
	조성원소						고상선	액상선			20℃	100℃
	Sn	Pb	Ag	Sb	In				Bi			
Sn-Pb	100					H63, A, B	232	232	53.1~51.5	22.1	19	
	63	37				H60, A, B	183	183	188(189)	37.9	21.6	
	50	40				H50S, A, B	183	183	28.6~52.4	33.6~38.6		
	50	50				H40S, A, B	216	216	32.2	18.4~30.0	24	
	40	60				H10A, B	234	234		34.3	13.7	
	10	90				H5A, B	275(268)	302		28.9	14.7	
Sn-Pb-Ag	62	36	2			H82Bi58A	179*	197*		43.1	18.6	
	10	88	2				268~275	290~300				
	5	93.5	1.5				296	301		23.8	15.7	
	2	95.5	2.5				299	304				
Sn-(Pb)-Bi	42				58	H42Bi58A	139*	139	72.6+	50	19.6	
	15	33			52		96*	96				
	34	42			24	H43Bi14A		146	44.1	34.3	17.7	
	43	43			14			163	48.1			
	52	10		7.5			183	50				
Sn-Pb-Sb	35.5	62.7		1.8				243				
	30.5	67.9		1.6				250				
	20.5	78.5		1				270				
	5	92		3				285				
	98		2				314					
Sn-Ag	98.5		1.5			H96Ag3.5A	309	309				
	96.5		3.5				221*	221		37.8	22.6	
	96		4				221	221	61.4	31.7		
	95		5				221	221	55.1			
							250(245)					

Material	Melting temp.	Operation temp.
Low temp. lead	105	164
Soldering lead	168	220
Sn, Ag lead	225	235
Bi 57, Sn 43 alloy	160	165
Bi 70, Sn 30 alloy	164	175

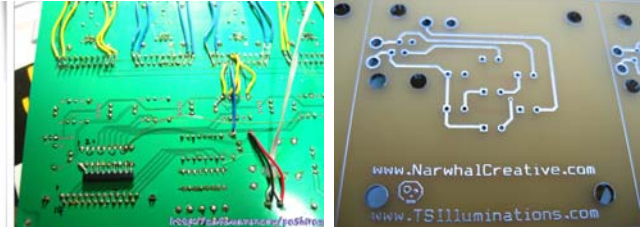


Fig. 2 PCB(printed circuit board)

그린 시트를 일괄 적층 및 동시 소성하는 미세배선 형성에 성공했다[8].

이러한 잉크젯 인쇄기술의 성공에는 인쇄기 외에 잉크기술의 기여가 크다. 고속 분사에 필요한 저점도 특성과 장기 신뢰성을 가져야 한다. 유연기판의 플라스틱 재료의 용융온도 이하에서 잉크의 금속입자 소결이 가능하고, 충분한 전기 전도성과 분산성을 갖기 위해서는 금속입자가 나노크기가 되어야 한다. 기판재질과 적당한 젖음성을 가져야 건조 후 패턴을 설계대로 형성할 수 있다. 또한 나노입자 사이의 엉킴 대책도 필요하다. 잉크젯 기술의 재료로는 이미 은과 금의 나노입자 잉크 페이스트가 판매되고 있으나, 가격이 비싸다는 단점이 있어 현재 동(Cu)에 대한 연구도 진행되고 있다. 동은 은에 비해 이송 (migration)의 문제가 적고, 재료비도 낮은 장점이 있는 반면, 산화하기 쉬운 단점이 있다[9].

특허조사 결과 몇몇 자동화된 납땜 기계는 존재하나 자동으로 금속을 프린트하거나 금속이 프린트된 복합재의 경우는 찾아보기가 힘들었다.

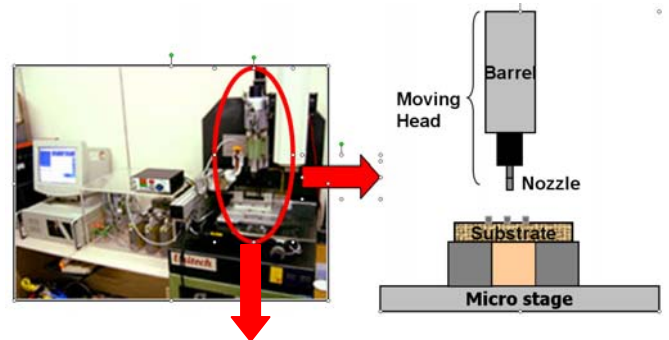


Fig. 3 Circuit printing using RP machine

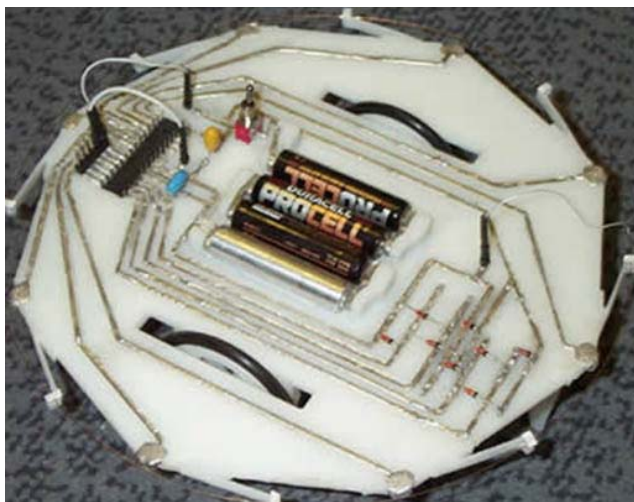


Fig. 1 저온합금으로 만든 금속 회로 서킷

3. Research objective

전자제품내의 요소들인 저항, 콘덴서, 트랜지스터 등은 Fig. 2 에서와 같이 케이블이나 프린팅으로 상호 연결되어 있다. 하지만, 상호 연결시 회로의 특성상 회로선들은 상호 교차 (cross)가 될 수 없기 때문에 모든 요소들을 기판에 배치할 때는 공간을 충분히 확보하여야 한다. 본 연구에서는 사용자들에게 보다 쉬우면서, 기판 공간을 절약할 수 있는 방법을 제시하고자 진행하였다. Fig. 3에서와 같이 고온환경을 부여할 수 있는 RP 장비 실린더(배럴) 내부에 가용합금을 위치시킨 이후 회로에 맞는 NC 코드에 의해서 프린팅을 수행하는 실험을 진행하였다

Fig. 4에서는 이전에 회로를 연결한 방법과 가용합금을 이용한 프린팅 방법을 비교하여 보여주고 있는데, 만능기판의 공간이 상당부분 감소하는 것을 개략적으로 확인할 수 있다.

Fig. 4 Comparison with general type and NDFM type

4. Printing experiments and results with RP

4.1 Materials and apparatus

솔더링 재료에는 서론에 언급한 바와 같이 다양한 재료가 있으나 장비의 가용온도 및 실험의 편의를 위해 연구실에 기 보유하고 있는 재료들을 활용하였다. 실험에 사용된 기판 (substrate)은 유리섬유 복합재와 만능기판이다. 기판에 프린팅되는 솔더의 종류와 녹는점, 작동온도는 Table 2와 같다. 녹는점(melting temp.)은 솔더가 녹기 시작하는 온도를 의미하며, 작동온도(operation temp.)는 녹은 솔더가 RP장비를 통해 흘러나오기 시작하는 온도를 의미한다.

실험에 사용된 장비는 Fig. 3와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 솔더를 넣은 배럴 및 노즐과 압력을 조절할 수 있는 장치, 노즐의 위치를 통제할 수 있는 장치로 구성되어 있다.

4.2 Printing process

배럴에 솔더를 넣고 녹는 점 이상의 온도로 가열하여 충분히 녹인다. 배럴 내의 납이 충분히 녹아 액체 상태가 되면, 압력을 가해 배럴 입구에 설치된 노즐을 통해 솔더가 밀려나오게 된다. NC 코드 (code)에 의해 스테이지 (stage)가 움직이며 원하는 형태의 선 (line)을 제작하게 된다. 위에 언급된 5 가지 종류의 솔더에 대해 유리섬유 복합재 및 만능기판에 선 형태의 프린팅 (printing)을 시도하였으며, 이 중 가장 우수한 재료를 이용하여 기초적인 전기회로를 구성하였다.

4.3 Experimental results

압력과 온도를 달리하여 다양한 실험을 해 본 결과 저온 납은 일정한 조건에서 프린팅이 되는 것을 확인 할 수 있었다. 일정한 모양의 선을 만들 수 있었으며, 기판과 솔더 간의 접착력 또한 우수하였다. 납땀 납(soldering lead)은 프린팅된 결과를 얻을 수 없었으며, 실험과정에서 일부 노란 액체가 흘러나오는 것을 관찰 할 수가 있었다. 이 노란 액체는 납땀 납이 가열되면서 납땀 납 내부에 포함되어 있는 플럭스 (flux)가 먼저 녹아나와 흘러내리는 것으로서, 이 플럭스로 인해 납땀 납은 배럴 내에서 덩글게 뭉쳐있지만 하고 노즐을 통해 밖으로 배출되지 않는 것을 확인 할 수가 있었다. 일부 배출된 납땀 납은 형태를 갖추지 않고 퍼진 상태에서 굳어버렸으며 기판과 쉽게 분리되는 현상을 관찰할 수 있었다.

Bi 70 wt%, Sn 30 wt% 합금은 작동온도는 적당하였으나, 온도에 따라 배럴 입구에서 폭발하듯이 터져 나오거나, 아예 흐르지 않는 등의 문제가 발생하였다. Bi 57 wt% , Sn 43 wt% 합금의 경우 선의 형태는 우수하였으며 기판과의 접착력은 GFRP에서는 좋았으나 만능기판에서는 좋지 않았다.

5. Manufacturing

5.1 Line components

가장 우수한 성형성과 기판과의 접착력이 뛰어난 저온납을 이용하여 전기회로를 만들기 위한 기초형상인 Line 을 만드는 실험을 진행하였다. 저온납의 조성은 Table 3 와 같다.

Fig. 5 는 제작된 Line 의 여러 가지 형상을 보여준다. Fig. 5 (b)에서 보는 바와 같이 매우 가늘은 형상의 선도 제작이 가능하나, 기판과의 접착력이 좋지 않은 단점이 있었다. Fig. 5 (a)의 Line 은 드롭 다운 (drop-down)방식으로 제작된 선으로 두께는 (b)보다 두껍지만 기판과 좋은 접착력을 보였다.

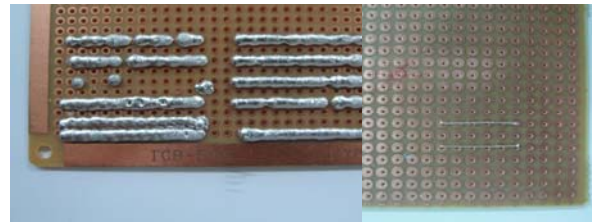
5.2 Interconnection components

전기회로의 소형화, 간소화를 위해 필연적으로 필요한 것이 회로 교차점에서의 단선 (short)문제 해결이다. 일반적으로 구성되는 회로는, 교차점에서 발생하는 문제를 회피하기 위해 복잡한 회로 디자인이 필요하게 된다. 이에 대한 방안으로, 이 논문에서는 회로 교차점에 폴리머를 적층함으로써 회로를 소형화, 간소화 할 수 있는 가능성을 보여주고자 한다.

실험에 사용하고자 하는 폴리머는 솔더에 의해 녹지 않아야 하며, 접착성이 좋아야 하고, 절연성이 우수해야 한다. XX 은 높은 녹는점과 연신율을 지니고 접착성이 우수하며 절연성이 좋은 폴리머로서 RP 장비에 의해 형태를 만들기 쉬운 재료이다. Fig 6.는 XX 를 이용하여 제작

Table 3 Composition of low temperature lead

Element	Proportion (%)
Tc	5.19
Sn	26.71
Pb	40.08
Bi	28.02



(a) Thin line (b) Thick line
Fig. 5 Printing 된 Line의 모습



Fig 6. 제작된 회로 교차점

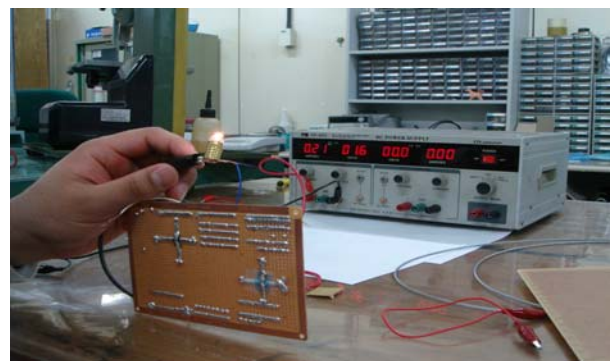


Fig 7. 작동 여부 테스트

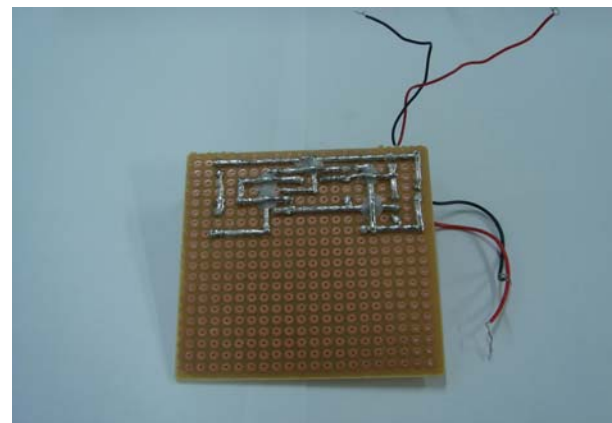


Fig 8. 제작된 회로(완성품)

된 회로 교차 점을 보여준다. 1 차적으로 프린팅된 선 위에 폴리머를 적층하고 적층부위 위로 선이 교차되게 하였다. 교차된 각각의 선의 전기전도성을 체크한 후, 꼬마전구가 켜지는 간단한 회로를 구성한 결과 단선 없이 잘 작동되는 것을 확인 할 수 있었다. 작동모습은 Fig. 7 과 같다.

5.3 Electrical circuit

Fig. 8 은 제작된 전기회로의 모습을 보여준다. 그림에서 보는 바와 일반 전기선대신 RP 장비를 이용하여 각 부품들을 연결하였으며, 교차점은 폴리머를 적층하여 제작하였다.

6. Bonding test

비설계 제조 (NDFM)를 통한 가용합금의 프린팅 방법이 실제 활용되기 위해서는 우선적으로 가용합금과 기관간의 결합력이 요구된다. 따라서, 가용합금과 만능기관간의 결합력을 측정하기 위한 시편을 제작하고, 인장시험기를 이용하여 실험을 진행하였다. 실험방법은 Fig. 9 과 같다.

6.1 Specimen fabrication

가용합금과 기관과의 결합력을 측정하기 위하여 Fig. 9 와 같은 방법으로 본딩 시편을 제작하였다. 시편은 먼저 기관 위에 종이를 이용해서 사각형의 댄(20 mm × 15 mm)을 만들었다. 그리고, 설치된 종이를 고정하고 가용합금이 흘러나가지 않게 하기 위해서 4 면에 실리콘 처리를 하였다. 노(furnace)를 이용하여 녹는점이 138°C 인 가용합금 (Bi 57 wt%, Sn 43 wt%)를 용해시킨 이후에 댄 안쪽에 붓고, 인장시험기를 이용해서 인장(pull-out) 실험을 하기 위하여 스틸 케이블을 중앙에 꽂은 이후 상온에서 응고하여 시편을 완성하였다. Fig. 10 (a)는 결합력 실험을 위한 시편의 도식화 한 것이고, Fig. 10 (b)는 완성된 시편의 형상을 보여주고 있다.

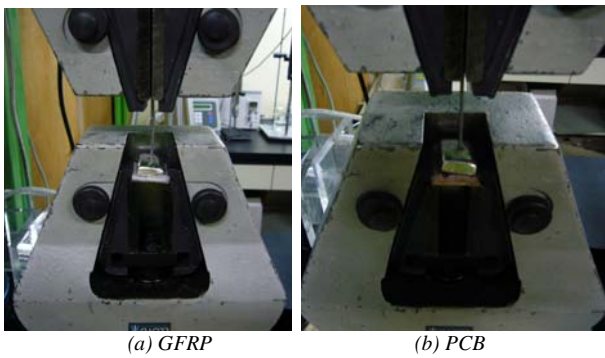
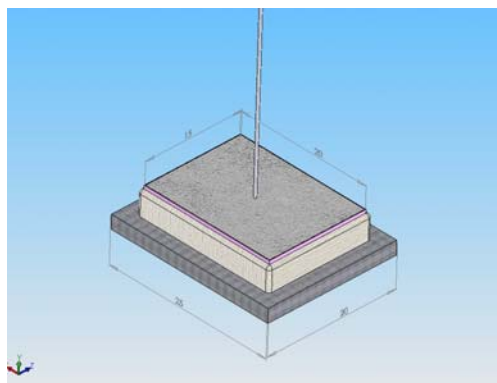
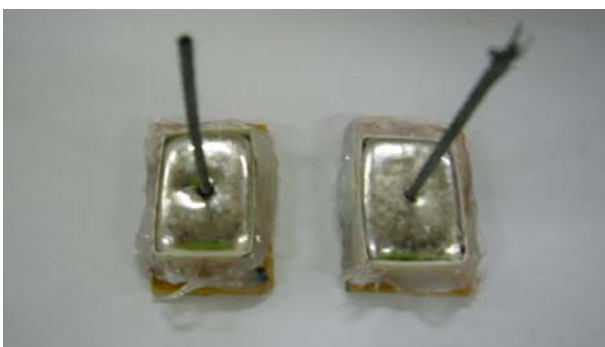


Fig. 9 Bonding test



(a)Diagram of bonding test specimen



(b).Fabricated bonding test specimen
Fig. 10 Specimen for bonding test

Table 4 Result of bonding test

구분	만능기관 *hot plate(100°C)	만능기관 * no heat	GFRP	CFRP
시편갯수	5	5	5	5
실험갯수	2	4	3	2
Bonding Force (N)	Aver. 15.3	Aver. 20.8	Aver. 11.1	Aver. 10.8

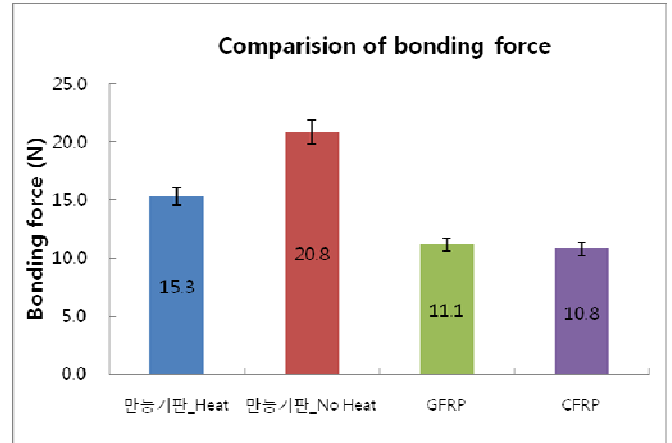


Fig. 11 Results of bonding test

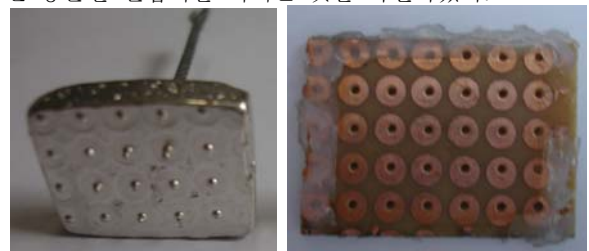
6.2 Results of bonding test

기관 재료의 가열에 따른 결합력을 비교하기 위해서 Hot plate를 이용하여 약 100°C로 가열한 기관과 가열하지 않은 기관을 이용하여 시편 제작하였다. 그리고, 추가적으로 섬유 강화 플라스틱(FRP)과 가용합금간의 결합력도 같이 비교하기 위해서 GFRP, CFRP를 이용하여 본딩시편을 제작하였다.

모든 종류별로 각각 5개의 시편을 제작하여 실험을 진행하였으나, Table 4에서 명기된 바와 같이 제작 및 실험과정중에서 결합 분리가 된 시편을 제외한 시편을 갖고 실험을 진행하였으며 결과값은 Fig. 11와 같다.

6.3 Analysis of bonding test

기관 결합력에 대한 실험 결과 상대적으로 만능기관에서 높은 값을 얻을 수 있었다. 만능기관의 사전 가열여부에 따른 결합력은 오히려 가열을 하지 않은 시편이 약 5N 높게 나타났다. GFRP와 CFRP는 만능기관에 비해서는 낮은 약 11N의 결합력을 가지는 것으로 나타났다. 높은 결합력을 나타내는 만능기관의 경우는 Fig. 12(a)에서와 같이 만능기관에 위치하여 전자부품을 끼울 수 있는 구멍(hole) 내부로 가용합금이 흘러 들어가서 두 재료를 물리적으로 결합하여 상대적으로 높은 결합력을 갖는 것으로 판단된다. 반면, FRP의 경우는 만능기관에서와 같은 구멍은 없지만 섬유자체의 형상에 의해서 Fig. 12(b)과 같은 패턴을 가지게 되고, 이러한 패턴을 만들어 내는 가용합금과 FRP의 결합에 의해서 비록 만능기관보다는 적지만 일정한 결합력을 가지는 것으로 판단된다. 따라서, 본 결합력 실험을 통해서 프린팅 재료인 가용합금과 기관 재료인 만능기관, FRP간 값의 차이는 재료별로 있지만 충분한 결합력을 지니는 것을 확인하였다.



(a) PCB's pattern



(b) GFRP's pattern

Fig. 11 Pattern comparison of substrates

4. Conclusion

다양한 가용합금과 RP 장비를 이용하여 GFRP 및 만능기판에 프린팅하는 실험을 진행하였다. 가용합금 중 접착력과 성형성이 가장 우수한 저온 납을 이용하여 전기회로를 구성하였으며 정상적으로 작동됨을 확인하였다. 이를 통해서, 가용합금을 프린팅하여 일정한 회로를 구성하여 활용할 수 있음을 확인하였고, 회로의 교차점에 폴리머를 적층함으로써 회로의 크기 및 제작소요를 줄일 수 있음을 확인하였다.

또한, 프린팅 재료인 가용합금과 기판재료인 만능기판, GFRP 및 CFRP 와의 결합력을 확인한 결과 회로배선에 사용 가능한 결합력을 지니는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGEMENT

한 학기동안 지도해 주신 안성훈 교수님께 감사드립니다.

REFERENCES

1. 정재필, 신영의, 임승수, “무연마이크로 솔더링”
2. 1. B.Wood, “New fusible alloy: Remarks on determining the melting point of metals”, Journal of the Franklin Institute, Vol.73, Issue 1, Jan., 1862
3. 2. Fusible alloy tooling, Material & Design, Vol.10, Issue 5, Sep.-Oct., 1989
4. ASTM B774-00, “Standard Specification for Low Melting Point Alloys”, Reapproved 2005
5. <http://regrap.org>
6. <http://cafe.naver.com/minktappa/16189>
7. Jani, M., Ville, P. Kimmo, K. Pauliina, M. Juha, M. Matti, M. Huja, N. Jussi, P. Taavi, S. and Risto, R., “Inkjet printed System-in-Package design and manufacturing,” Microelectronics Journal, 2008.
8. <http://www.koanet.co.jp>
9. KISTI, 글로벌 동향 브리핑