

초소형 고효율 평면변압기의 기술동향

김현식*, 허정섭*, 김종령*, 민복기**

(* (주)매트론 기술연구소, ** 한국전기연구원)

1. 서론

최근 전자·통신 분야에서 안정된 전원의 변환공급 및 에너지 절약과 효율의 증대에 대한 관심이 고조됨에 따라 에너지 저장·변환장치의 고성능화, 고효율화, 소형·경량화 등에 대한 중요성이 인식되어 세계 각 국에서는 이 분야에 대한 투자와 연구개발이 활발하게 이루어지고 있다.

현재 전자통신 기기에 있어 시스템부분은 반도체 집적회로의 발전에 수반하여 소형·경량화가 이루어지고 있는 반면 전원부분은 에너지 축적 또는 변환용 소자인 인덕터(변압기) 및 커패시터의 존재로 인하여 기대만큼의 소형·경량화가 이루어지지 못하고 있는 실정이다.

에너지변환기술은 응용회로에 따라 다양한 입출력 전압·전류와 소형화가 요구되면서 스위칭(Switching)방식이 실현되었다. 이 SMPS(Switching Mode Power Supply)의 구성요소 중에서 가장 큰 부피를 차지하고 있는 것은 변압기이며, 이 SMPS의 소형화를 위해서 변압기의 부피를 최소화하는 것이 급선무이다. 하지만 변압기의 소형화는 스위칭 주파수를 증가 시킴으로써 가능해지지만, 소형화에 따른 방열 면적이 감소하여 손실이 증가하게 되며, 이 손실량은 스위칭 주파수의 증가에 따라 비례적으로 증가하게 된다. 현재 상용화되고 있는 전원장치의 전체손실의 약 14%를 변압기가 차지하고 있는 것만으로도 그 비중은 쉽게 짐작할 수 있다. 그리고 일반적인 권선형 3차원 변압기는 100kHz 이상의 고주파 스위칭 주파수에서 표피효과(Skin effect)와 근접효과(Proximity effect)에 의한 손실의 증가로 인해 수백 kHz 이상의 스위칭 주파수를

갖는 전원장치에는 응용하기가 어렵다.

반면 전원장치에 평평하고 넓은 도체를 이용한 평면변압기(Planar Transformer)는 고주파 손실을 감소시켜 고주파대역용 전원장치에의 채용이 가능하여 최근 이에 대한 많은 관심과 그 응용에 대하여 집중되고 있다.

2. 국내·외 개발 동향

평면변압기는 1990년대 초에 특성, 모델링 그리고 평면자성체의 적합성에 대한 연구가 시작되었으며, 1990년대 중반부터 평면자성체의 여러 형태가 개발되어 현재 3MHz의 스위칭주파수와 2.5kW의 용량까지 개발되어 상용화되어 있다. 평면변압기의 선진업체로는 Payton(이스라엘)사, TOKIN(일본)사, VISHAY(미국), PLANETICS(이스라엘), ECI-world(미국)사가 대표적이며, Philips(네덜란드)사, TDK(일본)사, Siemens(독일)사 등에서는 공업규격에 따른 평면자성체가 개발되어 이미 시판되고 있으며, 이 외에도 크고 작은 선진업체들은 다수가 있다. 반면 국내에서는 현재의 평면변압기의 좁은 시장성 때문에 기술개발에의 참여가 늦어지고 있는 실정이며, 평면자성체에 대한 연구는 현재 몇몇 업체에서 이루어지고 있으나, 평면변압기 제조기술 개발의 중요성에 대한 인식부족으로 참여 업체 수는 극히 소수에 이르고 있는 실정이다.

전자·통신기기의 소형화를 위해서는 평면변압기의 개발이 요구된다고 볼 때, 평면변압기의 국내 자체 기술개발은 시급한 실정이며, 현재 상황으로 볼 때, 기술의 개발은 국내뿐만

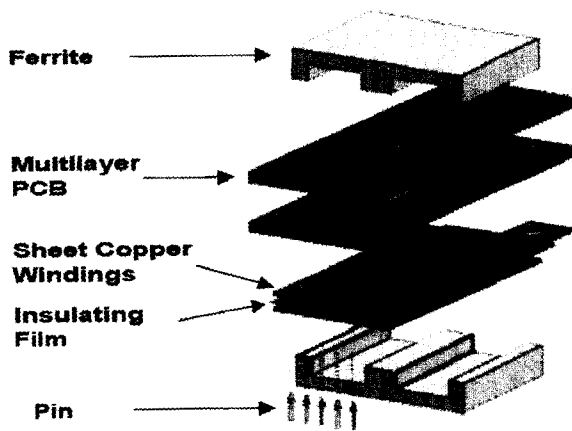
아니라 국외시장으로의 진출도 가능한 상태이다. 또한 차후 국내 변압기 및 전원장치 관련 시장의 보호차원에서라도 국내 기술개발이 요구되고 있다.

3. 평면변압기(Planar Transformer)

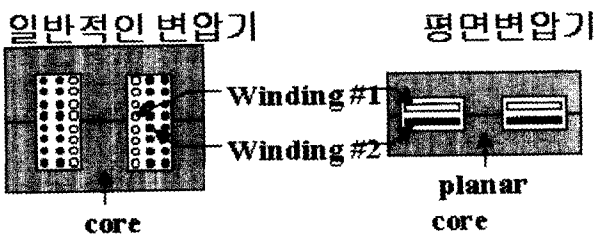
3.1 구조와 특성

일반적인 전력용 변압기는 코어의 중간 다리를 중심으로 구리선재가 x, y-축 방향으로 권선되어 있다. 반면 평면변압기는 그림 1과 같이 원형 구리선재 대신 평면구리 나선선을 형성화하거나 구리 박판(Sheet)을 적층한 형태로서 z-축 방향으로 권선되어 있다.

평면변압기에 사용되는 평면 자성체는 8가지의 공업표준 사이즈가 있고, 일반적인 코어에 비해 낮은 높이(Low profile)를 가지면서도 보다 높은 전력밀도를 나타낸다. 그리고 일정한 선간격과 선폭을 유지함으로써, 고주파대역에서의 근접효과와 표피효과를 낮추는 것이 가능하다. 하지만 2차 권선의 끝단 설계방법에 따라 누설 인덕턴스는 최고 3배까지 증가할 수 있으며, 평면소자의 AC저항 중 약 75%까지 차지할 수 있으므로 주의가 필요하다. 그 외 평면변압기의 장·단점을 열거하면 아래와 같다.



(a)



(b)

그림 1 평면변압기의 (a)구조와 (b)권선형태

평면변압기의 장점

- 낮은 높이(Low Profile)에 의한 소형화 실현
- 낮은 누설 인덕턴스((Leakage Inductance)
- 높은 전력밀도(유효면적의 증가)
- 높은 효율 (95% 이상)
- 경량화(100W/5g)
- 낮은 교류 저항(일반 권선변압기의 85~90%)
- 높은 특성의 재현성
- 높은 생산성

평면변압기의 단점

- 권선 창(Window) 내의 권선수의 제한성
- 대전류(High current)에서 사용 불능

이와 같이 평면변압기는 우수한 주파수특성, 열적 특성 및 물리적 장점 등을 가지지만, 위에서 나열되었듯이 대전류(High current)에 대한 설계 및 응용이 불가능하여 최근에는 여러 개의 코어를 연결하여 각 코어에서 2차 전류를 인출하여 병렬 연결하는 대전류용 Flat Transformer에 대한 연구가 이루어지고 있다.

3.2 설계방법

3.2.1 코어 선택

평면변압기의 설계에서 가장 중요한 것은 고주파대역에서의 코어손실, 권선손실, 누설인덕턴스 등의 고주파 손실을 최소화하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다. 여기서 코어손실은 변압기 전체손실의 50%에 달한다. 그리고 코어손실과 권선손실은 상승온도의 함수이며, 이 상승온도는 변압기에서 발생하는 허용상승온도(ΔT_{total}) 이하가 되어야 한다. 평면변압기의 전체손실(P_{trans})과 허용상승온도 사이의 관계는 (식 1)과 같다.

$$P_{trans} = \frac{\Delta T}{R_T} \tag{식 1}$$

그리고 이전의 연구에서 변압기의 열저항값(R_T)은 유효자기부피(V_e)와 직접적으로 관계함이 밝혀졌으며, 그 관계는 (식 2)와 같다. 이때 변압기의 전체손실은 두 배의 코어손실에 근접한다.

$$P_{core} = \frac{2 \cdot \Delta T}{\sqrt{V_e} (cm^3)} [mW/cm^3] \tag{식 2}$$

코어손실은 스위칭주파수와 피크자속밀도(B_{peak})에 의해서 정의될 수 있으며, 이는 (식 3, 4)와 같다.

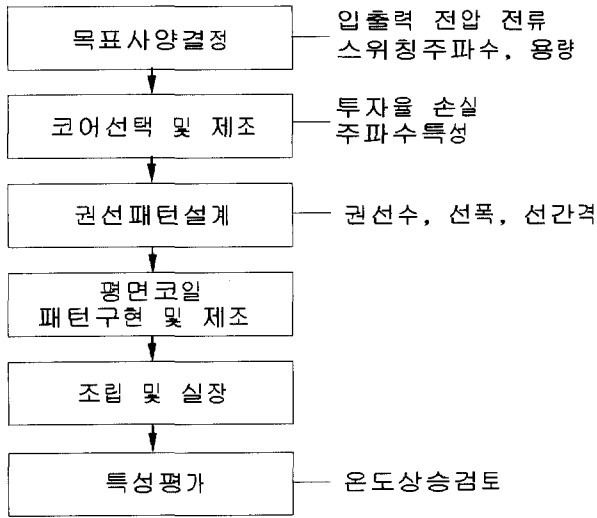


그림 2 평면변압기의 설계 공정도

$$P_{core} = A \cdot f^X \cdot B_{peak}^Y \text{ [mW/cm}^3\text{]} \quad (\text{식 3})$$

$$B_{peak} = \left[\frac{P_{core}}{A \cdot f^X} \right]^{1/Y} \text{ [T]} \quad (\text{식 4})$$

(A, X, Y : 코어의 재료정수)

이와 같이 평면변압기에서 코어의 재질과 사이즈 등의 사양 선택에 의해 손실 특성이 조절될 수 있으며, 최종적인 변압기의 특성에 직접적인 영향을 미치게 되므로 신중한 선택이 요구된다.

3.2.2 권선 패턴 설계

권선 패턴의 설계는 1, 2차 권선수의 산출, 임피던스, 입출력 전류 및 자화전류의 산출, 그리고 선폭과 선간격 산출의 순서로 이루어진다. 여기서 1차 코일의 권선수는 펄스파일 경우, 전압·전류 파형이 구형파일 경우와 비교하여, 전압을 (+)로만 강제적으로 인가하기 때문에 B-H curve의 상부만 여자되므로 권선수는 두 배로 증가하게 된다.

그리고 평면 코일에 전류가 인가되면 PCB의 온도가 상승하게 되므로 1, 2차 권선이 샌드위치(Sandwich) 구조로 적층되는 레이어(layer)에서 1차 권선 레이어와 2차 권선 레이어 사이에는 근접효과에 대한 고주파손실을 방지하기 위해 절연층(Insulation layer)을 삽입한다. 이 때 절연층의 두께는 IEC950과 같은 안전표준규격에 주(Main) 절연층은 400 μm이 요구된다고 하지만, 주절연층이 아닌 경우는 >200μm이면 충분하다고 명시되어 있다.

또한 평면 구리선의 두께는 제조단가와 전류-상승온도에 의해 결정될 수 있지만 일반적으로 생산 또는 사용되고 있는 35 μm 또는 70μm이 이용된다.

마지막으로 선간격과 권선폭의 제어는 온도상승의 억제를 위한 최대의 수단이라고 할 수 있으며, 선간격은 권선에 흐르는 최대전류에서 근접효과에 의한 온도상승폭이 최소가 되는 조건으로 설계된다. 일반적으로 구리선의 두께가 35μm일 때 >150μm, 70μm일 때 >200μm이 되도록 한다. 선폭은 고주파대역에서 표피효과를 무시할 수 있는 조건으로 설계하는 것을 원칙으로 한다. 표피효과에 의해 전류가 침투할 수 있는 표면으로부터의 깊이 δ는 (식 5)에 주어졌으며, 선폭은 <2δ가 되도록 한다.

$$\delta = \frac{66}{\sqrt{f[\text{kHz}]}} \text{ [mm]} \quad (\text{식 5})$$

3.2.3 온도상승 검토

변압기 작동중의 온도상승이 코어와 PCB 그리고 코일의 세 부분에서 발생된다고 볼 때 ($\Delta T_{total} = \Delta T_{core} + \Delta T_{PCB} + T_{coil}$), 페라이트 코어가 약 80℃에서 최소의 손실을 나타내므로, 상온에서 허용온도상승 ΔT는 50℃로 일반적으로 설계된다. 또한 코어의 최소 손실 온도가 100℃내외로 개선되어 있으므로 선택범위는 있을 수 있다.

$$\Delta T_{core} = \frac{P_v \text{ [mW/cm}^3\text{]}}{P_{core} \text{ [mW/cm}^3\text{]}} \times \frac{1}{2} \Delta T \quad (\text{식 6})$$

$$\Delta T_{PCB} = \frac{f[\text{kHz}]}{100} \times 2 \quad (\text{식 7})$$

$$\Delta T_{coil} = \frac{1}{2} \Delta T \quad (\text{식 8})$$

(식 6~식 8)은 평면 자성체의 PCB 그리고 코일에서 발생되는 상승온도를 나타내는 것으로, ΔT_{core}는 자성체의 재질과 크기변수에 의한 것으로 코어 선택 시 결정되며, ΔT_{PCB}는 스위칭주파수에 따른 함수로서 100kHz 증가에 따라 2℃씩 증가한다. 따라서 설계 시 ΔT_{total}의 제어는 ΔT_{coil}에 가장 크게 영향을 받는다. ΔT_{coil}는 전류-선폭-상승온도 그래프를 이용하여 각 레이어에 흐르는 전류와 허용상승온도에 대한 선폭을 읽어 설계하면 된다. 이 때 전류가 너무 높아 상승온도가

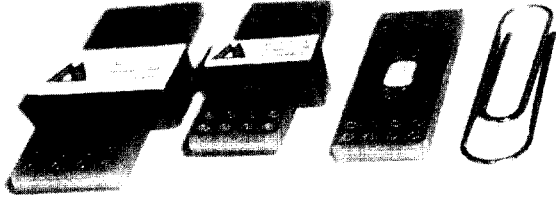


그림 3 평면변압기의 시제품(매트론社)

너무 높은 경우, 2개의 레이어를 병렬로 연결하여 전류량을 낮춤으로써 상승온도를 감소시킬 수 있다.

이와 같은 공정에 의해 제작된 20W급 평면변압기의 시제품을 그림 3에 나타내었다.

3.3 평면변압기의 설계사례

본 설계 사례는 DC-DC 컨버터에 응용 가능한 Flyback식 평면변압기로서 기본사양은 표 1과 같다. 3-2장에서 설명된 바와 같이 먼저 120kHz의 스위칭주파수와 8W의 용량 및 주파수 손실특성을 고려하여 코어를 선택한다. 본 설계사례에서는 코어 손실에 따른 B_{peak} 과 권선창의 크기를 감안하여 Philips E-PLT18-3F3 코어를 선택하였다. (식 2)에서 허용상승온도 35℃에 대한 E-PLT18의 P_{core} 는 470mW/cm²로 산출되며, (식 4)에 의해 120kHz 주파수에서의 B_{peak} 는 152mT가 산출된다. 이 때 코어변수 A는 2.5×10^{-4} , X와 Y는 각각 1.63, 0.48이다.

다음으로 권선수, 임피던스 및 입출력전류 값을 산출하며, 그 결과를 표 2에 나타내었다.

여기서 1차 권선수(N_1)는 24회로 간주하며, IC 레이어와 2차 권선은 모두 3회로 간주한다. 이 중 E-PLT18 권선창(Winding Window)이 4.6mm일 때, 선간격은 $> 200\mu\text{m}$, 선폭은 (식 5)에 의해 $< 380\mu\text{m}$ 이어야 1차 코일에서의 근접효과와 표피효과에 의한 손실을 최소화할 수 있다. 하지만 24회의 권선은 4.6mm라는 권선창에서 위의 조건을 만족하는 조건으로 권선하는 것은 불가능하다. 따라서 24회 권선을 4개의 6회 권선 레이어로 직렬 연결하는 방법을 채택한다. 즉 선간격과 선폭을 각각 $340\mu\text{m}$, $370\mu\text{m}$ 으로 6회 권선하면 위의 조건을 모두 만족한다. 그리고 IC와 2차코일의 경우 선간격과 선폭을 각각 $300\mu\text{m}$, $1133\mu\text{m}$ 으로 설계하도록 한다.

마지막으로 온도상승 점점으로서 현재 코어와 PCB에 의한 온도상승이 (식 6)과 (식 7)에 의해 각각 6.3℃, 2.4℃이고, 코일에 의한 온도 상승이 1차, 2차 코일 모두를 합하여도 10

표 1 평면변압기 설계를 위한 기본사양

항 목	설 계 사 양
형 식	Flyback
전 력	8W
입·출력 전압	70V → 8.2V
IC 전압	8V
1차 코일 듀티 사이클	0.48/0.5
2차 코일 듀티 사이클	0.48/0.5
스위칭 주파수	120kHz
주위 온도	60℃
허용상승온도	35℃

표 2 평면변압기의 설계 결과

E_1 (V)	E_2 (V)	N_1 (turn)	N_2 (turn)	N_{IC} (turn)	L_{prim} (μH)	I_{2rms} (mA)	I_{1rms} (mA)
70	8.2	24.3	2.8	2.8	638	1593	187

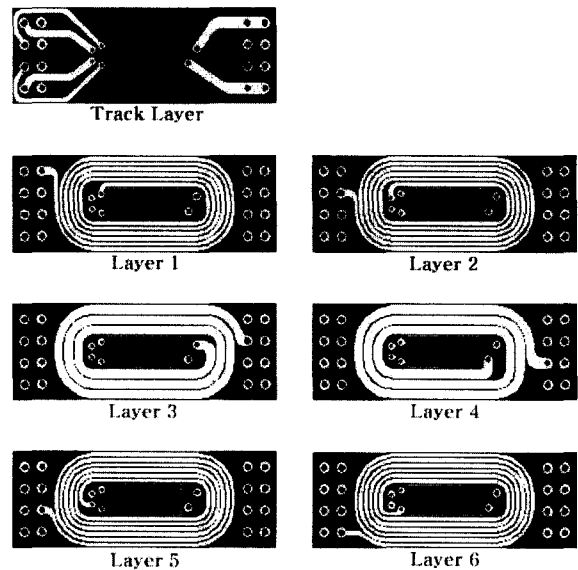


그림 4 설계된 평면변압기의 패턴형상

℃이하게 되므로 총 온도상승은 19℃이하게 된다. 따라서 허용상승온도 35℃에 대한 본 평면변압기의 설계치는 만족한다고 볼 수 있다. 이 때 전체 온도상승폭이 허용온도상승폭보다 높을 경우, 같은 모양의 2차 코일 두 개를 병렬 연결하여 전류량을 감소시킴으로써 상승온도폭을 줄일 수 있다.

그림 4는 설계된 평면변압기의 패턴 형상을 나타낸 것으로, 1차 코일은 레이어 1, 2, 5, 6을 직렬로 연결하여 24회 권선을 구동시키고, 동시에 IC 전압용으로 레이어 3을 구동시킨다. 그리고 레이어 4를 2차 코일로서 구동시키면 목표로 하는 사양에 대한 변압기가 구동된다.

4. 평면변압기의 응용형태

평면변압기는 SMPS나 컨버터 등의 전원장치의 PCB 회로 위에서 독립형(Stand-alone), 독립함몰형(Stand-alone sunken), 적층형(Hybrid), 집적형(integrated) 등의 4가지로 구분되어 구성될 수 있으며, 이를 그림 5에 나타내었다.

주상독립형과 함몰독립형은 고전력 변환장치에서의 전형적인 방법으로 설계 시 평면소자에서의 온도상승제어가 가장 크게 고려되어야 한다. 그 외에 함몰독립형은 구성품의 변화 없이 측면의 높이를 더울 감소시킬 수 있다는 장점이 있다. 적층형은 변압기의 1, 2차 코일 중 한 성분을 모체 기판 위에 위치시켜 다른 성분과 분리시킴으로써, 주상독립형에서의 레이어 수를 감소시켜 높은 전류에 대한 온도상승의 제어를 위한 레이어를 첨가할 수 있다는 공간적 장점이 있다. 예를 들어 전력 컨버터에서 변압기의 1차 코일과 필터 초크를 모체 기판에 위치시키고, 2차 코일과 출력 초크를 모체 기판에서 독립시킨다. 집적형은 저전력 변환장치에 주로 응용되며 설계 시 고주파대역에서의 전기적 특성에 중점을 두고 설계해야 한다.

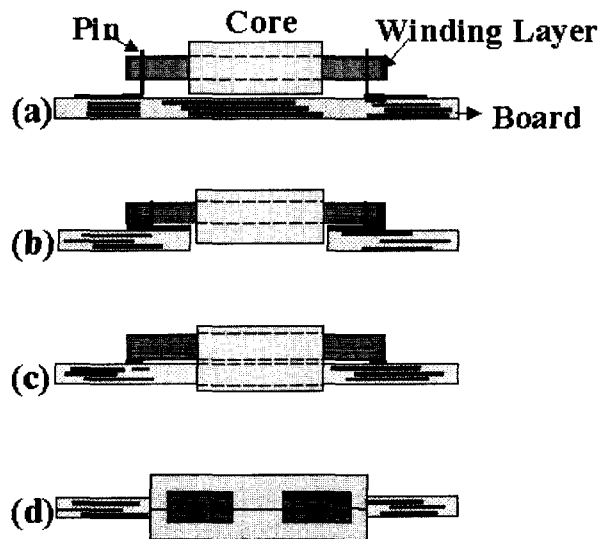


그림 5 평면변압기의 응용형태
 (a) Stand-alone, (b) Stand-alone sunken
 (c) Hybrid, (d) Integrated

이렇게 SMPS, 컨버터, 인버터 등의 다방면에서 그림 5와 같은 형태로 응용되는 평면변압기는 현재에 와서는 집적형 변압기의 일종인 LCT(Inductor + Capacitor + Transformer) 또는 LLCT(Inductor + Inductor + Capacitor + Transformer)에 대한 연구가 진행 중에 있다. 이는 평면코어의 권선창 내에 변압용 코일 외에 인덕터와 커패시터를 집적시켜 내장시킨 것으로 LCT와 LLCT의 실현은 전원장치의 초소형화 및 고효율화를 동시에 이룰 수 있을 것으로 기대되고 있다.

5. 결론

본 고에서 평면변압기의 특징과 최근 국내·외 기술동향 설계방법 및 그 응용에 대하여 고찰하였듯이 평면변압기는 기존의 일반 변압기에 비해 많은 장점들과 응용 가능성이 있다. 그러나 전자·통신기기의 국외 선진국가에서 이미 개발되어 상용화되고 있고, LCT와 LLCT 및 대전류용(High current) Flat Transformer의 연구에 대한 결론이 내려지고 있는 시점에서, 전원장치의 고주파화에 따른 소형화는 필수적임에도 불구하고 현재 국내업체 및 연구기관의 인식부족과 검토에 머무르는 현상에 따른 기술개발의 지연은 더 이상 방치되지 않아야 할 것이다. 그리고 최근 선진업체들이 기술이전보다는 직접적인 시장참여에 관심을 보이고 있으므로 향후 전원장치 업계의 국내시장이 잠식될 가능성마저 낮게 하고 있으므로 평면변압기에 대한 관심에서 나아가 기술개발을 위한 투자와 노력이 더욱 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] 성안당, 김희준, "스위치모드 파워플라이"
- [2] Conor Quinn, Karl Rinne, "A review of Planar Magnetic Techniques and Technologies", 2001IEEE
- [3] Ferroxcube, "Design of Planar Power Transformer"
- [4] Mulder S.A., "Application note on the design of low profile high frequency transformers, Ferroxcube Components", 1990
- [5] Mulder S.A., "Loss formulas for power ferrites and their use in transformer design, Philips Components", 1990
- [6] "과학기술정보연구소 "트랜스포머/인덕터 설계테크닉 및 응용기술", 2001
- [7] "25 Watt DC-DC converter using integrated Planar Magnetics" Ferroxcube Components technical note, 1996
- [8] 김희준, "SMPS의 기본설계-Forward/Flyback 컨버

- 터”, 전자부품, 8, 2000
 [9] 이배원, “고효율 변압기를 이용한 포워드 컨버터 설계”, 중앙대학교, 6, 1999

〈 저 자 소 개 〉



김현식

1967년 3월20일생. 1998년 8월 경남대학교 재료공학과 졸업(박사). 1993년~2000년 4월 한국전기연구원 연구원, 현재 주)매트론 대표이사.



허정섭

1970년 9월10일생. 1997년 2월 경남대학교 무기재료공학과 졸업, 2000년 8월 동 대학원 졸업(석사). 1998년~2001년 6월 한국전기연구원 연구원, 현재 주)매트론 기술연구소 연구원.



김종령

1973년 7월 23일생. 2000년 2월 경남대학교 무기재료공학과 졸업. 현재 주)매트론 기술연구소 연구원. 2001년 경남대학교 재료공학과 석사 수료.



민복기

1959년 9월 26일생. 1984년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 동 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기연구원 전자기소자연구그룹 선임연구원.