

초고속 통신용 저유전성 인쇄회로기판 복합소재 기술현황



전길우

- 2011. 금오공과대학교 나노바이오텍스타일 학과 졸업
- 2013. 금오공과대학교 소재디자인공학과 석사
- 2022. 충남대학교 유기응용재료공학과 박사수료
- 2012-현재. 한국섬유개발연구원 선임연구원



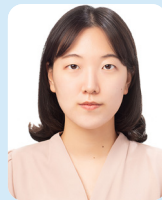
최유리

- 2012. 전북대학교 섬유소재시스템공학과 졸업
- 2014. 전북대학교 유기소재파이버공학과 석사
- 2014-현재. 한국섬유개발연구원 선임연구원



김현지

- 2017. 영남대학교 융합섬유공학과(경영학과) 학사 졸업
- 2018. 영남대학교 융합섬유공학과 석사
- 2019-2020. 한국과학기술연구원 인턴
- 2020-2022. 깨끗한나라(주) 근무
- 2022-현재. 한국섬유개발연구원 연구원



권효주

- 2017. 충남대학교 수학과 학사 졸업
- 2017-2018. 세영회계법인 근무
- 2018-현재. 한국섬유개발연구원 연구원

1. 머리말

1.1. 초고속 통신기술의 산업 트렌드

3세대 무선 이동통신 이후 초고속 통신기술은 비약적으로 발전하여 우리 일상생활의 매우 많은 부분에서 중요한 역할을 하고 있다. 특히, 초고속 무선 통신망에 대한 세계 각국의 관심은 다양한 과학기술 분야에서 많은 발전을 가져왔고, 현재는 5세대 (이하 5G) 통신기술이 상용화 되기에 이르렀다 [1]. 우리나라는 2019년 4월, 상용 5세대 이동통신시스템 안정화 작업을 진행함과 동시에 전세계 최초 상용화라는 업적을 이루어 내기도 했다 [2]. COVID-19 시기에 재택근무, 비대면 의료서비스 이슈가 대두되고, OTT 서비스와 자율주행 자동차 등과 같은 다목적, 다기능 연결성 제공을 위한 첨단 정보통신 산업의 폭발적인 성장이 기대되자, 5세대 무선통신기술의 속도와 용량을 넘어선, 더 빠르고 정확한 정보의 송수신이 가능한 6세대 (이하 6G) 통신기술에 대한 필요성이 대두되었고, 관련수요가 증가하면서 전 세계적으로 6G 통신기술을 실현시키기 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다 [1-4].

2020년 발행된 삼성전자의 ‘6G 백서’에서는 6G 통신기술 실현의 조건으로 최대 데이터 송수신 속도 1,000 Gbps, 무선지연시간 100 msec (10⁻⁶초)로 기존 5G 기술대비 전송속도는 50배 빠르고, 무선지연 시간은 1/10로 단축시킬 수 있는 성능을 요구하며, 2028년에는 상용화되어 일상에서 사용할 수 있을 것으로 예상하고 있다 [5].



Figure 1. 6G Communication Technology Trend.

1.2. 초고속 통신용 인쇄회로기판 개요

인쇄회로기판 (printed circuit board, 이하 PCB)은 전자부품 제조공정에서 저항소재, 콘덴서 등의 다양한 전자부품들이 집적되고 신호 및 명령을 전달할 수 있도록 하는 회로로 구성되는 전자부품으로써, 기판소재라 함은 이들 부품들이 실장되고 회로가 그려지는 지지체 (substrate)를 의미한다 [6-8]. PCB는 그 형태와 물성을 유지하는 역할의 복합소재와 전기적 신호의 송수신 회로를 구성하기 위한 copper foil의 적층 구조로 이루어져 있다. Figure 2는 기본적인 PCB 용 기판소재의 적층 구조를 보여주고 있는데, 복합소재로 이루어진 코어 및 프리프레그는 여러 문헌에서 FR4로 명명되기도 한다. 이는, 대표적인 PCB 용 기판소재로 FR4 에폭시 수지 기반의 유리섬유 강화 복합소재 (glass fiber reinforced composite plastic, GFRP)가 널리 사용되기 때문이기도 하다. PCB의 내부 구조를 자세히 보면, 2개의 copper foil층 사이에 1개의 GFRP 층으로 이루어진 코어 (core) 층과 같이, 전도체인 copper foil 층 사이에는 절연체인 프리프레그가 삽입되어 있는 구조로 이루어져 있다. 이는, PCB에 부착된 부품간 전기적 신호간섭을 최소화하여 송수신 품질의 안정화를 위한 설계이다 [6-9]. 코어와 프리프레그는 동일한 소재로 구성될 수 있으나 각각 그 역할과 특성에서 차이를 가진다. 코어는 공정 초기에서부터 이미 경화된 상태로 제공되며, PCB를 구성하는 가장 중앙에 위치하여 내부 구조와 형태를 형성하는데 사용된다. 프리프레그는 주로 PCB의 각 층 간을 연결하는 역할을 하기 위하여 반경화 상태에서 최종 적층성형 시 열과 압력에 의하여 완전히 경화된다. 두 소재

모두 복합소재라는 측면에서는 동일하며 다층구조의 PCB 구조에서 중요한 역할을 한다.

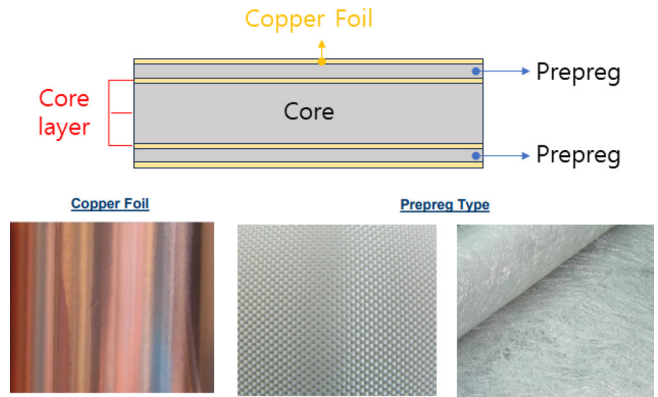


Figure 2. Basic structure of PCB substrate.

성형이 완료된 PCB 용 기판소재는 단순히 물성과 형태유지 뿐만 아니라, 전자부품들의 실장공정을 위한 함수율, 기계적 물성, 열팽창 계수, 타공성, 땀납과의 접착성 및 송수신 데이터 품질 평가를 위한 유전특성 등 다양한 신뢰성 시험을 만족해야만 한다 [9].

무선 통신기술에서 데이터의 송수신 처리속도는 주파수와 관련이 있다. 특히, 초고속 통신분야는 10 GHz~300 GHz 대역에 이르는 통신주파수를 이용하기 때문에, 파장이 매우 짧은 신호를 주고받게 된다. 주파수가 높을수록 동일 시간에 많은 데이터의 송수신이 가능하지만, 상대적으로 짧은 파장의 주파수대역을 사용하므로 주위 환경에 존재하는 산소, 수분 등에 의하여 에너지 흡수가 상대적으로 크게 발생할 수 있을 뿐만 아니라, 넓은 대역폭을 사용하기 때문에 발생하는 SNR (signal-to-noise ratio) 저하는 통화 및 데이터 송수신 품질저하의 주요 원인이 된다 [10]. Figure 3은 고주파수 대역에서의 산

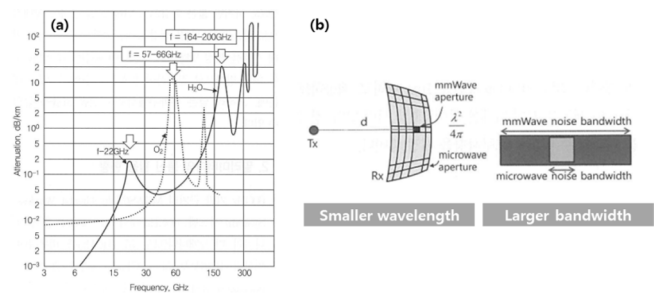


Figure 3. Signal attenuation trends (a) and loss Factors (b) due to Oxygen and Moisture [10].

소 및 수분에 의한 신호감쇄 특성과 신호손실 유발 요인을 나타내고 있다.

상기한 고주파수 신호의 손실특성은 자유공간에서 뿐만 아니라, PCB 기판소재를 구성하는 재료들의 특성에도 크게 영향을 받게 된다. 복합소재와 같은 고분자 재료는 전기장 (electric field) 을 통과할 때 분자의 이동이나 전기분극 (electric polarization) 등의 간섭으로 인해 일부 에너지를 흡수하는 경향이 있다. 이러한 경향성은 통신 신호의 손실을 야기시키는데, 이는 고분자 재료의 유전율에 의하여 영향을 받는다. 통신기술 분야에서 신호의 총 전송손실은 전도체 손실 (conductor loss)와 유전체 손실 (dielectric loss)의 합이며 아래 식1과 같이 표현된다.

$$\text{Transmission Loss}(\alpha_t) = \text{Conductor Loss}(\alpha_c) + \text{Dielectric Loss}(\alpha_d) \quad (\text{식 1})$$

유전체 손실은 전기장이 유전체를 통과하면서 발생하는 손실을 나타내며, 이는 유전체 내에서 발생하는 에너지 손실로 주로 유리섬유, 고분자 소재와 같은 비전도성 소재에서 나타난다.

유전체의 유전율은 식2와 같이 복소 유전율 (permittivity, ϵ) 로 표현된다. 실수부인 ϵ' 는 주로 유전체의 저장된 에너지인 유전상수 (dielectric constant, 이하 D_r)를 의미하며, 허수부인 ϵ'' 은 유전체의 에너지 손실인 유전손실 (dielectric loss)을 의미한다 [11,12]. 이를 이용하면 유전율의 손실 각도인 $\tan \delta$ (dissipation factor, D_f)를 식3과 같이 정의할 수 있다 [11].

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' \quad (\text{식 2})$$

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (\text{식 3})$$

Figure 4는 전체 주파수 대역에서의 유전율의 경향성을 나타낸다. 고분자 재료는 수많은 원자와 반복단위의 분자 집합체이며, 복합소재는 2개 이상의 고분자 재료들의 복합체로 구성되므로, 고분자 재료의 종류, 복합소재의 적층 설계 등 매우 다양한 요소의 제어를 통하여 유전특성을 제어하고 디자인할 수 있다는 장점이 있다.

앞서 언급한 5G~6G 고주파 대역에서의 초고속 통신기술 현실화는 신호의 송수신 시 발생하는 신호손실의 최소화가 관건이며, sub-terahertz (<1.0THz) 대역에서 저유전성을 가지는 고분자 및 이를 이용한 복합소재의 연구개발이 활발히 이루어지고 있다 [12-17]. 본 고에서는 복합소재를 중심으로 한 고속통신용 저유전성 PCB 기판소재의 연구개발 동향을 알아보고자 한다.

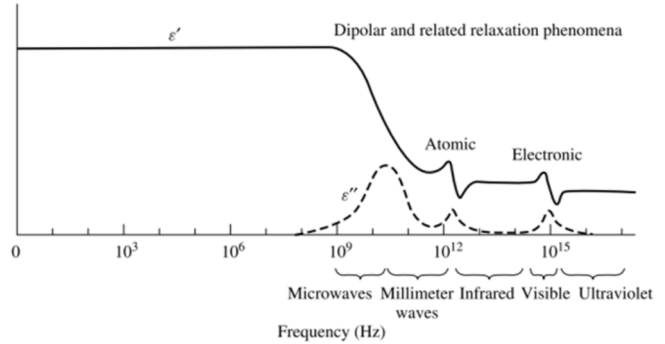
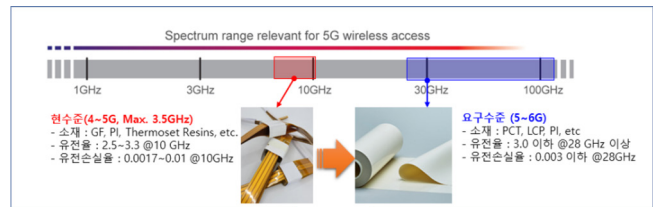


Figure 4. Frequency dependence of permittivity for a hypothetical dielectric [11]

2. 초고속 통신용 인쇄회로기판 국내외 시장현황

PCB는 전기를 사용하는 모든 기기에 필요한 부품으로, 기기 성능을 좌우하는 첨단 산업의 필수 부품이다. 특히, mmWave 대역의 통신 주파수를 사용하는 5G~6G 통신 분야의 고부가 가치 PCB 부품에 대한 수요가 가파르게 증가하고 있으며, 일본과 미국을 중심으로 PCB 소재 및 부품기술개발에 대한 투자를 높이는 추세에 있다. 우리나라는 세계 최고의 전자산업 인프라를 보유하고 있어 국내 원자재 수요 증대가 가능한 상황이므로 품질, 가격, 납기 및 장기신뢰성을 보증할 수 있는 소재 개발이 필요한 상황이라고 할 수 있다. Figure 5는 현재 상업화된 주파수 대역과 미래 영역인 5G~6G에서 요구되는 대표적인 소재의 종류와 수요산업에서 요구하는 유전특성을 보여주고 있다.



초고속 통신용 고주파 송수신 부품 개발을 통한 초연결시대 핵심 소재부품

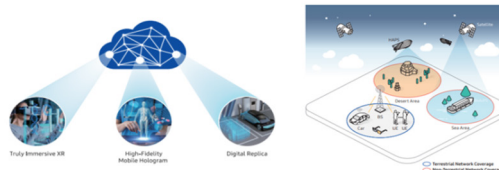


Figure 5. Performance requirements for ultra-high-speed communication technology.

초고속 통신용 PCB 부품이라고 하면, 일반적으로 모바일 기기의 안테나로 사용되는 연성 PCB 기판 (flexible PCB, F-PCB) 를 떠올리겠지만, 시장 규모 측면에서는 서버 및 중계기 등에 사용되는 경성 PCB (rigid PCB, R-PCB)가 시장의 대부분을 차지하고 있다. 이외에도 반도체 실장용, 디스플레이용 부품소재로 PCB 소재 및 부품은 매우 핵심적인 역할을 한다.

2000~2020년 전 세계 국가별 PCB 시장 점유율 성장 추이를 살펴보면, 우리나라는 중국 (26%)에 이어 13%로 2위를 기록하며 시장 규모 측면에서 큰 성장을 이루어 냈다. COVID-19 이후 온라인 생활이 대중화되고, 비대면 서비스 및 OTT 플랫폼의 폭발적인 성장으로 인하여 통신용 PCB 시장 규모는 2019년 총 12,260 백만\$에서 2021년에는 17,160 백만\$ 규모 (추정치)로 2020년~2021년 성장율은 총 21% 인 것으로 추정된다. Table 1은 2019~2026년 (예측치)의 주요 PCB 수요분야의 시장 점유율을 나타내는데, 통신부품과 직접적으로 관련된 시장인 Server/Data storage, Mobile Phones, Wired

Infrastructure, Wireless Infrastructure 시장이 가장 큰 점유율을 차지하는 것을 알 수 있다.

전 세계 PCB 공급망에서는 중국이 단연 가장 큰 비중을 차지하며 그 뒤로 일본 및 대만과 미국 등이 있다. 기업별로 보면 중국의 Zhen Ding Technology가 2020년 총 시장 규모인 39,600 백만\$ 중 4,440 백만\$로 가장 큰 공급사로 자리매김하며 관련 시장을 이끌고 있다. 우리나라 기업으로는 영풍그룹이 약 1,410 백만\$ 규모로 14위를 기록하였으며, LG 이노텍은 850 백만\$로 22위의 시장 점유율을 기록하였다.

3. 저유전성 유리섬유강화 복합소재

GFRP는 PCB 용 코어 및 프리프레그 보강 소재로 널리 사용되는 재료이다 [7]. 유리섬유는 우수한 전기적 특성, 낮은 흡수율과 고온 치수안정성으로 인하여 대표적인 PCB 복합소재용 강화섬유로 널리 사용되고 있다 [7,18-20].

PCB 복합소재 강화섬유로 사용되는 유리섬유의 종류로는 전기적, 열적, 물리적 특성에 따라서 다양하게 존재하며, PCB 적층 설계에 따라서 사용될 유리섬유의 섬도를 선택하게 된다. Table 2에는 PCB에 사용되는 유리섬유를 정리하였다. E-glass는 전통적으로 널리 사용되고 있는 보강용 소재이지만 고주파 대역에서의 D_k 와 D_f 가 높으므로, 고속통신용 PCB 소재로 사용되기에는 한계가 있다.

Table 1. Total PCB and substrate demand by application

\$M	2019	2020	2021E	2026F	2021E/2020	2021-2028 CAAGR
Computer: PC	9,160	11,190	14,780	14,690	32%	0%
Server/Data Storage	4,970	5,880	7,800	12,570	33%	10%
Other Computer	3,690	3,800	4,620	5,070	22%	2%
Mobile Phones	13,250	13,980	16,090	21,320	15%	6%
Wired Infrastructure	4,670	4,970	6,110	7,900	23%	5%
Wireless Infrastructure	2,610	2,770	3,240	4,240	17%	6%
Consumer	9,240	9,470	11,810	14,850	25%	5%
Automotive	7,000	6,510	8,190	11,770	26%	8%
Industrial	2,700	2,560	3,200	3,820	25%	4%
Medical	1,300	1,270	1,500	1,730	18%	3%
Military/Aerospace	2,730	2,820	3,110	3,600	10%	3%
Total	61,300	65,200	80,400	101,600	23%	5%

(Source) 한국실장산업협회, 「고속전송용 부품소재 기술 세미나」, 2022년

Table 2. Property of selected glass fibers

Property	Unit	E-glass	Low D_k glass	Ultra D_k glass	Quartz glass
Density	g/cm ³	2.5	2.3	2.2-2.3	2.2
CTE	ppm/°C	5.4	3.3	3.0-3.5	0.5
Modulus	GPa	77.2	62.1	50-60	70-78
D_k @10 GHz	-	6.6	4.7	4.3	3.7
D_f @10 GHz	-	0.006	0.0026	0.0018	0.001

최근 초고속 통신기술의 발달과 회로 및 실장부품들의 소형화, 집적화로 인하여 PCB 기판용 복합소재 분야에서는 두께가 얇고도 고주파 대역에서의 유전특성이 낮은 소재가 요구되고 있다 [19]. 이러한 수요로 인하여 GFRP에 사용되는 보강소재의 선정에 있어서 낮은 섬도를 가지는 유리섬유가 채택되고

있다. 낮은 섬도의 유리섬유는 PCB의 두께 저감에 유용하지만 복합소재 내부에 많은 기공과 수지함량의 증가를 야기하게 되고, Figure 5에서 볼 수 있듯이 회로 선상에 유리섬유의 존재 유무에 따라서 유전특성에 차이가 발생하여 불안정한 신호 송수신 특성을 나타낼 우려가 있다 [21].

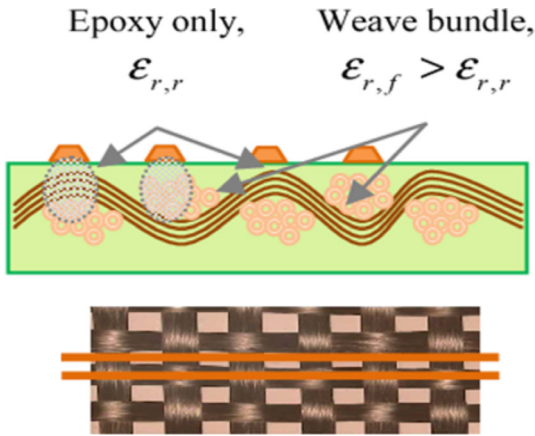


Figure 6. Traces with different substrates, different dielectric permittivities with non-spreading glass cloth.

유리섬유 섬도에 따른 불안정한 유전특성 극복을 위하여 유리섬유 개선 (spreading)을 이용한 복합소재 개발 연구가 진행된 바 있다 [18,21,22]. Bei Chen 등은 유리섬유를 개선하여 PCB 복합소재용 보강재로 사용한 결과, Figure 6에서 볼 수 있듯이 개선된 유리섬유를 사용한 GFRP가 일반 유리섬유를 사용한 GFRP 대비 안정적인 유전특성을 가질 수 있음을 보고하였다 [18]. 특히, 개선된 유리섬유를 사용한 GFRP의 Δphase¹⁾의 차이가 확연히 감소하는 모습을 보이는데, 이는 복합소재 내의 기공이 감소함에 따라서 해당 주파수 대역에서의 신호 전달 품질이 향상될 수 있음을 의미한다.

유리섬유의 개선화 뿐만 아니라, 저섬도의 저유전성 유리섬유를 고밀도로 제작하여 복합소재내 기공을 저감하고 복합소재의 전체 면적에서 유리섬유가 차지하는 면적을 극대화하여 유전특성을 안정화시키는 방법 또한 충분히 고려할 수 있다. Panasonic Industry (일본)는 개선된 유리섬유 소재가 사용된 GFRP를 이용하여 15 μm 미만의 박막 저유전성 PCB 기판인 LEXCM^{GX} R-G740M을 출시한 바 있다. R-G740M에 사용

된 유리섬유의 직경은 4 μm 미만이며 경사 및 위사수는 각각 105 ea/inch와 110 ea/inch, 두께는 약 10 μm 이다. R-G740M의 D_k 및 D_f는 10 GHz에서 각각 2.6, 0.0031로, 기존 파나소닉의 저유전성 GFRP 기판인 R-G540L 대비 두께가 감소하였으며, 개선된 저유전 특성을 보여준다.

4. 저유전성 고분자 복합소재

5G 이상의 초고속 통신용 PCB 소재분야에서는 기존에 주로 사용되던 FR4 기반의 GFRP 이외, 더 얇고 안정적이며 낮은 유전특성을 가지는 소재의 개발이 매우 활발히 이루어지고 있다. 주로 F-PCB 분야에 필름형태로 사용이 되며, 대표적인 소재로는 polytetrafluoro ethylene (PTFE), polyimide(PI) 및 liquid crystal polyester (LCP)가 있다. Figure 7에서는 10 GHz 대역에서의 각 고분자 수지별 D_k와 D_f 값을 볼 수 있는데 [23], 5G 스마트폰 안테나용 F-PCB 소재로써 PI와 LCP가 적용된 사례가 있다. Table 3에 고주파수 대역에서 사용 가능한 주요 고분자 소재들의 유전특성, 열적특성 및 흡수율을 정리하였다.

Rogers Corporation (미국)은 PTFE기반의 고주파 PCB 소재로써 RO4000[®] series를 출시하였다. RO4000[®] series는 30 GHz의 고주파 대역에서 안정적인 신호의 송수신 성능과 낮은 유전특성을 가진다 (Figure 8). 유전특성 및 흡수율 측면에서 PTFE가 저유전성 PCB 소재로 최적일 수 있으나, 접착제,

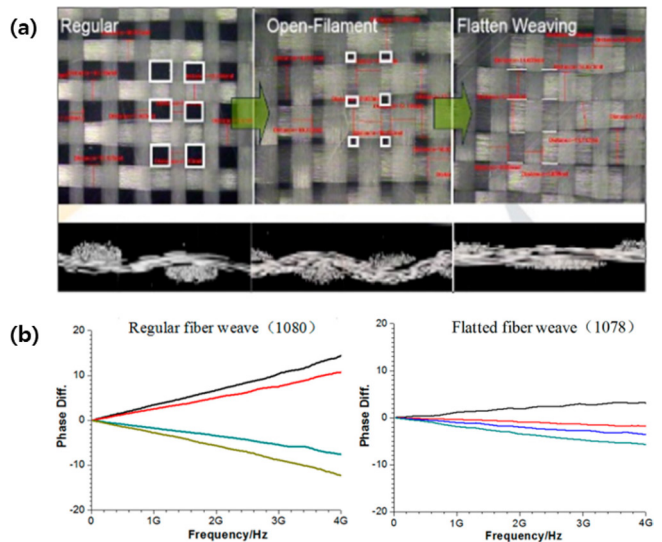


Figure 7. The structure(a) and Δphase(b) of regular weaves and flattened fiber weaves^[18].

¹⁾ ΔPhase: 주로 신호 처리나 통신 시스템의 컨셉에서 사용되는 용어 중 하나로써, 통신 기술분야에서는 두 신호 또는 두 시점 간의 위상차이를 의미한다.

Table 3. Various polymers for high frequency PCBs.

Material	Dk	Df	Tg (°C)	Tm (°C)	CTE (ppm/k)	W/A (%)	Frequency (GHz)
PTFE	2.1	0,0015	240	265	110	0,02	<100
LCP	2.9	0,0021	205	288	17	0,05	<100
PPS	2.2	0,0023	>88	280	30	0,02	-
PEEK	3,3	0,0030	143	323	47	0,20	-
m-PI	3,5	0,0028	380	-	18	0,50	<15
PI	3,2	0,0070	430	-	16	1,30	<5
PP	2,4	0,0008	-	145	-	0,06	>6

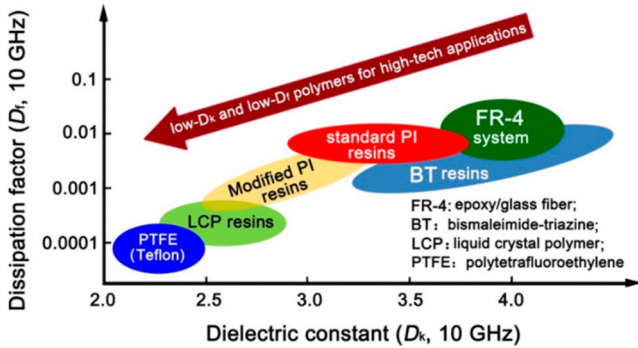
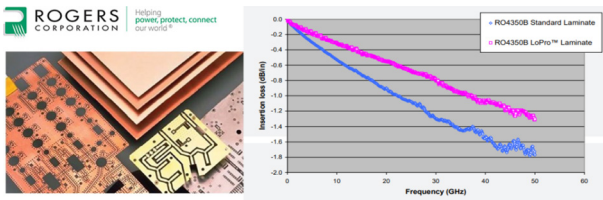


Figure 8. Common low-Dk and low-Df polymers reported in the literature.^[23]

copper foil, 땀납과의 낮은 상용성과 높은 CTE(coefficient of thermal expansion, 열팽창계수) 및 비싼 가격으로 인하여 PCB 용 소재로서 사용되기에 다소 어려운 점이 문제가 되고 있다.



(Source) Rogers Corp. RO4000® LoPro® series Catalogue

Figure 9. The insertion loss of RO4000 series with different copper foil types.

30 GHz 이상의 고주파 대역에서 현재 가장 많은 관심을 받고 있는 고분자 소재는 열방성 액정 고분자 (thermotropic liquid crystal polymer) 인 LCP 소재이다 [24,25]. LCP는 고온에서 액정성을 가지는 열가소성 액정고분자로서, 섬유소재로

는 Kuraray (일본)의 VectranTM으로 잘 알려져 있다. VectranTM의 원료 수지는 Polyplastics (일본) 및 Celanese의 A950 수지이며, HBA (hydroxybenzoic acid)와 HNA (hydroxynaphthoic acid)의 축합반응으로 합성된 공중합체이다 [26]. LCP는 HBA 및 HNA 뿐만 아니라, terephthalic acid (TA)와 같은 방향족 고리환을 가진 단량체들의 공중합을 통하여 다양한 전기적 특성을 가지는 고분자 소재를 합성할 수 있다 [27].

LCP의 가장 큰 장점으로는, 사출성형 뿐만 아니라 섬유, 부직포 및 필름 등 다양한 형태로의 성형이 매우 자유롭다는 것이다. 우리 연구진은 LCP 섬유 직물과 E-glass 섬유직물을 이용한 복합소재의 유전상수를 측정하였는데, 초고주파 영역인 100 GHz에서의 유전상수는 각각 4.28과 3.07로 측정되어 LCP 섬유를 복합소재의 보강재로 사용할 경우, 유전특성이 상당한 수준으로 개선되었다. Table 4와 Figure 9에는 각각 GFRP와 LCP FRP의 유전특성 측정결과와 측정에 사용된 PCB 용 복합소재 샘플 사진을 정리하였다.

Table 4. Comparison of the dielectric constants of glass and LCP fiber reinforced composites.

Fiber	GFRP	LCP FRP			
		Commercial	Low D _k		
Resin	Commercial	Commercial	B10	B20	A
Defined	SL3	SL3			
D _k @100 GHz	4,2852	3,0713	3,1588	3,0097	3,18



Figure 10. Photographs of glass and LCP fiber reinforced composite samples.

LCP는 연속섬유 뿐만 아니라, Melt blown 부직포 (이하 MB 부직포)로 방사할 수도 있다. Murata Manufacturing (일본)에서는 Kuraray의 LCP MB 부직포인 VecrusTM을 적용하여 저유전성 PCB인 MetroCirc[®]를 출시하였으며, 일부 5G 용 스마트폰에 적용한 사례가 있다. MetroCirc[®]는 5G mmWave의 주파수 대역에서 PI나 m-PI 대비 20~50% 이상 전송손실 특성이 개선된 결과를 보여준다 (Figure 10). 그러나, LCP 소재의 우수

한 유전특성에도 불구하고, 성형 공정에서의 정밀한 조건 제어와 PCB 기판 제조공정에서 사용되는 상용성 접착제의 개발 등 기술적 장벽이 매우 높다. 최근, 국내 연구진을 통하여 LCP를 이용한 6G 용 안테나의 개발을 위한 LCP 수지, 성형 및 초고속 통신용 PCB 기판의 개발이 진행되고 있어, 향후 국산화에 대한 기대가 매우 높다.

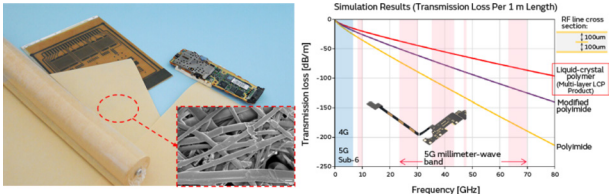


Figure 11. A Photograph of Kuraray VECTRUS™ and the transmission loss of MicroCirc.

5. 맺음말

지금까지 본지에서는 고속통신 PCB 용 복합소재의 이론적 배경과 몇몇 예시를 통한 연구개발 동향을 살펴보았다. 무인항공기, 자율주행 자동차 및 대용량 무선정보 처리용 PCB 개발에 있어서 섬유 및 고분자 소재는 매우 중요한 부분일 것이다.

전통적인 PCB 소재의 한계로 인하여 ~THz 대역까지 확장된 초고주파 대역에서의 안정적인 송수신 품질 향상을 위해서는 저유전성 섬유 및 고분자 소재의 연구개발이 매우 중요하며, 미래 고부가가치 소재부품 시장에서의 기술경쟁력 확보에 필수적인 기술분야이다. 국내 연구분야에서 PCB 용 복합소재 분야의 기술확보는 미미한 수준인 반면에 일본, 유럽, 미국 등 선진국에서는 섬유공학과 전기전자분야의 전문가들을 중심으로 6G를 향한 미래기술 확보에 전력을 다하고 있다.

5G 상용화를 최초로 성공한 대한민국은 고속통신용 소재부품 분야에서는 선진국과의 기술격차가 점차 벌어지는 상황이지만, 몇몇 관련기술 연구의 진전 또한 있는 것이 분명하다. 하지만, 지속적인 R&D 투자와 연구개발을 통하여 선진국과의 기술격차를 극복하지 못한다면 미래 핵심기술에 대한 해외 기술의존도 심화를 피할 수 없을 것이다. 이러한 측면에서 저유전성 섬유 및 고분자 복합소재의 기술개발과 산업간 기술융합은 매우 중요하다고 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2023년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국

산업기술기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 20024820, 2023년 소재부품기술개발사업).

참고문헌

- George, A.s. and S.Sagayarajan, *Exploring the Potential and Limitations of 5G Technology: A Unique Perspective*, PUIIJ, 2023, 1(2).
- 예충일, et al., *6G 비전, 서비스 및 기술 동향*. 한국통신학회지 (정보와통신), 2020, 37(2): p. 11-22.
- 나용수, 박래혁, *차세대 6G 모바일 통신 핵심 기술 동향*. 한국통신학회 학술대회논문집, 2022: p. 1850-1851.
- Hong, W., et al., *The role of millimeter-wave technologies in 5G/6G wireless communications*. IEEE Journal of Microwaves, 2021, 1(1): p. 101-122.
- The Next Hyper Connected Experience for All*, 2020, Samsung Research Center.
- Kpobie, W., et al., *Thermo-mechanical simulation of PCB with embedded components*. Microelectronics Reliability, 2016, 65: p. 108-130.
- Girard, G., et al., *Experimental and numerical characterization of thin woven composites used in printed circuit boards for high frequency applications*. Composite Structures, 2018, 193: p. 140-153.
- Bhavsar, N.R., H. Shinde, and M. Bhat, *Determination of mechanical properties of PCB*. International Journal on Mechanical Engineering and Robotics, 2014, 2(4): p. 23-27.
- Rao, C.S., S. Tunga, and A. Kumar. *Analysis of high speed design on a multilayer PCB substrate*. in *2021 International Conference on Recent Trends on Electronics, Information, Communication & Technology (RTEICT)*. 2021. IEEE.
- 홍승은, 김일규, 방승찬, *밀리미터파 활용 5세대 이동통신 기술 개발 동향*. [ETRI] 전자통신동향분석, 2013, 28(6): p. 107-117.
- Chen, L.-F., et al., *Microwave electronics: measurement and materials characterization*, 2004: John Wiley & Sons.
- Janezic, M.D., N. Paulter, and J. Blendell, *Dielectric and conductor-loss characterization and measurements*

- on electronic packaging materials, NIST Technical note, 2001, **1520**.
13. Apeldorn, T., F. Wolff-Fabris, and V. Altstädt, *High-performance substrate based on a highly filled thermoplastic polymer*, Circuit World, 2011, **37**(1): p. 4–14.
 14. Salameh, A.I. and M. El Tarhuni, *From 5G to 6G—Challenges, Technologies, and Applications*, Future Internet, 2022, **14**(4): p. 117.
 15. Hinaga, S., et al., *Thermal effects on PCB laminate material dielectric constant and dissipation factor*, IPC APEX EXPO, 2010.
 16. Li, H.-M., et al., *Frequency and temperature dependence of the dielectric properties of a PCB substrate for advanced packaging applications*, Journal of the Korean Physical Society, 2009, **54**(3): p. 1096–1099.
 17. Zhou, Z., et al., *Flexible Liquid Crystal Polymer Technologies from Microwave to Terahertz Frequencies*, Molecules, 2022, **27**(4): p. 1336.
 18. Chen, B., et al., *Effect of Fiber Weave Structure in Printed Circuit Boards on Signal Transmission Characteristics*, Applied Sciences, 2019, **9**(2): p. 353.
 19. Morgan, A., *Developments in glass yarns and fabric constructions*, The PCB magazine, 2014: p. 78–88.
 20. Naito, K., et al., *Dielectric properties of woven fabric glass fiber reinforced polymer–matrix composites in the THz frequency range*, Composites Science and Technology, 2009, **69**(11): p. 2027–2029.
 21. Bucur, D.M., *Fiber Weave Effect – a performance-limiting factor*, 2014 10th International Conference on Communications (COMM), 2014: p. 1–4.
 22. Dudek, R., J. Kuhn, and P. Goldman, *Opening eyes on fiber weave and CAF*, Technical Paper from Mentor Graphics, 2009.
 23. Huangfu, M.-G., et al., *Preparation and Characterization of Electrospun Fluoro-Containing Poly(imide-benzoxazole) Nano-Fibrous Membranes with Low Dielectric Constants and High Thermal Stability*, Nanomaterials, 2021, **11**(2): p. 537.
 24. Lee, W.C. and A.T. Dibenedetto, *Processing of thermotropic liquid crystalline polymers and their blends—analysis of an in-situ LCP composite system*, Polymer Engineering & Science, 1992, **32**(6): p. 400–408.
 25. Ji, Y., et al., *Progress of liquid crystal polyester (LCP) for 5G application*, Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2020, **3**(4): p. 160–174.
 26. McIntyre, J., *Liquid crystalline polymers, in Structure and properties of oriented polymers*, 1997, Springer, p. 447–514.
 27. Collyer, A. and D. Acierno, *Rheology and processing of liquid crystal polymers*, 1996: Chapman & Hall.