

제 7 장 5G 통신소자용 저유전성 폴리이미드 소재

김윤호

1. 초연결 지능화 시대와 5G 통신

- 인공지능, 빅데이터, IoT, 자율 주행차, 원격진료 등 초연결 지능화 시대에 들어섬에 따라, 스마트폰과 같은 다양한 전자 기기의 개발과 보급이 가속화되고 있음.
- 이에 따라, 초고속, 대용량의 데이터를 무선으로 전송할 수 있는 5G 통신 기술의 중요성이 매우 커지고 있으며, 스마트폰 단말기를 비롯한 통신 기기에 사용되는 통신용 부품 소재 및 부품 소자에 대한 시장 규모가 2020년을 기점으로 2026년까지 기하급수적으로 팽창, 약 2.3 billion US\$(14,000톤/년)에 이를 것으로 예측되고 있음.(Lux Research 보고서 자료)

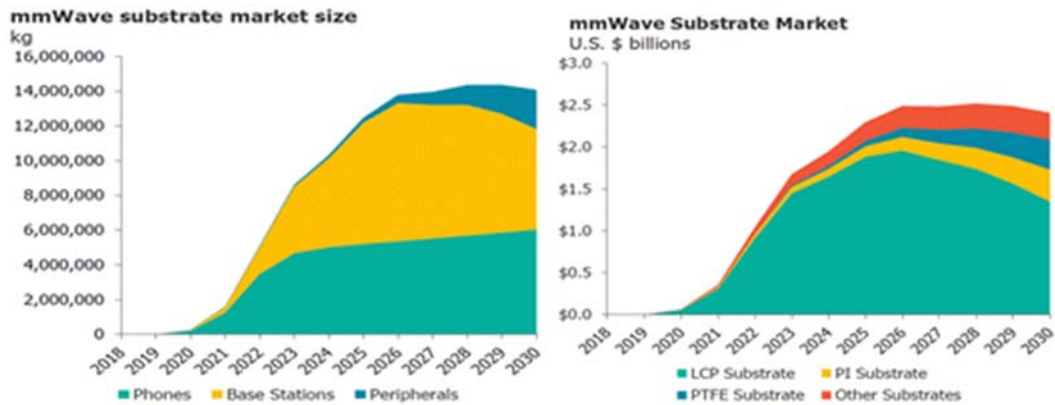


그림 1. 통신 부품 소재 시장 예측

- 5G 통신은 고주파대(Sub-6 및 28 GHz 대역)에서 속도·용량 및 다중 단말 동시 접속 측면에서 장점이 크나, 고주파대 전파 신호의 도달 거리가 짧기 때문에 기지국 안테나도 촘촘히 많이 설치해야하며, 무엇보다 신호의 지연을 최소화하면서 고속으로 신호 처리를 하기 위해서 안테나를 비롯한 통신 회로의 품질 또한 매우 중요함.
- 통신 회로의 주요 구성 소재는 간단하게 고분자 유전 기재, 점착제, 전도성 구리막으로 이루어져 있음. 이전의 통신 방식에서 차세대 5G 통신으로 바뀌면서, 통신 회로 또한 5G의 고주파 신호에 대한 신호 손실이나 지연을 최소화할 수 있도록 개선이 필요함. 특히, 전파 신호의 주파수가 높아질수록 전송 신호가 회로 표면을 흐르는 표피효과가 발생하여 신호 지연이나 손실이 발생하게 되는데, 이를 방지, 고속으로 데이터를 전송하기 위해서는 동박의 두께를 얇게, 표면의 조도는 낮게 하는 것이 매우 중요하며, 고밀도, 협피치 회로 구현에 용이하고, 에칭 등 폐액들의 배출이

나 공정 단계를 최소화하여 친환경성을 만족하면서도, 경제성, 양산성을 갖는 제조 기술을 확보해 나가야 함. 이와 함께, 유전 기재는 전파의 손실을 최소화하기 위해 유전상수가 낮고, 저유전 손실 특성이 우수해야 하며, 구리 극박 계면과의 접착 특성이 우수해야 하며, 열, 수분 등에 대한 안정성 및 가공성, 경제성 등을 만족 시켜나가야 함.

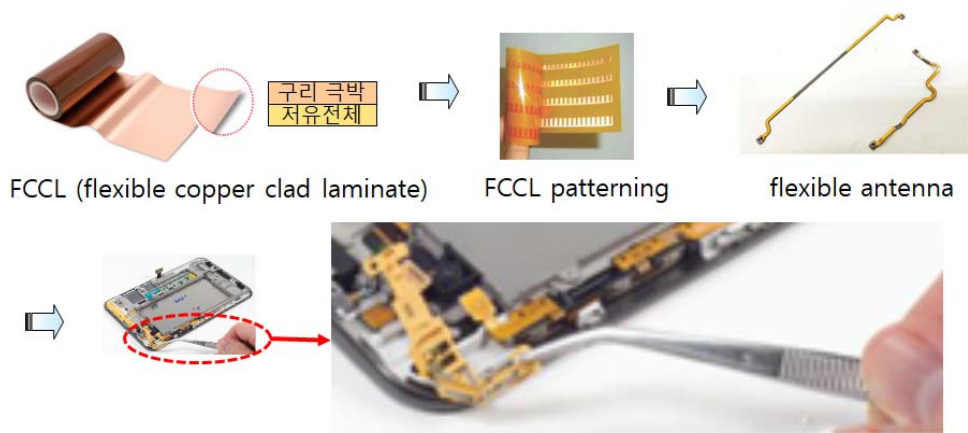
2. 5G 급 대응 저유전체

- 5G 통신용 주파수(Sub-6 및 28 GHz) 대역에 사용하는 유전체 기재의 경우는 전파 손실을 최소화하기 위해 무엇보다 유전율(Dk)과 유전손실(Df)이 낮아야 하기 때문에, 기존 4G LTE 통신에 주로 사용되던 폴리이미드(PI)는 사용이 어려움.

- 미국 애플사는 이에 대응하기 위해 2018년부터 아이폰에 LCP 소재를 채택하기 시작하였고, 현재는 고주파 대응이 가능한 변형 폴리이미드(Modified PI: MPI), 용매 캐스팅이 가능한 LCP, 올레핀계, 에폭시계, PPS와 같은 다양한 소재를 개발해나가고 있음. 차세대 통신의 궁극적인 주파수인 28GHz 전후의 밀리미터파(mmWave) 대역에서 유전손실이 낮고, 우수한 내흡습성, 구리 극박과의 높은 접착력, 접합 공정 및 다층 적층을 위한 내열성과 공정성을 갖는 차세대 저유전 소재 개발 또한 향후 통신 시장 선점을 위해서는 매우 중요함



그림 2. 스마트폰 탑재되는 4G/5G용 안테나 비교



핸드폰에 장착된 유연성 안테나의 예

그림 3. 5G 대응 FCCL용 저유전체 및 유연성 안테나

◦ 5G급 대응 저유전체 관련 국내 기술 동향

- 현재 PI(polyimide) 기반의 필름은 SKCKOLONPI에서, FCCL은 넥스플렉스, (주)두산전자BG, CFT(구; LS엠트론), (주)삼성전기에서 대량 생산중이며 커버레이는 이녹스첨단소재와 한화첨단소재에서 대량 생산중임
- 국내 스마트폰 업체들은 유전율을 낮춘 FPCB 안테나를 검토 중으로 파트론 등의 안테나 업체, 코리아씨키트 등 모듈업체 등도 고주파 대역 대응 소재 개발을 애타게 기다리고 있음.
- 고주파대역에서 손실계수가 낮은 LCP는 저손실소재로서 국내 생산이 전무하며 기존에 채용하던 폴리이미드계 소재의 물성을 향상시켜 고주파 대응용 소재로 적용시키기 위한 연구, 올레핀계, 에폭시계 등 다양한 소재를 각사에서 연구 및 개발 중임.
- 세양폴리머는 중합 및 컴파운드 기술을 개발하고 있으며 2019년 China 전시회에서 LCP 샘플을 전시하고 중국의 화웨이, 오포 등 단말기업체에 안테나를 공급하는 기업들과 공동개발하고 있다고 발표하였음.
- 진영글로벌은 SKC에서 생산하는 PCT(polycyclohexylene dimethylene terephthalate)필름을 이용한 28 GHz 대역급 안테나 전송선과 피복소재를 개발하였다고 발표함.
- 이녹스첨단소재는 올레핀계의 본딩쉬트용 저유전 소재, 일진머티리얼즈는 고주파 대역에서 사용 가능한 저조도 동박 채용 FCCL, SKCKOLONPI는 저유전특성 발현 core 폴리이미드 필름 등 고주파

대역 대응의 다양한 소재를 개발 중임.

◦ 5G급 대응 저유전체 관련 국외 기술 동향

- 안테나용 FPCB 분야에서 가장 높은 기술을 보유한 나라는 일본이며 미국과 대만이 그 뒤를 따르고 있음

- Apple 사에서는 아이폰8 제품부터 종래에 동박과 폴리이미드로 구성되어 사용되던 FPCB 안테나를 저조도 동박과 접합하는 LCP 소재 (MetroCirc, 무라타제작소)를 채택하기도 하였음.

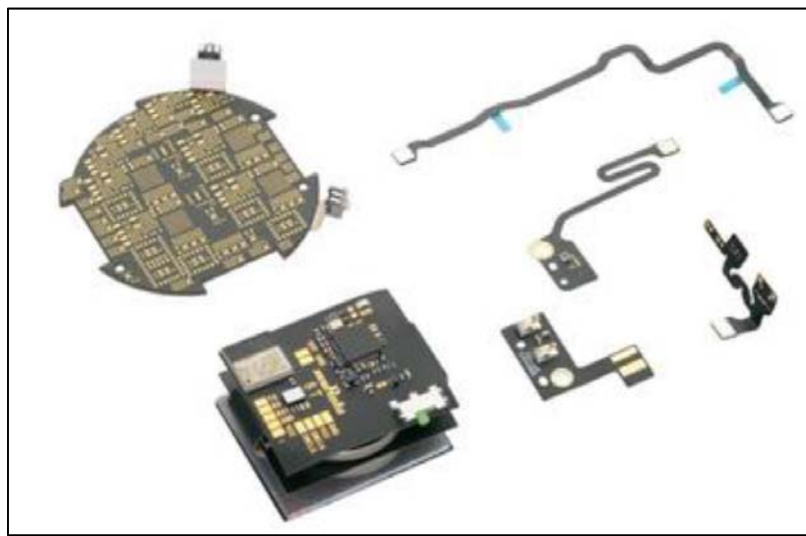


그림 4. 무라타제작소의 유연다층기판 MetroCirc 제품 예

- TF International의 애널리스트인 Ming-Chi Kuo는 "수정된 폴리이미드(MPI)가 Liquid Crystal Polymer (LCP)를 대체하고 하반기 새로운 iPhone 모델의 주류 안테나 기술이 될 것으로 예상된다"고 밝혔음 (2018.11.10., Internet 자료) 이는 FCCL 제조 공정이 폴리이미드 필름을 사용하는 구조로 생산라인이 구성되어 있어 LCP를 사용하는 공정으로 설비를 수정하는 것 보다는 기존 공정으로 적용하기를 모듈업체가 선호하고 있으므로 MPI가 개발되어 적용되기를 희망함을 의미함. 또한 LCP의 단점을 보완한 MPI가 이미 개발되고 있음을 시사하는 것으로 그 이후로도 현재까지 진행 중임.

- 스미토모화학은 코팅공정이 가능한 LCP를 최근 개발하였다고 발표하였으며, AGC사는 유리와 불소수지로 된 5G 통신용 안테나 소재를, Toray 사는 dipole moment를 작게하는 구조를 도입한 MPI와 폴리페닐렌설피드(PPS)를 개발하였다고 발표하였음.

- 파나소닉, Rogers Corporation은 LCP 필름을 구입하여 FCCL을 생산하고 있으며, PPE (polyphenylene ether)를 열경화 타입의 필름으로 NAMICS사, RISHO(利昌工業)가 제품화하고 있음.
- 변성 에폭시계의 고주파 필름 재료는 아지노모토파인테크노, 세키스이화학공업(積水化學工業)이 에폭시 수지를 base로 한 cyanate ester 변성 수지 또는 활성에스테르를 경화제로 사용하여 양호한 고주파 특성을 갖게 한 필름의 제품화를 위해 노력하고 있으며, JXTG Energy사 및 미츠비씨케미칼도 에폭시수지를 개발하였다고 발표하였음.
- DuPont은 폴리이미드의 주쇄에 분극형의 작은 구조를 도입한 저유전 폴리이미드를, 히타치화성은 말레이미드를 도입한 필름을 제품화하고 있음.

기업	substrate 소재	특징	특성 및 기타
무라타제작소	LCP	필름 자체생산, 가공기술	2017년부터 아이폰에 채용, <MetroCirc>, 세계시장 주도
AGC	불소계 수지 PPE계 수지	고품질 CCL	CCL기업 M&A : Taconic, Park Electrochemical 사
스미토모화학	LCP	용융 필름, 솔루션 코팅	LCP 소재 강함
쿠라레	LCP	내열성, 필름 및 FCCL	LCP 필름 : <Vecstar>
공동기연화학(KGK)	LCD	등박에 직접 LCD 필름 제작하여 FCCL 생산	횡방향 특성 개선, 분자 레벨 결합으로 접착층 없음
토레이	PI, PPS	내열, 접착, 저가격 고내열, 치수안정성	PI : Df 0.001 PPS : 내열온도 40°C 개선
카네카	PI	초고내열 PI (Pexio SR) FCCL 생산	Df : 기존 PI의 1/2(0.004)
일철케미칼 & 머티리얼	PI	등박에 PI Cast, 접착성	<에스파넥스> F(핸드폰), Z(기지국) series
미츠비씨화학	에폭시	중분자 타입, 접착성	Dk 2.6, Df 0.0055
신에츠	열경화성 수지	내습성, 등박접착성	Dk<2.5, Df < 0.0025
JSR	열경화성 수지	내고온습도성, 등박밀착성	
JXTG Energy	에폭시 LCP	특수 모노머 혼합	Df 0.0095
Rogers	LCP, 불소계 수지 등	불소계 등 다양한 제품	자동차, 우주산업용 등
Isola	탈화수소계 에폭시계	불소계 대체 노력	통신 인프라, 차량용 등

그림 5. 다양한 저유전체 개발 동향

3. 5G 급 대응 저유전 변성 폴리이미드

- 5G급 초고속 통신소자 구현을 위해서는 메모리, 디스플레이, 수동소자, 배터리 등 다양한 부품에서의 전방위적 혁신이 필요함. 특히, 전자소자용 회로기판 관점에서 볼 때, 통신손실 최소화를 위한 소재 및 공정기술이 요구됨.
- 회로기판에서 발생하는 전송손실은 1) 절연재료에서 발생하는 유전손실(Dielectric Loss)와 2) 절연체와 전극사이에서 발생하는 전도손실 (Conductor Loss)로 이루어져 있음.

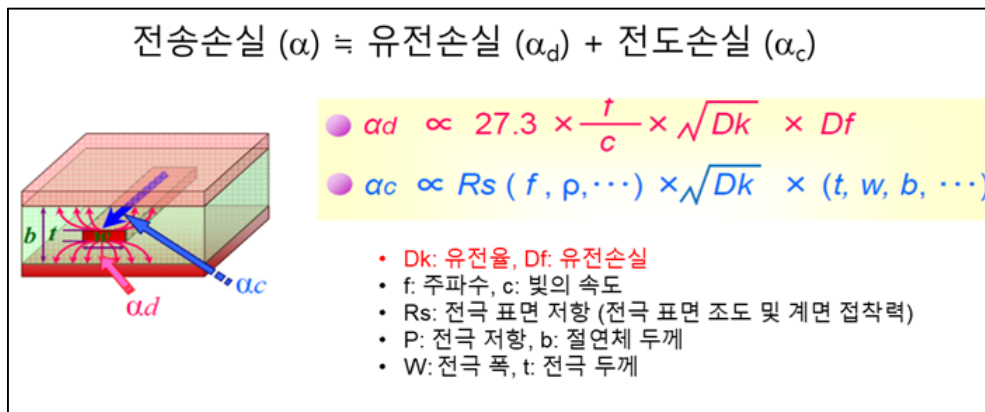


그림 6. 통신 회로기판에서의 전송 손실 요소

- 유전손실은 절연소재가 가지는 고유한 유전특성과 관계가 있으며, 유전손실을 줄이기 위해서는 낮은 유전율 (Dk)과 유전손실 (Df)값을 가지는 절연소재가 요구됨.
- 또한, 고주파 대역에서는 자속이 빨라져 회로 전극의 표피층에만 신호가 흐르게 되므로 신호의 전도손실을 줄이기 위해 저조도 동박을 사용하게 됨에 따라 절연층으로 사용하는 고분자 소재와의 접착력이 떨어지는 문제점이 있음.
- 현재 전자기기 모듈업체에서는 폴리이미드 필름을 사용하는 생산 공정라인이 구축되어 있으나, 향후 더 높은 주파수 영역에 대응할 수 있는 저유전 특성을 가지는 폴리이미드 소재 개발이 요구되고 있음.
- 한국화학연구원에서는 차세대 전자회로기판 제조를 위한 고내열 및 접착력이 향상된 폴리이미드 수지 개발에 관한 연구를 유니코정밀화학과 진행하여 2013년에 기술이전 한 바 있음. 또한 포토리소그래피를 이용하여 미세패턴화가 가능하며 매우 낮은 Df 값을 가지는 경화형 변성 폴리이미드 수지 개발 연구를 수행하고 있음.
- 산업계에서는 두산전자, 도레이첨단소재에서 낮은 Dk, Df를 확보하는 동시에 저흡수율, 고내열

성의 특성을 갖는 폴리이미드 5G용 전자부품소재를 적극적으로 개발하고 있음.

- 이녹스첨단소재는 본딩쉬트용 저유전 소재, PI첨단소재와 넥스플렉스 등은 저유전특성 발현 core 폴리이미드 필름 등 고주파 대역 대응 가능한 다양한 저유전성 변성 폴리이미드 소재를 개발 중임.
- 현재까지 보고된 초고주파용 저유전성 변성 폴리이미드의 주요 성능 지표를 아래 그림에 정리하였음. 경쟁 소재인 LCP 대비, 내열성, 공정성, 기계적 강도는 우수한 반면, 유전손실과 흡습율 측면에서는 성능 향상이 필요함.

	mPI_DuPont	mPI_Kaneka	mPI_Nippon Steel	mPI_Toray	mPI_Arakawa
상품명	Pyralux_TA (or HXL)	PIXEO_SR	Espanex	LDA	PIAD_130H
유전율	3.2 @ 10 GHz	3.1-3.2 @ 10 GHz	3.3 @ 10 GHz	2.9 @ 20GHz	2.5 @ 10 GHz
유전손실	0.003 @ 10 GHz	0.006-0.01 @ 10 GHz	0.0031 @ 10 GHz	0.003 @ 20GHz	0.0017 @ 10 GHz
CTE (ppm/°C)	-	-	-	46	> 100
흡습율 (%)	-	0.7	0.8	0.6	0.5
인장강도 (MPa)	-	-	420	136	6.9
Solder Float (°C)	260°C, 10 sec	Pass @ 288°C	Pass @ 380°C	350	-
Tg (°C)	-	-	-	224	80
접착력	1.0 kgf/cm	-	1.2-1.7 kN/m	6 kN/m	-

출처: 고주파 필름/기재의 기술 시장 전망 (2019), 재팬 마케팅 서베이

그림 7. 상용화 되어 있는 변성 폴리이미드 소재 종류 및 성능 지표

- 최근 동경공대 Ando 그룹과 대만의 Chen 그룹은 다양한 폴리이미드의 관능기 그룹을 제어하여 10GHz 이상의 고주파 영역에서 폴리이미드의 유전특성 (유전율과 유전손실)에 대한 상관관계에 대해 보고하였음. ether, fluorine, ester, amide, ketone, sulfide, sulfone, and alkane 그룹을 포함하는 총 36종의 폴리이미드를 중합하였음. 불소 함량이 높아질수록 유전율과 유전손실을 줄일 수 있었으며, ether 그룹이 도입될 경우 유전손실을 줄일 수 있음을 실험적으로 밝혀내었음. 이러한 기초 연구 결과를 바탕으로 저유전 변성 폴리이미드의 분자설계에 적용될 수 있을 것으로 판단됨. 그러나 동박과의 접착력이나 난연특성과 같은 성능에 대한 보완도 고려되어야 함.

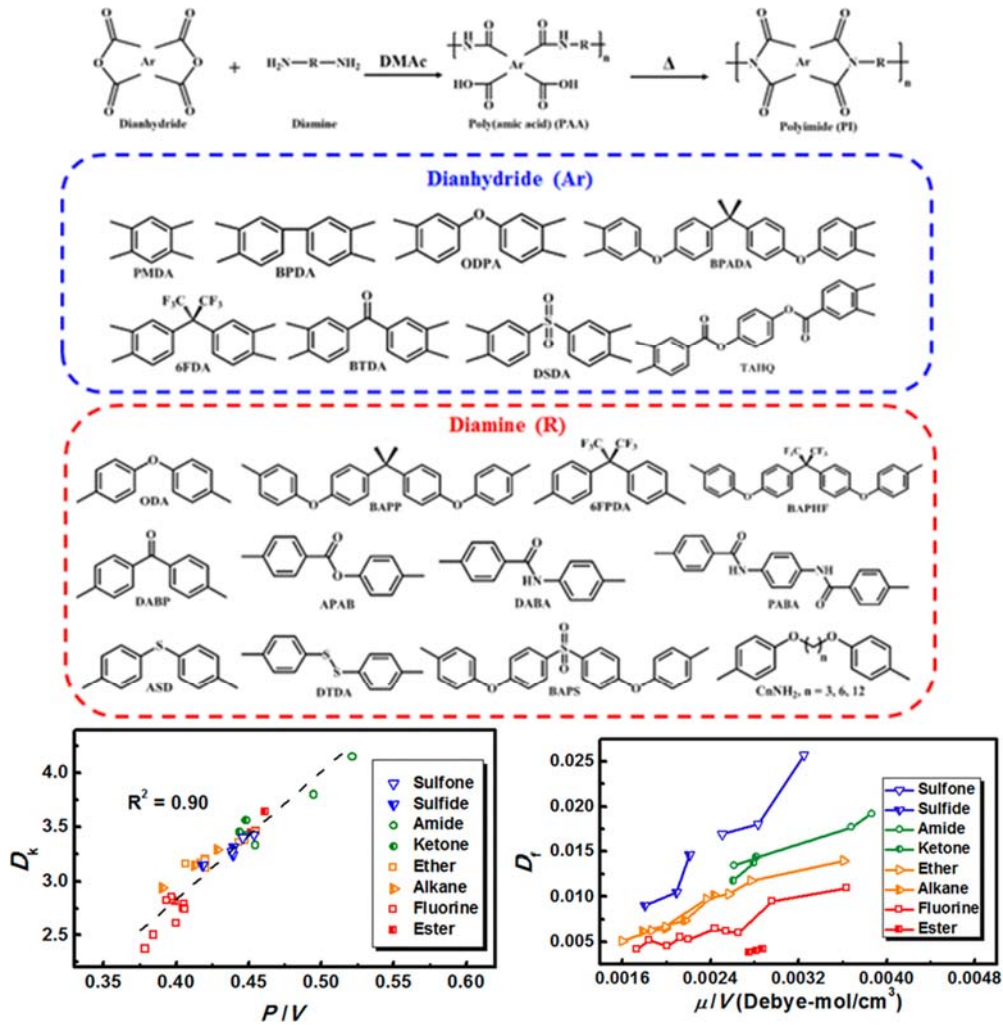


그림 8. 저유전 특성 폴리이미드 개발을 위한 다양한 분자구조 및 유전특성 분석결과

◦ 중국 BUCT의 Tian 그룹에서는 불소계 폴리이미드 공중합체를 형성하고 triamine 경화제를 이용하여 Hyperbranched 구조의 폴리이미드 소재를 보고하였음. 이러한 소재는 높은 불소함량과 함께 hyperbranched 구조에 의한 Free-volume을 증가시킬 수 있기 때문에 낮은 유전율을 기대할 수 있음. Triamine에 의해 경화가 되어 있어 기존 폴리이미드가 가지는 고유의 열적, 기계적 물성을 유지할 수 있는 장점이 있음.

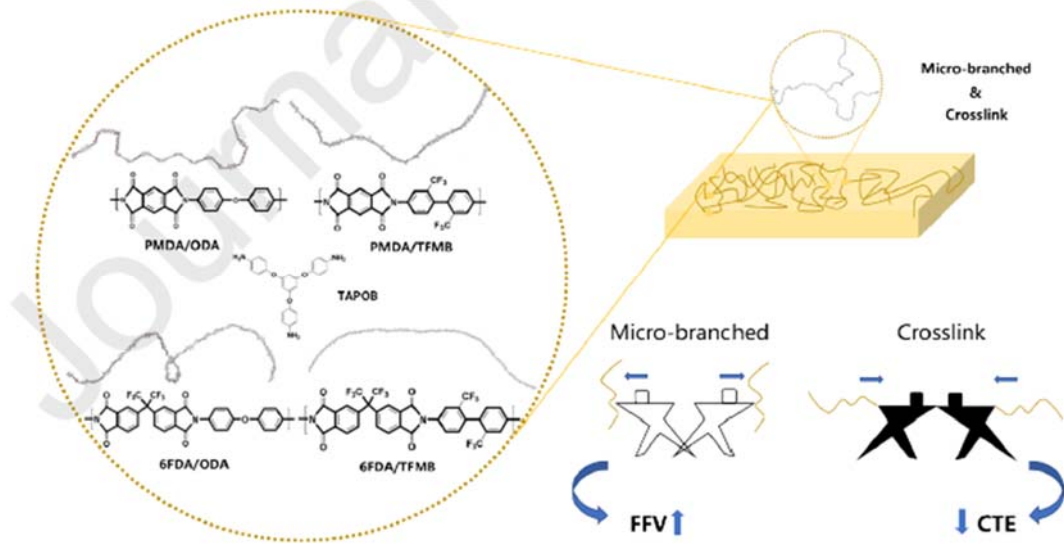


그림 9. 높은 Free-volume을 가지고 경화된 형태의 저유전성 폴리이미드 분자설계 개념도

4. References

- 1) 5G 시대 나노/소재 기술 (NNPC이슈페이퍼, 2019.02), 이정수, 윤상경, 최영진
- 2) 5G 이동통신용 화학소재 동향, (화학소재정보은행 심층보고서, 2020.03), 이재흥, 정종구
- 3) 고주파 필름/기재의 기술 시장 전망, (재팬 마케팅 서베이, 2019.05)
- 4) Kuo et. al., ACS Appl. Poly. Mater., 3, 1, 362–371 (2021)
- 5) Han et. al., Eur. Poly. J., 143, 110206 (2021)