

## 피코초UV레이저를이용한새로운폴더블OLED디스플레이재료절단

모바일기기시장에서데이터처리능력과무선데이터통신의 발전은지속적인성장을위한주요원동력이지만,디스플레이 기술의 중요성을간과할수는없습니다.가장기본적인휴먼 인터페이스요소로서,터치스크린평판디스플레이는사용자의 경험을형성하는데중요한역할을합니다.최근모바일기기 시장에서유기발광다이오드(OLED)디스플레이가두각을 나타내고있는데,얇고유연한OLED는가볍고에너지효율이 좋은패키지로서우수한이미지품질を提供하며이는현재와 미래 세대의 폴더블 모바일 기기에 더더욱 이상적입니다.

소형폴더블폰의핵심과제는디스플레이의모든부품(OLED 디스플레이,터치센서,폴라라이저,커버윈도우)에서작은 곡률반경을만드는것입니다.이를위해,제조업체는초박형 유리(UTG)와비교적새로운유형의폴리이미드로서가시광 영역에서투명도가매우높은클리어폴리이미드(clearPI)와같은소재개발을지속하고있습니다.UTG는본질적으로 스크래치에 더 강한 반면,부서지기 쉽고필요한 두께 (~50~200  $\mu\text{m}$ )로 제조 및 취급이 어려운 단점이 있습니다. Clear PI는 본질적으로 유연하고 제조상의 이점들이 있지만, 스크래치에 대한 저항성을 높이기 위해서는 얇은 하드 코트(HC)층을 덮어야 합니다. 물론 이 하드 코팅도 눈부심 방지와 지문 방지 특성이 적용될 수 있고 두 소재 모두 폴더블 디스플레이 시장에서의 강력한 존재감이 기대된다고 할 수 있습니다. UTG 절단 작업의 경우, IR 피코초 레이저 Bessel 빔 공정이 가능한 옵션이라고 한다면, 투명 PI+HC의 경우에는 어블레이션 절단 공정을 필요로 합니다.

본 연구에서는 고출력 피코초 355 nm 하이브리드 파이버 레이저(Icefyre 355-50, 아이스파이어)를 이용하여, 폴더블 디스플레이 커버 윈도우 애플리케이션에 사용될 clear PI 기반 다층 구조 스택의 어블레이션 절단 결과를 제시하고자 합니다. 다층 스택은 한쪽 면에 12  $\mu\text{m}$  두께의 HC 층이 있는 50 $\mu\text{m}$  두께의 clear PI 필름으로 구성되어 있으며, HC 층에는 나중에 제거될 50  $\mu\text{m}$  두께의 폴리에틸렌 테레프타레이트(PET) 보호층이 부착되어 있습니다. 또한, PET 필름에는 Clear PI 표면의 HC 층과 접착하기 위한 두께 4  $\mu\text{m}$  이하인 감압 접착제(PSA) 코팅이 있습니다. Clear PI+HC 층의 절단은 고품질이 필수적이지만, PET+PSA 필름에서 절단 품질은 치명적일 정도로 중요하지는 않습니다.



그림 1. 왼쪽-유연디스플레이는모바일기기기술의혁신적인발전인폴더블폰을 가능하게 한다. 오른쪽-이 어플리케이션 노트에서 연구 한 재료의 층 구조 도식.

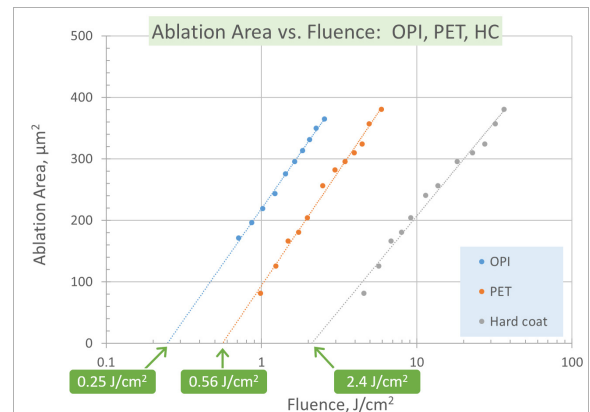


그림 2. 절제된영역대레이저플루언스의플롯은절단할스택의세가지재료에대한 임계값을 보여준다.

초기 실험은 세 가지 주요 재료인 clear PI 필름, HC 레이어, PET 보호 시트 각각에 대해서 어블레이션 반응 특징을 보기 위해 수행되었습니다. 단일 펄스 어블레이션 임계값은 그림 2의 결과 값이 보여주는 것과 같이 결정되었습니다.

각각의 임계값은 큰 차이를 보였습니다. ClearPI는 임계값이  $0.25\text{J}/\text{cm}^2$ 로 매우 낮은 반면, HC는  $2.4\text{J}/\text{cm}^2$ 로 10배 가까이 높고 PET는 그 사이인  $0.56\text{J}/\text{cm}^2$ 로 나왔습니다. ClearPI의 낮은 어블레이션 임계값은 기존의 폴리이미드처럼 UV파장에서 강한 흡수로 형성된 매우 깨끗하고 얇은 용융 분화구 형태가 관찰되었습니다. HC필름의 높은 임계값은 다양한 유리 가공에서 보인 것과 결과가 비슷하데, 얇은 층은 깨지기 쉽고 균열, 칩핑에 취약함을 아래 그림 3의 다양한 공정 조건에 대한 현미경 이미지로 확인할 수 있습니다.

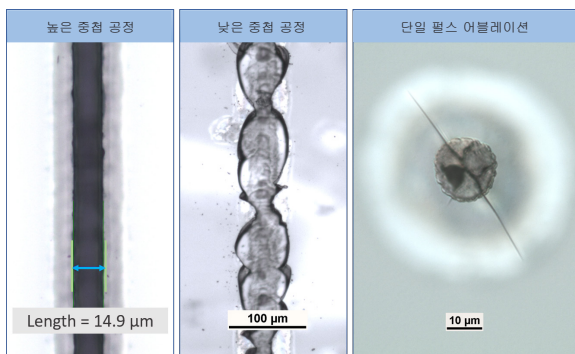


그림 3.  $12\ \mu\text{m}$  하드 코팅 필름에서 펄스 중첩 높인 가공 방법은 극적인 품질 향상 결과를 보여준다.

그림 3의 왼쪽 현미경 이미지는 재료에 대한 플루언스와 펄스 중첩 등 파라미터 최적화를 통해 HC층의 매우 깨끗한 선 가공 결과를 보여주고 있습니다. 그림 3의 가운데 이미지는 파라미터 최적화가 되지 않아 전체적으로 심한 칩핑이 발생한 모습입니다. 놀랍게도, 이런 좋지 않은 품질의 결과는 일반적으로 더 적절한 가공 영역이어서 더 좋은 결과가 기대가 되는 낮은 펄스 중첩과 적절한 플루언스에서 보여졌는데, 실제로 Fig. 3의 오른쪽 이미지처럼 단일 펄스 조사만으로 생긴 명확한 균열은 색다른 접근법의 필요성을 보여줍니다.

세 가지 각 재료들의 임계값에 대한 지식과 전반적인 어블레이션 반응을 통해 전체가 합쳐진 스택을 절단하기 위한 과정이 개발되었습니다. 그러나 완전한 절단 과정을 위해서는 레이저 빔이 스택의 clear PI 한쪽면만을 통해 조사되기 때문에, 각 재료에 대한 가공 파라미터는 다시 미세 조정해야 했습니다. 연속된 각 층마다 펄스 에너지, PRF 및 스캔 속도의 특별한 조합을 적용되었습니다. 피코초 UV 펄스의 어블레이션 작용은 매우 균일하게 반복 가능한 것으로 확인이 되었고, 따라서 어블레이션 깊이 등에 대한 실시간 모니터링이 필요하지 않았습니다. 더구나, 레이저 펄스 에너지와 PRF, 반복 스캔 횟수 등과 같은 파라미터를 최종 절단 공정에 맞게 미리 프로그래밍할 수 있었는데, 아이스파이어 레이저의 “on-the-fly” 펄스 에너지 및 PRF 조정 기능을 사용하였습니다. 3-10m/s 범위의 개별 스캔 속도와 최대 3MHz의 레이저 PRF를 사용하여 최적의 절단 품질을 400mm/s 이상의 순속도로 달성했습니다. 그림 4는 PI, HC 및 PET 층의 선명한 절단면을 보여주고 있습니다.

절단 품질은 모든 열 영향부 (HAZ) 가  $10\ \mu\text{m}$  미만으로 매우 우수했으며, 특히, 더 까다로운 HC 층은  $5\ \mu\text{m}$  미만의 가장자리 칩핑과 거칠기를 보여주고 있습니다. PET 필름에 생긴 다소 큰 HAZ는 크게 중요하지

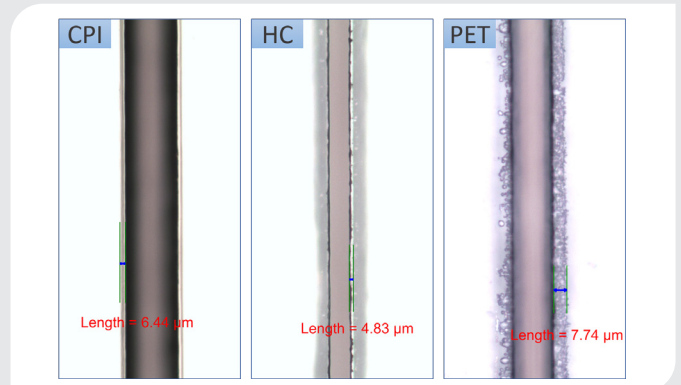


그림 4. 전체 유효 가공 속도  $400\text{mm/s}$  이상에서 각 층별 특화된 절단 공정을 적용한 투명 PI (왼쪽), HC (중간), PET (오른쪽)의 피코초 UV 절단 현미경 사진.

않은데, PET는 그저 보호막 역할로서 결국 제거되고 실제 기능을 하는 스크래치에 강한 HC 층이 노출되기 때문입니다. 절단 측면의 품질 또한 매우 중요한데, 완성된 디스플레이를 기기에 장착할 때 절단된 측면은 맞닿는 면이 될 수 있기 때문입니다. 그림 5는 전체 절단 측면의 현미경 사진입니다.

절단 측면 이미지를 통해 어블레이션 공정의 품질이 자재 전체에

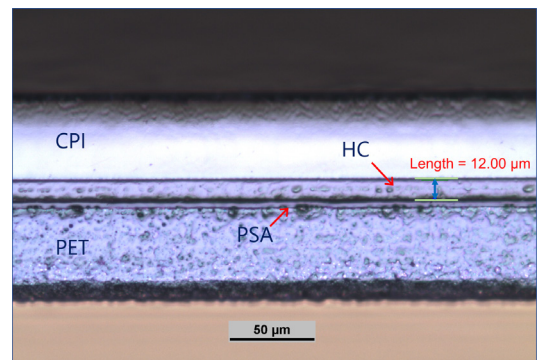


그림 5.  $50\ \mu\text{m}$  투명 PI 및 PET,  $12\ \mu\text{m}$  HC 및  $\sim 4\ \mu\text{m}$  PSA의 고품질 절단 단면도.

걸쳐 유지됨을 확인할 수 있습니다. 매우 얇은 PSA를 포함한 각각의 층은 명확하게 구별 가능하며, 절단 측면에서의 녹거나 얼룩짐, 희미해진 흔적이 나타나지 않았습니다.

새로운 기술은 종종 새로운 재료와 새로운 가공 방법을 필요로 합니다. 폴더블 디스플레이의 경우 광학적, 열적, 그리고 기계적 특성이 매우 다양한 재료가 합쳐진 하나의 스택을 절단해야 하는 도전적인 과제입니다. 이번 실험을 통해서 PET 보호 필름이 부착된 하드 코팅된 clear PI 재료를 각 레이어에 최적화된 기법과 높은 출력과 폭넓은 활용성을 가진 IceFyre ps UV 레이저의 결합으로 품질과 속도 두 가지를 모두 만족하는 매우 유망한 결과를 만들어 낼 수 있었습니다.

## 제품

### 아이스파이어 산업용 피코초 레이저.

IceFyre 355-50 은 시장에서 가장 성능이 뛰어난 UV ps 레이저로 1.25 MHz (>40  $\mu$ J) 에서 50 W 이상의 UV 출력을 제공하며 버스트 모드에서는 100  $\mu$ J 의 펄스 에너지와 10ps 의 펄스폭을 제공합니다. IceFyre 355-50 은 고출력뿐만 아니라 싱글샷에서 10 MHz 까지 폭넓은 반복률로 새로운 표준을 제시합니다. IceFyre 355-30은 60  $\mu$ J 이상의 펄스 에너지로 (버스트 모드에서는 더 높은 에너지 가능) 30W 이상의 출력을 제공하며 싱글 샷에서 10M Hz 까지 이르는 뛰어난 성능을 전달합니다. IceFyre 1064-50은 400 kHz 단일 펄스에서 50 W 이상의 IR 출력을 만들어 내며 싱글 샷에서 10 MHz 까지 뛰어난 성능을 제공합니다. IceFyre 레이저

고유의 TimeShift™ 디자인은 파이버 레이저의 유연함과 Spectra-Physics 만의 독점적인 출력 증폭 기능을 채택하여 프로그래밍이 가능한 버스트 모드 기술 TimeShift ps으로 업계에서 가장 다양한 기능과 가장 넓은 범용성을 제공합니다. 각각의 IceFyre 모델마다 표준 waveform 세트가 제공됩니다. 선택사항으로 TimeShift ps 전용 프로그램을 이용하여 사용자 정의 waveform 을 만들 수 있습니다. IceFyre 레이저는 동급 최저의 타이밍 지터로 진정한 POD 과 PSO 가 가능하도록 설계되어 폴리곤 스캐너와 같은 고속 스캔에서 고품질 가공을 가능하게 합니다.

|                                            | IceFyre 1064-50                | IceFyre 355-30                                                         | IceFyre 355-50         |
|--------------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| 파장                                         | 1064 nm                        | 355 nm                                                                 |                        |
| 출력                                         | >50 W @ 400 kHz                | >30 W typical @ 500 kHz<br>>25 W @ 800 kHz<br>>20 W typical @ 1 MHz    | >50 W @ 1250 kHz       |
| 최대펄스에너지,보통(TimeShiftps으로burst로더큰펄스에너지구현가능) | >200 μJ single pulse @ 200 kHz | >60 μJ typical @ 500 kHz<br>>31 μJ @ 800 kHz<br>>20 μJ typical @ 1 MHz | >40 μJ @ 1250 kHz      |
| 반복률 범위                                     | Single shot to 10 MHz          |                                                                        |                        |
| 펄스폭, FWHM 반치전폭                             | <20 ps (15 ps typical)         |                                                                        | <12 ps (10 ps typical) |
| TimeShift ps                               | yes                            |                                                                        |                        |
| 펄스 간 에너지 안정성                               | <1.5% rms, 1 σ                 | <2.0% rms, 1 σ                                                         |                        |
| 출력 안정성(온도안정화 후)                            | <1%, 1 σ, over 8 hours         |                                                                        |                        |