



The Art and Science of Designing Optics for Laser Damage Threshold

Edmund Optics Korea Ltd
최은지 | Product Support Engineer

광학 산업분야에 관심이 있는 분이라면 ART(경험에 기반한 숙련된 기술)와 SCIENCE(과학)에 관한 광학시스템 설계에 대하여 한번쯤은 들어보셨을 겁니다.

빛의 전파 법칙은 수학 방정식에 의해 기술되는 물리적 원리를 기반으로 하기 때문에 SCIENCE 부분의 대한 설명은 이해하기 쉽습니다. 반면 ART에 관해서는 이해하기가 어렵습니다. ART라는 용어는 수년간의 경험을 통한 조언, 기술, 암묵적인 지식을 모두 포함합니다. 고파워 레이저 손상에 대한 광학 시스템을 설계하는 것은 ART와 SCIENCE 사이의 경계를 이루는 영역 중 하나라고 볼 수 있습니다.

레이저로 인한 손상은 강한 세기의 빛이 광학 제품과 상호 작용하여 코팅, 표면 또는 소재 자체를 변형시켜 제품의 성능을 저하시키는 과정을 의미합니다. 강한 세기의 빛은 코팅에 손상을 입히며, 미세한 흠집 및

소재 자체에 균열을 유발할 수 있습니다. 이에 대한 결과로 투과율 감소, 시스템 손상을 야기하는 산란의 증가로 이어집니다. 이러한 부정적인 영향을 없애기 위해 산업 시장에서는 Laser Induced Damaged Threshold(LIDT)라는 측정 기준을 개발했습니다. 이상적인 LIDT는 레이저 광선의 경계 값을 의미합니다. 광학 제품은 LIDT 보다 낮은 레이저 세기에서 손상되지 않지만, LIDT 보다 높은 레이저 세기에서는 손상을 입을 수 있습니다.

실제로 이것을 측정하기는 쉽지 않습니다. 빛은 원래부터 예측할 수 없는 독립체로 빛의 세기는 시공간에 의한 영향을 받으며, 이는 일부분에 불과합니다. 레이저 옵틱스의 손상은 뚜렷한 메커니즘에 의해 발생하게 되며, 파장 및 펄스주기와 같은 요소의 영향을 받습니다. 또한 광학 제품이 생성되는 공정 과정에 의해서도 LIDT 값이 바뀔 수 있습니다.

따라서 처음에는 단순한 값으로 보였던 LIDT는 다양한 변화 요소들과 함께 복잡한 의미를 내포한 값이라는 것을 이해하실 수 있을 것입니다. 이런 이유로부터 ART라는 말이 개입됩니다. 숙련된 엔지니어들은 단순히 주어진 LIDT 값을 따르는 것이 아니라, 이에 영향을 끼칠 수 있는 다른 복잡한 요소들에 대한 충분한 이해를 바탕으로 주어진 LIDT 값에 그들만의 '오차'를 고려하여 결정합니다.

위에서 언급했듯이 많은 변수와 불확실성에도 불구하고, 잠재적인 손상 가능성 및 이를 어떻게 테스트할 수 있는지에 대한 충분한 이해를 통해 수용 가능한 위험 수준 내의 이상적인 설계를 하고 시스템을 만들 수 있습니다.

즉, LIDT가 무엇인가에 대해 이해한다는 것은 그것이 귀사의 시스템에 얼마나 큰 영향을 주는지, 귀사의 용도에 적합한 광학 제품이 어떻게 테스트되고 선정되었는지를 안다는 것과 같은 의미입니다. 아래의 자료는 시스템 디자이너들이 고려해야 할 자료에 대한 리뷰입니다.

Damage Mechanisms

CW 레이저에 의해 발생하는 손상은 일반적으로 광학 코팅 또는 재질 자체의 흡수에 의한 열로 인하여 발생합니다.

펄스레이저의 나노초 펄스로 인한 손상은 열 축적이 발생하기 이전에 다른 프로세스에 의해 먼저 발생합니다. 나노초 펄스는 비선형 효과로 일차적인 손상 메커니즘이 되기엔 너무 긴 시간이지만, 전류를 통해 인가되는 전압이 breakdown 전압을 초과하기 때문에 유전체 손상으로 이어질 수 있습니다. 이러한 과정은 전자기적 힘에 의해 발생하며 전자기장에서 주어진 threshold 이상의 전압에 의해 유전체 손상이 발생하듯, 손상 메커니즘의 가장 결정적인 요인이 됩니다.

이는 코팅이 벗겨지는 현상(delamination) 및 더 큰 손상을 유발할 수 있습니다. 일반적으로 수십 마이크로 이하의 작은 빔 또는 펨토초 펄스의 경우 유전체 손상이 주된 손상 요인이며, 수백 마이크로 또는 그 이상의 큰 사이즈의 빔인 경우 열로 인해

발생하는 미립자 오염물질들의 폭발이 주된 요인이 됩니다.

다양한 형태의 결함과 빛의 상호 작용에 의해 유발되는 손상 메커니즘은 그리 간단하지 않습니다. 예를 들어 연마(Polishing) 과정에서 광학 제품에 레이저 손상의 시초가 될 수 있는 미세 결함이 발생할 수 있습니다.

이상적으로는 각각의 연마 과정을 거쳐가면서 점점 더 미세하게 가공되고 이전 단계에서의 결함은 다음 단계에서 완벽하게 제거되어야 하지만, 어떠한 공정도 완벽할 순 없으며, 표면 아래에 어느 정도의 손상이 남아있게 됩니다.

연속적인 가공 단계를 거친 후 표면에 남아있을 수 있는 연마 자재들의 미세한 입자들 또한 다른 잠재적 결함 요인이 될 수 있으며, 코팅 프로세스 자체가 또 다른 잠재적 결함으로 이어질 수 있습니다.

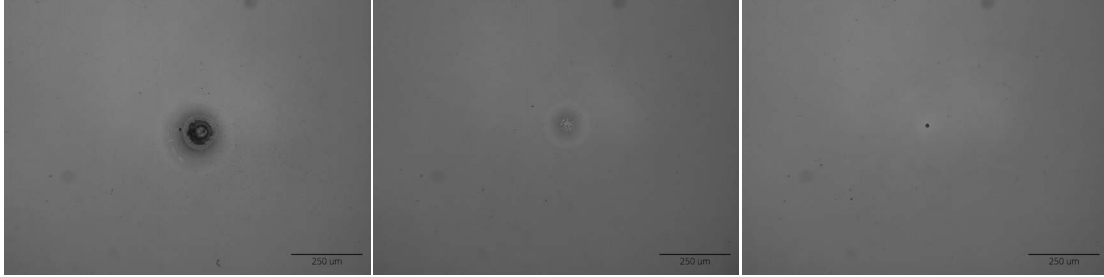
대표적인 금속 산화물 유전체 코팅은 스퍼터링(sputtering) 대상으로부터 진공 증착에 의해 이루어지며, 증착되는 동안 금속 물질들이 뭉쳐 덩어리가 생길 수 있습니다. 결함에 의해 유도된 LIDT는 레이저 빔의 중심에 대해서 무작위적인 위치의 결함 때문에 확률적 모델을 사용하여 나타낼 수 있습니다.

각각의 뚜렷한 결함의 근원들은 동일한 흡수 특성을 보이며, 자연적으로 또는 공정 과정에서 생성된 다양한 사이즈의 결함들은 광학 제품이 손상 없이 어느 정도까지 버틸 수 있는지에 대한 레이저 세기를 결정짓는 요인이 됩니다.

LIDT를 염두한 디자인의 다음 단계는 주어진 시스템에서 이러한 결함들이 광학 제품의 성능에 미치는 영향을 고려하는 것입니다. 이것은 레이저 옵틱스 통합자들이 그들의 레이저 시스템에서 허용 가능한 위험 수준의 LIDT 값을 추론할 수 있도록 해줍니다.

Acceptable Degradation and Risk

시스템 내에서의 허용 가능한 수준의 성능 저하는 미치는 영향에 따라 결정됩니다. 예를 들어 투과율 10% 감소가 어떤 용도에서는 견딜 수 있는 수준인



손상의 근본 원인에 따라 다양한 형태의 손상이 발생하며, 이러한 형태론에 대한 식별은 코팅과 공정 개발에 있어 매우 중요합니다. 과도하게 좁게 또는 넓게 보는 것은 추가적인 비용이 발생할 수 있으며, 그 결과로 발생하는 손상은 레이저 시스템의 성능을 저하시키기 때문에 이러한 현상을 올바르게 이해하는 것은 매우 중요합니다.

반면, 다른 용도에서는 입사 조명의 1% 이상이 산란되는 경우에도 손상이 발생할 수 있습니다. ISO 21254:20 표준에 따르면, 검출 가능한 수준의 코팅 변화는 '손상'으로 간주됩니다. 레이저 손상 테스트마다 다른 손상 탐지 방법을 사용하며, 사용자마다 Signal-to-noise(신호 대 잡음)에 대한 임계 값이 다를 수 있어 테스트 방법에 따라 다른 LIDT 값이 정해질 수 있습니다. 따라서 LIDT 값은 시스템의 용도에 따라 달라질 수 있어, ISO에서 정의한 '손상'이 반드시 성능 저하를 의미하는 것은 아니라는 것을 인지해야 합니다.

허용 가능한 수준의 위험의 양은 전적으로 어떤 용도인지에 따라 달려있습니다.

어떠한 광학 제품도, 어떠한 레이저 손상 테스트도 완벽할 순 없기 때문에 레이저 손상에 대한 위험성은 LIDT보다 낮은 세기에서도 발생할 가능성이 있습니다. 따라서 시스템을 설계한 사람만이 허용 가능한 수준의 위험에 대한 정의를 내릴 수 있습니다.

예를 들어 설계 수명이 3년인 LIDAR 시스템은 multiphoton fluorescence microscopy의 실험실 기준보다 허용 가능한 수준이 훨씬 낮습니다.

시스템 설계자는 레이저 특성, 요구되는 성능 수준 및 허용 가능한 위험 수준을 이해한 후 레이저 옵틱스 공급 업체의 제품에 대한 사양을 평가하고 주어진 요소들이 요구 사항을 충족하는지 아닌지를 판단할 수 있습니다. LIDT 값이 어떻게 결정되었는지 완벽하게 이해해야만 이러한 판단을 내릴 수 있습니다.

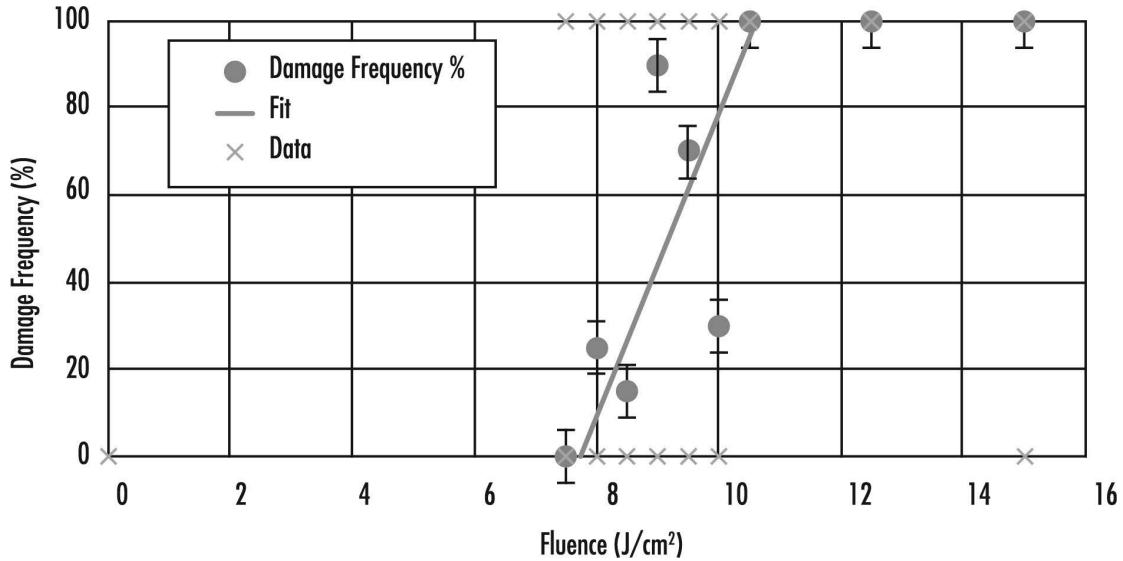
LIDT Testing

레이저 손상 테스트는 근본적으로 제품을 손상시키는 테스트 방법입니다.

광학 제품은 주어진 수준의 레이저 빛에 노출되어 있으며, 일반적으로 Differential interference contrast microscopy로 검사가 진행됩니다. 점차적으로 레이저 세기를 높이고, 노출과 검사 단계를 반복합니다. 이러한 과정에서 광학 제품이 손상될 때까지 계속해서 진행합니다. 개념적으로는 간단한 과정이지만, 몇 가지 복잡한 사항들이 요구됩니다.

대부분의 경우 LIDT 시험에 사용되는 레이저는 가우시안 형태의 빔이기 때문에, 광학 제품의 노출된 영역의 중심 부분은 외곽부분 보다 훨씬 높은 세기를 보입니다. 따라서 가우시안 빔의 영역을 정의하는 것조차 문제가 될 수 있습니다.

1/e 지점의 에너지 밀도가 $50\text{J}/\text{cm}^2$ 이고, 결점이 감지되는 경우에 가정할 수 있는 3가지의 가능성이 있습니다. 첫째로 결함은 1/e 위치에서 정확히 발생하며, 특정 테스트의 LIDT 값은 $50\text{J}/\text{cm}^2$ 가 될 수 있습니다. 둘째, 손상은 1/e 지점 밖에서 발생했을 수 있으며, 이 경우 측정된 값은 $50\text{J}/\text{cm}^2$ 미만일 수 있습니다. 마지막으로 $50\text{J}/\text{cm}^2$ 이상의 세기에서 빔의 중심 아래 부분에서 손상이 발생한 것일 수도 있습니다. 테스트 빔이 좀더 균일한 분포를 보이는 top-hat 형태의 형상을 보인다는 조건 하에 몇 가지의 불확실성을 줄일 수는 있지만, shot-to-



샘플 데이터는 여러 번 시행한 LIDT 시험 중 사용된 레이저 세기와 그에 대한 손상 빈도를 보여줍니다. 이 테스트에서 데이터의 선형 회귀에 대한 분석 결과, 광학 제품의 LIDT는 약 7.5 J/cm²입니다.

shot 세기 변화는 여전히 불확실성을 야기합니다. 따라서 단순히 한번의 테스트만으로 정확한 LIDT 값을 얻을 수 없습니다.

이러한 불확실성은 다양한 조건에서 측정해봄으로써 줄일 수 있습니다. 그러나 고파워의 레이저는 비용이 많이 들고, 레이저 제조사가 모든 파장 범위와 가능한 시간 제약적 특성을 가지는 레이저를 보유하는 것은 불가능하므로 모든 시나리오를 테스트할 수 있는 것은 아닙니다.

제조사는 작은 직경의 빔으로 빔을 조사함으로써 높은 세기에서 훨씬 더 쉽게 테스트할 수 있습니다. 그러나 이는 표면이 과소 샘플링 될 수 있으며, 샘플의 일부 결점이 누락될 수 있습니다.

직경 40mm의 광학 제품을 2mm의 직경으로 덮으려면, 400회의 노출이 필요합니다. 다른 세기에서 다른 노출 시간의 요소를 lot 샘플링에 추가하고, 이는 실제 시험에 일부 통계적인 샘플링과 시뮬레이션이 필요하다는 것은 명백하게 보여줍니다. 이 시뮬레이션의 목표는 "직경 2mm top hat 빔의 1회 통과로 표면 추출한 표면의 60%로 40J/cm²에서

손상이 감지되지 않을 경우, 전체의 LIDT 값이 실제로 40J/cm² 미만일 가능성이 얼마나 높은가"라는 질문에 답하는 것과 같습니다.

다른 세기에 대해서도 완전한 노출과 손상 프로세스에 대한 확률적 모델이 필요하기 때문에 이 측정값만으로 결정을 내릴 수는 없습니다. LIDT의 확률적 모델은 빔 크기와 강도, 형상, 면적 범위, 결함의 특성 및 분포에 대한 일부 정보들을 포함합니다.

Modeling LIDT Using the Stochastic Model

레이저 손상의 메커니즘과 LIDT를 결정하기 위한 모델에 대한 논의에서, 레이저 손상 테스트가 LIDT를 과대평가할 가능성은 매우 낮다는 부분을 간과하기 쉽습니다.

광학 제품을 LIDT의 두 배가 되는 세기에서 노출시킨다면, 아마도 손상될 가능성이 높습니다. 불확실성은 정해진 LIDT값보다 낮은 세기에서 발생합니다. 광학 제품이 LIDT보다 훨씬 낮은 수준의 세기에서 손상될 확률은 다소 제한적입니다.

이러한 관점에서 시스템 설계자는 레이저를 정의하고,

허용 가능한 수준의 손상 정도를 결정하고, 허용 가능한 수준의 위험에 대한 계산을 했다고 가정해봅시다. 정해진 LIDT를 가진 광학 제품이 이러한 조건을 충족하는지 어떻게 판단할 수 있을까요? 우선적으로 제조사가 어떻게 LIDT를 결정했는가에 대하여 정확하게 이해해야 합니다. 어떠한 샘플링 프로토콜이 사용되었는지, 어떤 레이저로 어떤 세기의 빔 형상을 사용했는지, 결함에 대해서는 어떻게 정의했는지 등에 대한 이해가 필요합니다.

이러한 것에 대해 이해하고 있다면, 제조사의 테스트 결과를 특정 시스템의 성능 예측으로 추론하는데 사용할 수 있는 몇 가지 규칙이 있습니다. 테스트를 통해 λ_1 파장에서 펄스의 길이가 τ_1 이고 빔의 직경이 1인 파장에서 결정된 LIDT를 감안하면, λ_2 파장에서 펄스의 길이가 τ_2 이고 빔 직경이 2인 LIDT는 다음과 같이 추론할 수 있습니다.

그러나 이 공식을 사용하는 경우, 두 레이저의 매개 변수가 서로 근접한 경우에만 유효하다는 것을 명심해야 합니다.

$$LIDT_2 = LIDT_1 \times \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \times \sqrt{\frac{\tau_2}{\tau_1}} \times \left(\frac{\phi_1}{\phi_2}\right)^2$$

가장 좋은 해결책은 광학 제품을 사용할 정확한 조건에서 레이저 손상에 대한 테스트를 하는 것입니다. 하지만 이것이 불가능하다면, 시스템 설계자는 LIDT가 정해진 정확한 실험 조건에 대해서 알고 있어야 합니다.

또한 설계자는 결함에 대해 잘 이해할 수 있도록 광학 제작 파트너의 공정이 잘 관리되고 있는지에 대해 신뢰할 수 있어야 합니다. LIDT와 광학 제품에 대한 테스트 방법을 이해하면 응용 프로그램에 적합한 광학 제품을 선정하고 있는지 아닌지를 알 수 있습니다. 변수, 손상을 유발하는 결함, 그리고 확률적인 모델이 잘 확립된 상태에서 시스템 설계자들은 그들 자신만의 과정을 ART에서 SCIENCE으로 옮겨가고 있다고 말할 수 있습니다. **Laser**

“레이저 및 워터젯, 플라즈마, 특수가공에 관한 독자 투고를 기다립니다!”

월간 ‘레이저기술’은 레이저와 각종 응용분야 및 워터젯, 플라즈마, 특수가공에 대한 독자 여러분의 다양한 글을 기다리고 있습니다.

- 원고매수 : 제한없음
- 원고내용 : 레이저 및 특수가공에 관련된 제반내용
- 원고마감 : 매월 15일한
- 접 수 처 : 월간 ‘레이저기술’ 편집부
- 문 의 : (02)868-0211