

# REFINEMENT AND SYNTHESIS

REFINEMENT(최적화) AND SYNTHESIS(구조 생성)의 역할

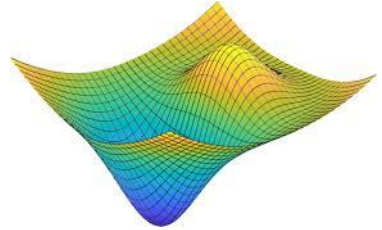
Target (설계 목표)



Refinement (개선)



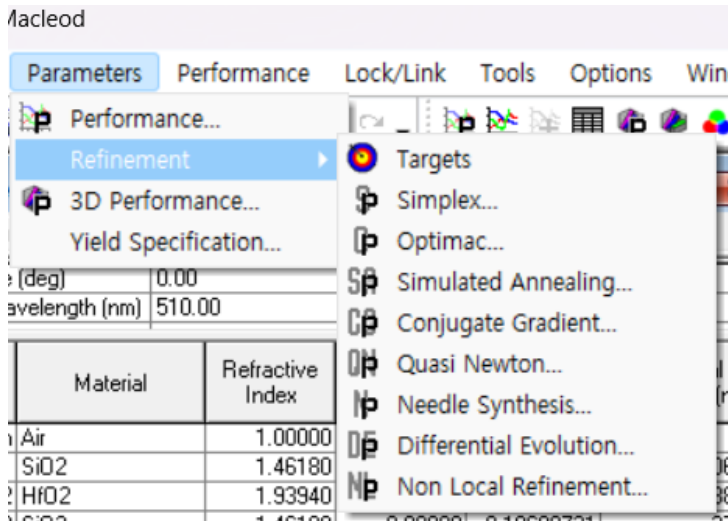
최적설계 도출



## Refinement와 Target의 관계 (핵심)

Refinement는 "어떻게 개선할지"이고  
Target은 "어디로 가야 하는지"입니다.

- ✓ Target이 좋으면 → 어떤 Refinement든 잘 됨
- ✓ Target이 나쁘면 → 어떤 Refinement도 실패



Parameters >  
Refinement

프로그램에서 지원되는 Refinement / Synthesis 기법 종류 ( 총 8가지 )

## Refinement / Synthesis 기법 비교표

| 방법                            | 유형                | 핵심 개념                | 장점                     | 단점                     | 추천 사용 시점           |
|-------------------------------|-------------------|----------------------|------------------------|------------------------|--------------------|
| <b>Simplex</b>                | 국소 최적화            | 두께를 조금씩 바꾸며 Merit 감소 | 빠름, 안정적, 사용 쉬움         | 국소해에 빠질 수 있음, 구조 변경 불가 | 기존 설계 미세 조정, 일반 설계 |
| <b>Optimac</b>                | 구조+최적화            | 층 추가/삭제/분할 자동 수행     | 구조까지 개선, 복잡한 Target 강력 | 느림, 임시 구조 생성 가능        | 설계 생성, 고성능 필터      |
| <b>Simulated Annealing</b>    | 전역 탐색             | 나쁜 방향도 허용하며 해 탐색     | 국소해 탈출 가능              | 매우 느림, 설정 까다로움         | 수렴 안 될 때, 최종 해결    |
| <b>Conjugate Gradient</b>     | 고속 국소 최적화         | 기울기 이용 빠른 수렴         | 매우 빠름                  | 초기값 민감, 국소해            | 중·후반 미세 튜닝         |
| <b>Quasi-Newton</b>           | 초고속 국소 최적화        | 곡률 근사로 최적점 접근        | 최고 속도·정밀도              | 계산량 큼, 초기값 중요          | 최종 완성 단계           |
| <b>Needle Synthesis</b>       | 구조 생성 (Synthesis) | 얇은 층 자동 삽입           | 구조 자동 생성, 성능 강력        | 설계 복잡, 계산량 큼           | 설계 생성, 성능 한계 돌파    |
| <b>Differential Evolution</b> | 전역 최적화            | 진화 알고리즘 기반 탐색        | 국소해 탈출 매우 강력           | 매우 느림                  | 다른 방법 실패 시         |
| <b>Non-Local Refinement</b>   | 구조 탐색             | 설계 전체를 크게 변화         | 해 다양화                  | 수렴 불안정                 | 국소해 반복 시           |

|             |                        |
|-------------|------------------------|
| 목적          | 추천 방법                  |
| 빠르게 개선      | Simplex                |
| 구조 포함 자동 설계 | Optimac                |
| 막혔을 때 탈출    | Simulated Annealing    |
| 고속 튜닝       | Conjugate Gradient     |
| 최종 고정밀      | Quasi-Newton           |
| 설계 처음부터 생성  | Needle Synthesis       |
| 최후의 수단      | Differential Evolution |
| 해 다양화       | Non-Local              |

**Needle Synthesis** : 광학 박막 설계의 "치트키" 같은 존재입니다.

기존 박막 층 사이에 아주 얇은 층(바늘처럼 가는 층)을 찢러 넣어보고, 성능이 개선되면 그 층을 키워나가는 방식입니다.

층의 개수를 스스로 늘려가며 최적의 설계안을 찾아냅니다.

| 구분               | 알고리즘                      | 특징           | 비유                     |
|------------------|---------------------------|--------------|------------------------|
| <b>Local</b>     | Simplex, Quasi-Newton, CG | 빠르고 정밀함      | 근처에서 가장 낮은 골짜기 찾기      |
| <b>Global</b>    | Differential Evolution    | 시간이 걸리나 광범위함 | 지도 전체에서 가장 높은 산 찾기     |
| <b>Synthesis</b> | Needle Synthesis          | 구조 자체를 변경    | 건물을 수리하는 게 아니라 새로 증축하기 |

**Best Workflow**

- 1 Simplex / Optimac
- 2 막히면 → Needle Synthesis
- 3 그래도 안 되면 → Differential Evolution / Non-Local
- 4 거의 되면 → Conjugate Gradient / Quasi-Newton으로 마무리

## 용어 설명

**Refinement** : 기존 코팅 구조를 조금씩 고쳐서 성능 향상

**Synthesis** : 목표만 주고 처음부터 코팅 구조를 새로 생성

| 구분  | Refinement | Synthesis |
|-----|------------|-----------|
| 출발점 | 기존 설계 있음   | 거의 없거나 없음 |
| 방식  | 미세 수정      | 새로 구성     |
| 성격  | 최적화        | 창조적 설계    |

### Merit Function (평가 함수)      **Merit 값이 작을수록 더 좋은 설계**

현재 설계된 박막의 성능이 내가 목표로 하는 타겟(Target) 성능과 얼마나 차이가 나는지를 하나의 숫자로 나타낸 수치입니다.

- **원리** : 목표값과 현재값의 차이(에러)를 제곱하여 합산한 형태입니다.
- **해석** : 이 숫자가 **0에 가까울수록** 사용자가 설정한 설계 목표에 완벽하게 도달했다는 뜻입니다.
- **수식적 의미**: 보통 다음과 같은 최소제곱법(Least Squares) 형태를 가집니다.

$$MF = \sqrt{\frac{\sum [W_i(T_i - C_i)]^2}{n}}$$

( $T_i$ : 타겟값,  $C_i$ : 현재값,  $W_i$ : 가중치)

### Weight (가중치)

모든 타겟이 똑같이 중요할 수는 없으므로 **Weight**는 특정 파장대나 특정 각도에서의 성능을 얼마나 더 엄격하게 관리할지 결정하는 '**중요도**'입니다.

- **Weight가 높으면**: 알고리즘은 그 지점의 에러를 줄이는 데 최우선순위를 둡니다. 다른 곳의 성능이 조금 깨지더라도 해당 지점을 먼저 맞추려고 노력합니다.
- **Weight가 낮으면**: 상대적으로 덜 중요한 구간으로 취급하며, 전체적인 밸런스를 위해 어느 정도 Tolerance(허용 오차)가 있습니다.

**Tolerance가 작을수록 Weight는 자동으로 높아지는 효과가 있습니다.**

- **Merit Function** : "현재 내 설계가 목표 대비 몇 점짜리인가?" (낮을수록 좋음)
- **Weight** : "이 파장대는 특히 더 신경 써서 맞춰라!"

# Simplex

| 조정 대상                   | 의미               |
|-------------------------|------------------|
| 층 두께 (layers)           | 각 박막층의 두께        |
| 패킹 밀도 (packing density) | 물질의 실제 밀도/굴절률 보정 |
| 굴절률                     | 재료의 광학적 성질       |
| 타겟 스펙                   | 투과율, 반사율, 분광 특성  |

- 👉 Simplex는 이런 변수들을 **\*\*조금씩 바꾼 여러 설계안(Designs)\*\***을 동시에 비교하면서
- 👉 **가장 나쁜 설계를 버리고 더 좋은 설계를 만드는 방식**으로 진행합니다.

| 핵심                 | 내용                     |
|--------------------|------------------------|
| Simplex refinement | 빠른 국소 최적화 알고리즘         |
| 조정 대상              | 층 두께, 밀도, 굴절률          |
| 방식                 | 최악 설계를 버리고 더 나은 설계로 교체 |
| 장점                 | 빠름, 안정적, 미분 불필요        |
| 용도                 | 광학 박막 설계 최적화           |

두께 최적화(Refine Thicknesses)\*\*와 **굴절률 최적화(Refine Index)** 중 하나 또는 둘 다 선택할 수 있습니다.

분산성 물질(굴절률이 파장에 따라 변하는 물질)을 처리하기 위해, 굴절률 변화 모델로는 **가변 충전 밀도(variable packing density)** 모델이 사용됩니다.

## Parameters

**반복 횟수(Number of iterations):** 최적화 과정의 절대적인 한계치를 결정합니다. 보통 충분히 큰 값으로 설정하는 것이 권장됩니다.

### Starting thickness increment :

각 층 두께를 얼마나 변화시킬지를 정하는 값

Common Scaling ( check box ) : 동일한 재질로 구성된 모든 층의 충전 밀도가

**동시에 같은 비율로** 조정됩니다.

이는 증착(Deposition) 환경 문제로 인해 특정 재질의 모든 층이 이상적인 상태에서 일괄적으로 벗어났을 때, 이를 추적하는

**역설계(Reverse Engineering)** 작업에 매우 유용합니다.

| 항목                 | 의미                   |
|--------------------|----------------------|
| Refine Thicknesses | 각 층의 두께를 최적화         |
| Refine Index       | 굴절률(실제로는 패킹 밀도)을 최적화 |
| 둘 다 선택 가능          | 두께 + 굴절률 동시에 조정      |

**리사이클링(Recycling)** : 최적화를 진행하다 보면 심플렉스(도형)가 너무 찌그러지거나 특정 구역에 갇혀 더 이상 개선되지 않는 '정체 상태'에 빠질 수 있습니다.

이때 리사이클링은 현재 지점을 기준으로 심플렉스를 다시 구성(초기화)하여, 새로운 방향으로 탐색을 재개할 수 있도록 돕는 일종의 '**새로고침**' 역할을 합니다.

**대안 경로(Try Alternate Paths)의 원리** : 수학적으로 지역 최적점(Local Optimum)에 빠지는 것을 방지하는 기술입니다. 눈앞의 작은 이익(당장 가장 성능이 좋은 경로)만 쫓다 보면 더 큰 이득(전역 최적점)을 놓칠 수 있는데, 이 옵션은 당장 조금 손해를 보더라도 더 유망한 경로를 찾아가게 하는 지능적인 탐색을 가능하게 합니다.

최적화 진행 상황은 성능 그래프(Plot of Performance)를 통해 자동으로 표시됩니다. 그래프는 마지막으로 표시된 시점 이후, '그래프 갱신을 위한 최소 평가 함수 개선량(Minimum Merit Function Improvement To Update Plot)'에 설정된 수치만큼 성능이 개선될 때마다 매번 새로 그려집니다.

**사용자 정의 평가 함수(Use Custom Merit Function), 소스 파일(Source File), 그리고 찾아보기(Browse...)** 버튼은 설계(Designs) 작업에만 적용되며, 'Function' 선택사항이 있는 경우에만 활성화됩니다.

사용자 정의 평가 함수 사용법에 대한 자세한 정보는 컴퓨터에 설치된 '스크립팅 언어(Scripting Language)' 매뉴얼에 포함되어 있습니다.

- **평가 함수 (Merit Function):** 현재 설계가 목표치에 얼마나 부합하는지를 나타내는 수치입니다. 이 값이 **0에 가까울수록** 목표한 성능에 완벽하게 도달했음을 의미합니다.
- **그래프 갱신 설정 (Update Plot):** 너무 자주 그래프를 갱신하면 계산 속도가 느려질 수 있습니다. "의미 있는 변화"가 있을 때만 그래프를 보고 싶다면 이 개선량 수치를 적절히 조절하세요.
- **사용자 정의(Custom) 기능:** 기본 제공되는 평가 항목(반사율, 투과율 등) 외에, 특별한 수학적 조건이나 복합적인 성능 지표가 필요할 때 스크립트를 짜서 넣는 기능입니다.

최상의 결과를 얻으려면 다음을 확인해 보세요.

1. **반복 횟수(Iterations)** : 수천 번 정도로 넉넉하게 잡았는가?
2. **공통 스케일링(Common Scaling)** : 역설계 시 물질별 일괄 조정을 선택했는가?
3. **리사이클(Recycle)** : 복잡한 설계라면 일정 간격으로 리사이클 설정을 했는가?
4. **불균질성(Inhomogeneity)** : 막질이 균일하지 않다면  
층을 나누어 밀도를 다르게 부여했는가?

# Optimac

Optimac의 가장 큰 장점은 "막다른 골목"을 피하는 능력입니다. 단순한 알고리즘은 성능 개선이 멈추면 그대로 정지해버리지만, Optimac은 "이 방법이 안 통하네? 그럼 층을 하나 더 추가해볼까?" 혹은 "무작위로 흔들어볼까?"라며 끊임없이 돌파구를 찾습니다. 이 때문에 초기 설계값이 전혀 없는 상태(Synthesis)에서 새로운 코팅 구조를 만들어낼 때 Optimac은 Simplex보다 훨씬 탁월한 성능을 발휘합니다.

구조(과도)생성 이란 : 설계 구조 자체를 바꾸면서 최적화 단순히 두께만 조금 바꾸는 게 아니라 구조 변화까지 포함한 자동 설계(**Synthesis**) 생성이 가능하다

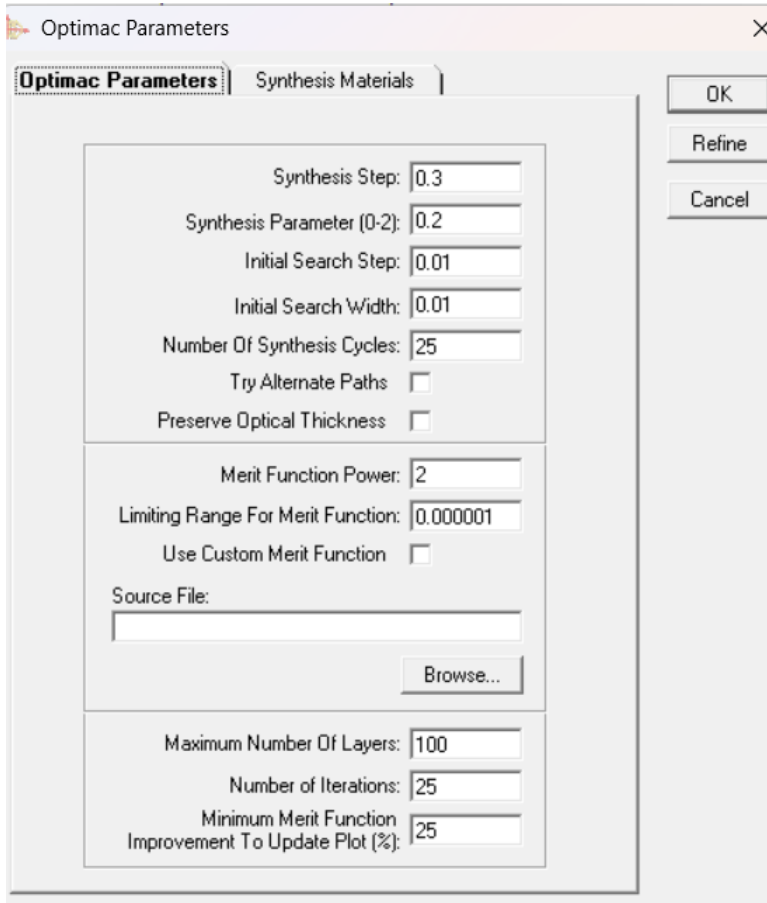
구조 과도(structural transitions) 생성이 가능하면

- ✓ 국소 최적(local minimum)에 덜 갇힘
  - ✓ 완전히 새로운 설계 형태 탐색 가능
  - ✓ 초기 설계가 없어도 설계 생성 가능
  - ✓ 진짜 "합성(synthesis)"이 가능해짐
- 한 층이 둘로 갈라짐
  - 새로운 얇은 층이 끼어듦
  - 불필요한 층이 제거됨

| 항목            | Simplex | Optimac        |
|---------------|---------|----------------|
| 속도            | 매우 빠름   | 느리지만 강력        |
| 구조 변경         | ✗       | ○              |
| 국소 최적화        | 매우 강함   | 강함             |
| 전역 탐색         | 약함      | 강함             |
| 합성(synthesis) | 부적합     | 매우 적합          |
| 실무 용도         | 미세 조정   | 구조 생성 + 고급 최적화 |

Optimac에서는 층 두께에 윗 limit(최대값 제한)은 없어요.

단, 음수가 되면 안 되고요. 다만 너무 두꺼운 층은 합성 과정 중에 대부분 자동으로 더 얇은 층들로 잘게 나누어지는(subdivision) 경우가 많습니다.



## Parameters

**Number of Synthesis Cycles** (합성 사이클 수) : **refinement(미세조정)**만 할지, **synthesis(층 삽입/합성)**까지 할지 결정합니다.

• 0 → **합성 없이 refinement만** 수행

합성을 하려면 좋은 출발 설계(Starting Design)가 있는지 여부에 따라 다름

출발 설계가 거의 없는 경우: **50 정도**가 적당

출발 설계가 꽤 좋은 경우: **더 낮은 값** (예: 10~30) 사용 가능

(너무 높으면 계산 시간이 길어지고 불필요한 층이 계속 추가될 수 있음)

**Synthesis Step** (합성 단계/삽입 층 두께) 합성 과정에서 새로 삽입되는 층의 **두께**를 의미합니다. 보통 **크게** 설정하는 것이 좋으며, 추천값은 **0.1 ~ 0.3** (단위: 광학 두께, 보통 quarter-wave 단위로  $\mu\text{m}$  또는  $\text{nm}$  기준) →

너무 작으면 세밀하지만 느리고, 너무 크면 효과가 떨어질 수 있음

**Synthesis Parameter** (합성 허용 파라미터, 일종의 허용 오차) 합성(층 추가/변경) 후 merit figure(성능 지표, 낮을수록 좋음)이 일시적으로 **나빠지더라도** 받아들일 수 있는 **최대 허용 악화 비율**입니다.

- 새 설계의 merit figure 증가율(악화율)이 이 값 이하라면 → 받아들임
- 추천 시작값: **약 0.2** 정도 → 이 값이 작으면 보수적(안전하게) 진행, 크면 더 과감하게 탐색하지만 발산 위험 ↑

**Initial Search Step & Initial Search Width** 탐색 방향의 초기 검색 간격과 검색 범위 ( $\pm$  값)

- 수렴이 잘 되면 Initial Search Step = Initial Search Width 로 설정 가능
- 수렴이 느리거나 성능 개선이 아주 천천히 일어나면 → 검색 범위(Width)를 **크게** 늘려줌 → refinement 중에는 자동으로 간격이 조정됨

**Try Alternate Paths** 현재 반복에서 가장 좋은 층 삽입 방법이더라도,

**다음 반복**에서 더 나은 결과를 얻을 가능성이 있다면 일부러 그 방법을 건너뛰고

대안 경로를 시도하게 함 → “탐욕적(greedy) 최적”이 아닌 **더 글로벌한 탐색**을 허용하는 옵션 (켜두면 더 좋은 설계를 찾을 확률 ↑, 하지만 계산 시간 ↑)

**Number of Iterations** 각 합성(synthesis) 사이에 수행하는 **refinement 반복 횟수**

추천: **40 ~ 50** 정도

- **Maximum Number of Layers** (최대 층 수) 완전 자동 실행 시 →

너무 크게 잡지 말 것 (얇은 층이 계속 추가되는 경향 있음) 사람이 모니터링하면서 적당한 시점에 수동 정지할 경우 → 크게 설정해도 괜찮음

- **Minimum Merit Function Improvement To Update Plot** 성능(merit figure)이 이전 플롯

대비 이 값만큼 개선될 때마다 자동으로 플롯(그래프)을 갱신·표시

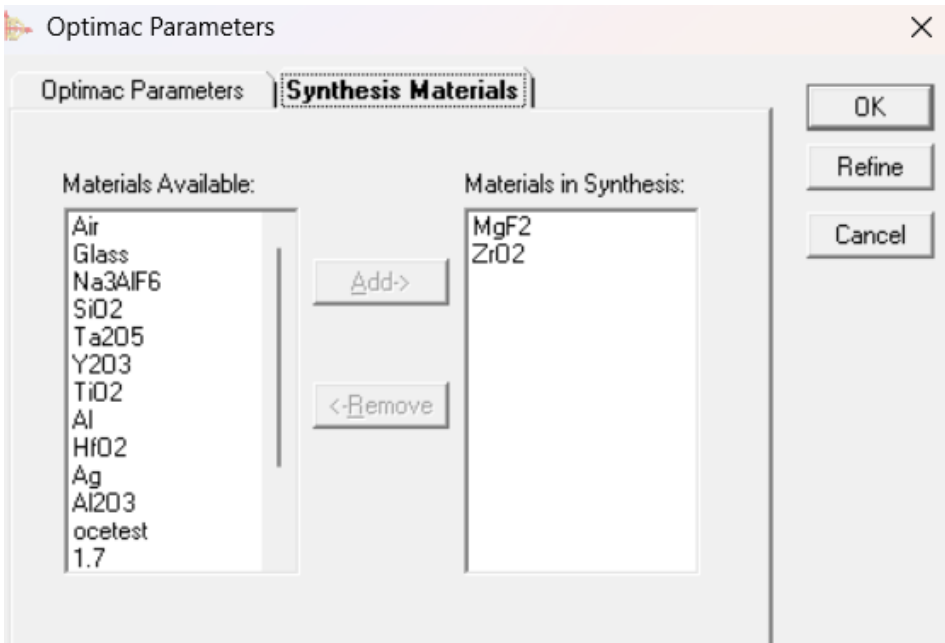
→ 너무 작게 하면 플롯이 너무 자주 갱신되어 느려질 수 있음

**Use Custom Merit Function, Source File, Browse...** → **Designs** 모드에서만 사용

가능하며, **Function 선택사항**이 있어야 활성화됨.

(커스텀 merit function을 직접 작성해서 사용할 수 있는 고급 기능,

일반 사용자에게는 보통 비활성)



### 구조 생성 재료( Synthesis Materials ) :

Optimac이 자동으로 층을 생성하거나 수정할 때 사용할 수 있는 재료 목록

"설계를 더 좋게 만들기 위해 층을 더 추가해도 좋은데,  
그때는 이 물질들(H, L)만 사용해" 라고 허락해주는 목록이라고 이해하시면 됩니다.

**재료 최적화:** 실제 공정에서 3가지 이상의 재료를 쓰기 어렵다면,  
리스트에서 불필요한 재료를 제거하여 알고리즘이  
**고굴절(H)과 저굴절(L) 두 가지만 사용하도록 제한**하는 것이 효율적입니다.

**새로운 시도:** 현재 설계에 쓰인 재료보다 더 나은 대안이 있을 것 같다면,  
설계에 포함되지 않은 재료를 리스트에 추가해 보세요.  
Optimac이 합성 과정에서 그 재료를 삽입해 보며 성능이 개선되는지 테스트할 것입니다.

**Design :** 최소한의 층(예: H-L 2층 또는 3층)으로 시작합니다.

**Targets :** 원하는 사양(반사율, 투과율 등)을 입력하고,

**Weight**를 조절해 강조하고 싶은 파장대를 지정합니다.

# Simulated Annealing (모의 담금질)

Simulated Annealing은 특별히 새로운 기법은 아니며

박막 코팅 분야에는 많이 적용되어 오지 않았다.

이 방법은 설계를 무작위로 교란시켜 Merit Function 표면 위를 돌아다니도록 하는 방식이다.

매번 새로운 교란이 일어날 때마다 새로운 Merit 값이 계산된다.

더 좋은 설계는 항상 받아들여지지만, 더 나쁜 설계도 **때때로 확률적으로 받아들여진다.**

이 확률은 공정이 진행됨에 따라 점점 줄어든다.

이 과정은 실제 금속 열처리(annealing) 과정을 모방하려는 시도로,

나쁜 결과를 받아들일 확률은 볼츠만 분포( $\exp(-E/kT)$ )에서 뽑은 난수에 의해 결정된다.

여기서  $E$ 는 Merit 값의 무작위 증가량을 나타내고,  $kT$ 는 "어닐링 온도"를 의미한다.

(여기서  $k$ 는 볼츠만 상수이며 소광계수(extinction coefficient)가 아니다.)

설계는 점차적으로 Merit 값이 최소가 되는 방향으로 이완(relax)된다.

일반적으로 이 과정을 오래 허용할수록 최종적으로 얻어지는 최소값은 더 좋아진다.

Simulated Annealing은 **뚜렷한 초기 설계가 없을 때 특히 효과적**이며,

특히 다른 기법들이 잘 작동하지 않는 경우,

입사각 효과(angle of incidence)가 포함된 규격에 대해 매우 좋은 반응을 보인다.

## 주요 용어 해설 및 실무 팁

- **Randomly perturbed (무작위 섭동)** : 기존 설계를 조금씩 무작위로 흔들어보는 것을 의미
- **Boltzmann distribution** : 성능이 나빠지더라도 일정 확률로 그 해를 받아들여, 지역 최적점(Local Minimum)이라는 '함정'에서 빠져나오게 하는 수학적 근거입니다.
- **No obvious starting design**: 보통 최적화는 좋은 초기 모델이 필요하지만, 이 기법은 초기 모델이 엉망이거나 아예 없을 때(랜덤하게 시작할 때) 유리합니다.

## Parameters

**Annealing Parameters**

**General**

Initial Temperature: 1000  
Final Temperature: 0  
Number of Iterations: 20000  
Minimum Merit Function Improvement To Update Plot (%): 25

**Merit Function**

Merit Function Power: 2  
Merit Function Limit: 0.01

**Thicknesses**

Refine Thicknesses   
Changes: Absolute  
Initial Standard Deviation: 0.02  
Final Standard Deviation: 0.0002

**Index**

Refine Index   
Changes: Absolute  
Initial Standard Deviation: 0.02  
Final Standard Deviation: 0.0002  
Common Scaling:

OK  
Refine  
Cancel

파라미터인 표준 편차(Standard Deviation)와 초기 온도(Initial Temperature)는 각각 별도로 지정됩니다. 층 두께 변동에 대한 표준 편차는 시작값과 종료값을 가집니다.

작업 초기에는 변동 폭이 상당히 커야 하지만, 작업 종료 시점에서의 큰 변동은 설계를 허용할 수 없는 범위까지 이동시키기 때문에 비효율적인 경향이 있습니다.

따라서 종료값을 시작값과 다르게 설정할 수 있습니다.

마찬가지로, 굴절률(Index) 변화 또한 고유의 표준 편차를 가지므로,

굴절률의 변화 프로파일이 두께 변화 프로파일을 반드시 따를 필요는 없습니다.

담금질 온도(Annealing Temperature)는 '도(Degree)' 단위로 측정되며,

1도는 시작 성능 지수(Merit Figure)의 1/10,000에 해당합니다.

적절한 초기값은 수백 또는 수천 단위입니다.

담금질 과정은 온도를 점진적으로 낮추어 종료값에 도달하게 하며,

이 종료값은 편의상 0으로 설정할 수 있습니다. 온도의 하강은 선형적이지 않습니다.

감소율은 프로세스 초기에 종료 시점보다 다소 더 크며,

이는 표준 편차의 경우도 마찬가지입니다.

두께를 **Absolute(절대 변화)**로 설정한 경우,  
 변동은 실제 두께의 절대적인 변화로 처리되며,  
 예를 들어 변동값이 0.2라면 현재 층 두께에  $0.2 \times \lambda_0$ 가 더해진다.

만약 변화를 **Relative(상대 변화)**로 설정하면,  
 층 두께는 현재 값의 0.2배만큼 증가하게 된다.

초기 단계에서는 Absolute 방식이 더 좋은 선택인데,  
 그 이유는 Relative 방식에서는 얇은 층들이 거의 움직이지 않기 때문이다.

충진 밀도(packing density)에 대해서도 Absolute 변화의 경우,  
 변동값이 현재 충진 밀도 값에 그대로 더해진다.  
 예를 들어 변동이 0.2라면 현재 충진 밀도에 0.2가 추가된다.

- Initial Std Dev = 최적화가 시작될 때 층 두께나 굴절률을 변화시키는 **최대 변화 폭**
- Final Std Dev = 최적화 작업이 마무리될 때 적용되는 **최소 변화 폭**
- Simulated Annealing의 "거칠게 탐색 → 정밀 수렴"을 만드는 핵심 파라미터
  - **Initial SD:** "초반엔 성큼성큼 크게 움직이며 명당을 찾기"
  - **Final SD:** "마지막엔 살금살금 움직이며 정확한 지점에서 멈추기"

| 설정 항목        | 권장 시작값 (Initial) | 권장 종료값 (Final) | 비고                           |
|--------------|------------------|----------------|------------------------------|
| Thickness SD | 0.1 ~ 0.5        | 0.001 ~ 0.01   | 설계 파장 $\lambda_0$ 대비 비율      |
| Index SD     | 0.05 ~ 0.2       | 0.0            | 굴절률(또는 Packing Density) 변동폭  |
| Temperature  | 500 ~ 2000       | 0              | 초기 Merit Figure의 1/10,000 단위 |

## Conjugate Gradient (공액 기울기법)

이 방식은 지역 최적화(Local Optimization)의 일종입니다.

따라서 초기 구조가 어느 정도 잡혀 있을 때, 이를 매우 정밀하게 깎아 나가는 '마무리 작업' 단계에서 주로 사용되며

미분 정보(Derivative Information)를 사용하여 평가 함수(Merit Function) 표면의 국부적 기울기(Local Slope)를 결정하는 알고리즘 범주에 속합니다.

이렇게 얻은 정보는 설계를 개선하려는 시도로서 설계 파라미터 (일반적으로 층 두께)를 변경하는 데 사용되며

초기 구조가 어느 정도 잡혀 있을 때, 이를 매우 정밀하게 깎아 나가는 '마무리 작업' 단계에서 주로 사용됩니다.

### “derivative information(미분 정보)”란?

Merit Function이 어느 방향으로 얼마나 급하게 변하는지를 알려주는 정보 즉, “어디로 움직이면 성능이 좋아질지” 알려주는 나침반입니다.

“지금 서 있는 지점 근처에서

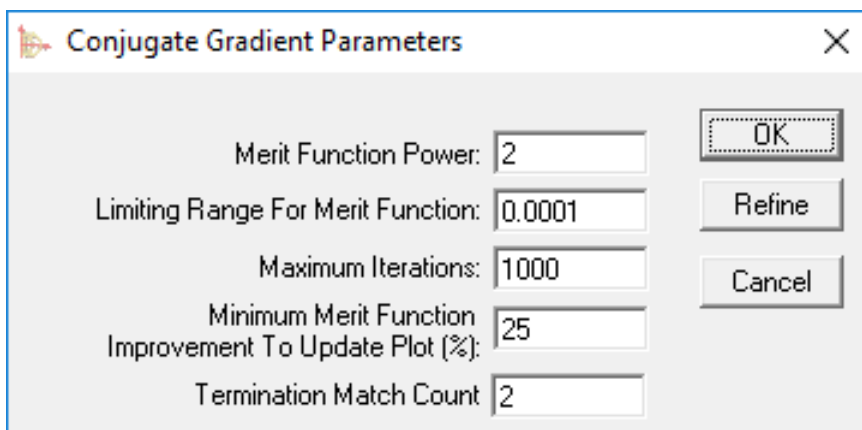
가장 빨리 내려갈 수 있는 방향”을 계산하는 방식입니다.

local slope of Merit Function surface

(평가 함수(Merit Function) 표면의 국부적 기울기(Local Slope))

Merit Function을 3D 지형으로 보면 높이 = Merit 값, 낮을수록 좋은 설계

이 정보는 설계 파라미터(보통 **층 두께**)를 **변경하여** 설계를 개선하려는 시도에 사용된다.



| 파라미터                           | 권장 설정 및 기능     | 실무 팁   |
|--------------------------------|----------------|--|
| <b>Merit Function Power</b>    | 2 (양의 짝수)      | 값이 클수록 오차가 큰 부분(나쁜 부분)을 고치는 데 더 집착합니다.                     |
| <b>Limiting Range</b>          | 목표하는 MF 값      | 내가 원하는 수준에 도달하면 계산을 멈추게 하는 장치입니다.                          |
| <b>Maximum Iterations</b>      | 적절한 반복 횟수      | 무한 루프에 빠지는 것을 방지합니다.                                       |
| <b>Plot Update (%)</b>         | 1% ~ 5%        | 계산 속도를 높이려면 이 값을 키워 그래프 갱신 횟수를 줄이세요.                       |
| <b>Termination Match Count</b> | 5 ~ 10 (또는 -1) | <b>[중요]</b> 최적화가 너무 빨리 끝난다면 이 값을 키우거나 -1로 두어 끝까지 파헤치게 하세요. |

최적화 중에는 성능 지수가 거의 변하지 않는 \*정체 구간(Plateau)\*이 나타날 수 있습니다. 이때 알고리즘이 "다 찾았다"고 착각해 멈추는 것을 방지하려면 Termination Match Count를 넉넉히 주어 정체 구간 이후의 더 깊은 골짜기를 찾을 기회를 주어야 합니다.

## Quasi-Newton

**Quasi-Newton(준 뉴턴)** 정밀화 방식 역시 평가 함수(Merit Function) 표면의 국소적 기울기를 결정하기 위해 미분 정보를 사용하는 알고리즘 범주에 속합니다. 이 정보는 설계를 개선하기 위해 설계 파라미터(일반적으로 층 두께)를 변경하는 데 사용됩니다.

**Quasi-Newton 파라미터** Quasi-Newton 정밀화의 파라미터는 Conjugate Gradient 파라미터와 유사합니다. 유일한 차이점은 \*재순환 간격(Recycle Interval)\*이라는 추가 파라미터가 있다는 것입니다. Quasi-Newton의 수렴 속도는 정밀화를 다시 시작(Restarting)함으로써 종종 개선될 수 있습니다.

재순환 간격 파라미터는 매 '설정된 반복 횟수(Recycle Interval)'마다 정밀화를 새로 시작합니다. 이 파라미터의 기준값을 결정하는 것은 어렵지만, 보통 **15에서 20 사이의 값**이 효과적입니다.

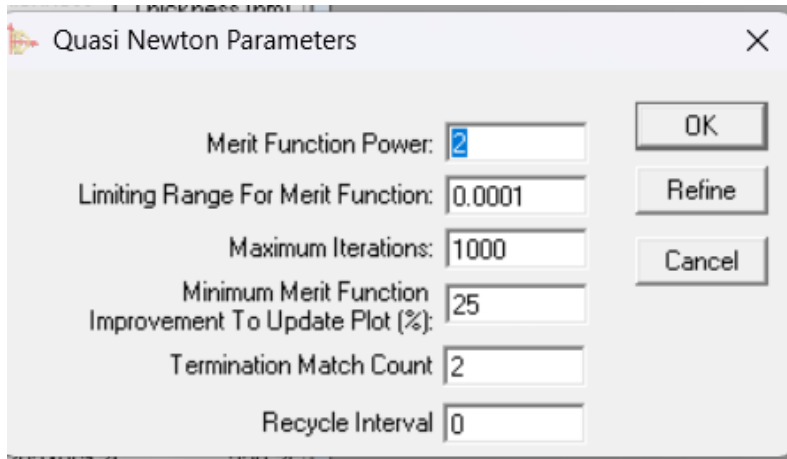
이 값을 0으로 설정하면 자동 재순환이 중단됩니다.

Quasi-Newton은 CG보다 더 빠른 고급 미분 기반 정련 기법이며, Recycle Interval을 통해 수렴 안정성과 속도를 개선할 수 있다.

### CG vs Quasi-Newton 비교

| 항목     | Conjugate Gradient | Quasi-Newton         |
|--------|--------------------|----------------------|
| 속도     | 빠름                 | ★ 더 빠름               |
| 곡률 고려  | ✗                  | ✓                    |
| 재시작 기능 | ✗                  | ✓ (Recycle Interval) |
| 안정성    | 높음                 | 다소 민감                |

### Parameters



### Needle Synthesis

어디에 새 층을 넣으면 가장 효과가 클지 자동으로 찾아주는 구조 생성 방법  
 구조(과도)생성 이란 : 설계 구조 자체를 바꾸면서 최적화, 단순히 두께만 조금 바꾸는 게 아니라 구조 변화까지 포함한 자동 설계(**Synthesis**) 생성이 가능하다

Merit Function 표면의 미분(도함수) 정보를 사용하여

**어디에 새 층을 삽입할지 결정하는 방법이다.**

기존 층 사이를 따라 두께가 0인 층(zero thickness layer)을 이동시키면서, Merit Function을 층 두께에 대해 미분한 값을 계산한다.

Merit Function의 미분값이 **가장 음수(negative)가 되는 위치가**

새로운 층을 삽입하기에 가장 좋은 지점이다.

한 번에 여러 개의 0두께 층을 삽입할 수도 있다.

한 번에 여러 개의 0두께 층을 삽입할 수도 있다.

모든 0두께 층이 삽입된 후에는 Conjugate Gradient 정련을 사용하여

새로 삽입된 층들의 두께를 0이 아닌 값으로 키운다.

이 정련 과정 중에, 다른 기존 층들의 두께도 Merit를 개선한다면 함께 변화될 수 있다.

이 과정은 원하는 설계가 얻어질 때까지,

또는 반복 횟수 제한 등 어떤 한계에 도달할 때까지 반복된다.

Zero-thickness layer : 실제로 존재하지 않는 "가상층"

두께 0인 층을 모든 층 사이를 이동시키면서 "만약 여기에 층이 생긴다면 Merit가 얼마나 좋아질까?" 를 미분값으로 평가합니다.

미분이 음수라는 것은 이 위치에서 층 두께를 조금만 늘리면 Merit가 급격히 줄어든다"는 뜻

[기존 구조]



0두께 층 이동하며 최적 위치 탐색



최적 위치에 새 층 삽입



CG로 두께 키움 & 구조 정련



다시 필요하면 새 층 추가

**왜 Conjugate Gradient와 같이 쓰는가?**

Needle은:

• "어디에 넣을까?"는 잘함

• "얼마나 두껍게 할까?"는 못함 ❌

**언제 Needle Synthesis가 좋은가?**

상황

적합성

층 개수 자동으로 만들고 싶을 때



처음부터 구조를 만들 때



Layer 개수를 모를 때



이미 구조가 완성된 경우



미세 조정만 필요할 때



# Parameters

Needle Synthesis Parameters

Synthesis Parameters | Conjugate Gradient Parameters | Synthesis Materials

Number of Synthesis Cycles: 100

Merit Function Limit: 0

Minimum New Thickness: 0

Minimum Improvement (%): 0

Maximum Number of New Needles: 3

Compact Thickness: 0

Compact Interval: 0

Try Alternate Paths

OK

Refine

Cancel

## 항목

## 기능 설명

### Number of Synthesis Cycles

**합성 주기 횟수:** 새로운 층 삽입을 시도할 최대 횟수입니다. 이 횟수에 도달하면 합성이 자동 종료됩니다.

### Merit Function Limit

**평가 함수 제한치:** 성능 지수(MF)가 이 값보다 낮아지면(목표 달성 시) 합성을 중단합니다.

### Minimum New Thickness

**최소 신규 두께:** 새로 삽입될 층이 가져야 할 최소 두께(nm)입니다. 너무 얇은 층 생성을 방지합니다.

### Minimum Improvement (%)

**최소 개선율:** 성능이 이 비율만큼 개선되지 않으면 탐색 공간을 넓히기 위해 재료를 추가로 배치합니다.

### Maximum Number of New Needles

**최대 신규 니들 수:** 한 주기(Iteration)마다 한 번에 추가할 수 있는 새로운 층의 최대 개수입니다.

## Compact Thickness

**압축 두께:** 이 두께보다 얇은 층은 불필요한 것으로 간주하여 제거(Compact)합니다. 단위는 nm입니다.

## Compact Interval

**압축 간격:** 몇 주기마다 한 번씩 설계를 압축(층 정리)할지 정합니다. 0이면 압축하지 않습니다.

## Try Alternate Paths

**대안 경로 시도:** 현재 최선이 아니더라도 다음 단계에서 더 나은 결과를 낼 수 있는 경로를 고려합니다.

• **Synthesis Materials** : 합성 시 사용할 **고굴절/저굴절 물질**을 미리 지정해두어야 합니다.

• **컴팩트 기능 (Compact):** 실무에서는 층수가 무한정 늘어나는 것을 막기 위해 Compact Interval을 1~5 정도로 설정하고, 제작 가능한 최소 두께를 Compact Thickness에 입력하는 것이 중요합니다.

• **동작 원리:** 프로그램이 설계 내부를 훑으며 미분값이 가장 낮은(성능 개선 효과가 큰) 곳에 두께 0인 층(Needle)\*\*을 찢어 넣은 후, Conjugate Gradient 기법으로 두께를 키워나갑니다.

• **Number of Synthesis Cycles (합성 주기 횟수) [100]:**

• **Merit Function Limit (평가 함수 제한치) [0]:**

• **Minimum New Thickness (최소 신규 두께) [0]:** 이 값보다 얇다면, 탐색 공간을 확보하기 위해 기판이나 입사 매질 쪽 층에 재료를 더 추가하여 탐색을 이어갑니다.

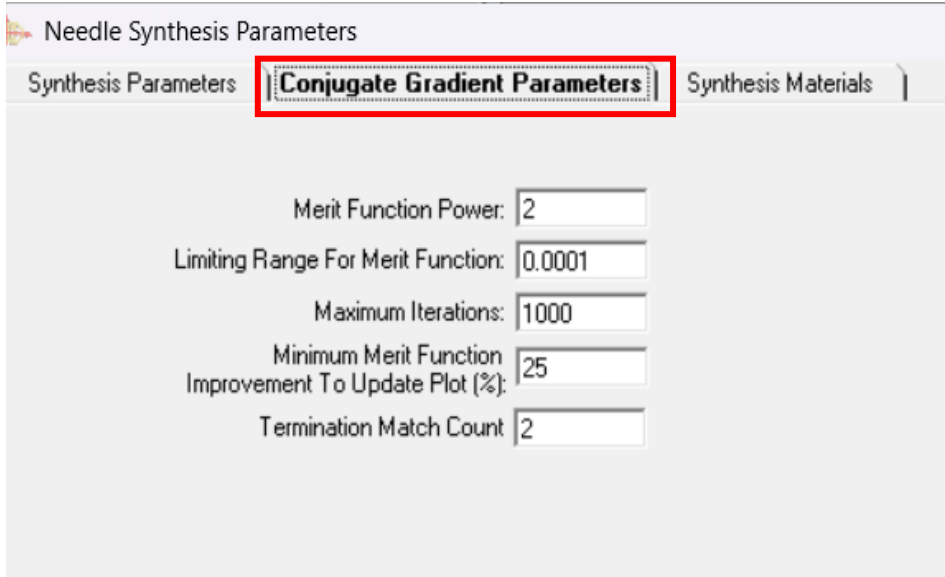
• **Maximum Number of New Needles (최대 신규 니들 수) [3]:**

- 한 번의 주기 동안 동시에 삽입할 수 있는 최대 층의 개수입니다.

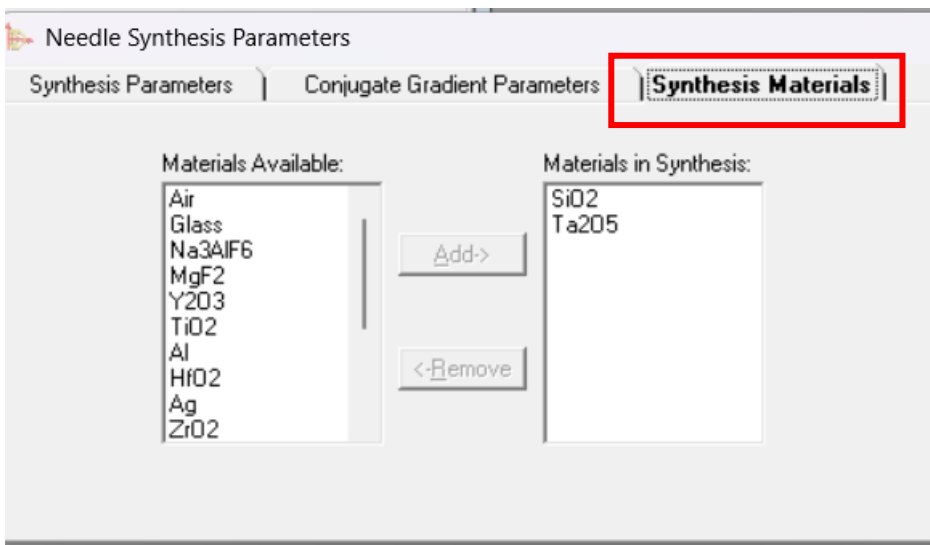
• **Compact Thickness (압축 두께) & Compact Interval (압축 간격) [0]:**

- **실무 핵심:** 제작이 불가능한 얇은 층을 자동으로 지워주는 기능입니다.
- Interval을 1~5 정도로 설정하고, Thickness에 실제 증착 가능한 최소 두께 (예: 5nm~10nm)를 입력하면 설계 효율이 매우 높아집니다.

**Conjugate Gradient Parameters)** 탭은 앞서 설명한 기울기법의 파라미터와 동일한 항목들을 포함합니다.



**Synthesis Materials( 구조 생성 재료)** 탭은 설계에 새로운 층을 삽입할 때 사용할 재료들의 목록을 보여줍니다. 기본적으로, 잠금 상태(Locked)가 아닌 설계 내의 모든 층 재료들이 사용 재료로 지정됩니다. 각 재료를 선택한 후 **추가(Add)** 또는 **제거(Remove)** 버튼을 클릭하여 목록에서 재료를 더하거나 뺄 수 있습니다.



# Differential Evolution

Differential Evolution(차분 진화)은 진화론적 최적화 알고리즘입니다.

이 알고리즘은 돌연변이(Mutation)와 우수 설계 선택(Selection)을 통해 설계 집단(Population)을 수정함으로써 문제에 대한 더 나은 해답을 찾으려 시도합니다. 프로세스는 시작 설계를 바탕으로 무작위 두께, 충전 밀도(Packing density) 또는 재료를 가진 설계 집단을 생성하는 것으로 시작됩니다.

두께와 밀도에 대한 제한은 설계상의 최대 및 최소 한계치 또는 오차 파라미터(Error parameters)에 의해 지정됩니다. 재료는 지정된 재료 목록 내에서 선택됩니다.

다음 조건 중 하나가 만족될 때까지 계속된다:

최대 세대 수(Maximum number of generations)에 도달했을 때 충분히 작은 Merit 값을 갖는 설계가 발견되었을 때 또한 현재 세대에서

가장 좋은 설계와 가장 나쁜 설계의 Merit 값 차이가 사용자가 지정한 값보다 작아질 경우에도 종료된다.

이는 "충분히 좋은 Merit 값에는 도달하지 못했더라도, 모든 설계가 거의 동일해져서 더 이상 진화가 없을 때" 과정을 멈출 수 있도록 해준다.

여러 설계 생성(무작위)



서로 섞고(Mutation)



좋은 것만 살아남음(Selection)



다시 세대 생성



수렴 or 종료

| 구분    | Refinement (CG, Quasi-Newton) | Differential Evolution (DE)    |
|-------|-------------------------------|--------------------------------|
| 작동 방식 | 현재 위치에서 내리막길 찾기 (미분 기반)       | 여러 후보군을 만들어 교배/변이 시키기 (유전 기반)  |
| 주요 장점 | 속도가 매우 빠르고 정밀함                | 함정(Local Minima) 탈출 능력이 매우 탁월함 |
| 단점    | 시작 구조가 나쁘면 길을 잃기 쉬움           | 계산 시간이 오래 걸리고 무거움              |

## 특징

| 항목                 | 의미           |
|--------------------|--------------|
| 재료 선택 가능           | 다양한 구조 생성 가능 |
| Packing density 포함 | 실제 공정 반영 가능  |
| 오차 기반 한계           | 현실적 설계 유지    |
| 종료 기준 다양           | 자동 수렴 감지     |

## 세대(Generations) 란

현재 설계 집단(population)을 가지고

새로운 설계 집단을 만들어 평가하고 교체하는 한 주기

- **초기 세대 (First Generation):** 시작 설계를 바탕으로 두께, 밀도, 재료 등이 무작위로 변형된 여러 개의 설계 후보군(Population)을 먼저 만듭니다.
- **변이와 교차 (Mutation & Crossover):** 각 세대의 설계 후보들끼리 서로 정보를 교환하거나 무작위 돌연변이를 일으켜 새로운 설계안들을 생성합니다.
- **선택 (Selection):** 새로 만들어진 설계안과 기존 설계안의 성능 지수(Merit Figure)를 비교하여 더 우수한 것만 다음 세대로 남깁니다.

표준 방식에서 다음 세대는 집단(Population) 내의 각 설계를 차례대로 고려하여 형성됩니다. 이전 세대에서 무작위로 세 개의 설계를 선택하여 새로운 설계를 만듭니다.

이 중 첫 번째 설계의 각 파라미터를 차례대로 수정합니다.

교차 확률(Crossover probability)은 해당 파라미터를 수정할지 여부를 결정합니다.

만약 파라미터를 수정하기로 결정했다면, 두 번째와 세 번째 설계에서 동일한 파라미터의 차이값을 구하고, 그 차이에 \*스케일 팩터(Scale factor)\*를 곱한 후, 그 결과를 첫 번째 설계의 파라미터에 더하는 방식으로 수정이 수행됩니다.

이렇게 변이(Mutation)가 완료된 첫 번째 설계는 현재 검토 중인 기존 설계와 비교됩니다.

만약 변이된 설계가 기존 설계보다 더 낮은 성능 지수(Merit figure)를 갖는다면, 기존 설계는 변이된 설계로 교체됩니다. 그렇지 않으면 기존 설계가 다음 세대에 그대로 유지됩니다. 집단 내의 모든 설계에 대한 검토가 끝나면 새로운 세대가 완성됩니다.

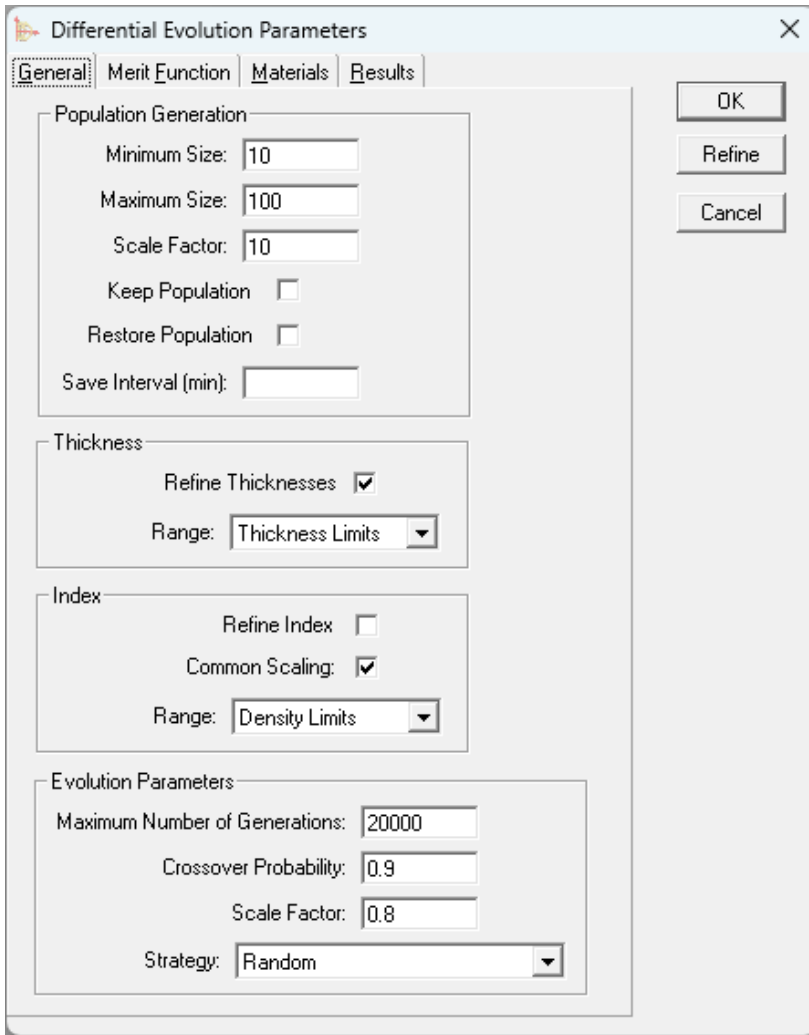
종료 기준 중 하나라도 충족되면 프로세스가 종료되고, 그렇지 않으면 다음 세대 생성을 시작합니다.

### 한 Generation에서 일어나는 일

| ① 현재 설계 집단이 있음                     | Generation 수 | 의미        |
|------------------------------------|--------------|-----------|
| ② 설계들끼리 섞고 변형(mutation, crossover) | 20~50        | 빠른 구조 탐색  |
| ③ 새 설계 생성                          | 100~200      | 정밀한 전역 탐색 |
| ④ Merit 평가                         | 300 이상       | 고난이도 설계   |
| ⑤ 좋은 설계만 남김                        |              |           |

이것이 **1 Generation**

# Parameters



## 항목

## 의미

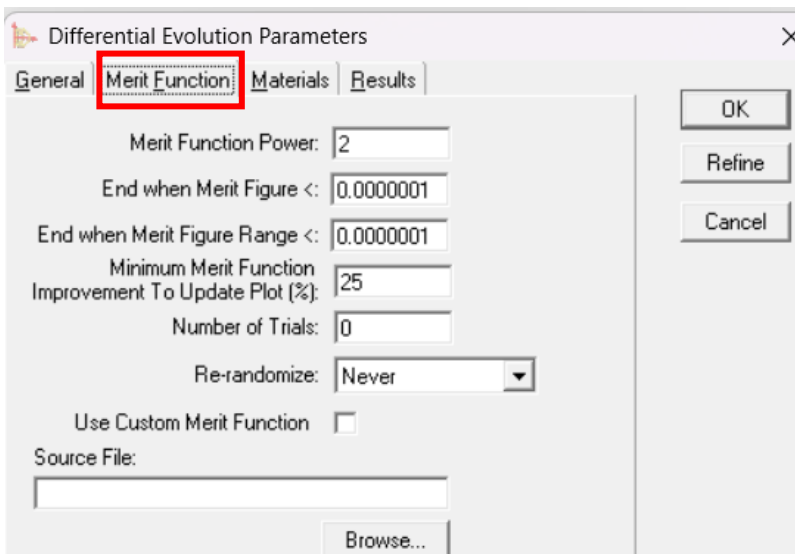
|                     |          |                      |
|---------------------|----------|----------------------|
| Minimum Size        | 최소 개체 수  | 한 세대에서 유지할 최소 설계 개수  |
| Maximum Size        | 최대 개체 수  | 한 세대에서 허용되는 최대 설계 개수 |
| Scale Factor        | 스케일 계수   | 변이 시 설계 변화량 크기       |
| Keep Population     | 개체군 유지   | 중간 결과를 유지하며 계속 사용    |
| Restore Population  | 개체군 복원   | 이전에 저장한 개체군을 불러와 재시작 |
| Save Interval (min) | 저장 간격(분) | 몇 분마다 개체군을 자동 저장할지   |

| 항목                 |         | 의미                              |
|--------------------|---------|---------------------------------|
| Refine Thicknesses | 두께 최적화  | 각 층 두께를 최적화에 포함                 |
| Range              | 범위      | 두께 변화 허용 범위 설정                  |
| Thickness Limits   | 두께 제한   | 각 층의 Min~Max 두께 범위 내에서만 변화      |
| Refine Index       | 굴절률 최적화 | 굴절률(또는 packing density)도 함께 최적화 |
| Common Scaling     | 공통 스케일링 | 모든 층의 굴절률 변화를 동일 비율로 처리         |
| Range              | 범위      | 굴절률 변화 허용 범위                    |
| Density Limits     | 밀도 제한   | packing density 범위 내에서만 변화      |

|                               |         |                   |
|-------------------------------|---------|-------------------|
| Maximum Number of Generations | 최대 세대 수 | 몇 세대까지 반복할지       |
| Crossover Probability         | 교차 확률   | 각 파라미터를 바꿀 확률     |
| Scale Factor                  | 스케일 팩터  | (B-C) 차이에 곱해지는 계수 |
| Strategy                      | 전략      | 변이 방식 선택          |
| Random                        | 무작위     | 무작위 선택 전략         |

### Evolution Parameters (핵심!)

| 항목                            | 추천값          | 의미         |
|-------------------------------|--------------|------------|
| Maximum Number of Generations | 5000 ~ 15000 | 충분한 전역 탐색  |
| Crossover Probability         | 0.8 ~ 0.9    | 탐색 활발하게    |
| Scale Factor                  | 0.6 ~ 0.8    | 변화 크기 적절   |
| Strategy                      | Random       | 기본 전략, 안정적 |



## Merit Function

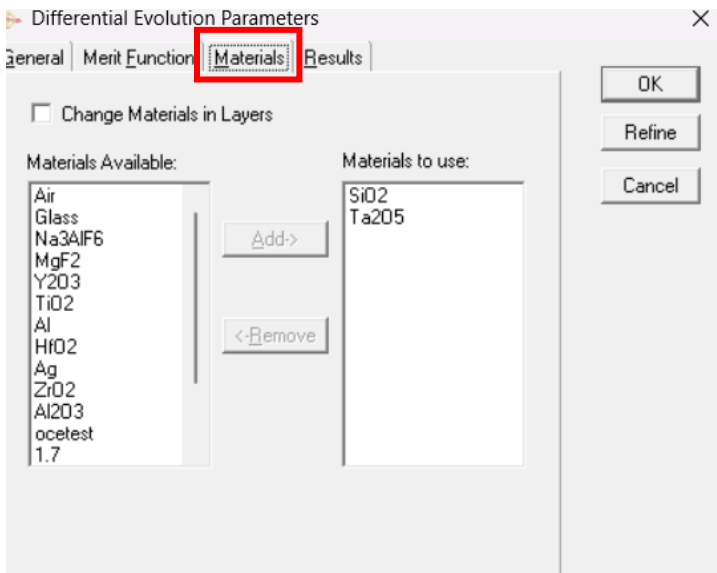
- **Merit Function Power (2)** : 값이 클수록 오차가 큰 부분에 더 집중하여 최적화합니다.  
보통 2를 사용합니다.
- **End when Merit Figure < (0.0000001)** : 성능 지수가 이 값보다 작아지면 최적화를 종료합니다.
- **End when Merit Figure Range < (0.0000001)** : 집단 내 최상위 설계와 최하위 설계의 성능 차이가 이 값보다 작아지면(수렴 완료), 더 이상 진화할 여지가 없다고 판단하여 멈춥니다.
- **Minimum Merit Function Improvement To Update Plot (%) (25)** : 성능이 25% 이상 개선될 때만 그래프를 갱신하여 계산 시간을 절약합니다.

Number of Trials : 0

동일한 조건으로 몇 번 반복 실행할 것인지 (중요한 설계는 3~5회 반복 추천)

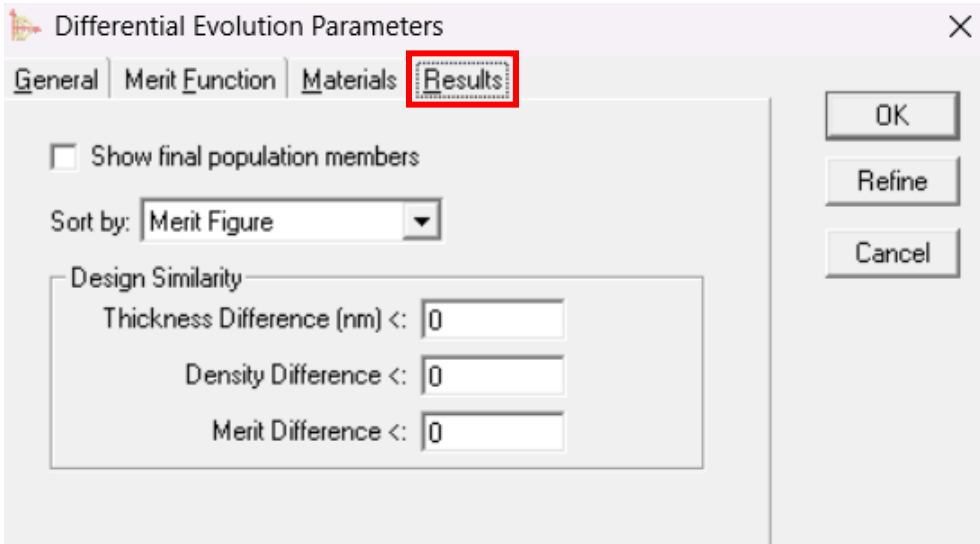
Re-randomize : Never 재랜덤화(집단 초기화) 옵션

| 옵션            | 의미         |
|---------------|------------|
| Never         | 현재 집단 유지   |
| On Stagnation | 개선 멈추면 재랜덤 |
| Always        | 매번 새로 시작   |



Materials 는 다른 것과 동일

## Results



**Results(결과)** 탭은 차분 진화(Differential Evolution)가 완료된 후 최종 집단(Final population)을 확인할 수 있게 할지 여부를 지정합니다.

\*Show final population members(최종 집단 구성원 표시)\*를 체크하면, 최적화 완료 후 집단에 포함된 설계 목록을 보여주는 표가 열립니다.

\*Sort by(정렬 기준)\*는 표가 처음 열릴 때의 정렬 순서를 지정합니다.

\*Design Similarity(설계 유사성)\*는 설계들을 '동일한 것'으로 간주할 기준을 설정합니다.

**Thickness / Density / Merit Difference:** 두 설계 간의 두께, 밀도, 성능 지수 차이가 설정값 이내라면 동일한 설계로 간주하여 하나만 표시합니다.

이를 통해 중복된 구조를 걸러내고 독특한 설계안들만 효율적으로 검토할 수 있습니다.

집단 내에서 한 그룹의 설계들이 동일하다고 판단될 경우, 표에는 그중 단 하나의 설계만 표시됩니다.

이러한 설계 유사성 기준과 정렬 순서는 나중에 생성된 집단 표 내에서 Edit > Parameters를 선택하여 변경할 수 있습니다.

## DE vs Simulated Annealing 핵심 비교

| 항목      | Differential Evolution (DE) | Simulated Annealing (SA) |
|---------|-----------------------------|--------------------------|
| 탐색 방식   | 집단 기반(여러 설계 동시에)            | 단일 설계 기반(하나씩 이동)         |
| 탐색 성격   | 넓고 구조적인 전역 탐색               | 랜덤 워크 기반 점진 탐색           |
| 최적화 속도  | 느리지만 안정적                    | 빠르지만 들쭉날쭉                |
| 지역최적 탈출 | 매우 강함                       | 가능하지만 확률적                |
| 설계 다양성  | 매우 높음                       | 없음 (한 설계만 추적)            |
| 시간 소요   | 큼                           | 상대적으로 작음                 |
| 구현 난이도  | 높음                          | 비교적 단순                   |
| 결과 재현성  | 높음                          | 낮음(랜덤성 큼)                |

### ● DE를 써야 할 때

- ✓ 구조가 전혀 없음
- ✓ 복잡한 다중 목표
- ✓ 다양한 구조를 보고 싶음
- ✓ 강건 설계 필요
- ✓ 계산시간 감수 가능

### ● SA를 써야 할 때

- ✓ 시작 설계 있음
- ✓ 각도/편광 문제
- ✓ 빠른 개선 필요
- ✓ 구조 유지하면서 개선

DE는 “구조를 찾는 데” 강하고,

SA는 “구조를 다듬는 데” 강하다.

설계 초기엔 DE, 중후반엔 SA/CG가 최적 조합이다.

## Non-Local Refinement

지역 최적해(Local Minimum) 방식인 Conjugate Gradient나 Quasi-Newton은 현재 위치(시작점)에서 '가장 가까운 골짜기'를 찾아 내려갑니다.

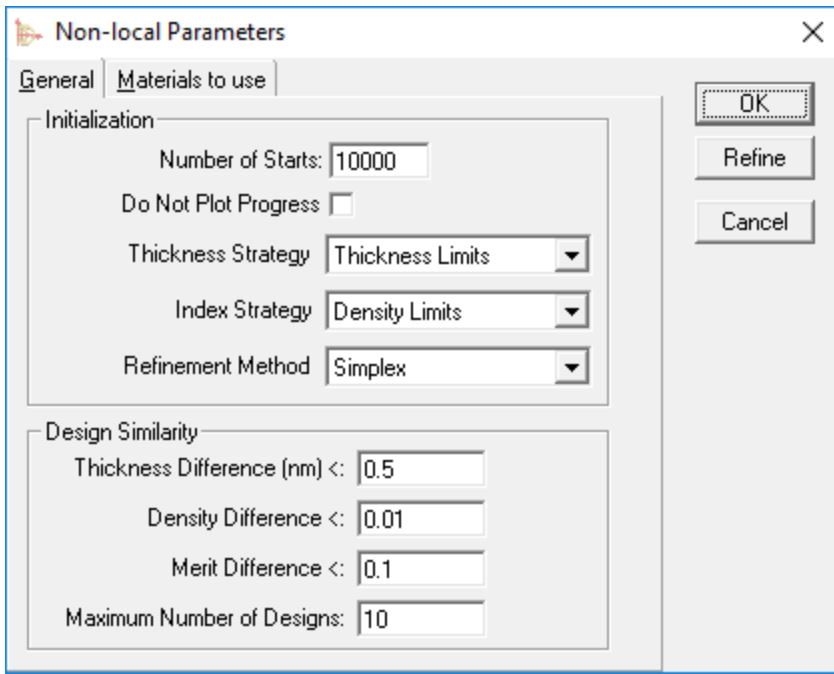
만약 더 깊고 좋은 골짜기가 옆에 있더라도, 현재 위치에서 언덕에 가려 보이지 않는다면 알고리즘은 이를 찾지 못하고 가까운 곳에 멈춰버립니다.

이런 단점을 고려하여 최소점(best minimum)을 찾을 가능성을 높이는 방법으로는 통계 기반 기법(statistics-based techniques)을 사용하는 것이 있는데

예를 들어 **Simulated Annealing**이나 **Differential Evolution**이 여기에 해당되며 또 다른 방법으로는 **다른 최적화(refinement) 기법들을**

**여러 다른 시작점 (starting point)에서 실행하는 Non-local refinement**입니다.

# Parameters



- **Number of Starts: 10000**

→ Non-local refinement가 시작할 **다른 시작점의** 수입입니다.  
10,000이면 10,000개의 서로 다른 초기 설계를 사용해 정련을 시도합니다.

- **Do Not Plot Progress**

→ 체크하면 **진행 상황 그래프를 표시하지 않음.**  
→ 체크 해제하면 각 시작점마다 진행 상태를 시각적으로 볼 수 있습니다.

- **Thickness Strategy: Thickness Limits**

→ 설계층 두께를 초기화할 때 사용할 전략입니다.  
→ Thickness Limits는 **층 두께의 최소/최대값 범위** 내에서 초기 두께를 결정합니다.

- **Index Strategy: Density Limits**

→ 각 재료의 굴절률(또는 밀도)을 초기화할 때 사용할 전략입니다.  
→ Density Limits는 **설정된 밀도 범위 내에서 난수 초기값**을 선택합니다.

- **Refinement Method: Simplex**

→ 각 시작점에서 적용할 **정련 기법**을 선택합니다.  
→ 여기서는 **Simplex 방법**을 사용하여 각 초기 설계를 최적화합니다.

## Design Similarity (설계 유사성)

Non-local refinement는 서로 비슷한 설계는 중복 계산하지 않도록 유사도 기준을 설정할 수 있습니다.

## Thickness Difference (nm) < 0.5

→ 두 설계의 층 두께 차이가 0.5nm 미만이면 같은 설계로 간주하고 중복 정련하지 않음.

## Density Difference < 0.01

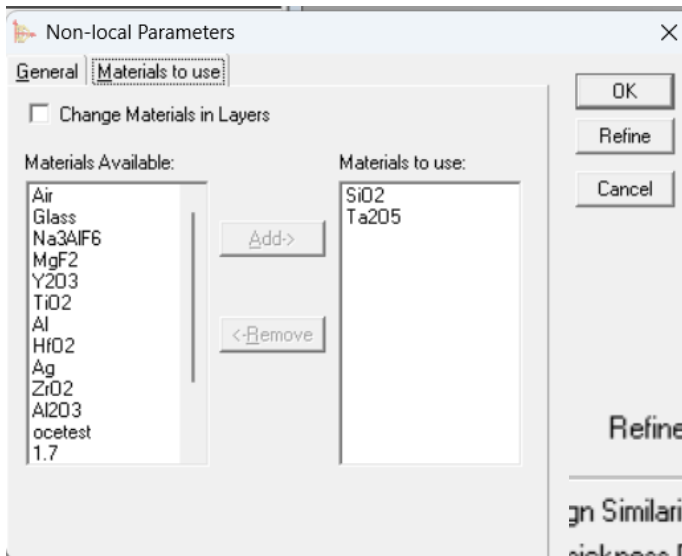
→ 두 설계의 밀도 차이가 0.01 미만이면 같은 설계로 간주.

## Merit Difference < 0.1

→ 두 설계의 merit function(성능 지표) 차이가 0.1 미만이면 중복 설계로 간주.

## Maximum Number of Designs: 10

→ 최종적으로 동일 설계로 간주되는 경우 최대 10개의 설계까지만 유지.



Non-local Refinement 계산에 실제로 투입될 재료들로 알고리즘은 무작위로 수천 번의 시작점을 만들 때 이 목록에 있는 재료들만 사용하여 설계를 구성합니다.

사용되는 Refinement Method 따라 다양한 최적화의 결과가 보여집니다.