

Research Paper 열·유체 부문

# 고출력 광섬유 레이저 냉각판 설계과정에서 나타난 열전달 이론, CFD 및 실험 결과값의 비교

김태우<sup>\*,1)</sup> · 이강인<sup>1)</sup> · 정민완<sup>1)</sup> · 정예지<sup>1)</sup> · 고광웅<sup>1)</sup> · 이용수<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> (주)한화 레이저개발2팀

## Comparison of Heat Transfer Theory, CFD and Experimental Results in the Design Process of High-Power Fiber Laser Cooling Plate

Taewoo Kim<sup>\*,1)</sup> · Kangin Lee<sup>1)</sup> · Minwan Jeong<sup>1)</sup> · Yeji Jeong<sup>1)</sup> · KwangUoong Koh<sup>1)</sup> · Yongsoo Lee<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Laser System R&D Team 2, Hanwha Corporation, Korea

(Received 4 June 2021 / Revised 9 August 2021 / Accepted 17 September 2021)

### Abstract

For the stabilization of laser output power and wavelength of the high power fiber laser, the cooling plate must be properly taken into account. In this study, three analyzing methods which are heat transfer theory, CFD and experiment are used to analyze cooling plate performance by measuring pump Laser Diode(LD) temperature. Under limited operating conditions of a cooling plate, the internal flow of cooling plate is transitional flow so that the internal flow is assumed to be laminar and turbulence flow and conducted theoretical calculation. Through CFD, temperature of pump LD and characteristics of the internal flow were analyzed. By the experiment, temperature of pump LD was measured in real conditions and the performance of the cooling plate was verified. The results of this study indicate that three analyzing methods are practically useful to design the cooling plate for the high power fiber laser or similar things.

Key Words : High Power Fiber Laser(고출력 광섬유 레이저), CFD(연산유체역학), Cooling Plate(냉각판)

### 기 호 설 명

$A$	면적	$[m^2]$	$D$	수력직경	$[m]$
			$\rho$	밀도	$[kg/m^3]$
			$\mu$	점성계수	$[Ns/m^2]$
			$k$	열전도율	$[W/mK]$
			$\mu$	점성계수	$[Ns/m^2]$
			$C_p$	비열	$[J/kgK]$

\* Corresponding author, E-mail: twk@hanwha.com  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

$\dot{m}$	질량유량	[kg/s]
$v$	유속	[m/s]
$Re$	레이놀즈 수	[-]
$Pr$	프란틀 수	[-]
$Nu$	넛셀 수	[-]
$h$	대류열전달계수	[W/m <sup>2</sup> K]
$\dot{Q}$	열량	[W]
$T$	온도	[°C]
$t$	두께	[m]
$R$	열저항	[K/W]

하 첨 자

$ch$	유로 기호	[-]
$ch_{wall}$	유로 내부 열교환 면적	[-]
$i$	유로 입구	[-]
$o$	유로 출구	[-]
$\iota$	냉각 유체	[-]
$CP$	냉각판	[-]
$LD$	레이저 다이오드	[-]
$TIM$	열전달물질	[-]

1. 서 론

광섬유 레이저는 다른 종류의 레이저에 비해 크기가 작고 내환경성이 좋아 군사용 장비로 개발하기 좋은 장점이 있다<sup>[1]</sup>. 전 세계적으로 광섬유 레이저를 무기화하기 위해 연구가 활발히 이루어지고 있다.

단일 채널의 고출력, 고품질 광섬유 레이저는 현재 수 kW 급으로 제작되고 있으며 수십 kW급의 고출력 레이저를 단일 광섬유 레이저로 제작하는 데는 한계가 존재한다. 이를 극복하고자 여러 개의 레이저채널을 결합하는 방법이 유리하다. 파장제어 빔결합(Spectral Beam Combining, SBC)방식은 파장이 서로 다른 좁은 선폭의 고품질 레이저를 회절격자에 각기 다른 각도로 조사하여 회절 이후 하나의 빔으로 결합하는 방법이다<sup>[2]</sup>. SBC 방법은 안정적인 출력과 높은 빔결합 효율을 달성할 수 있지만 단일 레이저 채널에서 먼저 좁은 선폭과 안정적인 출력을 보장해야한다.

고출력 레이저 빔을 만들기 위해서 출력 레이저 빔 에너지보다 더 많은 에너지를 레이저모듈에 공급하는

데, 이때 공급한 에너지의 대부분은 열에너지로 소산된다. 빔결합을 위해 개발하는 레이저의 출력이 1 kW로 가정하였을 때 발열소자별 발생하는 열량은 Table 1과 같다. 레이저 채널의 발열량 중 약 70 %는 증폭 광섬유에 에너지를 공급하여 레이저빔의 출력을 증가시키는 주증폭부 펌프 LD(이하 LD)에서 발생한다.

Table 1. Heat of heating components of the 1 kW laser module

Heating component	Heat (W)
Pre-amplifying active fiber	3.01
Main amplifying active fiber	147.5
Pre-amplifying fiber combiner	0.75
Main amplifying fiber combiner	37.5
CLS	61.3
Pre-amplifying pump LD	40.0
Main amplifying pump LD	1440

LD는 구동 온도에 따라 파장과 출력이 달라진다<sup>[3]</sup>. LD의 파장과 출력의 변화는 레이저의 빔품질과 출력에 영향을 주므로 결과적으로 레이저 출력 증대를 제한하는 요인이 된다. 따라서 수십 kW 고출력 레이저를 개발하기 위해선 LD의 구동 온도를 안정시키기 위한 냉각판이 반드시 필요하다.

본 연구에서는 단일 1 kW 레이저모듈을 가정하여 LD의 발열량을 설정한 후 레이저 가동시 발생하는 열을 안정적으로 제어하는 수냉식 냉각판을 이론해석, CFD 해석 및 실제 실험을 통해 분석하였다.

2. 냉각판 모델링

2.1 레이저모듈 발열소자 배치

Fig. 1은 현재 개발 중인 레이저모듈의 발열소자 배치를 나타낸다. 발열소자는 냉각판을 기준으로 양면 거울 대칭으로 부착되어 레이저모듈 1개당 2개의 레이저 채널을 형성한다. 따라서 1개 레이저 모듈에서 2개의 레이저 출력이 나오며 이는 레이저모듈의 획기적인 소형/경량화를 가능하게 한다. 하지만 전체 발열량 중 70 %가 발생하는 LD가 냉각판의 국소부위에 대

칭으로 장착되므로 해당 부분에 매우 높은 열이 발생한다.

### 2.2 해석형상

레이저모듈 냉각에서 가장 중요한 부분은 LD이다. 해당 요소에서 가장 많은 열이 발생하며 LD의 안정적인 온도유지가 전체 레이저시스템의 성능을 보장하기 때문이다. 해석형상은 1 kW 레이저 1채널 사용을 가정하여 LD 4개를 냉각판 양면에 두 개씩 거울 대칭으로 부착하였다. LD 하우징은 구리로 이루어져 있으며 크기는 Everbright사 LD는 120 mm × 60 mm × 16 mm, nlight사 LD는 125 × 59 × 17 mm 이다.

모델링한 냉각판 형상은 Fig. 2와 같다. 냉각판 소재는 알루미늄이며 크기는 180 × 180 × 13 mm 이다. 냉각유로는 LD 아래를 교차하여 지나가며 유로 크기는 9 × 10 mm 이다.

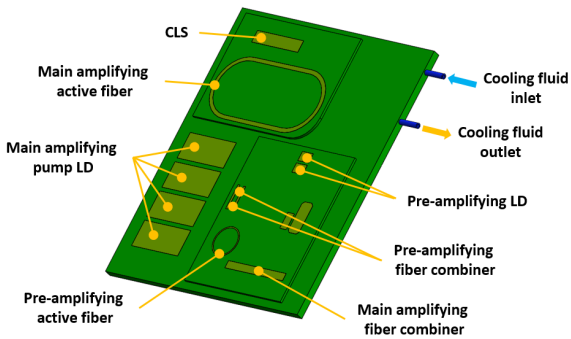


Fig. 1. Arrangement of heating component on the cooling Plate

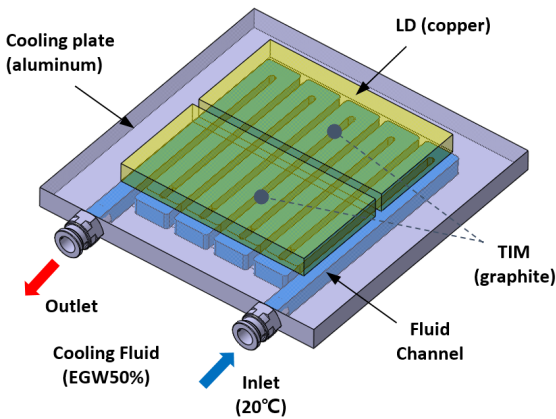


Fig. 2. The cooling plate for analysis

냉각유체는 에틸렌글리콜과 물을 50 %씩 혼합한 용액(EGW50%)을 사용한다. EGW50%의 어는점은 -37 °C로 부동액으로 널리 사용되고 있으며 레이저모듈을 무기화 하여 야전에서 사용하는 것을 가정하였다. 해석에 사용한 EGW50%의 물성치를 Table 2로 나타내었다. 냉각판에 공급되는 냉각유체의 온도는 20 °C이며 유량은 6.5 liter/min 이다. 냉각판과 LD 사이에는 그라파이트 시트를 열전달물질(Thermal Interface Material, TIM)로 사용하여 접촉면의 접촉 열저항을 줄이고자 하였다. 사용된 그라파이트 시트의 열물성치는 Table 3과 같다<sup>4,5)</sup>.

Table 2. Thermo-physical properties of EGW50%

T (°C)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Viscosity (Ns/m <sup>2</sup> )	Specific Heat (J/kgK)	Thermal Conductivity (W/mK)
15	1059.0	0.0044	3277.7	0.421
20	1056.1	0.0039	3287.5	0.426
25	1053.3	0.0034	3297.6	0.430
30	1050.4	0.0029	3307.9	0.434

Table 3. TIM thermophysical properties

Material	Graphite Sheet
Thickness	0.1 mm
Thermal Conductivity (x-y plane)	700 W/(mK)
Thermal Conductivity (z direction)	15 W/mK

### 3. 이론해석

모델링한 냉각판의 냉각유로 단면적은 0.00009 m<sup>2</sup>이며 수력직경  $D = 0.011$  m 이다. 유로 내부의 전체 표면적  $A_{chwall}$ 은 0.456 m<sup>2</sup> 이다. 공급 유량은 6.5 liter/min은 질량유량  $\dot{m} = 0.115$  kg/s 에 해당하며 냉각유체의 유로 내 속도는  $v = 1.20$  m/s 이다. 실제 LD의 가동 환경은 레이저모듈 내부에 장착되어 하우징으로 밀폐된다. 레이저모듈 내부의 정체된 공기의

대류열전달 효과는 매우 작을 것으로 예상되며 냉각관의 냉각유체를 이용한 강제 냉각이 압도적일 것으로 예상된다. 또한 LD 발열량중 얼마가 대류를 통해 열전달되는지 참고할만한 선행 연구자료가 없다. 따라서 본 연구에서는 LD에서 발생한 열이 모두 냉각관을 통하여 냉각수에 전달되는 것으로 가정하였다. 이론해석은 계산의 편의성을 위해 모든 접촉면은 완벽히 면접촉이 된상태로 가정하였고 Qusai 1-D로 가정하여 열교환이 냉각관의 수직한 방향으로 이루어진다.

열저항은 LD에서 발생한 열량은 총 1440 W 이며 열평형공식 (1)을 이용해 계산한 출구 유체의 온도  $T_o = 23.9 \text{ }^\circ\text{C}$  이다.

$$\dot{Q} = \dot{m}Cp(T_o - T_i) \tag{1}$$

입출구 유체온도의 산술평균  $22.0 \text{ }^\circ\text{C}$ 을 냉각관 내부를 흐르는 냉각유체의 평균온도  $T_i$ 로 가정하였다.

냉각유체의 유동형태는 레이놀즈수를 이용하여 추정한다. 많은 선행연구에서 직선 관내유동에서 유체는 레이놀즈수가 2300 이하일 경우 층류, 4000 이상일 경우 난류로 발달하며 그 사이의 영역은 천이영역으로 발달하는 것을 검증하였다<sup>6)</sup>. 본 연구에 사용된 냉각유체의 레이놀즈수를 식 (2)으로 계산한 결과  $Re = 3566.2$ 으로 난류유동에 가까운 천이영역에 해당한다.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{2}$$

천이영역의 열교환 특성은 예측하기 매우 어려운 것으로 알려져있다. 선행연구<sup>7)</sup>에서는 경계층이 완전히 발달한 관내 천이영역의 열교환 특성은 유로 입구 형상에 따라 달라지는 것을 실험적으로 확인하였다. 본 연구의 유로는 원형입구로부터 사각단면 유로로 변화하며 유로의 방향전환이 반복되므로 경계층이 완전히 발달함을 입증 할 수 없다. 본 실험에 적용할 천이영역 열전달 해석기법이 없으므로 본 연구에서는 냉각수의 유동형태를 완전히 발달된 층류유동 및 난류유동으로 나누어 LD의 온도를 예측하였다.

### 3.1 층류유동

직사각형 관을 흐르는 층류유동의 넛셀 수는 관의 가로세로비와 표면의 열유속 및 온도에 따라 달라진다. 본 연구에서 사용된 냉각관 유로의 가로세로비는

1.11이며 일정한 열유속 환경에서  $Nu = 3.67$  이다<sup>8)</sup>. 넛셀 수와 식 (3)를 이용해 계산한 층류유동의 대류열 전달계수  $h = 145.9 \text{ W/m}^2\text{K}$  이다.

$$Nu = \frac{hD}{k} \tag{3}$$

냉각관 내부의 냉각 유체에서부터 LD 표면까지의 열전달 과정 도식도를 Fig. 3으로 나타내었다. 열저항 회로는 냉각 유체의 대류열저항( $R_{conv}$ ) 식 (4)와 냉각관, TIM 및 LD의 전도열저항( $R_{cond}$ ) 식 (5)로 이루어진다. 전체 저항을 이용해 식 (6)으로 계산한 LD 표면의 온도는  $46.5 \text{ }^\circ\text{C}$  이다.

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \tag{4}$$

$$R_{cond} = \frac{L}{kA} \tag{5}$$

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} \tag{6}$$

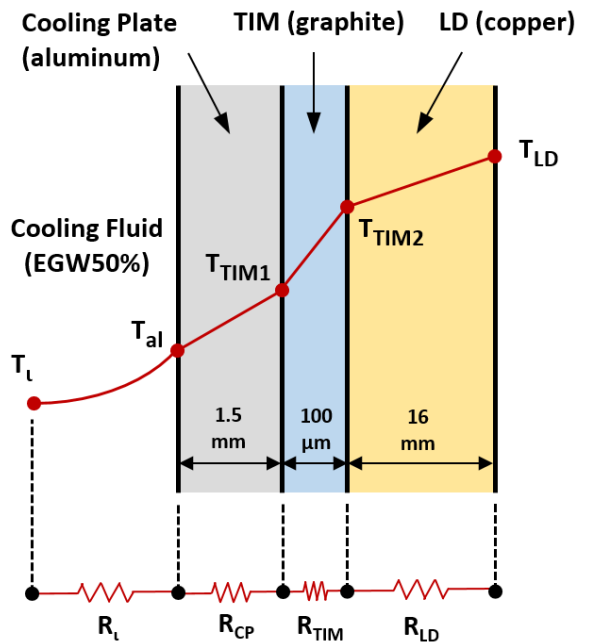


Fig. 3. Thermal resistance schematic of the cooling plate

### 3.2 난류유동

유동의 속도 경계층과 열 경계층의 상대적 두께를 나타내는 프란틀 수는 식 (7)로 계산한다. 본 연구에 사용된 냉각유체의 프란틀 수는  $Pr = 29.9$  이다.

프란틀 수와 Dittus-Boelter 공식 (8)을 이용하여 유체의 넛셀 수를 구할 수 있으며 지수  $n$ 은 유체를 가열할 때 0.4, 냉각할 때 0.3이다. 본 연구에서 냉각유체는 가열되므로 0.4로 계산하여  $Nu = 62.9$  이다.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\kappa} \quad (7)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^n \quad (8)$$

넛셀 수를 이용해 식 (3)으로 계산한 난류유동의 대류열전달계수  $h$ 는  $2446.2 \text{ W/m}^2\text{K}$  이다.  $h$  값과 식 (4) ~ (6)을 이용해 계산한 난류유동일 때 LD 표면의 온도는  $26.1 \text{ }^\circ\text{C}$  이다.

## 4. CFD 해석

### 4.1 격자 생성

냉각판과 LD 및 유로형상을 CFD 해석하기 위한 격자 형상은 Fig. 4와 같다. 냉각유로와 LD 영역은 Hex dominant, 냉각판 영역은 tetra-hedral 격자를 사용하였다. Fig. 5는 격자계 테스트를 위하여 격자 개수를 25000 ~ 80000개로 수정하며 LD 최고온도를 측정된 결과이다. 격자수가 많아질수록 LD 최고온도는 낮아지며  $34.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 수렴하였다. 격자개수가 52557개에서 LD 최고온도는 수렴온도와 약 0.3 % 차이가 발생한다. 해석시간과 자원의 효율성을 고려하여 0.3 %의 차이는

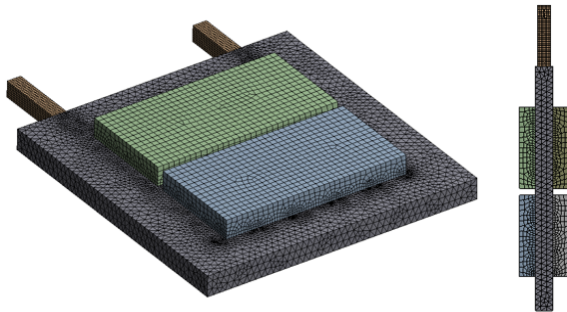


Fig. 4. Mesh of the cooling plate and LDs

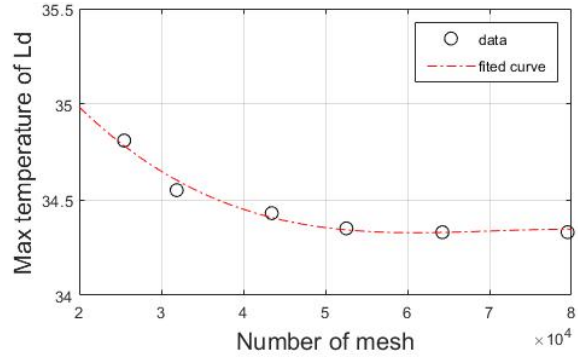


Fig. 5. Grid independent test

오차의 범위로 감안하여 52557개 격자모델을 사용하였다. 격자품질은 Orthogonal quality와 Skewness가 각각 평균 0.74, 0.27이다. Orthogonal quality와 Skewness는 각각 0.7 이상, 0.5 이하일 경우 격자품질이 매우 좋은 것으로 알려져있다<sup>[9]</sup>. 따라서 생성한 격자의 품질은 해석에 적합한 격자로 판단하였다.

### 4.2 수치해석 조건

CFD 해석은 ANSYS Fluent를 사용하였으며 해석 프로그램에서 설정한 해석 조건들은 Table 4와 같다. 작동유체인 EGW50%의 물성치는 Table 2의 4개 온도 지점의 값을 이용하여 구분적 선형으로 입력하였다.

Table 4. Fluent analysis conditions

CFD program	ANSYS Fluent
Turbulent model	k- $\epsilon$ realizable
Wall function	Standard wall function
Fluid Properties	Piecewise linear 4 points of 4 properties ( $\rho$ , $\mu$ , $C_p$ , $k$ )
Heat flux	Volume heat source $3211806 \text{ W/m}^3$
Inlet condition	Mass flow inlet $0.115 \text{ kg/s}$
Outlet condition	Pressure outlet
Solution methods	SIMPLE
Residual	Continuity, velocity, k, $\epsilon$ : $1.0\text{e-}5$ Energy : $1.0\text{e-}7$

발열은 LD 체적에서 360 W가 발생하는 체적발열로 부여하였다. TIM인 그라파이트시트의 열전도도는 냉각판 표면과 평행방향으로 700 W/mK, 수직방향으로 15 W/mK를 부여하였다. 레이저모듈 내부의 정채된 공기에서는 온도차에 의한 자연대류만 발생한다. 본 연구에서는 LD표면과 공기사이의 대류열전달계수  $h$ 를 매우 안정된 공기의 대류열전달 수준인  $3 \text{ W/m}^2\text{K}$ 로 가정하였다<sup>[10]</sup>. 해석 종료 조건은 연속, 운동량방정식의 수렴오차  $1.0\text{e}^{-5}$ , 에너지방정식의 수렴오차  $1.0\text{e}^{-7}$  이하로 설정하였다.

#### 4.3 수치해석 결과

해석결과 냉각판과 LD 표면의 온도구배를 Fig. 6로 나타내었다. 4개 LD 표면의 평균온도는  $33.6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 최고온도는  $34.4 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 출구 냉각수의 온도는  $23.3 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다. 냉각수 입구에 가까운 냉각판과 LD 부분이 온도가 낮게 유지되었고 먼 부분의 온도가 높게 나타났다.

유로 내부의 유체 속도구배는 Fig. 7과 같다. 유로의 모서리 부분과 급격히 꺾이는 지점에서 재순환영역이 발생하는 것을 확인 하였다. 입출구의 평균 유속은  $1.20 \text{ m/s}$ 이며 관내 일부 영역에서 유속이  $2.1 \text{ m/s}$ 까지 상승하였다. 재순환 영역으로 인한 유로 유효면적 감소효과가 발생하여 유속이 빨라진 것으로 판단된다.

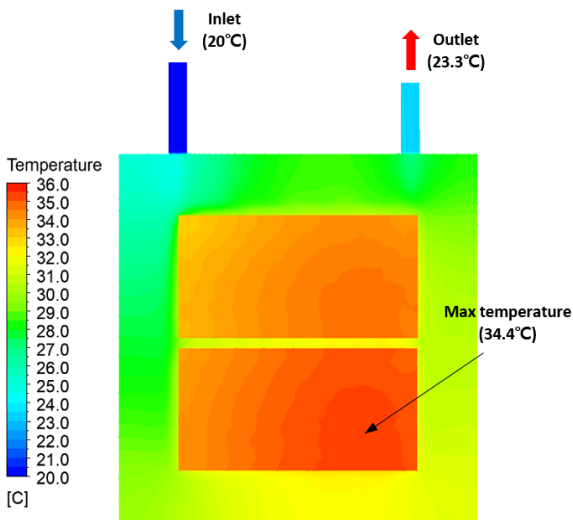


Fig. 6. Temperature contour of surface of the cooling plate and LDs

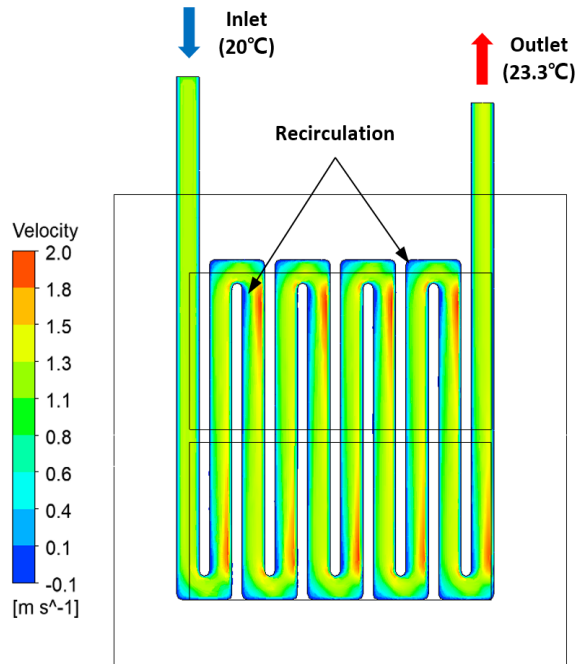


Fig. 7. Velocity contour of Fluid

## 5. 실험

### 5.1 실험 구성

실험 장치 구성도는 Fig. 8로 나타내었으며 실제 실험 장치는 Fig. 9와 같이 설치하여 수행하였다. 실험용 냉각판은 온도시험 챔버 안에 설치하고 냉각수 배관과 온도센서 및 출력 광섬유는 챔버 벽면의 구멍을 통하여 밖으로 전송된다. 온도시험 챔버는 내부 온도를  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지시키도록 하였다.

실험에 사용된 LD는 nLight사의 광출력 370 W LD 1개와 Everbright사의 광출력 400 W LD 3개이다. 두 제조사의 LD는 가동 전류가 다르며, 동일 제품의 LD 일지라도 각각 개별적인 효율을 가지고 있어 발열량 360 W를 생성하기 위한 개별적인 전류 제어가 필요하다. 이를 위해 사전 실험을 수행하여 각각의 LD 특성을 파악하였고 LD 드라이버를 이용해 발열량 360 W를 생성하도록 전류량을 제어하였다. 두 제조사의 LD 크기 차이는 세로 5 mm, 가로 1 mm, 높이 1 mm로 냉각판과 체결되는 바닥면 면적이 약 2% 차이가 있다. 두 제조사의 LD내 발열소자의 위치가 동일하지 않으므로 정확한 열유속 차이는 알 수 없



므로 약 2 %의 바닥면적 차이는 본 연구에서 무시하여 실험을 수행하였다. LD의 작동 상태 모니터링은 LD의 광출력을 파워미터로 측정하여 확인하였다. LD의 온도변화 혹은 비정상작동이 일어날 경우 LD의 광출력이 변화하므로 광출력을 모니터링하여 LD의 작동상태를 알 수 있다. 1, 2번 LD는 각각 측정용량이 1.0, 0.4 kW인 파워미터를 이용해 측정하였고 3, 4번 LD는 측정용량 2.0 kW인 파워미터를 이용해 두 LD의 출력을 동시에 측정하여 측정값을 2로 나누어 계산하였다.

칠러는 EGW50%를 20 °C, 6.5 liter/min으로 공급한다. 공급 유체의 온도측정은 칠러 내부 온도센서를 이용한 칠러 자체의 표시값을 이용하였으며 냉각판을 냉각시킨 후 유체 온도는 내부적으로 제작한 온도측정 블록을 이용하여 측정하였다. 유량은 유량계를 부착해 확인하였다.

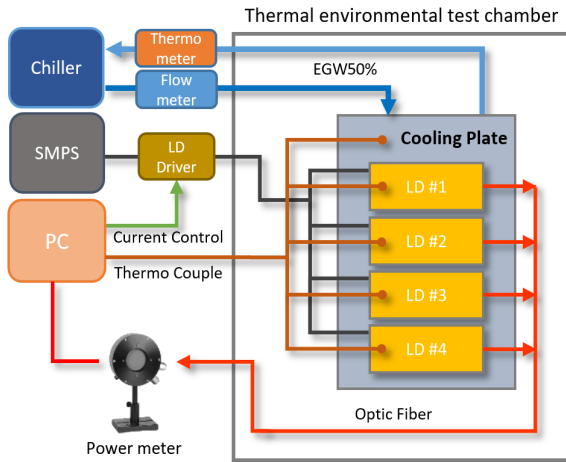


Fig. 8. Schematic of thermal environmental test

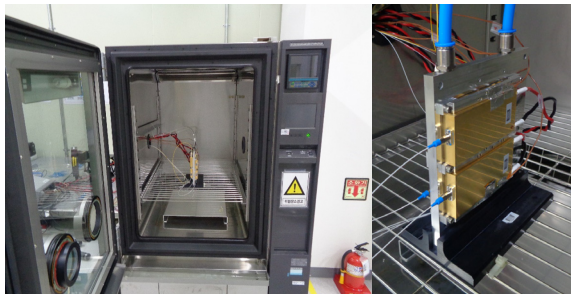


Fig. 9. Thermo environmental test chamber(left)  
Cooling plate setup in the test chamber(right)

사용된 온도 센서는 J타입 열전대이다. 온도센서 5개를 냉각판과 각각의 LD 표면에 부착하여 5 지점의 온도를 측정하였다. 온도센서 부착위치는 사전 실험을 통해 LD의 전, 후, 좌, 우 및 상부 면 온도를 측정하였고 각 면의 온도 분포와 LD 내부 발열소자 배치를 고려하여 LD 측면 중앙에 부착하였다.

실험은 온도 챔버와 칠러를 가동하여 LD 및 냉각판 온도를 20 °C로 수립시킨다. 이후 발열량이 360 W인 조건으로 LD를 가동하여 5분간 LD 온도를 측정하였다. 측정 샘플링 속도는 1/3 Hz 이다.

### 5.2 실험데이터 신뢰도 측정

냉각판 실험을 수행하기 전 실험 환경에서 온도 센서 측정값의 편차를 분석하여 데이터의 신뢰도를 확보하였다. LD와 칠러를 가동하지 않은 상태에서 온도 챔버를 가동하여 챔버 내부를 20 °C로 유지시킨 후 10분 간 온도를 측정하였다. 따라서 측정데이터는 온도 챔버의 가동 패턴과 그 때 온도센서의 반응성을 포함한다. 5개 온도 센서의 측정 결과는 Fig. 10과 같으며 표준편차와 평균은 Table 5로 나타내었다. 챔버 내부 온도는 약 7분 주기로 출렁이는 것으로 확인된다. 5개 온도센서로 측정한 챔버 내부의 평균온도는 20.07 °C, 평균 표준편차는 0.034 °C 이다.

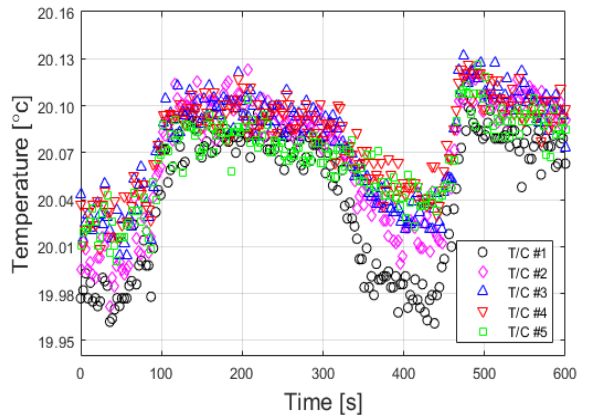


Fig. 10. Temperature variation with time of LD and the cooling plate for 5 minutes

### 5.3 냉각판 성능 실험

20 °C로 유지된 LD를 가동하여 LD 및 냉각판의 온도와 LD 출력을 5분간 측정하였다. 결과를 Table 6과 Fig. 11로 나타내었다. LD를 가동한 후 LD 온도는 상

승하여 약 100초 지점에서 최대 오버슈트가 나타나며 수렴온도 대비 1.0 ~ 2.6 % 상승한다. 이후 온도는 낮아지며 약 130초에서 최종 수렴온도에 오차 0.5 % 이내로 수렴한다. 4개 LD의 최종 수렴온도는 29.8 ~ 36.3 °C이며 평균 온도는 32.7 °C 이다. 4번 LD의 온도가 가장 높게 측정되었는데 그 이유로 냉각판과 LD 사이가 정확하게 체결되지 않은 것을 확인하였다. 실험 후 해체 과정에서 LD와 냉각판 사이의 면 접촉이 적절하지 않은 것을 그라파이트 시트에 나타난 체결 자국으로 확인하였으며 이와 같은 원리로 다른 LD간의 온도차이도 동일하지 않은 체결력에 따라 나타난 결과로 판단된다.

Table 5. STDEV and average of thermocouples in pre-test

Thermo Couple	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
STDEV	0.044	0.040	0.033	0.028	0.026
Average	20.04	20.07	20.07	20.08	20.07

Table 6. Saturation temperature and maximum overshoot of LDs

	LD #1	LD #2	LD #3	LD #4
Saturation temp (°C)	33.5	29.8	31.1	36.3
Saturation time (s)	128	143	128	125
Max overshoot (%)	1.4	2.6	0.8	1.0

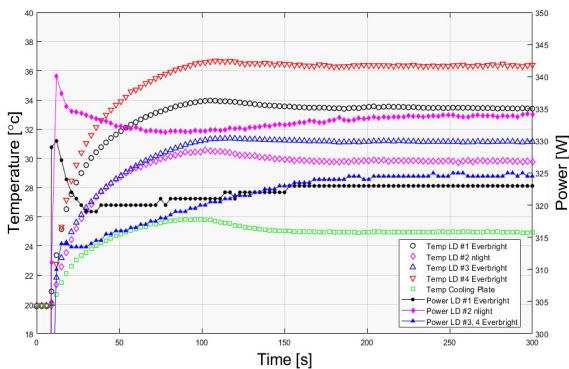


Fig. 11. LD and cooling plate Temperature in 5 min

출력 측정결과 LD작동을 시작한 직후 출력이 급증하였고 LD 온도에 따라 출력이 변화하는 모습을 보였다. LD 가동 10초 이후의 1, 2번 LD의 출력 변화는 5 W 미만이며 3, 4번 LD의 출력은 10 W 미만으로 측정되었다. LD 온도가 수렴하는 시간과 동일하게 LD 출력 또한 수렴하는 것으로 확인되었다.

## 6. 결 과

이론 계산, CFD 해석, 실제 실험을 통해 얻은 LD 온도를 Table 7로 나타내었다.

Table 7. Temperature comparison of 3 methods

Temp (°C)	Theoretical calculation		CFD	Experiment
	Laminar	Turbulence		
LD	46.5	26.1	33.6	32.7
Outlet fluid	23.9		23.3	22.6

본 연구에서 사용된 냉각유체의 유동형태는 적절한 해석기법이 없는 천이영역에서 존재하여 층류유동과 난류유동으로 나누어 계산하였다. 층류유동을 적용한 해석은 냉각성능을 과소평가한 결과를 나타내며 난류유동의 경우 냉각성능을 과대평가한 결과를 나타내므로 실제 냉각판의 성능은 층류유동과 난류유동의 결과의 중간에 위치할 것을 예상하였으며 CFD 결과와 실험결과가 이를 입증하였다.

CFD 해석결과 유로가 급격히 변화하는 지점에서 재순환영역이 발생하는 것을 확인하였으며 이로 인해 유속이 증가됨을 확인하였다. 유속의 증가는 열전달 효과를 촉진시킬 수 있으나 열전달 면적이 줄어들므로 인한 열전달 감소효과 또한 발생할 수 있다. 해당 현상은 본 연구에서 사용한 해설모델에서 구분하여 계산할 수 없었었으며 추후 새로운 냉각유로에 더욱 조밀한 격자계를 사용하여 효과를 분석할 예정이다.

실험을 통해 측정한 LD 온도와 출구유체 온도는 이론보다 낮게 나타났는데 이는 LD 발열량이 표면 대류를 통해 이동하였기 때문으로 판단된다. 온도챔버 내부는 20 °C로 유지하기 위해 차가운 공기 혹은 따뜻한 공기를 챔버 내에 공급한다. 이때 대류열전달이



촉진되어 실제 레이저모듈 내부에서의 효과보다 더 큰 효과를 낼 수 있다. 설정된 챔버 내부 공기온도 20 °C는 LD 및 냉각관보다 낮은 온도이므로 표면 대류를 통해 냉각이 발생하며 이를 무시한 이론계산 결과보다 온도가 낮게 나오는 것이 자명하다. 반면 이론계산과 CFD 해석의 경우 냉각관, TIM 및 LD 표면이 완벽한 면 접촉 조건으로 계산하지만 실제 실험에서는 체결력과 접촉면의 편평도 및 표면 거칠기에 따라 면 접촉이 고르지 못한 것을 확인하였다. 이는 실제 상황에서 계산된 목표성능보다 냉각관의 성능이 저하될 수 있음을 나타낸다.

## 7. 결론

본 연구는 이론계산, CFD 및 실험을 통해 고출력 광섬유 레이저 냉각관 설계를 진행하였고 이론 계산, CFD 및 실험 세 방법의 LD 온도 계산 및 실험 결과를 비교 분석하였다.

본 연구에서 사용된 냉각유체의 유동형태는 적절한 해석기법이 없는 천이영역에서 존재하여 층류유동과 난류유동으로 나누어 계산하였다. 실제 냉각관의 성능은 층류유동과 난류유동의 결과의 중간에 위치하는 것을 CFD 결과와 실험결과로 확인하였다.

그라파이트 시트의 불균일 면접촉을 포함한 결과값의 차이는 냉각관 설계과정에서 냉각성능을 추정하기에 감안할 수 있는 정도로 판단되며 추후 진행할 연구에서는 LD와 그라파이트시트 및 냉각관의 면접촉을 확인할 예정이다.

본 연구에서 수행한 세 가지 방법은 추후 고출력 광섬유 레이저 냉각관 및 유사 냉각관을 설계하는데 유용하게 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

## References

- [1] H. Choi, "The Next Generation of Weapons that are Becoming a Reality," *Defense & Technology*, Vol. 443, pp. 34-45, 2016.
- [2] H. Jeong, K. Lee, J. Lee, D. Kim, J. Lee and M. Jo, "High-beam-quality 2-kW-class Spectrally Combined Laser Using Narrow-linewidth Ytterbium-doped Polarization-maintaining Fiber Amplifiers," *Korean Journal of Optics and Photonics*, Vol. 31, No. 5, pp. 218-222, 2020.
- [3] H. Kim, K. Kim, M. Kang, J. Ryu, M. Kim, Y. Kim, J. Park, H. Lim and D. Kim, "Effects of Temperature and Current on the Lasing Spectrum of a Laser Diode and on the Output Power of a Nd:YAG Laser," *The Korean Physical Society*, Vol. 57, No. 4, pp. 261-268, 2008.
- [4] Panasonic Industry, "Industrial Device & Solutions," Accessed September 24, 2021. <https://industrial.panasonic.com/ww/products/thermal-solutions/graphite-sheet-pgs/pgs/models/EYGS182310>
- [5] Panasonic Industry, "'PGS' Graphite Sheets," Accessed September 24, 2021. <https://www.mouser.com/pdfdocs/ThermalGraphiteSheets.pdf>
- [6] Y. A. Cengel and Afshin J. Ghajar, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. Korean Language Edition," McGrawHill, Seoul, p. 464, 2012.
- [7] L. M. Tam and A. J. Ghajar, "Transitional Heat Transfer in Plain Horizontal Tubes," *Heat Transfer Engineering*, Vol. 27, No. 5, pp. 23-38, 2006.
- [8] Y. A. Cengel and Afshin J. Ghajar, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. Korean Language Edition," McGrawHill, Seoul, p. 479, 2012.
- [9] TSNE, "ANSYS Meshing for CFD," ANSYS Inc., CH. 5, p. 14, 2016.
- [10] Y. A. Cengel and Afshin J. Ghajar, "Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications. Korean Language Edition," McGrawHill, Seoul, p. 26, 2012.