

大出力 레이저와 核融合에의 應用

姜 衡 富
(漢陽大 工大 教授)

■ 차 례 ■

- 1. 緒 論
- 2. 大出力레이저 시스템의 開發現況
 - 2.1 大出力레이저에 要求되는 條件
 - 2.2 글라스레이저
 - 2.3 炭酸가스(CO₂)레이저
- 3. 레이저 核融合研究의 現況
參考文獻

□ 緒 論

人類가 消費하는 에너지量은 매년 指數函數的으로 增加하고 있는 現在, 에너지問題는 아주 深刻한 問題가 되어 가고 있다. 현재 에너지供給의 대부분을 石炭, 石油, 天然가스등의 化學燃料에 의존하고 있는데 지금과 같은 급격한 에너지需要가 계속된다면 化石燃料은 一世紀 이내에 고갈할 것으로 예상된다.

人類가 使用하는 에너지 중에서도 제일 利用하기 쉬운 電力의 소비가 急速히 증가하고 있음으로 火力 이외에 水力, 風力, 潮力 및 地熱發電등도 利用할 수 있지만 에너지需要의 一部分을 擔當할 수 있을 뿐이다. 또한 太陽에너지의 利用도 있지만 現시점에서는 經濟的인 것이 되지 못한다.

그래서 結局 나머지 에너지源은 原子力이다. 그 중에서 현재 實用되고 있는 것은 周知한 바와 같이 核分裂原子爐發電所이며 현재 계속 建設되고 있다. 그러나 이 原子爐에는 暴走의 危險性, 放射線廢棄物質의 處理問題, 立地難등으로 인하여 長期的으로는 樂觀할 수 없는 形편이다.¹⁾

또 하나의 原子力은 核融合原子力이다. 이것은 현재 研究開發段階에 있으나 만일 이것이 完成된다면 核分裂原子力과 比較해서 다음과 같은 점에서 훨씬 優越하다고 할 수 있다.

a) 바다물에 포함되어 있는 重水素(²D)를 燃料로

하기 때문에 현재의 技術水準으로도 값싸고 무진장하게 구할 수 있으며 地域的인 偏在性도 없다.

b) 任意的 瞬間에 核融合爐내에 存在하는 燃料은 微量이므로 本質的으로 安全하며, 따라서 發電所의 立地條件도 크게 緩和된다.

c) 正常的인 放射性廢棄物은 生成되지 않기 때문에 廢棄物處理는 거의 問題가 되지 않는다.¹⁾

以上과 같은 理由로 核融合原子力은 “人類의 마지막 에너지源” 이라 일컬어지고 있다.

현재 展開되고 있는 核融合研究에는 크게 나누어 磁場密閉 (Magnetic confinement) 方式과 慣性密閉 (Inertial confinement) 方式의 두가지 方式이 있다. 慣性密閉方式은 磁場密閉方式보다 훨씬 늦게 研究가 시작되었지만 그에 비슷한 큰 成果를 나타내고 있다. 특히 大出力글라스레이저에 의한 慣性密閉核融合研究의 成果가 顯著하다. 慣性密閉方式이란 大出力비임을 核融合燃料物質에 入射, 吸收시켜 原子의 慣性力을 利用하여, 플라즈마가 膨脹에 의해 散逸되기 전에 순간적으로 플라즈마를 核融合反應이 일어나는 高溫, 高密度狀態로 끌어올리는 方式이다.

大出力비임을 에너지드라이버 (energy driver)라 하며, 輕이온비임, 相對論的인 原子비임, 레이저비임등 여러 種類가 있으나, 本文에서는 大出力레이저의 應用이란 觀點에서 大出力레이저비임에 의한 慣性密閉核融合만을 다루기로 한다.

에너지드라이버로서 현재, 核融合研究에 쓰여지고

있는 레이저에는 글라스레이저와^{2,3)} 炭酸가스(CO₂) 레이저^{4,5)}가 있다.

현재의 레이저核融合의 研究目標은 大出力레이저 시스템의 開發, 이 레이저비임을 燃料物質에 均一하게 照射시키기 위한 照射시스템의 開發, 가장 效率的으로 核融合反應을 일으키기 위한 燃料펠릿(pellet)의 開發 및 그 計測法의 開發등에 있다.

本文에서는 各國에서의 大出力레이저시스템의 開發現況과, 레이저核融合의 現況에 대해 살펴 보고자 한다.

② 大出力레이저시스템의 開發現況²⁻⁵⁾

2.1 大出力레이저에 要求되는 條件

慣性密閉核融合用 에너지드라이버로서 大出力레이저가 갖어야 할 條件은 適切한 波長, 急峻한 펄스의 risetime과 펄스幅의 制御性, 良好한 集光特性, 매우 작은 N/S 비등이다. 또 레이저出力은 研究目的에 따라 設定해야 하는데 現在 主要先進國에서는 100GW에서 100TW까지의 레이저시스템이稼動中 또는 建設中에 있다.

現在 가장 앞서고 있는 레이저는 1.06 μm의 波長을 갖는 글라스레이저이며, 高效率 高調波發生技術이 確立됨에 따라, 2倍高調波(λ = 0.53 μm), 3倍高調波(λ = 0.35 μm), 4倍高調波(λ = 0.26 μm)도 發生할 수 있게 되어 결국 0.26 μm에서 1.06 μm까지의 波長領域을 커버할 수 있게 됐다. 이것에 波長이 10.6 μm인 CO₂ 레이저를 합치면 研究에 必要한 波長은 모두 충족되고 있다. 두 레이저는 다같

이 出力에너지가 10 ~ 100KJ인 레이저시스템이稼動 또는 建設中에 있으며, 레이저 入力에너지와 發生하는 核融合에너지가 같아지는 所謂 "breakeven" 條件의 實證實驗을 하는데 必要한 條件은 충분히 確立되고 있다.

2.2 글라스레이저^{2,3)}

Nd 글라스레이저는 현재 가장 完成도가 높은 레이저로서 爆縮核融合研究에 가장 많이 利用되고 있다.

레이저用 글라스는 잘 아는 바와 같이 非結晶이므로 比較的 값도 싸고, 光學的 均質성이 우수한 大口径의 大形素子を 쉽게 만들 수 있어서 이를 增幅器로 使用하여 大出力펄스레이저 시스템을 構成할 수 있다는 장점이 있다. 大出力레이저펄스를 얻기 위해서는 發振器에서 나오는 미약한 레이저펄스를 多段 增幅器에 의해 단계적으로 增幅해야 한다. 增幅되는 레이저 펄스의 出力은 媒質의 길이 l , 誘導放出斷面積 σ , 反轉分布密度 N , 레이저의 terminal準位の 수명등에 의해 決定된다. 또 增幅器를 設計하는데 가장 重要한 것은 增幅率이며, 增幅器의 로드(rod) 길이는 요구되는 增幅率에 의해서 근본적으로 決定되며, 로드 直徑은 표면 파괴의 閾值(threshold)를 생각하여 出力에너지에 의해 決定된다. 그런데 종래 레이저 글라스에는 硅酸鹽 Nd 글라스가 利用되어왔으나 요즘 새로 磷酸鹽 Nd 글라스가 開發되어 大出力 글라스레이저 시스템에 利用되기 시작했다. 표 1은 종래의 硅酸鹽 Nd 글라스와 새로 開發된 磷酸鹽 Nd 글라스의 物理的, 光學的 特性을 나타낸 것이다. 표 1에서 磷酸鹽 Nd 글라스(LHG-7, LHG-8)가 硅

표 1. 네오 (Nd³⁺) 레이저 글라스의 物理的, 光學的 特性

Glass designating		ED 2	LSG-91 H	LHG - 7	LHG - 8
Glass type		Silicate	Silicate	Phosphate	Phosphate
Nd ₂ O ₃	Wt %	3.1	3.1	3.4	3.0
Nd ³⁺ ion concentration	10 ²⁰ ions / cm ³	2.83	3.0	3.1	3.1
Cross section for stimulated emission	10 ⁻²⁰ cm ²	3.03	2.7	3.8	4.2
Loss coefficient	10 ⁻³ / cm	5 (1062 nm)	1 (1062nm)	1.31(1054nm)	1 (1054nm)
Refractive index		1.555 (1062 nm)	1.54980(1062nm)	1.50415(1054nm)	1.52005(1054 nm)
dn/dT	10 ⁻⁶ / °C	2.9	1.6	-2.9	-5.3
Thermal conductivity	Kcal/m. h. °C	1.35 × 10 ⁻² (W/cm °k)	0.89	0.62	0.50

* Manufacturer : ED-2, Owens - Illinois (U. S. A)

LSG-9H, LHG-7, LHG-8, Hoya (Japan)

표 2. 各國의 核融合研究用 글라스레이저 시스템

国名	研究所	装置名	비임수	出力파워 (TW)	出力에너지 (kJ)	펄스幅 (ns)	摘要
美 国	LLNL	Argus	2	5	2	0.03~1.0	10 ⁹ 중성자 3×10 ¹⁰ 중성자 50g/cc (1985)
		Shiva	20	30	10	0.1 ~ 1.0	
		Nova	10	100	100	0.1 ~ 3.0	
	LLE U. Rochester	GDL	1	0.7		0.1	10 ¹⁰ 중성자 6g/cc
		Omega-X	24	15	5	0.03~0.1	
		Pharos-II	2	0.7	1.3	0.1 ~ 1.0	
NRL	Pharos-II	2	0.7	1.3	0.1 ~ 1.0		
KMS	Charoma-I	2	0.6	1	0.1		
소 련	Kurchatov Levedev	Mishen	4		1	1.0	} 建設中
		Delfin	216	33	100	0.2 ~ 3.0	
		Aurora	20			0.03~10	
		UM1-35			100		
日 本	ILE Osaka	激光-II	2	0.4	0.12	0.1 ~ 1.0	10 ⁸ 중성자 5g/cc (1984)
		激光-IV	4	2	1	0.1 ~ 1.0	
		激光-M-II	2	7	3	0.1 ~ 1.0	
		激光-XII	12	40	20	0.1 ~ 1.0	
	IPP Nagoya	Halna	1	0.1		0.1	
		ETL	1	0.1		0.1	
英 国	Rutherford AWRL	Vulcan	6	3.6	1.2	0.1 ~ 1.0	
			2	1	1	0.05~1.0	
프 랑 스	Limeil	P 102	2	0.6		0.08	
		Octal	8	2	1	0.1 ~ 1.0	
		Ecole Poly, Tek, Greco	1	0.25	0.25	0.1 ~ 2.5	
이 태 리	Frascati		2		0.25	2.0	
폴 란 드	Kalisky Inst.		4		0.1	3.0	
오스트리아	LIT-IV		4	1.2	0.12	0.005~0.01	

酸塩 Nd 글라스(ED-2, LSG-91H) 보다 誘導放出斷面積이 상당히 크며, 前者가 상당히 큰 増幅率을 나타낸다. 이와 같이 磷酸塩 Nd 글라스를 레이저素子로 利用함으로써 상당히 出力이 큰 글라스레이저 시스템이 開發되고 있다. 표 2에 현재 世界各國에서 稼動中 또는 建設中인 大出力 글라스레이저 시스템의 概要를 나타낸다.

표 2에서 소련에서 開發되고 있는 레이저 시스템이 가장 出力에너지가 큰 것으로 생각되나 이에 대한 公式인 發表는 없으며 다만 推定일 따름이다. 따라서 현재 가장 큰 出力에너지는 日本 大阪大学 레이저核融合研究所의 “激光-XII號” 에서 얻어지고 있으며, 1985년에 美国 Lawrence Livermore 国立研究所에서 建設中인 “Nova” 시스템이 完成되면 出力이 100 KJ 로서 世界最大 出力에너지가 될 것이다. 또 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 大出力글라스레이저의 대부분은 多비임으로 構成되고 있다. 單一비임으로는 高出力레이저비임에 의한 레이저素子の 破

壞, 光学媒質中에서의 非線形効果에 의한 波面の distortion (歪曲) 등으로 인하여 표 2에 있는 最大出力을 얻을 수 없기 때문이다. 예를 들어 “Shiva” 시스템은 20비임 30 TW이므로 1비임당의 出力은 1.5 TW가 된다.

지금까지 世界最大出力을 갖는 시스템으로서 가장 큰 研究実績을 얻은 美国 Lawrence Livermore 国立研究所의 “Shiva” 시스템에 대하여 그 概要를 紹介하기로 한다.

“Shiva” 레이저 시스템은 1977년에 完成된 것이며, 0.1nsec 펄스幅으로는 30 TW, 1.0nsec 펄스幅으로는 15 KJ 의 最大出力을 낼 수 있도록 設計되었다. 이 最大出力을 얻기 위하여 20개의 増幅器 체인(chain) (20비임)을 構成하였으며 각 체인의 길이는 50m, 最終端의 레이저비임의 口径이 20cm 가 되도록 設計되었다. 결국 1비임당 1.5 TW, 또는 750 J 을 얻을 수 있는데 이는 性能—費用比를 最適化하는 觀點에서 얻어진 設計值이다. 그림 1(a)

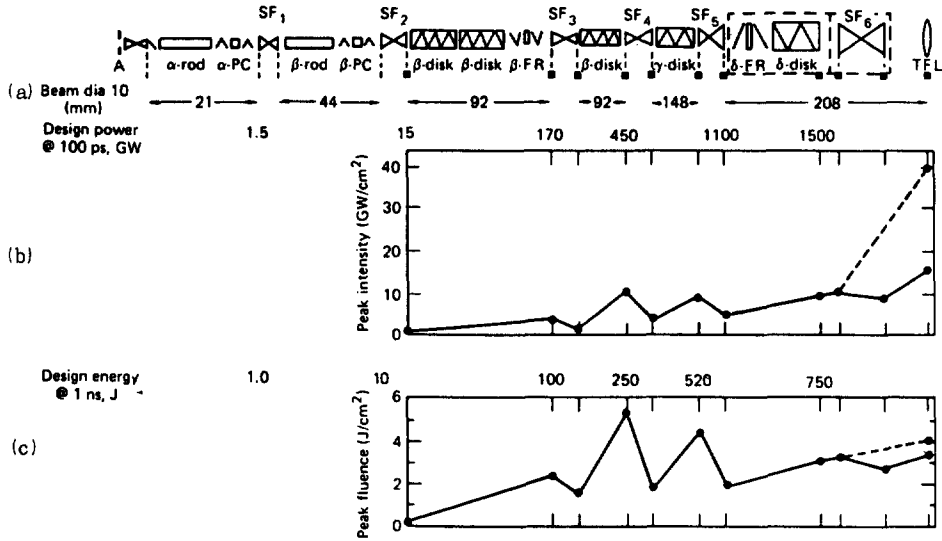


그림 1. (a) "Shiva" 시스템의 증폭단(1비임)
 (b) 각 증폭器에서의 出力과워 密度
 (c) 각 증폭器에서의 出力에너지 密度

는 1비임에 대한 증폭시스템을 나타낸 것이다. 이 증폭시스템은 로드(rod)形 및 円板(disk)形 글라스 증폭器, 分離素子[Pockels cell(PC) 및 Faraday rotator(FR)] 및 空間濾波 및 空間濾波 비임 拡大素子(spatial filter beam expansion element)로 構成되고 있다. 로드증폭器는 25mm(α -rod) 50mm(β -rod)의 口徑을 갖는 高利得 증폭器이다. 이 로드증폭器 뒤에는 α -PC, β -PC의 두 개의 Pockels cell 이 있는데 이는 증폭器내, 또는 증폭器사이에서 일어나는 自己發振과 증폭된 自然放出光(一種의 雜音의인 光)이 主 레이저펄스보다 먼저 核融合標의物에 到達하는 것을 抑制하기 위한 素子이다. 로드증폭器에 이어 口徑이 95mm인 6장의 disk로 構成된 3段의 증폭器(β -disk)가 設置되어 있으며 約 500GW의 出力을 낼 수 있다. 이 마지막 β -disk 증폭器의 出力비임은 空間濾波器(SF₄)에 의해 비임口徑이 184mm로 拡大된 다음 4장의 disk로 構成된 r -disk 증폭器에 들어가게 되며 여기서 1,100GW로 증폭된다. 이 레이저 비임을 다시 空間濾波器(SF₅)에 의해 비임口徑이 208mm로 拡大된 다음 3장의 disk로 構成된 δ -disk 증폭器로 入射되어 1,500GW(1.5TW)로 증폭된다. 이와 같이 각각 1.5TW로 증폭된 20개의 비임을 四方八方으로 燃料標의物에 照射하여 核融合反

應을 일으키는 것이다. Faraday rotator(β -FR, δ -FR)는 兩端에 있는 偏光자와 組合하여 증폭器 사이의 自己發振을 抑制하고, 또 플라즈마로부터 反射되어 다시 증폭器쪽으로 돌아오면서 再증폭되는 레이저光에 의하여 각 레이저素子가 破壞되는 것을 防止하기 위한 裝置이다.

그림 1 (b) 및 (c)는 각각 각증폭器에서의 最大 出力密度 및 에너지 密度를 나타낸 것이다. 또 표 3은 각 증폭器와 Faraday rotator의 레이저 特性과 諸元을 나타낸 것이다.

그림 1 (a)에서 증폭器 사이에 空間濾波器(SF₁₋₆)가 많이 設置되고 있는 것을 알 수 있을 것이다. 이 空間濾波器는 核融合研究用 大出力과워 레이저 시스템에 있어서는 아주 결정적인 役割을 하는 것이므로 이에 關係해서 說明하기로 한다. 高出力과워 레이저 시스템에서는 高強度 레이저光에 의한 光學媒質에서의 非線形光學效果로 인하여 波面의 distortion이 생기는데 이를 除去해야 한다. 非線形屈折率이 n_2 인 媒質에 세기가 E 인 電界를 가하면 그 屈折率 n 은

$$n = n_0 + n_2 |E|^2$$

가 된다. 단 n_0 는 媒質自体가 갖고 있는 固有의 屈折率이며, n_2 는 레이저과워가 작을 때는 無視할 수 있으나 레이저과워가 커짐에 따라 그 效果가 현저하게 나타난다. 위 式의 第 2項에 의하여 레이저의 波

표 3. “Shiva” 시스템의 各 増幅器와 Faraday rotator의 레이저 特性과 諸元

Unit	α -rod	β -rod	β -disk	β -rot	γ -disk	δ -rot	δ -disk
Aperture (mm)	25	50	95	95	150	208	208
Small Signal Module Gain	40 X	12 X	3.8 X	—	2.4 X	—	1.8 X
Thickness / Disk or Length (mm)	400	400	24	15	30	10	32
# of Disks per Module	—	—	6	1	4	1	3
Stored Energy per Module (kJ)	20	30	144	21/12	216	160	288
Number of Modules	22	25	60	20/5	20	20	20
Nominal Total Energy (MJ)	0.44	0.75	8.64	0.48	4.32	3.20	5.76
Total Stored Energy = 23.59 MJ							

面에 $(2\pi/\lambda) \cdot n_2 \cdot |E|^2 \ell$ 만큼의 位相의 뒤짐 (phase lag)이 생긴다. 여기서 ℓ 은 光의 傳播距離이다. 이 位相의 뒤짐으로 인하여 레이저비임光의 空間的 強度分布가 不均一하게 된다(이 現象을 beam breakup 라고 한다). 이 現象에 의해 反射鏡, 레이저글라스등의 光学素子가 레이저光에 의해 損傷을 받기 쉽게 된다. 또한 레이저 出力光을 렌즈를 통해서 集光시킬 경우 集光効率が breakup의 成長과 더불어 나빠지며, 出力에너지를 增加시켜도 集光이 가능한 에너지密度는 增加할 수 없게 된다. 따라서 글라스레이저 시스템에서 얻어지는 實質的인 出力의 上限은 이 breakup 現象에 의해 決定된다. 空間濾波器 (spatial filter)는 이 breakup 現象을 除去하여 그 成長을 抑制시키며 레이저 시스템의 實質出力을 增加시킬 수 있다. 空間濾波器는 上述한 目的以外에 그 光学的 性質을 利用함으로써 레이저 시스템 全體의 設計를 容易하게 하며 性能向上을 도모할 수 있다. 아래에 그 機能을 要約한다.

(1) 레이저비임의 breakup의 成長을 抑制한다.

(2) 레이저비임의 口徑 및 發散角을 制御할 수 있다.

(3) 空間濾波器는 렌즈를 組合하여 光學的 結像系를 形成하고 있으며 따라서 像轉送의 機能을 갖는다. 이 特性을 利用하면 레이저光의 filling factor (레이저光의 増幅器 開口 利用率)를 크게 할 수 있으므로 레이저 시스템의 出力을 向上시킬 수 있다.

(4) 空間濾波器는 有限의 開口角을 갖고 있으므로 増幅器에서 發生되는 自然放出光중에서 그 一部分인 極히 發散角이 작은 光만을 通過시킨다. 따라서 타겟 表面에 到達하는 自然放出光의 에너지를 크게 減少시킬 수 있으며, 自然放出光에 의한 타겟의 損傷 또는 플라즈마化를 防止할 수 있다.

以上과 같이 空間濾波器는 多量의 機能을 지니고 있으므로 現在 大出力글라스레이저 시스템에 있어서는 必須 不可缺인 裝置의 하나로 되고 있다.

空間濾波器는 스테레스製의 圓筒形 眞空容器的 兩端에 設置한 凸 렌즈와 두 렌즈의 共焦點 位置에 設置한 다이아몬드형 핀홀 (pin hole)로 構成되고 있다.

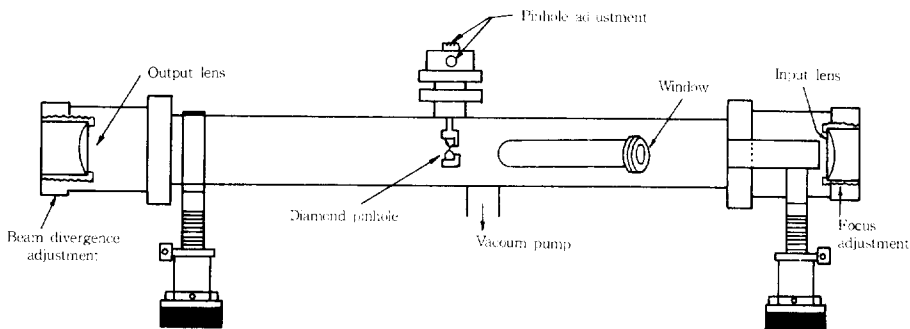


그림 2. 空間濾波器의 構造

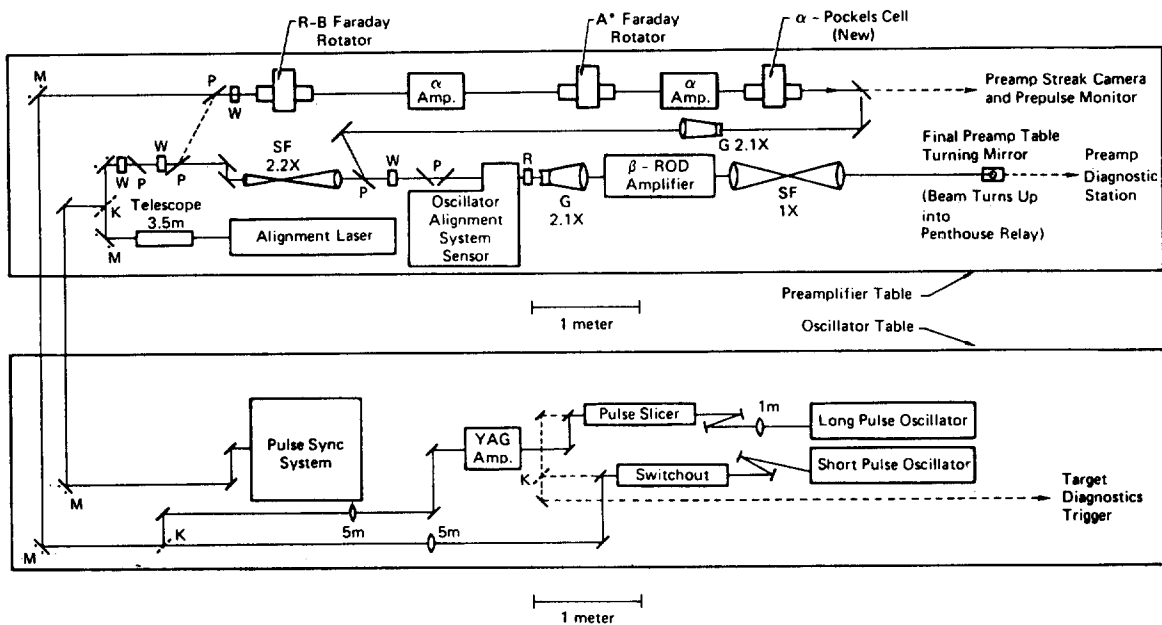


그림 3. "Shiva" 시스템의 發振器와 前置增幅器 시스템의 概略圖

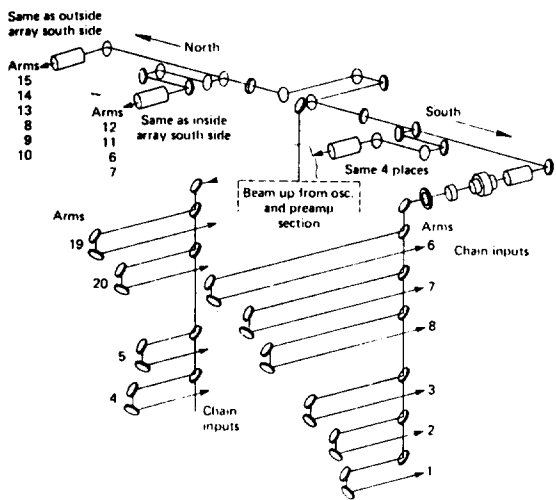


그림 4. 20개의 비임으로 分割시키는 비임 스피릿터 시스템

렌즈의 焦點附近에서 空氣의 플라즈마化를 막기 위해 장치 전체를 10^{-3} torr 以下の 眞空으로 유지한다. 장치 전체를 진공으로 유지한 狀態에서 렌즈를 光軸(z 軸) 方向으로, 또 핀홀을 x, y 方向으로 각각 높은 精度로 移動시킬 수 있게 되고 있다. 그림 2는 空間濾

波器 (spatial filter)의 構造의 大略을 나타낸 것이다. 다음에 "Shiva" 장치의 發振器 및 前置 增幅器 시스템에 대해서 說明한다. 그림 3에 發振器 및 前置 增幅器 시스템의 概略圖를 나타낸다. 發振器에는 펄스幅이 긴 發振器와 짧은 發振器가 있으며 目的에 따라서 서로 바꾸면서 쓸 수 있게 되고 있다. 이 發振器의 펄스出力을 Pulse Slicer로 適當한 波形으로 整形한 다음 數段의 前置 增幅器로 增幅한다. 이 出力 펄스를 20 비임의 增幅器 시스템에 보내기 위하여 그림 4에 있는 펄스 分割器를 利用하여 前置 增幅器 出力펄스를 20 等分하는 方式이 採用되고 있다.

以上은 美國 Lawrence Livermore 研究所에서 現在 稼動中인 "Shiva" 레이저 시스템의 概要를 紹介했는데, 이 시스템과 거의 같은 出力을 갖는 大出力 글라스레이저 시스템 "激光-XII"가 日本大阪大學 레이저核融合研究所에서 完成됐다. 이와 같은 巨大한 大出力레이저 시스템의 建設에는 막대한 豫算을 필요로 할 뿐만 아니라 高度의 關連技術이 必要하며 따라서 先進 工業國이 아니면 손을 摸 수 없는 것이다.

2.3 炭酸가스(CO₂)레이저^{4, 5)}

CO₂ 레이저는 高效率, 높은 反復動作이 可能하며, 將來의 原子炉用 레이저로서의 可能性을 갖는 레이저

표 4. 各國의 核融合 研究用 CO₂ 레이저 시스템 (沃素 레이저 포함)

國 名	研 究 所	裝 置 名	비임수	出力파워 (TW)	出力에너지 (kJ)	펄스幅 (ns)	摘 要
美 國	LANL	DBS	2	2.5	2.5	1	10 ⁹ 中性子 20g/cc (1985)
		Helios	8	10	10	1	
		Antares I	2×(12)	40	40	1	
日 本	ILE Osaka	烈光Ⅱ	2	1	1	1	10 ⁶ 中性子
		烈光Ⅷ	8	10	10	1	
캐 나 다	NRC	Coco I	1	0.2	0.2	2	
이 태 리	Frascati	Shimera	2	0.2	0.2	1	(1981)
폴 란 드	Kalisky Inst.	—	8	6	6	1	
西 独	IQO Garching	Asterix III	1	1.1	0.4	0.35	沃素 레이저

이다. 波長이 글라스레이저의 波長 1.06 μm의 10 배가 되는 10.6 μm으로 아주 길며, 寄生發振이 일어나기 쉽다는 缺點등으로 인하여 글라스레이저보다 技術開發이 늦은 감이 있었으나 最近에 와서 技術開發이 현저하게 이루어져 표 4에서 보는 바와 같이 10 kJ, 10TW大出力 CO₂ 레이저 시스템이 美國 Los Alamos 研究所 ("Helios")와 日本 大阪大學 레이저 核融合 研究所 ("烈光Ⅷ號")에서 完成, 稼動中에 있으며, 40kJ, 40TW級 CO₂ 레이저 시스템 "Antares I"이 Los Alamos 研究所에서 1985년 完成目標로 現在 建設中에 있다. 또한 100kJ 級 CO₂ 레이저 시스템에 대한 技術도 確立되고 있으며, 장래의 勿論 레이저를 想定한 MJ 級 레이저에 대해서도 技術開發中에 있다. 이 方向의 研究를 더욱 活發히 推進하기 위해서는 爆縮의 波長依存性을 解明할 必要가 있다. 따라서 現在 稼動中인 10kJ 레이저에 의한 펠렛 (pellet) 爆縮의 實驗을 여러 構造를 갖는 펠렛을 對象으로 하여 實施함으로써 그 可能性을 明確히 할 必要가 있다.

다음에 제일 먼저 10kJ 大出力 CO₂ 레이저 시스템을 開發한 美國 Los Alamos 研究所의 "Helios"에 대하여 그 概要를 說明하기로 한다.

"Helios" 시스템의 全體裝置의 概略圖를 그림 5에 나타낸다. 그림에서 發振器의 出力을 펄스整形한 다음 이 레이저비임을 2개의 前置 增幅器로 增幅시킨다. 이 增幅된 레이저비임을 비임스프리트러 (beam splitter)로 4개의 비임으로 均等分割한 다음 4개의 增幅器로 각 비임을 增幅시킨다. 이 增幅된 4비임의 레이저光을 다시 비임스프리트러로 8개의 비임으로 分割하여 2비임씩 하나의 增幅器에 入射시켜 增幅시킨다. 이 마지막 增幅器에서는 각 비임은 세번 通過할 수 있으며, 이 하나의 增幅器로서 충분한 增幅率을 얻을 수 있다. 이와 같이 增幅된 8개의 레이저 비

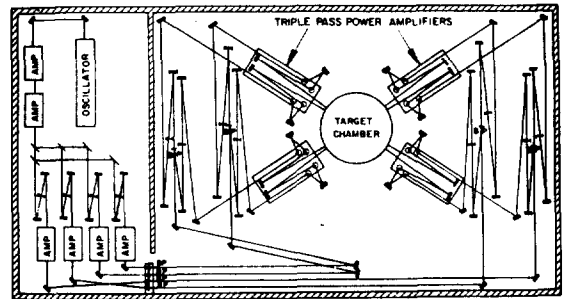


그림 5. "Helios" 시스템의 概略圖.

임을 眞空容器내에 있는 燃料타겟에 照射하여 核融合 反應을 일으킨다. 여기에 使用되는 反射鏡등의 모든 光子素子は 10.6 μm의 波長에 대하여 거의 吸收가 없는 NaCl 結晶體가 使用되고 있다. 大出力炭酸가스 레이저 시스템에서는 大出力을 얻기 위해 發振器 및 모든 增幅器는 大氣庄의 가스庄力範圍에서 動作시킨다. 또한 出力을 높이기 위하여 10.6 μm의 發振波長附近에 있는 P(14), P(16), P(18), P(20), P(22)線의 모든 波長에 대하여 동시에 發振시키는 多波長 (multiline) 發振法을 채택하고 있다. 發振器放電管은 600 torr의 庄力으로 N₂ 및 CO₂ 가스가 1:1로 混合되고 있으며 44KV의 電庄으로 TEA 방식 (Transversely Excited Atmospheric pressure)에 의해 펄스 動作을 시키면 自發 Q-switching 發振에 의해 rise time 20nsec, 펄스幅 80nsec, 出力에너지 600 mJ의 펄스가 얻어진다. 이 펄스를 電氣光學素子和 偏光子로 構成된 펄스整形시스템으로 適當한 펄스로 整形한 다음 前置 增幅器로 보내어진다.

大出力CO₂ 레이저의 增幅器에서는 高에너지 電子비임으로 레이저 가스를 勵起시킨다. 電子비임制御 炭

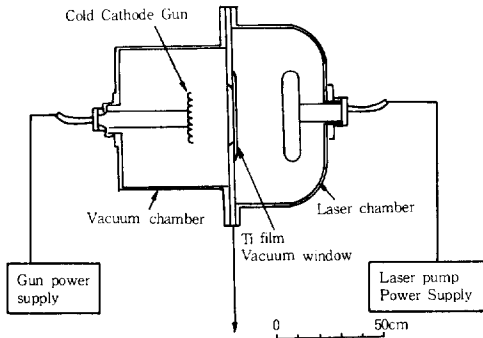


그림 6. 電子비임 制御 CO₂ 레이저 增幅器의 断面圖

酸가스레이저 增幅器의 動作原理를 그림 6으로 說明한다. 그림에서 티타늄박막 眞空窓을 境界面으로 하여 왼쪽은 高에너지 電子비임 發生部(電子銃)이며 10^{-7} torr의 高眞空으로 유지된다. 오른쪽은 數氣庄의 CO₂, N₂ 混合가스를 封入한 레이저容器이다. 지금 數百kV의 高電壓으로 왼쪽이 電子銃을 動作시키면 冷陰極에서 發生한 電子는 加速되어 高에너지가 되므로 티타늄박막을 통과하여 레이저容器내에 있는 레이저가스와 衝突하여 電離시킨다. 동시에 레이저容器내의 電極과 티타늄박막사이에서 數百kV의 電壓으로 放電시키면 完全한 그로우放電이 일어나 傳導電流가 흐르게 되어 레이저가스를 勵起시킨다. 이때 레이저비임이 이 容器내를 통과하게 되면 入力 레이저비임은 높은 파워로 증폭이 된다. 그림 7에 “Helios” 시스템의 最終 增幅器의 断面을 나타낸다. 이 增幅器는 특히 두개의 비임을 同時に 증폭하기 위하여 레이저容器가 양쪽에 두개 있으며 그 사이에 電子銃 容器가 있다. 이 容器내에서 冷陰極은 中心部에 있으며 이 冷陰極과 양쪽 박막窓사이에서 각각 高電壓을 가하여 高

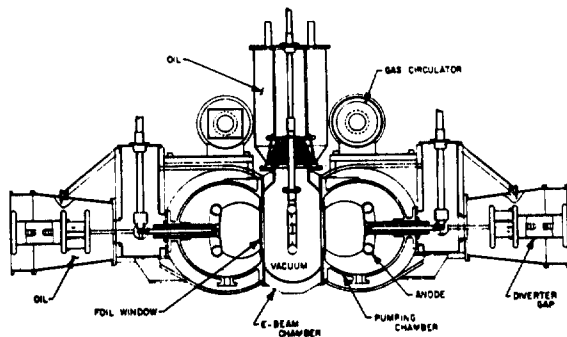


그림 7. “Helios” 시스템의 最終 增幅器의 断面圖(2 비임 增幅用)

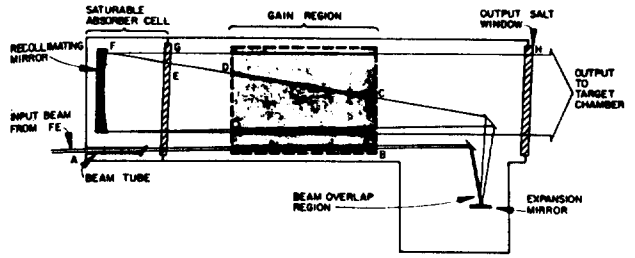


그림 8. 3번 通過 CO₂ 增幅器의 光學的方式.

표 5. “Helios” 시스템의 最終 增幅器의 光學的, 電氣的 設計諸元

<u>Optical Design</u>	34 cm-diameter
Aperture	200 cm
Gain lenth	1800 torr
Operating pressure	3 : 1 / 4 : 1 (He : N ₂ : CO ₂)
Gas mixture	3.5 % cm ² P(20), 10 μm band
Gain	1250 J
Energy Output	
<u>Electrical Design</u>	
<u>Laser Discharges</u>	300 KV
Voltage	100 KV
Current	3 μs
Pulse length	150 J/ℓ - atm
Energy	
<u>Electron beams</u>	
Beam voltage	300 KV
Beam current	0.5 A/cm ²
Pulse length	20 μs
Emitter	8 μm thick Ta foil

에너지 電子비임을 發生시켜 박막窓을 통해서 양쪽 레이저容器에 入射시킴으로서 레이저가스를 勵起하는 방식으로 되고 있다. 그리고 增幅器의 에너지利用率을 높이기 위하여, 그림 8에 나타낸 바와 같이 레이저비임을 세번 通過시켜 增幅率을 높이는 방식이 채택되고 있다. 표 5에 “Helios” 시스템의 最終 增幅器의 光學的, 電氣的 設計諸元을 표시한다. 現在 “Helios” 시스템은 8비임 15TW의 出力을 낼 수 있다.

③ 레이저 核融合研究의 現況¹⁾

慣性密閉 核融合이란 重水素 및 三重水素로 만들어진 燃料小球에 레이저등의 大出力 短펄스의 集中에너지(에너지 드라이버)를 投射, 加熱하여, 膨脹에 의해 消散되기 전에 빠른 速度로 核融合反應을 點火하

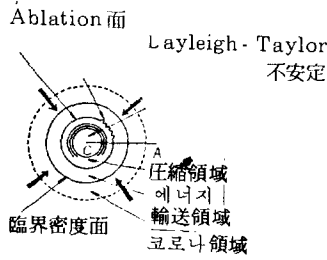


그림 9. 레이저에 의한 燃料페렛의 爆縮機構.

는 것이다. 이 때 爆縮에 의하여 燃料를 壓縮하여 密度를 크게 해주면 燃燒率이 增大하기 때문에 결국 核融合點火에 必要한 投射에너지를 낮출 수 있게 된다.

燃料페렛 表面에 均一하게 레이저光이 照射되면 發生된 플라즈마가 膨脹하여 그림 9과 같이 된다. 入射된 레이저光은 電子密度가 $n < n_c$ (n_c : 遮斷密度)인 吸收領域(코로나 領域)에서 吸收된다.

吸收된 에너지가 古典的인 熱傳導, 高溫電子의 흐름, 放射등에 의하여 Ablation 面에 傳達되면 여기서 爆發이 일어나게 되며 그 反作用에 의하여 燃料内部에 대한 큰 壓縮力이 發生하여 燃料페렛을 壓縮시킨다. 이 過程을 爆縮이라 한다. 따라서 吸收率과 더불어 熱傳導領域에서의 에너지輸送이 충분히 좋아야 한다. 또한 壓縮을 對稱的으로 시키기 위해서는 페렛表面을 均一하게 加熱해야 하며, Ablation 面도 安定해야 한다. 따라서 現在 이와 같은 條件이 滿足되는 燃料페렛의 構造를 研究하는 것도 重要한 研究課題의 하나이다. 이와 같이 레이저核融合은 燃料全體를 效率的으로 壓縮加熱하여 高溫高密度 플라즈마를 生成하여 核融合反應을 點火시켜, 이 때 發生되는 α 粒子에 의하여 反應이 계속 촉진되어 燃料全體를 燃燒시키는 방식이 된다. 이 過程을 自己點火라 한다.

이와 같은 自己點火가 可能한 플라즈마의 密度 ρ 와 半徑 R 은, α 粒子의 平均自由行程등을 考慮하면 $\rho R > 0.3g/cm^3$ 의 條件이 滿足해야 한다. 이에 必要한 레이저에너지 E_L 은 吸收率 η_A , 壓縮效率 η_H , 플라즈마의 에너지 $E_p = (4/3)\pi R^3(3T_i)(\rho/m_i)$ 이라 할 때 $E_L = E_p / \eta_A \eta_H$ 로 주어진다. $T_i = 20keV$ 일 경우

$$E_L = (4\pi T_i / \eta_A \eta_H) \cdot \left\{ (\rho R)^3 / m_i \rho^2 \right\} \\ \approx 6 \times 10^9 (1/\eta_A \eta_H) (\rho_s / \rho)^2 \quad [J]$$

가 된다. 여기서 T_i, m_i 는 이온의 溫度 및 密度이며 ρ_s 은 液體 D-T의 密度 ($0.2g/cm^3$)이다. 이 식으로부터 點火에 必要한 레이저에너지는 壓縮率(ρ/ρ_s)의 自乘에 反比例함을 알 수 있다. 예를 들어 1,000배의 壓

縮 ($200g/cm^3$)에 대해서는 $\eta_A \eta_H = 0.05$ 라 하면 $E_L = 120kJ$ 로 自己點火플라즈마를 發生시킬 수 있다. 이때의 페렛利得 (pellet gain) [發生한 核融合에너지 / 投入레이저에너지] Q 는 $Q > 1$ 이 되어 breakeven 條件 ($Q = 1$)을 達成할 수 있다.

지금까지의 議論으로 分명한 것은 η_A, η_H 및 壓縮率 (ρ/ρ_s)등을 어떻게 크게 하느냐 하는 것이다. 이 問題에 대한 approach는 두가지 측면에서 생각해야 한다. 하나는 大出力 레이저시스템의 開發에 있으며, 出力, 波長, rise time, 펄스幅, 同一出力의 多비임의 發生, 同時에 均一하게 페렛에 照射하기 위한 光學系의 構成 등에 있다. 또 하나의 問題는 燃料페렛의 設計이다. 이를 위하여 爆縮의 物理的過程을 構造가 다른 여러가지 燃料페렛을 만들어 詳細히 解明하는 實驗이 實施되고 있다. 이것과 並行하여 多비임 照射에 의하여 實際로 燃料페렛을 爆縮하여 可及的으로 高密度, 高溫, 高中性子發生條件을 追求하여 그 綜合特性을 確認하는 實驗도 進行되고 있다.

吸收, 에너지輸送, Ablation에 의한 壓縮力의 發生등이 爆縮의 素過程을 여러가지 形狀, 材料, 構造를 갖는 타겟을 使用하여 詳細히 研究하여 爆縮機構의 物理的 解明이 進行되고 있다.

現在의 研究의 進行狀況을 보면 1980년대에 慣性密閉 核融合의 科學的 實證이 이루어질 것으로 期待되고 있다.

參考文獻

- 1) 姜衡富; "大出力 글라스레이저에 의한 慣性密閉 核融合"; 大韓電氣學會誌, Vol. 28, No 11, pp. 765-777 (1979).
- 2) D.P. Speck, et al; "The Shiva Laser-Fusion Facility", IEEE J, Quantum Electronics, Vol. QE-17, No 9, pp. 1599-1618 (1981)
- 3) C. Yamanaka, et al; "Nd-Doped Phosphate Glass Laser Systems For Laser-Fusion Research", ibid. Vol. QE-17, No 9, pp. 1639-1648 (1981)
- 4) R.L. Carlson et al; "Helios: A 15TW Carbon Dioxide Laser Fusion Facility", ibid. Vol. QE-17, No 9, pp. 1662-1677 (1981)
- 5) C. Yamanaka et al; "The Lekko VIII CO₂ gas Laser System", ibid. Vol. QE-17, No 9, pp. 1678-1688 (1981)