《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 17, Number 2, April 2006

불안정형 레이저 공진기 정렬을 위한 null 렌즈 설계

김현숙† · 김연수

국방과학연구소

㉾ 305-600 사서함 35-5, 유성구, 대전광역시

(2006년 1월 26일 받음, 2006년 3월 20일 수정본 받음)

공초점 불안정형 공진기의 광학 정렬을 정밀하게 수행할 수 있는 새로운 개념의 null 렌즈 광학 정렬 방법을 제안하였다. 제안된 정렬 방법은 3.5 m 공진기에 적용하여 민감도 분석을 통해 실용성 여부를 판단하였으며, 공진기의 길이 변화가 1.0 mm 발생하였을 때와 반사경이 광축에 대하여 1.0 mrad 기울었을 때에 대한 pupil map 분석 데이터를 제시하였다.

주제어 : 불안정형 공진기, null lens, 민감도.

I. 서 론

연속 발진 화학 레이저는 레이저를 이용한 원거리 에너지 전송이나 레이저 무기로 이용될 수 있는 고에너지 레이저로서 지난 수 십 년간 개발되어 왔다. 화학 레이저는 고에너지 레이저 광을 얻기 위해 레이저 이득매질을 충분히 사용하여야 하므로 공진기의 길이가 상당히 길어지는 특징이 있다. 따라서 고출력뿐만 아니라 고품질의 레이저광을 얻기 위해서는 레이저 공진기의 설계 및 정렬이 매우 중요한 요소가 된다.

일반적으로 레이저 공진기는 크게 안정형 공진기와 불안정형 공진기로 나눌 수 있다. 안정형 공진기는 흔히 사용되고는 있지만 출력이 증가함에 따라 빔품질(beam quality)이 저하되는 문제가 있어 고에너지 레이저용으로는 주로 공초점 불안정형 공진기 구조가 요구된다. 불안정형 공진기는 초점 위치에 따라 초점이 공진기 내에 있는 negative branch 와 공진기 밖에 있는 positive branch 로 분류한다.[1-2] 일반적으로 negative branch 형태는 positive branch에 비해 공진기 정렬 민감도가 작기 때문에 고에너지 레이저를 응용한 시스템에 많이 적용된다.

공초점 불안전형 공진기를 정렬하기 위한 방법으로는 정렬 망원경(alignment telescope) 이용법,[3] 자동시준법(autocollimation method)[4], 환형 He-Ne 레이저 빔의 동심 링(concentric ring) 및 near-field burn patterns[5]을 이용한 정렬법 및 빔 분할기를 이용한 정렬법 등이 널리 쓰이고 있다. 그러나, 이들 방법은 공진기에 대한 광축 정렬은 제공할 수 있으나 공진기에 사용되는 각 반사경의 정확한 위치, 즉 두 반사경간 거리는 정확히 정렬하기가 쉽지 않다. 따라서 발진 실험에 의한 정렬 상태 확인 및 조정이 필요하게 되며 이에 따른 시험 비용이 추가되는 단점이 있다.

본 논문에서는 공초점 불안정형 공진기의 정밀 광학 정렬을 수행할 수 있는 새로운 개념의 null 렌즈를 이용한 광학 정렬 방법을 제시하고자 한다. 일반적으로 null 렌즈는 비구면 반사경의 형상오차 측정에 이용되나 본 논문에서는 광학 정렬에 null 렌즈를 이용하는 방법[6]을 적용한 공초점 불안정형 공진기 정렬용 null 렌즈 설계 결과 및 활용의 가능성을 제시한다.

II. 불안정형 공진기의 정렬 개념

본 연구에 사용된 공초점 불안정형 공진기(confocal unstable resonator)의 개략도는 그림 1과 같다. 반사경 1과 반사경 2는 각각 구면경으로 서로 마주 보고 있으며 양 반사경의 초점들이 한 점에서 일치한다. 환형 평면거울인 스크레이퍼는 양 반사경의 공초점 위치에 놓이게 되며 광축과 45도를 이룬다. 이때, 스크레이퍼 상의 한 지점을 통해 평행 광선이 입사할 경우, 광선은 반사경 1에서 반사된 후, 스크레이퍼의 중심부에 위치한 공초점 근처를 지나 반사경 2로 입사한다. 반사경 2에서 반사된 광선은 준 평행광선으로 반사경 1쪽으로 되돌아가며, 처음 반사경 1에서 출발할 때 광선의 높이보다 낮게 반사경 1에 도달한다. 반사경 1에서 재반사된 광선은 동일한 과정을 반복하며 반사경 1과 반사경 2 사이를 계속해서 진행한다. 단, 반사경 1에 도달하는 광선의 높이는 점점 낮아져 광축상에서 진행하는 빛으로 되었다가 점점 반대방향으로 높이가 증가하여 일정 높이에 도달하면 스크레이퍼를 통

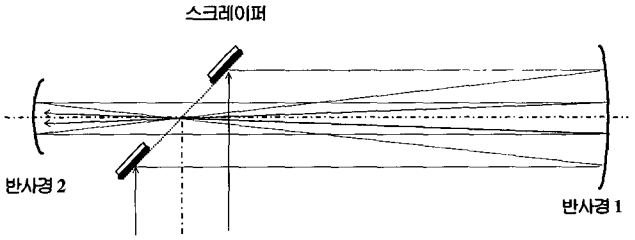


그림 1. 공초점 불안전형 공진기의 개략도.

† E-mail: hyunsook.kim@add.re.kr

해 원래 입사광선과 맞은 편 위치로 나오게 된다.

이와 같은 공초점 불안전형 공진기를 정렬하기 위한 방법으로는 앞에서 언급한 여러 가지 방법을 이용할 수 있다. 그러나 반사경의 표면 형상이 이상적이 아닐 경우, 정렬 망원경이나 콜리메이터를 이용한 정렬 방법은 시준 광선이 양 반사경을 여러번 반사되면서 파면 오차가 누적되어 선명한 결상을 제공하지 못하게 되므로 정밀한 정렬이 곤란하다. 또 환형 He-Ne 레이저 빔의 동심 링(concentric ring) 및 near-field burn patterns 을 이용한 정렬 방법도 어느 정도 광축 정렬은 가능하나 양 반사경 사이의 거리를 정확히 정렬하기가 쉽지 않다. 따라서 불안전형 공진기의 정밀한 정렬을 위해서는 새로운 방식의 정렬계 설계가 요구되어 진다.

그림 2는 본 연구를 통해 제안된 negative branch 형태의 공초점 불안전형 공진기 정렬을 위한 null 광학계를 보여준다. 스크레이퍼를 통해 입사된 광선은 반사경 1에서 반사된 후, 스크레이퍼의 중심부에 위치한 공초점 근처를 지나 반사경 2쪽으로 진행한다. 반사경 2를 향하던 광선은 null 렌즈를 통과하여 반사경 2에서 반사된 후, 진행방향만 바뀌어 원래 입사하던 경로를 따라 진행하게 되며 반사경 1에서 반사된 후 스크레이퍼를 통해 되돌아 나오게 된다. 여기서 null 렌즈는 반사경 1에서 반사되어 공초점에 모아진 후 반사경 2에 입사되는 수차가 포함된 광선들을 반사경 2의 곡면과 이상적으로 일치하도록 만들어주는 기능을 수행한다. 그러므로 반사경 1에서 재반사되어 스크레이퍼를 통해 출력되는 광선들은 반사경 형상과 광학 정렬이 이상적일 경우 입사파면과 동일한 파면으로 나오게 된다. 따라서 간섭계를 이용할 경우, 양 반사경의 광축뿐 아니라 반사경 사이의 거리도 매우 정밀하게 정렬할 수 있다. 또한, 정렬이 완료된 후에는 null 렌즈를 제거하게 되며, 이는 공진기의 양 반사경간 거리가 고정된 상태에서 null 기능을 이용한 정렬을 수행할 수 있도록 하는 장점이 있다.

III. 공진기의 정렬 광학계 설계 및 분석

불안정형 공진기의 구성 형태는 레이저 시스템이 사용되는 환경이 외부 진동에 쉽게 노출되는 상황임을 고려하여 정렬 민감도가 상대적으로 낮은 negative branch 형태의 공초점 공진기로 결정하였다. 레이저 출력은 하드웨어 구현의 용이성을 위하여 불안정형 공진기 내에 스크레이퍼를 설치하여 광축에 45° 방향으로 레이저 빔을 반사시키는 방식을 채택하였다. 공진기의 전체 길이는 3.5 m이며, 불안정형 공진기의 설계 데이터는 표 1과 같다.

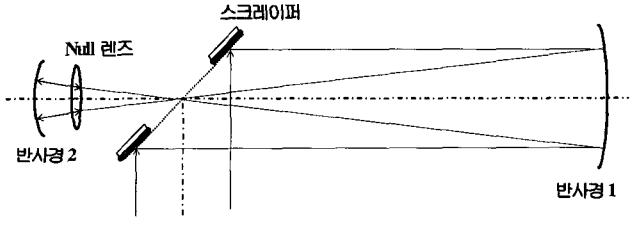


그림 2. 공초점 불안정형 공진기 정렬을 위한 null 렌즈 적용 개념도

이와 같은 불안정형 공진기를 광학적으로 정밀하게 정렬하기 위하여 제안된 null 정렬 광학계의 기본 개념은 그림 2와 같다. 스크레이퍼를 통하여 입사된 광선은 반사경 1에서 반사된 후 반사경 2 앞쪽에 놓인 null 렌즈를 통과하여 반사경 2에서 반사된 후, 진행방향만 바뀌어 원래 입사하던 경로를 따라 그대로 진행하게 된다.

정렬 광학계에 적용된 null 렌즈는 스크레이퍼에 되도록 가까이 놓이도록 함으로써 외경의 크기나 부피를 작게 하여 제작에 소요되는 비용을 줄이고 사용의 편의성을 제공하도록 하였다. 또한, null 정렬 광학계는 불안정형 공진기를 정밀하게 정렬하는 것이 목적이므로 null 렌즈 자체의 광학적 비축 수차 성능은 둔감하도록 함으로써 공진기의 정밀한 광축 정렬에 null 렌즈 자체의 위치 오차에 의한 기여도가 작도록 하였다. 표 2는 이와 같은 정렬 개념이 적용된 null 정렬 광학계의 설계 데이터를 보여준다. 정렬을 위한 null 렌즈는 2 매의 렌즈로 구성되었으며, 표에서 null 렌즈 부분은 5번 면에서부터 8번 면까지이고, 이후 10번 면에서 13번 면까지는 반사경 2인 9번 면에서 반사된 후 돌아오는 광선이 다시 null 렌즈를 지나게 되는 것을 보여준다. 이때 표에서 반사경

표 1. 불안정형 공진기 설계 데이터

항목	반사경 1	반사경 2	스크레이퍼
곡률반경	4.2 m (오목)	2.8 m (오목)	평면
구경	15 cm	10 cm	높이 : 6.7 cm 폭 : 2.4 cm

표 2. Null 정렬 광학계 설계 데이터

(단위:mm)

	곡률반경	두께	재질	광선 높이
무한점광원	∞	∞		-
1	∞	100.0		-
2	∞	-2100.0	REFL	-
3	4200	2100.0	REFL	-
4	∞	360.0		-
5	-798.08	15.0	NBK7	**-14.99**
6	-179.42	10.0		-15.48
7	-69.28	15.0	NBK7	-15.54
8	-76.33	1000.0		-16.77
9	-2800.0	-1000.0	REFL	-26.11
10	-76.33	-15.0	NBK7	-16.77
11	-69.28	-10.0		-15.54
12	-179.42	-15.0	NBK7	-15.48
13	-798.08	-360.0		**-14.99**
14	∞	-2100.0		-
15	4200	2100.0	REFL	-
16	∞	-150.0	REFL	-

들과 null 렌즈를 통과하는 광선 높이에 대한 데이터를 살펴보면, 반사경 1에서 반사된 후 null 렌즈를 지난 광선이 반사경 2에서 반사된 후 null 렌즈에 정확히 같은 높이로 입사하여 지나가는 것을 볼 수 있다. 그림 3은 null 정렬 광학계가 적용된 불안정형 공진기 전체의 광선 추적 그림을 보여준다. 공진기에 사용된 반사경 1과 반사경 2의 곡률반경이 4.2 m, 2.8 m로 매우 길기 때문에 실제 null 렌즈가 적용된 부분이 작게 보이지만, 확대된 그림을 보면 반사경 2에서 반사된 광선이 다시 정확하게 되돌아가는 것을 볼 수 있다.

앞에서 언급한 바와 같이 null 정렬 광학계는 불안정형 공진기의 정밀한 광학 정렬을 위한 광학계이므로 반사경 1이나 반사경 2의 정렬 오차에 대하여 민감하게 감지하고 보정할 수 있어야 하나, null 정렬 광학계 자체의 광학적 비축 수차성능은 둔감해야 한다. 따라서 본 연구에서는 null 정렬 광학계를 구성하는 null 렌즈 및 반사경 1, 반사경 2의 광축 및 비축수차 특성을 민감도(sensitivity)로 분석하였으며, 표 3과 표 4는 그 결과를 보여준다. 민감도 분석은 공진기에 대한 null 정렬 광학계가 광축에 대하여 대칭이므로 분석의 편의를 위해 기울기는 x 축에 대하여 y 축과 z 축이 회전하는 경우에 대해 살펴보았으며, 비축상의 변위는 y 축을 따라 변위가 발생하는 경우에 대해 분석하였다. 또한, 민감도 분석 결과는 각 미소 변위에 대해서 제르니케 계수의 변화량으로 나타내었으며 제르니케 계수[7]는 CODE V(ORA사, 미국)의 표현 방식을 따랐다.

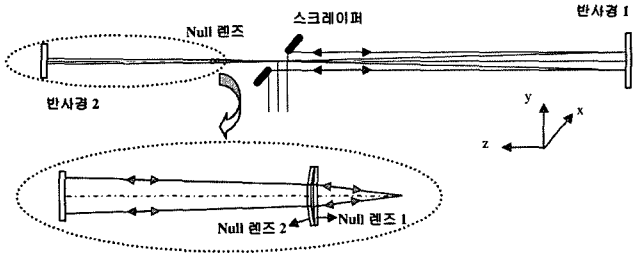


그림 3. 공초점 불안정형 공진기의 null 정렬 광학계 광선 추적.

표 3에서 보면 null 렌즈는 기울기와 비축 변위에 대해 민감도가 작다. 따라서 null 렌즈 자체의 기구적인 비축 정렬 오차는 특별히 고려하지 않아도 됨을 알 수 있다. 표 4에서 보면 반사경 2는 null 렌즈와 유사하게 기울기나 비축 변위에 대하여 민감도가 작고 축상 변위에 대하여 상대적으로 큰 민감도를 보인다. 따라서 공진기 정렬시는 null 렌즈와 반사경 2를 먼저 정렬하며 이때 축상 거리를 주로 조정한다. 반사경 1은 기울기와 축상 변위에 대하여 민감도가 null 렌즈나 반사경 2에 비해 상대적으로 크며, 특히 축상 변위에 대하여 민감하므로 위의 null 렌즈를 이용하면 기울기나 비축 변위뿐 아니라 축상 정렬도 정밀하게 수행할 수 있다.

그림 4는 공진기 정렬에 있어 반사경 간의 축상 거리에 오차가 있는 경우와 반사경이 광축에 대하여 기울어진 경우에

표 3. Null 렌즈의 광축 및 비축 민감도 분석 결과 (시험파장: 632.8 nm)

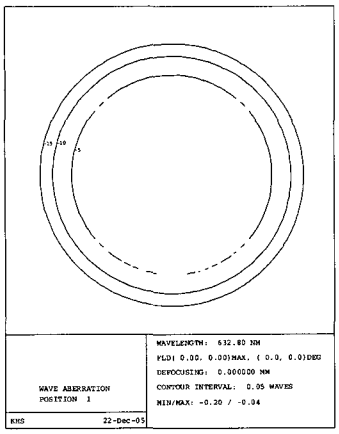
		Null 렌즈 1			Null 렌즈 2		
		ADE[1]	YDE[2]	ZDE[3]	ADE	YDE	ZDE
민감도 (Zernike coeff.)	C3[4]	0.005	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000
	C5[5]	0.000	0.000	0.077	0.000	0.000	-0.002
	C9[6]	0.002	-0.010	0.000	0.003	0.017	0.000
	C13[7]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

1 ADE는 x축에 대한 y축과 z축의 1.0 mrad 회전
2 YDE y축을 따라 1.0 mm 발생된 변위
3 ZDE z축(광축)을 따라 1.0 mm 발생된 변위
4 C3 : tilt about x axis
5 C5 : defocus
6 C9 : third-order coma along y axis
7 C13 : third-order spherical aberration

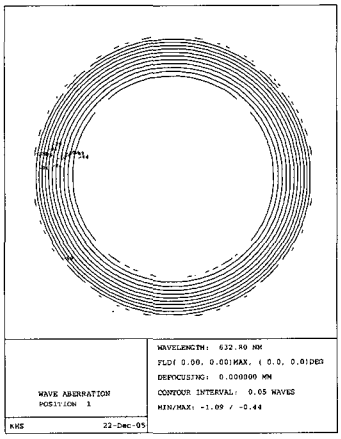
표 4. 반사경 1과 반사경 2의 광축 및 비축 민감도 분석 결과 (시험파장(@) : 632.8 nm)

		반사경 1			반사경 2		
		ADE[1]	YDE[2]	ZDE[3]	ADE[1]	YDE[2]	ZDE[3]
민감도 (Zernike coeff.)	C3	-0.085	-0.021	0.000	-0.005	0.002	0.000
	C5	0.013	0.001	-0.445	0.001	0.000	-0.022
	C9	-0.043	-0.010	0.000	-0.002	0.001	0.000
	C13	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

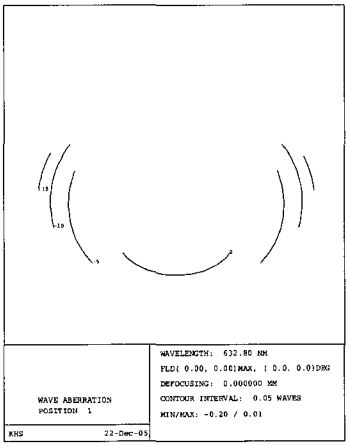
1 ADE는 x축에 대한 y축과 z축의 1.0 mrad 회전
2 YDE y축을 따라 1.0 mm 발생된 변위
3 ZDE z축(광축)을 따라 1.0 mm 발생된 변위



(가) 완벽한 정렬을 이루었을 때 pupil map



(나) 반사경 1 과 반사경 2 사이의 거리가 1.0 mm 증가했을 때 pupil map



(다) 반사경 1 이 광축에 대하여 1.0 mrad 기울어 있을 때 pupil map

그림 4. 공초점 불안정형 공진기 정렬 개념을 적용한 pupil maps.

대하여 본 null 정렬 광학계의 정렬 개념을 적용할 수 있는지에 대한 가능성을 보여주는 pupil map 이다. 그림에서 (가)는 공진기의 광학 정렬이 완벽하게 이루어졌을 때의 pupil map을 보여주며, (나)와 (다)는 각각 반사경 1과 반사경 2 사이의 축상 거리가 1.0 mm 증가 했을 때와 반사경 1이 광축에 대하여 1.0 mrad 기울어졌을 때에 대한 pupil map 이다. 그림에서 보는 바와 같이 그림 (나)와 (다)의 pupil map은 정렬이 완벽하게 이루어졌을 때인 그림 (가)과는 다른 pupil map을 보여주고 있다. 축상 거리에 오차가 있는 경우에 대해서는 defocus에 의한 간섭무늬를 확인할 수 있으며, 반사경이 기울어진 경우에 대해서는 간섭무늬의 일부가 잘리며 비대칭적으로 형성됨을 알 수 있다. 따라서 간섭계를 이용하면 간섭무늬의 간격이나 모양을 보고 공진기의 정렬 오차를 예측할 수 있으며 이를 보정할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 null 렌즈를 이용한 공초점 불안정 공진기의 정렬 개념과 null 렌즈 설계 결과를 제시하였다. 제안된 null 정렬 광학계는 공진기의 광로 중간에 null 렌즈를 설치하여 공진기에 입사되는 입사파면과 공진기를 통해 반사되어 나오는 반사파면이 동일한 파면으로 나오도록 함으로써 간섭계를 이용할 경우, 양 반사경의 광축뿐 아니라 반사경 사이의 거리도 매우 정밀하게 정렬할 수 있도록 하는 광학계이다. 또한 정렬이 완료된 후에는 공진기 내에서 null 렌즈만 제거하면 되므로, 공진기의 양 반사경간 거리가 고정된 상태에서 null 기능을 이용한 정렬을 수행할 수 있는 장점이 있다.

설계 완료된 null 정렬 광학계에 대한 민감도 분석을 통해 제안된 정렬 광학계가 공진기를 구성하는 반사경들의 정렬 오차에 대해서는 민감하게 반응하지만, null 정렬 광학계 자체의 광학적 비축 수차성능에 대해서는 둔감함을 확인함으로써, 공진기의 정밀한 광축 정렬에 null 렌즈 자체의 위치 오차에 의한 기여도는 매우 작은 효과적인 정렬 광학계임을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] L. E. Wilson, "Deuterium fluoride cw chemical lasers," *Journel de Physique*, vol. C9-N11, no. 41, 1980

[2] J. Shwartz, G. T. Wilson, and J. Avidor, "Tactical High Energy Laser," in *Laser and Beam Control Technologies*, J. F. Riker, Ed., Proc. SPIE, vol. 4632, 2002.

[3] J. Hanlon and S. Aiken, "Alignment Technique for Unstable Resonators," SPIE MS, vol. 29, p. 388, 1991.

[4] L. V. Koval'chuk and N. A. Sventsitskaya, "Methods for Alignment of Lasers with Unstable resonators," Soviet Journal of Quantum Electronics, vol. 2, p. 450-453, 1973.

[5] T. F. Ewanizky and J. M. Craig, "Negatibe-branch unstable resonator Nd:YAG laser," Appl. Opt., vol.15, p. 1465-1469, 1976.

[6] Y. S. Kim, H. S. Kim, H. K. Kim, "Use of null optics for monitoring the optical alignment of a beam director," Appl. Opt., vol. 44, p. 4239, 2005.

[7] Optical Research Associates, *Code-V Reference Mannual*, CODE V 9.5 (Optical Research Associates, Pasadena, Calif, 2003).

Design of null Lens for Alignment of the Unstable Laser Resonator

Hyun Sook Kim† and Yeon Soo Kim

Agency for Defence Development, Taejon 305-600, KOREA

†*E-mail: hyunsook.kim@add.re.kr*

(Received January 26, 2006, Revised manuscript March 20, 2006)

The use of null optics is proposed as a new concept for the precise alignment of a confocal unstable resonator. The characteristics of the proposed null optics are investigated and analysed with the designed null lens for a real confocal unstable resonator of which the length is 3.5 m. As a result of the analysis, the pupil map data are shown about the despace error of 1.0 mm and tilt error of 1.0 mrad.

OCIS Codes : 140.0140. 140.3410.