

직경 300 mm 광집속장치의 광학정렬

양호순[†] · 이윤우

한국표준과학연구원 광기술표준부
Ⓣ 305-340 대전 유성구 도룡동 1번지

김정주 · 엄해동 · 이수상

두산인프라코어(주)
Ⓣ 641-120 경상남도 창원시 성주동 24번지

김연수 · 김현숙

국방과학연구소 기술연구본부
Ⓣ 305-600 대전시 유성우체국 사서함 35-5

(2005년 10월 6일 받음, 2005년 11월 30일 수정본 받음)

우리는 국내에서 처음으로 직경 300 mm인 광집속장치를 정렬 및 조립하였다. 이 장치는 주경, 부경 그리고 5개의 연결 거울로 구성된다. 이 중에서 가장 중요한 부품인 주경은 각 구조물들과의 조립때마다 발생할 수 있는 변형을 정밀 측정하였다. 또한 사용되는 거울의 개수가 많기 때문에 광학정렬에는 체계적인 정렬 알고리즘을 도입하였다. 최종 조립결과 파면수차는 1.9 wave rms(wave = 633 nm)로 예상치의 7배정도 큰 값이었다. 이것의 주원인은 조립 과정에서 발생한 연결 거울들의 변형인 것으로 확인되었다. 본 광집속장치를 정렬하면서 발생했던 문제점들에 대한 고찰은 향후 대형광학계를 만들 때 유용하게 사용될 수 있다.

주제어 : laser beam director, reflective telescope, alignment

I. 서 론

대공표적 추적 시스템^[1]이나 레이저 무기 시스템^[2] 등에 적용되는 광집속장치는 원거리 표적을 지향하여 구동을 하므로 집속광학계는 그림 1과 같이 반사경계와 방위각 및 고각 구동이 자유로운 Coude 광경로로 구성된다. 하지만 이러한 광학계는 광경로가 길고 고출력 레이저를 사용함에 따라 위험한 상황을 초래할 수 있다. 예를 들면 고출력 레이저에 의해 구성품들의 온도가 상승하면 광경로상의 광학정렬이 흐트러지고 레이저 출력이 손상되어 원하지 않는 방향으로 레이저가 발사될 수 있다. 이러한 상황을 방지하기 위해 광경로상의 광학 정렬을 모니터링하는 시스템을 설치한다. 최근에는 부경주위에 환형거울을 부착하는 정렬방법이 제안되었다.^[3,4]

집속광학계는 주경과 부경, 그리고 5개의 광전송용 연결거울로 구성된다. 평행광 형태의 레이저 광선은 연결거울과 부경 및 주경을 거쳐 원거리 표적에 집속된다. 부경에는 위치 조절용 장치가 부착되어 있어 입사된 레이저 광선을 원하는 거리에서 집속시킬 수 있다. Coude 광학계는 이러한 목적을

달성할 수 있는 가장 간단한 형태이기는 하지만 광경로상에 있는 거울이 7개에 달하여 체계적인 정렬순서를 세우지 않으면 많은 자유도 때문에 정렬과정에서 낭패를 볼 수 있다. 하지만 집속광학계는 인공위성광학계처럼 시야각이 크지 않고 주로 광축만 사용하므로 광축상에서만 정렬을 하면 된다는 장점을 가지고 있다.

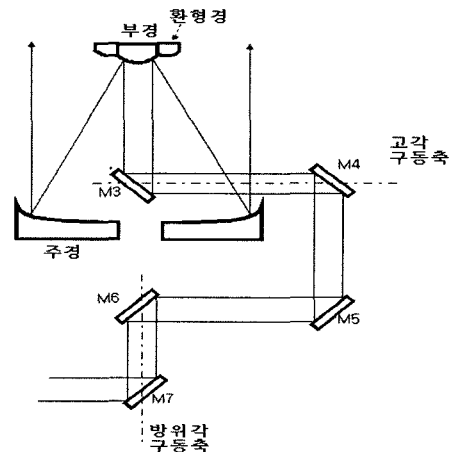


그림 1. 광집속장치의 광학계

[†]E-mail: hsy@kriss.re.kr

본 논문에서는 국내에서 처음 시도하는 직경 300 mm 광 집속장치의 정렬에 관한 이론과 실험적 결과를 다루었다. 광 집속장치에서 제일 중요한 부품인 직경 300 mm 주경에 대하여 마운트들과 조립할 때마다 발생하는 변형을 정확히 측정하고 그 효과를 알아보았다. 또한 많은 거울을 조립하기 위한 체계적인 정렬순서를 세웠고 정렬에 따른 측정 결과를 제시하였다.

II. 주경 평가

주경은 직경 300 mm인 포물면으로 가공되었다. 주경은 장치의 성능을 많이 좌우하므로 정밀 측정이 필요하다. 특히 마운트에 의한 변형 여부는 향후 보다 큰 광 집속장치의 제작에 영향을 미칠 수 있으므로 각 조립 단계마다 주경을 정밀 측정하여 마운트 효과를 살펴보았다.

주경은 포물면이므로 자동시준(autocollimation)방식으로 평가하는 것이 일반적이다.^[5] 그림 2는 주경을 평가하는 과정을 촬영한 것이다. 간섭계에서는 구면파를 만들며 이 구면파가 포물면의 초점과 일치하면 포물면에서 반사된 빛은 평면파가 된다. 이 평면파는 기준 평면을 맞고 다시 포물면에서 반사되어 간섭계로 돌아가게 된다.

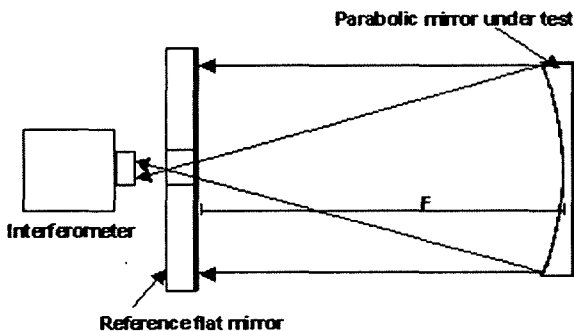
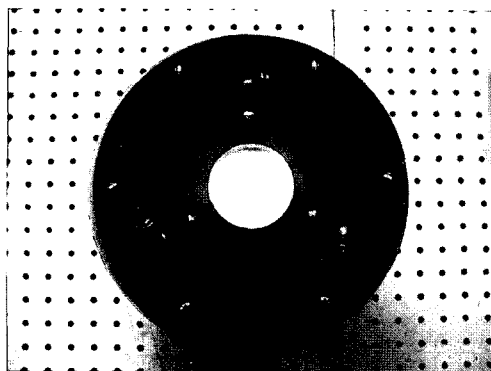
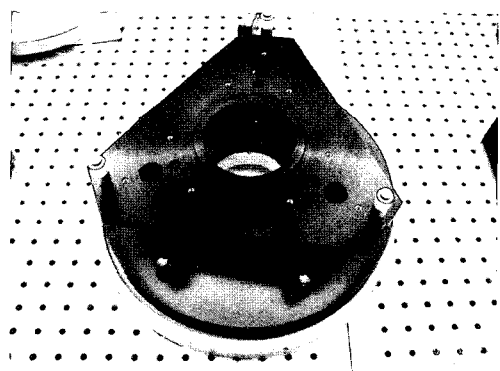


그림 2. 자동시준방식에 의한 주경의 측정. 왼쪽 거울은 평면거울이고 오른쪽은 포물면임.



(a)



(b)

그림 3. (a) whiffle 마운트 (b) 델타 마운트.

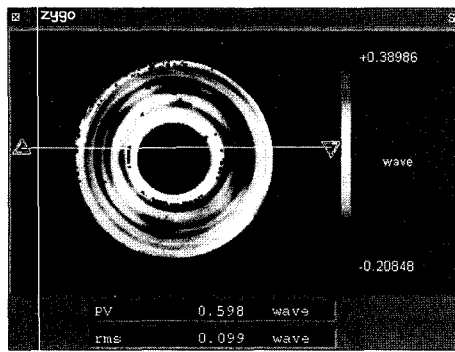
주경과 관련한 마운트는 다음과 같다. 주경의 뒷면은 9점 지지형태의 whiffle 마운트와 접착된다(그림 3(a)참조). 이 whiffle 마운트는 다시 마이크로미터가 부착된 델타마운트와 볼트로 결합된다(그림 3(b) 참조). 마이크로미터는 주경의 미세조정을 위하여 사용된다. 다시 델타마운트는 주경의 경통과 볼트로 연결된다. 이러한 일련의 작업이 끝날 때마다 주경의 변형을 측정하였다.

그림 4는 측정결과를 보여준다. (a)는 주경만 측정한 결과이다. 파면수차는 0.1λ rms이었다. (b)는 주경 뒷면에 whiffle 마운트를 본드로 접착한 후 측정한 결과이다. (a)와 비교하여 특별한 변형이 보이지 않으므로 접착이 잘 되었음을 알 수 있다. (c)는 whiffle 마운트에 델타마운트를 조립하고 측정한 결과이다. (b)와 비교하면 약간의 변형이 비점수차 형태로 발생하였음을 알 수 있다. 이것은 델타마운트에 부착된 마이크로미터가 주경에 영향을 미치고 있음을 의미한다. 비록 그 양은 심각한 수준은 아니지만, 대형 광집속장치를 설계할 경우 더욱 커질 수 있는 변형을 줄이기 위해 설계 변형이 필요한 부분이다. (d)는 주경 경통에 주경을 안착시킨 후의 면형상 측정결과이다. (c)와 비교하여 특별한 변형이 보이지 않는 것으로 보아 경통의 효과는 거의 없는 것을 알 수 있다.

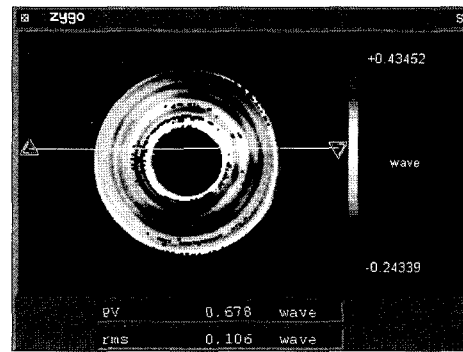
III. 부경의 정렬

주경의 평가가 끝난 후 부경을 주경에 대해 정렬한다. 부경의 정렬 절차는 그림 5에 표시되어 있다. 다음은 각 과정에 대한 부연설명이다.

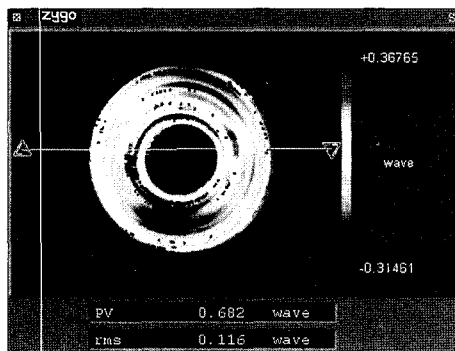
1. 시스템의 고각축을 정렬망원경(Alignment Telescope, AT)과 투명지에 그려진 십자선을 이용하여 찾는다.
2. 십자선이 새겨진 평면거울을 AT를 이용하여 고각축과 일치시킨 후 고정시킨다.
3. AT를 주경의 뒤쪽으로 이동시킨다. 이때 AT의 고각은 가급적 중력방향에 대해 수직이 되도록 조절한다.
4. 오각프리즘(pentaprism)을 경통내부의 고각축상에 위치시키고 AT의 방위 각도를 조절하여 AT의 광축방향이



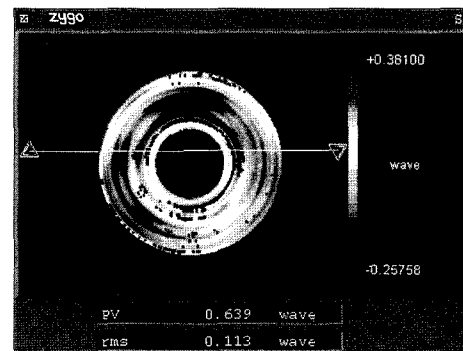
(a) 주경



(b) 주경 + whiffle mount



(c) 주경 + whiffle mount+delta mount



(d) 주경 + whiffle mount + delta mount + 주경 경통

그림 4. 간섭계를 이용한 주경의 파면수차 측정.

시스템의 고각축과 수직이 되도록 한다.

5. 오각프리즘을 제거하고 기준평면거울을 AT의 광축에 수직이 되도록 조절한다. 즉 기준평면거울의 법선방향은 고각축에 수직이 되도록 한다. 광집속장치와 기준평면거울사이의 거리는 최소 1.5 m를 유지하여 여러 가지 정렬에 필요한 장비가 위치할 수 있는 공간을 둔다.
6. 주경의 광축이 AT의 축과 일치하도록 주경의 방향을 조절한다. 이때 거울의 뒷면을 이용하여 주경의 광축을 판단한다.

7. AT를 치우고 간섭계를 주경의 뒤쪽에 위치시킨다. 간섭계를 기준평면거울에 대해 정렬한다. 이때 간섭계에서 나오는 평행광을 이용한다.
8. 마지막으로 부경을 주경통에 위치시킨다. 간섭계에서 나오는 간섭무늬를 보면서 부경을 정렬한다.

이와 같은 정렬을 거쳐 부경을 정확히 정렬시킬 수 있었다. 그림 6은 정렬후 간섭계로부터 나오는 간섭무늬이다. 가운데 부분은 주경과 부경을 맞고 기준평면거울까지 왕복한 광선

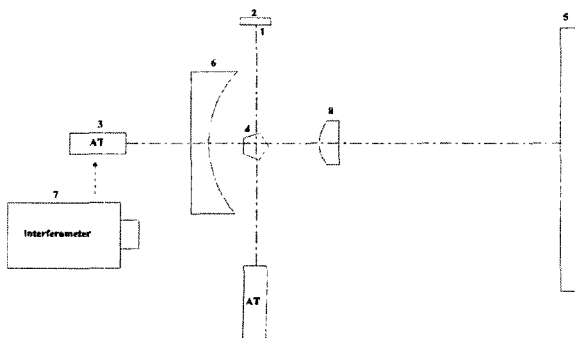


그림 5. 부경 정렬용 절차도

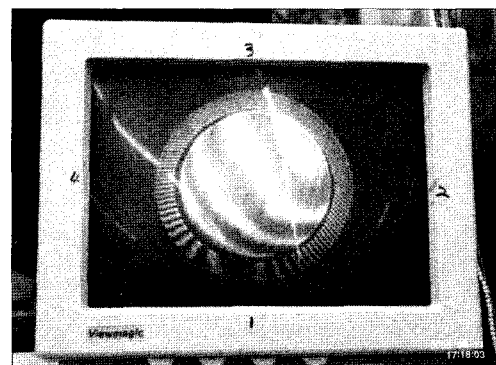


그림 6. 부경 조립후에 부경과 환형거울로부터 발생된 간섭무늬.

에 의한 간섭무늬이고 바깥쪽 부분은 주경과 부경주위의 환형거울에 의해서 생긴 것이다. 부경과 환형거울은 서로 다르게 정렬되므로 간섭무늬의 모양은 다르게 된다.

부경의 정렬이 끝난 후 그림 1의 M3의 조립이 이루어진다. AT를 조절하여 시스템의 고각축과 일치시킨다. 이때 이미 고각축을 정의하고 있는 평면거울을 사용한다. 그리고 M3를 삽입하고 기울기를 조절한다. AT로부터 나간 빛이 부경과 주경, 기준평면거울까지 왕복하고 다시 돌아오도록 하면 M3의 정렬이 완료된다. M3에는 위치제어를 위한 PZT가 붙어 있는데 PZT에 전압이 가해지는 여부에 따라 자세가 틀려지므로 정렬을 할 때는 반드시 PZT를 켜 상태에서 실시하여야 한다.

IV. 연결 거울의 정렬

M3의 정렬이 끝난 후 나머지 4개의 연결거울에 대한 정렬을 수행하였다. 이때 주경의 광축과 시스템의 고각축을 정확히 알고 있으므로 M4, M5, M6, M7 순서대로 나머지를 정렬하는 top-down 방식을 고려해 보았다. 이러한 경우 AT를 적절한 장소에 위치시켜 고각축을 확인하면서 진행하여야 하지만 구조물의 형태가 AT를 설치하기에 협소한 경우 이러한 top-down 방식은 가능하지 않다.

본 광집속장치의 연결 거울의 정렬은 M7에서 M4까지 거꾸로 정렬하는 bottom-up 방식으로 진행되었다. 이를 위하여 간섭계는 광학테이블위에 설치하고 간섭계의 방향은 기준평면거울과 일치시킨다. M7의 앞부분의 중심에 구멍이 뚫린 종이를 대고 이것이 M6의 앞부분에서 다시 중심을 통과하도록 M7을 조절한다. 다시 M5의 앞부분에 종이를 대고 M6을 통과한 빛이 M5의 중심을 통과하도록 M6를 조절한다. 이러한 방식으로 M4까지 정렬하게 되면 M1에서 M7에 이르는 모든 거울의 정렬이 끝나게 된다. 그림 7은 최종 조립된 광집속장치의 전체 사진이다. 장치에 연결된 선은 M3 거울 조정용 PZT를 위한 것이다.

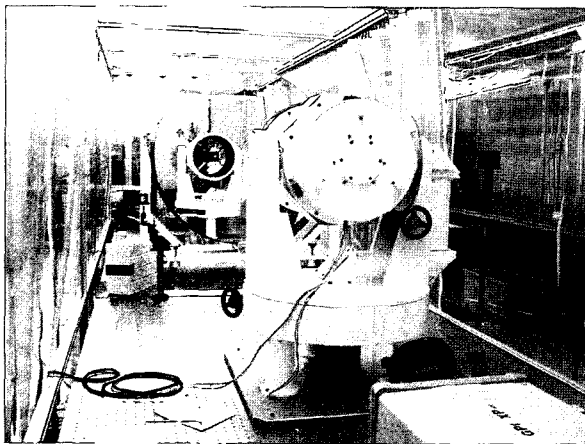


그림 7. 장치의 최종 조립 장면. 간섭계는 바닥에 고정되어 있음.

V. 문제점 분석

그림 8은 조립이 완료된 후 시스템의 전체 파면수차를 측정하는 것이다. 주경과 부경을 비롯한 다른 연결 거울들의 파면수차가 0.1 wave(wave = 633nm) 정도인 것을 감안하면 최종 파면수차는 RSS (root sum square)에 의하여 0.27 wave rms를 넘지 않아야 하지만 측정 결과는 1.9 wave rms로 7배 정도 큰 값을 보였다. 또한 파면수차의 형태를 보면 3점지지의 변형을 볼 수 있으므로 조립 중에 어떤 부품에 심각한 변형이 생겼음을 알 수 있다.

이러한 문제점에 대한 원인을 분석한 결과 연결 거울의 변형을 확인하였다. 그림 9는 M4에서 M7까지의 연결거울을 시스템에서 분리하여 측정하고 조립하기 전의 상태와 그 결과를 비교한 것이다. 그 결과 M6과 M7이 조립전과 비교하여 심각하게 변형됨을 알 수 있었다. 본 측정결과는 형상오차이므로 파면오차를 고려하고 (2배), 연결거울이 45° 반사에 사용되는 것을 고려하게 되면 (1.414배), M6에서 발생하는 파면오차는 0.56 wave 이고 M7은 0.28 wave에 이른다. 하지만 위의 오차를 고려하더라도 RSS 결과는 0.67 wave rms에 불과하여 측정결과와 1/3 밖에 되지 않는다. 따라서 이러한 심각한 변형은 연결거울 자체의 변형 뿐만 아니라 조립 과정에서 추가로 발생하는 변형이 주 원인인 것으로 생각된다.

이러한 추가 변형은 거울을 알루미늄판에 직접 본드를 이용하여 접착하기 때문에 발생한다. 즉, 거울과 알루미늄판 사이에 알루미늄의 변형을 완충할 수 있는 구조물이 설치되어 있지 않기 때문에 알루미늄판을 구조물과 볼트로 체결할 때 발생하는 응력이 거울로 전달되는 것을 막을 수 없었다. 또한 거울을 알루미늄판에 붙인 후 본드가 완전히 굳어지는데 필요한 충분한 시간을 보내지 않고 바로 본체와의 체결을 수행한 결과 거울은 알루미늄판이 변형된 상태에서 자리를 잡았다. 즉, 알루미늄판을 본체에서 분리하여 알루미늄판의 응력을 제거한 상태에서도 거울은 변형을 유지하게 된다.

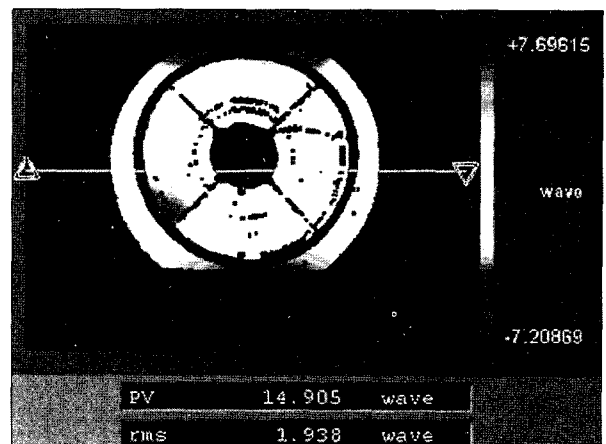


그림 8. 장치의 최종 파면수차.

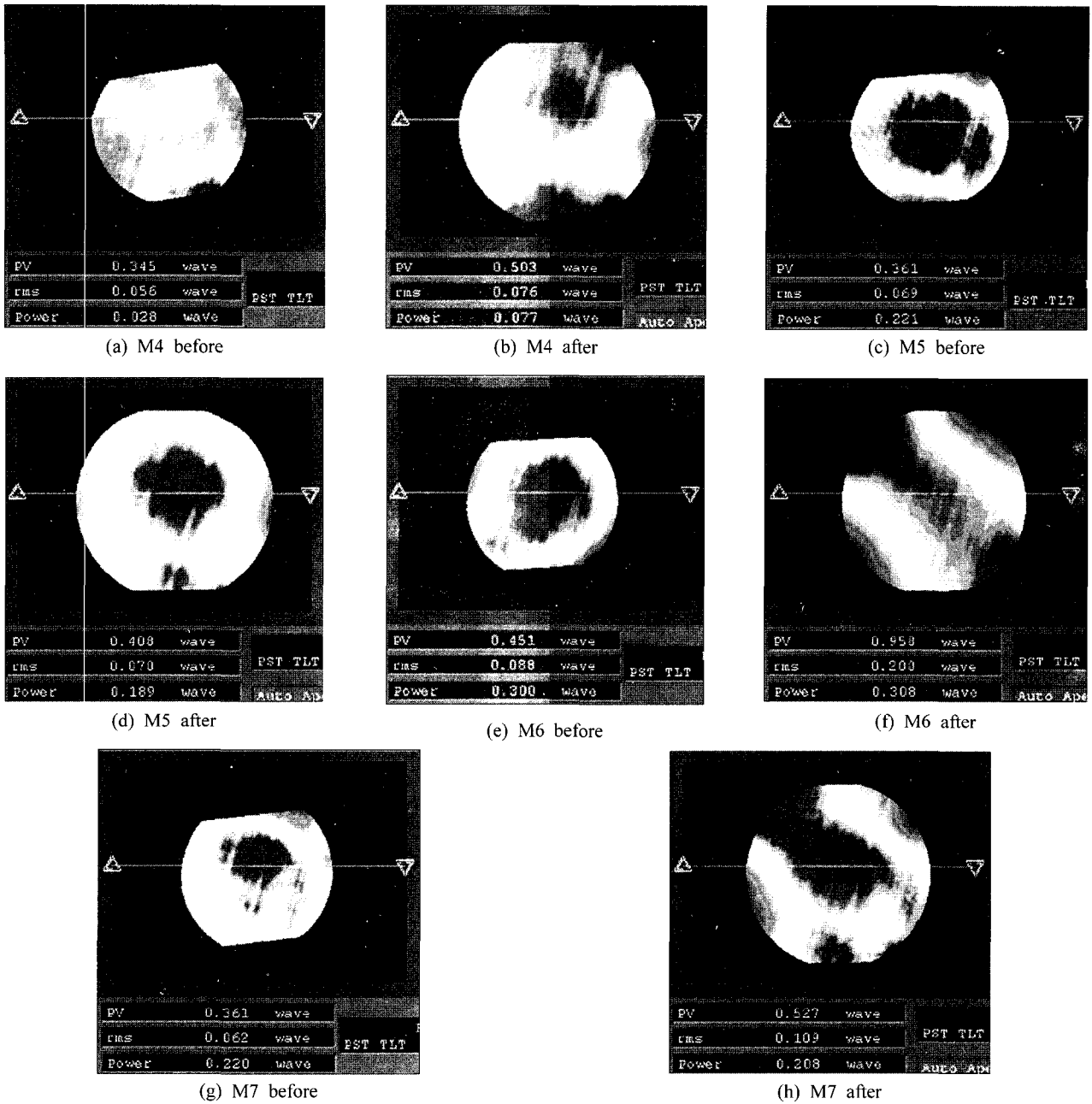


그림 9. 각 연결 거울의 본체와의 체결전과 후의 파면수차 비교.

VI. 결 론

본 논문에서는 직경 300 mm 광집속장치의 정렬에 관한 연구결과를 보고하였다. 먼저 주경에 부품을 조립할 때마다 파면수차를 정확히 측정하여 부품에 의한 효과를 파악하였다. 또한 체계적인 정렬 알고리즘을 이용하여 많은 수의 거울을 순차적으로 조립하였다. 이러한 과정을 거친 결과 부경을 정렬하면서 환형거울로부터의 간섭무늬를 같이 얻을 수 있어서 정렬오차 검출 연구를 원활히 진행할 수 있었다. 하지만 조립 후 최종 파면수차를 측정한 결과 예상보다 심각한

파면수차가 생겼음을 발견하였다. 이것은 연결거울의 조립과정에서 발생하는 응력에 의한 결과라는 것을 실험을 통하여 확인하였다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 연결거울을 알루미늄판에 고정시키거나 알루미늄판을 본체에 고정시킬 때 별도의 응력 완충장치를 이용하는 방안을 강구하여야 한다. 본 광집속장치의 조립을 수행하면서 많은 중요한 문제점들을 파악할 수 있었다. 이러한 문제점을 해결하고자 하는 노력들은 향후 보다 큰 광집속장치의 개발에 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대한다.

참고문헌

- [1] R.W. Duffner, *Airborne Laser* (Plenum Press, New York, 1997), Chapter 8.
- [2] R.W. Duffner, *Airborne Laser* (Plenum Press, New York, 1997), Chapter 11.
- [3] 김연수, 김현숙, 김현규, "광집속장치의 광학정렬을 위한 null 광학계," *한국광학회지*, 제15권 3호, pp. 254-257, 2004.
- [4] Y. S. Kim, H. S. Kim, and H. K. Kim, "Use of null optics for monitoring the optical alignment of a beam director," *Appl. Opt.* vol. 44 no. 20, pp. 4239-4243, 2005.
- [5] 양호순, 이재협, 이윤우, 이인원, 김종운, 김도형, "직경 450 mm Cassegrain 형태의 시준장치의 제작," *한국광학회지*, 제15권 3호, pp. 241-247, 2004.

Assembly of diameter 300 mm optical beam director

Ho Soon Yang[†] and Yun Woo Lee

Optical Nano Metrology Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 305-600, Korea

Jeong Ju Kim, Hae Dong Eum and Soo Sang Lee

Dusan Infracore Co. Ltd 24 Sungju-dong, Changwon, Kyongsangnam-do, 641-120, Korea

Yeon Soo Kim and Hyun Sook Kim

Agency for Defence Development, Daejeon 305-600, Korea

[†]*E-mail: hsy@kriss.re.kr*

(Received October 6, 2005, Revised manuscript November 30, 2005)

We assembled the optical beam director with diameter 300 mm. This consists of primary, secondary mirrors and 5 folding mirrors. Among them, the primary mirror is the most important component so that we measure any possible deformation on it at every step of assembly. Also, we developed the systematic alignment algorithm, which is essential because the number of mirrors is 7. The final wavefront error of the system is 1.9 wave rms (wave=633 nm) which is 7 times larger than we expected. The main source is the deformation of the folding mirrors. We expect that what we have learned from the assembly of this system would be helpful when we deal with a larger system in the future.

OCIS Codes : 120.6650. 220.4840. 220.1250.