

적외선 체열촬영시스템을 위한 고속 광주사기의 구현

이수열

=Abstract=

Realization of a High Speed Optic Scanner for Infrared Thermal Imaging

Soo Yeol Lee

A high speed optic scanner capable of 16 frames/sec imaging has been developed for the realization of the infrared thermal imaging system with a single element infrared sensor. The high speed optic scanner is composed of a rotating polygon mirror for horizontal scanning, a flat mirror mounted on a galvanometer for vertical scanning, and a spherical mirror. It has been experimentally found that the optic scanner is capable of 16 frames/sec imaging with the frame matrix size of 256×64 .

Key words : Optic scanner, Infrared thermal imaging, Polygon mirror

서 론

인체 표피상의 체온분포는 표피하 세포조직내 신경망의 기능 및 혈류 순환 등에 대한 정보를 내포하고 있어 표피 온도를 2차원적으로 측정하는 체열영상(Thermograph)기술은 현대의학에서 그 중요성이 인정되고 있다^{1, 2)}. 인체의 열이 외부로 전달되는 열전달방식으로는 복사, 대류, 전도, 기화 등이 있는데 이 중에서도 적외선 형태로 방출되는 복사가 차지하는 비중은 약 60% 이상으로 대부분을 차지하고 있다(실내온도하에서 휴식을 취하고 있는 상태에서)³⁾. 적외선 체열영상시스템은 인체에서 복사되는 적외선을 인체의 표피를 접촉하지 않고 감지하여 인체 표피 온도분포를 천연색 영상으로 보여줄 뿐만 아니라 그 영상을 디지털 데이터로 저장하여 정량적인 분석까지도 가능하게 하여 그 임상적 응용이 확산되어 가고 있다^{4, 5)}. 통증크리닉, 재활의학과, 신경외과 등에서 주로 이용되고 있는 적

외선 체열영상시스템은 우리나라의 경우 인체의 온도분포를 중요시하는 한방의학 분야에서도 임상적 응용이 크게 증가할 것으로 보인다.

적외선 체열영상시스템을 2차원 배열형 적외선센서를 사용하여 구현할 경우 복잡한 광주사기를 사용하지 않아도 되지만 인체의 체열영상이 가능한 $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 의 파장대역에서 동작하는 2차원 배열형 적외선센서는 아직 상용화가 되어 있지 않아 대부분의 의료용 적외선 체열영상시스템은 단소자형 적외선센서와 2차원 광주사기를 이용하여 구성되어 있다.

본 논문에서는 256×64 의 적외선 영상을 초당 최대 16장까지 촬영할 수 있는 고속 광주사기의 구현을 소개하였다. 체열영상이 일반적인 가시광선대역의 영상에 비해 시각적으로 인지가 잘 되는 고주파 성분이 거의 없는 것을 고려하면 256×64 의 해상도와 초당 16장의 촬영속도는 의학적으로 의미를 갖는 다고 생각된다. 평면경, 회전다면

건국대학교 의과대학 의학공학과

* Dept. of Biomedical Eng., Konkuk University

† 본 논문은 1993년도 상공자원부 공업기반기술과제에 의하여 연구되었음.

통신저자: 이수열, (380-701) 충북 충주시 단월동 322, Tel. (0441) 40-3764, Fax. (0441) 848-0620

경, 구면경 등으로 구성된 이 고속 광주사기를 이용하여 적외선 체열영상시스템을 구현할 경우 체열영상을 동영상으로 촬영할 수 있게 되어 운동 등으로 인해 야기되는 인체표피 온도의 시간적인 변화 형태를 정량적으로 검사할 수 있을 것으로 기대된다.

본 론

광주사는 거울, 렌즈, 프리즘 그리고 홀로그램 등의 광학소자를 회전시키거나 진동시킴으로써 실현할 수 있는데 이들 중 촬영을 위해 가장 보편적으로 쓰이고 있는 방법은 거울을 회전시키는 방법이다. 거울은 다른 광학소자들과 비교하여 색수차가 없고 온도변화에 따른 광학특성의 변동이 적은 등의 장점을 가지고 있으면서도 값싸게 제작할 수 있는 잇점이 있다. 본 논문에서는 거울을 이용한 고속 광주사기의 구현을 소개하였다. 거울을 이용하여 2차원 광주사를 하기 위해서는 거울 2개를 각기 다른 방향으로 운동시키거나 거울 1개를 동시에 2방향으로 운동시키는 방법이 있다. 이중 거울 1개를 사용하는 방법은 거울을 동시에 2방향으로 운동을 시켜야 하기 때문에 이를 구동하기 위한 구조가 복잡해지고 또한 고속으로 주사하기 어렵다는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 거울 2개를 각기 독립하여 운동을 시키는 방법을 택하였다.

1. 2차원 광주사의 원리

그림 1에 전형적인 2차원 광주사기의 구조를 나타내었다. 레이저빔 주사에서와 같이 직진하는 광다발을 평면경1과 평면경2를 통하여 XY-평면에 조사하는 경우에 평면경1과 평면경2의 중심위치로부터의 회전각도를 각기 θ_1 와 θ_2 라 하면 XY-평면에 도달하는 광다발의 위치 X, Y는 아래의 식으로 표현된다⁶⁾.

$$Y = a \tan \theta_2$$

$$X = (\sqrt{a^2 + Y^2} + b) \tan \theta_1 \quad (1)$$

단 여기서 a는 평면경2와 XY-평면과의 수직거리를, 그리고 b는 평면경1과 평면경2 사이의 수직거리를 나타낸다. 위 식에서 알 수 있는 것은 XY좌표는 각기 회전각도에 tan함수로 연결되어 있어 비선형적인 관계로 매개되어 있는 점이다. 회전각도가 작으면 근사적으로 선형관계를 이루고 있는 것으로 가정할 수 있으나 그렇지 않으면 심한 왜곡현상을 초래할 수 있게 된다. 일반적으로 레이저프린

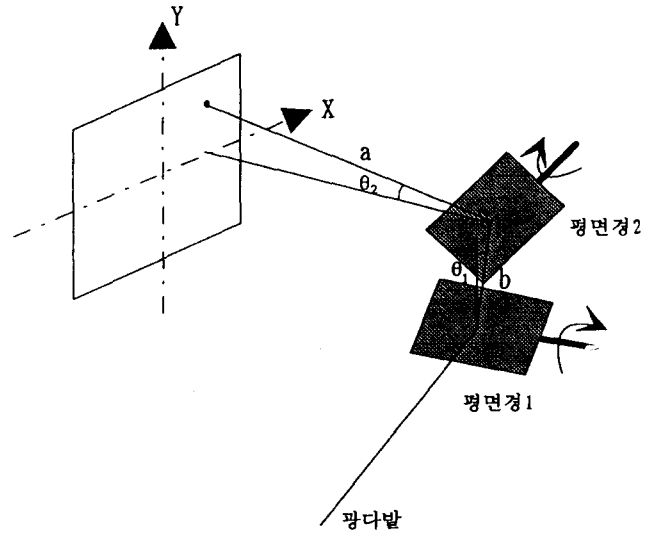


그림 1. 2차원 광주사기의 기본적인 구조

Fig. 1. Basic structure of the 2-dimensional optic scanner

터에서와 같이 광주사의 각도가 큰 경우에는 fθ 렌즈와 같이 왜곡보정용 광학소자를 사용하여 위의 왜곡을 보정해 주지만 적외선촬영시스템과 같이 주사각도가 작은 경우 (일반적으로 10° 내외)에는 보정을 하지 않아도 육안으로 쉽게 구별이 되지 않는 정도의 왜곡을 야기한다.

2. 고속 광주사기의 구성

고속 광주사기를 그림 2에 보인 것과 같이 평면경, 회전다면경, 구면경, 집광렌즈 등으로 구성하였다. 이 그림에서 평면경은 수직방향의 주사를, 그리고 회전다면경은 수평방향의 주사를 실행한다. 평면경에는 무초점 광학시스템이 만들어 주는 시준된(Collimated) 적외선 광다발이 입사하게 된다. 그림 2의 광주사기는 적외선촬영을 위해 구성되어 있기 때문에 입력광다발은 시준되어 수평 및 수직 방향으로 정해진 각도 안에서 순차적으로 각도가 변하면서 입사한다고 생각할 수 있다. 평면경은 입사되는 적외선 광다발의 방향을 바꾸어 구면경에 보내주게 되고 이 구면경은 수평방향으로 광축으로부터 발산하는 적외선 광다발을 모아서 회전다면경의 거울면에 보내주게 된다. 회전다면경은 이 적외선 광다발을 다시 수평방향으로 주사시켜 집광렌즈로 보내주게 되고 집광렌즈에 의해 집광된 적외선 광다발은 적외선센서로 향하게 된다. 반대로 광다발의 방향을 집광렌즈로부터 시작하여 역순으로 진행하게 되면 레이저빔 주사와 같은 기능을 실현할 수도 있다. 그림 2에 보인 2차원 광주사기는 앞 절에서 설명한 기본적

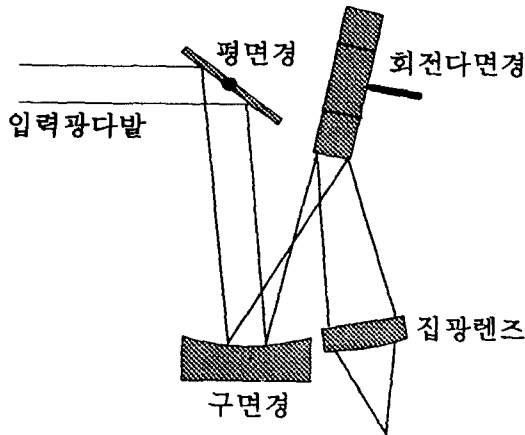


그림 2. 고속 2차원 광주사기의 구조
Fig. 2. Structure of the high speed 2-dimensional optic scanner

인 2차원 광주사기에 비교하여 수평방향 광주사기와 수직방향 광주사기 사이에 구면경이 놓인 점이 다르다. 기본형 광주사기의 경우 1차적으로 한방향으로 광주사된 광다발은 그 방향으로 광축으로부터 발산하게 되고 이 발산하는 광다발을 2차적으로 주사하는 거울이 없는 것 없이 모두 반사시키기 위해서는 2차적으로 주사하는 거울의 크기가 필연적으로 커지게 된다. 특히 적외선 촬영시스템에서와 같이 입력 광다발의 크기가 큰 경우에는 거울의 크기도 비례하여 커지게 된다. 이 큰 거울을 고속으로 오차없이 진동하거나 회전시키는 것은 기술적으로 어려운 일이 된다. 따라서 고속으로 거울을 진동시키거나 회전시키기 위해서는 가능한 한 거울의 크기를 작게 해야만 한다.

본 연구에서는 1차 광주사기(그림 2의 평면경)에 의해서 주사되어 광축으로부터 발산하는 광다발을 다시 광축으로 집광하여 2차 광주사기(그림 2의 회전다면경)의 주사 표면에 모아주기 위해 구면경을 사용하였다. 이 구면경은 1차 주사기에 의해 주사되어 광축으로부터 발산하는 광다발을 집광할 뿐만 아니라 1차 주사기에 입사하는 광다발의 두께보다 더 작은 두께의 광다발을 형성하여 2차 주사기의 표면에 보내주는 역할도 하게 된다. 이렇게 하면 2차 광주사기의 거울면 크기를 줄일 수 있어 2차 광주사기의 주사속도를 높일 수 있게 된다. 주사용 구면경은 무촉점시스템의 접안부(Eye relief) 위치에 놓인 평면경에 대한 상을 회전다면경의 면위에 만들어 주는 역할을 한다고 볼 수 있다. 여기서 접안부란 무촉점시스템의 주광선(Principal ray)이 광축과 만나는 위치를 가리킨다. 따라서

구면경의 배율을 결정하면 회전다면경 위에서의 적외선 광다발의 충돌점 크기를 알 수 있게 된다. 그리고 무촉점시스템의 출력광이 광축과 이루는 최대 각도를 α 라 하면 회전다면경에 입사되는 광의 최대 입사각도 α' 는 아래의 관계식으로 구할 수 있다.

$$\alpha' = -\frac{\alpha}{m} \quad (2)$$

여기서 m 은 구면경의 배율이다.

본 연구에서는 2차원 영상을 얻을 경우 빠른 속도의 주사가 필요한 수평방향의 광주사를 위해 회전다면경을 사용하였다. 회전다면경의 경우 거울의 모양이 거의 원통형 형태로 되어 있어 고속 회전이 용이할 뿐만 아니라 원통면에 다수의 거울을 만들 수 있어 회전다면경을 1회전 하는 동안 복수의 주사를 할 수 있어 주사의 효율을 높일 수 있는 장점이 있다. 그리고 수직방향으로의 주사는 평면경을 원하는 각도 안에서 선형적으로 진동시키는 방법을 택하였다.

회전다면경에 의한 주사속도를 높이기 위해서는 다면경의 회전속도를 높이거나 면수를 늘려야 하는데 면수를 늘리는 경우 다면경의 크기가 커져 회전속도를 높히기가 힘들고 광주사기의 외형이 커지는 문제점이 있으므로 회전속도와 면수, 그리고 외형크기를 상호 고려하여 설계해야만 한다. 다면경 설계시 고려해야 할 변수들을 그림 3에 나타내었다. 그림에서 각기 변수들이 나타내는 바는 아래와 같다.

- Ro: 외측반경 (Outer radius)
- Ri: 내측반경 (Inscribed radius)
- ϕ : 한면이 이루는 각도 = $360^\circ/\text{면수}$
- W: 면의 길이
- T: 면의 두께

여기서 회전다면경의 면이 입사광의 중심축과 이루는 각도를 θ , 회전다면경의 회전각을 β , 그리고 회전다면경에 의해 반사된 반사광의 회전각을 β' 라 하면 β' 는 아래의 관계식으로 주어진다.

$$\beta' = \tan^{-1} \left[\frac{-\sin 2\beta \cos \theta}{1 - \cos^2 \theta + \cos 2\beta \cos^2 \theta} \right] \quad (3)$$

회전다면경의 면길이 W는 면에 입사되는 광다발의 너비

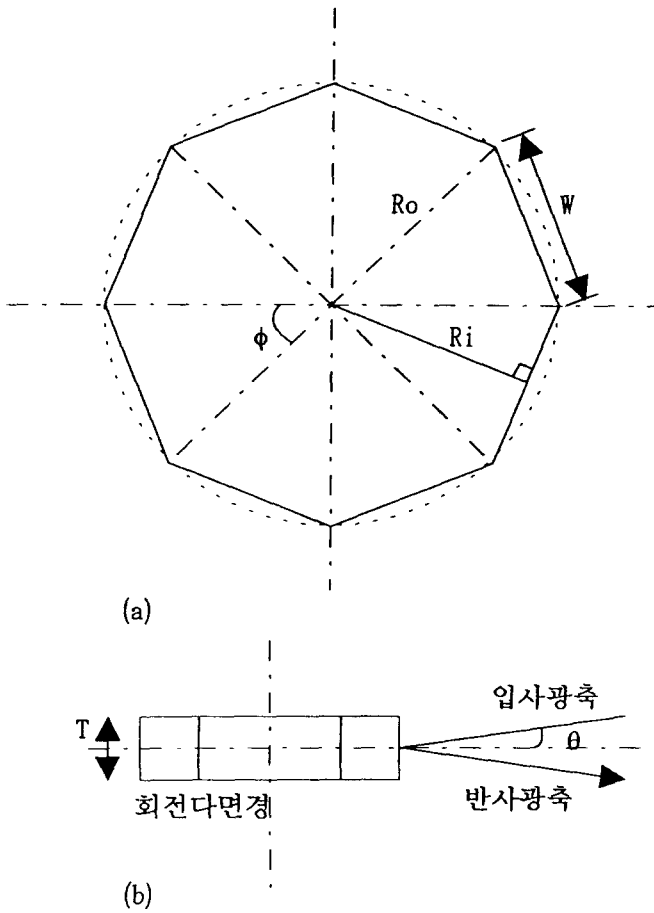


그림 3. 회전다면경의 외형
(a) 정면도 (b) 측면도
Fig. 3. The shape of a polygon mirror
(a) Front view (b) Side view

를 BW라 할 때 아래의 관계식으로 구할 수 있다.

$$W \geq \frac{BW}{2 \cos \theta \left(\frac{\cos \beta}{2} - \frac{\sin \beta}{2 \tan 0.5 \phi} \right)} \quad \text{BW (4)}$$

실험결과 및 토의

회전다면경을 제작하여 주사실험을 하였다. 제작한 회전다면경의 면수는 8면이며, 내측반경(Inscribed radius)은 32.5mm, 두께는 13mm, 그리고 재질은 알루미늄을 사용하였다. 회전다면경에 의한 광편향각은 회전다면경에 입사하는 광다발의 너비가 9mm일 때 최대 26°가 되게 하였다. 이렇게 할 경우 회전다면경에 의한 최대 광주사각도가 45°

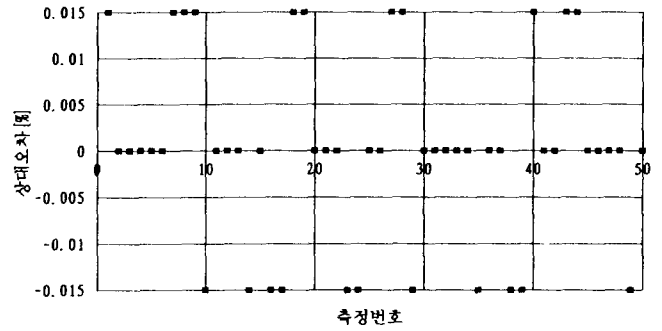


그림 4. 회전다면경에 의한 광주사 오차 측정 결과
Fig. 4. Measurement result of scan error caused by the polygon mirror

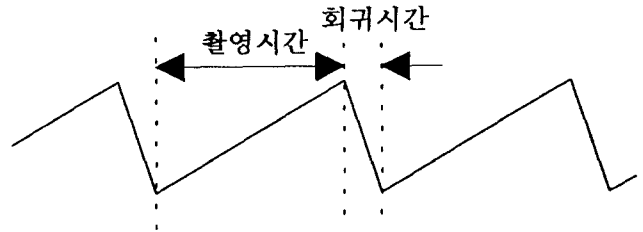


그림 5. 갈바노메타 구동 파형
Fig. 5. Driving waveform of the galvanometer

인 것을 고려하면 주사효율은 약 58%가 된다. 회전다면경의 구동은 직류서보모터를 사용하여 실현하였다. 직류서보모터로 회전다면경을 9,000rpm으로 회전시키면서 회전다면경의 면 오차 및 회전속도의 오차(peak-to-peak jitter)를 측정하였다. 광주사에 오차를 야기할 수 있는 요인으로는 회전다면경의 면평활도(facet flatness), 면각도의 오차, 그리고 모터 회전속도의 변동 등을 생각할 수 있다. 이 오차를 측정하기 위해 회전다면경에 레이저빔을 조사하면서 정해진 각도로 반사되어 나오는 반사광을 포토트랜지스터로 수광하여 전기적인 펄스를 만들고 이 펄스들사이의 간격을 측정하였다. 그림 4에 측정한 결과를 예시하였다. 이 그림에서 오차가 0.015%와~0.015% 값만을 갖는 것은 제작한 타이밍 측정회로의 정밀도가 0.015%이기 때문이다. 이 결과로부터 회전다면경의 최대 주사 오차는 0.03% 이하인 것을 알 수 있는데 이 정도의 오차는 256 × 256 영상을 구성할 경우 화소 크기의 약 1/10 정도의 오차를 야기하므로 무시할 수 있다.

수직방향으로의 광주사는 무촉점 시스템에서 나오는 평

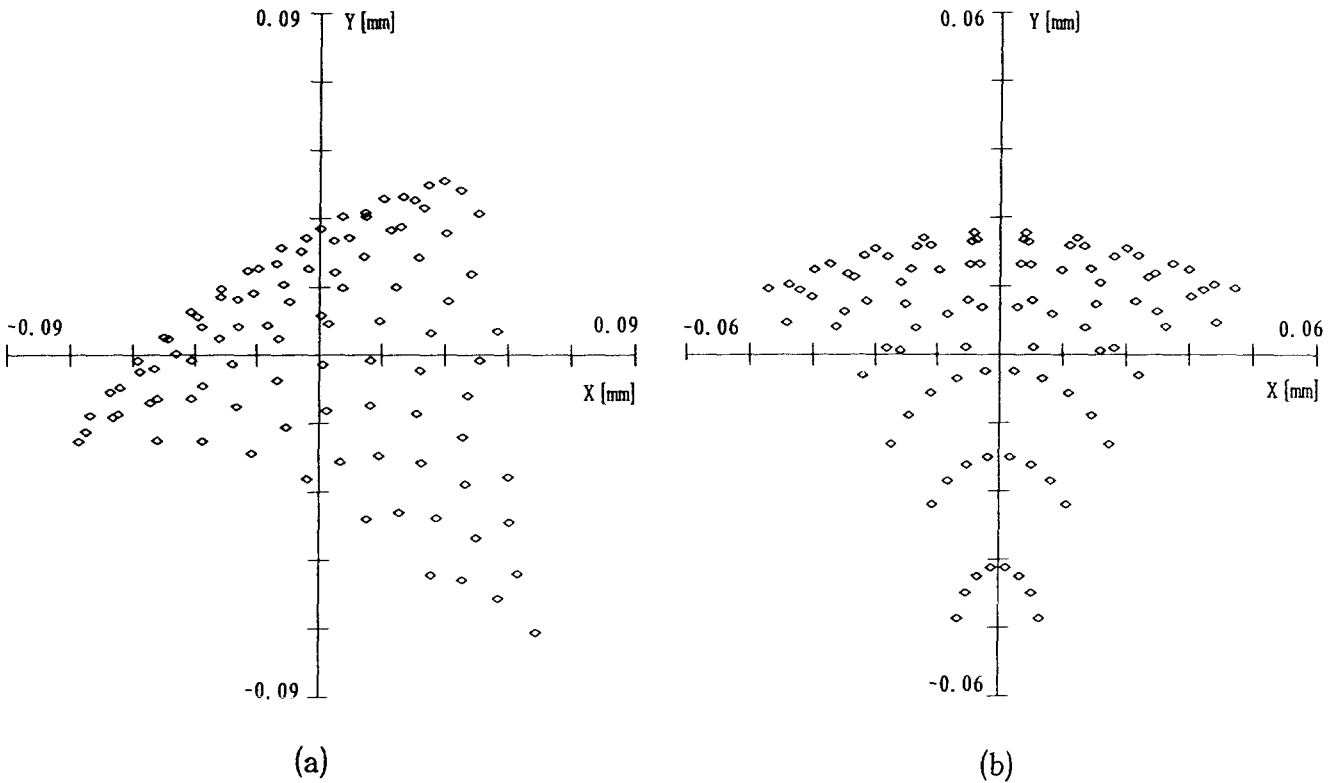


그림 6. 주사용 구면경의 수차영향 측정을 위한 Ray spot도

(a) 수차가 가장 큰 경우(Tangential angle of ray=6°, Sagittal angle of ray=18°, Beam diameter=13mm)

(b) 수차가 가장 작은 경우(Tangential angle of ray=6°, Sagittal angle of ray=0°, Beam diameter=13mm)

Fig. 6. Ray spot diagrams for estimating aberrations of the spherical mirror

(a) Maximum aberration case(Tangential angle of ray=6°, Sagittal angle of ray=18°, Beam diameter=13mm)

(b) Minimum aberration case(Tangential angle of ray=6°, Sagittal angle of ray=0°, Beam diameter=13mm)

행광을 평면경을 진동하여 주사하는 방식을 채택하였다. 이 주사용 평면경의 진동은 갈바노메타를 이용하여 실현하였다. 갈바노메타는 일반 모터와는 달리 정해진 각도 안에서 왕복회전운동을 할 수 있기 때문에 캠과 같이 복잡한 기계물의 도움이 없이도 주사효율을 높힐 수 있는 장점을 가지고 있다⁷⁾. 갈바노메타의 구동은 그림 5에 보인 톱니파 모양의 구동파형과 갈바노메타축의 위치센서 신호와의 차이를 최소화하는 서보앰프를 구성하여 실현하였다. 구동파형은 촬영하는 시간과 평면경을 다시 원위치로 회귀시키는 회귀시간으로 구성되어 있다. 실험에서는 보통 촬영 시간과 회귀시간의 비를 약 5:1로 하였다. 갈바노메타는 최대 16Hz까지 진동주파수를 가변하여 구동할 수 있도록 하였다. 갈바노메타에 부착된 평면경에 입사되는 광다발의 너비는 13mm로 하였으며 이 평면경에 의한 최대 광주

사 각도는 18°가 되게 하였다.

무촛점 시스템의 출력광다발의 크기가 13mm일 때 회전다면경에서의 광 충돌점 크기가 9mm가 되도록 구면경의 배율을 0.692로 하였다. 따라서 회전다면경에 입사하는 광의 최대 입사각도는 무촛점 시스템의 최대출력각도를 18°로 할 경우 식(2)에 의하여 26°가 된다. 그리고 구면경에 입사되는 광과 반사되어 나오는 광이 회전다면경이 있는 위치에서 서로 겹치지 않도록 입사광은 6°의 각도로 경사지게 입사하도록 하였다. 그리고 구면경의 촛점거리는 65mm로 하였다. 구면경은 파이렉스(Pyrex)에 알루미늄을 코팅하여 제작하였다. 위의 값들로 설계한 구면경의 수차영향을 분석하였다. 구면경은 색수차가 없으므로 구면수차, 코마, 비점수차 등의 영향을 받게 된다⁸⁾. 이러한 수차의 영향을 광학설계 S/W OPTECIII(미국 Sciopt사 제품)

를 이용하여 분석하였다. 수차의 영향이 가장 큰 경우 (Tangential angle of ray=6°, Sagittal angle of ray=18°, Beam diameter=13mm)와 가장 작은 경우 (Tangential angle of ray=6°, Sagittal angle of ray=0°, Beam diameter=13mm)의 광선 충돌점을 그림 6의 (a)와 (b)에 각기 나타내었다. 코마, 비접수차등의 수차영향 때문에 광선 충돌점은 부채꼴 모양을 하고 있다. 사용한 광선의 수는 각기 100이다. 이 결과로부터 각해상도를 구하면 각기 약 1.4mrad과 1.0mrad임을 알 수 있었다. 따라서 광주사기의 주사각도를 수평 및 수직방향으로 각기 20°(0.35rad)로 할 경우 공간적으로 분해가능한 주사선 수는 약 250이 되어 256×256영상의 촬영이 가능해진다.

회전다면경을 9000rpm (150rps)로 회전시키면 256×64의 영상을 최대 18.8장(초당 회전속도×면수/64=150×8/64)까지 얻을 수 있지만 갈바노메타 구동과형인 톱니파의 회귀시간을 고려하면 약 16장까지 촬영 가능한 광주사를 얻을 수 있게 된다.

결 론

단소자형 적외선센서를 가지고 적외선 체열촬영시스템을 구성할 수 있는 고속 광주사기의 설계 및 이의 실험 결과를 소개하였다. 고속 광주사기는 8면을 가진 회전다면경과 갈바노메타에 부착된 평면경, 그리고 구면경으로 이루어져 있다. 이 고속 광주사기로 256×64의 체열 영상을 초

당 16장까지 촬영할 수 있음을 실험으로 검증하였다. 상용으로 사용할 수 있는 2차원 배열형 적외선센서는 아직 개발되지 않았기 때문에 2차원 고속광주사기의 개발은 의료용 적외선체열촬영시스템의 개발에 필수불가결한 것이라 할 수 있다. 본 연구에서 개발한 고속광주사기를 사용하여 의료용 적외선체열촬영시스템을 개발할 예정이며 또한 이 고속 광주사기는 레이저 주사 등 다른 의료기기에도 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. Frieda Feldman, "Thermography of the hand and wrist: Practical applications", Hand Clinics, Vol. 7, No. 1, pp. 99-111, 1991
2. Sumio Uematsu, et al., "Quantification of thermal asymmetry", J. of Neurosurg., Vol. 69, pp. 552-555, 1988
3. Joachim-Michael Engel, Ed., "Thermological Methods", VCH publishers, pp. 21-33, 1985
4. 이수열, 우응제, 조민형, "적외선 체열촬영시스템을 위한 광학계의 구성", 의공학회지, 제 15 권, 제 1 호, pp. 97-104, 1994
5. 이수열, 우응제, 조민형, "적외선 체열촬영시스템의 구현", 의학물리, 제 5 권, 제 1 호, pp. 13-24, 1994
6. Gerald F. Marshall, et al., "Laser Beam Scanning", Marcel Dekker Inc., New York, pp. 226-234, 1985
7. Gerald F. Marshall, et al., "Laser Beam Scanning", Marcel Dekker Inc., New York, pp. 63-66, 1985
8. Warren J. Smith, "Modern Optical Engineering", McGraw-Hill, pp. 436-439, 1991