

## X선용 545 nm 형광판 결상광학계 개발

이동희

울지대학교 보건과학대학 안경광학과  
투고일(2008년 4월 5일), 수정일(2008년 6월 3일), 게재확정일(2008년 6월 10일)

**목적:** X선용 545 nm 형광판을 위한 결상광학계 개발. **방법:** 캐논(Canon)사 CX2-70 모델을 참조하여 설계 기준을 정한 다음 Sigma 2000 광학 설계 프로그램으로 X선용 545 nm 형광판을 위한 결상광학계를 설계 제작하였다. **결과:** 새로 설계 제작되어진 X선용 545 nm 형광판 결상광학계의 배율은 -0.225배이고, 이미지 크기는 90 mm×90 mm이며, 분해선폭은 30% MTF 값 기준으로 0.033 mm인 특성을 보여준다. 이는 캐논 CX2-70 모델보다 큰 화면으로 판독을 할 수 있고, 판독의 분해능도 우수함을 의미한다. 또한 이미지 측 NA값이 -0.196으로 캐논 CX2-70 모델 -0.139보다 약  $\sqrt{2}$  배 크게 하였고, 물체 측 NA값도 0.044로 캐논 CX2-70 모델 0.022보다 약 2배 크게 하였다. 이는 필름의 감도를 4배 증가 시킬 수 있는 것을 의미하며 X선의 피폭시간을 1/4로 줄일 수 있음을 뜻한다. **결론:** 이미지 크기가 90 mm×90 mm이고, 15 lines/mm에서 MTF 30% 이상인 특성을 가지며, 캐논 CX2-70 모델에 비해 X선 피폭시간을 1/4로 줄일 수 있는 새로운 X선용 545 nm 형광판 결상광학계를 설계 제작하였다.

**주제어:** 545 nm, X선, 결상광학계, NA, 분해능

### 서 론

1895년 독일의 뢰트겐에 의해서 X선이 발견되었고, 1896년 미국의 토마스 에디슨은 X선을 흡수한 형광체가 발광하는 것을 발견하여 형광증감지가 실용화되는 계기를 만들었고, 1897년에는 청색의 425 nm를 발광극대파장으로 하는  $\text{CaWO}_4$ 를 사용한 형광증감지가 실용화되어 지금까지 사용되어 왔다. 그 이후 X선 사진 촬영법은 형광증감지를 사용하는 직접촬영법과 형광판을 사용하는 간접촬영법으로 발전하여 왔고, 요즘은 간접촬영법이 더욱 발전하여 X선 촬영용 카메라는 거의 디지털화 되고 있는 실정이다<sup>2,3</sup>.

그렇지만 디지털화된 장비의 가격이 고가이기 때문에 후진국 또는 제3세계에서는 디지털 카메라를 운용하기에는 너무 부담이 된다. 따라서 이에 제3세계로의 수출용 아날로그 카메라가 필요하다고 판단한 업체도 있는 실정이다. 이번에 새로 개발하려는 아날로그 카메라는 기존의 필름의 크기가 70 mm×70 mm인 것에 비해 보다 많은 정보를 포함하기 위해 90 mm×90 mm가 되도록 하였다. 이미 일본 캐논사는 90 mm×90 mm 크기의 용도로 CXM2-100, CXM2-100A 모델로 catadioptric 형태의 장비를 개발

하였으나 워낙 고가로서 제3세계에 진입하기 어려운 실정이다. 본 논문에서는 이러한 틈새 시장에 진입하고자 렌즈 방식의 90 mm×90 mm급 X선용 카메라 개발을 하고자 하는 것이다.

### 캐논 모델의 분석과 개선 방향

대표적으로 간접촬영방식에서 세계 아날로그 X선 카메라 시장을 거의 독점하였던 모델이 캐논사 CX2-70 모델<sup>4</sup>이다. 이것의 스펙과 외관은 Table 1과 Fig. 1에 나와 있다. 실제 이 모델을 이번 개발의 샘플로 삼기에는 입수할 수 있는 자료가 너무나 빈약하여 샘플 구매를 하여 분석하였다.

Table 1. General specifications of Canon CX2-70<sup>4</sup>

Fluorescent screen size	400 mm×400 mm (Max)
Picture size	64 mm×64 mm
Film used	70 mm size roll film
Dimensions	288 mm×266 mm×204 mm
Weight	Approx. 6.7 kg

교신저자 연락처: 이동희, 461-250 경기도 성남시 수정구 양지동 212 울지대학교 보건과학대학 안경광학과  
TEL: 011-9785-4132, E-mail: dhlee@eulji.ac.kr

\*본 연구는 2007년도 경기도 중기청 산학연 컨소시엄 개발 사업 연구비 지원으로 수행되었음.

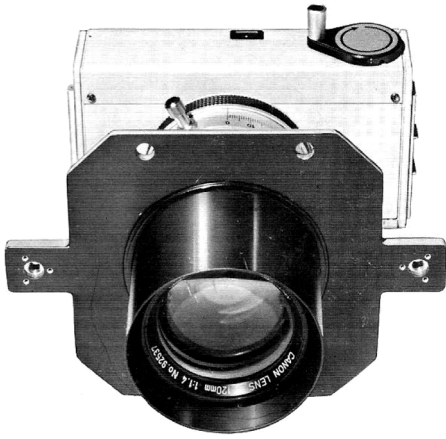


Fig. 1. Configuration of Canon CX2-70.

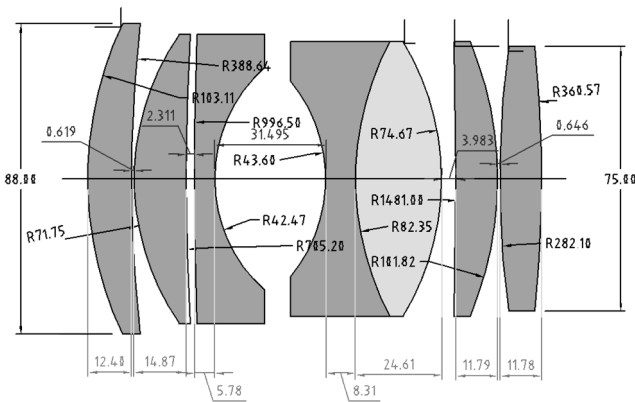


Fig. 2. Drawing of the investigated lens data of Canon CX2-70.

렌즈의 곡률반경은 자이코(Zygo) 간섭계로 자체 분석하였고, 렌즈의 굴절률은 시편을 잘라서 (주)신광(055-256-2841)에 의뢰하여 측정하였다. Fig. 2에는 분석된 렌즈의 치수가 나와 있다. 렌즈의 형태는 최대 유효 직경 86 mm 이고 더블가우스 타입의 변형<sup>5</sup>으로 파악되며 분석 및 평가용 Sigma 2000 S/W 렌즈 설계 프로그램<sup>6</sup> 입력 데이터는 Table 2에 나와 있다.

이 광학계의 수차 특성은 Fig. 3~6에 나타나 있다. 7면을 stop으로 하고 크기를 25.1 mm로 했을 때 노출 시간과 관계되는 물체측 NA는 0.022, 이미지 측 NA는 -0.139로 되었고, 물체거리는 763.0 mm, defocusing을 고려한 이미지 거리는 108.9 mm, 광학계 두께(1번 렌즈에서 7번 렌즈까지의 거리)는 128.6 mm으로 TCL은 1000.5 mm인 것으로 분석된다.

실제 필름의 크기는 70 mm×70 mm 이지만 Table 1에 서와 같이 결상 유효 크기는 64 mm×64 mm임을 알 수 있기 때문에 배율은 -0.160이 되도록 역 추적하여 Table 2의 분석 자료를 완성하였다.

Fig. 3과 Fig. 5에서 보면 자오적 비점수차가 어느정도

Table 2. Input lens data of CX2-70 on Sigma 2000

EFL = 121.978 OBJECT DISTANCE = 763,  
WAVELENGTHS [nm] 545.00 550.00 540.00

# SURF	RAD	THICK	INDEX1	CLR RAD	GLASS
1 S	103.110	0.000	1.000000	43.000	
2 S	388.640	12.400	1.661604	43.000	H-BACED5
3 S	71.750	0.619	1.000000	40.000	
4 S	705.200	14.870	1.673500	40.000	H-BAF10
5 S	996.500	2.311	1.000000	39.000	
6 S	42.470	5.780	1.570559	39.000	H-FL6
7 S	Plane	20.000	1.000000	12.555	
8 S	-43.600	11.495	1.000000	38.000	
9 S	82.350	8.310	1.704604	39.000	H-FD15
10 S	-74.665	24.610	1.696692	38.500	H-LAC13
11 S	-1481.000	3.983	1.000000	37.500	
12 S	-101.820	11.790	1.673500	37.500	H-BAF10
13 S	282.100	0.646	1.000000	36.250	
14 S	-360.570	11.780	1.673500	36.250	H-BAF10
15 S	Plane	108.895	1.000000	68.457	

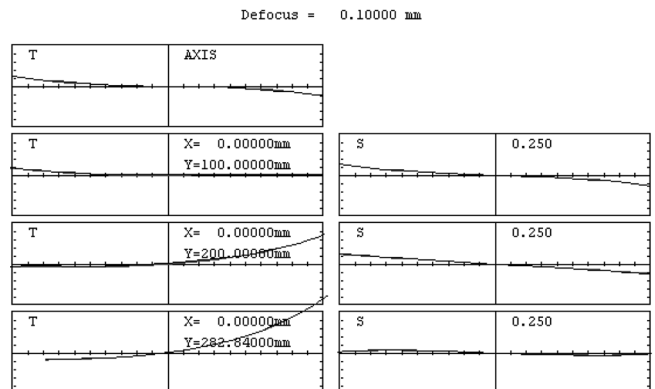


Fig. 3. Diagram of finite ray aberrations of Canon CX2-70.

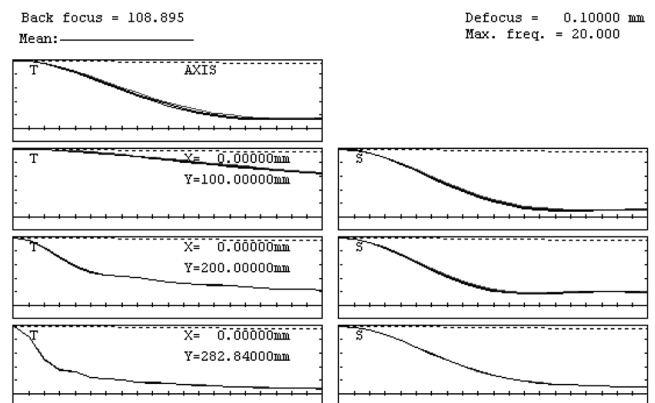


Fig. 4. MTF characteristics of Canon CX2-70.

존재하는 것을 알 수 있다. Fig. 5에서와 같이 왜곡수차도 최대 2.8% 존재하는데 이 양은 사진 관독에 영향을 주지

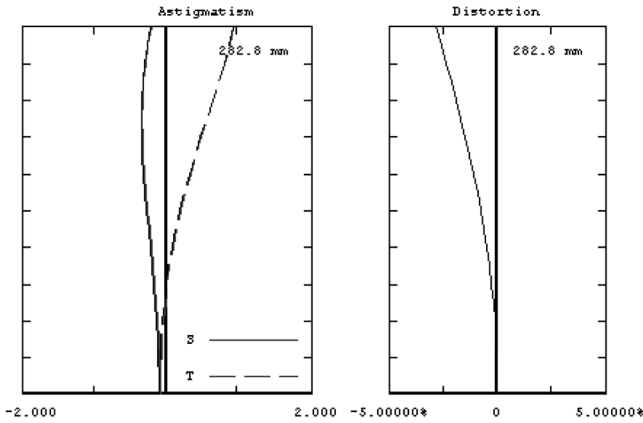


Fig. 5. Astigmatism and distortion of Canon CX2-70.

않기 때문에 X선 결상계에서는 허용되는 수치이다.

Fig. 4에서의 MTF<sup>7)</sup>는 30% 기준치에서 9 lines/mm 정도로 0.056 mm의 선폭을 가지는 것으로 판단된다. 이번 고려에서 half full field 282.8 mm( $400 \times \sqrt{2} / 2$ )에서의 값은 고려하지 않는다. 왜냐하면 X선 사진 필름의 대각선 방향의 영상은 모서리 부분을 등글게 처리하는 필름 마스크에 의해 잘리기 때문에(판독에 필요한 정보를 가지는 부분이 아니기 때문에) 일반적으로 무시하게 된다. 이러한 영향을 Fig. 3에서도 확인 할 수 있는데, 즉 half full field 282.8 mm에서 vignetting이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이는 half full field 에서의 정보는 결상에 필요한 기록이 아니기 때문에 무시할 수 있다는 것이 고려된 것으로 파악 된다.

Fig. 6은 캐논 CX2-70의 spot 다이어그램으로 defocusing 0.1 mm에서 spot이 잘 형성되어 있음을 보여 주고 있다. 물론 여기서도 half full field 282.8 mm에서의 spot는 다른 필드에서의 spot보다 크지만 앞에서 고려된 것과 같이 무시될 수 있는 것이다.

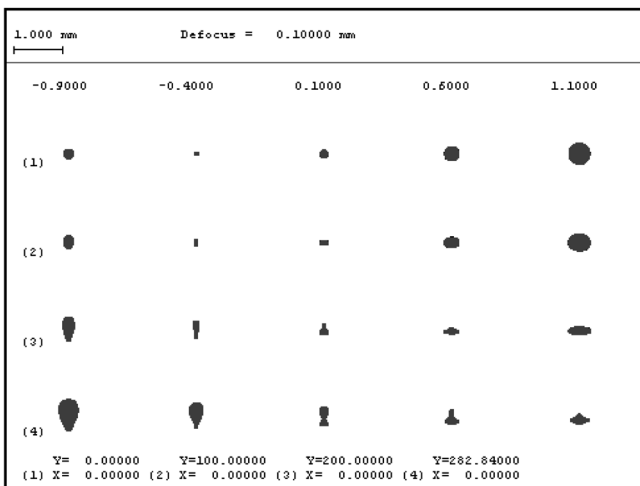


Fig. 6. Spot diagrams of Canon CX2-70.

이상의 분석에서 확보할 수 있는 우리의 새로운 설계에서의 개선 방향은 다음과 같다. 판독의 분해능을 CX2-70 모델 이상으로 유지하면서 결상 유효 크기를 90 mm×90 mm으로 하여 실제 화면의 크기를 2배 늘려서 큰 화면으로 판독하도록 하며, 화면이 커짐으로서 유발되는 필름 면에서의 상대적인 노출 빔의 강도를 유지해 주기 위해 노출시간과 관계있는 이미지측 NA값을 최대한 늘려서 피검사자의 X선의 피폭량이 증가되지 않도록 하며 물체 측의 NA값을 CX2-70 모델보다 2배 이상이 되게 하여 피검사자에 대한 X선 피폭량을 줄일 수 있도록 함을 새로운 렌즈의 개발 방향으로 하고자 한다.

### 새로운 X선용 545 nm 형광판 결상광학계 설계

현재 개발하려고 하는 장치의 형광판의 형광체는 산화화가돌리늄-테르븀( $Gd_2O_3:S:Tb$ )으로 발광 스펙트럼이 Fig. 7에 나와 있다. 간접 촬영용 형광판은 400 mm×400 mm 크기로 구성되는데 방출하는 가시광선은 545±5 nm에서 거의 90% 이상을 점유하고 있다<sup>8)</sup>. 따라서 여기에서 관찰된 설계에 필요한 파장은 545±5 nm임을 확인할 수 있다.

초기 설계를 위한 렌즈의 형태는 캐논과 같이 더블가우스 형태로 하되 stop 면에 +굴절력의 렌즈를 넣어 렌즈 후반부 광로의 범위가 커지는 것을 억제하여 상기 캐논 모델에서의 단점인 vignetting의 발생을 줄이고자 하였다. 렌즈 전반부 +렌즈의 굴절력이 너무 증가하여 곡률반경이 급해지는 것을 막기 위해 2장으로 분리하여 총 6개의 렌즈로 초기화하여 Sigma 2000 프로그램으로 최적화<sup>9)</sup> 하였다. 최적화된 결과의 렌즈 설계 데이터는 Table 3에 나타나 있다. 이 최적화 설계 에서의 물체 측 NA는 0.044이고, 이미지 측 NA는 -0.196임을 알 수 있다. 렌즈 최대 유효구경은 약 134 mm로 캐논 모델의 156%가 된다. 물체 거리는 860.0 mm, 이미지 거리는 58.3 mm, 광학계 두께(1번 렌즈에서 6번 렌즈까지의 거리)는 180.9 mm으로 TCL은 1099.2 mm인 것을 파악된다. 배율은 -0.225배로 나타났다.

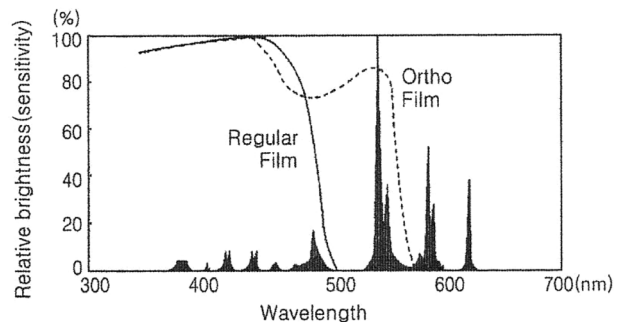


Fig. 7. Spectrum of  $Gd_2O_3:S:Tb$  (quoted from reference 8).

Table 3. Lens data of the new design on Sigma 2000

EFL = 153.771 OBJECT DISTANCE = 860,  
 WAVELENGTHS [nm] 545.00 550.00 540.00

# SURF	RADIUS	THICK	INDEX1	CLR RAD	GLASS
1 S	150.159	0.000	1.000000	67.132	
2 S	Plane	24.000	1.610009	64.376	H-BACD2
3 S	79.778	0.500	1.000000	52.321	
4 S	143.845	25.000	1.622933	43.775	H-BACD16
5 S	-244.872	12.000	1.000000	42.190	
6 S	70.740	4.260	1.723276	36.084	H-FD1
7 S	Plane	27.000	1.000000	33.033	
8 S	82.782	0.000	1.000000	32.408	
9 S	-167.291	16.000	1.622933	31.018	H-BACD16
10 S	205.854	33.104	1.000000	34.599	
11 S	Plane	15.000	1.610009	34.676	H-BACD2
12 S	-48.045	19.000	1.000000	34.719	
13 S	-109.044	5.000	1.677795	39.499	H-FD5
14 S	Plane	58.287	1.000000	64.690	

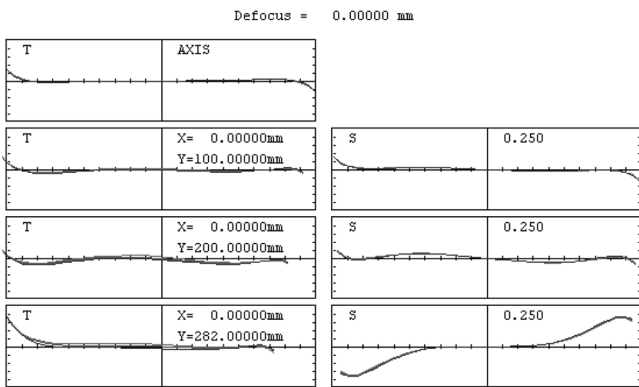


Fig. 8. Diagram of finite ray aberrations of the new design of Table 3.

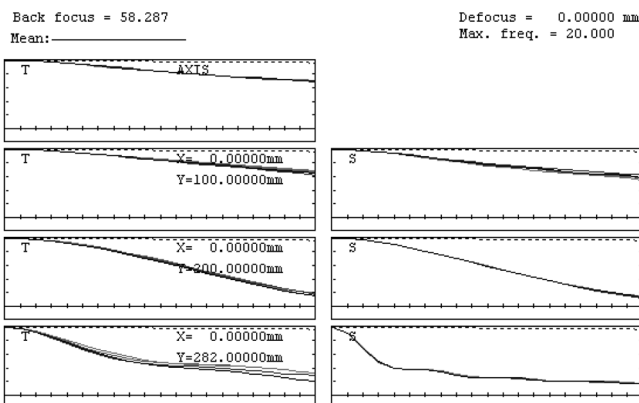


Fig. 9. MTF characteristics of the new design of Table 3.

Fig. 8에는 유한광선 수차도를 보여주고 있는데 Fig. 3의 캐논 모델에 비해서 비점수차가 잘 제거되어 있음을 보여주고 있다.

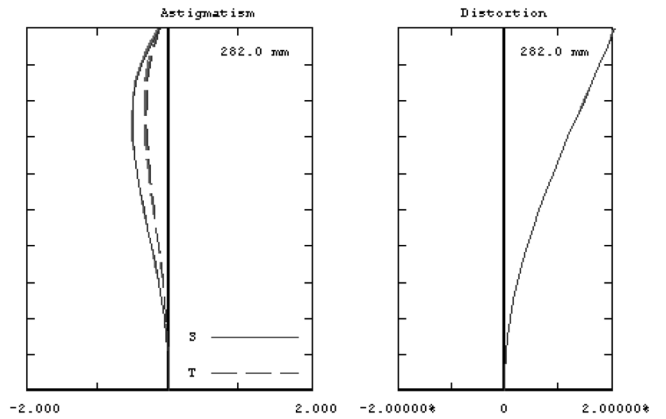


Fig. 10. Astigmatism and distortion of the new design of Table 3.

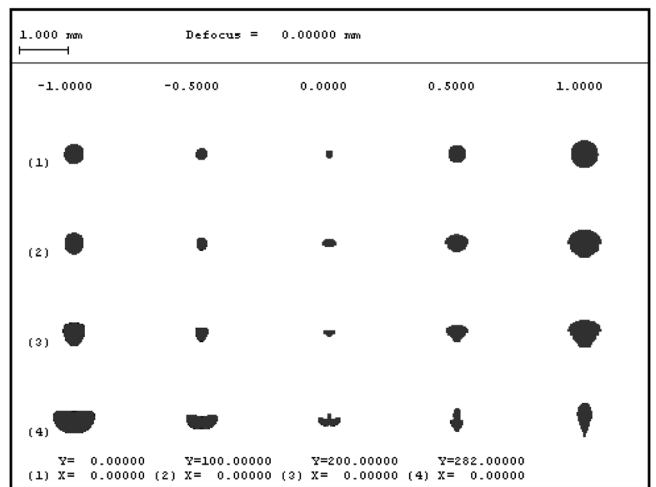


Fig. 11. Spot diagrams of the new design of Table 3.

Fig. 9는 MTF를 보여주고 있는데 half full field 를 제외한 상태에서 30% 기준선에 대해 15 lines/mm의 분해능을 보여주기 때문에 0.033 mm 정도의 선폭을 가지는 것으로 파악된다. Fig. 10에서 보면 비점수차가 잘 제거되어 있고 왜곡수차도 2% 범위로 제한되어져 있음을 확인할 수 있다. Fig. 11은 spot을 보여 주고 있는데 defocusing없이 수차가 잘 제어되어져 있음을 확인할 수 있다.

### X선용 545 nm 형광판 결상광학계 평가 및 제작

새로 설계되어진 X선용 545 nm 형광판 결상광학계의 배율이 -0.225배로 이미지 크기가 90 mm×90 mm로 나타나고, 선폭도 0.033 mm으로 캐논 CX2-70 모델 0.056 mm 보다 우수하기 때문에, 큰 화면으로 판독이 가능하도록 하게 되었으며 판독의 분해능도 우수하게 된 것으로 판단된다. 일반적으로 화면이 커짐으로서 유발되는 필름 면에서의 감광 감도의 저하를 막기 위해 상대적인 X선 노출시간을 증가시키게 되어 피검사자의 X선의 피폭량이 증가하

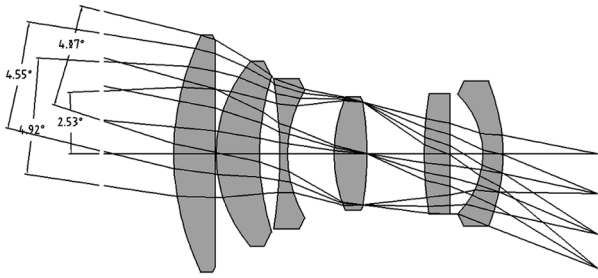


Fig. 12. Ray tracing draw showed the vignetting-free in the new design of Table 3.

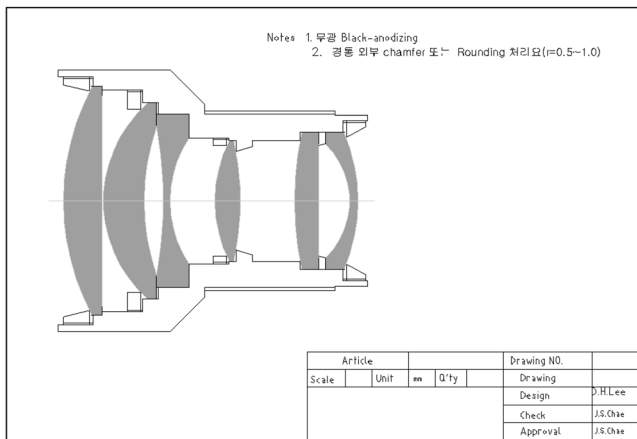


Fig. 13. Drawing of the barrel structure of the new design of Table 3.

게 되는데 이는 피검사자에 대한 유해한 요소로 작용하게 된다. 이번 설계에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 이미지 측 NA값을  $-0.196$ 이 되도록 하여 캐논 CX2-70 모델  $-0.139$ 보다 약  $\sqrt{2}$  배 크게 하였다. 즉 결상 화면이  $65\text{ mm} \times 65\text{ mm}$ 에서  $90\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 으로 2배 정도 크기 때문에 이미지 측 NA를  $\sqrt{2}$  배 크게 하여 필름 감도 저하를 막고자 한 것이다. 또한 새로운 설계에서의 물체거리의 증가( $763.0\text{ mm}$ 에서  $860\text{ mm}$ 로)에도 불구하고 유효 렌즈의

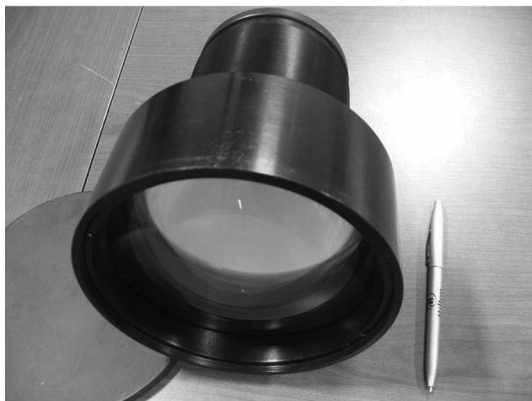


Fig. 14. Configuration of the 545 nm imaging optical system manufactured by the new design of Table 3.

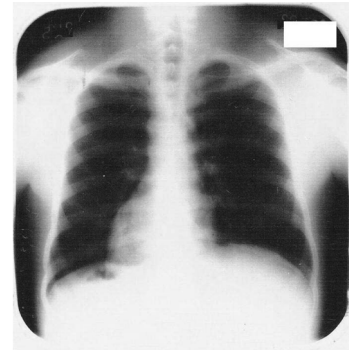


Fig. 15. One example of image photographed by the 545 nm imaging optical system of Fig. 14.

직경을 크게 함으로서 물체 측 NA값이  $0.044$ 로 캐논 CX2-70 모델  $0.022$ 보다 약 2배 크게 할 수 있었다. 이는 필름의 감도를 4배 증가 시킬 수 있는 것을 의미하며 X선의 피폭시간을  $1/4$ 로 줄일 수 있음을 뜻하기 때문에 매우 바람직한 설계의 방향으로 파악된다. Fig. 12는 새로운 설계에서의 vignetting 정도를 확인할 수 있는 광선 추적도로 경통에 의한 광선 경로의 막힘은 존재하지 않는 것을 보여 주고 있다. Fig. 13은 실제 경통 제작도를 보여 주고 있으며 Fig. 14는 실제 제작된 광학계의 형상을 보여 주고 있다. 이러한 광학계로 실제 촬영된 영상이 Fig. 15에 주어져 있는데 비교적 잘 결상된 것으로 평가된다.

### 결 론

본 연구에서 우리는 캐논 CX2-70 모델을 분석하여 새로운 X선용 545 nm 형광판 결상광학계를 설계 개발하였다.

새로 설계 제작되어진 X선용 545 nm 형광판 결상광학계의 배율은  $-0.225$ 배 이고, 이미지 크기는  $90\text{ mm} \times 90\text{ mm}$ 이며, 분해선평은 30% MTF 값 기준으로  $0.033\text{ mm}$  정도로 분석된다. 이는 캐논 CX2-70 모델보다 큰 화면으로 판독을 할 수 있음을 의미하며 판독의 분해능도 우수함을 의미한다. 또한 이미지 측 NA값이  $-0.196$ 으로 캐논 CX2-70 모델  $-0.139$ 보다 약  $\sqrt{2}$  배 크게 되었고, 물체 측 NA값도  $0.044$ 로 캐논 CX2-70 모델  $0.022$ 보다 약 2배 크게 되었다. 이는 필름의 감도를 4배 증가 시킬 수 있는 것을 의미하며 X선의 피폭시간을  $1/4$ 로 줄일 수 있음을 뜻하기 때문에 매우 바람직한 설계의 방향으로 파악된다.

### 참고문헌

1. 이인자, “CaWO<sub>4</sub>와 Gd<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S:Tb 증감지의 형광체 형태와 사진감도 특성에 관한 연구”, 교육논총, 동국대학교교육대학원,

- 13:335-350(1993).
2. 대한민국방사선영상정보기술연구회, “의료방사선 영상정보기술학원론”, 고문사, 서울, pp. 2-5(2002).
  3. 강세식, 권달관 외, “방사선 감광학”, 청구문화사, 서울, pp. 71-76(2005).
  4. Canon, “canon medical equipment”, catalog, PUB.B-CE-4006A, 0181D3, CANON INC., JAPAN, p. 7.
  5. Warren J. Smith, “Modern Lens Design”, McGraw-HILL, New York, pp. 303-353(1992).
  6. User Manual, “SIGMA 2000”, KIDGER OPTICS LTD, UK, pp. Ch. 5(1995).
  7. Freeman, M. H. and Hull, C. C., “Optics”, 7th Ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, pp. 500-505(2003).
  8. 강세식, 권달관 외, “방사선 감광학”, 청구문화사, 서울, pp. 179-201(2005).
  9. User Manual, “SIGMA 2000”, KIDGER OPTICS LTD, UK, pp. Ch. 9(1995).

## Development of the Imaging Optical System for the 545 nm Fluorescent Plate of X-ray

Dong-Hee Lee

Department of Optometry, College of Health Sciences, Eulji University  
(Received April 5, 2008: Revised June 3, 2008: Accepted June 10, 2008)

**Purpose:** To develop an imaging optical system for the 545 nm fluorescent plate of X-ray. **Methods:** We designed and manufactured a new imaging optical system for the 545 nm fluorescent plate of X-ray by Sigma 2000 program after deciding the design comparison standards referred to Canon CX2-70 model. **Results:** The characteristics of the new imaging optical system for the 545 nm fluorescent plate of X-ray have the magnification of  $-0.225x$ , the image field size of 90 mm×90 mm, and the 0.033 mm resolution line width at the 30% MTF value criterion. These mean that the new model has a capability of deciphering for the more large screen and the resolution of deciphering is superior to that of Canon CX2-70 model. Also the image side NA ( $-0.196$ ) of the new model is about  $\sqrt{2}$  times than that ( $-0.139$ ) of CX2-70 and the object side NA (0.044) of the new model is about 2 times than that (0.022) of CX2-70. These mean that the sensitivity of the film in the new design model is able to be increased to about 4 times and there is the possibility of reducing the bombed time of X-ray to 1/4 times. **Conclusions:** We could design and manufacture the imaging optical system for the 545 nm fluorescent plate of X-ray having the possibility of reducing the bombed time of X-ray to 1/4 times in comparison to Canon CX2-70 model, the characteristics of which have the image field size of 90 mm×90 mm and the MTF of 30% or more at 15 lines/mm criterion.

**Key words:** 545 nm, X-ray, imaging optical system, NA, resolution