

## 고화질 프로젝션 디지털 TV용 광학렌즈 설계

박성찬

단국대학교 물리학과

문희중

(주) LG전자 디스플레이연구소

(1998년 7월 29일 받음, 1998년 9월 23일 수정본 받음)

고화질 프로젝션 TV에서 광학부품들이 가격 및 성능면에서 경쟁력을 갖춘 최적의 시스템을 설정하고, 그로부터 현재 방송규격인 NTSC 및 향후에 시행될 디지털 TV에 공용적용할 투사렌즈를 설계 개발 하였다. 플라스틱 렌즈 2매와 구면 glass 렌즈 1매로 구성된 투사렌즈계에 대해, 3차 수차가 모두 보정된 초기설계치로 부터, 플라스틱 렌즈의 비구면화, 공차를 고려한 최적화 설계, 그리고 온도보상등의 과정을 통해 설계 하였다. 최종적으로 개발된 렌즈의 구현가능한 화면크기는 40~50인치, 해상도는 800 TV-line 이상 이다.

### I. 서 론

최근에 멀티미디어의 눈부신 발전과 더불어 디스플레이 화면의 대형화와 고화질화가 급속도로 진전되고 있다. 이런 경향을 더욱 가속화시키는 것은 일본 및 미국이 고화질, 대화면 개념인 디지털 TV(DTV) 방송규격을 확정함과 더불어, 대형 직시관의 양산화, PDP 개발, 투사형 TV(projection TV)의 고화질, 저가격화의 효과가 크다. 특히 투사형 TV는 수년간에 걸쳐 투사렌즈, 스크린, 투사관(CRT) 등 기본 핵심부품의 성능이 대폭 개선되어, 직시형 TV에 필적되는 화질이 실현되었다. 이미 알려진 바와 같이 대화면 디스플레이 장치로서 여러 가지 종류가 있지만, 디지털 TV시대를 앞두고 있는 미래의 투사형 장치로서 가장 각광 받을 만한 것은 CRT 및 LCD를 이용한 투사방식이 될 것이라는 예측이 매우 강하다.<sup>[1,2]</sup>

본 연구는 투사형 TV 중에서도 CRT를 이용한 배면투사(rear projection)용 투사렌즈의 설계 및 기타 광학 부품과 최적 시스템 구현을 위한 방법을 설정하여 시장에서 요구되는 경쟁력이 있는 프로젝션 TV용 광학계를 갖추는 것이 그 목적이다. 제 2장에서는 CRT 배면투사 방식의 광학계에 대해 중요하고도 기본이 되는 원리 및 사양 설정에 관해 논하겠으며, 제 3장에서는 투사렌즈의 설계과정에 대해, 제 4장에서는 렌즈의 제작 및 평가, 그리고 제 5장에서는 결론에 대해 서술하겠다.

본 연구의 결과로서는 고화질 프로젝션 TV에서 광학부품들이 가격 및 성능면에서 경쟁력을 갖춘 최적의 시스템 설정 방법과 그로부터 현재 방송규격인 NTSC 및 향후에 시행될 디지털 TV에 공용 적용할 3매 구성의 투사렌즈를 세계 최초로 설계 개발한 것이다. 3차 수차가 모두 보정된 초기설계치, 플라스틱 렌즈의 비구면화, 공차 및 제작성을 고려한 최적화 설계, 그리고 온도보상등의 과정을 통해 설계된 투사렌즈의 구현가능한 화면크기는 40~50인치, 해상도는 800 TV-line 이

상을 실현 할 수 있을 것으로 기대된다.

### II. 프로젝션 TV의 광학 부품

투사광학계는 투사렌즈, 스크린, 반사거울, CRT, CRT와 렌즈를 결합하는 coupler 등으로 구성되어 있다. 그림 1은 배면 투사형 TV의 구성도 이다. 그림 2는 투사광학계의 영상결합 및 red(R), green(G), blue(B) CRT의 배치도이고 R, G, B CRT의 중심파장은 각각 612 nm, 544 nm, 448 nm이다. 그림에서 알 수 있듯이, TV set의 컴팩트화에는 렌즈의 투사거리(Total Conjugate Length, TCL), CRT의 길이 등이 큰 영향을 주기 때문에 이들을 짧게 하는 것이 필요하다. 한편, 단순히 이것들의 치수만을 줄이는 것은 화질의 저하로 이어진다. 다시 말해서, 투사거리를 단축한다면, R, G, B. CRT-lens assembly의 광축간의 집중각(convergence angle)이 커지게 되어, 1) raster 왜곡의 증가, 2) 렌즈 화각의 증가에 의한 포커스 특성 저하, 3) color shift 발생등의 문제가 생긴다.<sup>[3-5]</sup> 컴팩트화 및 고화질화 라는 서로 상반되는 문제를 해결하기 위해서는 많은 기술개발이 필요하다.

#### 2.1. CRT-Lens Assembly

그림 2와 그림 3에서 CRT에 맺힌 영상을 투사렌즈를 통해 확대시켜 스크린에 결상 시키는 것이 CRT-lens assembly이다. CRT는 투사렌즈와 마찬가지로 화질과 밝기를 결정하는 중요한 부품이다. TV를 시청하는 동안 CRT의 표면온도는 100°C 이상까지 상승되기 때문에 유리 bulb가 터질 우려가 있다. 따라서 강력한 냉각이 필요하다. 현재는 그림 3에 보인 액냉각방식을 이용하여 종전에 사용된 air coupling 방식의 문제점들을 해결하고 있다.<sup>[6]</sup> 액냉각방식에 널리 사용되는 냉매는 에틸렌글리콜과 글리세린 등을 적절히 혼합하여 사용하며, 20°C, 1기압에서 굴절률은 대략 1.44 정도이다. 이 값은

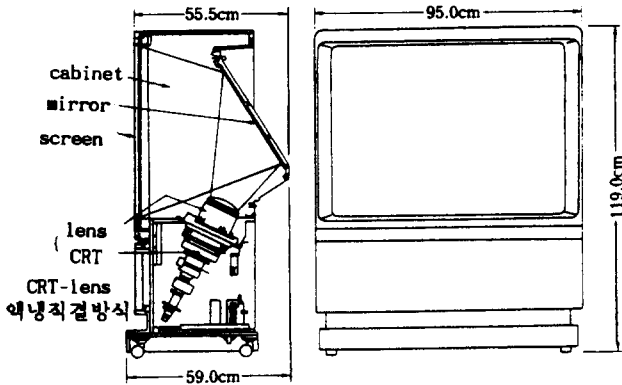


그림 1. 배면투사형 TV의 구성도.

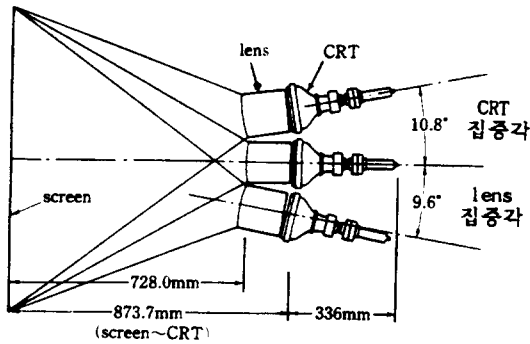


그림 2. CRT 및 광학계의 배열.

CRT 유리벌브의 굴절률 1.55, 플라스틱 렌즈의 굴절률 1.49와 비슷한 굴절률을 가지므로, 이들면 사이에서 발생하는 반사광 손실을 종전의 4%에서 1% 이내로 줄이는 것이 가능하다.

투사렌즈계는 렌즈설계 및 비구면 제조기술의 발전에 따라 보다 밝고, 선명한 화질을 비교적 쉽게 구현할 수 있으며, 그림 3과 같은 굴절방식이 일반적으로 사용되고 있다. 최근에는 플라스틱 렌즈 성형기술이 발달됨에 따라 구면 glass 및 플라

스틱 비구면 렌즈를 조합한 hybrid형 렌즈 구성이 널리 사용되고 있다.<sup>[7-11]</sup> 플라스틱 렌즈의 장점은 비구면과 같은 복잡한 형상을 용이하게 실현 가능하고, 제조가격이 싸다는 것이다. 단점으로는 환경(온도, 습도)에 대한 성능의 변화 폭이 매우 크다는 것이다.

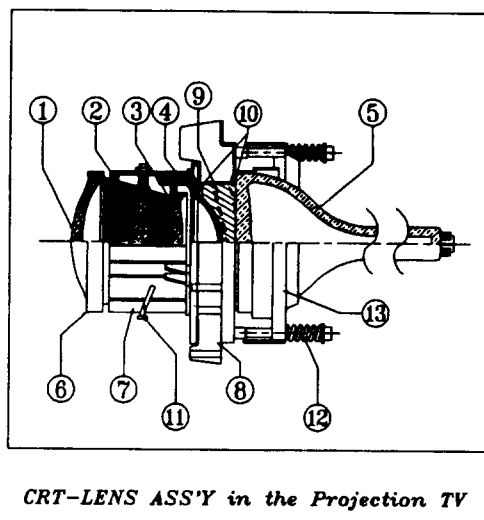
현재 상업화된 렌즈는 4~5매로 구성된 hybrid 형태가 주류를 이루고 있다. 렌즈의 F/수는 1.1 정도가 일반적으로 쓰이고 있다. 적은 렌즈 매수와 고해상도, 투사거리 단축등의 모순되는 과제를 동시에 해결하기 위해서 투사관의 형광면(phosphor)을 구면 또는 비구면화 하는 기술로 새로운 투사관의 개발이 실용화 되고 있다. 형광면 및 렌즈면을 비구면화 하는 것으로 투사거리를 단축시킬 때 발생하는 고차 수차를 줄일 수 있다. 또한 형광면에 커다란 곡률을 주는 것으로 상면만곡 수차의 보정과 더불어 주변 광량을 렌즈 중심에 모으는 것이 가능하므로 주변광량비를 약 30% 이상 높일 수 있는 장점을 갖고 있다.<sup>[4,11]</sup>

투사렌즈에서 요구되는 해상력과 MTF는 CRT상의 유효 주사선수에 의해 결정된다. NTSC 방식은 약 450 TV-lines 이고, 디지털 TV의 경우는 800 TV-lines 이상인 정도이다.<sup>[4,11]</sup> TV-lines를 광학계의 해상력 기준인 공간주파수(단위: lp/mm)로 환산하면, 대각 raster size를 5.0"로 사용하는 경우 요구되는 렌즈의 해상력은 각각 3.0 lp/mm, 5 lp/mm이다. 해상력과 MTF의 관계에 대해서는 CRT 형광면상에서 최대 주사선에 해당되는 공간주파수에 대해 설계된 렌즈의 MTF가 0.8 field 이내에서 30% 이상이면 적절하다. 설계 및 개발 단계에서 결상성능 평가에는 수차특성 평가, MTF는 물론 투영해상력 등의 평가 항목에 의해서 다각적으로 검토해야 한다.

2.2. 색순도 향상

그림 4는 본 연구에서 사용될 7" green CRT의 분광스펙트럼 특성이다. 인간의 눈에 대해 시감도가 가장 큰 녹색에 해당되는 중심파장 544 nm 이외에도 빨간색 및 파란색에 해당되는 파장이 방출되고 있으므로, 렌즈의 결상능력과 TV의 색

NO.	N A M E	N O T E
①	1st Lens	① ③ ④ ; Plastic Lens
②	2nd Lens	
③	3rd Lens	
④	C-Lens	② ; Power Glass Lens
⑤	C R T	Hitachi 180CSB22④
⑥	Inner Barrel	-
⑦	Outer Barrel	-
⑧	Coupler	350 ± 20 ml
⑨	Coolant	Ethylene Glycol + Glycerin
⑩	Packing	Silicon Rubber
⑪	Variator	7.0 X ~ 9.0 X
⑫	Spring	-
⑬	Back Cover	Holding CRT



CRT-LENS ASS'Y in the Projection TV

그림 3. CRT-Lens Assembly의 구성도.

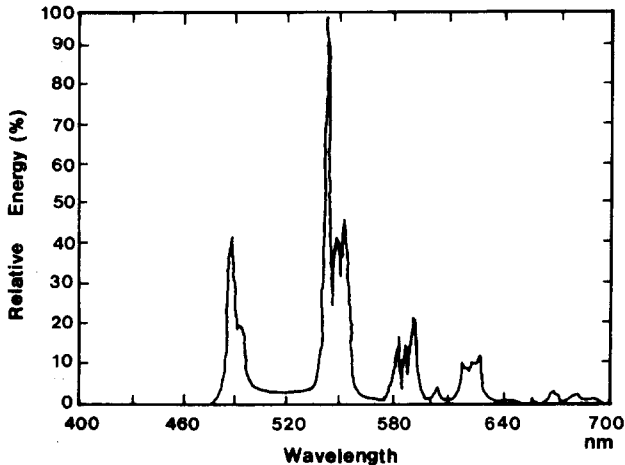


그림 4. Green CRT의 분광스펙트럼(Hitachi 180CSB22®).

순도가 저하된다. 착색렌즈를 녹색 CRT 렌즈 어셈블리에 채용하므로써, 이 문제를 부분적으로 해결할 수 있다. 그림 5는 착색렌즈만의 분광투과율 특성을 보이고 있는데, 녹색 CRT의 중심파장에서는 투과율이 높고, 이외의 파장대에서는 투과율이 낮기 때문에, 결국 색순도를 높일 수 있지만, 착색에 의한 빛의 흡수 등으로 전체 시스템의 광투과율은 약 5~8% 정도 떨어진다.<sup>[4,11,12]</sup>

2.3. 스크린

프로젝션 TV의 화질을 결정하는 요인중의 하나로 스크린을 들 수 있다. 스크린은 반사형과 투과형 스크린이 있는데, 프로젝션 TV에는 투과형 스크린을 사용한다.<sup>[11,13]</sup> 프로젝션 TV의 화질은 현재 많은 부분에서 개선되고 있지만, 최종 화질을 좌우하는 스크린의 개선이 과제로 남아 있다.

스크린에 투사된 투사광은 R, G, B CRT에서 나온 색분해된 상이다. 스크린에서는 이 광들을 합성시켜 영상을 재생하며, CRT에서 나온 광속을 특정한 부분에 고르게 분포시켜 유효한 화상휘도를 얻기 위해 일정한 광특성 기능이 필요하다. 현재 사용되고 있는 투과형 스크린에는 α값을 기준으로 하여 수평 시야각 ±35°~±45°, 수직 시야각 ±5.5°~±12.5°이고, gain은 4~6 정도이다.<sup>[11]</sup>

투과형 스크린의 재질은 대부분 PMMA이며, 프레넬 렌즈

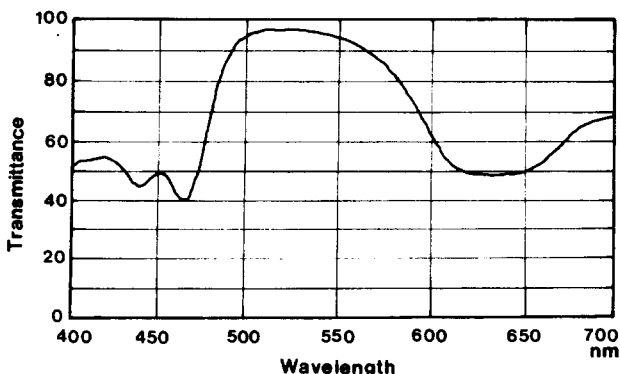


그림 5. Green-Lens Assembly에 적용된 착색렌즈의 분광투과도.

와 렌티큘러(lenticular) 렌즈로 구성되어 있다. 여기서 프레넬 렌즈는 투사광을 관찰자측에 집광시켜 적절한 시야 범위를 조절한다. 위치는 투사렌즈 방향이다. 그리고 렌티큘러 렌즈는 스크린의 gain을 높게 유지하면서, 수평방향의 시야각은 크고, 수직방향의 시야각은 작게 하여, 시청자가 밝은 화상을 볼 수 있게 해 주는 역할을 한다. 최근에는 상의 contrast를 향상시키기 위해 렌티큘러 렌즈에 black stripe를 처리함으로써 외부에서 입사되는 불필요한 광을 제거시키는 기술도 적용되고 있다.

2.4. 투사광학계

프로젝션 시스템 설계에서 가장 중요하며, 절실하게 요구 받는 것은 바로 TV set의 크기다. 고화질을 유지하면서 총투사거리(TCL)를 짧게 해서 TV set의 두께를 슬림화 해야 제품으로서의 품위 및 경쟁력을 갖출 수 있기 때문이다. TCL은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$TCL = \frac{(1+M)^2}{M} f + N.S. \tag{1}$$

단,  $M = \frac{h_{SCREEN}}{h_{PHOSPHER}}$ ; 배율,  $f$ ; 초점거리.

N.S.; Nodal Separation.

식 (1)에서 볼 수 있듯이 주어진 배율에서 렌즈의 초점거리를 짧게 해야 투사거리(TCL)는 작게 되며, 초점거리가 일정할 때 배율 M이 작아져야 set가 컴팩트 해진다. 주어진 스크린 크기에서 배율을 작게 하기 위해서는 raster의 유효 면적을 크게 해야한다. 그러나 위 경우 모두 투사거리가 짧아짐에 따라 화각(θ)이 커져 결국 cos<sup>4</sup>θ 효과에 의한 주변광량비 감소는 피할 수 없게 된다.

시스템의 contrast에 영향을 미치는 근본적인 요인으로서 veiling glare가 있다. 이것은 광학계에서 산란된 비결상 광원으로서 스크린에 입사되는 불필요한 광이다. veiling glare의 원인으로서는 광학유리의 inhomogeneity, 경통에 의한 반사, 코팅의 불균일, 렌즈면의 긁힘 등에 의해서 주로 발생하므로 광학계 설계시부터 주의해야 한다.<sup>[4,11,14]</sup>

III. 프로젝션 렌즈계 설계

3.1. 초기 설계

렌즈의 사양 및 구성도가 정해지면 렌즈계의 1차적 성질과 3차 수차의 목표치를 설정하고, 각각의 수차를 제거하므로써 초기설계가 가능하다. 실제로 F/수가 작고 렌즈계의 분해능이 정밀하지 않을 경우 3차 수차의 보정이 광학계의 성능에 크게 영향을 미치지 않는 않지만, 이러한 초기설계 과정은 기존 특허의 회피 및 고유모델을 개발하기 위해서는 필요한 작업임에 틀림이 없기 때문에 본 설계과정에서는 초기설계를 시도하였다.

현재까지 발표되었고 상업화된 투사렌즈는 그림 3에서 보듯이 비구면 플라스틱 비구면 3매와 구면 glass 렌즈 1매로 설계된 4매 구성이 가장 일반적이다.<sup>[14,16]</sup> 본 연구에서는 기존의

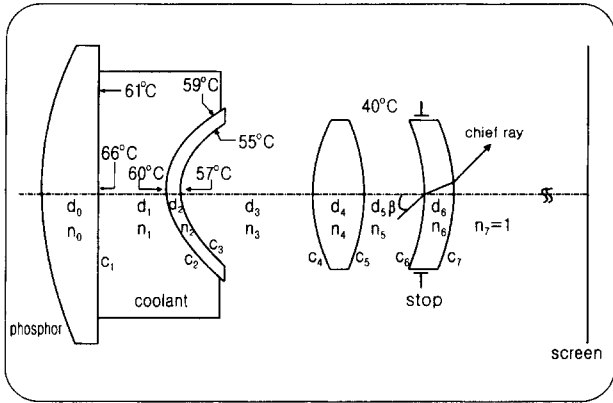


그림 6. 3매구성 투사렌즈의 구성도 및 TV 작동후 2시간 경과시 온도분포.

구성과는 달리 그림 6과 같이 3매 구성으로 설계하여 고유 특허 확보 및 부품의 단가를 절감하고, 또한 소형화를 피하고자 한다.

스크린으로부터 첫번째 렌즈는 매우 작은 굴절능을 갖고, F/수가 1.1정도인 대구경 광학계의 구면수차 보정에 적합한 meniscus형의 플라스틱 비구면 렌즈이다. 두 번째 렌즈는 양면이 볼록한 구면 glass 렌즈이며, 렌즈의 두께를 두껍고 곡률을 크게하여 렌즈계 전체의 굴절능이 대부분 glass 렌즈에 집중되도록 함으로써, TV 내부의 온도변화에 대한 초점이동의 최소화 및 성능의 안정성을 확보하는데 매우 유리하다. 왜냐하면 렌즈설계는 보통 20°C, 760 mHg에서 진행되지만 TV를 작동 시킨후 2시간 정도에 이르면, 그림 6에 보인 것처럼 TV 내부의 온도는 약 40°C, CRT 표면 및 냉매의 온도는 60~70°C까지 상승한다. 또한 표 1에서 보는 바와 같이 플라스틱 렌즈는 온도변화에 따른 굴절률 및 곡률변화가 glass에 비해 매우 크므로 플라스틱 렌즈에 광학계의 굴절능을 집중시키는 것은 바람직 하지 않다. 그리고 세 번째 렌즈는 스크린 방향에 대해 오목한 형상(concave lens)이며, 음의 굴절능을 갖는 비구면 플라스틱 렌즈이다. 이런 형상은 상면만곡수차를 보정하는데 매우 효과적이다.

인간의 눈은 녹색에 대해 시감도가 가장 민감하므로, green CRT-lens assembly가 TV 화면의 화질에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 설계기준 파장을 녹색 CRT의 중심파장인 544 nm로 설정하는 것이 적절하다. 그림 6에서 조리개(stop)는 제 6면에, 주광선이 조리개중심에서 광축과 이루는 각을  $\beta$ 라 하면, 배율( $M=1/m$ ), 구면수차( $S_I$ ), 코마( $S_{II}$ ), 비점수차( $S_{III}$ ),

표 1. 광학유리 및 경통 재질의 열특성

재 질	선팅창 계수 ( $\times 10^{-7}$ mm/ $^{\circ}$ C)	굴절률변화(dn/dT) ( $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}$ C)
BK7	71	1.7
BaCD5	54	2.4
Coolant	5000	-300
PMMA	630	-110
Al 7075	236	-
Al 6061	234	-

Petzval sum( $S_{IV}$ ) 및 왜곡수차( $S_V$ )의 계수를<sup>[17]</sup> Gaussian brackets를 이용하여 정리하면 다음과 같다.<sup>[18]</sup>

$$S_I = -n_0^4 u_0^4 \{X + a_7^2 g_{13}(-g_{13} k_7 + \alpha) - p_6 c_6^2 g_{11}^4 (n_6 - n_5)\}, \quad (2)$$

$$S_{II} = -n_0^3 u_0^3 \beta \{Y + a_7 b_7 g_{13}(-g_{13} k_7 + \alpha)\}, \quad (3)$$

$$S_{III} = -n_0^2 u_0^2 \beta^2 \{Z + b_7^2 g_{13}(-g_{13} k_7 + \alpha)\}, \quad (4)$$

$$S_{IV} = H^2 \{W + k_7/n_6\}, \quad (5)$$

$$S_V = n_0 u_0 \beta^3 \{T + b_7/a_7 \{g_{11}^2 k_7/n_6 - b_7^2 g_{13}(-g_{13} k_7 + \alpha)\}\}, \quad (6)$$

$$M = 1/m = [d_0/n_0, -k_1, d_1/n_1, -k_2, d_2/n_2, -k_3, d_3/n_3, -k_4, d_4/n_4, -k_5, d_5/n_5, -k_6, d_6/n_6, -k_7], \quad (7)$$

$$\text{단, } a_7 = [d_0/n_0, -k_1, d_1/n_1, -k_2, d_2/n_2, -k_3, d_3/n_3, -k_4, d_4/n_4,$$

$$-k_5, d_5/n_5, -k_6, d_6/n_6, n_6 c_7],$$

$$b_7 = [d_6, c_7],$$

$$g_{11} = [d_0/n_0, -k_1, d_1/n_1, -k_2, d_2/n_2, -k_3, d_3/n_3, -k_4,$$

$$d_4/n_4, -k_5, d_5/n_5],$$

$$g_{13} = [d_0/n_0, -k_1, d_1/n_1, -k_2, d_2/n_2, -k_3, d_3/n_3, -k_4, d_4/n_4,$$

$$-k_5, d_5/n_5, -k_6, d_6/n_6].$$

위 식에서  $c_i(i=1, 2 \dots, 7)$ 는 각면의 곡률,  $n_i(i=0, 1 \dots, 7)$ 은 굴절률,  $k_i(i=1, 2 \dots, 7)$ 는 각면의 굴절능으로서  $c_i(n_i - n_{i-1})$ 로 표현되고,  $d_i(i=0, 1 \dots, 7)$ 는 면들사이의 간격, 그리고  $p_6$ 은 제 6면의 원추곡면(conic surface)계수를 나타낸다. 위 식에서 보듯이 조리개가 위치한 제 6면을 원추곡면화 하여도 구면수차만 변화될 뿐 비축수차에는 영향을 주지 않는다.<sup>[17]</sup>  $u_i(0, 1 \dots, 7)$ 는 축상광선의 근축각이고, H는 Lagrangian 불변량, [ ]는 Gaussian bracket 이다. 식 (2)~(7)에서 X, Y, Z, W, T 및  $\alpha$ 는  $d_6, c_7$ 를 포함하지 않고 각 렌즈의 재질이 결정되어졌을 경우 단지 변수  $d_0, k_1, d_1, k_2, d_2, k_3, d_3, k_4, d_4, k_5, d_5, k_6$ 만의 함수임에 유의하자. 모든 Seidel 수차가 보정된 광학계를 얻기 위해서는 식 (2)~(6)로 주어지는 수차계수가 모두 0이 되어야 한다. 우선 식 (5)에서 Petzval sum이 0이 되기 위해서는 다음 식이 만족되어야 한다.

$$c_7 = \frac{n_6 n_7 W}{n_6 - n_7}, \quad (8)$$

$$\text{단, } k_7 = c_7(n_7 - n_6), n_7 = 1.0.$$

식 (8)을 식 (7)에 대입하고  $d_6$ 에 대해 풀면

$$d_6 = \frac{n_6(g_{12} - k_7 g_{11} - m)}{k_7 g_{12}} \quad (9)$$

를 얻는다. 여기서  $g_{12} = [d_0/n_0, -k_1, d_1/n_1, -k_2, d_2/n_2, -k_3, d_3/n_3, -k_4, d_4/n_4, -k_5, d_5/n_5, -k_6]$ 이고, 식 (8), (9)를 이용하여 식 (3), (4), (6)를 정리하면 다음과 같은 세 개의 방정식을 얻는다.

$$c_6 = \frac{s_4 q_1^2 + q_3(q_2 s_1 - s_2 q_1)}{q_1(q_3 s_1 - s_3 q_1) - q_2(q_2 s_1 - s_2 q_1)}, \quad (10)$$

$$q_1 c_6^2 + q_2 c_6 + q_3 = 0 \quad (11)$$

$$v_1c_6^2 + v_2c_6^2 + v_3c_6 + v_4 = 0 \tag{12}$$

식 (10), (11), (12) 에서  $s_b, q_b, v_i$ 는 설계변수  $d_0, k_1, d_1, k_2, d_2, k_3, d_3, k_4, d_4, k_5, d_5$ 만의 함수, 즉  $s_b = s_b(d_0, k_1, d_1, k_2, d_2, k_3, d_3, k_4, d_4, k_5, d_5)$ ,  $q_b = q_b(d_0, k_1, d_1, k_2, d_2, k_3, d_3, k_4, d_4, k_5, d_5)$ , 그리고  $v_i = v_i(d_0, k_1, d_1, k_2, d_2, k_3, d_3, k_4, d_4, k_5, d_5)$ 이다. 마지막으로 구면 수차가 보정되기 위해서는 식 (2)로부터 다음의 식이 만족되어야 한다.

$$p_6 = \frac{X + g_{13}a^2(-g_{13}k_7 + \alpha)}{c_6^2g_{11}^4(n_6 - n_5)} \tag{13}$$

따라서 축소배율  $M(=1/m)$ 을 갖고, 색수차를 제외한 모든 Seidel 수차가 보정된 광학계는 식 (8), (9), (10), (11), (12), (13)을 동시에 만족시켜야 한다. 식 (8)에서  $c_7$ 는  $d_6$ 에 관계되지 않고, 식 (10)의 오른쪽항은  $c_6, d_6, c_7$ 를 포함하고 있지 않음에 유의하자. 플라스틱 렌즈 재질로서, 첫 번째 렌즈는 PMMA를 사용하고, 세 번째 렌즈는 온도변화에 대해 안정된 광학특성을 가지며, PMMA와 유사한 계열인 WF720을 사용하였다. CRT는 180CSB22⑥를 사용함에 따라 이들에 대한 굴절률과 CRT의 사양에 의해  $c_1=0, n_0=1.5658, d_0=14.1$  mm로 고정되어 있으므로 설계시의 변수는  $d_1, k_2, d_2, k_3, d_3, k_4, d_4, k_5, d_5, k_6, d_6, k_7, n_4, p_6$ 로서 총 14개이다. 그러나 물리적으로 타당한 해를 얻기 위해서 초기설계시 제어해야 할 물리량은 다음과 같다.

- (1)  $1/70$  mm  $< c_2 < 1/30$  mm
- (2)  $1/70$  mm  $< c_3 < 1/30$  mm
- (3) 냉매의 광축상 두께( $d_1$ )  $\geq 9$  mm
- (4) 3 mm  $<$  첫 번째 렌즈의 두께( $d_2$ )  $< 5$  mm
- (5) 15 mm  $<$  glass 렌즈의 두께( $d_4$ )  $< 25$  mm
- (6) 총투사거리  $< 1000$  mm

그리고 일정한 배율 M을 갖고 모든수차가 보정된 광학계를 얻기위해서, 식 (8)-(13)로부터 설계변수  $k_5, d_5, k_6, d_6, k_7, p_6$ 가 결정되므로 위 조건들을 만족시키도록 변수  $d_1, k_2, d_2, k_3, d_3, k_4, d_4, n_4$ 을 적절히 선정해 가면서 방정식을 풀면 된다.<sup>[19]</sup> 다시 말하면 값이 이미 주어진 설계변수( $c_1, d_0, n_0, n_1, n_2, n_3, n_5, n_6, n_7$ )를 제외한 자유변수( $d_1, k_2, d_2, k_3, d_3, k_4, d_4, n_4$ )를 타당성이 있는 광학계가 되도록 적절한 값을 선택하면 식 (10),

표 2. 3매구성 투사렌즈의 초기설계치

No.	Radius	Thickness	Glass( $n_c$ )
OBJ	INF	792.7873	-
1	30.0328	20.2244	PMMA(1.4935)
stop	*36.5150	15.3257	
3	73.2350	23.1493	BACD5(1.5916)
4	-178.8813	31.5673	
5	-42.0897	4.2090	WF720(1.5115)
6	-52.6122	10.5224	Coolant(1.4413)
7	INF	14.1001	PANEL(1.5658)
IMG	-350.0000	0.0000	-

\*원추계수  $P_2=2.411$ 인 비구면임.

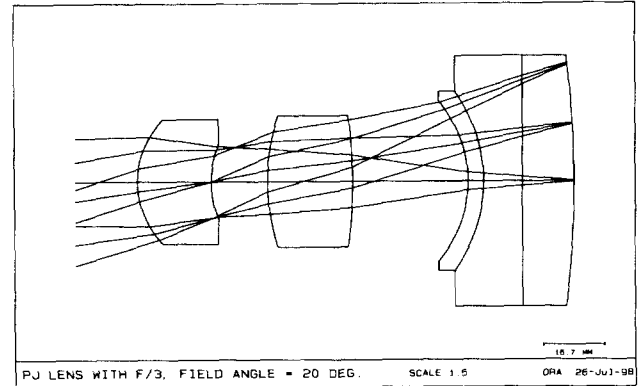


그림 7. 초기설계된 투사렌즈의 광선도.

(11), (12)로부터  $c_5, d_5, c_6$ 가 결정된다. 이를 식 (8), (9)에 대입하면  $c_7, d_6$ 가 정해지고, 마지막으로 식 (13)을 이용하여 원추계수  $p_6$ 을 얻을 수 있다. 이런 과정을 통해 얻은 해석적인 해는 무수히 많지만 주어진 사양에 가장 적절한 초기설계 데이터가 표 2이고, 그림 7은 광선도이다. 표 2와 그림 7에 주어진 광학계는 초기설계시 설정된 구성을(그림 6) 반전시킨 것이다. 즉, CRT의 형광면이 광학계의 상면이 되고 스크린이 물체면에 해당된다. 그 이유는 CRT의 단위화소가 CRT 사양과 방송규격에 의해 주어지므로 CRT 단위화소 크기에 대해 렌즈의 분해능을 설정하고, 평가 해야하기 때문이다. 표 3은 3차 수차 값이며, 그림 8은 광선수차도이다. 표 3에서 보듯이 모든 3차 수차 값은 0에 가까우므로, 3차 수차는 보정되었다고 말할 수 있다. 그러나 본 렌즈가 적용될 수 있는 F/수는 3 정도로 매우 크고, TCL 또한 길다. 그리고 반화각은 20°로 작기 때문에 이 렌즈를 곧바로 프로젝션 TV에 적용할 수 없으므로, 최적화 과정을 통해 원하는 사양 및 성능을 갖추도록 재 설계가 필요하다.

### 3.2. 허용공차를 고려한 최적설계

본 광학계의 3차 수차는 보정되어 있지만, 그림 7과 8에서 알 수 있듯이 보정되지 않은 고차수차가 광학계의 구경 및 상크기를 제한하고 있다. 렌즈설계 프로그램을 이용한 최적설계 과정에서 원하는 사양을 만족시키기 위해서는 다음과 같은 제약조건을 만족시켜야 한다.

- (1) F/수=1.1

표 3. 초기설계치에 대한 3차 수차

No.	구면수차	코 마	비점수차	Petzval S.	왜곡수차
1	-0.0578	-0.0298	-0.0034	-0.0110	-0.0027
STO	0.0034	0.0107	0.0075	0.0090	0.0158
	0.0585	0.0000	0.0000		0.0000
3	0.0000	0.0006	0.0015	-0.0051	-0.0223
4	-0.0067	0.0149	-0.0073	-0.0021	0.0046
5	0.0025	0.0039	0.0013	0.0080	0.0055
6	-0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0006	-0.0002
7	0.0000	-0.0003	0.0005	0.0000	-0.0006
Sum	-0.0001	-0.0002	0.0001	-0.0017	0.0001

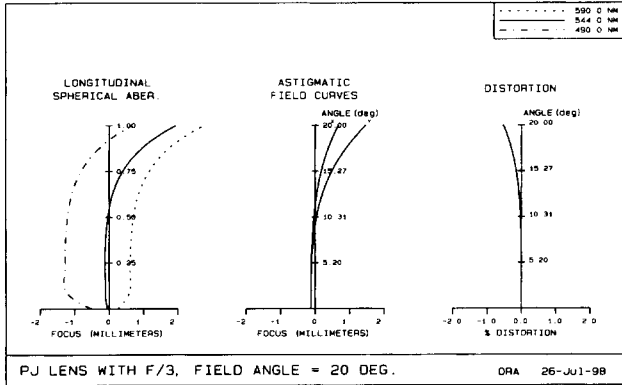


그림 8. 초기설계된 투사렌즈의 수차도.

- (2) 800 mm < TCL < 850 mm at 43" screen
- (3) 초점거리( $f$ ) ≤ 77 mm
- (4) 플라스틱 렌즈의 중심과 가장자리 두께비 ≥ 1/2

표 4. 최적설계된 투사렌즈의 데이터 및 공차분석( $f=76.65$  mm)

(a) Centered tolerances

NO.	Radius	Fringes Pow/Irr	Thickness	Thickness Tolerance	Glass	Index Tolerance
OBJ	INF	-	694.6410	-	-	-
1	(dummy)	-	1.0000	-	-	-
2	*52.1328	16.0/4.00	10.0000	0.0500	PMMA1	0.0005
3	*75.5286	16.0/4.00	15.2252	0.0500	-	-
stop	125.0155	16.0/4.00	25.0000	0.0500	BACD5	0.0005
5	-67.0206	16.0/4.00	5.0000	-	-	-
6	(dummy)	-	40.7605	compensator	-	-
7	*-48.6658	16.0/4.00	4.0000	0.0500	Wf720	0.0010
8	-45.0000	16.0/4.00	9.0233	0.0500	Coolant	0.0010
9	INF	16.0/4.00	14.1000	0.0500	Panel	0.0010
IMG	-350.0000	16.0/4.00	0.0010	-	-	-

\*는 비구면임.

(b) Decentered tolerances

Element No.	Front Radius	Back Radius	Element Wedge (분)	Element Tilt (분)	Element Decenter (mm)
1	52.1328	75.5286	1.5	3.1	0.0250
2	125.0155	-67.0206	1.4	1.4	0.0250
3	-48.6658	-45.0000	1.4	-	0.0250
3-4	-48.6658	INF	-	-	0.0250
3-5	-48.6658	-350.0000	-	1.4	0.0250
4	-45.0000	INF	1.3	-	-
5	INF	-350.0000	0.9	-	-

(c) Performances summary

Field	Freq. lp/mm	Azim. Deg.	Design(MTF)	Design+Tol	Compensator Range(+/-)
					DLT S <sub>6</sub>
0.0	5.00	TAN	0.537	0.452	0.1309
0.6	5.00	TAN	0.379	0.259	0.1309
0.8	5.00	TAN	0.382	0.254	0.1309
1.0	5.00	TAN	0.191	0.083	0.1309

- (5) 주변광량비 ≥ 30% at 1.0 field
- (6) 왜곡 수차 ≤ 7%
- (7) Glass 렌즈 가장자리 두께: 3~7 mm
- (8) 렌즈전장(overall length) ≤ 130 mm
- (9) 저가격의 glass 렌즈 재질 선택 (BaCD5, BK7, 등)
- (10) 최대상고 ≈ 63.5(raster 크기 5" 기준).

위와 같은 렌즈의 1차적인 성질을 만족시키는 범위에서 수차 보정을 해야한다. 수차보정 과정에서 고차수차보정은 비구면을 적용함으로써 실행되지만 중요한 것은 비구면 형상이 매끄러워 지도록 설계함과 더불어 허용공차를 크게 할 수 있도록 함으로써 제조오차에 대해 성능의 안정성을 확보해야 한다. 다시 말해서 주어진 설계값에 대해 어느 정도의 제조오차가 발생해도 렌즈의 성능을 일정한 수준 이상을 유지시키기 위해서는 각각의 면에서 발생하는 수차의 총합 및 수차 발생량을 최소화 시키는 것이 필요하다.<sup>[20]</sup> 이러한 개념을 자동설계에 적용하기 위해서 Abbe 굴절률 A, B를 다음과 같이 정

의하였다.<sup>[21]</sup>

$$\text{축상광선: } A = \sum (Q_i h_i)^2 \quad (14)$$

$$\text{주광선 : } B = \sum (Q_{pi} h_{pi})^2 \quad (15)$$

위식에서  $Q_i, Q_{pi}$ 는 근축광선 및 주광선의 Abbe 불변량 이고  $h_i, h_{pi}$ 는 각 광선의 입사고 이다. 따라서 제조오차에 대해 안정된 성능을 확보하기 위해서, 위의  $A$  및  $B$  값을 작게 설계 하는 것이 필요하다. 최적화 설계과정에서 이러한 Abbe 굴절 량을 merit function에 추가로 도입하여 설계하였다. 설계된 렌즈의  $A$ 와  $B$  값은 각각  $A=2.13, B=3.23$ 이고, 기존의 렌즈에 비해  $A$  및  $B$  값이 크지 않으므로, 설계된 렌즈는 주어진 공차 에 대해 성능저하가 작음을 간접적으로 알 수 있다.<sup>[14]</sup>

### 3.3. 렌즈계의 성능분석

초기설계 및 최적화 설계과정에서 녹색 CRT의 중심파장 (544 nm)을 기준으로 설계하고, 색수차를 완전하게 보정하지 는 않았다. 왜냐하면 R, G, B CRT 마다 각각 렌즈계가 부착 되므로 즉, 독립적으로 결상을 이루는 형태이므로 정확하게 물색화된 렌즈계를 얻을 필요가 없기 때문이다.<sup>[11]</sup> 다시말해 서 설계중심 파장은 544 nm이고, R, B CRT의 중심파장은 각 각 448 nm, 612 nm이지만, 중심파장 변경에 의한 상면이동은 렌즈계를 refocusing 함으로써 해결 할 수 있다. 또한 황색수 차는 전자회로적으로 보상 가능하다. 그러나 그림 4에서 보듯 이 녹색 CRT의 경우, 중심파장 이외에도, 적색(590 nm)과 청 색(490 nm) 파장대의 빛이 방출되므로, 이에 의한 색번짐이 최소화 되도록 설계 및 성능평가 과정에서 고려되어야 한다. 본 논문에서는 녹색 CRT에 대해 파장에 대한 가중치를 590 nm : 544 nm : 490 nm = 1 : 8 : 1로 설정하였다. 이러한 가중치는 그림 4에 주어진 녹색 CRT의 스펙트럼과 그림 5의 착색렌즈 투과도 특성을 고려하여 정한 값이고, 일본의 선전업체들도 이 정도의 값으로 제품의 성능을 평가 하고 있다.

표 2에 주어진 데이터를 초기설계치로 잡고, 위에서 설명된 설계개념을 도입하여, 설계된 렌즈가 표 4-(a)이다. 플라스틱 렌즈 재료로는 PMMA와 WF720, 유리는 싸고 구하기 쉬운 (일) HOYA사의 BaCD5를 이용하였으며, 비구면은 플라스틱 렌즈에만 채용했다. 세번째 렌즈와 냉매가 맞닿는 면은 구면 처리를 하였으며, 이웃한 매질의 굴절률이 비슷하므로 AR 코팅을 하지 않았다. 그림 9는 설계된 투사렌즈의 광선도, 그림 10은 광선 수차도, 그림 11은 렌즈의 MTF 특성 이다. 표 4-(a)와 그림 9에서, 제 1면과 6면은 렌즈계를 통과하는 광속을 조 절하기 위해 설정한 조리개 이다.

렌즈형상 및 수차특성은 요구사항을 충분히 만족시키고 있 으며, 공간주파수 5 lp/mm 에서 MTF특성은 전영역에서 30% 이상을 확보하고 있으며, 특히 0.8 field 이내에서는 40%를 갖 고 있다. 또한 3 lp/mm에서는 0.8 field 이내에서 모두 50% 이 상을 확보하고 있으므로 차세대 TV인 디지털 TV에서도 곧 바로 적용 가능함을 알 수 있다.

성능변화가 민감한 자오면상(tangential plane)에서 공차 분 석한 결과로서, 표 4-(a)는 곡률, 두께, 굴절률에 대한 공차, 표

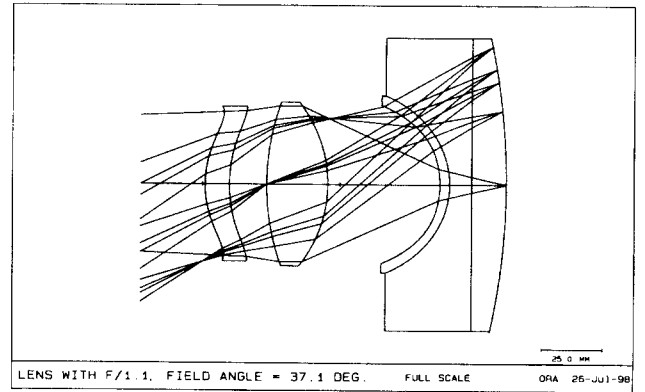


그림 9. 최적설계된 투사렌즈의 광선도.

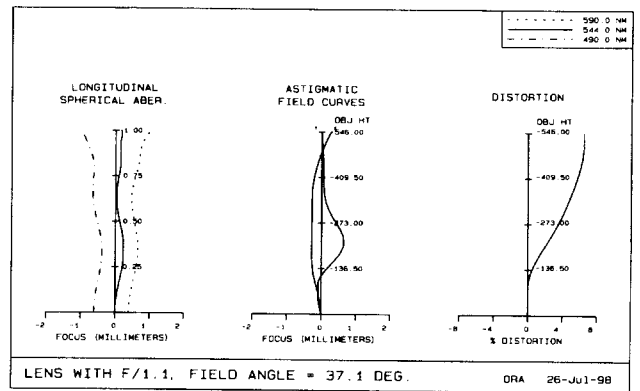


그림 10. 최적설계된 투사렌즈의 수차도.

4-(b)는 단렌즈의 wedge 공차, 렌즈와 mount와의 결합시 발생 되는 tilt 공차 및 decenter 공차 이다.<sup>[23]</sup> 그리고 표 4-(c)는 위 의 공차가 부여되었을 경우 MTF 특성 및 보상인자 (compensator)의 양이다. 경통상에 있는 캠에 의해 내경통 렌즈 어셈블리가 이동 가능하므로 두번째 렌즈와 세번째 렌즈 사이의 거리  $d_6$ 를 보상인자로 설정하였다. 이때 보상인자( $d_6$ )가 이동해야 할 양( $\Delta d_6$ )은 0.13 mm로서 매우 작고, 또한 MTF 변화도 작아서 공차 설정후의 MTF는 공간주파수 5 lp/mm의 0.8 field 이내의 모든 영역에서 25% 이상을 유지하 므로 본 렌즈는 제조오차에 대해 매우 안정적인 성능을 보유하

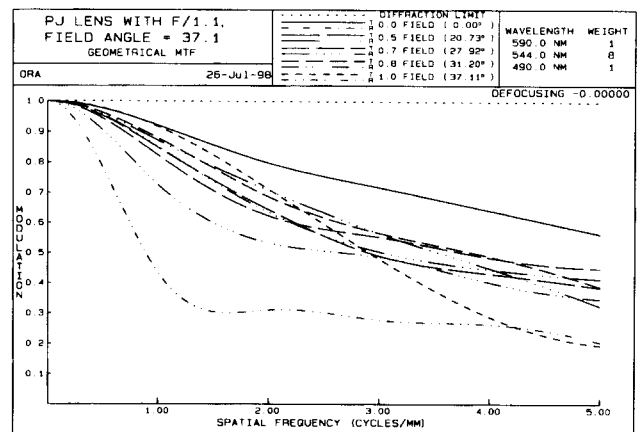


그림 11. 최적설계된 투사렌즈의 MTF 특성.

고 있다. 실제로 표 4에서 주어진 공차는 매우 큰 값이며, 공차분석 과정은 유의 수준을 2.3% 이내로 잡고 실시했으므로 매우 타당성이 있는 데이터로 판단할 수 있다.<sup>[23]</sup>

#### IV. 렌즈제작 및 평가

설계결과를 비교검토한 결과, 구성매수, 비구면의 형상, 단 초점, 짧은 투사거리 및 공차에 대한 성능의 안정성등에서 설계된 렌즈가 강점을 갖고 있었으므로 본렌즈 설계서를 바탕으로 렌즈 어셈블리를 제작 하였다. 본 렌즈의 제작과정에서 녹색 CRT에 적용할 렌즈 어셈블리의 세번째 렌즈에 착색을 하여 색순도를 높였다. 시험 제작된 렌즈는 표 4에서 주어진 공차내에서 가공 되었다. 제작된 렌즈의 성능을 평가한 결과, 전체적으로 분광투과율은 90%, 투영해상력은 중심부에서는 16 lp/mm, 0.8 field 에서 10 lp/mm, 그리고 주변부에서 6 lp/mm 이상 이었다. 따라서 본 렌즈는 800 TV-line 이상을 충분히 구현할 수 있기 때문에, 디지털 TV용 투사렌즈로서 요구 되는 해상력을 보유하고 있다. 또한 주변광량비는 0.8 및 1.0 field에서, 각각 42%, 32% 이상이므로 충분한 밝기를 구현하고 있으며, 왜곡수차는 전자회로로 쉽게 보정 가능할 수 있을 정도로 작았다.

#### V. 결 론

본 연구는 프로젝션 TV 에서 국내의 고유모델을 개발기 위한 기반기술로서, 고화질을 구현할 수 있는 렌즈를 설계 및 개발하는 것과 동시에 프로젝션 TV의 전체 재료비에서 절반 이상을 차지하는 광학부품을 개발하여 성능 및 가격경쟁력을 향상시키는 것이 주 목적이다. 개발된 렌즈의 사양 및 성능은 이미 앞장에서 상세히 설명 했으므로, 여기서는 그 의미에 관해서만 논하겠다. 기존 업체들과는 차별화된 렌즈구성으로 고유특히 확보 가능성과 더불어 성능 및 조립성 등에서 우수하다. 또한 국내 및 일본, 그리고 북미의 방송규격인 NTSC는 물론 향후 디지털 TV에 적용가능한 충분한 해상도와 성능을 갖추고 있다.

Aspect ratio 4:3 NTSC 및 16:9의 디지털 TV에 활용할 수 있는 투사렌즈의 설계, 개발에 관련된 일련의 과정을 통해 프로젝션 TV 시스템 및 광학계 설계, 코팅, 측정, 평가에 관련한 제반기술의 심화 및 체계를 잡았다. 무엇보다도 렌즈의 독자설계, 개발, 그리고 제품화를 통해 국내의 광학계 개발능력을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구는 단국대학교 대학연구비의 지원으로 연구되었습니다.

#### 참고문헌

- [1] 倉重光雄, "AV 光情報機器 總論", 光學, **19**, 562 (1990).
- [2] 官崎榮一 외 3명, "大畫面 DISPLAY", TELEVISION 學會誌, **45**(2), 141-179 (1991).
- [3] PROJECTION TV の 設計, (トリケップス 出版部, 東京, 1989) chap. 1.
- [4] Jacob Moskorichi, *et al.*, CRT Projection Optics, (美) U. S. Precision Lens社 기술자료.
- [5] John A. Clarke, "Current Trends in Optics for Projection TV", Opt. Eng., **27**(1), 16 (1988).
- [6] S. Hasegawa, "High Brightness Picture Technology in SD-P40 Projection TV", SPIE, **760**, 38 (1987).
- [7] 小倉馨美, "先端光學機器 材料と最近の話題", 工業材料, **35**(5), 2 (1991).
- [8] 松島正洋, "プラスチック 렌즈用 PMMA 樹脂材料", 工業材料, **35**(5), 36 (1991).
- [9] 姫野好章, "テレビプロジェクション 用 렌즈", 工業材料, **35**(5), 62 (1991).
- [10] John D. Rudolph, Developments in Projection lenses for HDTV, (美) U.S. Precision Lens社 기술자료.
- [11] PROJECTION TV の 設計, (トリケップ스 出版部, 東京, 1989) chap. 2.
- [12] Koji Hirata, *et al.*, "Video Projector with Optical Color Balance", U.S. Patent 5,200,814 (1993).
- [13] 種田悌一, "Rear Projection Screen", 光學, **19**, 583 (1990).
- [14] 박성찬, "고화질 프로젝션 TV용 렌즈 설계 및 제작", 한국광학회지, **4**(2), 145 (1993).
- [15] Sung Chan Park, "Projection Lens", U.S. Patent 5, 633, 757 (1997).
- [16] Koji Hirata, *et al.*, "Projection Lens System", U.S. Patent 4, 948, 237 (1990).
- [17] W. T. Welford, Aberrations of the Optical Systems, (Adams Hilger Ltd., Bristol, 1986) pp. 130-152.
- [18] M. Herzberger, Modern Geometrical Optics, (Interscience, New York, 1958) pp. 457-462.
- [19] 박성찬, UV Submicron lithography를 위한 4반사 광학계의 설계 및 수차해석, 한국과학기술원 박사학위 청구논문 (1991).
- [20] 박성찬, 이상수, "허용공차를 고려한 렌즈설계", 응용물리, **6**, 115 (1993).
- [21] 中川治平, "렌즈의 코스트 低減設計", 광기술 콘택트, **30**, 135 (1992).
- [22] 박성찬, 문희중, 이만형, "체결구조에 의한 Athermalized Tessar형 렌즈설계", 한국광학회지 **4**(2), 133 (1993).
- [23] CODE-V Reference Manual, version 7.51, (Optical Research Associates, California, 1993) chap. 6.



## **Optical design of a projection lens for high definition digital TV**

**Sung Chan Park**

*Department of Physics, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea*

**Hee Jong Moon**

*Display R&D Center, LG Electronics, Seoul 137-140, Korea*

(Received July 29, 1998, Revised manuscript received September 23, 1998)

In the rear projection TV, the optimal system configurations of optical parts are presented, which are focused on competitive price and performances. From the initial design with five Seidel aberrations free, aspherization of the plastic lenses, and optimization with tolerances, a new lens consisting of two plastic and one glass lenses was designed. It is able to be used on current broadcast standard NTSC and digital TV in common. The developed CRT-lens assembly could display the 40 to 50 inch image and its resolution is more than 800 TV-lines.