

## 렌즈군의 일반화된 등가렌즈 변환

이종웅

청주대학교 광학공학과

박성찬

단국대학교 물리학과

(1998년 3월 4일 받음, 1998년 6월 25일 수정본 받음)

등가렌즈 변환을 렌즈군의 변환으로 확장하였으며, 보다 일반화된 변환법을 개발하였다. 새로운 변환법은 두꺼운 렌즈계에서 바로 두꺼운 렌즈계로의 변환이 가능하다. 등가렌즈 변환을 통하여 얇은 렌즈계는 서로 다른 두께를 가지면서도 근축광학적 특성이 같고 수차특성이 유사한 여러 개의 두꺼운 렌즈계로 변환될 수 있다. 예로서 telephoto 렌즈계의 설계변경에 등가렌즈 변환을 적용하여 보았으며, 앞부분 렌즈군의 축상두께를 원설계의 75%로 축소하였다. 등가렌즈 변환을 통하여 얻어진 수정설계의 초점거리는 원설계와 동일하였으며, 축상두께만을 변경시킨 경우에 비하여 수차특성의 변화가 적음을 확인할 수 있었다.

### I. 서 론

공기 중에 있는 단렌즈를 근축각, 굴절률변량, 전체굴절능이 같은 얇은 렌즈로 변환하고 다시 이를 두꺼운 렌즈로 역변환하는 방법은 1930년대에 소개되었다.<sup>[1]</sup> 두께가 0인 얇은 렌즈의 경우에는 두꺼운 렌즈의 경우에 비하여 3차수차의 해석적인 보정이 쉬우므로 먼저 얇은 렌즈에서 3차수차를 보정한 후 이를 두꺼운 렌즈로 변환하는 방법이 광학계의 기초설계에서 사용되고 있다. 참고문헌<sup>[2]</sup>에 소개된 등가렌즈를 이용한 기초설계법은 렌즈가 공기 중에 있다는 전제하에 등가렌즈변환이 사용되고 있었으며, 렌즈가 공기 중에 있다는 조건이 없도록 일반화된 등가렌즈 변환법은 1996년에 발표된 바 있다.<sup>[3]</sup> 이와 같은 단렌즈 단위의 등가렌즈 변환은 렌즈의 매수가 적은 광학계의 설계에는 매우 유용하지만, 여러 개의 렌즈군으로 구성된 복합렌즈계의 경우에는 수차해석이 복잡하게 되어 쉽게 적용될 수 없다는 단점을 가진다.

광학계의 3차수차는 각 면에 입사하는 광선의 높이  $h$ , 근축각  $u$ , 매질의 굴절률  $n$ 의 함수로 표현될 수 있으며, 광선의 굴절률변량은 3차수차와 직접적인 관련을 가지고 있다. 등가렌즈 변환법은 광선의 근축각, 굴절률변량, 주요면에 입사하는 높이가 같도록 렌즈의 두께와 곡률을 변화시키는 방법으로 이해할 수 있다. 주요면에 입사하는 높이와 근축각이 같음으로 인하여 변환된 등가렌즈는 원래의 렌즈와 근축광학적인 특성이 같다. 다만 각 면에 광선이 입사하는 높이가 변화하게 되어 3차수차가 달라지게 된다. 단렌즈의 경우에는 특별히 두꺼운 렌즈의 경우 이외에는 입사각의 변화가 적으므로 등가렌즈가 원래 렌즈의 3차수차를 잘 근사하고 있다. 두께가 0인 얇은 렌즈는 굴절능만 있는 면 한 개로 볼 수 있다. 2개의 얇은 렌즈가 있는 경우에 각각의 얇은 렌즈를 굴절능만 있는 면으로 본다면, 두꺼운 렌즈 1개가 있는 것과 같게 된다. 이를

등가렌즈변환을 통하여 두께 0의 얇은 렌즈계로 변화시키면 2매의 렌즈로 구성된 광학계가 사이간격이 0인 얇은 렌즈계로 변환이 될 수 있다. 이것은 등가렌즈 변환을 통하여 렌즈군 전체를 두께 0의 얇은 렌즈군으로의 변환이 가능하다는 것을 나타내고 있다. 렌즈군의 경우, 동일한 렌즈군에 속한 렌즈는 서로 가까이에 있는 것이 일반적이므로 등가렌즈 변환에 따른 입사각의 변화 역시 적을 것이며 변환된 등가렌즈군도 원래 렌즈군의 3차수차를 잘 근사할 수 있을 것이다. 얇은 렌즈계를 원래의 두께를 다시 부여하여 두꺼운 렌즈계로 변환하면, 얇은 렌즈계는 다시 같은 두꺼운 렌즈계로 변환된다. 이때 원래와 두께를 다르게 하면 다른 두꺼운 렌즈계가 얻어지게 되며, 이 렌즈계를 원래의 렌즈계와 비교하면 근축광학적인 특성(근축각, 굴절률변량, 주요면에서의 높이)은 서로 같고, 각 면에서의 곡률과 입사각만 달라지게 된다. 이 렌즈계들은 얇은 렌즈계로 변환하면 모두 동일한 얇은 렌즈계로 변환되는 공통점을 가진다. 이것은 등가렌즈변환을 두꺼운 렌즈계와 두꺼운 렌즈계의 변환에도 적용시킬 수가 있음을 의미하고 있다.

본 연구에서는 등가렌즈변환을 렌즈군의 변환으로 확장하여, 임의의 매수로 구성된 렌즈군을 등가의 렌즈군으로 변환하는 방법을 연구하고, 2군 telephoto 렌즈계의 설계변경에 적용하였다. Telephoto 렌즈계의 설계변경에서는 앞부분 렌즈군의 두께를 원설계의 75%로 줄였으며, 앞부분 렌즈군의 두께만을 줄여준 경우와 비교하여 등가렌즈 변환을 사용한 경우가 광학계의 수차특성의 변화가 적음을 확인하였다.

### II. 렌즈군의 등가렌즈 변환

#### 2.1. 등가렌즈의 변환조건

단렌즈의 등가렌즈변환에 대한 1996년의 논문에서는 두꺼

은 렌즈를 두께 0의 얇은 렌즈로 변환하고, 이 얇은 렌즈를 다시 두꺼운 렌즈로 역변환하는 과정이 소개되어 있다.<sup>[3]</sup> 등가 렌즈 변환은 근축각, 근축광선의 굴절률변량, 주요면에서의 입사각이 같도록 곡률  $c$ 와 입사고  $h$ 를 변환하는 과정으로 이해할 수 있다. 광학계 또는 렌즈군에서 근축각과 주요면에 입사하는 높이가 같으면 근축광학적인 특성이 같으며, 굴절률 변량이 같다는 조건에 의하여 3차수차가 크게 변화하지 않게 된다. 따라서 렌즈를 두께가 0인 얇은 렌즈로 변환시키지 않더라도 등가렌즈의 변환조건을 만족시키면 변환된 렌즈는 원래의 렌즈와 유사한 특성을 가지게 된다.

그림 1에서  $j$ 번째 굴절면에서의 굴절후 광선의 근축각  $u_j$ 와 광선의 굴절률변량  $A_j$ 는

$$n_j u_j = n_{j-1} u_{j-1} + h_j c_j (n_j - n_{j-1}) \quad (1)$$

$$A_j = n_{j-1} (c_j h_j - u_{j-1}) = n_j (c_j h_j - u_j) \quad (2)$$

으로 주어진다. (1), (2)식에서  $n_j$ 는  $j$ -면에서 굴절후 매질의 굴절률이다. 등가렌즈변환을 통하여 변환된 굴절면의 경우는

$$n_j u_j = n_{j-1} u_{j-1} + h_j^* c_j^* (n_j - n_{j-1}) \quad (3)$$

$$A_j = n_{j-1} (c_j^* h_j^* - u_{j-1}) = n_j (c_j^* h_j^* - u_j) \quad (4)$$

가 된다. (3), (4)식에서 첨자 \*는 변환된 굴절면의 물리량임을 나타낸다. 위의 식들을 살펴보면 곡률과 입사각의 곱이 같도록 곡률과 입사각을 변환하면 근축각과 굴절률변량은 변화하지 않음을 알 수 있다. 따라서 굴절면의 등가렌즈 변환조건은

$$h_j c_j = h_j^* c_j^* \quad (5)$$

가 된다.

다음으로 주요면에 입사하는 높이를 같게 하는 조건을 생각하여 보자. Fig. 1에서 렌즈군의 첫 번째 면을  $i$ 면, 마지막 면을  $k$ 면이라고 하면, 렌즈군의 제1주요면에 입사하는 높이  $h$ 는

$$h = h_i - z u_{i-1} = h_{i-1} - (d_{i-1} + z) u_{i-1} \quad (6)$$

로 주어지며,  $z$ 는  $i$ 면의 정점에서 제1주요면까지의 거리이다. 변환된 렌즈군에서는

$$h = h_i^* - z^* u_{i-1} = h_{i-1} - (d_{i-1}^* + z^*) u_{i-1} \quad (7)$$

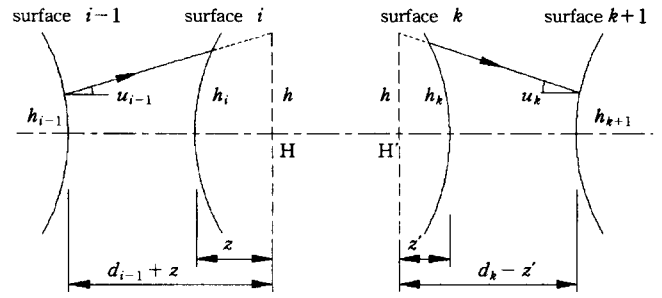
로 주어지고,  $i$ 면부터  $k$ 면까지만 변환하기 때문에 이 렌즈군의 바로 앞에 있는 ( $i-1$ )면의 입사고  $h_{i-1}$ 은 서로 같다. (6), (7)식에서 렌즈군의 주요면에 입사하는 높이가 같을 조건은

$$d_{i-1}^* = d_i + z - z^* \quad (8)$$

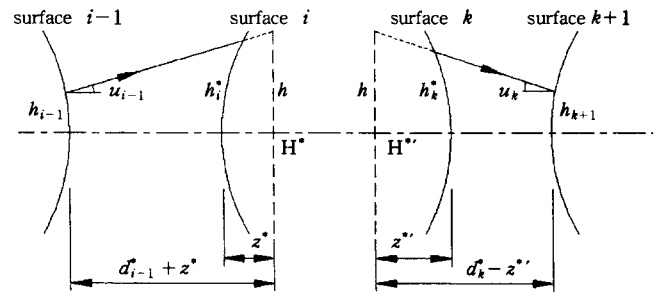
로 주어지게 된다. 그림 1에서  $z'$ 와  $z^*$ 는 렌즈군의 마지막 면 ( $k$ 면)에서 렌즈군의 제2주요면까지의 거리이며, 제2주요면에서 높이는

$$h = h_{k+1} + (d_k - z') u_k = h_{k+1} + (d_k^* - z^*) u_k$$

가 되므로, 제2주요면에서 광선의 높이가 같을 조건은



(a) 두꺼운 렌즈계의 렌즈군



(b) 등가렌즈로 변환된 렌즈군

Fig. 1. Conversion of a lens group.

$$d_k^* = d_k - z' + z^* \quad (9)$$

가 된다.

### 2.2. 렌즈군의 등가렌즈 변환방법

앞에서 논의된 렌즈군의 등가렌즈 변환조건을 살펴보면 변환된 등가렌즈의 제1주요면의 위치  $z^*$ 가 주어지면 변환되는 렌즈군의 첫번째 면인  $i$ 면에 입사하는 높이  $h_i^*$ 은

$$h_i^* = h_{i-1} - d_{i-1}^* u_{i-1}$$

가 된다. 이 이후의 면은 임의의 두께를 주는 경우에도 근축광선추적에 의하여 입사하는 높이를 모두 구할 수 있다. 근축광선추적의 전환방정식(transfer function)은

$$h_{j+1}^* = h_j^* - d_j^* u_j$$

이며, 등가렌즈변환에서는 근축각이 유지되므로 임의의  $d_j^*$ 에 대한 광선추적이 가능하다. 면에서의 광선의 굴절은

$$n_j u_j = n_{j-1} u_{j-1} + h_j^* c_j^* (n_j - n_{j-1})$$

로 주어지고, (5)식의 변환조건에서  $h c = h^* c^*$ 가 항상 유지되므로 굴절에 대한 별도의 계산은 필요가 없게 된다.

두꺼운 렌즈계를 두께 0의 얇은 렌즈계로 변환시키는 경우에는 얇은 렌즈의 주요면의 위치는 항상  $z^* = z' = 0$ 이고, 렌즈군의 물체가 무한대에 있는 경우( $u_{i-1} = 0$ )도  $h_i^* = h_i = h$ 이며, 렌즈군의 상이 무한대에 생기는 경우( $u_k = 0$ )는  $h_k^* = h_k = h$ 이므로, 이 세 가지 경우에는 별도의 계산 없이 쉽게 등가렌즈로의 변환이 가능하다. 이 이외의 경우에는 다음과 같은 반복적인 수치해법을 통한 변환이 필요하며, 10회 이내의 반복은

로 충분한 정밀도의 변환이 가능하다.

단계 1. 초기치 추정

- 가. 등가렌즈군의 렌즈 두께 및 렌즈사이의 간격을 원하는 값으로 설정한다.
- 나. 곡률은 같다고 보고 렌즈군의 주요점의 위치  $z^*$ ,  $z^{*'}(초기치)$ 를 구한다.

단계 2. 반복과정 : 등가렌즈로 변환

$$d_{i-1}^* = d_{i-1} + z - z^*, \quad d_k^* = d_k - z + z^{*'} \\ h_j^* = h_{j-1}^* - d_{j-1}^* u_{j-1}, \quad c_j^* = h_j c_j / h_j^*; \text{ for } j = i \dots k$$

단계 3. 종료검사

- 가. 변환된 렌즈군의 주요점의 위치  $z_N^*$ 과  $z_N^{*'}$ 을 구한다.
- 나.  $\Delta z^* = z_N^* - z_N^{*'}$ 가 충분히 작으면 종료한다. 그렇지 않은 경우는  $z^* = z_N^*$ ,  $z^{*' = z_N^{*'}$ 로 두고 변환을 반복한다.

2.3. 렌즈군의 등가렌즈 변환과 3차수차

렌즈군의 등가렌즈 변환에서는 렌즈군 전체의 굴절능, 군 내의 각 면에서의 근축각이 유지되고, 변환의 기준으로 사용한 근축광선에 대하여 렌즈군의 주요면에 입사한 높이와 각 면에서의 굴절률변량이 변화하지 않는다. 등가렌즈 변환의 기준광선으로 marginal ray를 사용하면, 광학계의 Lagrange 불변량과 광학계 전체의 횡배율, 각 면에서의 횡배율은 유지된다. 반면에 변환된 렌즈군 내에서는 marginal ray가 각 면에 입사하는 높이가 변화하며, 주광선의 경우에는 변환된 렌즈군과 그 이후의 광학면에서 입사고와 근축각이 변화하게 된다. 따라서 광학계의 일부군에 등가렌즈변환을 적용하는 경우에는 광학계의 Lagrange 불변량과 축상물체점에 대한 근축광학적 특성만이 유지되기 때문에 marginal ray의 입사고, 면의 곡률, 주광선의 변화에 따른 수차의 변화가 발생하게 된다.

광학계의 3차수차는 marginal ray와 주광선의 근축광선추적을 통하여 다음과 같이 주어진다.<sup>[4,5]</sup>

$$S_I = \sum_i A_i^2 h_i \Delta_i (u/n), \quad \text{구면수차} \tag{10}$$

$$S_{II} = \sum_i A_i B_i h_i \Delta_i (u/n), \quad \text{코마} \tag{11}$$

$$S_{III} = \sum_i B_i^2 h_i \Delta_i (u/n), \quad \text{비점수차} \tag{12}$$

$$S_{IV} = H^2 \sum_i P_i, \quad \text{Petzval 상면만곡} \tag{13}$$

$$S_V = \sum_i \frac{B_i}{A_i} \{H^2 P_i + B_i^2 h_i \Delta_i (u/n)\}, \quad \text{왜곡수차} \tag{14}$$

$$C_L = \sum_i A_i h_i \Delta_i (\delta n/n), \quad \text{종색수차} \tag{15}$$

$$C_T = \sum_i B_i h_i \Delta_i (\delta n/n), \quad \text{횡색수차} \tag{16}$$

위의 식에서  $H$ 는 광학계의 Lagrange 불변량,  $A_i$ 는  $i$ -번째 면에서 (2)식의 marginal ray에 대한 굴절률변량이며,  $B_i$ 는 주광선의 굴절률변량으로

$$B_i = \frac{H}{h_i} (1 + h_i E_i A_i), \quad = \frac{1}{h_i} (H + h_i^{(p)} A_i) \\ E = \frac{h_i^{(p)}}{H h_i} \tag{17}$$

로 표현될 수 있으며,  $h_i^{(p)}$ 는  $i$ -번째면에서 주광선의 입사고이다. (14)식의  $P_i$ 는 면의 Petzval sum 기여분이며,

$$P_i = -c_i A_i \left(\frac{1}{n}\right) \tag{18}$$

식으로 주어진다. (15), (16) 식에서  $\delta n$ 는 청색 기준파장(보통의 경우 F-선)과 적색 기준파장(보통의 경우 C-선)의 굴절률 차이이다.

등가렌즈 변환을 통하여 광학계를 변환한 경우에는 3차수차를 계산하기 위한 parameter중에서 marginal ray의 굴절률변량  $A_i$ , 광학계의 Lagrange 불변량  $H$ , marginal ray의 근축각  $u_i$ 가 유지되며, marginal ray의 입사고  $h_i$ 와 주광선의 입사고  $h_i^{(p)}$ , 면의 곡률  $c_i$ 가 변화하게 된다. 따라서 변환된 렌즈군에서는 구면수차  $S_I$ 과 종색수차  $C_L$ 의 경우에는 marginal ray의 입사고  $h_i$ 의 변화에 따른 수차변화가 발생한다. 비축수차의 경우 주광선의 입사고  $h_i^{(p)}$ 의 변화에 따라 (17)식에서 주광선의 굴절률변량  $B_i$ 가 달라지게 되므로, 코마  $S_{II}$ , 비점수차  $S_{III}$ , 왜곡수차  $S_V$ 와 횡색수차  $C_T$ 는  $h_i$ 와  $B_i$ 의 변화에 따른 수차변화가 발생하게 된다. Petzval 상면만곡  $S_{IV}$ 는 곡률  $c_i$ 의 변화에 의하여 수차량이 변화한다. 변환되지 않은 렌즈군에서는 면의 곡률과 marginal ray가 변화하지 않으므로  $S_I$ ,  $C_L$ 과  $S_{IV}$ 은 변화하지 않는다. 반면에 주광선의 굴절률변량  $B_i$ 와 관련된 비축수차는 변환된 렌즈군 이후의 광학면에서도 주광선의 변화에 따른 수차량의 변화가 발생한다.

이상의 논의를 통하여 광학계의 일부군을 등가렌즈 변환을 통하여 렌즈의 두께를 변경시킨 경우에는 marginal ray의 입사고와 주광선의 변화에 따른 3차수차의 변화가 발생함을 알 수 있고, 등가렌즈 변환에서 두께의 변화가 크지 않다면 광학계의 3차수차의 변화는 크지 않을 것으로 생각된다.

III. 응용의 예와 검토

광학설계 실무에서는 설계목표와 유사한 기존설계를 사용 목적에 적합하도록 scaling하여 설계를 변경하여 사용하는 경우가 많다. 이때 초점거리를 scaling하는 과정에서 일부 렌

표 1. Telephoto lens계의 설계제원(JP 45-37385)<sup>[5]</sup>

면번호	곡률변경	면간거리	굴절율( $n_d$ )	분산상수( $\nu_d$ )
1	27.99000	4.000000	1.48749	70.0
2	-40.48000	1.580000		
3(stop)	-36.39000	1.320000	1.75520	27.5
4	17.25000	3.600000	1.78472	25.7
5	-219.73000	40.000000		
6	-15.23000	0.800000	1.71300	53.9
7	-32.20000	1.200000	1.78472	25.7
8	-24.05000			

efl=100.1520 mm  
bfl=28.6653 mm

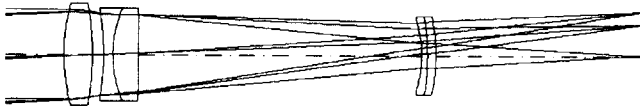


Fig. 2. Sample telephoto lens system (JP 45-37385, F/8, efl=100.15 mm, FOV=7°).

즈군의 두께가 너무 얇아지거나 또는 반대로 두꺼워지는 경우도 발생할 수 있으며, 이때 임의로 적절한 두께를 부여하게 되면 수차특성이 달라질뿐만 아니라 렌즈계의 근축광학적 특성도 변화하게 되어 이를 다시 조정해주어야 한다. 이러한 경우에 렌즈군의 등가렌즈변환은 매우 유용하게 사용될 수 있다.

표 2. 제1군의 축상두께를 줄인 렌즈계(Modified design)

면번호	곡률반경	면간거리
1	27.99000	3.000000
2	-40.48000	1.185000
3(stop)	-36.39000	0.990000
4	17.25000	2.700000
5	-219.73000	40.000000
6	-15.23000	0.800000
7	-32.20000	1.200000
8	-24.05000	

efl=108.1665 mm  
bfl=35.3807 mm

표 3. 등가렌즈변환을 이용하여 제1군의 두께를 줄인 렌즈계(Equivalent lens system)

면번호	곡률반경	면간거리
1	27.99000	3.000000
2	-40.97726	1.185000
3(stop)	-37.31718	0.990000
4	17.72947	2.700000
5	-227.45992	42.095020
6	-15.23000	0.800000
7	-32.20000	1.200000
8	-24.05000	

efl=100.1520 mm  
bfl=28.6645 mm

표 4. Telephoto lens계의 3차수차(F/8, efl=100.15 mm, FOV=7°)

(a) 각 면의 3차수차

No	$S_I$	$S_{II}$	$S_{III}$	$S_{IV}$	$S_V$	$C_L$	$C_T$
1	0.015422	-0.003518	0.000802	0.001716	-0.000574	0.006559	-0.001496
2	0.084589	0.018046	0.003850	0.001187	0.001074	0.009176	0.001958
3	-0.103460	-0.020694	-0.004139	-0.001733	-0.001174	-0.030403	-0.006081
4	0.003454	-0.000491	0.000070	0.000080	-0.000021	0.004365	-0.000621
5	0.005230	0.002936	0.001649	0.000293	0.001090	0.011189	0.006282
6	-0.007112	0.004080	-0.002341	-0.004005	-0.003641	-0.002942	0.001688
7	-0.000028	-0.000012	-0.000005	-0.000107	-0.000047	-0.001787	-0.000750
8	0.002058	-0.000333	0.000054	0.002679	-0.000443	0.004271	-0.000691

(b) 각 군의 3차수차

렌즈군	$S_I$	$S_{II}$	$S_{III}$	$S_{IV}$	$S_V$	$C_L$	$C_T$
제1군	0.005234	-0.003720	0.002232	0.001543	0.000395	0.000887	0.000042
제2군	-0.005082	0.003735	-0.002232	-0.001433	0.003151	-0.000457	0.000246
전체	0.000152	0.000015	-0.000060	0.000110	0.003546	0.000429	0.000288

### 3.1. Telephoto 렌즈계의 설계변경

본 연구에서는 2개의 렌즈군으로 구성된 telephoto lens계에서 앞부분 렌즈군의 두께를 등가렌즈 변환법을 사용하여 변경한 경우와 임의로 두께만을 변경시킨 경우에 대하여 3차수차와 유한광선수차의 변화를 비교하여 보았다. 설계변경의 예로 사용된 telephoto lens계의 설계제원<sup>[6]</sup>은 표 1에 나타나 있으며, 원래의 설계는 F/5.6, efl이 100.152 mm, 반시계각이 3.5°이며 수차가 잘 보정되어 있는 렌즈계이다. 이 렌즈계를 F/8에서 사용한다고 가정하면, Fig. 2에서 나타난 것과 같이 전반부 렌즈군(제1군)의 두께가 필요이상으로 두껍게 된다. 본 연구에서는 이 렌즈계를 F/8로 설계를 변경하는 경우로 가정하고 제1군의 두께를 원설계의 75%로 줄이는 과정에서 등가렌즈 변환을 적용하여 보았다. 표 2의 제원은 원래의 렌즈계에서 전반부 렌즈군의 두께만을 75%로 줄인 제원이며, efl은 108.167 mm로 늘어나고, bfl도 원래 설계의 28.665 mm에서 35.381 mm로 변화하여 efl, bfl 모두 8 mm 정도의 변화가 발생하였다. 표 3에는 등가렌즈변환을 사용하여 제1군의 두께를 변경한 설계제원이 나타나 있으며, 이 경우에는 전체광학계의 efl, bfl은 변화하지 않는다.

### 3.2. 설계변경에 따른 수차의 변화

표 4에는 원래의 telephoto lens계의 3차수차가 나타나 있으며, 이 설계는 3차수차가 잘 보정되어 있다. 표 5에는 임의로 제1군의 두께를 줄인 경우의 3차수차이다. 표 4의 원래의 렌즈계와 비교하면 왜곡수차  $S_V$ 와 종색수차  $C_L$ 를 제외한 다른 수차들은 전체적으로 증가하였으며, 각 군별로도 수차량의 절대값이 커지고 있음을 보여주고 있고, 특히 구면수차  $S_I$ 과 코마  $S_{II}$ 의 변화가 크다. 표 6에는 등가렌즈 변환을 이용하여 제1군의 두께를 변화시킨 경우의 3차수차이며, 변환되지 않는 제2군의 3차수차는 거의 변화하지 않았음을 알 수 있다. 표 6에서 제2군의 비축수차가 약간 변화한 것은 주광선의 변화에 기인한다. 등가렌즈 변환은 변환에 사용된 광선 1개에 대하여서만 굴절률변량과 근축각이 유지되기 때문에 변환된 렌즈군 뒤의 렌즈군에서는 주광선이 약간 변화하게 되며, 본 예에서는 조리개가 3면에 있기 때문에 등가렌즈 변환과정에

표 5. 축상두께를 줄인 렌즈계의 3차수차(F/8, efl=108.17 mm, FOV=7°)

(a) 각 면의 3차수차							
No	$S_I$	$S_{II}$	$S_{III}$	$S_{IV}$	$S_V$	$C_L$	$C_T$
1	0.020982	-0.004666	0.001038	-0.002002	-0.000676	0.007650	-0.001701
2	0.119218	0.022567	0.004272	0.001384	0.001071	0.010924	0.002068
3	-0.149943	-0.026701	-0.004755	-0.002021	-0.001207	-0.036882	-0.006568
4	0.005412	-0.000659	0.000080	0.000093	-0.000021	0.005419	-0.000660
5	0.007281	0.003722	0.001902	0.000342	0.001147	0.013490	0.006896
6	-0.013001	0.006152	-0.002911	-0.004672	0.003588	-0.004164	0.001970
7	-0.000039	-0.000015	-0.000006	-0.000125	-0.000050	-0.002387	-0.000909
8	0.003456	-0.000455	0.000060	0.003125	-0.000420	0.005943	-0.000783

(b) 각 군의 3차수차							
렌즈군	$S_I$	$S_{II}$	$S_{III}$	$S_{IV}$	$S_V$	$C_L$	$C_T$
제1군	0.002950	-0.005737	0.002538	0.001800	0.000314	0.000602	0.000034
제2군	-0.009585	0.005681	-0.002856	-0.001671	0.003119	-0.000609	0.000278
전체	-0.006634	-0.000056	-0.000319	0.000129	0.003433	-0.000007	0.000313

서 조리개의 이동에 의한 수차변화도 포함되어 있다. 표 6에서 제1군의 3차수차를 표 4의 원설계와 비교하면, 코마  $S_{II}$ 와 종색수차  $C_L$ 의 절대값은 증가하고 나머지 수차는 절대값이 줄어들었으나 원설계에서 제1군과 제2군이 이루고 있던 수차의 균형이 깨어짐에 따라 종색수차  $C_L$ 을 제외한 광학계 전체의 수차는 커지고 있음을 볼 수 있다. 표 5와 표 6의 수차를 비교하여 보면 임의로 두께를 바꾼 경우가 코마  $S_{II}$ 와 종색수

차  $C_L$ 가 적은 것으로 나타난다. 이 두 경우 모두 각 군별의 수차량은 변화하였으나 제1군과 제2군의 수차발생량이 균형을 이루게 된 경우로 유한광선수차를 살펴보면 임의로 두께를 변경한 경우에는 고차수차가 크게 발생하여 등가렌즈 변환의 경우보다 나쁜 수차특성을 가지고 있어, 전체적으로는 등가렌즈변환을 이용한 경우가 원설계의 수차특성이 크게 변화하

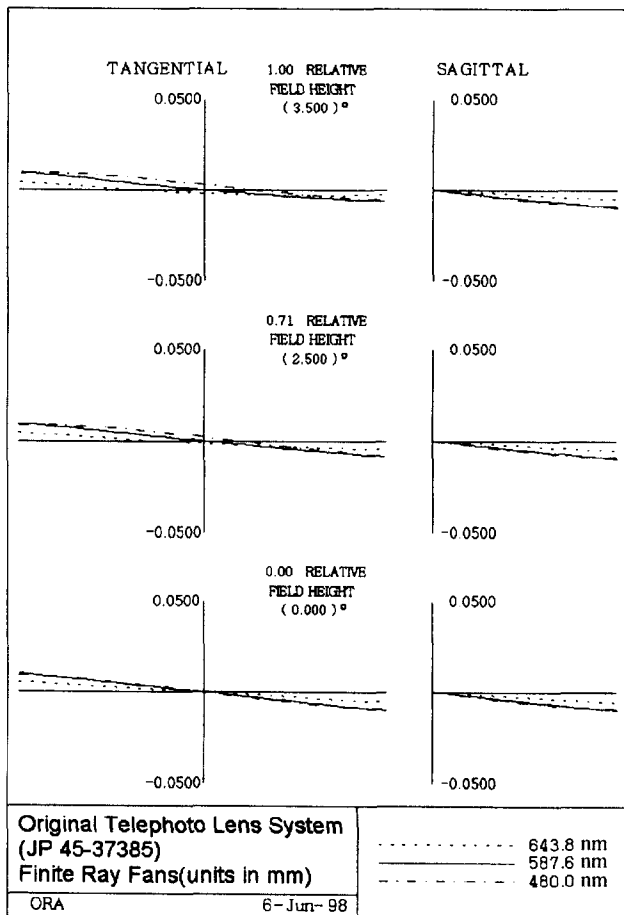


Fig. 3. Finite ray fans of the original design (F/8, efl=100.15 mm).

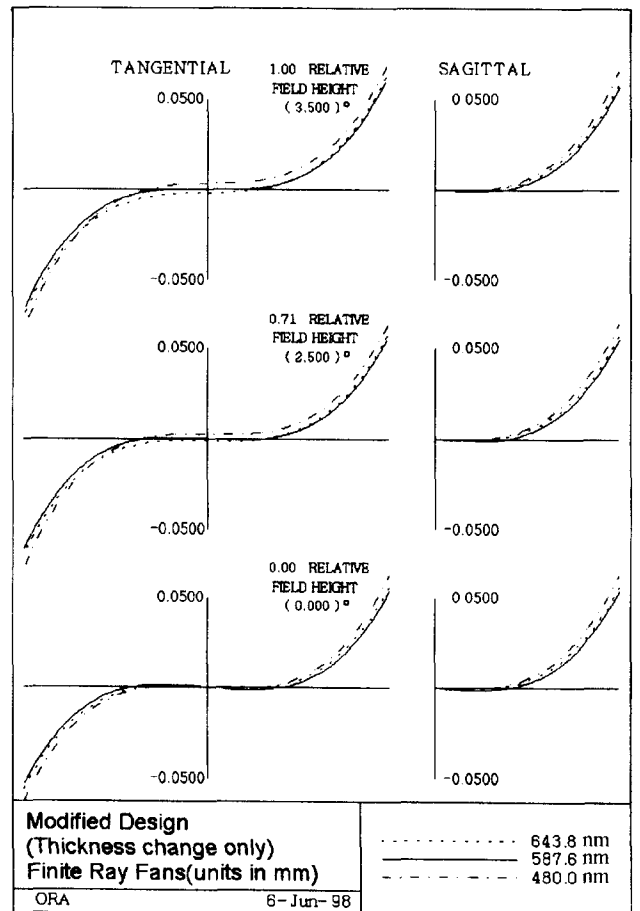


Fig. 4. Finite ray fans of the modified design (the thickness were changed. F/8, efl=108.17 mm).

표 6. 등가렌즈로 변화된 렌즈계의 3차수차(F/8, efl=100.15 mm, FOV=7°)

(a) 각 면의 3차수차							
No	S <sub>I</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>III</sub>	S <sub>IV</sub>	S <sub>V</sub>	C <sub>L</sub>	C <sub>T</sub>
1	0.015422	-0.003704	0.000890	0.001716	-0.000626	0.006559	-0.001575
2	0.085628	0.017640	0.003634	0.001172	0.000990	0.009289	0.001914
3	-0.106096	-0.020694	-0.004036	-0.001690	-0.001117	-0.031178	-0.006081
4	0.003550	-0.000483	0.000066	0.000078	-0.000020	0.004487	-0.000610
5	0.005414	0.002984	0.001645	0.000283	0.001063	0.011583	0.006384
6	-0.007112	0.004192	-0.002471	-0.004005	0.003818	-0.002942	0.001734
7	-0.000028	-0.000011	-0.000005	-0.000107	-0.000045	-0.001787	-0.000722
8	0.002058	-0.000366	0.000065	0.002679	-0.000488	0.004271	-0.000759

(b) 각 군의 3차수차							
렌즈군	S <sub>I</sub>	S <sub>II</sub>	S <sub>III</sub>	S <sub>IV</sub>	S <sub>V</sub>	C <sub>L</sub>	C <sub>T</sub>
제1군	0.003917	-0.004256	0.002198	0.001560	0.000291	0.000740	0.000031
제2군	-0.005082	0.003815	-0.002411	-0.001433	0.003285	-0.000457	0.000253
전체	-0.001165	-0.000441	-0.000213	0.000127	0.003576	0.000283	0.000285

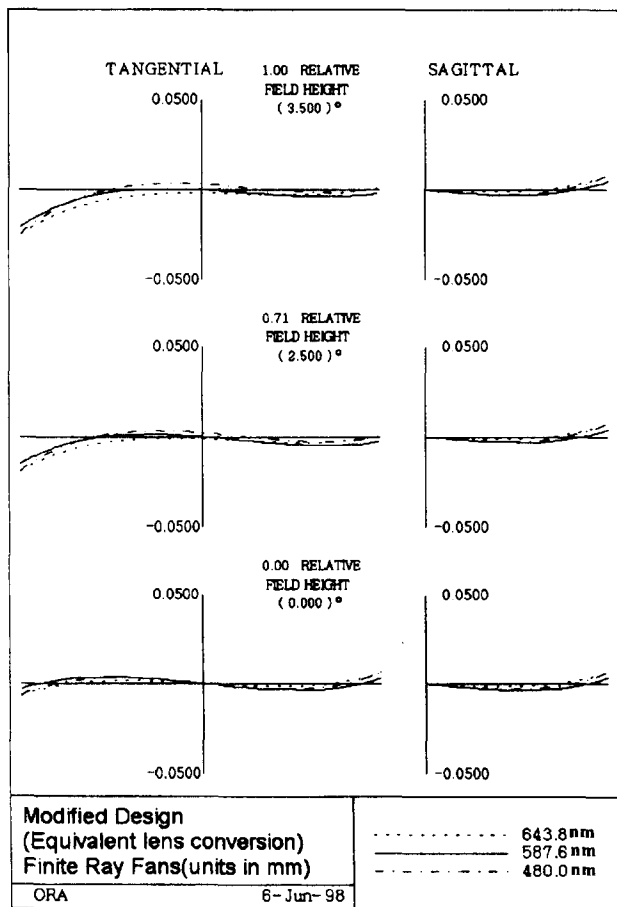


Fig. 5. Finite ray fans of the eqivalent lens system (F/8, efl=100.15 mm).

지 않고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에는 위의 3가지 예에 대한 ray fan이 나타나 있다. Fig. 3은 원설계의 ray fan으로 수차가 잘 보정되어 있다. Fig. 4는 임의로 두께를 바꾼 경우이며 고차수차가 크게 발생하여 있음을 볼 수 있고, Fig. 5는 등가렌즈변환을 이용한 경우로 고차수차가 원설계보다는 크게 발생하고 있는

나 임의로 두께를 변경한 것보다는 좋은 수차특성을 보여주고 있다.

#### IV. 결 론

본 연구에서는 두꺼운 렌즈계를 임의의 다른 두께를 가진 렌즈계로 변환시키는 방법이 연구되었으며, 단렌즈의 변환에 사용되던 등가렌즈 변환이 렌즈군의 변환에서도 마찬가지로 적용시킬 수 있음을 보였다. 본 연구에서 2개의 군으로 구성된 telephoto lens계의 설계변경에 등가렌즈 변환법을 적용하였으며, 임의로 두께를 변경시킨 경우와 비교하여 광학계의 수차특성의 변화가 적음을 확인할 수 있었다.

등가렌즈 변환을 렌즈군의 변환에 적용하면 축상 두께를 부여하는 방법에 따라 곡률이 약간씩 다른 두꺼운 렌즈계를 얻을 수 있고, 이 렌즈계들은 근축각, 굴절률변량, 주요면에서의 입사각이 모두 같기 때문에 근축광학적 특성이 같고 수차특성이 유사하게 된다. 이것은 등가렌즈 변환이 광학계의 기초설계 뿐만 아니라 광학계의 특성 파악과 복합렌즈계에서 일부 렌즈군만을 변경시키는 경우에도 매우 유용하게 사용될 수 있음을 보여주고 있다.

본 연구에서 연구된 렌즈군의 등가렌즈 변환은 여러 개의 군으로 구성된 복합광학계의 설계에 매우 유용한 것으로 생각되며, 실제적인 설계에의 적용방법은 앞으로 계속 연구될 예정으로 있다.

#### 참고문헌

- [1] 三宅和夫 譯, 렌즈設計의原理 (講談社, 東京, 1970) pp. 99-107.
- [2] 松居吉哉, 렌즈設計法 (共立出版株, 東京, 1972) pp. 114-128.
- [3] 이종용, 김건수, 한국광학회지, 7(4), 305 (1996).
- [4] 이상수, 기하광학(교학사, 서울, 1985) Chap 4.
- [5] H. H. Hopkins, Wave Theory of Aberration (oxford, London, 1950) pp. 76-105.
- [6] JP 45-37385, Lens Design Data 1970-1977 (日本 光學工業振興協會, 1977), pp. 19.

## **Generalized lens group conversion to their equivalent lenses**

Jong Ung Lee

*Dept. of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea*

Sung Chan Park

*Dept. of Physics, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea*

(Received March 4, 1998, Revised manuscript received June 25, 1998)

The equivalent lens conversion is extended to lens group conversion, and the more generalized conversion method is developed. The new conversion method can be used for the direct thick-to-thick lens conversion. By using the equivalent lens conversion, a thin lens system can be converted into various thick lens systems which have different axial thicknesses, but those converted lens systems have identical paraxial property and similar aberration characteristic. For an example, the equivalent lens conversion technique is applied to modification of a telephoto lens design. The axial thicknesses of the front group elements of the system are reduced to 75% of their original values. The modified design by using the equivalent lens conversion has same focal length with original design, and it has smaller aberration changes than the other design of which axial thicknesses are changed only.