

등가렌즈 변환의 일반화와 일반화된 등가렌즈의 3차수차식*

이 종 용

청주대학교 광학공학과

김 건 수

삼성전자주식회사 디지털미디어본부

(1996년 7월 1일 받음)

지금까지 광학설계에서 사용되던 등가렌즈 변환은 렌즈가 공기중에 있다는 전제조건하에서 유도되었기 때문에 접합렌즈계의 설계에서 부적절한 해를 얻는 경우가 있었다. 본 연구에서는 두꺼운 렌즈에서 등가렌즈로의 변환 및 이의 역변환과정을 어떠한 전제조건도 사용하지 않도록 일반화하였으며, 일반화된 등가렌즈에 대한 3차수차식을 유도하였다. 일반화된 등가렌즈 변환을 2매 접합렌즈와 3매 접합렌즈의 변환에 적용시켜 본 결과, 일반화된 등가렌즈 변환이 두꺼운 렌즈의 3차수차를 잘 근사하고 있음을 확인하였다.

I. 서 론

광학계의 설계에서는 설계사양을 고려하여 단렌즈 또는 렌즈군 단위로 굴절능을 결정하고, 이를 두꺼운 렌즈로 변환하면서 3차수차를 보정하여 초기설계를 얻은 후에, 최적화기법을 이용하여 유한광선수차와 ray fan을 보정하는 방법이 많이 사용되고 있다. 광학계의 초기설계에서 사용되는 렌즈, 반사경의 매수가 적을 경우에는 해석적인 3차수차의 보정이 가능하다. 그러나 렌즈 매수가 많은 경우에는 3차수차의 근사식을 이용하여 수차를 보정하고 있으며, $y-\bar{y}$ diagram^[1], G-sum^[2], 또는 등가렌즈의 3차수차식^[3-5]이 사용되고 있다.

등가렌즈를 사용하는 초기설계법에서는 단렌즈를 축상두께가 0인 얇은 렌즈로 가정하여 얇은 렌즈계의 3차수차를 보정한 후, 이를 굴절불변량($A=ni=n'i'$, 근축광학에서의 Snell 법칙)과 굴절능이 같은 두꺼운 렌즈로 변환시키는 방법이 사용되고 있다^[3,4]. 등가렌즈는 양면의 곡률반경과 재질의 굴절율이 주어지고 축상두께가 0이라는 점에서는 얇은 렌즈와 같다. 등가렌즈는 축상두께를 부여하면 전체굴절능, 굴절불변량과 근축각, 주요면(principal plane)에서 광선의 높이가 같은 두꺼운 렌즈와 1:1 대응되며, 곡률반경과 굴절면에 입사한 높

이만이 약간 다르다^[3]. 반면에 두께만을 0으로 근사한 보통의 얇은 렌즈는 전체굴절능, 굴절불변량, 근축각등 근축광학적 특성이 실제의 두꺼운 렌즈와 다르다. 광학계의 3차수차는 marginal ray의 굴절불변량 A , 입사고 h , 근축각 u 의 함수로 주어지기 때문에 등가렌즈와 두꺼운 렌즈의 3차수차는 거의 같다. 또한, 등가렌즈를 이용한 기초설계법은 렌즈군을 단렌즈로 가정하여 수차를 배분하고, 각 렌즈군의 설계에서 이를 다시 단렌즈로 분배하여 수차를 보정하는 방식의 설계가 가능하다는 장점이 있다.

지금까지 사용되고 있는 등가렌즈와 두꺼운 렌즈간의 변환법은 렌즈가 공기중에 있다는 전제하에서 유도되었다. 접합렌즈의 경우에는 접합면에 두께 0인 공기층을 추가하여 air-spaced doublet으로 가정하여 두꺼운 렌즈를 등가렌즈로 변환하고 있으며, 설계에서는 2매의 등가렌즈 사이에 두께 0의 공기층이 있다고 가정하여 수차를 보정하고, 두꺼운 렌즈로 변환하고 있다^[3]. 렌즈가 접합되기 위하여서는 두꺼운 렌즈로 변환되었을 때, 접합면간의 거리가 0이 되어야 하며, 양면의 곡률반경이 같아야 한다. 기존의 방법으로는 등가렌즈를 설계하여 두꺼운 렌즈로 변환하는 경우, 이 접합조건을 만족시키기 가 매우 어렵다. 본 연구에서는 렌즈가 공기중에 놓여있다는 조건을 사용하지 않도록 등가렌즈 변환법을 일반화하였으며, 일반화된 등가렌즈의 3차수차식을 유도하였다.

*본 연구는 청주대학교 교비연구비의 지원으로 수행된 것임.

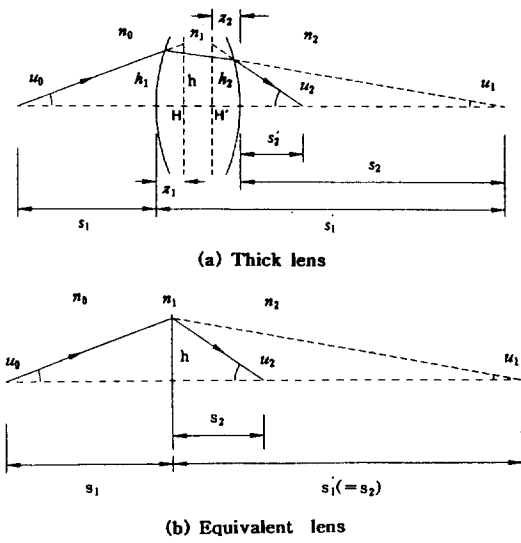


그림 1. 두꺼운 렌즈의 등가렌즈 변환.

II. 일반화된 등가렌즈 변환

1. 두꺼운 렌즈의 등가렌즈 변환

두꺼운 렌즈의 등가렌즈 변환에서는 두꺼운 렌즈의 제 1주요점과 제 2주요점에 등가렌즈의 제 1면과 제 2면이 놓인다고 가정하여, 굴절률변량과 근축각이 서로 같도록 등가렌즈의 곡률반경을 설정한 후, 등가렌즈의 면간거리를 0으로 둔다. 근축광선추적에서 주요면간의 거리는 0으로 설정하여도 광선추적결과는 동일하므로, 등가렌즈로의 변환은 이 성질을 이용하고 있다.

그림 1(a)에서 두꺼운 렌즈 제 1면에서 광선의 굴절과 굴절률변량 A_1 은

$$n_1 u_1 - n_0 u_0 = h_1 c_1 (n_1 - n_0) \tag{1}$$

$$A_1 = n_0 (h_1 c_1 - u_0) \tag{2}$$

로 주어지며, 두꺼운 렌즈 제 1면에서 n_0 은 입사측 매질의 굴절률, n_1 은 굴절후 매질의 굴절률, h_1, c_1 은 근축광선의 입사고와 면의 곡률이다. 그림 1(b)에서 등가렌즈 제 1면의 입사고를 h 곡률을 c_1 이라고 하면, 등가렌즈와 두꺼운 렌즈의 근축각과 굴절률변량이 같을 조건은

$$h_1 c_1 (n_1 - n_0) = h c_1 (n_1 - n_0) \tag{3}$$

$$n_0 (h_1 c_1 - u_0) = n_0 (h c_1 - u_0) \tag{4}$$

가 된다. 등가렌즈 변환에서 근축각 u_0, u_1 과 굴절률 n_0, n_1 는 변화하지 않으므로,

$$h_1 c_1 = h c_1 \tag{5}$$

이면, (3), (4)식의 조건이 동시에 만족된다. 등가렌즈의 제 1면이 두꺼운 렌즈의 제 1주요면에 있다고 두면, 두꺼운 렌즈의 제 1면에서 제 1주요면까지의 거리 z_1 과 제 1주요면에서 광선의 입사고 h 는

$$z_1 = \frac{n_0 d k_2}{n_1 K_T} \tag{6}$$

$$h = h_1 - z_1 u_0 \tag{7}$$

로 주어지며, (6)식에서 k_1 은 두꺼운 렌즈 제 1면의 굴절능, K_T 는 두꺼운 렌즈 전체의 굴절능, d 는 두꺼운 렌즈의 축상 두께이다. 등가렌즈에서는 두께가 0이므로 제 1면과 제 2면에서 광선의 입사고는 같고, 등가렌즈 제 2면의 곡률 c_2 는

$$h_2 c_2 = h c_2 \tag{8}$$

의 조건을 얻어진다. 두꺼운 렌즈 제 2면에서 제 2주요점까지의 거리 z_2 는

$$z_2 = -\frac{n_2 d k_1}{n_1 K_T} \tag{9}$$

이며, 등가렌즈의 물체거리 s_1 과 상거리 s'_2 는

$$s_1 = s_1 - z_1, \quad s'_2 = s'_2 - z_2$$

로 변환된다.

일반화된 등가렌즈 변환과 기존의 변환방법(공기중에 있는 단렌즈의 변환)과 비교하면, 참고문헌 [3]에서는 근축각의 유지조건으로

$$u_1 - u_0 = h_1 \left(\frac{1}{s'_1} - \frac{1}{s_1} \right) = h \left(\frac{1}{s'_1} - \frac{1}{s_1} \right)$$

가 사용되었으나, 본 연구에서는 (3)식이 근축각의 유지조건으로 사용되었다는 점이 다르며, 최종적으로 유도된 (5)~(9)식의 변환식은 동일하다.

2. 등가렌즈의 두꺼운 렌즈 변환

등가렌즈를 두꺼운 렌즈로 변환하는 과정에서는 두꺼운 렌즈의 등가렌즈 변환과는 달리 주요점의 위치가 렌즈의 정점에 있게 되므로 (5)식과 (8)식이 사용될 수 없고, 변환조건이 만족되도록 수치해법을 사용하여 반복적인 과정을 통하여 변환된다. 등가렌즈의 두꺼운 렌즈 변환에서는 단렌즈의 굴절능과 면의 근축각, 굴절률변량은 보존된다. 따라서 단렌즈 전체의 굴절능 K 는

$$K = c_1(n_1 - n_0) + c_2(n - n_1) \quad (10)$$

로 주어진다. 초기치로서 두께가 d 인 두꺼운 렌즈에서 제 2면의 곡률이 등가렌즈의 2면과 같다고 두면, 제 2면의 굴절능 k_2 는

$$k_2 = c_2(n_2 - n_1) \quad (11)$$

이며, 제 1주요점의 위치 z_1 과 두꺼운 렌즈의 제 1면에서 광선이 입사하는 높이 h_1 은

$$z_1 = \frac{n_0 d k_2}{n_1 K} \quad (12)$$

$$h_1 = h + z_1 u_1 \quad (13)$$

이 된다. 두꺼운 렌즈의 제 1면 곡률 c_1 과 굴절능 k_1 은 (5)식에서

$$c_1 = \frac{h}{h_1} c_1 \quad (14)$$

$$k_1 = c_1(n_1 - n_0) \quad (15)$$

로 주어지고, 근축광선추적에서 두꺼운 렌즈의 제 2면 입사고 h_2 는 $h_2 = h_1 - d_1 u_1$ 가 된다. 두꺼운 렌즈 제 2면의 곡률 c_2 와 굴절능 k_2 는 (8)식에서

$$c_2 = \frac{h}{h_2} c_2 \quad (16)$$

$$k_2 = c_2(n_2 - n_1) \quad (17)$$

가 된다. 등가렌즈가 1:1 대응되는 두꺼운 렌즈로 변환된 경우에는 두꺼운 렌즈의 전체굴절능 K_T 가 (10)식의 등가렌즈의 전체굴절능 K 와 같아야 한다.

$$K_T = k_1 + k_2 - \frac{d}{n_1} k_1 k_2 = K \quad (18)$$

등가렌즈의 두꺼운 렌즈변환에서 1회 계산에서는 위의 조건을 만족하지 않으며, (17)식의 k_2 를 다시 초기치로 사용하여 (12)식에서 (17)식까지의 과정을 반복하면, (18)식의 조건을 만족하는 해로 수렴하게 된다.

III. 일반화된 등가렌즈의 3차수차

1. 광학면의 3차수차

그림 2에서와 같이 물체측 매질의 굴절율이 n_0 , 상측 매질의 굴절율이 n_1 인 광학면의 3차수차계수는 다음과 같이 주어진다^[6].

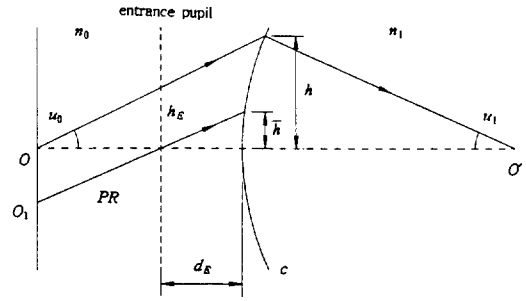


그림 2. 광학면에서의 근축광선의 굴절.

$$S_I = A^2 h \Delta(u/n) \quad (19)$$

$$S_{II} = AB h \Delta(u/n) \quad (20)$$

$$S_{III} = B^2 h \Delta(u/n) \quad (21)$$

$$S_{IV} = H^2 P \quad (22)$$

$$S_V = \frac{B}{A} [H^2 P + B^2 h \Delta(u/n)] \quad (23)$$

$$C_L = Ah \Delta(\delta n/n) \quad (24)$$

$$C_T = Bh \Delta(\delta n/n) \quad (25)$$

윗식에서 A, B 는 근축광선의 굴절불변량과 주광선의 굴절불변량이며, P 는 면의 Petzval 상면만곡, H 는 Lagrange 불변량이다. 그림 2에서 A, B, P 를 광선의 입사고 h 와 입사광선의 근축각 u_0 , 굴절된 광선의 근축각 u_1 으로 표현하면^[6]

$$A = n_0(ch - u_0) = n_1(ch - u_1) = \frac{n_1 n_0 (u_1 - u_0)}{(n_1 - n_0)} \quad (26)$$

$$B = \frac{H}{h} (1 + AEh) \quad (27)$$

$$P = -c \Delta(1/n) = \frac{(n_1 u_1 + n_0 u_0)}{n_1 n_0 h} \quad (28)$$

으로 주어진다. (27)식에서 E 는

$$E = \frac{\dot{h}}{Hh} \quad (29)$$

로 정의되었으며, \dot{h} 는 주광선이 굴절면에 입사한 높이이다. 그림 2에서와 같이 입사동에서 광학면까지의 거

리를 d_E , 입사동에서 근축광선의 입사고를 h_E 라 하면

$$E = \frac{d_E}{n_0 h_E h} \quad (30)$$

로 주어진다. (19)~(25)식의 $\Delta(u/n)$ 과 $\Delta(\delta n/n)$ 은 다음과 같다.

$$\Delta(u/n) = \frac{u_1}{n_1} - \frac{u_0}{n_0} \quad (31)$$

$$\Delta(\delta n/n) = \frac{\delta n_1}{n_1} - \frac{\delta n_0}{n_0} = \gamma_1 - \gamma_0 \quad (32)$$

(32)식에서 γ_n 는

$$\gamma = \frac{n-1}{nv}$$

로 쓸 수 있고, v 는 매질의 분산상수이다.

조리개가 굴절면에 있는 경우에는 (29)식에서 $E=0$ 이므로, 면의 3차수차계수는 다음과 같이 주어지게 된다.

$$S_I^0 = \frac{n_1 n_0 h}{(n_1 - n_0)^2} [n_0 u_1^3 - (2n_0 + n_1) u_0 u_1^2 + (n_0 + 2n_1) u_0^2 u_1 - n_1 u_0^3] \quad (33)$$

$$S_{II}^0 = \frac{H}{(n_1 - n_0)} [n_0 u_1^2 - (n_1 + n_0) u_0 u_1 + n_1 u_0^2] \quad (34)$$

$$S_{III}^0 = \frac{H^2}{n n_0 h} (n_0 u_1 - n_1 u_0) \quad (35)$$

$$S_{IV}^0 = \frac{H^2}{n n_0 h} (n_1 u_1 - n_0 u_0) \quad (36)$$

$$S_V^0 = \frac{H^3}{n_1^2 n_0^2 h^2} (n_1^2 - n_0^2) \quad (37)$$

$$C_L^0 = \frac{n_1 n_0 (\gamma_1 - \gamma_0) h}{n_1 - n_0} (u_1 - u_0) \quad (38)$$

$$C_T^0 = H(\gamma_1 - \gamma_0) \quad (39)$$

조리개가 굴절면에 없는 경우에는 (27)식에서 B 만이 조리개의 위치에 따라 변화되는 물리량이므로 3차수차계수는 다음과 같이 주어지게 된다^[7].

$$S_I = S_I^0 \quad (40)$$

$$S_{II} = S_{II}^0 + (HE)S_I^0 \quad (41)$$

$$S_{III} = S_{III}^0 + 2(HE)S_{II}^0 + (HE)^2 S_I^0 \quad (42)$$

$$S_{IV} = S_{IV}^0 \quad (43)$$

$$S_V = S_V^0 + (HE)(S_{IV}^0 + 3S_{III}^0) + 3(HE)^2 S_{II}^0 + (HE)^3 S_I^0 \quad (44)$$

$$C_L = C_L^0 \quad (45)$$

$$C_T = C_T^0 + (HE)C_L^0 \quad (46)$$

2. 등가렌즈의 3차수차

등가렌즈에서는 렌즈의 축상두께가 0이므로 렌즈의 앞면(1면)과 뒷면(2면)에서 근축광선과 주광선의 입사고가 같다. 그림 1(b)와 같이 등가렌즈의 2면에서 굴절된 광선의 근축각을 u_2 , 상측매질의 굴절율을 n_2 라 하면, 2면의 3차수차계수는 (33)~(39)식과 동일한 형태가 된다. 양면의 3차수차를 서로 더하면 등가렌즈의 3차수차가 얻어지며, 조리개가 등가렌즈에 있는 경우에 대한 3차수차계수는 다음과 같다.

$$S_I^0 = h \left[\left\{ \frac{n_1 n_0^2}{(n_1 - n_0)^2} - \frac{n_2^2 n_1}{(n_2 - n_1)^2} \right\} u_1^3 - \left\{ \frac{n_1 n_0 (n_1 + 2n_0) u_0}{(n_1 - n_0)^2} - \frac{n_2 n_1 (2n_2 + n_1) u_2}{(n_2 - n_1)^2} \right\} u_1^2 + \left\{ \frac{n_1 n_0 (2n_1 + n_0) u_0^2}{(n_1 - n_0)^2} - \frac{n_2 n_1 (n_2 + 2n_1) u_2^2}{(n_2 - n_1)^2} \right\} u_1 - \left\{ \frac{n_1^2 n_0 u_0^3}{(n_1 - n_0)^2} - \frac{n_2 n_1^2 u_2^3}{(n_2 - n_1)^2} \right\} \right] \quad (47)$$

$$S_{II}^0 = H \left[\left\{ \frac{n_0}{(n_1 - n_0)} + \frac{n_2}{(n_2 - n_1)} \right\} u_1^2 - \left\{ \frac{(n_1 + n_0) u_0}{(n_1 - n_0)} + \frac{(n_2 + n_1) u_2}{(n_2 - n_1)} \right\} u_1 + \left\{ \frac{n_1 u_0^2}{(n_1 - n_0)} + \frac{n_1 u_2^2}{(n_2 - n_1)} \right\} \right] \quad (48)$$

$$S_{III}^0 = \frac{H^2}{h} \left[\left\{ \frac{(n_1 + n_0)}{n_1 n_0} - \frac{(n_2 + n_1)}{n_2 n_1} \right\} u_1 - \left\{ \frac{(n_1 + n_0) u_0}{n_1 n_0} - \frac{(n_2 + n_1) u_2}{n_2 n_1} \right\} \right] \quad (49)$$

$$S_{IV}^0 = \frac{H^2}{h} \left\{ \frac{(n_2 - n_0)}{n_2 n_0} u_1 - \frac{1}{n_1} (u_0 - u_2) \right\} \quad (50)$$

$$S_V^0 = \frac{H^3}{h^2} \left(\frac{1}{n_0^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) \quad (51)$$

$$C_L = h \left[\left\{ \frac{n_1 n_0 (\gamma_1 - \gamma_0)}{n_1 - n_0} - \frac{n_2 n_1 (\gamma_2 - \gamma_1)}{n_2 - n_1} \right\} u_1 - \left\{ \frac{n_1 n_0 (\gamma_1 - \gamma_0) u_0}{n_1 - n_0} - \frac{n_2 n_1 (\gamma_2 - \gamma_1) u_2}{n_2 - n_1} \right\} \right] \quad (52)$$

$$C_T = H(\gamma_2 - \gamma_0) \quad (53)$$

광학계의 설계에서 단렌즈를 얇은 렌즈로 가정하여 굴절능이 결정되면, 굴절능 배치에 대한 광선추적에서 각각의 얇은 렌즈에 대한 광선의 입사각과 근축각이 주어지게 된다. 각각의 얇은 렌즈에서는 그림 1(b)의 u_0 , u_2 , h 는 이미 결정되어 있으므로, 등가렌즈의 3차수차계수는 (u_1, n_1, γ_1) 의 함수로 주어지게 된다. 또한 (u_0, u_1, u_2) 는 등가렌즈의 물체거리를 s_1 , 상거리를 s_2' , 렌즈 제 1면의 상거리를 s_1' 이라고 하면

$$u_0 = \frac{h}{s_1}, \quad u_1 = \frac{h}{s_1'}, \quad u_2 = \frac{h}{s_2'}$$

으로 표현하는 것이 가능하다. 따라서 굴절능 배치에서 등가렌즈의 굴절능 K 와 물체거리 s_1 이 주어지고 렌즈 재질이 선정되면, 등가렌즈의 3차수차는 단지 s_1' 의 함수로 주어지게 되므로 두꺼운 렌즈에 비하여 해석적인 3차수차의 보정이 용이하다.

IV. 등가렌즈 변환 결과의 비교 및 검토

본 연구에서 논의된 일반화된 등가렌즈 변환법과 기존의 등가렌즈 변환법을 비교하기 위하여 2매 접합렌즈와 3매 접합렌즈를 등가렌즈로 변환하고 3차수차를 비교하였다.

1. 2매 접합렌즈의 변환

표 1의 접합렌즈는 미국 Melles Griot Ltd.에서 시판하고 있는 물색화 렌즈 01LAO366를 파장 546.1 nm에서 초점거리가 1이 되도록 규격화한 설계제원이다. 이 렌즈의 조리개는 제 1면에 있다고 가정하고, $F/12.5$ 에서 무한물체점에 대한 3차수차를 계산하였고, Lagrange 불변량 H 는 1로 규격화 하였다.

기존의 등가렌즈 변환법에서는 접합면에 두께 0의 공기층이 있다고 가정하여 변환하므로 접합렌즈는 2매의 등가렌즈로 변환된다. 그러나 본 연구에서 연구된 일반화된 변환법은 두께 0의 공기층을 가정할 필요가 없으므로 2매 접합렌즈는 등가렌즈 1매와 굴절면 1면으로 변환된다. 표 2에는 일반화된 등가렌즈 변환법을 사용

표 1. 2매 접합렌즈의 설계제원(Melles Griot, 01LAO 366).

면번호	곡률	면간거리	굴절율(n_r)	분산상수(v_r)
1	1.47245	0.005	1.62032	54.86
2	-2.22514	0.005	1.69416	34.94
3	-0.36263			

EFL=1.00000($F/12.5$, 546.1 nm), BFL=0.99496

표 2. 2매 접합렌즈에서 변환된 등가렌즈계의 제원 (a) 등가렌즈계 ED-1(첫번째 렌즈를 일반화된 등가렌즈로 변환)

면번호	곡률	면간거리	굴절율	비고
1	1.47245	0	1.62032	등가렌즈
2	-2.21887	0.011371	1.69416	
3	-0.36263			굴절면

(b) 등가렌즈계 ED-2(두번째 렌즈를 일반화된 등가렌즈로 변환)

면번호	곡률	면간거리	굴절율	비고
1	1.47245	0.018751	1.62032	굴절면
2	-2.24257	0	1.69416	등가렌즈
3	-0.36466			

(c) 등가렌즈계 ED-3(접합면에 공기층을 가정).

면번호	곡률	면간거리	굴절율	비고
1	1.47245	0	1.62032	등가렌즈
2a	-2.21887	0.000656	1	공기
2b	-2.22221	0	1.69416	등가렌즈
3	-0.36135			

* 두꺼운 렌즈계 제2면의 굴절능이 2개의 굴절면으로 분배됨.

하여 앞의 렌즈를 등가렌즈로 변환한 등가렌즈계 ED-1, 뒤의 렌즈를 등가렌즈로 변환한 ED-2, 기존의 방법으로 접합면에 두께 0의 공기층을 가정하며 2매의 등가렌즈로 변환한 ED-3의 변환결과가 나타나 있으며, 각 변환방법은 그림 3에 나타내었다. 물체가 무한대에 있는 경우, 제 1면에서는 축상물체점에서 출사한 근축광선의 입사각과 주요면에 입사하는 높이가 같기 때문에 두꺼운 렌즈계의 제 1면과 등가렌즈계의 제 1면의 곡률과 수차는 같다.

표 3에는 두꺼운 렌즈계와 변환된 등가렌즈계에서 계산된 3차수차를 정리하였다. 먼저 표 3(c)의 전체 광학계의 3차수차를 살펴보면, 단색수차의 경우에는 일반화된

변환법을 사용하여 변환된 등가렌즈계 ED-1과 ED-2가 기존의 방법으로 변환된 ED-3 보다 변환에 따른 수차의 변화가 적은 것으로 나타나고 있다. 색수차의 경우에는

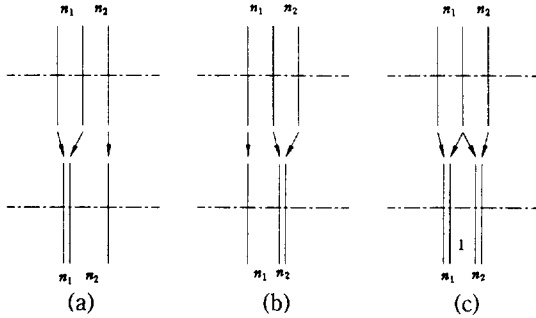


그림 3. 2매 접합렌즈의 등가렌즈 변환.

- (a) 첫 번째 렌즈를 일반화된 등가렌즈로 변환 (ED-1),
- (b) 두 번째 렌즈를 일반화된 등가렌즈로 변환 (ED-2),
- (c) 접합면에 두께 0의 공기층을 가정하여 2매의 등가렌즈로 변환(ED-3).

표 3. 2매 접합렌즈의 3차수차
(a) 제 2면의 3차수차

렌즈계	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V	C_L	C_T
THK*	-7.2025e-05	2.4683e-03	-8.4591e-02	-5.9854e-02	4.9502e+00	-1.8025e-04	6.1773e-03
ED-1	-7.2229e-05	2.5032e-03	-8.6750e-02	-5.9685e-02	5.0749e+00	-1.8076e-04	6.2645e-03
ED-2	-7.1465e-05	2.3726e-03	-7.8766e-02	-6.0323e-02	4.6176e+00	-1.7885e-04	5.9377e-03
ED-3	-6.9692e-05	2.3301e-03	-7.7804e-02	-6.1053e-02	4.6642e+00	-1.8019e-04	6.2253e-03

*두꺼운 렌즈계

(b) 제 3면의 3차수차

렌즈계	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V	C_L	C_T
THK*	5.5759e-05	-6.3819e-03	7.3044e-01	1.4858e-01	-1.0061e+02	1.1475e-04	-1.3134e-02
ED-1	5.5759e-05	-6.3760e-03	7.2909e-01	1.4858e-01	-1.0036e+02	1.1475e-04	-1.3122e-02
ED-2	5.5449e-05	-6.3334e-03	7.2342e-01	1.4942e-01	-9.9697e+02	1.1411e-04	-1.3034e-02
ED-3	5.5957e-05	-6.4290e-03	7.3865e-01	1.4806e-01	-1.0188e+02	1.1516e-04	-1.3231e-02

*두꺼운 렌즈계

(c) 2매 접합렌즈 전체의 3차수차

렌즈계	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V	C_L	C_T
THK*	1.4629e-05	-6.3513e-04	9.9375e-01	6.5244e-01	1.0794e+00	2.6292e-07	2.1666e-05
ED-1	1.4425e-05	-5.9441e-04	9.9024e-01	6.5261e-01	1.4512e+00	-2.4656e-07	1.2095e-04
ED-2	1.4878e-05	-6.8245e-04	9.9255e-01	6.5280e-01	1.6588e+00	1.0252e-06	-1.1831e-04
ED-3	1.7159e-05	-8.2051e-04	1.0087e-00	6.5072e-01	-4.7428e-01	7.3426e-07	-2.7337e-05

*두꺼운 렌즈계

등가렌즈계에서 계산된 수차와 두꺼운 렌즈계에서 계산된 수차가 다르게 나타나고 있다. 이것은 이 렌즈계가 몰색화되어 색수차가 적고, 등가렌즈 변환의 오차가 실제의 색수차보다 크기 때문에 나타난 것으로 이해된다. 표 3(a)와 표 3(b)에 나타나 있는 제 2면과 제 3면의 수차를 살펴보면, 굴절면 단위로는 등가렌즈가 두꺼운 렌즈의 3차수차를 잘 근사하고 있다. 표 3(a)에서 기존의 변환방법을 사용한 등가렌즈계 ED-3의 경우는 두꺼운 렌즈의 2면이 등가렌즈에서는 2개의 면으로 굴절능이 분배되었으므로, 이 두면의 수차를 합하여 두꺼운 렌즈의 경우와 비교하였다. 제 2면과 제 3면의 3차수차의 비교에서도 본 연구에서 연구된 일반화된 변환방법을 사용한 등가렌즈계 ED-1과 ED-2가 기존의 방법보다 변환과정에서 생기는 수차의 변화가 적음을 알 수 있다.

2. 3매 접합렌즈의 변환

3매 접합렌즈의 경우에는 기존의 방법을 사용할 경우에는 공기층에 있는 3매의 등가렌즈로 변환되지만, 일반화된 변환법에서는 2매의 등가렌즈로 변환되는 장

표 4. 3매 접합렌즈의 설계제원(Melles Griot, 01LAT013).

면번호	곡률	면간거리	굴절율(n_d)	분산상수(ν_d)
1	1.23457	0.06	1.64769	33.85
2	2.48139	0.39	1.51680	64.17
3	-2.48139	0.06	1.64769	33.85
4	-1.28457			

EFL = 1.13628($F/1.6$, 587.6 nm), BFL = 0.95304

표 5. 3매 접합렌즈에서 변환된 등가렌즈계의 제원.
(a) 등가렌즈계 ET-1(첫번째, 세번째 렌즈를 등가렌즈로 변환)

면번호	곡률	면간거리	굴절율	비고
1	1.23457	0	1.64769	등가렌즈
2	2.40914	0.572396	1.51680	
3	-2.56980	0	1.64769	등가렌즈
4	-1.26704			

(b) 등가렌즈계 ET-2(접합면에 공기층을 가정)

면번호	곡률	면간거리	굴절율	비고
1	1.23457	0	1.64769	등가렌즈
2a	2.40914	0.115664	1	air
2b	2.21430	0	1.51680	등가렌즈
3a	-1.93030	0.115664	1	air
3b	-2.31693	0	1.64769	등가렌즈
4	-1.25184			

* 두꺼운 렌즈계 제 2, 3면의 굴절능을 각각 2개의 굴절면으로 분배

점이 있기 때문에 일반화된 등가렌즈 변환법이 매우 유용하리라고 생각된다. 3매 접합렌즈의 등가렌즈 변환에서는 Melles Griot사의 3매 접합렌즈 01LAT013을 예로서 사용하였으며, 표 4의 설계제원은 실제 렌즈를 1/20로 축소한 제원이며, $F/1.6$ 에서 무한물체점에 대한 3차수차를 계산하여 비교하였고, Lagrange 불변량 H 는 1로 규격화하였다. 표 5의 설계제원은 이를 등가렌즈로 변환한 제원이며, 등가렌즈계 ET-1은 본 연구에서 연구된 일반화된 변환방법이 사용되었고, 등가렌즈계 ET-2는 기존의 방법(접합면에 두께 0의 공기층을 가정)이 사용되었다(그림 4).

표 6(d)의 전체 광학계의 3차수차계수를 살펴보면 일반화된 등가렌즈 변환을 사용한 ET-1의 경우는 두꺼운 렌즈계의 3차수차를 잘 근사하고 있으나, 접합면에 공기층을 가정한 ET-2의 경우는 차이가 크게 나타나고 있다. 횡색수차 C_T 의 경우는 두꺼운 렌즈계에서 계산된 값과 등가렌즈계에서 계산된 값이 서로 다르게 나타난다.

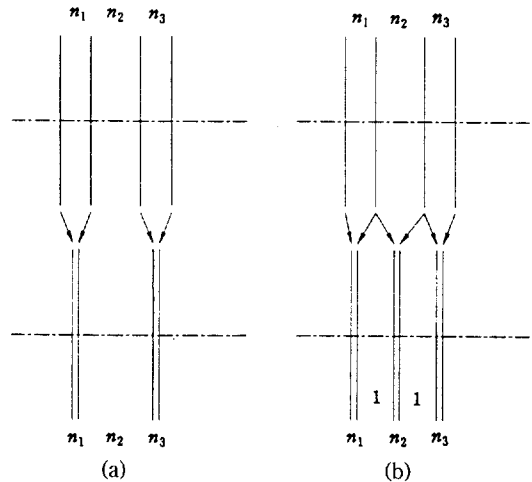


그림 4. 3매 접합렌즈의 등가렌즈 변환.
(a) 첫 번째, 세 번째 렌즈를 일반화된 등가렌즈로 변환(ET-1),
(b) 접합면에 두께 0의 공기층을 가정하여 3매의 등가렌즈로 변환(ET-2).

이것은 2매 접합렌즈의 경우와 마찬가지로 렌즈계가 물색화되었기 때문에 상대적으로 등가렌즈 변환 과정에서 수차변화가 실제의 색수차에 비하여 크기 때문으로 이해된다. 등가렌즈계 ET-2의 경우에는 두꺼운 렌즈계의 제 2면과 3면의 굴절능이 각각 2개의 면으로 분배되었기 때문에, 분배된 면의 수차를 모두 합하여 두꺼운 렌즈계와 비교하였다. 굴절면의 3차수차를 표 6의 (a), (b), (c)에서 비교하여 보면 ET-2의 경우는 두꺼운 렌즈와 아주 다르게 나타나고 있고, 기존의 등가렌즈 변환법은 3매 접합렌즈의 설계에는 적합하지 못함을 보여주고 있다. 반면에 일반화된 등가렌즈 변환법을 사용한 ET-1의 경우는 등가렌즈가 실제의 두꺼운 렌즈를 잘 근사하고 있다.

3. 토의

2매 접합렌즈와 3매 접합렌즈의 등가렌즈 변환에서 본 연구에서 연구된 일반화된 등가렌즈 변환이 접합면에 두께 0의 공기층을 가정하는 기존의 방법보다 실제의 두꺼운 렌즈계의 수차를 잘 근사하고 있음을 확인하였다. 이것은 (47)~(53)식의 등가렌즈에 대한 수차식에서 그 이유를 설명할 수 있다. 기존의 등가렌즈 변환은 공기층의 두꺼운 렌즈만을 등가렌즈로 변환하고 있으므로, 항상 $n_2 = n_0 = 1$ 이 된다. 이 조건을 (47)~(53)식의 수차식에 적용하면 u_1 에 대하여 가장 높은 차수의 계수가 항상 0이 되어 기존의 변환법이 두꺼운 렌즈의 3차수차를

표 6. 3매 접합렌즈의 3차수차
(a) 제 2면의 3차수차

렌즈계	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V	C_L	C_T
THK*	-2.0853e-01	-1.4986e-01	-1.0769e-01	-1.2996e-01	-1.7078e-01	-9.7835e-03	-7.0307e-03
ET-1	-2.1479e-01	-1.3435e-01	-8.4035e-02	-1.2617e-01	-1.3148e-01	-1.0077e-02	-6.3031e-03
ET-2	3.6498e-03	4.3496e-01	6.1202e-01	-1.9256e-01	6.5034e-01	-9.3300e-03	-4.3564e-03

(b) 제 3면의 3차수차.

렌즈계	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V	C_L	C_T
THK*	-3.8668e-01	-2.1815e-02	-1.2307e-03	-1.2996e-01	-7.4010e-03	-9.8738e-03	-5.5703e-04
ET-1	-3.7338e-01	-9.5004e-02	-2.4173e-02	-1.3459e-01	-4.0396e-02	-9.5341e-03	-2.4259e-03
ET-2	4.3117e-01	-7.3999e-01	3.0569e-01	-2.5307e-01	-1.5063e-01	-8.7904e-03	-8.0348e-05

(c) 제 4면의 3차수차

렌즈계	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V	C_L	C_T
THK*	6.2857e-01	-2.7507e-01	1.2037e-01	4.8530e-01	-2.6505e-01	9.4098e-03	-4.1178e-03
ET-1	6.1246e-01	-2.1497e-01	7.5456e-02	4.9806e-01	-2.0130e-01	9.1687e-03	-3.2182e-03
ET-2	6.7930e-01	-4.7456e-01	3.3153e-01	4.4905e-01	-5.4531e-01	1.0169e-02	-7.1043e-03

(d) 3매 접합렌즈 전체의 3차수차.

렌즈계	S_I	S_{II}	S_{III}	S_{IV}	S_V	C_L	C_T
THK*	1.4754e-01	-2.6335e-01	3.0598e-01	7.1068e-01	8.0920e-01	-3.0168e-03	-9.2838e-05
ET-1	1.3848e-01	-2.6094e-01	2.6178e-01	7.2260e-01	8.7924e-01	-3.2117e-03	-3.3453e-04
ET-2	1.2283e+00	-5.9620e-01	1.5438e+00	4.8872e-01	1.2068e+00	-7.2039e-04	7.1686e-05

*두꺼운 렌즈계

잘 근사하지 못하는 원인이 되는 것으로 생각된다. 예로서 구면수차 S_I 은 (47)식에서 u_1 의 3차식이나 기존의 방법으로는 3차항의 계수가 0이 되므로 u_1 의 2차식으로 주어지게 된다. 이러한 근사는 수차식을 단순화시키므로 설계에는 편리한 점도 있으나, 실제로는 3매 접합렌즈의 예에서와 같이 등가렌즈가 두꺼운 렌즈의 3차수차를 잘 근사하지 못하는 원인이 되고 있다. 일반화된 변환법에서는 이와 같은 문제점이 없으므로, 등가렌즈가 두꺼운 렌즈를 잘 근사하고 있는 것으로 이해된다.

V. 결 론

등가렌즈를 사용하여 광학계의 3차수차를 보정하는 기존의 설계법에서는 두꺼운 렌즈를 등가렌즈로 변환하는 과정에서 두꺼운 렌즈가 공기중에 있다는 전제가 사용되고 있었다. 이 때문에 접합렌즈의 설계에서 접합면에 두께 0의 공기층을 가정하고 등가렌즈로 변환하였다. 본 연구에서는 이를 일반화시켜 공기중에 있지 않은

경우에도 적용이 가능함을 보였으며, 일반화된 등가렌즈 변환법을 2매 접합렌즈 및 3매 접합렌즈의 등가렌즈 변환에 적용하여 3차수차를 비교하여 본 결과, 기존의 등가렌즈 변환법보다 두꺼운 렌즈의 3차수차를 잘 근사하고 있음을 확인하였다. 이것은 등가렌즈의 3차수차식에서도 그 원인을 설명할 수 있었으며, 기존의 등가렌즈 변환에서 접합렌즈의 경우 두께 0의 공기층을 가정하는 것은 적절하지 못하다는 것을 보여주고 있다.

본 연구에서 연구된 일반화된 등가렌즈 변환법과 3차수차식은 특히 3매 이상의 렌즈가 접합된 렌즈계의 설계에 유용하다. 일반화된 변환법은 두꺼운 렌즈를 잘 근사하고 있을 뿐만 아니라, 기존의 방법보다 적은 매수의 등가렌즈로 분해할 수 있으므로 수차보정점과 설계가 보다 간편하다.

참 고 문 헌

[1] Orsetes N. Stavroudis, *Modular Optical Design*,

- Springer Series in Optical Sciences Vol. 28, (Springer-Verlag, Berlin, 1982). Chap. 3. 114-128.
- [2] A. E. Conrady, *Applied Optics and Optical Design* (Dover Pub. Inc., New York, 1957) pp.92-113. [5] *Military Standardization Handbook* **141**, Section 8. 11.
- [3] 三宅和夫 譯, *렌즈設計의原理* (講談社, 東京, 1970) pp. 99-107. [6] 이상수, *기하광학*(교학연구소, 서울, 1985) Chap. 4.
- [4] 松居吉哉, *렌즈設計法*(共立出版株, 東京,1972) pp. [7] H. H. Hopkins, *Wave Theory of Aberrations* (Clarendon Press, Oxford, 1950) pp.148-158.

Generalization of Equivalent Lens Conversion and Third Order Aberration Formulae of the Generalized Equivalent Lens System

Jong Ung Lee

Department of Optical Engineering, Chongju University, Chongju 360-764, Korea

Keon Soo Kim

Digital Media Business, Samsung Electronics Co., Ltd., Suwon 442-742, Korea

(Received: July 1, 1996)

Lens design method by using equivalent lenses was already introduced, but the method has a limitation that all lenses should be in the air. Therefore, we often get improper solution in designing cemented lenses. In this study, the lens conversion from thick lens to equivalent lens and its reversal was generalized without any preconditions, and the third order aberration formulae were derived for the generalized equivalent lens system. The generalized equivalent lens conversion were applied to typical cemented doublet and triplet, and they show that the third order aberrations of the generalized equivalent lenses have better agreements with their corresponding thick lenses than the previous conversion method.