'2001 춘계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KSTAR ECE 용 마이크로파 금속렌즈 설계

Microwave Metal Lens Design for KSTAR ECE System

정승호, 황철규

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

금속 원판에 수많은 도파관을 갖는 마이크로파 렌즈를 설계하였다. 이 렌즈는 반경이 커질수록 도파관의 직경이 작아져 렌즈의 가장자리쪽 위상속도가 빨라지고 따라서 마이크로파를 잘 집속시킬 수 있게 설계되었다. 설계된 렌즈의 초점거리는 주파수가 75GHz 일때 450mm 이며 기하광학적인 공간 분해능은 5cm 이하이다.

Abstract

A microwave lens is designed which consists of a number of small wave-guides drilled in a solid plane metal disk. With increasing radius, the wave-guides in the lens become smaller in diameter, so the phase velocity will increase towards the edge which produces a focusing effect for microwaves. The focal length is 450mm at 75GHz and its spatial resolution is less than 5cm.

1. 서론

현재 '국가 핵융합 연구개발사업'에 의해 건설중인 차세대 초전도 토카막 핵융합 연구장치 'KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)는 플라즈마의 전자온도 및 그 분포측정을 위해 ECE 진단장치가 기초 및 기본 진단으로 정해져 있다. 이를 위해 ECE heterodyne radiometer(HRS)가 개발 중에 있으며 차후에 fast scanning Michelson interferometer (FSMI)와 grating polychromator(GPC)의 개발이 계획되어있다. 이들 ECE 진단장치의 front-end

로 mirror type 의 light collecting optics 가 연구되고있었으나 차후 개발로 계획된 기본 진단장치(FSMI,GPC)의 추진이 불확실하고, KSTAR 의 첫번째 운전 기간(1.5T 운전)이 짧은 점을 고려해 우선 1.5T 운전기간에는 제작이 간편하고 상대적으로 경제적인 렌즈 형태의 front-end optic 를 개발하는데 의견이 모아지고 있다. 특히 HRS 에 비해 상대적으로 큰 input power 를 요구하는 GPC 의 개발이 유보된 것이 front-end optics 의 변경에 큰 비중을 차지했다.

마이크로파 렌즈로는 일반적으로 dielectric 렌즈를 사용하나 플라즈마로 부터의 열 부하 그리고 초고진공 상태에서의 렌즈 재질로 부터의 out gassing 등을 고려하여 금속렌즈의 사용이 대두되었다.

본 논문에서는 KSTA 의 1.5T 운전기간에 전자온도를 측정할 HRS 의 light collecting optics 에 사용될 마이크로파 금속 렌즈의 설계에 대해 논의하였다. 사용 주파수 영역은 약 70GHz 부터 85GHz 이며 색수차에 의한 공간 분해능이 5cm 이하가 되게 설계하였다.

2. 금속렌즈의 원리(the principle of metal lens)[1]

금속렌즈는 도파관(waveguide) 내에서 파의 위상속도(phasevelocity)가 도파관의 직경에 따라 다르다는 성질을 이용한 것이다. 공기로 채워진 도파관 내에서의 위상속도는 $v_g = fl_g$ 이고 도파관 내의 파장 l_g, 그리고 굴절율 n_g 는 아래와 같이 주어진다.

$$l_g = \frac{l}{\sqrt{1-(l/l_c)^2}} \qquad \text{식(1)}$$

여기서 l 는 자유공간에서의 파장이다. 따라서 도파관의 위상속도는 광속 C 보다 빠르며 도파관의 굴절율은 1 보다 작은값을 갖는다. l_c 는 cut-off 파장으로 원형 도파관의 경우 도

$$n_g = \frac{l}{l_g} \le 1 \qquad \text{식(2)}$$

파관의 직경(d)에 비례하며 도파관의 기본모드인 TE11 파에 대해 cut-off 파장은 $l_c = 1.706d$ 값을 갖는다.

그림 1 은 초점거리 F, 두께 S, 그리고 실 직경(effective dia.) k 인 금속 렌즈를 보여주고 있다. 그림 1 에서 d_o 는 렌즈의 중심에 있는 도파관의 직경이고 d_k 는 중심으로부터 k 만큼 떨어진 곳의 도파관의 직경이다.

렌즈의 초점으로부터 나와 렌즈의 구멍(도파관)을 지나 평면파면(plane wave front)에 도달하는 모든 파는 동일한 path length 를 갖아야 하므로,

$$\frac{l_k}{l} + \frac{s}{l_{gk}} = \frac{s}{l_{go}} \qquad \text{식(3)}$$

인 조건을 만족해야 한다.

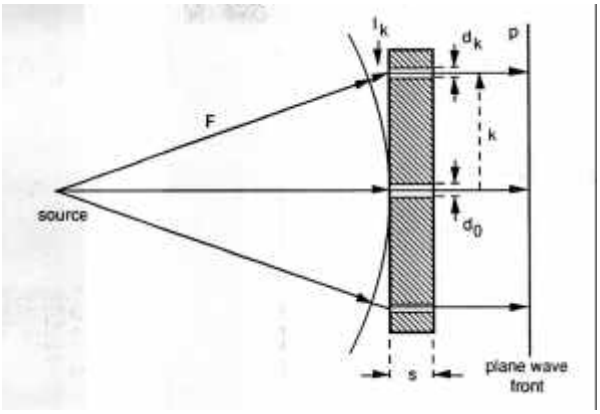


그림 1. 금속렌즈의 원리 : 파원(source)으로부터 평면파면(P)에
도달하는 모든 광선(ray)의 광로(path length)는 같다.

식(3)에서 l_{go}와 l_{gk}는 각각 직경 d_o와 d_k인 도파관내의 파장이고 path length l_k는 식(4)에 의해 구해진다.

$$l_k = \sqrt{k^2 + F^2} - F \qquad \text{식(4)}$$

따라서 적절한 d_o를 선택하면 중심으로부터 k만큼 떨어진 곳에 있는 도파관의 직경 d_k를 아래의 식(5)와 식(6)에 의해 구할 수 있다.

$$l_{gk} = \frac{s}{s/l_{go} - l_k/l} = \frac{l}{\sqrt{1-(l/l_{ck})^2}} \qquad \text{식(5)}$$

$$d_k = \frac{0.586\,l}{\sqrt{1-(\sqrt{1-(l/l_{co})^2} - l_k/s)^2}} \qquad \text{식(6)}$$

식(5)와 식(6)에서 l_{ck}와 l_{co}는 각각 $l_{ck} = 1.706 d_k$와 $l_{co} = 1.706 d_o$이다.
이렇게 설계된 렌즈는 초점거리가 F이고 두 principal axis 사이의 간격이 S 인 thick lens 에 대응시킬 수 있다.

3. 렌즈 파라메타 결정

메탈렌즈는 그 원리상 파장에 따라 큰 색수차를 갖는다. 따라서 서로 다른 위치에서 방사되는 두 파장에 대해 같은 위치에 상을 갖을 수 있다. 본 논문에서는 이 특성을 을 이용해

KSTAR 1st 플라즈마의 각 다른 위치에서 방사되는 70GHz – 85GHz 영역의 전자 사이클로트론 방사파를 한 위치의 안테나에서 받을 수 있는 렌즈를 설계하려고 우선적으로 노력을 하였다.

그림 2 는 KSTAR 의 진공용기 및 ECE diagnostic port 를 나타낸 도면이다.

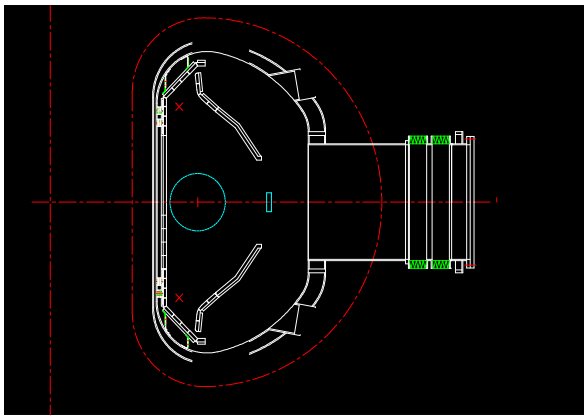


그림 2. KSTAR 진공용기, 진단구, 플라즈마 영역, 그리고 렌즈위치

그림 2 에서 파란색 원은 플라즈마의 크기를 그리고 파란색 사각형은 렌즈를 나타낸다. 플라즈마의 중심과 가장자리 위치는 토카막 중심으로부터 각각 1600mm, 1900mm 떨어져있으며 이 영역에서 반경방향으로 위치가 증가함에 따라 84GHz 부터 71GHz 사이의 주파수를 갖는 ECE 파가 방사된다. 렌즈의 위치는 플라즈마로 부터의 열부하를 고려해 stabilizer 뒷편 어느 곳이나 가능하나 계산에서는 2400mm 에 위치하게 하였다.

이제 안테나로부터 84GHz 와 71GHz 두가지 주파수를 갖는 파가 나와서 렌즈를 지나 원래 두 파가 발생하는 플라즈마의 위치 즉 중심(1600mm)과 가장자리(1900mm)에 안테나의 상을 맺는 경우를 생각해보자. 렌즈로부터 안테나까지의 거리를 a, 각 파장에 대한 초점거리를 F_{84}, $F_{71,}$ 그리고 안테나의 상까지의 거리를 b_{84}, b_{71} 이라 하면 이들 사이에는 다음과 같은 관계가 성립하며 그 결과는 그림 3 과 같다.

$$F_{84} = (x-1)\frac{b_{71}b_{84}}{b_{84}-b_{71}}, x = \frac{F_{84}}{F_{71}} \qquad \text{식(7)}$$

그림 3 에서 î= F_{84}/F_{71} 이다. 그런데 실제문제에서 안테나 위치는 렌즈로부터 무한히 멀어질 수 없기 때문에 î 값은 1.45 이하만이 가능하다. 최적의 î 값을 결정하기 위해 먼저 84GHz 파에 대한 초점거리 값을 scan 하였다.

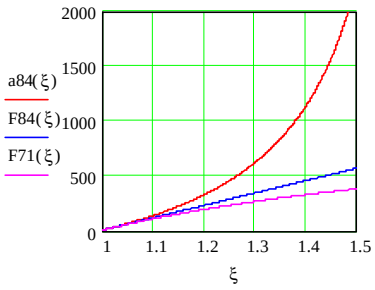


그림 3. 초점거리 비에 따른 안테나 위치 및
각 주파수의 초점거리

3.1 렌즈 초점거리

렌즈의 파라메타를 결정하는데 만족해야 할 또하나의 조건식, 식(3)을 다시 쓰면

$$l_k = S(n_{go} - n_{gk}) \qquad \text{식(8)}$$

위 식에서 l_k 는 두 도파관의 광로차(path length difference)에 해당된다. 원하는 설계치를 얻기 위해서는, 임의의 파장에 대해, 그 파장에 대응되는 렌즈의 초점거리를 변화시켜가면서 계산된 이 값과 초점거리들을 식(4)에 의해 계산된 결과가 일치되어야 한다.

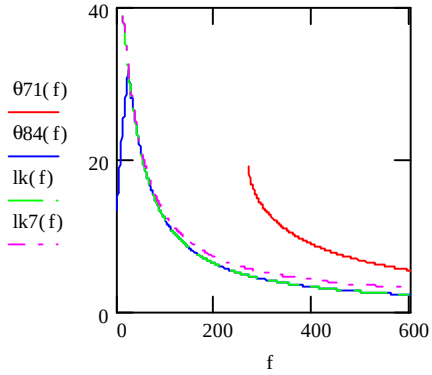


그림 4. 광로차의 비교;71GHZ 와 84GHz 에 대해, 각각
식(8)에 의해 계산된 광로차: è71(f), è84(f)
식(4)에 의해 계산된 결과 : lk7(f), lk(f)

그림 4 의 계산에서 렌즈의 반경(k) 및 두께(S)는 50mm 로 그리고 d_o =2.7mm 로 고정하였다. 그래프의 x 축 f 는 그림 3 의 F84(î)와 동일하며 è71(f), lk(f) 계산에 사용한 71GHz 에 대한 초점거리는 F71(î)이다. 그림에서 보듯이 84GHz 경우와 달리 71GHz 파는 lk7(f)와 차이를 보여 식(3)을 만족시키지 못하지만 f 값이 커질수록 그 차가 줄어듦을 알 수 있다. 이는

84GHz 에 대한 렌즈의 초점거리를 길게 할수록 즉 î 값이 클수록 좋은 결과를 얻을 수 있음을 의미한다. 따라서 앞으로 찾아야 할 최적 S, k 결정에 î=1.45 값을 사용하였다. 이때 F_{84}, F_{71} 값은 각각 600mm, 413.8mm 이며 a 는 2400mm 이다.

3.2 렌즈의 반경(k) 및 두께(S)

위 절에서 결정된 값들에 대한 최적 k ,S 값을 찾기 위해 3.1 절에서와 같이 식(8)과 식(4)를 이용하여 계산 결과를 그림 5.에 나타내었다.

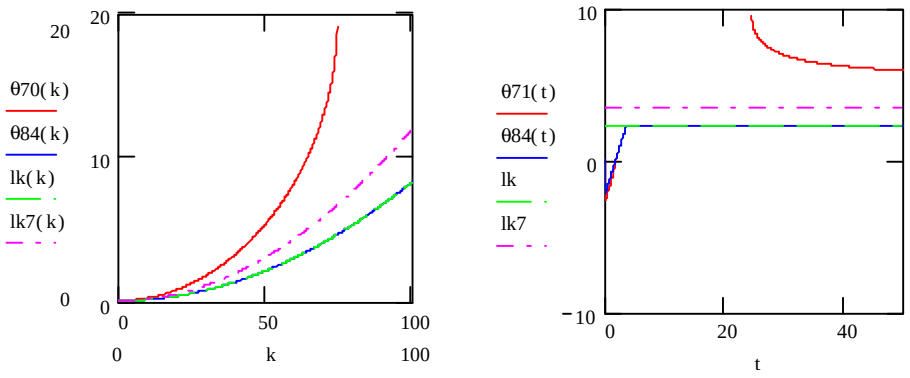


그림 5. 렌즈의 반경, k (왼쪽) 및 두께,S(오른쪽, S 대신 t 사용)에 따른 광로차의 변화

먼저 왼쪽의 경우 k 가 클수록 즉 렌즈가 커질수록 식(8)의 결과(è70(k))와 식(4)의 결과(lk7(k))가 급격한 차이를 보인다. 하지만 렌즈 크기를 줄이면 렌즈에 의해 집속 되는 파의 세기도 줄어들기 때문에 k 를 한없이 줄일 수 없다.

오른쪽의 경우도 두께가 클수록 유리해지지만 그 변화율은 점점 작아져 크게 효과를 보이지 못한다. 특히 실제 렌즈 제작 시 두께가 커지면 많은 어려움이 발생한다. 결국 그림 5 의 두 경우 모두 71GHz 에 대해 식(3)을 만족하지 못함을 보인다. 지금까지의 결과로부터 F_{84}, F_{71} 값이 각각 600mm, 413.8mm 이며 즉 플라즈마의 84GHz 와 71GHz layer 위치에 안테나의 상을 맺는 렌즈의 설계는 불가능하다는 것이 판명되었다.

4. over-mode 렌즈

이제 까지는 렌즈의 중심 도파관의 직경 d_o 을 2.7mm 로 고정하고 계산하였다. 그림 6 은 d_o 가 변할 때 71GHz 파에 대한 굴절율의 변화를 계산한 결과이다. 결과에서 d_o 가 커질수록 굴절율이 급격히 1 에 가까워짐을 보이며 그 차이도 크게 감소한다.

마지막으로 중심 도파관의 직경변화에 따른 광로차를 계산하면 d_o 가 7.941mm 에서 식(3)을 만족함을 알 수 있다.

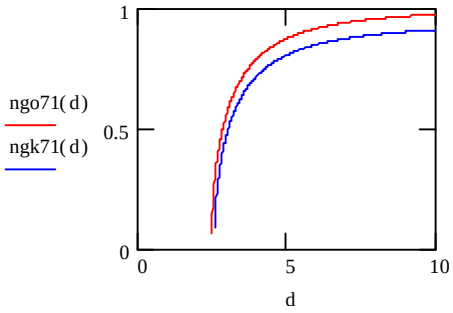


그림 6. 중심 도파관의 직경변화에 따른 굴절율(71GHz) 변화

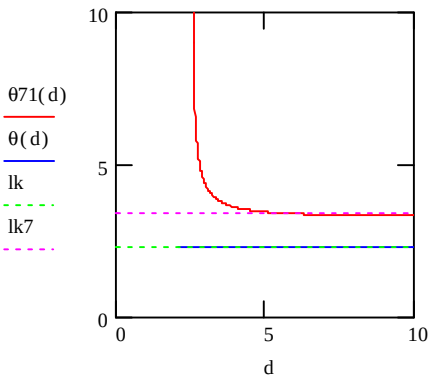


그림 7. 중심 도파관의 직경변화에 따른 광로차를 계산
k =50, S=50, 71GHZ 와 84GHz 에 대해, 각각
식(8)에 의해 계산된 광로차: è71(d), è(d)
식(4)에 의해 계산된 결과 : lk7(f), lk(f)

그림 7 의 결과에 의하면 84GHz 와 71GHz 두 파에 대해 식(3)과 식(8) 두 조건을 모두 만족한다. 이 경우 70GHz – 84GHz 영역의 모든 파장에 대해 안테나 상의 위치를 계산하고 이 결과로부터 기하광학적인 수직 분해능을 계산하면 수직 분해능은 5mm 이내로 매우 우수함을 알 수 있다. 계산 결과를 그림 8 에 나타내었다.

그림 8 의 왼쪽 그래프에서 적색선은 ECE layer 의 위치를 나타내고 청색선은 설계된 렌즈에 의한 안테나의 상의 위치를 나타낸다. 오른쪽 그래프에서 양끝을 제외하고 오차가 생기는 이유는 왼쪽 그래프에서 보여주듯이 주파수에 대한 자장곡선과 렌즈의 상의 곡선이 일치하지 않기 때문이다. 하지만 이 오차는 5mm 이내로 매우 우수한 편에 해당한다

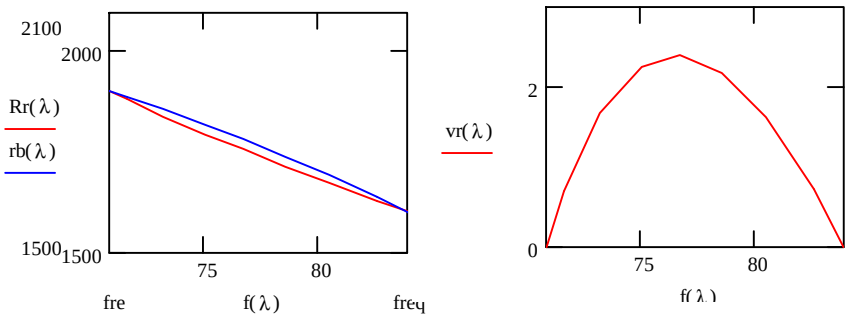


그림 8. 주파수 영역 71GHz –84GHz 에 대한
안테나 상의 위치(왼쪽) 및
기하광학적 수직 분해능(오른쪽)

이제까지의 논의는 도파관 내에 기본 모드인 TE11 파만 존재하는 것을 전제로 하였고 실제로 d_o 가 2.7mm 인 경우는 TE11 모드만 존재한다. 하지만 조건식 식(3)과 식(8)을 동시에 만족시키기 위해 d_o 값을 7.941mm 로 늘렸기 때문에 도파관 내에 고차모드가 존재할 수 있다. TE11 모드 다음 고차모드는 TM01 모드로 원형 도파관의 경우 $1.306\,d_o$ 의 cut-off 파장을 갖는다. 따라서 TE11 모드만 존재하기위해서는 식(9)을 만족해야 한다.

$$\frac{l}{1.706} < d_o < \frac{l}{1.306} \qquad \text{식(9)}$$

주파수 영역 71GHz - 84GHz 에 대해 식(9)를 만족하는 d_o 의 영역은 $2.486 < d_o < 2.735$ 이다. 이제 계산에 사용된 도파관의 직경이 식(9)의 영역보다 훨씬 크므로 고차 모드들의 영향을 고려해야만 한다. 그림 9 와 그림 10 은 7.941mm 를 d_o 값으로 갖는 도파관에 존재할 수 있는 모든 고차모드(TM01, TE21, TE01, TM11, TE31)들의 cut-off 파장을 사용하여 초점거리와 안테나 상의 위치를 계산한 결과와 기하광학적 ray tracing 을 나타낸 것이다.

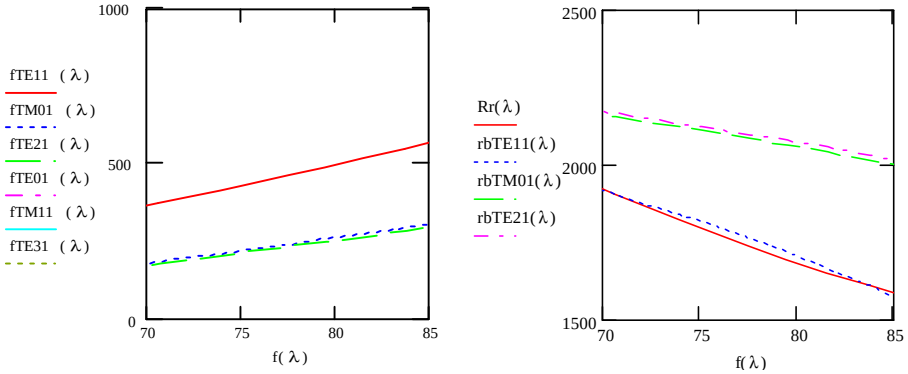


그림 9. TM01, TE21, TE01, TM11, TE31 모드들의 파장에 대한 초점거리(왼쪽)와
안테나 상의 위치(오른쪽)

그림 9 에서 왼쪽 그래프의 적색선은 TE11 모드의 초점거리이며 청색과 녹색선은 TM01 과 TE21 모드의 초점거리이다. TE21 모드 이상의 고차모드는 렌즈의 바깥쪽 도파관의 cut-off 에 걸려 계산되지않았다. 오른쪽 그래프에서 고차 모드에 의한 안테나 상은 초록선과 분홍선으로 나타나고 있다.

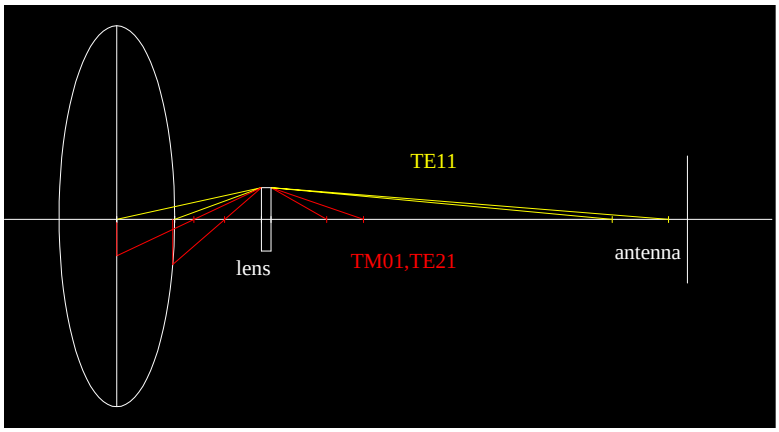


그림 10. 고차 모드의 기하광학적 ray tracing

그림 10.에서 황색선은 TE11 모드에 대한 것으로 안테나에서 나온 84GHz, 71GHz 파가 각각 플라즈마의 중심 및 가장자리에 상을 맺는 것을 보여준다. 고차모드의 경우 렌즈의 오른쪽은 플라즈마로부터 나온 파들이 맺는 상의 위치를 나타내며 왼쪽은 안테나로부터 나온 84GHz, 71GHz 파가 어떻게 진행하는가를 보여준다. 그림에서 보듯이 고차 모드에 의해 안테나에 들어오는 84GHz, 71GHz 파들은 너무 넓은 범위에서 나와 수직 분해능을 떨어뜨린다.

결론적으로 over –mode lens 는 기본 모드에 대해서는 좋은 결과를 나타내지만 고차 모드에 의해 분해능이 현격히 저하되어 사용할 수 없다.

5. single-mode 렌즈

3 절에서 논의한 결과로부터 식(7)을 만족하는 렌즈는 설계가 불가능하다. 이제는 특정한 기준 파장에 대해 렌즈를 설계하고 사용하고자 하는 주파수 영역(71GHz –84GHz)에서 설계된 렌즈의 오차를 평가해보자. 먼저 시행착오법에 의해 기준 파장을 75GHz 로 정하였다. 그리고 파라메타 결정에 있어서 식(7)의 조건이 없어졌기 때문에 렌즈의 위치에 대한 자유도가 하나 더 늘어났다.

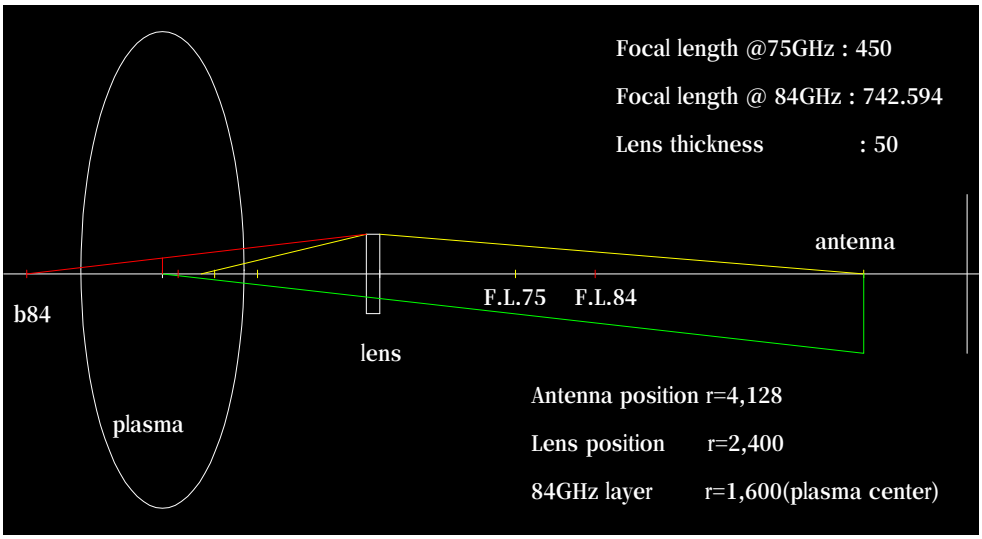


그림 11. single-mode 렌즈에 대한 ray tracing

먼저 기준 파장에 대한 초점거리를 구하기 위해 렌즈의 위치를 그림 2 에서와 같이 고정하고 75GHz 파의 초점거리를 변화시키며 F_{84}, b_{84}, a 의 변화를 살펴보았다.

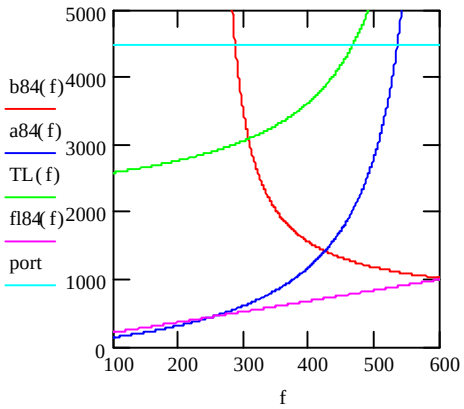


그림 12. 기준파(75GHz)의 초점거리를 변화에 따른 F_{84}, b_{84}, a 의 변화

위 그림에서 TL(f) 는 안테나의 위치를 KSTAR 토카막의 중심으로부터 거리로 환산한 값으로 port 의 위치보다 안쪽에 있어야 한다. 이로부터 기준파의 초점거리는 450mm 정도가 한계이다. 그리고 250mm 이하가 되면 안테나의 위치(a84)가 84GHz 에 대한 초점거리보다 짧아져 허상을 갖게 되므로 기준파의 초점거리는 250mm – 450mm 범위 내에 있어야 한다. 이때 식(3)의 조건은 당연히 만족되며 그 결과를 그림 13.에서 확인할 수 있다.

고려해야 할 또 하나의 변수는 렌즈의 위치이다. 렌즈의 위치는 열 부하 때문에 현 위치에서 플라즈마에 가깝게 갈 수 는 없지만 반대의 경우는 항상 가능하다.

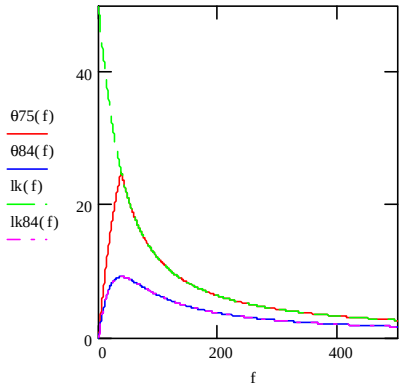
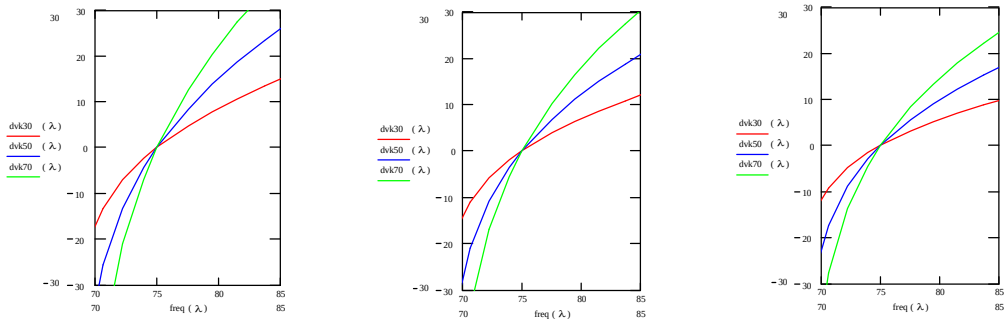


그림 14. 기준파와 84GHz 파에 대한 광로차

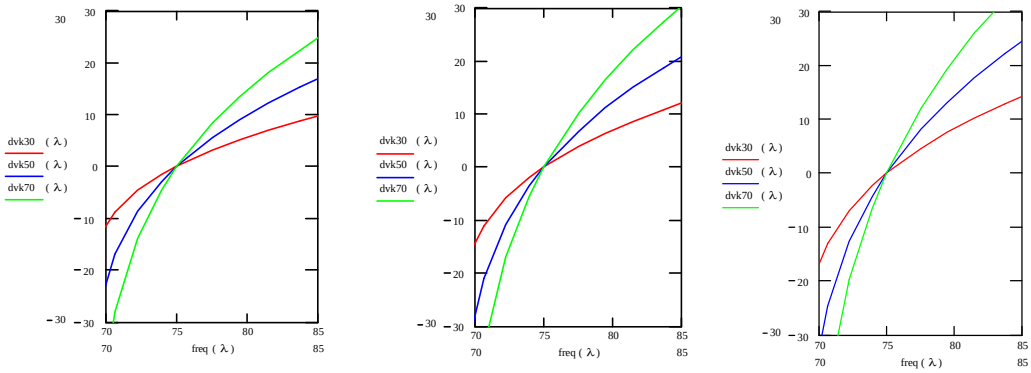
이제 4 가지 변수 즉 초점거리, 렌즈위치, 그리고 렌즈의 반경 및 두께를 변화시켜가며 렌즈의 성능평가에 중요한 수직 분해능을 계산하였다.



f=400 f=450 f=500

그림 15. 렌즈위치:2400mm , 초점거리 :400, 450 ,500 일때 렌즈반경(k)에 따른 수직분해능

적색:k=30, 청색:k=50, 녹색:k=70



R=2350 R=2400 R=2450

그림 16. 초점거리:450mm, 렌즈위치 R=2350, 2400, 2450 일때 수직 분해능

적색:k=30, 청색:k=50, 녹색:k=70

렌즈의 수직 분해능은 초점거리가 클수록, 렌즈직경이 작을수록 유리하나 안테나의 위치 제한으로 f=500 의 경우는 불가능하며, 렌즈의 반경은 앞서 논의한대로 작게 할 수 없다.
렌즈의 수직 분해능은 렌즈 위치가 작을수록 유리하나 열 부하 때문에 R=2400mm 보다 플라즈마에 가까이 갈 수 없다. 같은 방법으로 렌즈의 두께에 대해 계산한 결과 두께가 두꺼울수록 유리하나 수직 분해능에는 미세한 효과만 있다. 결론적으로 렌즈 위치는 R=2400mm, 기준파에 대한 초점거리는 f=450, 그리고 렌즈반경 및 두께는 각각 50mm 일때가 최적임을 알 수 있다. 그림 17 은 렌즈의 두께에 대해 계산한 결과 중 최적 경우를 나타낸 것이다.

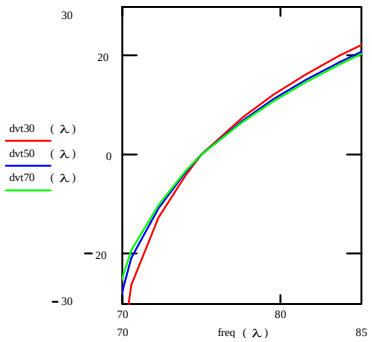


그림 17. 렌즈 위치는 R=2400mm, 기준파에 대한 초점거리는 f=450, 그리고 렌즈반경:50mm, 두께는 각각 30mm(적색), 50mm(청색), 70mm(녹색) 일때 수직 분해능

이상의 결과를 바탕으로 식(6)에 의해 렌즈의 각 반경에 따른 도파관의 직경을 계산하였다. 계산결과 렌즈 중심에서의 도파관의 직경은 2.7mm 이며 렌즈 반경이 50mm 인 곳의 도파관 직경은 2.612mm 이었다. 그리고 사용 주파수 영역에서 수직 분해능은 4cm 를 얻었다. 렌즈 반경에 대한 도파관의 직경과 주파수 영역에서의 수직 분해능을 그림 18 에 나타내었다.

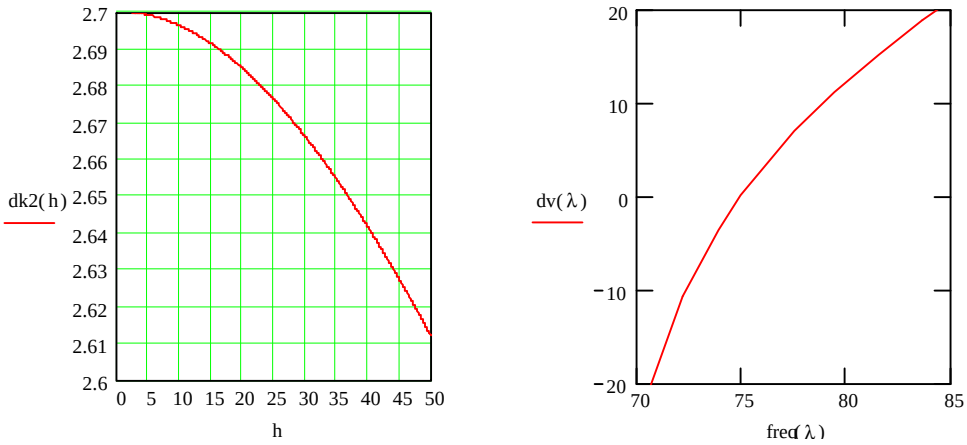


그림 18. 렌즈 반경에 대한 도파관의 직경(왼쪽)과 주파수 영역에서의 수직 분해능(오른쪽)

6. 결 론

KSTAR 토카막 ECE 진단장치의 front end 에 사용할 금속 렌즈를 path-length 원리를 사용하여 설계하였다. 이를 위해 렌즈의 특성에 관련된 렌즈 두께와 렌즈 크기, 그리고 기하광학 계산에 관련된 렌즈의 초점거리와 렌즈의 위치 등을 변화시켜가며 최적의 값을 찾았다.

렌즈의 도파관으로 over-mode 도파관을 채택한 경우 기본 모드(TE11)에 대해서는 아주 우수한 결과를 얻었지만 고차 모드들의 간섭으로 공간 분해능이 떨어져 사용할 수 없었다. Sing-mode 도파관을 채택한 경우 렌즈반경 및 두께는 각각 50mm 일때 그리고 기준파장(4mm)의 초점거리가 450mm 일때 사용 주파수 영역(71GHz-84GHz)에서 최적의 공간 분해능 4cm 를 얻었다. 이때 렌즈의 위치는 토카막 중심으로부터 2,400mm 이며 안테나 위치는 4,128mm(렌즈로부터 1,732mm) 이다. 그리고 도파관의 최대 직경은 렌즈 중심에서 2.7mm 이며 최소 직경은 가장자리에서 2.612mm 이다.

참고문헌

1. C.A.J.Hugenholtz, Rev. Sci. Instr. **45**, No.11, 1474 (1974).