

## 임의 분배 비율의 다중모드간섭 광전력 분배기에 대한 벡터 해석법

김진희<sup>†</sup> · 이상선

한양대학교 전자전기공학부

Ⓣ 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

송석호

한양대학교 물리학과

Ⓣ 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지

(2002년 9월 13일 받음, 2002년 10월 8일 수정본 받음)

다중모드간섭을 이용한 임의 분배 비율의 광전력 분배기에 대한 벡터 해석법을 제시한다. 광전력 분배는 집적 광학의 기초가 되는 부분이며 특히 광전력 비율을 임의로 조절할 수 있다면 많은 응용분야에 유용할 것이다. 본 벡터 해석법은 기존의 다중모드간섭 현상에 대한 해석적 결과를 도식화함으로써 임의 분배 비율의 다중모드간섭 광전력 분배기 설계를 보다 쉽게 할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

주제어 : multi-mode interference, self-imaging, optical power splitter, variable splitting ratio, vector analysis.

### I. 서 론

광전력 분배는 집적 광학에서 기초가 되는 기능이다. 지금까지 여러 가지 구조의 광전력 분배기가 제안되어 왔다. 이들 중 다중모드간섭(Multi-Mode Interference; MMI)을 이용한 광전력 분배기는 크기가 작고, 제작 허용 오차가 크다는 집적 광학소자로서의 매우 중요한 장점을 갖고 있으며, 또한 0.3 dB 정도의 손실을 더 감안하면 편광에 민감하지 않게 설계할 수 있다는 특성도 가지고 있다.

이러한 다중모드간섭 광전력 분배기를 설계하는 방법은 기존에 발표되었던 자기상 맺힘(Self-imaging) 현상에 대한 해석적 공식을 이용하는 방법과 유기모드 전파에 대한 수치해석을 이용하는 방법이 있다. 간단한 1xN 균일 광전력 분배기를 설계할 때는 두 가지 방법이 다 유용하다. 그러나 자기상의 위상변조 및 자기상들의 합성을 이용해야 하는 비균일 광전력 분배기나 임의분배비율 광전력 분배기를 설계할 때는 분배비율의 조절 원리를 파악하기 쉽지 않고 계산이 복잡해 질 우려가 있다. 따라서 본 논문에서는 다중모드간섭을 이용한 임의 분배비율의 광전력 분배기를 해석하고 설계하는데 있어 출력 단파의 세기와 상대 위상에 따른 변화를 손쉽게 계산할 수 있는 벡터 해석법을 제시하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 다중모드간섭에 의한 자기상 맺힘의 원리를 설명하고, 광전력 분배기 설계의 가장 핵심이 되는 자기상 맺힘에 대한 해석적 공식을 살펴본다. 1xN 균일 광전력 분배기에 대한 이 결과의 적용 방법을 3장에서 설명하고, 특정한 입력위치에 따라 일어나는 자기상 중첩과 이로 인한 광출력 변화를 설명하기 위해 벡터 해석법을 도입한다. 구조가

더 복잡해지고 자기상들의 위상변조가 필요한 임의분배비율 광전력 분배기에 대한 벡터 해석법의 적용 예를 4장에 보이고, 마지막으로 결과를 종합하여 결론을 내린다.

### II. 자기상 맺힘(Self-Imaging)

입력파가 다중모드 도파로에 결합되면 존재할 수 있는 여러 개의 모드가 여기되며, 도파로를 따라 모드간의 간섭을 일으키며 진행한다. 도파로의 길이가 매우 길다면, 모드 간의 간섭에 의해 일정한 길이에서 처음 입력파의 모양을 다시 만들게 되고 이러한 간섭을 반복하게 된다. 이를 다중모드간섭 현상이라 한다. 이와 같이 특정한 길이에서 입력파의 모양을 갖게 된 간섭파를 자기상(Self-Image)이라 한다. 다중모드간섭 현상에 따르면 도파로의 진행 방향에 따라 한개 내지는 여러 개의 자기상을 주기적으로 만들게 된다.<sup>[1,2]</sup>

자기상 맺힘은 3차원 다중모드 도파로에서 이루어지지만, 일반적으로 평면 도파로의 경우 한축 방향은 강하게 갇혀진 단일모드 도파로로 만들어져 있으며 다른 한 축은 다중모드 도파로로 이루어져 있기 때문에 2차원 구조로 해석이 가능하다. 예를 들어, x축 방향의 길이가 y축 방향보다 훨씬 길고 y축 방향의 구조가 강하게 갇힌 단일 모드 도파로인 경우 x 방향 파의 분포는 y축에 의해 거의 영향을 받지 않으므로 유효 굴절률법을 이용하여 그림 1과 같이 2차원 구조인 x축과 파의 진행방향인 z축에 대해서만 해석 할 수 있다.<sup>[2]</sup> 여기서  $n_x$ 은 코어의 굴절률을,  $n_c$ 는 클래딩의 굴절률을 나타낸다. 도파로 내의 정현파 곡선은 유기 모드의 분포를 나타내고 있으며  $\nu$ 는 모드의 차수를 나타낸다.

그림 2는 다중모드 도파로에서 파의 진행 방향 z축을 따라 자기상 맺힘 현상이 일어나는 예를 보여주고 있다. 입력에서

<sup>†</sup>E-mail: gneekim@dreamwiz.com

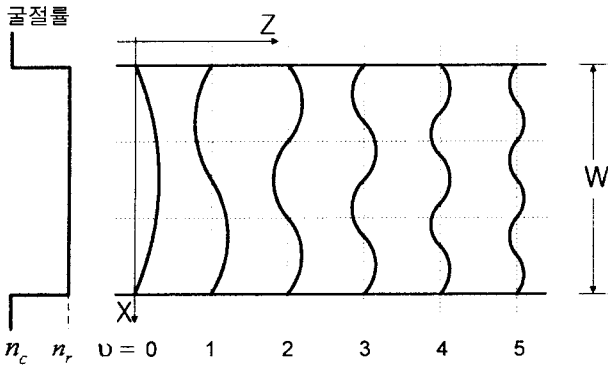


그림 1. 간략화된 2차원 다중모드 도파로와 유기모드의 분포.

인가된 파는  $z=3L_\pi/2$ 라는 특정 거리에서 두개의 자기상을,  $z=3L_\pi$ 에서 한 개의 자기상을 맺는 것을 볼 수 있다. N개의 자기상이  $1/N$ 의 같은 세기를 가지고 맺히게 되는 다중 모드 결합기의 길이  $L_N^p$ 은 비트길이(Beat Length)  $L_\pi$ 에 의해  $L_N^p = p(3L_\pi)/N$ 로 나타낼 수 있는데, 여기서 p와 N은 서로소여야 하고  $L_\pi$ 는 가장 낮은 두 모드가 z 방향으로 전파하여  $\pi$  만큼의 위상차를 갖는 거리를 타나낸다.<sup>[3]</sup>

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \quad (1)$$

여기서  $\beta_0, \beta_1$ 은 기본 모드와 1차 모드의 전파 상수이다. 또 다중 모드 도파로에서는 파가 진행하는 방향인 z 방향을 따라 N개의 자기상이 첫 번째, 두 번째 등 주기적으로 나타나게 되는데 이 주기성을 나타내는 정수가 p이다. 예를 들어 그림 2를 보면  $z=(3L_\pi)/2$ 에서 첫 번째  $N=2$ 의 이미지가,  $z=3(3L_\pi)/2$ 에서 두 번째  $N=2$ 의 이미지가 나타나는 것을 알 수 있다. 첫 번째 이미지일 때  $p=1$ 이 된다는 것을 알 수 있고, 두 번째 이미지일 때  $p=3$ 가 된다는 것을 알 수 있다.  $p=2$ 에서 두 번째 이미지가 안 되는 이유는 p가 자기상의 개수를 나타내는 N과 공통 인수를 갖기 때문이다. 또한 한 개의 자기상이 맺히는 경우 ( $N=1$ ), p가 홀수일 때는 입력 위치와 대칭이 되는 크로스 위치에 상이 맺히고 짝수일 때에는 입력된 위치와 같은 바 위치에 맺히게 된다.

다중 모드 도파로 내에 유기되는 모드들의 여기 상태에 따라 일반적인 간섭과 제한적 간섭으로 나눌 수 있다. 일반적 간섭은 모든 유기 모드가 여기되어 자기상 맺힘에 기여하게 되는 것이고 제한적 간섭은 특정 모드들만 여기되는 경우를

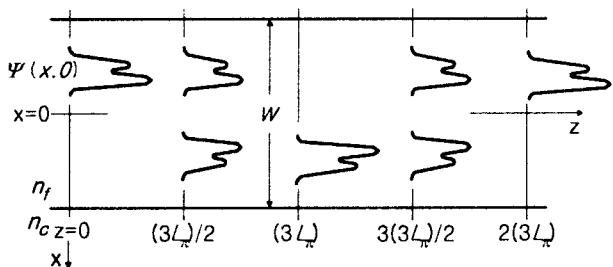


그림 2. 자기상 맺힘 현상.

이야기 한다. 이 두 간섭에서의 자기상이 맺히는 길이는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.<sup>[4]</sup>

$$L_{N,general}^p = \frac{L}{N} 3(L_\pi), \quad L_{N,paired}^p = \frac{L}{N} (L_\pi) \quad (2)$$

첨자 general은 일반적인 간섭을 나타내고 paired는 제한적 간섭의 하나로 입력이 도파로의 3등분 지점에 들어가는 경우인 쌍간섭을 의미한다. 식에서 보는 바와 같이 제한적 간섭은 특정 모드들만의 여기로 자기상이 맺히는 길이가 일반적 간섭에 비해 매우 짧아지는 것을 알 수 있다.

이러한 자기상 맺힘 현상에 대한 해석적 모델은 잘 알려져 있다.<sup>[3]</sup> 이 해석적 모델은 다중모드 도파로의 유기모드들이 완벽하게 도파로 안에 갇혀 진행하며 임의의 진행거리에서의 파의 분포는 이들 유기모드들의 합성으로 표현된다는 가정에서 출발한다. 따라서 수학적 해석 시 유기 모드들은 정현파로써 표현할 수 있으며, 모든 정현파의 한 주기가 해석범위에 들어가 푸리에 급수를 적용할 수 있도록 실제 도파로 폭 W에 같은 크기의 가상 도파로 폭 W 만큼을 확장하였다. 이를 그림 3에 나타내었다. 실제의 입력파  $f(x)$ 가 인가되면 이 전력을 각 모드들이 나누어 갖게 되며, 가상 영역에서는 실제 도파로와 점대칭의 형태를 가지게 되므로 가상영역의 입력파는  $-f(-x)$ 로 표현할 수 있다. 따라서 이 둘을 합한 수학적 입력  $f_m(x)$ 를 정의하게 되고 z 방향으로 거리  $L_N^p$ 만큼 진행한 후의 파의 분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{out}(x) = \frac{1}{C} \sum_{q=0}^{N-1} f_{in}(x-x_q) \exp(j\phi_q) \quad (3)$$

식 (3)이 의미하는 것은 입력파가 다중모드 도파로에 결합되어  $z=L_N^p$ 까지 진행했을 때, 파의 분포 즉 출력파는 x축 방향으로 각각  $x_q$ 에 위치하며  $\phi_q$ 의 상대 위상을 갖는 N개의 자기상으로 표현된다는 것이다. 여기서

$$x_q = (2-N) \frac{L}{N} W \quad (4)$$

$$\phi_q = q(N-q) \frac{L}{N} \pi \quad (5)$$

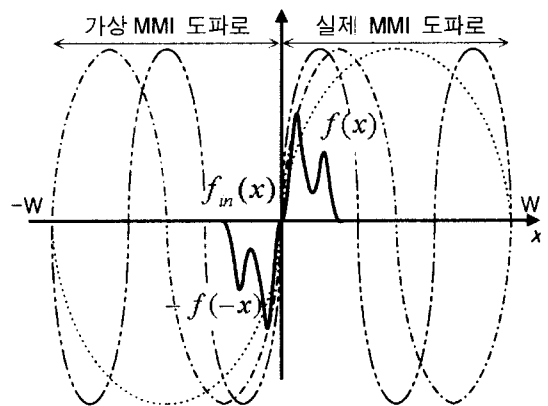


그림 3. 자기상 맺힘 해석을 위한 입력파의 가상영역으로의 주기 확장 및 유기모드 분포.

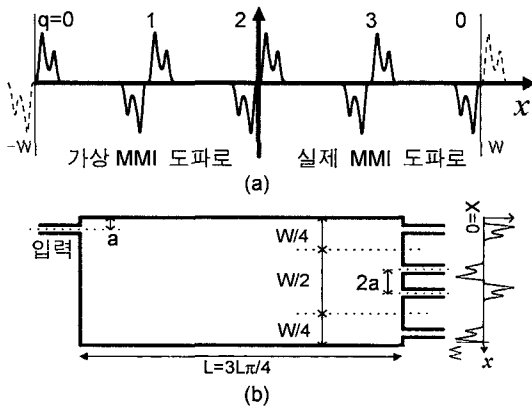


그림 4. 그림 3의 입력  $f_m(x)$ 에 의해 (a)  $z=3L_\pi/4$  진행 후의 자기상 맷힘에 의한 출력 파형과 (b) 이를  $1 \times 4$  균일 광전력 분배기 구조.

$$C = \exp(j\beta_0 L_N^p) \sum_{q=0}^{N-1} \exp\left[-j\pi \frac{x_q}{W} + j\phi_q\right] \quad (6)$$

로 나타내며  $C$ 는 에너지 보존 법칙에 의해  $|C| = \sqrt{N}$ 을 만족한다.  $q$ 는 0부터  $N-1$ 까지 변하는 정수로  $N$ 의 주기성을 가지며 자기상의 상대 위상과 위치를 결정하는 변수이다.

하나의 예로써 그림 4(a)에 첫 번째로 4개의 자기상 맷힘이 일어나는 예 ( $p=1, N=4$ )를 보였다.  $z$  방향으로  $L_\pi/4$ 만큼 진행하면 4개의 자기상이 맷히게 된다. 이들 중  $q=1$ 과  $q=3$ 인 자기상을 살펴보면, 식 (4)에 의해  $x_1 = -W/2$  그리고  $x_3 = W/2$  지점에 자기상이 만들어지며 각각의 상대 위상은 식 (5)를 이용하여  $\phi_1 = 3\pi/4$  그리고  $\phi_3 = \pi/4$ 임을 알 수 있다. 이와 같이  $x = -W$  지점부터 생기는 자기상의 넘버링은  $q=0, 1, \dots, N-1$ 과 같이 매겨지게 되며  $N$ 의 주기성을 가지므로  $x=W$  지점에 생기는 자기상의 넘버링은 다시  $q=0$ 가 되어 반복된다.

### III. 균일 광전력 분배기의 벡터 해석

2장에서 설명한 자기상 맷힘 현상의 해석에 근거하여 다중 모드 도파로를 이용한 광전력 분배기를 설계할 수 있다. 광집적 회로에 쓰이는 광전력 분배기는 그 소자의 길이가 짧을수록 좋으므로 여기서는  $N$ 개의 자기상이 맷히는 가장 짧은 길이, 즉  $p=1$ 인 경우에 대해서만 설명하도록 하겠다. 앞서 설명한 바와 같이 그림 4(a)는 4개의 자기상을 갖는 경우로 이를 이용하면 그림 4(b)와 같은 균일 광전력 분배기를 설계할 수 있다. 입력도파로 위치의 기준이 되는  $a$ 를  $0 < a < W/N$  사이에서 임의로 선택함에 따라  $1 \times N$  균일 광전력 분배기를 구현할 수 있다. 반면  $a$ 를  $W/N$ 의 정수배와 같게 하면, 즉, 입력의 위치를  $W/N$ 의 정수배 지점으로 이동하게 되면 기존의 분리되어서 나오던 자기상들이 중첩을 하게 되고 중첩된 자기상들 사이의 위상 관계에 따라서 균일 출력뿐 아니라 비균일 분배 비율을 갖는 출력을 얻을 수 있다. 그러나 이 경우 비균일 출력이라 해도 4장에서 언급하고자 하는 임의의 분배 비율을 얻을 수는 없으며 다만 몇 가지의 정해진 비균일 분배 비율을 가질 수 있음을 주지할 필요가 있다.<sup>[5]</sup>

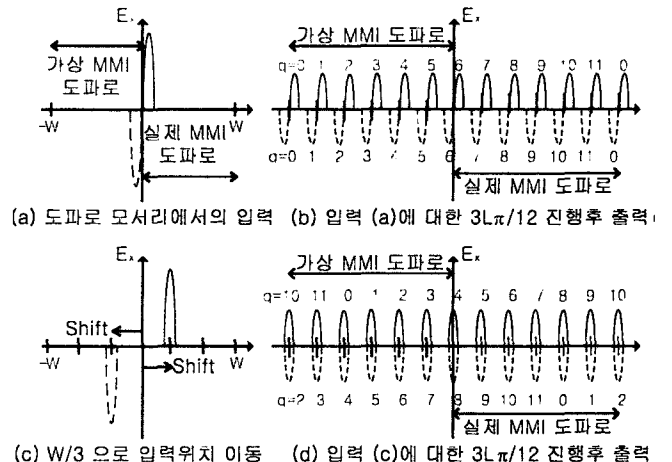


그림 5. 대칭형 입력 인가에 의한 일반적 간섭과 제한적 간섭에 의한 자기상 맷힘 비교 (a) 일반적 간섭이 일어나는 경우의 예: 입력 위치 ( $0 < a < W/12$ ) 및 입력파의 확장 (b) (a) 경우의 입력에 따른 12개의 출력 자기상 (c) 제한적 간섭이 일어나는 경우의 예: 입력 위치 ( $a = 3W/12 = W/3$ ) 및 입력파의 확장 (d) (c) 경우의 입력에 따른 자기상 중첩과 결과로 나타난 6개의 출력 자기상.

균일 광전력 분배기의 경우 출력 자기상의 위치와 위상을 식 (3)~식 (5)들을 사용하여 간편하게 구할 수 있으며 이에 근거하여 소자를 쉽게 구현할 수 있다. 그러나 비균일 광전력 분배기의 경우 중첩에 의해 2개의 자기상의 위상에 따라 서로 상쇄 혹은 보강되거나 새로운 위상과 크기를 가진 출력을 만들게 되므로, 식 (3)~식 (5)들을 이용하여 수식적으로 해석할 수는 있지만 복잡하고 직관적이지 못하다는 단점이 있다. 따라서 이 경우 벡터 해석법을 적용하면 중첩에 의한 출력파의 변화를 도식적으로 나타낼 수 있어 쉽게 비균일 분배 비율의 원리를 파악할 수 있고 더 나아가 원하는 분배비율의 소자를 구현할 수 있다. 그림 5는 입력의 위치에 따라  $N=12$ 인 다중 모드 도파로에서 출력 자기상이 12개로 나타나는 경우(그림 5(a)와 5(b))와 중첩에 의해 출력 자기상이 4개만 나타나는 경우(그림 5(c)와 5(d))를 보여주고 있다. 실선으로 표시된 파는 실제영역에 인가된 실제 입력과 이에 의해 발생한 자기상을 그리고 점선으로 표시된 것은 가상영역에서의 입력과 이에 의한 자기상을 표현하고 있다. 그림 5(a)에서와 같이 입력파가 도파로의 모서리에 입력되어지는 경우를 생각해 보자. 가상영역을 포함하는 전체 입력은 실선과 점선에 의해 구성된  $f_m(x) = f(x) - f(-x)$ 가 된다. 식 (3)~식 (6)들에 의하면 이 입력이  $L_\pi/2 = 3L_\pi/12$ 만큼 진행했을 때, 그림 5(b)와 같이  $x = -W$ 와  $x = 5W/6$  사이에 입력  $f_m(x)$ 의  $1/\sqrt{12}$  크기가 되고 모양은 같은 12개의 자기상이 생긴다. 이 경우 12개의 자기상들은 그 위치  $x_q$ 가 서로 겹치지 않음을 볼 수 있다. 여기서 주의할 것은 가상영역은 실제 존재하는 것이 아니라 해석상 편리함을 위해 전개되어진 것으로 실제 출력은  $x=0$ 와  $x=W$  사이에 있는 자기상들만 고려해야 한다. 따라서 실제 입력과 닮은 실선과 점선의 자기상이  $x=0$ 와  $x=W$  사이에 12개 존재하므로  $1 \times 12$ 의 균일한 광전력 분배를 얻을 수 있다.

그런데 만일 입력의 위치를  $x = W/3$ 로 이동하면 주기 모드 확장에 의해 가상 영역의 상은 그림 5(c)에서 보는 바와 같이  $x = -W/3$ 로 이동하게 된다. 이 경우  $L_{12}$  만큼 진행하고 난 후의 출력 분포를 그림 5(d)에 보여주고 있다. 마찬가지로 식 (4)로부터  $q=0$ 의 실제 입력에 의한 자기상은  $x = -4W/6$ 에 생기며 입력 위치의 이동으로 인해 가상영역의 입력에 의한 자기상은  $x = 4W/6$  지점에 생기게 된다. 이와 같은 방법으로 서로 다른  $q$  값을 갖는 자기상들이 중첩을 일으키게 된다. 예를 들어  $x = 2W/6$  지점의 출력은  $q=6$ 의 실제 입력에 의한 자기상과  $q=10$ 인 가상영역의 입력에 의한 자기상의 간섭으로 만들어진다.  $x=0, 3W/6$  그리고  $W$  지점의 경우를 살펴보면 실제 입력에 의한 자기상의 상대위상과 가상 입력에 의해 만들어진 상대위상이 각각 순서대로  $2\pi/3$ 과  $5\pi/3, 11\pi/12$ 와  $23\pi/12$  그리고  $5\pi/3$ 과  $2\pi/3$ 가 됨을 식 (5)를 통해 확인할 수 있다. 이들은 서로  $\pi$ 의 위상차를 보임으로써 서로 상쇄되어 없어진다. 여기서 실제 입력과 좌우 대칭이라면 가상 입력에 의해 만들어진 자기상은 식 (5)의  $\phi_0$  외에 접대칭에 의한  $\pi$  만큼의 위상을 더 가지게 됨을 감안하여야 한다.

$x = W/6, 2W/6, 4W/6$  그리고  $5W/6$ 에서는 같은 지점에 위치한 실선과 점선의 자기상들의 상대 위상차가  $\pi$ 가 아니므로 출력이 존재하게 된다. 각 지점에서의 실선과 점선의 자기상들을 벡터로 표시하고 이들을 합성하여 결과적으로 나타나는 실제 출력들을 그림 6에 나타내었다. 다만 4개의 실제 출력들의 크기와 상대위상을 비교하기 쉽게 하기 위하여,  $x = W/6$  출력의 상대위상이 0이 되게 모든 자기상들과 출력들의 상대위상을  $-13\pi/12$  만큼씩 이동시켰다. 하나의 예로써  $x = W/6$ 인 지점의 경우를 살펴보자(그림 6(a)). 식(5)에 의하면 실제입력에 의한 자기상의 상대위상은  $11\pi/12$ 이 되고 가상입력에 의해 만들어진 상대위상은  $5\pi/4$ 가 된다. 이들을 벡터 합성하면 출력의 상대위상은  $13\pi/12$ 이 된다. 이를 반시계 방향으로  $13\pi/12$ 만큼 이동시키면 크기는 변함이 없이 상대위상이 0이 된다. 그림 6에서 각 지점에서의  $\vec{OA}$ 는 실제입력에 의한 자기상의

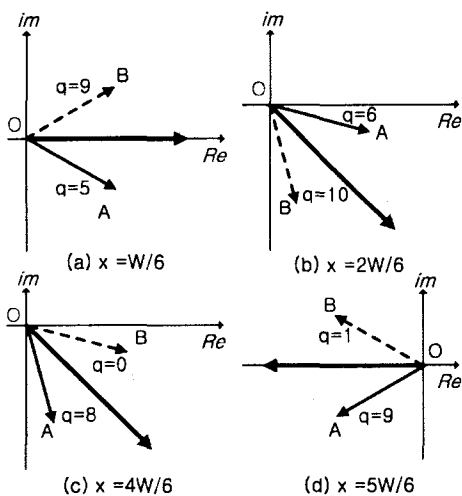


그림 6. 지점에 입력이 인가되었을 때(그림 5(c)와 5(d)의 경우), 자기상 중첩에 의해 나타나는 출력 자기상의 크기와 상대 위상을 도식적으로 나타낸 벡터 해석.

파를,  $\vec{OB}$ 는 가상영역에 의한 자기상의 파를 나타낸다. 같은 방법으로  $x = 2W/6, 4W/6, 5W/6$  지점에서의 출력을 구할 수 있으며 이를 각각 그림 6(b), 6(c), 6(d)에 나타내었다. 이 벡터 합성의 결과를 통해 우리는  $N=12$ 이며 입력이  $x = W/3$ 에 위치할 경우, 4개의 출력단,  $x = W/6, 2W/6, 4W/6$  그리고  $5W/6$ 에서 같은 크기를 가지며 서로 상대위상차가  $0, -\pi/4, -\pi/4$  그리고  $\pi$ 인 출력들을 얻는다는 것을 알 수 있다.

#### IV. 임의 분배 비율의 2x2 광전력 분배기에 대한 벡터 해석

앞서 기술한 광전력 분배기 벡터 해석 결과들을 역으로 이용하면 쉽게 임의 분배비율의 2x2 광전력 분배기를 설계할 수 있다. 여러 종류의 임의 분배비를 분배기가 발표되었으며 그 중 하나를 그림 7에 나타내었다. 그림 7은 그림 5에 보여준 광전력 분배기 두개를 이용한 임의분배비를 분배기의 구조를 보여주고 있다.<sup>16)</sup> 이 분배기는 크게 세부분으로 이루어져 있는데 입력과가 들어가는 다중모드 도파로(분배기)와 가운데 부분의 위상변조 단일모드 도파로 그리고 다시 처음 단과 같은 다중모드 도파로(결합기)로 이루어져 있다. 다중모드 도파로의 길이는  $3L_\pi/12$ 이며 입력은 도파로의 1/3 지점, 즉  $x = W/3$ 의 지점에 들어가게 되어 그림 5에서 살펴본 것과 같다. 앞서 말한 바와 같이 입력과가 길이  $L_{12} = 3L_\pi/12$ 인 분배기를 진행하게 되면 같은 세기를 갖지만 상대위상차  $0, -\pi/4, -\pi/4$  그리고  $\pi$ 를 갖는 4개의 출력을 얻게 된다. 그 다음 이 4개의 출력은 각각 독립된 단일모드 도파로를 진행하게 된다.  $x = W/6$ 과  $5W/6$ 에 위치한 단일도파로의 길이는  $L_1$ 로 같으며,  $x = 2W/6$ 와  $4W/6$ 에 위치한 단일도파로의 길이는  $L_2$ 이다.  $L_1$ 과  $L_2$ 의 서로 다른 길이를 사용하는 목적은 분배기의 4개 출력이 갖고 있었던 기존의 상대위상을 변조하기 위함이다. 이 네 개의 단일 도파로를 지나온 파는 길이  $3L_\pi/12$ 의 결합기의 입력으로 들어가게 되고 여기서 다시 자기상 맷힘 원리에 의해 두개의 출력을 만드는데 이 두 출력의 전력비는  $L_1$ 과  $L_2$  길이 차이에 의한 위상 변조를 통해 조절할 수 있다.

우선  $L_1$ 과  $L_2$ 의 길이 차이가 없다면 출력은 어떻게 되는지 살펴보자. 분배기의 4개 출력들은 결합기의 입력으로 작용하게 된다. 각 입력들은 식 (3)-식 (6)에 의해 결합기 출력단에서  $x=0$ 와  $x=W$ 을 제외하고  $W/6$ 의 배수가 되는 지점에 같은 크

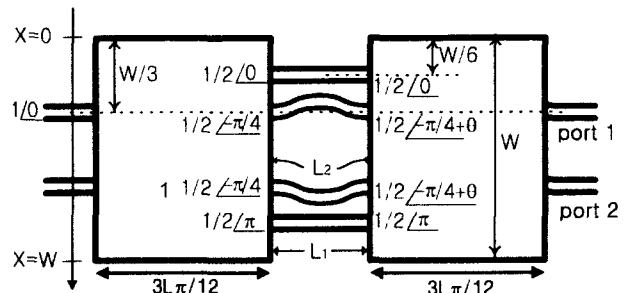


그림 7. 3 dB 다중모드간섭 결합기를 이용한 임의 분배 비율의 2x2 광전력 분배기 구조.

표 1  $L_1$ 과  $L_2$ 가 같을 경우 분배기의 출력 자기상(혹은 결합기 입력 자기상)에 의해 결합기 출력에 나타날 수 있는 출력 자기상들의 위치와 상대위상

출력위치 입력위치	$x = W/6$	$x = 2W/6$	$x = 3W/6$	$x = 4W/6$	$x = 5W/6$
$x = W/6$	$\pi, 5\pi/3$	$11\pi/12, 5\pi/4$	$2\pi/3, 2\pi/3$	$\pi/4, 23\pi/12$	$5\pi/3, \pi$
$x = 2W/6$	$2\pi/3, \pi$	$3\pi/4, 5\pi/12$	$2\pi/3, 5\pi/3$	$5\pi/12, 3\pi/4$	$5\pi/3, 0$
$x = 4W/6$	$0, 5\pi/3$	$5\pi/12, 3\pi/4$	$2\pi/3, 5\pi/3$	$3\pi/4, 5\pi/12$	$2\pi/3, \pi$
$x = 5W/6$	$2\pi/3, 0$	$5\pi/4, 11\pi/12$	$5\pi/3, 5\pi/3$	$23\pi/12, \pi/4$	$0, 2\pi/3$

기를 갖는 10개씩의 자기상을 맺게 된다. 표 1에  $L_1$ 과  $L_2$ 가 같을 경우 입력위치와 결합기 출력 위치에 따른 자기상들의 상대위상을 나타내었다. 표 1의 세로 변수는 입력위치, 즉 각 단일모드 도파로를 통해 결합기로 들어온 입력파의 위치를 나타내며 가로 변수는 식 (4)에 의한 자기상 맺힘의 위치  $x_q$ , 즉 출력단 위치를 나타낸다. 예를 들어 입력위치  $x = W/6$ 에 위치한 입력은  $x = W/6$  출력단 지점에 상대위상  $\pi$ 와  $5\pi/3$ 를 가지는 두개의 자기상을 맺게 한다. 이와 같이 출력단의 각 위치  $x_q$ 에서는 네 개의 단일모드 도파로를 통해 들어온 입력들에 의한 자기상들을 갖게 되므로 총 8개의 자기상들이 만들어지며 이들의 상대위상차에 의한 간섭에 의해 출력파가 만들어진다. 그런데 표 1의 자기상들의 상대위상을 살펴보면  $x = W/6, 3W/6, 3W/6$  그리고  $5W/6$  출력지점에서는 8개의 자기상들이  $\pi$ 의 위상차이를 갖는 쌍으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 또한 이러한 구성은  $L_1$ 과  $L_2$ 의 길이 차이에 상관없음을 알 수 있다. 즉 이들 출력단에서는 출력이 없음을 의미한다. 그러나  $x = 2W/6$ , 즉  $W/3$ 와  $x = 4W/6$ , 즉  $2W/3$  지점에서는 각각 8개의 자기상들에 의해 만들어진 일정한 크기의 출력을 갖게 된다. 이를 그림 8에 나타내었다. 먼저  $L_1=L_2$ 인 경우를 그림 8(a)에 그렸다. 그림 6의 경우와 마찬가지로 편리한 해석을 위해 전체적으로 모든 자기상들의 상대 위상을  $-\pi/12$ 만큼 이동시켰다. 그림에서 점선으로 된 벡터는 하나의 출력 자기상을 나타내며 표 1에 표시한 상대위상으로부터  $-\pi/12$ 만큼씩 이동하여 그려져 있다. 그림 8(a)의 벡터 (1)은  $x = W/6$ 와  $5W/6$  지점의 입력에 의한 출력 자기상들에 의해 만들어지며, 벡터 (2)는  $2W/6$ 과  $4W/6$  지점의 입력에 의한 출력 자기상들에 의해 만들어진다. 따라서 이 둘의 합 벡터  $\vec{E}_1$ 은  $x = 2W/6$ 의 출력과, 즉 그림 7에서 port1의 출력이 된다. 같은 방법으로  $x = 4W/6$ 인 port2에서의 출력을 구할 수 있고 그림 8(a)의 벡터  $\vec{E}_2$ 로 나타내고 있다. 그림에서 쉽게 알 수 있듯이  $L_1$ 과  $L_2$ 가 같은 경우는 50:50의 균일 분배기가 되는 것이다. 다시 말해  $L_1$ 과  $L_2$ 가 같다는 것은 단일모드 도파로 없이 분배기와 결합기를 연속적으로 붙어 있는 경우와 같으므로 이 결과는 일반적인  $2 \times 2$  3dB 다중모드간섭 광분배기의 구조와 일치함을 알 수 있다.

다음으로 위상 변조단의 길이  $L_1$ 과  $L_2$ 가 다른 경우를 생각해 보자.  $L_1$ 과  $L_2$ 를 달리 함으로써 이에 따르는 상대위상차  $\theta$ 가 발생하므로, 출력단의  $x = 2W/6$ 와  $4W/6$ 에 위치한 입력들의 상대위상이  $\theta$ 만큼 변하게 된다. 이로 인해 표 2와 같이 출력 자기상들의 상대위상도  $\theta$ 만큼 변하게 된다. 이를 이용하여 벡터 합성을 해 보면 그림 8(b)와 같다. 그림 8(a)와 비

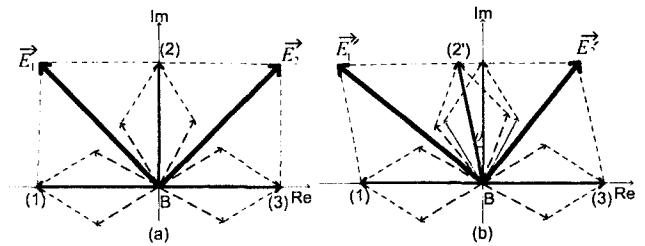


그림 8. (a) 위상차이가 없을 경우 임의 분배 비율의  $2 \times 2$  광전력 분배기의 결합기 출력에 대한 벡터 해석 (b) 위상차이가 있을 경우 결합기 출력에 대한 벡터 해석.

표 2.  $L_1$ 과  $L_2$ 가 같지 않아  $\theta$  만큼의 위상변조가 발생했을 때, 출력위치  $x = 2W/6, 4W/6$ 에 맞는 자기상들의 상대 위상

출력위치 입력위치	$x = 2W/6$	$x = 4W/6$
$x = W/6$	$11\pi/12, 5\pi/4$	$\pi/4, 23\pi/12$
$x = 2W/6$	$3\pi/4 + \theta, 5\pi/12 + \theta$	$5\pi/12 + \theta, 3\pi/4 + \theta$
$x = 4W/6$	$5\pi/12 + \theta, 3\pi/4 + \theta$	$3\pi/4 + \theta, 5\pi/12 + \theta$
$x = 5W/6$	$5\pi/4, 11\pi/12$	$23\pi/12, \pi/4$

교하여 보았을 때 그림 8(a)의 벡터(2)가  $\theta$ 만큼 회전하여 벡터(2) $\gamma$ 가 되며 이에 따라 그 출력과  $\vec{E}_1$ 와  $\vec{E}_2$ 은  $\vec{E}_1'$ 와  $\vec{E}_2'$ 가 된다. 즉  $\theta$ 의 크기에 따라 두 출력단의 출력 분배비가 결정되며, 실제 광전력 분배기 설계에서는  $L_1$ 과  $L_2$ 의 길이 차이에 의해 분배비가 결정된다. 그림 8에서 보는 바와 같이  $\theta$ 에 의한 회전은 벡터(2)에서 발생하므로 더욱 간단한 해석을 위해 벡터(1)과 (3)을 고정시키고 벡터(2)의 회전만을 간단하게 그림 9에 나타내었다. port1의 출력 광전력을  $P_{E1}$ 이라고 하면  $P_{E1} = \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_1^* = |\vec{E}_1|^2$ 로 구해질 수 있으며 이는  $\vec{E}_1$  벡터의 크기의 제곱이 된다. 그러므로 이는 삼각함수를 이용하여  $\Delta ABC$ 에서

$$P_{E1} = |AB|^2 + |OB|^2 - 2|AB||OB|\cos(\pi/2 + \theta) \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 그림 8에서 보는 바와 같이 벡터 (1), (2) 그리고 (3)의 크기가 모두 이므로

$$P_{E1} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \quad (8)$$

로 나타낼 수 있으며 port2의 광전력은  $P_{E2} = 1 - P_{E1}$ 이므로

$$P_{E2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \quad (9)$$

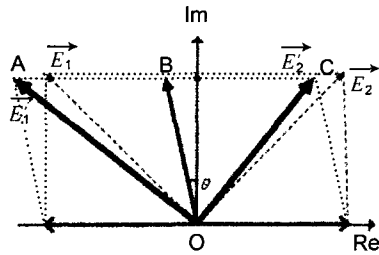


그림 9. 간단한 해석을 위해 그림 8의 벡터(10과 (3)을 고정시키고 벡터(2)만의 회전을 나타낸 벡터 해석.

로 간단하게 나타낼 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 다중모드간섭 광전력 분배기 설계를 위한 벡터해석법을 제시하였다. 이를 위해 우선 다중모드간섭 현상에 의한 자기상 맺힘의 원리를 자세히 설명하였고, 이들 자기상의 도파로 내에서의 위치, 크기 및 상대위상에 대한 기존 수식들 (식 (3)~식 (6))을 분석하였다. 이 결과를 이용하여 설계할 수 있는 3가지의 광전력 분배기가 있는데,  $1 \times N$  균일 광전력 분배기,  $1 \times N$  비균일 광전력 분배기 그리고 임의분배비율 광전력 분배기가 그것이다.  $1 \times N$  균일 광전력 분배기의 경우 기존 수식을 이용하여 쉽게 설계할 수 있었으나, 입력의 위치가 특수한 경우 출력에서 상대위상이 서로 다른 자기상들이 중첩되어  $N$ 이 아닌 다른 개수의 균일 혹은 비균일 출력들을 갖게 된다. 후자의 경우 기존 수식들을 이용하여 설계하기에는 계산이 매우 복잡하고 중첩에 의한 출력 개수 및 분배비율의 원리를 이해하기 쉽지 않다. 그러나 자기상의 크기와 상대위상을 벡터로 표현하여 자기상 중첩을 벡터들의 도식적 합성으로 계산하면 출력의 상대적 크기와 상대위상을 쉽게 파악할 수 있다. 더군다나 임의분배비율 광전력 분배기의 경우, 분배기의 중간 지점에서 만들어진 자기상들의 상대위상을 변조한 후 전파하게 함으로써 출력에서 원하는 분배비율을 얻는 원리를 이용하고 있기 때문에, 어느 위치의 자기상에 얼마만큼의 위상

변조가 필요한지를 알아내는 것이 기존 수식들로는 쉽지 않으나 벡터 해석법은 비교적 편리한 방법을 제공하고 있다. 본 논문에서는  $2 \times 4$ 와  $4 \times 2$  다중모드 결합기로 구성된 임의분배비율 광전력 분배기에 적용한 예를 보였다. 또한 이 벡터 해석법은 광전력 분배기 뿐만 아니라 다중모드간섭을 이용한 광스위치, 광필터, 광감쇄기 등 다양한 소자들에 적용 가능한 방법이다.

### 감사의 글

이 연구는 한양대학교 1999년도 교내연구지원사업에 의해 지원되었음.

### 참고문헌

- [1] R. Ulrich and G. Ankele, "Self-imaging in homogeneous planar optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 27, no. 6, p. 337, 1975.
- [2] O. Bryngdahl, "Images formation using self-imaging techniques," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 63, no. 4, p. 416, 1973.
- [3] L. B. Soldano and E. C. M. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: Principles and Applications," *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 4, p. 615, 1995.
- [4] M. Bachmann, P. A. Besse, and H. Melchior, "General self-imaging properties in  $N \times N$  multimode interference couplers including phase relations," *Appl. Opt.* vol. 33, no. 18, pp. 3905-3911, 1994.
- [5] M. Bachmann, P. A. Besse, and H. Melchior, "Overlapping-image multimode interference couplers with a reduced number of self-images for uniform and nonuniform power splitting," *Appl. Opt.* vol. 34, no. 30, pp. 6898-6909, 1995.
- [6] N. S. Lagali and M. R. Paiam, "Theory of variable-ratio power splitters using multimode interference couplers," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 11, no. 6, 1999.

## Vector analysis for multimode-interference power splitter with an arbitrary splitting ratio

Jin Hee Kim<sup>†</sup> and Sang Sun Lee

*Division of Electrical and Computer Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, KOREA*

<sup>†</sup>*E-mail: gneekim@dreamwiz.com*

Seok Ho Song

*Department of Physics, Hanyang University, Seoul 133-791, KOREA*

(Received September 13, 2002, Revised manuscript October 8, 2002)

We propose a vector analysis for designing multimode-interference power splitters, which can show an arbitrary splitting ratio. Power splitting is a fundamental characteristic in integrated optical circuits and its value would be multiplied for many applications if the splitting ratio could be selected freely. Since the vector analysis utilizes a graphical method based on the previously-reported mathematical results of multimode interference, it shows an excellent advantage especially for designing power splitters with an arbitrary splitting ratio.

*Classification code* : OE.010.