

Variable optical attenuator(VOA) 응용을 위한 comb actuator 설계 방법

김상범, 한승오, 오상우, 박정호
고려대학교 전기공학과 마이크로 시스템 연구실

Comb actuator design methodology for variable optical attenuator(VOA) application

Sang-Bum Kim, Seung-Oh Han, Sang-Woo Oh, Jungho Pak
Department of Electrical Engineering, Korea University

Abstract - 본 논문은 variable optical attenuator(VOA)에 응용하기 위한 comb actuator를 설정하기 위해, 요구되는 조건에 가장 적합한 comb actuator를 설계하기 위한 방법을 제시한다. VOA 응용을 위한 comb actuator 설계에서 고려되어야 하는 조건들은 comb actuator의 performance(변위, 공진 주파수), 구동 전압 그리고 공정의 한계(최소 선폰, 최소 간격, 두께) 등이다. 이러한 조건들이 정해지면, 이 조건들을 comb actuator의 구동력과 지지빔 스프링에 의한 복원력에 대입하여 두 힘이 평형일 때의 조건으로부터 comb finger의 수와 구동부의 질량 및 지지빔의 길이 등의 설계 변수들을 정할 수 있다. 그리고 comb actuator의 질량으로부터 구동부의 면적을 구할 수 있고, 이러한 조건에서 구한 지지빔의 면적과 비교하여 적절한 구동부의 면적을 설정한다. 이상의 내용을 조합해서 요구된 조건이 comb actuator 설계에 적합한지의 여부를 확인했고, VOA 응용을 위한 요구 조건에 맞는 comb actuator 설계를 했다.

1. 서 론

현대 사회는 정보를 서로 주고받을 수 있는 정보 네트워크 사회를 이루고 이러한 정보 중 일부를 이용하여 많은 일을 수행하고 있다. 이러한 정보의 홍수 속에서 상호 전달되는 정보의 양은 기하급수적으로 증가했으며, 앞으로 전개될, 가상공간과 물질공간의 통합이라는 유비쿼터스 시대에는 더욱 폭발적으로 증가할 것으로 예상된다. 하지만 정보가 전달되는 정보 전송수단은 급격한 전송 정보량의 증가를 따라가지 못하고 있다. 이를 해결하기 위해 검토되고 있는 방법이 모든 네트워크를 광섬유로 구성하는 전광 네트워크이다. 광통신이란, 전기 정보를 광신호로 변환하여 물리적 전송 회선인 광섬유를 통해 상대방에게 빛의 속도로 전달하고, 상대방은 이를 다시 전기적 신호로 변환하여 정보를 통신하는 방법이며 전광 네트워크란 현재 전기선으로 구성된 네트워크의 지선과 간선을 모두 광섬유로 교체함으로써 각 가정과 사무실의 개인용 컴퓨터에 직접 광섬유가 연결되는 초고속/대용량 네트워크 체계이다. 이러한 전광 네트워크에 필히 요구되는, 광신호를 제어하는 지능형 광 제어기 개발을 위해 variable optical attenuator(VOA)의 사용이 요구되는데, VOA의 구조물 구동에 사용되는 초소형 comb actuator 단위 소자의 설계 방법을 본 논문에서 소개한다. Micro-electro-mechanical system 제작 기술을 이용하여 제작되는 초소형 comb actuator를 VOA에 적용하기 위해서는 VOA 구조물 구동 조건과 제작 공정의 한계를 동시에 고려하여 요구되는 VOA 소자의 요구 조건에 맞도록 초소형 comb actuator를 설계해야 한다.

2. 본 론

2.1 Comb actuator 설계

Comb actuator의 설계는 그림 1의 flow chart에 따라 진행된다.

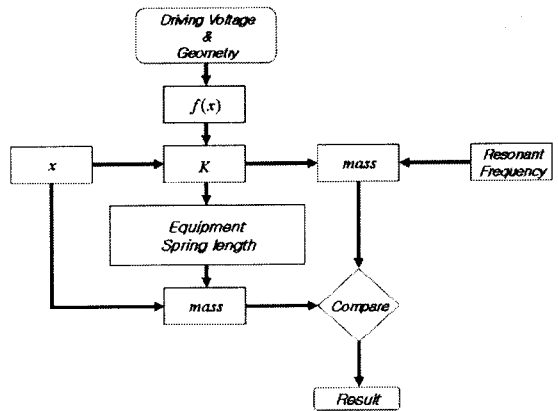


그림 1. VOA의 구동 조건에 따라 초소형 comb actuator를 설계하기 위한 flow chart.

2.1.1 구동 조건 및 구조

요구된 구동 전압 범위는 3~15 V이고 계산을 위한 초기 값으로 10 V를 설정하였다 또한, 공진 주파수는 목표 값이 10 KHz(최소 1 KHz 이상)이다. 이 외에, 제작 공정에 의해 정해진 설계 변수들은 comb actuator 두께 (80 μm), comb finger 및 spring beam의 폭 (각 3 μm), comb finger의 간격 (4 μm) 등이다. Comb actuator를 구성하는 comb finger와 지지빔의 모양은 일반적인 직선형을 고려하였다.

2.1.2 Comb actuator의 기본 동작

수평 방향으로 움직이는 정전형 actuator의 두 평행판 사이의 정전력을 구하는 식으로부터 n개의 finger가 있을 때의 comb actuator의 구동력은 식 (1)과 같이 된다.

$$F = \frac{n\epsilon_r \epsilon_0 a V^2}{d} \quad (1)$$

여기에서 n은 comb finger의 개수, ϵ_r 은 comb finger 사이에 있는 물질의 상대 유전율이고 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F/m, a는 comb actuator의 두께, V는 comb actuator에 인가되는 전압, d는 comb finger간의 거리이다.

스프링에 의한 기계적 복원력 F_s 는 Hook의 법칙에 의

해 식 (2)와 같이 된다.

$$F_s = Kx \quad (2)$$

여기에서 K 는 지지빔의 스프링 상수이고, x 는 comb actuator의 변위이다.

식 (1)과 (2)가 동일한 조건에서 정리를 하면 식 (3)을 수할 수 있고, 이를 이용하여 이 조건에서 필요한 스프링 상수 K 의 관계식을 식 (4)와 같이 구할 수 있다

$$Kx = \frac{n\epsilon_r \epsilon_0 a V^2}{d} \quad (3)$$

$$K = \frac{n\epsilon_r \epsilon_0 a V^2}{xd} \quad (4)$$

2.1.2 Comb actuator의 K 값 계산

Comb actuator의 구동 조건과 변수 값을 가지고, 기본적인 구동력 F 를 구할 수 있고, 이를 Equilibrium 조건에 의해 F_s 와 F 가 같다고 하면 K 값을 구할 수 있다. 표 1은 comb finger의 수(n)를 변화시키면서, n 의 변화에 따른 F 와 K 의 값을 구한 것이다.

표 1. 구동 전압이 10 V이고, 공진 주파수가 10 KHz로 정해질 때 comb finger의 수에 따른 정전력 F 와 스프링 상수 K 값.

comb finger 수 (n)	F (10^{-8})	K (10^{-3})
10	17.7	17.7
20	35.4	35.4
30	53.1	53.1
40	70.8	70.8
50	88.5	88.5
100	177	177
200	354	354
400	708	708
600	1062	1062
800	1416	1416
1000	1770	1770

2.1.3 Comb actuator의 변위

구동 전압의 초기 값이 10 V이고, 목표로 하는 공진 주파수가 10 KHz일 때의 요구된 변위는 10 μ m이다. 10 μ m의 변위를 고려해서 comb finger의 길이는 30 μ m로 정했고 이런 조건에서 comb finger의 개수가 n 개일 때의 구동부의 면적 S_f 를 표 2에 정리하였다.

2.1.4 Comb actuator의 mass 계산

표 1에서 구한 각 K 값들과 목표하는 공진 주파수 f 를 이용하면 그림 2의 comb actuator의 동작 모델링으로부터 구동부 질량과 공진 주파수와의 관계식인 식 (5)를 얻고, 이로부터 구동부 질량의 면적을 구할 수 있다 [3,4].

$$K = M(\omega_n)^2 = M(2\pi f_n)^2 \quad (5)$$

여기에서 ω_n 은 $2\pi f_n$ 이고 f_n 은 구동부의 공진 주파수이다.

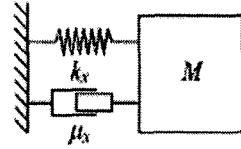


그림 2. VOA comb actuator의 동작 모델링.

표 2. 구동 전압 10 V, 공진주파수 10 KHz 일 때, n 개의 comb finger의 면적(S_f)과 구동부의 면적(S_m).

comb finger 개수 (n)	S_f [μ m] ² (3*30*n)	S_m [μ m] ²
10	900	23
20	1800	48
30	2700	72
40	3600	96
50	4500	121
100	9000	241
200	18000	482
400	36000	965
600	54000	1447
800	72000	1930
1000	90000	2412

또한, M 은 구동부의 질량이며 이는 다음과 같이 표현된다.

$$M = S_m \rho \quad (6)$$

여기서, S_m 은 구동부의 윗면 면적이고, ρ 는 재료의 밀도이다. (Si의 경우는 2320 kg/m^3 이다.)

$$K = S_m \rho a (\omega_n)^2 = S_m \rho a (2\pi f_n)^2 \quad (7)$$

$$S_m = \frac{K}{\rho a (\omega_n)^2} = \frac{K}{\rho a (2\pi f)^2} \quad (8)$$

식 (8)에 의해서 구동부 질량의 면적을 구하면 표 2와 같다.

2.1.5 Comb actuator의 설계 가능 여부

표 2의 결과를 보면 comb finger의 수가 10개부터 1000개까지 변할 때 줄곧 S_f 값이 S_m 값보다 크음을 알 수 있다. Comb finger의 면적이 구동부의 면적보다 클 수 없으므로, 구동 초기 전압 10 V와 목표로 하는 공진 주파수 10 KHz의 구동 조건은 현재의 설계 변수를 갖는 comb actuator의 제작에 부적절하다. 따라서 설계에 맞는 적절한 구동조건을 구하기 위해서는 식 (8)로부터 S_m 과 설계 변수들의 상호 관계를 고려하여 comb finger의 면적보다 구동부의 면적을 크게 되도록 설계 변수의 조정이 필요하다.

$$S_m = \frac{n\epsilon_r \epsilon_0 a V^2}{xd} \cdot \frac{1}{\rho a (2\pi f)^2} \quad (9)$$

식 (9)에서 정해진 구동 조건이 있을 때, S_m 을 증가시키기 위해서는 n 의 증가, V 의 증가, 또는 f 의 감소가 필요하다. 그러나 공정상의 문제로 n 의 무한정한 증가는

불가능하다. 그래서, V 를 증가 시키거나 f 를 감소시켜야 하는데 우선, V 를 15 V(f 는 10 KHz일 때)로 증가시켜서 S_f 와 S_m 을 비교하고, V 를 10 V, 15 V일 때, f 를 5 KHz, 3 KHz로 각각 감소시켜가면서 S_f 와 S_m 을 비교해 보았으나 항상 S_f 가 S_m 보다 컸다. 이 결과로 요구된 3 V ~ 15 V의 구동 전압 범위와 목표 공진 주파수 10 KHz에서는 comb actuator의 설계가 불가능함을 알 수 있었다.

2.1.6 적합한 Comb actuator 구동 조건

Comb actuator 설계에 적합한 구동 조건을 구하기 위해서, f 는 3 KHz로 고정하고, V 값을 30 V로 해서 결과를 구했을 때, S_m 은 n 에 관계없이 S_f 보다 컸다. 따라서, 3 KHz의 공진 주파수에서 적절한 구동 전압의 범위는 $15V < V < 30V$ 이고, 계산을 통해서 적절한 구동 전압인 20 V의 값을 얻었다. 표 3에 구동 전압과 공진 주파수가 20 V, 3 KHz인 경우의 S_m 과 S_f 를 정리하였다. 여기에서 총면적이란 것은 comb finger의 면적과 지지빔의 면적의 합이다.

표 3. 구동 전압이 20 V, 공진 주파수가 3 KHz 일 때, n 개의 구동부 질량의 면적(S_m), comb finger의 면적(S_f), 지지빔 면적(S_b), 그리고, 총면적(S)의 값.

comb finger 개수(n)	$S_f[\mu m^2]$ (3*30*n)	$S_b[\mu m^2]$	$S_f[\mu m^2]$	$S_m[\mu m^2]$
10	900	3498	4398	1093
20	1800	2775	4575	2186
30	2700	2424	5124	3279
40	3600	2202	5802	4372
50	4500	1943	7443	5465
100	9000	1623	10623	10931
200	18000	1287	19287	21863
400	36000	1023	37023	43727
600	54000	891	54891	65591
800	72000	810	72810	87455
1000	90000	753	90753	109310

2.2 Comb actuator의 스프링 빔

Comb actuator 설계에서 지지빔의 면적 또한 고려되어야 한다. 식 (2)에서 유도한 스프링 상수 K 는 식 (10)과 같이 다시 표현된다.

$$K = \frac{F_s}{x} \quad (10)$$

직선빔 구조의 경우 수평, 수직 방향 모두 동일한 스프링 상수를 사용하는데 이때의 변위 x 는 식 (11)과 같다.

$$x = \frac{FL^3}{48EI} \quad (11)$$

여기서 E 는 Young's modulus(Si의 경우는 130GPa), $I = aw^3/12$ (수평방향), L 은 지지빔의 길이 그리고 w 는 지지빔의 선포(3um)이다. 식 (11)을 통해서 지지빔의 길이(L)를 구하면 지지빔의 넓이를 구할 수 있다.

2.3 Comb actuator 설계에 필요한 각 면적 비교

Comb actuator의 구동부 질량의 면적은 comb finger의 면적과 지지빔의 면적을 포함하고 있다 그렇기 때문에, 구동부 질량의 면적은 comb finger의 면적과 지지빔

의 면적을 합한 총면적(S)보다 커야 한다. 표 3을 참조하면 이러한 조건을 만족하는 구동부 질량의 면적에서의 comb finger의 개수가 100개 이상임을 알 수 있다.

2.4 Comb actuator 설계에 적절한 구동 조건

주어진 VOA의 사양과 제한된 공정 조건을 이용하여 VOA의 구동부 구동에 사용된 comb actuator를 설계하기 위해 설계 변수와 구동 조건들은 변화시키면서 분석한 결과 comb actuator 설계에 적합한 구동 조건은 구동 전압 20 V, 공진 주파수 3 KHz, 그리고 comb finger 개수가 100개 이상임을 확인하였다. 전체 구동부에서 comb actuator의 최종 면적이 주어지면, 이러한 방법을 이용하여 구동에 적합한 comb finger 개수와 함께 comb actuator 설계를 끝낼 수 있다.

3. 결 론

요구된 comb actuator의 사양과 공정 조건이 주어졌을 때, 그 조건이 comb actuator 설계에 적절한지의 여부를 기본 동작 관계식과 설계 변수를 이용한 계산에 의해서 확인할 수 있다. 만약에 요구된 조건이 설계에 부적합할 경우에는 설계 변수 간의 상호 관계에 의해서, 가장 적절한 값을 수학적 계산을 통해 제시할 수 있다. 현재, 이 방법을 통해서 얻어진 구동 조건과 설계 변수를 가지고 comb actuator의 모델링을 MEMS CAD Tool에서 구현하고 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Tang, William chi-keung, "Electrostatic comb drive for resonant sensor and actuator application", U.M.I, 10~21, 1990
- [2] W.C. Tang, T.Cuong H.nguyen, and R.T.Howe "Laterally Driven polysilicon resonant Microstructure", proc. 1989 IE EE Micro Electro Mechanical System, pp.53~59, February 1989
- [3] Pasano A P and Cho Y H 1990 Mechanical design issue in laterally-driven microstructures Sensors Actuators A2 1-A23 1060-4
- [4] Rob Legtenberg, A W Groeneveld and M Elwenspoek "Comb-drive actuators for large displacements" J.Micromech. Microeng. 6 (1996)320-329.