

〈 논문 〉

평판형 압전 복합재료 작동기의 작동 변위에 미치는 인가전압 및 구동주파수의 영향

우 성 충[†] · 구 남 서^{*}

(2005년 12월 9일 접수, 2006년 3월 17일 심사완료)

Influence of Applied Electric Fields and Drive Frequencies on The Actuating Displacement of a Plate-type Piezoelectric Composite Actuator

Sung-Choong Woo and Nam Seo Goo

Key Words: Plate-type Piezoelectric Composite Actuator(평판형 압전 복합재료 작동기), PZT Ceramic(압전 세라믹), Bending Behavior(굽힘 거동), Actuating Displacement(작동 변위), Resonance Frequency(공진 주파수)

Abstract

The actuating performance test of plate-type piezoelectric composite actuators having different lay-up sequences was experimentally carried out at simply supported and fixed-free boundary conditions. The actuating displacement of manufactured plate-type piezoelectric composite actuator (PCA) was measured using a non-contact laser displacement measurement system. Our results revealed that the actuating displacement with increasing applied electric field at a drive frequency of 1Hz increased non-linearly at the simply supported boundary condition whereas it almost linearly increased at the fixed-free boundary condition. On the other hand, the actuating displacement of piezoelectric composite actuator depended on the applied electric field in a drive frequency range from 1Hz to 10Hz, but its behavior was different in higher drive frequencies beyond 15Hz due to the occurrence of resonance. On the basis of the above experimental results, the bending characteristics of PCAs revealed different behavior depending on applied electric fields, drive frequencies as well as boundary conditions. Therefore, by investigating drive frequencies together with applied electric fields, actuating performance can be easily controlled and PCAs which were fabricated for this study will be sufficiently applied to pumping devices.

1. 서 론

섬유강화 복합재료는 강화제인 섬유의 배향을 적절히 조절함으로써 원하는 강도를 얻을 수 있고 종래의 금속재료나 알루미늄 합금에 비해 우수한 비강도(specific strength) 및 비강성(specific

stiffness)을 가지고 있어 경량화 설계를 위한 소재로서 그 이용 가치가 급속도로 증가해왔다. 또한 압전세라믹(lead zirconate titanate, PZT)은 타고난 전기-기계적인 연계성, 넓은 주파수 대역 그리고 에너지 소비율이 작으면서도 큰 제어력을 갖기 때문에 항공우주, 의료기기 그리고 정밀기계 분야에서 널리 사용되어 왔다. 최근, 압전재료를 복합적층판 내에 삽입하거나 부착하여 구조물의 소음과 진동을 억제하고^(1,2) 위치 및 형상을 제어함으로써^(3,4) 소형 항공기, 헬기 블레이드, 잠수함 스킨, 펌핑 기구 등의 분야에서 유력한 압전 복

[†] 책임저자, 회원, 건국대학교 인공근육연구센터

E-mail : lilsuzy@ihanyang.ac.kr

TEL : (02)452-7091 FAX : (02)444-7091

^{*} 회원, 건국대학교 신기술융합학과

합재료 작동기로서 관심을 받고 있다. 압전 복합 재료를 구성하고 있는 압전세라믹은 가해진 전기장에 의해 변형이 발생함으로써 작동기를 작동하게 하는 역할을 한다. 또한 표피층을 형성하는 섬유강화 복합재료는 내부 압전세라믹의 강도저하를 외부 충격이나 극한 환경으로부터 보호하는 역할을 함과 동시에 작동기 자체의 무게를 감소시키는 역할을 한다.

RAINBOW,⁽⁵⁾ THUNDER^{TM(6)}와 같은 하이브리드 압전 작동기와 LIPCA,⁽⁷⁻¹⁰⁾ GEPAC^(11,12)와 같은 압전 복합재료 작동기의 개발 및 소개 이후, 우수한 작동성과 다양한 분야에 응용될 수 있다는 잠재력 덕분에 작동기에 관한 많은 연구가 수행되어 왔다. 더욱 최근에는 MEMS기술을 이용하여 인체의 혈관이나 조직에 약물을 이송하는 초소형 펌프(micro pump)⁽¹³⁾나 항공기 날개에서 발생하는 기류박리에 의한 실속을 지연시키거나 제어하는 고양력장치 작동기(synthetic jet actuator, SJA)^(14,15)에 관한 연구도 시도되고 있다.

국내외 복합재료 작동기와 관련된 연구를 살펴보면, Wise⁽¹⁶⁾는 RAINBOW와 THUNDER의 변위특성을 작동성능 실험을 통하여 전기적 및 기계적 하중의 함수로 비교하고 두 작동기의 상호 보완적인 기술을 소개하였으며 Mossi 등⁽¹⁷⁾은 THUNDER와 같은 유니모프(unimorph) 작동기에 대하여 다양한 기하학적 인자가 작동기의 작동성능에 미치는 영향을 규명하였다. Yoon 등⁽¹⁸⁾은 THUNDERTM작동기의 금속층을 섬유강화 복합재료로 대체하여 성형곡률을 갖는 경량화 압전 복합재료 작동기 LIPCA를 개발하고 간단한 해석적 방법을 이용하여 작동기의 작동변위 발생 원리를 설명하였으며 THUNDER7-R 모델에 비해 34%의 경량화 및 13% 높은 작동성능을 나타내는 것으로 보고하였다. 또한, Gex 등⁽¹⁸⁾은 탄소섬유/에폭시 대신 일방향(unidirectional) 케블라/에폭시 플라이 내에 압전세라믹을 배치하여 GEPAC을 제작하고 저주파수 영역에서 초음파 비파괴검사 방법을 병행하여 피로시험을 수행하면서 건전성을 평가하였다.

그러나 상기에 열거한 작동기들의 공통점은 주로 빔(beam) 모델을 바탕으로 설계되어 있고 각 구성 재료의 열적 및 기계적으로 심한 물성차이와 기하학적 형상으로 인해 성형 후 말 안장형 곡률(saddle shaped curvature)을 갖게 된다. 이와

같은 말 안장형 곡률은 압전 복합재료 작동기의 성능을 저해하는 요인이 될 수 있을 뿐만 아니라 펌핑기구나 고양력장치 작동기로 적용하는 데 있어 문제점이 될 수 있다. 말 안장형 곡률이 발생되지 않도록 하기 위해서는 평직형(fabric type) 섬유강화 복합재료를 사용함으로써 해결할 수 있는데, 본 연구자는 선행연구^(19,20)에서 평직형 탄소 섬유/에폭시와 유리섬유/에폭시의 물성값을 이용하여 비대칭으로 적층된 평판형 압전 복합재료 작동기(Plate-type piezoelectric Composite Actuator, PCA)에 대해 성형시의 냉각과정에서 발생하는 잔류 열 변형을 고려한 3차원 유한요소해석을 수행하여 PZT의 두께, 작동기의 적층순서 그리고 경계조건이 작동성능에 미치는 영향을 규명 한 바 있다. 또한 3점 굽힘하중을 받는 단일 PZT와 본 연구에서 소개하고자 하는 PCA에 대해 하중 단계별 파괴거동을 비파괴평가법의 하나인 음향 방출법을 이용하여 진폭 및 주파수영역에서 감시하고 이를 해석하여 PCA의 최초 손상은 PZT층의 취성파괴로 인한 것이며 최종파단은 유리섬유 바닥층에서의 섬유파단으로 인한 주 균열의 급진 전임을 밝혔다.^(21,22)

본 연구에서는 선행연구의 결과를 바탕으로 평직형 탄소섬유/에폭시와 유리섬유/에폭시 프리프레그를 이용하여 PCA를 제작하고 단순지지 조건과 외팔 평판 경계조건에서 인가전압과 구동주파수에 따른 PCA의 굽힘 특성을 해명하고자 한다. 또한 이들 결과를 고찰하여 펌핑 기구나 고양력장치 작동기에의 적용가능성을 확인하고자 한다.

2. 실험

2.1 압전 복합재료 작동기의 작동원리

Fig. 1은 본 연구에서 제작한 PCA의 구조와 작동원리의 개략도를 보여준다. 전압을 가하기전의 압전세라믹 내부에는 쌍극자들이 불규칙하게 배열되어 있다가 전압을 인가하면 양전하와 음전하가 극화 방향(polling direction) 또는 극화 반대방향으로 배열되면서 분극현상이 발생한다. 압전세라믹의 극화방향과 반대방향으로 전압을 인가하면 극화방향으로는 압축변형이 발생하고 극화수직방향으로는 인장변형이 발생한다. 극화방향과

같은 방향으로 인가하면 반대현상이 발생하게 된다. 모멘트평형에 의한 중립면이 압전 세라믹층 외부에 있도록 적층하게 되면 위와 같은 압전효과로 인해 PZT층에는 면내방향으로 변형이 발생하게 되고 각 방향으로 굽힘 변형이 발생하게 된다.

2.2 평판형 압전 복합재료 작동기(PCA) 제작

Table 1에 작동기 제작에 사용한 재료들의 기계적, 전기적 물성과 치수를 나타내고 Fig. 2에는 본 연구를 위해 제작된 작동기의 적층구조와 적층구성별 이름을 나타낸다. 적층구성별 작동성능을 확인하기 위하여 3종류의 압전 복합재료 작동기를 제작하였다. 참고적으로 PCA-A는 시물레이션에 의한 선행연구에서 작동성능이 가장 우수하

였고 PCA-C는 가장 좋지 못하였다. 적층순서가 달라지면 각 층의 물성 및 강성의 차이로 인해 성형 후에 발생하는 잔류 열응력의 분포와 뒀 높이도 달라진다. 작동기 제작에 사용된 재료는 두께가 0.25mm인 단일 PZT wafer (3203HD, CTS Co., USA), 평직형 탄소섬유/에폭시 프리프레그 (WSN1K-B, SK Chemicals, Korea) 그리고 평직형 유리섬유/에폭시 프리프레그(GEP108, SK Chemicals, Korea)이다. PZT를 보호하기 위하여 PZT 아래층은 두께가 0.07mm인 평직형 유리섬유/에폭시 프리프레그를 사용하였다. PZT층을 기준으로 상층부는 두께 0.105mm의 평직형 탄소섬유/에폭시 프리프레그의 적층위치와 장수를 달리하여 제작하였다. 탄소섬유/에폭시는 전도체이므로 전기적 단전을 방지하기 위하여 PZT보다 가로 및 세로로 1mm 작은 크기를 사용하였고 유리섬유/에폭시는 작동성능 시험시 작동기의 탭 부분

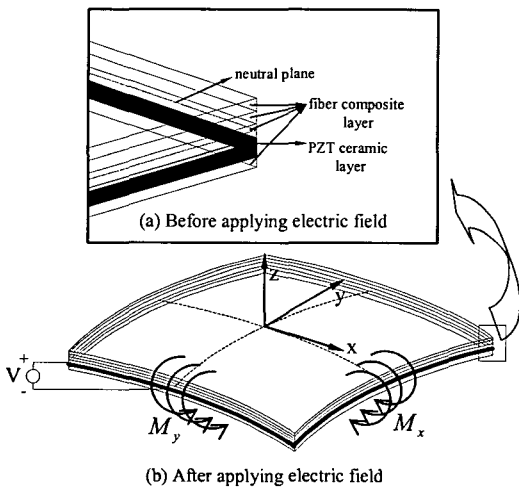


Fig. 1 The structure and the actuating principle of a unimorph piezoelectric composite actuator

Table 1 Mechanical and piezoelectric properties used in this study

Material properties	PZT ceramic (3203HD)	Carbon/epoxy (fabric)	Glass/epoxy (fabric)
Elastic properties			
E_1 (GPa)	62	66.42	21.7
E_2 (GPa)	62	66.42	21.7
G_{12} (GPa)	25.57	4.35	3.99
ν_{12}	0.31	0.054	0.13
CTE			
α_1 (10^{-6}C^{-1})	3.5	1.16	14.2
α_2 (10^{-6}C^{-1})	3.5	1.16	14.2
Piezoelectric constant			
d_{31} (10^{-12}mV^{-1})	-320	-	-
d_{32} (10^{-12}mV^{-1})	-320	-	-
Dimension (mm)	72x72x0.25	71x71x0.105	92x82x0.07

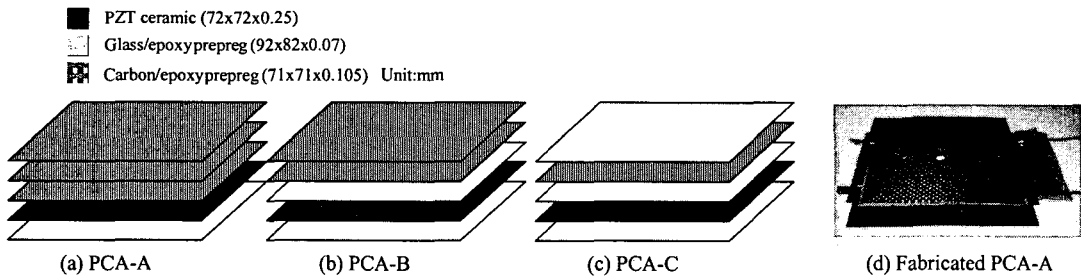


Fig. 2 Schematic of lay-up sequences used in this study (a)~(c) and a fabricated piezoelectric composite actuator (d)

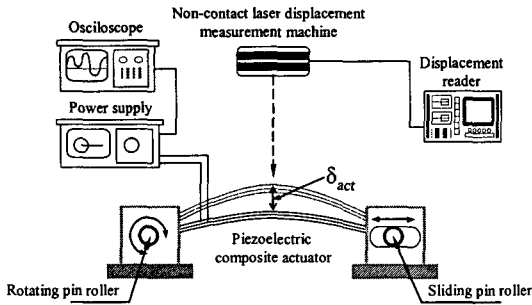


Fig. 3 Schematic illustration of experimental set-up for measuring the actuating displacement at simply supported boundary condition

을 제작하기 위해 가로 및 세로방향으로 10mm 큰 것을 사용하였다. 또한 적층시 전압공급을 위해 PZT층 아래위에 구리선을 배치하였다. 편의상, PZT를 기준으로 상층부에 탄소섬유/에폭시 프리프레그의 장수에 따라 PCA-A, -B 그리고 -C로 각각 명명하기로 한다. 작동기는 hand lay-up 방법으로 적층된 후 경화 사이클에 따라 오토클레이브 내에서 진공백(vacuum bag)방식으로 성형하였으며 Fig. 2(d)는 실제로 제작된 PCA-A의 모습을 나타낸다.

2.3 작동성능 시험

작동변위 측정을 위한 전체적인 실험장치의 개략도는 Fig. 3과 같고 시험편 지지 장치, 작동변위를 측정할 수 있는 비 접촉식 레이저 변위계 (Keyence LK-081), 전압 공급기(TD-2 Power Supplier, Face International Co.), 오실로스코프 (HP 54622A), 제작된 작동기로 구성된다. PZT층에 0~200V_{pp}(peak to peak voltage)의 교류 전압과 1~30Hz의 구동 주파수를 정현파의 형태로 가하여 작동변위를 측정하였다. Fig. 3에 나타내었듯이, 작동 시험에 적용한 경계조건은 한쪽 단은 회전이 가능하고 다른 한쪽 단은 x방향으로 미끄러짐이 가능한 단순지지 조건과 한쪽 단이 고정된 외팔 평판 조건이다. 단순지지 조건에서는 최대작동변위를 나타내는 시험편 중앙지점의 수직방향 변위를 측정하였고 외팔 평판 조건에서는 동일한 실험조건으로 작동기 모서리에서의 처짐 변위를 시험편의 위치로부터 80mm의 높이에서 작동기별로 5회 반복 측정하여 평균값으로 취하였다.

3. 유한요소해석

상용 유한요소 프로그램 ANSYS를 이용하여 전기적 하중을 받는 압전 복합재료 작동기의 작동 변위 또는 처짐량을 예측하였다. Lee 등⁽²⁷⁾은 본 연구에서 사용된 PZT 3203HD wafer가 인가전압이 증가함에 따라 비선형거동을 보인다는 것을 실험을 통하여 확인하고 이 비선형거동을 표현할 수 있는 실험식을 증분형태의 수치적 방법으로 제안하였다. 본 연구에서는 PZT wafer의 비선형 거동을 근사적으로 반영하여 이를 유한요소 시뮬레이션에 적용하였다. 유한요소 모델의 크기는 가로(72mm)×세로(72mm)로 하였고 x축을 작동기의 가로방향, y축을 세로방향, z축을 두께방향으로 설정하였다. 적층판의 층간에서는 요소간의 완전결합을 부여하였고 해석에 사용된 요소는 8절점 3차원 요소를 사용하였다. 작동변위 예측을 위한 시뮬레이션은 3단계로 이루어져 있다. 1단계는 성형온도차로 발생하는 열 변형 해석 단계이다. 2단계는 1단계에서 발생하는 구속지점에서의 곡률을 평평화 하는 단계이다. 이 단계는 작동시험시에 작동기의 한 단(외팔평판 조건의 경우) 또는 양 단(단순지지 조건의 경우)이 그립에 의해 평평하게 구속되게 되는데 실제의 구속조건을 반영하기 위함이다. 3단계는 PZT층에 전압을 가하여 횡 방향 작동변위를 예측하는 단계이다. 유한요소 시뮬레이션에 적용된 경계조건은 실험 결과와의 비교를 위해 양단 단순지지조건과 외팔 평판 조건으로 모델링하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 적층구성에 따른 성형 돔 높이

Fig. 4에 본 연구에서 제작된 작동기의 성형 후 각 층의 열팽창계수 및 강성의 차이로 인해 발생하는 돔 높이를 비 접촉식 레이저 변위계를 이용하여 측정된 값과 유한요소 시뮬레이션으로 열 변형 해석한 값을 나타낸다. Fig. 2에 나타내었듯이 PZT 상층부에 열팽창계수가 낮고 고 강성인 3장의 탄소섬유/에폭시를 적층한 PCA-A의 경우 경화시의 열 변형에 의한 돔 높이가 가장 컸으며

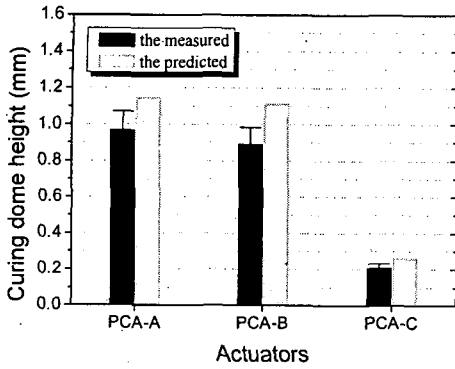


Fig. 4 Comparison of curing dome height between the predicted and the measured

열팽창계수가 높고 저 강성인 2장의 유리섬유/에폭시와 탄소섬유/에폭시가 교대로 적층된 PCA-C의 돔 높이가 가장 작게 나타났다. 예측치와 측정치를 비교할 때, 성형 돔 높이는 15~20% 정도의 차이를 보였는데, 이러한 차이의 주된 원인은 작동기 제작시 적층판의 치수가 시뮬레이션에 사용된 것과는 다소 다르고, 작동기 성형시에 온도에 따라 복합재료의 물성이 변한다는 경화반응과 관련된 현상이 시뮬레이션 수행 시에는 고려되지 않았기 때문인 것으로 판단된다.⁽²³⁾ 선행연구의 결과에 따르면, 열팽창계수가 높고 저 강성의 유리섬유 층에서는 인장형 잔류응력만이 존재하며 강성이 높고 비교적 열팽창계수가 낮은 PZT층과 탄소섬유층에는 압축 잔류응력이 존재하였다. 이와 같이 각 층에서 발생하는 응력구배에 의해 작동기의 성능이 향상된다는 연구 결과가 보고된 적이 있다.⁽¹⁶⁾

4.2 준 정적 특성 작동변위

Fig. 5는 1Hz의 주파수로 작동기를 구동하였을 때 단순 지지 조건에서 인가전압 증가에 따른 작동변위(δ_{act})의 측정치와 예측치를 나타낸다. 본 연구에서는 구동주파수가 1Hz에서의 작동변위를 준 정적상태라고 가정한다. 모든 작동기에 대해 인가전압 증가에 따라 측정된 작동변위의 거동은 비선형성을 보였다. 이는 인가전압이 높아짐에 따라 압전세라믹 자체가 비선형 거동을 나타내기 때문이며⁽²⁷⁾ 압전재료의 비선형성은 인가전압뿐만 아니라 기계적 내부 응력이 클수록 영향을 많이

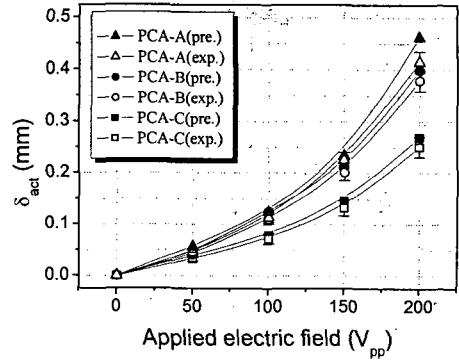


Fig. 5 Comparison of δ_{act} between predictions and experiments for PCAs at simply supported boundary condition

받는 것으로 알려져 있다.⁽²⁴⁾ 본 연구에서 사용된 압전세라믹(3203HD PZT wafer)의 재료 비선형 거동을 고려한 예측치는 측정치와 비교하여 V_{pp}=200일 때 최대 8% 오차 내에서 비교적 잘 일치함을 보였으며 인가전압이 증가할수록 그 격차는 커졌다. 이러한 차이의 주된 원인으로서는 유한요소 시뮬레이션 수행시에 작동기와 지지대 사이의 마찰과 그림의 무게 효과가 고려되지 않았기 때문인 것으로 사료된다. 측정값을 기준으로 인가전압이 200V_{pp}일 때, PCA-A의 작동변위는 PCA-C보다 약 1.65배 컸으며 PCA-B는 약 1.5배 컸다. 이와 같은 결과는 선행연구에서 규명되었듯이, 작동기의 작동성능은 굽힘 강성이 작을수록 그리고 작동거리가 클수록 커지는데^(19,20) PCA-A와 -B의 경우, 탄소섬유/에폭시의 체적비가 -C에 비해 높기 때문에 굽힘 강성은 PCA-C의 그것보다 크지만 모멘트평형에 의한 중립면의 위치가 PZT층 외부에 위치하고 작동거리가 컸기 때문이다.

외팔 평판 조건에서 인가전압 증가에 따른 작동변위를 Fig. 6에 나타낸다. 인가전압 증가에 따라 작동변위는 단순지지 조건과는 다르게 거의 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 인가전압이 200V_{pp}일 때 PCA-A의 작동변위는 -C보다 약 1.61배 높았으며 PCA-B는 약 1.52배 높은 것으로 나타났다. 이들 값은 단순지지 조건에서의 각 작동기별 작동변위 차이와 거의 비슷한 수준이다. 동일 작동기에 대해 단순지지 조건에서의 작동변위

와 비교하면, PCA-A는 평균 5.5배, -B는 5.7배 그리고 -C는 5.6배 크게 나왔다. 이는 외팔 평판의 경우 작동변위는 작동기의 모서리부에서의 처짐 변위를 측정하였는데 한쪽 단이 자유로워 굽힘

모멘트에 의한 에너지 전달이 더욱 용이하고 모서리효과(corner effect)로 인해 작동변위를 크게 증대시킨 것이다. 따라서 준 정적 상태에서의 실험결과로부터 작동기의 작동변위는 인가전압, 경계조건 그리고 작동기의 적층구조에 따라 달랐음을 알 수 있었다.

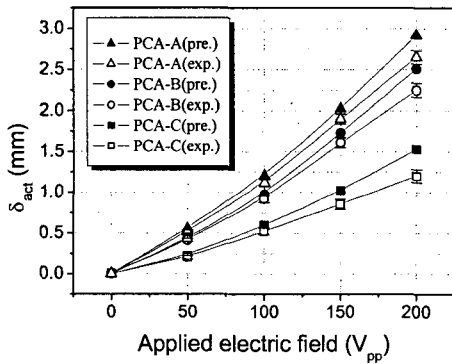


Fig. 6 Comparison of δ_{act} between predictions and experiments for PCAs at fixed free boundary condition

4.3 동적 특성 작동변위

Fig. 7은 단순 지지 조건에서의 동적 특성 거동을 30Hz까지 5Hz씩 구동주파수를 증가시켜 가면서 측정한 결과이다. 적층구성별 작동변위는 주파수증가에 따라 상당히 다른 특징적 거동을 보였으며 공진주파수에서 작동변위가 최대가 되었다. 인가전압이 낮을 때($V_{pp}=50$), 작동변위는 구동주파수가 증가하여도 거의 변함이 없었으며 오히려 아주 근소하게 감소하는 경향을 보였다. $V_{pp}=100$ 일 때의 작동변위는 $V_{pp}=50$ 일 때보다 전체적으로 높았지만 거의 비슷한 경향을 보였고 구동주파수가 20Hz부터 PCA-C의 경우에만 점차적으로 증가하면서 28Hz에서 피크를 보였다가 이후 급감하였다. $V_{pp}=150$ 일 때, PCA-C는 28Hz에서

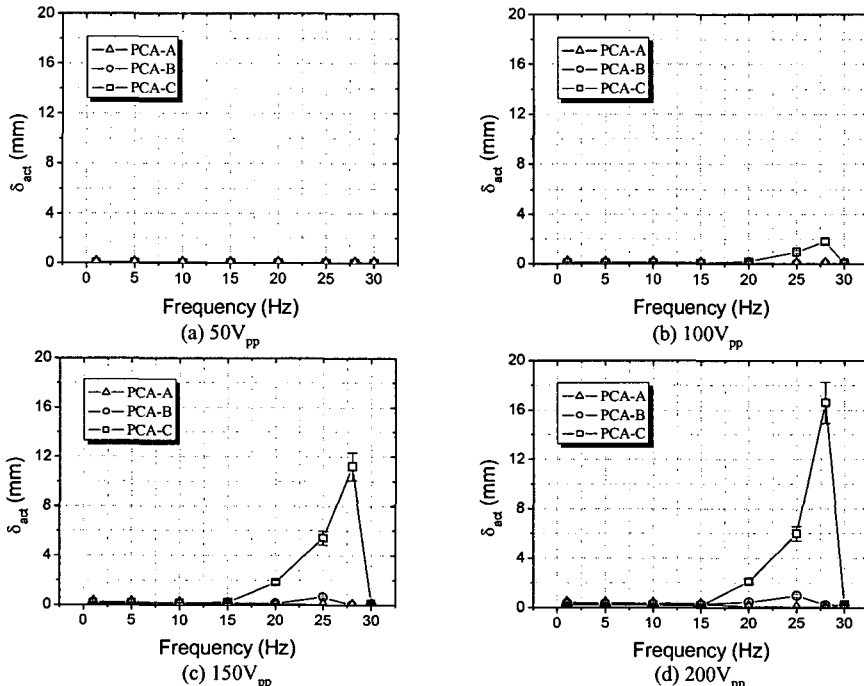


Fig. 7 Actuating displacement versus drive frequencies according to actuator type at simply supported boundary condition subjected to electric fields of (a) $50V_{pp}$, (b) $100V_{pp}$, (c) $150V_{pp}$ and (d) $200V_{pp}$

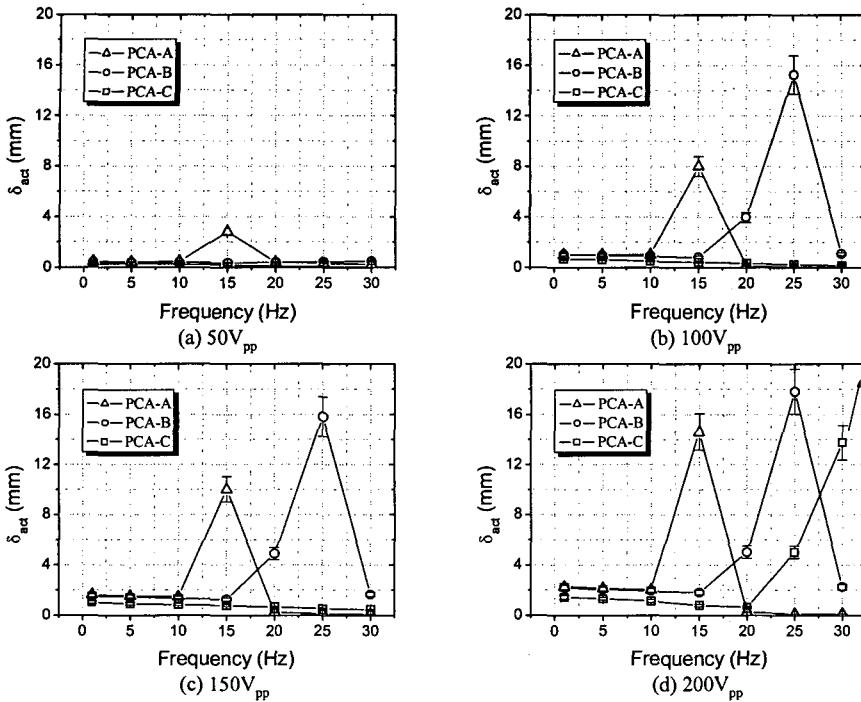


Fig. 8 Actuating displacement versus drive frequencies according to actuator type at fixed free boundary condition subjected to electric fields of (a) $50V_{pp}$, (b) $100V_{pp}$, (c) $150V_{pp}$ and (d) $200V_{pp}$

피크를 보였고 $V_{pp}=200$ 일 때 역시 마찬가지로 경향으로 나타났지만 작동변위의 값은 더 컸다. PCA-B의 경우, $V_{pp}=150$ 와 $V_{pp}=200$ 일 때 25Hz에서의 작동변위는 각각 0.64mm와 0.97mm로 측정되었으며 이는 PCA-C와 비교하여 상대적으로 너무 낮은 수준이고 그 증가정도가 미미하므로 단순 지지 조건에서의 공진주파수가 아닌 것으로 여겨진다. 공진주파수에서 작동변위가 최대가 되는 현상은 인가전압이 증가할수록 현저하였는데 이는 PZT층에 상대적으로 높은 전압이 가해지면서 PZT 내부에 강탄성 연화현상(ferroelastic softening)이 발생하기 때문이며 비슷한 결과가 Wang 등⁽²⁵⁾과 Schwartz 등⁽²⁶⁾에 의해 보고되었다. 상기의 결과로 비추어 볼 때 1~10Hz의 구동주파수 범위에서 작동변위는 거의 변함이 없었으나 15Hz 이상 구동주파수에서는 PCA-C의 경우에만 공진 주파수의 발생으로 인해 작동변위로 상이한 굽힘 거동을 보였으므로 작동변위는 인가전압 보다는 구동주파수에 더욱 민감한 것으로 판단된다.

외팔 평판 경계조건에서 구동주파수 증가에 따

른 작동변위 결과를 Fig. 8에 나타낸다. 외팔 평판 조건에서도 작동변위는 구동주파수 증가에 따라 상당히 상이한 거동을 보였으나 작동기별 공진주파수의 발생시점은 단순지지 조건과는 다르게 나타났다. 예를 들면, 단순지지 조건에서 PCA-A와 -B는 공진주파수가 관찰되지 않았으며 PCA-C는 28Hz에서 발생하였다. 외팔평판 조건에서는 PCA-A와 -B의 공진주파수는 각각 15Hz 그리고 25Hz에서 발생하였으며 PCA-C의 경우에는 레이저 변위 측정기의 측정한계치(최대 20mm) 때문에 연구범위 내의 구동주파수에서는 측정이 불가능하였다. Fig. 8(d)의 변화추이로 볼 때, 아마도 30Hz보다 고주파수에서 공진현상이 나타났을 것으로 추측된다. 이와 같은 결과는 공진주파수가 기하학적 특성, 재료적 특성 그리고 경계조건 등에 영향을 받음을 말해주고 있으며 전체적으로 단순지지 조건의 작동변위와 비교하면, 구동주파수 증가에 따라 큰 작동변위의 값을 보였다. PCA-A의 경우, 단순 지지조건에서와는 달리 인가전압이 낮을 때($V_{pp}=50, 100$)에도 공진주파수가 발생하였는데 이는 단순지지 조건에 비해 외

팔평판의 조건에서 에너지 전달이 용이하였던 것으로 사료된다. 작동변위의 측면에서는 공진주파수를 파악함으로써 최대의 작동변위를 내는 것이 바람직하나 작동기가 고전압 및 공진주파수에서 장기간 작동하는 경우 PZT 및 복합재 층에 피로 누적에 의한 손상이 발생하여 작동기의 성능을 저하시킬 수 있으므로 적절한 구동주파수 제어가 요구된다. 인가전압뿐만 아니라 구동주파수에 따른 압전 복합재료 작동기의 작동 및 굽힘 특성을 동시에 평가함으로써 실제로 펌프나 고양력 장치에 적용될 때 이들을 적절히 제어한다면 유량이나 기류를 충분히 제어할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 서로 다른 적층구성을 갖는 평판형 압전 복합재료 작동기를 제작하고 작동성능 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) PZT세라믹을 기준으로 하층부는 열팽창계수가 크고 저장성인 유리섬유/에폭시 프리프레그와 상층부는 열팽창계수가 작고 고강성의 탄소섬유/에폭시 프리프레그를 적층한 PCA-A의 경우가 성형 후 열 변형으로 인한 뒹 높이가 가장 컸으며 준 정적 상태에서의 작동변위도 가장 크게 나타났다. 이는 상기의 적층구조로 인해 모멘트 평형에 의한 중립면이 압전세라믹 상부에 존재하여 압전효과로 인한 굽힘 모멘트가 크게 작용함과 동시에 성형 후 작동기 내부의 응력구배가 작동기 성능을 증대시켰기 때문이다.

(2) 준 정적 상태인 1Hz에서의 인가전압 증가에 따른 작동변위는 PCA-A가 가장 컸으나 고 인가전압 및 고주파수 영역에서는 작동기별 공진주파수의 발생으로 인하여 각 경계조건별로 작동성능은 상이하였다. 특히, 구동주파수는 작동기의 작동변위에 지대한 영향을 미치는 요소임을 알 수 있었다. 따라서 펌핑 기구의 기류나 유량을 적절히 제어하기 위해서는 인가전압과 구동주파수의 영향이 동시에 고려되어야 할 것이다.

(3) 본 연구에서 제작된 평판형 압전 복합재료 작동기는 취성 재료인 압전세라믹과 면외 하중에 취약한 복합재료로 구성되어 있어, 작동기의 주된 작동모드인 굽힘 모드에 장기간 노출될 경우 작동기의 건전성 및 성능저하가 예상된다. 따라

서 작동기의 신뢰성을 위해 건전성 평가도 수반되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단 중점연구소 지원사업 (과제번호: KRF-2004-005-D00045/D00046)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Kim, M. H., Kang, Y. K., Park, H. C., Hwang, W. B. and Han, K. S., 1996, "Multi-Modal Vibration Control of Laminated Composite Plates Using Piezoceramic Sensors/Actuators," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 20, No. 10, pp. 3173~3185.
- (2) Hwang, W. S., Hwang, W. B., Han, K. S. and Park, H. C., 1993, "Active and Passive Control of a Laminated Composite Beam Using Piezoceramic Materials," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 17, No. 3, pp. 485~491.
- (3) Akella, P., Chen, X., Cheng, W., Hughes, D. and Wen, J.T., 1994, "Modelling and Control of Smart Structures with Bonded Piezoelectric Sensors and Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 3, pp. 344~353.
- (4) Hwang, W. S., Hwang, W. B., Han, K. S. and Park, H. C., 1993, "Modeling on Structural Control of a Laminated Composite Plate with Piezoelectric Sensor/Actuators," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 17, No. 1, pp. 90~100.
- (5) Haertling, G. H., 1994, "Rainbow Ceramics - A New Type of Ultra-High-Displacement Actuator," *Bull. Am. Ceram. Soc.* 73. pp. 93~96.
- (6) Hellbaum, R., Bryant, R. and Fox, R., 1997, "Thin Layer Composite Unimorph Ferroelectric Driver and Sensor," US patent No. 5632841.
- (7) Park, K. H., Yoon, K. J. and Park, H. C., 2002, "Development of Light Weight Piezo-composite Curved Actuator," *Trans. of the KSAS*, Vol. 30, No. 5, pp. 94~100.
- (8) Goo, N. S., Shin, S. J., Park, H. C. and Yoon K. J., 2001, "Design/Analysis/Manufacturing/Performance Evaluation of Curved Unsymmetrical Piezoelectric Composite Actuator LIPCA," *Trans.*

- of the *KSME(A)*, Vol. 25, No. 10, pp. 1514~1519.
- (9) Kim, K. Y., Park, K. H., Park, H. C., Goo, N. S. and Yoon, K. J., 2005, "Performance Evaluation Lightweight Piezo-composite Actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 120, pp. 123~129.
- (10) Yoon, K. J., Park, K. H., Lee, S. K., Goo, N. S. and Park, H. C., 2004, "Analytical Design Model for a Piezo-composite Unimorph Actuator and Its Verification Using Lightweight Piezo-composite Curved Actuators," *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 459~467.
- (11) Lynch, C. S., Berthelot, Y., Hopkinson, D., Keller, C. and Be'chet, A., 2005, "Development of Stress Gradient Enhanced Piezoelectric Actuator Composites with Integrated Ultrasonic NDE Capability," *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Washington, DC.
- (12) Hopkinson D., 2003, Development of Stress Gradient Enhanced Piezoelectric Unimorph Actuator Composites, MS Thesis Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia.
- (13) Teymoori, M. and Ebrahim, A., 2005, "Design and Simulation of a Novel Electrostatic Peristaltic Micromachined Pump for Drug Delivery Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 117, pp. 222~229.
- (14) Liang, Y., Kuga, Y., Taya, M., 2005, "Design of Membrane Actuator Based on Ferromagnetic Shape Memory Alloy Composite for Synthetic Jet Applications," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 121, pp. 1~7.
- (15) Mallinson, S. G., Kwok, C. Y. and Reizes, J. A., 2003, "Numerical Simulation of Micro-Fabricated Zero Mass-Flux Jet Actuators," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 105, pp. 229~236.
- (16) Wise, S., 1998, "Displacement Properties of RAINBOW and THUNDER Piezoelectric Actuator," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 69, pp. 33~38.
- (17) Mossi, K., Green, C., Zoubaida, Z. and Hughes, E., 2005, "Harvesting Energy Using a Thin Unimorph Prestressed Bender: Geometrical Effects," *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 16, pp. 249~261.
- (18) Gex, D., Berthelot, Y. H. and Lynch, C. S., 2005, "Low Frequency Bending Piezoelectric Actuator with Integrated Ultrasonic NDE Functionality," *NDT&E International*, pp. 1~7.
- (19) Woo, S. C. and Goo, N. S., 2005, "Evaluation of Actuation Performance of Unsymmetrically Laminated Piezoelectric Composite Actuator by Finite Element Analysis," *Proceedings of fall conference of KSME* (Yongpyoung, November 2) pp. 2449~2454.
- (20) Woo, S. C. and Goo, N. S., 2006, "Analysis of a Plate-type Piezoelectric Composite Unimorph Actuator Considering Thermal Residual Deformation," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 30.
- (21) Woo, S. C. and Goo, N. S., 2006, "Use of Acoustic Emission to Characterize the Damage Process of a Piezoelectric Composite Actuator Subjected to a Bending Load," *Materials Science and Engineering A* (under review)
- (22) Woo, S. C. and Goo, N. S., 2006, "Bending Fracture Process for Piezoelectric Composite Actuators Using Dominant Frequency Band by Acoustic Emission," *Composites Science and Technology* (under review)
- (23) Goo, N. S., Kwon, Y. D., Kim, J. S. and Yoon, K. J., 2001, "Measurement Method of Strain/Stress in a Variable Temperature Environment and Its Application to Measurement of CTE of a Composite," *Trans. of the KSAS*, Vol. 29, No. 2, pp. 43~51.
- (24) Lee, S. K., Jang, S. H., Kim Y. S., Park, H. C. and Yoon, K. J., 2005, "Material Nonlinear Characteristics of the 3203HD PZT Wafer Under High Electric Fields," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 121, pp. 450~456.
- (25) Wang, Q. M., Zhang, B. X., Xu, B. and Liu, L. E., 1999, "Nonlinear Piezoelectric Behavior of Ceramic Bending Mode Actuators Under Strong Electric Fields," *Journal of Applied Physics*, Vol. 86, pp. 3352~3360.
- (26) Schwartz, R. W. and Narayanan, M., 2002, "Development of High Stress-Biased Actuators Through the Incorporation of Mechanical Pre-Loads," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 101, pp. 3220~331.
- (27) Lee, S. K., Kim, Y. S., Park, H. C., Yoon, K. J., Goo, N. S., Yu, Y. and Cho, C. M., 2005, "Performance Analysis of a Lightweight Piezo-Composite Actuator Considering the Material Non-Linearity of an Embedded PZT wafer," *Smart Materials and Structures*, Vol. 14, pp. 1101~1106.