

인공근육에 적용되는 압전복합재료 작동기의 탄소섬유 배향각과 작동변위의 관계

김철웅*, 이성혁 (건국대 인공근육연구센터), 윤광준 (건국대 항공우주공학과)

Relationship Between CFRP Ply Orientation and Performance Stroke in Piezoelectric Zirconate Titanate Composite Actuator (PZTCA) of Artificial Muscle

Cheol-Woong Kim, Sung-Hyuk Lee (Artificial Muscle Research Center, Konkuk Univ.) and Kwang-Joon Yoon (Aerospace Eng., Konkuk Univ.)

ABSTRACT

The aim of this research is to evaluate the relationship between the total effective moment (M^E) and Bernoulli-Euler bending moment (M) when the ply orientations of UD CFRP in Piezoelectric Zirconate Titanate Composite Actuator (PZTCA) are changed. The obtained results as follows. Firstly, as the performance test results by the CFRP ply orientation, the performance of [0] and [90] were stable. However, while the performance of [+45] was suddenly decreased after 5 hours. Secondly, the change of M^E by the CFRP ply orientation was evaluated. As the CFRP ply orientation was increased from [0] to [+60], the M^E were gradually decreased. However, they became a little bit increased from [+60] to [90]. Finally, after the change of M by the CFRP ply orientation was evaluated, it was found that $M^E=2.2M$ was valid for just [0] and that there was a relationship between M^E and M according to the ply orientation.

Key Words : Artificial Muscle(인공근육), Piezoelectric Zirconate Titanate Composite Actuator(압전복합재료 작동기, PZTCA), CFRP Ply Orientation(탄소섬유 배향각), Fiber Ply Orientation Factor(섬유배향계수, F_{po}), Total Effective Moment(총유효모멘트, M^E), Bernoulli-Euler Bending Moment(베르누이-오일러 굽힘모멘트, M)

1. 서 론

최근 NASA에서는 박판 유니모프 작동기인 THUNDER(THin layer UNimorph DrivER)를 개발하여 상용화에 성공했다. 그러나 PZT와 알루미늄 박판, 스테인리스 스틸의 적층구조로 이루어져 있는 THUNDER는 피로하중에 장시간 노출될 경우, 알루미늄 박판의 미세한 스크래치 또는 균열에 의해서도 급격한 피로파손이 발생할 가능성이 매우 크다. 따라서 본 연구그룹에서는 THUNDER의 단점을 보완하고자 새로운 인공근육용 압전 복합재료 작동기(이하, PZTCA)를 개발하였다. 작동주파수 조절을 통해 변위를 제어하는 PZTCA는 피로성능시험을 수행하기 위해 주파수-작동변위의 관계뿐만 아니라 변위-작용모멘트의 관계도 우선적으로 평가해야 한다. 따라서 선행 연구⁽¹⁾를 통하여 작동변위를 최소

1mm부터 최대변위인 20mm까지 증가시켰을 경우, PZTCA에 작용하는 총유효모멘트(total effective moment, M^E)를 산출할 수 있는 방법을 제안한 바 있다. 그리고 제안된 총유효모멘트(M^E)와 복합재료 적층부의 베르누이-오일러 굽힘모멘트(Bernoulli-Euler bending moment, M)의 상관관계를 파악해 보았다. 그 결과, PZTCA는 총유효모멘트(M^E)와 베르누이-오일러 굽힘모멘트(M)가 2.2배의 관계성이 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 선행연구에서 제안한 $M^E=2.2M$ 의 관계는 Fig. 1에 제시된 일방향 CFRP층의 배향각이 [0] 일 때만 성립되는 결과이다. 따라서 본 연구에서는 PZTCA의 CFRP층의 배향각이 [0], [+30], [+45], [+60] [90]로 변화할 경우 총유효모멘트와 베르누이-오일러 굽힘모멘트가 어떻게 변화하는지 평가하고자 하였다. 또한, 그 결과를 이용하여 CFRP 배향각이 [0]일 때만 적용가능했던 기존

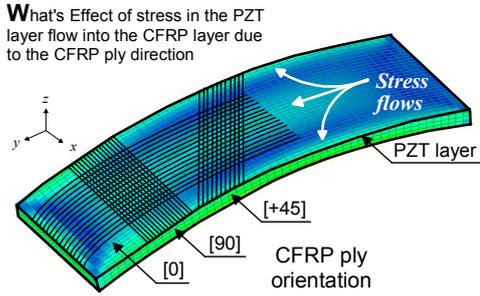


Fig. 1 Different stacking configuration of CFRP ply orientation and changeable stress flows in PZTCA

의 작동변위와 곡률반경의 관계식을 수정하고, 섬유배향각이 곡률반경에 미치는 영향을 평가하기 위한 섬유배향계수(F_{po})를 제안하였다.

2. CFRP 배향각에 따른 총유효모멘트(M^E)와 베르누이-오일러 굽힘모멘트(M)의 관계

2.1 CFRP 배향각에 따른 총유효모멘트의 변화

PZTCA의 CFRP 배향각에 따른 총유효모멘트(M^E)의 변화를 살펴보기 위해 고전적층이론(CLT)을 바탕으로 한 총유효모멘트의 개념을 파악해야 한다. 총유효합력(N^E)과 총유효모멘트(M^E)는 PZTCA 제작 시 상온 25°C와 경화온도 170°C의 온도차에 의한 열팽창계수(CTE)를 고려하여 합력(N)과 합모멘트(M)를 계산하고, 이를 기초로 성형온도에 의한 영향(N^T, M^T)과 흡습에 의한 영향(N^M, M^M)을 각각 적용한 것으로 식(1), 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \{N^E\} &= \{N\} + \{N^T\} + \{N^M\} \\ &= [A] \{\varepsilon^0\} + [B] \{k\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \{M^E\} &= \{M\} + \{M^T\} + \{M^M\} \\ &= [B] \{\varepsilon^0\} + [D] \{k\} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, [A]는 인장강성행렬, [B]는 커플링강성행렬, [D]는 굽힘강성행렬이고, $\{k\}$ 는 곡률이다. 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)을 유도할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} \varepsilon^0 \\ \kappa \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} A' & B' \\ B' & D' \end{bmatrix} \begin{pmatrix} N^E \\ M^E \end{pmatrix} \quad (3)$$

식 (3)에서 곡률(k)은 곡률반경(ρ)과 역수($\rho=1/k$)의 관계이다. 한편 Fig. 2에 제시한 PZTCA의 작동변위(Δh)는 식 (1)부터 식 (3)까지를 이용하여 계산한 곡률반경(ρ)을 Yoon 등⁽²⁾이 제안한 식 (4)에 대입하여 구할 수 있다. 식 (1)부터 식 (3)까지 살펴본 바와 같이 식 (4)에 적용할 곡률반경(ρ)은 CFRP의

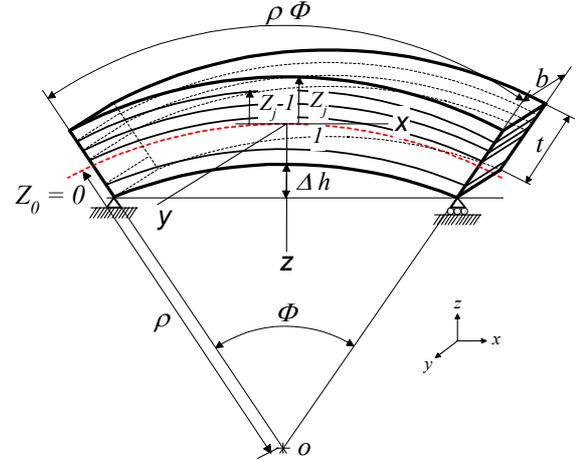


Fig. 2 Schematic diagram of flexural deformation under cyclical bending moment in PZTCA

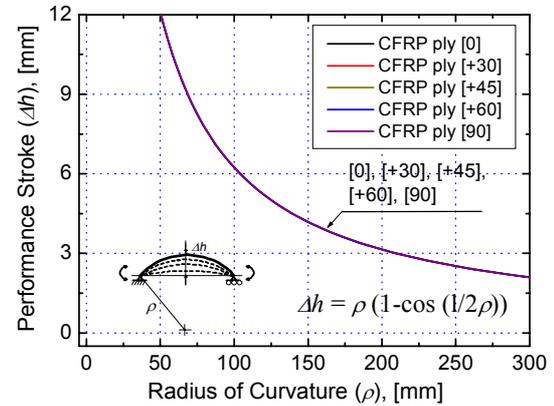


Fig. 3 Relationship between radius of curvature (ρ) and performance stroke (Δh) by Eq. (4) according to the CFRP ply orientation

$$\Delta h = \rho \left(1 - \cos \left(\frac{l}{2\rho} \right) \right) \quad (4)$$

배향각에 따라 변화한다. 즉, CFRP 배향각에 따라 곡률반경과 작동변위(Δh)의 관계는 변화함을 알 수 있다. 식 (4)를 통해서 계산된 CFRP 배향각에 따른 작동변위와 곡률반경의 관계는 Fig. 3과 같다. Fig. 3을 살펴보면 CFRP 배향각에 관계없이 모두 동일한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 PZTCA의 섬유배향각이 변화할 경우 식 (4)의 적용은 불가능해진다. 식 (4)는 기존에 제작되어온 CFRP 배향각 [0]의 경우에만 적용가능한 식이다. 한편, Fig. 4는 식 (1)부터 식 (3)까지를 이용하여 곡률반경(ρ) 변화에 따른 총유효모멘트(M^E)의 변화를 계산한 결과이다. Fig. 4에서 작동변위 5~10mm 영역을 자세히 살펴보면 다음을 알 수 있다. 첫째, CFRP의 배향각이 [0]부터 [+60]까지 증가할수록 동일 곡률반경 상에서

총유효모멘트(M^E) 값은 꾸준히 감소하다가 [+60]부터 [90]에서는 미소량 증가함을 알 수 있다. 그러나 CFRP 배향각과 총유효모멘트(M^E)의 증감 폭은 비례하지는 않는다. 둘째, [+45]이상 [90]이하의 범위에서 총유효모멘트(M^E)는 아주 미소한 차이만 나타낸다. 그러나 이러한 미소한 차이에도 불구하고 실제 작동성능피로시험에서 [+45]와 [90]의 경우는 작동변위의 거동이 큰 차이를 나타냈으므로 CFRP 배향각에 따른 총유효모멘트(M^E)만으로 PZTCA의 작동성능을 평가하기에는 한계성이 있다.

2.2 베르누이-오일러 굽힘모멘트를 이용한 PZTCA의 곡률반경 변화 평가

본 절에서는 베르누이-오일러(Bernoulli-Euler) 적층보 이론⁽³⁾을 이용하여 CFRP 배향각에 따른 굽힘모멘트(M)의 변화를 살펴보았다. 그리고 총유효모멘트(M^E)와 베르누이-오일러 굽힘모멘트(M)의 관계를 평가해보았다. PZTCA는 5장의 적층재가 비대칭적 구조로 이루어져 있지만 적층판의 수가 홀수인 경우 식 (5)를 적용할 수 있다.

$$M = \frac{2bt^3}{3\rho N^3} \sum_{j=1}^{N/2} (E_x)_j (3j^2 - 3j + 1) \quad (5)$$

여기서 b , t , ρ 는 Fig. 2에 제시된 바와 같고, z_j 는 jh/N 와 같다. 식 (5)는 동일한 단일재를 적층한 경우에도 적용이 가능하므로 식 (6)과 같이 간단한 형태의 베르누이-오일러 굽힘모멘트(M)로 표현된다.

$$M = \frac{EI_{xx}}{\rho} = \frac{Ebt^3}{12\rho} \quad (6)$$

식 (6)에서 E 는 Table 1에 제시한 CFRP 배향각에 따라 달라지는 E_I 를 적용해야 한다. 또한, 곡률반경 (ρ)은 식(1)~(3)을 통하여 계산된 값을 적용할 수 있다. 그 결과, CFRP 배향각에 따른 베르누이-오일러 굽힘모멘트(M)의 변화는 Fig. 5와 같다. Fig. 5의 M 은 Fig. 4의 M^E 와 값의 차이는 나타나지만 CFRP 배향각에 따른 변화는 유사한 경향을 나타냈다. 베르누이-오일러 굽힘모멘트(M)는 총유효모멘트(M^E)와 같이 CFRP 배향각이 [0]부터 [+60]까지 증가할수록 꾸준히 감소하다가 [+60]부터 [90]까지의 구간에서는 미소량 증가한다. 또한, [+45]이상 [90]이하의 범위에서 M 은 아주 미소한 차이만 나타낸다. 이상과 같이 섬유배향각에 따른 M^E 와 M 의 거동이 유사한 점을 이용하여 선행연구⁽¹⁾에서 제안한 $M^E = 2.2M$ 의 관계가 CFRP 배향각 [0]뿐만 아니라 [+30], [+45], [+60], [90]에서도 적용 가능한가를 평가하기 위해 정량적 해석과 비교평가를 수행하였다. 그 결과, 기존에 제작되어 오던 CFRP 배향각 [0]의 경우

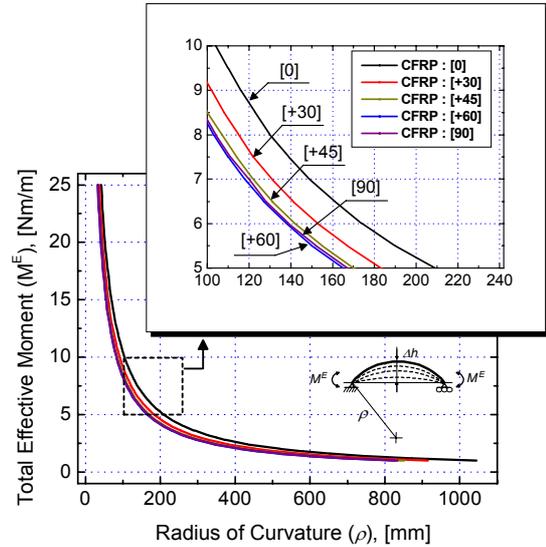


Fig. 4 Relationship between radius of curvature (ρ) and total effective moment (M^E) by Eq. (1)~(3)

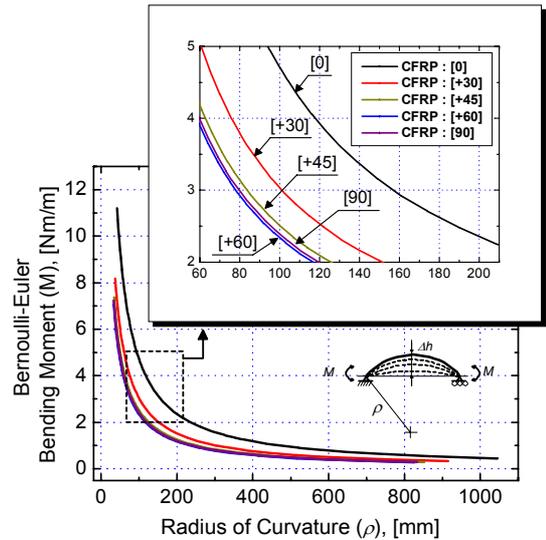


Fig. 5 Relationship between radius of curvature (ρ) and Bernoulli-Euler bending moment (M)

Table 1 Laminate engineering constants due to the CFRP layer ply orientations by CLT

Engineering constant	CFRP ply orientation of PZTCA				
	[0]	[+30]	[+45]	[+60]	[90]
E_1 (GPa)	71.1	45.8	37.9	35.3	36.1
E_2 (GPa)	36.1	35.3	37.9	45.8	71.1
ν_{12}	0.26	0.35	0.34	0.27	0.13
ν_{21}	0.13	0.27	0.34	0.35	0.26
G_{12} (GPa)	11.7	15.9	17.9	15.9	11.7

는 $M^E = 2.2M$ 의 관계가 매우 잘 일치됨을 확인할 수 있었다. 그러나 [+30], [+45], [+60], [90]의 경우는 M^E

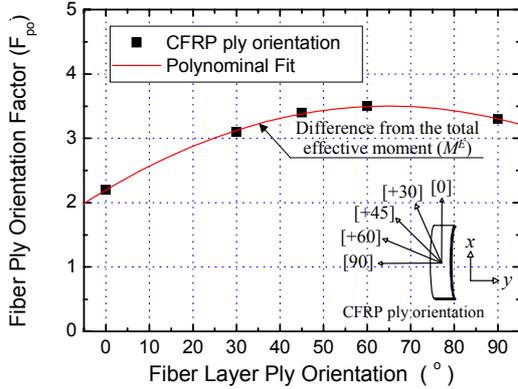


Fig. 6 Relationship between fiber layer ply orientation and fiber ply orientation factor in PZTCA

$=2.2M$ 의 관계가 성립하지 않았다. [0]을 제외한 모든 배향각에서 $M^E > 2.2M$ 의 관계가 나타났다. 그 이유는 베르누이-오일러 굽힘모멘트(M)의 식 (6)에서 CFRP 배향각에 따라 E 값과 ρ 값이 변화하기 때문이다. 따라서 M^E 와 $2.2M$ 간의 차이는 CFRP 배향각 [0]을 기준으로 각도변화에 의해 손실된 굽힘모멘트(loss bending moment, M_{loss})를 의미한다. 손실굽힘모멘트(M_{loss}) 해석결과, $\rho = 50 \sim 100\text{mm}$ 의 구간에서는 M_{loss} 값이 미소량 증가하다가 $\rho = 100 \sim 500\text{mm}$ 의 구간에서는 미소량 감소함을 알 수 있다. 또한 CFRP 배향각이 [0]부터 [+60]까지 증가할수록 M_{loss} 의 미소한 증가가 나타나다가 [+60]부터 [90]까지는 미소한 감소가 나타났다. 결과적으로 $M^E = 2.2M$ 의 관계는 CFRP 배향각이 [0]일 때만 성립되는 식이고, 작동변위(Δh)에 대한 식 (4)는 재료의 특성에 대한 인자가 배제되었을 뿐만 아니라, CFRP 배향각이 [0]일 때의 초기높이(Δh_0)를 기초로 유도된 식이므로 CFRP의 배향각이 변화한 경우에는 동일한 조건에서도 작동변위가 다르게 나타나게 된다.

2.3 섬유배향각의 영향을 고려하기 위한 섬유배향계수(F_{po})의 제안

CFRP 배향각에 따른 영향을 평가하기 위한 섬유배향계수(fiber ply orientation factor, F_{po})를 Fig. 6과 같이 제안해 보았다. Fig. 6은 CFRP 배향각에 따라 달라지는 M^E 와 M 의 차이가 손실굽힘모멘트(M_{loss})인 점을 착안하여 두 모멘트 값의 차이를 섬유배향계수(F_{po})로 나타낸 것이다. Fig. 6에서 CFRP 배향각이 [+30], [+45], [+60], [90]일 때 F_{po} 값은 각각 3.1, 3.4, 3.5, 3.3을 나타냈다. 결국, [+30]부터 [90]사이에서의 F_{po} 값은 미소한 차이를 나타내며, 대략 3.1~3.5의 값을 갖는다. 식 (6)에 섬유배향계수(F_{po})를 고려하면 식 (7)과 같은 곡률반경(ρ) 식을 유도할 수 있다. 여기서, b 는 PZTCA 시험편의 폭이고 t 는 두께

이다. 또한, F_{po} , E , M^E 는 CFRP 배향각에 따라 달라지는 값으로 상기 내용을 통하여 계산할 수 있다.

$$\rho_{po} = \frac{F_{po} E b t^3}{12 M^E} \quad (7)$$

3. 결론

1) PZTCA의 CFRP 배향각이 변화할 경우, 기존의 작동변위(Δh) 계산식은 적용이 불가능해진다. 따라서 곡률반경(ρ)에 따른 총유�효모멘트(M^E)의 변화를 파악해 본 결과, CFRP의 배향각이 [0]부터 [+60]까지 증가할수록 M^E 값은 감소하다가 [+60]부터 [90]에서는 미소량 증가함을 알 수 있었다. 그러나 CFRP 배향각과 M^E 의 증감 폭은 비례하지 않았다.

2) 섬유배향각이 [0]이 아닌 경우는 $M^E = 2.2M$ 의 관계가 성립되지 않고 $M^E > 2.2M$ 의 관계가 나타났다. 그 이유는 베르누이-오일러 굽힘모멘트(M)의 식에서 CFRP 배향각에 따라 E 값과 ρ 값이 변화하기 때문이다. 따라서 M^E 와 $2.2M$ 의 차이는 각도변화에 의해 손실된 굽힘모멘트(M_{loss})임을 알 수 있다. M_{loss} 는 CFRP 배향각 [0]부터 [+60] 구간에서 미소한 증가가 나타났고, [+60]부터 [90] 구간에서는 미소한 감소가 나타났다.

3) PZTCA의 CFRP 배향각이 곡률반경에 미치는 영향을 고려하기 위한 섬유배향계수(F_{po})를 제안하였다. 그 결과 CFRP 배향각 [+30]부터 [90] 사이에서 대략 3.1~3.5의 값을 나타냈고, [+60]일 때 가장 높은 값을 나타냈다. 따라서 [+60]일 때 곡률반경은 가장 낮게 됨을 알 수 있다.

후기

본 연구는 학술진흥재단 중점연구소 지원사업(과제번호: KRF-2004-055-D00047)으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Kim, C. W., Oh, D. J. and Yoon, K. J., "New Calculation Method for the Total Effective Moment of LIPCA Using Actuating Height", *International Pacific Conference on Automotive Engineering*, No. 186, 2005.
2. Yoon, K. J., Park, K. H., Lee, S. K., Goo, N. S. and Park, H. C., "Analytical Design Model for Piezo-Composite Unimorph Actuator and Its Verification Using Lightweight Piezo-Composite Curved Actuators", *Smart Materials and Structures*, No. 13, pp. 459~467, 2004.
3. Ronald F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*, McGraw Hill, pp. 190~269, 1994.