<학술논문> DOI http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.1.055 ISSN 1226-4873

컴파운더 보우 지레 시스템의 기구학적 해석§

이용성* ·김홍석**·정성균**·최웅재***·김영근***·박경래***·신기훈**†
* 서울과학기술대학교 NID 융합기술전문대학원, ** 서울과학기술대학교 기계자동차공학과, *** ㈜ 윈앤윈

Kinematic Analysis of Levering Systems in Compound Bows

Yong-Sung Lee*, Hong Seok Kim**, Seong-Kyun Cheong**, Ung-Jae Choi***,
Young-Keun Kim***, Kyung-Rea Park***and Ki-Hoon Shin**†
* Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology,
** Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul Nat'l Univ. of Science and Technology
*** Win & Win Archery

(Received June 18, 2012 ; Revised October 10, 2012 ; Accepted October 10, 2012)

Key Words: Compound Bow(컴파운더 보우), Levering System(지레 시스템), Kinematic Analysis(기구학적 해석), Cam Pulley (캠 풀리)

초록: 컴파운더 보우는 리커브 보우와 비교하여 케이블 및 캠 풀리로 구성되는 지레시스템을 사용하여, 궁사가 보우를 최대 위치로 당기기 위해 필요로 하는 힘을 줄이는 동시에 더 많은 에너지를 축적할 수 있도록 해준다. 지금까지 컴파운더 보우의 효율 및 성능을 향상시키기 위해 경험적인 방법에 기초하여 많은 특허가 제안되었지만, 해석적인 방법에 대한 연구는 별로 없었다. 그러므로 본 연구에서는 컴파운더 보우 지레 시스템의 기구학적인 해석을 위한 방법을 제안하여 지레시스템의 캠 형상 및 보우 날개의 재질변화에 따른 효과를 설계자가 쉽게 예측할 수 있도록 하고자 한다.

Abstract: Compound bows use levering systems consisting of cables and cam pulleys to bend limbs that are much stiffer than those of recurve bows, thus storing more energy while requiring less force for the archer to hold the bow at a fully drawn position. Many patents have thus far been proposed to improve the efficiency and performance of compound bows through empirical methods, whereas only a few analytical methods have been proposed. In this light, this paper presents a method for the kinematic analysis of levering systems in compound bows so that a designer can easily predict the effects of changes in the cam profiles and limb materials.

- 기호설명 -

θ : 캠 궤적 극좌표의 각도
r : 캠 궤적 극좌표의 반경
λ : 파워 캠의 시계방향 회전각도
o_p : 파워 캠의 회전중심 좌표
o_c : 컨트롤 캠의 회전중심 좌표
ϕ : λ 회전 후 캠궤적 극좌표의 각도
R : 파워 캠에 작용하는 합력
ω : 파워 캠에 작용하는 합력의 방향각
T_1 : 컨트롤 케이블의 장력(파워 캠궤적 1)
T_2 : 스트링의 장력
T_3 : 컨트롤 케이블의 장력(파워 캠궤적 3)
α : T_1의 방향각
β : T_2의 방향각
γ : T_3의 방향각
F : 활의 당김력

1. 서 론

세계 각국의 활 쏘기 문화는 지형과 목표물에 맞게 발달 되어 왔고 아시아의 경우 산과 나무가 많은 지형 특성상 짧은 단궁의 사용이 용이했다. 활은 총포의 발달로 그 위상이 많이 줄었으나

§이 논문은 2012 년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2012. 6. 26.-27., 대전컨벤션센터) 발표논문임.
† Corresponding Author, shinkh@seoultech.ac.kr
© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

레저 및 경기용 도구로 여전히 사용되고 있으며, 전통적인 활의 구조인 리커브 보우(recurve bow)에 기계적인 장치를 추가한 컴파운드 보우(compound bow)로 발전되고 있다.[1] 수세기 동안 사용된 리커브 보우는 최적의 성능을 내기 위해 구조 및 재료에 많은 연구가 진행되어 왔으나, 화살을 당기는 거리에 비례하여 활의 림(limb)을 휘게 하는 궁사의 유지력도 증가하여 오랜시간 대기하는 것이 어려운 단점이 있다.[2-5] 최초의 컴파운드 보우는 도망가는 목표물을 잡기 위해 필요한 빠른 속도와 힘을 주기 위해 기존 리커브 보우의 상하에 풀리를 달아 림의 휨을 절반으로 줄이는 구조였다. 현재는 캠을 이용한 지렛대 원리의 적용으로 보다 작은 힘으로 큰 유지력을 발생 시킬 수 있는 구조가 되었다.[6] 컴파운드 보우는 그 힘과 정확도가 뛰어나 곰이나 사슴 등을 사냥하는 용도로 많이 사용되고 있으며 리커브 보우와 달리 활줄을 최대한 당긴 상태에서 많은 힘이 들지 않기 때문에 오랜 시간 동안 발사 대기를 할 수가 있다.[7,8] 스포츠 측면에서도 양궁 종목인 리커브 보우와 마찬가지로 올림픽 경기 종목으로 유치하기 위한 노력도 계속되고 있다.

리커브 보우에 비해 컴파운드 보우는 국내에서는 보기 어려운 활의 종류로 전량 수입에 의존 하고 있으며 활의 설계 및 평가를 위한 연구도 국내적으로 전무하다.[9]

지금까지 컴파운드 보우의 효율 및 성능을 향상시키기 위해 경험적인 방법에 기초하여 많은 특허[10,11]가 제안되었지만, 해석적인 방법에 대한 연구는 별로 없었다. 미국 미주리대학 Handerson[8]은 싱글캠 방식의 컴파운더 보우에 대한 해석 방법을 제시하였으나, 캠 궤적 데이터에 비교적 오차가 큰 최소자승법을 이용한 근사법을 사용하였으며, 본 논문에 다루고 있는 하이브리드 캠 방식은 다루지 않았다. 본 논문에서는 현재 전세계적으로 가장 널리 사용되고 있는 하이브리드 캠 방식 컴파운드 보우 의 기구학적 해석방법을 제안하고, 역설계를 통해 획득한 캠 궤적 데이터에 적용하여 그 유효성을 검증하였다.

2. 컴파운더 보우의 기구학적 해석

2.1 컴파운더 보우의 구조

컴파운드 보우는 상하 림의 끝 부분에 캠이 장착되어 있어 활줄(bow string)을 당기면 캠이 회전하게되고, 상호 연결된 케이블(buss cable)이 캠 궤적에 감김과 동시에 캠의 중심이 가까워 지는 구조를 가지고 있다. 이때 림에 발생하는 탄성 에너지는 화살에 전달되어 운동에너지로 변환된다.

컴파운더 보우에는 싱글캠(single cam), 트윈캠(twin cam), 하이브리드캠(hybrid cam), 바이너리캠(binary cam) 등 다양한 종류의 캠 시스템이 사용되고 있다. 싱글캠 방식의 경우 화살 끝의 움직임(nock travel)이 정확한 수평이 되기 힘들다는 단점이 있다. 트윈캠 방식의 경우 캠 궤적의 반경이 작은 구간에서 상하 캠의 정확한 동기(synchronization)가 어렵다는 단점이 있다. 바이너리 캠 방식의 경우 다른 방식에 비해 좌우 편향이 일어날 수 있다는 단점이 있다. 현재 전세계적으로 싱글캠과 트윈캠의 장점을 조합한 하이브리드 캠 방식이 가장 널리 사용되고 있다. Fig. 1 은 하이브리드 캠이 적용된 컴파운더 보우를 보여주고 있다. Fig. 1 에서와 같이 하이브리드 방식은 3 개의 그루브(groove)를 가지는 파워 캠(power cam)과 2 개의 그루브를 가지는 컨트롤 캠(control cam)으로 구성된다.

Fig. 2 는 파워 캠과 컨트롤 캠의 상세 구조를 보여주고 있다. 캠에 연결된 케이블과 활줄은 T_1, T_2, T_3 의 3 가지 인장력을 발생 시키며 궁사가 활줄을 당기면 T_2 의 방향으로 캠이 회전하며 이때, 파워 캠의 케이블이 컨트롤 캠의 중심에 연결되어 있어 T_1 방향의 인장력이 발생한다. 하단의 컨트롤 캠에 장착된 케이블은 파워 캠의 3 번째 원형 캠에 고정되어 T_3 의 인장력이 발생한다.

Fig. 2 에 소개된 캠은 카본테크사의 OS3LD 캠으로 본 연구에서는 이들 캠 궤적을 역설계 방식

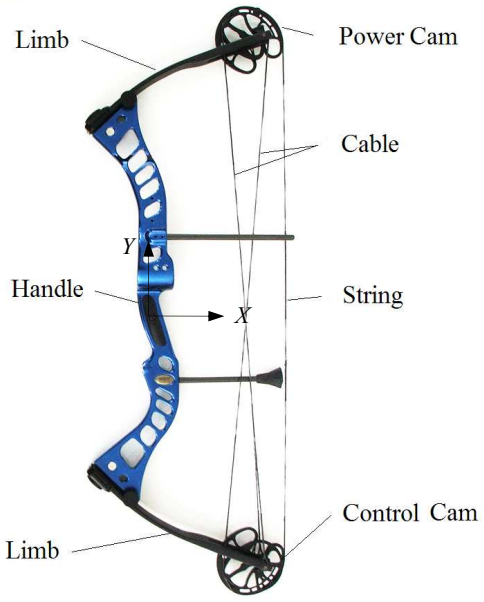


Fig. 1 Hybrid cam compound bow

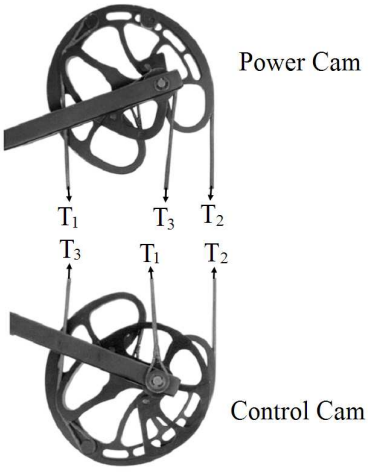


Fig. 2 Connection between the power cam and the control cam

으로 측정하여 사용하였다. 윈앤윈사의 경우 이들 캠을 사용하여 컴파운더 보우를 현재 개발 중에 있지만, 캠설계 기술을 보유하고 있지 못하고 단순히 부품을 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

2.2 캠과 케이블의 접점 계산

Fig. 3(a)는 활줄을 당기지 않은 초기상태에서 파워 캠의 형상을 보여주고 있다. 캠의 형상을 나타내는 궤적 데이터는 역설계를 통해 $(\theta, r(\theta))$ 의 극좌표 형식으로 얻을 수 있다. 본 연구에서는 측정된 캠 궤적 데이터의 각 구간을 아래 식 (1)과 같이 3 차 함수로 보간하여 사용하였다.

$$r(\theta) = q_1\theta^3 + q_2\theta^2 + q_3\theta + q_4 \tag{1}$$

Fig. 3(a)에서 XY 전역좌표계는 Fig. 1 에서와 같이 활의 메인 프레임 중간부분에 위치시킨다. 이때 파워캠 및 컨트롤캠의 회전중심은 전역좌표계에서 각각 $o_{p0}(X_0, Y_0)$, $o_{c0}(X_0, -Y_0)$ 가 된다.

활줄을 당겨 캠이 임의의 각도 λ 만큼 시계방향으로 회전하게 되면 캠 궤적은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 여기서 초기상태 및 회전 후 캠 궤적은 각각 $(\theta, r_0(\theta)), (\phi, r_1(\phi))$ 로 정의된다.

$$r_1(\phi) = r_0(\phi + \lambda) \tag{2}$$

한편 Fig. 3(b)에서와 같이 케이블의 접점이 a 에서 b 로 움직이게 되고, 상하 캠의 회전 중심점도 각각 $o_{p1}(X_1, Y_1), o_{c1}(X_1, -Y_1)$ 으로 바뀌게 된다. 본 연구에서는 상하 캠이 정확히 조율되어 있어, 상부의 파워캠이 시계방향으로 λ 만큼 회전할 경우,

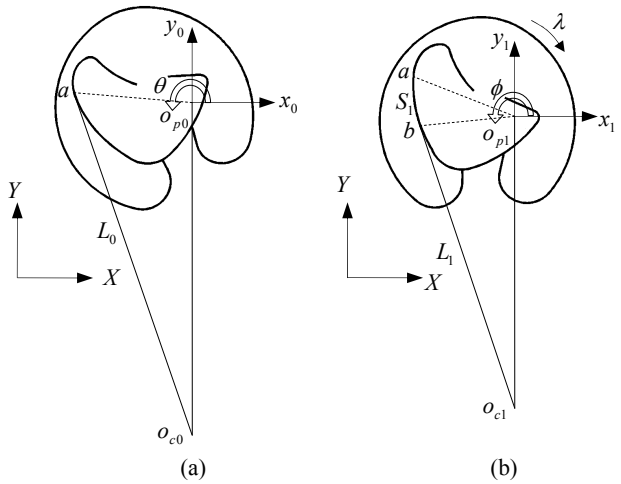


Fig. 3 Calculation of the tangent point after clockwise rotation λ of cams

하부의 컨트롤 캠도 반시계방향으로 λ 만큼 회전한다고 가정한다.

회전 후 캠 궤적상의 임의의 점을 x_1y_1 지역좌표계에서 (x, y) 로 나타낼 때, 새로운 접점 b 가 컨트롤 캠의 회전중심 o_{c1} 과 이루는 직선 L_1 의 기울기 K 는 식 (3)의 조건을 만족해야만 한다.

$$K = \frac{dy}{dx} = -\frac{2Y_1 + y}{x} \tag{3}$$

여기서

$$x(\phi) = r_1(\phi)\cos\phi = r_0(\phi+\lambda)\cos\phi$$

$$y(\phi) = r_1(\phi)\sin\phi = r_0(\phi+\lambda)\sin\phi$$

$$dx = \frac{dr_0(\phi+\lambda)}{d\phi}\cos\phi d\phi - r_0(\phi+\lambda)\sin\phi d\phi$$

$$dy = \frac{dr_0(\phi+\lambda)}{d\phi}\sin\phi d\phi + r_0(\phi+\lambda)\cos\phi d\phi$$

한편 캠의 λ 회전 후 호 S_1 와 L_1 의 합은 식 (4)와 같이 L_0 과 같다는 조건을 만족해야만 한다.

$$L_0 = L_1 + S_1 \tag{4}$$

여기서 $S_1 = \int_{\phi_a}^{\phi_b} r_0(\phi+\lambda)d\phi$

$$L_1 = \sqrt{x^2 + (2Y_1 + y)^2}$$

식 (3), (4)를 만족하는 미지수 ϕ_b 와 Y_1 를 수치해석방법[12,13]으로 구하면, 새로운 접점 b 의 좌표 및 호 S_1 의 감김각 $\phi_b - \phi_a$ 를 계산할 수 있다. 감김각 $\phi_b - \phi_a$ 는 일반적으로 캠의 회전각 λ 와는 비슷한 값이지만 동일하지는 않다.

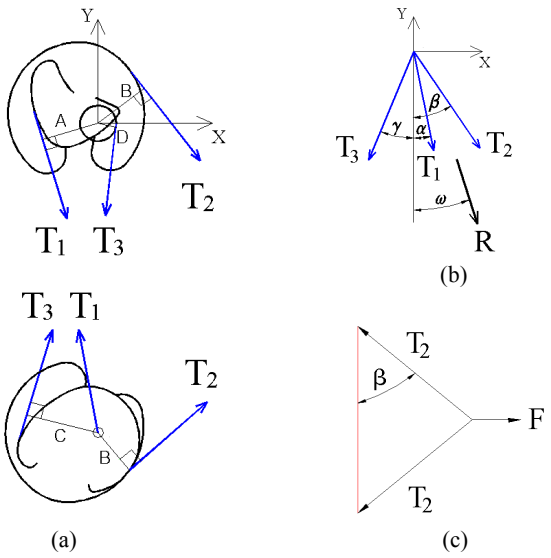


Fig. 4 Tensile forces applied to cams

일단 캠의 회전중심에서 Y_1를 구하면, 림의 굽힘을 단순한 외팔보의 회전운동으로 가정하여 도식적으로 X_1를 구할 수 있다. 림의 정확한 재료 물성치를 구할 수 있다면, 전산해석을 통하여 좀 더 정확한 X_1값을 구할 수 있을 것으로 판단된다.

실제 파워 캠은 3 개의 캠이 조합되어 있는 구조로서 T_2, T_3에 연결된 캠에 동일한 방법을 적용하여 캠 회전 각도 λ에 따른 T_1, T_2, T_3의 각도를 구하였다.

2.3 캠에 작용하는 인장력의 계산

Fig. 4(a)에는 파워캠과 컨트롤 캠에 작용하고 있는 인장력을 보여주고 있다. 케이블에 작용하는 인장력은 캠의 중심으로부터 각 케이블까지의 수직 최단거리인 A, B, C, D 와 곱해져서 파워캠과 컨트롤 캠에서 각각 식(5)와 (6)의 모멘트 평형조건을 만족해야 한다.

$$AT_1 - DT_3 - BT_2 = 0 \tag{5}$$

$$BT_2 - CT_3 = 0 \tag{6}$$

식 (5),(6)으로부터 식 (7)의 관계식을 유도할 수 있다.

$$T_1 = \left(\frac{DB/C + B}{A}\right) T_2 \tag{7}$$

$$T_3 = \left(\frac{B}{C}\right) T_2$$

Fig. 4(b)에서 T_1, T_2, T_3의 합력 R 은 식 (8)과 같이 x, y 성분으로 분해하여 계산할 수 있다. 여기서 합력 R 은 ω의 방향각으로 상하 림에 작용하여 림의 탄성변형을 일으키는 힘이다.

$$R_x = R\sin\omega = T_1\sin\alpha + T_2\sin\beta - T_3\sin\gamma \tag{8}$$

$$R_y = R\cos\omega = T_1\cos\alpha + T_2\cos\beta + T_3\cos\gamma$$

식 (7), (8)로부터 식 (9)와 같이 합력 R 의 방향각 ω을 찾을 수 있다.

$$\tan\omega = \frac{R_x}{R_y} = \frac{\left(\frac{DB/C+B}{A}\right)\sin\alpha + \sin\beta - \left(\frac{B}{C}\right)\sin\gamma}{\left(\frac{DB/C+B}{A}\right)\cos\alpha + \cos\beta + \left(\frac{B}{C}\right)\cos\gamma} \tag{9}$$

한편 식 (7),(8)로부터 T_2 와 R 사이에는 식 (10)의 관계가 성립한다.

$$T_2 = \frac{R\sin\omega}{\left(\frac{DB/C+B}{A}\right)\sin\alpha + \sin\beta - \left(\frac{B}{C}\right)\sin\gamma} \tag{10}$$

캠의 회전각 λ가 주어지면, 림의 수직 변위량을 계산할 수 있다. 이로 부터 T_1, T_2, T_3 힘의 방향각 α, β, γ 및 수직거리 A,B,C,D 그리고 합력 R 의 방향각 ω가 계산된다. 하지만 합력 R 의 크기는 림의 재질 및 형상에 따라 변하는 값이므로, 정확한 형상 및 재료의 모델링을 통한 전산 해석을 통해서 구하던지 아니면 실제 굽힘 실험 등을 통해서 구해야만 한다. 일단 합력 R 의 크기가 구하지면 식 (10)으로부터 T_2 를 계산하고, 다시 Fig. 4(c)의 관계로부터 활의 당김력 F 를 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$F = 2T_2\sin\beta \tag{11}$$

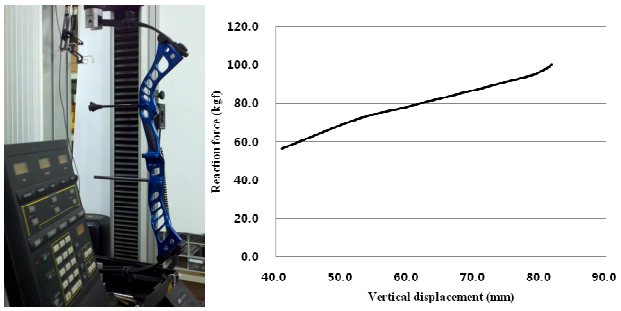
3. 실험 및 결과 비교

3.1 림에서의 수직 반력 측정

컴파운드 보우의 림이 굽힘 길이(수직 방향 변위)에 따라 나타내는 수직반력을 측정하기 위해 굽힘 실험을 수행하였다.

현재 개발 중인 컴파운더 보우의 상하 림에 캠이 조립된 초기 상태에서 각 림은 수직방향으로 41.0mm 의 변위가 발생하며, 활을 최대로 당겼을 때 81.9 mm 의 변위가 발생하도록 설계되어 있다.

실제 인장실험에서 각 림의 수직변위가 81.9 mm 될 때까지 반력을 측정하여 Fig. 5 와 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 실험 결과 수직변위가 81.9 mm 일 때 100.5 kgf 반력이 측정되었다.



(a) (b)

Fig. 5 Reaction force vs. vertical displacement

Table 1 은 캠의 회전각 별로 계산된 각 림의 수직방향 변위값 및 당김거리(drawing distanc)에 상응하는 림에서의 수직반력을 Fig. 5 의 그래프에서 찾아서 표시한 것이다.

Table 2 는 Table 1 의 캠 각도별 수직반력 (식 (8)의 R_y 값에 해당) 값으로부터 식 (7)~(10)을 이용하여 T_2 와 당김력 F 를 계산한 결과를 보여주고 있다. 일반적으로 합력 R 의 각도 ω 는 활줄을 당김에 따라 F 방향으로 변화하다가 T_1 값이 커짐에 따라 각도가 작아지고 T_2 값과 F 값도 작아지는 경향을 보여준다.

3.2 활줄 당김 시험

실제 컴파운드 보우의 활줄을 당길 때 필요한 당김력(drawing force)을 측정하기 위해 Fig. 6(a)과 같은 setup 으로 실험하여 Fig. 6(b)의 힘-변위 그래프를 얻었다.

측정 결과 변위가 증가 할수록 초기에는 힘이 상승하다가 일정한 값을 유지한 후 낮은 값으로 떨어짐을 확인할 수 있다. 즉 최대 500mm 당겼을 때 최소 8.3kgf 의 힘이 측정되었다. 리커브 보우의 경우 당김력은 당김거리에 일방적으로 비례하는 그래프를 나타내지만, 컴파운더 보우의 경우 전술한 바와 같이 목표물을 장시간 기다려야 하므로 최대 당김거리에서 최소 당김유지력이 필요하도록 캠 궤적을 설계해야 한다. 한편 Fig. 6(b) 그래프가 가로축과 이루는 면적은 실제 림에 축적되는 탄성에너지로 화살의 운동에너지로 변환되어 화살의 속도를 결정하게 된다. 결국 체급별 화살의 속도, 최대당김거리, 최대 당김력 및 최소 당김유지력 등의 스펙을 고려하여 Fig. 6(b)와 유사한 그래프가 나오도록 캠 궤적을 설계할 필요가 있다.

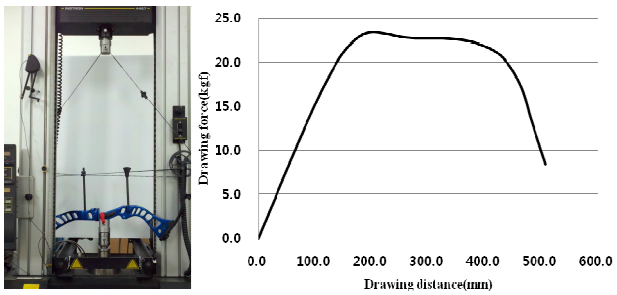
Fig. 7 에서는 Table 2 의 계산된 당김력과 Fig. 6(b)의 측정된 당김력을 활의 수평 당김거리로 도시하여 비교하고 있다. 수식에서 계산된 당김력과 측정된 당김력을 비교할 때, 다소의 차이는 발생하지만 전체적인 경향은 유사한 것으로 관측되었다. 당김력 차이의 주된 원인으로는 캠 회전 중심에서의 마찰손실로 판단되며, 인장에 따른 케이블 및 활줄 길이의 변화도 고려할 수 있다.

Table 1 Cam angle vs. reaction force at limbs

Cam angle (degree)	Vertical displacement (mm)	Drawing distance (mm)	Reaction force at limbs (kgf)
0	41.00	0	56.33
20	48.74	134.85	67.10
40	56.22	199.00	75.30
60	62.72	252.75	78.79
80	68.53	303.74	85.67
100	73.24	349.75	89.70
120	77.50	393.40	93.44
140	80.18	429.58	96.79
160	81.39	458.87	98.87
180	81.90	483.00	100.50

Table 2 Cam angle vs. computed drawing force

Cam angle (degree)	ω (degree)	T_2(kgf)	F(kgf)
20	7.14	27.35	16.83
40	7.77	24.34	20.56
60	7.09	19.60	19.60
80	6.69	17.73	20.09
100	6.21	15.74	19.53
120	5.52	13.53	18.06
140	4.52	10.85	15.28
160	3.12	7.41	10.85
180	2.01	4.70	7.08



(a) (b)

Fig. 6 Measured drawing force vs. displacement

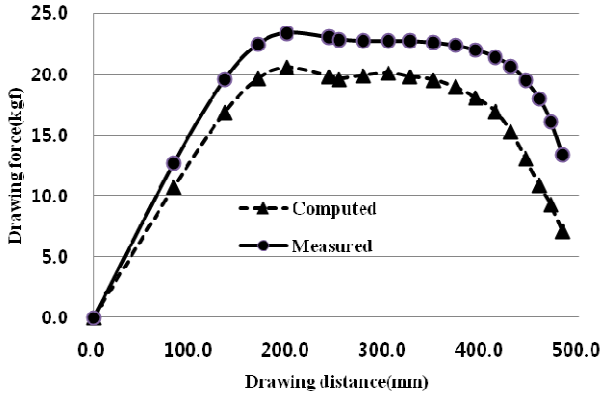


Fig. 7 Comparison between the measured and the computed drawing forces

4. 결 론

지금까지 컴파운드 보우의 효율 및 성능을 향상시키기 위해 경험적인 방법에 기초하여 많은 특허가 제안되었지만, 해석적인 방법에 대한 연구는 별로 없었다. 그러므로 본 연구에서는 컴파운드 보우 지레 시스템의 기구학적인 해석을 위한 방법을 제안하였고, 역설계 방식을 통해 얻어진 캠 궤적에 적용하여 제안된 방법의 유효성을 검증하였다. 실험을 통해 림(limb)에서의 반력을 측정하고, 측정된 림에서의 반력을 유도된 수식에 적용하여 얻어진 활을 당기는 데 필요한 당김력이 실제 측정값과 유사한 결과를 보였다. 향후 컴파운더 보우 림의 형상 및 재질을 고려한 전산해석기술을 추가적으로 개발하여 림의 설계 및 캠 궤적 설계 등에 활용할 계획이다.

리커브 보우보다 훨씬 시장 규모가 큰 컴파운더 보우의 경우 국내 개발을 시작하는 단계이다. 그러므로 본 연구에서 개발된 기구학적 해석 방법을 실제 캠의 궤적 설계 등에 적극 활용하여 향후 컴파운더 보우 세계 시장으로의 진입이 기대된다.

후 기

이 논문은 2011 년 문화체육관광부 국민체육진흥공단의 지원을 받아 수행된 연구 결과임(과제명 : 올림픽 정식종목 채택을 대비한 국산 경기용 컴파운더 보우 개발).

참고문헌

(1) Nieminen, T. A., 2010, "The Asian War Bow," Barbiero, E., Hannaford, P. and Moss, M. (eds), *19th Australian Institute of Physics Congress, ACOFTAOS*

(2) Kooi, B. W., 1991, "Archery and Mathematical Modelling," *Journal of the Society of Archer-Antiquaries*, Vol. 34, pp. 21~29.

(3) French, R. M., Curtis, B. A. and Parm, V., 2006, "Mechanics of a Simple Bow," *2006 IMAX-XXIV Conference & Exposition on Structural Dynamics.*

(4) Denny, M., 2003, "Bow and Catapult Internal Dynamics," *European Journal of Physics*, Vol. 24, pp. 367~378 .

(5) Kooi, B. W., 1996, "Functioning of Ears and Set-Back at Grip of Asiatic Bows," *Journal of the Society of Archer-Antiquaries* , Vol. 39, pp. 73~77.

(6) Allen, H. W., 1968, "Achery Bow with Draw Force Multiplying Attachments," *US Patent No. 3486495*.

(7) Meyer, C. G. and Baker, J. R., 2004, "An Experiment Study on the Influence of Compound Bow Draw Cycle Characteristics on Vibration Response," *2004 IMAC-XXII Conference & Exposition on Structural Dynamics*.

(8) Handerson, A. J., 2009, "Kinematic Analysis of Cam Profiles Used in Compound Bow," *M.S. Thesis*, University of Missouri, U.S.A.

(9) Korea Archery Association, www.archery.or.kr

(10) Darlington, R. F., 2000, "Single-Cam Compound Archery Bow," *US Patent No. 6082347.*

(11) Blahnik, R. C., 2006, "Compound Bow with Adjustable Let-off," *US Patent No. 7059315 B2.*

(12) Song, C. Y. and Lee, J., 2010, "Comparative Study of Approximate Optimization Techniques in CAE-Based Structural Design," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 34, No. 11, pp. 1603~1611.

(13) Shin, K. H., 2011, "A Method for Planar Development of Free-Form Surfaces Made of Anisotropic Materials," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, No. 11, pp. 2817~2825.