

**다중프레임을 이용한 공사의 패러독스 크기 측정**김종근<sup>a</sup>, 정영상<sup>a</sup>, 송문재<sup>b</sup>, 김성신<sup>c\*</sup>**Measurement of Archer's Paradox Size using Multiple Frames**Jonggeun Kim<sup>a</sup>, Yeongsang Jeong<sup>a</sup>, Moonjae Song<sup>b</sup>, Sungshin Kim<sup>c\*</sup><sup>a</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, Republic of Korea<sup>b</sup> ShinKwang Leports Co., Ltd. Republic of Korea<sup>c</sup> Department of Electrical Engineering, Republic of Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	6	November	2013
Revised	30	December	2013
Accepted	15	January	2014

*Keywords:*

Archer's paradox  
Intensity of impact point  
High speed camera  
Multi-frame

**ABSTRACT**

An arrow produced by a manufacturing process is evaluated using the archer's paradox and the intensity of the impact point. The accuracy rate in particular is changed by the arrow's vibrational movement, which is called the archer's paradox. The archer's paradox occurs not only in the right, left, upward, and downward directions, but in all directions. The optimized value of the archer's paradox has not been studied yet. This paper proposes to measure the archer's paradox to determine its optimized value. Measuring the archer's paradox using a high-speed camera is expensive, and it is difficult to translate the result to a numerical value. However, the device for measuring the archer's paradox proposed in this paper is inexpensive, and the results are easy to convert to a numerical value. Therefore, this device is more suitable for optimization of the archer's paradox than a high-speed camera. In this paper, we propose to measure the size of the paradox using multiple frames, which can measure the position of an arrow moving at a speed of 300km/h to within millimeters. We calculate the size of the paradox experimentally using the measured location in each frame. This value is not an approximate value, but an accurate numerical value.

**1. 서론**

제조공정을 통해 생산된 화살의 성능은 화살의 공사의 패러독스와 탄착점의 집적도에 따라 좌우 된다<sup>1-2)</sup>. 공사의 패러독스는 Fig. 1과 같이 화살이 발사된 후 화살과 수평인 평면에 진동이 일어나는 현상이다. 이러한 현상은 두 가지 원리에 의해 발생하게 된다. 첫째로 활시위를 당기는 방법에 의해 발생하게 되는 진동이다. 활시위는 엄지, 중지 그리고 약지를 이용하여 당기는 것이 일반적이다.

활시위를 최대한 당겨서 활시위를 놓을 때 아무리 감각이 뛰어난 사람이어도 3개의 손가락을 동시에 놓는 것은 불가능하기 때문에 시간차가 발생한다. 손가락을 놓는 시간차에 의해 Fig. 2와 같이 시위가 좌우로 흔들리면서 진동이 발생하며 화살을 뒤에서 앞으로 미는 힘뿐만 아니라 화살의 측면에서 밀어주는 힘이 추가된다. 두 번째 원리는 활시위를 최대한 뒤로 당겼을 때 화살의 중간부분이 조금 휘어질 때 활시위를 놓게 되면 노크와 그림 사이의 간격이 급격히 줄어들면서 활을 밀게 되며 활의 관성에 의해 활은 급격하

\* Corresponding author. Tel.: +82-51-510-2374

Fax: +82-51-513-0212

E-mail address: sskim@pusna.ac.kr (Sungshin Kim).

게 휘면서 앞으로 나아가기 때문이다. 그림은 사람이 활을 잡는 부분이며 활의 중앙에 위치한다<sup>3)</sup>.

궁사의 패러독스는 활시위를 당길 때의 무게, 화살의 스파인(Spine) 그리고 화살의 길이 등에 영향을 받는다. 특히 스파인에 영향을 많이 받게 되는데 스파인이 크면 궁사의 패러독스의 크기가 크고 스파인이 작으면 궁사의 패러독스 크기 또한 작아진다. 여기서 화살의 스파인은 화살의 휘어짐 정도를 측정하는 척도이며 Fig. 3과 같이 화살을 71.2 cm 넓이로 벌려 놓은 기둥에 화살을 올리고 화살의 중심에 880 g의 추를 달아서 화살이 휘는 정도를 측정한다.

궁사의 패러독스를 측정하는 기존방법으로는 초고속 카메라를 이용한 측정 방법이 있다. 현재 화살을 제조하는 업체는 대부분 초고속 카메라를 이용하여 실험환경을 구성하고 있다. 초고속 카메라

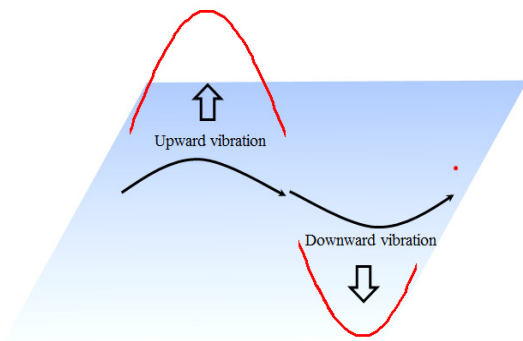


Fig. 1 Vibrating arrow image

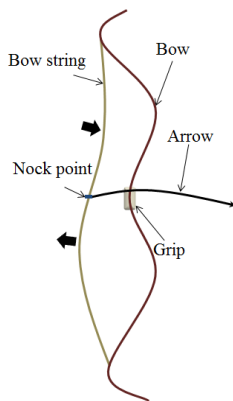


Fig. 2 String moving swiftly sideways

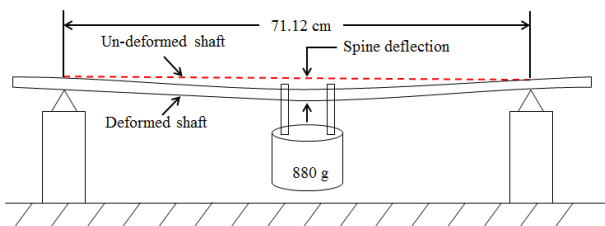


Fig. 3 Measuring method of an arrow's spine

를 이용하여 발생하는 문제점으로는 고정된 위치에서 특정한 각도의 화살 모양만 측정할 수 있다는 점이다. 이 때, 궁사의 패러독스가 발생하고 있으나 카메라의 설치 각도와 화살의 휘어짐의 방향이 틀려서 이미지로 확인 할 수 없는 경우가 발생한다. 초고속 카메라에서 발생하는 문제점을 해결하기 위해서 화살의 특성 및 궁사의 패러독스를 측정하기 위한 새로운 하드웨어의 구성이 필요하다<sup>4)</sup>.

본 논문에서는 궁사의 패러독스 크기와 화살 성능과의 관계를 알아내기 위해 참고문헌 [4]번 연구의 연장선으로서 참고문헌 [5]의 탄착점 측정 시스템을 확장하여 궁사의 패러독스 크기를 측정하였다. 제안한 장치를 이용한 궁사의 패러독스 크기 측정은 초고속 카메라와 달리 비행하는 화살의 움직임을 수치화 할 수 있으며 궁사의 패러독스 크기도 수치화 할 수 있고 매우 경제적이다. 프레임 을 이용한 궁사의 패러독스 크기 측정은 수치화된 값을 이용하여 화살의 성능을 분석 할 수 있는 이점이 있다. 그리고 카메라를 이용한 촬영은 영상처리를 위해 촬영하는 위치 뒤쪽에 흰색 배경을 설치하지만 제안한 장치는 부수적인 장치가 필요하지 않다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 단일 프레임을 이용한 탄착점 측정 시스템과 다중 프레임을 이용한 궁사의 패러독스 크기 시스템에 대해 설명 및 제안하며, 3장에서는 실험 환경 및 실험 결과에 대해서 설명한다. 마지막으로 4장에서 결론 및 향후 연구과제에 대해서 기술하였다.

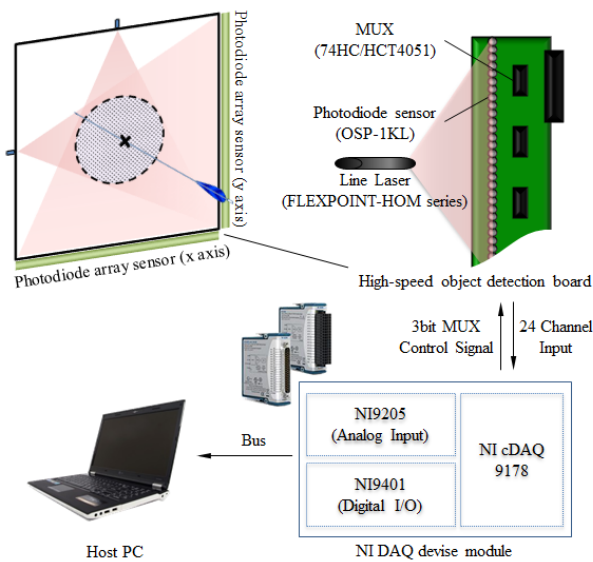
## 2. 궁사의 패러독스 크기 측정 방법

### 2.1 궁사의 패러독스 크기 시스템

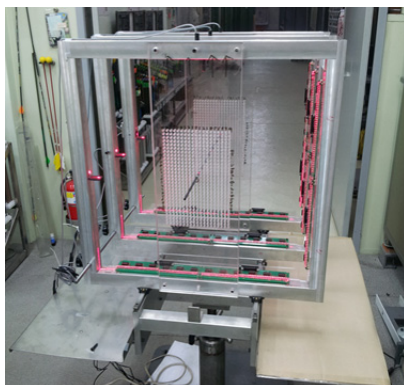
궁사의 패러독스 크기 측정 시스템은 참고문헌 [5]번, 단일 프레임을 이용한 화살의 탄착점 측정 시스템을 확장하여 참고문헌 [4]번의 패러독스 측정 방법을 실제로 구현한 시스템이다. 단일 프레임을 이용한 화살의 탄착점 측정 시스템의 구성도는 Fig. 4(a)와 같고 프레임의 수를 2개로 확장한 측정 시스템은 Fig. 4(b)와 같다. 단일 프레임을 이용한 탄착점 측정 시스템<sup>5)</sup>은 지정된 지점에서 화살의 탄착점을 계측하기 위해서 65 cm × 65 cm 규격의 프레임에 라인레이저와 포토다이오드 센서를 설치한 구조물을 사용하였다. 포토다이오드 센서는 빛에너지를 전기에너지로 변환시켜주는 소자이므로, 라인레이저 빛의 강도는 포토다이오드 센서의 전압레벨로 변환시킨다. 화살이 프레임을 통과 할 경우 임의의 지점에 있는 포토다이오드 센서의 전압레벨을 NI (National Instruments)의 DAQ device를 이용하여 계측한다. 포토다이오드에서 출력되는 신호는 NI 9205 Analog Input 모듈을 사용하여 24개의 채널을 입력받는다. NI 9205 아날로그 입력 모듈의 최대 Sampling rate은 250 kS/s이고, 총 32개의 아날로그 입력을 가진다. 하나의 프레임에 사용하는 채널수는 24개이며, 1개의 채널당 20kS/s를 사용한

다. NI 9205의 한 채널의 입력은 MUX의 출력에서 받으며, MUX가 커버하는 포토다이오드 수는 8개이다. NI cDAQ 9718 8-slot USB chassis는 NI 9401과 NI 9205 모듈의 동기화를 맞추어 주고, NI 9205에서 입력 받은 아날로그 신호를 Host PC로 전송한다. 빛의 강도에 따라 다른 전압레벨을 가지는 포토다이오드 센서의 전압레벨을 빛의 양에 따라 동일한 레벨로 데이터로 계측하기 위해서 min-max normalization을 이용하였다. 화살이 프레임에 통과할 때 다수의 포토다이오드 센서가 화살의 그림자에 가려지게 되므로, 질량 중심을 구하는 공식을 이용하여 다수의 포토다이오드의 중심을 구한다. 라인레이저의 위치와 포토다이오드 센서의 중앙 위치를 이용하여 탄착점 좌표를 출력한다. 하지만 최초로 출력되는 탄착점은 포토다이오드 센서가 설치되어 있는 보드의 구조와 라인레이저의 빛의 각도의 영향으로 출력되는 탄착점은 오차를 가지고 있다. 오차를 수정하기 위해서 정밀하게 가공된 1 cm 간격의 격자를 이용하여 좌표 왜곡 보정을 실행하였다. 보정전은 약 3 mm의

오차가 발생하였고, 보정 후 0.5 mm 이내로 개선됨을 확인할 수 있었다. cDAQ-9178에 아날로그 측정 장비 NI 9205를 추가하여 65 cm × 65 cm 규격의 프레임 2개를 확장하였다. 프레임 3개를 일렬로 배치하여 Fig. 4(b)와 같이 구성한다. Three-frame 또한 단일 프레임과 동일하게 프레임 구조와 라인 레이저의 발광 각도 및 포토다이오드 센서가 설치되어 있는 보드에서 발생하는 오차로 인해 보정을 수행하였다. 보정 방법은 양쪽 프레임에 격자를 설치하고 격자 구멍에 철심을 넣어 위치를 측정한 후 측정값을 Neural network를 이용하여 보정하였다.

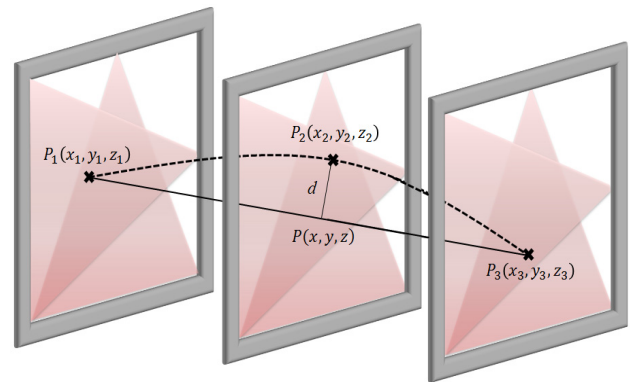


(a) Configuration of measuring photodiode signal

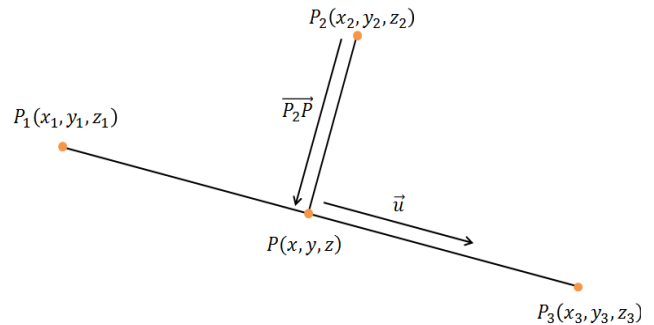


(b) Measuring device of paradox size

Fig. 4 Measuring system of paradox size



(a) Location of arrow measuring in three frame



(b) Calculation method of calculating size

Fig. 5 Calculating size of archer's paradox

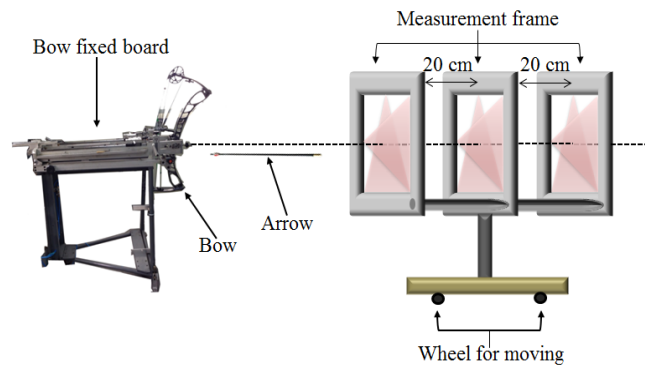


Fig. 6 Experiment environment

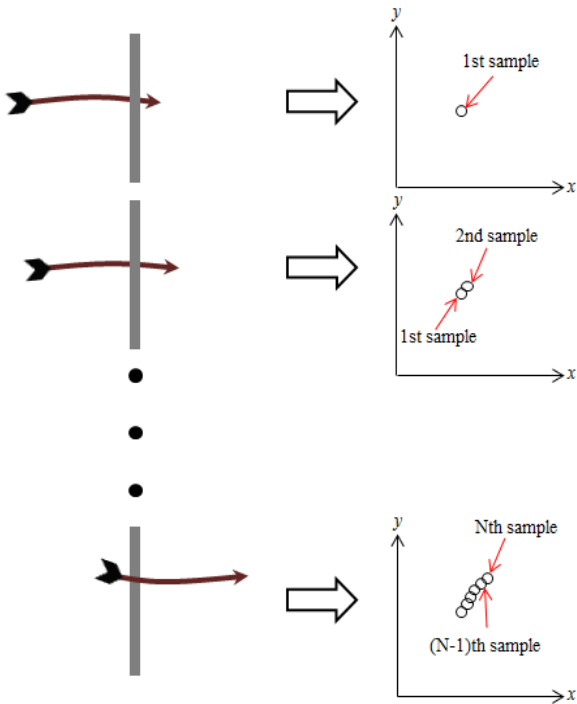


Fig. 7 Sample-based location of arrow

### 2.2 공사의 패러독스 크기 측정

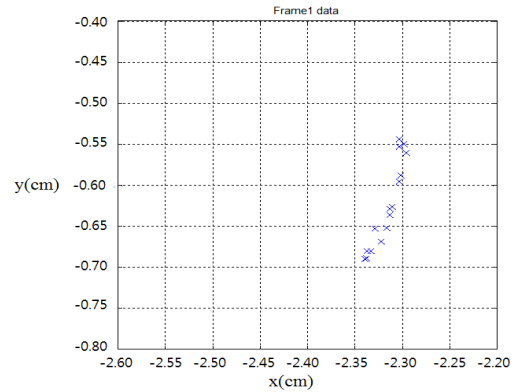
공사의 패러독스 크기를 측정하기 위해서 프레임을 이용한 위치 측정은 필수이다. 각 프레임의 위치 측정은 화살이 프레임 사이를 비행할 때 가려지는 그림자의 위치와 라인레이저의 위치 사이의 직선의 방정식을 이용하여 화살의 위치가 계측 된다. 자세한 화살의 위치측정 방법은 참고문헌 [5]번에 언급된 것과 같다.

Fig. 5(a)는 3개의 프레임을 이용하여 화살이 지나간 위치를 나타내는 그림이며 Fig. 5(b)는 측정된 3개의 위치를 이용하여 공사의 패러독스 크기를 계산하는 그림이다.  $P_1, P_2, P_3$ 는 1번, 2번, 3번 프레임에 측정된 화살의 위치이고 점선은 화살의 형태를 나타낸다.

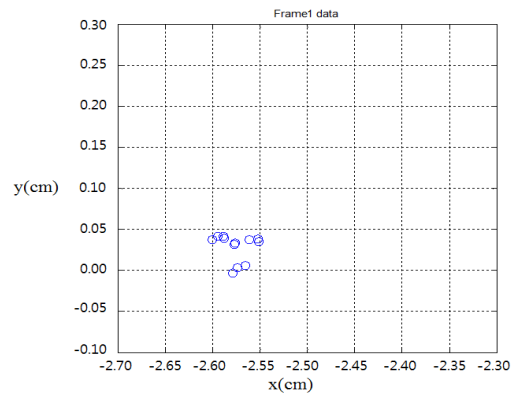
$\vec{u}$ 는  $\overrightarrow{P_1P_3}$ 의 단위벡터이며,  $\vec{u}$ 와 수직이고 점  $P_2$ 를 지나가는 벡터  $\overrightarrow{P_2P}$ 를 구한 뒤  $\overrightarrow{P_2P}$ 의 계산된 길이가 공사의 패러독스 크기이다.

### 3. 실험환경 및 실험결과

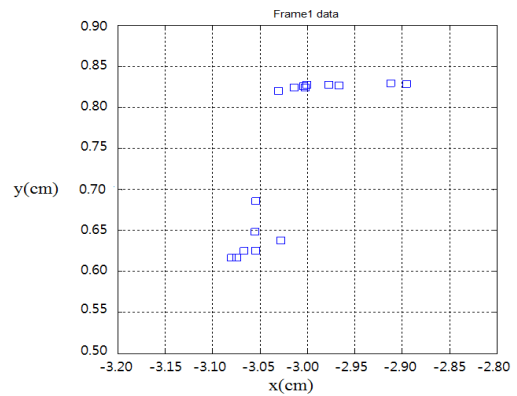
제안한 실험장비와 보정 알고리즘을 검증하기 위해서 실험환경을 Fig. 6과 같이 구성하였다. 활 앞쪽에 프레임을 설치할 때 활 고정대와 프레임을 Fig. 6의 점선으로 표현한 것과 같이 일직선으로 설치한다. 프레임과 프레임 사이의 거리는 20 cm이며 화살의 길이는 75.4 cm이다. 화살이 3프레임에 모두 걸리는 구간이 3개 이상 나오도록 프레임 간격을 20 cm로 설정하였다. Fig. 7은 화살



(a) Frame 1



(b) Frame 2



(c) Frame 3

Fig. 8 Result of measuring a arrow location

이 프레임 중심을 지날 때 화살의 위치가 측정되어 좌표평면에 표출되는 결과를 보여준다. 화살이 지나갈 때 Fig. 7과 같이 시간이 지남에 따라 이동한 화살의 위치가 측정되고 화살이 프레임을 빠져 나갈 때까지 다수의 화살 좌표를 측정하여 표출한다.

Fig. 8은 각 프레임에 측정된 화살의 위치를 나타낸 그림이다.

Fig. 8(a)의 결과는 발사대에서 가장 가까이 있는 프레임에서 측정된 결과이며 Fig. 8(c)의 결과는 발사대에서 가장 멀리 있는 프레

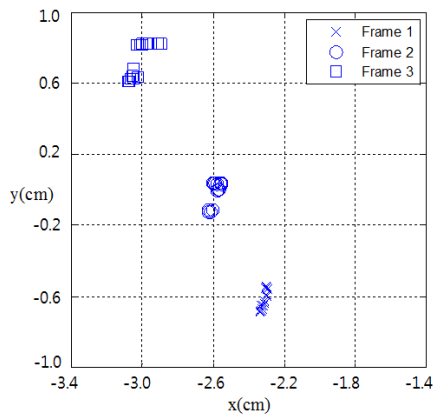
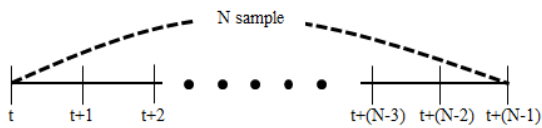
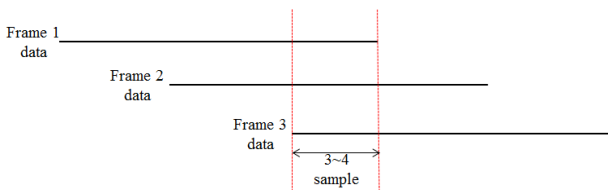


Fig. 9 Combining the Three frame results



(a) One frame data structure



(b) Three frame data structure

Fig. 10 Result data structure

임에서 나온 결과이다. Fig. 8에서 측정된 결과를 하나의 좌표평면으로 나타낸 그림은 Fig. 9이다. 가장 아래쪽에 위치해 있는 화살 위치 샘플의 군집이 발사대와 가장 가까운 프레임에서 측정된 결과이며 가장 위쪽에 위치해 있는 화살 위치 샘플의 군집이 발사대와 가장 멀리 떨어진 프레임의 측정 결과이다.

화살이 프레임을 지나갈 때 한 개의 프레임에서 측정되는 화살의 위치는 Fig. 10(a)와 같이 여러 개의 샘플 위치가 측정된다. 하지만 3개의 프레임에 화살이 모두 측정되는 샘플은 Fig. 10(b)와 같이 3~4개정도 측정된다. 화살의 위치가 3개의 프레임에서 모두 측정된 시간의 샘플을 이용하여 패러독스 크기를 나타낸 그림은 Fig. 11와 같다. Fig. 11에서 숫자 점들은 프레임의 번호를 나타내며 1번이 발사대와 가장 가까운 위치에 있는 프레임이다. 패러독스의 크기는 2번 프레임의 점에서 1번 점과 3번 점을 이은 선에 수직인 점과의 거리이다. Table 1은 발사대와 가장 가까운 프레임의 거리가 80 cm일 패러독스 크기를 측정된 결과이다. 화살은 총 4개의 종류로 실험하였으며 공사의 패러독스 크기의 결과는 화살을 6번 발사한 실험 결과의 평균값이다.

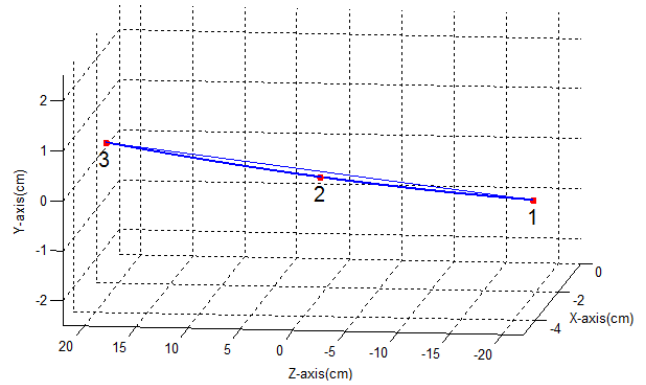


Fig. 11 Size of the archer's paradox

Table 1 The archer's paradox size of each arrow

No	Size of the archer's paradox
1	4.942 / mm
2	5.527 / mm
3	4.693 / mm
4	4.634 / mm

#### 4. 결론

본 논문은 화살의 성능 평가를 위해 참고문헌 [4]번에서 시뮬레이션을 통해 패러독스의 크기를 계측할 수 있도록 제안한 방법을 실제장비에 적용하여 패러독스 크기를 측정하였다. 카메라를 이용한 공사의 패러독스 측정은 데이터의 수치화가 어려우며 가격이 비싸고 카메라의 촬영 각에 따라 측정이 불가능한 상황이 발생한다. 그러나 논문에서 제안한 측정 장비는 300 km/h의 속도로 비행하는 화살의 위치를 mm 단위까지 측정하여 수치화가 가능하며 가격이 저렴하고 측정위치에 따른 방해요소가 없다. 화살의 공정변수(곧기(straightness), 오버랩(overlap), 스팩인 등)를 이용한 화살의 성능 평가 연구는 진행 중이다. 이번 연구로 인해 공사의 패러독스 크기 측정이 가능하기 때문에 추후 연구 과제로는 화살의 공정변수뿐만 아니라 공사의 패러독스 크기를 추가하여 화살의 성능 평가를 진행할 계획이다.

## 후 기

“이 논문은 2010년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2012-0006889)”

## References

- [1] Baek, G. D., Cheon, S. P., Kim, S. D., Kim, S. S., 2011, Performance Criterion-Based Polynomial Calibration Model for Laser Scan Camera, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems*, 21:5 553-563.
- [2] Baek, G. D., Cheon, S. P., Lee, I. S., Kim, S. S., 2012, Parameter Calibration of Laser Scan Camera for Measuring the Impact Point of Arrow, *Journal of Manufacturing Engineering & Technology*, 21:1 76-84.
- [3] Kooi, B. W., Sparenberg, J. A., 1997, On the mechanics of the arrow: Archer's Paradox, *Journal of Engineering Mathematics* 31:2-3 285-303.
- [4] Jeong, Y. S., Yu, J. W., Lee, H. S., Kim, S. S., 2012, Hardware Configuration and Paradox Measurement for the Determination of Arrow Trajectory, *Journal of Manufacturing Engineering & Technology*, 21:3 459-464.
- [5] Jeong, Y. S., Lee, H. S., Yu, J. W., Kim, S. S., 2013, Measurement and Calibration System of Arrow's Impact Point using High Speed Object Detecting Sensor INTELLI 2013, *The Second International Conference on Intelligent Systems and Applications* 167-172.
- [6] Yu, J. W., Lee, H. S., Jeong, Y. S., Kim, S. S., 2012, Measuring System for Impact Point of Arrow using Mamdani Fuzzy Inference System, *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems* 22:4 521-526.
- [7] Jang, J. S., Sun, C. T., Mizutani, E., 1997, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.
- [8] Jain, A. K., Duin, R. P., Robert, P. W., Mao, J., 2000, *Statistical Pattern Recognition: A Review Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions, 22:1 4-37.
- [9] Kooi, B., 1998, Bow-Arrow Interaction in Archery, *Journal of Sports Sciences*, 16:8 721-731.
- [10] Klopsteg, P. E., 1943, *Physics of Bows and Arrows*, *American Journal of Physics*, 11:4 175-192.
- [11] Park, J. L., 2011, The Behaviour of an Arrow Shot from a Compound Archery Bow, *Journal of Sports Engineering and Technology*, 225:1 8-21.
- [12] Weng, J., Cohen, P., Herniou, M., 1992, Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation Pattern, *Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions, 14:10 965-980.
- [13] Wan-Yu, L., Kai, X., 2007, A Camera Calibration Method based on Neural Network Optimized by Genetic Algorithm Systems, *Man and Cybernetics, ISIC. IEEE International Conference, IEEE*, 2748-2753.
- [14] Smith, L. N., Smith, M. L., 2005, Automatic Machine Vision Calibration using Statistical and Neural Network Methods, *Image and Vision Computing*, 23:10 887-899.
- [15] Jang, J. S., 1993, ANFIS: Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System, *Man and Cybernetics, IEEE Transactions*, 23:3 665-685.