

**야구장 안전펜스 성능평가를 위한 충돌시험기 개발**한의돈<sup>a</sup>, 장웅기<sup>a</sup>, 고순탁<sup>b</sup>, 곽호택<sup>b</sup>, 서영호<sup>a</sup>, 김병희<sup>a\*</sup>**Development of Collision Tester for Performance Evaluation of Safety Fence in Baseball Stadiums**Eui Don Han<sup>a</sup>, Woong Ki Jang<sup>a</sup>, Sun Tak Kho<sup>b</sup>, Ho Taek Kwak<sup>b</sup>, Young Ho Seo<sup>a</sup>, Byeong Hee Kim<sup>a\*</sup><sup>a</sup> Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Kangwon National University, 1 Kangwondaehak-gil, Chuncheon 200-701, Republic of Korea<sup>b</sup> CAE Technology Inc., A-208, Seoul Hightech Venture Center, 29, Gonghang-daero 61-gil, Gangseo-gu, Seoul 157-030, Republic of Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	10	September	2013
Revised	13	November	2013
Accepted	14	November	2013

*Keywords:*

Baseball  
Ballpark  
Outfield fence  
Safety fence  
Performance tester

**ABSTRACT**

This paper presents a performance testing device for safety fences of domestic professional baseball stadiums. Safety fences of professional stadiums have been fabricated and installed without adhering to any safety regulations, safety fences demonstrate critically low safety performances and many outfielders are severely injured every season. In this study, we designed and fabricated a performance testing device for safety fences and investigated its validity and reproducibility. A HIC (head injury criterion) was used for the statistical analysis of colliding data. We found that the optimal expulsion pressure and eliminated the accelerometer by replacing it with a velocity sensor using an estimation of the correlation between the momentum data obtained from velocity sensor and the impulse data from the accelerometer.

**1. 서론**

출범 32년째를 맞은 국내 프로야구는 2011년 누적 관중 1억 명을 돌파하며<sup>[1]</sup> 수많은 명경기와 스타를 배출하고 흥미진진한 경기로 국민들의 많은 사랑을 받고 있다. 또한 2008년 베이징올림픽 우승 및 2009년 WBC 준우승 등을 통해<sup>[2]</sup> 국내 프로야구가 대외적으로도 높은 수준에 이르렀음을 증명하였다. 이처럼 국내 프로야구가 양적, 질적으로 큰 성장을 하고 있는 반면, 선수들이 마음 놓고 멋진 플레이를 보여줘야 할 국내 프로야구 구장은 그 수준에 미치지 못하고 있다. 야구는 투수와 타자에 의해 흥미 있는 경기가

진행되지만 수비가 타구를 놓치면 실점으로 연결될 가능성이 높기 때문에 외야수는 실점을 막기 위해 몸을 던지는 허슬플레이를 할 수 밖에 없다. 하지만 외야수의 부상을 막아줄 야구장 외야의 안전펜스는 일정 규격 및 관리 없이 임의로 설치되고 있으며 외야 펜스에 사용되는 광고 페인트 역시 완충 작용을 하는 우레탄 페인트 대신 저가의 에나멜 페인트를 사용하여 안전펜스를 더 딱딱하게 만듦으로써 많은 외야 선수들의 부상을 초래하고 있다<sup>[3-5]</sup>. 이 때문에 한국프로야구선수협회에서는 구단과 지자체에 안전펜스의 개선을 강력하게 요구하고 있지만 받아들여지지 않고 있다<sup>[6,7]</sup>. 따라서 국내 프로야구 구장이 높은 안전성의 외야 펜스를 갖추기 위해서

\* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-6374

Fax: +82-33-259-5551

E-mail address: kbh@kangwon.ac.kr (Byeong Hee Kim).

안전펜스의 안전성 평가를 위한 표준 시험기 및 시험법이 필요하며 이를 통해 안전펜스의 공인 규격을 제정하여 선수들의 안전 확보, 국내 프로야구의 수준 향상, 나아가 국제 경쟁력 강화 등을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 국내 프로야구 구장 안전펜스의 안전성을 정량적으로 평가하기 위해 야구선수의 머리가 충돌하는 것을 모사하여 충돌체를 펜스에 충돌시키는 시험기를 설계, 제작하고 실제 야구장 안전펜스 및 다양한 재료에 대한 충돌 실험을 통해 제작된 야구장 안전펜스 성능시험기의 타당성과 재현성을 검증하였다.

## 2. 설계 및 제작

본 연구에서는 야구선수가 안전펜스에 충돌하는 상황을 모사하여 충격량을 측정하는 장비를 제작하기 위해 충돌체를 질소가스로 발사시키는 건-타입(gun-type)의 장비를 설계하였다. 충돌체는 발사가 용이하도록 인체 머리의 평균 무게인  $4.4 \pm 6 \text{ kg}^{[8]}$ 의 약 1/4 비율로 설계하였다. Fig. 1은 설계된 야구장 안전펜스 성능시험기의 개략도이며 충돌체인 코어(core)는 알루미늄 바디와 폴리우레탄 충돌부로 구성되어 있고 실린더 내부의 LM 가이드를 따라 움직인다. 코어는 최초 실린더의 후면에 영구자석으로 고정되어 있다가 솔레노이드 밸브가 열리면 가스챔버 안에 저장되어 있는 압축 질소가스에 의해 발사되어 성능을 평가할 안전펜스에 충돌한다. 이 과정에서 코어 내부에 위치한 가속도센서(ADXL 193, Analog Devices, Inc.)가 발사 후 2초 동안의 코어의 가속도 변화를 기록하게 된다. 코어에 연결된 가속도센서 케이블은 반복되는 성능테스트 과정에서 내구성을 보장할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 실린더에 부착된 홀센서(FN08, Shanghai Lanbao Sensing Technology Co., Ltd.)를 이용하여 코어의 운동을 감지한 뒤 가상의 가속도 데이터를 계산하여 가속도센서에 의해 측정된 실제 가속도 데이터와의 상관관계를 분석하였다. 분석된 상관관계를 통해 가속도센서 없이 코어의 충격량을 산출할 수 있는 무(無)가속도센서 시스템을 설계하였다.

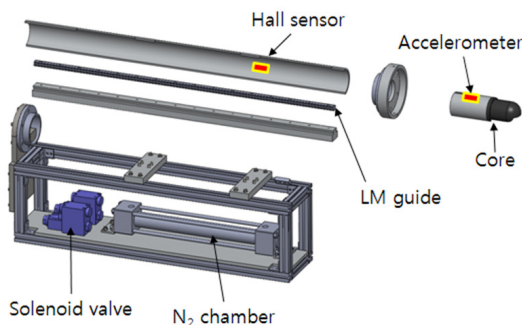


Fig. 1 Schematic of designed safety fence performance tester



Fig. 2 Photograph of fabricated safety fence performance tester

코어의 충돌 시  $HIC$  (Head Injury Criterion)를 적용하여 충격량을 계산하였다. 일반적인 자동차 사고 평가에서 상대차량 또는 고정벽에 충돌하는 방향에 따라 충돌실험을 하게 되는데<sup>[9]</sup>,  $HIC$ 는 자동차 전면 충돌 시 머리 부상 위험의 예측 기준으로 북미자동차 안전규정(north american motor vehicle safety regulations)에서 35년 넘게 사용되어져 왔으며 기계적 충격으로 부터의 머리 부상을 측정하는 가장 좋은 방법이다<sup>[10]</sup>.  $HIC$ 는 고정벽과 충돌하는 차량 안에 앉아있는 충돌 시험용 인체 모형의 머리 질량 중심에서 관찰되는 선형 가속도로부터 식 (1)을 통해 계산 된다<sup>[10]</sup>.

$$HIC = \left[ \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right]^{2.5} (t_2 - t_1) \quad (1)$$

본 연구에서는 코어의 충돌 시 가속도센서에 의해 측정된 실제 가속도와 홀센서의 측정값에 의한 가상 가속도 데이터를 비교하여 상관관계를 계산하였으며  $HIC$ 와 가상의  $HIC'$ 을 비교하였다.

제작 전 유한요소해석을 통해 적정 압력을 선정하였으며 압축 질소가스 토출 압력이 5.5 MPa 일 때 프레임에서 소성변형이 일어나므로 실험 시 토출 압력을 5 MPa 이하로 정하였다. 또한 코어의 충돌 시물레이션에서는 가속도센서의 측정가능 최대값인 250 G에서도 변형이 일어나지 않음을 확인하였다. Fig. 2는 제작된 안전펜스 성능시험기의 모습을 보여주는 사진이다.

## 3. 데이터의 처리 방법

가속도센서로 측정된 최대가속도,  $G_{max}$ 와 충돌시간,  $\Delta t$ 를 식 (2)에 대입하여 충격량(impulse),  $P$ 를 계산하였으며  $m$ 은 코어의 질량이다.

$$P = F \Delta t = m G_{max} \Delta t \quad (2)$$

충돌시간인  $\Delta t$ 는 각 가속도 프로파일마다 다르므로 적절한 기준이 있어야 한다. 따라서 충돌 시 최대가속도 값의 약 5%인 2.5-sigma를 기준으로 충돌시간을 선정하여 계산하였다. 또한 홀센서로 코어의 이동 위치를 감지하여 토출속도,  $V_{inlet}$ 과 반발속도,  $V_{outlet}$ 을 계산하고 식 (3)을 통해 가상충격량,  $P'$ 를 구하여 충격량,  $P$ 와 비교하였다.

$$P' = [m(\overrightarrow{V_{outlet}} - \overrightarrow{V_{inlet}})] \quad (3)$$

HIC 모델에 의한 머리 부상의 수량화 시 적분구간의 선정이 중요한데, 전혀 다른 형태의 가속도 프로파일이라도 전체 적분면적이 같을 수 있기 때문이다. H. W. Henn은 실험을 통해 HIC 모델의 적분구간,  $t_2-t_1$ 으로  $3 \text{ ms} < t_2-t_1 \leq 36 \text{ ms}$ 의 범위를 제안하였는데,  $t_2-t_1$ 이 3 ms 보다 작으면 데이터 중 뇌에 영향을 미치는 위험요소가 너무 적으며 36 ms를 초과하면 그 반대이기 때문이다<sup>[11]</sup>. 따라서 본 연구에서는 선행된 발사실험의 가속도 프로파일을 분석하여 최대가속도 전후 5 ms, 즉  $t_2 - t_1 = 10 \text{ ms}$ 로 머리 부상을 수량화하였으며  $HIC_{10}$ 으로 표기하였다. 머리상해지수의 비교를 위해 먼저 코어의 가속도 센서로 얻은 가속도 데이터를 식 (1)에 대입하여 머리상해지수,  $HIC_{10}$ 을 계산하였다. 다음으로 홀센서에 의해 측정된 코어의 위치 데이터로 가상의 머리상해지수,  $HIC'_{10}$ 를 구하기 위해 가상 최대가속도,  $G_{max}'$ 와 가상 충돌시간,  $\Delta t'$ 를 이용하여 삼각형과 가우시안 두 가지 가상 가속도 프로파일로 모사하여 식 (1)에 대입한 뒤 비교하였다. Fig. 3은 가상의 삼각형 프로파일과 가우시안 프로파일을 보여주고 있다.

Fig. 3(a)는 가상의 삼각형 프로파일이다. 삼각형의 높이, 밑변, 면적을 각각  $G_{max}'$ ,  $\Delta t_{tri}'$ ,  $S_{all}$ 이라 하면 삼각형의 면적,  $S_{all}$ 은

$$S_{all} = P' / m \quad (4)$$

이므로 삼각형의 높이, 즉 가상 최대가속도,  $G_{max}'$ 는

$$G_{max}' = (2 \times S_{all}) / \Delta t_{tri}' \quad (5)$$

로 계산할 수 있다. 또한 HIC를 구하는 식 (1)의  $\int_{t_1}^{t_2} a(t) dt$  부분에 해당하는 삼각형의 색칠한 넓이  $S_{HIC10}$ 는

$$S_{HIC10} = S_{all} - \frac{4S_{all}}{\Delta t_{tri}'^2} \left( \frac{\Delta t_{tri}'}{2} - 0.005 \right)^2 \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. 식 (6)을 이용하여  $HIC'_{10}$ 를 구하는데 필요

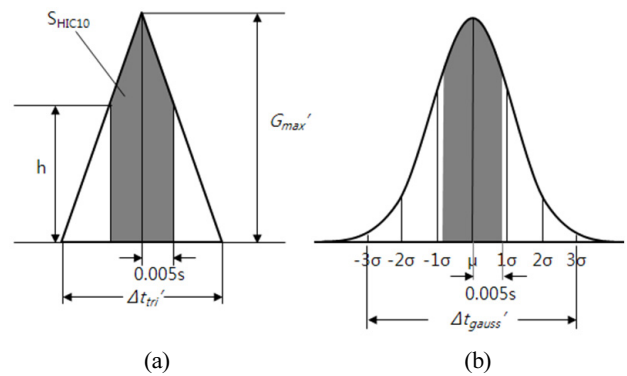


Fig. 3 Images of virtual acceleration profile : (a) Virtual triangular profile; (b) Virtual gaussian profile

한 삼각형 프로파일의  $\Delta t_{tri}'$  구간의 면적을 구한 뒤 가우시안 프로파일에 의한 값과 비교하였다.

Fig. 3(b)는 가상의 가우시안 프로파일이다.  $\Delta t_{gauss}'$ 를 전체 면적의 약 95%인 2.5-sigma로 정할 경우 삼각형 프로파일의 결과와 유사해지는 것을 확인한 후 Fig. 3(b)와 같이 전체 면적의 약 99.7%인 3-sigma로 정한 뒤 정규분포표를 이용하여 가우시안 프로파일의 색칠한 부분의 면적에 해당하는 충격량을 계산하였다.

## 4. 실험 및 결과

### 4.1 성능실험기의 발사성능 검증실험

제작된 안전펜스 성능시험기의 발사 능력을 확인하기 위해 1, 2, 3, 4, 5 MPa의 압축 질소가스 토출압력으로 코어를 발사시켰다. 실험 결과 1 MPa에서는 코어가 발사되어 벽에 충돌할 만큼의 추진력이 발생되지 않았으며 2~5 MPa로 발사한 코어의 속도는 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 최저 발사가능 압력인 2 MPa부터 프레임의 소성변형이 일어나지 않는 5 MPa까지 코어

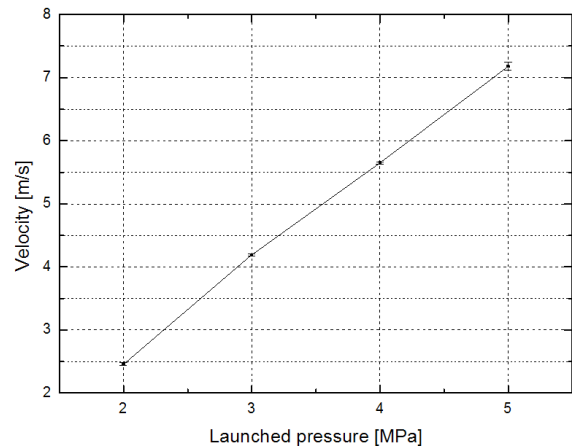


Fig. 4 Graph of velocity of launched core by each pressure

의 발사속도가 선형적으로 증가함을 알 수 있으며 안전펜스 성능시험기의 발사성능을 검증하였다.

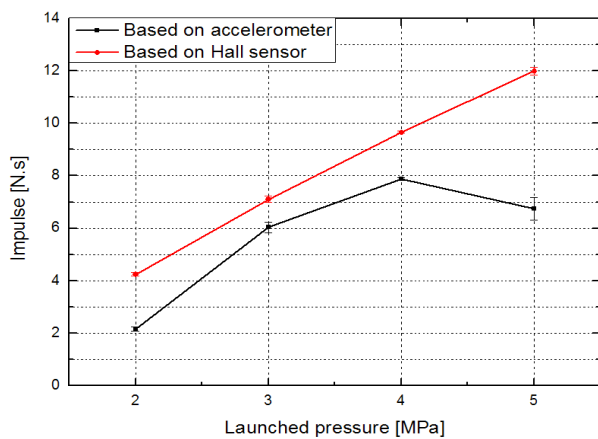
#### 4.2 코어 발사압력에 따른 실험

코어의 적정 발사압력을 정하기 위해 실제 야구장 안전펜스 샘플에 대하여 2, 3, 4, 5 MPa의 토출압력으로 코어를 발사한 뒤 각 발사압력에서의 재현성을 평가하는 실험을 수행하였다. 각 압력에서 발사된 코어가 펜스 샘플에 충돌할 때 가속도센서에 의한 충격량과 홀센서에 의한 충격량을 비교하였으며 결과는 Fig. 5(a)와 같다. 그래프에서 볼 수 있듯이 3 MPa와 4 MPa로 발사하였을 때의 충격량은 약 0.83의 계수로 일치하는 반면 2 MPa와 5 MPa로 발사하였을 때는 가상 충격량,  $P'$ 가 충격량,  $P$ 보다 약 2배 높게 나타난 것을 알 수 있다. 따라서 3~4 MPa이 유효 발사압력의 범위로 판단되며 반복 실험에 사용되는 에너지를 최소화하기 위해 3 MPa를 코어의 적정 발사압력으로 선정하였다. Fig. 5(b)는 각 발사압

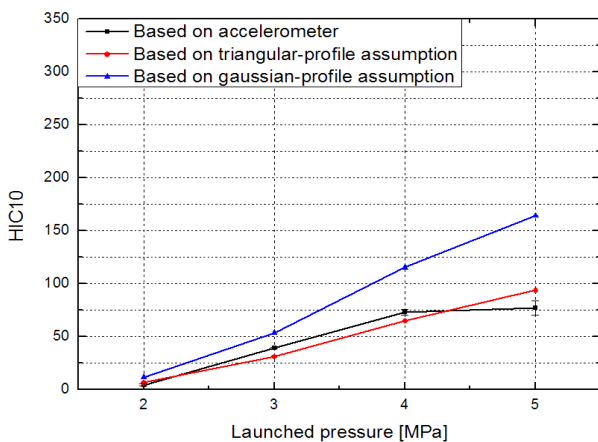
력에서 가속도센서에 의한 머리상해지수,  $HIC_{10}$ 과 홀센서에 의한 데이터를 삼각형 프로파일로 근사한 가상 머리상해지수,  $HIC_{10tri}'$ , 그리고 홀센서에 의한 데이터를 가우시안 프로파일로 근사한 가상 머리상해지수,  $HIC_{10gauss}'$ 를 비교한 그래프이며 각 가상데이터들은 충격량의 비교에서 발생한 상관계수인 0.83이 적용된 값이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 가우시안 프로파일로 근사한 가상 머리상해지수,  $HIC_{10gauss}'$ 보다 삼각형 프로파일로 근사한 가상 머리상해지수,  $HIC_{10tri}'$ 가 가속도센서에 의한 실제 머리상해지수,  $HIC_{10}$ 과 유사한 것을 확인할 수 있으며 이는 코어가 충돌할 때의 가속도 프로파일이 삼각형 형상에 가까워 나타난 결과라고 사료된다.

#### 4.3 충돌벽의 종류에 따른 실험

코어의 적정 발사압력으로 선정된 3 MPa에서의 여러 충돌벽 재질에 대한 재현성을 검증하기 위해 흡음재(sound absorber), 실제 야구장 펜스샘플(safety fence sample), 매트 1(mat 1), 매트 2(mat

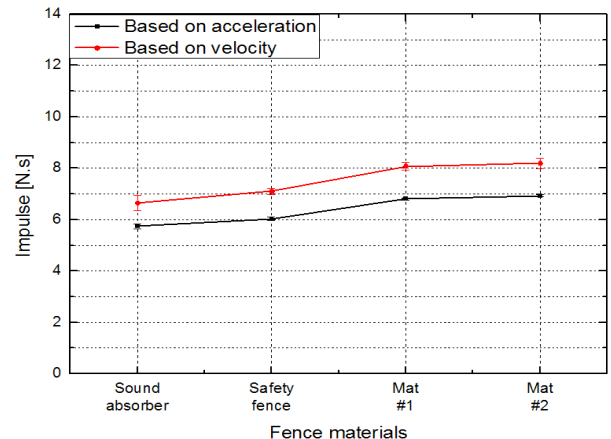


(a)

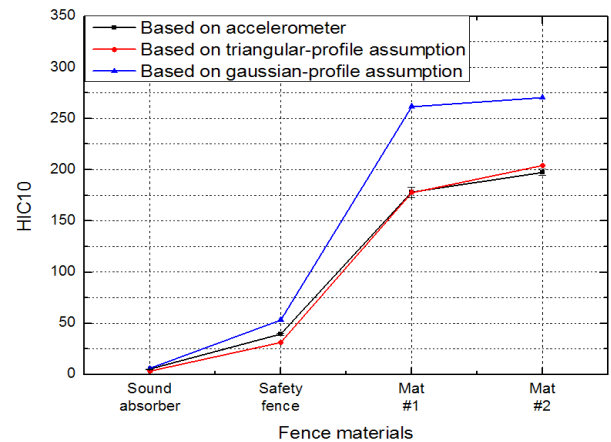


(b)

Fig. 5 Graphs of correlation between accelerometer and hall sensor against each launched pressure : (a) Impulse ; (b)  $HIC_{10}$



(a)



(b)

Fig. 6 Graphs of correlation between accelerometer and hall sensor against each fence material : (a) Impulse ; (b)  $HIC_{10}$

2), 4가지의 충돌벽에 코어를 3 MPa로 발사하는 실험을 수행한 후 결과를 비교하였다. Fig. 6(a)는 3 MPa의 발사압력에서 4가지 충돌벽 재질에 대한 충격량을 보여주는 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 할 수 있으며 이 상관계수는 코어의 유효 발사압력 범위인 3~4 MPa에서 발생하는 상관계수 0.83과 거의 일치하는 값이다. 따라서 적정 발사압력으로 선정된 3 MPa이 타당함을 보여주고 있다. Fig. 6(b)는 코어를 3 MPa로 발사하였을 때 4가지 충돌벽 재질에서의 가속도센서에 의한 데이터를 삼각형 프로파일로 근사한 가상 머리상해지수,  $HIC_{10tri}$ , 그리고 홀센서에 의한 데이터를 가우시안 프로파일로 근사한 가상 머리상해지수,  $HIC_{10gauss}$ 를 비교한 그래프이며 각 가상데이터들은 충격량의 비교에서 발생한 상관계수인 0.85가 적용된 값이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 가우시안 프로파일로 근사한 가상 머리상해지수,  $HIC_{10gauss}$  보다 삼각형 프로파일로 근사한 가상 머리상해지수,  $HIC_{10tri}$ 가 가속도센서에 의한 실제 머리상해지수,  $HIC_{10}$ 과 유사한 것을 확인할 수 있으며 4가지 발사압력에 대한  $HIC_{10}$ 의 비교 결과와 일치한다. 따라서 가속도센서에 의한 충격량 및 머리상해지수를 홀센서에 의한 데이터로 근사하는 과정에서 가속도 프로파일이 가우시안 프로파일보다 삼각형 프로파일과 더 유사하며 삼각형 프로파일로 근사한 충격량 및 머리상해지수의 사용이 타당함을 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 야구장 안전펜스의 성능을 정량적으로 평가하기 위하여 야구선수의 머리가 안전펜스에 충돌하는 것을 모사한 시험기를 설계, 제작하고 충돌 실험을 통해 적정시험압력 선정 및 다양한 충돌 재료에 따른 충격량을 비교 분석하였다. 인체 머리 무게의 약 1/4인 코어가 안전펜스에 충돌할 때의 충격량을 정량적으로 나타내기 위하여 충돌 시 머리상해지수인  $HIC$ 을 사용하였으며 충돌 전후 10 ms 구간의 데이터를 사용하여  $HIC_{10}$ 으로 나타내었다. 유효구간 내의 발사압력에 대한 실험에서 가속도센서에 의한 충격량과 홀센서에 의한 충격량 사이에 0.83의 상관계수가 발생하였으며 적정 발사압력을 3 MPa로 선정하였다. 홀센서에 의한 데이터를 가우시안 프로파일과 삼각형 프로파일로 근사하여 가상의  $HIC_{10}$ 을 계산하고 0.83의 계수를 적용한 결과, 삼각형 프로파일을 사용한 근사가 가우시안 프로파일을 사용한 근사보다 가속도센서에 의한  $HIC_{10}$ 과 일치함을 확인하였다. 또한 충돌벽의 종류에 따른 실험을 통해 가속도센서에 의한 충격량과 홀센서에 의한 가상충격량이 약 0.85의 상관계수로 유효 발사압력 실험에서 얻은 상관계수 0.83과 모든 충돌벽 재질에 대해 거의 일치하는 것을 확인하였으며 가상의  $HIC_{10}$ 을 근사함에 있어 발사압력에 따른 실험과 같이 삼각형 프로파일을 사용하는 것이 가속도센서에 의한  $HIC_{10}$ 과 일치하

였다. 따라서 본 연구에서는 가속도센서를 홀센서로 대체하여 가속도 프로파일 데이터를 분석할 수 있는 야구장 안전펜스 성능평가용 충돌시험기를 설계하고 제작하였으며 데이터의 분석에 있어 홀센서로 측정된 결과를 삼각형 프로파일로 근사하는 방법이 타당하며 다양한 충돌벽 재료에 대해 재현성을 가지는 것을 실험적으로 검증하였다.

## 후기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No.20134030200240)입니다. 또한 부분적으로 (주)씨에이이테크놀러지의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

## References

- [1] Kim, A. R., Cho, W. J., 2012, A Study on Development of Marketing Communication Scale in Professional Baseball, The Korea Journal of Sports Science, 21:5 741-755.
- [2] Lee, J. H., 2012, The Influence of Factors Affecting Decision to Spectate on Spectator Satisfaction and Revisiting Intention in Professional Baseball Games, Korean Journal of Sport Management, 17:3 41-53.
- [3] Kim, y. I., viewed 23 July. 2012, "Fearful fence" Korean outfielders are frightened, <<http://news.sportsseoul.com/read/baseball/1062383.htm>>.
- [4] Moon, h. g., viewed 9 april.2009, Huh and Kim said that the safety fence in korean professional ballpark is dangerous, <[http://joynews.inews24.com/php/news\\_view.php?g\\_menu=702120&g\\_serial=406540](http://joynews.inews24.com/php/news_view.php?g_menu=702120&g_serial=406540)>.
- [5] Channel A, viewed 11 june.2013, The safety fence likes deadly weapons lead to injury of baseball players, <<http://news.ichannela.com/sports/3/05/20130611/55795086/1>>.
- [6] Moon, S. D., viewed 31 may.2013, No more neglecting the dangerous ballpark outfield fence, <[http://sports.news.naver.com/sports/index.nhn?category=kbo&ctg=news&mod=read&office\\_id=003&article\\_id=0005180023](http://sports.news.naver.com/sports/index.nhn?category=kbo&ctg=news&mod=read&office_id=003&article_id=0005180023)>.
- [7] Kim, E. J., viewed 31 may.2013, Players said "change the dangerous ballpark outfield fence to safety", <[http://sports.khan.co.kr/news/sk\\_index.html?cat=view&art\\_id=201305311431093&sec\\_id=510201&pt=nv](http://sports.khan.co.kr/news/sk_index.html?cat=view&art_id=201305311431093&sec_id=510201&pt=nv)>.
- [8] Walker, Jr., L. B., Harris, E. H., Pontius, U. R., 1973, Mass,

Volume, Center of Mass, and Mass Moment of Inertia of Head and Head and Neck of Human Body, SAE Technical Paper, 730985, doi:10.4271/730985.

- [9] Han, M. S., Cho, J. U., 2011, Damage of Car Body and Passenger at Impact Contact, Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20:3 280-283.
- [10] Hutchinson, J., Kaiser, M. J., Lankarani, H. M., 1998, The Head Injury Criterion (HIC) functional, Applied Mathematics and Computation, 96 1-16.
- [11] Henn, H. W., 1998, Crash Tests and the Head Injury Criterion, Teaching Mathematics and Its Applications, 17:4 162-170.