

안전모 충격시험 장치 설계 및 충격 특성 변화 연구

유광호^a, 이철희^{a*}

Design of the Impact Test Device and Evaluation of Impact Characteristics of Safety Helmet

Kwang-Ho Yu^a, Chul-Hee Lee^{a*}^a Department of Mechanical Engineering, Inha University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	5	January	2021
Revised	12	March	2021
Accepted	16	March	2021

Keywords:

Falling speed reduction rate
Impact load reduction rate
Reference angle
Friction
Impact test

ABSTRACT

Safety helmets absorb some of the impact of caused by heavy falling objects to protect the head. During safety helmet impact tests, the changes in the fall speed and impact load are measured and analyzed with different angles. As a result, the average fall speed and impact load reduction of the falling rail when the angle is between 90° and 88° is less than 1.0%. However, the fall speed and impact load reduction exceed 3.0% when the angle of the falling rail is 87.0°. The fall speed and impact load reductions due to the change in rail angle are nearly equal. In particular, when the falling angle deviates more than 3° from 90°, the fall speed and impact load significantly decrease. As this deviation increases, the fall speed and impact load decrease further due to friction on the rail.

1. 서론

충격력은 극히 짧은 시간에 대변형이 일어나게 되고 물체 또는 구조체의 파손현상을 동반하게 된다. 이에 충격력에 대한 부재의 재료적 반응, 구조적 형상에 따른 변형률 예측은 안정성을 평가하는데 매우 중요한 역할을 한다^[1]. 안전모의 기준성능을 시험할 수 있는 안전모 충격시험장치는 자유낙하에 의한 운동에너지를 충격력으로 산정하고 있으나 마찰력 발생에 따른 충격에너지 감소는 고려되고 있지 않으므로 실제 충격력보다 낮게 평가될 우려가 있다. 따라서 안전모 충격시험시 안전모의 안정성 확보와 신뢰성 있는 실험데이터 획득을 위해 안전모 충격시험에 따른 충격에너지와 마찰에 관한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 안전모 충격시험장치의 중력에 의한 자유낙하 방식을 이용하여 안전모에 충격 하중을 발생시켜 안전모를 변형

또는 파손 시킬 수 있는 자유낙하 시험기를 구성하고, 자유낙하에서 발생하는 충격 하중을 측정하는 시험장치를 개발하였다. 또한 자유낙하에 의한 충격에너지와 구속 레일의 마찰저항력에 대한 상관관계를 분석하여 충격에너지 감쇄 영향을 분석하고자 하였다. 이에 본 연구에서는 다음과 같은 방법으로 연구를 진행하였다.

첫째, 운동에너지와 위치에너지의 상관성을 근거로 한 운동량과 충격량 이론을 고찰하였다. 둘째, 안전모 충격시험에 대한 충격에너지를 실측하기 위해 장치를 구성하고 낙하 상태의 실증 경로, 저항 등의 충격에너지의 정도를 파악할 수 있도록 하는 실증 실험을 실시하였다. 셋째, 안전모 충격시험을 하는데 있어 기준 각도(90°)를 설정하고 낙하 레일의 각도를 변경하여 그에 따른 낙하속도 변화와 충격하중을 측정 및 분석하였다. 마지막으로, 안전모 충격시험의 낙하속도, 충격하중과 마찰력의 특성을 분석

* Corresponding author. Tel.: +82-32-860-7311

E-mail address: chulhee@inha.ac.kr (Chul-Hee Lee).

하여 안전모 충격작용에 대한 정량적 지표의 기초자료를 제시하였다.

2. 이론적 배경

2.1 운동량과 충격량 이론

안전모 전달충격력 시험 관련의 이론은 충격추의 자유낙하로 모체 정부에 충격을 가하게 되며 정부의 충격 점에서의 속도는 자유 낙하 운동 관계식을 이용하여 식 (1)과 같이 구할 수 있다^[2].

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2, v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

여기서, m은 질량(kg), g는 중력가속도, h는 높이(m), v는 속도(m/s)이다.

운동량과 충격량 관계로 충격 전후 물체의 운동량의 변화는 물체가 받은 충격량과 같다.^[3] 또한, 힘은 질량과 가속도의 곱으로 다음의 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다^[4].

$$F = ma = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2)$$

여기서, F는 힘(N),

a는 가속도(m/s²), t는 시간(s), 충격량

$F \cdot \Delta t$ (N.s), 운동량 변화: $m \cdot \Delta v$ (kg.m/s)

안전모 충격흡수 성능 시험에서 자유낙하로 충격추가 충돌되어 반발될 때까지의 힘과 시간을 나타내고 있다. Fig. 1은 곡선 밑의 면적이 충격량이며 운동량의 총 변화량과 같다^[5]. 시각 t_i 는 충격추가 안전모를 충격하는 시점으로 시각 t_i 에서 시각 t_p 의 정점까지 곡선 밑의 면적을 변형 충격량이라 하고, 전달충격력 최대 정점까지의 운동량 변화량(ΔP_i)과 같다. 또, 시각 t_p 에서 t_f 까지의 곡선 밑의 면적을 회복충격량이라 하고, 반발 운동량 변화량(ΔP_f)과 같으며, 충격추는 시각 t_f 에서 안전모와 완전히 떨어진다^[6].

변형 충격량과 회복 충격량은 다음 식 (3), 식 (4)과 같이 쓸 수 있다^[7].

$$I_d = \int_{t_i}^{t_p} F \cdot dt = \Delta P_i \quad (3)$$

$$I_r = \int_{t_p}^{t_f} F \cdot dt = \Delta P_f \quad (4)$$

여기서, I_d : 변형충격량, I_r : 회복충격량이다.

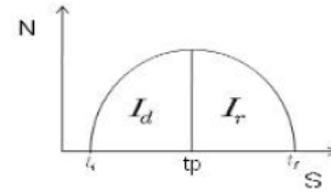


Fig. 1 The amount of deformation impact in the transmission impact of the helmet (I_d) and recovery shock (I_r) curve

이 두 충격량의 비를 반발계수(e, coefficient of restitution)라 하고, 식 (5)과 같이 나타내어지며, 초속도(V_i) 대비 종속도(V_f)로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다^[8].

$$e = \frac{I_r}{I_d} = \frac{\Delta P_f}{\Delta P_i} \quad (5)$$

$$e = V_f / V_i \quad (6)$$

3. 안전모 충격시험 장치 개발

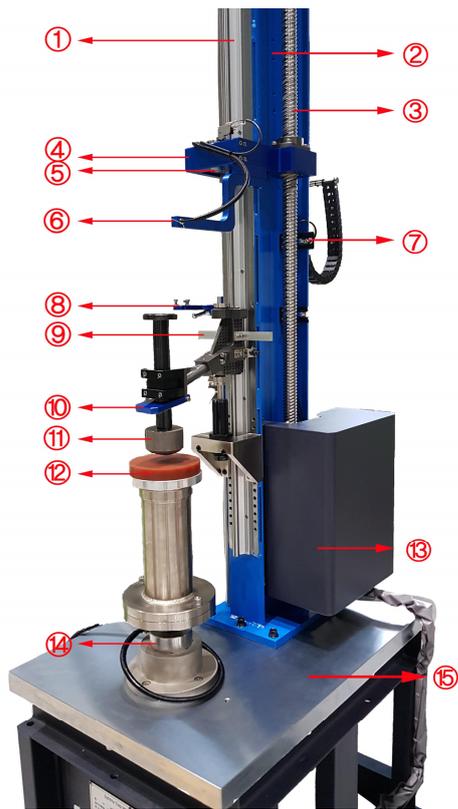
3.1 충격시험장치 제작

안전모 충격시험장치는 기계장치인 하드웨어와 충격량 측정 시스템인 소프트웨어로 구성된다. Fig. 2 기계장치인 하드웨어를 나타낸 것으로 충격시험장치 프레임(지지 틀), 낙하 추(striker), 엘라스토머(고무 경도계), 전자석(낙하 추를 인양하는 장치), 속도센서(낙하 추가 떨어지는 속도를 측정하는 센서), 위치 감지센서(충격추의 헤드를 측정하는 센서), 2중 낙하 방지장치(충격 추가 안전모에 낙하 후 추가적인 낙하를 막기 위하여 설치된 장치) 등으로 구성되어 있다. Fig. 3은 소프트웨어인 충격량 측정 시스템을 나타낸 것으로 낙하고 제어장치, 센서 신호처리장치로 구성되며 이는 각종 제어담당 프로그램으로 낙하높이 및 위치 선정, 충격에너지 산정, 데이터 획득 및 처리를 담당한다.

3.2 충격량 측정 시스템

충격에너지는 로드셀에서 mV/V 단위로 측정되며 측정된 mV/V는 컨트롤앰플를 통해 증폭되게 된다. 이 증폭된 값은 고속 앰플를 통하여 디지털 신호로 변경되어 컴퓨터 프로그램을 통해 실시간 그래프로 표시하게 된다. Fig. 4는 충격량 측정시스템의 구동화면을 나타낸 것으로 속도 데이터는 0.05초 동안 1 kHz 데이터를 저장하여 그래프를 그려 충격에너지 값을 표시한다. 데이터 손실을 막기 위해 National Instruments SCSI Parallel Interface 사용하여 데이터를 저장할 수 있도록 구성하였다. 충격량 측정시스템의 구성 조건은 아래와 같다.

- ① 전달충격력 측정센서(로드셀)는 0~20 kN까지의 힘을 $\pm 0.1\%$



- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| ① Falling rail | ⑨ Speed recognition jig |
| ② Frame | ⑩ Double fall prevention device |
| ③ Ball screw | ⑪ Striker |
| ④ Falling weight lifting device | ⑫ Elastomer |
| ⑤ Electromagnet | ⑬ Servo motor |
| ⑥ Position detection sensor | ⑭ Load cell |
| ⑦ Origin sensor | ⑮ Plate |
| ⑧ Speed sensor | |

Fig. 2 Hard hat impact test device (hardware)

정밀도 측정

- ② 1,000 Hz의 주파수 대역
 - ③ 60 Hz에서 -3 dB 주파수 대역인 저주파 통과 대역필터가 포함되며, 감쇠 시작은 옥타브당 -12 dB 이상⁹⁾
 - ④ 증폭기(amp)는 선형이며 측정범위에서 ±0.1%로 보정
 - ⑤ 공진주파수: 인두와 센서(로드셀), 정반 또는 이를 고정하는 추가 브라켓은 최소 5 kHz 이상의 공진 주파수를 갖도록 제작
 - ⑥ 주파수 응답 : SEA J211b, 채널 등급 1,000에 부합
- A는 낙하 이동 시간, S는 엘라스토머 충격 시간, T는 충격 이후 충격 후 낙하 올림 시간을 말한다.

3.3 속도측정시스템

속도 측정 시스템은 설정된 높이에서 시험 추가 낙하할 때의 속도를 측정하는 장치이다. 본 시스템은 강구(steel ball)가 속도

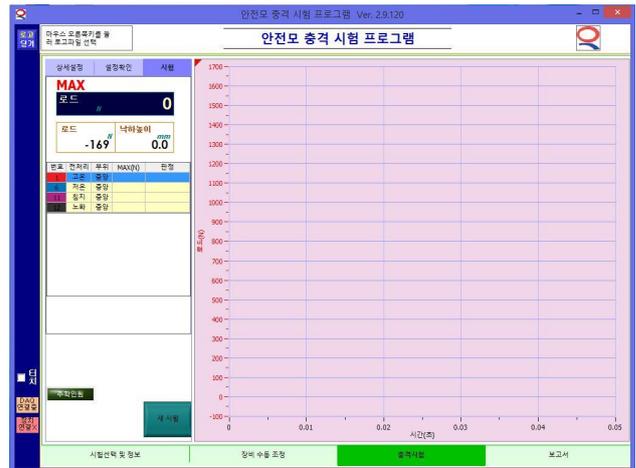
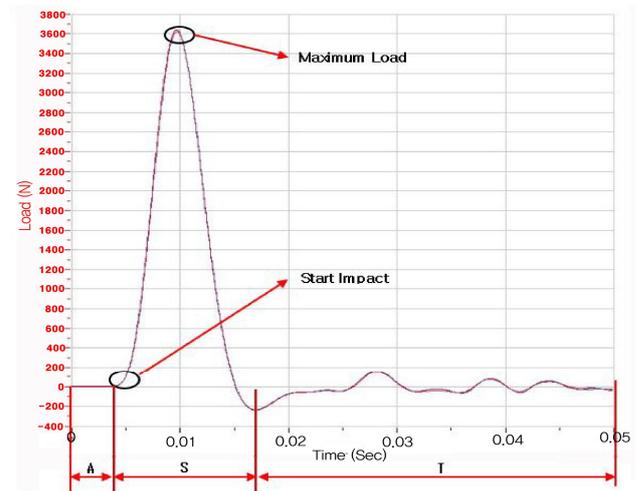


Fig. 3 Impulse measurement system (Test location and display screen)



- A : Fall travel time
- S : Elastomer impact time
- T : Drop ringing time after impact

Fig. 4 Impulse measurement results for evaluating impact energy characteristics

탐지기를 통과거나 탐지기에 의하여 규정된 높이로부터 자유낙하로 낙하될 수 있도록 구성하여 시스템 교정이 가능하도록 하였다.

• 속도 측정 시스템 교정 절차

- ① Ø20 mm 강구를 속도탐지기가 작동되도록 1.0 m 높이로부터 낙하될 수 있도록 하였다.
- ② 강구는 속도탐지기를 적절하게 작동시킬 수 있을 정도의 크기이며, 공기역학적 마찰효과를 무시할 수 있을 정도의 충분한 질량을 가지도록 하였다.
- ③ 속도 측정 시 강구는 최소한 1.0 m의 높이에서 자유낙하 하며 실제 속도(V)는 $V = \sqrt{2gh}$ 와 같은 공식으로 얻을 수 있다¹⁰⁾. 여기서, g는 중력상수이며 h는 낙하 높이이다.

Table 1 Hard hat impact test device impact characteristics test conditions

Parameter	Conditions
Rail angle	90.0° (Reference), 89.5°, 89.0°, 88.0°, 87.0°
Test number	5 for each rail angle
Height	1 m
Impacter weight	3.6 kg
Elastomer	HS A 50~60

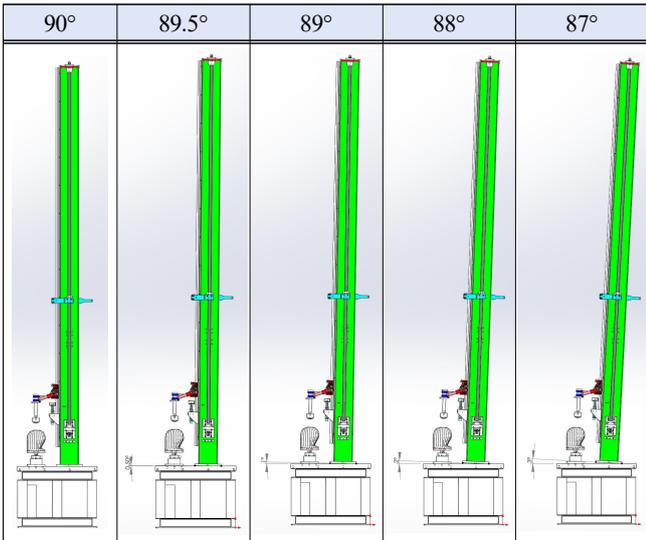


Fig. 5 Tester tilt angles

④ 이 값을 강구의 자유낙하를 통한 측정속도 값과 비교하였을 때 두 값이 1.0% 이내가 되도록 제작하였다.

⑤ 자체교정 서포트 프로그램은 위에 정의된 교정방법 및 절차를 간편하게 수행할 수 있는 S/W를 메인 S/W에 포함시켜 제작하였다.

4. 안전모 충격시험장치의 충격 특성 실험

4.1 실험 개요 및 방법

안전모에 가해지는 충격력 평가시 충격 추가 수직(90°)으로 배치되지 않으면 추(striker)가 자유낙하 하더라도 낙하 레일(h-beam)에서 발생하는 마찰력에 의하여 안전모에 가해지는 충격력은 감소될 수 있다. 본 실험에서는 낙하 레일에서 발생하는 마찰력을 정량적으로 평가하기 위하여 Fig. 5와 같이 다양한 각도에서의 실험을 실시하였다. 따라서 충격시험장치의 레일 각도 변화에 따른 마찰특성과 안전모에 가해지는 충격력 변화를 분석하기 위하여 Table 1과 같이 레일 각도를 90.0°(기준각도), 89.5°, 89.0°, 88.0°, 87.0° 총 5개의 각도로 실험을 수행하였다. 마찰에 의한 영향을 다양하게 분석하기 위하여 기준각도를 중심으로 최소 0.5°, 최대 3.0° 간격으로 분석을 수행하였다. 하나의 각도

Table 2 Rail angle 90.0° experiment results

Test NO.	Velocity (m/s)	Standard deviation	Impact force (N)	Standard deviation
1	4.510	2.573	4,486	0.062
2	4.500		4,483	
3	4.110		4,486	
4	4.530		4,491	
5	4.510		4,494	
Average	4.432		4,488	

당 최소 5회 이상 실험하여 평균치를 적용하였으며 정확한 데이터 산출을 위하여 5/10000초 단위로 측정하여 피크점(peak point)을 획득하였다. 충격 추는 3.6 kg, 실험 높이는 1 m 엘라스토머를 사용하여 실험을 실시하였다.

4.2 레일 각도 변화에 따른 낙하 실험

4.2.1 낙하 충격 실험 결과

1) 레일 각도 90.0°

기준 각도인 레일 각도 90.0°에서 실험을 수행한 결과, Table 2과 같이 엘라스토머를 타격했을 때의 평균속도는 4.432 m/s로 낙하하였으며, 이때 엘라스토머에 가해진 충격하중은 평균 4,488 N이 발생하였다.

2) 레일 각도 89.5°

레일 각도 89.5°에서 실험을 수행한 결과, Table 3와 같이 엘라스토머를 타격했을 때의 평균속도는 4.429 m/s로 낙하하였으며, 이때 엘라스토머에 가해진 충격하중은 평균 4,457 N이 발생하였다.

Table 3 Rail angle 89.5° experiment results

Test NO.	Velocity (m/s)	Standard deviation	Impact force (N)	Standard deviation
1	4.450	0.344	4,485	0.110
2	4.415		4,480	
3	4.460		4,480	
4	4.410		4,482	
5	4.410		4,465	
Average	4.429		4,478	

Table 4 Rail angle 89.0° experiment results

Test NO.	Velocity (m/s)	Standard deviation	Impact force (N)	Standard deviation
1	4.390	0.136	4,455	0.212
2	4.401		4,462	
3	4.398		4,460	
4	4.386		4,425	
5	4.410		4,450	
Average	4.397		4,450	

Table 5 Rail angle 88.0° experiment results

Test NO.	Velocity (m/s)	Standard deviation	Impact force (N)	Standard deviation
1	4.368	0.167	4,395	0.450
2	4.388		4,435	
3	4.390		4,455	
4	4.398		4,475	
5	4.394		4,465	
Average	4.388		4,445	

Table 6 Rail angle 87.0° experiment results

Test NO.	Velocity (m/s)	Standard deviation	Impact force (N)	Standard deviation
1	4.228	0.966	4,386	0.330
2	4.286		4,346	
3	4.368		4,335	
4	4.356		4,348	
5	4.235		4,327	
Average	4.295		4,348	

3) 레일 각도 89.0°

기준 각도인 레일 각도 89.0°에서 실험을 수행한 결과, Table 4과 같이 엘라스토머를 타격했을 때의 평균속도는 4.397 m/s로 낙하 하였으며, 이때 엘라스토머에 가해진 충격하중은 평균 4,450 N이 발생하였다.

4) 레일 각도 88.0°

레일 각도 88.0°에서 실험을 수행한 결과, Table 5와 같이 엘라스토머를 타격했을 때의 평균속도는 4.388 m/s로 낙하하였으며, 이때 엘라스토머에 가해진 충격하중은 평균 4,445 N이 발생하였다.

5) 레일 각도 87.0°

기준 각도인 레일 각도 87.0°에서 실험을 수행한 결과, Table 6와 같이 엘라스토머를 타격했을 때의 평균속도는 4.295 m/s로 낙하하였으며, 이때 엘라스토머에 가해진 충격하중은 평균 4,348 N이 발생하였다.

4.2.2 레일 각도 변화에 따른 낙하 속도 및 충격하중 평가

1) 레일 각도 변화에 따른 낙하 속도 분석

Table 7과 같이 레일 각도별 평균 낙하 속도를 분석한 결과 4.432 m/s~4.295 m/s로 나타났으며 90°~88°까지는 평균 속도 4.432 m/s~4.388 m/s로 1.0% 이하의 속도감소율을 확인할 수 있다. 그러나 87.0°에서는 평균속도 4.295 m/s로 약 3.09%의 속도

Table 7 Average fall speed and reduction rates according to rail angle change

Rail angle (°)	Fall speed (m/s)	Reduction rate (%)
90.0	4.432	-
89.5	4.429	0.07
89.0	4.397	0.79
88.0	4.388	0.99
87.0	4.295	3.09

Table 8 Average drop impact loads and reduction rate according to rail angle change

Rail angle (°)	Impact load (N)	Reduction rate (%)
90.0	4,488	-
89.5	4,478	0.22
89.0	4,450	0.85
88.0	4,445	0.96
87.0	4,348	3.12

감소율을 보였다. 낙하 레일이 기준 각도(90.0°)에서 약 3° 이상 기울기 편차가 발생할 경우, 낙하 레일과 충격 추 사이에서 발생하는 마찰력에 의하여 낙하 속도는 현저하게 낮아지는 결과가 나타났다.

2) 레일 각도 변화 및 마찰력에 따른 충격하중 분석

레일 각도별 평균 충격하중 변화는 Table 8에서 확인할 수 있으며 평균 하중 변화는 4,488 N~4,348 N으로 나타났으며 90°~88°까지는 평균 충격하중 4,488 N~4,445 N으로 1.0% 이하의 충격하중 감소율을 확인할 수 있다. 87.0°에서는 마찰력이 커져 평균 충격하중 4,348 N으로 약 3.12%의 충격하중 감소율을 보였다. 낙하 레일이 기준 각도(90.0°)에서 3° 이상 기울기 편차가 발생할 경우, 낙하 레일과 충격 추 사이에서 발생하는 마찰력에 의하여 낙하 충격하중은 현저하게 낮아지는 결과가 나타났다.

3) 레일 각도 변화에 따른 낙하 속도 및 충격하중 상관관계

추의 높이가 h의 위치 에너지 J이고 mgh는 낙하 추가 충돌면에 도달하였을 때 운동에너지이다. 낙하 추의 90° 이론속도는 4.427 m/s이며 측정속도는 4.432 m/s이다. 90°에서의 속도는 -0.005 m/s의 오차를 나타내었다. Fig. 6과 같이 레일 각도 변화에 따른 낙하속도 감소 및 충격하중 감소가 거의 유사한 경향을 보였으며 특히 낙하레일이 기준각도인 90°에서 3° 이상의 편차가 발생할 경우, 낙하 속도 및 충격하중은 현저하게 낮아지는 결과가 나타났다. 본 실험을 통해 기울기 편차가 커지면 커질수록 낙하 속도 및 충격하중은 감소하며 이는 레일에 발생하는 마찰력에 의한 영향으로 사료된다.

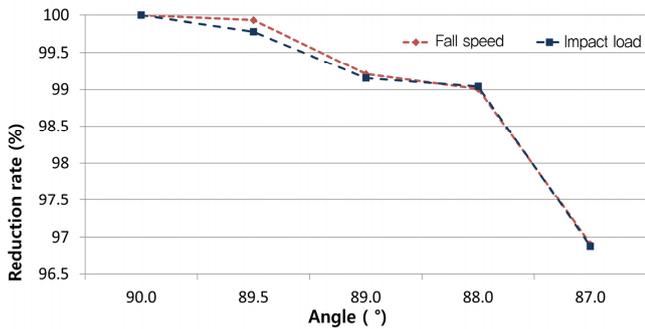


Fig. 6 Relationships between drop speed and impact load according to rail angle change

5. 결론

본 연구에서는 안전모 충격시험장치의 중력에 의한 자유낙하 방식을 이용하여 안전모에 충격 하중을 발생시켜 안전모를 변형 또는 파손시킬 수 있는 자유낙하 시험기를 구성하고, 자유낙하에서 발생하는 충격하중을 측정하는 시험장치를 개발하였다. 안전모 충격시험을 하는데 있어 기준 각도(90°)를 설정하고 낙하 레일의 각도(89.5°, 89°, 88°, 87°)를 변경하여 그에 따른 낙하속도 변화와 충격하중을 측정 및 분석하였다. 그 결과 레일각도 90°~88°의 낙하속도 및 충격하중은 평균 1.0% 이하의 낙하속도 감소율, 충격하중 감소율을 확인할 수 있었다. 그러나 레일각도 87.0°에서는 낙하속도 감소율 및 충격하중 감소율이 약 3.0% 이상의 감소율을 나타냈다.

시험장비에서 90° 실제 측정 속도는 4.432 m/s로 측정되었으며 이론속도와 시험 속도는 -0.005 m/s의 오차가 측정되었다. 특히 낙하레일 기준각도인 90°에서 3° 이상의 편차가 발생할 경우, 낙하 속도 및 충격하중은 현저하게 낮아지는 결과가 나타났다. 본 실험을 통해 기울기 편차가 커지면 커질수록 낙하 속도 및 충격하중은 감소하며 이는 레일에 발생하는 마찰력에 의한 영향으로 사료된다. 본 연구에서 레일 각도에 따른 마찰의 영향을 확인할 수 있으나 특수 베어링과 윤활제가 마찰에 미치는 영향에 대해서는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0012769, 2020년 산업혁신인재성장지원사업).

References

- [1] Ministry of Employment and Labor Notification, 2014, Performance Standard of Safety Helmets for Preventing Risk of Falls and Electric Shock, Section 2 Article 4, Republic of Korea.
- [2] Shin, U., 2011, Analysis of Collision Absorption Test on Safety Helmet, Proc. Korea Saf. Manag. Sci. 2011 Autumn Conf., 93-99.
- [3] Kim, W. B., 2018, A Preliminary Study on Computer Vision Based Safety Helmet Detection in Construction, Masteral Dissertation, Pukyong National University, Republic of Korea.
- [4] Kim, S. H., 2019, A Study on the Application of Epoxy Resin-Based Fiber Reinforced Composite Materials for Industrial Safety Helmet Shell, Doctoral Dissertation, Seoul National University of Science and Technology, Republic of Korea.
- [5] Joo, I. K., 2017, Development of Impulsive Load Measurement System in Free Fall Tester, Masteral Dissertation, Kyungil University, Republic of Korea.
- [6] Yong, G. C., 1991, Theory for Impact Absorption of Industrial Safety Helmet, J. Korean Soc. Saf., 6:2 37-40.
- [7] Jeon, B., Chang, S., Park, K., Kim, N., Jung D., 2011, Seismic Performance Evaluation of a Cone-type Friction Pendulum Bearing System, J. Earthq. Eng. Soc. Korea, 15:2 23-33, <https://doi.org/10.5000/EESK.2011.15.2.023>.
- [8] Kim, C. K., Kim, T. W., 2013, A Study on the Anti-impulsive Strength of the Helmets for a Gas Industry, Journal of the Korean Institute of Gas, 17:6 52-57, <https://doi.org/10.7842/kigas.2013.17.6.52>.
- [9] Kim, M. S., Jung, H. M., Seo, R., Park, I. K., Hwang, Y. S., 2001, Estimation of Allowable Drop Height for Oriental Pears by Impact Tests, Journal of the Korean Society of Agricultural Machinery, 26:5 461-468.
- [10] Kang, S., Kim, J., Seol, G., 2013, Impact Analysis of Freely Falling Cellular Phone, J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng., 22:6 963-968, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2013.22.6.963>.
- [11] Yu, K. H., 2010, Shock Device and Safety Cap Shock Test Machine, KS Patent: 10-0986289-0000.



Kwang-Ho Yu

Graduate Student of the Graduate School of Engineering, Inha University. His research interest is Machine.

E-mail: yukwho@hanmail.net



Chul-Hee Lee

Professor in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. His research interest is Mechanical Engineering.

E-mail: chulhee@inha.ac.kr