A Study on Golf Ball Spin Mechanism at Impact

Woo-Jin Roh and Chong-Won Lee
(2007년 3월 20일 접수; 2007년 4월 24일 심사완료)

Key Words: Contact Time, Contact Force, Impact, Spin, FEM

ABSTRACT

It is important to improve the initial launch conditions of golf ball at impact between golf club and ball to get a long flight distance. The flight distance is greatly influenced by the initial launch conditions such as ball speed, launch angle and back spin rate. It is also important to analyze the mechanism of ball spin to improve the initial conditions of golf ball. Back spin rate is created by the contact time and force. Previous studies showed that the contact force is determined as the resultant force of the reaction forces normal and tangential to the club face at the contact point. The normal force causes the compression and restitution of ball, and the tangential force creates the spin. Especially, the tangential force is known to take either positive or negative values as the ball rolls and slides along the club face during impact. Although the positive and negative tangential forces are known to create and reduce the back spin rate, respectively, the mechanism of ball spin creation has not yet been discussed in detail in the literature. In this paper, the influence of the contact force between golf club and ball is investigated to analyze the mechanism of impact. For this purpose, the contact force and time at impact between golf club head and ball are computed using FEM and compared with previous results. In addition, we investigate the impact phenomenon between golf club head and ball by FEM and clarify the mechanism of ball spin creation accurately, particularly focusing on the effect of negative tangential force on ball spin rate.
Table 1 Inconsistent results on contact forces at impact between ball and club head

<table>
<thead>
<tr>
<th>V(m/s)</th>
<th>$\varphi$ [°]</th>
<th>$F_x[N]$</th>
<th>$F_y[N]$</th>
<th>$\varphi_t[\text{rpm}]$</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>W. Gobush(1)</td>
<td>29</td>
<td>20</td>
<td>8,800</td>
<td>1,300</td>
</tr>
<tr>
<td>P. C. Chou(2)</td>
<td>29</td>
<td>40</td>
<td>6,000</td>
<td>750</td>
</tr>
<tr>
<td>S. Uijishin(3)</td>
<td>46.1</td>
<td>0</td>
<td>13,000</td>
<td>0</td>
</tr>
<tr>
<td>G. Tavares(4)</td>
<td>27.4</td>
<td>0</td>
<td>8,800</td>
<td>0</td>
</tr>
<tr>
<td>S. H. Johnson(5)</td>
<td>42.7</td>
<td>45</td>
<td>11,500</td>
<td>1,400</td>
</tr>
<tr>
<td>A. Hocknell(6)</td>
<td>35.5</td>
<td>10.5</td>
<td>X</td>
<td>X</td>
</tr>
<tr>
<td>A. J. Cochran(7)</td>
<td>48.77</td>
<td>0</td>
<td>16,500</td>
<td>0</td>
</tr>
<tr>
<td>K. Moriyama(8)</td>
<td>34</td>
<td>12</td>
<td>X</td>
<td>700</td>
</tr>
</tbody>
</table>

기존의 많은 논문에서 클럽과 공의 충돌을 실험 및 시뮬레이션을 통해 해석하였다. Table 1을 보면 충돌을 해석한 여러 논문에서 초기 속도 및 로프트 각도에 따른 클럽의 범선방향 윗, 접선방향 윗 및 공의 각속도를 나타내었는데 서로 초기조건이 다르다고 할지라도 평균적으로 다른 결과를 제시하고 있다. 그중 A. Hocknell 과 K. Moriyama의 결과를 보면 초기 속도와 로프트 각도가 비슷한에도 불구하고 공의 각속도 값은 큰 차이를 보였으며 두 방향도 값은 제대로 구해져 있지 않았다. 기존의 충돌을 해석한 여러 논문들에서도 이와 마찬가지로 서로 결과들이 많이 다르고, 또 충돌이 일어날 때 어떤 일이 발생하여 그 과정이 재현되고 과정으로 회전하며 남아가게 되는지 규명되어 있지 않았다. 따라서 이 논문에서는 유한요소해석을 통해서 클럽과 공프공이 충돌할 때를 실제의 비슷하게 묘사하고 이를 통해 충돌 메커니즘을 보다 정확하게 규명하는데 목적이 있다.

2. 충돌 해석을 위한 유한요소모델

2.1 클프 공의 설계

해석에 사용한 공은 가장 많이 사용되는 2피스 공으로 하였고 직경은 42.8 mm의 닫힘없는 공으로 하였다. 실제 공에는 닫힘이 존재하므로 공기 저항을 적게 받아 비교를 늘려주는 효과를 낼다. 그러나 많은 시간의 충돌을 해석 할 때는 큰 차이가 없으므로 닫힘을 무시하고 설계하였다. 공에 사용된 재료는 중심부분은 부터디에 고무 재질로 하고 결 부분은 아이오니 플라스틱 재질로 하였다. 이 재질들은 공프공에 혼히 사용되는 재질로서 공의 질량은 46 g 정도가 된다.

Fig. 1에 나타난 것처럼 설계한 골프공을 유한요소해석을 위해서 여러 개의 육면체 요소로 나누었는데 그 개수는 중심부분은 6,912개, 결 부분은 2,592개로 나뉘었다. 기존의 논문에서 공의 요소를 나눌 때 중심부분과 결 부분 합계 2,000~7,000개 정도로 나누는데 공의 운동을 보다 정확하게 알아보기 위해서 기존의 논문보다는 더 총자리나 나뉘었다. 그리고 공의 아이오니 플라스틱 부분은 선형강성으로, 공 중심의 부터디에 고무 부분은 비선형 강성으로 모형화하였다. 비선형 모델은 이와 같은 비압축성 고무의 거동을 표현하기 위해 사용되는 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였는데 이에 사용한 계수 값은 Hocknell의 논문(6)을 참조하였다.

2.2 클프 클럽의 설계

클럽의 경우 제조사에 따라서 드라이버의 질량과 부피가 서로 다르며 매우 복잡한 형상을 가진다. 이런 복잡한 형상을 유한요소해석했을 경우 해석이 계계적으로 이루어져 지지 않고, 만약 해석이 이루어진다고 하여도 그 결과물을 믿을 수가 없다. 따라서 클럽의 경우는 최대한 정확적으로 값을 적용하면서 해석을 믿을 수 있도록 간단한 형상으로 디자인 하였다. 로프트 각도는 기존 연구결과와의 직접 비교를 위해서 11.5°를 사용하였는데 이는 납성용 드라이버의 경우 비교적 큰 로프트각도의 드라이버에 해당한다. 드라이버의 안은 실제와 같이 비어있는 셀 형태이고 현재 드라이버 유행에 맞추어 최대한 무게중심을 낮추었다. 요소 개수는 3,264개로, 클럽의 재질은 탄타늄으로 질량은 210 g, 질량완성 모멘트 $I_a=1,526$ gcm²로 본질 드라이버 값과 비슷하다.

3. 유한요소해석

3.1 이론적인 충돌 계산

한국소음진동공학회논문집/제 17 권 제 5 호, 2007년/457
유한요소해석에 앞서 동역학적 이론을 바탕으로 충돌관계를 계산해보았다. 이는 Jorgensen이 제시하고 있는데 공이 제격거리는 값을 \( f \)라는 압축상수를 이용하여 나타내었다.

클럽헤드는 단련이 있는 긴 사프트의 끝에 달려 있으며 클럽헤드와 공의 접촉이 일어나는 빠른 시간 동안에는 골프에 의해 클럽헤드가 움직이는 방향으로 이루어진 힘으로 가해지지 않는다고 생각하는 것이 타당하다. 따라서 충돌하는 동안 클럽헤드 방향의 총 운동량은 변하지 않는다고 볼 수 있다. 그림 2에서 나타내듯이 충돌하기 전 클럽헤드의 운동량은 단순히 클럽헤드의 질량 \( M \)과 속도벡터 \( V \)의 곱이며, 그 방향은 클럽헤드의 속도 \( V \)의 방향과 일치한다. 충돌 후 이 방향의 운동량은 두 가지 부분으로 되어 있는데, 그 하나는 클럽헤드의 운동량 \( MW \)이고, 또 하나는 공의 운동량 \( MV \)방향 성분 \( mU \cos \alpha \)이다. 따라서 충돌 전후 이 방향의 운동량이 보존되는 원리에 의하여 다음과 같은 식을 얻을 수가 있다.

\[
MV = MW + mU \cos \alpha
\]

(1)

그림의 속도를 클럽헤드의 수직방향으로 바꾸면 그 크기는 \( V \cos \varphi \)이다. 한편 클럽헤드의 수평방향 속도는 \( V \sin \varphi \)가 된다. 클럽 헤드를 기준으로 움직이는 좌표에서 보면 공은 클럽헤드 면을 따라 움직이게 된다. 즉 이때의 방향이 \( V \sin \varphi \)의 속도로 움직일 것이다. 그러나 클럽의 성분에 따르면 공의 클럽헤드 면을 따라 구르기 시작하며, 속도는 늦어진다. 이때 작은 항은 마찰력에 의한 충격량과 공공의 운동량의 변화량은 서로 같으므로 다음과 같은 수식을 쓸 수 있고,

\[
\int F(t) dt = mv_1 - mv_2
\]

(2)

이로부터 공공의 최종속도를 구할 수 있다. 여기서 \( v_1 \)은 공공의 초기속도이고, \( v_2 \)는 최종속도. 그리고 \( m \)은 공의 질량이다. 공이 구를 때 \( v_2 = R \omega \)가 되는데 \( R \)은 공의 반지름, \( \omega \)는 구를 공의 각속도이다.

마찰력은 \( \int F(t) dt \)와 같이 선운동에 대하여 충격량을 줄 뿐 아니라 회전 운동에 대한 토크 복력량도 주가 되는데 이는 \( \int F(t) R dt \)가 된다. 공이 최종적으로 얻게 되는 각 운동량은 바로 이 토크 복력량과 같다. 따라서 이 두 가지 양이 같으므로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

\[
\int F(t) R dt = 0.4mR^2 \omega = 0.4mRv_2
\]

(3)

여기서 \( 0.4mR^2 \omega \)은 중심축에 대한 공의 회전 관성 모멘트이다. \( R \)은 변형이 없는 상수로 본다면, 식 (2)와 (3)을 풀어서 다음과 같은 식을 얻게 된다.

\[
\int F(t) R dt = R \int F(t) dt = Rm(v_1 - v_2) = 0.4mRv_2
\]

(4)

\[
v_2 = \frac{5}{7} v_1
\]

(5)

속도 \( v_2 \)는 \( v_1 \) 보다 작다. 왜냐하면 공이 충돌하는 동안 마찰력을 작용함으로써 에너지를 잃어 버렸고, 회전 운동으로 에너지가 사용되었기 때문이다. 식 (5)를 이용하면 공공이 클럽헤드와 충돌할 때, 제격거지 않는다는 가정하에 공공이 클럽헤드를 따라 굴러온다는 속도로 계산할 수 있다. 속도에 클럽 헤드의 방향의 속도가 \( V \sin \varphi \)이므로, 공공이 클럽헤드를 떠날 때의 속도는 공공의밀도가 유일하다고 보았을 때 \( \frac{5}{7} V \sin \varphi \)가 된다. 그러나 실제로 많은 공공은 시리는 사정을 보면 공공이 클럽헤드와 충돌할 때, 상당한 정도로 쳐서 졌다공공의 중심으로부터 클럽헤드 면까지의 거리는 원래 공공의 반지름보다 훨씬 작아진다. 이렇게 공공의 반지름을 시간에 따라 변한다면, 토크를 계산하는 식은 다음과 같이 바꾸어 주어야만 한다.

\[
\int F(t) R(t) dt = 0.4mRv_2 = \int F(t) R dt
\]

\[
= R \int F(t) dt = Rm(v_1 - v_2)
\]

(6)

식 (6)에 의하면 공공이 클럽 헤드를 떠날 때,
속도는 $$\frac{5}{7}NV \sin \varphi$$ 가 되며, 여기서 $$f$$ 는 공의 저그려짐으로 해서 생기는 요소를 반영한 것이다. 그리고 머나갈 때의 속도 $$V = R \omega$$는 공이 충돌함 때의 각속도는 다음과 같이 계산된다.

$$\omega = \frac{5f}{7R} V \sin \varphi$$ (7)

정확한 값을 알 수 없지만 Jorgensen은 $$f$$ 값으로 0.7을 계산하고 있다.

3.2 유한요소해석
이를 토대로 LS-DYNA를 이용하여 굴프의 충돌을 유한요소해석 하였다. Fig.3은 유한요소해석 결과로 충격 이후 공의 속도를 나타내는데 이 값은 공의 모든 요소의 속도를 구한 뒤 각 요소의 질량이 모두 다르므로 질량을 고려해 주어 계산하였다. 우선 방향각 $$\alpha$$는 9.8°, 공의 초기 속도는 50.4 m/s, 클립의 충돌 이후 속도는 24.0 m/s이다.

앞서 말한 Jorgensen의 이론으로 반발계수 $$e$$는 0.7, 압축상수 $$f$$는 0.7이라 가정하여 값을 구해보면 $$\alpha$$는 9.97°, 초기 속도는 47.4 m/s가 계산되는데, 이는 유한요소해석으로 구한 값과 약간의 차이를 보인다. 이 차이는 반발계수와 압축상수를 0.7로 고정하여 계산한 결과에서 비롯된 것이다. 하지만 어느 정도 비슷한 경향을 보이며 기존의 다른 논문에서 실현 및 시뮬레이션으로 구한 값과도 상당히 유사한 결과이다.

다음으로 충격이 일어날 때 클립페이스의 범선 방향 $$H_0$$과 접선 방향 $$F_1$$을 구해보았다. $$F_0$$은 공을 클립으로부터 벗어나게 하여 날아가게 하는 힘이고 $$F_1$$은 공이 클립과 떨어 있을 때 역회전을 생성하는 힘이다. Fig.4를 보면 $$F_0$$은 280 µs 부근에서 최대값 6600 N의 힘이 나타난다. 그러나 $$F_1$$를 보면 320 µs 부근에서 음의 방향으로 힘이 생기는 것을 볼 수 있는데, 여기서 음의 방향은 클립과 공이 충돌할 때 공이 미끄러지는 위쪽의 방향이다. 기존의 다른 논문에서는 대부분 $$F_0$$ 만 중요시 여겨 언급하고 있거나 $$F_1$$을 언급할 경우가 무시하고 있다.

충돌할 때 클립에서 공으로 전달되는 힘 $$F_0$$와 $$F_1$$에 대해서 자세히 알아보기 위해서 접촉 부분 요소 분포대로 120 µs마다 힘 $$F_0$$와 $$F_1$$을 구해 보았다. Fig.5에서 나타내었듯이 각 시간 별로 보여지는 부분이 클립공의 접촉부분을 나타낸다. $$F_0$$의 경우 충돌이 일어나기 시작할 때부터 생겨나기 시작하는데 공의 중앙부분이 다른 부분에 비해서 상대적으로 값이 크다. 280 µs 부근에서 최대값이 나타나고 이후에는 점차 감소하는 경향을 보인다. 한편, $$F_1$$의 경우 충돌이 일어나기 시작할 때 접촉 부분의 대부분에서 양의 방향의 힘이 나타난다. 하지만 접촉 초기 분포를 보면 공의 아래 부분은 양의 힘의 분포로 보이지만, 위 부분은 중심부에서 음의 방향 힘의 분포를 나타낸다. 이후 점차적으로 음의 방향 힘이 위 부분 중심을 기점으로 커지기 시작한다. 240 µs에서는 공의 위 부분이 전체적으로 음의 분포로 바뀌었음을 알 수 있다. 이후에는 음의 방향 힘의 분포가 공의 아래 부분으로 내려오는데 아래 부분 중심을 둘러싼

![Fig. 3 Ball and head velocity at impact](image1)

![Fig. 4 Normal and tangential forces](image2)
음의 방향이 생겨나게 된다.

\[ F_n \]와 약화장과의 관계를 알아보기 위해서 공의 클럽페이스 접속방향 속도 \( V_n \)을 구해보았다. 여기서 \( V_n \)은 충돌이 일어날 때 클럽과 공이 모두 움직이므로 클럽 헤드를 기준으로 움직이는 좌표계를 사용하여 공이 클럽페이스 면을 따라 올라가는 속도이다.

![Fig. 6 Tangential force and velocity, and spin rate](image)

\[ F_t \]

Fig. 5 Normal and tangential forces during contact
Fig. 6의 가운데 그래프에서 이 값을 나타내고 있는데, 먼저 처음에 촉돌이 일어나기 시작할 때 값은 7.0 m/s이다. 이는 Jorgensen의 이론에서 공이 클러 kald과 타고 오는 초기각도 $V \sin \phi$ 값과 일치한다. 이후 $V_r$는 점차적으로 감소하다가 320 μs 부분에서 최소값을 가지는데 이 부분은 Fig. 6의 맨 위 그래프에서 보듯이 $F_r$ 값이 양에서 음으로 바뀌는 지점이다. 320 μs 이후 $V_r$는 다시 증가하기 시작한다. 마지막에 빗어나가 직전에는 5.15 m/s의 속도를 가지게 된다.

반면 빗어나가 직전에 공이 미끄러지지 않아 오직 회전으로만 빗어나갔다고 가정을 하면 $v_r = R \omega$를 적용할 수 있으므로 빗어나가 직전의 속도 $v_r$는 5.15 m/s를 사용하여 역회전 값을 구하면 2,298 rpm이 나온다. 하지만 충돌이 일어나는 동안 실시간으로 회전 값을 구해보면 공이 클립을 빗어날 때 2,047 rpm이 나오는데 이는 Fig. 6의 맨 아래 그래프로 나타났다. 실시간 회전 값은 공의 변화하는 무게중심을 기준으로 회전 속도에 수직으로 잔차서 그때 나타난 점별로 변화 값을 계산하여 구하였다. 이것은 이론적으로 구한 값과 비교하기 위해서 식 (7)을 통해 구해보면 2,107 rpm이 나오고 더 값이 상당히 비슷한 것을 알 수 있다. 하지만 마지막 빗어날 때 공의 접선 방향 속도 5.15 m/s를 통해 회전을 계산하면 2,298 rpm이 나왔다. 이 값이 차이를 보이는 이유는 공이 클립을 빗어날 때 순간적 회전만 하면서 빗어나지 않기 때문이다. 대부분 회전하지만 약간의 미끄러짐을 수반하기 때문에 회전 속도가 2,298 rpm까지 올라가지 못하고 2,047 rpm에서 빗어나게 된다. 이 값은 식 (7)에 대입하여 Jorgensen이 제시한 $f_r$ 값을 구해보면 0.92로 나온는데, 이 값은 Jorgensen이 가정한 0.7값과는 상당한 차이를 보인다.

Jorgensen이 가정한 $f_r$ 값과 이 연구에서 계산한 $f_r$ 값의 차이에 대해 좀 더 정확하게 알아보기 위해서 시간에 따라서 변화하는 $R(t)$를 구해 보았다. Fig. 7에 나타내고 있는데, 이 값은 공이 점근하면서 변화하는 무게중심을 고려한 값이다. 공의 9,504개의 요소들의 무게중심을 계산하고 각각 요소들의 질량의 다르므로 그것을 고려해 주어 시간에 따라 변화하는 공의 무게중심을 구하였다. 처음에 반지름 0.0214 m에서 시작하여 점차적으로 줄여들면서 300 μs에서 최소값 0.0164 m가 된다. 이때가 최대로 점근될 경우인데 이는 관공 공 반지름의 23% 정도 점근한 것이다. 이후 $R(t)$값은 다시 증가하기 시작해서 빗어날 때 0.0218 m 정도로 빗어나는데 이는 원래 공의 반지름보다 0.4 mm 늘어난 값이다. 이는 공이 점근되다가 탄성에 의해 다시 펼쳐지면서 더 커지게 된 것이다. 이를 토대로 식 (6)을 이용하여 $f_r$ 값을 구해보았다. 우선 식 (6)을 $f_r$을 사용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\int [F(t) R(t) dt] = 0.4 m R v_r = f' \int [F(t) R(t) dt]$$

$$f' = \frac{\int [F(t) R(t) dt]}{\int F(t) dt}$$

여기서 $F(t)$ 값과 $R(t)$ 값은 Figs. 6, 7에 나타낸 것처럼 알고 있으므로 $f'$를 계산하면 0.8379의 값이 나온다. 식 (5)에 의해서 $f'$와 $f$와의 관계는 다음과 같다.

$$f = \frac{7f'}{5f' + 2}$$

식 (10)을 통해서 $f_r$ 값은 0.9476이 나오게 되는데 이 값 역시 0.7보다는 상당히 크다 할 수 있다. 따라서 이 연구에 의하면 Jorgensen이 제시한 $f_r$ 값이 0.7은 상당히 작다고 할 수 있는데 이는 공이 점근시기의 것인지 이 연구보다 더욱 심한 경우이다.

위에서 살펴본 바와 같이 $f_r$ 값 양이 경우는 공의 회전이 증가하게 되고, 움직일 경우는 공의 회전이 감소하게 되는데 이를 Fig. 6의 그래프로 나타났다. 이것은 Moriyama의 논문(8)에서 간략히 언급했던 내용인데 왜 그런지에 대해서 자세히 알아보았다.
3.3 클럽의 초기 속도, 로프트 각도를 변화시켰을 때 총합 해석

이 연구에서는 총합 초기 속도 35 m/s, 클럽의 로프트 각도 11.5°로 고정하여 해석을 하였는데 이 수치는 앞서 언급했듯이 초보 클럽 총합 35 m/s로 근접하는 값이다. 실제 프로 클럽 사용자도 클럽 초기속도가 50 m/s를 넘으며 미션 위의 경우 50 m/s, 타이거 우즈는 거의 60 m/s에 근접하는 것으로 알려져 있다. 또한 로프트 각도도 8°에서 12°까지 다양하다. 따라서 총합 초기속도 30~60 m/s, 로프트 각도는 8~12°로 변화시키면서 해석하였다. 

Fig. 8에 나타내있는데 클럽 초기 속도를 변화시켰을 때 총합 초기 속도, 공의 최대 속도, 압축상수를 구하였고 로프트 각도를 변화시켰을 때 공의 초기 발사각도, 공의 최대 속도, 압축상수를 알아보았다.

먼저 총합 속도를 변화시켰을 때 끝이 뛰어나가는 속도를 구해보면 최소 43.5 m/s에서 최고 83.7 m/s로 선행적으로 증가하였다. 최진속도 또한 1,783 rpm에서 3,405 rpm으로 선행적으로 증가하였다. 이는 상식적으로 생각했던 범위 내이고 이론적으로 구한 값들에서 크게 벗어나지 않았다. 압축상수를 구해보면 0.953에서 0.922로 줄어들었는데 이는 총합 속도가 빨라질수록 공이 더 쉽게 끝이 뛰어나가며 압축상수가 줄어드는 것이다. 하지만 총합 속도가 60 m/s일 때 공이 최대로 끝이 뛰어나갈 경우인데 이때 압축상수가 0.922로 Jorgensen이 제시한 0.7과는 상당한 차이를 보였다.

다음으로 로프트 각도를 변화시켰을 때 공의 발사 각도를 구해보면 6.8°에서 10.2°로 선행적으로 증가하였고 최진 속도 또한 1,459 rpm에서 2,119 rpm으로, 압축상수는 0.938에서 0.952로 증가하였다. 이 값들은 역시 이론 계산 값에서 크게 벗어나지 않았으며 압축상수 최소값인 0.938로 0.7과는 큰 차이를 보였다.

4. 결론

이 연구의 주된 내용은 유한요소해석을 통하여 클럽 클럽과 공의 충돌을 해석한 것이다. 기존의 여러 논문에서도 이와 같이 해석을 하였는데 결과들이 서로 달리서 이런 기준을 세울 수 없었고, 또한 충돌이 일어나면서 공의 회전을 명확히 구분하기 힘들었던 다. 따라서 본 연구에서는 충돌 초기 총합을 조금 더 정확하게 해석하고 공의 회전 원리로 구분하여 이러한 해석을 바탕으로 여러 가지 상황에서 충돌을 해석하였다.

우선 총합 이후 공의 초기 속도 50.4 m/s, 로프트 각도 11.5°인 경우, 발사 각도는 9.8°가 나왔는데 이는 기존의 다른 논문들의 결과와 비슷한 값이다. 그리고 공이 클럽 헤드를 빛어날 때의 속도가 클럽헤드의 위 방향으로 5.15 m/s로, 만약 빛어날 때 공이 미끄러짐 없이 회전만 한다고 가정하면 이는 2,298 rpm으로 계산한다. 하지만 실제로로 충돌이 일어나는 동안 회전 값은 계산보다 공이 클럽을 빛어날 때 2,047 rpm으로 나온다. 이는 공이 클럽을 빛어날 때 미끄러짐과 회전이 동시에 발생하여 2,298 rpm까지 증가하지 못하고 2,047 rpm으로 빠져나간다고 결론을 내릴 수 있다. 또한 Jorgensen은 공이 충돌할 때 각각은 것을 f라는 압축상수를 사용하여 표현하였는데 그 값으로는 0.7을 가정하였다. 하지만 이 연구에서 0.948값으로 추정되었고 여러 경우의 충돌을 고려했을 때에도 0.92 이상의 값이 나왔다.

이 연구에서는 클럽 혼자 주제를 가지고 이와 같은 결론을 얻어냈는데 이는 전적으로 수학적이고 기계 공학적인 이론과 식에 근거했음에도 불구하고 실재
고프 공의 충돌 시 스핀 생성 원리 연구

와 상당히 비슷한 결과를 도출 하였다. 이는 고프라는 스포츠가 정량적·과학적과 공학적으로 접근할 수 있음을 의미한다. 물론 다른 소프트웨어를 사용하거나 다른 공 또는 클럽을 모델링 할 경우 결과값이 약간씩 다를 수 있었으나 전체적인 충돌 이론과 훈련은 이 연구에서 크게 벗어나지 않으리라 예상된다. 따라서 이와 같은 충돌 해석이 단지 고프로서만 끝나는 것이 아니라 다른 분야에도 충분히 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌


