

골프 공의 충돌 시 스핀 생성 원리 연구

A Study on Golf Ball Spin Mechanism at Impact

노우진† · 이종원*

Woo-Jin Roh, Chong-Won Lee

Key Words : contact time(접촉시간), contact force(접촉력), impact(충돌), spin(회전), FEM(유한요소해석)

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.

1. 서 론

골프 클럽과 공이 충돌 후 공의 초기 속도에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 충돌 전 클럽의 속도이다. 예를 들어서 충돌 전 드라이버의 속도가 35 m/s 일 경우 충돌 후 공의 초기 속도는 대략 50 m/s 인데, 이는 클럽의 속도가 크면 클수록 공의 초기 속도가 커지게 된다. 반면 공의 역회전의 경우 로프트 각도와 클럽의 속도가 가장 큰 영향을 미치는데 로프트 각도와 클럽의 속도가 커질수록 역회전이 더 빨라지게 된다. 정면 충돌의 경우 초기의 클럽 속도와 로프트 각도가 주어지면 충돌이 일어나면서 힘이 클럽에서 공으로 전달되고 그로 인해 공은 상당히 쪼그러지게 된다. 충돌이 일어나는 동안 클럽과 공 사이에 마찰력으로 인해서 공은 클럽 헤드면을 타고 미끄러지다가 역회전을 하면서 클럽을 벗어나게 된다. 이와 같은 과정을 거쳐서 공은 초기의 속도, 발사 각도, 역회전을 가지고 공기 중으로 날아가게 된다. 골퍼들이 공을 타격했을 때 짧은 충돌시간에 이러한 초기 조건들이 생겨나게 되고 이로 인해 공이 클럽을 벗어나 공기 중으로 날아갈 때 여러 가지 복잡한 과정을 거쳐서 공의 궤적과 비거리가 결정된

다.

기존의 많은 논문에서 클럽과 공의 충돌을 여러 가지 방법으로 해석하였다. 하지만 각각의 논문들의 결과에는 상당한 차이가 있었고, 이로 인해 충돌이 일어날 때 어떤 일이 발생하여 골프 공이 쪼그러지고 고속으로 회전하며 날아가게 되는지 명확하게 규명할 수가 없었다. 따라서 본 논문에서는 유한요소해석을 통해서 클럽과 골프 공이 충돌할 때를 실제와 비슷하게 묘사하고 이를 통해 충돌 메커니즘을 보다 정확하게 규명하는데 목적이 있다.

2. 충돌 해석을 위한 유한요소모델

2.1 골프 공의 설계

해석에 사용한 공은 가장 많이 사용되는 2 피스 공으로 하였고 직경은 42.8mm 의 딤플이 없는 공으로 하였다. 실제 공에는 딤플이 존재하는데 이는 공기 저항을 적게 받아 비거리를 늘려주는 효과를 낸다. 그러나 짧은 시간의 충돌을 해석 할 때는 큰 차이가 없으므로 딤플을 무시하고 설계하였다. 공에 사용된 재료는 중심부분은 부타디엔 고무 재질로 하였고 겉 부분은 아이오노머 플라스틱 재질로 하였다. 이 재질들은 골프 공에 흔히 사용되는 재질로서 공의 질량은 46g 정도가 된다.

그림 1 에 나타난 것처럼 설계한 골프 공을 유한요소해석을 위해서 여러 개의 육면체 요소로 나누었는데 그 개수는 중심부분은 6912 개, 겉 부

† 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : seungbusa@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3060, Fax : (042) 869-8220

* 한국과학기술원 기계공학과

분은 2592 개로 나누었다. 기존의 논문에서 공의 요소를 나눌 때 중심부분과 겉 부분 합쳐서 2000~7000 개 정도로 나누는데 공의 운동을 보다 정확하게 알아보기 위해서 기존의 논문보다는 더 촘촘히 나누었다. 그리고 공 겉의 아이오노머 플라스틱 부분은 선형강성으로, 공 중심의 부타디엔 고무 부분은 비선형 강성으로 모형화하였다. 비선형 모델은 이와 같은 비압축성 고무의 거동을 표현하기 위해 사용되는 Mooney-Rivlin 모델을 사용하였는데 이때 사용한 계수 값은 Hocknell의 논문 [1]을 참조하였다.

2.2 골프 클럽의 설계

클럽의 경우 제조사에 따라서 드라이버의 질량과 부피가 서로 다르며 매우 복잡한 형상을 가진다. 이런 복잡한 형상을 유한요소해석했을 경우 해석이 제대로 이루어 지지 않고, 만약 해석이 이루어진다 하여도 그 결과를 믿을 수가 없다. 따라서 클럽의 경우는 최대한 사실적으로 값을 적용하면서 해석을 믿을 수 있도록 간단한 형상으로 디자인 하였다. 로프트 각도는 기존 연구결과와의 직접 비교를 위해서 11.5°를 사용하였는데 이는 남성용 드라이버의 경우 비교적 큰 로프트 각도의 드라이버에 해당한다. 드라이버의 안은 실제와 같이 비어있는 쉘 형태이고 현재 드라이버 유행에 맞추어 최대한 무게중심을 낮추었다. 요소 개수는 3264 개로, 클럽의 재질은 티타늄으로 질량은 210g, 질량관성 모멘트 $I_{zz}=1526 \text{ gcm}^2$ 로 본래 드라이버 값과 비슷하다.

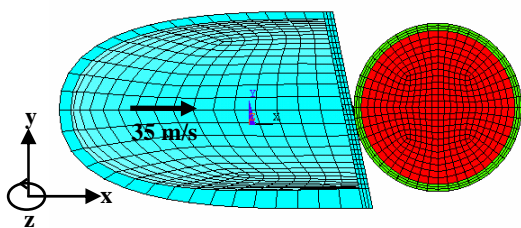


그림 1. 골프 공과 클럽 모델

3. 유한요소해석

3.1 이론적인 충돌 계산[2]

유한요소해석에 앞서 동역학적 이론을 바탕으로 충돌관계를 계산해보았다. 이는 Jorgensen[2]이 제시하고 있는데 공이 찌그러지는 것을 f 라는 압축상수를 이용하여 나타내었다.

클럽헤드는 탄력이 있는 긴 샤프트의 끝에 달려 있으므로 클럽헤드와 공과의 접촉이 일어나는 짧은

시간 동안에는 골퍼에 의해서 클럽헤드가 움직이는 방향으로 아무런 힘도 가해지지 않는다고 생각하는 것이 타당하다. 따라서 충돌하는 동안 클럽헤드 방향의 총 운동량은 변하지 않는다고 볼 수 있다. 그림 2 에서 나타내듯이 충돌하기 전 클럽헤드의 운동량은 단순히 클럽헤드의 질량 M 과 속도벡터 V 와의 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 V 방향 성분 $mU \cos \alpha$ 이다. 따라서 충돌 전후 이 방향의 운동량이 보존된다는 원리에 의하여 다음과 같은 식을 쓸 수가 있다.

$$MV = MW + mU \cos \alpha \quad (1)$$

클럽의 속도를 클럽페이스의 수직방향으로 바꾸면 그 크기는 $V \cos \phi$ 이다. 한편 클럽페이스의 수평방향 속도는 $V \sin \phi$ 이 된다. 클럽 헤드를 기준으로 움직이는 좌표에서 보면 공은 클럽페이스 면을 따라 위로 움직인다. 만일 마찰이 없다면 공은 위쪽으로 계속해서 $V \sin \phi$ 의 속도로 움직일 것이다. 그러나 마찰이 충분히 크다면 공은 클럽페이스 면을 따라 구르기 시작하며, 속도는 늦어진다. 이때 작용하는 마찰력에 의한 충격 량과 골프 공의 운동량의 변화 량은 서로 같으므로 다음과 같은 수식을 쓸 수 있고

$$\int F(t)dt = mv_1 - mv_2 \quad (2)$$

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

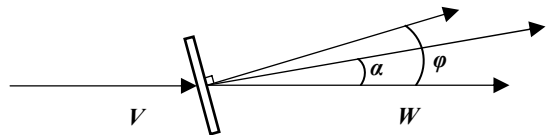


그림 2. 클럽과 공의 충돌 벡터

마찰력은 $\int F(t)dt$ 와 같이 선운동에 대하여 충격 량을 줄 뿐 아니라 회전 운동에 대한 토크 충격 량도 주게 되는데 이는 $\int F(t)Rdt$ 가 된다. 공이 최종적으로 얻게 되는 각 운동량은 바로 이 토크 충격 량과 같다. 따라서 이 두 가지 양이 같으므로 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\int F(t)Rdt = 0.4mR^2\omega = 0.4mRv_2 \quad (3)$$

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

$$\int F(t)Rdt = R \int F(t)dt = Rm(v_1 - v_2) = 0.4mRv_2 \quad (4)$$

$$v_2 = \frac{5}{7}v_1 \quad (5)$$

속도 v_2 는 v_1 보다 작다. 왜냐하면 공이 굴러가는 동안 마찰력이 작용함으로써 에너지를 잃어 버렸고, 회전 운동으로 에너지가 사용되었기 때문이다. 식 (5)를 이용하면 골프 공이 클럽페이스와 충돌할 때, 찌그러지지 않는다는 가정하에 골프 공이 클럽페이스를 따라 굴러 올라가는 속도를 계산할 수 있다. 처음에 클럽 헤드면 방향의 속도가 $V \sin \phi$ 이므로, 골프 공이 클럽페이스를 떠날 때의 속도는 골프 공의 밀도가 균일하다고 보았을 때 $\frac{5}{7}V \sin \phi$ 가 된다. 그러나 실제로 많은 골프

문헌에 실린 사진들을 보면 골프 공이 클럽페이스와 충돌할 때, 상당한 정도로 찌그러져 골프 공의 중심으로부터 클럽페이스 면까지의 거리는 원래 공의 반지름보다 훨씬 작아진다. 이렇게 공의 반지름이 시간에 따라 변한다면, 토크를 계산하는 식은 다음과 같이 바꾸어 주어야만 한다.

$$\int F(t)R(t)dt = 0.4mRv_2 < \int F(t)Rdt = R \int F(t)dt = Rm(v_1 - v_2) \quad (6)$$

식 (6) 에 의하면 골프 공이 클럽 헤드를 떠날 때, 속도는 $\frac{5}{7}fV \sin \phi$ 가 되며, 여기서 f 는 공의 찌그러짐으로 해서 생기는 요소를 반영한 것이다. 그리고 떠나갈 때의 속도 $V=R\omega$ 이므로 공의 각속도는 다음과 같이 계산된다.

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

정확한 값을 알 수 없지만 Jorgensen 은 f 값으로 0.7 을 제시하고 있다.

3.2 유한요소해석

이를 토대로 LS-DYNA 를 이용하여 골프 클럽과 공의 충돌을 유한요소해석 하였다. 그림 3 은 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 발사각도 α 는 9.8° , 공의 초기 속도는 50.4m/s , 클럽의 충돌 이후 속도

는 24.0m/s 이다. 앞서 알아본 Jorgensen 의 이론으로 반발계수 e 를 0.7, 압축상수 f 를 0.7 이라 가정하여 값을 구해보면 α 는 9.97° , 초기 속도는 47.4m/s 가 계산되는데, 이는 유한요소해석으로 구한 값과 약간의 차이를 보인다. 이 차이는 반발계수와 압축상수를 0.7 로 고정하여 계산한 결과에서 비롯된 것이다. 하지만 어느 정도 비슷한 경향을 보이며 기존의 다른 논문에서 실험 및 시뮬레이션으로 구한 값과도 상당히 유사한 결과이다.

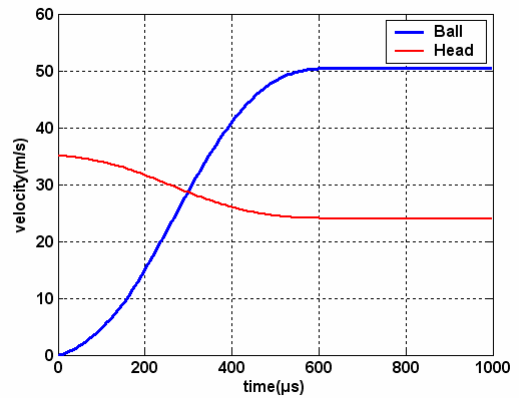


그림 3. 충돌 시 골프 공과 클럽의 속도

다음으로 충격이 일어날 때 클럽페이스의 법선 방향 힘(F_n)과 접선 방향 힘(F_t)을 구해보았다. F_n 은 공을 클럽으로부터 벗어나게 하여 날아가게 하는 힘이고 F_t 는 공이 클럽과 붙어 있을 때 역회전을 생성하는 힘이다. 그림 4 를 보면 F_n 은 $280\mu\text{s}$ 부분에서 최대 값 6600N 의 힘이 나타난다. 그러나 F_t 를 보면 $320\mu\text{s}$ 부분부터 음의 방향으로 힘이 생기는 것을 볼 수 있는데, 여기서 음의 방향은 클럽과 공이 충돌할 때 공이 미끄러지는 위쪽의 방향이다. 기존의 다른 논문에서는 대부분 F_n 만 중요시 여겨 언급하고 있거나 F_t 를 언급할 경우도 음의 방향 힘은 무시하고 있다.

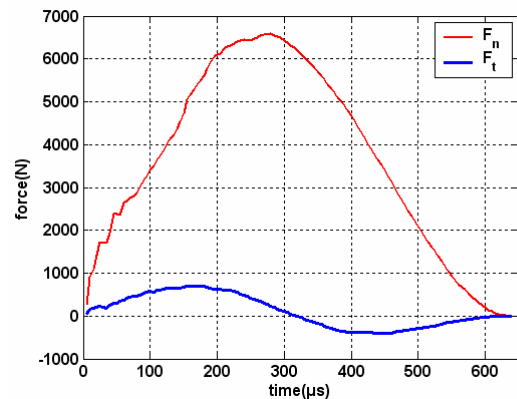


그림 4. 충돌 시 법선 방향 힘과 접선 방향 힘

충돌할 때 클럽에서 공으로 전달되는 힘 F_n 와 F_t 에 대해서 자세히 알아보기 위해서 접촉 부분 요소 분포대로 $120\mu s$ 마다 힘 F_n 와 F_t 를 구해 보았다. 그림 5 에서 나타내었는데 각 시간 별로 보여지는 부분이 골프 공의 접촉 부분을 나타낸다. F_n 의 경우 충돌이 일어나기 시작할 때부터 생겨나기 시작하는데 공의 중앙부분이 다른 부분에 비해서 상대적으로 값이 크다. $280\mu s$ 부분에서 최대값이 나타나고 이후에는 점차 감소하는 경향을 보인다. 한편, F_t 의 경우 충돌이 일어나기 시작할 때 접촉 부분의 대부분에서 양의 방향의 힘이 나타난다. 하지만 접촉 초기 분포를 보면 공의 아래 부분은 양의 힘의 분포를 보이지만, 위 부분은 중심부터 음의 방향 힘의 분포를 나타낸다. 이후 점차적으로 음의 방향 힘이 위 부분 중심을 기점으로 커지기 시작한다. $240\mu s$ 에서는 공의 위 부분이 전체적으로 음의 분포로 바뀌었음을 알 수 있다. 이후에는 음의 방향 힘의 분포가 공의 아래 부분으로 내려오는데 아래 부분 중심을 둘러싸며 주변부터 부호가 바뀌기 시작한다. 그림 4 에서 $320\mu s$ 부터 전체 힘이 음의 방향으로 바뀌는데 그림 5 의 $360\mu s$ 를 보면 확인할 수 있다. 공의 아래 부분의 중심을 제외하고는 대부분 음의 방향 힘이 생겨났으므로 접촉면의 전체 힘을 다 더하면 음의 방향이 된다. 그 이후 접촉 면의 음의 방향 힘 분포가 점점 커지나 그 크기가 점점 작아지면서 0 이 되면 클럽을 벗어난 것이다.

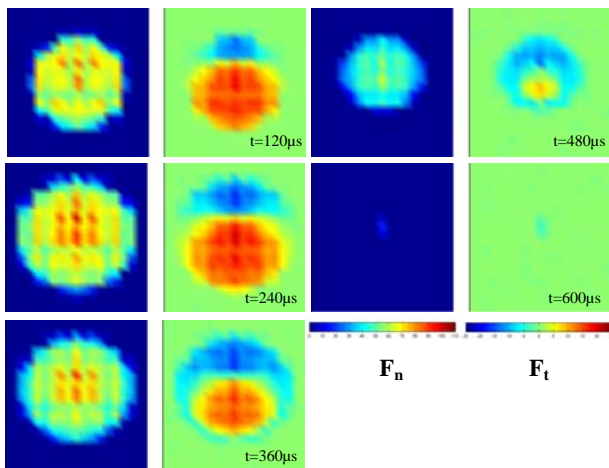


그림 5. 충돌 시 법선 방향 힘과 접선 방향 힘의 시간에 따른 분포

충돌이 일어날 때 공에 음의 방향 힘이 생기는 이유는 골프 공의 탄성으로 인한 회전력 증가 때문이다. 충돌이 일어나 공이 찌그러지면서 회전력이 증가하고 최대로 찌그러졌을 때 회전력이 최대

가 된다. 이후 공은 탄성에 의해서 다시 퍼지려고 하는데 그때 공은 회전력 증가로 인해서 클럽 헤드 면을 깎듯이 반대방향으로 힘이 생기게 된다. 찌그러진 힘의 크기가 크면 클수록 퍼지는 시간이 오래 걸리고 작으면 작을수록 빨리 퍼진다. 클럽 헤드의 로프트 각도 때문에 공과 접촉할 때 무게 중심을 기준으로 아래 부분에 상대적으로 큰 변형이 일어나고, 반면 위 부분은 상대적으로 작은 변형이 일어난다. 따라서 공의 위 부분부터 퍼지려는 힘이 생기고 점차적으로 아래 부분으로 확대된다. 이 힘에 의해서 F_t 의 음의 방향이 생겨나게 된다.

F_t 와 역회전과의 관계를 알아보기 위해서 공의 클럽페이스 접선방향 속도 (V_t) 를 구해보았다. 여기서 V_t 는 충돌이 일어날 때 클럽과 공이 모두 움직이므로 클럽 헤드를 기준으로 움직이는 좌표계를 사용하여 공이 클럽페이스 면을 따라 올라가는 속도이다. 그림 6 의 가운데 그래프에 이 값을 나타내고 있는데 먼저 처음에 충돌이 일어나기 시작할 때 값은 $7.0m/s$ 이다. 이는 Jorgensen 의 이론에서 공이 클럽페이스를 타고 오르는 초기속도 $V \sin \phi$ 값과 일치한다. 이후 V_t 는 점차적으로 감소하다가 $320\mu s$ 부분에서 최소값을 가지는데 이 부분은 그림 6 의 맨 위 그래프에서 보듯이 F_t 값이 양에서 음으로 바뀌는 지점이다. $320\mu s$ 이후 V_t 는 다시 증가하기 시작하다 마지막에 벗어나기 직전에는 $5.15m/s$ 의 속도를 가지게 된다.

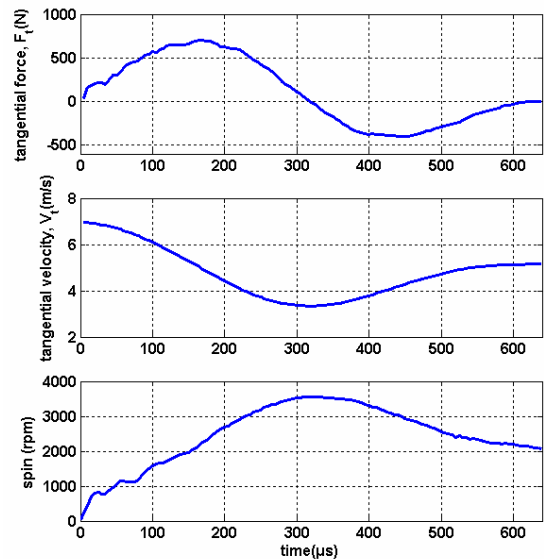


그림 6. 시간에 따른 접선 방향 힘, 접선 방향 속도, 공의 회전 값

만약 벗어나기 직전에 공이 미끄러짐 없이 오직

회전으로만 벗어난다고 가정을 하면 $v_2=R\omega$ 을 적용할 수 있으므로 벗어나기 직전의 속도 $v_2=5.15\text{m/s}$ 를 사용하여 역회전 값을 구하면 2298rpm 이 나온다. 하지만 충돌이 일어나는 동안 실시간으로 회전 값을 구해보면 공이 클럽을 벗어날 때 2047rpm 이 나오는데 이는 그림 6 의 맨 아래 그래프로 나타내었다. 실시간 회전 값은 공의 변화하는 무게중심을 기준으로 회전 축에 수직으로 잘라서 그때 나타난 질점들의 변화 값을 계산하여 구하였다. 이 값을 이론 식으로 구한 값과 비교하기 위해서 식 (7)을 통해 구해보면 2107rpm 이 나오고 두 값이 상당히 비슷한 것을 알 수 있다. 하지만 마지막 벗어날 때 공의 접선 방향 속도 5.15m/s 를 통해 회전을 계산하면 2298rpm 이 나왔다. 이 값이 차이를 보이는 이유는 공이 클럽을 벗어날 때 순전히 회전만 하면서 벗어나지 않기 때문이다. 대부분 회전하지만 약간의 미끄러짐을 수반하기 때문에 회전 속도가 2298rpm 까지 올라가지 못하고 2047rpm 에서 벗어나게 된다. 이 값을 식 (7)에 대입하여 Jorgensen 이 제시한 f 값을 구해보면 0.92 로 나오는데, 이 값은 Jorgensen 이 가정한 0.7 과는 상당한 차이를 보인다.

Jorgensen 이 가정한 f 값과 본 연구에서 계산한 f 값의 차이에 대해 좀 더 정확하게 알아보기 위해서 시간에 따라서 변화하는 $R(t)$ 를 구해 보았다. 그림 7 에 나타내고 있는데, 이 값은 공이 찌그러지면서 변화하는 무게중심을 고려한 값이다. 공의 9504 개의 요소들의 무게중심을 계산하고 각각 요소들의 질량이 다르므로 그것을 고려해 주어 시간에 따라 변화하는 공의 무게중심을 구하였다. 처음에 반지름 0.0214m 에서 시작하여 점차적으로 줄어들어서 300 μs 에서 최소값 0.0164m 가 된다. 이때가 최대로 찌그러졌을 경우인데 이는 골프 공 반지름의 23% 정도 찌그러진 것이다. 이후 $R(t)$ 값은 다시 증가하기 시작해서 벗어날 때는 0.0218m 정도로 벗어나는데 이는 원래 공의 반지름 보다 0.4mm 늘어난 값이다. 이는 공이 찌그러졌다가 탄성에 의해 다시 퍼지면서 더 커지게 된 것이다. 이를 토대로 식 (6)을 이용하여 f 값을 구해 보았다. 우선 식 (6)을 f' 을 사용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\int F(t)R(t)dt = 0.4mRv_2 = f' \int F(t)Rdt = f'R \int F(t)dt = f'Rm(v_1 - v_2) \quad (8)$$

$$f' = \frac{\int F(t)R(t)dt}{R \int F(t)dt} \quad (9)$$

여기서 $F(t)$ 값과 $R(t)$ 값은 그림 6, 7 에 나타난 것처럼 알고 있으므로 f' 을 계산하면 0.8379 의 값이 나온다. 식 (5)에 의해서 f' 과 f 와의 관계는 다음과 같다.

$$v_2 = \frac{f'}{0.4 + f'} v_1 = \frac{5f'}{5f' + 2} v_1 = \frac{5}{7} f v_1 \quad (10)$$

$$f = \frac{7f'}{5f' + 2} \quad (11)$$

식 (11)를 통해서 f 값은 0.9476 이 나오게 되는데 이 값 역시 0.7 보다는 상당히 크다 할 수 있다. 따라서 본 연구에 의하면 Jorgensen 이 제시한 f 값 0.7 은 상당히 작다고 할 수 있는데 이는 공이 찌그러지는 것이 본 연구보다 더욱 심한 경우이다.

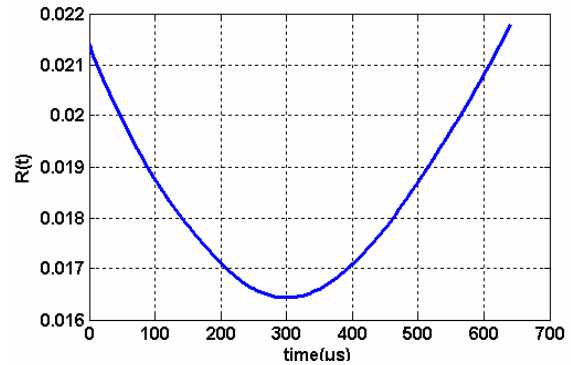


그림 7. 충돌 시 공의 반지름 변화

위에서 살펴본 바와 같이 F_t 값 양일 경우는 공의 회전이 증가하게 되고, 음일 경우는 공의 회전이 감소하게 되는데 이를 그림 6 의 그래프로 나타내었다. 이것은 Moriyama 의 논문[4]에서 간략히 언급했던 내용인데 왜 그런지에 대해서 자세히 알아보았다.

3.3 클럽의 초기 속도, 로프트 각도를 변화시켰을 때 충돌 해석

본 연구에서는 충돌 초기 속도 35m/s, 클럽의 로프트 각도 11.5°로 고정하여서 해석을 하였는데 이 수치는 앞서 언급했듯이 초보 골퍼 혹은 여자 골퍼들에게 해당되는 값이다. 실제 프로 골퍼들은 클럽 초기속도가 50m/s 를 넘으며 미셸 위의 경우 50m/s, 타이거 우즈는 거의 60m/s 에 근접하는 것으로 알려져 있다. 또한 로프트 각도도 8°에서 12°까지 다양하다. 따라서 충돌 초기속도를 30~60m/s, 로프트 각도는 8~12°로 변화시키면서 해석하였다. 그림 8 에 나타내었는데 클럽 초기 속도를 변화시켰을 때 공의 초기 속도, 공의 회전 속도, 압축상수를 구하였고 로프트 각도를 변화시

켰을 때 공의 초기 발사각도, 공의 회전 속도, 압축상수를 알아보았다.

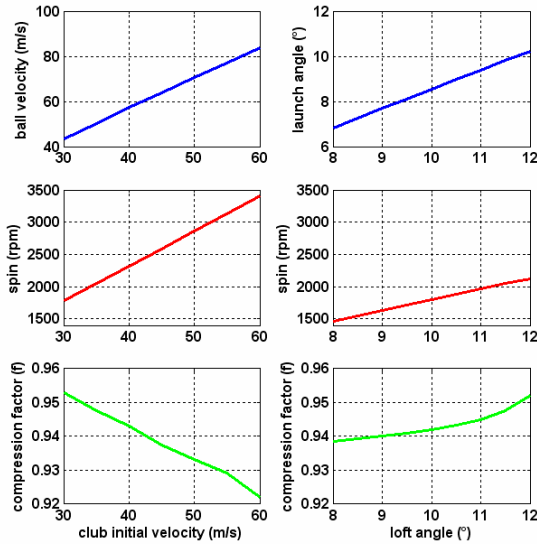


그림 8. 클럽의 충돌 속도와 로프트 각도를 변화시켰을 때 공의 속도, 회전 량 및 f 값 변화

먼저 충돌 속도를 변화시켰을 때 공이 튀어나가는 속도를 구해보면 최소 43.5m/s 에서 최고 83.7 m/s 로 선형적으로 증가하였다. 회전속도 또한 1783rpm 에서 3405rpm 으로 선형적으로 증가하였다. 이는 상식적으로 생각했던 범위 내이고 이론적으로 구한 값들에서 크게 벗어나지 않았다. 압축상수를 구해보면 0.953 에서 0.922 로 줄어들었는데 이는 충돌 속도가 빠를수록 공이 더 심하게 찌그러지므로 압축상수가 줄어드는 것이다. 하지만 충돌 속도가 60m/s 일 때 공이 최대로 찌그러졌을 경우인데 이때 압축상수가 0.922 로 Jorgensen 이 제시한 0.7 과는 상당한 차이를 보였다.

다음으로 로프트 각도를 변화시켰을 때 공의 발사 각도를 구해보면 6.8°에서 10.2°로 선형적으로 증가하였고 회전 속도 또한 1459rpm 에서 2119rpm 으로, 압축상수는 0.938 에서 0.952 로 증가하였다. 이 값들 역시 이론 계산 값에서 크게 벗어나지 않았으며 압축상수 최소값 또한 0.938 로 0.7 과는 큰 차이를 보였다.

4. 결론

본 연구의 주된 내용은 유한요소해석을 통하여 골프 클럽과 공의 충돌을 해석하는데 기존의 여러 논문에서는 살펴보지 못했던 방향으로 좀더 정확히 해석하고자 하였다. 그리고 이러한 이론을 바탕으로 여러 가지 상황에서 충돌을 해석 하였다.

우선 충돌 이후 공의 초기 속도 50.4m/s, 로프트 각도 11.5° 인 경우, 발사 각도는 9.8 도가 나왔는데 이는 기존의 다른 논문들의 결과와 비슷한 값이다. 그리고 공이 클럽 헤드를 벗어날 때의 속도가 클럽페이스의 위 방향으로 5.15m/s 로, 만약 벗어날 때 공이 미끄러짐 없이 회전만 한다고 가정하면 이는 2298rpm 으로 계산된다. 하지만 실시간으로 충돌이 일어나는 동안 회전 값을 계산하면 공이 클럽을 벗어날 때 2047rpm 이 나온다. 이는 공이 클럽을 벗어날 때 미끄러짐과 회전이 동시에 발생하여 2298rpm 까지 증가하지 못하고 2047rpm 으로 벗어난다고 결론을 내릴 수 있다. 또한 Jorgensen 은 공이 충돌할 때 찌그러지는 것을 f 라는 압축상수를 사용하여 표현하였는데 그 값으로는 0.7 을 가정하였다. 하지만 본 연구에서 0.948 값으로 추정되었고 여러 경우의 충돌을 고려했을 때에도 0.92 이상의 값이 나왔다.

본 연구에서는 골프라는 주제를 가지고 이와 같은 결론을 얻어냈는데 이는 전적으로 수학적이고 기계공학적인 이론과 식에 근거했음에도 불구하고 실제와 상당히 비슷한 결과를 도출 하였다. 이는 골프라는 스포츠가 굉장히 과학적이고 공학적으로 접근할 수 있음을 의미한다. 물론 다른 소프트웨어를 사용하거나 다른 공 또는 클럽을 모델링 할 경우 결과값이 약간씩 다를 수 있겠으나 전체적인 충돌 이론과 흐름은 본 연구에서 크게 벗어나지 않으리라 예상된다. 따라서 이와 같은 충돌 해석이 단지 골프로서만 끝나는 것이 아니라 다른 분야에도 충분히 적용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) A. Hocknell, R. Jones and S. J. Rothberg, 1998, "Computational and Experimental Analysis of the Golf Impact", Science and Golf III, Proceedings of the World Scientific Congress of Golf, pp. 526-534.
- (2) T. P. Jorgensen, 1994, The Physics of Golf, American Institute of Physics.
- (3) A. R. Penner, 2001, "The Physics of Golf: The Optimum Loft of a Driver", American journal of physics, Vol.69 (5), pp. 563-568.
- (4) K. Moriyama, T. Yamaguchi, M. Yabu, M. Tsunoda, 2004, "The Influence of Mechanical Impedance of the Golf Club and the Golf Ball on Ball Spin", The engineering of sport 5, Vol.1, pp. 337-343.
- (5) P. C. Chou, D. Liang, J. Yang, 1994, "Contact Forces, Coefficient of Restitution, and Spin Rate of Golf Ball Impact", Science and Golf II, Proceedings of the World Scientific Congress of Golf, pp. 296-301.