

선 충격량과 공의 회전 속도와의 상관관계

Correlation between the Linear Impulse and Ball Spin Rate

노우진* · 이종원*

Woo-Jin Roh and Chong-Won Lee

(2007년 9월 27일 접수 ; 2007년 10월 18일 심사완료)

Key Words : Back Spin Rate(역회전속도), Impact(충돌), Contact Force(접촉력), Tangential Force(접선력), Linear Impulse(선충격량)

ABSTRACT

Golf ball spin rate after impact with club is created by the contact force, which is greatly influenced by ball and club mass, material, impact speed, and club loft angle. 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 the ball, and the tangential force creates the spin. Especially, the tangential force takes 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. It is shown in this work that the linear impulse of the tangential force is directly related to generation of back spin rate of golf ball. The linear impulse can be calculated from the tangential force, which depends upon many factors such as ball and club mass, material, impact speed, and club loft angle. In this research, 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 the contact time at impact between golf club head and ball are computed using FEM.

1. 서 론

골프 클럽으로 공을 타격할 때 약 400~600 μ s 정도의 굉장히 짧은 시간 동안 충돌이 발생하는데 이로 인해서 골프 공은 약 2,000~10,000 rpm 정도의 회전 속도로 공기 중을 날아가게 된다. 이전 논문⁽¹⁾에서 밝혔듯이 골프 공을 공기 중에서 날아가게 하는 힘은 클럽에서 법선 방향의 힘(F_n)이 고회전하게 하는 힘은 접선방향의 힘(F_t)인데 이를 Fig. 1에서 나타내었다.

공의 회전에 영향을 미치는 접선 방향의 힘(F_t)을 유한요소해석을 통해서 구하면 Fig. 2와 같이 나타나는데 처음에는 클럽헤드면의 아랫방향으로 향하는 양의 접선힘이 나타나지만 그 이후에는 반대방향인 음의 접선힘이 나타나게 된다. 여기서 양의 방향힘은 공의 회전을 증가시키고 음의 방향 힘은 공의 회전을 감소시킨다고 이전논문에서 밝혔다⁽¹⁾.

앞서 언급했듯이 충돌 이후 공의 회전에 직접적인 영향을 미치는 힘은 Fig. 2에서 나타낸 접선 방향의 힘인데 이 값은 초기 충돌 속도, 로프트 각도, 클럽 및 공의 질량, 공의 재질 등 여러 가지 조건에 의해서 달라 질 수 있다. 다시 말해서 회전에 영향을 미치는 여러 가지 조건들로부터 Fig. 2와 같은 접선 방

† 교신저자: 정희원 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : seungbusa@kaist.ac.kr
Tel: (042)869-3060, Fax: (051)869-8220
* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

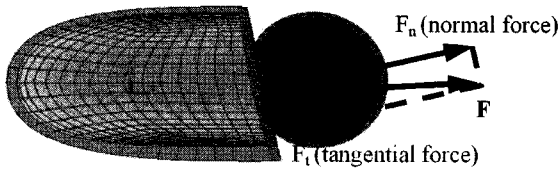


Fig. 1 Golf club head and ball models at impact

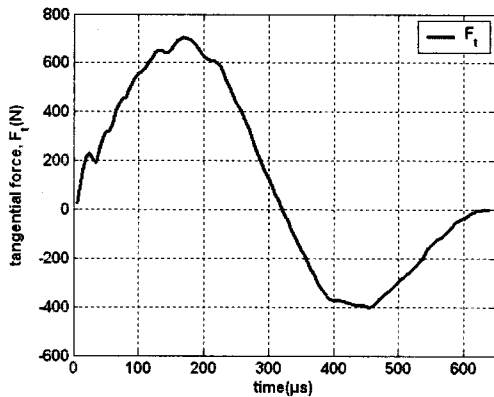


Fig. 2 Tangential force

향 힘이 생겨나게 되고 이 힘을 받아 공이 충돌 이후 고속으로 회전하게 되는 것이다. 따라서 Fig. 2와 같은 접선 방향 힘만 구할 수 있다면 다른 복잡한 여러 가지 조건 생각할 필요 없이 공의 회전 속도를 구할 수 있는데 이는 선 충격량이라는 값으로 표현될 수 있다. 이 논문의 목적은 이와 같은 선 충격량과 충돌 이후 공의 회전과의 상관관계를 규명하는데 목적이 있다.

2. 선 충격량

2.1 이론적 접근

클럽과 공의 충돌이 일어날 때 공이 클럽에 닿았을 때부터 클럽을 벗어날 때 까지를 간략히 살펴보면 Fig. 3과 같다. 클럽이 반지름 R, 질량 m인 공과 V라는 속도로 충돌하고 이로 인해 공은 초기 속도 v_1 으로 클럽을 따라 위로 미끄러지고 최종적으로 벗어나기 직전에는 v_2 의 속도로 클럽을 벗어난다. 이 과정에서 접선 방향 힘(F_t)이 생겨나게 되고 공은 회전(ω) 하게 된다. 여기서 ϕ 는 클럽의 로프트 각도이다.

이를 마찰에 의한 충격량과 선 운동량에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

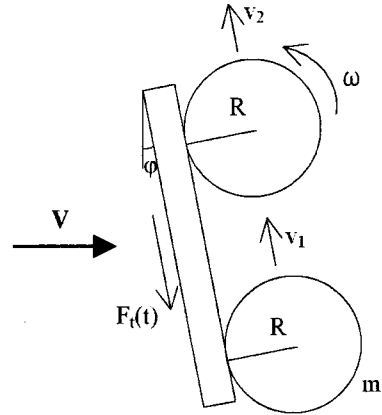


Fig. 3 The impact of club and ball

$$\int F(t)dt = mv_1 - mv_2 \quad (1)$$

공의 최종 속도(v_2) 및 회전속도(ω)는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있는데 Jorgensen⁽²⁾은 충돌 시 공이 찌그러지는 효과를 f 라는 압축상수를 이용하여 표현하였다.

$$v_2 = \frac{5}{7}fv_1 \quad (2)$$

$$\omega = \left(\frac{5f}{7R}\right)V \sin \phi \quad (3)$$

위의 식(1)~(3)을 이용하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$-\int F(t)dt = m(v_2 - v_1) = mv_2 \left(1 - \frac{1}{\left(\frac{5f}{7}\right)}\right) \quad (4)$$

$$f = \frac{7}{5} \left(1 - \frac{\int F(t)dt}{mV \sin \phi}\right) \quad (5)$$

$$\omega = \frac{1}{R} \left(V \sin \phi - \frac{\int F(t)dt}{m}\right) \quad (6)$$

식(6)을 살펴보면 공의 회전 속도를 구하는데 압축상수(f)와는 상관없이 초기 값과 선 충격량만 알면 구할 수 있다.

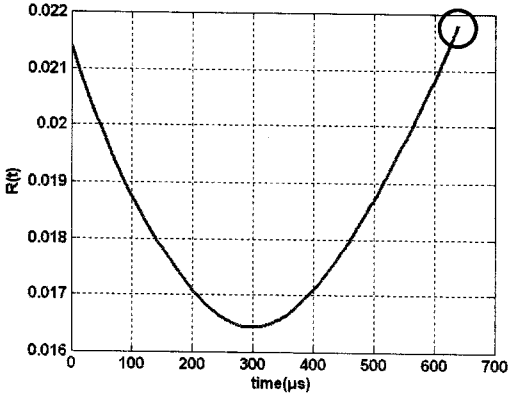


Fig. 4 Effective radius of deformed ball at impact

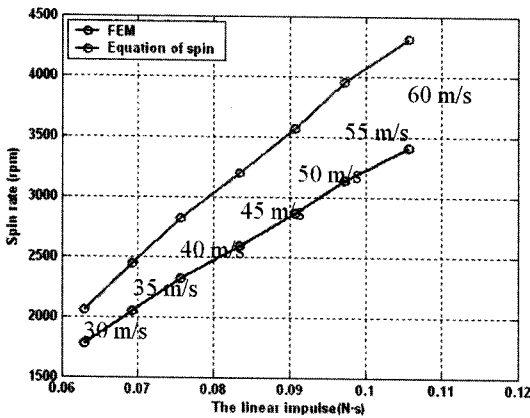


Fig. 5 Spin rate vs. impact velocity ($\phi=11.5^\circ$)

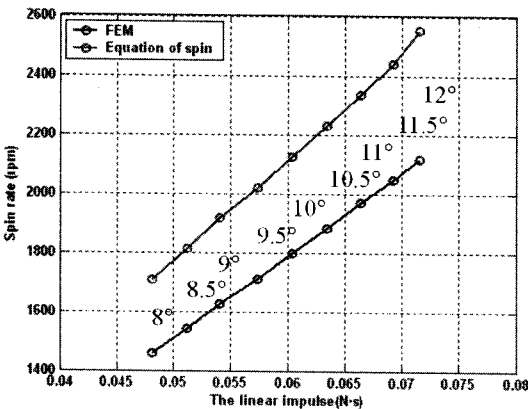


Fig. 6 Spin rate vs. loft angle ($V=35\text{ m/s}$)

2.2 이론 결과 값과 FEM 해석 결과 비교

식 (6)에서 구한 회전 이론 식과 기존에 연구에서 구한 FEM 해석 결과를 비교해 보았다. 공의 질량은 0.046kg, 반지름은 0.0214 m, 클럽의 로프트 각도

는 11.5° , 충돌속도는 35 m/s의 값을 사용하였다. FEM 해석을 통해서 접선 방향 힘의 값을 알 수 있으므로 선 충격량, $\int F(t)dt$ 을 구하면 0.0693 N·s가 나오고 이를 식 (6)에 대입하여 공의 회전 속도를 구하면 2,441 rpm이 나온다. 한편 기존의 연구에서 FEM을 사용하여 공의 회전 속도를 구하면 2,047 rpm⁽¹⁾이 나오는데 두 값은 20% 정도의 오차를 가진다. 오차가 발생하는 이유 중 하나는 식 (6)을 유도하는 과정에서 공의 접선 방향 최종속도를 $v_2 = R\omega$ 와 같은 식으로 가정했는데 FEM 해석 결과나 실제 충격현상을 살펴보면 Fig. 4처럼 벗어나기 직전반지름 값은 공이 찌그러졌다가 부풀어 오르면서 원래 반지름보다 더 커지게 된다. 따라서 이와 같은 오차가 생기게 되는 것이다.

충돌 속도 및 클럽의 로프트 각도가 변할 때 선 충격량에 따른 회전 속도를 Fig. 5, 6에서 나타내었다. 충돌 속도가 클수록, 그리고 클럽의 로프트 각도가 클수록 선 충격량이 크고 그로 인해서 공의 회전 속도도 큰 것을 볼 수 있다. 또한 이론 결과 값과 FEM 해석 값을 비교하였는데 대체적으로 이론 결과 값의 회전 속도가 20% 정도 크게 나온 것을 알 수 있다. 하지만 두 값이 비슷한 경향을 보이고 있고 식 (6)을 사용하여 공의 회전을 예측해 본다는 측면에서 의미가 있다고 하겠다.

3. 공의 재질에 따른 선 충격량과 공의 회전 속도와의 상관관계

3.1 공의 재질에 따른 회전 속도 변화

앞서 살펴 보았듯이 식 (6)을 통해서 구한 공의 회전 속도는 FEM해석 결과와 비교해서 어느 정도 신뢰를 갖는다. 하지만 식 (6)을 자세히 들여다보면 회전 속도는 선 충격량과 반대로 변하게 된다. 다시 말해서 $\int F(t)dt$ 값이 클수록 회전속도는 작아지게 되고 반대로 작을수록 회전속도는 커지게 된다. 그러나 앞서 언급했듯이 기존의 연구에서 양의 접선방향 힘이 회전을 증가시키고 음의 접선방향힘이 회전을 감소시킨다고 하였으므로 이 결과는 완전반대의 결과를 보이고 있다.

그럼에도 2절에서처럼 비슷한 값과 경향을 보이는 이유는 식 (6)에서 선 충격량 외에 다른 초기 값들이

회전 속도에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 예를 들어서 충돌 속도가 커지면 선 충격량이 커져서 식 (6)에서 더 작은 회전 속도가 나올 것 같지만 앞의 V 값 역시 증가하기 때문에 더 큰 회전 속도가 나올 수 있는 것이다. 로프트 각도가 변할 때도 마찬가지이다. 그렇다면 충돌 초기조건들은 모두 일정한 상태에서 공의 재질을 변화시켜 회전 속도를 계산할 경우에 대해서 알아보자. 우선 K. Tanaka⁽³⁾의 연구에서 골프 공 안의 고무 부분은 단단할수록 회전이 증가하고 부드러울수록 회전이 감소하는 경향을 보인다. 하지만 골프 공 겉의 플라스틱 중합체 부분은 반대로 단단할수록 회전이 감소하고 부드러울수록 회전이 증가하는 경향을 보인다, FEM 해석을 통해 공의 속과 겉의 재질을 변화시켜 가면서 선 충격량을 구하고 식 (6)을 이용한 이론 결과와 FEM 해석 결과를 Fig. 7에서 비교하였다.

우선 Fig. 7의 두 그래프를 살펴보면 좌측의 공의 속 부분 재질이 단단해 질수록 선 충격량이 증가하

는 것을 볼 수 있고 공의 겉 부분은 이와 반대로 재질이 단단해 질수록 선 충격량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 이 값을 토대로 공의 회전 속도를 구한 것이 Fig. 7의 아래 그래프 인데 식 (6)을 이용한 이론 값과 FEM 해석을 통한 값이 정 반대되는 경향으로 나타났다. 앞서 살펴보았듯이 다른 초기조건이 동일한 경우 식 (6)에 의해서 선 충격량이 클수록 회전 속도는 작아지고 선 충격량이 작을수록 회전 속도는 커지는 결과를 보여준다. 하지만 FEM해석 결과는 그 반대로 선 충격량이 클수록 회전 속도는 커지고 선 충격량이 작을수록 회전 속도는 작아지는데 이는 K. Tanaka의 결과⁽³⁾와 동일하다. 공의 속 부분 영계수 값이 40 MPa일 경우와 겉 부분 영계수 값이 300 MPa일 경우는 두 결과가 비슷한데 이 계수 값이 기준이 되는 공의 재질 값이기 때문이다. 다시 말해서 보통의 공을 사용할 때 식 (6)을 적용하는 것은 크게 무리가 없지만 여러 초기 충돌 조건은 같으나 재질이 다른 공에 대해서 해석할 때 식 (6)을 사

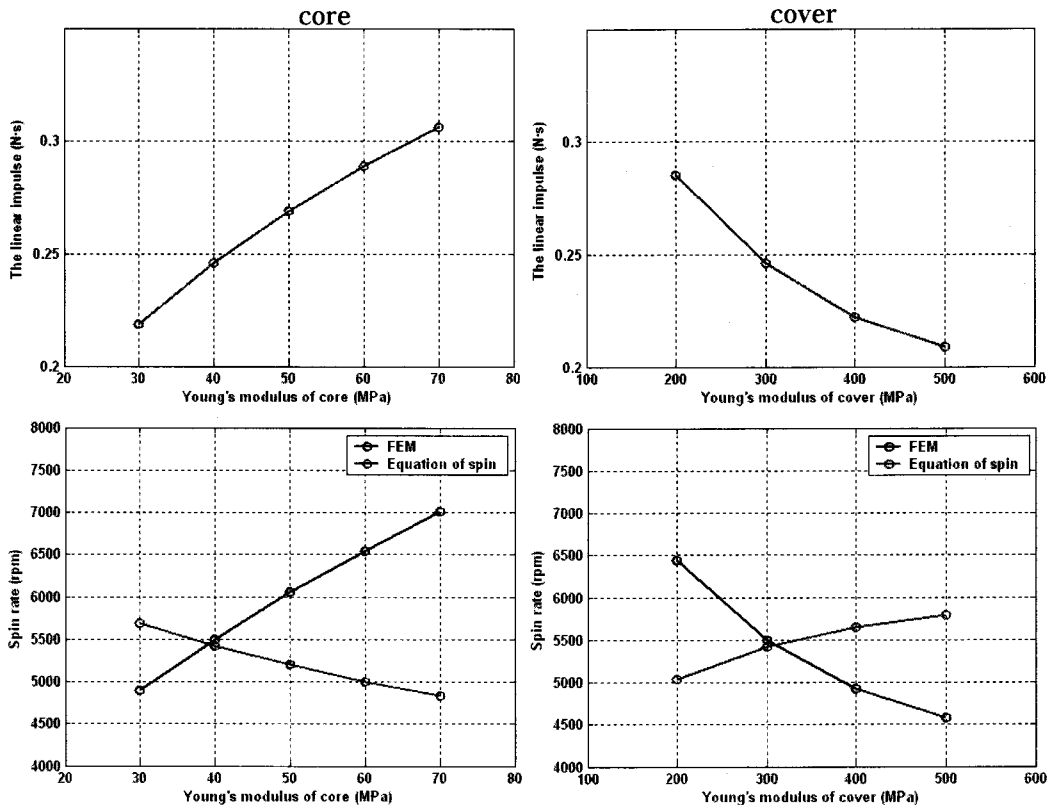


Fig. 7 Spin rate vs. ball material hardness

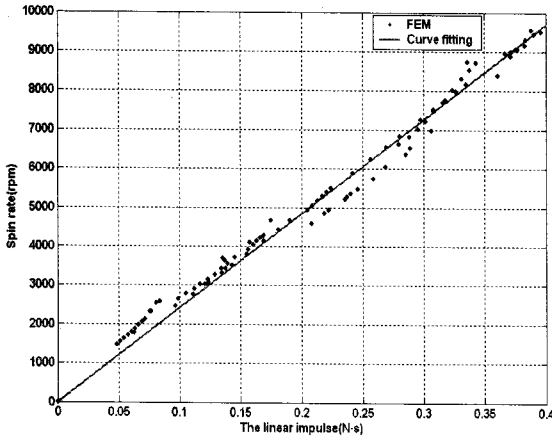


Fig. 8 Spin rate vs. the linear impulse by FEM

용하는 것은 불가능하다. 이처럼 이론 결과 값이 반대의 경향을 보이는 이유는 식 (6)에서 공의 재질 정보를 담을 수 있는 항이 없기 때문인데 재질 정보를 담아서 보다 정확한 충돌 이론 식을 도출하는 것이 앞으로의 연구과제이다.

3.2 FEM을 이용한 회전 경험 식

공의 재질 정보를 포함한 보다 정확한 충돌 이론 식을 세우기 이전에 FEM 해석 결과를 이용하여 공의 회전 속도와 선 충격량과의 관계를 단순화 하였다. 이는 다양한 충돌 조건을 각각 고려하기 보다는 선 충격량만으로 회전을 짐작할 수 있고 또 기존의 여러 가지 회전 속도들 검증 및 기준을 세우기 위해서이다. 따라서 여러 가지 충돌 조건 및 재질의 변화를 주어 수많은 FEM해석을 하였고 그 결과를 이용하여 선 충격량과 공의 회전 속도와의 관계를 다음과 같이 도출하였다.

이 결과를 토대로 경험 식을 다음과 같이 1차 선형 식으로 도출하였다.

$$\omega(\text{rpm}) = 2.4 \times 10^4 x \quad (7)$$

x 값은 선 충격량을 나타내는데 이 경험 식에 의하여 다른 여러 가지 복잡한 충돌 조건을 일일이 다 고려할 필요 없이 x 값만 알아내어 회전속도를 구하고 다른 값들과 비교할 수 있다.

3.3 경험 식의 다른 논문 결과에 적용

식 (7)에서 구한 경험 식을 검증하기 위해서 기존

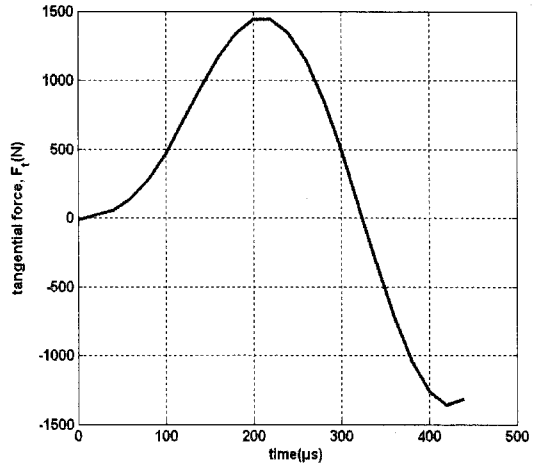


Fig. 9 Tangential force by W. Gobush⁽⁴⁾

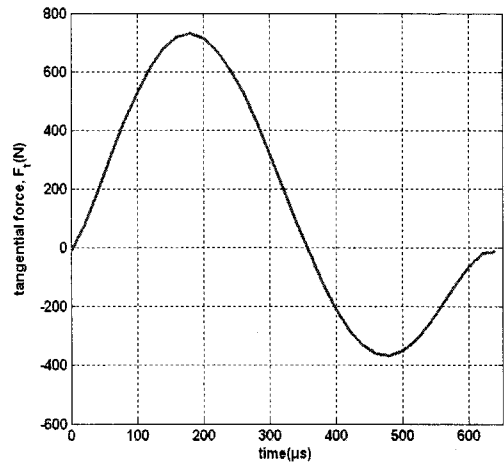


Fig. 10 Tangential force by K. Moriyama⁽⁵⁾

의 충돌을 해석한 논문의 결과와 비교하였다. 접선 방향 힘을 구한 논문 중 Fig. 9에 나타낸 것이 1990년 W. Gobush 논문결과⁽⁴⁾이고 Fig. 10에 나타낸 것이 2004년 K. Moriyama 논문 결과⁽⁵⁾이다.

Fig. 9에서 나타낸 W. Gobush의 결과는 초기 충돌 속도 29 m/s, 클럽 로프트 각도가 20°인 경우인데 선 충격량을 구하면 0.1315 N·s이고 이 값을 식 (7)에 대입하면 3,156 rpm이 된다. 다음으로 Fig. 10에서 나타낸 K. Moriyama의 결과는 초기 충돌 속도 34 m/s, 클럽 로프트 각도가 12°인 경우인데 선 충격량을 구하면 0.095 N·s이고 이 값을 식 (7)에 대입하면 2,280 rpm으로 계산된다. 이 두 결과 값은 각각 논문에서 주장하는 회전 속도와 상당히 유사한

결과를 보이고 있다.

4. 결 론

클럽으로 공을 타격했을 때 대부분의 골퍼들이 가장 고민하는 것이 공의 비거리와 원하는 곳까지 얼마만큼 정확하게 날아가는가 하는 것이다. 그런데 공의 비거리와 정확하게 날아가는데 모두 상당히 중요한 역할을 하는 것이 충돌 이후 공의 회전 속도이다. 따라서 회전 속도를 보다 복잡한 충돌 조건하에서도 간단하고 비교적 정확하게 예측할 수 있고, 또한 복잡한 충돌 조건을 총 망라한 하나의 비교 수치를 만들 수 있다면 추후 연구에 상당히 도움이 되리라 생각한다. 그 첫 번째로서 선 충격량이라는 값을 사용하였다.

결국 이 연구에서는 기존의 연구 결과를 바탕으로 마찰력에 의한 선 충격량과 골프 공의 회전과의 관계를 규명하고자 하였다. 그러기 위해서 선 충격량과 운동량 변화 관계를 이용하여 이론 식을 세우고 여러 가지 가정을 토대로 회전에 관한 이론 식을 세웠다. 그리고 이 값과 FEM해석 결과를 비교하였는데 여기서 FEM해석 결과는 기존의 연구에서 진행한 값들을 사용하거나 이어서 진행된 결과들이다. 여러 가지 충돌 초기 값들이 변화할 때 이론 결과와 FEM해석 결과는 약간의 차이는 있었으나 비슷한 경향을 나타내었다. 하지만 공의 재질이 변할 경우에는 완전 반대의 경향을 나타내었는데 이는 충돌 이론 식

이 공의 재질을 표현할 수 없기 때문이다. 이는 추후 연구를 통해서 해결하려 한다. 또한 많은 FEM해석 결과를 바탕으로 선 충격량과 회전과의 관계를 도출하고 경험 식을 세워 다른 논문의 결과와 비교하였는데 상당히 유사한 결과를 보이고 있다.

참 고 문 헌

- (1) Roh, W. J., Lee, C. W., 2007, "A Study on Golf Ball Spin Mechanism at Impact", Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 17, No. 5, pp. 456~463.
- (2) Jorgensen, T. P., 1994, The Physics of Golf, American Institute of Physics.
- (3) Tanaka, K., 2006, "Construction of the Finite-element Models of Golf Balls and Simulations of Their Collisions", Proc. IMechE Vol. 220 Part L:J. Materials: Design and Applications, pp. 13~22.
- (4) Gobush, W., 1990, "Impact Force Measurements on Golf Balls", Science and Golf, Proceedings of the World Scientific Congress of Golf, pp. 219~224.
- (5) Moriyama, K., 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.