테니스와 물리학

DOI: 10.3938/PhiT.23.007

노재우

Physics and Tennis

Jaewoo NOH

Tennis is a sport that has a strong connection to physics. One may think that describing tennis play by using physics theory is not possible because there are many variables such as the complex motion of the human body motion, air resistance, and the complicated structure of tennis rackets. However, several research results show that many aspects of tennis can be explained by physics quite well. The sweet spot and the dead spot of rackets, the swing weight, the speed of the returning ball, the tennis swing and the double-pendulum model, the mechanics of the dynamic step, the ball's trajectory, and the Hawk-eye system are all related to, and can be well explained by using physics.

현재의 테니스 게임은 20년 전에 비해 선수들이 친 공의 속력이 훨씬 증가해서 매우 빠른 속도로 진행되는 게임이 되었다. 빠른 속력의 공을 따라가서 강력하게 받아치기 위해서 모던 테니스 스텝이라는 새로운 다이내믹 스텝이 개발될 정도이다. 흔히 테니스 동호인들 중 많은 사람들은 현재의 그래파이트 소재 테니스 라켓이 옛날 나무 라켓에 비해 더 강력한 라켓이 된 것이 공이 빨라진 이유라고 말한다. 그런데 '강력하다'는 것은 과학적으로 무슨 의미일까? 라켓이 강력해져서 테니스 게임이 달라졌다는 말에 대해 반론을 제기하는 과학자들이 있다. 이들은 단지 현재 프로 테니스 선수들의 체격과 체력이

예전보다 더 좋아지고 라켓 헤드의 면적이 커져서 공에 스핀을 걸기가 쉬워진 덕분에 더 강하게 공을 쳐도 공을 잘 제어할 수 있기 때문이라고 말한다. 과연 테니스의 과학에는 어떤 것들이 있고 어떤 질문에 대해 과학적인 답을 내놓을 수 있을까? 이 글에서는 테니스에 관련된 여러 가지 과학적인 내용 중에서 테니스 라켓과 스윙, 그리고 공의 스핀 효과에 관련된 물리에 대해서 말해보고자 한다.

테니스 라켓의 물리학

테니스 동호인들은 모두 아는 사실로, 테니스 라켓에는 스위트 스팟(sweet spot)이라는 부분이 있다. 한글 위키피디아에서는 "스위트 스팟은 야구 배트나 탁구 라켓, 테니스 라켓 등에 공이 맞았을 때 가장 멀리 날아가는 부분을 말하며, 이에 비유하여 경제학에서는 특정 제품이 소비자들이 구매 의사가 있는 가격대에 가격을 형성하거나 그 제품의 제조업체에 대한 소비자들의 선호도가 극대화되어 유례없이 폭발적인 호황을 누리는 때를 (스위트 스팟을 쳤다고) 말한다"고 소개하고 있다. 그만큼 스위트 스팟은 널리 사용되는 용어이다. 그런데 테니스 라켓의 스위트 스팟에 대한 이런 단순한 설명은 과학적 사실과 조금 차이가 있다. 스위트 스팟은 라켓 헤드의 중앙 부분에 존재하는데, 사실 정지한 라켓에 공이 날아와 맞고 튀어 나가는 경우 가장 반발이 큰 부분은 라켓 헤드의 중앙 부분이 아니라 아래 부분, 즉 목에 가까운 부분이다.

정말 그럴까? 아주 간단한 실험을 해 보면 쉽게 확인할 수 있다. 책상 끝에 테니스 라켓의 손잡이 부분을 대고 꼭 누른 후 공을 적당한 높이에서 라켓 헤드에 떨어뜨려 보시라. 물론 라켓의 손잡이가 아닌 다른 부분은 책상 밖 공중으로 나와 있어야 한다. 공은 헤드의 아래 부분에서 가장 많이 튀어 오르고 중앙 부분에서는 그보다 적게 튀어 오르며, 헤드의 위 부분에서는 거의 튀어 오르지 않고 그대로 정지해버린다.

따라서 라켓을 거의 정지 상태로 유지하고 발리를 하는 경우 가장 공이 빠르게 리턴되는 부분은 헤드의 아래 부분이다.

저자약력

노재우 교수는 서울대학교, 한국과학기술원, 미국 로체스터 대학에서 공부했으며 JILA에서 박사후 연구원과정을 거치고 현재 인하대학교 교수로 재직 중이다. (jnoh@inha.ac.kr)

(보통 공과 라켓은 서로를 향해 움직이지만, 물리적으로 라켓을 기준으로 하는 기준계에서는 라켓을 정지한 것으로 간주하고 공이 상대 속도로 라켓을 향해 날아오는 것으로 볼 수 있다). 그런데 왜 라켓 제조사가 말하는 스위트 스팟은 헤드의 중앙 부분일까? 답은 스트로크 스윙의 형태에 있다. 스트로크 스윙을 하는 경우에는 라켓이 팔꿈치와 손목을 중심으로 회전하는 상태에서 공을 만나게 된다. 회전하는 상태에서는 라켓 헤드의 끝부분이 헤드의 아래 부분보다 속도가 더 크다. 다시 말해서 헤드의 끝 부분이 공과 만날 때의 상대 속도가 라켓 목 부분이 공과 만날 때의 상대 속도보다 상당히 크다는 말이다. 더 빠른 속도로 공을 치면 공이 더 빠르게 리턴되기 마련이다. 따라서 공과 헤드 각 부분의 상대 속도 차이와 반발 정도를 고려하면 최적점이 헤드의 가운데 부분이 되는 것이다. 결국 스트로크 스윙에서는 공이 가장 빠르게 리턴되는 부분은 헤드의 중앙 부분이 되는 것이 맞다. 그러나 발리에서는 다를 수 있다.

라켓 제조사들은 경우에 따라 스위트 스팟을 다른 방식으로 말한다. 공이 라켓 헤드에 맞았을 때 라켓을 쥔 사람의 손에 전달되는 힘이 0이 되는 부분이 스위트 스팟이며, 공이 스위트 스팟에서 먼 곳에 맞을수록 라켓이 뒤틀리는 힘과 진동이 손에 더 크게 전달된다는 것이다. 쉽게 말해서 스위트 스팟에 공이 맞았을 때 가장 편안한 느낌이 오며 공이 잘 나간다는 말이다. 그런데 이와 같은 설명도 과학적인 사실과 완전히 일치하지는 않는다. 라켓을 쥔 손에 가해지는 힘은 라켓과 공이 충돌하면서 라켓이 밀려나는 운동에 의한 것이다. (뉴턴의 운동법칙 제3법칙인 작용-반작용의 법칙에 의해 라켓으로 강하게 공을 때리면 그 반작용으로 라켓에도 강한 힘이 가해진다). 충돌 직후 라켓의 운동에는 세 가지가 있다. 병진운동, 회전운동, 진동운동이다. 테니스 라켓의 물리를 연구하는 사람들은 보통 스위트 스팟을 라켓의 고유 진동의 마디(node)가 되는 부분으로 정의한다. 마디인 스위트 스팟에 공이 맞았을 때 라켓은 거의 진동하지 않는다. 따라서 라켓을 쥔 손은 진동을 느끼지 않는다. 그러나 진동은 없지만 회전과 병진운동이 남아있다. 공이 라켓에 가하는 힘에 의해 라켓은 손잡이 부분을 회전축으로 하여 역회전하게 되고 이에 따라 손의 검지부분은 안쪽으로 그리고 새끼손가락 부분은 바깥쪽으로 뒤틀리는 힘을 받게 된다. 강하게 공을 가격할수록 역회전에 의해 손에 전달되는 힘은 더 강해진다. 테니스 동호인들에게 강한 악력이 필요한 이유이다.

그림 1에서 라켓 헤드의 각 부분을 나타냈는데, 위 부분으로부터 데드 스팟, 마디 점(스위트 스팟), 타격 중심점, 최대 반발점, 그리고 질량 중심점이다. 각 점에 대해 좀 더 자세히 알아보자.

그림 1. 테니스 라켓의 각 부분의 명칭.

데드 스팟(dead spot) - 정지 상태의 라켓에 공이 날아와 맞았을 때 공의 속력이 0으로 되는 부분이다. 앞에서 말한 것처럼 라켓 손잡이를 책상 끝에 대고 누른 상태에서 공을 떨어뜨려 보면 쉽게 찾을 수 있다. 공의 속력이 0이 되는 것은 공의 운동에너지가 전부 라켓에 전달되기 때문이다. 그 이유는 데드 스팟에서는 라켓의 유효 질량(effective mass)이 공의 질량과 거의 같기 때문이다[부록 참조]. 비슷한 경우를 당구장에서 볼 수 있다. 당구대 위에서 같은 무게의 당구공끼리 정면으로 충돌을 시키면 와서 때린 공은 정지하고 맞은 공은 때린 공의 속도로 튀어 나가는 것을 볼 수 있다. 탄성충돌과 운동량 보존 법칙에 의한 현상인데, 이와 비슷하게 테니스 라켓의 데드 스팟에서는 공의 운동량이 거의 전부 라켓에 전달되고 공은 속력을 완전히 잃게 된다.

마디(node) 점 - 기본 진동의 마디가 되는 점이다. 스위트 스팟과 같다.

실로 공중에 매단 테니스 라켓을 공으로 쳤을 때 기본 진동 형태는 그림 2에 나타난 것처럼 손잡이 끝과 헤드 끝이 진동의 배(anti-node)가 되고 라켓 손잡이의 중간 부분과 헤드의 중간 부분이 두 개의 마디가 되는 모습이다.^[1] 양쪽이 고정된 막대기가 진동한다면 고정된 양쪽 끝이 마디가 되지만 라켓의 양 끝은 고정되어 있지 않기 때문에 진동 폭이 큰 배가 된다. 손으로 라켓의 손잡이를 잡으면 이 진동은 크게 감소하는 감쇠진동이 되지만 기본 진동 형태는 같다. 기본 진동수는 약 100 Hz에서 180 Hz 정도이며 프레임이 유연할수록 진동수는 작다. 이 진동음을 들으려면 라켓 손잡이의 중간 부분을 두 손가락으로 가볍게 쥐고 라켓을 귀 가까이 대고서 라켓의 여러 부분을 공으로 가볍게 쳐 보면 된다. 어느 부분을 쳤을 때 진

REFERENCES

- [1] H. Brody, Am. J. Phys. **47**, 482 (1979).

그림 2. 테니스 라켓의 진동 형태.

동음이 더 크게 들리는지 시험해 보시라. 자기가 사용하는 라켓의 프레임이 유연한지 뻣뻣한지를 알려면 라켓의 진동음을 들어보고 인터넷이나 스마트폰 어플에 있는 100 Hz와 200 Hz 음과 비교해볼 수도 있다.

참고로, 두 번째 진동 모드의 진동수는 기본 진동수의 약 2.75배가 된다. 그런데 공과 라켓의 충돌 시간은 약 5 ms 정도이며 이 충돌 시간은 두 번째 이상의 높은 진동수 진동이 생기기엔 너무 긴 시간이다. 기타줄 가운데를 한 손으로 살짝 누른 상태에서 다른 손으로 기타 줄을 튕기는 것을 생각해 보면 이해가 쉽다. 따라서 기본 진동 이외의 진동은 별로 영향을 주지 않는다.

타격 중심점(center of percussion, COP) - 뉴턴의 운동법칙에 의하면 공을 때린 라켓은 반작용에 의해 힘을 받게 되며 라켓은 이 힘에 의해 라켓 전체가 뒤로 밀려나는 병진운동을 하게 된다. 그림 3을 보시라. (좀 더 물리적으로 엄밀하게 말하면 질량 중심점의 가속도의 크기와 방향이 이 반작용 힘에 의해 결정된다.)

만약에 공이 가격한 부분이 라켓의 질량중심점(CM)이라면 라켓은 그림 3(a)처럼 라켓 전체가 같이 뒤로 밀려나는 병진운동만 하게 된다. 그러나 질량중심점을 벗어난 다른 점을 가격하게 되면 그림 3(b)처럼 질량중심점을 회전축으로 하는 회전운동이 추가되어 생긴다. 일반적으로, 공이 헤드 부분을 가격한 경우 라켓 손잡이 부분은 그림 3(b)에서처럼 앞으로 회전하게 된다. 이 회전에 의해 손잡이가 앞으로 나오는 속도(v_2)와 원래의 병진운동에 의해 뒤로 밀려나는 속도(v_1)가 서로 상쇄하는 곳이 생기는데, 이 점은 속도가 0이 되어 순간적으로 정지하는 지점이 되며, 그림 3(c)에서 보듯이 이 점이 라켓 전체의 회전축이 된다. 이렇게 회전축이 되는 점을 공이 가격한 점에 대한 켤레점(conjugate point)이라고 부른다. 한편 특정한 점이 회전축이 되도록 공이 가격한 지점을 그 회전축의 타격

그림 3. 정지한 라켓과 공의 충돌에 의한 라켓의 운동 모습.

중심점(COP)이라고 부른다. 라켓 헤드에서 타격중심점이란 이 점에 공이 맞았을 때 손잡이 부분이 회전축이 되어서 회전에 의한 힘이 손에 거의 작용하지 않는 점으로, 두 번째의 스위트 스팟이라고도 부른다. 그림 1에서는 공중에 실로 매단 테니스 라켓의 타격중심점이 스위트 스팟하고 비슷한 위치에 있는 것을 보여준다. 그런데 실제로 라켓을 잡고 있을 때는 손의 무게가 라켓 손잡이 부분에 더해지므로 타격중심점은 좀 더 아래쪽으로 이동한다고 한다.^[2] 참고로, 보통 라켓의 질량은 약 300 g 정도이며 손의 질량은 약 500 g 정도로 생각한다.

최대 반발점(best bounce) - 위에서 이미 설명했지만 정지한 라켓에 공이 와서 맞았을 때 가장 반발 속력이 큰 부분이다. 이 부분에서는 라켓의 유효 질량이 크기 때문이다 [부록 참조].

질량 중심점(center of mass) - 무게 중심점, 평형점. 중력이 균일한 곳에서는 무게 중심점과 질량 중심점은 같다고 봐도 된다. 흔히 동호인들은 손으로 라켓을 들고 무게 중심점을 찾지만 좀 더 정확한 방법은 평평한 탁자 위에 라켓을 놓고 헤드 쪽이 탁자 밖으로 나가게 하여 계속 밀었을 때 라켓 손잡이 부분이 들리기 시작하는 순간을 찾으면 된다. 이때 손잡이 끝으로부터 탁자 가장자리까지가 무게 중심점까지의 거리가 된다.

무게 중심점의 위치는 라켓의 스윙 무게와 관계된다. 골프와 야구, 테니스 등의 스포츠에서는 클럽 또는 라켓의 스윙 무게(swing weight)를 중요시 한다. 특히 퍼터를 제외하고 13개의 클럽을 사용하는 프로 골프 선수들은 13개 클럽의 스윙 무게를 모두 같은 것으로 사용한다고 한다.

REFERENCES

- [2] R. Cross, Am. J. Phys. **72**, 622 (2004).

라켓의 스윙 무게

서론에서 말했지만, 현재의 라켓이 예전 라켓보다 강력해졌다고 말하는 사람이 많다. 사실 현재의 테니스 라켓은 예전에 비해 전체 무게도 가벼워지고 더 작은 스윙 무게를 가지고 있어서 선수들은 예전보다 더 빠르게 스윙을 할 수 있다. 그런데 같은 속력으로 라켓을 휘두른다면, 라켓의 유효 질량이 작아졌으므로, 가벼운 라켓에 맞은 공의 속력은 더 작을 것이다. 그러므로 라켓을 휘두르는 속력이 증가한 것의 플러스 효과가 라켓이 가벼워진 것의 마이너스 효과를 상쇄하고 남을 만큼 커야 할 것이다. 물론 또 다른 중요한 효과는 커진 헤드 면적의 라켓으로 공을 칠 때 스핀이 더 잘 걸린다는 사실이다. 이 점에 대해서는 나중에 다시 이야기하겠다.

라켓의 최대 스윙 속력은 라켓의 스윙 무게에 의해 결정된다. 스윙 무게란, 동호인들의 입장에서 말한다면 라켓을 휘둘렀을 때 느껴지는 라켓의 무게이다. 물리학적으로는 회전관성(moment of inertia)에 해당한다.(골프에서는 스윙 무게를 조금 다르게 질량 곱하기 거리로 정의하는 사람도 있다.) 테니스 라켓 제조사에서는 보통 라켓 손잡이의 끝에서 약 10 cm 안의 점, 즉 사람 손으로 잡는 부분을 회전축으로 했을 때의 라켓의 회전관성으로 표시하곤 한다. 그런데 테니스 스윙은 사람에 따라 조금씩 다르며 어깨관절, 팔꿈치, 손목을 축으로 하는 복잡한 회전 형태이다. 따라서 사람마다 스윙 무게를 느끼는 것이 조금씩 다르다. 그런데 흥미로운 사실은 실제 여러 명의 테니스 동호인과 선수를 대상으로 한 실험에 의하면 같은 스윙 무게를 가지는 여러 무게의 라켓들의 최대 스윙 속력은 서로 비슷하며, 그러나 여러 라켓의 무게 차이와는 별로 상관없다는 것이다. 한편 같은 무게의 라켓이지만 스윙 무게를 다르게 제작한 라켓의 최대 스윙 속력은 스윙 무게에 따라 크게 변한다. 간단히 말해서 라켓의 최대 스윙 속력은 라켓의 무게가 아니라 스윙 무게가 결정한다. 실험에 의한 라켓 헤드의 최대 선속력 $V_{\max}$ 에 대한 식은 다음과 같다.^[3]

$$V_{\max} = C/I^n.$$

여기에서 C 는 상수이며 사람에 따라 값이 다르다. I 는 스윙 무게를 뜻하며 실험적으로 시중에서 파는 대부분 라켓의 경우 n 은 약 0.27 정도의 값을 가진다.

그러면 라켓에 맞은 공의 최대 속력은 어떻게 결정될까? 이 계산은 조금 더 복잡한데, 요약해서 말하면 라켓의 유효 질량과 공과 라켓의 상대속도가 공의 속력을 결정한다. 유효질량 값은 라켓의 부위에 따라 다르다. 라켓의 전체 질량과 스윙 무게, 질량중심점으로부터 공이 맞은 점까지의 거리 등에 의해 결정된다. 참고문헌 [4]에 소개한 연구의 결과에 의하면 현재

시중에서 판매되는 인기 있는 라켓들의 스윙 무게는 대부분 비슷하며, 공이 라켓의 스위트 스팟에 맞았을 때 라켓의 무게 차이는 공의 속력에 거의 영향을 주지 않는다고 한다. 참고로, 요즘 인기 있는 라켓 중 하나의 사양을 찾아보면 총 길이 69 cm, 질량 315 g, 라켓 손잡이 끝에서 질량중심점까지의 거리 32 cm, 스윙 무게 $308 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$ 이라고 나온다. 이 스윙 무게는 손잡이 끝에서 약 10 cm 안쪽을 회전축으로 했을 때의 스윙 무게이다.

테니스 라켓 정리(tennis racket theorem) - 테니스 라켓 손잡이 부분을 손에 쥐고 라켓을 공중으로 던져서 길이 방향으로 완전히 한 바퀴 돌게 한 후 손잡이를 잡으면 라켓의 앞면과 뒷면이 바뀌게 된다. 라켓이 길이 방향으로 한 바퀴 도는 동안 폭 방향으로 반 바퀴를 돌기 때문이다. 회전관성의 차이 때문이다. $(I_x > I_y > I_z)$. 한번 실험해 보시라.

테니스 스윙과 이중 진자 모델

테니스, 야구, 그리고 골프 등에서 공통적인 것은 스윙의 구조가 비슷하다는 것이다. 테니스 스윙은 사람마다 조금씩 다르고 몸통의 회전과 어깨, 팔꿈치, 손목의 관절을 중심으로 하는 회전이 더해지는 복잡한 운동이다. 그런데 요즘 테니스 선수들의 스윙 모습을 비디오 분석을 통해 살펴보면 어깨부터 팔꿈치까지인 상완의 회전보다는 팔꿈치를 중심으로 하는 팔뚝 부분의 회전과 손목을 중심으로 하는 라켓의 회전이 스윙의 임팩트 순간에 주로 관여한다는 것을 알 수 있다. 특히 테니스 백핸드 스윙의 경우 임팩트 바로 전 순간에는 몸통의 회전이 나 상완의 운동이 상대적으로 매우 작다. 따라서 팔뚝과 라켓의 회전만을 고려해서 테니스 스윙을 이중진자 모델로 나타낼 수 있는데, 이중 진자는 두 개의 막대 진자가 연결된 것이다. 이중 진자 모델은 단순하지만 상당히 효과적인 모델이다. 이 스윙 모델은 테니스의 포핸드, 백핸드 스트로크 스윙과 서브 스윙에 모두 적용될 수 있는데, 공을 치는 순간에 라켓 헤드의 순간속력을 이중 진자 모델을 통해 분석하여 어떤 스윙이 바람직한 스윙인지 알아 볼 수 있다. 예를 들어 다음과 같은 질문을 해 볼 수 있다. 서브를 할 때 임팩트 순간에 라켓 헤드가 빠르게 돌아가도록 스윙을 해야 한다는 것은 대부분의 테니스 코치들이 하는 이야기이다. 그런데 임팩트 순간 손목에 힘을 주어 손목을 중심으로 라켓을 더 빠르게 돌리는 것이 좋을까,

REFERENCES

- [3] H. Brody, R. Cross and C. Lindsey, *The physics and technology of tennis*, Solana Beach, Ca. Racket Tech Publishing (2002).
- [4] R. Cross and R. Bower, *J. Sports Sci.* **24**, 23 (2006).

그림 4. 테니스 포핸드 스윙과 이중진자. 팔뚝과 라켓이 이중 진자를 만든다. 임팩트 전 팔뚝과 라켓의 각도와 임팩트 후 각도에 유의하라. 사진의 순서는 왼쪽 위부터 오른쪽으로, 그 다음 아래 왼쪽에서 오른쪽의 순서이다.

아니면 손목에 힘을 빼고 라켓이 돌아갈 때 손목은 라켓을 따라 자연스럽게 같이 돌아가게 하는 것이 좋을까? 물리학적으로는 팔꿈치를 회전축으로 하는 돌림힘(torque)과 손목을 회전축으로 하는 돌림힘의 역할을 분석해 보는 것과 관계된다.

흔히 코치들의 주문과 과학적 사실에는 약간의 차이가 있어 보인다. 예를 들어 코치들은 대부분 포핸드 스윙에서 공을 가격하고 난 후의 스윙 즉 폴로우 스윙이 중요하다고 말한다. 이들 중에는 폴로우 스윙이 공의 구질과 속력을 결정한다고 믿는 사람도 있는 듯하다. 그러나 물리학적으로는 공과 라켓이 만나는 충돌시간은 불과 5 ms 정도의 아주 짧은 시간이며 충돌 이후 라켓의 운동은 공의 운동과 전혀 관계가 없다. 단지 인간의 신체 구조와 심리적 요소 때문에, 폴로우 스윙을 길게 한다고 생각하고 스윙을 해야만 임팩트 순간에 라켓에 최대의 가속을 할 수 있다. 5 ms는 인간의 생물학적 반응시간에 비해서 너무 짧은 시간이어서 이 시간 동안에 라켓 스윙에 어떤 변화를 줄 수는 없고, 단지 전체적인 스윙이 올바른 임팩트에 적합하도록 스윙을 익히는 수밖에 없다. 야구나 골프에서도 마찬가지이다.

흥미로운 사실 하나는 최근 세계 정상급 테니스 선수들의 포핸드 스윙은 이중진자에서 순간 선속도가 최대화되는 모습의 스윙을 한다는 것이다. 그림 4를 보자.

그림 4의 스윙 모습은 20년 전의 프로 테니스 선수에게서는 볼 수 없었던 스윙이다. 그림을 보면, 백스윙이 끝나고 라켓이 앞으로 나가기 시작할 때(첫 번째 사진) 손목이 뒤로 젖혀지면서 팔뚝과 손목의 각을 최대한 크게 한다. 그 다음 팔뚝이 앞으로 회전하면서 라켓을 끌고 나가고, 임팩트 바로 전에는 팔뚝의 속력이 줄어들면서 손목을 중심으로 라켓이 빠르게 회전한다(두 번째, 세 번째 사진). 공과 라켓이 만나는 순간 손목은 거의 펴지며(네 번째 사진) 임팩트 후 라켓이 손목을 회전축으로 하여 계속 돌아가면서 폴로우 스윙이 되는 모습이다

그림 5. 스트로크 스윙 모습과 스윙에서의 회전 속력(각속력).

(여섯 번째 사진). 이 스윙 형태는 임팩트 순간에 라켓 헤드의 속력을 최대로 만드는 스윙이다. 인터넷에서 슬로우 모션 동영상을 찾아보면 페더러, 나달, 조코비치, 머레이 등의 스윙이 모두 이런 형태이다. 이 스윙을 쉽게 표현한다면 이중 진자의 끝 점이 되는 라켓 헤드에 최대의 에너지를 전달하는 스윙이다. 몸의 에너지가 팔뚝으로, 그리고 팔뚝에서 라켓으로 전달되는 것인데, 팔뚝의 회전속력이 처음에는 빠르다가 임팩트 순간 바로 전에는 느려지면서 라켓 헤드의 회전속력이 더 빨라지는 것이다. 그림 5에 팔뚝의 회전속력과 라켓의 회전속력을 측정한 결과를 보여주고 있다.

에너지 보존법칙을 생각한다면 그림 5에서 0.2 s 때의 회전운동에너지와 0.25 s 때의 회전운동에너지가 거의 같아야 한다. 총 회전운동에너지는 근사적으로 $I_1\omega_1^2 + I_2\omega_2^2$ 이므로 0.25 s

때에는 팔뚝의 회전속력이 줄어든 만큼 라켓의 회전속력이 증가한다는 것을 알 수 있다. 서브에서 팔뚝과 라켓의 운동도 마찬가지로이다.

사실 이중진자 형태의 운동은 드물지 않다. 사람이 걸어갈 때 허벅지의 운동과 종아리의 운동이 바로 이중 진자 운동과 같다. 허벅지가 움직이는 각도의 폭보다 종아리가 움직이는 각도 폭이 더 크며 발목이 이중진자의 끝 부분이 된다.

흥미로운 사실 두 번째는 서브에 이중진자 모델을 적용하여 전산시뮬을 한 결과에 나타난다. 손목의 힘을 빼고 한 서브 스윙의 경우 라켓의 순간속력은 더 증가한다. 그런데 서브의 경우 공을 위에서 아래로 보내야 하며 인체 구조 상 볼의 방향을 잘 제어할 수 있는 타격점은 공이 선수의 몸보다 약간 앞에 있을 경우이다. 지나치게 몸 앞쪽이나 몸 뒤 쪽에서 공을 가격해서는 공을 서비스 박스 안에 보내기 어렵다. 결과적으로 손목의 힘을 빼고 스윙하되 지나치게 힘을 빼는 것보다 약간의 손목 힘이 임팩트 순간에 필요하다.^[5]

테니스공과 유체 역학

세계 테니스 연맹이 규정한 테니스공의 크기와 질량은 지름이 65.41 mm-68.58 mm (2.575 in-2.700 in), 질량이 56.0 g-59.4 g (1.975-2.095 ounces)이다. 2.54 m (100 in) 높이에서 콘크리트 벽돌 위에 자유낙하했을 때 1.346-1.473 m (53-58 in) 높이 사이로 튀어 올라와야 한다. 이런 사실보다 더 중요한 것은 테니스공이 날아가는 모습이 공기의 저항과 공기역학에 의해 크게 좌우된다는 것이다. 현재의 테니스 게임이 예전보다 더 빠른 속도로 진행되는 이유 중 하나는 요즘의 라켓으로 공을 칠 때 공에 탑스핀을 걸기가 더 쉬워졌다는 점이다. 탑스핀이 강하게 걸린 공은 라인 밖으로 잘 나가지 않는다. 그런데 공에 걸리는 스핀은 공을 세게 칠수록 더 크게 걸리기 때문에 선수들은 최대한의 힘으로 공을 칠 수 있고 공은 더 빠르게 날아간다. 바닥에 맞고 튀어 오르는 높이와 방향도 스핀의 영향을 많이 받기 때문에 강한 탑스핀 공은 강력한 무기가 될 수 있다.

현대의 테니스는 스핀의 게임이라고 말할 정도로 테니스 게임에서 탑스핀과 언더스핀(슬라이스)의 효과는 크다. 스핀의 효과에 대해 알아보자.

테니스공이 날아갈 때 공에 미치는 힘은 세 가지이다. 중력, 공기 저항력, 공기 역학에 의한 부양력. 중력은 물론 테니스공의 무게에 의해 수직 아래 방향으로 항상 작용한다. 공기 저항력은 공이 날아가고 있는 방향의 반대 방향으로 작용한다(좀 더 정확하게 말하면 공의 순간속도 벡터와 반대 방향이다). 부양력은 공의 스핀에 의해 생기는 공기 압력 차이에 의한 것이

(a)

(b)

그림 6. (a) 테니스공에 작용하는 세 가지 힘. 중력(gravity), 공기저항력(drag), 부양력(lift). (b) 테니스공에 작용하는 힘의 합력. 탑스핀(위)과 슬라이스(아래)의 경우 합력의 크기와 방향에 유의.

며 날아가는 방향에 수직이다(좀 더 정확하게 말하면 공의 순간속도 벡터와 수직인 방향이다). 그림 6에 이 세 가지 힘을 나타내었다. 탑스핀 공의 경우 부양력은 아래 방향이며 슬라이스 공의 경우 부양력의 방향은 위 방향이다.

이 힘 중에 어떤 것이 가장 클까? 연구결과에 의하면, 예를 들어서 공의 속력이 $v = 30 \text{ m/s}$ (67 mph) 정도일 때 중력은 약 0.56 N이며 공기 저항력은 0.93 N으로 중력에 비해 1.7배 정도 크다.^[6] 부양력은 공의 스핀 정도가 증가하면 같이 증가하는데 강한 스핀이 걸린 경우 중력과 크기가 비슷해진다. 따라서 공기 저항과 공기 역학에 의한 부양력의 효과는 매우 강

REFERENCES

- [5] R. Cross, Am. J. Phys. **79**, 470 (2011).
- [6] R. D. Mehta and J. M. Pallis, Sports Eng. **4**, 177 (2001).

그림 7. 공의 궤도와 스핀 효과.

력하게 나타난다. 스핀이 걸린 공에 작용하는 힘의 합력을 그림 6(b)에서 볼 수 있다. 이 힘의 크기와 방향을 보면 탑스핀 공이 낙하할 때 급격한 경사를 그리며 떨어지는 이유와 슬라이스 공이 상대적으로 완만한 경사를 그리며 길게 낙하하는 이유를 알 수 있다.

스핀의 효과는 그림 7에 나타난 공의 포물선 운동 궤도에서도 분명히 볼 수 있다. 고등학교 물리에서 이미 배우는 것이지만 공기 저항과 스핀 효과가 없을 때 중력만을 경험하며 날아가는 공의 궤도는 완벽한 포물선이다. 그러나 회전하는 공의 경우 궤도가 크게 달라지는데 이를 마그너스(Magnus) 효과라고 한다. 공의 회전에 의해 발생하는 부양력을 마그너스 힘이 라고도 한다. 골프에서 공의 비거리를 늘리기 위해서 이 마그너스 효과가 매우 중요하게 취급된다.

공기 저항력은 공의 속력의 제곱에 비례하여 증가한다. 그런데 부양력은 공의 속력과 공의 스핀에 의해 크게 변한다 [부록 참조]. 테니스공의 표면은 펠트라고 부르는 섬유로 덮여 있는데, 테니스 역사의 초창기 시기에는 천연 양털을 사용했다고 하며 최근에는 주로 나일론 소재의 인공 섬유를 사용한다. 이 펠트는 공이 회전함에 따라 공 주변의 공기 흐름을 크게 바꾸어 놓게 된다. 테니스공이 야구공이나 축구공 등에 비해 훨씬 큰 공기 역학 효과를 보이는 큰 이유가 이 펠트의 효과에 있다. 펠트가 공 주변 공기의 층흐름(laminar flow)을 난류(turbulent flow)로 바꾸어 공 뒷면에 와류를 크게 만들면 스핀에 의한 효과가 더 커진다. 선수가 힘껏 친 공이 라인 안 쪽으로 떨어지느냐 아웃되느냐가 펠트의 역할에 의해 달라질 수 있다. 그리고 보면 프로 선수들이 시합에서 서브를 할 때마

다 공을 고르느라 시간을 보내는 것이 심리적인 것만은 아닌 것 같다.

맺는 말

현대의 대부분 스포츠가 다 그렇듯이 테니스도 인간의 한계에 도전하는 스포츠 게임이 되어가고 있다. 공의 속력이 빨라지고 선수들의 기량이 늘어나면서 과연 인간의 한계가 어디인가를 다시 생각해 보게 된다. 한계에 도전하는 스포츠에서는 선수의 운동 재능에 모든 것을 맡기지 않고 선수의 운동 모습과 운동 상황을 과학적으로 분석하여 선수의 기량을 단 몇 퍼센트라도 더 끌어올리는 데 주력한다. 단 몇 퍼센트의 차이가 금메달과 은메달, 그랜드슬램 대회의 우승과 준우승을 판가름할 수도 있기 때문이다.

이 글에서 다룬 내용들만 보아도 테니스에는 상당히 많은 과학적 내용이 있으며 현대 테니스 스윙 방식 등에 이런 과학적인 내용들이 반영되고 있음을 알 수 있다. 과거와 달라진 테니스 스윙과 빠른 리턴과 공격적 플레이를 위한 다이내믹 스텝 등이 개발되고 있는 외국의 경우를 볼 때 테니스의 물리학에 대해 거의 논의가 없는 국내의 실정은 조금 아쉽다.

이 글에서는 테니스에 관계된 여러 물리학적 내용 중에서 일부를 다루었다. 여기서 다룬 내용들은 대학교 1학년 물리를 잘 배운 사람이라면 대부분을 이해할 수 있는 내용이라고 생각한다. 물론 여기에서 한걸음 더 나아가 테니스 라켓의 성능을 높이기 위한 설계나 테니스 스윙의 과학적인 개선 방안 등에 대해서는 좀 더 심도 높은 논의와 연구가 필요할 것이다.

부 록

1. 유효 질량과 반발 계수, 공의 최대 속도

라켓의 유효 질량은 뉴턴의 법칙으로부터 유효 질량 = 힘/가속도의 관계로 정의한 것이다. 다시 말해서 라켓과 공이 충돌할 때의 평균 힘을 충돌 때 생기는 라켓 부위의 가속도로 나눈 것이다. 단순화시킨 모델을 적용하여 라켓을 하나의 균일한 막대로 가정하면 라켓의 유효질량은 다음과 같이 구할 수 있다.^[3]

$$M_e = \frac{M}{1 + Ma^2/I_{cm}}$$

여기에서 M 은 라켓의 총 질량이며 I_{cm} 은 질량 중심점을 회전축으로 했을 때의 회전관성이고 a 는 질량 중심점으로부터 공이 맞은 점까지의 거리이다. 이 식은 공과 라켓의 충돌 때 발

생하는 돌림힘(torque)과 회전관성의 관계 $\tau = I\alpha$, 그리고 운동량 보존법칙에 의해 얻은 것이다. 유효 질량을 이용하여 공과 라켓의 충돌을 두 질점 사이의 일차원 충돌로 취급할 수 있다. 테니스 라켓의 경우 스위트 스팟 부분에서 M_e/M 는 보통 0.4 정도이다. (야구 배트는 약 0.8 정도라고 한다.) 이제 정지해 있는 질량이 m 인 공(질점)에 유효 질량이 M_e 인 질점이 속력 V 로 와서 충돌하는 경우를 생각해 보자. 충돌 후 공의 속력은 다음과 같다.

$$v = \frac{M_e V(1+e)}{M_e + m}$$

여기서 e 는 반발 계수(coefficient of restitution)이다. 충돌 직전의 공의 상대 속력과 충돌 직후 공의 상대 속력의 비율이다. 참고로, 콘크리트 바닥에 떨어진 테니스공은 운동에너지의 약 45%를 잃는다고 하며 줄을 맨 라켓 헤드에 떨어뜨린 공은 약 30%의 에너지를 잃는다고 한다. 위 식에 의하면 공의 최대 속력은 라켓 헤드의 최대 속력에 비례한다. 그런데 라켓의 최대 속력은 스윙 무게에 의해 결정된다. 그리고 스윙 무게는 라켓의 총 질량에 근사적으로 비례한다. 라켓의 최대 속력 V 를 $V = C_1/M^n$ 으로 표시하면

$$v = C_1(1+e) \frac{M_e/M^n}{M_e + m}$$

이 결과를 라켓의 질량 M 의 함수로 그래프를 그리면 $M = 200$ g에서 $M = 400$ g 사이에서는 큰 변화가 없다.

2. 테니스공과 공기 역학

날아가는 공에 작용하는 세 가지 힘은 다음과 같은 식으로 나타낸다.^[6]

$$\begin{aligned} F_g &= mg \\ F_r &= 0.5 C_d \rho A v^2 \\ F_L &= 0.5 C_L \rho A v^2 \end{aligned}$$

위 식에서 F_g 는 중력을 나타내고, m 은 공의 질량, g 는 중력 가속도이며 9.8 m/s^2 의 값을 가진다. F_r 은 공기저항력, C_d 는 상수이며 ρ 는 공기의 밀도 ($\rho \approx 1.21 \text{ kg/m}^3$), A 는 공의 단면적(0.0034 m^2), 그리고 v 는 공의 속력이다. F_L 은 부양력이며 C_L 은 상수이다.

공기저항과 부양력의 변화를 보통 두 가지 변수에 대해 나타내는데 하나는 레이놀드 수(Raynold number) Re 이고 다른 하나는 스핀율(spin ratio) S 이다. 두 변수의 정의는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Re &= vD/k \\ S &= r\omega/v \end{aligned}$$

여기서 v 는 공의 속력이고 D 는 공의 지름, k 는 공기의 동점성률(kinetic viscosity)이며 상온에서 약 $0.000015 \text{ m}^2/\text{s}$ 의 값을 가진다. r 은 공의 반지름이며 ω 는 회전속도이다. 실험결과에 의하면 상수 C_d 는 Re 값의 변화에 관계없이 일정하며 S 에 대한 의존성도 크지 않다. 물론 속력의 범위가 실제 테니스 게임에서의 공의 속력 범위 내에서 그렇다는 것이다. 그런데 C_L 은 Re 값에는 크게 의존하지 않지만 S 에 비례해서 선형적으로 증가한다.