



# 과학과 축구

베르누이 원리와 마그누스 효과, 비행기의 비행 원리에 대한 오해의 해소

## 월드컵, 이해하며 즐기기

바야흐로 또다시 월드컵 축제가 펼쳐진다. 워낙 큰 축제가기에 4년이라는 긴 시간마다 한 번씩 열리므로 기다릴 때의 설렘과 벌어질 때의 짜릿함과 끝날 때의 아쉬움이 이 기간보다 더 진한 때를 찾기 어렵다. 대표적인 세계적 기구를 비교해보면 FIFA(국제축구연맹)의 회원국 수는 UN(국제연합)이나 IOC(국제올림픽위원회)보다 많다. 또한 흔히 인류의 가장 대표적인 축제로 여기는 올림픽이 보름 정도 개최되는 데에 비해 월드컵은 한 달 동안이나 지속되므로 축구라는 단일 종목으로 치르면서도 실질적으로는 훨씬 더 큰 축제인 셈이다.



글\_고중속

순천대학교 화학교육과 교수  
jsj@sunchon.ac.kr

글쓴이는 서울대학교 자연대학 화학과를 졸업하고 미국 애크런대학교에서 박사학위를 받았다. 과학문화의 저변 확대에 많은 관심을 갖고 다수의 저서 및 번역서를 펴냈으며, 최근에는 과학을 중심으로 삶의 전반에 이르기까지 저술 활동의 폭을 넓히고 있다. 대표적인 저서로는『세인연』『수학 바로보기』『중학수학 바로보기』『유레카 E=mc<sup>2</sup>』『과학의 성배를 찾아』『아인슈타인, 시간여행을 떠나다』 등이 있고, 주요 역서로는『상대성이란 무엇인가』『물리학 특강』『무영 진공』『우주, 또 하나의 컴퓨터』『수학자는 어떻게 사고를 하는가』『무의 수학 무한의 수학』 등이 있다.

그러므로 월드컵의 일정을 따라 흐르는 고양된 감정의 물결은 충분히 이해할 만하다. 그런데 인간은 감정뿐 아니라 사색의 존재이기도 하며, 후자는 인간을 다른 생물과 구별하는 가장 중요한 본질이기도 하다. 따라서 월드컵 시즌을 맞이하여 축구와 관련된 과학적 측면을 돌아보는 것도 나름대로 의미가 있다고 하겠다. 이를테면 ‘이해하며 즐기기’를 추구한다면 더욱 깊이 있는 흥취가 더해질 수 있을 것이다.

## 세트플레이의 묘미

축구는 기본적으로 발로 공을 다루다가 좋은 기회가 오면 상대편 골문을 향해 차넣고 득점을 하는 경기이다. 따라서 대개의 골은 역동적인 과정에서 만들어진다. 하지만 경기 중에 공이 경기장을 벗어나 스로인 또는 코너킥을 하거나 상대방의 반칙으로 얻은 페널티킥 또는 프리킥을 할 경우에는 정지 상태에서 곧장 골을 얻을 수 있으며, 이를 세트플레이(set-play) 또는 세트피스(set-piece)에 의한 득점이라고 부른다.

예전에는 세트플레이에서의 득점은 축구 본연의 득점이 아니라는 인상이 강했던 탓인지 그다지 중요하게 여겨지지 않았다. 하지만 축구의 전략과 기술이 발전하면서 세트플레이의 중요성이 많이 부각되었고, 실제 통계에서도 30% 가량의 골이 이렇게 얻어지는 것으로 드러남에 따라 일반 팬들도 큰 관심을 기울이게 되었다.

그런데 세트플레이 중에서도 가장 박진감이 있는 것은 프리킥이다. 스로인과 코너킥은 대개 자기편 선수에게 패스하는 중간 단계를 거치므로 곧바로 득점과 연결된 경우가 아주 드물며, 반면 페널티



킥은 실수가 없는 한 거의 득점하므로 긴장감이 그다지 크지 않다. 하지만 프리킥에서는 직접 또는 간접으로 슈팅을 할 수 있어서 여러 가지의 전략을 상정할 수 있고, 이 과정에서 슈팅하는 선수의 순간적 능력이 선명하게 드러나므로 이를 감상하는 재미는 축구의 백미 가운데 하나라고 하겠다. 따라서 아래서는 프리킥과 관련된 과학적 내용을 살펴보기로 한다.

### 바나나킥과 무회전킥의 묘미

프리킥을 하는 곳이 상대편의 골문과 가까워 직접 이든 간접이든 순간적으로 득점을 노릴 수 있는 경우 그 슈팅에서 가장 애용되는 것은 바나나킥이다. 이는 공의 궤적이 바나나처럼 휘어지기에 붙여진 이름으로, 스피크·돌려차기·감아차기 등으로도 부른다. 바나나킥은 공을 찰 때 공의 왼쪽이나 오른쪽 측면에 강한 마찰을 가하면서 차는 것이며, 왼쪽을 감아 차면 공은 왼쪽에서 오른쪽, 그리고 오른쪽을 감아 차면 오른쪽에서 왼쪽으로 휘어져 나아간다.

그런데 이러한 바나나킥이 아주 많이 사용되므로 근래에는 오히려 이와 반대로 회전을 최소화한 무회전킥이 많은 주목을 받고 있다. 언뜻 생각하면 “바나나킥이야 공이 심하게 휘어지므로 막기 어렵다는 게 쉽게 이해된다. 하지만 무회전킥은 회전이 없어서 거의 똑바로 나아간다는 뜻인데, 왜 이게 위협적이란 말일까?”라는 의문이 든다.

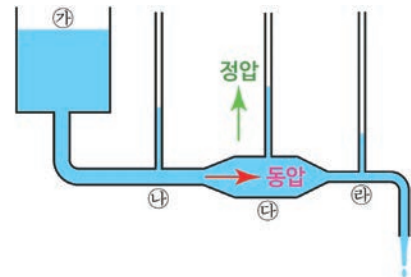
이에 대한 답은 보통의 킥에는 항상 어느 정도의 회전이 가해지므로 사람의 눈은 이처럼 적당히 휘어지는 궤적에 길들여져 있다는 데에서 찾을 수 있다. 따라서 바나나킥의 경우에는 회전이 아주 강해서 생소하게 보이는 반면 무회전킥에서는 회전이 아주 약해서 도리어 생소하게 보인다. 게다가 나중에 이야기하겠지만 무회전킥의 경우에는 무회전이라는 특징 때문에 공 주위로 흐르는 공기의 영향을 더 크게 받는다는 점도 덧붙여진다. 그래서 보통의 경우보다 직선에 가까워 생소한 터에 상하좌우로 불규칙하게 흔들거리므로 골키퍼가 그 궤적을 예측하기가 더욱 어렵다.

바나나킥과 무회전킥의 묘미는 공의 회전과 주변 공기의 영향에 달려 있다. 이와 관련된 과학적 원리에는 베르누이 원리와 마그누스 효과와 각운동량보존법칙이 있다. 참고로 바나나킥은 브라질의 호베르투 카

를루스(Roberto Carlos, 1973~) 그리고 무회전킥은 포르투갈의 크리스티아누 호날두(Cristiano Ronaldo, 1985~)가 가장 유명하다고 할 수 있는데 인터넷에 많은 동영상이 있으므로 쉽게 감상할 수 있다.

### 베르누이 원리

베르누이의 원리(Bernoulli's principle)를 간단히 표현하면 ‘유체(액체·기체)가 흐를 때 속도가 빨라지면 동압은 증가하고 정압은 감소한다’라고 간추릴 수 있다. 여기서 동압은 바람이나 물결이 흐르는 방향으로 미치는 압력을 가리킨다. 반면 정압은 유체가 운동과 무관하게 사방으로 미치는 압력을 가리키며, 흔히 말하는 수압이나 기압은 정압에 해당한다.



▶▶ ㉗의 물통에서 물을 흘리면 물기둥의 높이는 베르누이 원리에 따라 ㉘) ㉙) ㉚)의 순서가 된다.

이쯤에서 “유체가 정지해 있으면 정압만 나타나므로 움직일 때는 동압만 나타나는 것 아닐까? 움직일 때도 정압이란 게 있고, 이게 유체의 속도가 빠를수록 감소한다 말은 무슨 뜻일까?”라는 의문이 들 수 있다. 이를 해소함과 동시에 베르누이 원리를 쉽게 이해하는 데에는 여기의 그림이 도움이 된다.

그림에서 물통 ㉗에 담긴 물은 ㉘) ㉙) ㉚)를 거쳐 아래로 빠져나간다. 그런데 ㉗은 이런 흐름의 원천이므로 그 수면이 가장 높을 것은 당연하다. 그리고 주어진 시간 동안에 흘러가는 물의 양은 ㉘) ㉙) ㉚)의 어느 곳이든 모두 같으므로 유속은 가장 두꺼운 ㉘)에서 가장 느리다. 따라서 여기에 베르누이 원리를 적용하여 생각해보면 수직으로 세워진 물기둥에 채워지는 물의 높이는 (㉗을 포함하여 쓰면) ㉗) > ㉘) > ㉙) > ㉚)의 순서가 된다.

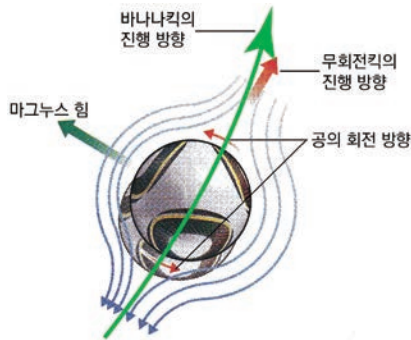
한 가지 유의할 것은 그림에서 흐르는 물의 정압을 물기둥의 높이로 나타냈기에 유체의 정압은 위쪽으로

만 작용한다는 생각을 하기 쉽지만 이는 잘못이라는 점이다. 주사기를 누를 때 빠져나가는 액체에 상관없이 주사기 안에 남아있는 액체가 주사기를 누르는 힘에 버티면서 작용하는 정압은 사방으로 작용한다는 점을 생각하면 쉽게 이해할 수 있다시피, 유체의 정압은 유체가 정지하든 운동하든 언제나 전후·좌우·상하의 온 사방으로 작용한다.

**마그누스 효과와 바나나킥**

마그누스 효과(Magnus effect)는 독자적인 과학적 현상이 아니라 베르누이 원리의 한 예이다. 베르누이 원리는 수학적으로 정확히 다루기 위해 유체에 점성이 없고, 유체와 물체 사이에 마찰이 없으며, 유체의 흐름에 소용돌이가 없다는 등의 까다로운 조건을 부과한다. 따라서 이론적으로는 깔끔하게 보이지만 실제로 응용할 때는 문제의 상황에 맞추어 여러모로 변용해야 한다.

그 대표적인 예가 바로 축구의 바나나킥이다. 만일 베르누이 원리를 엄격히 적용하여 공기와 축구공 사이에 아무런 마찰도 없다고 한다면 축구공은 거의 정확한 구형이므로 공기와 축구공 사이의 상호작용은 아주 미미할 것이고, 따라서 공을 찰 때 아무리 많은 회전을 가하더라도 공의 궤적이 바나나처럼 크게 휘어지는 현상은 나타나지 않을 것이다. 하지만 축구공의 표면은 적당히 거칠게 만들어져 있으므로 공이 날아갈 때는 주위 공기와의 마찰이 어느 방향으로 얼마나 일어나는지에 따라 다양한 궤적을 그리게 된다.



▶▶ 마그누스 효과. 공이 시계 반대 방향으로 회전하면 오른쪽 주변 공기의 유속은 느려지고 왼쪽은 빨라지므로 베르누이 원리에 의해 오른쪽에서 왼쪽으로 가해지는 마그누스의 힘이 발생하여 공은 왼쪽으로 휘어지며 나아간다.

축구에서 공이 회전하지 않을 경우에는(중력에 의

해 자연스런 포물선을 그리며 떨어지는 모습을 제외한다면) 똑바로 나아갈 것이다. 하지만 그림에 보인 것처럼 시계 반대 방향으로 회전하면 표면과 공기의 마찰에 의해 공 오른쪽의 주변 공기는 뒤로 흐르는 유속이 느려지는 반면 공 왼쪽 주변의 공기는 본래의 흐름에 마찰에 의한 가속이 더해져서 유속이 더 빨라진다.

그러면 베르누이 원리에 의해 공 오른쪽 공기의 정압은 높아지고 왼쪽 공기의 정압은 낮아진다. 이에 따라 공은 오른쪽에서 왼쪽으로 밀리는 힘을 받게 되며, 이를 ‘마그누스의 힘’이라고 부른다. 바나나킥은 회전이 지속되는 동안 마그누스 힘을 계속 받게 되므로 결국 이 그림의 경우 왼쪽으로 휘어지는 궤적을 그리게 된다(물론 이와 반대로 시계 방향으로 회전시키면 오른쪽으로 휘어지는 궤적을 그린다).

**신기한 무회전킥**

무회전킥은 너클(볼)킥(knuckle (ball) kick)이라고도 부른다. 야구에서의 너클볼이 거의 무회전의 볼로서 변화가 심한데, 무회전킥도 성질이 이와 비슷하기 때문이다. 너클은 권투나 태권도에서 주먹을 굳게 쥐고 펀치를 날릴 때 쓰는 정권의 핵심적인 관절 부분을 말한다. 하지만 이것과 너클볼이란 이름과의 관련성은 명확히 알려져 있지 않다.

위의 마그누스 효과에 대한 그림에서는 공기의 흐름을 나타내는 유선이 공을 감싸면서 매끄럽게 흐르는 듯 그려져 있다. 하지만 이는 이상적인 경우이고 실제로는 공의 뒤에 복잡한 소용돌이가 나타난다. 그런데 물체가 회전을 하지 않을 때는 이 소용돌이가 심하게 형성되기 쉬우며 여기의 그림은 이를 보여준다.



▶▶ 무회전킥의 불규칙성. 회전이 거의 없어서 공과 공기와의 상호작용에 일관성이 떨어져 심한 소용돌이가 만들어지는 터에, 각운동량마저 작아서 불규칙한 교란에 민감해지므로 공의 궤적을 더욱 예측하기 힘들다.

이처럼 무회전킥의 소용돌이가 심해지는 이유는 적은 회전에서 찾을 수 있다. 공에 충분한 회전이 있을 경우 공과 주변 공기 사이에 어느 정도의 일정한 상호



작용이 형성된다. 하지만 회전이 아주 적으면 공의 회전이 표면과 주변 공기 사이의 마찰을 충분히 극복하지 못하므로 작은 상호작용에 의해서도 심한 소용돌이가 일어난다.

나아가 적은 회전은 이렇게 발생한 소용돌이에 더욱 민감하게 반응하는 증폭 작용을 유발한다. 이 현상은 총알이나 대포알을 회전시켜 발사한다는 점으로부터 쉽게 이해할 수 있다. 이처럼 물체를 회전시키면 물체는 각운동량을 갖게 되는데, 이와 관련해서는 각운동량보존법칙이라는 원리가 있어서 회전이 지속되는 한 물체는 운동 방향을 일정하게 유지하려는 성질을 띠게 된다. 하지만 무회전칙에서는 공에 회전이 가해지지 않으므로 스스로 일으킨 심한 소용돌이에 스스로 크게 휘말려서 예측하기 힘든 불규칙한 궤적이 그려지게 된다.

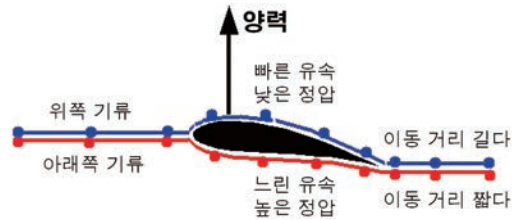
다만 이처럼 민감한 효과는 사뭇 미시적이라는 점에 유의해야 한다. 따라서 조금만 멀리서 보면 무회전칙은 거의 직선으로 매끄럽게 날아가므로 골키퍼가 왜 헤매는지 의아하게 여기기 쉽다. 하지만 공의 미세한 움직임까지 보이는 골키퍼의 입장에서는 보통의 공보다 훨씬 불규칙하게 움직이므로 당황하여 허둥대다가 어이없이 놓치곤 한다.

지금까지 설명한 바나나킥과 무회전볼의 내용은, 쉽게 예상할 수 있듯, 다른 구기 종목들에도 널리 적용된다. 곧 야구, 배구, 탁구, 테니스, 골프 등에서도 이 기교는 다양하게 활용된다. 그런데 아마추어의 경우 회전볼에는 많이 익숙해있지만 무회전볼은 생소하게 느끼는 경우가 많다. 따라서 생활 체육 등에서 틈틈이 활용한다면 게임을 더욱 재미있게 즐길 수 있을 것이다.

### 비행 원리의 올바른 이해

베르누이 원리는 비행기가 날아가는 원리를 설명하는 데에 널리 쓰여 왔다. 이에 따르면 비행기의 날개는 그림처럼 위쪽이 아래쪽보다 조금 더 부푼 모습으로 되어 있어서 전단부터 후단까지의 거리는 위쪽이 아래쪽보다 길다. 따라서 날개 전단에서 나뉜 공기가 후단에서 똑같이 만나려면 위쪽으로 가는 공기가 더 빨리 흘러야 한다. 그러면 베르누이 원리에 의해 날개 아래쪽의 정압이 위쪽의 정압보다 높으며, 이 압력 차

이가 비행기를 떠받치는 양력으로 작용하여 비행기가 날아간다고 설명한다.



▶ 부분적으로 잘못된 양력의 설명. 베르누이 원리에 따라 유속 차이로 양력이 발생한다는 점은 옳다. 다만 그림처럼 상하로 나뉜 공기가 날개의 후단에서 똑같이 만난다는 가정은 틀린 것이다.

하지만 이에 따를 경우 곡예 비행에서 비행기가 뒤집어진 상태에서도 수평으로 잘 날아가는 배면 비행을 설명하기 곤란하다. 게다가 날개 전단에서 나뉜 공기가 후단에서 똑같이 만난다는 것도 이론적으로 아무런 근거가 없는 직관적 단정에 불과하며 실제로 이를 점검한 실험 결과도 통상적인 비행기 날개의 경우 위쪽 공기가 예상보다 훨씬 빠르게 흐른다는 점을 확인하여 이게 잘못된 가정임을 보여주었다. 따라서 위의 설명은 완전한 오류는 아니고 부분적으로만 타당하다.

그러므로 비행의 원리에는 베르누이 원리와 함께 다른 원리도 더해져야 하는데, 그 중 중요한 것은 연날리기를 통해 쉽게 이해할 수 있다. 연은 공중에서 적당한 각도로 바람을 맞도록 만들어져 있다. 그래서 바람을 맞으면 그 (정압이 아니라) 동압에 의해 떠받쳐진다. 이 각도를 공격각(attack angle)이라고 부르며 비행기도 날개의 공격각을 적절히 조정하여 이용하는데, 특히 배면 비행은 이 공격각에 의한 양력으로 이루어진다. 그런데 공격각이 지나치게 크면 비행기가 위로 급격히 솟구치다가 뒤집어지거나 다시 아래로 미끄러지면서 추락할 수 있으므로 주의해야 한다.

베르누이 원리와 공격각에 의한 양력은 각각 공기의 에너지와 운동량의 보존에 근거한다. 그런데 비행의 원리를 완전히 설명하려면 이밖에도 공기의 점성 및 날개 주변의 각 부분에서 공기의 질량 변화 등도 고려해야 하므로 사뭇 복잡하다. 그러나 대체적으로는 베르누이 원리와 공격각에 의한 설명으로 충분하다고 볼 수 있는데, 다만 이 경우 그 한계를 함께 새겨두는 게 바람직하다. ⑤⑦