



Original Article

The Impact of Surface Structure Changes on the Aerodynamic Characteristics of Modern Soccer Balls

Sungchan Hong

Department of Sport and Exercise Science, Seoul Women's University

Article Info

Received 2024. 04. 02.

Revised 2024. 05. 31.

Accepted 2024. 06. 14.

Correspondence*

Sungchan Hong

hong@swu.ac.kr

Key Words

Aerodynamics,
Flight Characteristics,
Soccer Balls, Surface Structure,
Athletic Performance

This work was supported by a research grant Seoul Women's University (2024-0035)

PURPOSE This study comprehensively examined the aerodynamic and flight characteristics of modern soccer balls, focusing on their design evolution and performance attributes. **METHODS** The aerodynamic characteristics of five types of World Cup balls (2006 Germany World Cup, 2010 South Africa World Cup, 2014 Brazil World Cup, 2018 Russia World Cup, 2022 Qatar World Cup) and five types of Euro tournament balls (EURO2008, EURO2012, EURO2016, EURO2020, EURO2024) were examined, along with their respective design changes. **RESULTS** Through detailed analysis, significant variations in aerodynamic properties among soccer balls used in various tournaments were identified. Recent advancements have resulted in faster transitions towards critical Reynolds numbers, indicating improved stability in flight trajectories. This enhancement was attributed to the augmentation of surface roughness, which plays a crucial role in enhancing aerodynamic stability and overall performance. 2D simulations simulating powerful goalkeeper kicks revealed distinct differences in flight distances among different soccer balls; the Jabulani ball used in the 2010 World Cup exhibited the longest flight distance, while that of the 2024 Euro ball was the shortest. **CONCLUSIONS** Variations in surface texture significantly impact aerodynamic properties, affecting flight distance, arrival time, and height. This study underscores the significant design enhancements in modern soccer balls that optimize aerodynamic stability and performance, with modifications aimed at improving flight characteristics and enriching player experience.

서론

현대 축구공은 그 디자인이 매우 다양하게 변화하고 있다. 공의 표면을 구성하고 있는 패널의 모양을 비롯하여 패널 수 역시 다양하다. 또한 최근에는 공 표면의 작은 돌기 구조를 새김으로서 공과 발의 임팩트시의 미끄러짐을 줄이고 있다. 공 표면의 돌기 역시 격자무늬, 삼각형 무늬, 작은 딥플 형태, 작은 돌기 형태 등 다양한 형태의 축구공이 등장하고 있으며 각종 리그나 국제대회에 따라 공인구의 형태가 변화하고 있다.

먼저 월드컵에 처음으로 사용된 공인구는 1970년 멕시코 월드컵에서 처음 선보인 오각형 육각형의 패널 32장(검정과 흰색) 축구공인 텔스타(Telstar, 32panels, Adidas)로, 당시 흑백 텔레비전

에 공이 잘 보이도록 고안된 축구공이 사용되었다. 이 32장의 축구공은 2002 한일월드컵(Fevernova, 32panels, Adidas)까지 공인구로 사용되었다. 하지만, 2006 독일월드컵에 사용된 축구 공인구(Teamgeist, 14panels, Adidas)를 시작으로 지난 2022 카타르월드컵(Al Rihla, 20panels, Adidas)까지 사용된 축구 공인구는 공의 표면을 구성하는 패널수가 계속해서 변화하고 있다. 특히, 2010 남아프리카월드컵에 사용된 공인구(Jabulani, 8panels, Adidas)는 공의 불규칙성 때문에 선수들에게 많은 혼란을 주었다(Goff et al., 2014). 이렇게 매 월드컵마다 서로 다른 패널디자인의 축구 공인구의 등장으로 선수들뿐만 아니라 많은 미디어들이 새로운 축구공에 대해 설명하였으며, 특히 공의 비행 궤도에 크게 영향을 미치는 공력 특성에 관한 연구가 활발하게 진행되었다(Alam et al., 2012; Asai & Hong, 2021; Asai & Seo, 2013; Asai et al., 2020; Goff et al., 2014, 2018, 2022; Hong & Asai, 2014, 2017, 2021; Hong et al., 2015; Kiratidis & Leinweber, 2018; Mehta, 1985; Mizota et al., 2013; Naito et al, 2018; Oggiano and Sætran, 2010;

© This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Passmore et al., 2011; Sakamoto et al., 2021).

다음으로, UEFA 유럽 축구 선수권 대회(UEFA European Championship 유러피언 챔피언십)은 유럽 축구 연맹(UEFA)의 주관으로 개최되는 축구 대회로 유럽에서 규모가 가장 큰 국가 대항 성인 남자 축구 대회이다. 흔히 유로OO(개최 연도)이라 불리며, FIFA 월드컵과 2년 간격으로 4년마다 열리는 대회이다. UEFA European Championship에 사용된 축구공은 유로대회가 개최되는 해의 2년 전에 개최된 월드컵 공인구를 그대로 사용하곤 하였다. 1972년 개최된 유로1972에 사용된 축구공은 2년 전 1970 멕시코 월드컵에서 사용하였던 텔스타(Telstar, 32panels, Adidas)를 그대로 사용하였다. 그리고 그 다음 대회였던 유로1976에서도 유로대회 개최 2년 전에 있었던 1974 서독월드컵 공인구를 그대로 사용하였다. 이처럼 유로대회의 축구 공인구는 대회 2년 전에 개최했던 월드컵 공인구를 그대로 사용해왔다. 하지만, 유로2004에서는 최초로 유로 대회만을 위해 도입된 공인구(Roteiro, 32panels, Adidas)가 등장하였으며, 로테이로는 축구공의 기존 제작 방식(실박음질)이 아닌 본드접착 방식(본딩방식)을 처음으로 채택하여 만들어졌다. 이와 같은 본딩방식은 실박음질에 비해 상대적으로 공을 고른 형태를 유지하게 하였으며 기존의 공인구에 비해 방수성이 좋아졌다.

그리고 유로2008에 사용된 공인구(Teamgeist2, 14panels, Adidas)는 2006 독일월드컵 공인구와 동일한 패널디자인이었지만, 패널 표면에 작은 돌기를 새김으로서 월드컵 공인구와 조금씩 디자인면에서 차이를 두기 시작했다. 특히, 유로2012에서는 2010 남아프리카월드컵 공인구(Jabulani, 8panels, Adidas)의 불평으로 인해, 새롭게 만들어진 탱고12(Tango12, 32panels, Adidas)를 선보였다. 이것은 지금까지 월드컵-유로의 동일한 축구공 디자인을 처음으로 바꾼 대회가 되었다. 그리고 유로2016 공인구(Beau Jeu, 6panels, Adidas)에서는 대회 2년 전인 2014 브라질월드컵에서 사용되었던 혁신적인 디자인의 공인구(Brazuca, 6panels, Adidas)와 동일한 디자인(패널수와 형태)이지만, 조금 다른 패널 돌기 모양(격자무늬)을 사용되었다. 그리고 유로2020(Uniforia, 6panels, Adidas)에서는 2018 러시아월드컵 공인구(Telstar18, 6panels, Adidas)와 동일한 디자인(패널수와 모양, 돌기)의 축구공을 공인구로 채택하여 사용하였다. 하지만, 유로2024에 사용될 축구 공인구(Fussballliebe, 20panels, Adidas)는 2022카타르월드컵 공인구(Al Rihla, 20panels, Adidas)와는 패널수와 형태면에서 동일하나, 표면에 덤플과 원형 구조를 더함으로서 더욱 복잡해졌다.

지금까지 현대 축구공의 패널변화에 따른 공력특성에 관한 연구는 다양하게 진행되어 왔다(Asai & Seo, 2013; Goff et al., 2020;

Hong & Asai, 2014; Hussain et al., 2019; Sakamoto et al., 2021). 하지만, 대다수의 선행연구는 월드컵 공인구 변화에 초점이 맞춰져 있었으며, 월드컵 2년 후에 개최되고 있는 유로대회 공인구에 대해서는 거의 연구가 되어 있지 않다.

이에 본 연구에서는 유로2024 공인구를 비롯하여 최근 유로대회에서 사용된 공인구를 대상으로 그들의 공력특성이 월드컵 공인구와 어느 정도 상이한지 비교 검토하였다.

연구방법

이번 연구에서는 5종류의 월드컵 공인구(2006 독일월드컵, 2010 남아프리카월드컵, 2014 브라질월드컵, 2018 러시아월드컵, 2022 카타르월드컵)와 5종류의 유로대회 공인구(유로2008, 유로2012, 유로2016, 유로2020, 유로2024)를 이용하여 각각의 패널 디자인 변화와 함께 공력 특성을 검토하였다.

축구공 디자인의 변천

최근 국제대회 공인구는 다양하게 변화가 일어나고 있다. <Figure 1>에서 볼 수 있듯이, 2006 독일월드컵 공인구(Teamgeist)까지는 공 표면이 매끄러운 형태였지만, 유로2008(Teamgeist 2)을 시작으로 공 표면의 모양(texture)이 조금씩 바뀌고 있음을 확인할 수 있다. <Figure 1>처럼 월드컵에서 사용된 공인구와 같은 패널(panel) 디자인을 이용하여 2년 후인 유로 대회의 공인구로 사용해왔다. 그러나, 표면 디자인은 유로2008을 시작으로 작은 돌기(pimple)가 도입되었으며, 2010 남아프리카월드컵(Jabulani)에서는 물결무늬 모양(wavelike rectangle)이 도입되었고, 2년 후인 2012유로(Tango12)에서는 다시 작은 돌기(pimple) 형태를 선보였다. 2014 브라질(Brazuca) 공인구에는 작은 돌기의 물결 패턴(wavelike small pimple)이 등장하였고, 2년 후 동일한 패널구조의 공인구(유로2016)에서는 작은 사각형 모양의 돌기(small square)가 도입되었다. 2018 러시아월드컵 공인구(Telstar18)는 유로2016과 동일한 표면 돌기 모양이었지만, 패널구조의 디자인이 변화하였다. 유로2020 공인구는 2년전 러시아월드컵 공인구와 같은 패널디자인에 동일한 표면 형태를 보였다. 그리고 2022 카타르월드컵에서는 이전과는 조금 더 다른 독특한 형태의 패널 구조와 표면디자인(square and rhombus)을 선보였다. 그리고 유로2024 공인구는 2022 카타르월드컵 공인구와 동일한 패널구조에 다른 표면디자인(덤플 형태의 돌



Fig. 1. Recent World Cup and Euro Tournament soccer balls

기와 원형 돌기 구조(dimple and circle))의 축구공을 선보였다. 이렇게 2008년부터 계속해서 공의 패널구조와 함께 표면 디자인도 변화하고 있음을 확인할 수 있다.

풍동실험

풍동실험은 일본 츠크바대학교 캠퍼스내에 있는 풍동실험(San Technologies Co., LTD)을 이용하였다. 이 풍동의 최대풍속은 약 55m/s(약 200km/h)이며, 실험을 위해 설정된 바람은 1.5m×1.5m의 정사각형 통로를 통해 일정하게 불어온다. 이때의 풍속분포는 ±0.5% 이내이며, 난류정도는 약 0.1% 이하로 스포츠현장에서 의 현상에 대한 실험에 적합하다. 본 실험에서는 이 풍동을 이용하

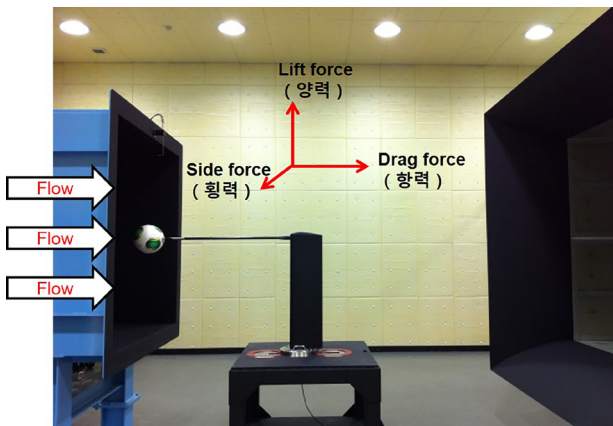


Fig. 2. Wind tunnel experiment

여 10종류의 서로 다른 축구 공인구를 사용하여 각각의 공력특성을 계속하였다. 실내 풍동을 이용하여 외부 환경을 차단하였으며, 실내 온도(20~30°), 습도(40~60%)를 유지하며 실험을 진행하였다. 풍속 (U)은 7m/s에서 35m/s로 설정하였으며, 각각 1m/s의 간격으로 공기력(공력특성)을 측정하였다. 축구공에 작용하는 힘(force)은 크게 방향에 따라 세종류로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 비행거리에 영향을 줄 수 있는 항력(drag force)을 중심으로 검토하였다. 항력은 가늘고 긴 막대 형태의 스팅타입 6분력검출기(LMC-61256, Nissho Electric Works)를 이용하여 항력을 계속하였다(Figure 2). 그리고 본 연구에서 계속된 공기력으로부터 아래와 같은 식을 이용하여 항력계수(C_d)를 구하였다(식 (1)).

$$C_d = \frac{2D}{\rho U^2 A} \tag{1}$$

위의 식에서, ρ 는 공기의 밀도($\rho=1.2\text{kg/m}^3$)를 의미하며, U 는 유속(풍속)을, A 는 축구공의 단면적으로 $A=\pi \times 0.11^2=0.038\text{m}^2$ 로 설정하였다.

또한 본 연구에서는 축구공의 공력특성을 비교하기 위하여 항력계수와 함께 임계 레이놀즈수(Re_{crit})를 사용하였다. 여기서 레이놀즈수(Re)는 물체의 관성력과 점성력의 비를 말하는 것으로, 층류(laminar)와 난류(turbulence)를 구분하기 위한 척도가 된다(식 (2)).

$$Re = \frac{UD}{\nu} \tag{2}$$

위의 식에서, U 는 유속(유체의 평균속도), ν 는 유체의 점성 계수를, D 는 축구공의 직경으로 설정하였다.

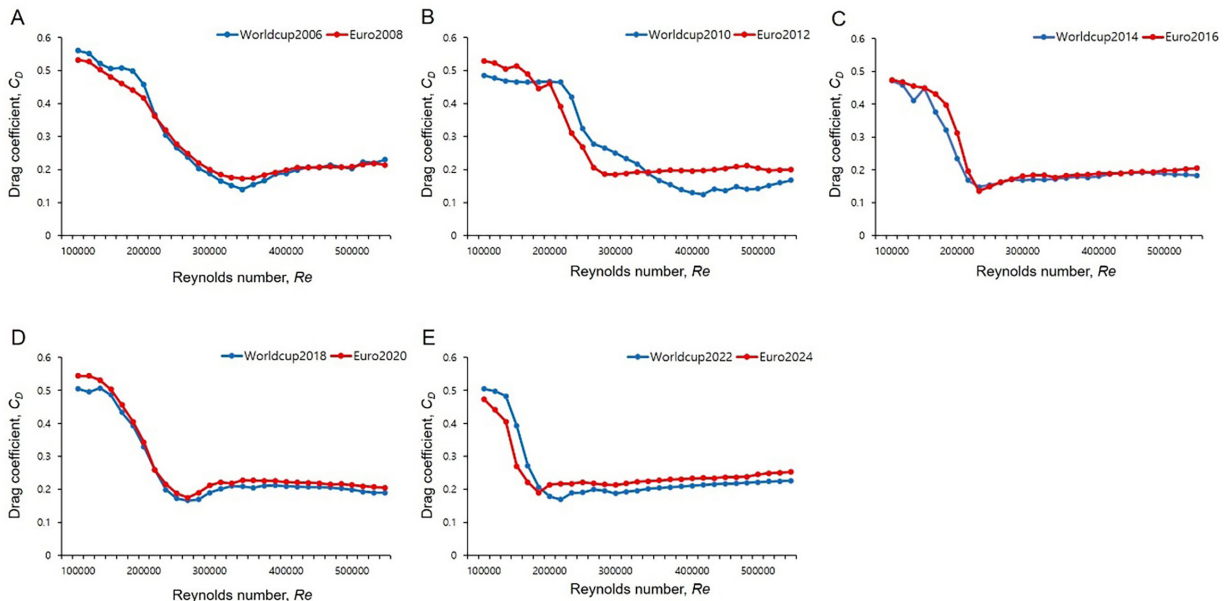


Fig. 3. Variation in drag coefficients for soccer balls. A represents the results for the 2006 World Cup and 2008 Euro balls, B represents the 2010 World Cup and 2012 Euro balls, C represents the 2014 World Cup and 2016 Euro balls, D represents the 2018 World Cup and 2020 Euro balls, and E represents the 2022 World Cup and 2024 Euro balls. Blue indicates the World Cup balls, while red indicates the Euro balls.

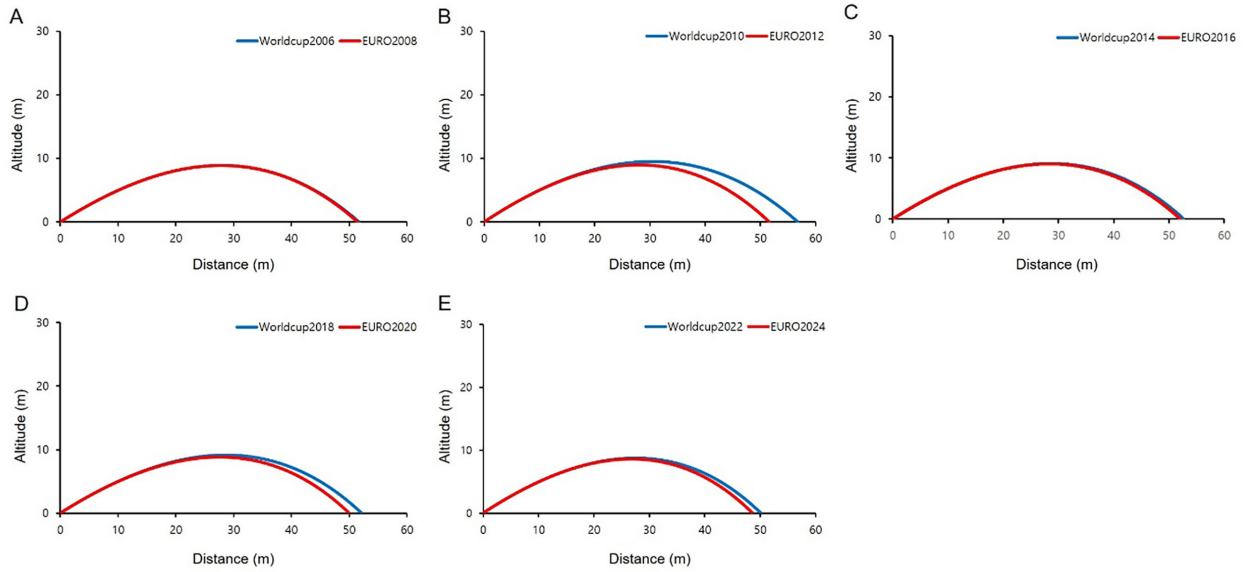


Fig. 4. Comparison of flight distance for each soccer ball (Initial velocity: 30m/s, launch angle: 30 degrees).

비행궤도 시뮬레이션

각각의 축구공에 대한 비행궤도는 풍동실험에서 얻은 항력데이터를 이용하여 계산하였다. 본 연구에서 기초연구로 2차원 비행 시뮬레이션을 사용하였다(Goff & Carré, 2009; Goff et al., 2022; Hong & Asai, 2021). 2차원 비행 시뮬레이션 방정식은 다음과 같다.

$$ma_h = -D \cos \gamma \tag{3}$$

$$ma_v = -D \sin \gamma - mg \tag{4}$$

위의 식에서, m 은 축구공의 무게를 나타내고, a_h 는 공의 수평 가속도, a_v 는 공의 수직 가속도를 의미한다. 그리고 g 는 중력가속도를 나타내며, γ 은 공 비행궤도의 초영각(initial attack angle)을 의미한다.

그리고 본 연구에서는 축구공이 무회전으로 날아갈 때 나타나는 현상인 너클이펙트(Asai & Kamemoto, 2011, Hong et al., 2010)의 영향은 무시하였다. 또한 축구공에 작용한 양력(Lift force)과 횡력(Side force)도 사용하지 않았다.

연구결과

풍동실험을 이용한 각각의 공인구에 대한 항력계수 비교

〈Figure 3〉은 각각의 축구 공인구의 공력 특성을 나타낸 그래프이다. 각 축구공의 초임계 항력계수(Re_{crit})를 비교해보면, 2006 독일월드컵 공인구가 약 $0.14(Re=3.4 \times 10^5)$ 이며, 유로2008 공인구가 약 $0.17(Re=3.4 \times 10^5)$ 로 나타났다. 2010 남아프리카월드컵 공인구는 약

$0.13(Re=4.0 \times 10^5)$, 유로2012 공인구는 약 $0.19(Re=3.4 \times 10^5)$ 로 나타났다. 그리고 2014 브라질월드컵 공인구는 약 $0.15(Re=2.3 \times 10^5)$, 유로2016 공인구는 약 $0.14(Re=2.3 \times 10^5)$ 로 나타났으며, 2018 러시아월드컵 공인구는 약 $0.17(Re=2.7 \times 10^5)$, 2020유로 공인구는 약 $0.17(Re=2.7 \times 10^5)$ 로 나타났다. 그리고 2022 카타르월드컵 공인구는 약 $0.17(Re=2.2 \times 10^5)$, 유로2024 공인구는 약 $0.19(Re=1.9 \times 10^5)$ 로 나타났다.

각 공인구의 2D 비행 시뮬레이션 결과

1. 비행거리의 비교

〈Figure 4〉는 각각의 축구공에 대한 비거리를 비교한 그래프로, 골키퍼가 강하게 툭을 하는 경우로 상정하여, 공의 초속도는 30m/s(108km/h)로 하였으며, 공의 발사각도는 30도로 설정하였다. 〈Figure 4〉에서 볼 수 있듯이, A(2006 독일월드컵 공인구와 유로2008 공인구)와 C(2014 러시아월드컵 공인구와 유로2016 공인구)는 비행거리에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 하지만, B, D, E의 축구공들은 같은 패널디자인의 월드컵이후의 유로대회 공인구임에도 불구하고 비거리가 상이함을 알 수 있었다. 또한, 같은 툭 조건에서 10종류의 축구공의 비거리를 비교해보면, 2010 남아프리카월드컵 공인구(자블라니)가 56.8m로 가장 멀리 날아가는 것으로 나타났고, 유로2024 공인구(Fussballliebe)가 가장 짧은 비거리(48.6m)를 나타냈다. 그리고 2006 독일월드컵 공인구의 비거리는 51.7m로 나타났으며, 유로2008 공인구는 51.3m로 나타났다. 또한 유로2012 공인구는 51.6m, 2014 브라질월드컵 공인구는 52.6m, 유로2016 공인구는 52.0m, 2018 러시아월드컵 공인구는 52.0m로 나타났다. 그리고 가장 최근에 개최되었던 유로2020 공인구는 50.0m, 2022 카타르월드컵 공인구는 50.1m로 나타나, 이들 공인구들 사이에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다.

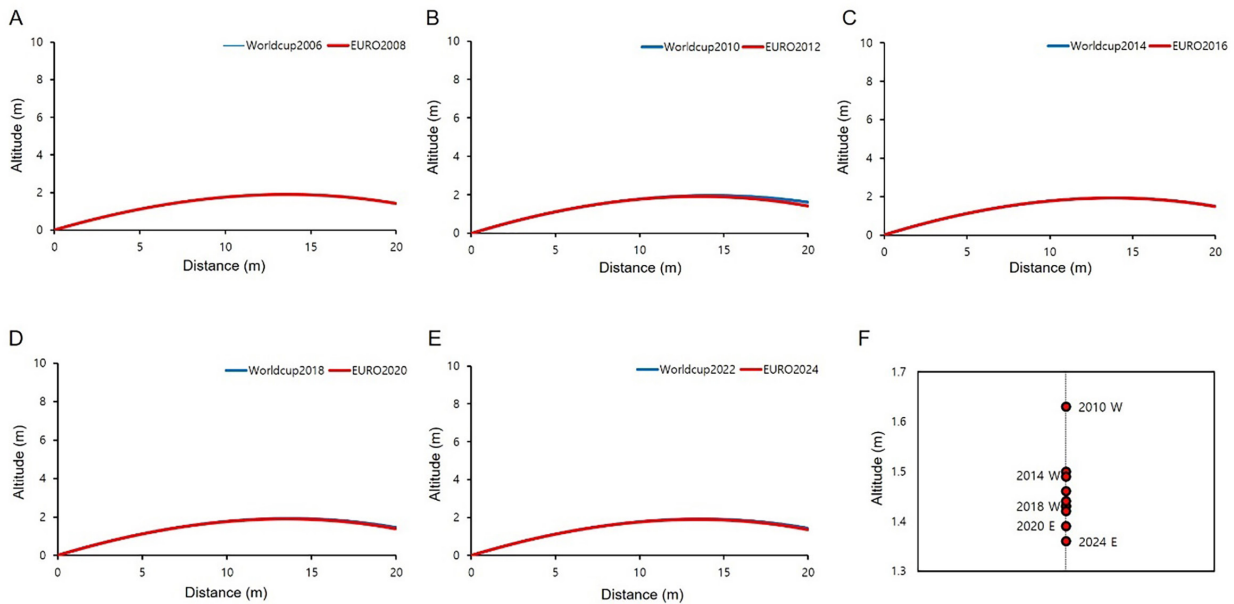


Fig. 5. Comparison of impact points for each soccer ball (Initial velocity: 25m/s, launch angle: 15 degrees). A represents the soccer balls used in the 2006 World Cup and 2008 Euros, B represents the balls used in the 2010 World Cup and 2012 Euros, C represents the balls used in the 2014 World Cup and 2016 Euros, D represents the balls used in the 2018 World Cup and 2020 Euros, and E represents the balls used in the 2022 World Cup and 2024 Euros. F indicates the height of each ball's arrival at the goalpost. Blue represents FIFA World Cup soccer balls, while red represents UEFA European Championship soccer balls.

2. 탄착점과 도착시간의 비교

〈Figure 5〉는 골대 앞 20미터에서의 프리킥을 상정한 것으로, 각각의 축구공에 대해 골대 도달 시의 높이를 비교한 그래프이다. 이때 설정된 공의 초속도는 25m/s(90km/h)로 하였으며, 공의 발사 각도는 15도로 설정하였다. 〈Figure 5F〉에서 볼 수 있듯이, 골대 도착 시의 축구공의 높이는 2010 남아프리카월드컵 공인구인 자블라니가 다른 공인구에 비해 상대적으로 매우 높은 위치(1.63m)에 있는 것으로 나타났다. 반면 가장 낮은 탄착점을 보인 공인구는 유로 2024 공인구로 1.36m를 보여 자블라니와는 비교해 약 27cm의 차이를 보였다. 그리고, 골대 앞 20미터에서 동일한 조건으로 프리킥된 각각의 공인구가 골대에 도착하는 시간을 살펴보면, 자블라니(2010 남아프리카월드컵)가 0.893초로 가장 빨리 도착하는 것에 비해, 유로2024 공인구인 Fussballliebe가 0.939로 가장 늦게 도달하는 것으로 나타났다. 그리고 다른 공인구들의 골대까지의 도착시간은 약 9.1초에서 9.3초 사이로 나타났다(Table 1).

Table 1. Comparison of height and arrival time at goal for each soccer ball

	height (m)	time (s)
2006 World Cup	1.43	0.925
EURO 2008	1.43	0.926
2010 World Cup	1.63	0.893
EURO 2012	1.42	0.928
2014 World Cup	1.50	0.915
EURO 2016	1.49	0.918
2018 World Cup	1.46	0.924
EURO 2020	1.39	0.934
2022 World Cup	1.44	0.926
EURO 2024	1.36	0.939

논의

본 연구에서는 스포츠용품 중에서도 디자인에 있어서 가장 빈도 높게 바뀌고 있는 현대 축구공을 대상으로 공력 특성과 비행 특성에 대해 살펴보았다.

먼저 풍동실험을 통해 얻은 축구 공인구들의 공기력(항력계수)를 살펴보면, 공인구 종류에 따라 공력 특성이 변하는 것을 알 수 있었다. 특히, 공 주위의 공기흐름이 층류에서 난류로 급격하게 변하는

지점인 임계레이놀즈수(Re_{crit})를 보면, 2014 브라질월드컵 공인구 이후(2014년부터 2024년까지)와 그 이전의 월드컵 공인구(2006년부터 2012년까지의 공인구)에 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 〈Table 2〉를 보면 2006년부터 2012년 공인구까지의 초임계로의 이동이 늦는 것(유속이 빠름; 22m/s~26m/s)으로 나타났다. 반면에 2014년부터 2024년까지의 공인구의 초임계점으로 이동하는 속도가 12m/s에서 17m/s 범위로 나타났다. 이것은 종전(2006년부터 2012년까지)의 공인구는 축구공의 임계점까지 도달하기 위한 속도 구간이 빨랐기 때문에, 그 전까지의 유속에 매우 불안한 상태였음을 의미한

Table 2. Comparison of critical Reynolds numbers for each soccer ball

	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	2024
Re_{crit}	0.14	0.17	0.13	0.19	0.15	0.14	0.17	0.27	0.17	0.19
Velocity(m/s)	22	22	26	22	15	15	17	17	14	12

Table 3. Comparison of drag coefficients for each soccer ball

	2006	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020	2022	2024
$Re=3.0 \times 10^5$ (approximately 19m/s)	0.18	0.20	0.25	0.18	0.17	0.18	0.19	0.21	0.19	0.21
$Re=5.0 \times 10^5$ (approximately 32m/s)	0.20	0.20	0.14	0.20	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.24

다. 다시말해, 매우 강한 슈팅에 사용하는 속도 구간에 미치지 못하는 속도 구간(10m/s~20m/s, 자블라니의 경우는 10m/s~25m/s)에서의 공 주위의 공기흐름이 층류에서 난류로의 천이(transition flow)중인 것으로 생각할 수 있기 때문에 축구공의 비행 궤도가 불안정하게 될 가능성이 있었다. 하지만, 최근 2014년 이후의 축구 공 인구의 임계점을 보면, 층류에서 난류로의 이동이 현저히 빠르게 이뤄지는 것(12m/s~17m/s)을 알 수 있었다. 즉, 초임계점 이후의 공의 스피드 구간이 되는 약 15m/s 혹은 18m/s 이상에서의 축구공에 비행궤도는 종전의 공인구에 비해 상대적으로 안정적이라고 예측할 수 있다. 이것은 층류에서 난류로 이동하는 속도구간(범위)이 종전보다 매우 짧아졌다는 것으로, 최근의 축구공은 패널의 모양과 이음새의 구조의 다양성, 그리고 공 표면구조에 있어서 종전의 공인구에 비해 보다 복잡하게 변화했기 때문으로 생각할 수 있으며, 최근의 발표되는 축구 공인구는 표면 구조(표면 거칠기)가 상대적으로 크게 하여 공의 비행 안정성을 유도하고 있다(Asai & Hong, 2021; Goff et al., 2020, 2022; Hong & Asai, 2017, 2020, 2021; Hong et al., 2015).

(Table 3)은 두 속도지점에서의 항력계수를 나타낸 것이다. 총 10종류의 축구공에 대해 비교를 해보면, 2010년 공인구 자블라니를 제외한 다른 공인구들은 상대적으로 유사한 결과를 보이고 있다. 자블라니의 경우, 레이놀즈수가 3.0×10^5 (약 19m/s)에 있어 다른 공인구들에 비해 항력계수가 0.25로 나타나 가장 큰것으로 확인되었다. 반면에 레이놀즈수 5.0×10^5 (약 32m/s)에 있어서는 다른 공인구들에 비해 항력계수(0.14)가 가장 작은 것으로 나타났다. 이것은 강한 슈팅의 경우, 다른 공인구에 비해 공기저항(항력)이 작아 공의 비거리가 길고 스피드가 빠를 것으로 판단된다. 또한 이 결과는 시뮬레이션 결과에서도 확인되었으며, 선행연구의 결과와 유사한 것으로 나타났다(Goff et al., 2014, 2022; Hong & Asai, 2014).

그리고 풍동실험에서 얻은 결과를 토대로 2D 시뮬레이션을 이용하여 공의 비행거리와 탄착점(도착지점), 도착시간을 비교 검토하였다. 골키퍼의 강한 롱킥으로 생각할 수 있는 조건(초속도 30m/s, 발사각도 30°)에서는 2010 남아프리카월드컵 공인구(자블라니)가 56.8m로 가장 멀리 날아가는 것으로 나타났고, 유로2024 공인구(Fussballliebe)가 가장 짧은 비거리(48.6m)를 나타냈다. 또한 동일 조건에서의 다른 공인구들의 비거리는 51m~53m 사이로 유사하게 나타났다. 가장 최근에 사용된 유로2024 공인구의 경우, 공 표면 구조가 매우 깊고 다양한 것이 육안으로도 확인이 될 만큼 확연하게 큰

것을 알 수 있는데, 이처럼 공 표면의 거칠기는 공의 공력 특성에 영향을 주게 되며 이는 공의 비 거리에 큰 영향을 주는 것으로 보고되고 있다(Goff et al., 2018, 2020; Hong et al., 2019; Naito et al., 2018).

그리고 이와 같은 공 표면 구조 차이는 공의 비거리의 변화뿐만 아니라, 공의 도달시간이나 도달 시의 높이 등도 함께 바뀌기 때문에 선수들의 경기 퍼포먼스에 크게 영향을 줄 것으로 판단된다.

결론 및 제언

이번 연구에서는 그동안 알려지지 않았던 유로대회 공인구와 월드컵 공인구의 공력 특성 및 비행 특성을 비교함으로써 최근 개최된 다섯 번의 유로대회와 다섯 번의 월드컵에 사용된 공인구에 대해 처음으로 비교 검토하였다. 10번의 대회를 개최하는 동안 가장 크게 변화한 것은 2006년까지 매끄러웠던 공의 표면 구조가 2008년 이후부터 바뀌게 되었다는 것과 매년 개최되는 대회마다 패널 조각 등의 디자인 변화와 함께 표면 구조(돌기 모양 등)도 다양하게 변화하고 있다는 것이다. 그리고 이와 같은 변화는 공의 공력 특성에 영향을 주게 되어 공의 비거리를 비롯한 도달 시간과 도착 지점 변화 등 다양하게 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 대회에 따라 공인구가 바뀌고 있는 축구 경기에 있어서는 선수들이 각각의 공인구의 특성을 정확하게 파악하여 적용하는 것이 선수들의 퍼포먼스에 영향을 주기 때문에 매우 중요한 부분이라고 설명할 수 있다. 또한, 최근에는 선수뿐만 아니라 코칭 스태프를 비롯하여 일반인들 사이에서도 축구공의 종류에 따라 공력 특성이 변하기 때문에 경기력에 영향을 줄 수 있음을 인지하고 있다. 이와 같은 공인구의 다양한 디자인 변화는 스포츠과학 발전뿐만 아니라 스포츠 과학을 이해하는데 큰 도움을 줄 것으로 사료된다.

CONFLICT OF INTEREST

논문 작성에 있어서 어떠한 조직으로부터 재정을 포함한 일체의 지원을 받지 않았으며 논문에 영향을 미칠 수 있는 어떠한 관계도 없음을 밝힌다.

AUTHOR CONTRIBUTION

Conceptualization: Sungchan Hong, Data curation: Sungchan Hong, Formal analysis: Sungchan Hong, Methodology: Sungchan Hong, Project administration: Sungchan Hong, Visualization: Sungchan Hong, Writing-original draft: Sungchan Hong, Writing-review & editing: Sungchan Hong

참고문헌

- Alam, F., Chowdhury, H., Stemmer, M., Wang, Y., & Yang, J. (2012). Effects of surface structure on soccer ball aerodynamics. *Procedia Engineering*, 34, 146-151.
- Asai, T., & Hong, S. (2021). Aerodynamics of the newly approved football for the English Premier League 2020-21 season. *Scientific Reports*, 11, 9578.
- Asai, T., & Kamemoto, K. (2011). Flow structure of knuckling effect in footballs. *Journal of Fluids and Structures*, 27(5-6), 727-733.
- Asai, T., & Seo, K. (2013). Aerodynamic drag of modern soccer balls. *SpringerPlus*, 2, 171.
- Asai, T., Nakanishi, Y., Akiyama, N., & Hong, S. (2020). Flow visualization of spinning and nonspinning soccer balls using computational fluid dynamics. *Applied Sciences*, 10(13), 4543.
- Goff, J. E., & Carré, M. J. (2009). Trajectory analysis of a soccer ball. *American Journal of Physics*, 77(11), 1020-1027.
- Goff, J. E., Asai, T., & Hong, S. (2014). A comparison of Jabulani and Brazuca non-spin aerodynamics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 228(3), 188-194.
- Goff, J. E., Hong, S., & Asai, T. (2018). Aerodynamic and surface comparisons between Telstar 18 and Brazuca. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 232(4), 342-348.
- Goff, J. E., Hong, S., & Asai, T. (2020). Effect of a soccer ball's seam geometry on its aerodynamics and trajectory. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 234(1), 19-29.
- Goff, J. E., Hong, S., & Asai, T. (2022). Aerodynamic comparisons between Al Rihla and recent World Cup soccer balls. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*.
- Hong, S., & Asai, T. (2014). Effect of panel shape of soccer ball on its flight characteristics. *Scientific Reports*, 4, 5068.
- Hong, S., & Asai, T. (2017). Aerodynamic effects of dimples on soccer ball surfaces. *Heliyon*, 3(10), E00432.
- Hong, S., & Asai, T. (2020). Effect of surface groove structure on the aerodynamics of soccer balls. *Applied Sciences*, 10(17), 5877.
- Hong, S., & Asai, T. (2021). Aerodynamic differences between new and used soccer balls. *Applied Sciences*, 11(16), 7204.
- Hong, S., Asai, T., & Seo, K. (2015). Visualization of air flow around soccer ball using a particle image velocimetry. *Scientific Reports*, 5, 15108.
- Hong, S., Chung, C., Nakayama, M., & Asai, T. (2010). Unsteady aerodynamic force on a knuckleball in soccer. *Procedia Engineering*, 2(2), 2455-2460.
- Hong, S., Goff, J. E., & Asai, T. (2019). Effect of a soccer ball's surface texture on its aerodynamics and trajectory. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 233(1), 67-74.
- Hussain, S. B., Shah, S. I. A., & Khan, M. K. A. (2019). Aerodynamic design considerations for a soccer ball. *Proceedings of the 6th International Conference on Aerospace Science and Engineering (ICASE)*, 1-16.
- Kiratidis, A. L., & Leinweber, D. B. (2018). An aerodynamic analysis of recent FIFA World Cup balls. *European Journal of Physics*, 39(3), 034001.
- Mehta, R. D. (1985). Aerodynamics of sports balls. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 17, 151-189.
- Mizota, T., Kurogi, K., Ohya, Y., Okajima, A., Naruo, T., & Kawamura, Y. (2013). The strange flight behaviour of slowly spinning soccer balls. *Scientific Reports*, 3, 1871.
- Naito, K., Hong, S., Koido, M., Nakayama, M., Sakamoto, K., & Asai, T. (2018). Effect of seam characteristics on critical Reynolds number in footballs. *Mechanical Engineering Journal*, 5(1), 17-00369.
- Oggiano, L., & Sætran, L. (2010). Aerodynamics of modern soccer balls. *Procedia Engineering*, 2, 2473-2479.
- Passmore, M., Rogers, D., Tuplin, S., Harland, A., Lucas, T., & Holmes, C. (2011). The aerodynamic performance of a range of FIFA-approved footballs. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*, 226(1), 61-70.
- Sakamoto, Y., Hiratsuka, M., & Ito, S. (2021). Effect of soccer ball panels on aerodynamic characteristics and flow in drag crisis. *Applied Sciences*, 11(1), 296.

현대 축구공의 표면구조 변화가 공력 특성에 미치는 영향

홍성찬

서울여자대학교 스포츠운동과학과 조교수

[목적] 본 연구는 현대 축구공의 공기역학적 및 비행 특성을 종합적으로 검토하며, 특히 그들의 디자인 진화와 공력 특성 변화에 중점을 두었다.

[방법] 풍동실험을 이용하여 최근 국제대회에서 사용되었던 10종류의 축구공을 대상으로 공기역학적 특성을 분석하여 비교 검토하였다.

[결과] 풍동실험의 결과, 종전의 축구 공인구들과 최근 사용되었던 공인구들 사이에 공기역학적 특성에 중요한 차이가 있음을 확인하였다. 특히 지난 2014월드컵 공인구 이후의 축구 공인구들(유로2016, 2018월드컵, 유로2020, 2022 월드컵, 유로2024)은 비행 궤도에서 개선된 안정성을 나타내는 임계점으로의 천이를 더욱 빠르게 이뤄지는 것(low speed range)을 확인하였다. 또한 이것은 축구공 표면의 거칠기를 크게함으로써 공의 비거리를 조절하는 것으로 판단할 수 있다.

[결론] 본 연구의 결과는 축구공의 표면구조의 변화가 공기역학적 특성에 영향을 주게 되어, 축구공의 비행거리, 도달 시간 및 높이에 영향을 준다는 것을 확인하였다.

주요어

공기역학, 비행궤도, 축구공, 표면구조, 경기력