



**AVIAV AEROV AEROTEST
WHITE PAPER**

2015.8

작성자: 아비아브 개발부

*본 백서의 데이터와 이미지, 내용은 아비아브의 자산입니다. 무단으로 복사, 인용, 수정을 금합니다.

개요

1. 백서의 제작 목적

최근의 자전거 업계는 카본파이버라는 새로운 소재를 전반적으로 사용하고 있습니다. 80~90년대에는 소재의 가격과 형상화의 어려움으로 인해 일부 항공업계에서만 사용되었던 소재이지만, 최근 카본파이버의 가격이 상대적으로 저렴해지고, 형상화를 위한 몰드제작이나 제조공정이 개발되면서 자전거를 비롯한 레크레이션 업계 전반적으로 카본의 사용이 늘어나고 있는 추세입니다. 또한 컴퓨팅 기술의 발전과 더욱 나은 형상을 찾고자 하는 업체들의 노력으로 인하여 휠에 있어서도 다양한 시도와 개발이 이루어지고 있습니다.

그 결과 업체들의 림 형태에 대한 끊임없는 연구 개발과 테스트로 림의 에어로 효과가 증명되었으며, 뚜르 드 프랑스나 지로 데 이테리에 참가하는 탑프로 레이서들로부터 증명된 에어로 휠의 효과는 이제 아마추어 레이서들에게까지 중요한 이슈가 되었습니다.

본 백서는 아비아브의 새로운 에어로브(가칭) 휠의 형상을 개발하는데 있어서, 시중에 판매되고 있는 에어로형태의 휠들을 CFD기법으로 해석하여 각 형상 값을 비교 분석하고, 새로 개발하는 휠의 최적의 형상을 개발하는데 그 목적이 있습니다.

테스트하는 휠은 현재 시판되는 제품을 기준으로 컴퓨터 모델링을 통한 시뮬레이션을 하였으며, 휠의 진행방향을 기준으로 0도에서 20도까지의 바람의 영향을 비교 분석 하였습니다. 바람은 시속 40km/h를 기준으로 하였고 점성공식은 RANS(Reynolds-Averaged Navier Stokes)모델을 사용하였습니다. 각각의 휠은 휠의 진행방향으로의 항력(Drag Force), 항력계수와 그 수직방향으로의 측력(Side Force), 측력계수를 측정하여 비교하는 방법을 택하였습니다. 전반적인 비교분석을 위해서 총 30개의 모델(자사제품 포함)을 2D 모델링하여 측정하였으며, 최종 개발된 제품의 성능을 테스트 하기 위해 휠을 3D모델링을 하여 항력, 항력계수, 측력, 측력계수, 회전관성, 스포크 항력, 최적화 수정 등을 하였습니다.

이러한 비교분석을 통해서 아비아브 에어로브 휠을 비롯한 에어로 휠의 특징과 장점과 단점을 살펴보고, 아비아브 에어로브 제품의 전반적인 특징을 수치적으로 비교하여 보겠습니다.

2. 에어로 형태의 중요성

최근 레이싱용 자전거 휠의 에어로 형태는 가장 중요한 포인트입니다. Greenwell et.al. 의 실험에 따르면 자전거가 실제 라이더가 올라가서 타는동안 받는 항력중 휠이 차지하는 항력은 10~15%라고 합니다. 또한 휠의 형태를 에어로 형태로 바꿀시에 전체항력의 2~3%의 항력을 줄이는 효과를 발휘한다고 합니다. 실제로 다른 실험에서도 항력이 줄어들면 40km의 거리를 48km/h의 등속도로 진행할 때 보존할 수있는 파워는 림의 형태에 따라 약 10~30W입니다. 이는 에어로 형태의 휠과 같은 항력계수를 가진 비에어로형태의 휠을 비교하면 같은 파워로 달릴 때 속도에 따라 최대 약 2분에서 40초 정도의 단축효과를 얻을 수 있습니다.

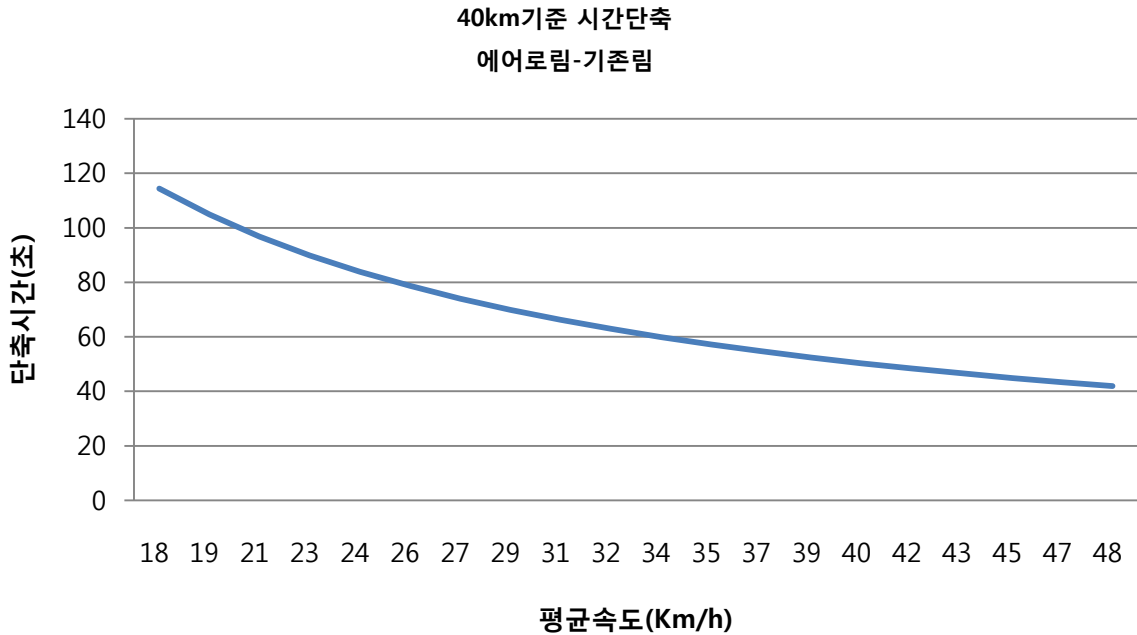


표 1 에어로 효과에 따른 시간단축표

표1을 보면 40km의 거리를 달릴때 에어로림(항력계수 Cd=0.085)과 기존형태림(항력계수 Cd=0.088) 사이의 시간 단축을 표로 나타냈습니다. 평균속도가 낮을수록 에어로림을 사용하는 것이 시간단축을 하는데 있어서 큰 역할을 하는 것을 알 수 있습니다. 엘리트 선수들의 평균속도인 30~40km/h를 보면 전반적으로 60초를 전후한 차이를 나타냅니다.

이 도표는 다음의 수식을 통해서 구하였습니다.

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_d A$$

$$V = \sqrt{\frac{2F_{drag}}{\rho C_d A}}$$

이처럼 에어로림의 효과는 수치적으로도 실제 경험적으로도 그 유의미한 차이를 보이고 있습니다. 아비아브는 대한민국 최초의 자전거용 카본 휠 생산업체로서 에어로 형태의 림을 설계하는 데 있어서도 최초로 CFD해석을 통한 최적의 림형상을 설계하였습니다. 다양한 브랜드의 휠을 직접 모델링하고 테스트를 통해 아비아브 에어로브 휠이 얼마나 더 나은 에어로 성능을 보여주는 직접 수치적으로 비교 분석하였습니다.

테스트 방법

1. 수치해석 모델

본 프로젝트에서 사용하는 수치해석 모델을 알아보겠습니다.

기본적으로 모든 수치해석은 RANS(Reynolds-Averaged Navier Stokes)모델을 사용하였습니다. 기존의 산업용이나 항공용 CFD의 경우 RANS 해석중에서 K-epsilon 모델이나 SST모델을 사용하지만, 자전거 휠의 경우 바람의 속도가 매우 낮아(Mach0.04 이하) 공기의 흐름이 완벽한 터블런스를 일으켜 압축을 시킬 정도라 보기 힘들고, 타이어의 종류, 정렬상태, 스포크의 회전 등 완벽하게 실제 모델을 구현하기가 어려우므로 RANS 모델중에서 Spalart-Allmaras(S-A) 1차원 점성모델(Viscos model-Steady)을 사용하였습니다. SA모델은 Turbulent viscosity를 1개의 변수인 turbulent kinetic energy만을 가지고 표현한 것입니다.

*SA모델에 대한 정확한 수식은 NASA(<http://turbmodels.larc.nasa.gov/spalart.html>)에 나온 수식을 인용하였습니다.

1차 모델의 수식은 다음과 같습니다.

$$\frac{\partial \hat{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1}(1 - f_{t2}) \hat{S} \hat{\nu} - \left[c_{w1} f_w - \frac{c_{b1}}{\kappa^2} f_{t2} \right] \left(\frac{\hat{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \hat{\nu}) \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_j} \right) + c_{b2} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_i} \frac{\partial \hat{\nu}}{\partial x_i} \right]$$

그리고 Turbulent eddy viscosity는 다음의 수식에서 계산됩니다.

$$\mu_t = \rho \hat{\nu} f_{v1}$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + c_{v1}^3} \quad \chi = \frac{\hat{\nu}}{\nu}$$

그리고 ρ 은 밀도, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ 는 molecular kinematic viscosity, 그리고 μ 는 molecular dynamic viscosity 입니다. 이 수식에서 상수는 다음과 같습니다.

$$c_{b1} = 0.1355 \quad \sigma = 2/3 \quad c_{b2} = 0.622 \quad \kappa = 0.41$$

$$c_{w1} = \frac{c_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1 + c_{b2}}{\sigma}$$

수치해석은 3D와 2D를 모두 시행하였습니다. 2D 시뮬레이션의 경우 림의 중앙의 단면을 기준으로 기본적인 비교설계를 하였습니다. 실제로 림 중앙에서 받는 항력이 전체항력의 70%이상 차지하고 있으므로 비교설계를 위해 중앙 단면만을 중심으로 항력계수와 항력을 측정하는 방식을 택하였습니다.

3D의 경우 실제 휠의 정밀 모델링을 통한 실제 공기역학적 성능을 검증하는 형태로 진행하였습니다. 3D 모델 시뮬레이션에서는 스포크 회전에 따른 공기저항, 휠의 회전에 따른 공기저항, 휠의 전체적인 공기저항등의 값을 측정하였습니다.

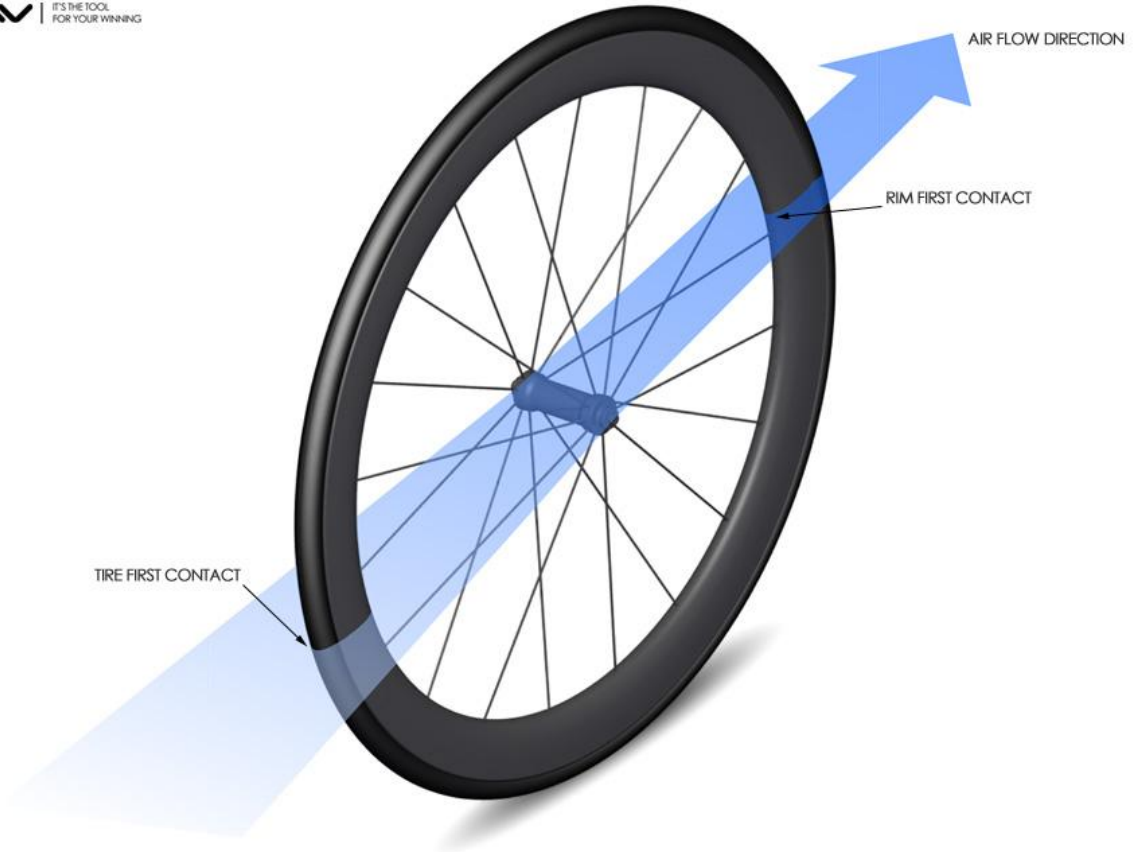


그림 1 림 항력 측정 부위 설명

그림1에서는 2D모델에서의 측정 부위를 설명하고 있습니다. 그림1에서처럼 림 중앙단면에서 타이어컨택면(Tire first contact-타이어가 가장 먼저 공기저항을 받는 형태)과 림컨택면(Rim first contact-림이 가장 먼저 공기저항을 받는 형태)의 2가지 부위에서 측정하였습니다. 실제 라이딩에서는 타이어컨택이 부분이 공기저항을 받고 이후에는 스포크의 회전으로 인해 림컨택 항력이 타이어컨택 부분보다 크게 발생하지 않지만, 수치적인 비교분석을 위해 두 면을 별도로 측정하였습니다.

3D의 경우 비교분석이 아닌 전체적인 항력과 그로 인한 성능을 알아보기 위해 아비아브 에어로브 제품에 대해서만 실시하였습니다.

2. 2D 모델 테스트

2D 모델의 매쉬(meshing)는 그림2와 같이 기본적으로 에어포일(airfoil)을 측정하는 형태와 같이 림형태를 중심으로 큰 원형면을 만들어서 림면에서부터 외부벽까지 일정한 크기로 사이징하는 형태로 하였습니다. 이러한 매쉬 형태는 의미 없는 공기흐름에 대한 계산을 최소화하여 컴퓨팅의 시간을 단축시킬 수 있으며 림을 타고 흐르는 공기의 흐름을 가장 잘 계산할 수 있습니다. 각 테스트 모델별 2D 매쉬는 약 30000개의 셀로 구성되어 있으며, 1번의 시뮬레이션에 소요되는 시간은 약 30분이므로 총 200시간의 2D모델 시뮬레이션을 시행하였습니다.

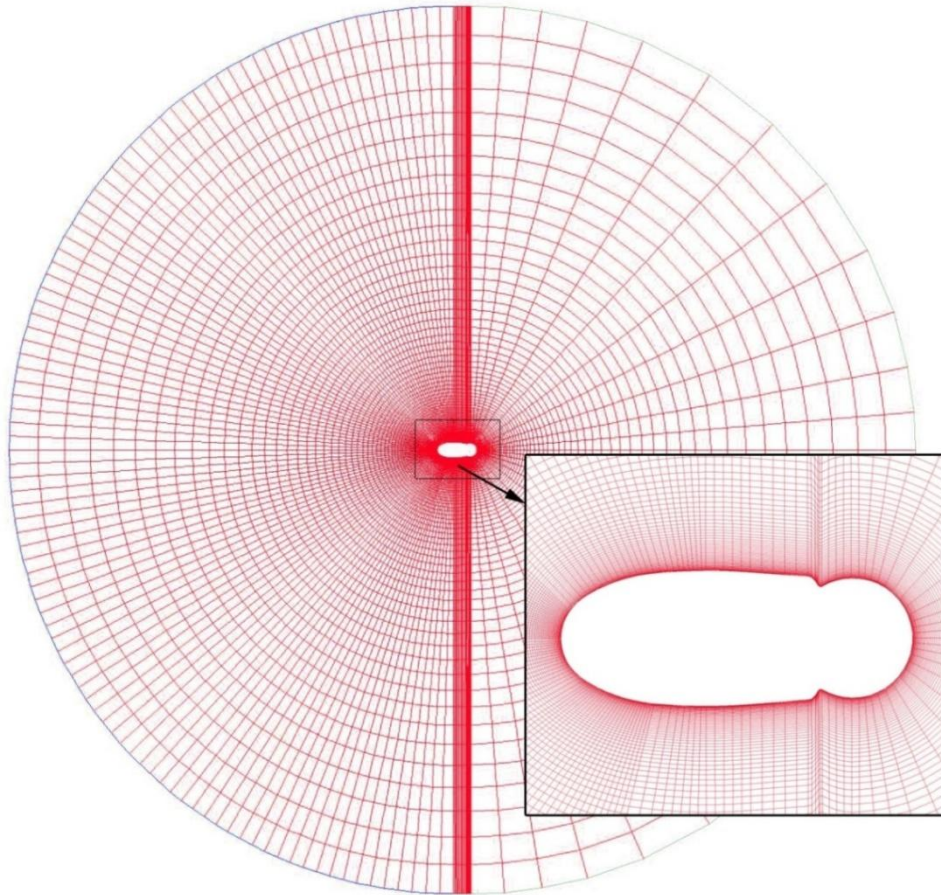


그림 2 2D 매쉬 모델링

3. 3D 모델 테스트

3D 모델은 비교분석이 아닌 더욱 정확한 항력을 계산하기 위해 아비아브 에어로브 제품에 한해서만 실시하였습니다. 3D모델 테스트는 림 중앙부의 항력과 함께 전체적인 림의 항력을 계산하여 활이 받는 항력을 수치적으로 계산하고 실제 라이딩시 활로 인한 항력을 더욱 정확하게 계산할 수 있습니다. 3D모델은 그림3과 같이 2D모델보다 100배 정도 많은 약 4,000,000개의 셀로 구성되어 있습니다. 그만큼 컴퓨팅의 시간이나 테스트 시간이 길 수 밖에 없으며, 1번의 시뮬레이션에 약 1시간30분의 시간이 소요되었습니다. 총 50시간 정도의 시뮬레이션을 실시 하였습니다.

3D 모델링은 실제 설계된 모델을 바탕으로 실물과 같은 크기로 모델링하였으며 허브와 스포크까지 모델링하여 실제 활이 받는 항력을 측정하였습니다.

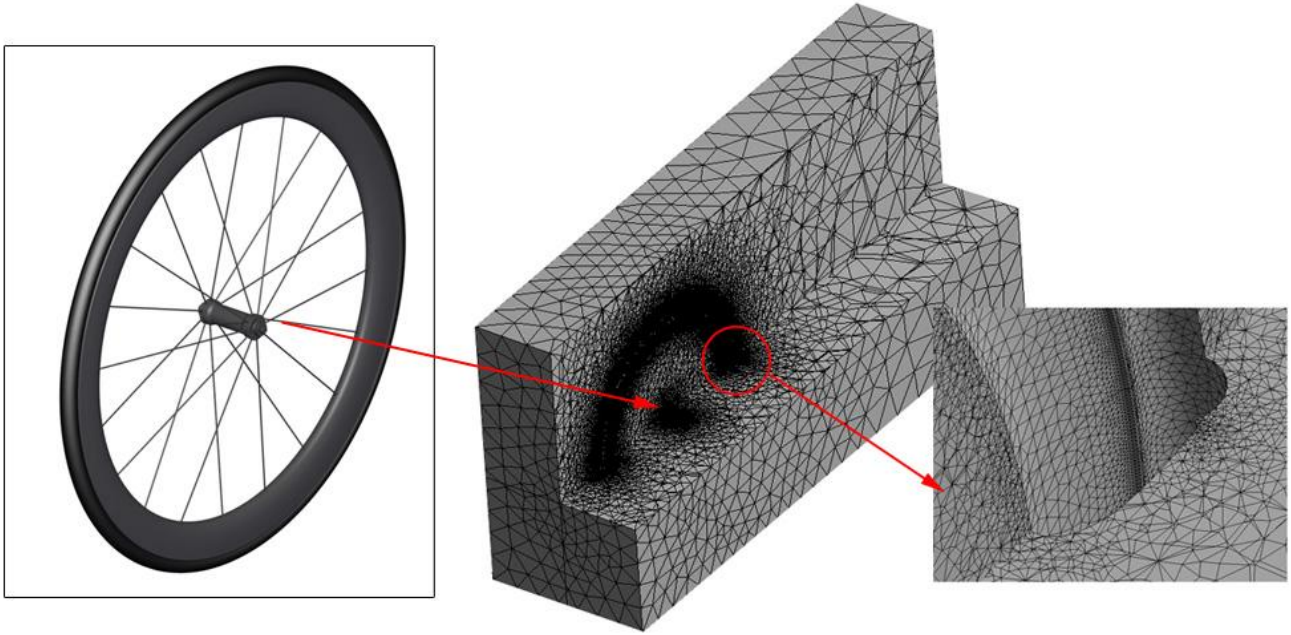


그림 3 3D 매쉬 모델링

4. 테스트 방법

테스트의 방법은 그림3과 같이 위에서 휠을 바라볼 때, 고정된 휠에 시속 40km/h(11.11m/s)의 바람이 지나가고(실제로는 자전거의 속도와 바람의 속도의 합), 그 바람의 편요각(yaw angle)이 0도에서 각 2.5도씩 총 9회에 걸쳐 20도 까지 변화 할 때 바람에 의해 휠(림)이 받는 축항력(Axile Drag force)과 그 수직이 되는 측력(Side force)를 측정하였습니다. 앞서 설명한 것처럼 타이어컨택면과 림컨택면을 개별적으로 계산하여 테스트 1모델당 평균 18회의 시뮬레이션을 시행 하였으며, 프로토타입 모델20개와 비교모델3개를 테스트하여 총 414회의 시뮬레이션을 하였습니다.

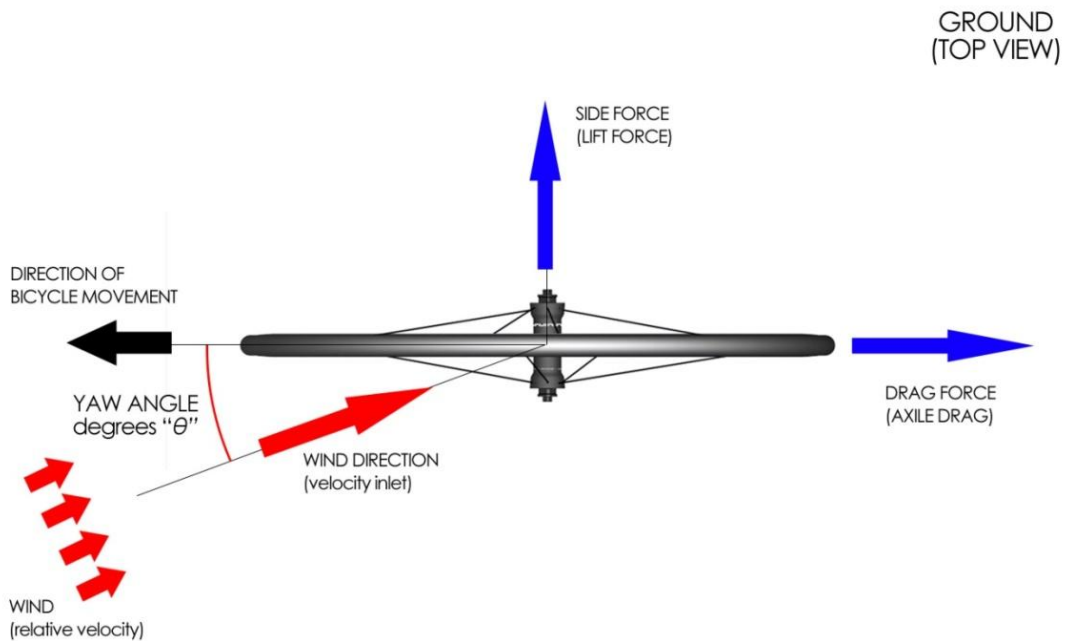


그림 4 휠의 테스트 조건 설명

5. 아비아브 에어로브 설계

최적의 에어로 형상을 찾기 위해 아비아브는 프로토타입 모델 20개를 개별적으로 모델링 하여 각 타입별 항력값을 측정 비교하여 최적의 값을 가진 형상을 찾았습니다.

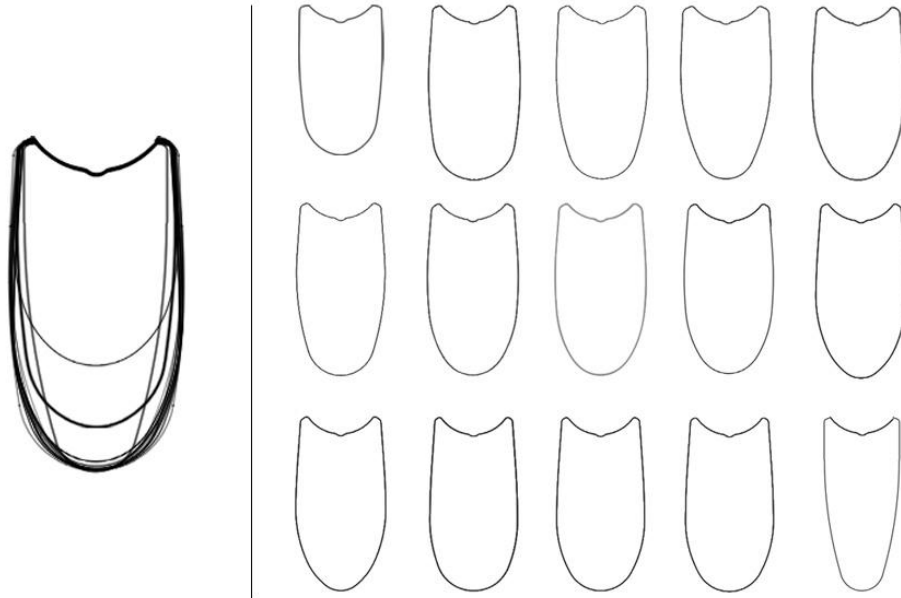


그림 5 에어로브 프로토타입 모델링

그림4에서 볼 수 있듯이, 림 설계는 폭과 넓이 그리고 림 엣지부분의 사이즈를 다양하게 설계하여 측정하였으며, 기준을 위해 기존 제품인 아비아브 알도50미리 제품을 기준으로 림폭을 24~27미리까지 다양하게 측정하였습니다.

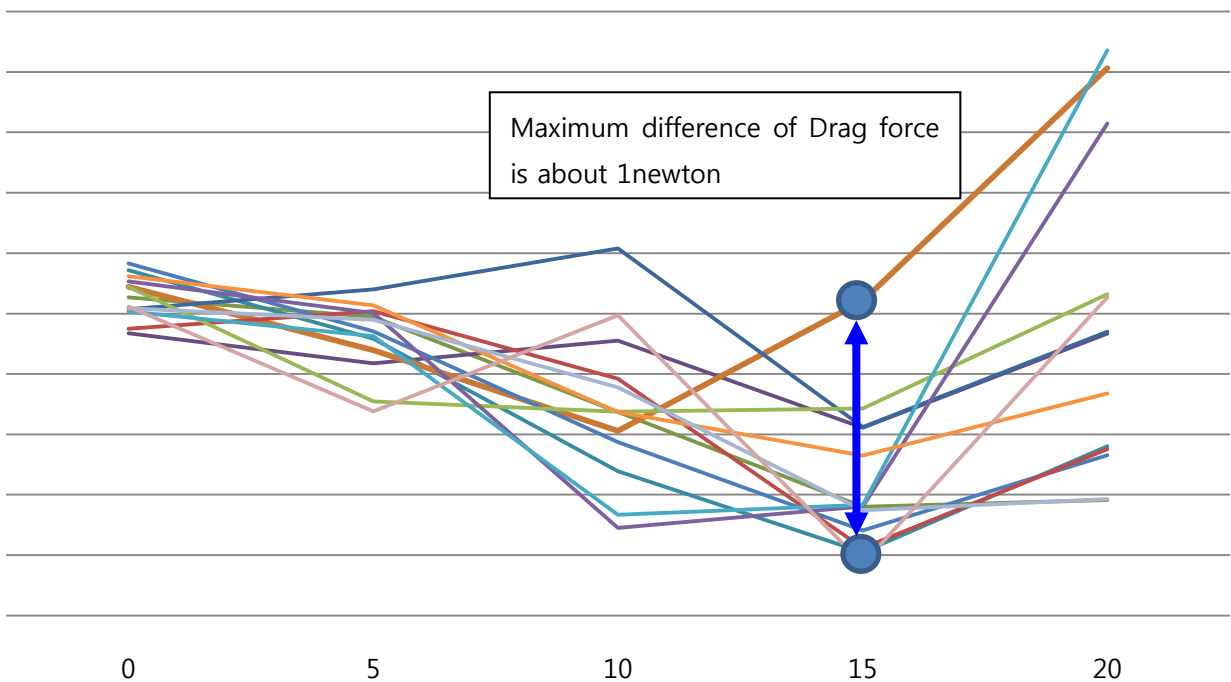


표 2 아비아브 프로토타입 항력 값 측정표

표2의 경우 20개의 50mm 모델을 측정된 값입니다. 항력의 경우 같은 50mm 프로파일이라 하더라도 각도나 측면의 길이에 따라 항력 값이 다양하게 측정됩니다. 차트2에서 같이 대부분 15도에서 가장 낮은 항력값을 보여주지만 일부 형태에 따라 10도에서 가장 낮은 항력값을 보여주는 경우도 있었습니다. 또한 15도를 기준으로 볼 때 프로토타입에 따라 최대 차이는 1N정도이며 이는 곧 40km의 거리를 시속40km/h(11.11m/s)로 달릴 시 약 51초 정도의 차이를 벌릴 수 있다는 뜻입니다.

약20개의 모델링과 시뮬레이션과 3종의 비교모델 테스트 결과 항력에 있어서 가장 좋은 값을 보여주는 모델을 그림 6과 같이 선정하였습니다. 프로파일별로 35mm 모델, 50mm 모델, 80mm 모델입니다. 전반적으로 원환면(Toroidal) 형태를 유지하고 있습니다.



그림 6 최종 선정된 에어로브 링 단면

6. 비교 모델

이번 장에서는 에어로브 링 형태가 다른 시판중인 제품과 비교 했을 때 항력 값에서 어떤 차이를 보이는지 비교하여 보겠습니다. 테스트를 하는데 있어서 기준이 되는 모델은 현재 시판중인 모델로 국내에서 가장 많은 판매량을 가진 제품 3가지를 비교를 위해 측정해보았습니다.

그림7의 회사별 단면을 보면 S브랜드의 경우 와이드형태 에어로 링이지만 전통적인 V컷 형태의 링을 가지고 있는 것을 알 수 있습니다. Z브랜드는 전반적으로 원환면(Toroidal)형태이고 Z1의 경우 링 높이가 낮지만 Z2에 비해 더 넓어지고, Z2의 경우 링높이가 높지만 Z1에 비해 폭이 좁아지는 것을 알 수 가 있습니다. 이런 형태별 항력의 차이는 다음장에서 살펴보도록 하겠습니다.



그림 7 시판중인 비교 제품의 단면도

저희 내부적 실측자료를 기준으로 모델링 한 것이므로 실제 형상과 차이가 있을 수는 있습니다. 또한 일부 브랜드의 경우 항력을 낮추기 위해 특수한 표면처리를 하기도 하지만, 이번 테스트에서는 비교를 위해 림 형태 외의 외적 부분은 고려하지 않았습니다.

테스트에 사용되는 타이어는 23c타이어를 기준으로 삼았습니다.

각 회사별 단면과 이번에 개발된 아비아브 에어로브의 형상을 겹쳐서 보면 그림8과 같습니다.

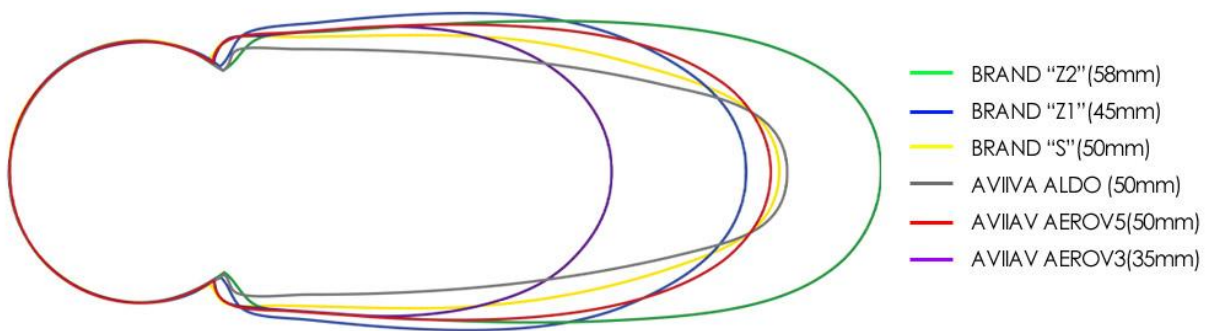


그림 8 각 제품별 단면 비교

비교 시뮬레이션 결과

1. TIRE FIRST CONTACT

첫번째로 타이어컨택 면에 대한 2D 시뮬레이션 결과입니다. 총 6개의 형상(아비아브 에어로브5, 에어로브3 포함)을 시뮬레이션 하여 측정해 보았습니다.

DRAG FORCE/Tire contact

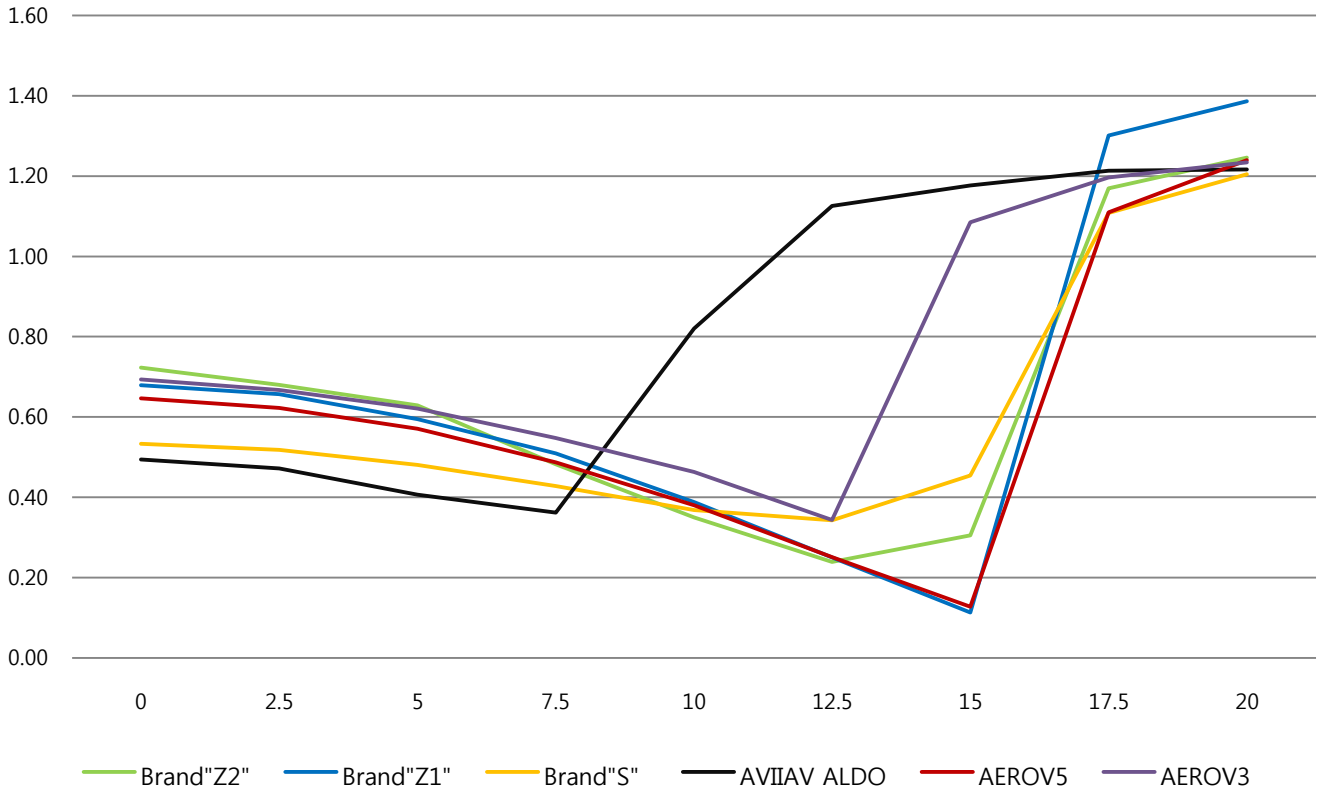


표 3 기존 브랜드 제품과의 항력 비교(x축:force, y축:degrees)

우선 기존 제품들과의 항력비교를 통해서 전체적인 항력값을 보면 표3과 같습니다. 기존 아비아브 알도 휠의 경우 22mm폭을 가지고 있으므로 초기 항력값은 다른 제품들에 비하여 상대적으로 낮다는 것을 알 수 있습니다. 하지만 측풍이 작용하는 상황에서 본다면 7.5도 이상에서 항력은 급격하게 상승합니다. 전통적인 V형태의 림이기 때문에 측풍에서 항력이 작은 각도(7.5도)에서 급격하게 증가하는 현상(Stall)을 확인 할 수 있습니다. 이 Stall 현상에 대해서는 6번 단락에서 설명하겠습니다.

브랜드 "S"의 경우 24mm 림폭을 가지고 있습니다. 역시 비교 제품들중 가장 폭이 좁은 제품이라 초기 항력은 상당히 낮은편이지만, 다른 브랜드의 제품들에 비하여 측풍 상황에서 항력이 내려가는 폭이 상당히 적습니다. 완만한 하강곡선을 그리면서 15도 이상에서 항력이 증가되는 것을 알 수 있습니다.

브랜드 "Z2"나 브랜드 "Z1"의 경우 새로운 U자형태의 와이드 림 답게 초기 항력이 다소 높은 편이지만 각도가 증가할 수록 급격하게 항력이 줄어드는 것을 알 수 있습니다. "Z1","Z2"도 "S"와 마찬가지로 역시 15도 부근에서 항력이 급격하게 높아지는 현상을 볼 수가 있습니다. 브랜드 "Z1"의 경우 15도까지 아비아브와 마찬가지로 각도가 증가할 수록 항력이 감소하는 것을 볼 수 있습니다. 다만 17.5도 부근에서의 "Z1"은 가장 높은 항력값을 보여줍니다.

아비아브 에어로브3의 경우 35mm 미들림이기 때문에 기존 ALDO보다는 측풍에 좋은 효과를 보여주지만 역시 다른 하이림과는 다르게 12.5도 부근에서 항력이 급격하게 상승하게 됩니다.

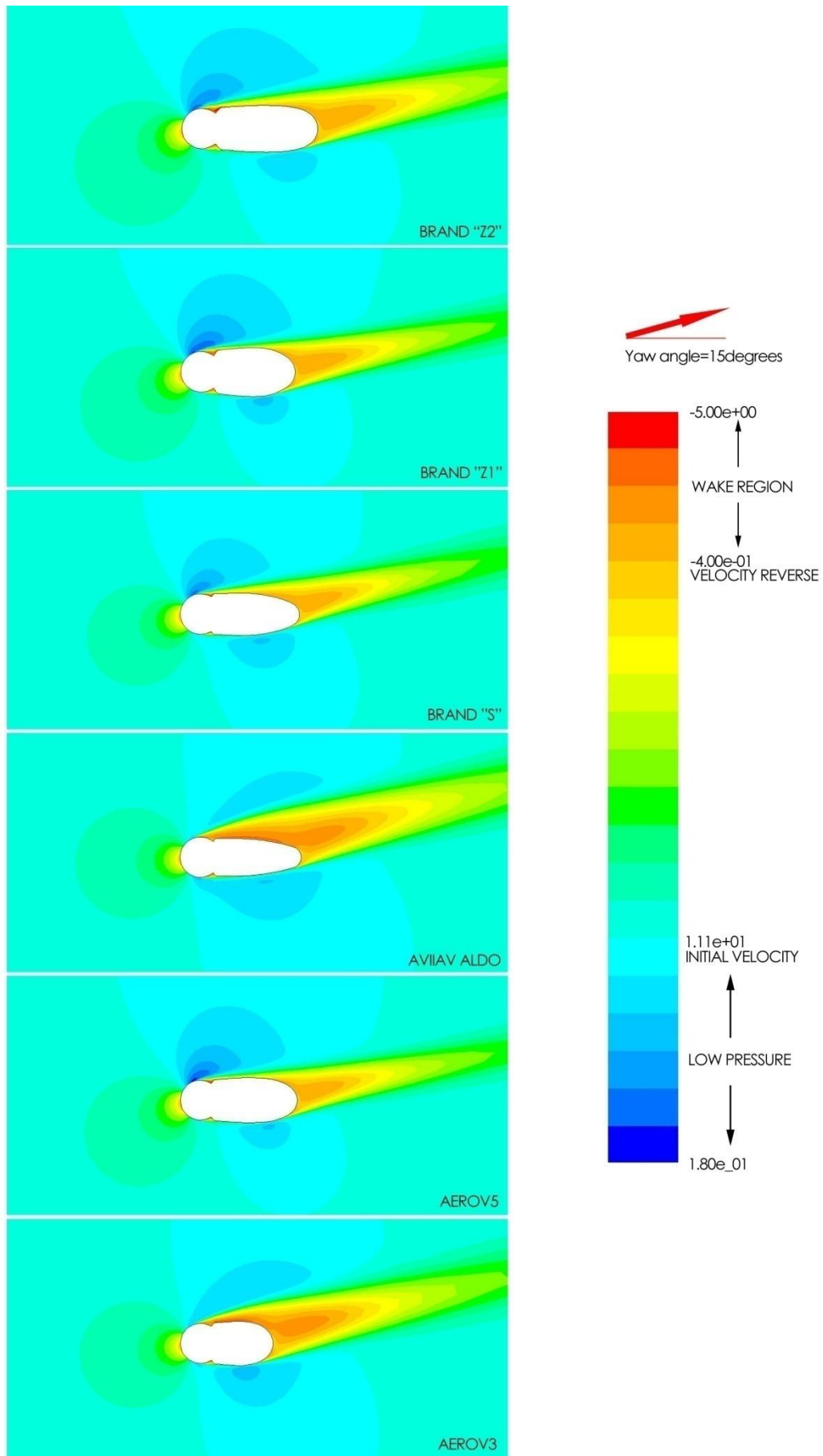


그림 9 15도 풍향에서 각 제품별 항적 이미지

그림9에서 보면, 항력이 높은 제품일 수록 노란색의 항적이 넓고 길게 발생하는 것을 알 수 있습니다. 이것은 곧 공기가 림 사이드면을 타고 넘어가지 못하고 앞쪽(공기가 닿는 지점)에서 공기의 흐름이 분리(Separation)되어 소용돌이(Vortex)를 발생시켜 압력저하로 인해 항력(Drag force)가 생기게 된다는 뜻입니다. 그림9의 오른쪽편의 무지개바를 보면 짙은 노란색부터 속도 역전현상(Velocity reverse)가 발생하게 되고 이점부터 무지개바가 빨간색이 될 때 까지를 후류영역(Wake region)이라고 하며, 이 후류 영역에서는 공기의 속도가 바람의 방향과 반대로 흐르면서 Vortex가 발생하여 림을 뒤로 잡아 끄는 힘(항력)을 발생시키게 됩니다.

이미지상으로 비교를 하면 AEROV5의 항적이미지가 다른 제품들보다 이 후류영역의 크기가 좁고 짧다는 것을 알 수 있습니다. 이는 곧 측풍에서도 항력이 낮게 생성되어 더 뛰어난 에어로다이내믹 효과를 볼 수 있다는 뜻입니다.

반대로 파란색의 부분은 저압상태(Low pressure)가 되어 공기의 흐름이 상대적으로 더 빨라지며 이러한 흐름은 휠을 옆으로 미는 측력(Lift force)를 발생시키지만, 실제로 휠은 좌우로 회전은 할 수 있지만 옆으로 슬라이딩 되지 않는다는 조건에서 보면 그 자체로 의미는 없습니다. 하지만 타이어컨택면과 림컨택면의 측력차이로 인해 모멘트가 발생할 수 있으므로 이 부분에 대해서는 다음장에서 살펴보겠습니다.

0도에서 20도 사이의 평균적인 항력값을 비교하면 다음과 같습니다.

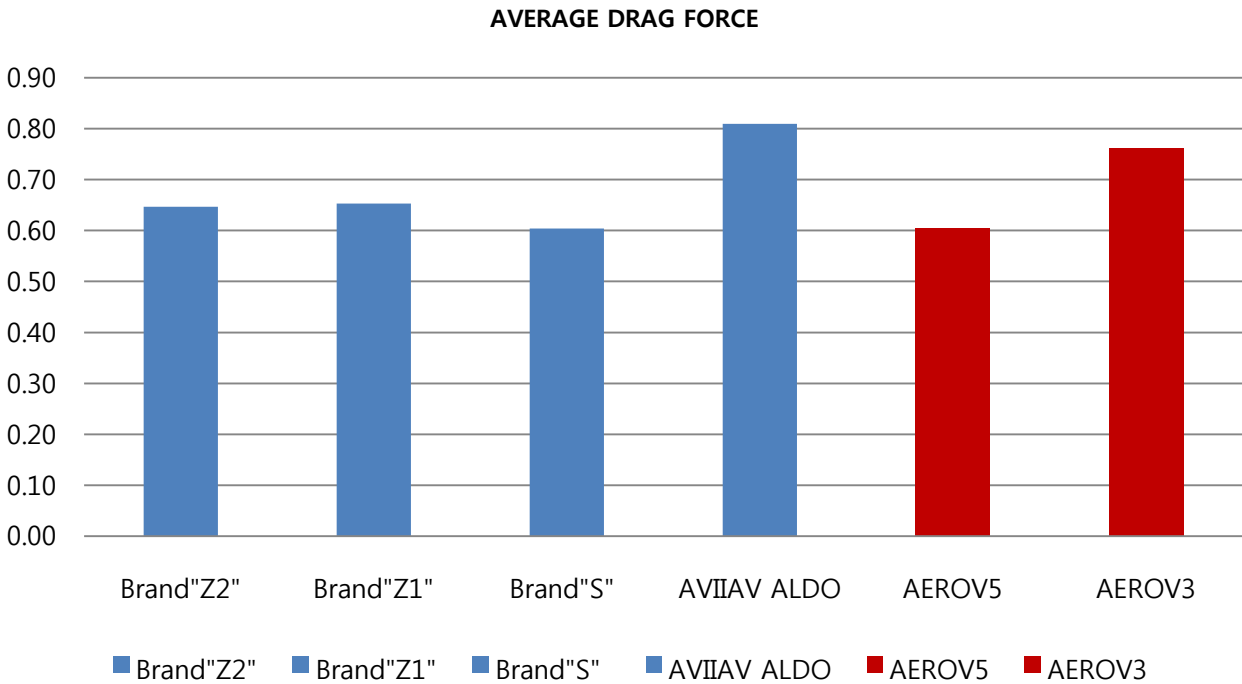


표 4 (0°-20°)의 평균항력

표4를 보면 AEROV5의 평균항력값이 Brand'S'제품과 함께 가장 낮은 수치를 보여줍니다. 앞의 표3에서 볼 수 있듯이 Brand'S'의 항력은 비교 제품중에서 AVIIAV ALDO를 제외하고 가장 림폭이 작기 때문에 0도에서 20도까지 크게 변화하지 않은 평균적인 수치를 보여주며 낮은 평균 항력을 가지지만, AEROV5의 경우 각도가 변할 수록 항력이 낮아지면서 측풍에서의 효과가 더 크기 때문에 낮은 평균 항력값을 보여줍니다.

또한 기존 AVIIAV ALDO 제품과 비교했을 때 평균 약25%정도의 성능을 더 발휘 하는 것을 알 수 있으며, 가장 차이가 많이 벌어지는 15도 각도에서는 무려90%의 공기역학 성능을 더 발휘 하는 것을 알 수 있습니다.

2. RIM FIRST CONTACT

앞에서 언급한 것처럼 림컨택면은 타이어컨택면에 비해서 항력의 영향이 크지 않습니다. 실측결과를 보면 림컨택면에서의 항력효과는 각도에 따라 전체 휠 항력의 30~20%정도입니다. 그러나 림컨택면도 항력에 있어서는 고려를 해야 하는 수치입니다. 이번에는 림컨택 시 항력 값을 측정해 보았습니다.

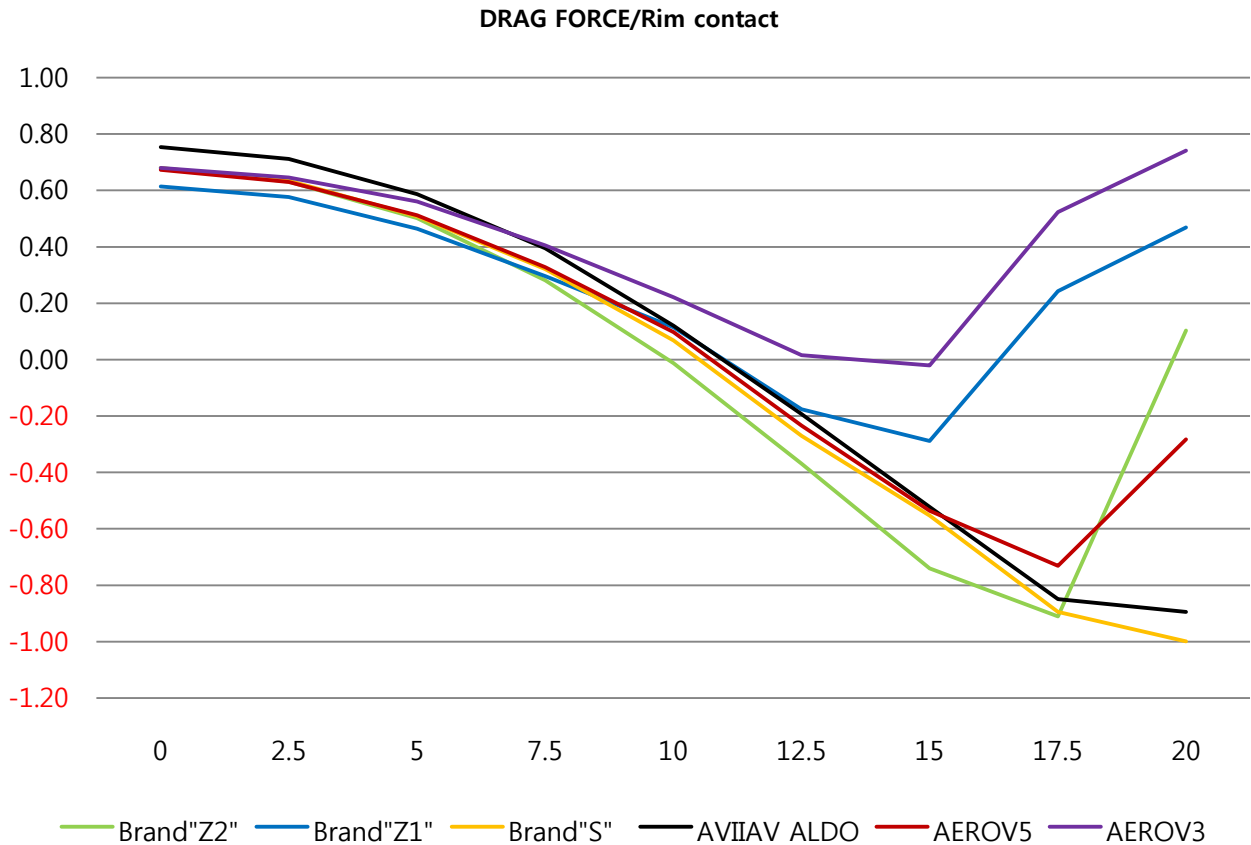


표 5 림컨택면에서의 항력

표5를 보면 림컨택면의 항력은 독특한 값을 보여줍니다. 10도 이상의 풍향에서는 대부분의 림에서 오히려 항력이 마이너스값을 보여줍니다. 이것은 곧 휠이 진행방향이 아닌 반대방향으로 오히려 힘을 받는 추력(thrust)가 생긴다는 뜻입니다.

사실 이 추력은 측력(Side force)에 의해서 생기는 것입니다. 그림10에서와 같이 바람의 방향에서의 항력(Drag)대비 양력(Lift)이 너무 크다 보면 림은 오히려 뒤로 밀리는 힘이 아니라 앞으로 나가는 추력(thrust)이 생기는 것입니다. 이것은 일종의 돛단배효과로 정면에서 바람이 불어와도 벡터값을 분석해보면 실제로는 오히려 앞으로 나아가는 추력(Negative Axile Drage Force)이 미세하게 생기게 됩니다. 이러한 효과는 대부분의 하이프로파일 림에서 발생하는 것을 표5에서도 확인 할 수 있습니다. 다만 휠의 전체적인 항력에서 보면 림컨택면의 추력은 타이어 컨택면의 항력에 비해 작다고 볼 수 있기 때문에 이러한 추력에 의한 효과는 실제로는 크지 않습니다.

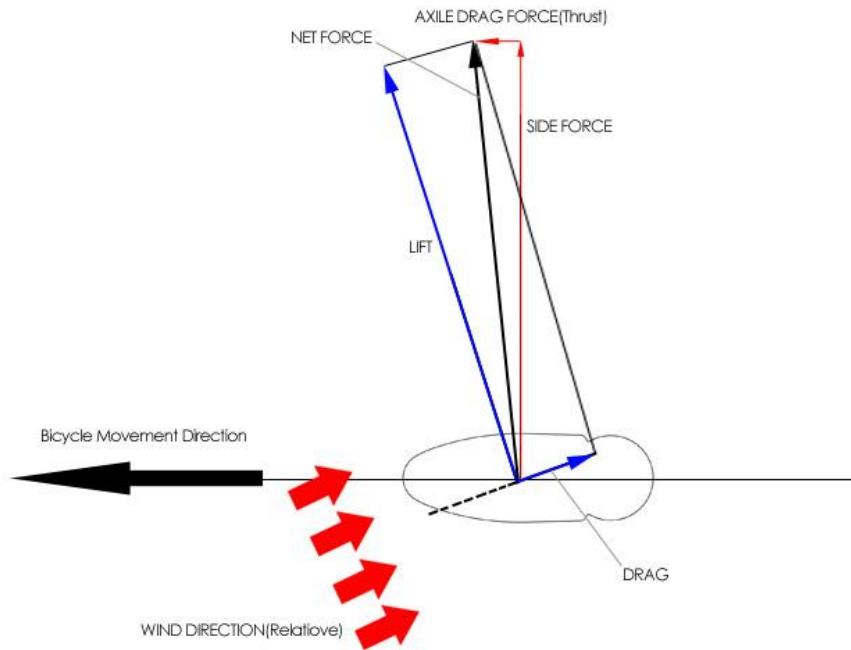


그림 10 림컨택면에서 역방향 항력이 생기는 원리

그러나 림 전체에서 본다면 타이어가 옆으로 미끄러지지 않는다는 가정하에서 측력은 사실상 의미가 없지만, 타이어 컨택면과 림컨택면의 측력 차이는 휠 중심에서의 모멘트(moment)를 발생시키며 이로 인해 측풍에서의 휠의 안정성이 차이가 발생합니다. 또한 림컨택면의 측항력은 전체 항력에 큰 영향이 없는 반면, 림컨택면의 측력(Side Force)은 타이어컨택면보다 평균 3배정도 더 크기 때문에 옆으로 미는 힘으로 인하여 휠을 좌우로 회전시키는 힘을 발생시키며, 이것이 실제로 라이딩시 약간의 측풍에도 조향이 틀어지거나 자전거가 휘청거리는 느낌을 주는 것입니다.

SIDE FORCE(AVERAGE)

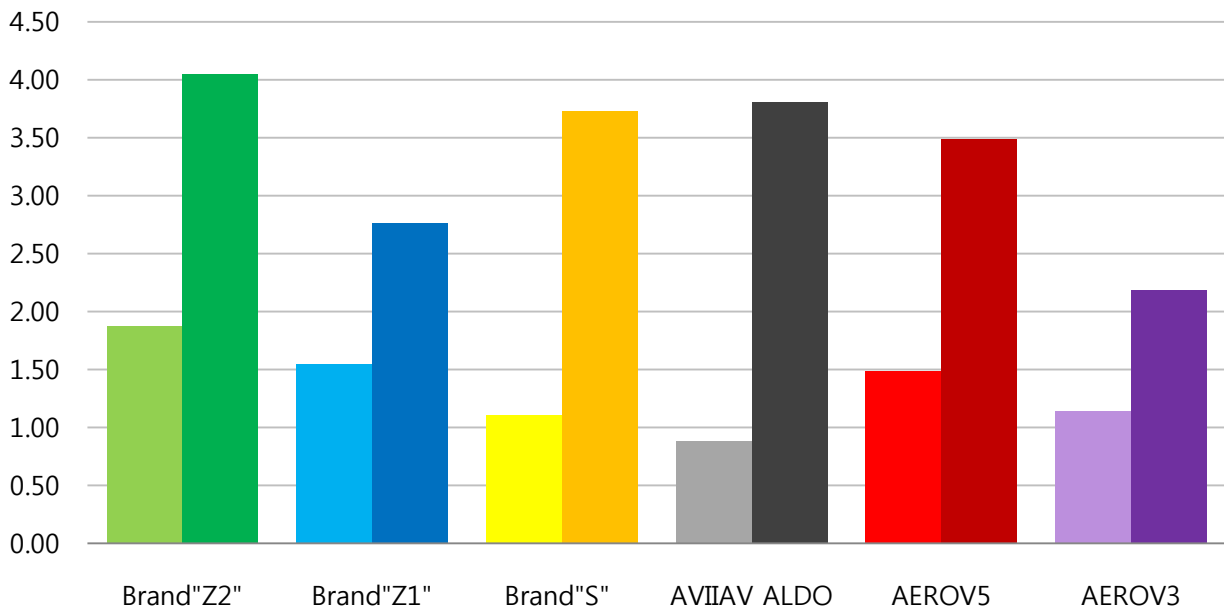


표 6 (0°-20°)에서의 평균 측력값(왼쪽-타이어컨택, 오른쪽-림컨택)

표6에서 볼 수 있듯이 V형 형태일수록, 림 프로파일 높이가 높을 수록(Deep rim) 림컨택면에서 측풍에서의 측력을 더욱 많이 발생시키는 것을 알 수 있습니다. 이 표6에서 또 한가지 주목해야 하는 점은 타이어컨택면의 측력과 림컨택면의 측력의 차이입니다 이 차이가 결과적으로 측풍에서의 휠의 안정성을 보여주는 것이며 이 차이값이 작을 수록 측풍에서 안정성이 높다는 뜻입니다.

현재 가장 작은 차이값(측풍에서의 안정성)을 보여주는 제품은 가장 낮은 프로파일 높이를 가진 AEROV3입니다. 그 다음으로는 45mm의 프로파일값을 가진 Brand"Z1"이며 50mm이상의 프로파일에서는 AEROV5가 가장 측풍에 안정적인 성능을 보여주는 것으로 나타났습니다.

이러한 현상을 항적이미지를 통해서도 확인할 수 있습니다. 그림11은 타이어컨택면과 림컨택면에서의 속도의 강도차이를 보여주는 이미지입니다.

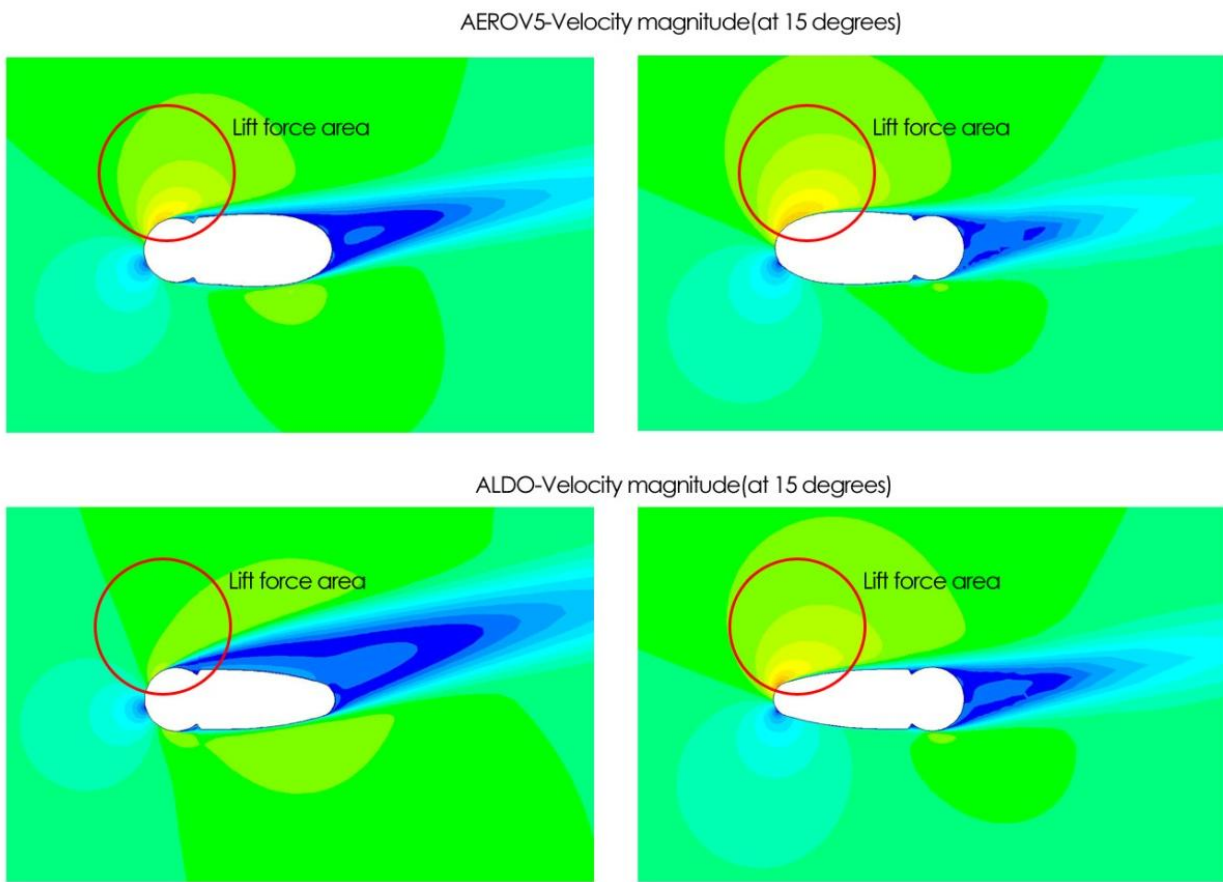


그림 11 타이어컨택면과 림컨택면에서의 항적(15도)

그림 11에서 볼 수 있듯이 AEROV5의 경우 타이어컨택면이나 림컨택면에서 측력이 발생하는 크기가 거의 비슷하지만, ALDO의 경우 타이어컨택면에서 측력은 매우 작지만, 림컨택면에서의 측력은 상당히 높아집니다. 또한 항적의 방향도 AEROV5의 경우 큰 차이가 없지만, ALDO의 경우 각도차이가 시각적으로도 보일정도로 차이가 납니다. 이러한 측력의 차이와 항적의 각도차이로 인해 휠의 안정성이 차이가 나게 되는 것입니다.

3. 림 프로파일 높이별 항력값의 차이

다음으로는 림 프로파일별 항력값의 차이를 보겠습니다. AEROV35는 35mm의 높이를, AEROV50은 50mm의 높이를, AEROV80은 80mm의 높이를 가지고 있습니다. 이러한 프로파일의 차이가 항력에서 어떠한 차이를 보여주는지 비교하면 다음과 같습니다.

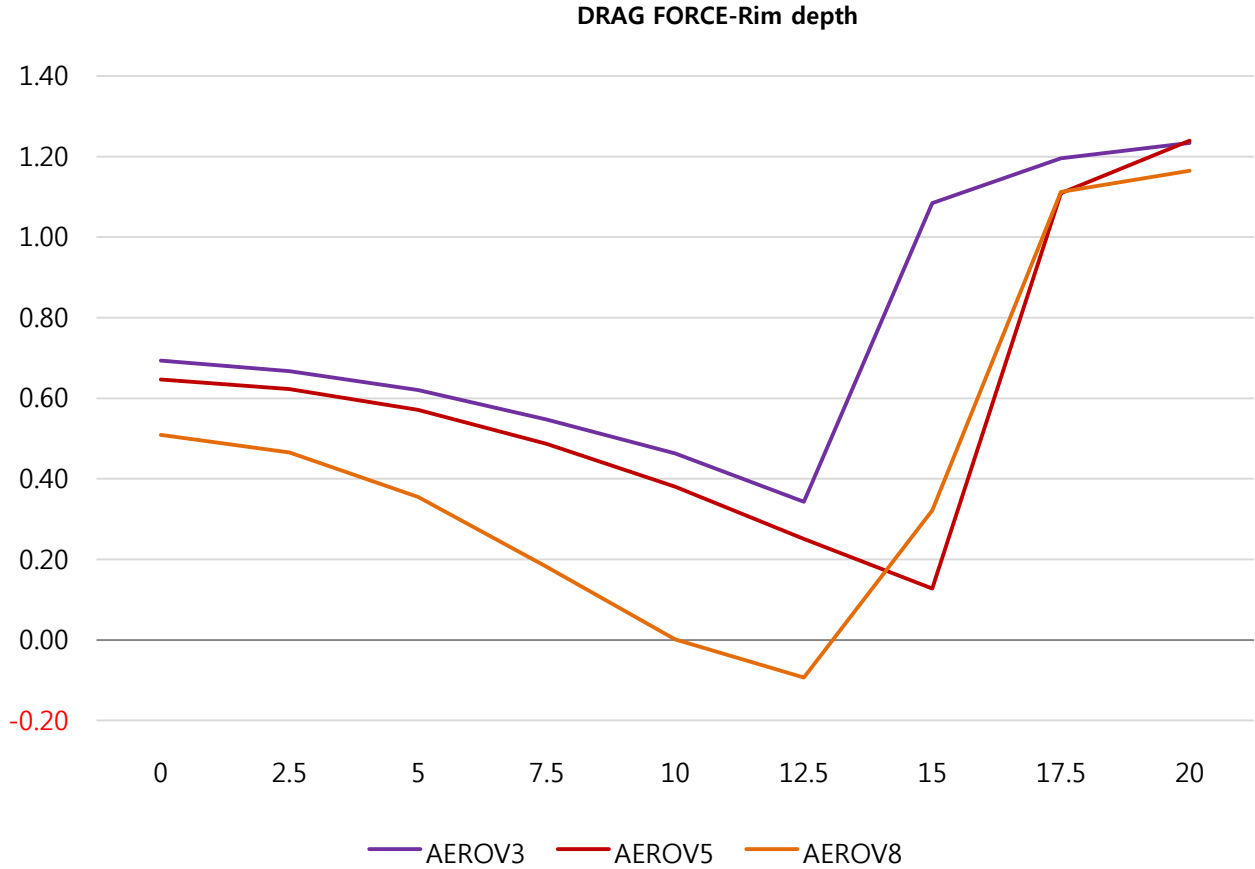


표 7 Aerov 제품별 항력

위의 표7에서 에어로브 제품별로 림 높이가 다를때 항력값이 어떻게 변하는지를 볼 수 있습니다. 에어로브제품의 경우 50mm를 제외하고 나머지 두 제품은 모두 12.5도의 측풍에서 가장 낮은 항력값을 보여줍니다. 림 프로파일 높이가 클 수록 가장 낮은 항력값을 보여 줍니다. 이것을 보면 림에서의 항력은 림의 단면보다는 길이에 더 크게 의존한다는 것을 알 수 있습니다.

DRAG FORCE(AVERAGE)

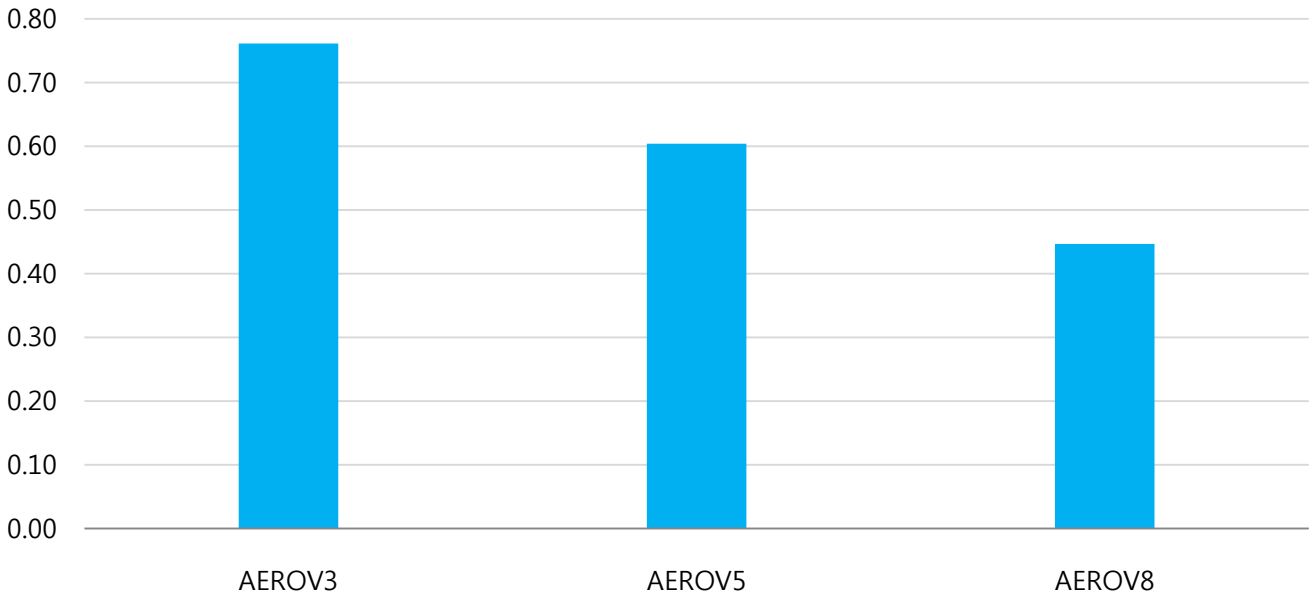


표 8 (0°-20°)에서의 Aerov 제품별 평균항력

다음으로 표8의 에어로브 제품별 평균항력을 살펴보면 거의 일정한 비율로 평균항력이 림 높이에 따라 줄어들고 있음을 알 수 있습니다. 그러나 평균항력치 이외의 측력이나 측풍에서의 안정성은 이와는 반비례한 것으로 측정됩니다.

이와 같이 림 높이가 높아질 수록 항력은 줄어들게 됩니다. 그러므로 TT경기나 Triathlon과 같이 긴 평지구간을 달릴 때는 림 높이가 높은 에어로브8이 가장 적합합니다. 그러나 업다운이 자주 있고, 속도의 변화가 많은 구간, 바람의 방향이 자주 바뀌는 구간에서는 에어로브3이 가장 적합하다고 할 수 있습니다. 에어로브5의 경우 전천후로 사용할 수 있도록 디자인되었기 때문에 절대적인 항력값은 에어로브8보다는 높지만 측풍에서의 항력을 가장 넓은 범위(15도 까지)에서까지 항력을 커버할 수 있기 때문에 측풍에서의 전반적인 성능은 상대적으로 에어로브8보다는 높다고 볼 수 있습니다.

4. 타이어 사이즈에 따른 항력의 변화

이번장에서는 타이어 사이즈에 따른 항력의 변화를 살펴보겠습니다.

기본적으로 대부분의 휠 제조사들은 기준이 되는 타이어사이즈를 23c로 하고 있습니다. 물론 기존에는 21c나 19c를 기준으로 하였지만, 최근 와이드림의 효과가 검증되고 이를 적용하기 위해 23c타이어를 쓰는 림을 개발하고 있습니다. 저희 아비아브 에어로브도 기본적으로 23c타이어를 기본 타이어로 디자인되었습니다.

DRAG FORCE-Tire dependent

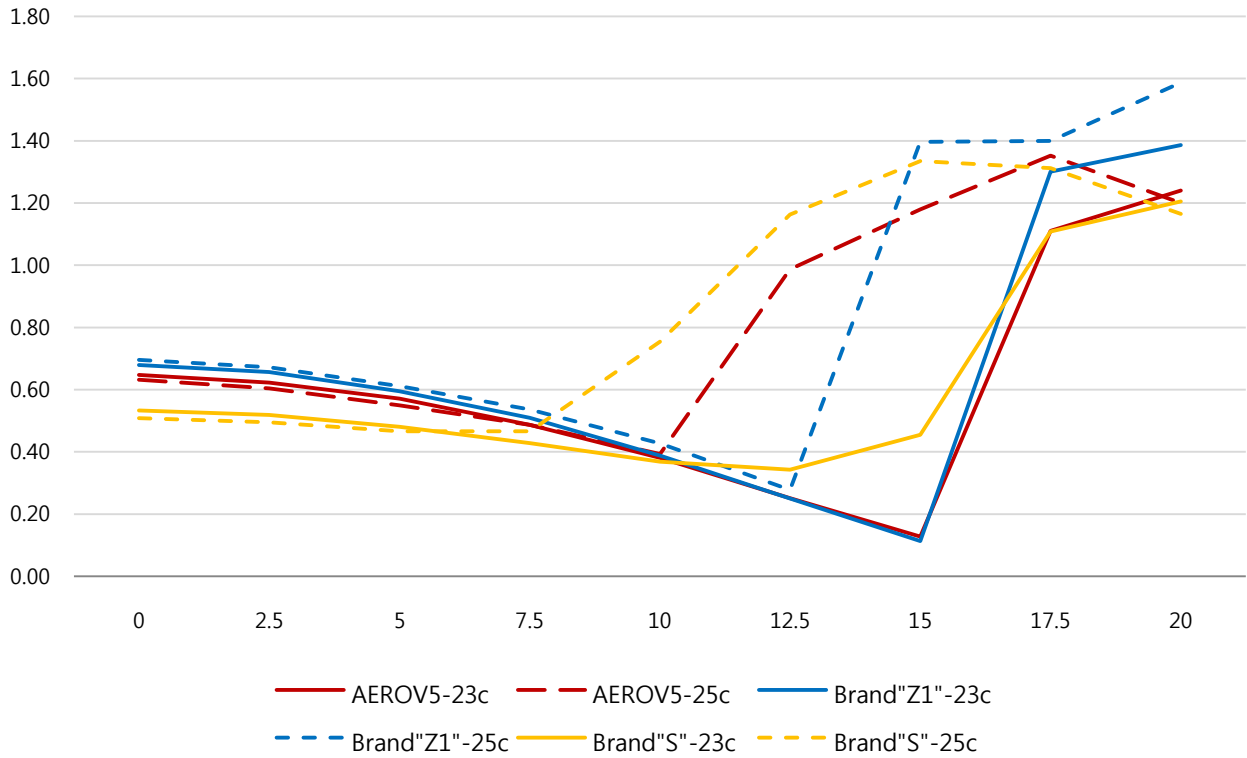


표 9 타이어 사이즈별 항력

표9에서 볼 수 있듯이, 대부분의 제품에서 타이어 사이즈가 23c에서 25c가 되면 항력이 증가합니다. 25c타이어를 사용한 50밀리 프로파일 높이를 가진 3종의 제품을 비교했을때, 전체 각도에서 가장 낮은 항력값을 가진 휠은 Brand'Z1' 제품이었습니다. 그다음으로는 AEROV5, Brand'S'순입니다. 그러나 가장 높은 항력값을 보여주는 제품도 Brand'Z1'이었습니다. 또한 23c 타이어를 사용했을때의 항력값과 비교를 해보면 전반적으로 조금 더 낮은 각도에서 항력이 급격히 증가함을 알 수 있습니다.

Average Drag Force-Tire Size

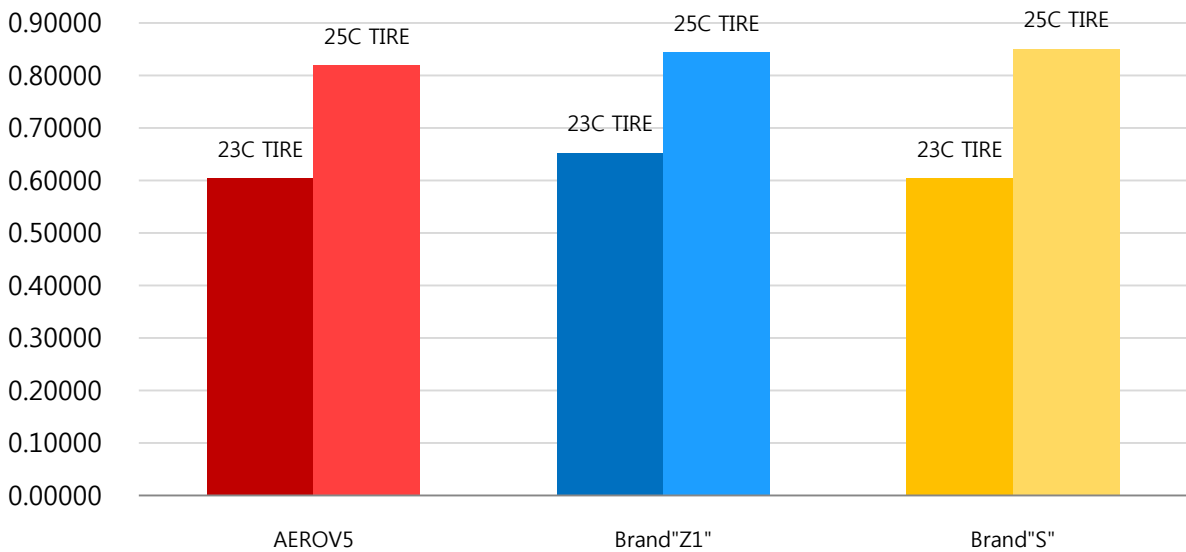


표 10 타이어 사이즈별 평균 항력

0도에서 20도까지의 림이 받는 평균 항력을 보면 표10과 같습니다. 표10에서 처럼 거의 모든 휠에서 23c타이어를 사용할때보다 약25%정도의 항력이 증가됨을 알 수 있습니다. 하지만 25C 타이어의 사용환경에서도 에어로브5의 평균항력은 비교제품들 보다 낮다는 것을 알 수 있습니다.

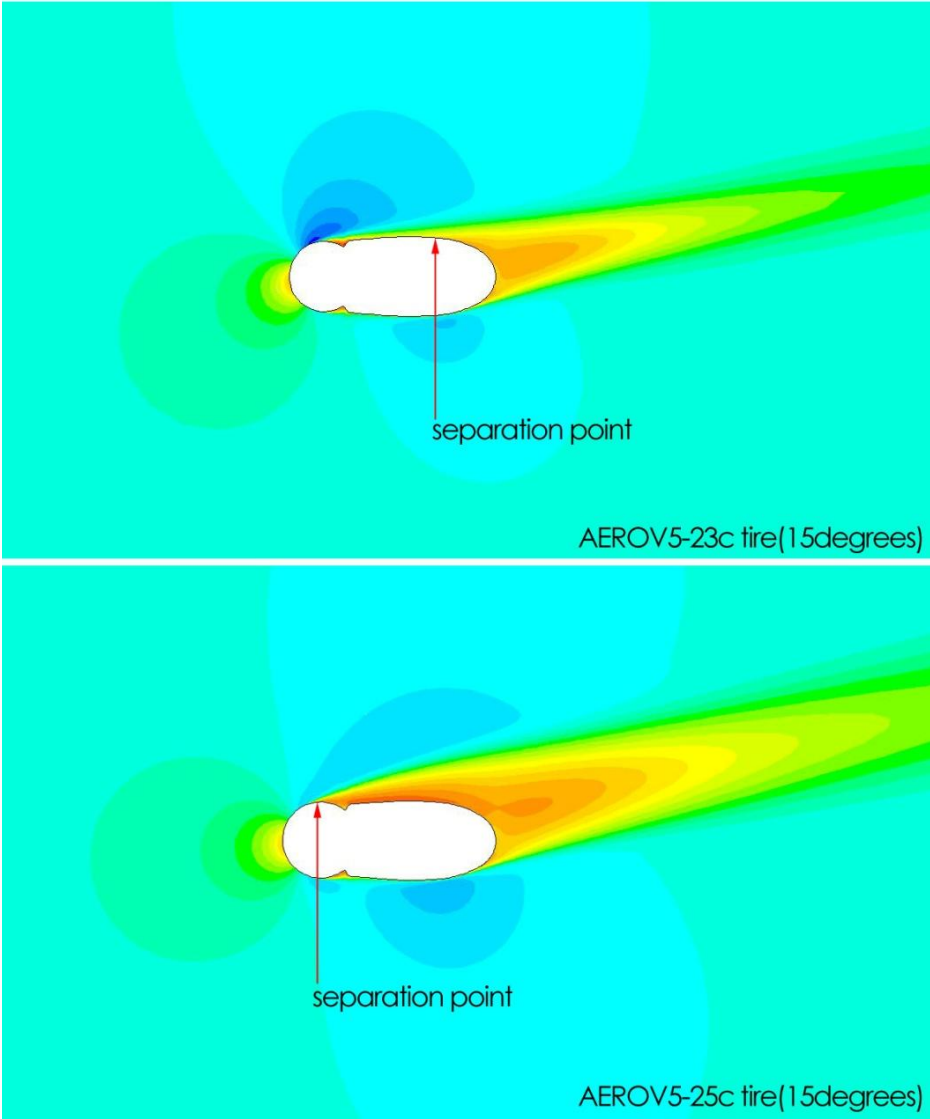


그림 12 타이어 사이즈에 따른 항적 비교

그림12에서 타이어 사이즈에 따른 항적의 변화를 시각적으로 확인 할 수 있습니다. 타이어 사이즈가 커질 수록 박리점(separtiaon point)가 앞으로 전진하여 항적을 만드는 후류영역(Wake area)의 크기가 증가됩니다. 이로인해서 항력이 증가 되는 것입니다.

결론적으로 거의 모든 휠에서 25c타이어의 에어로 효과는 23c보다 떨어진다는 것을 시뮬레이션을 통해서도 알 수가 있지만, 실제로 25c타이어를 사용하게 되면 지면과의 접지면적의 증가를 통한 코너링의 안정성이나, 우천시 접지력 증가 등의 장점이 분명하게 존재합니다. 이것은 사용자의 사용의도, 코스 형태나 라이딩 스킬 등의 조건에 따라 선택해야 될 부분입니다.

5. 3D 모델링을 통한 항력 비교

이번 장에서는 2D모델링을 통한 림형태의 검증으로 실제 휠과 근접한 3D모델링을 통해서 항력의 변화와 차이를 알아보겠습니다. 앞서 언급한 것처럼 3D 시뮬레이션의 경우 2D보다 100배정도의 셀과 10배정도의 컴퓨팅 시간이 필요합니다. 그러므로 3D 시뮬레이션은 에어로브5 제품에 대한 검증형태로만 진행 하였으며, 시각적으로 어떻게 공기의 흐름이 진행되는 지를 확인하겠습니다.

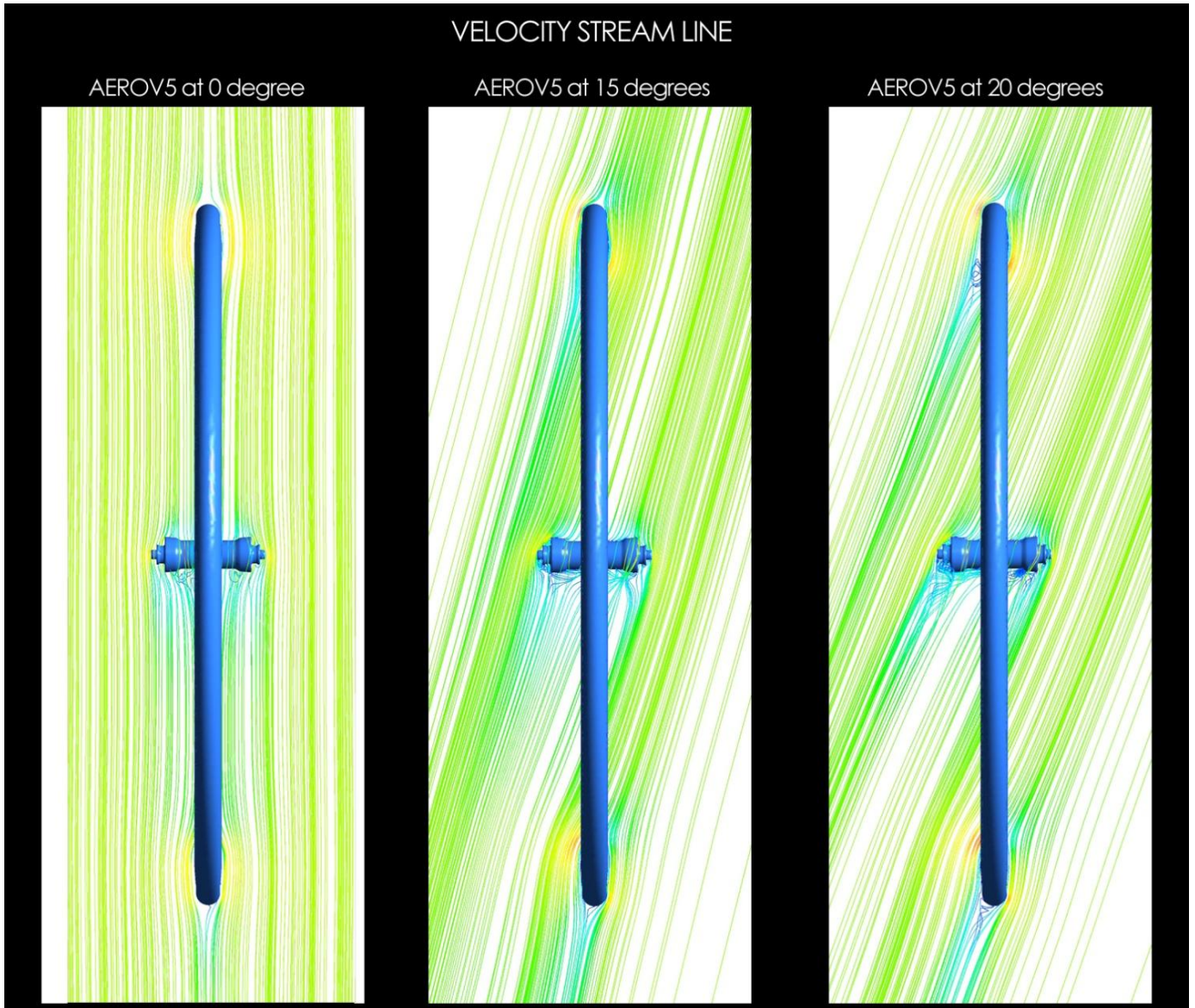


그림 13 공기의 흐름과 속도의 스트림라인(탐뷰)

그림13에서는 3D로 모델링된 에어로브5휠의 공기의 흐름을 보여주는 이미지입니다. 왼쪽부터 0도, 15도, 20도이며, 가장 항력이 낮게 측정되는 15도에서 보면 0도와 비슷하게 림뒤의 Vortex가 거의 발생하지 않습니다. 그러나 20도에서는 타이어컨택면과 림컨택면 모두 Vortex가 발생하는 것을 육안으로 확인할 수 있습니다.

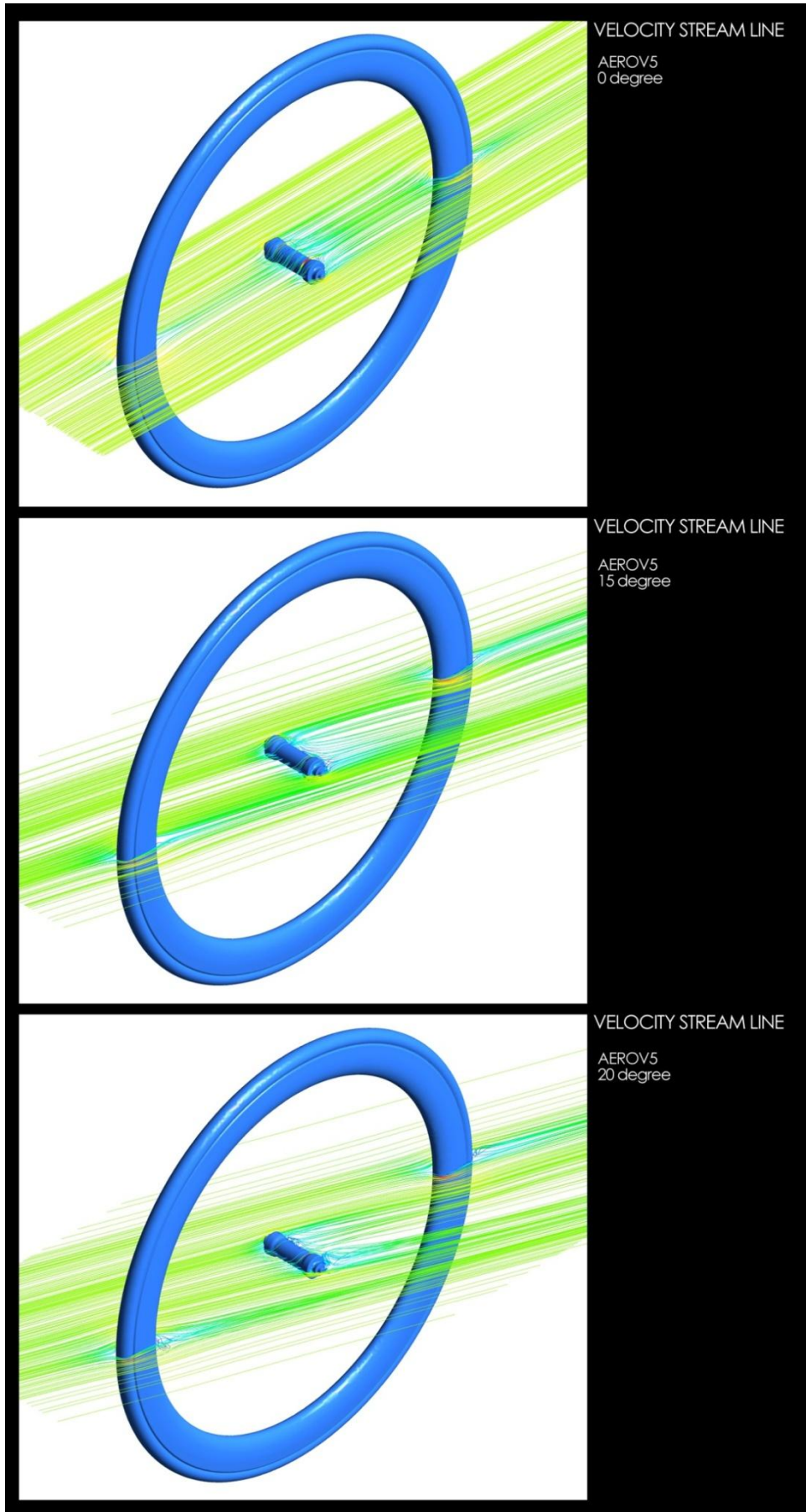


그림 14 바람의 흐름과 속도의 스트림라인(ISO뷰)

그림 14에서는 그림13과 같은 스트림라인이 ISO뷰에서 어떻게 시각적으로 보이는지 확인 할 수 있습니다. 0도와 15도의 이미지에서 타이어에 부딪친 스트림라인을 보면 약간의 압축은 있지만 부드럽게 림을 타고 넘어가는 것을 볼 수 있습니다. 그러나 20도 이미지를 보면 림을 타고 넘어가는 스트림라인이 림테일에서 vortex를 일으켜 반대면을 타고 넘어오는 스트림라인과 혼합되는 것을 볼 수 있습니다. 이로 인해서 20도에서의 항력이 크게 증가되는 것입니다.

그림 15에서는 3D로 시뮬레이션된 림 단면에서의 항적을 보여줍니다. 2D해석결과와 마찬가지로 15도에서의 항적이 0도보다 확연히 적다는 것을 알 수 있습니다.

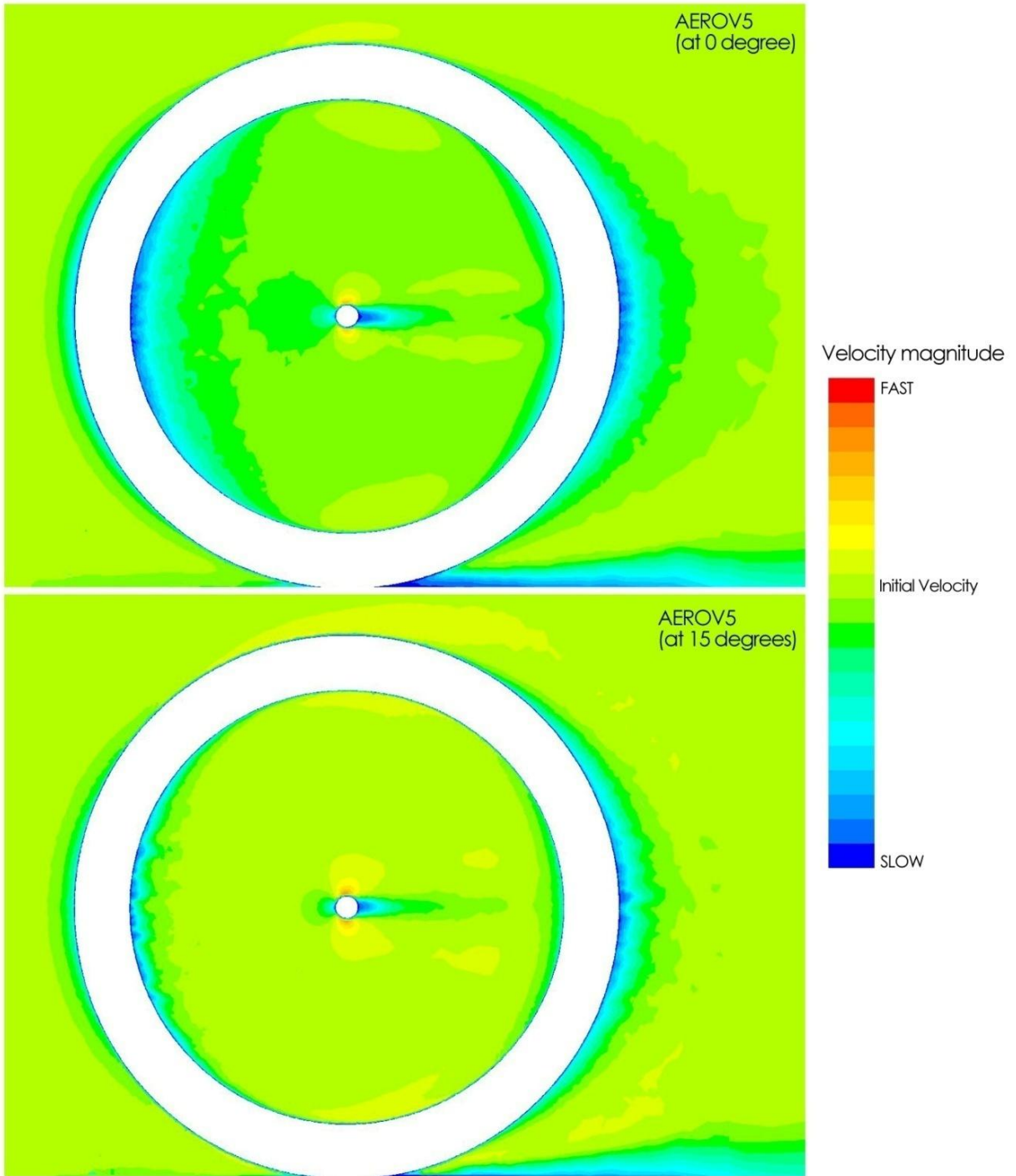


그림 15 림 단면의 항적

6. Stall 현상

유체역학에서 이 Stall현상은 가장 중요한 설계 포인트입니다. 특히 항공기의 날개를 설계하는데 있어서 이 Stall 포인트를 어떻게 설정하느냐에 따라 항공기의 양력과 기동성이 확보됩니다. 그림16처럼 Stall(실속현상)이란 날개의 받음각이 어느 한도 이상이 되면 표면을 따라 흐르는 기류의 흐름이 박리되어, 그 결과 급격하게 양력이 감소되고 항력이 증가하는 현상을 말합니다.

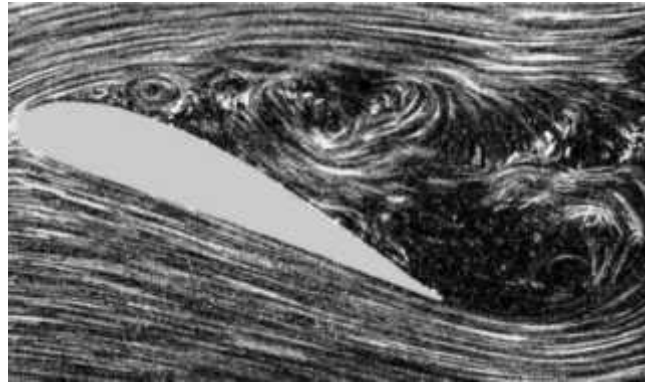


그림 16 Flow separation(wikipedia.org)

모든 자전거의 휠에서도 마찬가지로 일정한 각도에서 이런 Stall 현상이 발생합니다. 표3에서처럼 제품마다 일정한 각도가 되면 급격하게 항력이 증가하는 현상을 볼 수 있습니다. 이처럼 stall현상이 발생한 후의 흐름을 시뮬레이션 하는 것은 상당히 어렵습니다. 저희 시뮬레이션에서도 stall현상 이후의 흐름은 데이터의 흐름이 Converged(수렴)하지 않기 때문에 평균값으로 그 값을 대입하여 측정하였습니다.

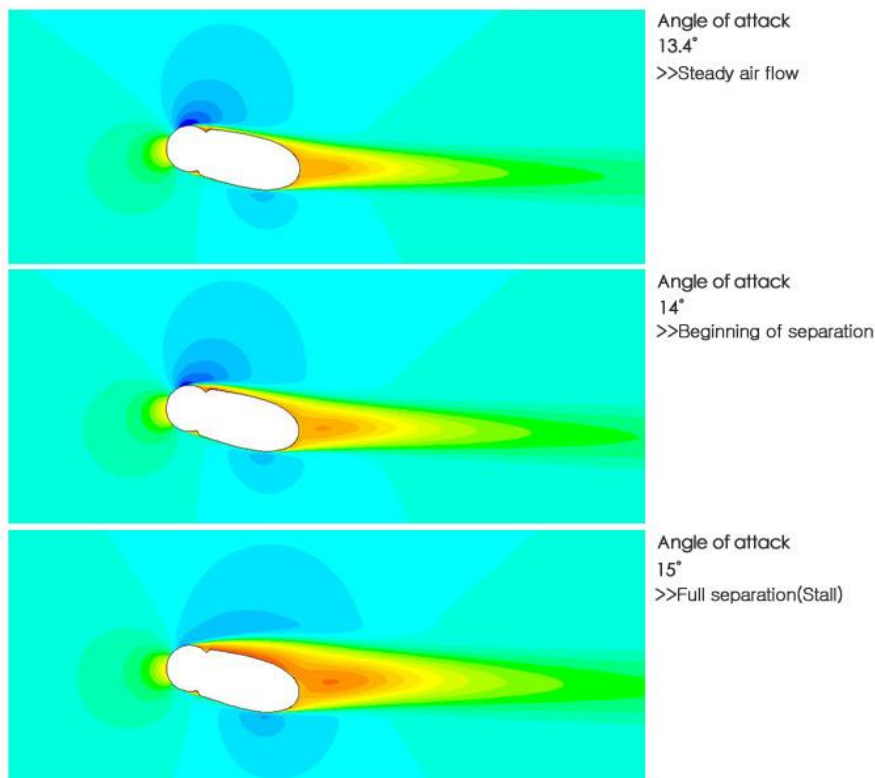


그림 17 받음각(AOA)별 항적 변화

그림 17에서 휠이 공기저항을 받는 받음각(Angle of attack)에 따른 항적변화를 시각적으로 확인할 수 있습니다. 0도에서 13.4도까지는 안정적인 공기의 흐름을 보이지만 14도부터 항력이 증가하여 15도가 되면 완전 실속상태(박리상태)가 된다는 것을 알 수 있습니다. 이때부터 항력은 급격하게 상승을 합니다.

자전거 휠의 에어로다이내믹 성능은 이 stall 현상을 얼마나 제어할 수 있느냐에 따라 달라집니다. 타이어를 타고 넘어오는 바람의 흐름을 최대한 큰 각도에서까지 박리(separation)시키지 않고 이어지게 하여 stall을 방지하는 것이 저희 에어로브 설계의 핵심입니다.

7. 스포크의 영향

사실 휠에서의 스포크의 영향은 적지 않습니다. 다만 현재까지의 대부분의 시뮬레이션이 컴퓨팅의 한계와 모델링의 한계로 완벽한 휠의 모델링을 통한 시뮬레이션이 어려웠던 것이 사실입니다.

저희 아비아브는 국내 최초로 휠의 형상을 실제 모델에 근접하게 3D로 모델링하여 휠의 회전을 통한 스포크의 영향을 측정했습니다.

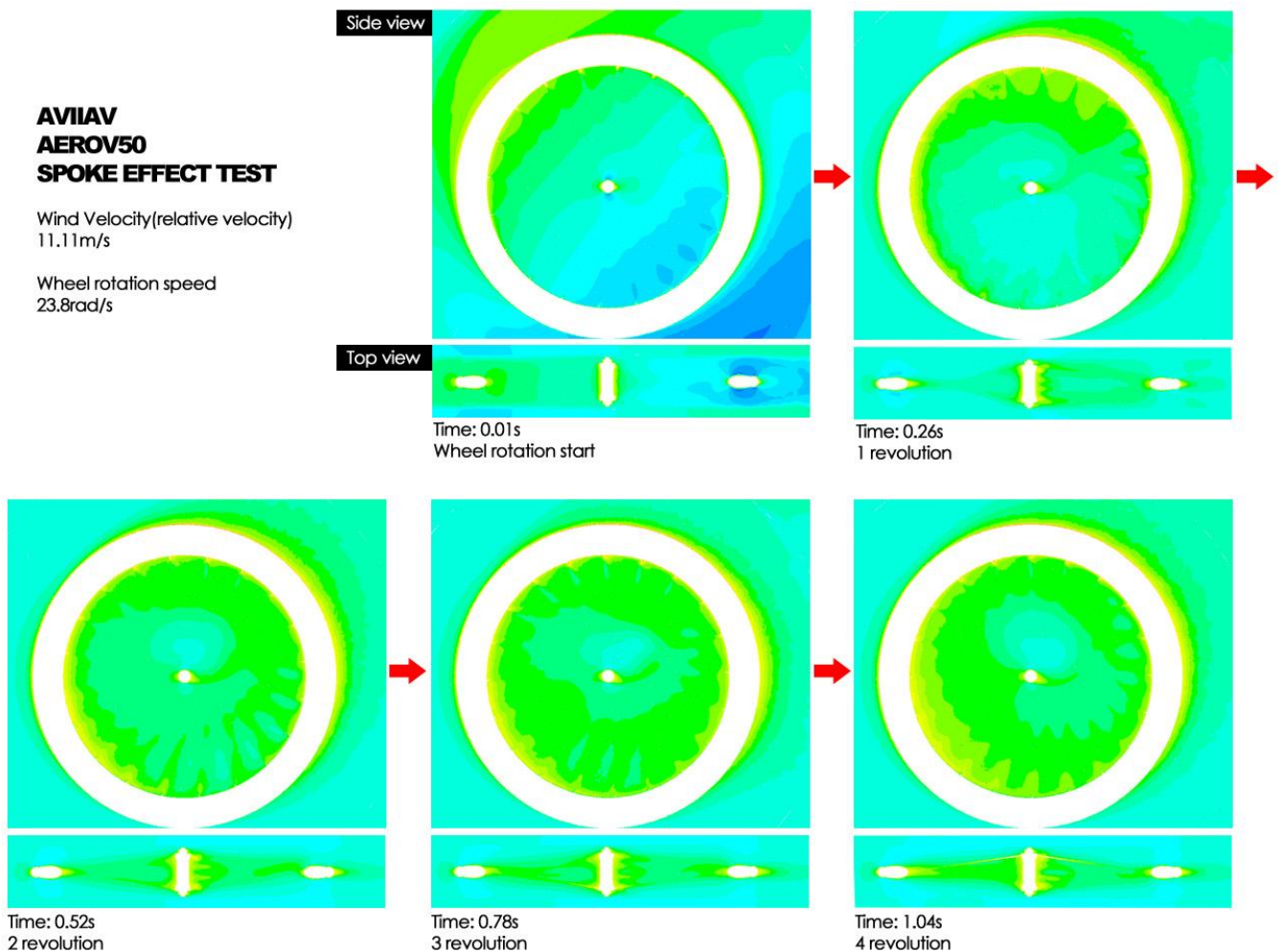


그림 18 휠 회전으로 인한 공기저항 측정

그림18에서처럼 11.11m/s의 바람이 정면에서 불어오고, 휠이 23.8rad/s로 회전할때 스포크로 인한 공기저항을 측정하였습니다. 이 경우는 다양하게 해석될 수 있는데, 정면에서 2.7m/s(10km/h)의 바람이 불어오고 자전거의 속도가 8.41m/s(30km/h)로 달리는 상황으로도 해석할 수도 있습니다.

이 경우 그림18에서처럼 바람의 흐름은 타이어와 림의 저항에 의해 타이어컨택면에서 곧바로 뒤로 흐르지 않고 약간씩 아래로 흐르게 됩니다. 약간씩 아래로 흐르는 바람은 스포크의 회전 영향으로 스포크 내부의 공간에서 회전하며 림컨택면에서는 오히려 위쪽으로 올라가는(회전에 의해) 방향으로 흐름이 이어집니다. 항적에서 노란색이 짙을 수록 공기저항이 심하게 생긴다는 뜻입니다.

또한 위쪽에서 바라본 단면에서 볼때 가장 큰 공기저항은 타이어컨택면에서는 림트레일 부분에서 생기지만, 전반적으로 스포크 사이의 내부 공간에서 분산되지 않고 공기저항을 발생시키며 회전을 하는 것을 알 수 있습니다.

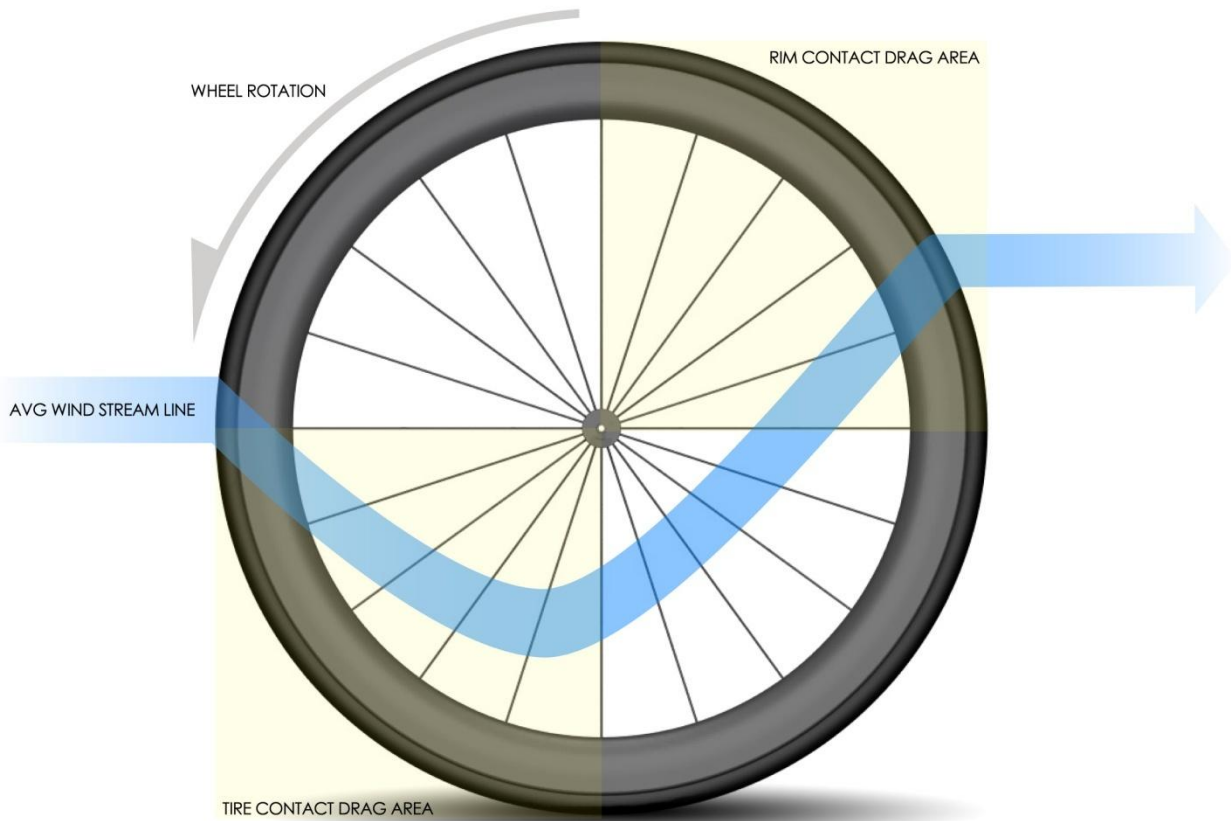


그림 19 휠의 회전으로 인한 바람의 흐름도

그림19은 설명을 위해 바람의 흐름도를 간략하게 표현한 것입니다. 그림의 스트림라인과 같이 실제 바람은 회전하는 타이어와 림의 마찰, 스포크의 회전으로 인해 아래로 향하다가 허브부근을 지나면서 흐름이 바뀌어 휠의 위쪽으로 빠져나가게 됩니다. 실제 항력은 노란색으로 표시된 3사분면(타이어컨택항력)과 1사분면(림컨택항력)에서 발생하게 됩니다.

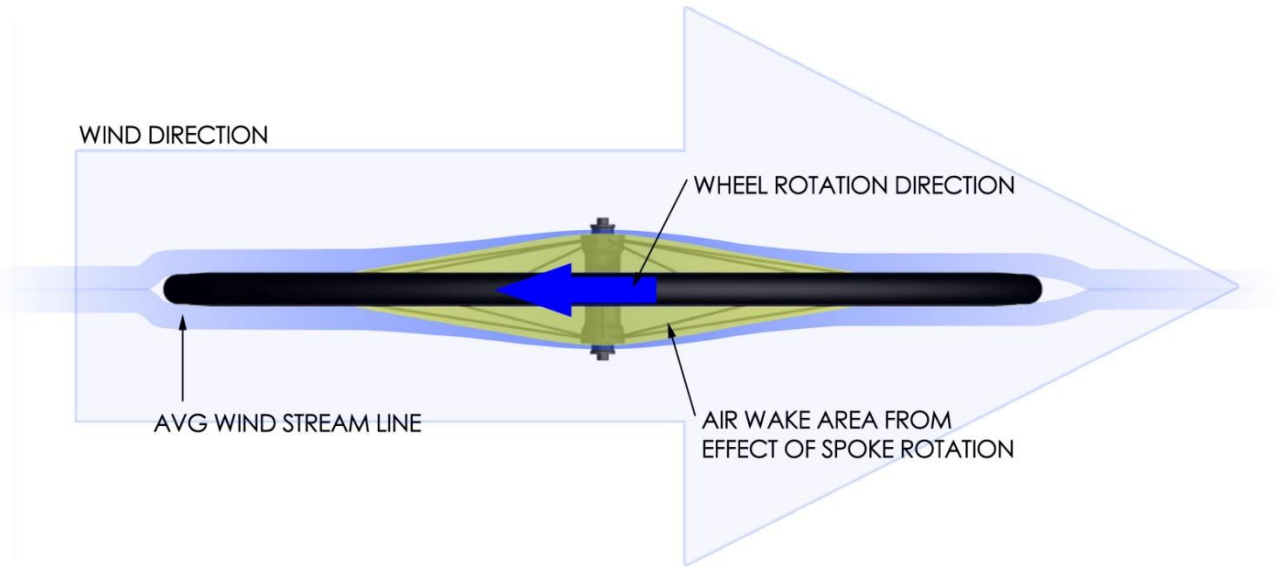


그림 20 윗면에서 바라보는 회전으로 인한 공기의 흐름도

아비아브 에어로브와 같은 형태의 휠의 장점중에 하나는 측풍시 후류영역이 생기는 부분을 최소한으로 억제시켜서 스포크의 회전으로 인한 림 안쪽의 공기의 흐름을 적절하게 분산시켜준다는 것입니다. 그림 20 과 같이 실제로 시뮬레이션 결과를 보면 스포크의 회전으로 인해 스포크 내부 공간에서 공기의 소용돌이를 크게 만들게 됩니다. 사실상 이것은 스포크의 갯수보다는 림의 프로파일에 따라 더 큰 영향을 받습니다. 결론적으로 보면 더 높은 림 높이를 가진 휠일 수록 스포크로 인한 공기의 저항을 줄여주며, 실제로 디스크형태의 휠은 이러한 스포크로 인한 영향을 최소화 시킬 수 있습니다.

결론

이번 시뮬레이션을 통해서 새롭게 와이드림으로 개발되는 아비아브 에어로브 림의 형상은 다음과 같은 장점이 있습니다.

- 50미리 계열 중에서 가장 낮은 항력값과 평균항력
-절대적인 항력값(15도)과 평균항력값이 가장 낮은 림 형태
- 타이어컨택면과 림컨택면의 낮은 측력값 차이
-낮은 측력값 차이로 휠의 안정성 확보
- 타이어 사이즈 증가에 따른 낮은 항력값 차이
-타이어 사이즈의 증가에도 비교제품 중 낮은 평균항력값
- 비교제품 중 가장 큰 각도(15도)까지 공기의 흐름 유지
-더 큰 각도의 측풍에서도 낮은 항력을 유지

비교데이터 분석

이번 시뮬레이션을 통한 데이터를 파워(W)로 계산하여 보겠습니다. 파워에 대한 수식은 다음과 같습니다.

$$Power(Watts) = F \times V$$

$$F = Force(Newton)$$

$$V = Velocity(m/s)$$

항력에 관련한 수식은 다음과 같습니다.

$$F_{drag} = \frac{1}{2} \rho V^2 C_d A$$

$$V = \sqrt{\frac{2F_{drag}}{\rho C_d A}}$$

$$F_{drag} = Force\ of\ Drag(Newton)$$

$$\rho = Density\ of\ Air(kg/m^3) = 1.225kg/m^3$$

$$C_d = Drag\ Coefficient$$

$$A = Frontal\ Area(m^2)$$

입니다.



우선 비교를 위해 기존 아비아브 알도 제품과 새롭게 개발된 Aerov5 제품간의 파워 차이를 보면 다음과 같습니다.

ALDO-AEROV5 power difference

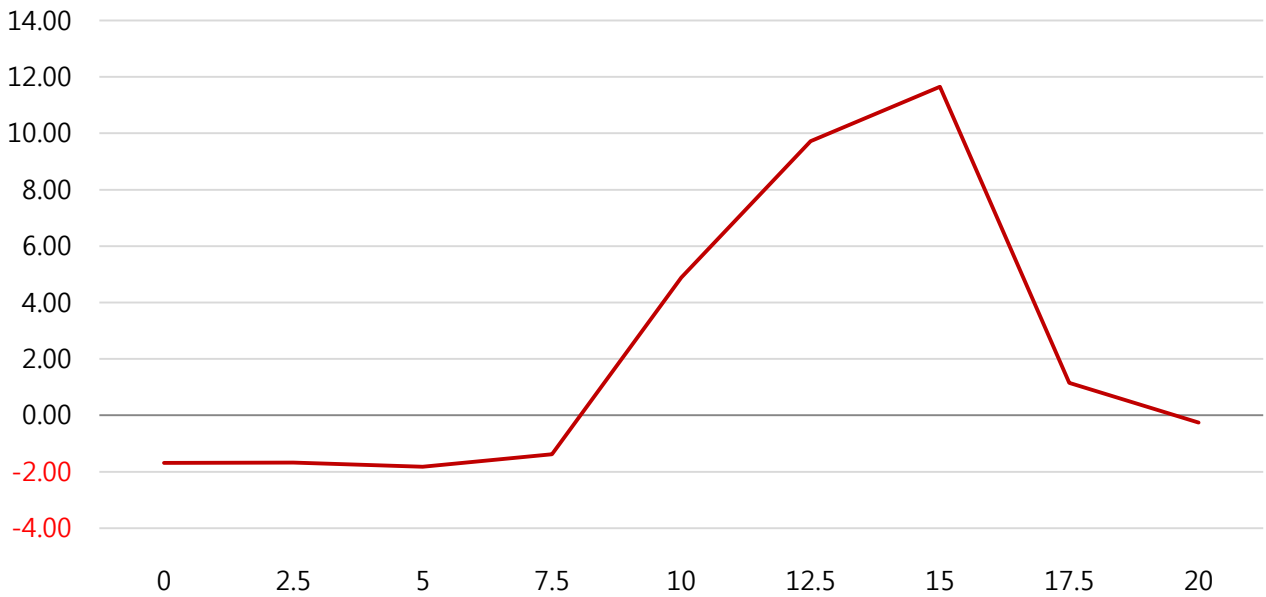


표 11 ALDO-Aerov5제품간의 풍향별 파워값 차이

표11에서 볼 수 있듯이 두 제품간의 차이는 7.5도까지 큰 파워손실이 없이 비슷한 값(오히려 ALDO가 더 좋은 파워 값)을 보여준다는 것을 알 수 있습니다. 그러나 최대로 파워값의 차이가 가장 크게 나는 15도에서의 풍향에서는 Aldo에 비해 Aerov5가 약 11와트(watt)정도의 파워를 세이브할 수 있다는 것을 알 수 있습니다. 이는 휠1개의 차이 이므로 앞뒤 휠을 모두 고려한다면 최대 약 16~22와트의 파워의 손실을 줄일 수 있다는 것을 알 수 있습니다.

다음으로 각 제품간의 평균 항력값에서 에어로브5의 항력값과의 차이를 위의 식을 바탕으로 계산해 보았습니다.

POWER SAVING

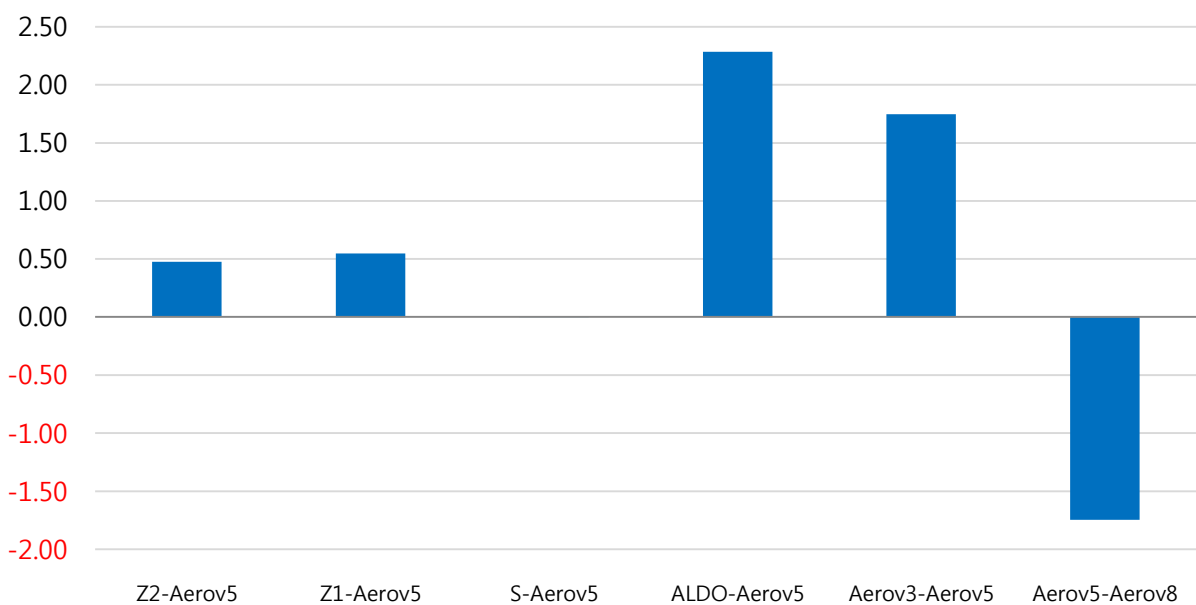


표 12 각 제품과 에어로브5간의 파워 차이



표12에서 볼 수 있듯이 0도에서 20도까지의 전체 평균항력에서 세이브되는 파워는 크지 않습니다. 기존 제품인 ALDO와의 차이도 평균값에서는 약 2.3와트 정도의 파워를 세이브 할 수 있습니다. 비교 제품인 다른 브랜드의 휠들과 비교해도 0.1~0.6와트의 값 정도의 파워를 세이브 할 수 있는 것으로 나타났습니다.

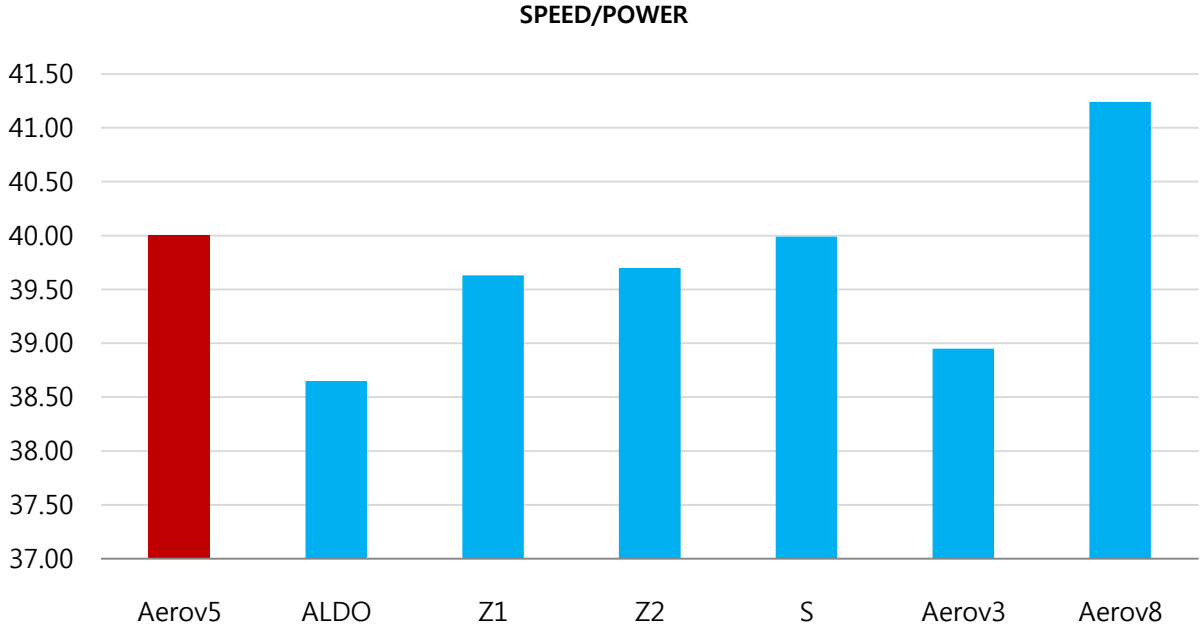


표 13 같은 파워에서 낼 수 있는 속력

표13은 Aerov5의 파워를 기준으로 각 제품들이 낼 수 있는 속도를 비교한 표입니다. Aerov5가 시속 40km/h를 내기 위한 파워를 각 제품에 적용하면 에어로효과가 가장 낮은 ALDO 제품이 약 38.7km/h로 약 1.3km/h의 속도차이를 보여주며, Aerov3의 경우 약 38.9km/h로 1.1km/h의 속도차이를 보여줍니다. 가장 림 프로파일이 높은 제품인 aerov8의 경우 Aerov5에 비해 약 1.2km/h의 속도를 더 낼 수 있다는 것을 알 수 있습니다. 비교제품들과 비교 했을때 큰 차이는 없지만 Aerov5가 다른 제품들에 비해 같은 파워에서 약 0.4~0.1km/h의 속도향상효과가 있다는 것을 알 수 있습니다. 위의 내용에서 알 수 있듯이, 에어로 형태의 휠이 같은 파워에서 더 빠른 속도를 낼 수 있고, 같은 속도에서 더 낮은 파워를 소모한다는 것을 알 수 있습니다.

끝맺으며

앞에서 살펴본 것처럼 저희 아비아브 에어로브 제품이 비교적 좋은 데이터를 보여주지만, 저희 제품이 유일하고 독보적인 성능을 보여준다고 말하지는 않겠습니다. 그러나 자전거 선진국에 비해 많이 뒤쳐진 후발주자로서 다만 단 0.01N의 항력이라도 줄일 수 있다면 그 자체로도 큰 의미가 있다고 봅니다. 마지막의 파워-속도 비교 표(표13)에서도 알 수 있듯이, 그 속도차이가 단 0.1km/h가 난다 하더라도 이것이 실제 경기에서는 큰 차이로 나타날 수 있으며, 이 차이로 인해 포디엄의 순위가 바뀔 수 있다는 것을 저희는 잘 알고 있습니다.

이번에 새롭게 아비아브 에어로브 제품을 개발하는데 있어서 총 5개월의 시간이 소요되었습니다. 아비아브는 대한민국 최초로 경주용 자전거휠을 개발했던 업체로서 이번 제품을 개발하는데 국내 최초로 CFD기법을 사용 비교 분석하여 해외 브랜드에 비교해서도 뒤지지 않는 성능의 제품을 개발하였습니다.

국내의 자전거 시장은 이제 겨우 걸음마 단계입니다. 현재도 유통되는 국내 브랜드들은 많이 있지만, 실제로 연구개발을 통해 제품을 설계 생산하는 업체는 손꼽을 정도입니다. 더욱이 휠 부품 시장에서 한국 브랜드는 자전거 선진국에 비해 연구개발 실적이 거의 전무한 상태입니다. 저희 아비아브는 대한민국의 대표 브랜드로서 제품의 초기 설계에서부터 생산까지 국내의 기술로 이루어진 제품으로 세계시장에 내놓아도 결코 손색이 없는 새로운 제품을 개발하였습니다. 본 백서의 목표도 단순히 내부 자료로서 사용하는 것이 아닌 실제 연구 개발의 결과를 공유하여 저희의 노력과 기술을 알려드리고 향후 국내 자전거 시장의 상생을 도모하고자 하는 것입니다.

단순히 말뿐인 성능이 아닌 실제 시뮬레이션과 테스트를 통한 결과값으로 보여드리고자 제품을 개발하는데 많은 시간과 비용을 소모했습니다. 이제 저희 아비아브는 대한민국 대표 카본 휠 브랜드로서 더욱 발전하는 회사가 되도록 노력하겠습니다.

아비아브/알비인터내셔널 대표
김 수 철