

기계공학실험 : 유체역학 실험 C

Single phase flow over a car model

5조 2019-15838 주기영

분석

0. PIV setting

PIV setting은 실험 A, B에서의 경험을 토대로 진행하였다. 먼저 ROI의 설정은 수조 내에서의 모든 부분을 ROI로 먼저 설정하였고, 이렇게 설정한 ROI 내부에서 잠긴 물체(car와 truck)과 그 아래를 모두 Mask 처리하였다. car와 truck의 아래에서는 물체의 그림자로 인하여 가려지는 부분이 존재하기 때문에 PIV가 제대로 수행되지 않았음을 예상하고 제외하였다. Interrogation window의 경우에는 실험 A에서 진행하였던 1/4-law와 stokes number를 직접 확인하여 제대로 수행되었던 것을 기반으로 50rpm에서는 40px, 100rpm에서는 50px로 진행하였고, step은 크기의 iw_size의 50%로 설정하고 진행하였다. 또한 Pass 2의 iw_size의 경우에는 각각 30px, 35px로 설정하고 진행하였다.

PIV 대상 사진의 noise 배제하고, PIVlab program을 사용하는 동안의 seeding particle를 잘 인식되기 위해서 Image pre-processing을 CLAHE filter와 highpass filter를 이용하여 진행하였다. 또한, reference length는 A와 마찬가지로 바닥에서의 알고 있는 두께 값을 활용하였다.

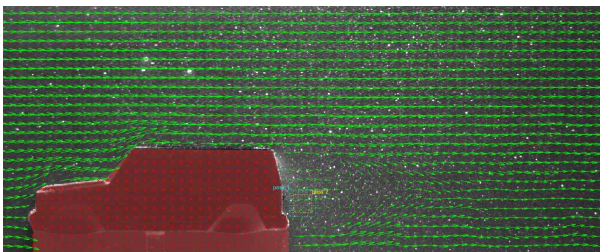


Fig 1. Example velocity field

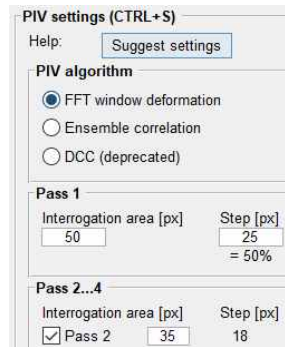


Fig 2. Interrogation area setting

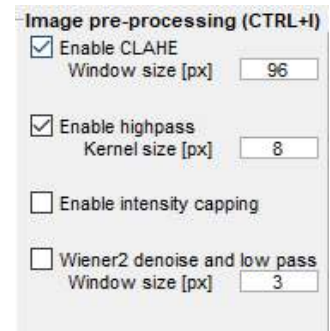


Fig 3. Image pre-processing

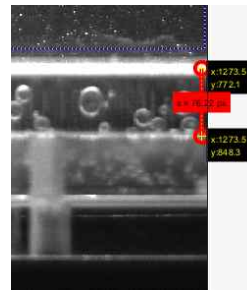


Fig 4. Reference length

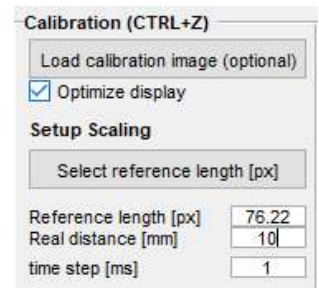


Fig 5. Calibration

1. Time-averaged velocity field

시간 평균된 속도장을 구하기 위해서 PIVlab에서의 기능을 사용하였다. 먼저 500개의 속도장에 대한 시간 평균 속도장을 PIVlab 내에서 계산한 뒤에 Plot 메뉴에서 “Spatial:derive parameter” 기능을 이용하였다.

Fig 6~9를 관찰해보면 먼저 50rpm과 100rpm에서 차에 영향을 받지 않는 부분에서의 free stream velocity의 차이가 크게 나는 것을 관찰할 수 있다. 또한 차체 바로 위에서는 실험 B에서와 마찬가지로 경계층 유동이 생겨서 다른 부분보다 속도가 더 작아지는 것을 color bar를 보면 알 수

있다. 이는 car보다 truck에서 더욱 뚜렷하게 관찰되는데 이는 car의 윗부분은 완만한 곡선 모양으로 이루어져 있는 반면에 truck의 윗부분은 plat plate 모양을 가지고 있기 때문이다.

Car model에 따라 가장 눈여겨볼 수 있는 것은 wake(후류)의 발달 모습이다. truck은 car보다 height 부분이 더욱 크기 때문에 wake가 길게 발달되는 반면에 car는 wake가 비교적 짧게 발달한다. 또한 각각의 car model에서의 rpm에서의 wake의 모습을 관찰해보면 차이가 크지 않기 때문에 wake의 모습은 유체의 free stream velocity 보다는 car model에 직접적인 관련이 있다.

각각의 car model, rpm에서의 free stream velocity는 차의 영향을 받지 않으며, 또한 수조의 윗부분에서의 영향을 받지 않는 공간에서의 시공간 평균을 통하여 구하였고, 나머지 분석에서 free stream velocity를 계산할 때 이 값을 이용한다. 이론상 rpm이 같으면 free stream velocity는 같아야 하나 값이 다른 것은 관찰할 수 있는데 이를 측정 오차에 포함해야 한다.

Car model, rpm	Free stream velocity [m/s]
car, 50rpm	0.3641
car, 100rpm	0.8012
truck, 50rpm	0.3818
truck, 100rpm	0.7642

Table 1. Free stream velocity

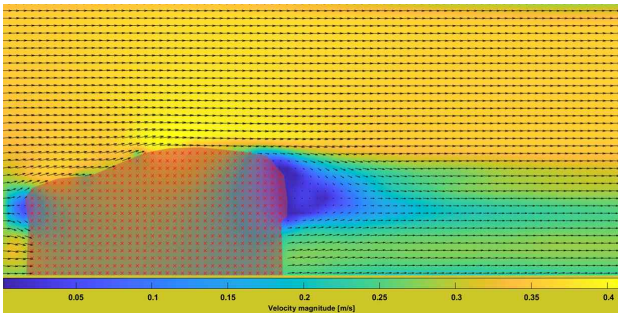


Fig 6. Time averaged velocity field (50rpm, car)

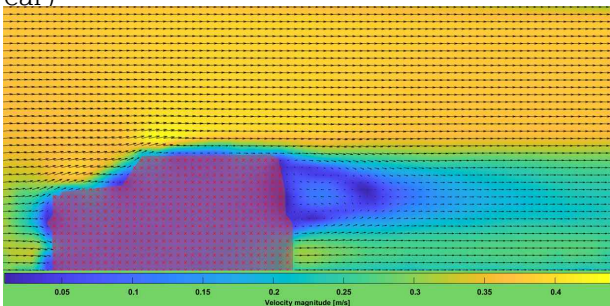


Fig 7. Time averaged velocity field (50rpm, truck)

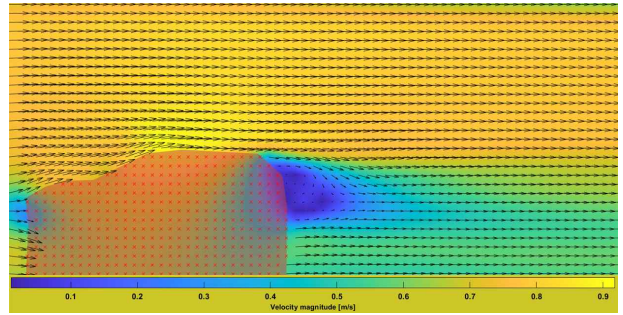


Fig 8. Time averaged velocity field (100rpm, car)

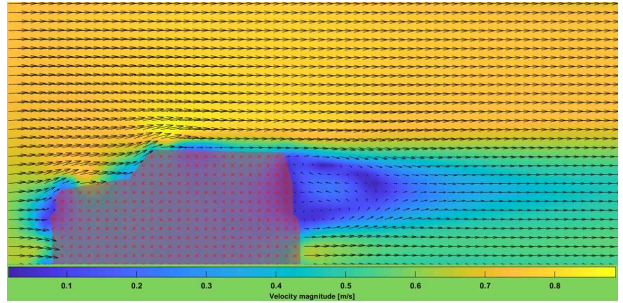


Fig 9. Time averaged velocity field (100rpm, truck)

2. The velocity profile in the wake와 car model에 따른 비교

2.1 wake와 stagnation point

Wake(후류)는 유체가 물체 주위를 통과할 때 형성되는 flow의 shape를 의미한다. 일반적으로, 유체가 잠긴 물체를 통과할 때 유체는 물체의 전후방을 따라서 흐르며, 이러한 flow가 물체의 뒤쪽에서 특별한 flow shape를 형성한다. 물체 뒤쪽에서는 유체의 속도가 느려지고, 유체의 에너지 손실이 발생하여 유동성이 낮아지는 특징을 가지고 있으며 이것이 wake가 갖는 특징이다. 유체역학에서 물체의 저항을 분석할 때 wake는 가장 중요하게 분석되는 것 중 하나이다.

Stagnation point는 유체의 속도장을 계산하였을 때 유체의 속력이 0인 지점을 의미한다. Stagnation point 주위에서는 유체가 물체를 통과하면서 분리되고 다시 합쳐지는 부분으로 유체 중 일부는 물체쪽으로, 일부는 원래의 유동과 같은 방향으로 운동한다. 즉, 유체가 모이고, 흩어지는 지점이다.

본 실험에서는 실제로 유체가 잠긴 물체를 통과할 때의 운동을 분석하는 것으로 wake가 나타나고, 이에 따른 stagnation point가 발생하게 된다.

2.2 Karman Vortex Street

wake의 모습을 관찰하기 위해서 특정한 moment

에서 분석을 해보았다. 먼저 시간 평균 속도장에서 관찰할 수 없는 부분은 시간 평균 속도장에 비해서 물체 뒤에서도 속도 변화가 더욱 크고, 또한 y방향 속도인 v의 절대값 또한 더욱 크다. 이는 잠긴 물체의 뒤에서 유체가 재결합하는 stagnation point가 물체의 위에서부터 오는 flow와 아래에서부터 오는 flow의 속도가 계속 변함에 따라서 시간에 따라 바뀐다. 이로 인해서 물체의 뒤에서는 유체의 흐름이 steady state를 유지하지 않고, 계속하여 바뀌게 되고 이러한 변화의 형태는 진동으로 나타난다. 이는 Karman Vortex Street이라는 현상이라고 불리우며 특정 지점에서의 유체의 vorticity의 부호(회전 방향)가 계속하여 바뀌게 된다. Fig 10과 Fig 11의 유선을 살펴보면 Fig 11에서는 유선이 x축과 평행하게 나타나는 반면에 Fig 10에서는 유선이 fluctuate하는 것을 관찰할 수 있고, 이는 Karman Vortex Street 현상에 의한 것이다. stagnation point 또한, Fig 10과 Fig 11의 모양을 살펴보면 다른 것을 확인할 수 있다.

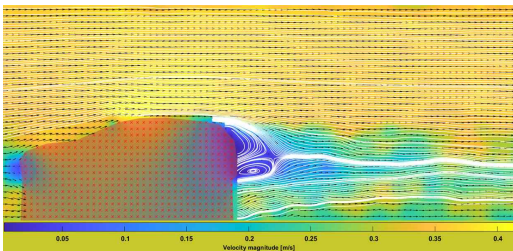


Fig 10. velocity field of moment including streamline (50rpm, car)

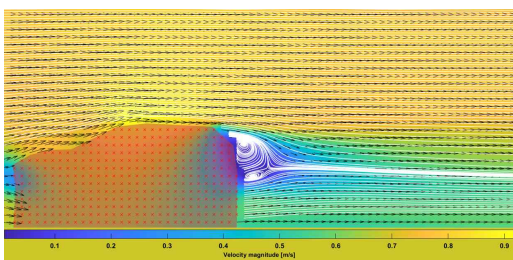


Fig 11. Time averaged velocity field including streamline (50rpm, car)

2.3 Stagnation point에서의 속도

유선에서 확인해볼 수 있는 Stagnation point에서 실제로 x방향 속도 u와 y방향 속도 v가 0이 되는지 살펴보자. Fig 13, 14는 특정한 moment에서의 속도장을 plot해본 것으로, Fig 13은 u component에 대하여 color bar를 삽입하였고, Fig 14는 v component에 대하여 color bar를 삽입하였다.

실제로 Fig 12, 13에서 stagnation point에서 u component와 v component 모두 0에 가까운 color를 가지는 것을 관찰할 수 있고, Fig 14에서는 stagnation point에서 벡터장이 합쳐지고, 분리되는 지점이라는 것 또한 확인해볼 수 있다. 즉, u와 v의 부호가 바뀌는 지점이다. 나머지 경우에서도 Stagnation에서 벡터장의 이러한 양상을 관찰할 수 있었다.

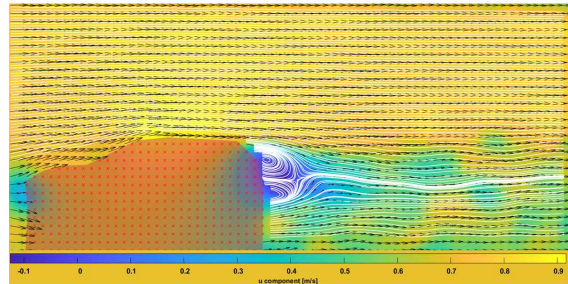


Fig 12. velocity field of moment (100rpm, car, u component colorbar)

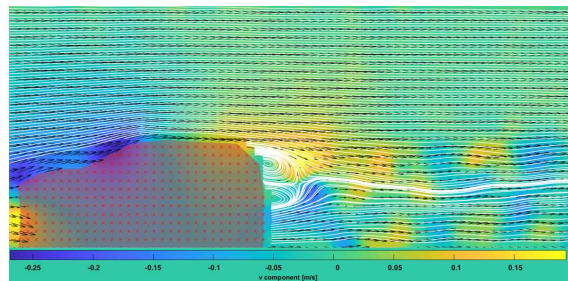


Fig 13. velocity field of moment (100rpm, car, v component colorbar)

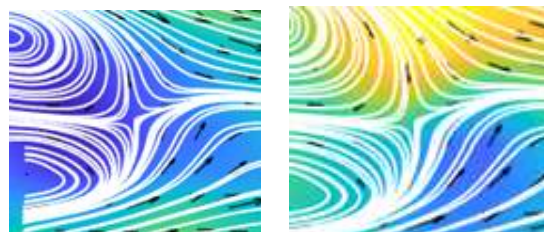


Fig 14. Stagnation point

2.4 car model에 따른 wake 비교

Fig 11, Fig 15~17은 각각의 rpm, car model에 따라서 특정 moment에서의 속도장의 모양과 속도 벡터의 절대 크기를 color bar로 나타내고, 유선을 포함한 그림으로 stagnation point의 위치를 쉽게 확인할 수 있다. 먼저 속도에 따라서 wake의 발달 모양의 큰 차이가 없다. 하지만 car와 truck에서 truck이 car에 비해 wake가 더 많이 발달하

는 것을 관찰할 수 있다. 이는 truck이 height와 크기가 더 커서 물체 위, 아래의 flow가 합쳐지는 것에 더욱 많은 시간이 소요되기 때문이라고 생각한다. 또한 이로 인해서 stagnation point 또한 car에 비해서 물체와 더욱 멀리 떨어진 곳에서 발달한다. 또한 유선의 fluctuate 진동의 진폭 또한 더욱 크게 관찰되어 Karman Vortex Street현상이 더욱 두드러지게 관찰된다.

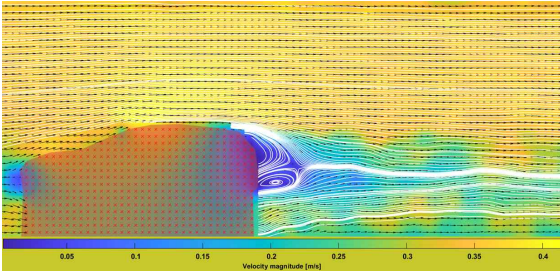


Fig 11. velocity field of moment including streamline (50rpm, car)

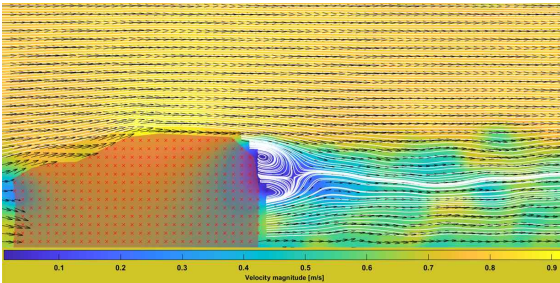


Fig 15. velocity field of moment including streamline (100rpm, car)

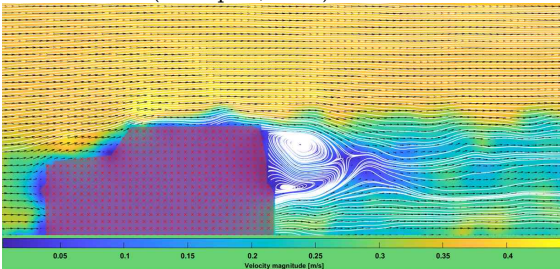


Fig 16. velocity field of moment including streamline (50rpm, truck)

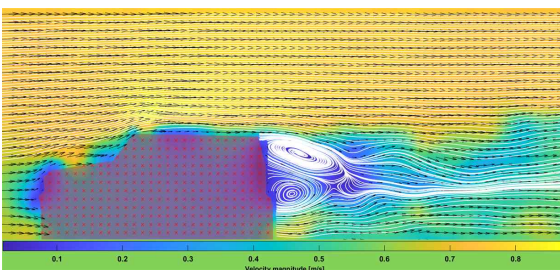


Fig 17. velocity field of moment including streamline (100rpm, truck)

3. The time-averaged streamlines plot과 car model에 따른 차이점 비교

3.1 유선 포함 속도장 plot

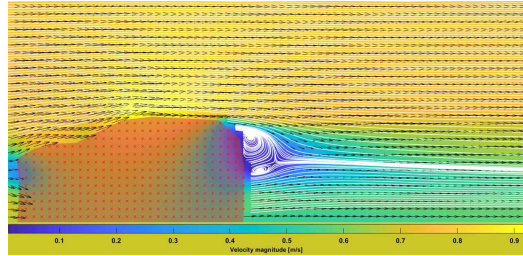


Fig 18. Time averaged velocity field including streamline (50rpm, car)

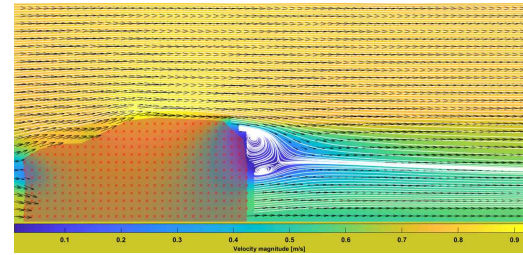


Fig 19. Time averaged velocity field including streamline (100rpm, car)

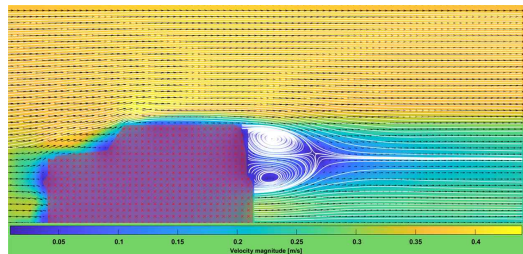


Fig 20. Time averaged velocity field including streamline (50rpm, truck)

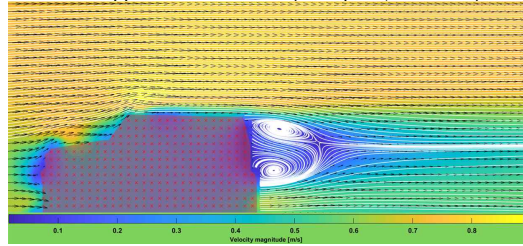


Fig 21. Time averaged velocity field including streamline (100rpm, truck)

3.2 Wake와 stagnation point

각각의 car model의 속도장은 scale만 상수만큼 다르고, 분포는 거의 똑같음을 Fig 18~21을 확인해보면 알 수 있다. 즉, 잠긴 물체의 유동은 일정 속도 이상에서는 유체의 속도보다도 잠긴 물체의 크기나 모양에 많이 의존한다는 것을 알 수 있다. 또한, wake에서의 유선의 모양이나 stagnation의

위치 또한 같은 car model에서는 거의 같고, truck이 car보다 wake가 더 발달되었고, stagnation point가 더욱 뒤에 있는 것을 관찰할 수 있다. 또한, Karman Vortex Street 현상을 관찰할 수 없는데 이는 이러한 현상이 flow가 시간에 따라 균일하게 진동하는 현상이기 때문임을 뒷받침하고, 4가지 case 모두 차에서 멀리 떨어진 부분에서는 유선이 거의 x축에 평행한 것을 관찰할 수 있다.

평균 속도장에서 stagnation point는 flow가 진동하면서 실제로 시간이 흐름에 따라서 변하게 되는 stagnation point에서 진동의 중심에 위치한다고 할 수 있다. car에서는 stagnation이 truck보다 좀 더 차의 아래쪽으로 쏠려서 형성되고, truck에서는 거의 중간에서 형성되는 것을 확인할 수 있는데 이는 car model의 shape 차이에 따라서 유체가 다시 합쳐지는 양상이 다르기 때문에 나타나는 현상이라고 생각한다.

3.3 Recirculation region

Recirculation region은 유체의 흐름이 주위와 다르게 역행하거나 회전하는 영역을 의미한다. 이 영역은 유체의 흐름이 되돌아가거나 뒤로 향한다. 이는 장애물을 통과한 유체가 주변의 유체와 상호 작용하며 만드는 영역으로 Fig 18~21에서 stagnation point에서 car쪽으로 이동하는 유체와 원 모양의 유선을 만들면서 회전하는 유체들이 모두 Recirculation region를 구성한다. 본 실험에서는 차의 표면부터 stagnation point까지 두 개의 순환 유체 부분을 확인할 수 있고, 이를 통하여 유체의 Recirculation region이 존재함을 눈으로 관찰할 수 있고, Recirculation region이 클수록 일반적으로 저항이 크게 나타나는 것으로 알려져 있다. 또한, Recirculation region에서는 유체의 변동성이 매우 크고, 이러한 영역이 끝나는 지점에서부터 원래의 Laminar flow를 다시 회복하는 단계가 된다. (본 실험에서 모든 case의 free stream은 Laminar flow임을 계산해보았다.)

truck은 car보다 Recirculation region이 크기 때문에 Drag와 이러한 Recirculation region에서의 속도의 변동폭이 더욱 클 것으로 예상할 수 있고, 실제로 그러한지 뒤에서 확인해보는다.

4. Time-averaged vorticity contours과 car model에 따른 차이점 비교

4.1 Vorticity의 의미

Vorticity(회전도)는 회전의 강도와 방향을 표현하는 벡터이다. Vorticity는 유체의 회전의 특성을 정량적으로 나타내고, 유체의 흐름이 회전을 얼마나 포함하는지를 표현하기 위해 사용된다. 수학적으로 식(1)과 같이 표현되고, 속도벡터장에 curl을 이용하여 표현한다. 본 실험에서는 z 방향의 유동을 확인할 수 없으므로, Vorticity는 두 개의 방향만을 가진다. MATLAB PIVlab의 경우에는 Vorticity 값이 음수일 때는 반시계방향의 유동을 나타내고, 양수일 때는 시계방향의 유동을 나타낸다. 또한, Vorticity의 절대값이 클수록 해당 방향으로의 회전 정도가 큰 것을 의미하고, Vorticity의 값이 0일 때는 회전이 없는 것을 의미한다.

$$w = \nabla \times V \quad (1)$$

4.2 Time-averaged vorticity contour

Fig 23~26은 4가지 case의 Time-averaged vorticity의 contour를 나타낸 것이다. 가장 먼저 확인할 수 있는 것은 bluff body에 영향을 거의 받지 않는 free stream velocity를 갖는 영역에서의 vorticity값이 0인 것이다. 즉, 이 곳에서는 유체가 회전하지 않고, steady state를 유지하고 있음을 알 수 있다.

4가지 케이스 모두 bluff body를 통과하는 순간 위쪽의 flow는 시계방향으로 회전하여 내려가고, 아래쪽의 flow는 반시계방향으로 회전하여 올라가서 두 개의 flow가 합쳐지는 것을 설명할 수 있도록 비슷한 양상의 vorticity contour를 갖는 것을 관찰할 수 있다. 또한, vorticity contour도 속도장과 마찬가지로 같은 car model에서 분포는 같으나 scale이 상수배만큼 차이 나는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 식(1)에서 vorticity값이 원래의 속도장의 값에 정비례하기 때문임을 확인할 수 있고, 시계방향으로 회전하는 flow의 vorticity의 절대값이 반시계방향으로 회전하는 flow보다 큰 것으로 보아 위쪽의 flow가 평균적으로 더 큰 vorticity를 갖는다고 말할 수 있다.

두 가지 car model에서 다른 점은 위쪽의 flow가 car를 타고 올라가는 과정에서 truck이 car보

다 vorticity가 큰 것을 관찰할 수 있는데 이는 truck이 차 앞쪽에 car보다 더 큰 경사를 가지기 때문이고, 이를 통하여 유체의 flow가 꺾이는 과정에서 방향이 많이 바뀔수록 유체의 vorticity가 커짐을 관찰할 수 있다.

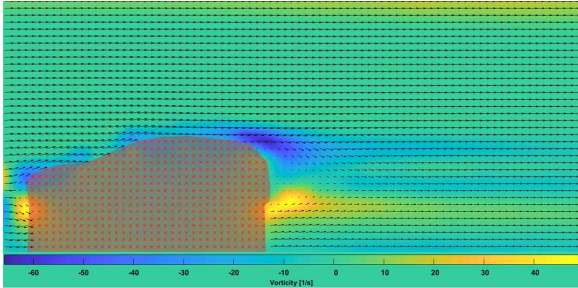


Fig 22. Time averaged vorticity contour (50rpm, car)

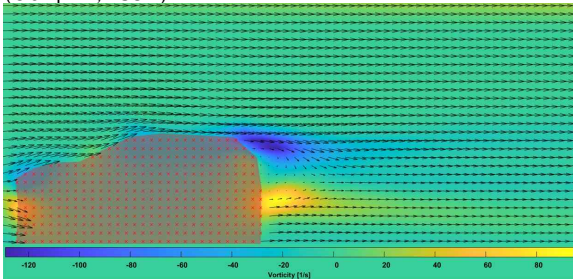


Fig 23. Time averaged vorticity contour (100rpm, car)

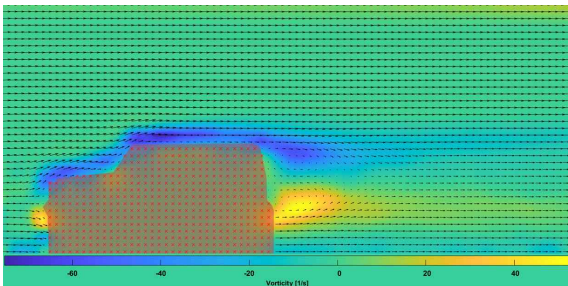


Fig 24. Time averaged vorticity contour (50rpm, truck)

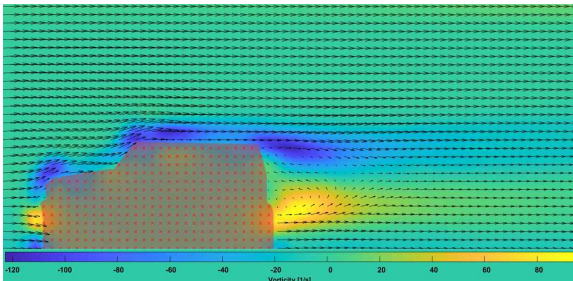


Fig 25. Time averaged vorticity contour (100rpm, truck)

4.3 vorticity contour of moment

앞서 Karman Vortex Street 현상에 대해서 설

명하였는데 이는 bluff body 뒤에 한 지점에서의 vorticity가 계속하여 변하도록 만드는 현상이다. 하지만 3.2에서 구한 vorticity contour는 모두 시간평균을 냈기 때문에 car model의 뒤에서도 vorticity의 값이 거의 0에 가까운 것을 관찰할 수 있다. 이는 stagnation point 이후에서 moment에서의 속도장의 유선은 fluctuate하지만 시간 평균 낸 속도장에서의 유선은 x축에 거의 평행한 것과 같은 원리이다. Fig 26, 27은 어떠한 순간에서의 vorticity contour를 car와 truck 각각 100rpm에서만 나타내어 비교한 것이다. 이를 보면 시간 평균한 것과 다르게 stagnation point 이후에서 유체가 계속 방향을 바꾸면서 vorticity를 갖는 것을 관찰할 수 있으며, Karman Vortex Street 현상을 직접적으로 관찰할 수 있는 부분이다. 또한 실제로 Fig 26이 Fig 25보다 유체 flow의 진폭이 미세하게 큰 것을 관찰할 수 있는데 일반적으로 bluff body의 크기가 클수록 진폭이 커지는 것을 통하여 이 현상을 설명할 수 있다. 또한, 여러 개의 moment에서의 vorticity contour를 그려보면 bluff body의 뒤쪽의 임의의 한 지점에서의 vorticity가 계속하여 변하는 것을 관찰할 수 있을 것이다.

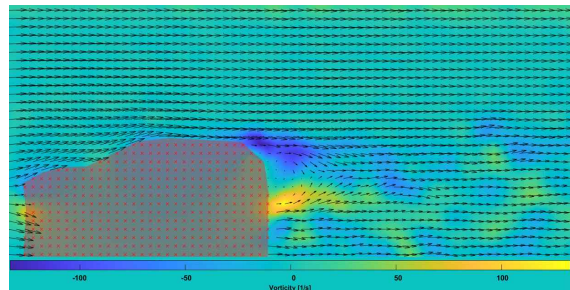


Fig 26. vorticity contour of moment (100rpm, car)

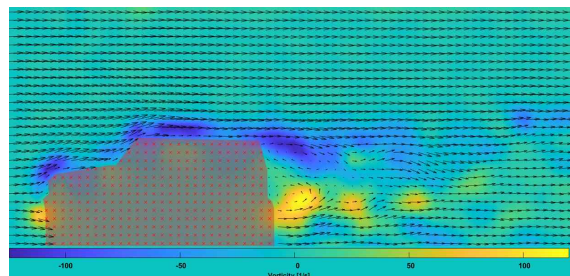


Fig 27. vorticity contour of moment (100rpm, truck)

5. Reynolds stress-Time graph plot과 car model에 따른 차이점 비교

5.1 Reynolds stress

앞서서 실험 A, B에서는 Reynolds 수를 통하여 난류와 층류를 구분지었고, 이는 식(2)와 같이 구별된다. 본 실험에서 진행하는 4가지 case에서의 free stream에서의 Reynolds 수는 식(3), (4)와 같이 나타나고, 이는 모두 식(2)에서 Laminar flow와 관련된 값이다. 식(30)에서 동점성 계수의 경우에는 식(4)의 값을 활용하고, d 값의 경우에는 정사각형 모양의 관을 따라 운동한다고 가정한 후에 관 전체의 높이 값을 활용하였다. 관 전체의 높이는 92.989mm로 계산되었다. 식(5), (6)은 각각 100rpm에서의 car, truck의 레이놀즈 수를 나타낸 것이고, 식(7)은 50rpm에서의 car, truck의 레이놀즈 수를 나타낸 것이다. 즉, 4가지 case에서 free stream의 레이놀즈 수는 층류의 범위에 속한다.

하지만 레이놀즈 수를 계산하였을 때 층류에 속하더라도 어떤 지점에서 속도, 압력의 변동이 매우 크다면 난류가 형성된다. 본 실험에서는 car model bluff body의 뒤에서 turbulence가 형성된다. Reynolds stress는 Turbulence에서 압력의 변동을 나타내는 대표적인 지표로 식(8)과 같이 표현되며 u', v' 의 곱의 시간평균과 밀도의 곱으로 정의된다.

$$10^3 < Re_x < 10^5 \text{ (laminar)} \quad (2)$$

$$10^6 < Re_x \text{ (turbulent)}$$

$$Re_d = \frac{U_\infty d}{\nu} \quad (3)$$

$$\nu = \mu/\rho = 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (4)$$

$$Re_{car} = \frac{0.8012 \times 92.989 \times 10^{-3}}{1.004 \times 10^{-6}} = 74502.8 \quad (5)$$

$$Re_{truck} = \frac{0.7642 \times 92.989 \times 10^{-3}}{1.004 \times 10^{-6}} = 70779.1 \quad (6)$$

$$Re_{car} = 35898.3, Re_{truck} = 37643.4 \quad (7)$$

$$Reynolds \ stress = \overline{\rho u'v'} \quad (8)$$

$$u' = u - \bar{u}, v' = v - \bar{v}, \rho = 998 \text{ kg/m}^3 \quad (9)$$

5.1 4개의 point select

Reynolds stress의 변화를 나타내기 위해서 네 개의 지점을 임의로 설정하였다. point 1은 평균속도장 내에서의 car의 stagnation point이고, point 2는 평균속도장 내에서의 truck의 stagnation p

oint이다. point 3, point 4는 point 1, point 2를 기준으로 x축 방향으로 같은 간격을 가지도록 임의로 설정하였다. y축 방향으로는 point 1, 2의 중점을 선정하였다. Fig 28에 각 point에 위치를 나타내었고, Fig 28에서 각 point에 나타난 색을 통하여 Reynolds stress를 plot한다.

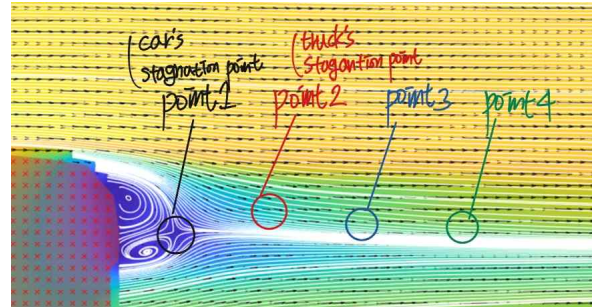


Fig 28. Four analyze point

5.3 Reynolds stress plot

5.2에서 선정한 점 4개와 더불어서 시각적인 비교를 위해서 각각의 case에서의 free stream이 지나가는 점을 임의로 잡아서 point 0으로 설정하고, 각각 5개의 point에서 분석을 진행하였다.

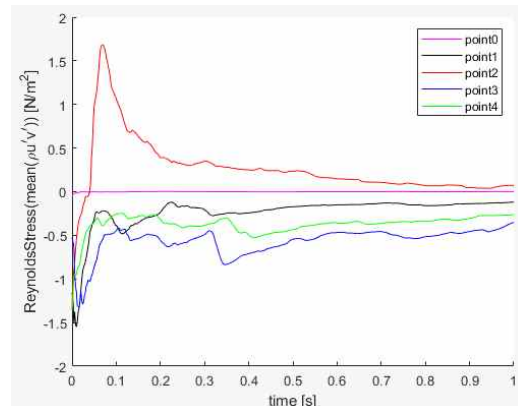


Fig 29. Reynolds stress(car, 50rpm)

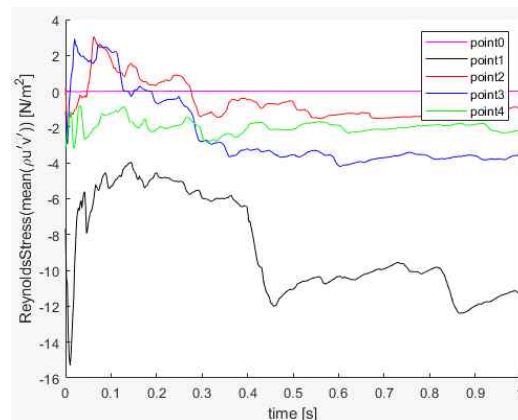


Fig 30. Reynolds stress(car, 100rpm)

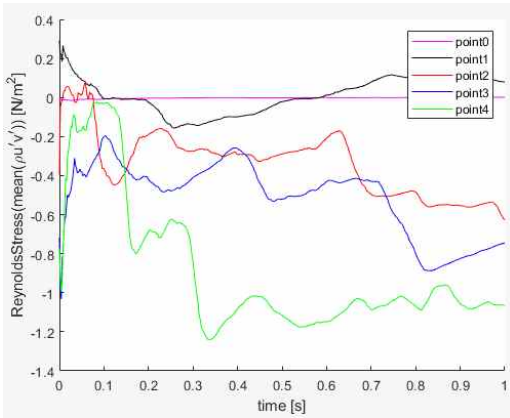


Fig 31. Reynolds stress(truck, 50rpm)

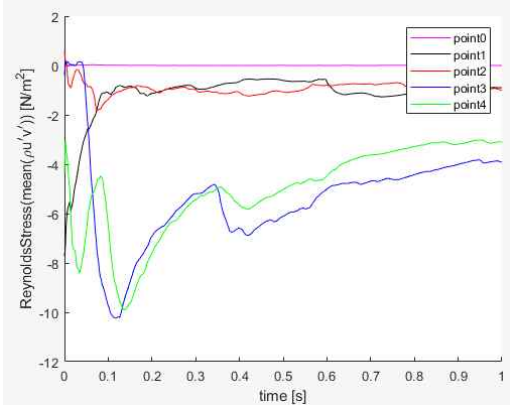


Fig 32. Reynolds stress(truck, 100rpm)

5.4 Reynolds stress 분석

Free stream이 steady하게 흐르고 있는 point 0에서는 Reynolds stress가 거의 0인 것을 확인할 수 있다. 이는 free stream이 Laminar flow임을 뒷받침한다. 또한 wake에서 4지점을 선정하였을 때의 Reynolds stress는 시간에 따라서 대체로 0이 아닌 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한, 앞서서 관찰하였듯이 같은 car model에서 속도장의 scale이 상수배만큼 다르고, 형태는 같게 나타났다. 따라서 난류 응력의 절대값은 freestream velocity의 제곱에 비례하게 나온다고 예상해볼 수 있는데 실제로 Fig 29~32를 비교해보면 이를 확인할 수 있다. 하지만 지점을 같게 잡았음에도 같은 car model에서의 Reynolds stress 개형이 다른 것은 camera가 유체의 유동에서 어떠한 순간부터 담았는지에 따라서 다르다. Fig 29는 Reynolds stress가 모든 점에서 거의 0에 수렴하는 반면에 Fig 31에서는 0에 수렴하지 않는 것이 이 차이 때문에 생긴다고 생각한다. 또한, Fig 31의 결과를 확인하면 truck에서의 Reynolds stress 크기가 측

정 지점이 wake의 뒤로 갈수록 더욱 더 크게 된다는 것을 확인할 수 있다. 이는 stagnation point 근처에서는 속도변동이 매우 크더라도 속도 자체가 0이 되는 지점의 주변이므로, 진폭 자체가 크지 않고, wake의 뒤로 갈수록 속도의 절대값 자체가 커지므로 이러한 현상이 나타난다고 생각한다. 실제로는 stagnation point보다 안쪽에 있는 point 1, 2에서 normalize된 속도변동이 더욱 클 것으로 예상된다. 또한 5.3의 결과를 통하여 bluff body에 의해 생기는 wake에서는 레이놀즈 수를 계산하였을 때 난류의 범위에 속하더라도 Karman Vortex Street 현상에 의해서 turbulence가 나타남을 확인할 수 있다. 또한, Karman Vortex Street는 flow의 진동하는 것이기 때문에 카메라가 n주기동안의 상황을 담는다면 Reynolds stress는 시간평균된 값이므로, Fig 29와 같이 모두 0에 가까운 값으로 수렴할 수 있다고 생각한다.

6. Wake survey 방법을 통한 Drag force와 Drag coefficient 계산

6.1 Wake survey analyze

각 bluff body의 Drag coefficient를 계산하기 위해서는 각 bluff body가 유체에 작용하는 Drag force를 먼저 계산해야 한다. 하지만 직접적으로 이를 측정하기는 어렵기 때문에 Control volume에 bluff body를 포함시킨 뒤에 식(10)의 레이놀즈 수송 정리를 이용하면 bluff body가 유체에 작용하는 drag force를 간접적으로 계산할 수 있다. 먼저 식(10)에서 유동방향에 대한 P의 편미분이 0이라고 가정하고, C.V.의 윗부분과 아랫부분은 유선을 따라 설정하여 위아래로의 질량 유출이 없다고 가정한다. 또한, 앞서 설명했듯이 bluff body를 통과하며 유체가 Karman Vortex Street 현상을 통해 진동하므로, Drag force가 시간에 따른 함수로 나타난다. 따라서 이를 시간에 대해서 평균한다면 평균속도장을 통하여 평균 Drag force를 계산할 수 있다. \overline{u} 의 경우에는 Table 1에 나타난 값을 이용하였다. 최종적으로 계산되는 시간에 대한 평균 Drag force \overline{D} 는 식(11)과 같이 나타난다. 식(11)는 Fig 33에서 질량 보존 법칙을 이용하여 표면 B에서의 속도장에 대해서만 아주 간단하게 나타난 식이다. \overline{u} 을 이미 계산했으므로, \overline{D} 를 결정하기 위해서 표면 B의 위치를 적절하게 설정해

야 한다. 실제로 이를 통하여 Drag coefficient를 계산은 식(12)을 통하여 한다. w 의 값을 포함하지 않고, Drag force를 계산하기 위하여 \bar{D}/w 를 이용할 것이고, h 는 차체의 높이이다. 이 때 차체의 높이는 유동방향으로 차체를 자르는 방법에 달려 있지만 바퀴를 제외한 차체의 높이를 PIVlab에서 측정하여 이용하였다. 각 차체의 높이를 계산해본 결과 식(13)과 같이 계산되었고, 이를 사용하였다.

$$\frac{D}{Dt} \int_{C.V.} \rho u dV = \int_{C.S.} P dS + \int_{C.V.} \rho f dV \quad (10)$$

$$\bar{D} = w\rho \left(\int_B \bar{u}_b (\bar{U}_\infty - \bar{u}_b) dy \right) \quad (11)$$

$$C_D = \frac{\bar{D}/w\rho}{1/2 \bar{U}_\infty^2 h} \quad (12)$$

$$h_{car} = 19.445mm, h_{truck} = 24.309mm \quad (13)$$

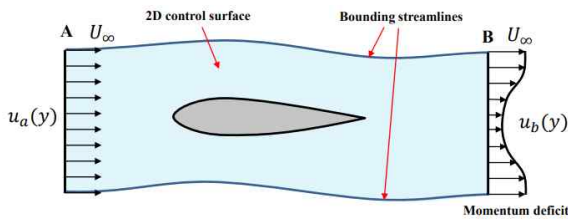


Fig 33. Control volume

6.2 Control volume 설정

C.V.는 차를 포함해야 하고, 위아래는 유선과 평행하게 잡아야 하므로, bluff body의 영향이 거의 없이 steady state를 유지하는 윗부분의 유동을 포함한다. 물론 차의 아랫부분은 공간이 부족하여 수조의 바닥과 간격의 차이가 많이 나지 않고, 차를 지탱하는 막대의 영향으로 y 방향의 vorticity 등 여러 가지 영향을 받는 부분이다. 하지만 이를 측정오차에 포함하고, 최대한 수조의 바닥에 의한 경계층 유동이 배제되는 구간을 C.V.의 아래 경계로 잡았다. 따라서 C.V.의 왼쪽 부분과 위 아래 부분은 모두 고정한 뒤에 C.V.의 오른쪽 부분만을 설정하면 된다. C.V.의 윗부분은 truck을 기준으로 truck과 car 모두를 포함하고, 4가지 case에서 모두 충분히 free stream velocity와 가까운 곳을 설정하였고, 세 가지 section은 4가지 case에 대해서 모두 고정하고 진행하였다. car와 truck의 축적(즉, reference length의 px 수)가 다르기 때

문에 이를 고려하였다. Fig 34와 같이 오른쪽의 경계를 이동시키면서 계산하여 최적의 C.V.를 찾으려고 하였다. 차의 바로 뒤에서부터 오른쪽 경계로 설정하여 Fig 34와 같이 끝까지 이동하면서 계산하였다.

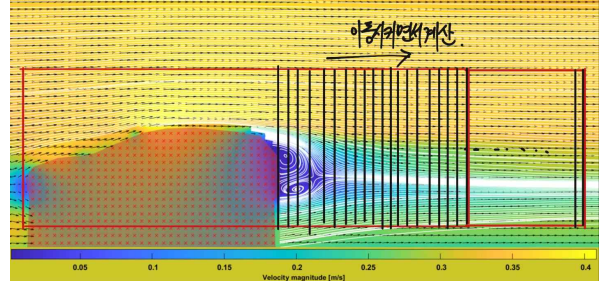


Fig 34. Choosing control volume

6.3 Drag coefficient 계산

먼저 식(12)에서 실험에서 얻은 데이터는 이산벡터장이기 때문에 \bar{D} 를 계산할 수 없다. 따라서 이를 이산벡터장에서 \bar{D} 를 계산하는 것을 포함하는 식(14)와 같이 유한합을 이용해 Drag coefficient를 계산할 수 있다. \bar{U}_∞ 은 Table 1의 값, h 는 식(13)의 값을 사용하였다. 각각의 case에서 C.V.의 오른쪽 경계를 차로부터 실제 위치 x 만큼 떨어진 곳을 설정하였을 때의 계산되는 C_D 를 plot해본 것이 Fig 35~38이다. car는 두 rpm 모두에서 증가하다가 천천히 감소하는 형태, truck은 급격하게 증가하다 거의 일정한 형태의 그래프를 얻는다.

$$C_D = \frac{\sum_i [u(i)(\bar{U}_\infty - u(i)) \Delta y]}{1/2 \bar{U}_\infty^2 h} \quad (12)$$

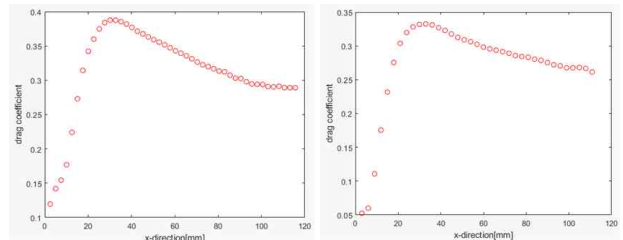


Fig 34. car C_D value (L: 50rpm, R: 100rpm)

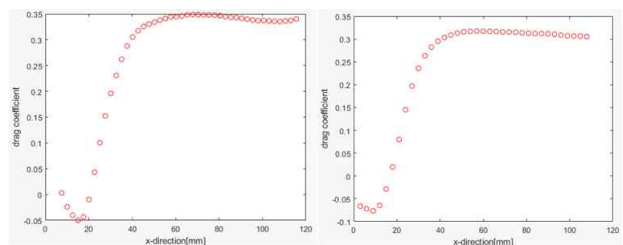


Fig 35. truck C_D value (L: 50rpm, R: 100rpm)

6.4 C.V. 확정과 C_D

먼저 식(12)의 계산된 방식을 보면 산술기하 평균에 의해서 속도장에서 $\overline{U_\infty}/2$ 의 크기를 갖는 벡터가 많을수록 C_D 값이 커지게 된다. car의 경우에는 25mm에서 시간평균 벡터장에서 $\overline{U_\infty}/2$ 크기를 갖는 벡터가 많아 이렇게 최대값을 갖는다고 생각할 수 있다. truck의 경우에도 미세하게 이러한 효과가 나타난다. 이 지점의 전후로 C_D 가 급격하게 변하는데 이러한 구간에서의 데이터를 신뢰할 수 없다고 생각하였고, 4가지 case에서 모두 전후의 변화가 거의 없어지는 차의 뒤의 실제 거리 90mm를 실제 C.V.로 설정했다. 이렇게 설정하면 truck이 car보다 C_D 가 더 크게 계산되는 이론적 직관과도 맞다. Table 2는 각각 case에서 확정된 C_D 이다.

Car model, rpm	Drag coefficient
car, 50rpm	0.6048
car, 100rpm	0.5586
truck, 50rpm	0.6831
truck, 100rpm	0.6232

Table 2. Drag coefficient

7. 각 case의 Drag coefficient 다른 이유

7.1 레이놀즈 수에 따른 차이점

Drag coefficient는 free stream velocity와 bluff body의 shape에 따라서 달라진다. Fig 36는 레이놀즈 수에 따른 C_D 의 변화를 나타낸 그래프인데 실제로 $10^4 \sim 10^5$ 사이에서 레이놀즈 수에 따른 변화가 거의 없는 것을 관찰할 수 있고, C_D 또한 0.5부근에 위치하는 것을 알 수 있다. 이를 생각해보았을 때 car, truck에서 free stream velocity가 두 배가 되었는데 그에 따라서 C_D 는 큰 변화가 없는 것은 Fig 36과 잘 맞는 결과이다. 하지만 다른 점이 있다면 그래프는 이 구간에서 C_D 가 증가하고 있지만 Table 2는 오히려 감소하고 있다. 큰 수조를 관내유동이라고 생각하고, 레이놀즈 수를 계산한 결과에 따른 측정오차이다.

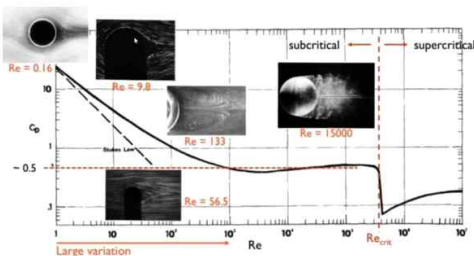


Fig 36. C_D-Re graph

7.2 car shape에 의한 차이점

실제로 차를 설계할 때 C_D 가 작을수록 적은 연료에도 차가 많은 거리를 갈 수 있기 때문에 C_D 는 아주 중요하게 여겨진다. C_D 는 bluff body의 shape에 따라서 달라지는데 실제로 bluff body의 유동방향의 수직인 방향으로의 길이가 클수록 커지고, 유체가 흘러지는 부분에서의 경사변화가 완만할수록 낮아지는 것으로 측정된다. 실제로 본 실험에서도 height가 크고, 유체가 흘러지는 부분에서의 경사가 더욱 급격하게 변하는 것은 truck임을 지금까지의 분석을 통해 알 수 있었다. 따라서 truck이 같은 rpm에서 car보다 모두 0.08 가량 C_D 의 값이 높게 나타났고, 이는 자연스러운 현상이다. 실제로 식(13)의 height 값이 1.25배이고 car model 앞에서의 경사의 차이를 생각하면 이는 납득할만하다. Fig 37은 실제 car shape에 따른 C_D 값으로 일반 자동차의 경우 0.35, 본 실험의 truck shape와 비슷한 자동차의 경우 0.4정도의 C_D 를 갖는다. 이는 Table 2의 값과 두 배정도 차이가 나는 것을 관찰할 수 있다. 이는 레이놀즈 수가 실제 car의 유동과의 차이가 존재, C_D 를 계산하는 과정에서 C.V.의 아래, 위의 유동을 무시한 것에 대한 오차, 차의 아래에서 생기는 xz평면의 와류 배제와 더 나아가 카메라 왜곡, calibration, PIV 적용 등에서 생기는 측정오차 때문에 발생하는 것이다.

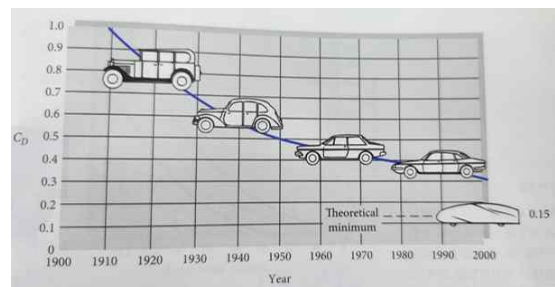


Fig 37. C_D value against car shape [2]

참 고 문 헌

- [1] Seoul National University Mechanical Engineering, "Mechanical Engineering Experiment"(2023), Westsea planning, pp.52~77.
- [2] F. M. White, 2016, Fluid Mechanics 8th edition.