

출품번호

1436

제65회 전국과학전람회

**풍력발전을 이용한 에너지 하베스팅의
실효성에 대한 탐구**

2019. 9. 16.

출품학생	
지도교사	
구분	학생부
출품부문	산업 및 에너지

목 차

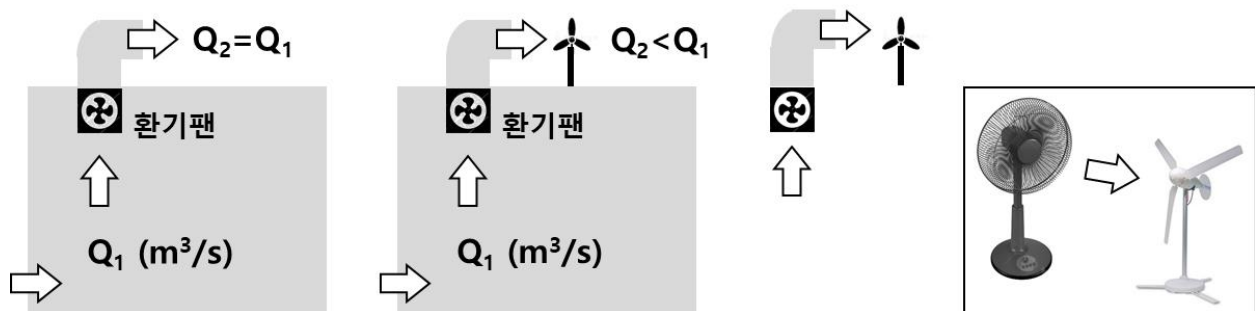
I. 연구 동기 및 목적	1
1. 연구 동기	1
2. 연구 목적	2
II. 이론적 배경 및 선행연구 조사	3
1. 이론적 배경	3
2. 선행연구 조사	4
III. 연구 방법 및 내용	7
1. 환기풍 실험	7
1) 환기풍 실험을 위한 덕트 제작	7
2) 환기풍 실험의 조건 및 내용	8
2. 주행풍 실험	9
1) 이론적 방법	9
2) 실험적 방법	10
3) 수치해석적 방법	11
IV. 연구 결과	14
1. 환기풍 연구 결과	14
2. 주행풍 연구 결과	14
1) 이론적 연구 결과	15
2) 수치해석적 연구 결과	16
3) 실험적 연구 결과	21
V. 연구 결론 및 활용성	24
1. 연구 결론	24
1) 환기풍 연구 결론	24
2) 주행풍 연구 결론	24
2. 향후 전망 및 활용성	25
VI. 참고 문헌	26

I. 연구 동기 및 목적

1. 연구 동기

산업화와 도시화로 인해 환경오염이 전 세계적 문제로 대두되면서 신재생에너지에 대한 수요와 관심이 더욱 뜨거워지고 있다. 우리나라의 대부분의 전력은 화력발전이나 원자력 발전이 공급하는 현 상황에서 우리나라 정부는 다양한 지원정책을 통해 신재생에너지를 이용한 발전을 확대하려고 노력하고 있다. 최근에는 대규모의 태양광 발전소나 풍력발전소 이외에도 소규모의 소수력 발전이나 압전소자를 이용한 발전기술 등도 주목받고 있다.

소규모 신재생에너지 발전은 버려지는 에너지를 다시 모아 사용한다는 의미에서 에너지 수확(energy harvesting) 혹은 에너지 회수(energy recovery)라고도 불린다. 이미 상용화까지 된 사례로는 지속적으로 환기가 요구되는 건물의 환기구에서 나오는 바람을 이용한 발전이 있는데 [1], 건물 내부의 혼탁해진 공기를 내보내는 환기팬이 전력을 소모하고 있기 때문에, 이러한 방식은 마치 선풍기의 바람으로 풍력발전기를 돌려서 전기를 생산하는 것과 다를 바 없게 된다 [그림 1]. 건물의 환기 시스템은 단위시간 동안 일정 부피의 공기를 건물 밖으로 배출할 수 있어야 하는데 풍력발전기를 환기구에 설치한다면 단위시간 동안 배출할 수 있는 공기의 양이 줄어들게 되고 이를 원래의 수준으로 올리기 위해서는 환기팬은 더 많은 일을 해야만 한다. 풍력발전기 자체만 보았을 때는 에너지를 회수할 수 있는 것처럼 보여도 실질적으로는 에너지 소비가 되는 것이다.



[그림 1] 건물 환풍시스템의 간단한 물리적 모델링

(환기풍 풍력발전 = 선풍기로 풍력발전; 가능한 하지만 경제성은 전혀 없음을 알 수 있다)

작년 여름에 자동차를 타고 가면서 창문을 열었더니 시원한 바람이 강하게 쏟아지는 것을 느꼈다. 차량이 지나가면서 발생하는 바람인 주행풍을 이용해 어떤 방법으로 발전을 할 수 있을지 고민하다가 자동차에 풍력발전기를 부착하는 방법과 도로 표지판이나 중앙분리대에 풍력발전기를 설치하는 방법을 생각하게 되었다. 차량에 풍력발전기를 부착하는 것은 열역학 제1법칙에 위배되는 것이라고 금방 이해가 되었지만, 통행량이 많은 도로의 중앙분리대나 표지판에 풍력발전기를 설치하는 것은 경제성과 효율성을 극대화하는 좋은 방법일 것이라고 생각하여 관련 자료를 조사하였다. 이 과정에서 차량 주행풍을 이용한 발전기술에 관한 여러 특허와 아이디어들을 발견할 수 있었다. 그중 한 아이디어는 세계 3대 디자인 공모전 가운데 하나인 독일 레드닷 디자인 어워드(Red dot Design Award)에서 디자인 콘셉트 상을 받은 것으로 [2], 우리가 구상한 주행풍을 이용한 에너지 하베스팅 모습과 가장 유사했다 [그림 2].



[그림 2] 바람을 이용한 에너지 회수 아이디어
(좌: 건물 환기풍을 이용한 풍력발전, 우: 차량 주행풍을 이용한 풍력발전)

2. 연구 목적

환기풍을 이용한 풍력발전은 추가적인 에너지 소비를 가져온다는 것은 어렵지 않게 이해할 수 있었지만, 혹시 주행풍 풍력발전이 환기풍 풍력발전과 물리적으로 잘못된 시각으로 보고 있는 것이 아닌지 의문이 들었다. 차량은 공기역학적 설계를 통해 저항을 줄여 연비를 높이는 데 풍력발전기를 설치하면 결과적으로 차량에 추가적인 공기저항을 발생시켜 설치 전과 동일한 속도를 내기 위해 더 많은 에너지를 소비하지 않겠냐는 것이었다. 우리는 중앙분리대 풍력발전기와 같은 자동차 주행풍을 이용한 에너지 회수가 전체 계(system)의 에너지 득실로 본다면 결국 에너지 손해를 야기할 것이라는 가설을 세우고 이론적 탐구를 진행하기로 하였다.

우리가 세운 가설이 사실이라면 중앙분리대 설치형 풍력발전기 또한 에너지의 손실을 일으킨다. 즉, 환기풍이나 주행풍을 이용한 에너지 회수는 전체 계 내에서 에너지의 변환은 항상 엔트로피를 증가시킨다는 열역학 제2법칙에 의해, 에너지 회수는 비가역 과정이므로 결국 전체 계의 에너지 소비를 증가시킨다는 과학적 사실에도 불구하고 많은 사람들은 착각하여 에너지 회수 아이디어를 상용화하여 실제로 설치하고 있는 것이다. 물리법칙을 위배하는 에너지 회수 아이디어를 실용화하는 것은 국가적 차원에서의 상당한 손해와 법적인 문제까지도 일으킬 수 있다. 그러나 이미 시중에 환기풍과 주행풍을 이용한 풍력발전기가 설치되어 있다는 것은 일반인이 이 문제를 이해하지 못하였다는 반증이다.

우리는 환기풍과 주행풍을 이용한 풍력발전 문제에 대해 과학적으로 명확하면서도 누구나 이해할 수 있는 답변을 탐구를 통해 만들어보기로 하였다. 즉, 이론적 방법과 눈으로 보고 확인할 수 있는 실험적 방법, 그리고 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)을 이용한 수치해석적 방법으로 확실한 검증을 하고자 한다. 우리가 만들고자 하는 새로운 물리법칙의 검증방법을 차후에 학습교구로 제작한다면 교육적인 차원에서도 매우 유용할 것이다.

II. 이론적 배경 및 선행연구 조사

1. 이론적 배경

1) 열역학 제1법칙과 제2법칙

탐구를 통하여 이론적인 증명에는 베르누이 방정식과 열역학 제2법칙을 사용할 것이다. 열역학 제1법칙은 일반화된 에너지 보존법칙의 표현으로, 어떤 계의 내부 에너지의 증가량은 계에 더해진 열에너지에서 계가 외부에 해준 일을 뺀 양과 같다. 한편 베르누이 방정식 (Bernoulli's equation)은 흐르는 유체에 대하여 유선(streamline) 상에서 모든 형태의 에너지의 합은 언제나 일정하다는 것으로, 에너지 보존법칙의 또 다른 형태이다. 아래의 식과 같이 유선을 따라서 압력(정압)과 속도(동압)은 항상 일정(전압)하다.

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 = Constant$$

열역학 제2법칙은 열적으로 고립된 계의 총 엔트로피는 증가하며 감소하지 않는다는 법칙이다. 즉, 에너지의 형태가 변할 때 엔트로피는 증가하며 이때 필연적으로 에너지 손실이 따르기 때문에 가역적으로 에너지를 회수하여 원래의 에너지로 변환할 수 없음을 의미한다.

2) 풍력발전기의 종류와 작동 원리

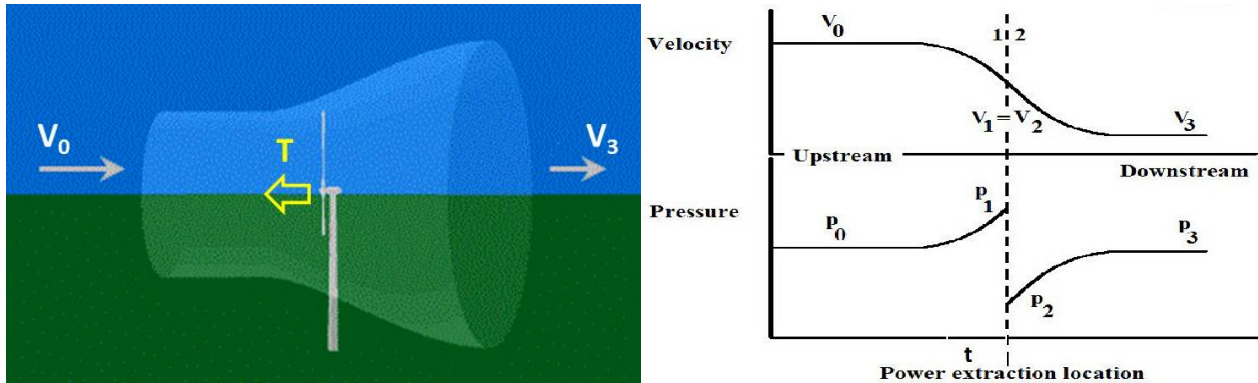
풍력발전기는 바람의 운동에너지를 어떤 원리로 전기에너지로 바꾸는지에 따라 양력식과 항력식으로 나눌 수 있다 [그림 3]. 양력식은 비행기가 양력을 받는 것처럼 베르누이 방정식에 의해 발생하는 압력차를 이용하는 방식이다. 항력식은 낙차를 가지고 떨어지는 물이 물레방아를 쳐서 움직이게 만드는 것처럼 유체가 물체의 흐름방향으로 작용하는 작용-반작용 힘을 이용해 발전하는 방식이다.



[그림 3] 풍력발전기의 종류 및 특징

프로펠러식 풍력발전기는 공기역학적 원리를 이용하여 바람의 운동에너지로 프로펠러를 돌리고 회전력으로 발전기를 돌려서 전기에너지를 만든다. 풍력발전기 전단과 후단의 풍속과

압력의 변화는 베르누이 방정식으로 유도할 수 있으며, 풍력발전기가 바람의 운동에너지를 흡수하므로 전단과 후단에 압력차가 발생한다. 에너지 보존법칙으로 설명한다면 바람의 운동에너지가 풍력발전기에 공기역학적 힘을 가하여 프로펠러를 돌리므로, 반대로 풍력발전기는 T라는 추력을 얻게 되는 것이다. 따라서 바람은 풍력발전기로부터 T라는 저항을 받게 된다 [그림 4].



[그림 4] 풍력발전기 전후의 풍속과 압력의 변화

2. 선행연구 조사

1) 환기풍 선행연구

환기풍을 이용한 선행연구를 검색하였더니 다음과 같은 SCI(Science Citation Index; 과학기술분야 학술지 중 엄격한 선정기준에 의해 선별된 저명한 학술지) 논문과 박사학위 논문 등을 찾을 수 있었다. 환풍구에 설치하는 풍력발전기는 결국 에너지 소비인데 이런 논문이 저명한 학술지에 발표되었다는 것은 매우 의아한 사실이다. 우리나라 학술지에도 축사 환기팬의 바람을 이용한 풍력발전 가능성을 평가한 논문이 게재되었다.

- W.T. Chong, S.Y. Yip, A. Fazlizan, S.C. Poh, W.P. Hew, E.P. Tan, T.S. Lim, "Design of an Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator for Energy Conservation in Commercial Buildings" *Renewable Energy* (2014) 67, 252–256
- Ahmad Fazlizan, Wen Tong Chong, Sook Yee Yip, Wooi Ping Hew, Sin Chew Poh, "Design and Experimental Analysis of an Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator" *Energies* (2015) 8, 6566–6584
- A.F.B. Abdullah, "Design and Testing of a Novel Exhaust Air Energy Recovery Wind Turbine Generator" *Doctoral Dissertation, University of Malaya, Kuala Lumpur*, 2016
- 홍세운, 이인복, 서일환, 권경석, 하태환, 황현섭 "축사 환기팬 후류의 풍에너지 평가 및 기류 형상의 전산유체역학 모델링" *한국농공학회논문집*, Vol. 54, No. 5, pp. 79–89, 2012

심지어 전문가들도 혼동을 일으키는 환기풍 풍력발전 아이디어의 예는 우리나라의 저명한 학회인 대한환경공학회에서 주최한 '제1회 대학생 종합설계경진대회'에서 전북대학교가 에어컨 실외기로 전기를 만드는 아이디어로 우수상을 수상한 사례에서도 찾아볼 수 있다. 광주매일신문에서는 비과학적인 아이디어를 수상한 대한환경공학회에게 과학적 책임과 사회적 책임이 있다고 비판하기도 했다 [3].

2) 주행풍 선행연구

자동차 또는 기차의 주행풍을 이용한 풍력발전에 대한 선행연구를 검색했더니 유명한 국내대학의 석사학위 논문과 저명한 학회지 논문뿐만 아니라 심지어 특허청에 등록된 다수의 특허를 확인할 수 있었다.

- 강병삼“차량주행풍을 풍력발전으로 이용하는 방안에 관한 연구”석사학위논문, 연세대학교 공학대학원 전기공학과, 2002
- 전제연, 한관문, 송중섭, 박승희“전산유체역학해석을 통한 고속도로 주행차량 유도풍의 풍력발전 적용 가능성에 관한 연구”대한토목학회논문집, Vol. 33, No. 2, pp. 739~748, 2013
- 이종조, 임재규“도로 중앙분리대용 후드장식형 수직축풍력발전기 연구”한국조명·전기설비학회논문지, Vol. 27, No. 1, pp. 24-34, 2013
- 서용범, 임재문, 신광복“도시철도차량 주행풍을 이용한 터빈형 플라이휠 에너지 저장시스템 개발에 관한 연구”한국생산제조학회지, Vol. 23, No. 5, pp. 443-449, 2014
- 이정익“차량주행풍을 이용한 풍력발전 시스템 구축을 통한 실무 융합 교육 개발”한국융합학회논문지, Vol. 5, No. 4, pp. 107-112, 2014
- 김제근, 서기범“고속철도 열차 주행풍의 풍력발전 활용성에 대한 연구”한국산학기술학회논문지, Vol. 18, No. 10 pp. 681-687, 2017

특허청에 등록된 주행풍을 이용한 도로 중앙분리대 풍력발전은‘도로구조물에 설치되는 풍력발전(1017188040000, 2017)’을 비롯하여 2002년부터 2017년까지 무려 25건이 등록되어 있으며, 주행풍을 이용한 터널 풍력발전의 경우에는‘고속철도 터널에서 발생하는 풍압 및 열차의 터널통과시 발생하는 풍속과 풍압을 이용한 발전 시스템(1018708910000, 2018)’등 15건이 등록되어 있다. 하지만 앞의 사례와는 상반되게 주행풍을 이용한 전기자동차 배터리 충전기술은 열역학 제2법칙에 위배한다며 특허법원에서 거절되었다. [4]. 다른 40여건의 특허처럼 간단히 통과될 것만 같은데 왜 이 특허만 특허재판까지 거치며 거절되었는지 의문이 들어 이를 알아보기 위해 특허명세서를 확인하였다. 그 결과 등록이 허가된 특허에는 주행풍으로 발전을 하는 기술만을 설명하고 있었고, 거절된 특허는 공통적으로 주행풍으로 발전하여 에너지 회수가 되므로 경제적이라고 주장한 부분이 있다는 공통점이 있었다. 에너지 측면에서 이득을 볼 수 있다는 주장은 열역학 제2법칙에 어긋나므로 이러한 주장이 담긴 특허만 거절된 것으로 보인다.

3) 환기풍 및 주행풍 풍력발전 사례

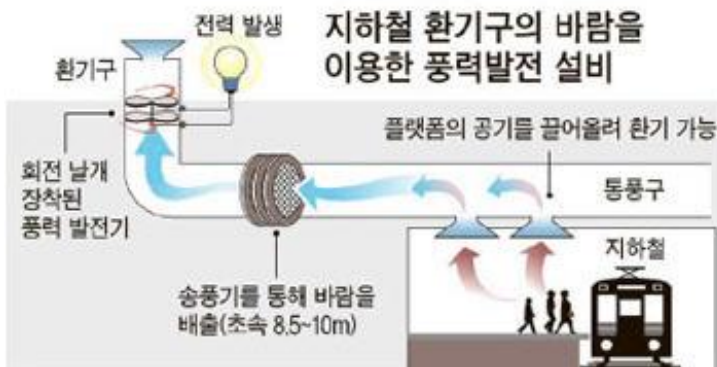
환기풍 또는 주행풍을 이용한 풍력발전기는 터키 이스탄불에 실제로 설치되어 가동 중이며 [5], 서울메트로는 2008년에 289억원을 들여 지하철 바람을 이용한 전력을 생산하겠다고 발표하였다가 여론의 못매를 맞기도 했다 [6, 7]. 미국의 xFlashpoint라는 회사에서는 건물 환풍구 설치형 풍력발전기를 판매하고 있으며 [1], 국토해양부는 고속도로변에 차량풍 풍력발전기를 설치하겠다고 계획을 발표하기도 했다 [8]. 미국에서는 공항에서 비행기의 엔진풍을 이용하여 풍력발전을 하는 아이디어가 논의되기도 했다. 중요한 점은 이미 환기풍이나 주행풍을 이용한 풍력발전기를 시중에 설치하였고 상업적으로 제품을 판매하기도 한다는 것이다.



An Existing Blast Fence



Caution sign at local airport



[그림 5] 환기풍 또는 주행풍을 이용한 풍력발전 사례
(좌상: 터키 도로, 우상: 미국 공항, 좌하: 서울메트로, 우하: 국토부 계획)

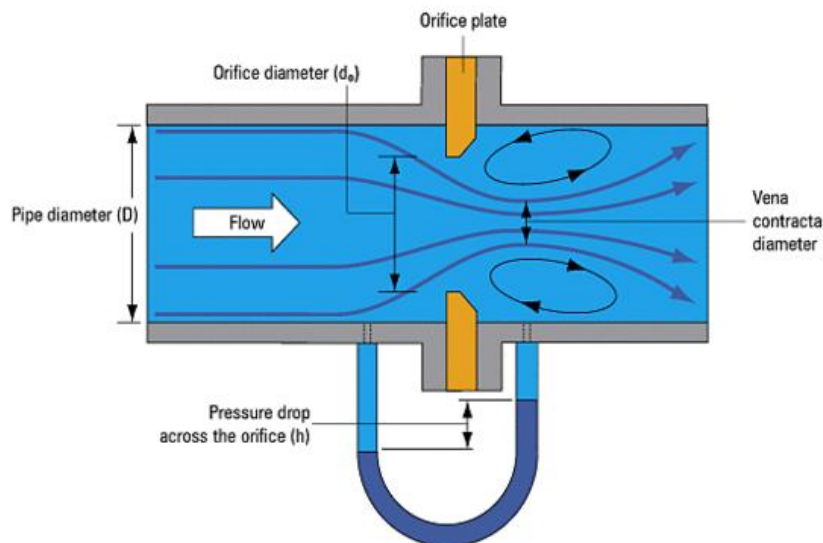
III. 연구 방법 및 내용

1. 환기풍 실험

1) 환기풍 실험용 덕트 제작

환기풍 풍력발전이 오히려 에너지 소비임을 시각적으로 명확하게 증명하기 위하여 다음과 같이 실험용 덕트를 제작하고 실험을 수행하기로 했다. 실험에 사용할 풍력발전기는 시중에서 판매하는 수직축 풍력터빈 키트를 구입하여 조립하였다.

- 환풍팬: 실험용 덕트에 사용할 환기팬은 컴퓨터용 냉각팬을 구입하여 설치하였으나 풍량이 너무 적어서 풍력발전기가 돌지 않았다. 그래서 풍량이 매우 큰 특수 냉각팬(Evercool EC12038HH24BA; 풍량 115 CFM \Rightarrow 3.7 m/s)으로 변경하고 환풍구 끝부분에 노즐을 만들어 풍력발전기로 전달되는 풍속을 증가시켰다.
- 유량계: 환기풍의 풍량을 측정하기 위해 유량계를 인터넷에 검색했더니 웨어(weir), 벤츨리 플룸(venturi flume), 오리피스(orifice) 등 여러 가지 측정방법을 찾을 수 있었다. 그 중 오리피스 유량계는 매우 간단하여 직접 제작할 수 있다고 판단하여 이를 사용하기로 하였다.
- 오리피스 유량계는 유체가 급격히 좁아지는 구멍을 통과할 때 전단과 후단의 압력차와 유량이 비례한다는 원리를 이용한다 [그림 6]. 따라서 덕트 중간에 오리피스를 설치하고 전단과 후단의 압력차를 측정하면, 압력차의 변화가 유량의 변화에 비례함을 알 수 있다.
- 차압계: 오리피스 전단과 후단의 압력차를 측정하기 위해 가장 간단한 액주계(manometer)를 설치하였는데, 압력차가 너무 적어서 변화를 감지할 수 없었고 Testo의 고성능 차압계(± 0.001 hPa)를 구입하여 측정하자 비로소 압력차를 측정할 수 있었다.
- 전압전류계: 환기팬이 소모하는 전력은 전원공급장치로부터 공급되는 전력($W = \text{전압}(V) \times \text{전류}(A)$)로 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 풍력발전기로부터 얻어지는 전력은 몇 번의 시행착오를 거쳐 미소하다는 것을 알아내었다. 그래서 미소 교류전압(mV)과 교류전류(μA)를 측정할 수 있는 특수 테스터를 구입하여 측정하였다.

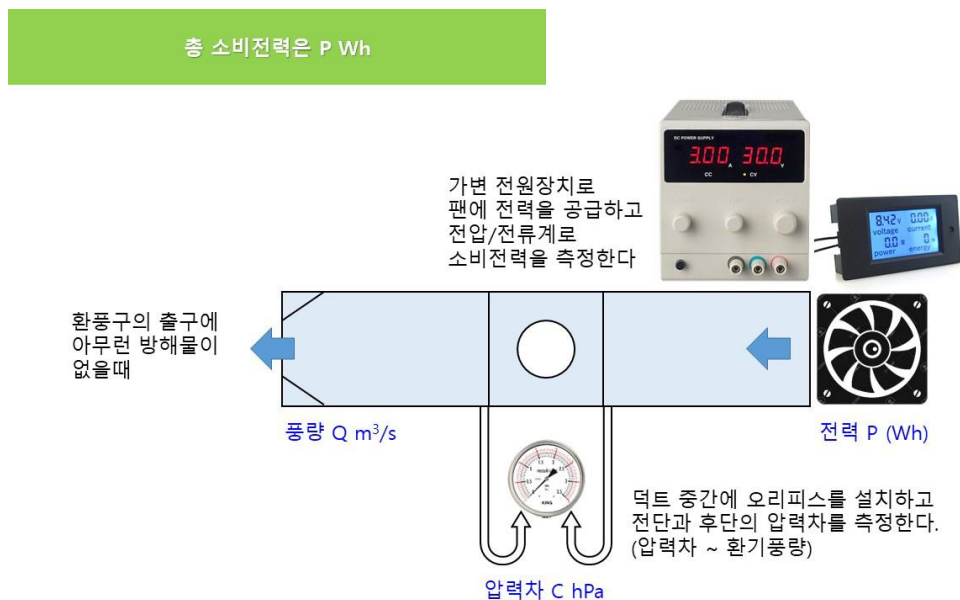


[그림 6] 오리피스 유량계의 단면도

2) 환기풍 실험 방법

환기풍 풍력발전에 따른 전력 소비량을 측정하기 위해 다음과 같은 단계로 실험을 수행하였다 [그림 7]. 본 실험의 목적은 환기풍 풍력발전을 하면 환기풍량이 감소함을 보이고, 본래의 환기풍량으로 올리면 전력소비량의 증가가 풍력발전량보다 더 많아짐을 보이는 것이다. 구체적인 실험 방법은 다음과 같다.

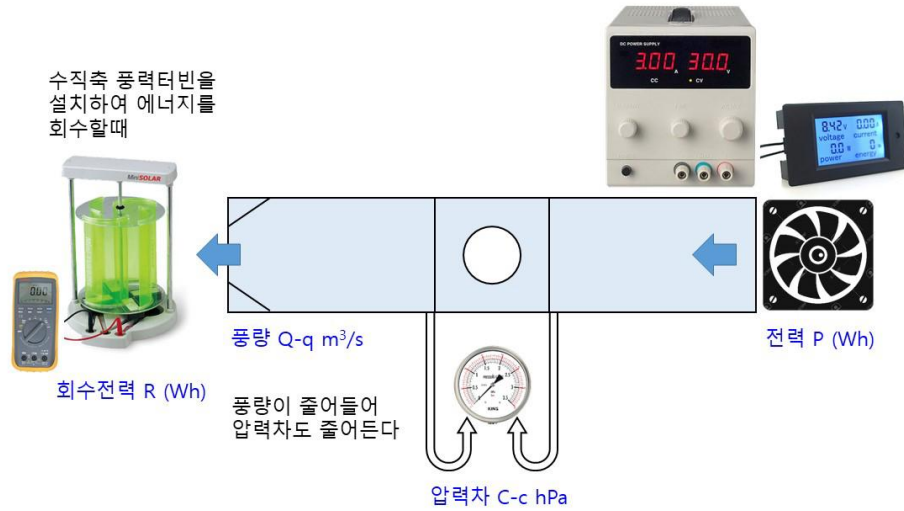
- 1단계 실험 (일반적 환풍조건) : 환풍구에 아무런 장애물이 없는 상태에서 전력 $P(W)$ 를 공급하여 환풍조건을 만들었다. 이때 압력차는 C hPa임을 측정하였다.
- 2단계 실험 (풍력발전기 가동) : 환풍구의 앞에 수직축 풍력발전기를 설치하여 회수전력 $R(W)$ 를 측정하였다. 또한 변화한 유량을 압력차로 측정하였다. 즉 $C-c$ hPa.
- 3단계 실험 (환기풍량 유지조건) : 풍력발전기에 의해 감소한 풍량을 원래대로 회복시키기 위해 환기팬에 전력을 추가 공급하였다. 따라서 압력차는 다시 C hPa로 복구되었으나 환풍팬의 소비전력은 $P+p(W)$ 로 증가한다. 또한 풍력발전기의 생산전력도 미소하지만 증가하여 $R+r(W)$ 가 될 것이다.
- 실험결과 분석 (환기풍 풍력발전의 에너지 회수 또는 소비 판정) : 환기풍량을 유지한 상태에서 추가적인 전력소비와 풍력발전에 의한 전력생산을 비교하여 추가적인 전력소비(p) < 전력생산($R+r$)이면 에너지 회수라고 판단하고, 추가적인 전력소비(p) > 전력생산($R+r$)이면 에너지 소비라고 판단한다.
- 환기풍 풍력발전에 관해 일반인이 착각하는 이유 : 환기풍이 버려지는 바람이라고 생각하여 풍력발전기를 설치하면 에너지를 회수할 수 있을 것이라 착각하는 가장 큰 이유는 풍력발전기를 설치할 경우 건물 내부에 있어 보이지 않는 환풍팬에 압력저항이 전달되어 환기풍량이 줄어든다는 사실을 간과했기 때문이다.



(a) 1단계 실험

실제로는 풍량이 줄어든다 $Q-q \text{ m}^3/\text{s}$

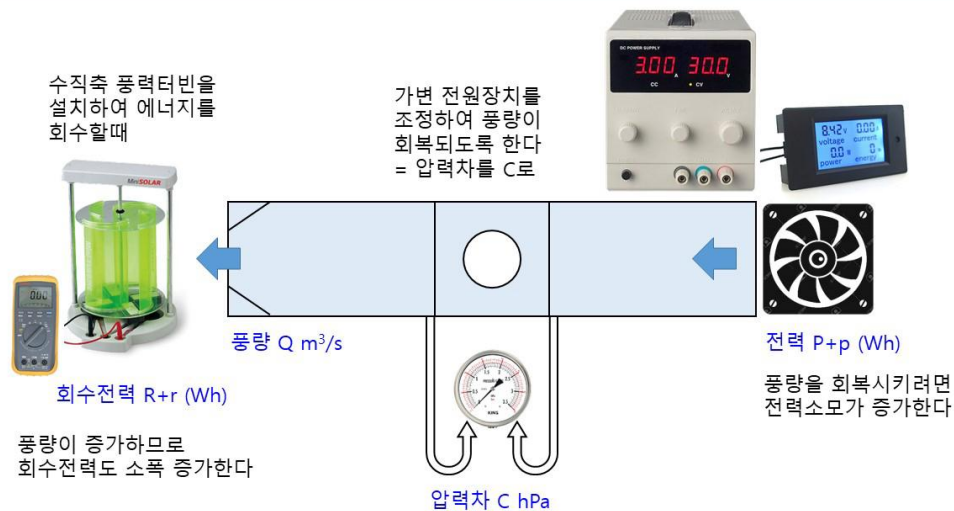
환풍의 목적은 풍량을 유지하는 것



(b) 2단계 실험: 환기구에 풍력발전기를 설치한 경우

풍량을 유지할 경우 총 소비전력은 $(P+p)-(R+r) \text{ Wh}$

$(P+p)-(R+r) < P$: 에너지 회수
 $(P+p)-(R+r) > P$: 에너지 손실



(c) 3단계 실험: 설계 환기풍량을 유지하도록 전력을 추가 공급한 경우
 [그림 7] 환기풍 풍력발전 유효성 증명을 위한 실험장치 및 실험방법

2. 주행풍 실험

1) 이론적 방법

자동차의 주행풍 상황을 이론적으로 구성하기 위해 참고문헌을 찾아보았으며 매우 복잡한 해석이 대부분이며 명확하게 이론적으로 해석한 선행연구는 찾을 수 없었다. 탐구를 위한 이론적 배경을 조사하고 공부하면서 유체의 흐름에 대한 베르누이 방정식을 알게 되었고, 풍력발전기 전단과 후단의 압력차와 풍력발전기에 발생하는 추력(thrust)를 공부하게 되면서, 풍력발전기가 자동차와 같은 물리적인 조건이라는 착안을 하게 되었다. 그래서 자동차 주위를 흐르는 바람의 흐름을 제어체적으로 정의하고 베르누이 방정식을 적용하여 압력과 풍속의 관계를 유도하기로 한다.

2) 실험적 방법

가) 주행풍 실험을 위한 풍동 제작

자동차의 주행풍 상황을 실험적으로 구성하기 위해 많은 고민을 하였다. 이론적 방법과 마찬가지로 자동차가 주행하는 대신 주행속도와 같은 풍속의 바람을 자동차에 불면 상대속도가 같으므로 물리적으로 동일한 상황이 된다. 이러한 원리로 풍동(wind tunnel)에 항공기나 자동차를 설치하여 실험을 한다. 그런데 자동차를 풍동에 고정하여 실험할 경우에는 도로와 중앙분리대 등은 자동차와 상대속도가 0이 되므로 실제의 주행상황과 달라진다.

실제 주행 상황과 풍동 실험의 차이점을 열거하자면,

- 실제 차량의 주행상황과 상사성이 맞지 않는다. 실제 차량의 크기와 풍속의 비가 맞아야 하는데 이러한 점이 고려되지 않았다.
- 상대속도의 측면에서 고려해 보았을 때 실제 상황에서는 바닥과 중앙분리대 또한 차량에 대해서 움직이는데, 풍동실험에서는 도로와 중앙분리대에 대한 차량의 상대속도가 0이다.
- 실제 상황에서 중앙분리대를 기점으로 서로 엇갈리는 방향으로 차량이 주행하고 있으나, 이를 무시하고 한 쪽 방향으로만 차량이 움직인다고 가정하였다.
- 이외에 차이점을 열거하자면 차량의 높이에 대한 중앙분리대의 높이 비율이 실제상황과 다르며, 도로의 길이 또한 풍동 실험에서는 제한적이다.

자동차 주행상황과 동일한 풍동실험 조건을 만들려면 자동차의 주행속도와 동일하게 바람을 불어주고 도로면도 컨베이어 벨트와 같은 장치로 주행속도와 동일한 속도로 움직여주어야 한다. 그렇다면 이러한 차이점이 실제 실험 결과에 어느 정도 영향을 미치는지를 고려해 주어야 한다. 실제 상황과 비교한 풍동실험에서의 차량은 바닥과 중앙분리대에 의한 마찰저항을 추가로 받기에 이를 고려해 주어야 할 것이다.

나) 자동차의 압력저항 측정 방법

앞서 실험한 오리피스 전후단의 압력차 실험을 통해서도 알 수 있듯이 압력차가 생긴다는 것은 유량에 변화를 준다는 의미이고 질량 보존의 법칙에 의해 차량 전면과 후면의 유량을 같게 해주기 위해서는 차량 전면과 후면의 압력차가 저항으로 작용한다는 사실을 알 수 있다. 이를 측정하기 위해 풍동 실험에서 차량의 역할을 할 아크릴 직육면체의 앞면과 뒷면에 각각 구멍을 뚫고 고무파이프로 연결한 뒤 이를 고성능 차압계와 연결하여 압력차를 측정하였다.

다) 다양한 형태의 중앙분리대 제작

중앙분리대의 형태에 따른 압력 차이의 변화를 실험하기 위해 다양한 형상의 중앙분리대를 제작하고 실험하였다. 일반적인 고속도로나 국도에서 볼 수 있는 완전 차폐식 중앙분리대, 일반 도로와 같은 완전 개방형, 부분적으로 막혀있는 부분 개방형으로 나누어 제작하였는데, 부분 개방형의 경우 도로 주행방향과 중앙분리대 사이의 각도, 풍력터빈의 설치 유무 등에 따라 더욱 다양한 중앙분리대를 제작하여 실험하였다.



[그림 8] 차량 전면과 후면의 압력차 측정방법



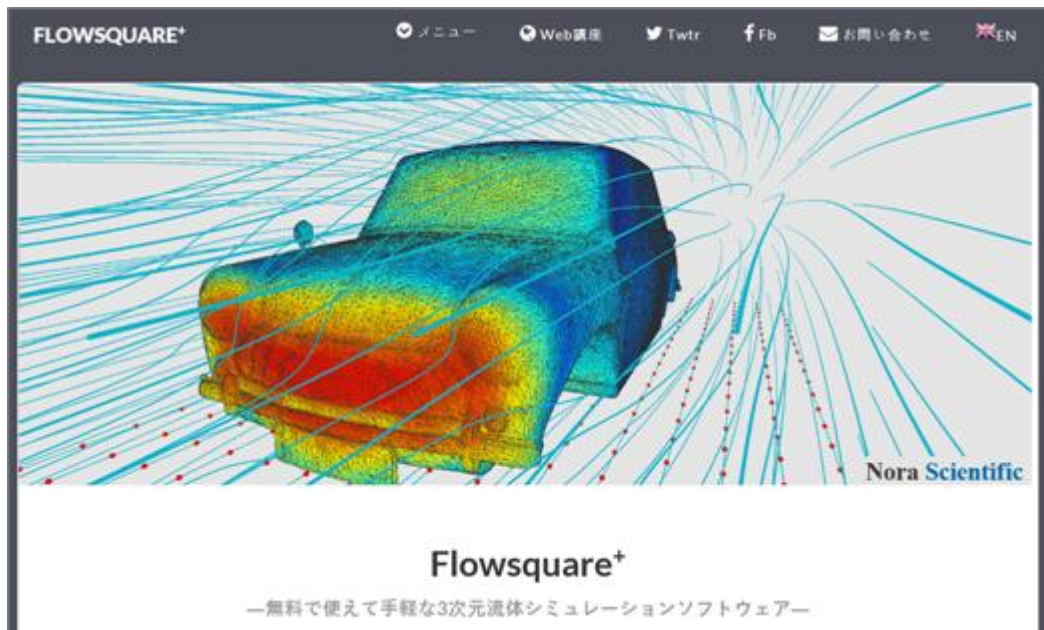
[그림 9] 여러 가지 형태로 제작한 중앙분리대

3) 수치해석적 방법

전산유체역학(CFD; Computational Fluid Dynamics) 프로그램을 이용한 해석방법은 초기조건을 어떻게 설정하느냐에 따라 여러 가지 상화를 모두 실험하는 것이 가능하다. 앞서 풍동실험 부분에서 언급한 실제 실험과 풍동 실험의 차이점을 알아보기 위해 CFD를 이용하여 두 가지 경우 모두를 실험하기로 하였다.

수치해석에 사용한 CFD 프로그램은 일본의 Yuki Minamoto 박사라는 분이 만들어서 저렴한 가격에 판매도 하지만 학생들에게는 1년간 무료로 모든 기능을 사용할 수 있도록 제공하고 있다. Flowsquare는 두 가지 버전이 있는데, Flowsquare v4.0은 2차원 CFD 프로그램이고 Flowsquare+는 3차원 CFD 프로그램이다. 이 프로그램은 사용하기가 매우 편하게 되어 있다. 즉, 해석하려는 영역을 bc.bmp라는 그림파일에 특정한 색상으로 그려 넣으면 자동적으로 입력조건을 인식하는 참신한 아이디어를 사용하고 있다. 즉, 검은색은 벽, 파란색과 빨간색은 입구조건, 흰색은 유동영역이며 움직이는 물체는 녹색으로 그리면 된다. 3차원의 경우에는 [그림 10]과 같이 자동차가 예제파일로 들어있어서 우리는 이 파일을 그대로 이용하여 벽면조건만 수정하여 손쉽게 사용할 수 있었다.

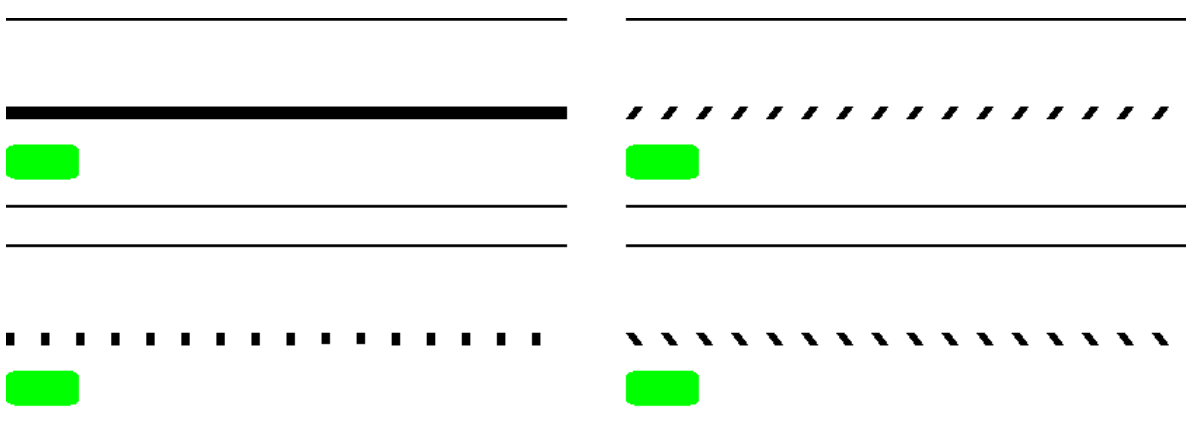
전산유체역학의 기본적인 원리는 바람이나 물과 같은 유체의 흐름을 나타내는 운동방정식을 수치해석적으로 해석하는 것으로, 유체가 흐르는 해석영역을 아주 조그만 셀(cell)로 나누어서 해석하는 방식을 사용한다. 셀이 많아지면 많아질수록 자동차와 같은 물체를 정확하게 표현할 수 있지만 반대로 계산시간이 증가하게 된다.



[그림 10] 전산유체역학 프로그램인 Flowsquare 설명

가) 실제 주행 상황 해석방법

실제로 차량이 주행하는 상황을 실험하기 위해 차량이 움직이고 공기, 도로, 중앙분리대가 움직이지 않도록 초기 조건을 설정하였다. CFD 프로그램인 Flowsquare의 moving wall 기능을 이용하여 차량만을 속도 V 로 움직이게 하여 일정한 시간간격, 1000 step마다 차량의 양단의 압력을 측정하였다.



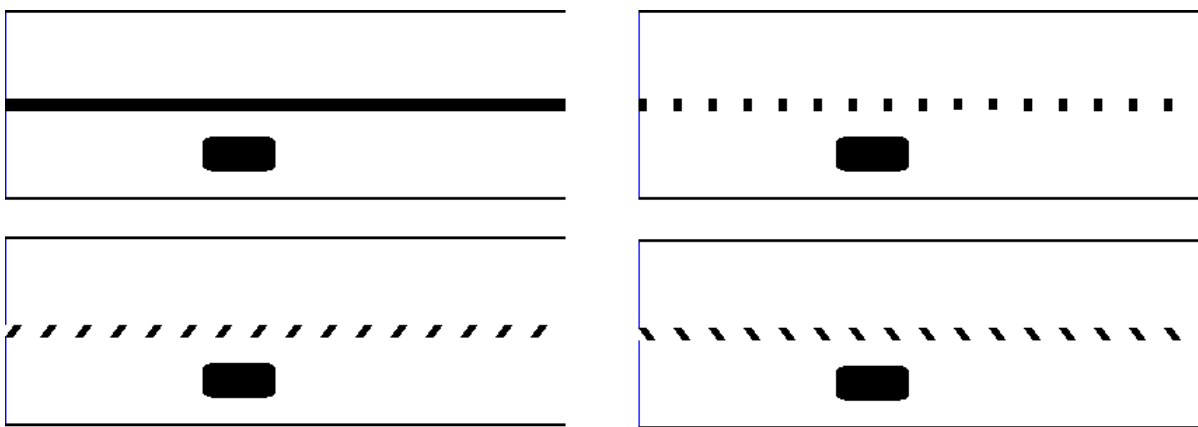
[그림 11] 자동차가 움직이는 경우의 주행풍 해석을 위한 입력파일

[그림 11]은 Flowsquare v4.0으로 2차원 해석을 위해서 작성한 해석조건 그림파일이다. 즉, 녹색으로 표시된 자동차는 속도 V 로 움직이며, 검은색으로 표시된 중앙분리대는 정지해있다.

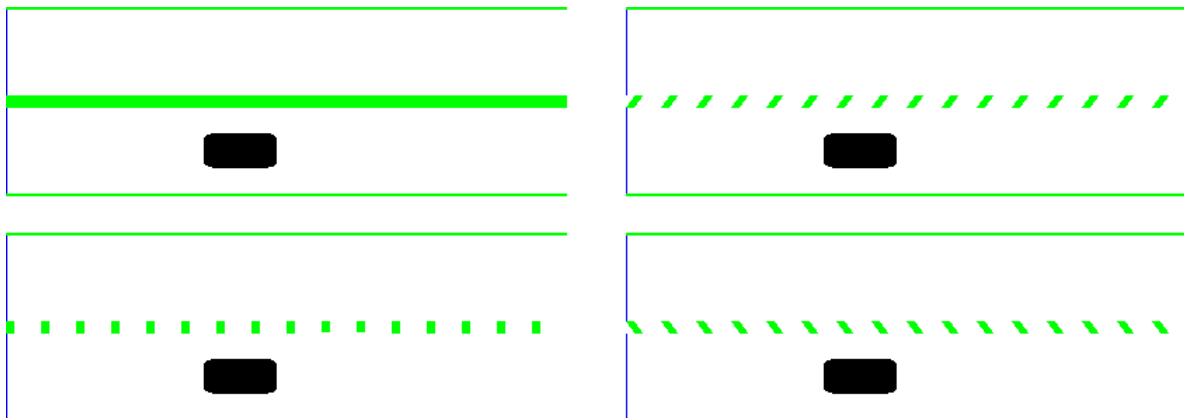
중앙분리대는 각각 완전히 차폐된 벽, 수직으로 뚫린 벽, 우경사벽, 좌경사벽으로 다양한 조건에 대해 해석을 수행하였다.

나) 가상 풍동실험 해석방법

가상 풍동실험 해석방법은 풍동의 실험조건을 그대로 CFD에 적용한 경우이다. 즉, 차량, 도로, 중앙분리대를 고정하고 바람만 불도록 초기조건을 설정하였다 [그림 12]. 또한, 비교를 위해 상대속도적 관점에서 실제 실험과 동일하게 차량만 고정하고 도로, 중앙분리대, 바람이 V 의 속력으로 움직이는 상황 또한 실험하였다 [그림 13]. 자동차가 정지한 경우를 보면, 자동차는 검은색으로 정지시켰고 벽과 중앙분리대는 녹색으로 움직이게 되어 있다. 또한 좌측면에 파란색으로 표시된 부분은 바람이 불어 들어오는 입구조건이 된다.



[그림 12] 자동차와 벽면이 고정된 경우의 주행풍 해석을 위한 입력파일 (가상 풍동실험)



[그림 13] 자동차만 고정된 경우의 주행풍 해석을 위한 입력파일

IV. 연구 결과

1. 환기풍 연구 결과

환기풍을 이용한 풍력발전의 타당성을 실험적으로 증명하기 위해 제작한 실험용 덕트와 풍력발전기는 [그림 14]와 같다. 앞서 설명한 바와 같이 1단계, 2단계, 그리고 3단계에 대해 실험조건을 바꾸어가면서 오리피스 전단과 후단의 압력차를 측정하였으며, 그 측정결과를 [표 1]에 정리하였다.



[그림 14] 환기풍 실험을 위해 제작된 환기덕트와 풍력발전기

[표 1] 환기풍 전력사용량 실험결과

단계	1단계	2단계	3단계	3단계
풍력발전기	미설치	설치	설치	설치 (고정)
팬 전력소비	25V x 0.27A	25V x 0.27A	30V x 0.27A	30V x 0.27A
풍력발전량	—	12V x 1mA	12V x 1mA	—
총 전력소비	6.75W	6.75W-0.01W	8.1W-0.01W	8.1W
압력차	0.35 hPa	0.52 hPa	0.35 hPa	0.46 hPa

1단계 실험의 경우 풍력발전기를 설치하지 않은 상태에서 환기팬에 공급하는 전력을 고정하고 오리피스의 압력차를 측정하였다. 이때의 소비전력은 6.75W 였다. 2단계 실험은 1단계와 동일한 조건에서 덕트의 환기구에 풍력발전기를 설치하였다. 풍력발전량은 매우 미소하여 전력소비량은 불과 0.01W만 회수가 되었다. 그런데 풍력발전기를 설치함에 따라 그 압력저항이 환기팬에까지 전달되어 결과적으로 압력차가 0.17hPa 증가하게 되었다. 즉 그만큼 환기풍량이 줄어들게 된 것이다. 3단계 실험은 풍력발전기를 계속 돌게 하면서 전력공급장치의 전압을 상승시켜 오리피스의 압력차가 1단계와 동일하게 되도록 조정하였다. 그 결과 전압을 25V에서 30V로 5V 상승시켜야 했고 결국 동일한 풍량을 유지하기 위해서는 소비전력이 6.75W에서 8.1W로 증가하게 되었다. 반면에서 풍력발전량은 2단계와 거의 변화가 없이 미소한 정도였다.

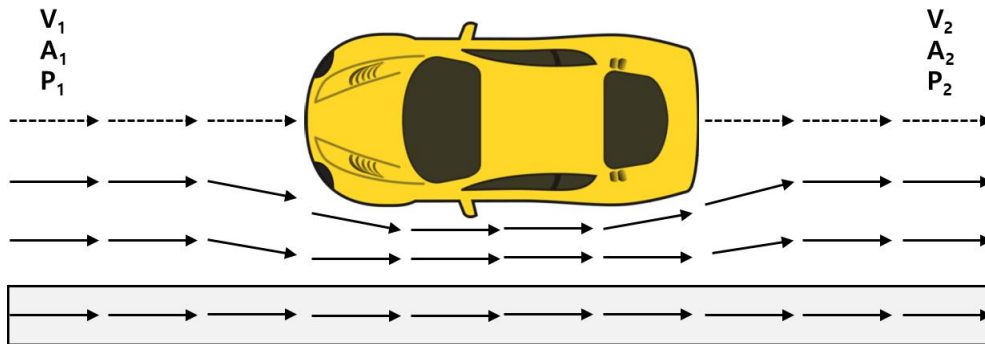
따라서 추가적인 전력소비와 풍력발전에 의한 전력생산을 비교하면 추가적인 전력소비 $p=8.1-6.75=1.35W$ 이고, 전력생산 $R+r=0.01W$ 이므로, 추가적인 전력소비(p) >> 풍력발전 전력생산

(R+r)이므로 에너지 회수가 아니라 에너지 소비인 것임을 명백하게 증명하였다.

2. 주행풍 연구 결과

1) 이론적 연구 결과

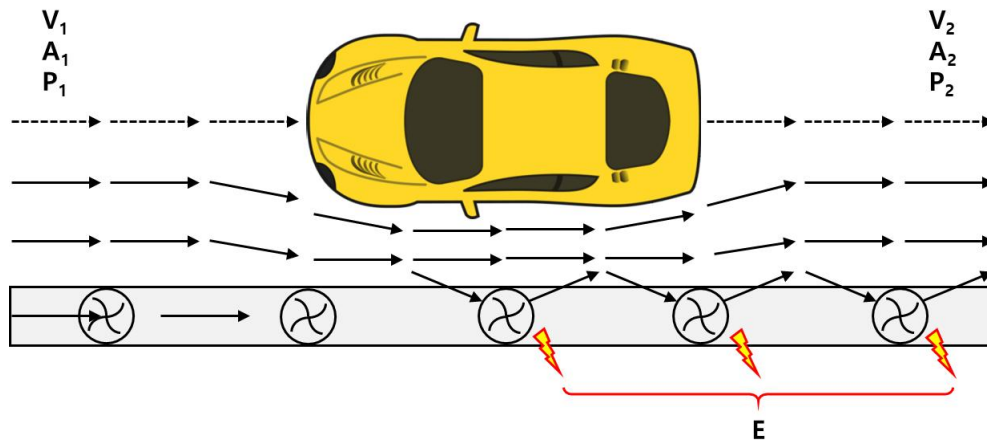
중앙분리대에서 자동차의 주행풍에 의한 풍력발전을 이론적으로 증명하기 위해 베르누이 방정식을 이용하였다. 먼저, 자동차가 도로에서 등속으로 달려가고 있다고 가정하자. 도로의 좌측과 우측은 대칭적이므로 한쪽 방향의 주행풍만을 고려하기로 한다. 또한 자동차가 움직이는 대신 바람과 중앙분리대, 지면이 자동차의 주행속도와 동일한 속도로 움직인다고 가정하더라도 물리적인 상황은 똑같다 [그림 15].



[그림 15] 차량 주행풍 상황에서의 바람의 흐름

베르누이 방정식을 적용하기 위한 제어체적(control volume) 또는 유관(stream tube)을 바람의 속도와 상대속도차가 없는 중앙분리대로부터 바람의 흐름이 대칭이 되는 차량의 중심선까지로 정의하기로 한다. 이 경우 유체(공기)는 차량 측면의 유선을 따라 저항 없이 부드럽게 움직인다. 이 때 차량 앞쪽의 공기의 압력과 자동차에 대한 공기의 상대속도를 각각 P_1 , V_1 이라 하고, 차량 뒤쪽의 기압과 상대속도를 각각 P_2 , V_2 라고 하자. 제어체적에 대해 연속방정식을 적용하면, $\rho A V_1 = \rho A V_2$ 를 통하여 $V_1 = V_2$ 임을 알 수 있다. 다음으로 베르누이 방정식을 적용하면, $P_1 + 1/2 \rho V_1^2 = P_2 + 1/2 \rho V_2^2$ 이므로 $P_1 = P_2$ 가 된다. 즉, 차량의 앞부분 압력 P_1 과 뒷부분 압력 P_2 가 같기 때문에 아무런 차량에 작용하는 아무런 압력차가 없다. 단, 바람에 의한 마찰력은 무시한다.

풍력발전기를 중앙분리대에 설치하여 자동차의 주행에 의해 생성되는 주행풍의 일부가 풍력발전기를 가동시킨다고 가정하자 [그림 16]. 단, 반대 차선에서도 자동차가 지나다니므로 중앙분리대를 거쳐나가는 바람은 좌우측에서 동일하여 제어체적 내에서 연속방정식은 그대로 유지된다고 가정한다. 주행풍에 의해 풍력발전기가 작동하여 전기에너지를 생산함으로써 제어체적 내에서 밖으로 빠져나가는 에너지 손실을 E 라고 하면, $P_1 + 1/2 \rho V_1^2 = P_2 + 1/2 \rho V_2^2 + E$ 가 된다. 앞서와 마찬가지로 연속방정식이 유지되므로 $V_1 = V_2$ 라면 위 식은 $P_1 = P_2 + E$ 가 되므로 결국 $P_1 > P_2$ 가 되어 자동차는 앞쪽 압력이 뒤쪽 압력보다 높아지며, 결과적으로 자동차를 앞에서 뒤로 미는 압력에 의한 저항인 항력이 발생하게 된다.



[그림 16] 차량 주행풍 상황에서 풍력발전할 경우의 바람의 흐름

첫 번째 경우는 자동차의 앞쪽과 뒤쪽에 아무런 압력차가 없었으므로 주행속도가 그대로 유지되지만 두 번째의 경우는 뒤로 미는 항력이 발생하므로 자동차의 전진속도가 속도가 줄어들게 된다. 만약 자동차가 동일한 속도로 달리려고 한다면 항력만큼의 연료를 더 소비하여 속도를 올려야 할 것이다. 따라서 두 번째의 경우는 에너지 회수가 아니라 차량이 풍력발전기가 회수하는 것 이상의 에너지를 자동차로 하여금 더 소비하게 만드는 것이다.

2) 수치해석적 연구 결과

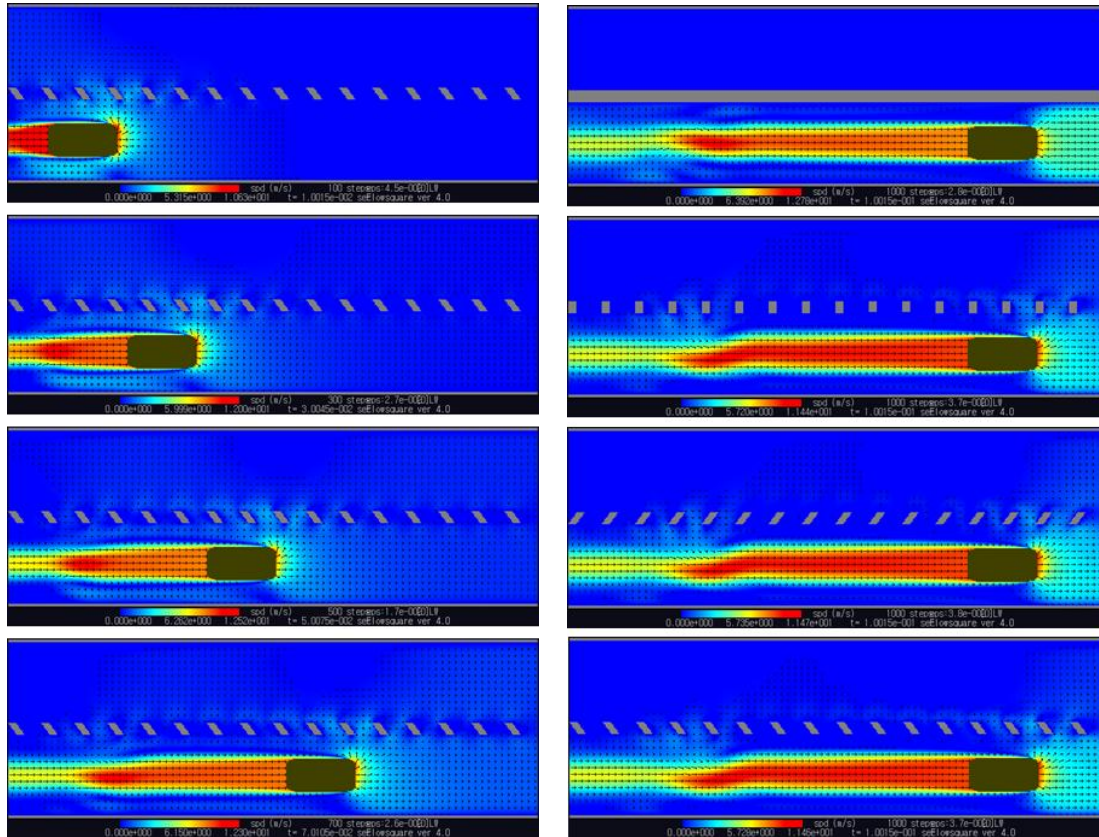
가) Flowsquare 2D 프로그램을 이용한 해석

(1) 벽과 공기는 정지하고 차량이 움직이는 경우

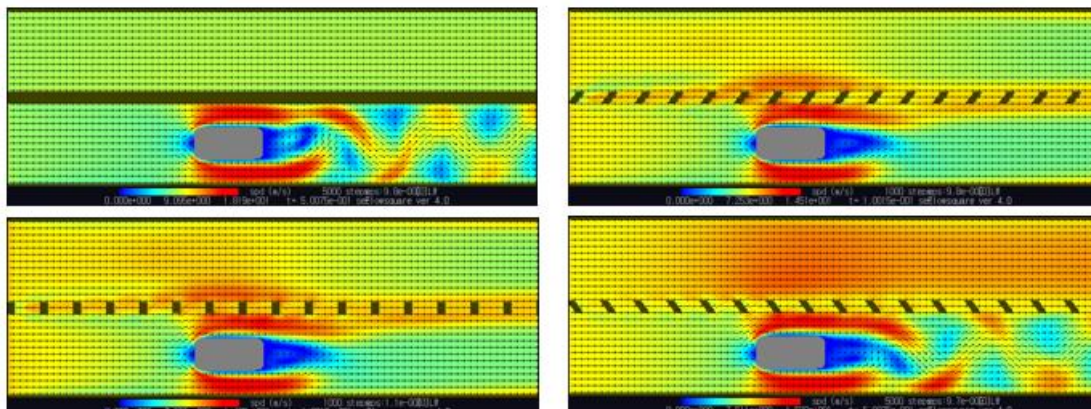
Flowsquare 2D의 moving wall 기능을 이용하여 여러 가지 중앙분리대 형상 하에 차량을 주행시켰다. 각 실험별 매 1000 step 마다 압력차와 속도를 측정하여 결과를 저장하였다. 차량이 움직이는 상황에서 중앙분리대의 형상에 따른 속도 및 압력 변화는 큰 차이를 보이지 않았다 [그림 16]. 다만 중앙분리대가 완전히 막힌 경우와 비교하여 중앙분리대가 터져있어서 바람이 통과할 수 있는 경우에는 압력저항이 줄어들기 때문에 차량 양단에 가해지는 압력차도 줄어드는 것을 확인할 수 있었다.

(2) 차량은 정지하고 중앙분리대가 공기와 같은 속도로 움직이는 경우

앞서 설명한 (1)의 경우와 마찬가지로 Flowsquare 2D의 moving wall 기능을 이용하여 여러 가지 중앙분리대 형상을 바람과 동일한 속도로 움직였다. 압력차가 안정되었을 때인 5000 step에서의 차량 양단의 압력차는 완전히 막혀있는 중앙분리대에서 78.57Pa로 가장 크게 나타났으며, 나머지의 경우 각각 53.25Pa, 52.57Pa, 52.87Pa로 거의 동일하게 나타났다. CFD 해석을 통하여 확실하게 확인한 것은 완전히 막힌 벽에 비해 벽의 일부가 어떤 방식으로든 뚫려있다면 차량에 가해지는 압력저항은 확실히 작아진다는 사실이다. 그러나 중앙분리대가 뚫려있는 형상이나 그 기울기에 따른 차이는 명확한 경향성은 명확하게 확인하기 어려웠다. 그 원인으로는 Flowsquare가 정밀한 압력값을 얻을 수 있는 수준의 프로그램이라기보다는 경향을 확인하는 정도의 교육용 프로그램이기 때문일 것이라고 생각된다.

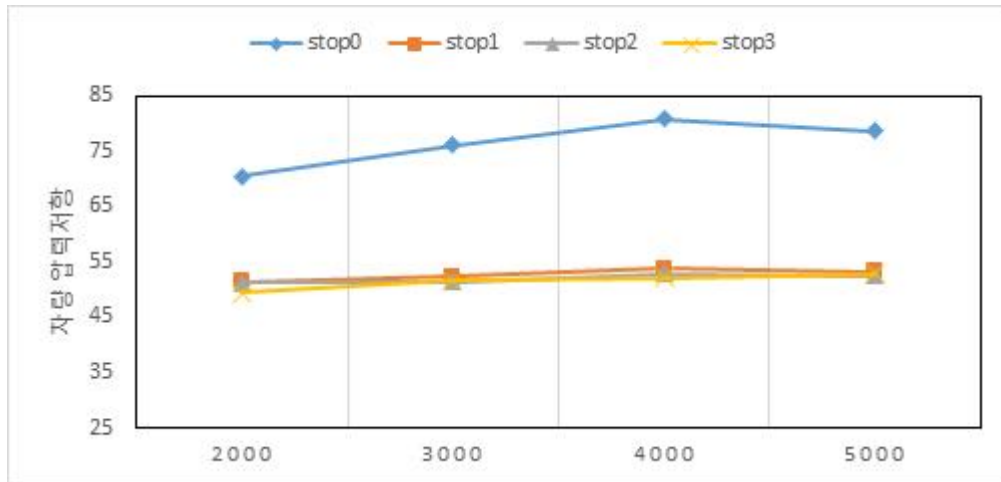


[그림 17] 중앙분리대 형상별 차량이 움직이는 경우의 시뮬레이션 결과
(좌: 1000step 단위로 촬영한 이미지, 우: 중앙분리대 형상별 최종 속도 분포 이미지)



[그림 18] 공기와 등속도로 움직이는 중앙분리대 형상별 속도분포

[그림 19]는 차량은 정지해있고 바람과 등속도로 중앙분리대가 움직인 경우의 해석결과로, 차량의 전면과 후면의 압력차를 비교한 것이다. 수평축은 timestep으로 각각 2000, 3000, 4000, 5000일때를 비교하였다. 그 결과, 가장 값이 크게 나온 파란색 선은 중앙분리대가 완전히 막힌 경우이고, 나머지 부분적으로 차폐된 경우는 거의 비슷한 양상을 보이지만 전체적으로 완전히 막힌 벽보다는 압력저항이 현저하게 작다는 것은 분명한 경향이다. 미소하게 수평벽보다 좌경사 벽인 경우가 압력저항이 작기는 하지만 이를 일반화 하기에는 무리가 있다.



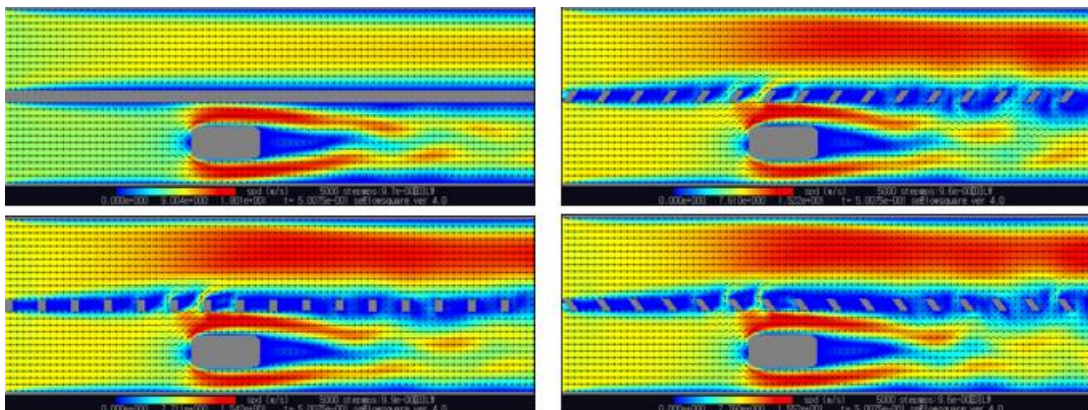
[그림 19] 공기와 중앙분리대가 등속도로 움직이는 경우에 차량에 가해지는 압력차 비교

(3) 차와 벽 모두 정지해있고 바람만 움직일 때의 경우

상대 속도의 관점에서 비교해 보았을 때 차량은 벽과 공기에 대해 움직이고 있으므로 실제와는 다른 상황이다. 그러나 실제로 우리가 제작한 풍동실험장치와는 동일한 상황이다.

앞서의 실험과 동일하게 매 1000 step마다 데이터를 기록해 결과를 비교했다 [그림 20].

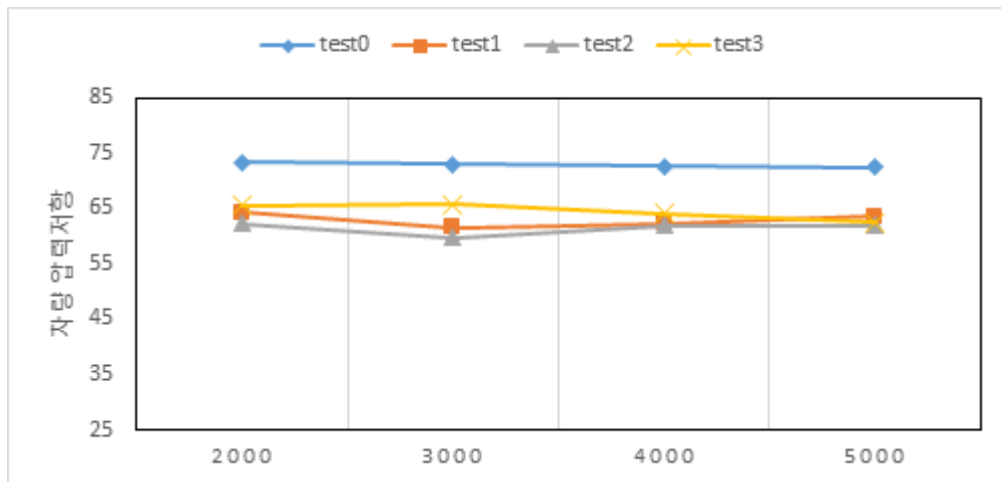
이 경우에도 (2)와 동일하게 압력이 안정되었을 때(4000 step)의 차량 양단의 압력차를 비교하였다. 결과는 (2)와 유사하게 완전히 막혀있는 중앙분리대에서 72.44Pa로 가장 크게 나타났으며, 나머지는 각각 63.52Pa, 61.96Pa, 62.4Pa의 우상, 좌하, 우하)로 큰 차이를 보이지 않았다. 이 실험 결과를 통해 실제 상황과의 차이인 바람과 벽의 상대속도 차이를 고려하지 않는다고 하여도 중앙분리대 형상, 즉 풍력발전기의 설치여부에 따른 경향성은 일치한다는 사실을 알 수 있다. 즉 풍동 실험과 실제 실험의 차이로 인한 오차는 어느 정도 배제해도 된다는 것을 의미한다.



[그림 20] 풍동실험과 동일한 상황에서 중앙분리대 형상별 압력 분포

풍동실험과 동일한 조건으로 수행한 가상 풍동실험 수치해석의 경우에도 앞서와 마찬가지로의 결과가 나타났다. [그림 21]의 그래프에서 볼 수 있듯이 완전히 막힌 벽일 때 차량에 가해지는 압력저항이 가장 크며, 부분적으로 차폐된 경우는 그보다 압력저항이 상당히 낮음을 알 수 있다. 그러나 차폐벽의 형상에 따른 분명한 차이는 결론을 내리기 힘들다. 2차원 수치해석

의 모든 경우에서 완전히 차폐된 경우보다 부분적으로 차폐된 경우에 차량에 가해지는 압력저항이 작다는 것은 확실한 사실인 것을 확인할 수 있었다.

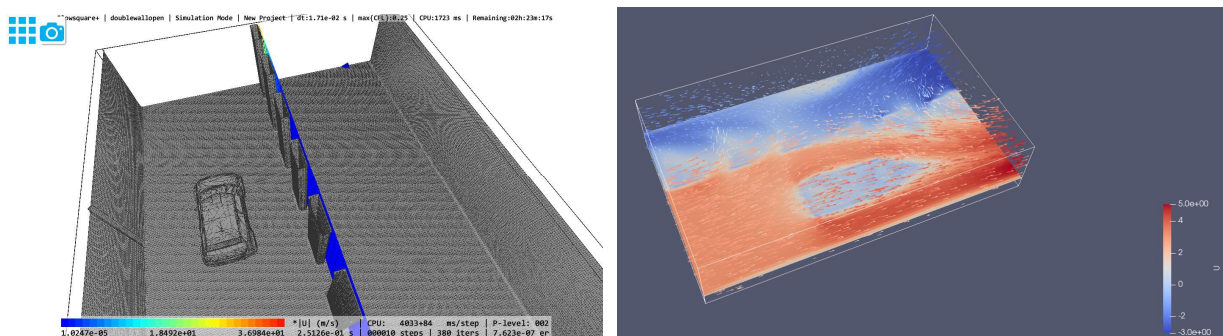


[그림 21] 공기만 등속도로 움직이는 경우의 차량에 가해지는 압력차 비교

나) Flowsquare 3D 프로그램을 이용한 해석

(1) 중앙분리대를 중심으로 서로 반대방향으로 바람이 부는 경우

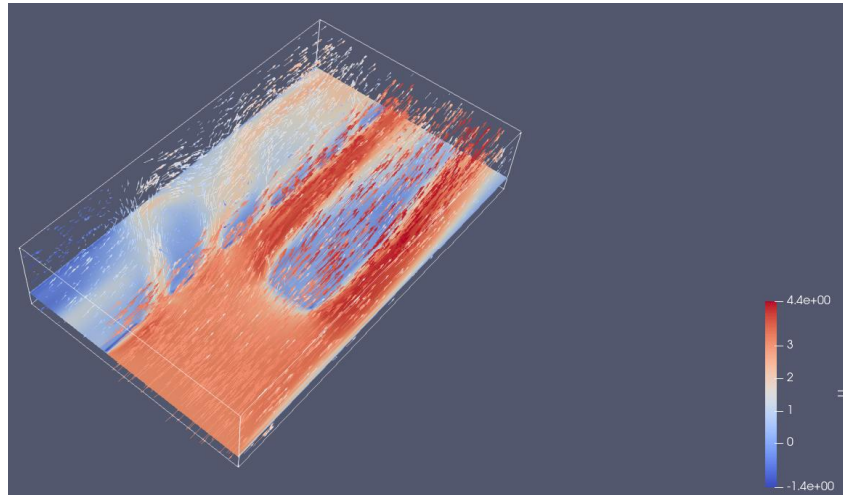
중앙분리대를 중심으로 서로 반대 방향으로 바람이 부는 경우를 3차원 CFD로 수치해석한 경우의 결과는 다음과 같다. [그림 22]의 우측 풍속 벡터 이미지를 살펴보면 중앙분리대의 뚫려있는 부분을 따라 바람이 소용돌이치는 모습을 확인할 수 있다. 이는 실제 차량 주행 상황에서는 절대 일어날 수 없는 현상이기 때문에 초기조건인 '중앙분리대를 기준으로 서로 반대방향으로 바람을 불어준다.'라는 명제가 실제 상황과 불일치함을 보여주었다고 할 수 있다.



[그림 22] 중앙분리대를 기준으로 서로 반대방향으로 바람을 불어주었을 때

(2) 차량이 존재하는 차선만 바람을 불어준 경우

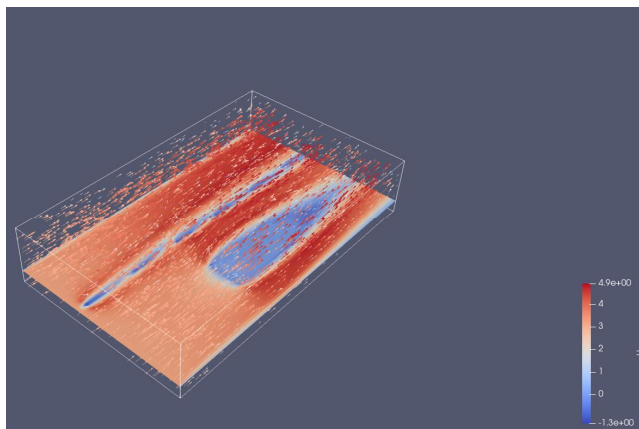
중앙분리대를 중심으로 차량이 존재하는 차선만 바람을 불어주고 반대쪽 차선에는 아무 바람도 불지 않는 경우를 수치해석적으로 실험한 결과이다. [그림 23]에서 주목해 봐야할 점은 차량 주위의 바람의 양상이 아니라 중앙분리대에 난 구멍으로부터 새는 듯한 공기이다. 이 또한 직관적으로 생각해 보았을 때 실제 상황과는 잘 들어맞지 않는다.



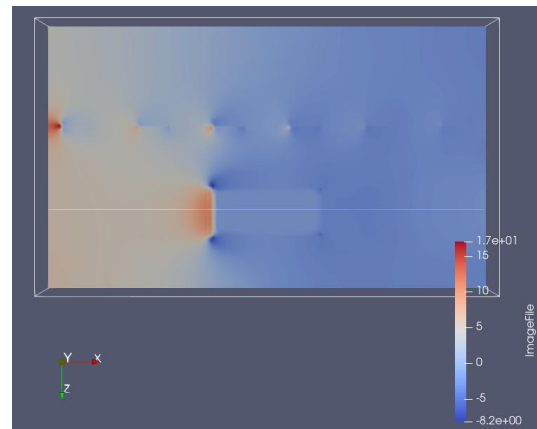
[그림 23] 한쪽 차선에만 바람을 불어준 경우

(3) 모든 차선에 균일하게 바람을 불어준 경우

모든 차선에 균일한 바람을 불어준 경우의 CFD 해석 결과는 다음과 같다. 모든 차선에 균일하게 바람을 불어준 경우가 실제 상황과 가장 유사하다고 판단하였다. 중앙분리대에 뚫린 부분에서 와류가 형성되는 것이 아니라 바람이 구멍으로 빠져나가면서 생기는 효과만을 관찰할 수 있었기 때문이다. 이러한 CFD 실험 결과를 바탕으로 실제 풍동 실험에서 같은 방향으로 바람을 흘려보내주는 방법을 채택했다.



(a) 바람의 속도를 나타낸 이미지



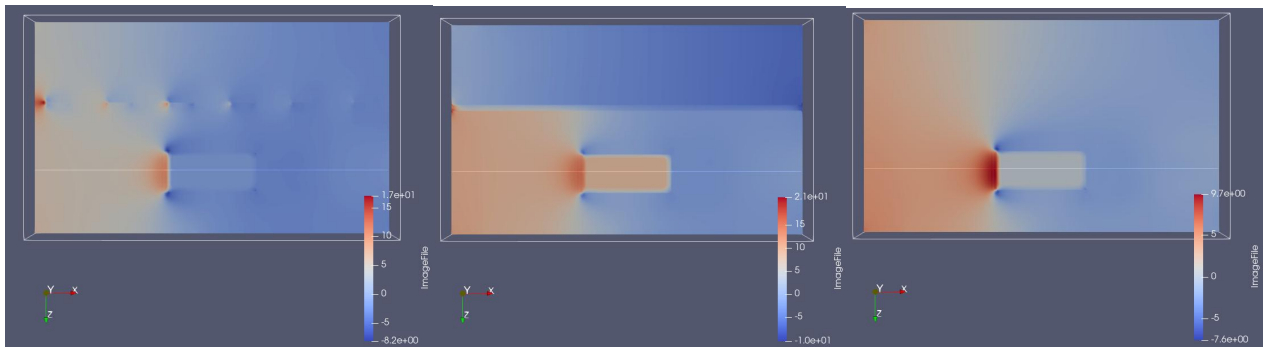
(b) 위에서 바라보았을 때의 압력차 이미지

[그림 24] 모든 차선에 균일한 바람을 불어준 경우

(4) 중앙분리대의 막힘 정도에 따른 압력저항 분석

(1) ~ (3)에서 얻은 결과를 바탕으로 모든 차선에 동일한 바람을 불어주었을 때 중앙분리대의 막힘 정도에 따라 비교하기로 하였다. 중앙분리대가 존재하지 않는 경우([그림 25], 우측)와 중앙분리대가 완전히 막힌 경우([그림 25], 가운데)은 중앙분리대로부터 차량이 떨어진 거리가 다르다는 점 밖에 차이가 없다. 충분히 오랫동안 시뮬레이션하여 바람이 안정되었을 때 차량 양단의 압력차이를 비교하였더니 모두 막혀있는 경우($14.90 - (-3.15) = 17.46\text{Pa}$) > 부분적으로 뚫려있는 경우($10.48 - (-3.15) = 13.63\text{Pa}$) > 중앙분리대가 없는 경우($9.52 - (-2.75) = 12.27\text{Pa}$)로 예상했던 결과와 동일하게 산출되었다.

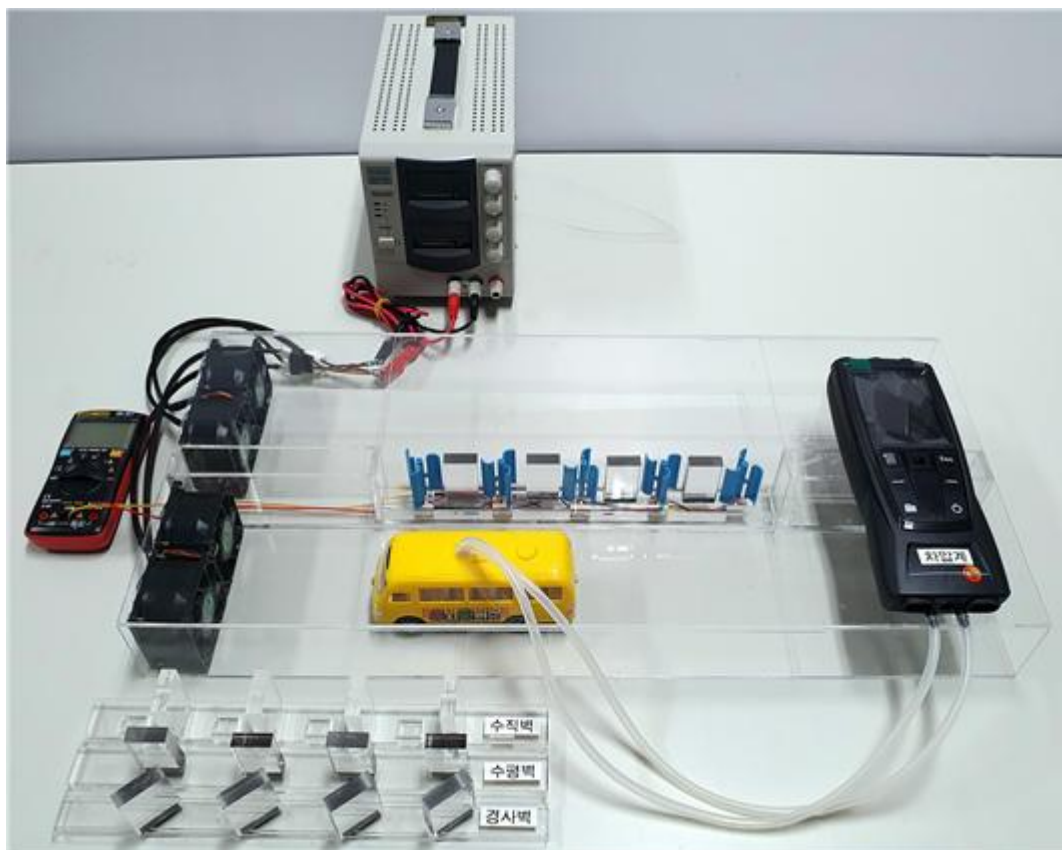
CFD 프로그램 자체의 기술적 문제로 실제로 중앙분리대의 뚫린 부분에 풍력발전기를 설치하였을 때 어떠한 양상을 보이는지 확인할 수 없어서 아쉬움이 남는다.



[그림 25] 중앙분리대의 막힌 정도에 따른 압력 변화의 추이 분석
(좌측 : 부분적으로 뚫려있는 경우, 중앙 : 막혀있는 경우, 우측 : 존재하지 않는 경우)

3) 실험적 연구 결과

[그림 26]은 차량 주행풍 풍동실험을 위해 제작한 실험장치이다. 바람을 불어주기 위한 팬은 앞서의 수치해석 실험과 마찬가지로 같은 방향에서 양쪽 두 차선에 동일하게 바람을 불 수도 있고, 팬을 빼서 반대편에 장착하면 두 차선에 각각 반대 방향으로 바람을 불 수 있도록 제작하였다.



[그림 26] 차량 주행풍에 의한 압력저항 측정을 위한 풍동실험장치

[표 2]는 차량에 가해지는 압력차의 측정결과이다. 수치해석과 마찬가지로 중앙분리대가 완전히 차단되었을 경우, 차량이 만드는 주행풍이 벽에 부딪쳐 저항을 받기 때문에 차량의 전단과 후단에 가해지는 압력차 즉 항력이 0.870hPa로 가장 크게 나타났다. 그리고 경사벽의 경우 차량이 만들어내는 주행풍이 효과적으로 배출될 수 있는 방향으로 기울어져 있을 때 차량에 가해지는 압력저항이 가장 작은 것을 알 수 있다.

풍력발전기를 설치하였을 경우의 압력차를 보면, 풍력발전기를 설치하지 않았을 경우보다 압력저항이 증가하는 것을 알 수 있다. 물리적으로 당연한 이야기지만 풍력발전기를 설치하면 벽을 설치하는 것과 마찬가지로 바람의 통로가 차단되어 압력저항이 증가하게 되는 것이다. 그러나 주목해서 볼 것은, 완전히 차단된 경우보다 수평, 수직 또는 경사벽을 만들과 그 중간에 풍력발전기를 설치한 경우의 압력저항은 낮아진다는 것이다. 또 한가지 재미있는 것은, 풍력발전기를 회전시켰을 때가 회전시키지 않았을 때보다 차량에 가해지는 압력저항이 작다는 것이다. 이것은 풍력발전기가 회전하면 그 만큼 통화시키는 유량이 많아지지만 풍력발전기가 정지하면 벽처럼 작용한다는 것을 의미한다.

이러한 실험결과로부터 수치해석과 동일하게 완전히 막힌 벽보다는 부분적으로 뚫린 벽이 차량에 가해지는 압력저항을 줄일 수 있으며, 뚫린 벽 사이에 풍력발전기를 설치하면 설치하지 않았을 때 보다는 압력저항이 증가하기는 하지만 완전히 막혔을 때 보다는 압력저항이 감소한다는 것을 증명할 수 있었다.

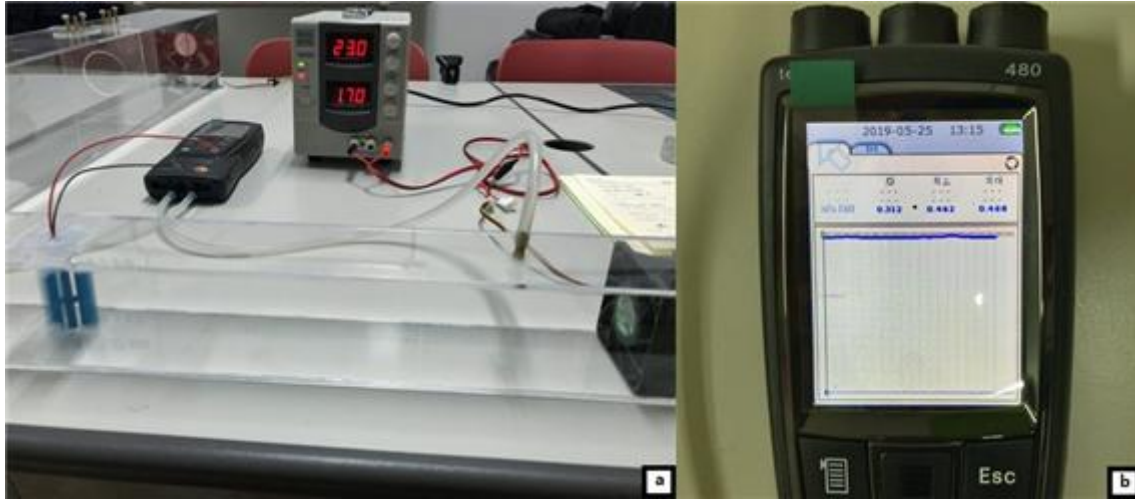
[표 2] 차량에 가해지는 압력차의 풍동실험 결과

중앙분리대	압력차 (hPa)	풍력발전량
벽으로 차단	0.870	풍력터빈 없음
수평 차단벽	0.707	
수직 차단벽	0.680	
경사 차단벽	0.672	
차단벽 없음	0.648	
풍력터빈 (고정)	0.606 (0.722)	매우 작음
수직 차단벽 + 풍력터빈 (고정)	0.750 (0.803)	480mV x 2.8mA
수평 차단벽 + 풍력터빈 (고정)	0.730 (0.774)	700mV x 4.5mA

[그림 27]은 풍력발전기가 회전할 때와 정지해 있을때의 압력저항을 확인하기 위해서 만든 단일 풍력발전기 실험용 풍동이다. 앞서 실험한 환기풍 덕트 실험에서 풍력발전기를 설치하고 회전하도록 한 경우와 날개를 고정시킨 경우에서도 동일한 경향을 발견하였기 때문에, 이와같이 별도의 실험장치를 만들어서 확실하게 증명을 하고자 하였다.

실험 결과, 풍력발전기가 회전하는 경우가 정지한 경우보다 압력저항이 작다는 것을 확인하였다. 이는 풍력발전기가 회전하지 않으면 덕트를 가로막고 있는 벽과 동일하지만 풍력발전기가 회전하면 비록 바람의 운동에너지를 흡수하지만 바람은 통과시키기 때문에 압력저항은

더 작다는 것을 확인할 수 있었다. 참고로 풍력발전기의 원리에 대해 공부하던 중, 베츠의 법칙(Betz's law)에 의하면 풍력발전기가 바람으로부터 운동에너지를 흡수할 수 있는 최대량은 이론적으로 59%라고 한다.



[그림 27] 단일 풍력발전기의 압력저하 효과 실험장치

V. 연구 결론 및 활용성

1. 연구 결론

1) 환기풍 에너지 하베스팅 실험

선풍기에서 나온 바람으로 풍력발전기를 돌려 에너지를 발전한다는 아이디어와 동일한 환기풍 에너지 회수 아이디어는, 이론적인 증명과 실험적 증명을 통해 환풍구 앞에 풍력발전기를 설치하여 발전을 할 경우 환기를 위한 풍량을 손해보거나 또는 일부 풍력발전으로 에너지를 회수하는 것 같지만 풍량을 유지하기 위해 환풍팬에 더 큰 에너지를 공급하여야 하기 때문에 결국은 손해를 일으킨다는 사실을 확실하게 증명하였다.

전체 계의 측면에서 보는 것이 아니라 특정 부분만 놓고 보았을 때는 에너지 회수로도 착각할 수 있기 때문에 전문가가 아니면 쉽게 예상하기 힘든 문제이다. 그러나 우리의 탐구에서와 같이 환기풍 풍력발전의 물리적 핵심요소를 간략화하여 보면 선풍기로 풍력발전기를 돌리는 아이러니한 경우가 된다는 것을 알 수 있다.

추가적으로 풍력발전기를 이미 설치한 경우에 풍력발전기의 날개를 고정한 경우와 그냥 돌도록 내버려둔 경우를 비교하였을 때 풍력발전기가 도는 편이 오히려 압력 저항을 줄인다는 사실을 알 수 있었다. 이를 통하여 불가피하게 바람의 길인 유로를 막아야 하는 상황에서는 오히려 막아두는 것보다는 풍력발전기를 설치하여 발전하는 것이 저항을 줄이는데 도움이 된다는 사실을 알 수 있었다.

2) 주행풍 에너지 하베스팅 실험

주행풍 에너지 회수 실험은 이론적 증명과 함께 풍동 실험 증명, 전산유체역학 프로그램을 이용한 수치해석 증명을 병행하였으며, 결과 해석에 상당한 어려움이 있었다. 먼저 학교에서 배운 연속방정식과 베르누이 방정식을 이용하여 주행풍 상황을 접근하였을 때는 풍력발전기에서 바람의 운동에너지를 흡수하게 되면 그 결과 차량 양단의 압력차, 즉 압력저항을 만든다는 사실을 확인할 수 있었다. 그러나 풍동 실험과 CFD 실험을 통하여 중앙분리대가 이미 차량의 주행에 있어 방해물의 역할을 하고 있기 때문에 오히려 막힌 벽을 뚫고 풍력발전기를 설치하여 바람이 통하도록 만들어 줄 수 있다면 차량 자체에 걸리는 압력저항을 줄이는데 도움이 됨과 동시에 발전을 통한 전력 생산 효과 또한 기대할 수 있다는 결론을 내리게 되었다. (물론 풍력발전기를 설치하지 않고 벽을 뚫기만 하는 경우가 가장 압력저항을 줄일 수 있기는 하지만, 완전히 막힌 벽과 비교하면 풍력발전기를 설치하는 것이 유리하다는 것이다.)

중앙분리대의 여러 형상에 따른 압력변화 실험에서는 차량의 진행방향과 일치, 반대되는 방향으로 중앙분리대를 설치하였을 때 유의미한 압력변화가 일어날 것으로 기대하였으나 풍동 실험에서는 주행풍이 중앙분리대를 통과하는 각도에 맞도록 경사벽을 설치한 경우 유의미한 압력저항 감소가 일어났다. 그러나 풍동실험은 물리적으로 실제의 차량 주행상황과 일치하지 않는 부분이 있어서 수치해석을 수행하였고, 수치해석 상으로는 아직 우리가 전산유체역학을 완전히 이해하고 사용하지 못한 측면이 있어서 풍동실험과 같은 유의미한 결과를 얻지는 못하였다.

2. 향후 전망 및 활용성

환기풍 에너지 회수 아이디어에서 많은 사람들이 간과했던 사실을 알리는 것은 매우 중요하다고 생각한다. 왜냐하면 아직도 전문가를 비롯한 많은 사람들이 혼동을 일으켜서 에너지 회수로 사업을 하고자 돈을 투자하는 경우가 전세계적으로 빈번하기 때문이다.

우리가 만든 환기풍 상황의 간단한 실험도구는 중고등학교에서도 누구나 손쉽게 제작할 수 있기 때문에 이를 학습교구화하여 에너지 보존법칙과 열역학 제2법칙에 의해 에너지를 원래대로 회수할 경우 에너지 손실이 두 번에 걸쳐 비가역적으로 발생하기 때문에 결국은 손해라는 올바른 물리적 개념을 학생들이 가르쳐 줄 수 있는 도구로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주행풍 에너지 회수 아이디어에서는 방해물 역할을 하고 있는 중앙분리대를 일부 개방하여 풍력발전기를 설치한다면 오히려 차량의 저항을 줄이고 에너지를 회수할 수 있음을 풍동실험과 수치해석을 통해 명확하게 확인하였다. 또한 풍동실험 상으로는 중앙분리대를 개방할 때 주행풍이 쉽게 통과할 수 있도록 경사벽을 설치하면 풍력발전 효율도 증가시킬 뿐 아니라 주행풍에 의해 차량에 가해지는 압력저항도 줄일 수 있다는 창의적인 아이디어를 새로 만들어낼 수 있었다. 본 탐구에서는 처음 배워서 사용하였던 전산유체역학이라 이 문제를 정확히 해석하여 완벽하게 증명하는 데까지는 이르지 못하였으나, 향후 3차원 전산유체역학 해석으로 경사벽의 유용성을 증명하면 이를 특허로 출원할 예정이다.

VI. 참고 문헌

1. xFlashpoint“HAVC Exhaust Capture - Unique Application of Wind Turbine”Portland OR/Los Angeles CA, <http://www.xflashpoint.com/hvac>
2. 동아일보“청주대 학생, 시계 디자인 공모전 수상 - 풍력발전 중앙분리대”2008-09-10, <http://www.donga.com/news/Culture/more27/article/all/20080910/8629053/1>
3. 광주매일신문“사회에게도 과학적 책임 물어야 - 대학생 종합설계경진대회”2014-02-26, <http://m.kjdaily.com/article.php?aid=1393412906313054144>
4. 특허법원 2014.12.19. 선고 2014허2634 판결[거절결정(특)]. 풍속발전장치(하이브리드카용), <https://casenote.kr/%ED%8A%B9%ED%97%88%EB%B2%95%EC%9B%90/2014%ED%97%882634>
5. Red Planet“Deveci Tech’s vertical wind turbine uses traffic to generate electricity”2018, <https://weather.com/science/video/highway-traffic-powers-wind-turbine>
6. 시사IN“지하철 바람으로 전력을 만든다고?”2008-11-11, <https://www.sisain.co.kr/news/articleView.html?idxno=3254>
7. 이투뉴스“[뉴스, 그 후] 지하철 풍력발전도 실현가능한 일”2011-02-18, <http://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=48180>
8. Safe Korea News“안전하고 똑똑한 고속도로 눈앞에 성큼”2011-12-01, <http://www.safekoreanews.com/10967>