



미국 풍공학의 본고장 - Colorado State University(CSU)

J. E. Cermak* 조 강 표**

1. 머릿말

콜로라도 덴버 북쪽으로 약 100 킬로미터 떨어진 아름다운 소도시 Fort Collins에서 바람을 길들인 젊은이가 있었으니 그가 바로 콜로라도 주립대(Fort Collins 소재)의 Jack E. Cermak 교수이다. Cermak교수는 2000년 9월 11일 안타깝게도 테러리스트 공격에 의해 건축역사에서 사라진 World Trade Center Towers(뉴욕 소재), 그리고 시카고에 소재한 Sears Tower와 같은 굵직한 프로젝트를 맡아 초고층건물의 안전성에 대한 결정적인 요소인 풍하중을 평가하는 등 업적으로 인해 세계적으로 널리 알려진 인물이다. 필자가 처음에 CSU의 Research Engineering Center내에 있는 FDDL(Fluid Dynamics and Diffusion Lab)을 처음 방문을 하였을 때 눈에 익은 듯한 풍동모형을 보고서 깜짝 놀랐다. 그 건물이 다름아닌 대한생명 63빌딩이었다. 필자가 Cermak교수를 지도교수로 정한 이후 대한생명빌딩 타인 지 좀 더 친숙하게 느껴지기도 했다. 이렇게 풍재해를 감소시키기 위해 혹은 풍하중을 보다 정확하

게 평가하기 위한 연구를 지속적으로 수행하고, 또 수많은 대형프로젝트들을 수행하게 되자 전세계 풍공학 전문가들의 발길이 끊이지 않았다. 이 FDDL은 Cermak 교수를 풍공학의 아버지로 만들었고, FDDL의 역사는 Cermak교수의 일대기와도 같은 것이다. 현재는 FDDL이 WEFL(Wind Engineering and Fluids Lab)로 명칭이 바뀌었다. Cermak 교수가 1959년 FDDL이 설립한 이래 줄곧FDDL의 Director직을 유지해 오다가 1985년 Meroney교수에게 넘겨주었다. 최근에는 Bienkiewicz교수가 Diector직을 이으면서 랩의 명칭을 WEFL로 바꾸었다. 한 때 Bienkiewicz 교수는 Cermak 교수의 학생이었다. WEFL은 40년 이상 기초 및 응용풍공학을 이끌어 온 세계적인 랩중의 하나이다. WEFL의 주요 연구분야는 바람에 의한 건축물이나 구조물의 풍재해방지 및 바람에 의한 오염원의 확산 등이다. WEFL은 3개의 경계층 풍동을 주축으로 해서 다수의 특정 목적의 풍동을 갖고 있고, 연구진은 Dr. Bienkiwicz, Dr. Cermak, Dr. Meroney, Prof. Sandborn, Dr. Neff가 중심이고, 프로젝트의 성격에 따라 다른

* University Distinguished Professor, Department of Civil Engineering, Colorado State University

** 아이오와 주립대, 연구원

분야의 교수들도 다 참여한다.

2. 역사

필자는 1997년 가을에 Cermak 교수의 50년 교직 생활 축하파티에 초대되어 간 적이 있다. 그 자리는 CSU 공과대학에서 주최한 파티였다. CSU 통틀어 50년 교직생활을 한 사람은 Cermak 교수가 유일하다고 한다. 그는 University Distinguished Professor라는 명예를 안았으며 대외적으로 해알릴 수 없는 상을 받았다. 지금도 베이저 저널의 편집인으로 활약하고 있다.

FDDL은 1959년 Cermak 교수에 의해서 설립되었으며, 토목공학과내에 Fluid Mechanics and Wind Engineering Program이 확립되었다. 그가 1947년 CSU의 석사과정때부터 설계에 참여하여 1949년 CSU 전임장사 시절 완성된 CSU의 첫 경계층풍동이 만들어진지 10년만의 일이다. FDDL의 역사는 이름에서 함축되어 있듯이 대기확산에 관한 연구로부터 시작되었다. 당시 Office of Naval Research로부터 증발에 관한 연구를 위해 첫 풍동이 설계되었다. 그 이후 난류확산에 관한 연구가 주종을 이루었다. 이 첫번째 풍동은 개조를 거듭하여 현재 Industrial Aerodynamics Wind Tunnel(IWT) 형태로 발전하였다. 그후 대기경계층을 재현할 수 있는 측정부(test section)가 충분히 긴 풍동이 1963년에 완성이 되었는데 이것이 두번째 풍동인 Meteorological Wind Tunnel(MWT)이다. 이 풍동으로 대기경계층내의 조건들을 정확히 재현할 수 있다는 확신에

힘입어 풍공학의 획기적인 전기의 기틀을 세웠다. 당시 MWT설계와 FDDL초창기 멤버로는 E. Plate (현재 Karlsruhe대학 교수), L. Baldwin, V. Sandborn 교수 등이다. 이들은 미시기상학, 난류확산, 실험유체 등으로 세계적인 명성이 있는 분들로 FDDL의 든든한 기반이 되었다. 현재 Cermak 교수와 Sandborn 교수는 아직도 FDDL멤버로서 활동하고 있다. 노장교수들이 직접 Hot wire를 들고 shear stress에 대해 연구하고 있는 모습을 보았을 때 존경심이 저절로 우러나왔다.

60년대의 대표적인 연구프로젝트로 뉴욕 맨해튼에 있는 World Trade Center Towers를 들 수 있다. 아깝게도 미국 부의 상징으로 지목되어 테러리스트의 목표물이 되어 건축의 역사에서 사라졌다. Cermak 교수에게는 이번 사건이 남다른 것이란 생각이 든다. 그 당시 세계적으로 유일한 대기경계층풍동을 소유하고 있었기 때문에 CSU는 별로 어렵지 않게 이 프로젝트를 맡을 수 있었다고 한다. 그 당시 세계에서 제일 높은 빌딩으로써 세계의 주목을 받고 있던 터라 CSU의 FDDL의 풍공학기술도 세계적으로 널리 알려지게 되었고 70년대에는 산업의 발달로 말미암아 초고층빌딩과 대스판 구조물이 수없이 지어져 FDDL은 그 전성기를 맞는다. 지금까지 FDDL에서 수행한 세계적인 빌딩은 550여개에 이른다고 한다. FDDL입구에 들어서면 세계각국의 유명 고층건물의 모형이 뿔뿔하게 늘어서 있다. 구조물 모형과 사진만 보더라도 프로젝트의 다양성을 엿볼 수 있다. 교량, 선박, 경주말, 스키선수, 풍차, 대형 크레인, 우주왕복선 발사대, 우



사진 1 Chientan 철도역사(대만소재) 공탄성모형



사진 2 보스톤시의 환기 프로젝트를 수행하고 있는 Meroney 교수

산 쓴 사람 등등 그야말로 모형전시장을 방불케 한다.

난류확산 전문가인 Meroney 교수를 주축으로 환경오염분제와 관련된 프로젝트들 다수 수행하였다. 전형적인 풍동실험은 발전소 등의 굴뚝으로 배출되는 오염원의 대기확산에 관한 실험으로 굴뚝 주변의 오염농도를 평가하여 굴뚝구조물의 적정높이 등을 산정하는 것이다. 이런 환경관련 난류확산 문제를 다루기 위한 풍동이 1969년 완공되었다. 공장굴뚝의 오염문제 뿐만 아니라차량으로 배출되는 가스의 이동, 병원 등의 유해가스배출, 실내환기, 스노우 드리프트(snow drift) 등 다양한 건축 및 도시환경문제를 다룬다. 태풍 및 토네이도 등의 실질적인 풍해는 대부분 지층구조물에 집중되어 있다. 이들 구조물에 대한 풍환경 및 내풍설계를 위한 기술을 습득하기 위한 기초연구가 80년대말부터 10년간 활발히 진행되었다. 미국과학재단의 지원을 받아 Texas Tech University(TTU)와 공동으로 추진한 이 프로젝트는 세계 풍공학자들의 이목을 받았다. CSU는 대기경계층 유동관련 풍동실험을 맡아서 했고 TTU는 실측모형을 지어서 실측데이터를 분석하는 역할을 하였다. 지층건물 주위의 유동, 표면압력특성 규명, 난류유동특성과 표면압력과의 상관관계 등을 규명하는 것이 주요 연구내용이었다. 당시 실측데이터가 없는 상황이었어서 일본, 호주, 캐나다 등 세계 각국의 풍공학자들에게는 지층건물에 대한 벤치 마킹 역할을 하였다.

3. 근래의 주요연구 및 영역

과거의 WEF(구 FDDL)의 주요연구 및 영역과제는 풍공학에 대한 기초연구와 응용연구의 절충이었다. 대부분이 대형경계층 풍동을 이용하거나 때론 필요에 따라 특정목적의 풍동을 설계하여 이용하는 풍동실험이 주를 이루었다. 그러나 차츰 이런 풍동실험과 더불어 수치해석 및 이론적 해석을 병행하고 있다. 최근에는 지층건물의 풍영향에 대한 모델링, 와류와 건물의 지붕에 작용하는 풍하중에 대한 연구, 지붕구조의 공기역학적 최적화, 난류경계층의 구조, 구조물의 동적응답에 대한 능동제어, 바람과 풍영향에 대한 이론적 해석법 개발, 풍동실험자료를 이용한 수치시뮬레이션 등 기초연구를 수행해 오고 있다.



사진 3 MWT안에 설치된 저층건물모형

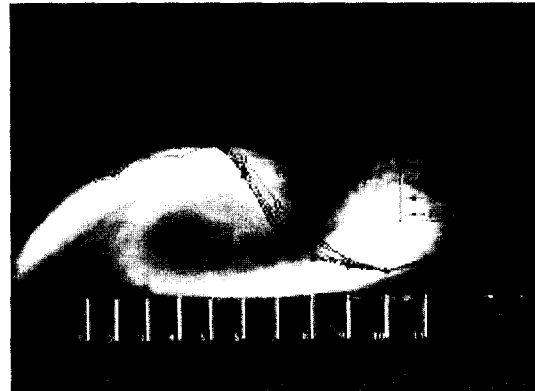


사진 4 건물지붕위위의 와류 가시화

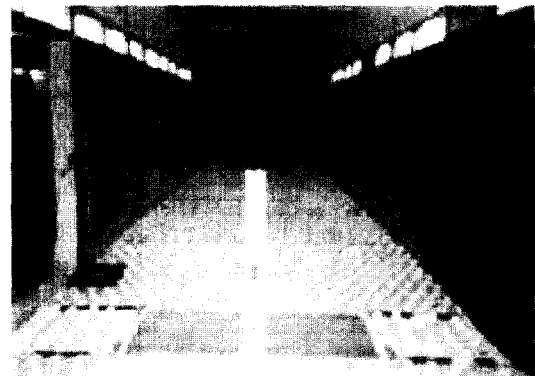


사진 5 고층건물의 풍진동 능동제어

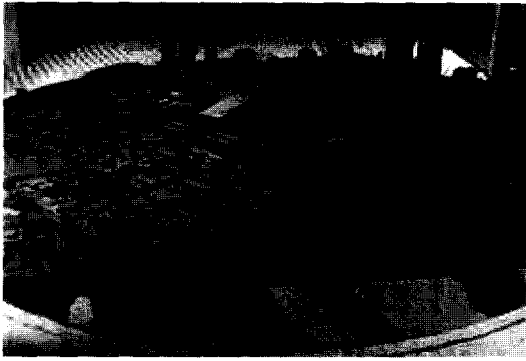


사진 6 건물 및 구조물의 풍영향조사

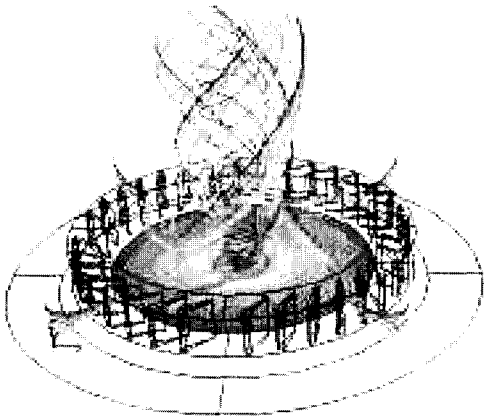


사진 7 토네이도 수치시물레이션



사진 8 토네이도 시물레이션

주로 용역과제의 주제는 건물 및 구조물의 풍영향, 보행자 공간의 풍환경 증진, 건물 및 구조물의 공력탄성모델링, 복잡한 지형에서의 기류매핑, 풍차, 스노우 드리프트 모델링 및 제어, 제레식 및

원자력발전소로부터 나오는 오염조사, 도시환기시스템 모델링 등이 있다.

4. 실험 및 계측장비

WEFL은 1949년 첫 경계층풍동이 만들어진 후 수정, 보완, 설계를 거듭하면서 1970년경 지금과 같은 랩의 형태(그림 1)를 갖추게 되었다. 총 10여개의 풍동을 소유하고 있으나 주요 터널은 Meteorological Wind Tunnel(MWT), Environmental Wind Tunnel(EWT), Industrial Aerodynamics Wind Tunnel(IWT) 이라고 할 수 있다. 각 풍동의 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다.

MWT는 26.8미터나 되는 긴 측정부로 되어 있고, 대기의 온도 성층화를 재현할 수 있도록 풍동 내부 및 측정부 바닥(1.3 미터 구간)을 냉각, 가열하여 온도와 습도를 조절할 수 있도록 만들어 졌다. 그림 2에서 보는 바와 마찬가지로 때론 개회로식 때론 폐회로식으로 사용할 수 있도록 설계되었다. 개회로식은 측정부 끝단을 외부통로와 연결하고 송풍기입구를 다른 외부통로와 연결하여 개회로가 되게 만든 것으로 주로 snow drift, wind erosion 실험 등 미립자를 날려 보내기 위해 사용된다. 성능에 대한 특성은 표 1에 나타내었다.

EWT는 개회로 흡입식으로 측정부의 단면이 높이 2.13-2.74 미터(유동방향 압력구배를 위해 천정을 조절 할 수 있음) 폭 3.7 미터로 비교적 큰 규모의 도시지역모형 혹은 지형모형에 대한 유동관찰이나 오염원의 대기확산연구에 주로 사용된다. 이 풍동은 나중에 건설된 미국 EPA(Environmental Protection Agency), CPP Corp. 등이 갖고 있는 환경풍동의 설계에 영향을 주었다.

IWT는 FDDL의 풍동 발전의 역사와 함께하고 있는것으로 현재 범용 공기역학 연구용으로 사용된다. 측정부 입구측 바닥면(3미터)을 십씨 90도까지 가열할 수 있도록 설계되어 있다. 이밖에도 2차원 단면모형의 풍동실험을 위한 Gust Wind Tunnel, 공기와 해수면 사이의 물질전달 등의 상호작용을 연구하기 위한 Wind Tunnel-Water Flume Facility 등이 있고, 특수목적풍동으로 Thermal Stratification Wind Tunnel, Transpiration Wind Tunnel, Separation

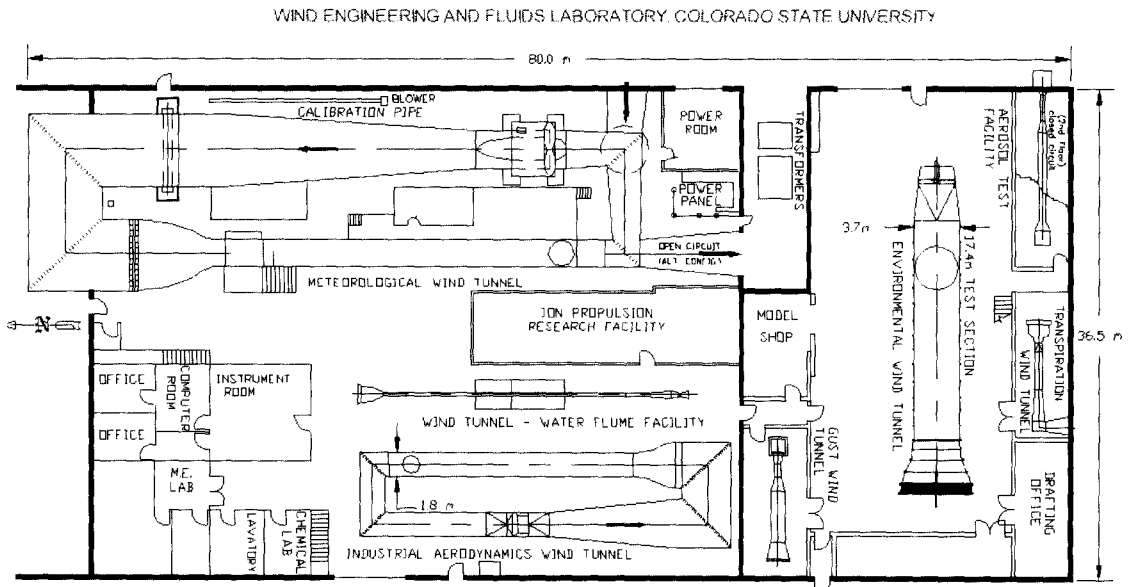


그림 1 WEFL의 풍동배치도

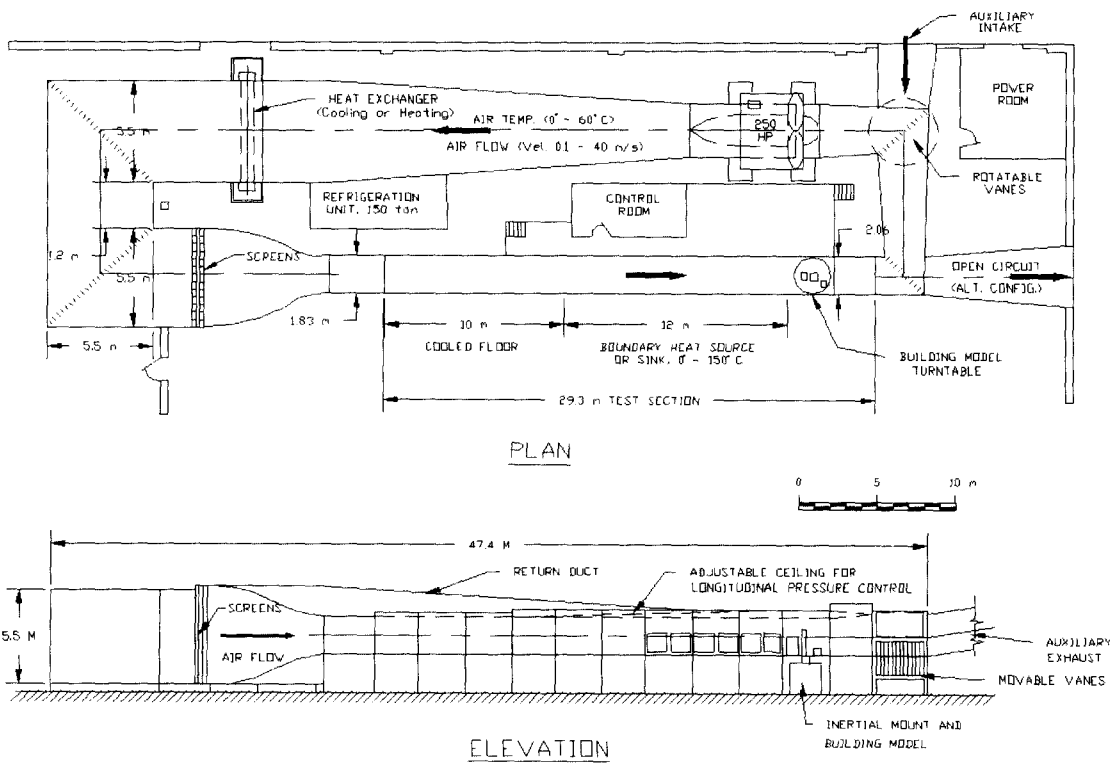


그림 2 Meteorological Wind Tunnel

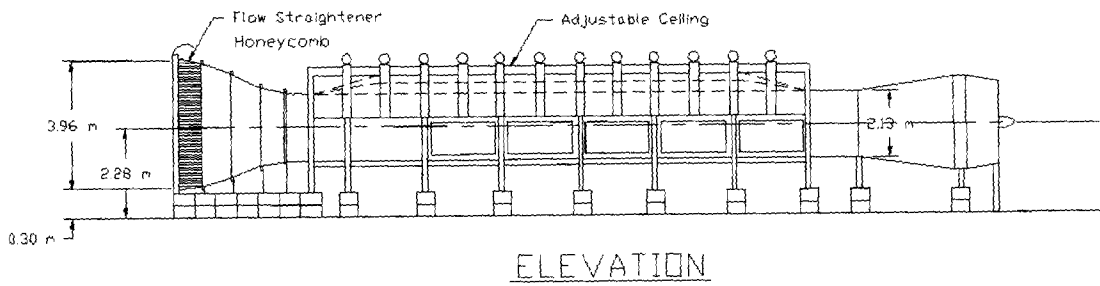
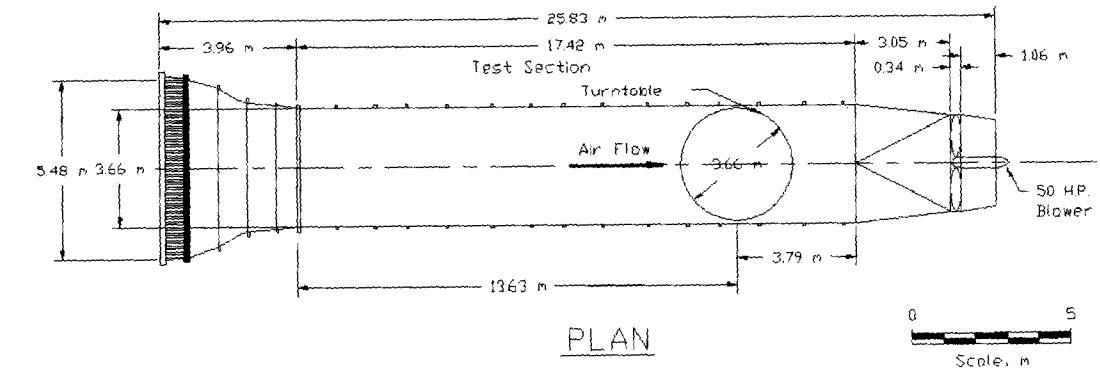


그림 3 Environmental Wind Tunnel

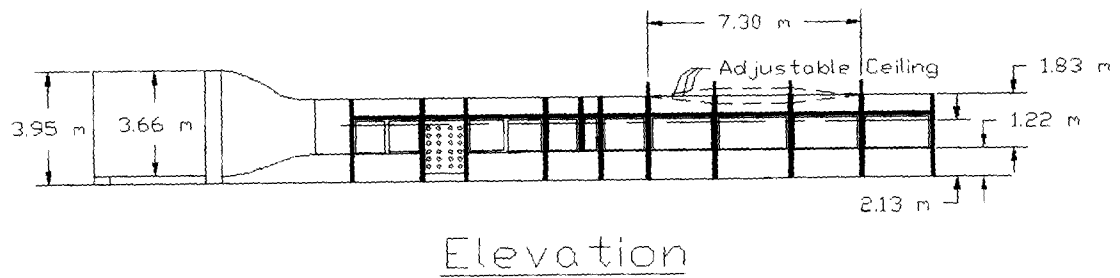
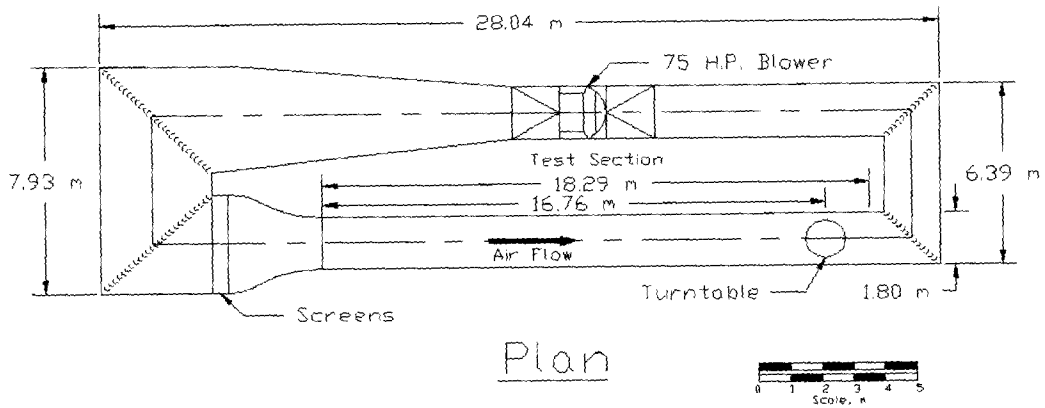


그림 4 Industrial Aerodynamics Wind Tunnel

표 1 WEFL의 풍동사양

특성	MWT	EWT	IWT
측정부 길이	26.8m	18.3m	18.3m
측정부 단면적	1.83m×1.83m	3.66m×2.44m	1.83m×1.83m
축류 비율	9 : 1	3.35 : 1	4 : 1
동력	400HP	50HP	75HP
바닥면 온도조절	12.2m(가열) 21.3m(냉각)	조절안됨	섭씨 90°
주변온도	섭씨 4°~90°	조절안됨	조절안됨
평균풍속	0.6m/sec~37m/sec	0.3~12m/sec	0~25m/sec
경계층 높이	1.22m	1.37 m	1.22m
난류강도	0.1%	1.0%	0.5%
상대습도	20% ~ 80%	조절안됨	조절안됨

Wind Tunnel, Aerosol Test Facility with Remote Sensing Laser Powered Particle Spectrometer 등이 있다.

계측장비는 WEFL의 역사와 규모를 보듯 1950년대 부터 사용해 온 열선을 포함하여 수십대의 열선유속계가 있다. 유체역학실험에 필요한 기본적인 유속과 압력을 재는 계측장비와 조명, 촬영장치, 자체설계된 3축 및 5축 천평(Force balance)등을 비롯하여 각종 진동계측장비 등을 구비하고 있다. 최근에 보완된 장비로는 Laser, Image Processing 장비 등이 있고, 모든 계측장비의 데이터처리가 National Instruments사의 LabView 을 이용하여 자동화가 완료되었다.

5. 맺음말

필자는 이 지면을 통해서 풍공학의 본산인 CSU의 WEFL을 소개하였다. 풍공학은 유체역학 뿐만 아니라 구조진동, 기상학, 통계학 등 복합적인 지식이 요구되는 응용학문이다. WEFL이 이와 같이 세계적인 명성을 얻을 수 있었던 것은 응용과제와 더불어 기초연구에 심혈을 기울였기 때문이다. Cermak

교수가 후배들에게 남긴 메세지에서 그 같은 사실을 엿볼 수 있다. "My philosophy has always been that one must have a very basic background in physics and mathematics, and then you can proceed to applications".

우리나라에서도 1997년에 풍공학회가 발족되어 활발히 연구가 진행되고 있다. 한가지 안타까운 점은 응용과제는 많이 하고 있으나 기초연구에는 아직 몰두하지 못하고 있다. 그 이유 중의 하나는 연구인력보다도 연구과제를 수행하기 위한 연구비 때문인 것으로 사료된다. 앞으로 우리나라도 풍공학의 선진국이 되기 위해서는 국가나 기관이 많은 관심을 가지고 지원을 아끼지 말아야 할 것 같다. 이 글이 풍공학에 관심이 있는 분들께 작게나마 도움이 되었으면 하는 마음으로 글을 맺는다.

감사의 글

본 기사는 콜로라도 주립대의 Cermak 교수, Meroney 교수, Bienkiewicz 교수가 보내준 자료를 바탕으로 씌여졌으며 그 분들께 감사의 마음을 전하는 바이다. 