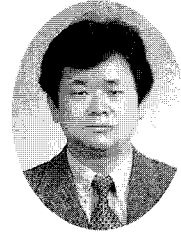


## 전북대학교 경계층풍동실험실 소개

- Boundary Layer Wind-Tunnel Lab. of Chonbuk National Univ. -



김영문\*

Kim, Young-Moon

본인이 재직하고 있는 전북대학교 건축공학과에 있는 경계층 풍동실험실 소개 기사를 어떻게 쓰는 것이 좋은지 지난 몇일간 생각해 보았다. 그런데 아직도 구조물에 대한 풍동실험이 왜 필요한 것인지 잘 모르는 혹은 관심이 없는 분들도 계신 것 같다는 생각이 들어서, 우선 풍동실험이란 무엇인가에 대해서 간단히 언급한 후에 본인의 풍동실험실을 소개하고자 한다.

최근에 이르러 국내에서도 60층 이상이 되는 초고층 주상복합 건물이나 아파트 그리고 장스팬 지붕을 갖는 대경간 구조물, 평면형태가 복잡한 고층건물, 장대 교량등이 많이 건설되면서 풍하중의 영향을 강하게 받는 이러한 구조물들의 내풍안전성을 고려한 합리적인 내풍설계(wind-resistant design)에 대한 관심이 높아지고 있다.

이와같이 풍하중에 대해 민감하게 반응하는 구조물에 대한 안전한 내풍설계를 위해서는, 예비설계단계(preliminary design stage)에서부터 이러한 구조물에 작용하는 풍하중의 특성과 구조물의 응답(거동)을 사전에 추정해서 충분히 설계에 반영해서 안전한 내풍설계가 이루어지도록 해야 한다.

그런데 풍하중을 구성하는 바람의 흐름 그 자체는 난류(turbulence)성분을 갖고 있어 시간과 공간에 따라서 불규칙적으로 변동하는 동적인 특성이 있

는데다, 작용하는 구조물의 형상(shape)과 구조물 주위의 지표면 상태에 따라 서도 역시 크게 영향을 받아 변하기 때문에 이론적으로 추정하기는 사실상 불가능하며, 이러한 풍하중에 의한 구조물의 거동 역시 이론적으로 추정하기는 현 단계에서는 거의 불가능한 일로 알려져 있다.

최근에는 컴퓨터 기술의 발전과 전산유체역학(computational fluid dynamics) 분야의 학문적 발달로 수치유체계산으로 한정된 범위내에서 풍하중과 그에 따른 구조물의 응답을 예측해보려고하는 연구도 많이 진행되고 있으나, 위에서 언급한 바와 같이 풍하중자체가 갖고 있는 난류적인 특성과 주변의 영향으로 변동하는 성질이 있기 때문에 현재까지도 내풍설계에 충분히 활용되고 있지는 못한 실정이다.

그러므로 풍동실험으로부터, 구조물의 형상이나 주변의 지표면의 상태등 이론적으로 접근하기 곤란한 여러 조건을 고려한 풍하중을 풍동내에서 재현발생시킨후 이용한 구조물의 응답(거동)을 하게되면, 보다 더 안전한 내풍설계를 할 수 있게 된다.

따라서 풍동실험에 근거해서 합리적으로 내풍설계를 하게된다면, 내풍설계의 신뢰도를 높여 보다 더 안전한 설계를 하게 될 것이며, 경우에 따라서는 과도한 설계를 사전에 방지하게 됨에따라 보다 더 경제적인 설계를 할 수도 있게 된다.

\* 전북대학교 공과대학 건축도시공학부 교수

이와같은 풍동실험은 목적에 따라 여러 종류로 나누어지는데, 구조골조 설계를 위해 구조물 전체에 작용하는 풍하중을 구하고 이를 이용해 응답변위와 가속도등을 추정할 수 있는 풍력실험(high-frequency force-balance test), 외장재 설계를 위한 국부풍압(local pressure)을 추정하기 위한 풍압실험(pressure test), 구조물의 진동변위등을 직접 구할 수 있는 공력진동실험(aeroelastic model test), 보행자등의 편의(pedestrian comfort)를 위해 건설 전후의 부지내 외 주변의 풍속 변동의 변화를 알아보는 풍환경실험(wind-environmental test) 등이있으며 이들을 간단히 소개하면 다음과 같다.

- ▶ 풍압실험(pressure test) : 아크릴과 같은 강성이 강한 재질로 제작된 풍압측정용 모델에 작용하는 풍압력을 측정하는 실험이다. 측정된 풍압력은 평균풍압계수, 변동풍압계수, 최대순간풍압계수, 최소순간풍압계수로 평가되며, 주로 외장재 설계용 풍압력을 산정하는데 이용한다.
- ▶ 풍력실험(High-Frequency Force-Balance test) : 가볍고 강성이 강한 풍력 측정용 모델을 제작하여 구조물 전체에 작용하는 풍하중의 평가를 위해서 실시한다. 평균풍속방향, 횡방향과 비틀림방향의 평균공력계수와 변동공력계수를 측정하여 구조골조용 설계용 풍하중을 구하며, 구조물의 동적특성 데이터를 이용해서 진동변위나 가속도응답을 구하기도 한다.
- ▶ 공력진동실험(Aeroelastic test): 상사법칙에 따라 실측대상구조물의 질량, 고유진동수, 감쇠율등의 동적특성(dynamic property)을 모형화한 공력탄성 모델(aeroelastic model)을 이용해, 구조물의 진동응답을 구하는 실험이다. 이 실험에서는 평균류방향방향, 횡방향, 그리고 비틀림방향의 진동변위와 가속도응답을 구하게 되며 주로 초고층건축물, 장스팬 건축물등을 대상으로 해서 실시한다.
- ▶ 풍환경실험(wind environment test) : 고층 건축물, 혹은 대규모 건축물의 건설전·후의 바람의

상황변화에 따른 영향을 무시할 수 없는 경우가 많고, 건설에 따른 문제나 장애의 발생을 미연에 방지하기 위해서 풍환경의 변화를 예측하기 위해서 실시한다.

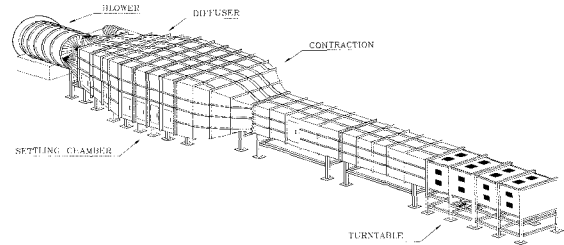
이상에 언급한 바와같이, 고층건물의 내풍설계에 있어서 절대적으로 필요한 경계층 풍동실험 장치(boundary layer wind tunnel)를 갖춘 풍동실험실은 1997년 말에 이르러서야 학교내에 갖추어질 수 있었다. 그 이전에는 변동 풍하중을 주로 수치적으로 시뮬레이션(simulation)해서 고층건물의 동적특성을 이용해서 응답해석을 구하는 이론적인 연구에 치중하면서, 경계층 풍동장치 제작에 필요한 준비를 해왔다. 1992년에는 미국의 노트르담 대학(University of Notre Dame)의 A. Kareem 교수의 경계층 풍동실험실로 한국과학재단의 지원을 받아 고층건물의 공력탄성모델을 이용한 진동응답에 관한 실험연구를 위해 visiting scholar 자격으로 방문연구를 하게 되었다. 1년간 A.Kareem 교수와의 공동연구는 처음 6개월간은 다변수 시뮬레이션 방법을 이용한 변동 풍하중에 의한 수치적 해석방법과 이를 이용한 피로(fatigue)관계 연구와 비선형 변동 풍압 특성에 대해서 연구하였으며, 나머지 6개월은 노트르담대학내 Hessert center로 새롭게 이전하면서 마련된 대형 경계층 풍동실험장치의 경계층 형성과 공력실험을 위한 준비를 병행하였다. 그런데 6개월이란 짧은 시간내에 두 연구를 다한다는 것이 거의 불가능함을 알수 있었고, 경계층 형성에 관한 실험연구를 하는데만 6개월이 걸렸다. 어쩔수 없이 공력진동실험은 다음 기회로 미루고 귀국해야했다. 그후 국내에서 고려대학교에 기계, 토목·건축공학과에서 공동으로 폐쇄식 풍동실험실이 만들어졌다는 소식을 접하게 되었다. 그런데 고려대학교 풍동실험실의 풍동장치는 실험부의 크기가 매우적어(폭: 1.0m 높이: 0.8m 길이: 3.0m) 고층건물의 모델을 이용한 경계층 풍동실험을 하기에는 부족하였으며, 실험장비 역시 매우 부족한 실정이었다. 일단 경계층을 잘 만든 후 변동 풍속성분을 측정해서 이를 이용한 기존의 가정을 이용해서 변동 풍압과 풍하중을 추정해서 시뮬레이션한 후, 이러한 변동 풍하중을 이용해서 고

층건물의 평균류 방향(alongwind direction)의 진동 응답을 구해보았는데, 실험 및 시뮬레이션 응답해석 결과가 매우 좋아, 1997년 이태리 제노바에서 열린 Proceedings of the 2nd Eurocopeam & African Conference on Wind Engineering June 22~26에 "Dynamic alongwind response of a tall building"란 제목의 논문을 제출해서 발표도 하였다. 이때 논문으로서 발표할것인가를 놓고 망설이기도 많이 하였다. 논문의 주제와 내용이 새로운 것이 아닌데다 경계층 풍동장치 역시 부족한 것이 많았기에 부담을 느꼈으나, 우리나라의 건축분야(건축물을 대상으로 한)의 풍동실험관련 연구수준이나 현황으로 볼때는 거의 초기 수준이었기에 우리나라의 현황도 소개할 겸해서 발표하기로 결정을 하고 이태리로 출발하였다. 그런데, 사실 1997년 이전인 1995년부터 1996년 사이에 2년간에 걸쳐 매년 여름방학 기간중에 현재는 경도대학으로 자리를 옮기셨지만 일본 동경전기대학의 H. Kawai 교수의 풍동실험실을 visiting professor로 방문 연구할 기회가 주어져, 본인 연구실의 대학원생인 유기표, 황규석군과 같이, 공력탄성모델을 이용한 초고층 건물의 진동 실험 관련 연구를 수행한 경험이 있었기에, 나름대로 고층건물의 경계층 풍동 실험에 관해서는 어느정도 알고 있기는 하였다.

제노바의 2회 유럽-아프리카 프로시딩에 참석하면서 이 프로시딩을 주관한 Solari 교수를 만날 수 있었는데, Solari 교수는 Eurocode의 풍하중 기준 위원회의 위원장으로 예전에 본인이 Solari 교수께서 요청한 Eurocode 관련 자료를 잘 받은 적이 있었기에 감사함을 직접 전하였고, 무엇보다도, A. Kareem 교수를 다시 만나서, 한국에서 풍공학회 설립이 추진중이며, 현 풍공학회 회장이신 최창근 교수께서 풍공학 관련 영문 저널 준비 중에 관한 소식을 전할 수 있었다. 후에 A. Kareem 교수는 국내에서 발간되는 영문저널 'Wind & Structure : An international journal'의 편집 위원으로 최창근 교수 그리고 Solari 교수와 함께 활동하고 있다.

이렇게 1997년을 지내면서 전북대학교내에 본인의 풍동실험실을 100평 규모의 별도의 건물로 갖추게 되었다. 풍동실험실에는 <그림 1>과 같은 대형 경계층 풍동이 설치되었으며, 그 제원은 <표 1>에, 그

리고 풍동실험실에서 갖추고 있는 실험장비는 <표 2>에 나타나 있다.



<그림 1> 경계층 풍동

<표 1> 경계층 풍동의 제원

형 태	OPEN TYPE
측 정 부	B(폭) 1.5m × H(높이) 1.2m × L(길이) 12m
풍 동 전체길이	24m
풍 속	0.3 ~ 20.0 m/sec
난류강도	Less than 0.5%
풍속편차	± 1% 이하

<표 2> 풍동실험 장비

계측기기명	형식
열선풍속계	IHW-100
다점풍압계	Scanivalve
6 분력계	Kyowa
3 분력계	Nissho
다점풍속계	KNOMAX, SYSTEM 6242
gimbal system	X, Y, θ방향
Amplifier	TEAC SA-100D
Micro Manometer	DP-20A-OKANO
Low-pass filter	NEC
A/D 변환기 (A/D convertor)	AT-MIO-16XE-50-NI DAS-1800DA

풍동실험실이 만들어면서 연구의 방향을 기본적인 형태의 고층건축물에 대한 풍력, 풍압 및 진동 실험을 중심으로 하는 것으로 정한후 오늘날까지 꾸준히 연구 해 오고 있다. 풍동실험의 경우, 근본적으로

불규칙한 난류의 변동 풍속성분은 항시 존재하기 때문에 기본 형상에 대한 철저한 이해없이 는 발전적인 연구 진행이 어렵다고 판단했기 때문이다.

그리고 풍동실험에 필요한 모델을 제작하는데 있어서도 풍력실험용이나 풍압실험용 그리고 진동실험용 공력탄성모델이 각기 서로 다른 특성을 갖는 서로 다른 모델이기 때문에 각 실험에 따른 모델 제작 문제도 현실적으로 부딪히게 되었다. 초기에는 서울에 있는 소위 유명하다는 모델 제작 회사에 적지 않은 비용을 지불하고 제작해 왔으나, 주문 제작한 모델의 경우 모델 제작 회사에서 모델에 대한 동적특성 테스트를 해주지 않기 때문에 다시 실험실에서 동적특성을 테스트한 후 실험에 사용하게 되는데, 모델의 동적 특성값이 기준치에서 도달하지 못할 경우는 문제가 발생하게 된다. 그리고 이곳전주에서 서울로 의뢰할 경우 모델제작 기간을 맞춰주지 않아 힘들었던 경험도 있고 해서, 요즘에는 우리 실험실에서 직접 모델을 제작해서 동적특성을 테스트한 후 사용하고 있으며, 최근에는 공력탄성모형으로 변단면 고층건물모델을 직접 제작해서 동적특성을 테스트한 후에 공력진동실험관한 연구를 하고 있는 실정이다.

이렇게 풍동실험을 중심으로한 고층건물 내풍설계 관련 기초적인 연구를 중심으로 해오면서 그동안 석사 14명 박사를 1명을 배출하였으며 박사과정에서 학위논문을 준비중인 4명의 대학원생과 함께 연구하고 있는 실정이다. 그동안 발표한 연구 논문은 대략 60여편 이며 최근에 발표한 연구 논문을 중심으로 한 연구실적을 언급하면 다음과 같다.

▶ 연구 실적

- 1) Dynamic responses of a tapered tall building to wind loads : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1771~1782, 2002
- 2) Probability in Dynamic Responses of a Tall Buildings to Fluctuating Wind Loads : the 2nd International Symposium on Advances in Wind & Structure 323~332, Busan, Korea, 2002. 8

- 3) Acrosswind Pressure Distribution on a Rectangular Tall Building : the 2nd International Symposium on Advances in Wind & Structure 333~342, Busan, Korea, 2002.8
- 4) Acceleration Responses of Acrovista to Wind Loads : the 2nd International Symposium on Advances in Wind & Structure 377~384, Busan, Korea, 2002. 8
- 5) Application of EPG Model to Simulation of Pressure Fluctuations on a Square Building : the 2nd International Symposium on Advances in Wind & Structure 471~478, Busan, Korea, 2002. 8
- 6) Dynamic Respnamiconse of a Tapered Tall Building to Wind Loads : the Fifth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, 2001. 10
- 7) 조도 구분에 따른 풍하중을 받는 변단면 고층 건물의 동적응답 : 대한건축학회 학술발표 논문집 2001. 10
- 8) 풍하중에 의한 정방향 고층건물의 상호작용 효과 : 대한건축학회 학술발표 논문집 2001. 10
- 9) 풍하중에 의한 종횡비가 다른 고층건물의 상호 작용효과 : 대한건축학회 학술발표 논문집 2001. 10
- 10) EPG모델을 이용한 횡방향 변동풍압 시뮬레이션 : 한국풍공학회논문집 5권 제1호 2001. 6
- 11) 변장비 변화에 따른 고층건물의 응답특성 : 한국풍공학회 학술발표회논문집, 2001. 6, 통권 제4호
- 12) 난류강도 변화에 따른 변단면 고층건물의 응답 특성 : 한국풍공학회 학술발표회논문집, 2001. 6, 통권 제4호
- 13) 정방향고층건물에서횡방향 변동풍압의 시뮬레이션 : 한국풍공학회 학술발표회논문집, 2001. 6, 통권 제4호.
- 14) 건물모서리 변화에 대한 고층건물의 응답특성 : 한국풍공학회 학술 발표회 논문집, 2001. 6, 통권 제4호.

- 15) 변동풍하중에 의한 변단면 고층건물의 동적 응답 : 대한건축학회 학술발표 논문집 2001. 4
- 16) 변장비 변환에 따른 초고층 건물의 휨·비틀림 진동응답 : 한국풍공학회 논문집. 2000. 12
- 17) Pressure Fluctuations on Tall Building in Turbulent Flow : Sixth Asian Pacific Conference on Shell and Spatial Structures, Seoul, Korea, 16-18 October, 2000. p.921~928.
- 18) 장방형 고층건물의 변동풍압분포 특성 : 대한건축학회 학술발표논문집 2000. 4
- 19) 고층건물에 작용하는 변동풍하중의 특성 : 한국풍공학회논문집 제4권, 제1호,2000.
- 20) 정방형 단면의 고층건물에 작용하는 변동풍압 특성 : 한국풍공학회논문집 제4권, 제1호, 2000.
- 21) 고층건물에 작용하는 변동풍압의 상호상관 : 한국풍공학회 학술발표회논문집, 2000. 6, 통권 제3호.
- 22) 변동풍하중에 의한 변단면고층건물의 응답특성 : 한국풍공학회 학술발표회논문집 2000. 6, 통권 제3호.
- 23) 변장비에 따른 고층건물의 변동풍압분포 특성 : 한국풍공학회 학술발표회논문집, 2000. 6, 통권 제3호
- 24) T.P.D.에 작용하는 풍하중에 대한 동적가속도 응답 : 한국풍공학회 학술발표회 논문집, 2000. 6, 통권 제3호.
- 25) Pressure Fluctuations on a Tall Building of Square Cross-Section : First International Symposium on Wind and Structures for the 21st Century, Cheju, Korea, 2000. 1. 26 ~ 1. 28
- 26) Dynamic Acceleration Response for T.P.D. to Wind Loads : First International Symposium on Wind and Structures for the 21st Century, Cheju,Korea, 2000. 1. 26 ~ 1. 28
- 27) Aerodynamic Methods for Reducing Bending and Torsional Vibrations of Tall Building : 10th ICWE (International Conference of Wind Enigneering) Demmork. 1999. 6

▶ 저서 및 역서

- 1) 실무자를 위한 건축물 풍동실험 가이드 북 : 김영문 역. 한국풍공학회발행. 1998.
- 2) 건축물의 내풍설계 : 김영문, 정영배, 윤성원 역. 한림원 발행. 2001.
- 3) 건축 구조물의 내풍설계 : 김영문, 황재승 저. 한국전산구조공학회 발행. 1998.

▶ 연구 보고서

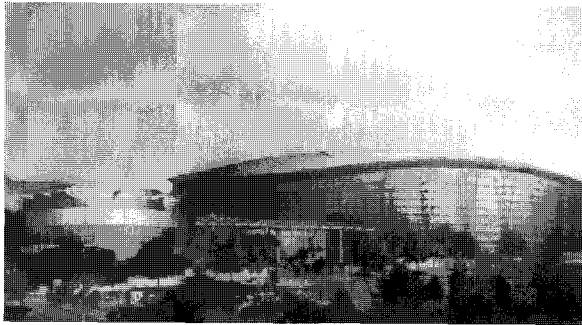
- 1) 풍하중을 받는 고층건물의 횡방향 진동응답 - 연구기간 : 1997. 8 ~ 1999. 7 (한국학술진흥재단)
- 2) Vortex에 의한 철골조 고층건물의 진동응답 - 연구기간 : 1997. 6 ~ 1998. 5((주) 포항제철)
- 3) 변동 풍하중을 받는 철골조 초고층 건물의 동적 응답 해석 - 연구기간 : 1995. 6 ~ 1996. 5 (주) 포항제철)
- 4) 철골조 초고층 건물의 풍하중에 의한 공역학적 진동응답감소방법에 관한 연구 - 연구기간 : 1996. 6 ~ 1997. 5((주) 포항제철)
- 5) 경계층 풍동실험에 의한 고층건물의 진동응답에 관한 연구 - 연구기간 : 1996. 7 ~ 1997. 6(산학협동재단)
- 6) 변동 풍하중에 의한 고층건물의 동적 응답에 관한 연구 - 연구기간 : 1995. 7 ~ 1996. 6(한국학술진흥재단)

▶ 학술 강연

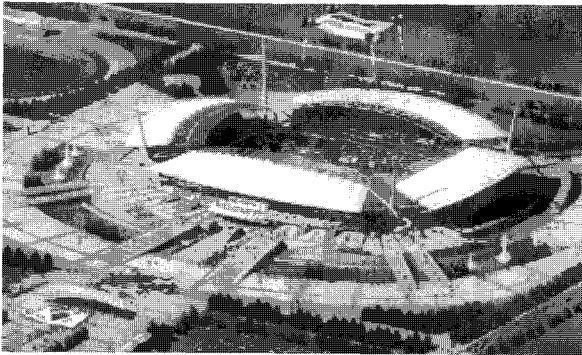
- 1) 제 18회 한국전산구조공학회 기술강습
  - 제 목 : “건축구조물의 내풍설계”
  - 시 간 : 1998. 8.19 ~8.21
  - 장 소 : 한양대학교 박물관 대강당
- 2) 2000 산학공동 국제세미나 "고층건물의 설계와 차세대 요소기술"
  - 제 목 : “고층건물의 내풍설계 및 적용사례”
  - 시 간 : 2000. 5. 26
  - 장 소 : 교육문화회관

▶ 연구 영역

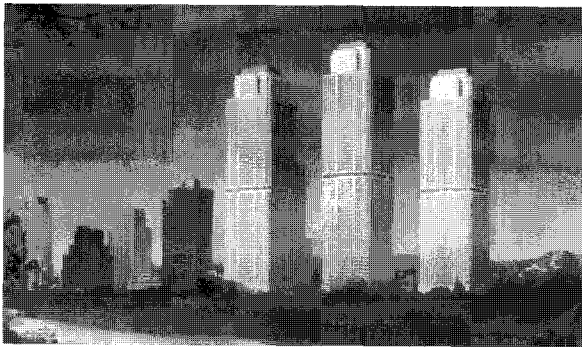
1) 안양 스포츠 센타 : 1997. 1



2) 전주월드컵 경기장 : 1999. 5



3) 도곡동 삼성주상복합빌딩(타워펠리스 I) : 1999. 6



4) 서초동 아크로비스타 : 2001. 4



5) 분당 파크뷰 : 2001. 5



6) 여의도 리첸시아 : 2001. 6



7) 목동 917 오피스텔 : 2001. 6



8) 부산 비치베르빌 아파트 : 2002.12(수행중)

이들 과제중 전주 월드컵 경기장의 경우는 전주에 세워지는 조형미가 뛰어난 경기장이기에 더욱 애착이 갖는데, 설계자측에 협조를 구하면서 지붕면의 내풍성능이 좀더 뛰어나도록 원래는 평평했던 지붕면의 형상을 굴곡된 형태로 변경 조정해줄 것을 요구해서 굴곡을 갖는 현재의 지붕면 형태가 되었다. 이러한 지붕면의 형태변경에 따른 시공상의 어려움과 초과 공사비 증가문제가 발생했음에도 불구하고 설계변경과 더불어 이에 따른 모든 문제를 흔쾌히 해결해준 전주 월드컵 경기장 담당자 모두에게 고마

움을 잊지 못하고 있다. 또 다른 과제로서 삼성물산이 건설한 도곡동 타워팰리스1의 경우는 예비설계 단계에서부터 풍동실험을 실시해서 풍동실험결과를 구조설계에 내풍설계가 이루어지게 반영한 합리적으로 프로젝트로 생각된다. 66층 1개동과 59층 2개동 그리고 42층 1개동으로 이루어진 초고층 주상복합 건물로서 풍동 실험 당시만 해도 국내에선 제일 높은 건물이라는 사실로 부터도 풍동실험에 임할 때 나름대로 자부심도 있었다. 풍동실험의 전 과정은 Arup에 의해 리뷰를 받도록 되어서, Arup의 Dr. Gibbon과 wind engineer 인 Andrw Allsop을 홍콩과 서울에서 자주 만나면서 풍동실험결과에 대한 충분한 검토를 해나감으로서 풍동실험을 무사히 마칠 수 있었다. 그리고 풍동실험결과에 따라서 최종 구조협약에서는 최상층 outrigger를 제거하게 되어 경제적으로도 풍동실험이 큰 도움이 되었다는 사실을 확인할 수도 있었다.

이상과 같이 아직도 모든 것이 부족한 상태이지만, 연구실원 모두가 노력한 결과, 내풍공학분야에선 유일한 SCI급 논문인 "Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics" 2002년 12월호에 우리 손으로 직접 설계하고 제작한 테이퍼가 있는 풍력모델을 이용한 풍동실험에 근거한 논문인 "Dynamic responses of a tapered tall building to wind loads"가 게재되기도 했다.

지금까지 전북대학교 풍동실험실을 소개하면서, 그 동안 풍동실험실을 위해 많은 성원을 해주신 많은 분들께 감사를 드리며, 특히 지금은 은퇴하신 본인의 지도교수님이신 고려대학교 박병용 교수님과 미국 노트르담 대학의 A. Kareem 교수님, 일본 경도대학의 H. Kawai 교수님, 풍동실험실을 마련해준 전북대학교 당국과 그 동안 열심히 연구해온 연구실의 대학원생 모두에게 다시 한번 감사드립니다.