인천 신공항 관제탑의 사용성 검토

김 효 진*

1. 서 론

국내의 건축물은 점차 고층화 되어가면서 건축물을 기념비적인 형상으로 설계함에 따라 보다 상세한 구조설계가 요구되는 시점에 이르렀다. 이에 대응하기 위해 엔지니어들은 불확정 요소들의 정확한 평가를 위해 보다 많은 시간과 노력을 기울이고 있는 상황이다.

건축물의 높이가 증가함에 따라 지진에 대한 요소보다 풍하중은 외력의 요소로서 중요한 인자가 되고 있으며 부재의 내력설계보다 사용성을 위한 요소로서 풍동실험을 통하여 정확한 구조해석에 접근하고 있다.

풍하중의 특성은 불규칙적 현상과 건물의 형상에 따라 다양한 거동양상을 보여준다. 특히 본 건물과 같이 세장한 건물의 경우 거동현태에 따라 거주성과 매우 밀접한 관련성을 가지며, 바람이 건물에 작용시 지역, 주변환경, 건물의 형태등에 따라 다양한 결과를 도출한다.

따라서 본 건물의 세장비에 따른 바람의 영향을 고려하여 영종도 신공항 관제탑을 대상으로 하여 설계당시 국내규준에 따른 정적내풍성능과 풍동실험결과를 근거로 한 동적 내풍성능과의 비교검토분석을 통하여 그 설계상의 적정성여부 및 설계의 결과를 소개하고자 한다.

2. 건물 개요

건물의 개요를 간략하게 언급하면 표 1과 같다.

표 1 건물개요

규 모	지하1층 / 지상 22층	
	연면적 : 2,760.7m²	
건물높이	100.4m	
건물 폭	SHAFT	9.1m
	관제실	15.0m
구조형식	저층부	철골조
	Tower	하부 : R.C
		중간 : R.C
		상부 : SRC
		지붕층 : 철골조
세장비	1 : 11	

* (주)동양구조 대표이사, 건축구조 기술사

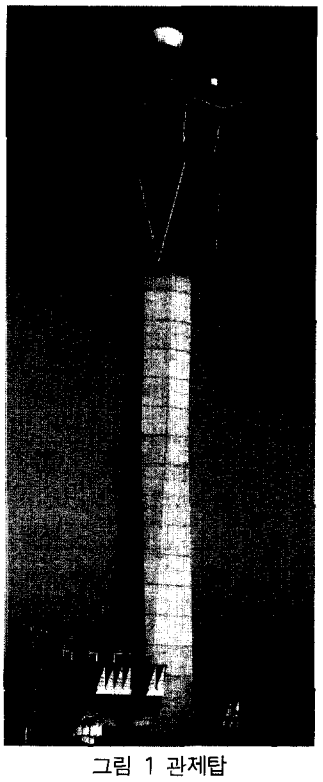


그림 1 관제탑

3. 내풍성능 평가

건물의 내풍성능평가는 건물의 안전성(safety), 안정성(stability), 사용성(servicebility)등이 검토대상이나 본 연구에서는 관제탑이라는 건물의 특이성에 근거하여 구조물의 거동에 중점을 둠으로써 사용성에 한하여 비교·분석하기로 한다.

3.1 풍하중 산정

설계기본풍속은 40(m/sec), 노풍도 C, 해안지역임을 고려하여 20%를 증가시킴으로서 해당높이별 경도풍에 따른 풍하중을 산정하면 표 2와 같다.

풍동실험과 풍하중 계산시 사용한 기본풍속은 30년동안 인천측후소에서 측정한 1961년-1990년까지의 풍속자료를 이용하여 누적확률분포함수를 작성하면 그림 2와 같으며, 각 재현기간(T_R)에 해당하는 풍속은 다음식으로 추정할 수 있다.

$$V = V + 0.78(\ln T_R - 0.577)s$$

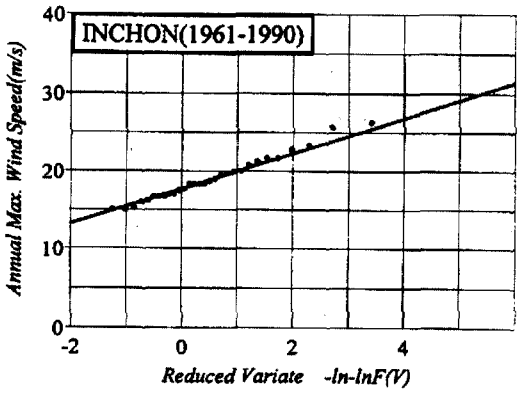


그림 2 30년간 측정한 최대풍속자료

표 2 해당높이별 경도풍에 따른 풍하중

높이(m)	C	q(kg/m²)	P(t)
106	1.4	296.3	9.5
101	1.4	292.1	13.1
94.4	1.4	286.8	62.2
89	1.4	281.8	9.5
79.2	1.4	272.5	92.7
0-69.8	1.2	F	143.8

* 본 연구에서 적용한 값은 2000년 6월 개정이전의 적용규준임.

설계풍속을 결정하기 위한 재현기간 100년에 해당하는 인천측후소 위치에서의 기본풍속은 28.2m/sec이다.

$$F = \int^{69.8} (1.25) \cdot (2.58) \cdot \left(\frac{z}{270}\right)^{\frac{2}{7}} \cdot \left(\frac{1}{16} V_0^2\right) \cdot (1.2) dz$$

3.2 풍동실험을 통한 동적 내풍성능 검토

본 관제탑의 동적내풍성능을 검토하기 위하여 일본의 시미즈사(Wind Tunnel Laboratory of Institute of Technology, Shimizu Corporation)에 의뢰하여 풍동실험을 수행하였다.

1차 풍동실험시 관제탑의 설계조건은 구조물의 높이 H=109.9(m), 폭 B=21(m), 직경 D=8.5(m)이며 풍동실험을 위한 모델의 설정값 중 고유 진동주기 T_1=2.04(sec), 감쇠비(Damping Ratio) h_1= 0.01이다.

표 3 1차 풍동실험 결과

건물높이	109.9 m			
폭	SHAFT	8.1m		
	관제실	17m		
고유주기	0.49Hz			
설계풍속	61.9m/sec			
노풍도	C			
사용성	기본풍속	재현주기 5년		21.2m/sec
	설계풍속	재현주기 5년		29.8m/sec
	가속도	without TLD	재현주기 5년	50cm/sec^2
		with TLD	재현주기 5년	30cm/sec^2
	ISO-6897	재현주기 5년		2.3cm/sec^2

1차 풍동실험시 사용된 설계풍속(U_H)은 인천지역의 100년 재현주기 풍속 28(m/s)에 대한 설계기본풍속(U_0)을 검토한 결과 38.0(m/s)로 나타났으며, 이는 변경전 규준의 40(m/sec)와 잘 일치하고 있어 이 값을 설계 기본풍속으로 하였다. 따라서 높이 H=109.9(m)에서의 설계풍속을 구하면 다음과 같다.

$$U_H = \sqrt{2.58} \times U_0 \times \left(\frac{H}{Z_G}\right)^{\alpha} \times \sqrt{1.2}$$

$$= \sqrt{2.58} \times 40 \times \left(\frac{109.9}{270}\right)^{\frac{1}{7}} \times \sqrt{1.2}$$

$$= 61.9(m/s)$$

1차 풍동실험의 결과는 표 3의 결과와 같이 ISO-6897에 제시된 기준치를 상당량 초과하고 있어 관제탑의 규모를 조정해야 하는 결과가 산출되었으며, 거주자의 거주성을 저해하는 요인으로 사용성을 충족시킬수 있는 대안이 필요하게 되었다.

3.3 공기력측정실험(Force balance test)

본 실험은 1/150의 축소모델을 사용하고, Force balance model의 경우 구조적 특성을 고려할 필요가 없고 원구조물의 외형만으로 발사로 제작된 모형을 이용하여 실험을 수행하였으며, 1차 및 2차 풍동실험에 따른 변위, 밑면전단력, 전도모멘트에 대한 실험결과는 표 4와 같다.

표 4 풍동실험 결과치 비교

구분		1차 실험	2차 실험	정적풍하중
건물높이	SHAFT	8.1m	9.0m	9.0m
	관제실	17.0m	15.0m	15.0m
변 위		25.6cm	7.91cm	12.4cm
밑면전단력		489t	350t	273.9t
전도모멘트		33,877t·m	22,588t·m	14,292t·m

위의 표 4에서 보면 동적풍하중은 정적 풍하중보다 20-30%정도 증가됨을 알 수 있다.

관제탑에 적용된 설계풍속과 고유진동수 등을 고려하여 Force balance test로부터 얻어지는 무차원 스펙트럼의 값을 X, Y 각 방향과 각도별로 조사한 후 이때 최대값이 발생하는 경우를 입력하중으로 사용하였다.

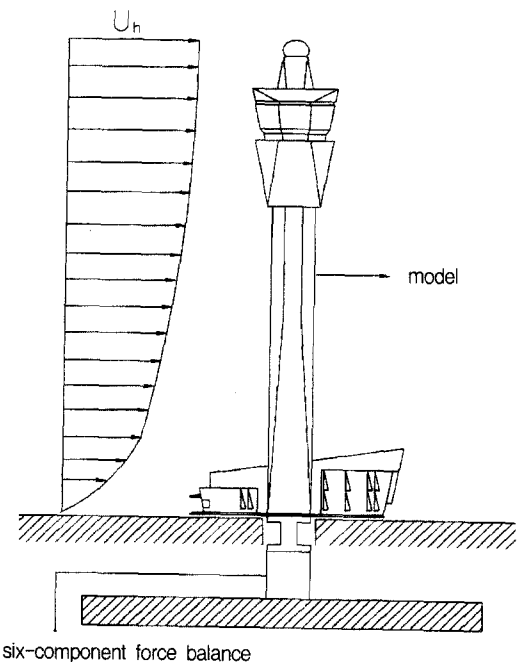


그림 3 Force balance test 모형

3.4 사용성 검토

3.4.1 사용성 검토를 위한 설계풍속 산정

5년 재현주기에 대한 인천지역에서 조사된 기본 풍속(지상 11m에서 측정)은 U_1=21.2(m/s)이며, 이에 따른 관제탑 최상층에서 풍속을 산정하면 아래와 같다.

$$U_1 = 21.2 \times \left(\frac{109.9}{10}\right)^{\frac{1}{7}} = 29.8(\mathrm{m/s})$$

위의 풍속을 이용하여 1차, 2차의 풍동실험을 통한 결과는 ISO-6897에서 제시한 값을 토대로 검토한 결과 사용성에 다소 문제가 있는 것으로 판단되며, 이에 따라 제진장치가 도입되어야 하는 것으로 판단된다.

4. 사용성을 위한 DAMPER의 설치 검토

4.1 관제탑의 동적특성

일본의 시미즈사에서 수행되었던 1차풍동실험에 의하면 진동정도가 매우 커서 업무에 지장을 초래할 가능성이 있는 것으로 지적되어 2차 풍동실험시 관제탑의 제원과 저층부의 강성을 증가 시켰으나 만족할수 있는 수치를 얻지 못하여 제진의 수단으로 TLD(Tuned Liquid Damper)와 HMD(Hybrid Mass Damper)를 적용하여 검토하였다.

관제탑의 1차 고유진동수는 구조해석에 의하면 X방향이 0.777Hz, Y방향이 0.764Hz로서 두방향에 큰차이가 없으므로 1차 고유진동수를 0.777Hz로 하여 사용성 평가에 적용하였다.

4.2 TLD 구조물 해석

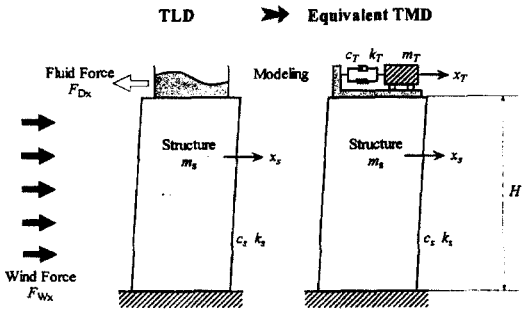
TLD해석은 관제탑의 1차 Mode에 대하여 최적 TLD를 설계하고 풍동실험으로부터 결정한 풍하중에 대한 관제탑의 평균제곱근 가속도 응답과 최대가속도 응답해석을 수행하였다.

등가 TMD해석 방법은 TLD의 감쇠원리가 TMD 와 같다고 가정하여 TLD해석은 TMD방법을 사용하였다.

해석에 사용된 TLD의 특성은 표 6과 같다.

표 5 인천관제탑의 동적특성

높이	H=100.4m
폭	B=18.0m
고유진동수	f_S=0.77Hz
Modal Damping	ξ_S=0.01
Modal Mass	M_S=1082.2

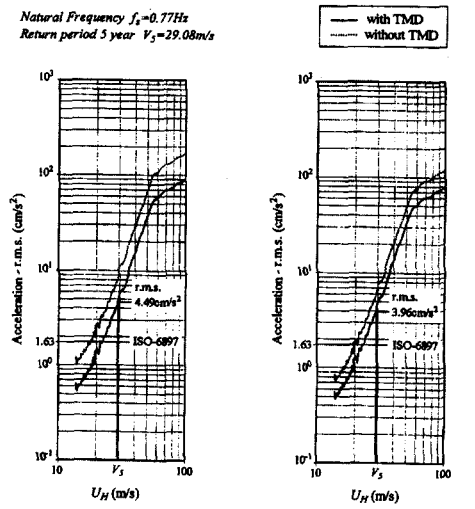


(a) TLD-Structure System (b) Equiv. TMD-Structure System

그림 4 등가 TMD 해석 model

표 6 TLD의 물성치

Mass Ratio	μ	0.99%
Modal Mass	M_S	1082.2t
TLD Mass	M_T	10.71t
Optimal Frequency Ratio	γ	0.99
TLD Optimal Frequency Ratio	$\xi_{T_{opt}}$	6%
Amount of Increased Ratio	$\Delta\xi_{eq}$	2.5%



(a) Structural Damping ξ_S=0.01 (b) Structural Damping ξ_S=0.02

그림 5 풍속에 따른 r.m.s가속도

4.3 HMD 구조물 해석

복합형 제진장치는 수동형 제진장치와 능동형 제진장치가 동시에 사용되는 형태의 제진장치를 말하며, 관제탑에 적용된 대표적 형식은 복합형질량 감쇠기(Hybrid Mass Damper)이다.

HMD는 수동형 제진장치인 동조 질량 감쇠기(Tuned Mass Damper, TMD)와 능동형 제진장치인 능동 질량 감쇠기(Acyive Mass Damper, AMD)가 결합된 형식을 취하여 Active Control System을 구성한다.

HMD는 수동형 제진장치인 TMD시스템에 질량체를 움직이는 제어장치를 장착한 구조로 되어 있으며, 수동형으로 작동할 경우 TMD로 작동하여 구조물의 고유진동수에 동조된 질량-스프링-감쇠의 부가적인 시스템이 구조물의 진동에너지를 흡수하며, 능동형으로 작동할 경우 수동형인 TMD시스템이 진동에너지를 흡수하면서, 추가적으로 부가질량을 움직여 발생하는 관성력에 의한 반력을 구조물에 작용함으로서 구조물의 진동을 제어하여 진동제어효과를 높인다.

해석에 사용된 HMD의 특성은 표 7과 같다.

4.4 AEROELASTIC 실험

4.2와 4.3에 제시된 물성치로 실험한 결과는 본 구조물에서 적용하여야 할 Damper를 판단할 수 있는 자료를 제시하고 있다.

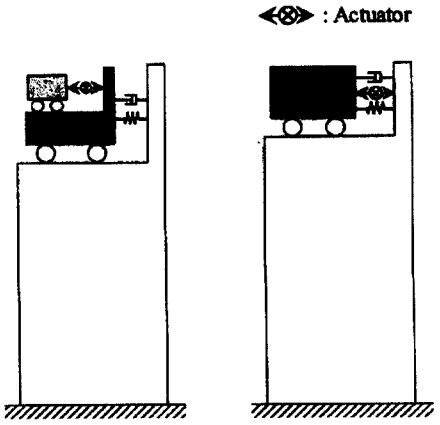


그림 6 Hybrid mass damper

표 7 HMD의 물성치

Mass Ratio	μ	1%
Modal Mass	M_s	1082.2t
TLD Mass	M_T	10.822t
Optimal Frequency Ratio	γ	0.99
TLD Optimal Frequency Ratio	$\xi_{T_{opt}}$	6.03%
Amount of Increased Ratio	$\Delta\xi_{eq}$	2.5%

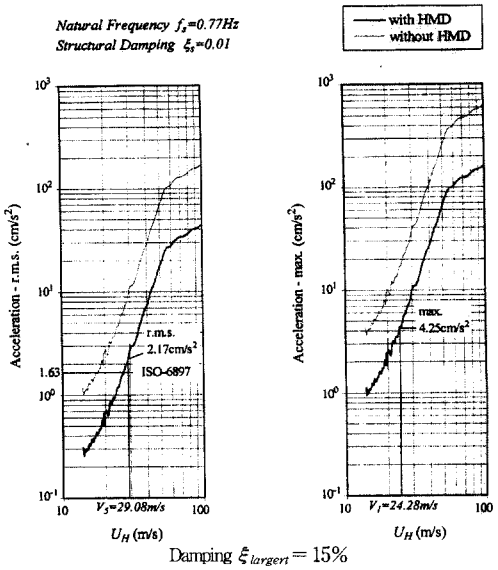


그림 7 풍속에 따른 acceleration response

표 8 각 경우 풍동실험 결과

			초과일수		
			강	중	저
인지레벨에 따른 사용성 평가	NO TLD	DAMPING RATIO 1%	9.57	24.85	-
	TLD	DAMPING RATIO 1%	2.04	5.03	21.43
	HMD	TARGET DAMPING=10%	0.51	1.33	5.16
		TARGET DAMPING=15%	0.37	0.79	3.89-4.32
		TARGET DAMPING=20%	0.23	0.52	2.13-2.82
영종도 관제탑의 사용성 제안	PRIMARY CRITERIA		STRONGLY PERCEPTIBLE LESS THAN 1 DAY/YEAR		
	SECONDARY CRITERIA		FOR 5YEAR RETURN PERIOD WIND SPEED LESS THANACCELERATION 2.85cm/sec²		

5. 결 과

1. 본문에서 언급한 바와 같이 동적풍하중은 정적풍하중 보다 20-30% 증가됨을 알 수 있다.

2. Aero-elastic test 결과 동적불안정을 초래하는 Vortex 진동, Galloping 또는 Flutter 등의 특이한 동적 공기력불안정현상은 발생하지 않는다.

3. 관제탑의 1차 mode 감쇠비를 1%로 보았을때, ISO-6897기준을 5.15배 초과하였으며, 수동형 제진장치인 TLD거동해석에서는 3.64배 초과하는 것으로 산정되었다.

수동형 제진장치로는 제진성능을 기대하기 어려워 복합형 제진기구인 HMD의 목표감쇠비를 27%로 하였을때 ISO-6897기준을 만족시켰다.

4. ISO-6897기준이 일반성인이 진동을 감지하는 구조물의 가속도의 평균임계점을 사용한 점, 평균값인 r.m.s가속도를 사용한 점 및 관제사들이 일반인들에 비하여 비교적 익숙한 점을 고려하면 ISO-6897기준은 다소 보수적일 수 있다.

따라서, ISO-6897에서 제시한 평균 성인의 진동인지임계선의 확률적 분포 및 관제사들의 진동인지선 분포를 고려한 보조기준을 제시하고, 관제탑의 동적응답해석결과는 목표감쇠비가 10-15%일 때 이 기준을 만족한다.

참 고 문 헌

1. SHIMIZU Corporation Report, "Prediction of Wind-Induced Loads for the Inchon International Airport Air Traffic Control Tower : Phase I Study Report Force Balance Test and Pressure Test", Aug 27, 1996
2. International Standard ISO 6897-1984(E)
3. SHIMIZU Corporation Report, "New Seoul International Airport Air Traffic Control Tower: Brief Summary of Force Balance Test", June 13, 1996
4. 인천기상대, "인천의 최근 35년간 풍속자료(1961-1995)"
5. 서울대 공학 연구소, "관제탑 사용성 개선을 위한 제진장치 타당성 조사", 1997.4
6. Bungale S. Taranath, "Structural Analysis and Design of Tall Buildings", 1996. 5
7. Emil Simiu and Robert H. Scanan, *Wind Effects on Structures*, Mcgraw-Hill, 1996