

천년의 문

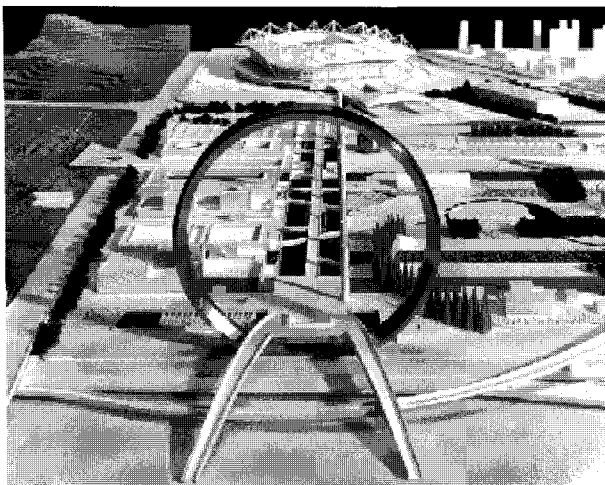
- Millennium Gate -



정 광 량*
Chung, Kwang-Ryang

1. 서 론

천년의 문은 2002년 월드컵 대회를 계기로 프랑스 파리의 에펠탑에 버금가는 국가 상징 조형물을 건립한다는 취지에서 상암동 월드컵 경기장 앞 연면적 2730평의 터에 직경 200m의 원형건축물을 세우는 것으로, 2002년 5월에 외관공사를 완료하고, 2003년 5월에 최종 완공한다는 계획 아래 추진해 왔던 새천년 기념사업의 하나다. 천년의 문 건립을 위해 설계경기 공모를 통해 <그림 1.1>과 같이 2000년 2월 건축사무소 오피스와 경희대 이은석 교수의 최종 당선작이 확정되었다.



<그림 1.1> 설계경기 최종 당선작
1년여 동안 설계가 진행된 천년의 문은 2001년 3월

* (주)동양구조안전기술 대표이사

안전성 문제와 예산낭비 우려 등 다음과 같은 이유들로 인해 건립계획이 전면 백지화되었다. 천년의 문 건립을 위한 총사업비가 당초 300억원에서 550억 원으로 늘어났지만 국고 85억원 이외에는 구체적인 자원확보 방안이 마련되지 않았고, 공모 당선작에 대한 풍동실험 결과 세계 초유의 직경 200m짜리 원형 건축물에 대한 안전성 문제가 제기돼 설계보완을 거치면서 원형이 변경되었고 또한 두 차례 풍동실험을 거치면서 2000년 12월로 예정됐던 착공이 계속 늦어져 밀레니엄 상징 조형물로서의 시의성을 상실하고 2002년 6월 월드컵 축구대회 이전까지 외관 완성이 불가능하다는 것이 건립계획 취소의 이유였으나 실제로는 당시 IMF 이후 공적자금의 낭비를 이유로 시민단체에서 건립을 강하게 반대하였고 더불어 복잡한 정치적 이유가 건립취소의 절대적 원인이었다.

비록 천년의 문 건립계획은 백지화 되었지만 천년의 문 설계과정을 통해 드러났던 기술적인 문제와 이로 당선작을 보완했던 대안에 대한 소개 및 대안을 통한 최종안의 선택과 진행과정에 대해 2년이 지난 지금 처음으로 지면을 통해 소개를 하고자 한다.

2. 당선작 기본설계

2.1 건물 개요

천년의 문 건축설계는 건축사무소 오피스에서 수행하였고, 철골구조에 대한 설계는 (주)동양구조

안전기술과 시드니 오페라 하우스 등을 설계한 영국의 건축회사 OAP(Ove Arup and Partners)의 홍콩 지사와 미국 LA지사의 King Le가 참가하였고 외부 판넬의 설계는 스위스 슈미들린사가 맡았다. 또한 거대한 건물의 안정성을 위한 풍동 실험은 세계적 권위를 가진 캐나다의 RWDI사와 국내의 현대건설 기술연구소가 참여하였다. 천년의 문에 대한 기본적인 건물 개요는 다음과 같다.

- 건 물 명 : 천년의 문
- 대지위치 : 서울 마포구 상암동 평화의공원 내
- 건물형상 : 직경200m, 원형 건축물
(다이아몬드 형 단면) 상부 전망대
- 건설기간 : 2000.3. ~2001.7.30
- 지역구분 : 도시지역, 자연녹지지역, 시가지조성지역
- 연 면 적 : 2,860평 (전망대500평)
- 설계하중 : 풍하중 100년 재현주기
- 내부시설 : 4대의곤돌라(20인승, 시간당800명 수송)
- 주요시설 : 200m 정상전망대, 통일염원 2000계단, 현대사 박물관, 평화기상대, 야외공연장

설계가 진행되어온 과정을 간단하게 살펴보면 초기 당선작에 대해서 풍동실험을 통하지 않고 OAP 홍콩지사에서 정적 풍하중만으로 설계한 결과 소요 물량이 예상물량의 3배를 넘게 산출되었고 이에 OAP에서 제시한 여러 보완방안 중 단면을 유선형으로 변경한 유선형대안에 대한 OAP의 추가 기본 설계와 RWDI의 풍동실험이 수행되었다. 그러나 유선형대안 역시 바람의 동적특성 인 난류의 영향으로 인해서 오히려 당선작보다 더 많은 물량이 요구되었고 이에 RWDI에서 난류의 동적특성 및 영향을 고려하여 제시한 최종대안1과 최종대안2가 도출되었고 현대풍동실험과 OAP 미국 LA지사의 설계를 통해 이 중 최종대안2가 당선작에 대한 최종 변경안으로 확정되었다.

2.2 풍하중

국내 고층 및 초고층 설계에 있어 서울의 경우 30층 이상, 부산일 경우 15층 이상만 되도록 지진하중 보

다는 풍하중이 설계지배하중이 되고 구조설계에 있어 안전성에 의한 강도 측면의 검토 보다는 횡변위, 층간변위 그리고 진동 등 사용성 기준의 확보를 위한 강성 검토가 설계의 주된 지배조건이 된다. 최근 국내 구조물 역시 점점 초고층화 및 대공간화 되는 추세이고 이에 맞춰 풍동실험 등을 통한 풍하중의 동적특성에 대한 연구 및 분석 활동이 활발히 이루어지고 있다.

972

CP 3 : Chapter V : Part 2 : 1972

uniform section

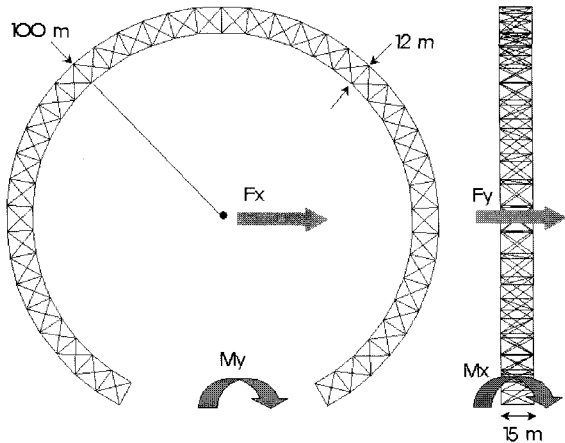
Table 14. Force coefficients C for clad buildings of uniform section (acting in the direction of the wind)

wind ratio		Pin shape	C _s for height/width ratio	C _s for height/width ratio							
1	5			10	20	30	40				
0.7	0.8	[Diagram: Square pin shape]	b/d = 1 r/b = 1/6	< 10	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.0	1.3
				> 10	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6
0.5	0.5	[Diagram: Oval pin shape]	b/d = 1/2 r/b = 1/2	< 3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4	
				> 3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3
0.5	0.5	[Diagram: Rectangular pin shape]	b/d = 1/2 r/b = 1/6	All values	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.7	
				0.9	1.0	1.1	1.3	1.7			
0.9	1.0	[Diagram: Rectangular pin shape]	b/d = 2 r/b = 1/12	All values	0.9	0.9	1.0	1.1	1.3	1.5	1.9
				0.6	0.7	0.8	0.8	1.0			
0.4	0.4	[Diagram: Oval pin shape]	b/d = 2 r/b = 1/4	< 6	0.7	0.8	0.8	0.9	1.0	1.2	1.6
				> 6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6

<그림 2.1> 당선작 설계를 위한 단면형상 별 풍력계수

천년의 문 역시 최대 높이 200m로 초고층, 대공간 구조물이라 할 수 있고 예외 없이 풍하중이 설계 지배하중으로 작용하였다. 초기 당선작 결정시 풍하중이 초고층 구조물에 미치는 영향에 대한 상기의 특성이나 영향이 충분히 고려되지 않은 채 당선작이 확정된 관계로 당선작에 대한 설계변경이나 보완은 불가피 하였다.

설계경기 당선작의 풍하중 산정시 기본 원칙은 설계 기본 풍속이 서울기준으로 35m/s 이고, 노풍도는 B 이며, 풍력계수는 <그림 2.1>과 같이 British 기준 BS CP3에 따라 단면형태가 사다리꼴이므로 1.4를 적용하여 산정되었다. 또한 재현주기는 10년을 선택하였으며, 천년의 문에 작용하는 풍하중의 방향은 <그림 2.2>와 같이 산정하여 설계하중에 반영하였다.



〈그림 2.2〉 풍하중 작용방향

2.3 당선작 구조설계 및 분석

초고층 및 대공간 구조물 설계에 있어 설계 검토조항으로는 크게 두 가지를 말할 수 있는데 첫째는 안전성에 기초한 강도 검토이고 두 번째는 사용성에 근거한 강성 검토이다. 일반적인 구조물에 있어 강도 검토만으로 부재 설계 및 선택이 이루어지는 반면 고층 및 초고층 구조물의 경우 강도 검토에 의한 조건보다는 강성 검토에 의해 부재 선택이 지배받게 된다. 다음은 사용성 평가를 위한 국내에서 일반적으로 채택되는 진동 및 변위 기준이다.

- 최대 횡변위 : $H/300 \sim H/400$ (H : 건물 높이)
- 층간 변위비 : $0.015h$ (h : 층고)
- 진동수 제한 : $1.5\%g \sim 2.0\%g$ (NBCC 기준)

〈표 2.1〉 풍하중에 의한 전단력과 전도모멘트(원안)

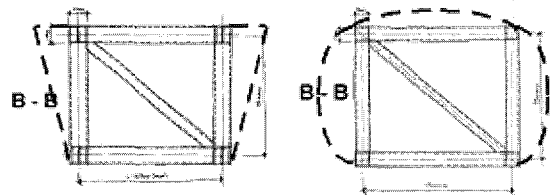
구조설계 진행과정	철골 물량(ton)	최대 변위(mm)
Strength optimization	5,740	2,234
Stiffness optimization	18,600	669
Member rationalization	19,100	653

주) 최대 변위 제한 : $H/300 = 667\text{mm}$

강성 최적화와 강도 최적화 그리고 부재 합리화 등에 의한 부재 선택과 그에 따른 물량 및 최대 횡변위를 정리하면 <표 2.1>과 같다. 표에 의하면 강도 최적화인 경우 철골 물량은 감소하지만 최대 횡

변위 기준을 만족하지 못하고 강성 최적화에 의해 부재를 선택하여 횡변위를 만족시킬 경우 철골물량이 증가함을 알 수 있다.

표에서 보는바와 같이 풍하중에 의한 횡변위를 만족하기 위해 소요되는 물량은 19,100tonf 이며 이는 천년의 문 계획 당시의 목표 철골물량인 7,000tonf 의 약 3배에 이르는 수치이다. 이에 OAP 에서는 단면의 형상을 <그림 2.3>과 같이 사다리꼴에서 유선형으로 바꾸어 풍하중을 감소시켜 횡변위를 제어하고 철골 물량을 감소시킬 수 있는 방안을 대안으로 제시하였고 더불어 세계적인 풍동실험 회사인 캐나다 RWDI사를 참여시켜 풍하중에 의한 동적특성도 평가 및 분석하였다.



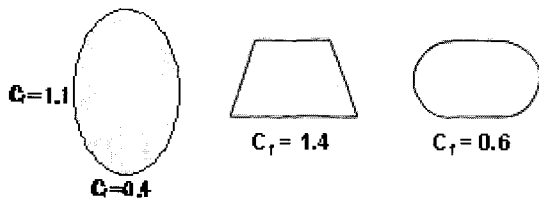
〈그림 2.3〉 단면형태의 변화

2.4 유선형대안 구조설계 및 분석

단면의 형태를 사다리꼴에서 유선형으로 변경할 경우 사용되는 풍력계수는 1.4에서 0.6으로 대폭 감소될 수 있다. 유선형으로 단면을 전환되면서 <그림 2.4>와 같이 장축방향으로는 형상계수 1.1을 단축방향으로는 0.4를 적용하여 풍하중을 산정하였고 이를 정리하면 <표 2.2>와 같다. 이를 토대로 OAP의 구조 계산 결과 최대 크기의 부재 사이즈는 Box-1200×1200×100×100 (자중=3.43tonf/m) 이고 상기 부재의 현실적인 제작 가능한 부재 길이는 길이가 6m로 무게는 20.58tonf 이다.

〈표 2.2〉 OAP 구조 설계에 의한 전단력과 전도모멘트

	Shear Forces	Overturing Moments
X direction	$F_x = 1,733 \text{ tonf}$	$M_y = 142,508 \text{ tonf-m}$
Y direction	$F_y = 561 \text{ tonf}$	$M_x = 62,538 \text{ tonf-m}$



<그림 2.4> 유선형 대안 설계를 위한 단면형상 별 풍력계수

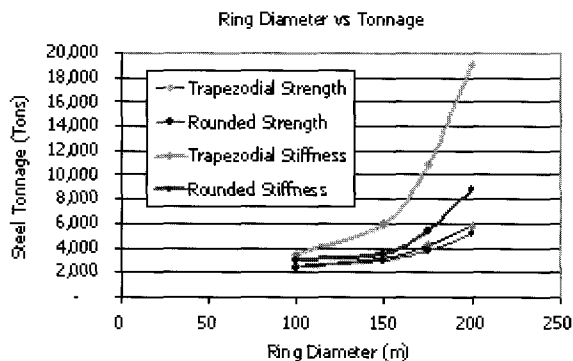
유선형 단면으로 변경하여 풍하중을 적용하고 그에 따라 구조설계를 수행한 결과에 <표 2.3>에서 보는바와 같이 철골물량이 원안의 1/3 수준에서 강성 최적화에 의한 횡변위를 만족시킬 수 있었고 이는 목표 물량인 7,000tonf 에 근접한 수치이다. <그림 2.5>에서는 원안과 유선형 대안의 규모 별 강도 및 강성 최적화에 따른 횡변위와 소요 물량을 정리 및 도식화 하였다.

<표 2.3> 풍하중에 의한 전단력과 전도모멘트(유선형 대안)

구조설계 진행과정	철골 물량(ton)	최대 변위(mm)
Strength optimization	5,450	1089
Stiffness optimization	6,010	667
Member rationalization	6,110	651

주) 최대 변위 제한 : $H/300 = 667\text{mm}$

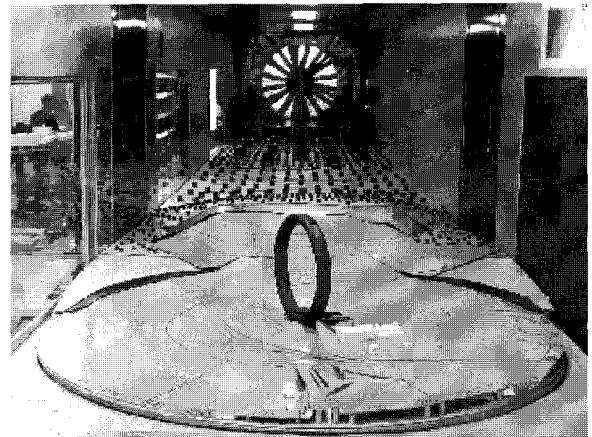
OAP의 풍하중에 대한 정적해석과 별도로 캐나다 RWDI사에서 유선형대안을 가지고 수행한 풍동실험



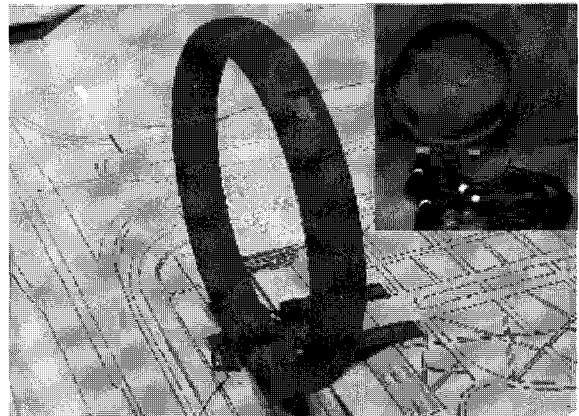
<그림 2.5> 규모 별 철골 물량

험을 통하여 구조물에 작용하는 풍하중을 산정하고, 풍향 성분별 분석을 통해 가장 지배적인 풍하중 조건을 판별해 내어 동적영향을 크게 유발시키는 난류

(Vortex Shedding)에 대한 평가를 수행하였다. 또한 제한 주기별 최대 가속도를 산정하여 구조물의 진동 및 변위에 대한 사용성 평가가 이루어졌다. <그림 2.6>과 <그림 2.7>은 RWDI에서 수행한 풍동실험 장면과 실험체 상세이다.



<그림 2.6> RWDI 풍동실험



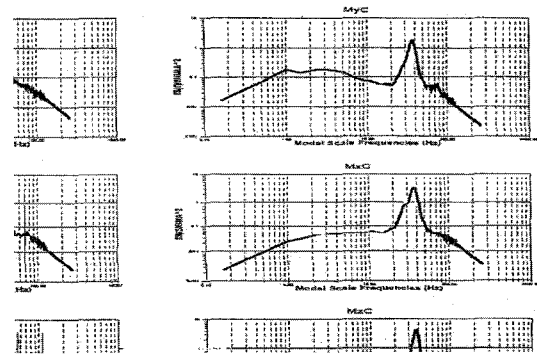
<그림 2.7> RWDI 풍동실험 실험체

풍하중 산정위치를 OAP 해석과 동일하게 하고 수행한 풍동실험 결과, 설계전단력과 전도모멘트는 <표 2.4>와 같고 이를 OAP 해석 결과와 비교하면 <표 2.5>와 같다.

<표 2.4> RWDI 풍동실험에 의한 전단력과 전도모멘트

	Shear Forces	Overturing Moments
X direction	$F_x = 2,855 \text{ tonf}$	$M_y = 304,791 \text{ tonf-m}$
Y direction	$F_y = 1,191 \text{ tonf}$	$M_x = 148,772 \text{ tonf-m}$

<그림 2.8>의 풍향별 파워스펙트럼 밀도 분석을 살펴보면 풍향150°와 280°에서 강력한 난류가 발생하고 이로 인해 스펙트럼의 주파수 값이 갑자기 크게 증가함을 알 수 있다. 풍향 150°와 280°를 천년의 문에 적용하면 <그림 2.9>과 같이 대각선 방향으로 구조물을 통과하는 바람에 의해 난류가 크게 발생하였다. <그림 2.10>는 파워스펙트럼 밀도분석 그래프 중 거스트 계수에 관한 것이다.

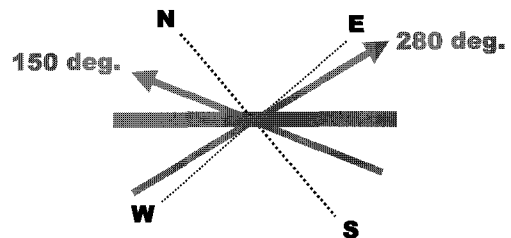


(b) 풍향 280°에서의 파워스펙트럼

<그림 2.8>

<표 2.5> RWDI 풍동실험과 OAP 해석결과 비교

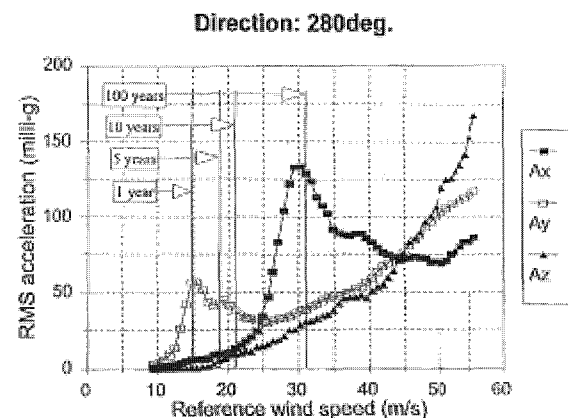
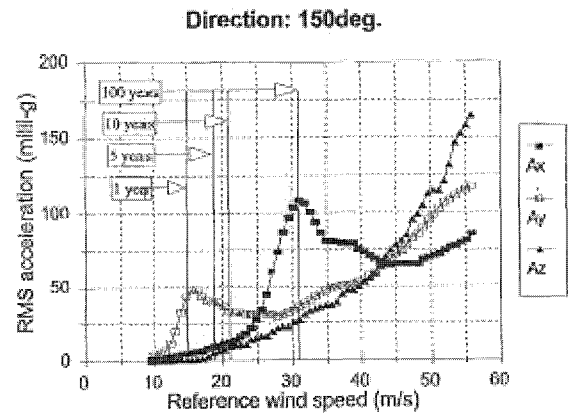
		Shear Forces		Overturning Moments	
		Force (tonf)	ratio	Moment (tonf-m)	ratio
X-Dir.	RWDI	Fx = 2,855	1.65	My = 304,791	2.14
	OAP	Fx = 1,733	1.00	My = 142,508	1.00
Y-Dir.	RWDI	Fy = 1,191	2.13	Mx = 148,772	2.38
	OAP	Fx = 560	1.00	Mx = 62,538	1.00



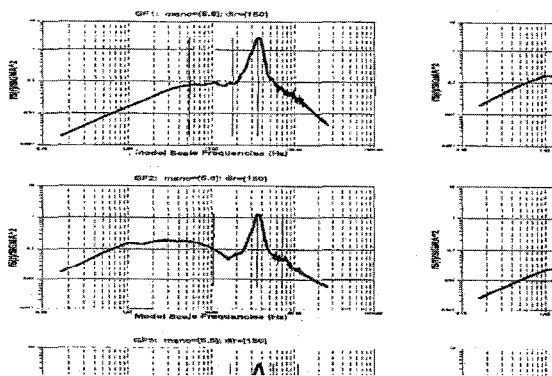
<그림 2.9> Vortex Shedding 방향

<그림 2.10>에서 보듯이 풍향150°와 280°인 경우 채현주기에 따른 각 풍속별 가속도 값을 비교해 보면 천년의 문 설계에서 채택한 기본풍속 30m/s 주위에서 가속도 값이 제일 크게 나오고 있음을 알 수 있고 이는 난류의 동적영향이 매우 강함을 보여준다.

이와 같은 난류에 의해서 매우 강력한 동적영향(Dynamic Effects)가 발생하고 이는 X 방향의 풍하중을 정적하중인 경우 30%, 동적하중인 경우 70% 가량 증가시켰다. 또한 Y 방향인 경우 증가폭은 정적하중 40%, 동적하중 60% 이다. 이런 동적특성으로 인해 OAP의 설계 결과 보다 약 1.65~2.38배 정도 큰 설계하중이 풍동실험 결과 산출되었다.



<그림 2.10> 풍속별 RMS 가속도 값



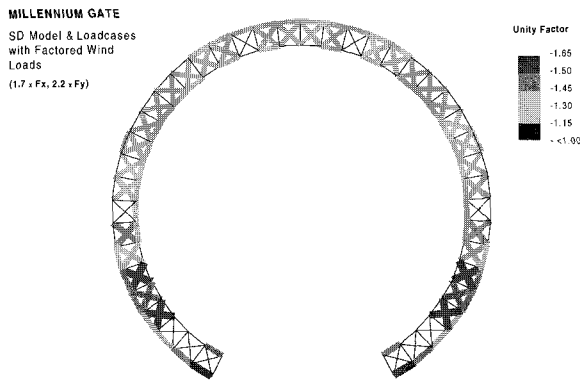
(a) 풍향 150°에서의 파워스펙트럼

천년의 문의 경우, 난류와 이로 인한 동적영향이 크게 발생한 이유는 매우 큰 세장비 약 1/10, 일반 건물의 1/5 수준인 약 40kg/m³의 가벼운 자중, 용접접합으로 인한 약 1%의 낮은 감쇠율 그리고 원형인 구조물의 형태 등을 들 수 있다.

최상층에서의 최대 가속도는 살펴보면 <표 2.6>과 같이 각 재현주기별로 모두 ISO 기준을 초과하고 있음을 알 수 있으며 <그림 2.11>과 같이 OAP 해석을 통해 산정된 부재에 RWDI의 풍동실험에 의한 풍하중을 적용하여 부재 강도를 재검토한 결과 최고 65%의 과응력 상태를 보이는 부재가 발생하고 있다.

<표 2.6> 최상층 최대가속도 예측치

재현주기	최대 가속도 (태풍 고려)	최대 가속도 (태풍 제외)	ISO 기준
1년	52.7 mg	47.0 mg	13.8 mg
5년	94.0 mg	81.5 mg	19.1 mg
10년	114.4 mg	93.1 mg	23.0 mg



<그림 2.11> RWDI 풍하중 적용에 따른 응력 분포도

3. 최종 대안

3.1 당선작 보완 배경

설계경기 당선작의 기본설계를 수행한 결과 원안대로 설계가 진행될 경우 사용되는 철골물량이 약 19,000톤에 이르며 이는 천년의 문 건립 발표 당시의 목표 물량인 7,000톤의 약 3배에 해당되는 수치이다. 또한 원안을 수정한 유선형대안대로 설계할 경우 난류에 의한 동적영향으로 인해 역시 물량 감소, 안정성 및 사용성 기준을 확보할 수 없으며 무

엇보다도 설계경기 당선작의 기본단면형태가 원형으로 수정된다는 측면에서 설득력을 얻을 수 없었다. 다음은 RWDI에서 제시한 천년의 문과 같은 구조물에 있어 난류에 의한 동적영향을 줄일 수 있는 방안들이다.

- ① 단면 형태의 변경
- ② 마감재 표면의 가공 혹은 마감재 제거
- ③ 강성 증가
- ④ 매스(Mass) 증가
- ⑤ 감쇠율 증가
- ⑥ 링 상부와 하부의 단면 폭 변화(Tapered Shape)

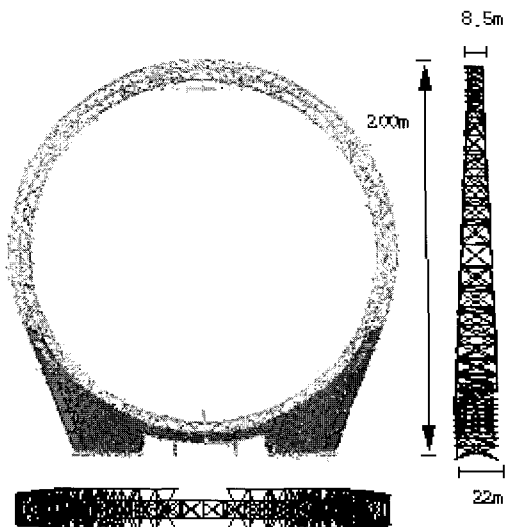
최종 대안을 결정하기 위해 상기와 같은 방안들에 대한 다단계의 복합적인 자문 및 검토들이 여러 단체 및 전문가에 의해 이루어졌고 이를 토대로 다음과 같은 최종 대안을 위한 기본설계 수정방향이 설정되었다.

- ① 유공마감재 혹은 마감재 50% 제거
 - 난류의 명확한 감소
 - 난류 감소의 정도를 예측하기는 불가능
 - 풍동실험을 통한 검증이 필요함
- ② 상부의 단면 폭 축소 (Tapered Elevation)
 - 높이에 따라 난류의 위상차 발생
 - 난류에 의한 영향력 감소
 - 큰 전도 모멘트를 발생시키는 상부의 풍하중이 감소함
 - 수평하중에 대해 가장 안정되고 경제적인 구조 형태
- ③ 원형인 구조물의 형태 변경
 - 구조체의 단면형태와 건축의 단면형태를 일치시킴
 - 콘크리트 베이스 설치

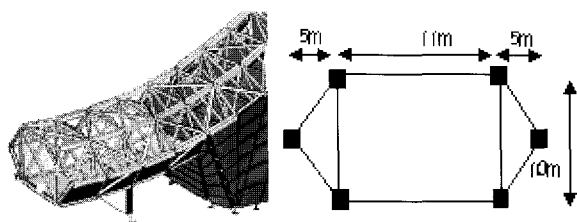
3.2 당선작 보완 사항

최종안 결정을 위한 다음의 2가지 대안이 검토되었고 이중 대안2가 최종안으로 결정되었다. 원안에

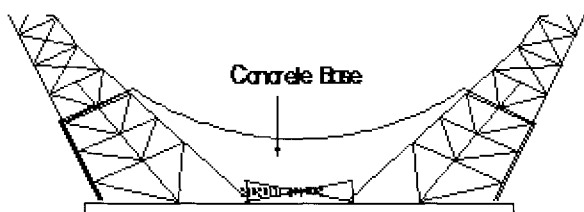
대한 최종 2가지 대안의 공통된 변경사항은 <그림 3.3>과 같이 원형 구조물 하부에 콘크리트 베이스를 설치하여 횡력에 대한 안정성을 확보하였고 <그림 3.2>와 같이 기본 철골 프레임을 기존의 4각형 골조에서 6각형으로 변경하여 난류의 영향을 최소화 하였다. 또한 <그림 3.1>과 같이 상부의 단면 폭을 하부보다 축소시켜 횡하중에 대한 안정성과 경제성을 추구할 수 있게 하였다.



<그림 3.1> 최종 대안 입면도



<그림 3.2> 최종 대안 단면 상세도



<그림 3.3> 최종 대안 콘크리트 베이스 상세도

최종 대안1과 대안2의 차이점은 하부 콘크리트 베이스 부분의 설치 높이가 대안1은 61.7m이고 대

안2는 32.3m 이다. 이외에 대안2의 마감은 유공마감판을 사용하여 난류의 보다 효과적인 감소를 이끌어 내도록 하였다. 천년의 문이 가지는 상징성 및 기념비적인 성격을 유지하기 위하여 원안에서 지속적으로 추구해온 구조물의 높이 200m와 완전한 원형구조물이라는 기본 특성을 원안 그대로 유지하기 위하여 상기와 같은 대안들이 적극적으로 검토되었고 결국 많은 노력과 시험을 통해 구조적 안전성 및 경제성을 확보하도록 최종대안이 채택되었다.

3.3 최종 대안1 구조 설계 및 분석

원안대로 유공마감판이 아닌 무공마감판의 사용과 콘크리트 베이스의 높이를 61.7m로 올리고 Tapered Elevation을 채택한 최종 대안1을 위해 RWDI는 유선형대안의 풍동실험을 근거로 하여 대안1의 횡하중에 대한 상대적 안전성 등을 고려하여 다음과 같이 풍하중을 제시하였다.

- Static Wind Forces
 - X direction : 풍동실험 결과보다 10~20 % 증가
 - Y direction : 풍동실험 결과보다 40 % 증가
- Dynamic Wind Forces
 - X direction : Tapered Elevation으로 인해 난류 감소, 감소치 예측 어려움
 - Y direction : 난류 존재

<표 3.1> 대안1과 유선형대안의 풍하중 비교

항목 (풍하중 산정 근거)	Overturning Moments		Shear Forces	
	My(tf-m)	Mx(tf-m)	Fx(tf)	Fy(tf)
유선형 기본설계 (OAP 산정)	142,508 (100%)	62,538 (100%)	1,733 (100%)	560 (100%)
유선형 기본설계 (RWDI 실험)	304,791 (214%)	148,772 (238%)	2,855 (165%)	1,191 (213%)
설계적용 풍하중 (40% 할증)	426,707 (300%)	208,281 (333%)	3,997 (231%)	1,667 (298%)

따라서 실제 구조설계에 적용하여야 할 풍하중은 X방향 보다 Y방향의 풍하중이 난류의 존재라는 측면에서 조금 더 지배적이므로 X, Y 두 방향 모두 풍

동실험 결과보다 40% 증가된 값을 적용하여 구조설계를 수행하였다.

유선형대안 기본설계 및 풍동실험 그리고 RWDI와 실제 설계에 적용시키기 위해 40% 할증된 RWDI의 풍하중을 정리하면 <표 3.1>과 같다. 표에서 알 수 있듯이 실제 적용된 풍하중이 유선형대안의 설계 풍하중보다 약 3배 정도 많은 풍하중을 보이고 있음을 알 수 있다. RWDI 유선형대안 풍동실험에서 40% 할증된 풍하중을 적용하여 구조설계를 수행한 결과 소요되는 철골 물량은 약 11,000tonf으로 최대 변위는 130cm를 보였다.

3.4 최종 대안2 구조 설계 및 분석

대안1과는 달리 유공마감판을 사용하여 난류의 <표 3.2> 대안2와 유선형대안의 풍하중 비교

항목 (풍하중 산정 근거)	Overturning Moments		Shear Forces	
	My(tf-m)	Mx(tf-m)	Fx(tf)	Fy(tf)
유선형 기본설계 (OAP 산정)	142,508 (100%)	62,538 (100%)	1,733 (100%)	560 (100%)
유선형 기본설계 (RWDI 실험)	304,791 (214%)	148,772 (238%)	2,855 (165%)	1,191 (213%)
대안 2(유공 마감) (RWDI 제시)	163,912 (115%)	222,621 (356%)	1,983 (114%)	1,832 (327%)
대안 2(유공 마감) (현대 풍실험 제시)	109,216 (77%)	169,274 (271%)	1,321 (76%)	1,393 (249%)

영향을 줄이고 콘크리트 베이스의 높이를 32.3m로 축소한 대안2의 풍하중 산정을 위해 캐나다 RWDI사는 기 수행한 풍동실험을 근거로하여 새로운 풍하중을 제안하였고 국내 현대건설기술연구소에서는 3차에 걸친 실험을 수행하였다. RWDI사는 유선형 대안에 대한 풍동실험 결과를 기본으로 하여 유공마감이라는 마감재의 형태에 따른 풍공학적 특성을 근거로 하여 대안1보다 약 절반가량 감소된 풍하중을 제안하였다.

현대기술연구소는 1차실험에서 3차원 풍력을 사용하여 유공없는 무공마감재에 대한 내풍 안전성을 평가하고 2차실험에서는 유공마감의 특성에 따른 공기력 진동의 발생여부를 상대평가 하였고 마지막으로 3차실험에서는 유공 마감재를 적용한 구조물에 대해서 3차원 풍력실험을 수행하여 내풍 안전성을 검증하였다. <표 3.2>는 대안2에 대한 풍동실험

결과 평가된 풍하중을 나타낸 것이다. 현대기술연구소의 풍동실험에서는 구조해석에 필요한 절점별 유효 풍하중이 제시되지 않아 RWDI와 현대 3차실험의 비율을 계산하고, 이 비율을 RWDI의 풍하중에 적용하여 유효절점 하중을 산정하였고 그 비율은 X방향에서 전단력이 0.41 전도모멘트가 0.76 이었고 Y방향의 경우 전단력 0.77, 전도모멘트 0.71 이었다. 현대기술연구소의 풍하중을 적용하여 구조설계를 수행한 결과 소요되는 철골 물량은 약 10,216tonf 최대 변위는 103cm로 나타났다.

3.5 유선형대안, 대안1 및 대안2 비교 분석

OAP에서 수행한 유선형대안의 설계와 RWDI에서 제안한 풍하중으로 설계된 대안1 그리고 현대기술연구소의 풍하중을 적용한 대안2의 설계를 비교하면 <표 3.3>과 <표 3.4>와 같다.

<표 3.3> 유선형대안, 대안1 및 대안2 설계 비교1

항목 (풍하중 산정 근거)	Base Conc.(m)	마감	철골물량 (ton)	최대변위 (cm)
유선형 기본설계 (OAP 산정)	21.6	무공 마감	9,500 (100%)	65 (H/300)
대안 1 (RWDI 제시)	61.7	무공 마감	11,000 (116%)	129 (H/150)
대안 2 (현대 풍실험 제시)	32.3	유공 마감	10,216 (108%)	103 (H/200)

<표 3.4> 유선형대안, 대안1 및 대안2 설계 비교2

항목 (풍하중 산정 근거)	풍하중				진동주기 (Y방향)
	My (tf-m)	Mx (tf-m)	Fx (tf)	Fy (tf)	
유선형 기본설계 (OAP 산정)	142,508 (100%)	62,538 (100%)	1,733 (100%)	560 (100%)	6.29sec
대안 1 (RWDI제시)	426,707 (300%)	208,281 (333%)	3,997 (231%)	1,667 (298%)	3.90sec
대안 2 (현대 풍실험 제시)	109,216 (77%)	169,274 (271%)	1,321 (76%)	1,393 (249%)	3.50sec

표에서 알 수 있듯이 유선형대안의 경우 대안1,2에 비하여 철골물량 및 최대변위 측면에서 유리하나는 바람의 재현주기를 100년이 아닌 10년으로 산

정하여 설계된 것이고 이를 대안1,2의 경우처럼 100년 재현주기 풍하중을 적용한다면 대안1,2보다 나은 결과를 얻을 수 없을 것으로 판단되었다. 더불어 유선형대안은 수평진동과 관련된 사용성 측면에서 기준을 만족하기 어렵고 또한 당선작의 단면형태를 원형으로 변화시켰다는 측면에서 최종안으로 선택되어 질 수 없었다.

과 경제성을 보다 더 많이 확보하고 있음을 알 수 있다. 더불어 대안1,2 모두 원안의 기본 단면형태인 사다리꼴에서 크게 변화되지 않은 6각형 단면을 취했고 완전한 원형을 여전히 구현할 수 있다는 점이 장점으로 부각되었다. 따라서 <그림 3.4>와 같이 최종적으로 대안2가 설계경기 당선작을 보완할 확정안으로 결정되었다.

<표 3.5> 대안1 및 대안2 비교

	대안 1	대안 2
Conc Base 높이	61.7 m	32.3 m
철골구조 높이	138.3 m	167.7 m
Y-dir (Fy, Mx)		
최상층 변위	129 cm	103 cm
철골 상부 변위	121 cm	103 cm
철골 하부 모멘트	149,358 tonf-m (72%)	138,535 tonf-m (82%)
전도 모멘트	208,281 tonf-m (100%)(29.80m 기준)	169,274 tonf-m (100%)(Base 기준)
X-dir (Fx, My)		
최상층 변위	93 cm	14 cm
철골 상부 변위	82 cm	14 cm
철골 하부 모멘트	383,929 tonf-m (90%)	91,345 tonf-m (84%)
전도 모멘트	426,707 tonf-m (100%)(49.80m 기준)	109,216 tonf-m (100%)(Base 기준)

4. 결 론

밀레니엄 상징 조형물로서 2002년 월드컵 대회를 계기로 세계적인 국가상징 조형물을 건립한다는 취지에서 계획된 천년의 문은 당선작 확정부터 최종 변경안을 도출해 내기까지 1년여의 시간이 소요되었다. 1년이라는 시간동안 계획 초기부터 발생되었던 많은 기술적, 경제적 문제들은 다각적인 노력을 통해 거의 극복되었다고 말할 수 있다. 황하중에 대한 안정성은 정밀한 풍동실험을 통해 확보되었고, 공기 지연이라는 과제는 국내의 세계적인 시공기술 능력에 의해 역시 해결되어질 수 있는 문제이고 더불어 설계변경이라는 기본적인 문제점 역시 당선작 설계자들과의 충분한 협의를 통해 결국 모두의 합의를 이끌어 낼 수 있었다.

설계가 진행되어 왔던 1년여 동안 아쉬운 점은 천년의 문과 같은 초고층 및 대공간 구조물의 설계경기 공모를 통한 심의과정에 있어 미적·상징적 요소와 함께 기술적인 요소들도 당선작 확정시 충분한 고려와 평가가 반드시 이루어져야 한다는 점이다. 고층 구조물에 있어 바람과 같이 설계, 경제성 그리고 시공성 등 여러 분야에 큰 영향을 미치는 요소들은 당선작 심의 과정에서부터 엔지니어들의 참여를 통해 반드시 검증되고 분석되어야 천년의 문과 같은 국가 상징물의 건립이 백지화되면서 발생하는 경제적 손실이나 국민적 실망감 등이 줄여질 수 있을 것이다.

호주의 오페라 하우스, 영국의 밀레니엄 브릿지와 런던 아이, 미국의 게이트웨이 아치 등 세계 유수의 건물들은 당선작 확정에서부터 엔지니어의 적극적인 참여가 있었고 또한 계획부터 시공까지 적게는 5년에서 많게는 20년 이상 지속적인 설계검토를 통해

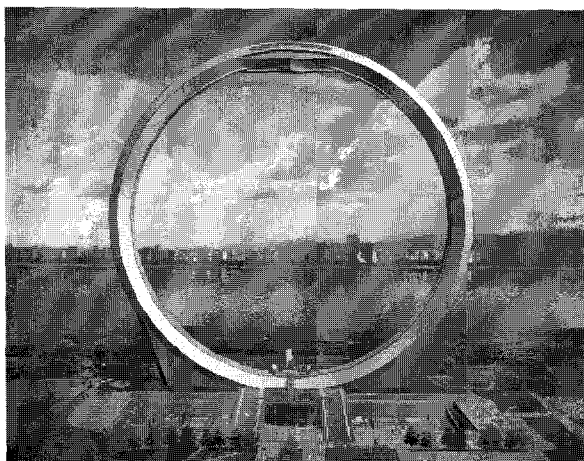


그림 3.4 최종 대안 조감도

<표 3.5>와 같이 대안1과 대안2를 비교하여 보면 거의 전 부분에 걸쳐 대안2가 풍하중에 대한 안전성

보완 및 변경을 거치면서 탄생하였다. 이 과정에서 기술적인 문제들로 인한 변화 등이 상당수 수용되고 채택되어 초기 당선안과 최종 확정안이 서로 어느 정도 차이를 보이고 있음을 잘 알 수 있다. 천년의 문 최종 확정안 역시 당선안과는 약간의 차이가 있고 이런 과정으로 인한 공기의 지연 역시 어느 정도는 불가피한 상황이었다. 그러나 이런 이유들이 전술한 바와 같이 잘 극복되고 해결되었다면 이것들이 어떠한 경우든 국가적 상징물 건립에 있어 결립들이 되어 중간에 건립 자체가 백지화 되는 일이 없도록 모든 관계자들의 노력 역시 필요하다고 하겠다.

세계적으로 거의 모든 국가들은 저마다 국가를 상징하는 하나 이상의 건축물 또는 조형물을 보유하고 있다. 이는 역사의 산물로서 보존되고 유지되어 온 것일 수도 있고 또는 근대나 현대에 새로이 지어진 것일 수도 있다. 어떠한 것이든 이들 상징물들은 문화적 상품으로서의 가치를 유발하여 국익의 상승 효과를 이끌어낼 뿐만 아니라 국민적 자존심과 자부심을 돋우어 낼 수 있는 중요한 수단이 될 수 있다. 국내에서도 세계 어느 나라의 조형물과 비교하여도 전혀 손색이 없는 기념비적인 상징물이 등장한다 하여 많은 국민들의 가슴을 설레이게 하기도 하였다.

그러나 이러한 국가상징 조형물이 여러 가지 이

유들로 인해 중간에 중단되어 졌고 백지화를 이끌어 내려는 많은 단체와 사람들의 노력들이 있었던 반면 이를 아쉬워하는 상당수의 국민들이 있었었던 것도 사실이다. 이번 천년의 문 건립계획은 백지화 되었지만 우리의 미래를 위해 우리의 현재를 이 땅에 남기려는 노력은 앞으로도 지속적으로 이루어 져야 한다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 건축물 하중기준 및 해설, 2000
2. National Research Council of Canada, National Building Code of Canada, Ottawa, Part 4. 1990
3. 日本建築學會, 建築物の振動に關する居住性能評價指針 同解説, 1991
4. 日本建築學會, 建築物荷重指針同解説, 技報堂, 1992
5. Simiu, E. and Scanlan, R. H., Wind Effects on Structures, 3rd Edition, Wiley Interscience
6. British Standard BS CP3, Chapter V, Part 2
7. ACI 318-95(1995), "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", ACI.
8. American Institute of Steel Construction(AISC) 1994, "Manual of Steel Construction - Load & resistance Factor Design".