

구조물의 적설 풍동실험 방법

The Method of Snow Wind Tunnel Experiments for Structures



유 기 표*
You, Ki-Pyo



김 영 문**
Kim, Young-Moon

1. 서론

우리나라는 기후변화 등과 맞물려 폭설현상도 대체로 그 양상이 변화하는 추세를 보이고 있으며, 점점 더 전형적인 특성이 나타나고 있다. 기상학계의 발표에 따르면 폭설은 일반적으로 대륙과 해양의 온도차, 해상에서의 충분한 수증기 공급 및 기단의 변질, 산악효과, 바람장애에 의한 수렴효과가 큰 지역에서 자주 발달한다고 한다.

대체로 북서쪽의 차가운 고기압과 남쪽의 따뜻한 고기압 사이에 형성된 저기압에 동반해 발달한 구름대가 서해상에서 계속 유입되고, 한반도 부근의 5km 상공의 영하 35℃의 찬공기와 영상인 지상 기온과의 온도차에 의한 기층 불안정으로 폭설이 발생한다. 그러나 실제로 우리나라의 폭설 피해지역으로 여겨지는 호남지역 및 강원도지역의 폭설 메카니즘은 지형적 영향에 의해 상이한 발생 메카니즘을 보이게 된다.

영동지역의 폭설은 보통 동해의 상대적으로 따뜻한 해면을 통과하면서 변질된 공기 덩어리가 영동의 산악지형과 만나면서 형성되는 지형성 강설로 알려져 있으며, 강설특성은 강설영역이 좁고 지역에 따라 강한 강설분포를 보이는 것이 특징이다. 한편 호남지역의 폭설은 겨울철에 상대적으로 따뜻한 서해상의 찬 한기가 유입되면서 대류운이 발생하고, 그 대류운이 강해진 풍속과 폭넓게 나란히 형성하면서 폭설을 발생시키게 된다.

이러한 현상은 앞에서 설명한 바와 같이 시베리아 고기압형의 강설로 찬 대륙성 고기압인 시베리아 고기압이 크게 발달하면서 한반도가 포함된 중위도 지역에 세력을 뻗어나가다 해수면 온도가 높은 서해상에서 많은 눈을 생성했다고 판단된다. 구체적으로 서해상에서는 11월 중·하순의 기온이 평년보다 4~5도 높아 서해안 해수면 온도가 섭씨 10도 이상으로 따뜻한 반면 서해 상공에는 영하 10~20도의 온도를 유지하면서 서해를 중심으로 급격한 눈구름대가 형성되고 겨울철에 강하게 나타나는 중국 쪽에서 불어

* 정회원, 전북대학교 건축도시공학부 교수

** 정회원, 전북대학교 건축도시공학부 교수

오는 편서풍을 타고 우리나라 서해안과 인접한 호남 지역에 사상 최대의 적설량을 기록한 것으로 분석된다. 하지만 태백산맥을 사이에 두고 동해안에서는 서해안과 같은 현상이 조금도 발생하지 않고 있어 시베리아 고기압의 영향이 동해안 지역에서는 거의 영향을 미치지 못하고 오히려 겨울 가뭄이 극심하게 발생하고 있는 것으로 나타나고 있다.

지구 온난화의 현상인 엘니뇨, 라니냐와 같은 이상기후로 인해 전 세계적인 기상이변 급증하고 있다. 이런 이유로 태풍, 폭설등 대규모 자연 재난과 산업화, 도시화 등에 기인한 대형화재, 폭발 등 인적 재난으로 인하여 최근 6년간 14조원 이상의 재산 피해가 발생되고 있고, 폭설의 피해금액만 8443억원에 이르며, 각종 재난 발생에 따른 피해발생 후 수습과 복구가 매년 되풀이 되고 있는 실정이다. 바람과 비에 의한 피해가 가장 많으며 설해도 3번째 자연재해로 나타나고 있다.

이러한 폭설피해에도 불구하고 건축물의 설하중 평가하기는 어렵다. 건축물의 설하중 평가는 눈의 성질 파악이 어렵고 옥상적설형상에 대한 조사는 야외의 자연설 조건에서 실시하여 왔다. 이 방법으로 일반적인 방침을 구하기 위해서는 많은 기간과 경비가 필요해 일부 건축물을 제외하고는 설계에 많이 반영되지 못하는 실정이다.

이러한 이유 때문에 국외에서는 풍동실험을 통해 적설현상을 재현해 내리는 움직임이 활발하지만 현재 국내에서는 적설현상에 대한 풍동실험연구가 전무한 상황이다.

2. 상사법칙

2.1 입자의 성질에 관한 상사

(Particle property parameters)

snowdrift modelling 상사법칙을 조사하기 전에, 미립자의 성질이 모델에서 prototype으로 수학적 변환이 가능하도록 정의되어야 한다.

Mellor(1965)는 snowdrifting의 연구에서 받아들여져야 하는 시동풍속(threshold velocity)의 개념에 대해 언급했다. 보통, 풍속이 어떤 임계의 값을 초과할 때 난류의 확산에 의해 입자가 표면에서 들어올려지고 바람에 날리게 된다는 것이 일반적 견해이다. 이는 눈 표면의 상태, 눈입자의 성질, 온도 등에 의해 영향을 받는다.

Bagnold(1941)는 무차원의 시동마찰풍속(threshold friction velocity)이 다음과 같이 설명된다고 제시했다.

$$A_1 = U_t^* / ((\rho_p - \rho_a)gD_p^2 / \rho_a)^{1/2} \quad (1)$$

ρ_p 는 입자의 밀도, D_p 는 입자의 지름, g 는 중력 가속도, ρ_a 는 공기밀도이다.

Bagnold와 이후의 연구자들은 A_1 은 입자의 마찰 레이놀즈수의 고유한 함수라고 주장했다.

$$A_1 = A_1(Re_p) \\ Re_p = U_t^* D_p / \nu$$

여기서, ν 는 공기의 동적점도(kinematic viscosity)이다.

식 (1)은 응집력이 무시될 수 있을 때만 적용된다. Iversen et al(1976)은 특히 작은 입자사이의 점착력(cohesive forces)은 고려되어야 한다고 주장했다. 그런 이유로 다음의 반경험적(semi-empirical)관계를 도출해내었다.

$$A_1 = 0.266 \left[\frac{1 + \frac{5.5 \times 10^{-5}}{\rho_a g D_p^2}}{1 + 2.123 Re} \right] \text{ for } Re < 0.22 \quad (2)$$

$$A_1 = \left[0.108 + \frac{0.0323}{Re} - \frac{0.00173}{Re^2} \right] \left[1 + \frac{5.5 \times 10^{-5}}{\rho_p g D_p^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

for $0.22 < Re < 10$ (3)

$$A_1 = 0.11 \text{ for } Re > 10 \quad (4)$$

눈의 경우 점착력은 중요하며 시동풍속(threshold wind speed)와 마찰속도(friction velocity)를 지배하는 요소이다. 이것은 새 눈의 복잡한 모양이 열역학적으로 불안정하기 때문이며 또한 눈이 떨어지자마자 덩어리의 재분배 과정이 시작되고 입자를 소멸시켜 점착력 층을 만들기 때문이다. Schmidt(1980)는 대기중 눈의 이동 시 점착력의 중요성을 주장했다.

2.2 기하학적 상사

모델의 길이 특성은 1/50스케일이 바람직하다. 그러나 모델과 실제 눈의 미립자 크기에 대한 길이스케일 비율에 대한 실험이 필요하다. 실험은 기하학적 스케일에 관련된 다른 상사 파라메타에 대한 실험이다. 각각의 미립자의 기하학적 상사는 간단한 형태로 표현될 수 있다. 식 (5)는 개개의 미립자의 기하학적 상사(particulate geometric similarity)를 표현한다.

$$\left[\frac{D}{L} \right]_m = \left[\frac{D}{L} \right]_p \quad (5)$$

2.3 대기 중 입자 운동의 상사

입자가 난류확산에 의해 대기 중에 뜨게 될 때 Isyumov와 Mikitiuk(1989)는 공력특성(aerodynamic)이나 유체저항력(fluid resistance forces) 그리고 중력과 관성효과(inertial effect)의 상사가 만족해야 한다고 제안했다.

특히 입자에서 중력과 유체힘(fluid forces)의 상사가 이루어졌다.

$$\left[\frac{U_f}{U} \right]_m = \left[\frac{U_f}{U} \right]_p \quad (6)$$

여기서 U_f 는 입자의 종단속도이다. 게다가 Isyumov와 Mikitiuk(1989)는 식 (6)을 만족하면 관성력을 무시할 수 있는 위치에서 전체궤도의 운동학적 상사가 이루어진다고 제안했다. 부유 상태에서 입자의 prototype과 모델과 관련된 행동은 비슷하게 되게 된다는 것이 이 제안이다.

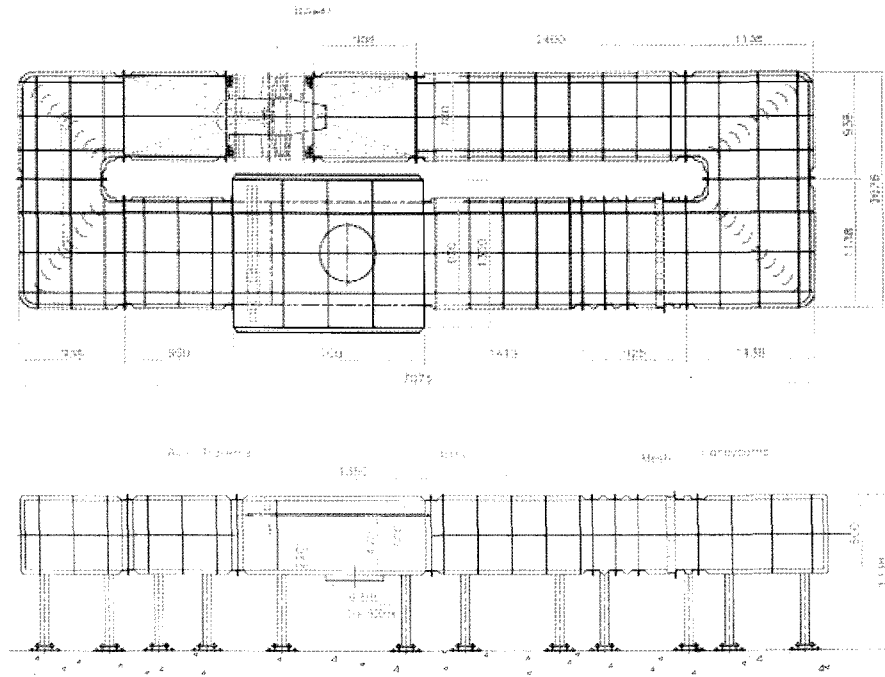
3. 풍동실험

3.1 풍동장치

설풍동실험은 전북대학교 건축공학과 풍동실험실에서 보유한 소형풍동실험장치를 사용하여 실시하였다. 이 소형풍동 실험장치는 순환형(CLOSE TYPE)으로 그 제원은 다음 <표 1>과 같다. <그림 1>은 설풍동의 평면과 입면도를 나타내고 있다. <사진 1>은 설풍동의 전경을 나타내고 있다.

<표 1> 풍동의 제원

형 태	CLOSE TYPE
측 정 부	B(폭) 90Cm × H(높이)60Cm × L(길이)13.5Cm
풍동의 전체길이	18.3m
풍 속	0 ~ 10.0 m/sec
난류강도	0.5% 이하
풍속편차	±1% 이하



〈그림 1〉 설풍동 실험 평면과 입면도



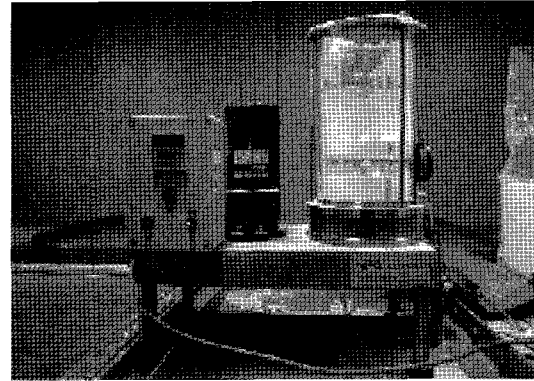
〈사진 1〉 설풍동 전경

3.2 모의눈 상사

모형 눈을 이용하는 풍동실험은 앞에서 기술한 E. A. Finney가 실시한 이후 몇 번 실시되었다. 위의 선행연구에 의거하여 설풍동에서 중탄산나트륨

(sodium bicarbonate)을 모형 눈으로 한 경우의 유사성을 검토하였다. 입자는 크기 분포가 있는 입자 군으로 구성되기 때문에 입도분포곡선의 형태로 나타내게 된다. 앞선 연구자들의 실험에서 사용된 모의눈과 북 일본 지역의 삿포로 눈과 나가오카 눈을

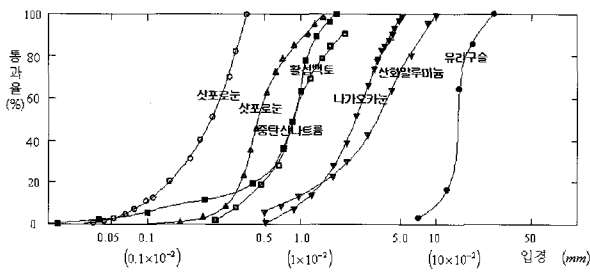
[흡의 입도시험방법]에 의한 입도분포곡선으로 나타내었다. 또한 실험에 사용된 모의눈인 중탄산나트륨을 입도분포곡선으로 나타내었다. 이들을 비교한 결과 중탄산나트륨은 삿포로 눈과 나가오카 눈의 입도분포곡선 사이에 위치하며 북 일본의 평균적 눈 형상과 근사성을 보인다. 또한 밑의 <그림 2>를 보면 중탄산나트륨을 현미경으로 찍은 사진을 통해 입자의 크기가 평균 $70\mu m$ 정도인 것을 확인할 수 있다. <그림 3>은 눈 및 모의눈 재료의 입도곡선을 나타낸 것이다.



<그림 4> 더스트 제너레이터 (Dust Generator)

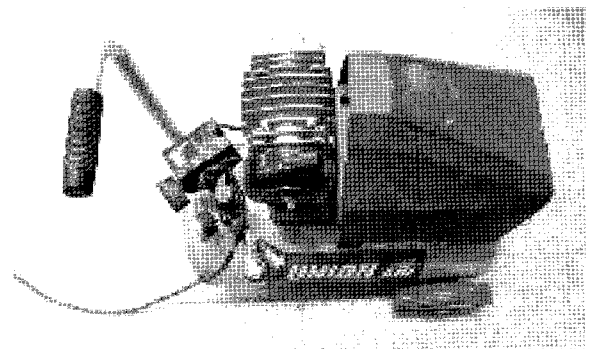
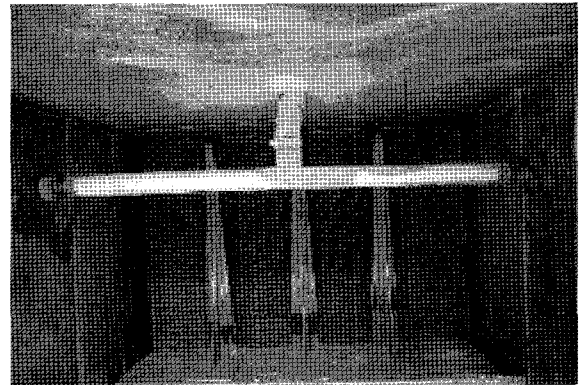


<그림 2> 중탄산나트륨의 입자 크기



<그림 3> 눈 및 모의눈 재료의 입도곡선

설풍동에 노즐을 설치하고 더스트 제너레이터를 통해서 공급되는 중탄산나트륨에 Comperessor의 압력을 주어 노즐의 작은 구멍을 통과하게 하면 설풍동에서 적설현상 재현해 낼 수 있다. <그림 5>는 풍동에 설치된 노즐과 컴프레셔를 나타낸다.



<그림 5> 풍동내 설치된 노즐 및 Comperessor

3.3 더스트 제너레이터(Dust Generator)

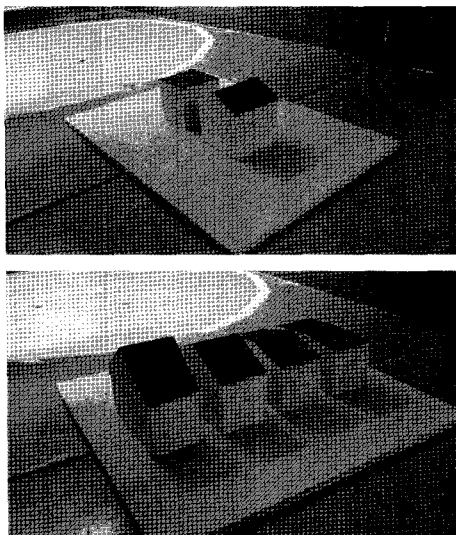
적설 실험 동안 중탄산나트륨을 일정한 속도로 공급해 주는 역할을 하는 장비로써 본 실험에서는 토출량 실험을 통해 초당 2cc로 공급했다. <그림 4>는 더스트 제너레이터를 나타내고 있다.

4. 검증실험

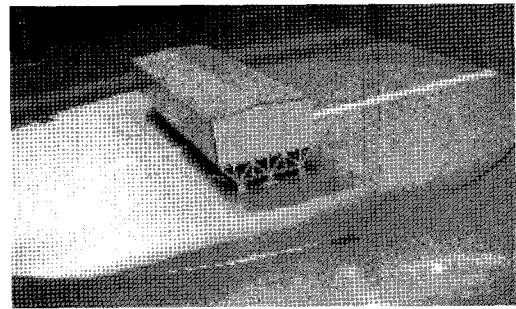
설풍동 성능실험을 위해 옥상 적설실험과 Snow drift현상 실험을 실시하였다. 옥상적설실험은 바람의 강약에 따라 수평지붕과 산형지붕의 지붕에 쌓이는 형상에 대해서 실험하였고 산형지붕의 각도를 4가지로 만들어 각도별로 쌓이는 형상에 대해 실험하였다. Snow drift 현상을 재현하기 위해 고상식 일본의 남극 Showa 기지를 1/50 스케일로 축소한 모델을 놓고 실험을 실시하였다

4.1 실험모형

옥상 적설 실험 모형은 두 가지의 모형군을 가진다. 첫 번째는 풍속을 다르게 하였을 때 옥상의 적설 형태를 알아보기 위한 수평지붕 및 산형지붕을 만들었다. 모형은 모두 1/50 스케일의 축척을 사용하였으며 모형의 재질은 발사를 사용하였다. <그림 6>은 옥상 적설 실험 모형사진을 나타낸다. 실험에 사용된 snow drift 현상 실험 모형은 고상식 일본의 남극 Showa 기지를 1/50 스케일로 제작한 것이다. 이는 D. H. Kim의 연구와 실험 결과 비교를 통하여 전북대학교의 설풍동의 성능을 확인하고자 한 것이다. <그림 7>은 일본 남극 Showa 기지 실제 도면 및 모형을 나타낸 것이다.



<그림 6> 옥상 적설 실험 모형사진

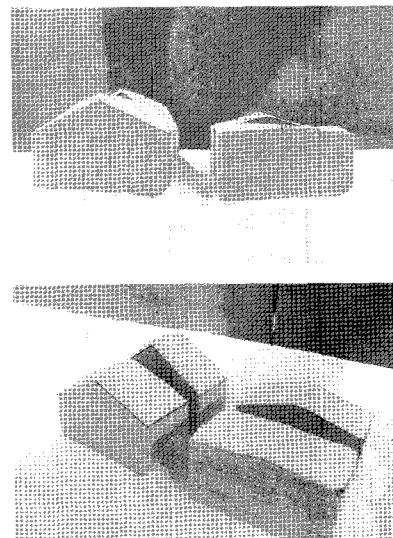


<그림 7> 일본 남극 Showa 기지 모형

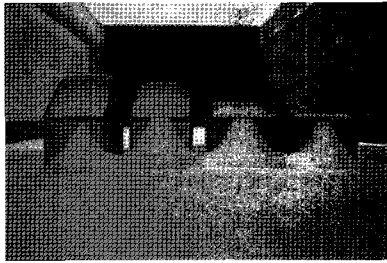
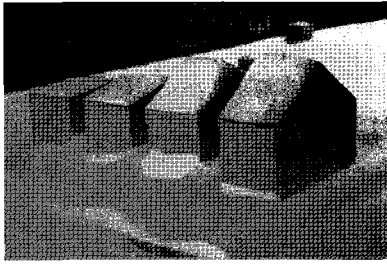
4.2 실험결과

(1) 옥상적설 실험

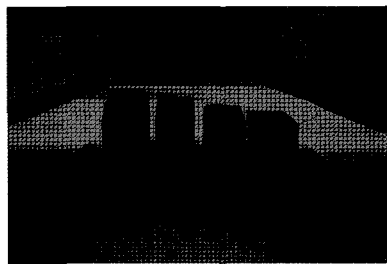
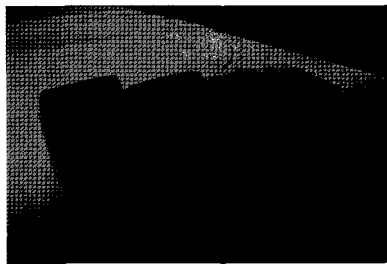
적설깊이를 나타내기 위해서 적설깊이의 측정점을 풍상측, 풍하측 각각 5열로 나누고 열별로 평균을 냈으며 평균값을 높이별로 표시하고 최대지점과 최소지점을 나타내었다. 실험은 퇴적계수와 쌓이는 높이를 고려하여 조건을 변경해가며 실험하였다. 노즐을 바닥에서 40cm 높이에 설치하고 노즐에서 2.6m 떨어진 지점에 모형을 설치하고 풍속 0.5m/s에서 실험을 실시하였다. 이후 퇴적계수 및 적설 높이 고려해 노즐높이를 50cm로 높이고 거리를 달리 하며 측정하였다. <그림 8>은 풍속 0.5m/s일때의 모형주변에 쌓인 적설형태를 보여주고 있다.



(a) 배치형태 : 2열, 노즐에서 떨어진 거리 : 2.4m



(b) 배치형태 : 1열, 노즐에서 떨어진 거리 : 2.4m



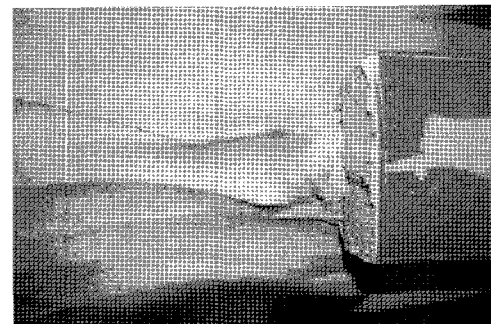
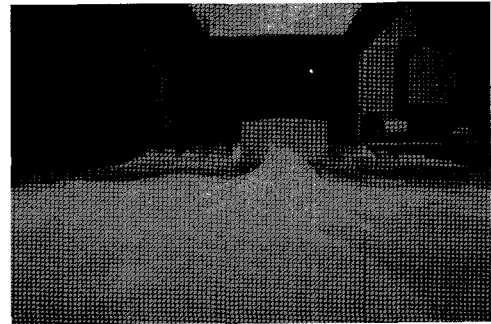
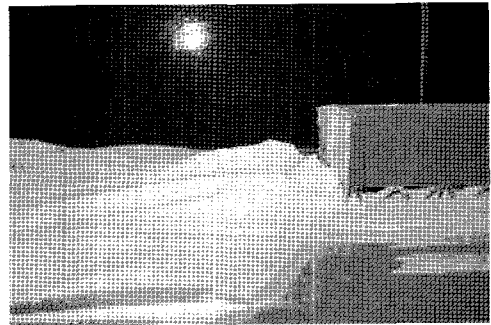
(c) 배치형태 : 1열, 노즐에서 떨어진 거리 : 2.6m

〈그림 8〉 지붕의 적설형태

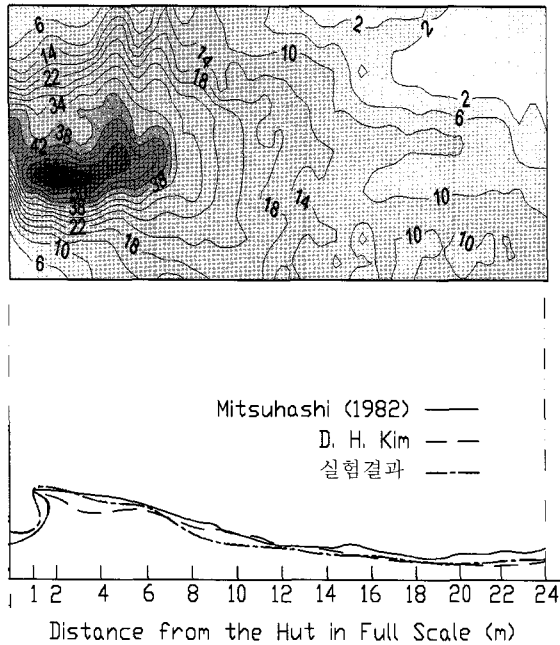
(2) 남극기지

Snow drift현상에 대한 실험은 앞서 찾은 최적 위치인 2.6m에 모델을 설치하고 실험을 실시한 후 결과를 D. H. Kim의 연구결과와 비교를 통해 설풍동의 성능평가를 하였다. 1/50스케일의 고상식 일본 남극 Shyowa 기지 모델의 주위에 쌓인 눈의 형태를 분석한 결과 Mitsuhashi(1982)가 실제로 남극에서 측정한 적설형태와 아주 흡사함을 알 수 있다. 또한

D. H. Kim의 연구결과와 아주 흡사함을 알 수 있다. 이로써 전북대학교 풍동연구실의 소형풍동은 설풍동의 성능을 만족한다고 볼 수 있다. 〈그림 9〉는 Snow drift현상의 성능 실험 사진을 나타내고 있다. 〈그림 10〉은 Mitsuhashi(1982)의 실측데이터와 D. H. Kim 연구 결과 그리고 연구실에서 수행한 실험 결과를 적설 깊이로 비교하여 나타내었다.



〈그림 9〉 남극기지 주변의 적설형상 사진



〈그림 10〉 Mitsuhashi(1982)의
실측데이터와 D. H. Kim 연구 결과와
적설풍동실험결과와 적설 깊이로 비교

5. 결론

매년 국내에서 발생하는 건축물의 다양한 폭설피해를 예방하기 위해서는 정확한 적설형태와 적설량을 구해야 한다. 본 연구에서는 이러한 적설실험을 위한 모의눈의 선정과 모의눈을 이용한 시설물(남극기지, 지붕면)에 대한 적설형태 대한 평가를 실시하였다.

- 참고문헌 -

1. Taylor DA, Schriver WR. (1980) "Unbalanced snow distributions for the design of Arch-Shaped roofs in Canada", Canadian Journal of Civil Engineering Vol. 7, No. 4, pp. 651-656
2. Isyumov N, Davenport AG. (1974) "A probabilistic to the prediction of snow loads", Candion Journal of Civil Engineering, Vol. 1, pp. 28-49
3. Isyumov N, Mikitiuk M. (1989) "Wind tunnel model tests of snow drift on a two-level flat roof", Proceedings of the 6th U.S. National Conference on Wind Engineering, Vol. II, pp. A6-47 to A6-58
4. Finney EA. "Snow control on the highways", Michigan Engineering Experiment Station bulletin No. 57, pp.1-62
5. 遠藤 明久, 苫米地(1984), "活性白土を用いた風洞實驗による 水平遅棚, 山形遅棚の 屋上積雪形状", 日本建築學會 構造系 論文報告集, 357互
6. Kim DH, Kwok KCS, Rohde HF.(1989), "Wind tunnel model study of Antarctic snowdrifting", Proceedings of 10th Australasian Fluid Mechanics Conference, Vol. 2, pp. 9.35-9.38
7. Mellor M. (1965), "Blowing snow", Cold Region Sciences and Engineering, Part III, A3C, U.S. Army Cold Regions Research And Engineering Laboratory.
8. Oura, H.(1966) "Studies on blowing snow I" Physics of Snow and Ice, International Conference on Low Temperature Science, Sapporo, Jappan