

풍동실험을 이용한 3차원 산악지형의 풍속할증평가

Estimation of Topographic Effects over 3-Dimensional Hills through Wind Tunnel Tests

조강표*·정승환**·조기성**
Cho, Kang-pyo · Jeong, Seung-hwan · Cho, Gi-sung

ABSTRACT

This paper presents investigation of topographic effects over isolated 3-dimensional hills through wind tunnel experiments in a boundary layer wind tunnel. Topographic models having five different slopes of 5.71°, 11.31°, 16.70°, 21.80°, and 26.57°, which were based on KBC(2005), were taken into account in the study. The maximum topographic factor and the range of topographic effect from the experiment were compared with those from worldwide major codes and standards, such as ASCE-7-02, AS/NZS-1170.2:2002, ISO4354(1997), and KBC(2005). From the comparison of major codes and standards, in the vertical region of topographic effect, the gentler the slope was, the more different the topographic factors and ranges of topographic effect were, but the steeper the slope was, the more similar they were. It was found from the experimental study that the region of topographic effect in the slope in the across wind direction was greater than the regions of major codes and standard. Also, the gentler the slope was, the larger the topographic factor from the experiment was than the factors of major codes and standards.

Keywords: Wind tunnel tests, Region of topographic effect, Hills, Topographic factors

1. 서론

경사지 및 산악지형에서 기류는 평지와는 달리 지형효과로 인해 매우 다양하게 변화한다. 지형에 따라 돌풍이 발생하거나, 평지에 비해 풍속이 증가하거나 혹은 차폐효과로 인해 감속하는 등 여러 가지 현상이 발생할 수 있다. 일반적으로 경사지 또는 산악지형에서는 일정 범위 안에서 풍속이 증가한다. 풍하중이 풍속의 제곱에 비례하는 것을 감안할 때 풍속할증현상은 지형효과를 갖는 지형에 건설되는 구조물의 내풍 설계에서 정확히 평가해야 할 요소이다. 따라서 풍속할증현상에 대해 국내외에서 많은 연구자가 관심을 가지고 연구를 진행하여 왔다(김무진 등, 1999; Shuyan 등, 2006; Ishihara 등, 1999; Taylor 등, 1984; Bowen, 1983).

최근 이상기후에 의한 강풍 또는 태풍이 자주 발생하여 많은 인적, 물적 피해가 발생하고 있다. 특히 산악 지형에 있는 송전철탑과 같은 기간시설물들이 지형효과로 인한 풍속할증에 의해 예상하지 못한 풍하중을 받

* 정희원 · 원광대학교 건축학부 조교수, Ph.D., Email: kpcho@wonkwang.ac.kr

** (주)CKP풍공학연구소 수석연구원, Ph.D., Email: manager@ckpwind.com

*** 학생회원 · 원광대학교 대학원 건축공학과 석사과정 Email: zelez@wonkwang.ac.kr

아 피해를 입는 일이 잦아지고 있다(조강표와 홍성일, 2006). 주요 풍하중 기준(The American Society of Civil Eng., 2002; Standards Australia, 2002; ISO, 1997 대한건축학회, 2005)에 의하면 구조물의 내풍 설계시 풍속할증계수를 설정하여 풍하중에 반영하고 있다(조강표와 홍성일, 2006). 주요 풍하중 기준에서 제시하고 있는 산악지형에 적용 가능한 풍속할증계수는 2차원 또는 3차원 산악지형모형실험을 통하여 제안되었다. 그러므로 각 기준의 풍속할증계수를 실제 산악지형에 그대로 적용하는 경우에는 주의를 기울여야 한다(조강표와 홍성일, 2006; 조강표 등, 2006).

본 연구에서는 산악지형에 의한 풍속할증효과를 풍동실험을 통하여 조사하고자 한다. 또 그 결과를 주요 풍하중 기준에서 제시하고 있는 풍속할증계수 및 풍속할증적용범위와 비교하고 고찰하고자 한다.

2. 풍동실험 개요

2.1 3차원 산악지형의 제원

풍동실험을 수행하기 위해 제작한 실험모형은 그림1과 같이 원뿔이고 대칭의 형태이고, KBC(2005)의 경사 분류와 동일하게 경사Ⅰ($\theta=5.71^\circ$, $\tan\theta=0.1$), 경사Ⅱ($\theta=11.31^\circ$, $\tan\theta=0.2$), 경사Ⅲ($\theta=16.70^\circ$, $\tan\theta=0.3$), 경사Ⅳ($\theta=21.80^\circ$, $\tan\theta=0.4$), 경사Ⅴ($\theta=26.57^\circ$, $\tan\theta=0.5$) 등 5가지의 산악지형모형을 제작하였다. 그림1에서 H 는 산의 높이로 120mm이다. L_u 는 산의 정상으로부터 $H/2$ 내려온 높이의 경사면까지의 수평거리이고, θ 는 L_u 와 산의 정상을 연결하여 생기는 각이다.

2.2 풍동실험의 개요

풍동실험은 현대건설기술연구소의 대형 경계층 풍동에서 수행하였다. 그림2는 5가지의 실험모형 중 경사Ⅲ의 실험모형이 설치된 전경을 보여주고 있다. 풍동실험은 그림2와 같이 조도블록과 spire를 설치하지 않은 smooth flow에서 수행하였다. 실험풍속은 높이 140mm에서 4.0m/s로 하였고, 평균풍속과 난류강도의 연직분포는 그림3과 같다. 평균풍속의 연직분포는 $\alpha=0.1$ 에 근사하였다.

계측지점은 원뿔의 대칭 형태이어서 그림4와 같이 41개의 점에서 풍속을 계측하였다. 이중 12개점들은 실험결과와 주요 풍하중 기준의 풍속할증계수를 비교하기 위해 선정된 위치이다. 계측높이는 10mm~30mm는 5mm 간격으로, 30mm~80mm는 10mm 간격으로, 80mm~200mm는 20mm 간격으로, 그리고 230mm, 260mm, 320mm, 400mm으로 총 20개이다. 풍속계측시간은 계측높이마다 100Hz로 10초간 열선풍속계(Hot-wire)를 이용하여 계측하였고, 풍속의 평균값을 이용하여 풍속할증계수를 구하였다.

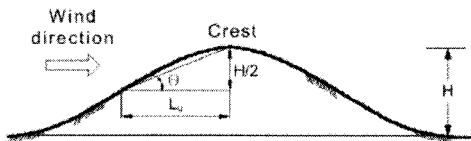


그림 1 3차원 산악지형의 형태

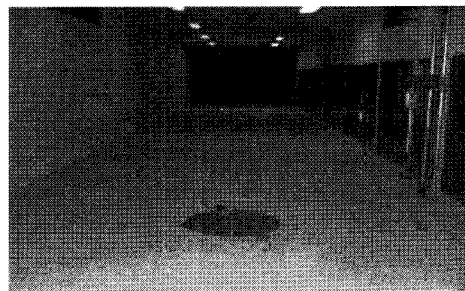


그림 2 경사Ⅲ의 산악지형모형의 풍동 내 전경

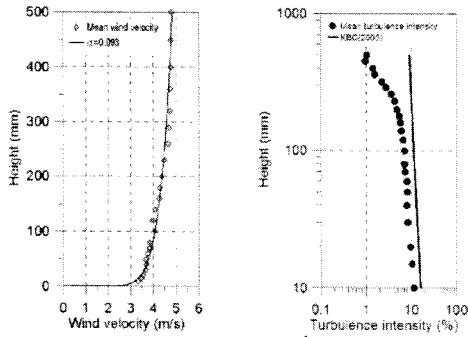


그림 3 기준평균풍속과 기준난류강도의 연직분포

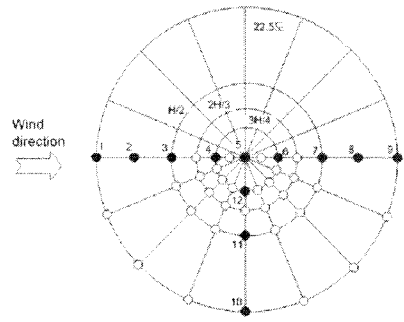


그림 4 3차원 산악지형의 풍속계측 지점

표 1 산의 정상부에서 $z/H=0.08$ 일 때의 풍속할증계수의 비교

	경사 I	경사 II	경사 III	경사 IV	경사 V
Experiment	1.57	1.75	1.79	1.81	1.62
KBC(2005)	1.21	1.40	1.58	1.58	1.58
ASCE-7-02	1.22	1.40	1.49	1.49	1.49
AS/NZS1170.2-2002	1.15	1.29	1.42	1.54	1.71
ISO 4354:1997	1.30	1.56	1.65	1.61	1.57

3. 3차원 산악지형의 풍동실험 결과

풍속할증계수는 실험모형의 각 풍속계측지점에서 높이에 따라 계측한 풍속과 모형을 제외하고 모형의 중심이 놓였던 위치에서 높이에 따라 계측한 풍속의 비로 정의하였다. 따라서 1.0보다 큰 경우에는 지형효과에 의해 풍속이 증가된 경우이고, 1.0보다 작은 경우에는 지형에 의한 차폐효과로 인해 풍속이 감소한 것이다.

풍동실험결과, 3차원 산악지형에서의 다양한 풍속할증현상이 발생하는 것을 확인할 수 있었다(조강표 등, 2006). 풍속할증계수는 산 정상 부근에서 최대값을 얻었고, 각 경사에 따라 표1의 Experiment와 같이 평가되었다. 또한 풍직각방향의 경사면에 위치한 그림4의 10,11번의 점에서의 풍속할증계수는 풍방향의 같은 높이의 위치(1,3번)에서보다 크게 평가되는 것을 확인할 수 있었다(조강표 등, 2006). 그림5-(a)~그림5-(c)를 보면 10번의 위치에서 $z/H=0.08$ 일 때 약10~20%의 풍속이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 산악지형의 풍속할증현상은 바람이 임의의 방향에서 불기 때문에 산의 전 지역에 걸쳐 발생할 수 있다. 또한 산의 높이(H)의 3.5배의 높이까지 지형효과로 인해 풍속이 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 실험결과를 바탕으로 하여 3차원 산악지형의 풍속할증영역을 그려보면 그림6과 같이 산의 전 지역에 걸쳐 3.5H되는 높이까지의 영역을 정할 수 있었다(조강표 등, 2006).

4. 고찰

풍동실험결과를 바탕으로 얻은 풍속할증계수와 풍속할증영역을 주요 풍하중 기준과의 풍속할증계수 및 풍속할증영역과 그림4의 12개 지점에서 비교하였다.

4.1 풍속할증계수

표1은 산정상부에서 $z/H=0.08$ 일 때의 주요 풍하중 기준과 실험값의 풍속할증계수를 비교한 것이다. 경사 I의 경우, 표1을 보면 산의 정상에서 $z/H=0.08$ 일 때 Experiment는 1.57로 KBC(2005), ASCE와 ISO보다는 약30%정도 더 크게 평가되었고, AS/NZS보다는 약40%가 더 크게 평가되었다. 경사IV까지 Experiment는 주요 풍하중 기준의 풍속할증계수보다 큰 값을 보였지만, 경사V에서는 AS/NZS의 풍속할증계수가 1.71로 Experiment보다 약 10% 크게 평가되었다.

그림5는 그림4의 10번 위치에서의 풍속할증계수를 비교한 것으로, 10번의 위치는 풍직각방향의 경사면 중 산의 경사가 시작되는 위치이다. Experiment에서는 10번의 위치에서 5가지 경사에 대해 10~20%의 풍속이 증가하는 것으로 평가되었다. 반면에, 주요 풍하중 기준에서는 경사 I~경사III의 경우에 10번의 위치가 풍속할증적용범위 밖으로 풍속이 증가하지 않는 것으로 평가되고 있다. 그림5-(b)의 경사IV와 그림5-(c)의 경사V에서는 KBC(2005)의 풍속할증계수가 각각 1.0과 1.1로 평가되었다. KBC(2005)에서 경사IV의 10번의 위치는 풍속할증적용영역이 시작되는 경계면이어서 풍속할증계수가 거의 1.0으로 산정되었다. Experiment와 KBC(2005)에서 경사V의 10번의 위치에서 각각 1.2와 1.1정도의 풍속할증계수로 평가되었다.

4.2 풍속할증영역

여러 나라의 주요 풍하중 기준은 각기 다른 기호를 사용하며, 각기 다른 풍속할증적용범위를 정하고 있다(조강표와 홍성일, 2006). 주요 풍하중 기준과 풍동실험을 수행하여 얻은 풍속할증영역의 정량적인 비교를 위해 풍속할증적용범위의 수평방향범위는 L_u , 수직방향범위는 H 로 표시하였다. 그림7, 그림8, 그림9는 각각 경사III, 경사IV, 경사V일 때의 풍속할증영역을 비교한 것이다.

그림7의 경사III에서는 주요 풍하중 기준의 풍속할증적용영역은 모두 Experiment의 수평방향, 수직방향의 범위 내에 있었다. 그림8의 경사IV의 경우에는 KBC(2005)의 수평방향범위가 $2.0L_u$ 로 Experiment와 같은 범위가 되었으나 수직방향범위는 $3.5H$ 보다 작은 것으로 확인되었다. 끝으로 경사V의 그림9에서는 수평방향범위의 경우 KBC(2005)가 $2.5L_u$ 로 3차원 산악모형의 경사 시작 밖에서도 풍속이 증가하는 것으로 평가되어 Experiment를 초과하였다. 경사V의 경우에 AS/NZS는 $1.6L_u$ 로 다른 경사일 때의 범위($1.44L_u$)와는 다르게 산정되었다.

여러 나라의 주요 풍하중 기준으로 평가되는 풍속할증적용범위는 주로 H 와 L_u 에 의해서 경사가 변할 때마다 풍속할증적용영역이 변하게 된다. 하지만 풍동실험의 결과를 바탕으로 정한 풍속할증영역은 경사에 무관하게 일정한 범위였다.

경사 I, II에서는 풍동실험을 수행하여 얻은 풍속할증영역의 수평방향범위가 주요 풍하중 기준에서 제시하는 풍속할증적용범위를 초과하고, 경사III, IV V에서는 수직방향범위가 모두 초과하였다. 이는 주요 풍하중 기준으로 산정되는 풍속할증적용범위를 벗어나는 위치에서 풍속이 증가하여 구조물이 예상하지 못한 풍하중을 받아 구조물의 안전이 위협받을 수 있다는 것을 말해준다.

5. 결 론

본 논문에서는 3차원 산악지형에서의 풍속할증현상을 대해 주요 풍하중기준에서 제시하는 풍속할증계수를 검토하고, 풍동실험을 통해 얻은 풍속할증계수와 비교·검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론들을 도출하였다.

1) 풍동실험결과, 산의 전체지역에 걸쳐 산의 지표면에서 산의 높이의 3.5배되는 높이까지 풍속이 증가하는 것으로 평가되었다.

2) 주요 풍하중 기준에서 제시하는 풍속할증계수는 같은 높이이고 동일한 수평거리를 가진 위치라면 풍향에 상관없이 같은 값을 가졌기 때문에 풍향에 따라 변화하는 3차원 산지의 풍속할증현상을 적절하게 평가하지 못하고 있다.

3) 풍동실험결과, 주요 풍하중 기준의 풍속할증적용범위 밖에서도 풍속이 증가하여, 주요 풍하중 기준에 의해 산지에 건설되는 구조물이 예상치 못한 풍하중을 받을 수 있다.

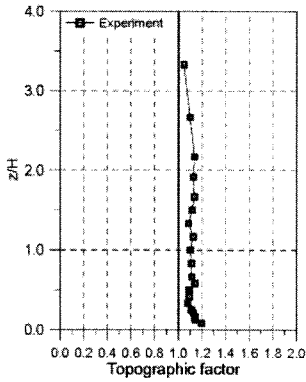
4) 풍동실험결과를 바탕으로 한 풍속할증영역은 경사에 상관없이 일정한 범위를 가진 반면에 주요 풍하중 기준에서는 경사에 따라 수직방향의 범위와 수평방향의 범위가 모두 변하는 것으로 확인되었다.

감사의 글

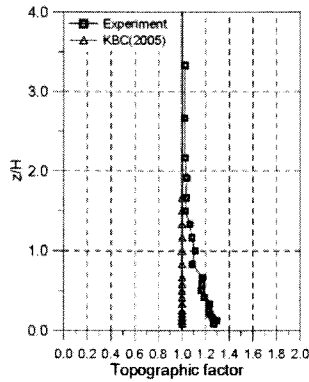
본 연구는 건설교통부 한국건설교통기술평가원의 “이상기후 대비 시설기준 강화” 연구단에 의해 수행되는 2005 건설기술기반구축사업(05-기반구축-D03-01)에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

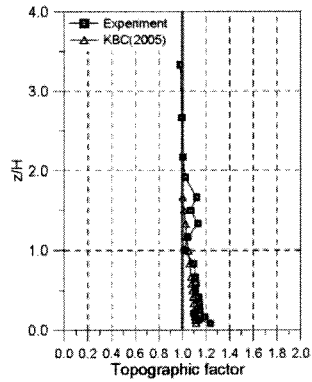
- 김무진, 김동우, 이석중, 하영철 (1999) 3차원 산지형의 풍속분포특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 학술발표논문집, 대한건축학회, 19(2), pp.211-216.
- 대한건축학회 (2005) 건축구조설계기준, 대한건축학회, 서울
- 조강표, 홍성일 (2006) 지형에 따른 풍속할증계수에 관한 세계 주요 풍하중 기준의 재고, 대한건축학회 논문집, 22(1), pp.27-34.
- 조강표, 홍성일 (2006) 대풍에 의해 송전철탑이 붕괴된 산악지형의 풍속할증, 대한건축학회 논문집, 22(2), pp.51-58.
- 조강표, 홍성일, 조기성 (2006) 3차원 산악지형의 풍속할증영향 검토, 대한건축학회 학술발표논문집, 대한건축학회, 26(1), pp.65-68.
- 조강표, 홍성일, 조기성 (2006) 3차원 산악지형의 풍속할증영향에 관한 연구, 한국풍공학회지, 10(2), pp.241-251.
- Bowen, A.J. (1983) The Prediction of Mean Wind Speeds above Simple 2D Hill Shapes, *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 15, pp.259-270.
- Ishihara, T. Hibi, K. (1999) A Wind Tunnel study of Turbulent Flow over a Three-dimensional Steep Hill, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamic*, 83, pp.95~107.
- ISO (1997) *ISO4354 Wind actions on structures*, Switzerland, Geneve
- Shuyang Cao Tamura, Tetsuro (2006) Experimental study on roughness effects on turbulent boundary layer flow over a two-dimensional steep hill, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94, pp.1-19.
- Standards Australia (2002) *Australian/New Zealand Standard™ Structural Design Actions(AS/NZS 1170.2:2002) Part: Wind actions*, Standards Australia International Ltd., Sydney
- Standards Australia (2002) *AS/NZS 1170.2 Supplement 1:2002 Structural Design Actions-Wind actions-Commentary*, Standards Australia International Ltd., Sydney
- Taylor, P.A. Lee, R. J. (1984) Simple Guidelines of Estimating Wind Speed Variation due to Small Scale Topographic Features, *Climatological Bulletin(Canada)*, 18(22), pp.3-32.
- The American Society of Civil Eng. (2002) *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, The American Society of Civil Eng., Reston.



(a) 경사 I의 경우



(b) 경사 IV의 경우



(c) 경사 V의 경우

그림 5 실험결과 및 주요 풍하중 기준의 풍속할증계수의 높이에 따른 비교(그림4의 10번 위치)

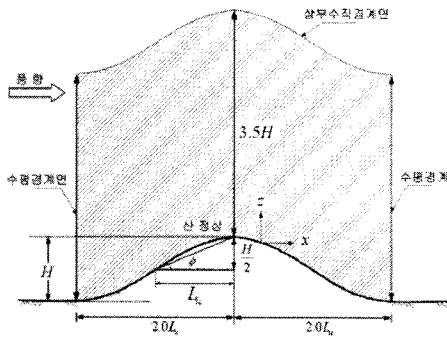


그림 6 풍동실험 결과를 바탕으로 정한 산악지형의 풍속할증영역

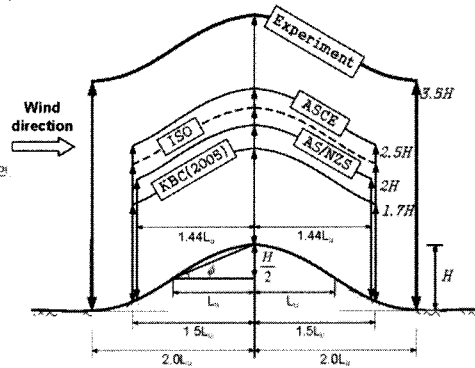


그림 7 경사 III일 때의 풍속할증영역의 비교

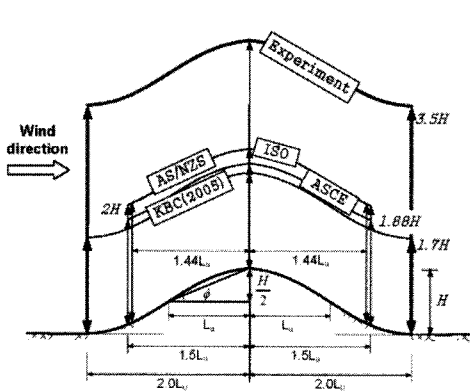


그림 8 경사 IV일 때의 풍속할증영역의 비교

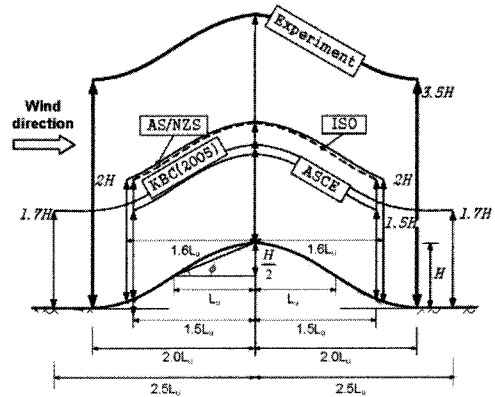


그림 9 경사 V일 때의 풍속할증영역의 비교