

대공간 구조물 폭설 재해사례 및 설하중 평가 최신기술

Snow Disasters and Snow Load Evaluation Methods for Large Spatial Structures



김 지 영*
Kim, Ji-Young



김 도 현**
Kim, Do-Hyun



방 부 형***
Bang, Bu-Hyung

1. 서 론

현재 대형 건축물의 구조설계 시 주로 풍하중 및 지진하중이 주요 설계하중으로 인식되고 있으나 설하중의 중요성에 대한 관심은 크지 않은 것으로 생각된다. 캐나다 등과 같이 눈이 많이 내리는 나라에서는 설하중에 의한 구조물의 피해가 종종 발생하기 때문에 대공간 지붕 구조물 등의 구조설계 시 설하중이 중요한 설계하중으로 고려되고 있다. 많이 알려지지 않았지만 우리나라에서도 설하중에 의한 재해발생 사례가 있으며, 최근 발생한 리조트 붕괴 사고를 계기로 폭설 및 태풍, 지진과 같은 기상이변에 대한 구조물 안전성 확보를 위해 국토교통부에서

건축물 하중기준 강화를 위한 관련 법규 개정예 착수하였다고 한다. 본 기사에서는 폭설 시 적설하중에 취약할 수 있는 대공간구조물의 국내외 피해사례를 살펴보고, 최근 해외에서 적용되고 있는 겨울철 폭풍설에 대한 실험 및 시뮬레이션과 같은 최신 기술동향을 소개하고자 한다.

2. 적설하중에 의한 국내 피해사례

우리나라에서 볼 수 있는 대표적인 눈피해의 사례는 비닐하우스, 온실 등과 같은 간이시설물의 붕괴이다. 그동안 비닐하우스의 적설하중 피해를 줄이기 위해 비닐하우스 구조개선 등의 노력이 이루어졌고, 그 결과, 강원 영동지역의 최근 폭설에서 비닐하우스 피해를 줄일 수 있었다고 한다. 간이 시설물에 대해서는 피해사례는 많이 알려지고 이에 따른 대비가 이루어진 반면, 구조물에 대한 국내의 설하중 피해

* 정희원, (주)대우건설 기술연구원 방재연구팀 책임연구원, 공학박사
** 정희원, (주)대우건설 기술연구원 방재연구팀 선임연구원, 공학박사
*** (주)대우건설 기술연구원 방재연구팀 전임연구원

에 대해서는 알려진 사례가 많지 않다. 대공간 구조물에 대한 대표적인 적설하중 피해사례는 2001년 잠실 올림픽공원 체조경기장의 지붕 피해가 있다. 올림픽공원 체조경기장 지붕막 구조물은 강재 케이블로 지지되는 철제 원형구조물 위에 막재를 얹는 공법으로 시공되었다. 2001년 폭설 시 지붕을 지탱하고 있던 와이어가 눈의 무게를 견디지 못해 끊어지면서 지붕막이 일부 찢어지고 지붕의 중심이 심하게 뒤틀어졌다.



〈그림 1〉 올림픽공원 체조경기장 지붕피해



〈그림 2〉 험프리 메트로돔 피해 전 전경



〈그림 3〉 험프리 메트로돔 지붕 파손사진

3. 적설하중에 의한 해외 피해사례

겨울철 폭풍설에 의한 대표적인 대공간 건축물의 최근 피해사례로 2010년 12월 미국 미네소타주에 있는 휴버트 H. 험프리 메트로돔(Hubert H. Humphery Metrodome) 지붕붕괴사례가 있다. 험프리 메트로돔은 1982년 개장한 세계 최초의 공기주입식 돔이며, 1988년 개장한 도쿄 돔의 모델이 되기도 하였다. 이 돔구조물은 이중막 구조로, 지붕구조물의 높이는 57m이다.

사고 당시 건물내부온도 조절 및 스팀 워터를 이용하여 지붕의 눈을 녹이기 위해 노력하였지만 3일 간의 강풍과 폭설로 인해 돔 지붕 구조물이 2010년 12월 12일에 붕괴되었다. 돔 지붕구조물 붕괴원인은 조사결과 눈과 얼음이 미끄러져 지붕구조물의 외곽에 설치된 고리형 보에 큰 충격을 발생시킨 것으로 밝혀졌다. 이로 인한 패널 파손이 내부 공기압의 손



〈그림 4〉 험프리 메트로돔 사고후 내부전경



〈그림 5〉 BC Place Stadium 지붕 붕괴

실을 일으켰고, 공기막이 주저앉게 되었다. 이 사고를 통하여 막구조물은 겨울 폭풍설에 대하여 주기적인 안전점검 및 유지관리가 필요하다는 결론에 도달하였다.

이외에도 적설하중에 의한 피해가 폭설이 많은 지역에서 주로 보고되었다. 캐나다 밴쿠버의 BC Place Stadium도 공기막구조의 돔 구조물로, 험프리 메트로돔과 비슷한 시기에 건설되었으며, 2007년 1월 5일에 적설하중에 의한 지붕구조의 부분적인 파손이 발생하였다.

4. 적설하중 평가 최근기술동향

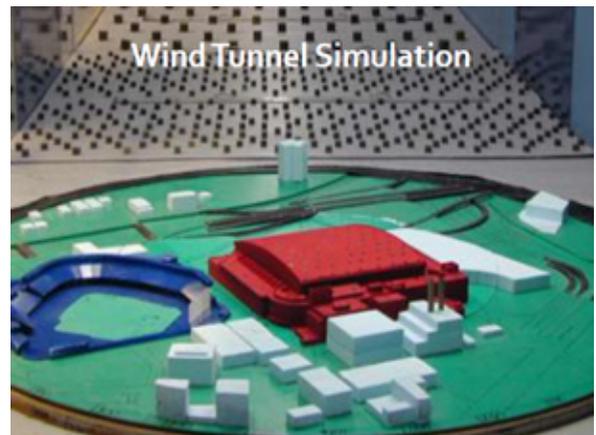
겨울철 폭풍설과 같이 눈과 바람의 영향에 대하여 대부분의 건축물 구조설계기준에서는 하중조합으로 고려할 수 있도록 기준을 제시하고 있다. 또한 적설하중시 풍하중에 의한 눈의 이동을 지붕유형별로 개괄적인 설계기준으로 제시하고 있다. 그러나 대공간 구조물의 지붕유형에 따른 눈과 바람의 동적인 영향은 설계기준만으로 고려되기 어려운 측면이 있다.

1980~90년대부터 미국, 캐나다 그리고 유럽의 일부 선진국들을 중심으로 건물 지붕에 대한 적설하중(Snow load)의 영향이 논의되어 왔다. 그리고 현재에도 지속적인 건물의 대형화와 함께 방재 대책에 대한 국제적인 관심이 날로 증가하면서 적설하중에 대한 안전문제는 점점 더 중요시되고 있다. 심지어 캐나다 기준을 비롯한 몇몇 기준에서는 방재부문에서 설계 시 적설하중에 대한 영향 평가를 포함시킬 것을 의무화하고 있다. 단지 국가별 기상 특징에 따라 기준에서 얼마나 많은 변수를 고려할 것인가에 대한 차이가 있다.

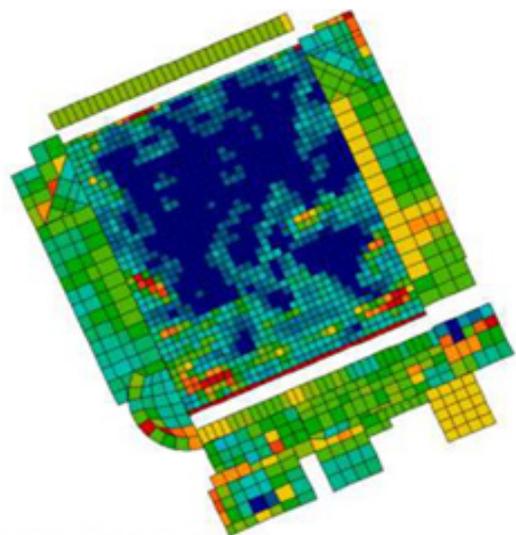
1990년대에는 주로 모형을 이용한 풍동실험을 통해 적설하중에 대한 연구가 수행되어 왔으나 각 기관마다 충분한 설비시설을 갖추기 어렵고, 실험 시에는 측정위치마다 속도 센서를 부착해야 하는 등의 비용적인 어려움이 있었다. 그러나 최근 풍향을 고려한 적설량을 예측하는 수학적 모델의 발전과 유한

요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션이 빠르고 정교화 되면서 실험을 대체하고 있으며, 이 두가지 방법을 함께 이용하여 더욱 정확하고 효율적인 대책 수립이 가능해지고 있다.

적설하중의 구조적 영향에 대한 예측은 대표적으로 기상변화 데이터를 이용해 전체 관심영역의 최대 평균 적설하중 예측과 국부영역에 대한 극한 조건에서의 적설하중 예측으로 구분된다. 이 때 기상변화 데이터에는 시간당 단위면적에서의 적설량뿐만 아니라 일조량과 복사에너지, 건물의 열손실 데이터, 눈의 용융 속도 등이 포함되어 예측 시뮬레이션에 반영된다. 풍동실험에서 다양한 시나리오에 대한 관심



〈그림 6〉 적설하중 평가용 풍속측정 풍동실험 (캐나다 RWDI 사)



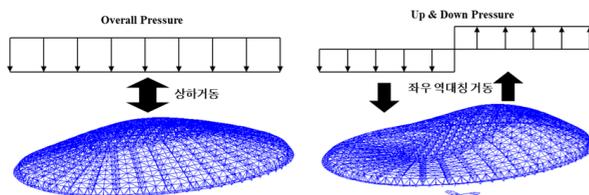
〈그림 7〉 유한요소법을 이용한 적설하중 계산 (캐나다 RWDI사)

영역의 풍속 정보를 취득하고, 이를 이용하여 유한 요소법을 통한 적설 시뮬레이션을 수행함으로써 적설하중을 예측하고 있다. 더불어, 적설하중 예측결과에 따라 필요시 방재대책을 수립하기도 한다. 이러한 엔지니어링 결과를 바탕으로 구조설계 시 전체 지붕 구조물 및 특정 부위의 상세설계 등을 수행한다.

5. 풍하중 평가

해외 기준에서는 폭설 시 강풍을 동반하는 경우를 반영하기 위해 설하중과 풍하중의 조합을 제시하는 사례가 있다. 안전한 설하중 설계를 위해서는 설하중 예측과 함께 풍하중에 대해서도 정확한 예측이 필요하다. 기준에서는 대표적인 지붕형상에 대한 풍하중만을 제시하고 있으므로 대표형상과 상이한 지붕형상에 대해서는 별도의 풍동실험을 수행하도록 규정하고 있다. 대공간 구조물에 바람이 작용하게 되면 그림 8과 같이 다양한 풍하중 패턴이 발생할 수 있으며, 이러한 풍하중 패턴은 다점풍압동시측정 풍압실험과 풍압상관성을 고려한 하중영향 해석을 통해 평가된다.

폭설 시 발생할 수 있는 설하중의 분포 패턴을 구하고, 강풍에 의한 풍하중 패턴을 산정하여 조합함으로써 경제적이면서도 안전한 폭풍설 대비 구조설계가 가능할 것으로 생각된다. 이와 아울러 기상데이터의 분석을 통해 해당 지역의 폭설에 대한 특성과 적설량을 확률적으로 예측하고, 폭설 시 풍향-풍속에 대한 예측을 수행함으로써 재현기간별 폭풍설 하중레벨을 추정하는 것도 중요하다. 이러한 확률-통계적인 분석을 통해 시설물 사용연한 내에 적절한 안전율이 확보된 구조물의 설계가 가능할 것으로 사료된다.



〈그림 8〉 대공간 구조물의 구조설계용 풍압패턴

6. 맺음말

최근의 사고로 인해 풍하중 및 지진하중과 아울러 설하중도 중요한 설계 요소로 대두되었다. 특히, 설하중은 태풍과 같이 거의 매년 발생하므로 시설물의 피해를 야기할 수 있는 가능성이 높다. 따라서 구조설계 시 유의하여 설하중을 반영할 필요가 있으며, 강풍이 동반된 폭설의 경우를 대비하여 풍하중과 조합된 설하중 설계방안도 요구된다. 대공간 구조물의 설하중 및 풍하중의 패턴은 기준으로만 정하기 어려우므로 풍동실험 및 해석 시뮬레이션을 통해 정확한 풍하중 및 설하중 패턴을 구하는 방법이 사용되고 있다. 향후 자연재해에 대한 대공간 구조물의 안전 확보를 위해 풍하중 평가용 풍동실험과 아울러 설하중에 대한 실험적 및 해석적 평가가 적극 활용될 필요가 있다고 사료된다. 그리고 모든 지붕 구조물, 특히, 모든 가시설물에 대해 풍동실험 및 시뮬레이션을 수행할 수는 없으므로 대표 시설물에 대한 폭풍설 영향 연구를 통해 설계시방을 마련하는 것도 중요하다라고 생각된다.

References

1. Scott L. Gamble, Will W. Kochanski and Peter A. Irwin(1992), "Finite area element snow loading Prediction Applications and Advancements", Journal of wind Engineering and Industrial Aerodynamicis, 41-44.
2. 대한건축학회(2009), "건축구조기준".
3. ASCE(2010), "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures(ASCE/SEI 7-10)".