FOCUS

내풍 방재 시설물에 대한 태풍 위험도 평가

함 희 정
강원대학교 건축공학과 교수
heejham@kangwon.ac.kr

이 승 수
충북대학교 토목학부 교수
joshua@cbnu.ac.kr

이 영 규
(주)큐벌솔루션 기술연구소장
youngQLee@cuber.co.kr

1. 들어가며

2000년 이후 매미, 루사, 곤파스와 같은 태풍은 도시 방재시설물에 많은 바람 피해를 유발 시켰다.

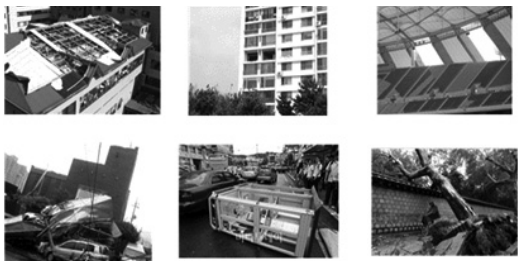

그림1. 최근 태풍에 의한 도시시설물의 피해

Knutson 등[1]에 의하면 미래에는 도시 인구집중화 현상이 더욱 심화되고 지구온난화로 인하여 강한 풍속의 태풍이 출현할 것으로 예상되며, 이로 인한 건축물과 지상 시설물의 피해는 현재보다 더 많이 늘어날 것으로 예측되고 있다.

선진국의 경우[2),3)] 자연재해의 피해 경감을 위하여 발생 피해를 사전에 예측함으로써 예방 및 대비를 도모하고, 응급 대응 및 복구의 효율성 제고를 목적으로 한 과학적인 방법론 개발 및 연구를 진행하고 있다. 그러나 국내의 경우[4)] 자연재해 중 태풍으로 발생한 강풍에 대한 내풍 방재 시설물의 피해 예측에 대한 연구는 매우 미흡하다. 이에 방재관련 전문가들에게 도움을 주고자 태풍으로 발생하는 태풍 위험도(typhoon risk)를 평가하는 방법론을 건축물을 중심으로 소개하고자 한다.

2. 확률적 태풍 위험도 평가에 대한 이론적 배경

2.1 태풍 위험도

Li와 Ellingwood[5)]에 의하면 태풍으로 발생한 강풍에 의한 건축물의 파괴확률 즉 위험도는 (1)식과 같이 태풍 위험 곡선과 건축물의 취약도 곡선을 컨벌루션(convolution)하여 얻을 수 있다.

$$P_f = \int_0^\infty gx(v) \bullet Fr(v)dv \quad (1)$$

여기서 gx(v)는 태풍으로 인한 강풍의 확률밀도함수 즉 태풍 위험이며 Fr(v)는 주어진 임의의 풍속 v 발생 시에 건축물이 파괴될 수 있는 조건적 확

률 즉 강풍 취약도를 의미한다.

2.2 태풍에 의한 강풍 위험

Li[6]에 의하면 태풍에 대한 위험 평가 시 평가하고자하는 특정 위치의 태풍발생에 관한 통계값이 적어 연 최고풍속에 대한 회기분석을 통한 풍속 산정방법을 적용할 수 없다. 이에 일반적으로는 기후학적 특성에 대한 확률분포 모형을 통하여 이들 태풍을 모사한 후 바람장 모형(wind field model)을 적용하여 해당 위치의 풍속을 추정하고 있다.
열대성 저기압인 태풍 및 허리케인에 대한 풍속 추정모형은 여러 연구자들[7),8)]에 의하여 연구되었다. 이들 방법론은 기본적으로 다음과 같이 세가지 절차로 정리될 수 있다. 1) 선별된 태풍을 표본으로 기후학적 통계치인 중심 기압깊이, 이동방향, 이동속도, 최단 접근거리, 태풍의 연간 발생을 파악한다. 2) 이들 기후학적 통계치를 표현할 수 있는 통계적 모형을 파악한 후 몬테카를로 모사기법을 이용하여 태풍을 발생시킨다. 3) 바람장 모형을 적용하여 지상 10m에서의 풍속을 산정한다.

(1)식에서 지상 10m에서의 풍속의 위험 gx(v)는 (2)식에 대한 확률밀도함수인 (2)식으로 평가할 수 있다.

$$gx(v) = \left(\frac{av^{a-1}}{b^a}\right)\exp\left(-\left(\frac{v}{b}\right)^a\right) \qquad (2)$$

여기서 a와 b는 웨이블 분포의 매개변수이다.

2.3 건축물의 강풍 취약도

(1)식에 나타난 취약도 $Fr(v)$는 시설물에 대한 내풍 성능파악에 있어서 매우 중요한 것으로, 특정한 강풍(예: 다양한 재현기간의 풍속)에 대한 시설물의 성능을 평가하거나, 반대로 시설물이 성능이 대응할 수 있는 태풍의 강도를 판단하는데 사용될 수 있다.
건축물의 취약도는 Kondo 등[3)]에 의하면 일반적으로 (3)식과 같이 로그정규누적분포의 형태로 모형화 될 수 있다.

$$Fr(y) = \Phi\left[\frac{ln(y) - m_R}{\zeta_R}\right] \qquad (3)$$

여기서 $\Phi(\cdot)$정규분포함수, m_R는 모평균, ζ_R는 $ln(R)$의 공분산을 나타낸다.
일반적으로 (3)식에 나타난 시설물 구조체 및 외장재에 대한 모평균과 모분산은 평가하려는 해당시설물과 비슷한 시설물의 피해정도로부터 얻거나 재료 및 구조실험, 전산시뮬레이션을 이용한 구조해석으로부터 얻은 시설물 구조체 및 부재의 저항성능과 시설물에 작용하는 풍하중을 몬테카를로 모사법으로 비교하여 얻을 수 있다.

3. 건축물에 대한 태풍 위험 및 취약도 모형

3.1 태풍 위험 모형

그림2의 9개 분석 지점에서 태풍 모사를 수행하였으며, 그에 따른 태풍 풍속의 웨이블 확률밀도함수 즉 태풍 위험을 그림3에 보이고 있다. 그림으로부터 남해안 분석지점(지점 4, 5, 6, 7)에서의 확률밀도 함수의 형태가 매우 비슷함을 알 수 있다.

3.2 건축물 강풍 취약도 모형

태풍 위험도를 평가하기 위하여서는 시설물의 취약도가 필수적으로 구축되어야 한다. 취약도를 구축하는 방법으로는 일반적으로 경험적 방법 및

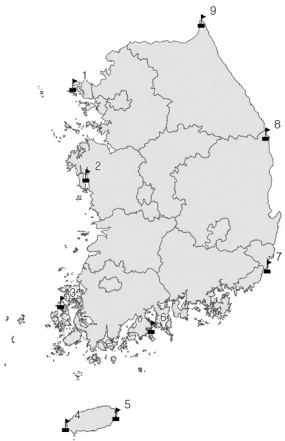

그림2. 태풍 모사를 위한 9개 분석 지점

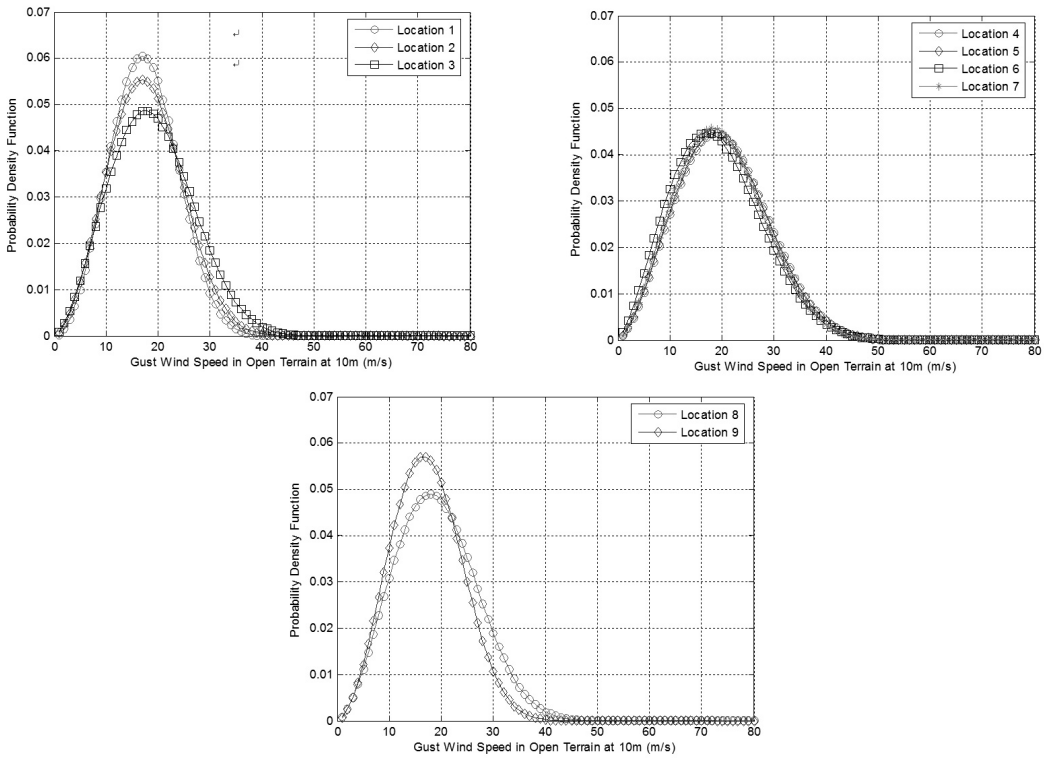

그림3. 태풍 모사에 의한 풍속의 확률밀도함수

해석적 방법이 존재한다. 본 기고에서는 몬테카를로 모사기법을 이용한 해석적 취약도 구축방법을 소개한다.

(1) 건축물 모형

본 예에서는 강풍취약도를 3가지 지붕모양(박공, 편지붕, 다중박공)에 동일한 처마높이를 갖는

12m x 18m 및 18m x 24m의 평면 크기를 갖는 S1 ~ L6로 명명된 12가지 형태를 갖는 산업용 건축물로 나누어 평가하였다. 시설물 L1 ~ L6은 표 1에 보이는 것과 시설물 S1 ~ S6과 같은 지붕형태, 지붕물매, 지붕처마를 갖고 있으나, 시설물의 평면이 시설물 S1 ~ S6보다 2배 크고 30cm ~ 50cm 높은 용마루를 갖는다. 그림4는 시설물 L1에 설치된 개구부의 위치를 나타낸다.

표1. 기본 시설물 S1 ~ L6의 크기와 특성

특성	산업용 건축물					
	S1 (L1)	S2 (L2)	S3 (L3)	S4 (L4)	S5 (L5)	S6 (L6)
지붕 형태	박공	박공	편 지붕	다중 박공	박공	박공
지붕 물매	6°	10°	5°	10°	6°	10°
용마루 높이(m)	7.6 (7.9)	8.1 (8.6)	8.0 (8.5)	8.1 (8.6)	7.6 (7.9)	8.1 (8.6)
처마 높이(m)	7.0					
지붕 처마	없음	없음	없음	없음	30cm	30cm
평면 크기	12m x 18m (18m x 24m)					

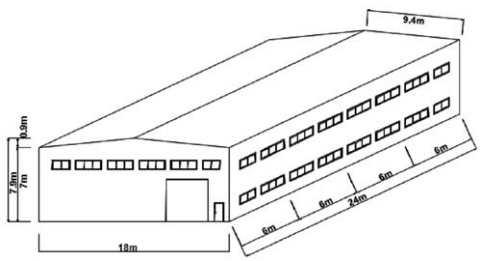

그림4. 시설물 L1의 형태 및 개구부 위치

(2) 강풍 취약도의 파괴 단계

본 예에서는 표2에 보이는 것과 같이 강풍취약도는 4가지의 외장재 파괴단계(소파괴, 중파괴 1, 중파괴 2, 대파괴)에 대하여 평가되었으며, 각 파괴단계에 대한 시설물에 작용하는 풍하중과 외장재의 저항성능을 확률적으로 비교하기 위해 몬테카를로 모사모형이 적용되었다.

표2. 산업시설물의 강풍 파괴단계

파괴 단계	외장재 파괴정도	개구부	벽체	지붕
1	소파괴	≥1개	≥1개	≥1개
2	중파괴 1	≥10%	≥10%	≥10%
3	중파괴 2	≥20%	≥20%	≥20%
4	대파괴	≥33%	≥33%	≥33%

(3) 취약도 구축을 위한 몬테카를로 모사 모형

풍하중과 시설물 외장재의 저항성능을 확률적으로 비교하기 위하여 사용한 몬테카를로 모사모형의 흐름도[9]는 그림 5와 같다. 그림 5에서 진한 회색으로 표시된 모듈(module)은 반복적인 작업을 의미한다. 이 몬테카를로 모사모형은 각 3초 돌풍풍속에 대하여 정규분포로 가정한 확률분포로부터 임의로 추출한 표본자료를 이용하여 동적 속도압, 풍방향계수, 외압 및 내압 풍압력계수, 부재 저항성능을 모사하고, 최종적으로 풍하중과 저항성능의 확률적 값들을 비교한다. 이 저항성능의 비교는 그림 6과 그림 7에 나타난 외벽과 지붕 파괴 결과 예상계통도(fault tree)와 같이 내압의 증가가 없는 직접적 파괴와 초기 부재파괴에 따른 내압증가에 의한 간접적 파괴로 구분되어 모사할 수 있다. 그림 6과 7에서 ∩는 모든 조건의 만족을 의미하

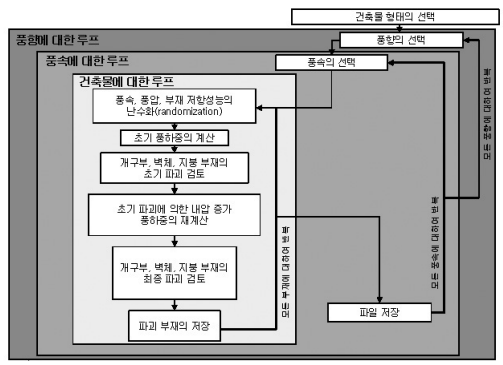

그림5. 강풍취약도 평가를 위한 몬테카를로 모사모형의 흐름도

는 연결자(AND gate)이고 ⋒는 일부 조건의 만족을 의미하는 연결자(OR gate)이다.

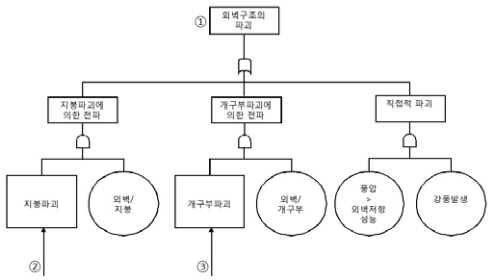

그림6. 벽체 파괴의 결과예상계통도(fault tree)

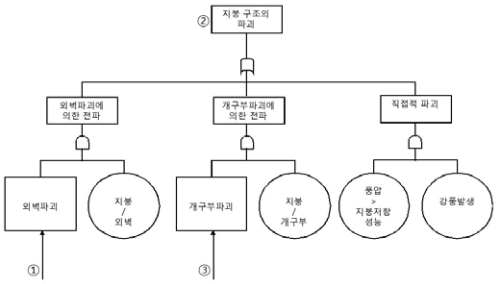

그림7. 지붕 파괴의 결과예상계통도(fault tree)

몬테카를로 모사기법을 이용하여 대수정규분포(lognormal cumulative distribution) 형태의 강풍취약도를 산정하기 위하여서는, 임의의 풍속에 대한 풍하중과 저항성능의 비교가 5,000번 이상 반복 수행할 필요가 있다.

(4) 강풍취약도의 예

그림8은 해석적 방법을 이용하여 구축한 강풍취약도의 예이다. 일반적으로 강풍 취약도는 지표면조도구분 C, 고도 10m에서 임의의 3초 돌풍 풍속이 불게 될 시 발생하게 될 시설물 S1의 파괴확률을 의미한다. 그림8에 나타난 취약도에 적용된 시설물 S1에 대한 지표면조도구분은 B이다. 이 그림에서 ○, □, ◇, ∗ 심벌은 몬테카를로 모사모형을 통하여 얻어진 취약도이며 실선은 로그정규분포로 회귀분석한 결과를 나타낸다. 그림8로부터 40m/s의 풍속이 발생할 시 파괴단계 1, 2, 3, 4가 일어날 확률은 각각 73%, 26%, 10%, 3% 정도이고 아무것도 파괴되지 않을 확률은 27% 정도임을 알 수 있다.

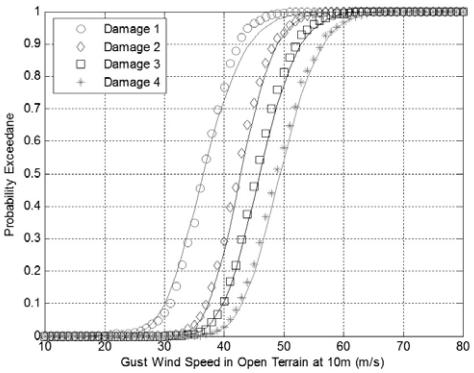

그림8. 강풍 취약도의 예(시설물 S1, 지표면조도 B)

4. 건축물에 대한 태풍 위험도

4.1 외장시스템의 강풍 저항성능과 태풍 위험도

그림9는 표1에 분류된 6°의 지붕물매를 갖는 시설물 S1의 외장시스템별 태풍 위험도를 비교하고 있다. 그림에서 수직축은 퍼센트(%)로 표시된 위험도, 하단의 수평축은 지표면조도구분 C에서의 풍속, 상단의 수평축은 풍속의 재현기간을 나타낸다.

태풍 위험도가 평가된 지점은 2, 지표면조도구분은 C, 파괴단계는 1이다. 그림으로부터 지점 2의 100년 재현기간 풍속(35m/s)에 대하여 개구부와 벽체 패널은 2.8% 정도의 비슷한 위험도를 가지나 지붕 패널은 3배 정도 적은 0.9% 정도의 위험도를 가짐을 알 수 있다. 이 결과로부터 태풍에 대한 시설물의 안정된 내풍성능을 확보하기 위하여서는 각 부재의 저항성능을 균일하게 할 필요가 있음을 알 수 있다.

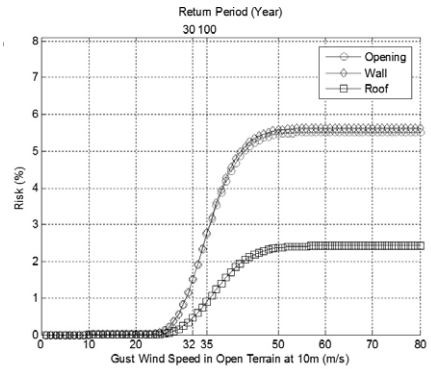

그림9. 태풍 위험도(시설물 S1, 지점 2, 지표면조도 C)

4.2 건축물의 지역별 태풍 위험도

그림10과 11은 100년 재현기간의 풍속에 대한 산업시설물의 태풍 위험도 지도(map)를 보이고 있다. 본 평가에서 해석된 지표면조도구분은 B와 D, 파괴단계는 1, 강풍 취약도의 매개변수는 표1에 정리된 것과 같이 시설물 S1~L6의 평균값이 사용되었다. 그림으로부터 지표면조도구분 D에 위치한 산업시설물이 지표면조도구분 B에 위치한 시설물 보다 3배 ~ 12배 정도 큰 위험도를 가짐을 알 수 있다.

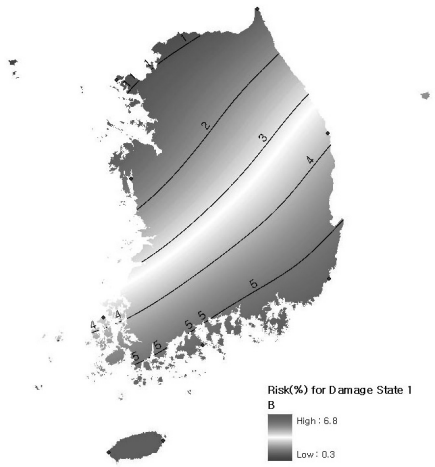

그림10. 태풍 위험도 지도(100년 재현기간, 지표면조도 B)

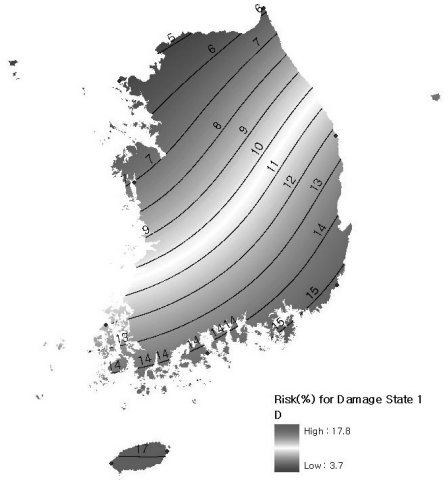

그림11. 태풍 위험도 지도(100년 재현기간, 지표면조도 D)

5. 맺음말

본 기고에서는 몬테카를로 모사모형을 사용하여 확률적 태풍 위험과 시설물 강풍 취약도를 구축하여 태풍 위험도 산정을 위한 평가방법을 소개 하였다 본 방법론을 통하여 한반도에 영향을 미치는 태풍 위험을 효과적으로 평가할 수 있었으며, 방재시설물의 취약도를 기초로 한 지역별 태풍 위험도를 판단할 수 있다. 본 기고에서 적용한 확률적 방법론을 사용하여 태풍에 대한 방재 시설물의 위험도를 정량적으로 파악할 수 있음에 따라, 보다 효율적인 풍해 피해 예측 및 대비, 신 · 구 시설물에 대한 설계 및 유지 관리가 가능할 것이라 판단된다. 기타 자연재해인 지진, 화재, 홍수 등으로 발생할 수 있는 방재 시설물에 대한 잠재된 위험도(risk)를 평가하기 위하여서도 본 방법론을 적용할 필요가 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

1. Knutson, T., McBride, J., Chan, J.,

Emanuel, K., Holland, G., Landsea, C., Held, I., Kossin, J., Srivastava, A., and Sugi, M., Tropical cyclones and climate change, Natural Geoscience, 3, 2010
2. FEMA, Multi-Hazard Loss Estimation Methodology Hurricane Model, Technical Manual, Department of Homeland Security, Washington, D.C., 2006
3. Kondo, K., Kanda. J., and Choi, H., Study on Strong Wind Hazard Analysis for Buildings, Annual Report, 51, Kajima Technical Research Institute, Kajima Corporation, 2003
4. 소방방재청, 강풍 및 대설 위험도 산정 기법 개발, 2009
5. Li, Y. and Ellingwood, B., Hurricane damage to residential construction in the US: Importance of uncertainty modeling in risk assessment, Engineering Structures, 28, 2006
6. Li, Y., Fragility Methodology for Performance-Based Engineering of Wood-Frame Residential Construction. Ph.D. Dissertation, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, Georgia, 2005
7. 이승수, 장은미, 지리정보시스템을 이용한 태풍 위험 평가, 한국GIS학회지, 17(2), 2009
8. Vickery, P., Skerlj, P., Steckley, A., and Twisdale L., Simulation of hurricane risk in the United States using empirical track modeling technique, Journal of Structural Engineering, ASCE, 126(10), 2000
9. 함희정, 이승수, 김호정, 샌드위치패널을 적용한 산업시설물에 대한 강풍취약도 개발, 대한건축학회 논문집, 25(12), 2009