

태풍 시뮬레이션을 통한 한반도 극한풍속 추정

이 승 수¹ · 김 가 영^{2*}

¹충북대학교 토목공학부, ²충북대학교 토목시스템공학과

Estimation of Extreme Wind Speeds in Korean Peninsula using Typhoon Monte Carlo Simulation

Sungsu Lee¹ and Ga Young Kim^{2*}

¹School of Civil Engineering, Chungbuk National University, CheongJu, 28644, Korea

²Department of Civil Systems Engineering, Chungbuk National University, CheongJu, 28644, Korea

Abstract

The long-span bridges such as Incheon Bridge and Seohae Grand Bridge are located on the coastal region effected frequently by strong wind of typhoons. In order to ensure the wind-resistant performance of the structure, estimation of the proper design wind speed is very important. In this study, stochastic estimation of design wind speed incurred by typhoons is carried out. For this purpose, we first established probability distribution of climatological parameters such as central pressure depth, distance of closest approach, translation speed and heading to build statistical model of typhoons, which are employed in Monte Carlo simulation for hypothetical typhoons. Once a typhoon is generated with statistically justified parameters, wind speeds are estimated along its path using wind field model. Thousands of typhoons are generated and their peak wind speeds are utilized to establish the extreme wind speeds for different return period. The results are compared with design basic wind speeds in Korean Highway Bridge Design Code, showing that the present results agree well with similar studies while the existing code suggests higher design wind speed.

Keywords : typhoon, typhoon simulation, design wind speed

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 자연재해의 피해가 증가함에 따라 관심이 증가하고 있으며, 특히나 태풍이 최근 10년간 자연재해 유형별 피해규모가 가장 큰 것으로 나타났다(Disaster Annals, 2014). 태풍의 피해는 점점 늘어가는 추세이며 우리나라를 통과한 태풍들로 인한 재해의 원인은 집중 호우와 강한 바람이 거론되고 있다. 특히, 1959~2014년 동안 한반도 태풍 통과 시 일 최대 순간풍속의 순위에, 2000년 이후에 발생한 태풍(0314 MAEMI, 0012 PAPIROON, 0215 RUSA, 0711 NARI, 1215 BOLAVEN)이 상위 5위안에 모두 기록되었으며, 같은 기간 재산피해 순위에도 2000년 이후에 발생한 태풍이 상위 5위안에 앞서 언급한 3개의 태풍(0215 RUSA, 0314 MAEMI, 1214&1215 TEMBIN&BOLAVEN)이

기록되었다(national typhoon center). 반면, 같은 기간 동안 일 최대 강수량의 순위에 10건의 태풍 중 3건만이 2000년대에 발생한 태풍(0215 RUSA, 0711 NARI, 0314 MAEMI)으로 기록되었다. 이렇게 태풍으로 인한 피해가 많이 발생하면서 강풍을 예측할 수 있는 기술의 필요성이 요구되고 있다.

특히, 국내 서해대교, 인천대교와 같은 장대교량은 대부분 빈번하게 태풍의 영향을 받는 해안에 위치하였으며, 교량의 길이가 긴 만큼 풍하중에 의한 영향이 다른 하중에 비해 상대적으로 크기 때문에 내풍 안정성을 확보하기 위해 정확한 설계풍속을 산정하는 것이 매우 중요하다.

국내 교량에 대한 설계풍속의 최근 연구를 살펴보면, Kwon 등(2009)은 광양대교 현장에 설치된 관측탑에서 측정한 풍속을 사용하여 풍환경 분석하고 MCP(measure-correlate-predict)

* Corresponding author:

Tel: +82-43-249-1892; E-mail: enthusiasm3535@gmail.com

Received October 12 2015; Revised December 18 2015;

Accepted December 19 2015

©2016 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

방법을 적용하여 관측치로부터 장기풍속 추정하였으며, Kim 등(2011)은 Gumbel 적률법과 최소자승법을 통해 서남해안 장대교량의 내풍설계에 적용할 수 있는 기본풍속을 추정하였다. Lee 등(2013)은 기상관측소로부터 거리가 먼 장대교량의 내풍설계 시 현장의 기본 풍속을 추정하기 위해, 현장의 풍 관측 탑을 통해 얻은 풍속자료를 이용하여 극치 확률분포 분석에 의해 기본풍속을 산정하였으며, 선형회귀분석 및 MCP 방법을 이용하여 인근기상관측소 풍속과 상관관계를 분석하였다. 하지만 Simu 등(1996)은 태풍이 발생하지 않는 지역에서는 연 최고 풍속자료가 극한풍 확률 거동을 잘 묘사하지만, 태풍이 빈번한 지역에서는 연 최고 풍속자료가 극한풍 확률 거동을 묘사하는데 부족하여, 몬테카를로 시뮬레이션(monte carlo simulation)과 같은 통계적 방법으로 극한 풍속을 추정해야 한다고 지적하였다. 실제로 국외의 해안지역의 강풍위험 평가나 설계풍속을 산정하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션 기법을 이용한 태풍 시뮬레이션이 많이 사용되고 있다(NOAA, 1972). 하지만 국내에서는 아직 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 풍속을 추정하는 연구가 미비한 실정이다.

태풍의 몬테카를로 시뮬레이션 기법은 Russell(1971)이 중심기압차, 이동속도, 최대풍속 발생반경 등의 파라미터들을 이용하여 처음 제시하였으며, 이후 Batts 등(1980), Vickery 등(1995a) 등이 파라미터의 확률분포 변형, 파라미터를 추가하는 등 확장하는 연구를 수행하였다. 국내에서는 Cho 등(1989)의 경우, 확률에 기초한 한국의 기본 설계풍속 추정을 위한 합리적인 방법을 제시하고 위험도에 기초한 전국의 설계풍속 지도를 제안하였다. 이때 극치 태풍 풍속 분포를 추정하였으며, 몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 간접적인 해석 방법이 적용되었다. Kim 등(2005)은 울산지역을 대상으로 태풍계절인 6월부터 10월까지 강풍발생빈도를 분석하였다. 이는 울산지역을 중심으로 반경 150km 이내 지역을 통과하는 태풍만을 선별하여 최고풍속, 태풍크기, 이동속도, 이동경로, 접근각도, 최단접근거리, 총 6개의 파라미터를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 파라미터 중 최단 접근거리는 3차 다항식으로부터 추정하였다. Kwon 등(2008)은 서남해안지역을 대상으로 극한 풍속을 예측하는 태풍 시뮬레이션 기법을 개발하였다. 이는 태풍의 물리적 모델을 제시하고, 서남해안의 분석 지역을 중심으로 반경 250km 이내를 통과하는 태풍을 선별하여 파라미터의 확률분포 모델을 제시하였다. 사용된 파라미터는 중심기압 차, 이동속도, 최대풍속 발생반경, 풍속형상계수, 최단접근거리이다. Lee 등(2008)은 강풍의 이동속도 및 방향, 최대풍속 반경, 중심기압 깊이를 포함하는 미국의 SPH(standard project hurricane)모형을 이용하여,

한반도 근역 태풍의 지표풍을 추정하였다. 또한, Lee 등(2008)은 장기 풍속 시계열을 이용한 극치빈도 분석법과 태풍자료를 이용한 태풍 시뮬레이션의 두 가지 방법으로 서남해안지역의 해상구조물에 대한 설계풍속을 산정하였다. 이때, 사용된 파라미터는 중심기압 차, 이동속도, 이동 방향, 최단 접근거리 총 4개의 파라미터를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 이와 같이 태풍자료를 이용한 몬테카를로 시뮬레이션 연구는 대부분 Russell의 연구를 기반으로 유사하게 접근하지만, 각 연구에서 사용한 파라미터와 그들에 대한 확률모델, 바람장 모델은 조금씩 다른 기법을 제시하였다.

본 연구에서는 태풍의 기후학적 특성 인자로 중심기압 깊이(주변기압과 중심기압의 차이), 태풍이동속도, 태풍이동 방향, 최단접근거리를 결정하였으며, 그 외 최대풍속반경이 포함된다. 태풍의 기후학적 특성 추정 분포를 이용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 모의 태풍의 특성 인자를 생성하고 물리적인 바람장 모형과 중심기압 상승모형을 적용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 주로 태풍의 영향을 받는 해안가 지방을 중심으로 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션을 통한 결과와 도로교 설계기준의 풍속을 비교하였다.

2. 태풍 시뮬레이션 방법론

태풍 시뮬레이션은 크게 기후학적 특성모형, 물리적 모형(중심기압 상승모형, 바람장 모형)으로 나뉜다. 본 절에서는 태풍의 기후학적 특성을 결정하는 중심기압 깊이(Δp), 태풍이동속도(s), 태풍이동방향(β), 최단접근거리(d_{\min})의 확률분포를 추정하였으며, 물리적 모형인 중심기압 상승모형과 바람장 모형을 바탕으로 특정지역의 재현기간 별 풍속 추정 기법을 기술하였다.

태풍자료는 RSMC(regional specialized meteorological center) 도쿄태풍센터에서 제공하는 1982년~2013년 기간 최상경로(best tracks) 자료를 이용하였다. 태풍자료는 최대 6시간, 최소 1시간 간격으로 태풍 중심의 위경도 및 중심기압 등에 대한 정보가 포함되어 있다.

2.1 기후학적 특성 모형

본 연구에서 태풍의 기후학적 특성을 나타내는 변수는 중심기압 깊이(Δp), 태풍이동속도(s), 태풍이동방향(β), 최단접근거리(d_{\min})이다. 이들의 확률분포를 추정하기 위해 ASOS 95개 지점을 대상으로, 해당 지점으로부터 각각 반경 250km 범위(Kwon *et al.*, 2008)를 통과한 태풍들을

대상으로 각 지역 별, 분포 별 likelihood를 계산하였으며, 지역 별로 분포가 상이하지만, 가장 많은 비중을 차지하는 확률분포를 선택하여 Table 1과 같이 대표 확률분포로 결정하였다.

① 중심기압 깊이(Δp)

중심기압 깊이 Δp 는 주변기압(표준대기압인 1013hPa 사용)과 중심기압의 차이를 일컫는다. 반경 250km 이내에서 표본을 추출 시 태풍 하나 당 관측된 중심기압 깊이 중 최댓값(중심기압의 경우 최솟값)이 그 태풍의 대표 중심기압 깊이가 된다. 250km이내에 추출된 모든 태풍들의 중심기압 깊이가 값들은 Table 1과 같이 Gamma 분포가 가장 적합한 것으로 나타났다. 중심기압 깊이는 최솟값과 최댓값 사이의 값을 갖도록 제약조건을 주었으며, 이는 Gamma 분포의 매개변수 a 와 b 로 사용된다.

② 최단접근거리(d_{min})

최단접근거리 d_{min} 은 중심기압 깊이가 결정된 지점을 기준으로 이후 시간에 기록된 지점과의 있는 경로에서 대상지역과 가장 가까운 곳과의 거리가 최단접근거리이다. 최단접근거리 표본의 분포는 Table 1과 같이 uniform 분포가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 여기서 a 와 b 는 최단접근거리가 가질 수 있는 범위의 하한과 상한을 의미하며, 본 연구에서는 $a = -250\text{km}$, $b = 250\text{km}$ 이다. Fig. 1에서 보이는 바와 같이, 태풍이 분석 지점의 왼쪽으로 통과하는 경우 음의 최단접근 거리를 가지며, 분석 지점의 오른쪽으로 통과하는 경우 양의 최단접근거리를 갖도록 정의하였다.

③ 이동 속도(s)

이동 속도 s 는 250km 반경 이내에서 최대 중심기압깊이를 갖는 태풍 중심 위치와 이후 태풍 중심 위치에 의해 결정된다. 이동속도를 구하기 위해 시간 간격 동안 태풍이 이동한 거리를

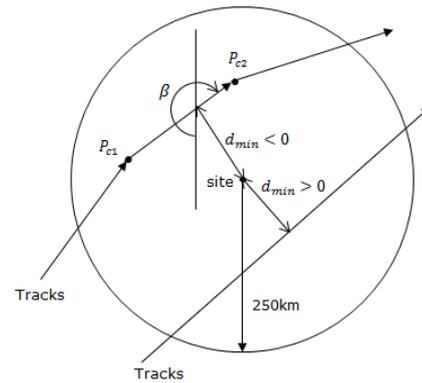


Fig. 1 The illust figure: CPD, Heading and Distance of closest approach

구하였으며, 이는 'great circle' 개념을 적용하였다. 이동 속도는 Table 1과 같이 GEV(generalized extreme value) 분포가 가장 적합한 것으로 나타났으며, 이동속도가 가질 수 있는 범위의 최댓값과 최솟값을 GEV 분포의 매개변수로 사용하였다.

④ 이동방향(β)

태풍은 북쪽으로 거의 대부분의 태풍이 이동하는 점을 감안하여 태풍 이동방향은 Fig. 1에서의 같이, 정남방향에서 시계방향으로 태풍의 이동방향을 측정하였다. 태풍의 최단 거리를 측정하는데 사용된 두 개의 태풍 중심기압 위치로 구성되는 직선 패도의 방향을 태풍 이동방향으로 정의하였다. 태풍 이동방향은 Table 1과 같이 Normal 분포가 가장 잘 묘사하는 것으로 나타났으며, 분포의 매개변수 μ 와 σ 는 이동 방향 표본의 최솟값과 최댓값으로, 최솟값과 최댓값 사이의 값을 갖도록 제약조건을 주었다.

Table 1은 본 연구에 사용된 파라미터의 확률분포와, 몬테카를로 시뮬레이션을 수행한 연구들에 해당하는 각 확률 분포를 나타낸 것이다. 각 파라미터의 확률분포를 살펴보면, 최단접근거리(distance of closest approach)를 제외하고는

Table 1 Comparison of other studys and our study

Researcher	Probability distribution						
	Russell <i>et al.</i> (1971)	Batts <i>et al.</i> (1980)	Vickery <i>et al.</i> (1995)	Huang <i>et al.</i> (2001)	Kwon <i>et al.</i> (2008)	Lee <i>et al.</i> (2008)	Our study
Climatological characteristic parameters							
Central pressure depth (Δp)	Lognormal	Lognormal	Weibull	Weibull	Weibull	Weibull	Gamma
Distance of closest approach(d_{min})	-	-	Uniform	-	Uniform	Uniform	Uniform
Translation speed(s)	Normal	Normal	Lognormal	Lognormal	Lognormal	Gamma	GEV
Heading(β)	-	-	-	Normal	Linear step function	Extreme value	Normal

대부분 다른 분포를 사용하였다. 중심기압깊이(central pressure depth)의 확률분포는 Weibull분포를 사용하지만, 본 연구에서 95개 지점을 대상으로 분석 시 전체의 약 77%를 차지할 만큼 Gamma 분포가 가장 잘 맞는 것으로 나타났다. 이동속도(translation speed)의 경우 대부분 Normal & Lognormal 분포가 나타났으며, 동일한 방법으로 표본을 추출한 Lee 등의 연구는 Gamma 분포를 사용하였다. 하지만 본 연구에서는 약 67%가 GEV분포로 나타났으며, Gamma분포는 약 20%에 그쳤다. 또한 이동방향(heading)의 경우 대부분 각기 다른 분포를 사용하였으며, 본 연구에서는 Normal 분포가 67%, Lee 등의 연구에서 사용된 Extreme Value는 약 32%로 나타났다.

2.2 물리적 모형

2.2.1 바람장 모형

바람장 모형은 Table 2에서 보이는 바와 같이 각기 다른 모델을 사용하였다. Batts 등은 RSPH(NOAA, 1972) 바람장 모형을 사용하여 태풍 시뮬레이션을 실시하였으며, 그 결과는 미국 설계 기본풍속(ASCE, 1990)으로 사용되었다. Batts 등의 바람장 모형은 Vickery 등, Lee 등의 연구에서도 사용되었다. 국내 연구인 Kwon 등의 연구에서는 Holland (1980)의 바람장 모형이 사용되었다. Holland의 바람장 모형은 Schloemer(1954)의 모델에 기반으로 개발된 것으로, 태풍의 이동속도, 태풍 진행방향과 관심 지점 사이의 각도, 태풍중심에서 최대풍속이 발생한 지점까지의 거리, 기압차, 코리올리 파라미터 등이 포함된다. 이때, 추정된 풍속은 태풍의 눈에서 r 만큼 떨어진 곳의 1분 평균 경도도 풍속으로 구조물 설계를 위해 Vickery 등(1995b)의 방법론에 따라 해수면 10m에서의 10분 평균 풍속을 구하였으며, Sanchez-Sesma(1988)의 연구에 따라 r 만큼 떨어진 목표지점에서 부는 풍향을 계산하였다.

본 연구에서 사용된 바람장 모형은 Lee 등의 바람장 모형이다. Lee 등의 바람장 모형은 Batts 등의 바람장 모형을 기초로 개발된 모형으로, 한반도에 적용하는데 있어 적합한

모형이다. Batts 등의 바람장 모형은 미국 대서양과 걸프(gulf)해안에서 발생한 강한 허리케인을 대상으로 개발된 모형이다. 미국에 상륙하는 허리케인의 경우, 허리케인이 발생한지 많은 시간이 지나지 않은 채 육상에 상륙하기 때문에, 허리케인의 최대풍속반경이 작지만, 우리나라에 영향을 미치는 태풍은 쇠퇴단계에서 우리나라에 상륙하며 상대적으로 큰 최대풍속반경을 갖는다. 대표적으로 태풍 RUSA(2002)는 100km가 넘는 최대풍속반경을 기록하였다. 이와 같은 태풍의 경우, 최대풍속반경이 50해리(92.6km)를 초과하여 바람장 모형을 사용할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 한반도에 적합한 Batts 등의 바람장 모형을 확장한 연구(Lee *et al.*) 결과(Fig. 3 참조)를 이용하였다.

우선 본 연구에서 사용한 Batts의 바람장 모형을 간략히 살펴보면, 최대 경도풍 V_{gr} 는 다음 식 (1)과 같다.

$$V_{gr} = K\sqrt{\Delta p} - \frac{R_{max}f}{2} \tag{1}$$

여기서, R_{max} 는 최대풍속반경, f 는 코리올리 인자(coriolis parameter), $K = [R_{max}\alpha/\rho]^{1/2}$ 로 정의되는 값으로, α 는 $dp/dn = \alpha\Delta p$ 관계식의 계수이고, ρ 는 공기 밀도이다. K 의 값은 23°N에서의 $6.04(m/s)/\sqrt{hPa}$ 와 45°N에서의 $6.0(m/s)/\sqrt{hPa}$ 사이에서 변한다. 최대풍속반경 R_{max} 는 중심기압깊이와 상관관계를 갖으며, 본 연구에서는 Fujii (1998)가 일본을 강타한 강한 태풍을 대상으로 제시한 중심기압깊이와 최대풍속반경과의 관계식 (2)를 사용하였다.

$$R_{max} = -66.19 \ln \Delta p + 335.18 (km) \tag{2}$$

여기서, Δp 는 중심기압 깊이를 의미한다.

최대 풍속 반경에서의 해수면 10m에서의 10분 평균 풍속과 최대 경도풍의 관계는 다음 경험식 (3)으로 가정하였다.

$$V(z=10, r=R_{max}) = 0.865 V_{gr} + 0.5s \tag{3}$$

여기서, s 는 태풍 이동속도이다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 태풍 중심 O로부터 태풍 이동방향과 시계방향으로 115°각을 이루는 직선을 OM이라고 정의하면, OM 직선 상에서 거리 r 만큼 떨어진 곳에서의 해수면 10m 높이에서의 10분 평균 풍속을 $V(z=10, r)$ 로 표기하며, $V(z=10, r)/V(z=10, R_{max})$ 비율을 r 에 종속하는 것으로 가정하였다(Batts *et al.*). 태풍 중심으로부터 직선 OM과 θ 각을 이루는 직선을 ON이라고 정의하면(Fig. 2

Table 2 Windfield model in each study

	Windfield model
Russell <i>et al.</i> (1971)	Graham <i>et al.</i> (1959)
Batts <i>et al.</i> (1980)	RSPH(NOAA)
Vickery <i>et al.</i> (1995)	Batts <i>et al.</i> (1980)
Huang <i>et al.</i> (2001)	Georgiou(1985)
Kwon <i>et al.</i> (2008)	Holland(1980)
Lee <i>et al.</i> (2007)	Batts <i>et al.</i> (1980)
Our study	Lee <i>et al.</i> (2007)

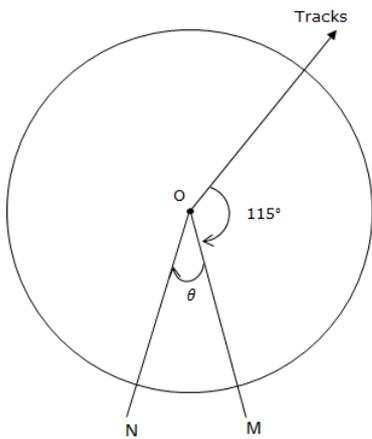


Fig. 2 The illust figure: Definition for wind speed by typhoon at particular location

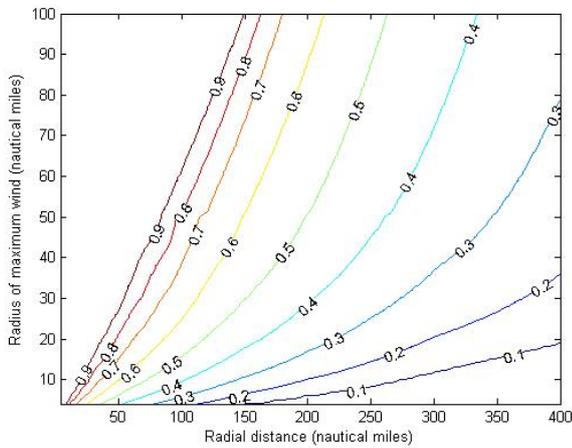


Fig. 3 The relationship Radius of maximum wind and Radial distance on straight line OM(Lee et al., 2007)

참조), 직선 ON 상에서 태풍 중심에서 거리 r 만큼 떨어진 곳에서의 해면 높이 10m에서의 10분 평균 풍속을 $V(z=10, r, \theta)$ 라 표현할 수 있다. $V(z=10, r, \theta)$ 는 $V(z=10, r)$ 과 태풍 이동속도, s 와 다음 식 (4)로 관계를 맺는 것으로 가정하였다.

$$V(z=10, r, \theta) = V(z=10, r) - 0.5s(1 - \cos\theta) \quad (4)$$

이때, 해수면 상의 풍속 V^w 을 육상 면($z_0=0.005m$) 상의 풍속 V^l 으로 저감시키기 위한 계수를 본 연구에서는 Lee 등의 연구인 Fig. 3을 이용하여 결정하였다.

2.2.2 중심기압 모형

태풍은 육지에 상륙하게 되면, 중심기압이 상승하면서 태풍의 소멸 단계를 겪게 된다. 본 연구에서는 육지 상륙 후 중심기압의 상승효과를 묘사하기 위해서 Fujii(1998)의 중심

기압상승 모형을 사용하였다. Fujii의 중심기압상승 모델은 다음 식 (5)와 같다.

$$\Delta p(t) = \Delta p_0 \exp(-a_p t) \quad (5)$$

여기서, Δp_0 는 상륙 시점의 중심기압값이며, a_p 는 태풍 중심기압상승률을 대변하는 인자이다. Fujii는 일본 열도를 A, B, C, 세 구역으로 구분하여 a_p 의 값을 추정하였다. 본 연구에서는 태풍이 한반도와 일본 섬에 상륙할 때인 구역 A의 파라미터 값($a_p=0.065h^{-1}$)을 이용하여 태풍의 중심기압 상승을 묘사하였다.

2.2.3 태풍 시뮬레이션

태풍의 최대풍속반경을 제외한 4개의 태풍 기후학적 특성으로 독립적이고 태풍의 이동방향과 이동속도는 250km 반경 영역 내에서 일정하다고 가정하였으며, 최대풍속반경은 중심기압값이와의 관계식을 통해서 결정하였다. 앞에서 언급한 태풍의 기후학적 특성들의 확률분포를 기반으로 몬테 카를로 시뮬레이션을 이용하여 각각의 분석 지점에서 모의 태풍을 발생시켰다.

Kwon 등은 적절한 시뮬레이션 횟수에 대해 명확한 기준을 제시하지 않고 대략 50,000회 이상이 되면 결과가 유사하므로, 시뮬레이션 횟수를 50,000회를 수행하였다. 본 연구에서는 본 연구에서 개발한 태풍 시뮬레이션 기법을 이용하여 시뮬레이션 횟수를 증가시켜 가상태풍의 개수에 따른 영향을 살펴보았다. Fig. 4는 횟수에 따르는 영향을 나타낸 것으로, Kwon 등의 연구와 같이 시뮬레이션 횟수가 적으면 풍속이 넓은 범위에 분포되고 횟수가 증가할수록 폭이 점차 줄어드는 것으로 나타났다. 하지만 그림에서 보이는 바와 같이 약 10,000회 이상에서는 결과가 유사하게 나타나며, 시뮬레이션을 수행 시간의 효율성을 위해 본 연구에서는 각 지점 별

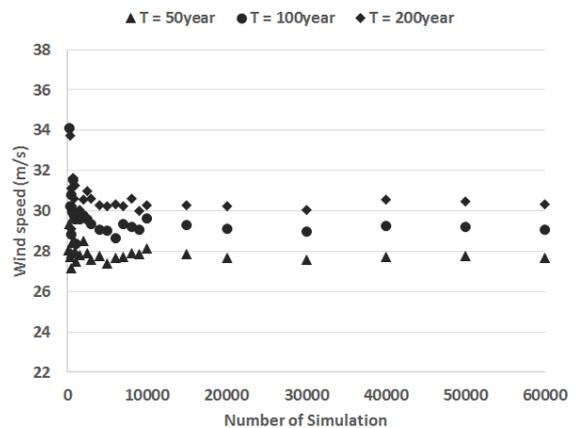


Fig. 4 Effect by random number of simulation

20,000개의 가상 태풍을 생성하여 연구를 수행하였다.

2.3 재현기간 별 풍속 산정

전체 풍속 m 개를 풍속 크기순으로 정렬하여 i 번째 풍속(v_i)의 평균 재현기간 N 은 다음과 같이 결정된다(Batts *et al.*).

$$N = \frac{1}{1 - \exp\left(-\lambda\left(1 - \frac{i}{m+1}\right)\right)} \quad (6)$$

여기서, λ 는 연 평균 태풍 발생률이다. 연 평균 태풍 발생률에 앞에서 언급한 바와 같이, 1951년부터 2013년까지 63년간 발생한 총 1,650개의 태풍 자료 중에서, 각각 지점(대상 지역) 인근 반경 250km 이내를 통과하고, 중심기압이 1,000hPa 미만인 태풍만을 사용하여 계산하였다.

3. 극한 풍속 추정

최종적으로 Table 3에서는 2장에서 기술 한 바와 같이 태풍 시뮬레이션을 수행하여 ASOS 일부 지점의 재현기간 별 풍속과 도로교 설계기준(2010)과 Kwon 등의 연구결과인 100년 재현기간 풍속을 비교하여 나타내었다. Table 3에서 제시한 태풍 시뮬레이션에 의한 풍속은 도로교설계기준에 의해 10분 평균, 지상 10m, 지표조도 II로 보정한 풍속이다. 한반도 남쪽으로 내려갈수록 대체적으로 재현기간 별 풍속은 증가하며 남해안과 서해안에 비해 동해안에 위치한 울산과 포항의 경우 남쪽에 위치한 다른 지역에 비해 낮게 풍속이 나타났다. 또한 Kwon 등의 연구결과에 비해 상대적으로 1.4~3m/s 정도 풍속 값이 높게 나타났으며, 고위도 지역에 비해 저위도 지역의 풍속 값의 차이가 적은 것으로 나타났다.

분석 결과 제주도와 남해안 지역의 재현기간 풍속이 크거나 대체적으로 고위도로 갈수록 작아지는 특징을 보이고 있다. 이와 같은 특징의 가장 큰 원인은 고위도 분석지점 표본 태풍의 중심기압이 저위도 분석지점 표본 태풍의 중심기압보다 높기 때문으로 판단되며, 또한 우리나라에 해상에서 육지로 이동하면서 쇠퇴기를 겪어 점차 약해지기 때문인 것으로 분석된다.

기본풍속이란 재현기간 100년에 해당하는 개활지에서의 지상 10m의 10분 평균 풍속을 말한다. 기본풍속은 대상지역 인근 기상관측소의 장기풍속기록(태풍 또는 계절풍)과 지역적 위치를 동시에 고려하여 극치분포로부터 추정하거나 태풍자료의 시뮬레이션 등의 방법으로 추정하며, 도로교 설계기준에서 제시하는 지역별 기본풍속은 Table 3에 제시한 바와 같다. 하지만 도로교 설계기준의 지역별 기본 풍속과 본 연구의 결과를 비교하면, 태풍 시뮬레이션의 결과가 낮으며, 이 또한 Kwon 등의 연구에서도 나타난 바 있다. 또한 도로교설계 기준에 의하면 3.13.1.2 '① 일반 중소지간 교량의 설계기준 풍속은 40m/s로 한다'라고 명시되어 있다. 이러한 점을 볼 때 도로교 설계기준의 기본 풍속이 태풍 시뮬레이션 연구 결과들이 제시하는 풍속에 비해 높게 산정되어 있다고 판단되며, 기상 자료 분석과 같은 추가적인 연구를 통해 기본풍속 조정에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

4. 결 론

최근 10년간 자연재해 유형별 피해규모 중 태풍이 가장 큰 것으로 나타났으며, 태풍으로 인한 피해가 많이 발생하면서 강풍을 예측할 수 있는 기술의 필요성이 요구되고 있다. 이에 따라, 해안지역의 강풍 위험평가나 설계 풍속을 산정하기 위하여 태풍 시뮬레이션이 많이 수행되고 있다.

Table 3 The return period wind speed by MCS and Korean Highway Bridge Design code at major regions (10 min, $z=10m$, Surface Roughness II)

Wind speed Region	Return period wind speed by MCS(m/s)				Kwon <i>et al.</i> 's study(2008)	Korean HighwayBridge Design Code(m/s)
	50 year	100 year	200 year	300 year	100 year	100 year
Gangreung	20.4	21.5	22.7	23.5	-	45
Incheon	23.4	24.6	25.4	25.7	22.1	35
Seosan	24.0	25.3	26.3	26.9	-	35
Gunsan	26.9	28.4	29.6	30.2	25.4	40
Mockpo	28.5	30.1	31.5	32.2	28.3	45
Ulsan	26.2	27.4	28.3	28.8	-	40
Pohang	24.1	25.5	26.7	27.4	-	40
Tongyeong	27.7	29.2	30.4	31.0	-	40
Yeosu	28.9	30.4	31.8	32.3	28.8	40
Jeju	29.9	31.2	32.2	32.8	29.8	45

본 연구에서는 태풍의 기후학적 특성 인자로 중심기압깊이, 태풍 이동속도, 태풍 이동방향, 최단접근거리를 결정하였으며, 이들의 확률분포를 추정하여 기후학적 특성 모형을 구축하였다. 또한, 기후학적 특성 모형 결과를 바탕으로 물리적 모형인 바람장 모형, 중심기압상승 모형과 함께 강릉, 인천, 서산, 군산, 목포, 울산, 포항, 통영, 여수, 제주지역을 대상으로 시뮬레이션을 수행한 후, 모의 풍속자료의 통계적 분석을 통하여 재현기간풍속을 추정하였다(제시된 시뮬레이션 결과 풍속은 10분 평균, 지상 10m, 지표조건 II로 보정하였다).

분석결과, 대체적으로 제주도와 남해안 지역의 재현기간 풍속이 크게 나오며 고위도로 갈수록 작아지는 특징을 나타냈다. 이와 같은 특징의 가장 큰 원인은 고위도 분석지점 표본 태풍의 중심기압이 저위도 분석지점 표본 태풍의 중심기압보다 높기 때문으로 판단되며, 또한 우리나라에 해상에서 육지로 이동하면서 중심기압이 쇠퇴기를 겪어 점차 약해지기 때문인 것으로 분석되었다. 또한, 시뮬레이션 결과를 도로교 설계기준 100년 재현기간 풍속(10분 평균, 지상 10m, 지표조건 II)과 비교하였다. 도로교 설계기준의 지역별 기본 풍속과 본 연구의 결과를 비교하면, 태풍 시뮬레이션의 결과가 상당히 낮으며, 이 또한 타 연구에서도 나타난 바 있다. 이러한 점을 볼 때 도로교 설계기준의 기본 풍속이 태풍 시뮬레이션 연구 결과들이 제시하는 풍속에 비해 높게 산정되어 있다고 판단되며, 기상 자료 분석과 같은 추가적인 연구를 통해 기본풍속 조정에 대한 연구가 수행 되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 정부(국민안전처)의 재원으로 자연재해저감기술 개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구(MPSS-자연-2015-81)입니다.

References

- American Society of Civil Engineers** (1990) *ASCE 7-88 Standards, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, New York, United States of America, p.94.
- Batts, M.E., Simiu, E., Russell, L.R.** (1980) Hurricane Wind Speeds in the United States, *J. Struct. Div., ASCE*, 106(10), pp.2001~2016.
- Cho, H.N., Cha, C.J., Baik, H.S.** (1989) Probability-based Estimation of Basic Design Wind Speeds in Korea, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 2(2), pp.63~72.
- Fujii, T.** (1998) Statistical Analysis of the Characteristics of Severe Typhoons Hitting the Japanese Main Islands, *Monthly Weather Review*, 126(4), pp.1091~1097.
- Georgiou, P.N., Davenport, A.G., Vickery, B.J.** (1983) Design Wind Speeds Regions Dominated by Tropical Cyclones, *J. Wind Eng. & Industrial Aerodyn.*, 13(1-3), pp.139~152.
- Graham, H.E., Nunn, D.E.** (1959) Meteorological Considerations Pertinent to Standard Project Hurricane, Atlantic and Gulf Coasts of the United States, National Hurricane Research Project Report, Report No.33, U.S. Weather Bureau, Washington, D.C, p.76.
- Haun, Z., Rosowsky, D.V., Sparks, P.R.** (2001) Hurricane Simulation Techniques for the Evaluation of Wind-speeds and Expected Insurance losses, *J. Wind Eng. & Industrial Aerodyn.*, 89(7-8), pp.605~617.
- Kim, H.S., Lee, H.H., Cho, D.Y., Park, S.K.** (2011) Estimation of Design Wind Speed Compatible for Long-span Bridge in Western and Southern Sea, *J. Korea Inst. Struct. Maint. & Insp.*, 15(2), pp.153~160.
- Kim, S.C., Kim, Y.S., Yang, Y.T.** (2005) Assessment of Severe Local Storm Risks in Ulsan Area using Monte Carlo Typhoon Simulation Method and CFD Model, *J. Wind Eng. & Industrial Aerodyn.*, 9(1), pp.45~54.
- Kwon, S.D., Lee, J.H.** (2008) Estimation of Extreme Wind Speeds in Southern and Western Coasts by Typhoon Simulation, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 28(4), pp.431~438.
- Kwon, S.D., Lee, S.L.** (2009) Estimation of Design Wind Velocity Based on Short Term Measurements, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 29(3A), pp.209~216.
- Lee, S.L., Kim, S.W.** (2013) Estimation of Basic Wind Speed at Bridge Construction Site Based on short-term Measurements, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 33(4), pp.1271~1279.
- Lee, Y.K.** (2009) Development of Model for Wind Hazard Assessment Based on Geographical Information, ph. D. Dissertation, Chungbuk National University, p.219.
- Lee, Y.K., Lee, S.** (2008) Estimation of surface Wind during Typhoon around Korean Peninsula, *J. Wind Eng. & Industrial Aerodyn.*, 12(2), pp.121~128.

- Lee, Y.K., Lee, S., Park, C.W. (2007) Analysis on Radii of Maximum Sustained Winds of Typhoons around Korean Peninsula, *J. Wind Eng. & Industrial Aerodyn.*, 11(2), pp.203~210.
- Lee, Y.K., Lee, S., Ham, H.J., Bienkiewicz, B. (2009) Estimation of Design Wind Speed for Offshore Structures, *J. Wind Eng. & Industrial Aerodyn.*, 13(3), pp.129~135.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(MLTMA) (2010) *Korean Highway Bridge Design Code (in Korean)*. Korea Road & Transportation Association, p.6~49.
- National Emergency Management Agency (2014) *Disaster Annals*, 11-1750000-000031-10, Ministry of Public Safety and Security, p.722.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (1972) Revised Standard Project Hurricane Criteria for the Atlantic and Gulf Coasts of the United States, Memorandum HUR7-120, U.S. Department of Commerce, p.47.
- National Typhoon Center, http://typ.kma.go.kr/TYPHOON/statistics/statistics_02_3.jsp/ (Accessed: June, 10, 2015).
- Russell, L.R. (1971) Probability Distributions for Hurricane Effects. *J. Waterw. Harbors & Coastal Eng., ASCE*, 97(1), pp.139~154.
- Sanchez-Sesma, J., Aguirre, J., Sen, M. (1988) Simple Modeling Procedure for Estimation of Cyclonic Wind Speeds, *J. Struct. Eng., ASCE*, 114(2), pp.352~370
- Schloemer, R.W. (1954) Analysis and Synthesis of Hurricane Wind Patterns over Lake Okechobee, Florida. Hydrometeorological Report No.31, U.S. Dept. of Commerce, Weather Bureau, Washington, D.C, p.49.
- Simiu, E., Scanlan, R.H. (1996) *Wind effects on structures*, Wiley Interscience, New York, p.688.
- Vickery, P.J., Twisdale, L.A. (1995a) Prediction of Hurricane Wind Speeds in the United States, *J. Struct. Eng.*, 121(11), pp.1691~1699.
- Vickery, P.J., Twisdale, L.A. (1995b) Wind Field and Filling Models for Hurricane Wind-speed Predictions, *J. Struct. Eng.*, 121(11), pp.1700~1709.

요 지

국내 서해대교, 인천대교와 같은 장대교량은 대부분 빈번하게 태풍에 의해 영향을 받는 해안에 위치하였으며, 교량의 길이가 긴 만큼 풍하중에 의한 영향이 다른 하중에 비해 상대적으로 크기 때문에 내풍 안정성을 확보하기 위해 정확한 설계풍속을 산정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 태풍의 기후학적 특성 인자로 중심기압깊이, 태풍이동속도, 태풍이동방향, 최단접근거리를 결정하였으며, 태풍의 기후학적 특성들의 확률 분포를 추정하고, 바람장 모형과 중심기압상승 모형을 적용하여 몬테카를로 시뮬레이션을 실시하였다. 분석결과, 대체적으로 제주도와 남해안 지역의 재현기간 풍속이 크게 나오며 고위도로 갈수록 작아지는 특징을 나타냈다. 이와 같은 특징이 나타난 가장 큰 원인은 고위도 분석지점 표본 태풍의 중심기압이 저위도 분석지점 표본 태풍의 중심기압보다 높기 때문으로 판단되며, 또한 우리나라에 해상에서 육지로 이동하면서 쇠퇴기를 겪어 점차 약해지기 때문인 것으로 분석되었다. 또한, 시뮬레이션 결과를 도로교 설계기준 100년 재현기간 풍속(10분 평균, 지상 10m, 지표조도 II)과 비교한 결과, 태풍시뮬레이션의 결과가 낮게 나타났으며, 이러한 점을 볼 때 도로교 설계기준의 기본 풍속이 높게 산정되어 있다고 판단되며, 기상자료 분석과 같은 추가적인 연구를 통해 기본풍속 조정에 대한 연구가 수행 되어야 할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 태풍, 태풍 시뮬레이션, 설계 풍속