

태풍 내습 시 3-second gust를 이용한 피해액 산정

정우식 · 박종길^{1)*} · 최효진

인제대학교 대기환경정보공학과/대기환경정보연구센터,
¹⁾인제대학교 환경공학부/대기환경정보연구센터
(2009년 12월 18일 접수; 2009년 12월 30일 수정; 2010년 1월 12일 채택)

An Estimation of Amount of Damage Using the 3-second Gust When the Typhoon Attack

Woo-Sik Jung, Jong-Kil Park^{1)*}, Hyo-Jin Choi

Department of Atmospheric Environment Information Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

¹⁾*School of Environmental Sciences Engineering, Atmospheric Environment Information Research Center, Inje University, Gimhae 621-749, Korea*

(Manuscript received 18 December, 2009; revised 30 December, 2009; accepted 12 January, 2010)

Abstract

The most efficient measures to reduce damage from natural disasters include activities which prevent disasters in advance, decrease possibility of disasters and minimize the scale of damage. Therefore, developing of the risk assessment model is very important to reduce the natural disaster damage. This study estimated a typhoon damage which is the biggest damage scale among increased natural disasters in Korea along with climate change. The results of 3-second gust at the height of 10 m level from the typhoon 'Maemi' which did considerable damage to Korean in 2003, using the wind data at the height of 700 hPa. September 12th 09 LST~13th 12 LST period by the time a typhoon Maemi approached to the Korean peninsula. This study estimate damage amount using 'Fragility curve' which is the damage probability curve about a certain wind speed of the each building component factors based on wind load estimation results by using 3-second gust. But the fragility curve is not to Korea. Therefore, we use the fragility curves to FPHLM(FDFS, 2005). The result of houses damage amount is about 11 trillion 5 million won. This values are limit the 1-story detached dwelling, 62.51~95.56 m² of total area. Therefore, this process is possible application to other type houses.

Key Words : Typhoon damage, 3-second gust, Risk assessment

1. 서론

지난 수십 년 동안 대기과학과 예·경보 기술의 발달로 태풍으로 인한 인명 손실이 크게 줄었다. 미국의

경우 허리케인 'Galveston'에 의해 약 8,000명이 사망하였으나, 지난 30여 년 동안 단 하나의 허리케인에 의해 60명 이상이 사망한 경우는 없었다. 그러나 2005년 허리케인 'Katrina'가 미국남부지역을 강타하면서 사망자 수가 1만 여 명에 이르렀고, 재해복구비만도 약 200조원에 육박했을 만큼 태풍과 태풍피해는 대형화되고 있다(기상청, 2005).

오(2007)는 미래기후변화에 대한 기온 상승과 관련

*Corresponding Author : Jong-Kil Park, School of Environmental Sciences Engineering, Inje University, Gimhae 621-749, Korea
Phone: +82-55-320-3250
E-mail: envpjk@inje.ac.kr

된 연구를 이용하여 2003년 태풍 Maemi의 상륙 시와 통과 후의 해수면 기압의 공간분포를 연구한 결과, 태풍 Maemi가 2100년에 다시 온다면 부산 동해남부 근해에서 2003년 경우보다 10 m/s 이상 강화될 것으로 나타나, 우리나라의 경우에도 대형태풍에 의한 피해 규모가 커질 수 있음을 분석한바 있다.

방재 측면에서는 태풍 예측 정보들이 어떤 유형으로 얼마나 빨리 생성되며, 얼마나 신속하게 방재유관 기관들에게 전달되는지가 매우 중요하다. 방재활동은 크게 예방, 대비, 대응, 복구 4단계로 구분하는데 태풍이 한반도에 상륙할 것으로 예상되는 시간을 고려할 경우 '예방' 단계는 여름철 방재 기간 이전에 이루어져야 할 단계이며 '대비' 단계는 태풍이 예측되었을 경우 행할 수 있는 대응 방안이다. 따라서 태풍이 한반도에 내습할 것으로 예상될 때 어느 지역에 어떤 강도로 최대한 미칠 수 있는 피해를 파악하여 방재유관기관과 시민들에게 신속하게 전달할 수 있다면 '대비' 단계에서 보다 많은 인명과 재산을 구할 수 있다.

따라서 1996년부터 미국 Federal Emergency Management Agency(FEMA)에서는 재해 관리를 총체적으로 처리하기 위한 국가 긴급 재해관리 정보시스템(National Emergency Management Information System, NEMIS)의 일부로 HAZUS-MH를 개발하였다. HAZUS-MH는 GIS 기반 자연 재해 위험 평가 소프트웨어로, 사전 재해 영향 평가, 응급 대응/복구 계획 수립, 피해 및 손실 규모 추정, 피해 경감 대책 수립 등의 자료를 공급한다(이와 조, 2006). 현재 재해예측 모형이 구축되어 있지 않은 우리나라의 경우 HAZUS-MH와 같이 복잡한 시스템을 개발하기에 앞서 모든 시설물이 GIS Inventory화가 되어야 하며, 이와 동시에 특정 재해 원인을 대상으로 한 피해액 산정 방법을 개발하는 것이 우선이 되어야 한다.

박 등(2008a)은 이러한 재해예측모형 개발의 필요성을 인식하고 자연재해 원인 중에서도 단일 피해 규모가 가장 큰 태풍(최, 2007)을 대상으로 모형을 개발하고자 하였다. 이 연구에서는, Florida Department of Financial Services (FDFS)에서 개발하고 실제 사용하며 계속 연구 중에 있는 허리케인에 대한 재해예측모형인 Florida Public Hurricane Loss Model(FPHLM) (FDFS, 2005)을 이용하여 국내 현황에 맞는지 적용하였다.

따라서 본 연구에서는 FPHLM의 연구 방법을 국내에 적용하여 산정한 태풍 내습 시 지상의 풍속⁴⁾을 이용하여 최대순간풍속인 3-second gust를 산정하고 한반도 대표 주택 유형을 대상으로 2003년 태풍 Maemi 사례에 대하여 3-second gust가 건물에 미치는 피해를 추정하여 적용하고자 한다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서는 2003년 태풍 Maemi가 한반도에 상륙한 9월 12일 09 LST~13일 12 LST 기간 동안의 700 hPa의 바람을 이용하여 지상풍(고도 10 m)을 추정하였다. 본 연구에서는 추정된 10 m 고도의 풍속을 이용하여 gust factor를 계산하고, gust factor를 이용하여 발생 가능한 최대순간풍속 3-second gust를 추정하였다. 3-second gust를 추정하는데 필요한 기상자료는 지상풍을 산정하는데 필요한 자료로, 기상청의 Regional Data Assimilation Prediction System (RDAPS)(기상청, 2003) 30 km 간격 자료를 이용하였으며, 태풍 Maemi의 위치와 중심기압은 Regional Specialized Meteorological Center(RSMC) Tokyo-Typhoon Center의 Best Track(RSMC, 2003) 자료를 사용하였다. 지상풍 추정뿐만 아니라 gust factor 계산에도 필요한 토지이용도는 United States Geological Survey(USGS)(USGS, 2003) 자료를 이용하였으며, Gust Factor를 계산하는 과정은 FPHLM(FDFS, 2005)에 따라 Engineering Sciences Data Unit(ESDU, 1983)의 방법에 따라 적용하였다.

태풍 Maemi가 한반도를 통과하는 기간 동안 시·도 단위에서 발생 가능한 최대피해액을 추정하기 위해서, 산정된 3-second gust에 대하여 태풍 내습 기간 중에서 우리나라 시·도 단위에서 가장 풍속이 큰 경우를 각 지역의 대푯값으로 선정하였다. 그리고 박 등(2008b)이 정의한 대표 주택 유형에 대한 우리나라 시·도 단위로 주택총조사 자료(통계청, 2005)의 가구 수를 이용하여 피해액을 추정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 태풍에 의한 지상풍 산정

태풍 Maemi는 2003년 9월 12일~13일 기간 동안

에 한반도에 상륙하여 4조 2,301억 원이라는 큰 피해를 입혔다. 따라서 본 연구에서는 태풍 Maemi가 한반도에 상륙하여 빠져나가는 기간을 대상으로 적용하는데, Best Track(RSMC, 2003) 자료가 제공되는 시간을 고려하여 사례 기간을 정하였다. RDAPS 30 km 자료를 이용하여 700 hPa로부터 10 m 고도 풍속까지의 추정 과정은 Franklin et al.(2003)의 연구 방법을 적용하였다.

지상풍 추정과정에서 태풍에 대한 최대풍속반경(Radius of Maximum Wind, RMW)이 필요한데, 이 연구에서는 RMW 산정식 중 우리나라에 최적의 식으로 평가된(박 등, 2008a) FEMA의 식 (1)(FEMA, 2003)을 이용하였다. 사례 기간과 태풍 정보 그리고 계산된 RMW는 Table 1과 같다.

$$\ln R_{max} = 2.556 - 0.000050255 \Delta p^2 + 0.042243032 \psi \quad (1)(FEMA, 2003)$$

where, Δp = central pressure deficit
 ψ = latitude of typhoon

700 hPa 바람을 이용하여 300 m 고도의 풍속을 추정하는데 조정계수(Adj)가 필요하며 식(2)와 같이 계산한다. 보다 정확한 Adj를 도출하기 위하여 Adj 산정식(Axe, 2003)을 이용하여 거리에 따른 각각의 값을 산정하였다.

$$U_{300} = U_{700} \times Adj \quad (2)(Axe, 2003)$$

300 m 고도의 풍속을 이용하여 10 m 고도의 풍속을 추정하고 3-second gust를 계산하는 과정에는 gust factor가 필요하다. 10 m 고도의 풍속을 재추정하는 과정에서는 해당 지역의 지표면 거칠기를 고려해야 한다. 식 (3)과 같이 300 m 고도의 풍속을 개방형 지형에서의 10 m 고도 풍속(V_o)으로 계산한다(Powell at al., 1996). 계산된 V_o 를 이용하여 개방형 지형에서의 마찰속도(U^*o)를 구하고, 해당지역의 거칠기 길이 자료를 사용하여 실제 지형에서의 마찰속도(U^*a)를 계산하며(식 (4)), 이렇게 구해진 값들을 이용하여 실제 지형에서의 10 m 고도 풍속(V_a)을 산정한다. 각 지역별 거칠기 길이는 토지 이용도 격자에 해당되는 대푯값을 사용하였다. 따라서 30 km 격자를 대상으로 한 본 연구에서는 일부 지역에서 토지 이용도가 중복되는 경우가 있다. 산정된 V_a 는 이후에 소개하는 gust factor를 이용하여 식(5)와 같이 산정한다.

$$V_o = U_{300} \frac{\ln(10/Z_{oo})}{\ln(300/Z_{oo})} \quad (3)(Powell, 1996)$$

$$U^*a = U^*o / [(Z_{oo}/Z_{oa})]^{0.0706} \quad (4)(ESDU, 1983)$$

$$V_3 = V_a \times G_{10min,3} \quad (5)(ESDU, 1983)$$

where, V_3 = Peak 3-second gust(m/s)
 $G_{10min,3}$ = Gust factor

300 m 고도의 풍속을 이용하여 V_a 까지 계산한 결과는 Table 2와 같다. 실제 지형을 고려한 10 m 고도

Table 1. Information of the typhoon Maemi

Y	M	D	H (LST)	Lat.	Long.	Central Pressure (hPa)	ΔP (hPa)	RMW (km)
2003	9	12	9	30.5	126.5	930	83	33.06
			15	32.7	127.1	935	78	37.77
			18	33.9	127.5	945	68	42.76
			21	34.9	128.3	955	58	47.52
		13	03	37	129.8	970	43	56.04
			09	39.1	131.8	975	38	62.50
			12	40.5	134.6	980	33	67.50

* 선행연구에 따르면 중심기압의 기준을 1013 hPa 로 정함.

Table 2. Estimation of the 10m level wind speed(V_a)

Region	U_{300} (m/s)	Z_{oa} (m)	V_o (m/s)	U^*_o (m/s)	U^*_a (m/s)	V_a (m/s)
Seoul	58.900	0.8	37.149	2.558	3.225	20.365
Busan	80.656	0.15	50.871	3.503	3.924	41.203
Daegu	89.354	0.15	56.357	3.881	4.348	45.646
Incheon	75.941	0.15	47.898	3.298	3.695	38.794
Gwangju	78.640	0.15	49.600	3.415	3.826	40.173
Daejeon	73.249	0.15	46.200	3.181	3.564	37.419
Ulsan	89.354	0.15	56.357	3.881	4.348	45.646
Gyeonggi	75.941	0.15	47.898	3.298	3.695	38.794
Gangwon	63.469	0.15	40.031	2.756	3.088	32.423
Chungbuk	60.261	0.15	38.008	2.617	2.932	30.784
Chungnam	73.249	0.15	46.200	3.181	3.564	37.419
Jeonbuk	89.350	0.15	56.355	3.880	4.347	45.644
Jeonnam	78.640	0.15	49.600	3.415	3.826	40.173
Gyeongbuk	89.354	0.15	56.357	3.881	4.348	45.646
Gyeongnam	80.656	0.15	50.871	3.503	3.924	41.203
Jeju	70.686	0.15	44.583	3.070	3.440	36.110

에서의 풍속(V_a)은 거칠기 길이에 따라서 300 m 풍속의 약 0.6~0.8 배로 나타나, Franklin et al.(2003)의 연구에서 제시한 최적의 계수 '0.8'과 유사한 범위를 보였다.

3.2. Gust factor를 이용한 3-second gust 산정

실제 지형에서의 10 m 고도 풍속을 이용하여 3-second gust를 산정하기 위해서는 gust factor가 필요한데, Vickery and Skerlj(2005)는 허리케인의 바람장 모형에 gust factor를 사용하기 위하여 3가지 Gust Factor Model에 대한 비교분석 연구를 수행한 결과 Fig. 1~2

와 같이 ESDU의 모형에서 계산된 값이 허리케인 관측 자료의 평균값과 가장 일치하였고, 또한 ESDU의 모형이 가장 적합하였다. 따라서 본 연구에서는 ESDU(1983)의 Gust Factor Model을 사용하였다.

ESDU(1983)의 Gust Factor 모형은 다음 과정을 통하여 도출한다. 먼저 실제 지형에서의 10 m 고도 풍속인 V_a 와 거칠기 길이를 이용하여 마찰속도 u^* 를 계산하고, u^* 와 코리올리 파라메타 f 를 이용하여 10 m 고도를 기준으로 한 고도조정계수 η 를 구할 수 있다(식(6~7)).

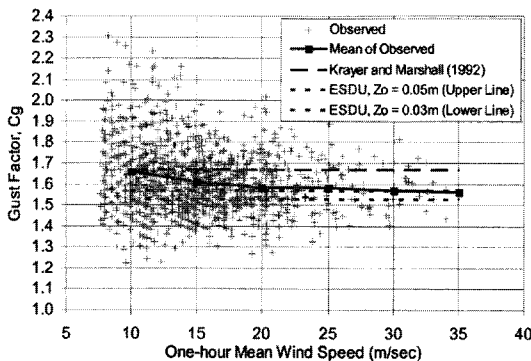


Fig. 1. Over-land gust factors at height of 10 m(ESDU, 1983).

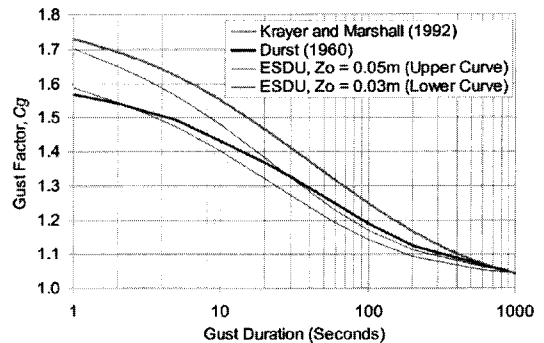


Fig. 2. Comparison of gust factor curves from ESDU, Durst, Krayner and Marshall(ESDU, 1983).

$$u^* = \frac{0.4 V_a}{\text{Ln}\left(\frac{10}{Zoa}\right)} \quad (6)(\text{ESDU}, 1983)$$

where, u^* = Friction velocity(m/s)

$$\eta = 1 - 6 f \left(\frac{10}{u^*}\right) \quad (7)(\text{ESDU}, 1983)$$

where, η = Height scaling parameter based on a height of 10 m

f = Coriolis parameter = $2(7.292 \times 10^{-5} \sin(\text{Lat.}))$

계산된 η , u^* , Zoa 와 f 를 이용하여 풍속에 대한 표준편차인 $\sigma_u(z)$ 를 계산할 수 있으며, 이 때 풍속에 대하여 3초당 1회 주기에 대한 빈도 범위를 고려하므로 $\sigma_u(z)$ 를 이용하여 3초에 대한 편차를 구한다(식 (8~9)).

$$\sigma_u(z) = \frac{7.5 \eta u^* \left(0.09 \text{Ln}\left(\frac{10}{Zoa}\right) + 0.538\right) \eta^{16}}{\left(1 + 0.156 \text{Ln}\left(\frac{u^*}{f \cdot Zoa}\right)\right)} \quad (8)(\text{ESDU}, 1983)$$

$$\sigma_u(z,3) = \sigma_u(z) \left(1 - 0.193 \left(\frac{I_t}{3} + 0.1\right)\right)^{-0.68} \quad (9)(\text{ESDU}, 1983)$$

where, I_t = the integral scale time parameter($Z=10$ m)
 $= 3.13Z^{0.2} = 4.96$

C_r 은 식 (10)과 같이 I_t 를 이용하여 계산이 가능하며, 앞에서 계산한 $\sigma_u(z)$, $\sigma_u(z,3)$ 와 C_r 을 이용해서 최대 3초 바람에 대한 peak factor를 계산한다(식 (11)).

$$C_r(3) = \frac{\left(0.0007 + 0.213 \left(\frac{I_t}{3}\right)^{0.654}\right)}{I_t} \quad (10)(\text{ESDU}, 1983)$$

where, C_r = the wind fluctuation cycling rates

$$P_f(3) = \left[\sqrt{2 \text{Ln}(600 C_r)} + \frac{0.557}{\sqrt{2 \text{Ln}(600 C_r)}} \right] \frac{\sigma_u(z,3)}{\sigma_u(z)} \quad (11)(\text{ESDU}, 1983)$$

where, $P_f(3)$ = the peak factors for the max 3 second winds

식 (13)과 같이 gust factor를 구하기 위해서는 peak factor와 경도난류강도 T_{ii} 이 필요하므로 식 (12)와 같이 $\sigma_u(z)$ 와 U_h 를 이용하여 T_{ii} 을 계산한다. 계산 결과는 식 (13)을 이용하여 3초에 대한 gust factor를 계산할 수 있으며, 앞에서 제시한 식 (5)와 같이 V_a 와 gust factor를 곱하여 3-second gust를 산정할 수 있다. gust

Table 3. Estimation of the 3-second gust(V3)

Region	Va (m/s)	$\sigma_u(z)$	$\sigma_u(z,3)$	$P_f(3)$	T_{ii}	$G_{10\text{min},3}$	V3 (m/s)
Seoul	20.365	0.126	0.109	2.4994	0.0062	1.015	20.680
Busan	41.203	2.433	2.112	2.4994	00059	1.148	47.284
Daegu	45.646	2.682	2.328	2.4994	0.0587	1.147	52.349
Incheon	38.794	2.305	2.001	2.4994	0.0594	1.149	44.555
Gwangju	40.173	2.374	2.062	2.4994	0.0591	1.148	46.108
Daejeon	37.419	2.223	1.930	2.4994	0.0594	1.148	42.975
Ulsan	45.646	2.682	2.328	2.4994	0.0587	1.147	52.349
Gyeonggi	38.794	2.305	2.001	2.4994	0.0594	1.149	44.555
Gangwon	32.423	1.943	1.367	2.4994	0.0590	1.148	47.284
Chungbuk	30.784	1.848	1.605	2.4994	0.0600	1.150	35.404
Chungnam	37.419	2.223	1.930	2.4994	0.0594	1.148	42.975
Jeonbuk	45.644	2.681	2.327	2.4994	0.0587	1.147	52.344
Jeonnam	40.173	2.374	2.062	2.4994	0.0591	1.148	46.108
Gyeongbuk	45.646	2.682	2.328	2.4994	0.0587	1.147	52.349
Gyeongnam	41.203	2.433	2.112	2.4994	0.0590	1.148	47.284
Jeju	36.110	2.152	1.868	2.4994	0.0596	1.149	41.487

factor와 3-second gust(V3) 계산 결과를 Table 3에 나타내었다.

$$T_{il} = \frac{\sigma_u(z)}{U_h} \quad (12)(ESDU, 1983)$$

where, T_{il} = longitudinal turbulent intensity
 U_h = wind speed at 10 m elevation

$$G_{10mi,3} = 1 + T_{il} P_f(3) \quad (13)(ESDU, 1983)$$

where, $G_{10mi,3}$ = the gust factor

3-second gust인 V3는 실제 지형에서의 10 m 풍속(Va)과 비교하여 약 1.1~1.5배의 풍속을 보였다. Gust factor 계산 과정에서 해당 지역의 거칠기 길이(Zoa)가 민감한 변수로 작용하는데, 전국 시·도의 Zoa가 0.15~0.8에 해당되므로 Zoa가 기본값인 0.03일 경우 V3는 약 1.8~2.6배 증가하였다.

3.3. 3-second gust에 의한 피해확률 산정

FPHLM(FDFS, 2005)에서는 강풍에 의한 주택의 피해를 추정하는데 Fig. 3과 같이 취약성 곡선

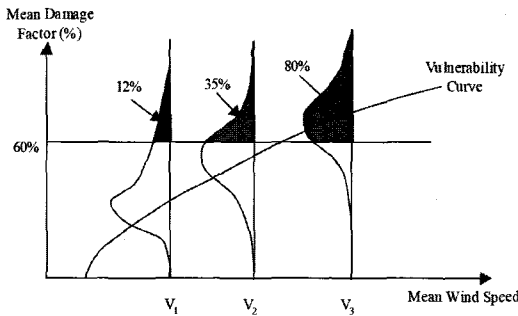


Fig. 3. Fragility curve generation for 60% overall structural damage(FDFS, 2005).

(Fragility curve) 개념을 사용한다. 여러 풍속에서 특정 유형의 건축물이 입을 평균 피해 분포를 나타낸 것이 vulnerability curve며, 이 값을 이용하여 확률통계적인 값을 도출하는 것이 fragility curve 이다. 예를 들어, Fig. 3에서 평균 피해율이 60% 이상인 경우의 자료를 이용하여 이 건물이 특정 풍속대에서 60% 이상 피해를 입을 확률이 얼마나 되는지를 Fig. 4와 같은 분포로 표현할 수 있다.

이 취약성 곡선을 만들기 위해서는 특정 풍속에 따라 주택의 주요 구성요소에 대한 피해수준을 나타내는 값이 필요하다. 이 과정을 위해서 Table 4와 같은 결과를 도출하며, 피해수준은 크게 0=no damage, 1=Light(<25%), 2=Moderate(25%-50%), 3=Heavy(>50%) 4단계로 구분한다. 풍속 v가 50 m/s 일 때 P(O1|v)가 10%를 나타내는데, 이것은 풍속이 50 m/s 일 때 창문이 0~25% 만큼 피해 입을 확률이 10%라는 것을 의미한다.

건물의 취약성 곡선을 만들기 위해서는 특정 주택을 대상으로 각 구성요소에 대한 풍해중 실험이 이루어져야 하며, 실제로 허리케인 또는 태풍이 내습하여 주택이 피해를 입은 사례들과 보험 claim 자료들도 필요하다. 이 과정에서 먼저 건물에 대한 취약성 곡선을

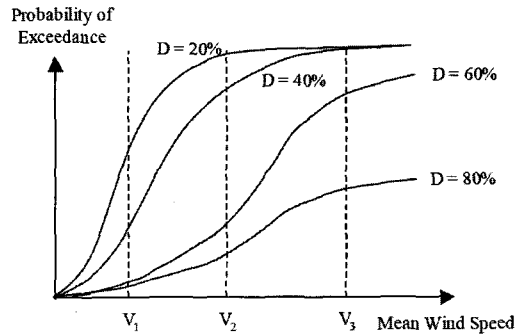


Fig. 4. Family of fragility curves for a particular structural type(FDFS, 2005).

Table 4. Assumed probabilities of occurrence of sub-damage modes Oi conditional on wind speeds intervals associated with the wind speed v(FDFS, 2005)

v (m/s)	45	50	55	60	65	70
P(O1 v)	6%	10%	5%	5%	5%	0%
P(O2 v)	4%	30%	40%	35%	20%	10%
P(O3 v)	0%	10%	40%	60%	75%	90%

만들기 위해서 건물의 풍하중을 산정하는데 있어 기본적으로 해당 지역에 있는 모든 건물 유형을 고려할 수는 없으므로, 통계조사를 통하여 그 지역을 대표하는 대표 건물 유형을 선정해야 하며 주택은 Fig. 5와 같이 크게 5가지 주요 요소로 구분한다(FDFS, 2005).

FPHLM(FDFS, 2005)은 실제 피해와 풍하중 실험에 의한 결과를 근거로 취약성 곡선을 만든 뒤, 허리케인 Andrew에 의한 피해 자료와 특정 3-second gust에서 모의한 모형 결과를 이용하여 모형을 구축하고 검토하는 과정에 매우 중요하게 사용하였다.

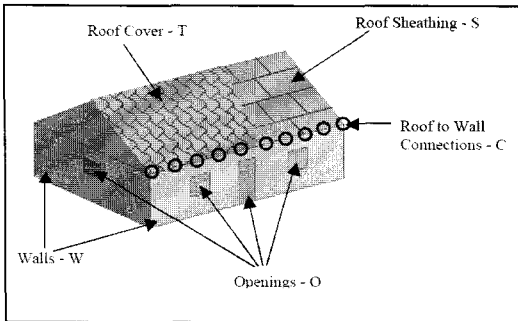


Fig. 5. Components of a single family home(FDFS, 2005).

미국의 경우 주택의 유형을 분류하고 통계자료를 구축하고 피해 조사에 사용하기 위한 목적으로 정기적인 주택 유형 조사를 하며, Fig. 6과 같이 13가지 구성요소대상으로 한다. 주택에 대한 재해 피해를 산정하고자 할 때 가장 먼저 파악되어야 할 부분이 해당 지역의 주택 유형을 조사하고 그 지역에서 가장 많이 차지하고 있는 대표 주택 유형을 선정하는 과정이었다. 향후 본 연구뿐만 아니라 한반도를 대상으로 한 재해 예측모형을 구축하기 위해서는 국내에서도 Fig. 6과 같은 구체적인 자료를 기반으로 주택관련 통계자료가 구축되어야 한다.

또한 허리케인에 의해 주택 피해를 입은 이후에도 건물 요소에 따라서 어느 강도의 피해를 입었는지를 조사한다. 실제 피해 정도를 구분하고 조사한 자료는 재해예측모형, 보험 회사, 방재유관기관 등에 매우 유용하게 사용된다. 그러나 국내에서 제공되는 대표적인 자연재해 피해 자료인 ‘재해연보’는 건물 피해를 크게 반파(주택의 피해정도가 1/3 이상으로, 지붕재의

바리 또는 바람으로 인한 주택의 담장과 외장재 벽체의 바리 정도인 경우)와 전파(주택 전체 또는 지붕 전체가 파손되어 형체가 없어졌거나 건축적·구조적으로 주거로서 안전에 대수신 또는 해체를 요하는 경우)로만 구분하고 있다. 건물은 구성 요소별 피해 정도에 따라서 교체 범위가 달라 피해액의 차이가 크기 때문에, 건물의 피해 정도를 지금까지처럼 단순히 반파와 전파로만 구분한다면 취약성 곡선을 만들 수 없으며, 주택의 피해액을 산정하는데도 많은 어려움이 따른다. 그러므로 현 상황에서는 미국과 같은 주택에 관한 구체적인 체계적인 기초 통계자료와 태풍에 의한 피해자료가 구체적으로 구분되어 구축되지 않는 한 국내 자료를 이용하여 취약성 곡선을 구축할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 FPHLM의 취약성 곡선을 이용하여 피해확률을 산정하고, 피해액을 산정하는데 사용하였다.

LOCATION: FL LA HA Grid _____ Film _____ Exp. _____ to _____ Dwelling Type: _____
 Date: _____ S.F. _____ T.H. _____ A.P. _____
 Name: _____ Inspected: _____
 Address: _____ Exterior Interior
 Currently Occupied: Yes No Unknown
 Overall Height: _____ ft. No. of Stories: _____

ROOF TYPE: Gable <input type="checkbox"/> Shed <input type="checkbox"/> Hip <input type="checkbox"/> Flat <input type="checkbox"/> Other: _____ Pitch: _____ L <input type="checkbox"/> M <input type="checkbox"/> H <input type="checkbox"/>	ROOF FRAMING: Wood Rafters <input type="checkbox"/> Wood Truss <input type="checkbox"/> Steel Truss <input type="checkbox"/> Other: _____	ROOF SHEATHING: Plywood <input type="checkbox"/> Bead <input type="checkbox"/> OSB <input type="checkbox"/> Nail <input type="checkbox"/> Staple <input type="checkbox"/> Other: _____ Fasteners: _____ <small>(type, size and spacing)</small>	ROOFING: Composition <input type="checkbox"/> Metal <input type="checkbox"/> Wood Shingles <input type="checkbox"/> Flat Clay Tile <input type="checkbox"/> Barrel Clay Tile <input type="checkbox"/> Other: _____ Fasteners: _____ <small>(type, size and spacing)</small>
EXTERIOR WALL SIDING: Wood Lap <input type="checkbox"/> Plywood Siding <input type="checkbox"/> Brick <input type="checkbox"/> Stucco <input type="checkbox"/> Vinyl/Aluminum <input type="checkbox"/> Other: _____	EXTERIOR WALL SHEATHING: <small>(where applicable)</small> Plywood <input type="checkbox"/> OSB <input type="checkbox"/> Let in Brace <input type="checkbox"/> Thermo-Ply <input type="checkbox"/> Other: _____ Thickness: _____ Fasteners: _____ <small>(type, size and spacing)</small>	EXTERIOR WALL FRAMING: CMU <input type="checkbox"/> Brick <input type="checkbox"/> Wood <input type="checkbox"/> Sliding Doors <input type="checkbox"/> Large Windows <input type="checkbox"/> Other: _____	INTERIOR WALL MATERIALS: Wood <input type="checkbox"/> Gypsum <input type="checkbox"/> Steel Stud <input type="checkbox"/> Plaster <input type="checkbox"/> CMU <input type="checkbox"/> Other: _____

Fig. 6. Front of damage survey form for recording the building characteristics(FDFS, 2005).

FPHLM(FDFS, 2005)에서는 건물의 풍하중과 실제 피해 자료 등을 이용하여 강풍에 의한 피해 확률을 추정하는데 Monte Carlo Simulation(MCS)을 이용하였다. MCS는 확률변수의 장래를 예측하는 수치적 접근방법으로 수치적으로 해를 찾기 위해서는 확률모형의 모수(parameter)나 변수에 대해 반복적으로 여러 수치를 시도하여 확률변수의 분포를 얻어내야 한다. 이 때 이 분포를 시뮬레이션 하기 위해 반복적으로 이용하는 수치를 일련의 난수(random number)로부터 얻을 때 이를 MCS라 한다. 이 시뮬레이션을 실행하기

위해서는 사전에 불확실한 변수에 대해 확률분포를 가정해야 한다. 확률분포를 정의함으로써 불확실한 변수가 확률변수로 전환되고 이 확률변수를 이용해 모형의 예측 값에 대한 분포를 얻을 수 있을 것이다. 주택 구성 요소에 대해서 시뮬레이션을 실행하면 결과는 수치로 나타나며, 이 결과 값을 Vulnerability로부터 fragility curves를 표현할 수 있다.

Fig. 7은 주택의 지붕에 대한 취약성 곡선의 예를 나타낸 그림이다. 연구에서도 FPHLM(FDFS, 2005)에서 구축한 fragility curves를 이용하여 MCS를 수행하였다.

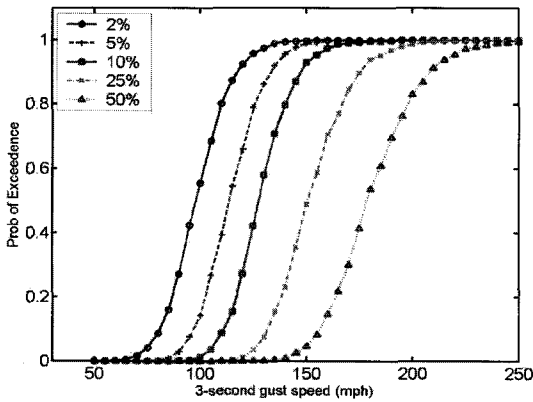


Fig. 7. Fragility curves for 2%, 5%, 10%, 25% and 50% damage to roof cover for South/Keys CBH homes (FDFS, 2005).

3.4. 대표 주택에 대한 피해액 산정

선행모형인 FPHLM의 주택 구성 요소별 취약성 곡

선을 이용하여 MCS를 수행하여 각각의 주택 구성 요소와 풍속대에 따른 피해 확률을 계산하였으며, 각 구성 요소별 피해 확률 값은 피해액을 계산하는데 사용된다.

과거에 발생한 태풍을 대상으로 태풍이 한반도에 상륙한 시점부터 빠져나가는 전 기간을 대상으로 피해액을 산정하므로, 실제 태풍의 예상 진로와 강도에 따라서 강풍 범위와 최대풍속이 달라지므로 예상되는 피해액도 다르게 산정되며, 예보 자료가 생산될 때마다 태풍에 의한 한반도 단독주택의 예상 피해액도 변한다. 그러나 이 사례에서는 태풍에 의한 피해액을 산정하는 전체 과정을 보다 쉽게 파악할 수 있도록 사례를 통하여 연구 방법을 적용하는 것이므로, 과거에 발생한 Maemi가 한반도를 통과하는 전 시간에 대하여 지역별로 3-second gust가 가장 높은 값을 대상으로 단독주택에 미치는 영향을 산정하고자 하였다. 결과적으로 태풍이 한반도를 통과하면서 발생할 수 있는 최대순간풍속을 이용하여 단독주택이 최대한 파괴될 수 있는 상황을 고려하는 것이다.

풍하중 산정과 취약성 곡선을 구축하지 못하는 현재 상황에서 피해액을 산정하는데 있어 모든 주택을 대상으로 할 수는 없으므로, 우리나라를 대표하는 주택을 선정해야 할 필요가 있다. 통계청의 주택 총조사 자료와 문헌조사, 선행연구를 이용하여 우리나라를 대표하는 주택 종류를 1층 일반단독주택, 1가구가 거주하며 방은 5개(부엌, 화장실 포함), 주택 면적은 62.81~95.56 m²(19~28 평)으로 정의하였다(박 등, 2008b; 박 등 2008c). 또한 선행연구 및 문헌조사를

Table 6. Example of damage vulnerability matrix

3-second gust (mph)	Roof cover			Roof Sheathing		
	DS1 (<25%)	DS2 (25%-50%)	DS3 (>50%)	DS1 (<25%)	DS2 (25%-50%)	DS3 (>50%)
30	0.23523	0	0	0.102	0	0
35	0.27574	0	0	0.14778	0	0
40	0.33153	0	0	0.19617	0	0
45	0.3458	0	0	0.24545	0	0
80	0.45979	0	0	0.43452	0	0
85	0.46966	0.00005	0	0.90602	0	0
95	0.47621	0.00376	0	0.4665	0	0
100	0.46856	0.01376	0.00001	0.94554	0.00024	0
105	0.45261	0.03299	0.00013	0.47451	0.00173	0
115	0.38344	0.10012	0.00589	0.89047	0.02644	0.00001

통하여 주택의 대표 지붕유형은 모입지붕(hip roof)과 평지붕(flat roof)으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 각 지역에 따라 태풍 Maemi에 의한 3-second gust가 미치는 주택 피해를 산정하기 위하여 앞서 설명한 대표 주택 유형에 대한 호수만을 대상으로 하였다.

피해액 산정에 있어서는 앞에서 언급하였듯이 전국 시·도 단위로 3-second gust가 가장 높은 풍속에 대푯값으로 정하고 주택의 요소 중에서 그 풍속에 해당하는 피해 확률 값을 이용하였다. FPHLM에서 구분한 4단계 피해수준에 따랐으며, 태풍 Maemi 때 발생한 풍속에 대한 피해 단계별 확률 값의 예는 Table 6과 같다.

피해확률 값에 따른 피해액을 산정하기 위해서는 기본적으로 식 (14)를 이용하여 계산할 수 있다. 이 때 주택의 구성 요소별 복구비 비율 자료가 필요하나, 국내 단독주택에서 사용하는 구성 요소에 대하여 대표 자재 가격을 알 수 없으므로, 건물 전체 가격을 이용하여 피해액을 산정하는 방법을 적용하였다. Table 7과 같이 FPHLM에서 조사한 집 전체 가격에 대한 구성 요소별 복구비 비율을 사용하여 피해액을 산정하였다.

$$\text{Damage}_{type m}(v_j) = \sum_{\text{damage_state } i} P(\text{damage_state}_i | v_j) \times c(\text{damage}_i) \quad (14)(\text{FDFS, 2005})$$

Table 7. Repair costs ratios for subassemblies of masonry homes in Central Florida(FDFS, 2005)

Component	Repair Ratios
Roof Sheathing	5%
Roof Cover	7%
Trusses	9%
Exterior Walls	22%
Windows	4%
Shutters	2%
Entrance Door and Sliding Back Door	1%
Garage	1%
Un-modeled Non-Structural	35%
Plumbing	10%
Mechanical	7%
Electrical	7%
Total	110%

주택 피해 산정 과정으로 대전(Daejeon)을 예로 들면, 대전에서 산정한 3-second gust는 42.975 m/s로 이와 비슷한 풍속인 95 mph를 대상으로 주택 구성요소별 피해수준에 따른 피해 확률과 피해액은 Table 8과 같이 계산할 수 있다. 대표 주택 유형에 해당하는 주택은 총 3,630,345,059호로, 주택 1채 가격이 서울부터 제주도까지 전국 시·도에 따라 가격차이가 많으므로, 광역시와 시골 지역의 차이를 고려하여 주택 가격을 5천만 원으로 가정하였다. 현재 단독주택에 대한 지붕의 유형별 통계자료는 없어, 단독주택의 대표 면적인 19~29 평에 대한 통계 자료를 전국 시·도로 구분하여 이용하였다. 이 과정을 전국 각 시·도의 대표 주택 호수를 곱하여 피해액을 산정하는 결과는 Table 9와 같다. 태풍에 의한 강풍이 면적 19~29 평이며 1층 단독주택의 주요 구성 요소에 입힐 수 있는 최대 피해는 태풍 Maemi의 경우 약 11조 5,000천억 원으로 추정하였다.

이 피해액은 태풍 Maemi 내습 시 한반도에 발생 가능한 최대순간풍속이 주택에 입을 수 있는 최대 피해액을 추정한 결과이므로, 실제 발생한 피해액보다 높게 추정되는 것이 사실이다. 이 연구에서는 태풍에 의한 피해액을 정확하게 추정하는 것이 아니라 지역에 따라 태풍에 의한 강풍 취약성을 경고하여 사전에 대비하기 위한 목적이므로, 피해액이 실제보다 높게 추정되는 것이 당연하다.

또한 태풍경로에 위치한 전체 주택에 대한 피해액을 나타낸 것이 아니다. 여러 가지 주택 유형 중에서도 아파트 등을 제외한 ‘일반단독주택’ 중에서 1층이며 주택 면적이 19~29 평 규모에 해당하는 경우의 피해를 산정한 것이다. 또한 본 연구에서는 주택 가격을 5천만 원으로 통일하였으나, 피해액 산정 과정에 있어 주택가격은 가장 마지막에 들어가는 변수로 특정 지역을 대상으로 지역을 세분화하여 피해액 산정 시, 들어가는 주택 가격에 따라 피해액은 얼마든지 변할 수 있다. 따라서 같은 주택 유형이라도 각 시·도의 구·군별 주택 가격이 다르므로 더 정확한 주택 가격을 조사하여 피해액을 산정할 수 있다.

Table 9. Damage cost of ordinary detached dwelling by region

Region (Si-Do)	Total households	Damage cost (thousand)	Region (Si-Do)	Total households	Damage cost (thousand)
Seoul	52,849	122,399,605	Gangwon	84,934	806,246,611
Busan	41,676	368,613,176	Chungbuk	80,537	639,604,317
Daegu	28,613	295,620,502	Chungnam	140,860	124,588,627
Incheon	29,551	300,094,689	Jeonbuk	119,632	1,236,000,139
Gwangju	22,008	200,047,344	Jeonnam	163,954	1,490,022,969
Daejeon	21,261	188,050,462	Gyeongbuk	180,106	1,860,798,458
Ulsan	14,230	147,019,877	Gyeongnam	127,189	1,124,868,262
Gyeonggi	127,629	1,296,091,001	Jeju	25,592	226,357,529
Total				11,547,788,794	

4. 결론

본 연구에서는 태풍에 의한 최대순간풍속(3-second gust)이 주택에 입히는 피해액 산정에 관하여 태풍의 실제 지형에서의 10 m 고도 풍속을 이용하여 대표 주택 유형에 미칠 수 있는 최대 피해액을 산정하였다. 연구 결과는 태풍이 한반도에 상륙할 것으로 예상될 때 방재유관기관 및 국민들에게 신속하게 제공 가능한 태풍에 의한 바람 피해가 대표 주택 유형에 입힐 수 있는 최대 피해액을 추정하는데 목적이 있다. 사례 기간인 2003년 태풍 Maemi가 한반도를 통과하는 주요 기간을 대상으로 전 기간 동안에 전국의 시·도에 발생 가능한 3-second gust를 추정하였다. 추정한 3-second gust는 취약성 곡선에 의해 MCS를 이용하여 주택의 주요 구성요소별로 피해 확률을 추정하였으며, 한반도 대표 주택 유형을 약 5천만 원으로 가정하였을 경우 태풍 Maemi에 의해 발생 가능한 최대 피해액을 약 11조 5천억 원으로 산정하였다.

본 연구에서 제시하고 있는 3-second gust를 이용한 피해액 산정 모형을 활용할 경우, 우리나라에 주택 요소 관련 통계 자료 Database가 구축이 된다면, 주택

면적, 층 수, 지붕 유형 등 각각의 다양한 주택 유형별 피해액을 구체적으로 산정할 수 있다. 향후 1층 단독 주택의 여러 가지 면적에 대해서도 적용하여 피해액을 추정할 수 있으며, 지붕 유형에 따른 통계자료가 같이 제공한다면 더 세분화하여 피해액을 계산할 수 있다. 태풍에 의한 10 m 고도의 3-second gust는 기상자료를 이용하여 해상도를 높여 적용할 수 있으나, 현재 피해액 계산을 위한 기본 통계자료들이 기상자료의 해상도가 낮거나 제공되지 않는 자료 유형이 많아, 강풍에 의한 피해액을 지역적으로 세분화 하는데 많은 어려움이 있어 건물 자료에 대한 개선이 요구된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-3303)의 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

한국과학기술기획평가원, 2005, 태풍에 관한 장·단기 연구 계획수립 및 태풍센터 설립방안 조사, 기상청, 160.

Table 8. Estimation of components damage(95 mph)

Components	Damage State			Ratio	Mean Damage	Cost (won)
	DS1 (<25%)	DS2 (25%-50%)	DS3 (>50%)			
Roof cover	0.47621	0.00376	0	0.07	0.035598	1,779,900
Roof Sheathing	0.4665	0	0	0.05	0.023325	1,166,250
Wall	0.46121	0	0	0.22	0.101466	5,073,300
Window	0.4027	0	0	0.04	0.018508	925,400
Total						8,944,850

- 오재호, 2007, 지구온난화, 태풍강도 변화에 큰 영향, Disaster Focus, 5, 104-107.
- Axe, L. M., 2003, Hurricane Surface Wind Model For Risk Assessment, Mater's Thesis, the Florida State University.
- Choi, H. J., 2007, Review of risk model and application of the prevention meteorological information to reduce the natural disasters, Master Thesis, Inje University, Gimhae, Korea.
- Engineering Sciences Data Unit, 1983, Strong Winds in the Atmospheric Boundary Layer, Part 2 : Discrete Gust Speeds, Item No.83045, London.
- Federal Emergency Management Agency, 2003, HAZUS-MH MRI Technical Manual.
- Florida Department of Financial Services, 2005, Florida Public Hurricane Loss Projection Model, Engineering Team Final Report Volume I-III.
- Franklin, J. L., Black, M. L., Valde, K., 2003, GPS Dropwindsonde Wind Profiles in Hurricanes and Their Operational Implications, J. Weather and Forecasting, 18, 32-44.
- Korea Meteorological Administration, 2003, Regional Data Assimilation Prediction System.
- Korea National Statistical Office 2005, Census.
- Lee, S. S., Cho, H. D., 2006, 풍수해 피해 예측 평가 도구 (HAZUS-MH)의 소개, Korean Geoenvironmental Society(KGES), Geo- environmental engineering, 7(3), 26-30.
- Park, J. K., Jung, W. S., Choi, H. J., 2008a, The study on the strong wind damage prediction for estimation surface wind speed of typhoon season (I), Atmos. Env., 17(2), 195-201.
- Park, J. K., Jung, W. S., Choi, H. J., 2008b, Representative type selection for strong wind damage by typhoon(II), proceeding of the Korean Environmental Sciences Conferences(autumn), 39-41.
- Park, J. K., Jung, W. S., Choi, H. J., 2008c, Representative type selection for strong wind damage by typhoon(I), proceeding of the Korean Environmental Sciences Conferences(autumn), 117-119.
- Powell, M. D., Samuel, H. Houston, Timothy, A. Reinhold, 1996, Hurricane Andrew's Landfall in South Florida, Part I : Standardizing Measurements for Documentation of Surface Wind Fields, J. Weather and Forecasting, 11, 304-328.
- The Regional Specialized Meteorological Center Tokyo-Typhoon Center, 2003, Best Track data.
- United States Geological Survey, Landuse.
- Vickery, P. J., Skerlj, P. F., 2005, Hurricane Gust Factors Revisited, J. Struct. Eng., 131(5), 825-832.