

태풍 특성치와 진로를 고려한 태풍피해예측함수 및 태풍등급체계 개발

Development of a Typhoon Damage Prediction Function and Rating System Using Typhoon Characteristics and Tracks

김태균*

Kim, Taegyun*

Abstract

In this study, a typhoon exposure index (TEI) was developed that can identify the effects of typhoons on the Korean Peninsula, allowing the development of a typhoon damage prediction function using TEI and rainfall data, based on which a new typhoon rating system is proposed that takes likely damage into consideration. TEI takes a value inversely proportional to the distance from the center of a typhoon to a district and proportional to the maximum wind speed in the center of a typhoon. In the rainfall data, a variable identified using principal component analysis was introduced to resolve the issue of multicollinearity between the maximum rainfall and duration. The typhoon damage prediction function for all typhoons showed good predictive precision, and the predictive precision for typhoons passing through the East Sea and making landfall in the South Sea was higher than for all typhoons. Since the KMA typhoon rating system cannot represent the degree of disaster risk on the Korean Peninsula by track, a new typhoon rating system considering with damage was developed using TEI and rainfall data.

Key words : Typhoon Expose Index (TEI), Typhoon Damage Prediction Function, Typhoon Rating System, Disaster Risk, Typhoon Track

요 지

본 연구에서는 태풍이 한반도에 미치는 영향을 파악할 수 있는 태풍노출지수(TEI)를 개발하고, TEI와 강우자료를 이용하여 태풍피해를 예측할 수 있는 함수를 개발하였고, 태풍피해를 고려한 태풍등급체계를 제시하였다. TEI는 태풍중심에서 지자체까지의 거리에 반비례하고, 중심부 최대풍속에 비례하는 변수로, 태풍영향 범위에 어느 정도 노출되었는지를 나타내는 척도이다. 강우자료는 지속기간별 최대강우량의 다중공선성문제를 해결할 수 있는 주성분분석에 의한 변수를 도입하였다. 태풍피해예측함수는 비교적 높은 예측력을 나타내었고, 동해관통형 및 남해상륙형 태풍에 대한 예측력은 상대적으로 높게 나타났다. 현재 운영중에 있는 태풍등급은 진로에 따른 한반도의 재해위험정도를 나타낼 수 없으므로, 태풍피해를 고려한 태풍등급체계를 TEI와 강우량자료를 이용하여 개발하였다.

핵심용어 : 태풍노출지수, 태풍피해예측함수, 태풍등급체계, 재해위험도, 태풍 진로

1. 서 론

태풍은 우리나라 재해 원인중 단일사상으로는 가장 큰 피해를 일으키고, 매년 재해원인으로 1, 2위를 차지하는데 (MOIS, 1996-2022), 태풍 재해는 호우, 강풍 및 연안지역의

강풍과 저기압에 따른 해수면상승으로 인한 파랑 피해 등 3가지 재해가 넓은 지역에 동시에 발생하기 때문이다(Kim, 2021).

태풍내습시 각 재해원인에 대하여 살펴보면, 호우는 태풍의 넓은 반경과 해양으로부터 공급되는 수증기 및 산악지역에 의한 집중호우의 영향으로 광범위한 지역에서 발생하기

*교신저자, 정회원, 경상국립대학교 조경학과 교수(Tel: +82-55-772-3306, Fax: +82-55-772-3309, E-mail: tgkim@gnu.ac.kr)
Corresponding Author, Member, Professor, Department of Landscape Architecture, Gyeongsang National University

(Lee and Choi, 2013) 때문에 3가지 원인중 가장 큰 피해액을 나타낸다. 호우피해액 산정을 위한 연구 중 강우량과 피해액 관계를 이용한 연구로는 J. Lee et al. (2016), Kim et al. (2016), Kim et al. (2018) 등의 연구에서 지속기간별 강우량, 선행강우량 등의 다양한 변수를 이용하였고, 단순회귀모형, 능형회귀모형, 로지스틱 회귀모형 등의 모형을 이용하였으나, 피해액 예측력을 설명하는 결정계수, RMSE (또는 NRMSE) 등이 만족할 정도는 아닌 것으로 나타났다.

강풍은 태풍의 기상학적 특성을 가장 잘 나타내는 재해원인이며 연안지방의 풍랑을 일으키는 요인이기도 하다. 내륙지역에 있어 강풍으로 인한 피해는 비닐하우스가 대부분을 차지하며, 연안지방의 경우는 풍랑으로 인한 피해인 방파제·방조제, 어항·항구, 어망·어구, 수산증양식 시설 등의 파괴, 손실이 대부분을 차지한다(Kim, 2021). 강풍에 의한 피해액 산정 연구는 전라, 경상도 등 광역시도를 대상으로 강풍과 관련된 기상특성치인 평균풍속, 최대풍속, 최대순간풍속과 평균기온, 최저기온, 최고기온 및 복구비, 인구, 농가수, 비닐하우스 면적 등 사회경제적 변수까지 고려하여 강풍으로 인한 피해를 예측하였다. 강풍피해예측모형 개발 결과는 예측력을 판단할 수 있는 결정계수가 높은 지역과 낮은 지역으로 나누어지는 것으로 나타났으며(Rho and Song, 2020; Song and Yang, 2020), 평균풍속, 최대풍속, 최대순간풍속 등 강풍 관련 기상특성치만 사용한 모형의 경우는 결정계수가 대단히 낮게 나타났다(Song et al., 2020).

풍랑피해액을 예측하기 위한 연구(Choo, Cho et al., 2018; Choo, Kim et al., 2018; Sim et al., 2019)에서는 풍랑의 크기를 예측할 수 있는 기본자료인 풍속, 평균조위, 최대조위, 최대파고, 유의파고 뿐 아니라, 국립해양조사원의 연안재해위험성평가체계에서 이용하는 연안재해영향지수, 연안재해노출지수, 연안민감도 지수 등을 이용하여 피해액산정모형을 구성하였으며, NRMSE를 이용한 비교에서 2-30% 정도를 나타내는 것으로 나타났다.

한편 태풍피해와 기상특성치 관계에 대하여 S. Lee et al. (2016)는 1시간 최대강우량과 10분 최대풍속을 이용하여 피해액과의 관계를 회귀분석하였고, Lee (2012)는 평균강우량, 최대풍속과 피해액 관계를, Kim et al. (2017)은 지속기간별 최대강우량, 선행강우량, 최대풍속과 피해액 관계를 회귀분석모형을 이용하여 개발하였으나, 피해추정모형의 정확도 또는 피해액과 기상특성치의 상관관계가 높지 않은 것으로 나타났다.

호우, 강풍, 풍랑 등 3가지 재해원인이 복합적으로 발생하는 태풍피해와 각종 수문기상학적 특성치의 관계를 분석하기 위하여, 각각의 재해원인과 피해액 관계에 대한 연구를 조사한 결과, 각종 수문기상학적 변수만으로 피해액을 설명하기에는 충분한 정확도를 나타내지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 태풍의 경우도 호우와 관련된 변수, 강풍과 관련된 변수, 풍랑과 관련된 변수를 이용하더라도 피해를 추정하는

데 한계가 있다는 것을 알 수 있다.

태풍으로 인한 피해 발생 여부 또는 위험정도를 나타내기 위한 연구도 시도되었는데, S. Lee et al. (2016)는 지자체별 표준화한 인구당 평균재산피해액을 산정하여 태풍피해표준화지수를 개발하였고, Y. Kim et al. (2019)는 지자체별 수문기상학적 인자, 도시화 등 지역적 특성인자, 사회경제적 인자 등을 고려한 태풍위험지수를 개발하였다. 한편 Song et al. (2019), Kim (2021)은 현재 적용되는 태풍 등급을 대신하여 피해를 유발하는 정도에 따라 태풍을 분류하는 태풍등급체계를 개발하였다. 이러한 시도들은 태풍과 한반도 피해발생의 관계를 규명하여 태풍재해에 대비하기 위한 방안의 일환으로 받아들여진다.

본 연구에서는 태풍 발생에서 소멸까지 관측하고 예측 정보인 진로(위치), 최대풍속, 영향범위 등의 자료를 이용하여 한반도가 태풍의 영향을 얼마나 받는지를 파악할 수 있는 방법을 모색하고, 태풍 정보와 기상청에 제공하는 시간별 강우량을 이용하여 태풍피해정도를 추정할 수 있는 방법을 개발하고자 한다. 또 태풍 영향을 나타내는 변수와 강우량 및 피해액을 이용하여 피해규모를 고려한 태풍등급체계를 제시하고자 한다.

2. 연구 방법 및 자료 수집

2.1 태풍자료 수집

본 연구에서는 태풍으로 인한 재해위험성을 평가하고, 피해를 추정하기 위하여 단일 태풍사상을 선택하였으며, 재해연보(MOIS)에 나타나 있는 자료를 근거로 1994년부터 2020년까지 35개 태풍을 대상으로 선정하였다. 태풍피해액은 2015년 기준 생산자 물가지수(BOK)를 이용하여 현재 가치로 환산하였으며 Table 1에 나타나 있다. 태풍 진로와 관련하여 Table 1의 'Track'에서 1은 동해관통형, 2는 남해상륙형, 3은 서해상륙형, 4는 서해관통형을 나타낸다.

35개 태풍에 대한 이동경로, 중심기압, 최대풍속, 반경 등의 기본적인 정보와 태풍 내습시 기록된 강우량, 최대풍속 등의 기상자료는 기상청(KMA1, KMA2)를 이용하여 수집하였다. 강우량자료는 ASOS와 AWS 자료를 모두 이용하였으며, 전국 시군구를 대상으로 Thiessen 계수를 구하여 면적강우량을 산정하였다. 한편 태풍 영향 정도를 나타내기 위한 자료로는 태풍 중심부의 위경도 좌표, 최대풍속, 반경 등 태풍 특성치와 229개 지자체(시군구)의 위경도 좌표를 이용하였다. 각 지자체의 위치는 각 지자체의 청사 위치로 결정하였다.

2.2 연구방법론

2.2.1 주성분 분석(principle component analysis, PCA)

주성분분석은 고차원의 자료를 저차원의 자료로 환원시키는 기법이다. 서로 연관가능성이 있는 고차원 공간의 표본

Table 1. Damage and Hydro-Meteorologic Data of Typhoons

No.	Name	Year	Track	Dmage (10 ⁹ won)	TEI (× 10 ³)		Max. Rainfall by Duration (10 ⁶ m ³)								PCA	1 hr Max (10 ³ /hr)				
					N. S.	D. S.	1 hr	2 hr	3 hr	6 hr	12 hr	24 hr	Total	Rain _{TEI}		te _i	Rain _t	R _{te_i}	R _{Rain}	RI
1	BRENDAN	1994	3	11.77	0.2	11.2	0.43	0.83	1.25	2.34	4.03	5.03	5.16	0.03	1.10	1.7	137.9	0.03	0.12	0.15
2	DOUG	1994	4	6.70	9.2	7.9	0.38	0.74	1.11	2.15	3.63	5.06	6.81	0.70	0.96	1.0	42.6	0.02	0.04	0.06
3	SETH	1994	2	16.80	84.5	41.4	0.71	1.35	1.96	3.72	6.68	8.25	8.32	8.96	1.76	22.6	498.2	0.40	0.44	0.84
4	FAYE	1995	2	152.30	161.4	77.0	0.28	0.54	0.73	1.33	2.63	3.46	3.71	0.02	0.68	27.9	197.4	0.49	0.17	0.66
5	TINA	1997	2	7.90	124.0	39.1	0.09	0.13	0.20	0.36	0.70	0.94	1.08	0.11	0.19	18.4	21.1	0.33	0.02	0.35
6	OLIWA	1997	1	8.30	28.9	0.3	0.04	0.08	0.11	0.18	0.27	0.28	0.28	0.05	0.10	3.0	10.3	0.05	0.01	0.06
7	YANNI	1998	2	356.00	33.6	43.8	1.09	1.87	2.65	4.56	8.13	11.56	11.56	4.27	2.46	14.0	934	0.25	0.82	1.07
8	RAMMASUN	2002	3	51.60	13.4	84.3	0.62	1.22	1.81	3.28	5.54	7.45	8.64	13.08	1.58	7.6	154.2	0.13	0.14	0.27
9	RUSA	2002	2	7,023.90	240.5	287.5	1.14	2.28	3.41	6.36	10.55	14.46	16.00	41.40	2.93	41.2	1137.9	0.73	1.00	1.73
10	SOUDELOR	2003	1	14.60	119.1	1.0	0.29	0.58	0.83	1.46	2.52	2.91	2.91	0.83	0.74	13.0	251.2	0.23	0.22	0.45
11	MAEMI	2003	2	5,642.70	433.6	117.5	0.90	1.75	2.53	4.43	6.34	10.68	11.30	0.39	2.14	56.7	898.9	1.00	0.79	1.79
12	MEGI	2004	2	309.90	266.3	15.3	0.85	1.67	2.48	4.76	8.37	13.18	14.55	1.13	2.14	30.9	394.7	0.55	0.35	0.90
13	NABI	2005	1	166.10	233.6	1.7	0.19	0.37	0.54	1.05	1.89	2.57	2.78	2.34	0.48	11.9	156.5	0.21	0.14	0.35
14	SHANSHAN	2006	1	13.00	106.5	0.0	0.15	0.29	0.43	0.84	1.47	2.50	2.86	0.40	0.37	11.4	56.5	0.20	0.05	0.25
15	MAN-YI	2007	1	0.40	73.9	0.0	0.02	0.03	0.04	0.07	0.11	0.16	0.17	0.05	0.04	6.0	3.5	0.11	0.00	0.11
16	NARI	2007	2	96.40	67.3	12.9	0.56	1.11	1.64	2.97	4.64	6.23	6.52	3.99	1.41	11.7	165.0	0.21	0.15	0.36
17	DIANMU	2010	2	2.30	84.6	38.4	0.37	0.71	1.04	1.99	3.50	6.29	7.87	0.71	0.88	7.9	156.8	0.14	0.14	0.28
18	KOMPASU	2010	3	161.40	1.6	141.9	0.38	0.75	1.12	2.11	3.58	4.31	4.54	0.41	0.98	15.9	151.3	0.28	0.13	0.41
19	MALOU	2010	1	0.10	12.4	0.5	0.22	0.42	0.60	1.01	1.64	2.66	4.75	0.18	0.51	0.9	3.1	0.02	0.00	0.02
20	MUIFA	2011	4	190.40	0.0	122.5	0.48	0.94	1.35	2.60	4.44	5.81	6.46	0.57	1.19	6.9	413.5	0.12	0.36	0.48
21	KAHNUN	2012	3	1.26	2.1	25.1	0.48	0.93	1.32	2.27	3.54	4.28	4.46	3.11	1.17	2.5	176.6	0.04	0.16	0.20
22	SANBA	2012	2	323.32	318.5	175.1	0.88	1.73	2.55	4.68	7.31	11.48	12.39	14.9	2.16	54.5	875.9	0.96	0.77	1.73
23	DANAS	2013	1	1.60	44.4	0.0	0.31	0.61	0.90	1.65	2.47	2.94	3.02	0.54	0.78	5.7	154.9	0.10	0.14	0.24
24	NEOGURI	2014	1	0.20	10.3	2.5	0.09	0.18	0.25	0.41	0.63	0.81	0.82	0.39	0.22	1.3	9.5	0.02	0.01	0.03
25	NAKRI	2014	4	4.70	0.0	22.2	0.39	0.77	1.16	2.24	3.95	5.96	6.89	0.77	1.00	1.4	31.6	0.02	0.03	0.05
26	GONI	2015	1	13.40	52.1	0.0	0.35	0.70	1.04	2.06	4.02	7.30	9.57	0.19	0.89	5.5	96.1	0.10	0.08	0.18
27	CHABA	2016	2	220.30	201.5	13.3	0.56	1.11	1.64	2.98	4.73	4.95	4.95	0.47	1.44	27.5	514.5	0.48	0.45	0.93
28	SOULIK	2018	2	8.90	131.2	256.0	0.28	0.55	0.82	1.57	3.00	4.71	5.82	0.09	0.72	28.8	201.4	0.51	0.18	0.69
29	KONG-REY	2018	2	52.60	186.7	34.8	0.80	1.58	2.35	4.48	7.36	10.69	12.16	1.19	2.01	27.6	606.0	0.49	0.53	1.02
30	DANAS	2019	2	3.40	0.2	3.0	0.36	0.68	0.99	1.89	3.34	5.59	9.06	0.21	0.61	0.4	228.7	0.01	0.20	0.21
31	FRANCOSCO	2019	2	0.04	0.6	0.4	0.27	0.52	0.75	1.38	2.17	2.95	2.98	0.09	0.47	0.6	116.5	0.01	0.10	0.11
32	LINGLING	2019	4	33.40	0.4	356.6	0.17	0.33	0.48	0.88	1.37	1.73	1.88	1.40	0.29	30.4	35.2	0.54	0.03	0.57
33	TAPAH	2019	1	0.12	111.3	0.0	0.42	0.83	1.22	2.33	4.33	7.84	10.51	1.35	0.73	13.3	181.4	0.23	0.16	0.39
34	MITAG	2019	2	167.70	69.3	45.4	0.80	1.56	2.28	4.18	7.05	11.16	12.19	2.71	1.39	10.7	605.9	0.19	0.53	0.72
35	BAVI	2020	4	1.12	0.7	192.6	0.18	0.33	0.49	0.94	1.72	2.45	2.56	1.42	0.30	15.7	139.9	0.28	0.12	0.40

들을 선형 연관성이 없는 저차원 공간(주성분)의 표본으로 변환하기 위해 직교 변환을 사용한다. 주성분의 차원 수는 원래 표본의 차원 수보다 작거나 같다. 주성분 분석은 자료를 한 개의 축으로 투영시켰을 때, 그 분산이 가장 커지는 축을 첫 번째 주성분, 두 번째로 커지는 축을 두 번째 주성분으로 놓이도록 새로운 좌표계로 데이터를 선형 변환한다. 주성분 분석으로부터 선택/추출된 변수는 기존 변수들의 선형결합으로 구성되며 소수의 추출 변수로써 자료를 설명할 수 있기 때문에, 고차원 형태의 자료를 차원 축소하기 위해 효과적으로 활용되고 있다. 이때 선택이나 추출된 변수는 원래의 자료에서 공분산 행렬로부터 얻어지는 고유값과

고유벡터를 통해 계산되며, 데이터를 설명하는 공간의 기저를 Eq. (4)로 표현한 재구성 오차를 최소화할 수 있도록 결정한다.

$$\text{Min}_{\mu+\lambda_i V_q} \sum_{i=1}^N x_i - (\mu + \lambda_i V_q)^2 \tag{1}$$

여기서, x_i 는 관측치를 의미하고, $\mu+\lambda_i V_q$ 는 주성분분석에 의해 새롭게 구성되는 공간의 기저를 나타낼 수 있다. 예를 들어, 자료가 n 개의 변수를 갖고 있다면, 주성분분석으로부터 추출된 변수는 다음과 같다.

$$Y_n = a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + \dots + a_{nn}X_n \quad (2)$$

여기서, a_{ij} , $ij = 1, 2, \dots, n$ 이며, Eq. (2)에서 Y는 추출된 변수를 나타내며, X의 선형결합의 계수값인 a는 기존 변수가 추출된 변수를 구성하는 데에 기여하는 정도로 표현된다 (S. Kim et al., 2019).

2.2.2 일반화 선형모형

태풍피해를 추정하기 위한 방법으로 일반화선형회귀모형(generalized linear regression model)을 이용하였다.

$$g(\mu_i) = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_{ij} \quad (3)$$

Eq. (3)에서 μ 는 반응변수의 평균 $E(y)$ 을 의미하며, $g(\cdot)$ 는 반응변수의 평균과 설명변수의 선형결합을 연결하는 역할을 수행하며 연결함수(link function)라고 한다. 일반화 선형모형에서의 회귀계수는 회귀모형에서 잔차제곱합을 최소화시키는 기준으로 구하는 것 대신에, 가능도(likelihood)를 최대화하는 방법을 통해 회귀계수의 추정치를 얻어내며, 구체적으로는 피셔-점수화(fisher-scoring) 알고리즘을 통한 반복재가중최소제곱(iteratively reweighted least squares)로부터 계산된다(Green, 1984).

회귀계수의 결정과 모형의 평가를 위한 방법으로는 LOOCV (leave-one-out cross-validation)을 이용하였다. LOOCV

는 m개 자료중 1개를 제외한 (m-1)개 자료로 회귀계수를 산정하고 남은 1개를 이용하여 모형을 검정하는 과정을 m번 시행하는 것으로 검증세트기법(Hold-Out)을 적용하기에는 자료수가 부족한 경우에 이용할 수 있는 방법이다. 모형의 적합도 판정은 NRMSE를 이용하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{(\max(y_i) - \min(y_i))}$$

Eq. (4)에서 RMSE (root mean square error)는 실제값과 예측값 사이의 평균 차이를 의미하며, NRMSE (normalized RMSE)는 RMSE를 실제값의 범위로 표준화한 값으로 단위는 백분율(%)이다.

3. 태풍위험도 평가 및 피해추정

3.1 태풍위험도 지수

태풍은 발생에서 소멸단계에 이르기까지 거의 전 과정을 많은 기상관련 기관으로 부터 감시되고, 위경도로 나타나는 진로와 중심부 기압, 최대풍속(세기), 영향범위(크기) 등의 태풍 특성치가 예측된다. Fig. 1은 우리나라 기상청에서 예측한 태풍 ‘CHABA (2016)’의 2016년 10월 4일 21:00에 확인된 위치와 예측진로를 나타내며, Table 2는 그 이후

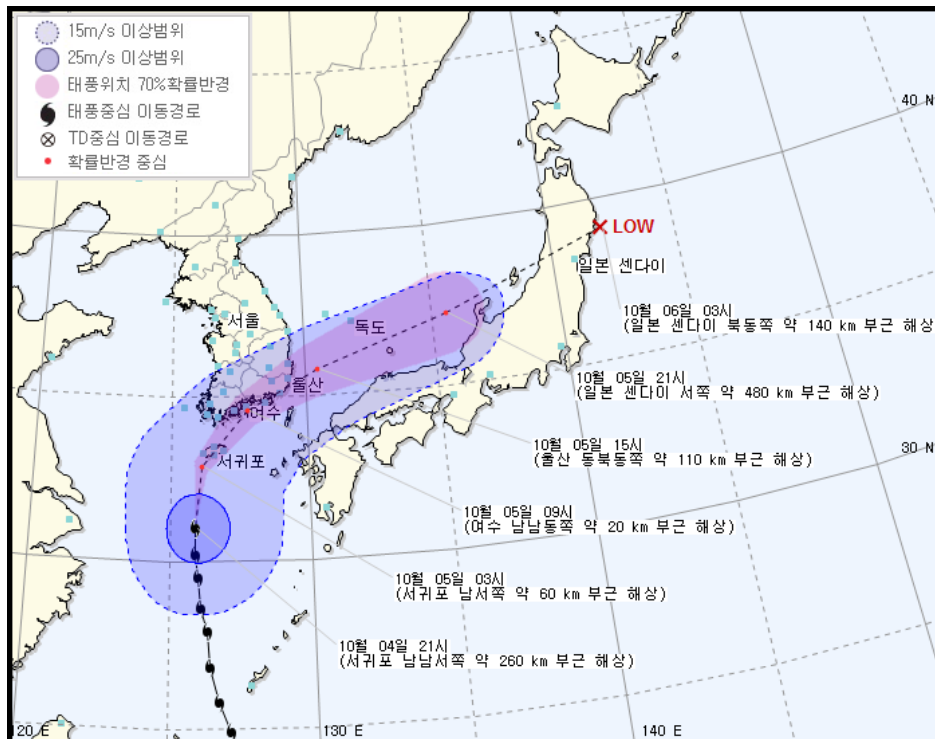


Fig. 1. Forecasting Typhoon ‘CHABA’(2016/10/4 21:00)

Table 2. Forecasting Informations of Typhoon ‘CHABA (2016)’

Date	Location		Pressure (hPa)	Max. wind speed		Radius (km)	Strength	Size	Direction
	lat.	long.		m/s	km/hr				
10/04 21:00	31.0	125.9	945	45	162	300	very strong	midium	N
10/05 00:00	31.9	126.0	950	43	155	300	strong	midium	N
10/05 03:00	32.8	126.4	955	40	144	280	strong	small	NNE
10/05 06:00	33.7	127.1	960	39	140	280	strong	small	NE
10/05 09:00	34.6	128.1	970	35	126	260	strong	small	NE
10/05 12:00	35.2	129.3	975	32	115	230	strong	small	ENE
10/05 15:00	35.9	131.0	980	29	104	220	normal	small	ENE
10/05 21:00	37.9	136.6	985	27	97	170	normal	small	ENE
10/06 00:00	42.2	141.8	994	-	-	-	-	-	NE

시간의 태풍 진로에 따른 위치와 태풍특성치가 나타나 있다 (KMA1).

Fig. 1과 Table 2는 동일한 자료로 태풍의 기상특성치를 나타내고 있으며, 재해를 대비하는 측면에서 태풍으로 인한 재해 발생 여부 및 피해 크기 정도는 Table 2로 주어지는 자료들과 기상예보로 기상청에 제공하는 시간별 예측강수량, 예측풍속 등에 의존해야 한다.

태풍 진로는 한반도에 내리는 강우량과 그로 인한 피해에 직접적인 영향을 미친다. Lee and Choi (2013)에 의하면 태풍 진로와 극한강우량(80 mm 이상의 일강우량)의 관계를 분석한 결과 태풍 위치와 극한강우량의 상관관계는 높게 나타난다. 태풍피해중 호우로 인한 피해는 전체 피해의 77%로 대부분을 차지함을 알 수 있다(Kim, 2021). 한편 태풍내습시 강풍 및 풍랑에 의한 피해도 23% 정도(Kim, 2021)를 보이나 1. 절에서 살펴본 바와 같이 최대풍속 등 기상학적 변수만으로 설명하기에는 어려움이 있다. 따라서 태풍 진로, 세기, 크기가 한반도에 미치는 영향을 파악할 수 있는 지표를 개발하여 태풍으로 인한 재해위험정도를 나타낼 수 있는 방안을 마련할 필요가 있다.

Y. Kim et al. (2019)은 시군구 단위로 기왕의 수문기상자료와 인문사회 자료를 이용하여 태풍위험지수를 개발하였으나, 이는 일반적인 재해발생 위험성을 시군구별로 나타낸 지표이며, 진행중인 태풍 내습으로 인한 재해위험성을 나타내는 지표는 아니다.

본 연구에서는 태풍의 진로와 태풍의 세기, 반경을 고려한 태풍노출지수(typhoon exposure index, TEI)를 Eq. (5)와 같이 개발하였고, 태풍으로 인한 재해위험정도와 피해예측을 위한 지표로 사용하고자 한다.

$$TEI = \sum_{t=1}^T tei_t, tei_t = \sum_{i=1}^{229} tei_{t,i} = \sum_{i=1}^{229} \frac{Wmax_t - 58}{L_{t,i}} \times A_i \quad (5)$$

여기서 TEI는 태풍내습에 따른 한반도 전역의 태풍노출

지수이다.

태풍의 진로를 기준으로 오른쪽 반원에 해당하는 지역을 위험반원(dangerous semicircle)이라 하며, 왼쪽 반원을 가항반원(navigable semicircle)이라 하는데, 이는 바람 세기와 진로의 관계를 고려한 것으로 강풍과 풍랑 위험 정도를 나타내는 요소로 작용할 수 있다. 따라서 태풍의 진행에 따른 시군구별 태풍노출지수를 위험반원에 속하는 정도와 가항반원에 속하는 정도를 구분하여 산정하였다. 어떤 시군구가 태풍의 가항반원과 위험반원중 어디에 속하는 지는 (t-1)시간과 t시간의 태풍 중심부 위치를 연결한 직선의 연장선을 기준으로 결정하였다. tei_t 는 t시간에서 시군구별 태풍노출지수로 전국 229개 시군구별로 구해지는 태풍노출지수를 더한 값이다. $Wmax_t$ 는 t시간의 태풍중심부 최대풍속(km/hr)이고, $L_{t,i}$ 는 t시간에서 태풍중심에서부터 i시군구까지의 거리(km), A_i 는 i시군구의 면적(km²), T는 태풍종료시간이다.

Eq. (5)의 태풍노출지수는 태풍 중심부의 최대풍속과 태풍 중심과 시군구 위치의 상호관계에 따라 결정되므로, 태풍의 이동방향을 고려할 수 있다. 또 Eq. (5)에서 태풍 중심부의 최대풍속을 변수로 이용하였으므로 강풍에 대한 영향을 평가하는 근거로 볼 수 있다. Table 1에서 TEI의 NS는 가항반원, D.S는 위험반원에 해당하는 지역의 TEI이다. TEI_{NS} 와 $TEI_{D.S}$ 를 비교하면 태풍 진로를 추정할 수 있는데, 동해관통형 태풍(Track = 1)은 위험반원에 해당하는 $TEI_{D.S}$ 이 0에 가까우며, 서해상륙형과 서해관통형은 가항반원의 TEI_{NS} 가 0에 가깝게 나타나는 것을 알 수 있고, TEI_{NS} 와 $TEI_{D.S}$ 를 비교하면 태풍의 진로를 어느 정도 추정할 수 있다.

Eq. (5)에서 58 km/hr는 태풍의 최소기준인 17 m/s보다 작은 16 m/s를 단위변환한 값이다. 또 tei_t 를 산정하는 시간간격은 1시간 간격으로 하였으며, Fig. 1과 Table 2에서 예보간격이 6시간 또는 3시간 간격이므로, 매시간의 태풍위치, 중심부 풍속, 반경 등은 선형보간법을 이용하여 산정하여 태풍노출지수에 이용하였다. 태풍중심과 시군구까지 거리

는 위경도를 Matlab에서 제공하는 함수를 이용하여 계산하였으며 29개 대상 태풍의 가항반원과 위험반원에 속하는 TEI는 Table 1에 나타나 있다.

Fig. 2에는 대표적인 경로별 태풍인 ‘KAHNUN (#21)’, ‘SANBA (#22)’, ‘CHABA (#27)’의 시군구별 TEI, 총강우량 (T. Rain), 최대풍속(W. Speed)이 나타나 있는데, 최대풍속은 해당 시군구에 여러 개의 ASOS, AWS 관측소가 있는 경우 가장 큰 최대풍속을 가지는 관측소의 최대풍속을 선정하였고, 관측소가 없는 시군구는 가장 큰 Thiessen 계수를 가지는

관측소의 최대풍속을 채택하였다.

Fig. 2에서 TEI는 태풍 진로에 직접적인 영향을 받는 것을 확인할 수 있고, 총우량도 언급한 바와 같이 TEI와 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있다. TEI와 총강우량의 차이는 서해관통형 태풍, 남해상륙형 태풍 및 동해관통형 태풍 모두에서 지리산을 중심으로 한 인근지역과 남해상륙형 태풍의 경우는 영동지역에 많은 강우를 보이는 것을 알 수 있다. 한편 최대풍속의 경우는 태풍 진로와 세기에 의하여 결정되는 TEI와 총우량과는 거의 무관한 것으로 나타났다. 이러한

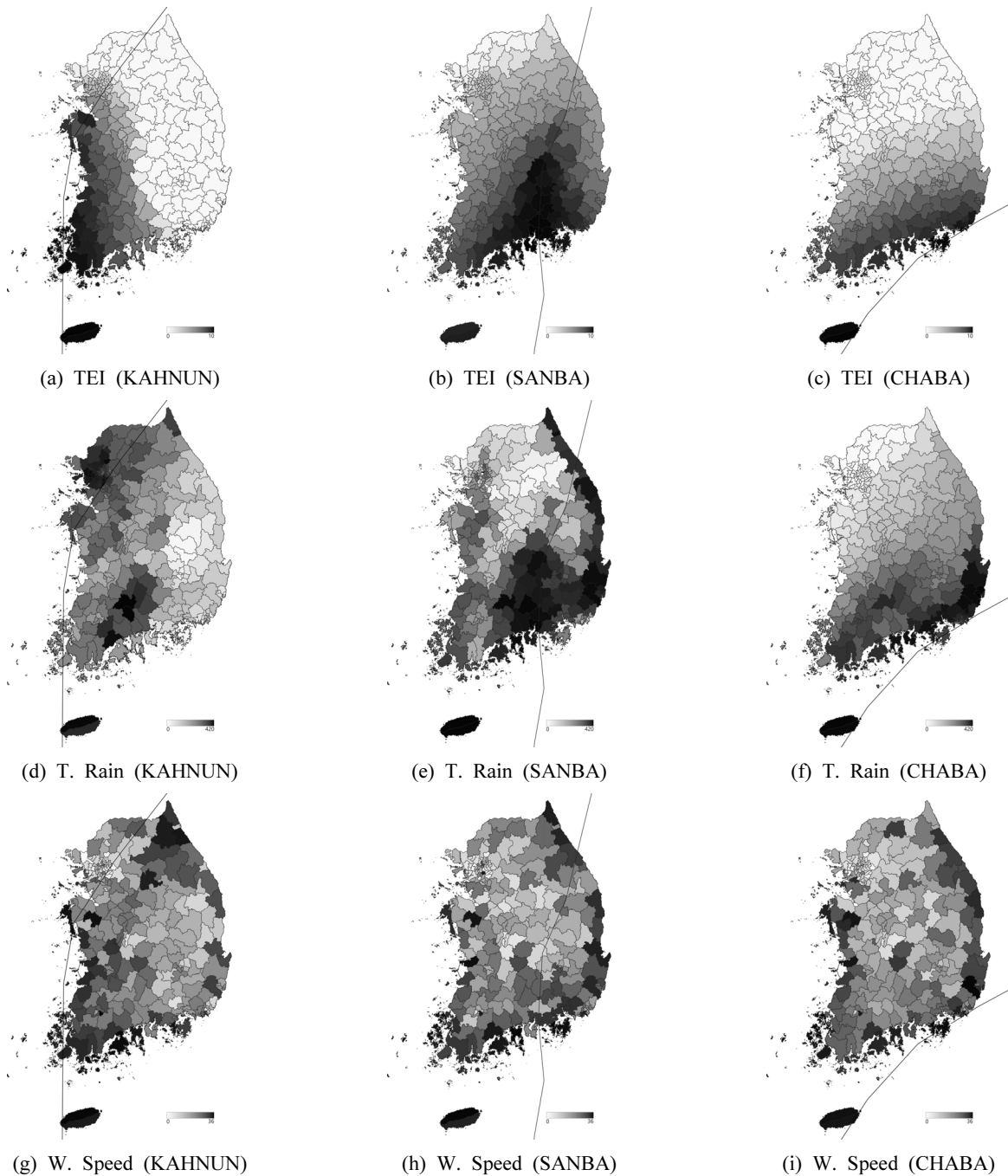


Fig. 2. Example of TEI, Total Rain and Maxium Wind Speed

결과는 전술한 바와 같이 태풍 내습시 강풍(풍랑)으로 발생하는 피해액(23%)에 대한 예측이 대단히 어려움을 나타낸다. TEI와 피해액 순위를 살펴보면, TEI 크기는 ‘MAEMI (2003)’, ‘RUSA (2002)’, ‘SANBA (2012)’ 순으로 나타내는데, 각 태풍의 피해순위는 상위 3위까지를 차지하고 있음을 알 수 있으므로, TEI가 태풍피해를 어느 정도 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 태풍피해추정

3.2.1 태풍피해 추정모형

태풍은 호우, 강풍, 풍랑의 복합재해이며, 1장에서 살펴본 바와 같이 각각의 재해원인에 대한 피해예측모형은 강우지속기간별 강우량, 최대풍속 또는 최대순간풍속, 조위자료 등을 이용하여 피해액을 산정하는 모형을 개발하였다. 이들 자료중 태풍예보기간에 최대풍속 및 강우량은 예측되나, 조위는 예측되지 않아 태풍피해예측모형에 적용하기 어렵다. 또 Figs. 2(g), (h), (i)에서 알 수 있는 바와 같이 태풍경로와 시군구의 최대풍속은 상관성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 즉 시군구가 태풍 중심에 가까울수록 최대풍속이 크게 나타나야 하나 실제 관측된 자료는 그렇지 않음을 보여준다.

따라서 태풍내습시 예측되는 강우자료와 강풍·풍랑자료를 대신할 수 있는 변수인 태풍노출지수(TEI)를 이용하여 태풍피해예측모형을 개발하고자 한다. 피해예측모형의 변수로는 태풍 진로, 세기, 크기를 고려한 지표인 TEI와 강우자료는 태풍내습기간 동안의 지속기간 1, 2, 3, 6, 12, 24시간 최대강우량, 총강우량과 태풍의 직접적인 영향을 받는 동안의 강우량(이하 Rain_{TEI}로 표기)중 선택하였다.

$$TEI_{N/D} = N \times TEI_{N,S} + D \times TEI_{D,S}, \quad N + D = 1 \quad (6)$$

TEI는 Eq. (6)과 같이 가항반원과 위험반원의 TEI를 계산한 후, 피해액과 가장 높은 상관계수를 가지는 비율의 TEI_{ND}를 결정하여 태풍피해예측모형의 변수로 사용하며, 35개 태풍에 대한 피해액과 가항/위험반원 TEI의 비율이 0.6/0.4

일 때가 가장 높은 상관계수를 나타내었다.

강우량 자료는 태풍 발생 연도의 획득 가능한 모든 ASOS, AWS 자료를 이용하였고, 시군구별 Thiessen 계수를 산정한 후, 면적강우량(mm)을 구하고, 여기에 시군구의 면적(km²)을 곱하여 산정하였다. 즉 태풍내습시 매시간 한반도에 내린 총우량(m³/hr)를 이용하여 태풍피해예측모형에 사용하였다.

지속기간별 강우자료는 특성상 강한 다중공선성을 가지므로 분산팽창계수(variance inflation factor, VIF)를 이용한 검증 후, 다중공선성이 있는 변수들을 주성분분석을 통하여 다중공선성을 제거하여 사용하고자 한다. Table 3에 나타나 있는 바와 같이 1, 2, 3, 6, 12, 24시간 강우량과 총강우량은 다중공선성을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 PCA에 의한 변수를 채택하였으며, 산정식은 Eq. (7)과 같고 Table 1에 나타나 있다.

$$PCA = 0.045P_{1hr} - 0.094P_{2hr} + 0.059P_{3hr} + 0.125P_{6hr} - 0.553P_{12hr} + 0.748P_{24hr} - 0.324P_{\text{총강우량}} \quad (7)$$

한편 강우자료중 태풍이 직접적인 영향을 미칠 때(어떤 지자가 태풍반경 내에 위치하였을 때) 내린 강우량인 Rain_{TEI}는 지속기간별 강우량 및 총강우량과 다중공선성이 없는 것으로 나타났으므로, 태풍피해예측함수의 변수로 채택하였다.

TEI_{0.6/0.4} 주성분분석에 의한 지속기간별 강우량을 대변할 변수(PCA) 및 Rain_{TEI}를 변수로 태풍피해예측함수를 개발하였다. 회귀모형으로는 일반화선형회귀모형을, 모형변수의 산정 및 평가는 LOOCV를 이용하였으며, 태풍피해예측함수는 아래의 식과 같다. 여기서 Y는 태풍으로 인한 예측피해액(원)이다.

$$Y = \exp(y), \quad y = 20.757 + 15.950 \times 10^{-6} TEI_{0.6/0.4} - 0.129 \times 10^{-6} Rain_{TEI} + 2.874 \times 10^{-6} PCA \quad (8)$$

$$Y = \exp(y), \quad y = 20.887 + 16.345 \times 10^{-6} TEI_{0.6/0.4} + 0.143 \times 10^{-6} Rain_{TEI} + 2.819 \times 10^{-6} PCA \quad (9)$$

Table 3. VIF of Rainfall Data

		Duration							Rain _{TEI}
		1 hr	2 hr	3 hr	6 hr	12 hr	24 hr	Total	
Duration	1 hr	-	264.3	152.2	69.6	45.0	22.8	11.8	2.4
	2 hr	-	-	1606.4	206.9	62.0	26.7	13.5	2.6
	3 hr	-	-	-	399.3	71.7	28.3	14.3	2.6
	6 hr	-	-	-	-	128.6	35.2	17.1	2.7
	12 hr	-	-	-	-	-	45.8	20.5	2.7
	24 hr	-	-	-	-	-	-	87.4	2.3
	Total	-	-	-	-	-	-	-	
Rain _{TEI}		-	-	-	-	-	-	-	-

Eq. (8)은 35개 모든 태풍에 대한 함수이며, Eq. (9)는 호우로 인한 피해가 주를 이루는 동해관통형과 남해상륙형 (Lee and Choi, 2013)만을 대상으로 피해예측모형을 산정한 것으로 각각의 NRMSE가 10.1%와 12.5%로 나타났다.

3.2.2 태풍피해 위험 등급 구분

Kim (2021)은 한반도를 내습한 태풍을 대상으로 태풍피해액, 태풍 진로상의 특정위치에서의 태풍중심부 최대풍속 및 해당 위치 도달시간 이후 3시간 동안의 강우량을 분석하여, 피해규모에 따라 4개 등급으로 구분하였다. 이 연구에서 특정위치를 위도 33° 인근 지역으로 설정한 이유는 위도 33°에 도달할 때의 최대풍속은 보간법에 의하여 계산할 수 있으나, 도달시간이 매 시간의 정각이 아닌 경우가 대부분이기 때문이다. 예를 들어 33°에 도착하는 시간이 14:20분이라면 14:20부터 17:20까지 3시간동안 내린 강우량을 산정하여야 하는데, 강우량자료는 1시간 단위로 제공되어 3시간 강우량을 산정할 수 없다. 따라서 태풍 위치 선정에 대한 문제와 위도만을 정의하였으므로 태풍 진로를 고려하는 데는 어려움이 있다.

본 연구에서는 태풍노출지수와 강우량을 이용하여 피해 규모를 고려한 태풍등급을 구분하고자 한다. 먼저 Lee and Choi (2013)가 밝힌 바와 같이 태풍위치와 극한강우량이

높은 연관성을 가지므로, 태풍진로를 고려한 변수인 TEI가 극한강우량과 큰 상관관계를 가질 것으로 추정된다.

Fig. 3은 Table 1의 1 hr Max.의 R_{tei} 와 R_{rain} 을 이용하여 그린 그림으로, R_{tei} 는 각 태풍의 1 hr Max. [te_i]을 최대값인 $6.7 \times 10^3/hr$ ('MAEMI')에 대한 비율이고, R_{rain} 은 각 태풍의 1 hr Max. [Rain_i]을 최대값인 $1,137.9 \times 10^3 m^3/hr$ ('RUSA')에 대한 비율을 나타낸다. 또 범례와 같이 태풍피해를 4등급으로 구분하여 각 피해액 구간별로 기호를 달리하여 나타내었고, 각 기호 옆의 숫자는 Eq. (10)으로 나타나는 등급지수 (rating index, RI)를 나타낸 것이다.

$$RI = R_{tei} + R_{rain} = 1hr Max.[te_i]/(6.7 \times 10^3) + 1hr Max.[Rain_i]/(1,137.9 \times 10^3) \quad (10)$$

Fig. 3에서 각 태풍을 나타내는 표식에 나타나 있는 값은 RI로 Table 1에 나타나 있다. Fig. 3을 살펴보면 태풍은 크게 3개 등급으로 구분할 수 있으며, 등급지수와 피해액 관계는 Table 4와 같다.

Class 1에 해당하는 태풍 3개는 'RUSA', 'MAEMI', 'SANBA'이며, 이중 'SANBA'는 3,000억(300×10^9)원으로 피해액 범위보다 작다. Class 2에서 등급지수가 0.69인 태풍은 피해액이 10×10^9 원 이하의 태풍인데, 이 태풍은 2018년에 발생한

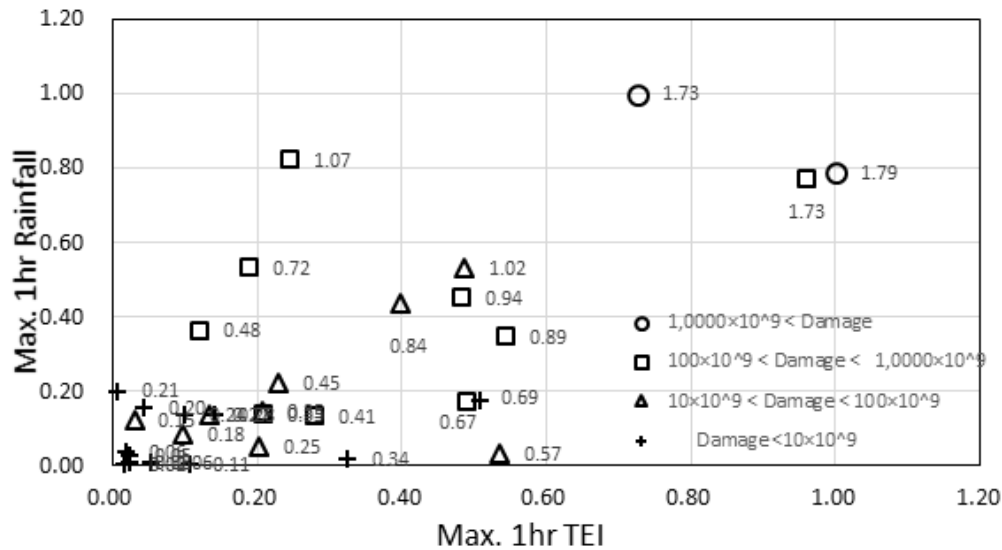


Fig. 3. Typhoon Rating System with TEI and Rainfall

Table 4. Typhoon Rating System with Damage

Rating	Damage (₩)	RI
Class 1	$1,000 \times 10^9 \leq \text{Damage}$	$1.7 \leq \text{RI}$
Class 2	$100 \times 10^9 \leq \text{Damage} < 1,000 \times 10^9$	$0.6 \leq \text{RI} < 1.7$
Class 3	$\text{Damage} < 100 \times 10^9$	$\text{RI} < 0.6$

‘SOULIK’으로 이틀 뒤에 발생한 태풍 ‘CIMARON’과의 후지와라효과에 의하여 목포해상에서 2일 동안 멈춘 후 한반도를 관통하여 진행함에 따라 TEI가 커진 결과이다.

Fig. 3에 나타나는 RI가 피해액을 정확히 대표하기는 어려우나, 태풍의 진로와 세기를 예측하여 재해에 대비하는 목적인 경우에는 피해규모를 예측하고 적절한 방재대책을 수립하는데 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

매년 발생하는 자연재해를 줄이기 위한 다양한 노력이 이루어지고 있으며, 자연재해 저감을 위한 대책의 일환으로 자연재해로 인한 피해를 예측하고, 대비할 수 있는 방안을 모색하고 있다. 풍수해로 인한 피해를 예측하기 위한 많은 연구가 이루어졌음에도 불구하고 피해를 정확히 예측하는 데는 한계가 있으며, 이는 공간적으로 시간적으로 변하는 기상특성을 정확히 반영하기 어렵기 때문이다.

본 연구에서는 자연재해로 인한 피해중 태풍피해를 대상으로 피해액을 예측할 수 있는 지표를 개발하고 피해예측함수를 개발하였고, 태풍을 피해규모에 따라 구분할 수 있었으며, 결론은 다음과 같다.

- 1) 태풍 중심부 위치와 최대풍속을 이용하여, 태풍이 한반도에 미치는 영향을 나타낼 수 있는 태풍노출지수(TEI)를 개발하였고, 태풍으로 인한 위험을 정량적으로 나타낼 수 있었다.
- 2) 태풍피해를 유발하는 강우량, 태풍노출지수를 이용하여 태풍피해예측함수를 개발하였으며, 호우에 의한 피해가 큰 동해관통형 태풍과 남해상륙형 태풍만을 대상으로 한 태풍피해예측함수는 비교적 높은 결정계수를 나타내었다.
- 3) 태풍이 한반도에 영향을 미치는 동안에 가장 큰 태풍노출계수(Max. TEI)와 해당 시간의 총우량을 이용하여 피해규모를 고려한 태풍위험등급을 구분할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 태풍피해예측함수와 태풍위험등급을 이용하여 태풍이 한반도로 접근할 때, 예측된 태풍 진로와 강우량을 분석하여 태풍피해를 예측할 수 있으며, 이에 대한 대비를 위한 자료로 이용될 수 있을 것이다. 그러나 태풍은 진로, 강우 및 풍속의 공간적 시간적 변동이 크고, 호우, 강풍, 풍랑에 의한 피해가 복합적으로 발생하므로 이를 고려하여 태풍으로 인한 재해에 대비하여야 할 것이다.

References

Bank of Korea (BOK). *PPI*. Retrieved January 16, 2022, from <https://ecos.bok.or.kr/>
 Choo, T., Cho, H., Shim, S., and Park, S. (2018). Development

of the wind wave damage estimation functions based on annual disaster reports: Focused on the western coastal zone. *The Journal of the Korea Contents Association*, Vol. 18, No. 1, pp. 154-163.
 Choo, T., Kim, Y., Sim, S., and Son, J. (2018). Development of the wind wave damage predicting functions in southern sea based on annual disaster reports. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 19, No. 2, pp. 668-675.
 Green, P.J. (1984). Iteratively reweighted least squares for maximum likelihood estimation, and some robust and resistant alternatives. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, Vol. 46, No. 2, pp. 149-192.
 Kim, J., Choi, C., Oh, S., Han, D., and Kim, H. (2016). Development of heavy rain damage Prediction functions in Gyeonggi province. *2016 Annual Conference, KOSDI*, pp. 203-204.
 Kim, J., Kim, T., and Lee, B. (2017). An analysis of typhoon damage pattern type and development of typhoon damage forecasting function. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 17, No. 2, pp. 339-347.
 Kim, J., Park, J., Choi, C., and Kim, H. (2018). Development of regression models resolving high-dimensional data and multicollinearity problem for heavy rain damage data. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 38, No. 6, pp. 801-808.
 Kim, S., Kim, M., Jung, D., and Yoo, D. (2019). Identifying the critical drought impact factor with feature selection approaches. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 511-518.
 Kim, T. (2021). Development of new typhoon rating to predict magnitude of damage. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 21, No. 5, pp. 251-261.
 Kim, Y., Lee, B., and Kim, T. (2019). Development of a typhoon risk index (TRI) based on records of typhoon damage. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 7, pp. 501-509.
 Korea Meteorological Administration (KMA1). *Typhoon*. Retrieved December 21, 2020, from https://www.weather.go.kr/plus/typ/typ_history.jsp
 Korea Meteorological Administration (KMA2). *Open MET data portal*. Retrieved December 21, 2020, from <https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>
 Lee, J., Eo, G., Choi, C., Jung, J., and Kim, H. (2016). Development of rainfall-flood damage estimation function using nonlinear regression equation. *J. the*

- Korean Society of Disaster Information*, Vol. 12, No. 1, pp. 74-88.
- Lee, S. (2012). *A study on damage scale prediction by rainfall and wind velocity with typhoon*. Master's thesis, Sunchon University.
- Lee, S., Ahn, S., Lim, B., and Choi, G. (2016). Relationships between intensity of extreme climate events and magnitude of damages for different typhoon tracks in the republic of Korea. *The Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 22, No. 2, pp. 450-465.
- Lee, S., and Choi, G. (2013). Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events by typhoons across the republic of Korea. *The Korean Association of Regional Geographers*, Vol. 19, No. 3, pp. 384-400.
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS). (1996-2022). *Annual natural disaster report (1994-2020)*. Ministry of Public Safety and Security.
- Rho, J., and Song, C. (2020). Development of estimation functions for strong winds damage reflecting regional characteristics based on disaster annual reports: Focused on gyeongsang area. *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 2, pp. 223-236.
- Sim, S., Kim, Y., and Choo, Y. (2019). A study on the prediction function of wind damage in coastal areas in Korea. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 4, pp. 69-75.
- Song, C., and Yang, B. (2020). Development of estimation functions for strong winds damage based on regional characteristics: Focused on jeolla area. *J Korean Soc. Disaster Secur.*, Vol. 13, No. 4, pp. 13-24.
- Song, C., Lee, H., and Lee, C. (2020). A simple regression model for predicting the wind damage according to correlation analysis between wind speed and damage: Gyeongsangbuk-do. *The Korean Society of Disaster Information 2016 Conference*, pp. 236-237.
- Song, J., Moftakhri, H., and Moradkhani, H. (2019). *Alternative hurricane hazard indicator*. 2019 AGU Fall Meeting.

Received	July 30, 2022
Revised	August 2, 2022
Accepted	August 23, 2022