韓國水資源學會論文集
第38卷 第10號 · 2005年 10月
pp. 825~839

EST 기법에 의한 태풍의 재해위험인자 평가

Evaluation of Typhoon Hazard Factors using the EST Approach

이 순 철* / 김 진 규** / 오 경 두*** / 전 병 호**** / 홍 일 표*****

Lee, Soon Cheol / Kim, Jin Kyoo / Oh, Kyoung Doo / Jun, Byong Ho / Hong, IL Pyo

Abstract

Application of the EST approach for the simulation of the risk-based typhoon hazard potential is described in this paper. For six selected cities in the Korean peninsula, EST simulations for one hundred years were performed one hundred times using historical typhoon data as a training data set. The analytical results of EST simulations were then post-processed to estimate the means, standard deviations, and ranges of variation for the maximum wind velocities and the daily rainfalls. From the comparison of the averages of the wind velocities for the 100 year recurrence interval typhoons, the wind hazard potential of them was revealed to be highest for Mokpo among the six cities, followed by Busan, Cheju, Inchun, Taegu, and Seoul in descending order. For the flood hazard potential associated with a typhoon, Busan was ranked to be the highest hazard potential area, followed by Mokpo, Cheju, Seoul, Inchun, and Taegu. In terms of the overall typhoon hazard potential, cities in the southern coastal regions were identified as being exposed to the most severe typhoon hazard.

keywords : Typhoon hazard potential, Empirical Simulation Technique, Wind speed, Rainfall, Flooding, Risk-based frequency analysis

요 지

우리나라에 주기적으로 내습하여 막대한 인명 및 재산피해를 발생시키고 있는 태풍의 재해위험도를 EST 기법을 적용하여 평가하였다. 서울을 비롯한 6개 주요 도시에 대하여 기존의 태풍자료를 Training Set으로 사용하여 100년간의 태풍 모의 기간에 대하여 100회 반복모의를 수행한 결과로부터 재현기간별 최대풍속과 일최대강우량의 평균값, 표준편차, 최소값 및 최대값을 추정하였다. 재현기간 100년의 태풍에 대한 최대풍속의 평균값을 비교 평가한 결과 태풍으로 인한 최대풍속은 목포, 부산, 제주, 인천, 대구, 서울의 순으로 나타나 해안이나 도서지방의 재해위험도가 내륙 지방 보다 높은 것으로 나타났으며, 태풍에 동반되는 일최대강우량은 부산, 목포, 제주, 서울, 인천, 대구의 순으로 나타나 남부지방이 중북부지방 보다 태풍동반 호우에 취약한 것으로 나타났다. 태풍 재해에 있어서 남부해안지방에

* 수원대학교 박사과정, 육군지도창 지형정보담당관
Ph.D. Student, Dept of Civil Engineering, Suwon University, Korea
(e-mail: leesc6464@yahoo.co.kr)
** 서울산업대학교 토목공학과 교수
Professor, Dept of Civil Engineering, Seoul National Polytechnic University, Seoul, Korea
*** 육군사관학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Military Academy, Seoul, 139-799, Korea
**** 육군사관학교 토목공학과 교수
Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Military Academy, Seoul, 139-799, Korea
***** 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 수석연구원
Research Fellow, Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology, Koyang, Kyeonggi 411-712, Korea

위치한 도시들이 위험도가 높았다.

핵심용어 : 태풍재해위험도, EST, 풍속, 강우, 홍수, 불확실성을 고려한 빈도해석

1. 서 론

우리나라에는 한해에 3개 정도의 태풍이 영향을 미치는데 8월 내습빈도가 가장 높다. 큰 피해를 가져왔던 대표적인 태풍으로는 1959년 부산을 포함한 남부지방에 우리나라 풍수해 사상 최대의 피해를 남겼던 태풍 Sarah와 1981년 전남지방을 중심으로 남부지방에 광범위한 침수피해를 유발한 태풍 Agnes, 1991년 부산과 남동해안에 기록적인 호우를 기록한 태풍 Gladys, 2002년과 2003년 연이어 강원도를 비롯한 동부해안지방을 중심으로 기록적인 피해를 가져온 태풍 루사와 매미 등이 있다.

태풍 재해 요인은 크게 바람과 호우로 구분할 수 있다. 일반적으로 바람은 인명피해와 직접적인 관련이 크고 호우는 재산피해와 관련이 크다. 바람은 특히 해안지방의 인명피해와 연계되는데, 선박의 침몰과 유실, 해일, 건물붕괴로 인한 피해 등을 발생시키며 대규모 인명피해를 발생하기도 한다. 그러나 이와 같이 거의 매년 우리나라에 내습하여 엄청난 인명 및 재산피해를 가져오는 태풍에 대한 연구와 방재관리정보는 미흡한 실정이다. 태풍에 관한 자료는 태풍의 특성에 대한 일반 통계분석 자료 정도이며, 체계적인 분석이나 기준이 설정되어 있지 않은 실정이다. 이것은 태풍의 불확실성에 주된 원인이 있는 것으로 판단된다. 태풍은 발생여부, 발생횟수, 피해지역, 풍속, 강우량 등에서 사전에 예측하기 어려울 정도의 불확실성을 가졌다.

이와 같은 문제는 비단 우리나라만의 문제는 아니다. 미국의 경우도 Hurricane을 포함한 열대성 폭풍의 내습으로 많은 인명과 재산피해를 입고 있다. 미국에서는 열대성 폭풍과 관련된 공학적인 설계나 사업 평가를 수행할 경우에 기존에 적용해오던 단순한 빈도해석에 의한 설계폭풍(design storm)의 개념을 탈피하여 해당 빈도에 해당하는 평균값과 이 평균빈도값에 대한 오차(error)와 불확실성(uncertainty)을 동시에 고려하는 방향으로 전환하였다(Scheffner, 1999).

미공병단에서는 1990년대 초에 이와 같은 위험도 기반 빈도해석(risk-based frequency analysis)을 수행하기 위한 방법을 산하 연구소와 일반 대학 공동으로 개발하였는데, 이러한 연구의 결과로 개발된 기법이 EST(Empirical Simulation Technique)이다. EST는 열대성 폭풍에 의해 발생할 수 있는 인명 및 재산피해는 물론 폭풍이 통과하면서 나타날 수 있는 해일, 연안침식 등 여러 가지 영향을 평가하는데 적용되고 있다. EST 기법이 갖는 일반성으로 인하여 열대성 폭풍 이외에 다른 분야에 적용하는 방안에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있어서, 강우유출과 같은 수문현상의 해석에 대한 적용이 현재 연구되고 있다 (Scheffner, 1999). 국내에서는 EST 기법을 적용한 사례가 아직 없으며, 최병호 등(1999)이 한국해안의 극값수위를 산정함에 있어서 통계적 시뮬레이션 모형인 EST를 적용한 최대해일빈도분석기법(Scheffner et al., 1996)과 태풍해일수치모형과 같은 물리적인 시뮬레이션 모델로부터 산정된 극값수위를 비교 검토하는 연구의 필요성을 제시한 바 있다.

본 논문에서는 우리나라의 주요 지점에 대하여 기존의 태풍자료에 EST 기법을 적용하여 태풍의 풍속과 강우량에 대한 위험도 기반 빈도해석을 수행하고 그 결과를 이용하여 주요 지점별로 태풍의 위험도에 대하여 비교 고찰하였다. 태풍백서(기상청, 1996)의 자료와 분석 프로그램으로 EST Ver. 3.1.11을 이용하였다.

본 논문의 구성은 1장 서론에 이어 2장에서는 EST 기법의 이론적인 배경을 살펴보고, 3장에 EST 기법의 적용 절차를 기술하였다. 이어서 4장에서는 주요 지점별 EST 적용결과의 제시 및 고찰을 기술하였으며, 마지막으로 5장에 결론 및 발전방향을 제시하였다.

2. EST기법과 JPM 빈도해석기법의 차이

EST(Empirical Simulation Technique)는 비확정적(nondeterministic)이며 다변수인 특성(multiparameter)을 갖는 시스템의 일생동안(life-cycle time sequence)을 모의하기 위한 통계 기법이다(Scheffner et al., 1999). EST는 위험도 해석(risk analysis)과 연관하여 빈도 해석(frequency analysis)과 오차 해석(error analysis)을 시스템 일생동안에 걸쳐 수행하기 위한 방법으로 미공병단 항만수리연구소(Coastal and Hydraulics Laboratory of the U.S. Army Engineer Research and Development Center)와 University of Wyoming의 Borgman 교수 등의 공동 연구로 개발하여 미국 연안에 근접하는 허리케인이나 폭풍과 관련된 피해 등을 평가하는데 성공적으로 적용되어 왔으며, 미공

병단에서는 연안 시설물에 대한 위험도 기반 설계(risk-based design)를 위한 기준으로 EST를 채택하였다. EST는 시공간상에서 주기성을 나타내는 거의 모든 자연현상에 대해서 적용이 가능한 것으로 알려져 있다.

다변수적인 특성과 주기성(periodicity)을 갖는 시스템에 대한 기존 대부분의 빈도해석기법은 결합확률에 의한 방법(JPM, Joint Probability Method)에 근거하고 있다. 결합확률에 의한 방법(JPM)의 기본 가정은 분석하고자 하는 사상(event)은 다수의 변수들에 의한 조합으로 묘사될 수 있으며, 이때 이 변수들은 상호 독립이다는 것이다. 그리고 이 변수들의 확률분포는 경험적인 공식이나 기타 매개변수를 이용하여 정해지는 확률분포로 기술될 수 있다고 가정한다. 따라서 어떤 특정한 사상이 발생할 결합확률(JP, Joint Probability)은 각각의 변수의 발생 확률의 곱(product)으로 계산할 수 있다.

예를 들어, 태풍의 파괴력이 중심기압 D, 최대 풍속반경 R, 태풍진로의 방위각 Θ, 태풍의 진행속도 V, 상륙예상지점과의 최단거리 L 등 다섯 가지 변수로 기술할 수 있다고 하자. 만일 이들 변수들이 통계적으로 독립이라면, 5차원 공간으로 나타내어지는 태풍의 결합확률밀도함수(JPDF, joint probability density function) f는 Eq. (1)과 같이 각각의 변수들에 대한 확률밀도함수(pdf)의 곱으로 나타낼 수 있다(이순철, 2002).

$$f = f_D f_R f_\Theta f_V f_L \tag{1}$$

여기서, f_D, f_R, f_Θ, f_V, f_L 등은 각각의 변수에 대한 확률밀도함수를 나타낸다.

이와 같은 방법으로 계산되는 결합확률에 의한 방법(JPM)은 근본적으로 다음과 같은 문제점을 내포하고 있다. 결합확률에 의한 방법은 변수들이 상호 독립적이거나 부분적으로만 상관 관계(partially dependent)를 갖는 것으로 가정한다. 그러나, 이러한 가정은 타당하지 않을 수가 있다. 예를 들어, 태풍중심기압과 최대 풍속반경 등은 상호 독립이 아니라 상호 연관성을 갖는 변수들이다. 태풍중심의 기압 강하량이 크면서 최대 풍속반경이 작은 태풍이 발생한다는 것은 비현실적이며, 따라서, 어떠한 사상을 여러 변수들의 임의적인 조합(random combination of parameters)으로 기술하는 결합확률에 의한 방법(JPM)에 있어서는 실제 자연현상에서 나타날 수 없는 비현실적인 사상들(unrealistic events)이 발생하는 것처럼 묘사될 수 있다.

3. EST의 이론적 배경 및 적용방법

EST는 앞에서 지적한 결합확률에 의한 방법(JPM)의 단점을 보완하기 위하여 개발되었다. 결합확률에 의한 방법과 달리 EST에서는 변수들에 대하여 어떤 특정한 확률 분포형을 사전에 가정하지 않기 때문에 distribution free 기법이라고 할 수 있다. 또한 EST에서는 변수들간의 상호 독립성에 대한 가정을 배제함으로써 실제 자연현상에서 나타나는 변수들간의 비선형적인 상관관계까지도 빈도해석에 포함시킬 수 있다.

EST는 과거에 발생했던 사상들로 부터 관측된 변수들(observed parameters)을 이용하여 모의 사상(simulated events)과 그에 따른 영향(impact)을 다수명 주기(multiple life-cycle)에 걸쳐 모의하여 그 결과를 해석하는 기법이다. 이때 유일한 가정은 미래에 발생할 사상은 과거에 발생했던 사상과 규모(magnitude)와 빈도(frequency)에 있어서 통계적인 유사성(statistical similarity)을 가져야 한다는 것이다.

EST는 과거에 발생했던 사상들과 이에 따른 영향을 대상으로 각 사상들과 그 영향을 정량적으로 기술할 수 있는 특성들을 찾아내어 변수화하는 과정으로 부터 시작된다. 이때 태풍과 같은 사상 자체의 특성을 기술하는 변수들을 입력벡터(input vectors)라고 하며, 이에 따라 발생하는 피해와 같은 영향을 기술하는 변수들을 응답벡터(response vectors)라고 한다. 이러한 입력벡터와 응답벡터를 이용하여 다수명주기 모의를 수행하게 된다. 여기에서는 태풍을 대상으로 EST에 대한 상세한 설명을 제시하기로 한다.

3.1 EST를 위한 자료

1) 입력벡터

입력벡터는 태풍과 관련된 물리적인 특성을 기술하는 변수이다. 이러한 변수들은 다음과 같은 N-차원의 벡터공간으로 정의할 수 있다.

$$v = (V_1, V_2, V_3, \cdots, V_N) \tag{2}$$

태풍의 경우 포함될 수 있는 입력벡터로는 태풍중심부 기압, 최대 풍속 반경, 최대 풍속, 태풍의 눈으로 부터 최근접 거리, 태풍 눈의 전진 속도, 강우량, 하천 수위, 연안의 경우 만조 수위 등을 들 수 있다. 입력벡터는 응답벡터에 영향을 줄 수 있는 요소들은 어떤 것이나 포함시킬 수 있다. 태풍자료의 기록은 다음과 같이 벡터 형태로 나타낼 수 있다.

$$[v_i \ ; \ i=1, \cdot \cdot \cdot, I] \tag{3}$$

여기서, I는 태풍의 전체 발생수를 나타낸다. 그리고 각각의 태풍은 d_v개의 구성요소를 입력벡터로 가지게 되므로 태풍자료는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$\vee_i = \mathcal{R}^{d_v} \tag{4}$$

여기서, $\mathcal{R}^{d_v}$는 d_v-차원 공간을 나타낸다.

2) 응답벡터

응답벡터는 태풍으로 인하여 발생할 수 있는 결과들을 기술하는 변수들이다. 이러한 변수들은 다음과 같은 M-차원의 벡터공간으로 정의할 수 있다.

$$\underline{r} = (r_1, r_2, r_3, \cdot \cdot \cdot, r_M) \tag{5}$$

태풍의 경우 포함될 수 있는 응답벡터들로는 침수면적, 바람에 의해 발생한 피해액, 연안 침식량, 최대 파고 등을 들 수 있다. 응답벡터는 태풍으로 인하여 발생하게 되는 영향은 어떤 것이나 포함시킬 수 있다. 풍속, 기압 강하량, 강우량과 같은 태풍의 특성도 응답벡터로 처리하여 모의에 반영할 수 있다.

응답벡터는 입력벡터와 다음 식과 같이 연관되어지게 되는데 그 관계는 비선형적인 관계 또는 상관관계(correlation relationships)로 나타낼 수도 있다.

$$\mathrm{V} \Rightarrow \mathrm{Y} \tag{6}$$

일반적으로 응답벡터는 입력벡터와 달리 빈도해석을 할 만큼 자료가 충분하지 못하다. 이런 경우에는 컴퓨터 모의를 하여 응답벡터 자료를 보완하는 방법을 사용할 수도 있다.

3) Training Data Set

태풍의 발생수가 충분하고 태풍의 강도가 다양하여 d_v-차원 공간을 적절히 묘사할 정도가 된다면 이상적이지만 대부분의 경우 현실적으로 그렇지 못한 실정이다. 과거에 발생한 태풍의 수가 너무 적을 경우 이를 보완하여야 하며, 만일 거의 특성이 일치하는 태풍들이 포함되어 있다면 중복을 피하기 위하여 일부 태풍자료를 삭제할 수도 있다. Training Set은 태풍자료 중에서 입력벡터와 이에 대한 응답벡터가 존재하는 자료 셋트로서 이를 이용하여 태풍자료중에서 입력벡터만 있고 응답벡터는 없는 자료의 응답벡터를 산정하는데 사용된다. Training Set은 다음과 같이 벡터로 나타낼 수 있다.

$$[\ v_j^*, j=1, \cdot \cdot \cdot, J] \tag{7}$$

여기서, J는 EST 입력 태풍자료 중에서 입력벡터와 응답벡터가 있는 태풍의 수를 나타낸다.

Training Set은 EST를 적용하고자 하는 지점의 태풍 특성을 대표하는 자료가 되도록 작성해야 한다. 과거에 발생했던 태풍은 아니지만 발생 가능하였던 태풍(Typhoons that could have occurred)이라고 판단될 경우 응답벡터는 컴퓨터 시뮬레이션 등의 방법으로 산정하고 이를 Training Set에 포함시키는 것이 필요할 경우도 있다. 예를 들어 태풍통과시 연안의 조위상승(storm surge)에 미치는 영향에 대하여 EST를 적용하고 있는데, 과거 태풍 통과시 수집된 자료는 천문조위가 H_α 인 경우에 대한 자료만 있다고 가정하자. 그런데 이 해역의 조위는 H_β, H_γ 등의 상태가 발생할 수 있다고 하자. 이때 발생가능한 조위 H_β, H_γ 등에 대하여 과거 태풍 통과시 기상자료를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션 등의 방법으로 조위 상승을 산정하여 Training Set에 포함시킬 수 있다.

3.2 모의 사상 발생 조건(1): 과거 사상과의 일관성 유지

EST의 첫번째 가정은 미래에 발생하는 사상들은 과거에 발생했던 사상들과 물리적인 특성이 유사할 것이라는 것이다. 과거 사상들의 특성은 Borgman에 의하여 개발된 "Nearest Neighbor Interpolation, Bootstrap, Resampling Technique" 기법에 의하여 미래 사상의 모의에 반영되어져서 EST에 의하여 발생되어지는 사상은 과거의 사상과 비슷하지만 과거의 사상과 어느 정도 변이를 보이게 된다. 이러한 변이는 Random walk와 Nearest neighbor interpolation에 의하여 반영되는 것으로서 시스템의 자연적인 변이를 반영하는 것으로 볼 수 있다.

X_1, X_2, X_3, $\cdot \cdot \cdot$, X_n을 n개의 서로 독립이며, 균등 분포된 임의 벡터(identically distributed random vectors)라 하자. 그러면 각각의 사상 X_i는 발생확률 1/n을 갖게 되므로, 각각의 사상은 0과 1 사이에 n개의 구간들(segments)로 이루어진 누적확률분포함수(cumulative probability density function)의 각 구간으

로 매칭(matching)될 수 있다. 즉, 각 구간 $s_j \Rightarrow X_j$ 라고 할 수 있다. 따라서 각각의 사상은 누적확률분포함수에서 다음과 같은 구간을 차지하게 된다.

$$[0 < s_1 \le \frac{1}{n}],\ [\frac{1}{n} < s_2 \le \frac{2}{n}],$$
$$[\frac{2}{n} < s_3 \le \frac{3}{n}], \ldots, [\frac{n-1}{n} < s_n \le 1] \quad (8)$$

난수발생기에 의하여 0과 1 사이의 수를 발생시켜 누적확률분포함수에서 난수에 해당하는 사상을 선택하게 된다. 이것은 전체 사상에서 어느 하나의 사상을 뽑아서 확인한 후 모집단에 다시 집어넣는 Drawing and replacing 방식에 해당된다. EST는 단지 과거 사상을 뽑아내는 것(resampling)에 그치는 것이 아니라 선택된 사상 X_i의 입력벡터로부터 Nearest neighbor random walk을 수행하여 과거 사상과 다른 사상을 발생시키게 된다. 이와 같이 하여 새로운 사상에 대한 입력벡터가 정해지면 이에 대한 응답벡터를 Training Set에 있는 과거 사상의 응답벡터공간상에서 내삽(interpolation)에 의하여 구하게 된다. 이와 같이 Training Set에 있는 과거의 사상을 기반으로 Random walk에 의하여 새로운 사상을 발생시키므로 과거에 발생했던 사상과 물리적 특성이 완전히 이질적이지 않으면서도 과거 사상과 다른 사상을 발생시킬 수 있는 것이다.

3.3 모의 사상 발생 조건(2): 통계적 일관성 유지

EST의 두 번째 가정은 미래에 발생하는 사상들은 과거에 발생했던 사상들과 통계적으로 유사할 것이라는 것이다. 예를 들어 미래의 어느 한 해에 발생할 수 있는 태풍의 수는 과거 그 지역의 어느 한 해에 발생할 수 있는 태풍의 수와 통계적으로 유사해야 한다는 것이다.

과거 어느 지역을 내습했던 태풍의 평균 발생빈도(mean frequency of events)가 주어진다면, 어느 한 해에 그 지역에 발생하는 평균 태풍의 수와 확률은 다음과 같은 Poisson 분포로부터 구할 수 있다.

$$\Pr(s;\lambda) = \frac{\lambda^s e^{-\lambda}}{s!} \quad (9)$$

여기서, s는 어느 한해에 발생하는 태풍의 수로서 0, 1, 2, 3, · · ·이고, λ는 과거 자료로 부터 산정된 한 해 평균 태풍의 평균 발생빈도이다.

예를 들어 어느 한 지역에 과거 100년간 32회의 태풍이 발생했다면, 태풍의 평균 발생빈도 λ=0.32가 된다. Poisson 분포 공간 0과 1 사이에서 난수발생기에 의하여 어느 한해의 태풍 발생수를 선정하게 된다. λ=0.32 일 경우, 어느 해에 태풍이 전혀 발생하지 않을 경우는 s=0에 해당하며, 이때 $\Pr(0,0.32)$=0.7261이 된다. 따라서, 발생된 난수가 0과 0.7261 사이에 있을 경우 그 해에는 태풍의 발생이 없는 것으로 간주하게 된다. 만일 발생된 난수가 0.7261과 0.9585 ($\Pr(0,0.32)+\Pr(1,0.32)$, = 0.7261 + 0.2324 = 0.9585) 사이에 있다면 1개의 태풍이 발생한 것이 되며, 같은 방법으로 0.9585와 0.9957 사이에 있다면 2개의 태풍이 발생한 것이 된다. 이와 같은 방법으로 어느 한 해에 발생할 태풍의 수가 결정되면 앞에서 설명한 Nearest neighbor interpolation에 의하여 태풍의 특성과 그에 따른 영향이 계산되어진다.

그리고 EST는 T-years(예: 100년)에 걸친 태풍의 발생과 그 영향에 대하여 모의를 수행한다고 할 경우에 T-years에 걸친 모의를 N-회(예: 1,000번) 반복해서 수행하게 된다. 이러한 Multiple time-series simulation 결과를 이용하여 빈도해석과 오차에 대한 평균값 등의 자료를 산정할 수 있게 된다. 매번의 T-years 모의 결과에 대하여 누적확률분포를 산정할 수 있으며, 이를 이용하여 다음 절에 설명하는 위험도 기반 빈도해석이 가능하게 된다.

3.4 EST 모의 절차

전반적인 EST 시뮬레이션 절차는 Fig. 1에 제시된 바와 같다.

과거 태풍 자료는 EST 시뮬레이션의 기본자료가 된다(블록 1). 그러나 과거 자료가 충분치 않을 경우, 예를 들어, 연안(coastal region)의 침수피해를 분석하기 위하여 EST를 적용한다고 가정하자. 같은 태풍이 발생하더라도 조석의 영향에 따라 그 결과는 달라질 수 있다. 이때 태풍의 특성은 같더라도 조석의 상태를 달리하여 여러 가지 발생가능한 상태(Might-Have-Occurred Events)를 고려해 볼 수 있다. 이 자료를 원래 과거 자료와 함께 시뮬레이션에 포함하여 자료를 보완할 수 있다(블록 2). 다음 단계로 응답벡터는 없지만 Training Set에 포함시키고자 하는 사상에 대하여 컴퓨터 모의를 통하여 응답벡터를 산정하는 과정으로서 예를 들면 태풍에 따른 해안 침식량 또는 파고 등을 모의하여 응답벡터를 구할 수 있다(우측 M1~M3 블록). 일반적으로 모델링에는 많은 시간과 노력이 소요되므로 모델링하고자 하는 Training Event는 자료의 대표성 등을 고려하여 신중히 선정하여야 한다. 과거 자료가

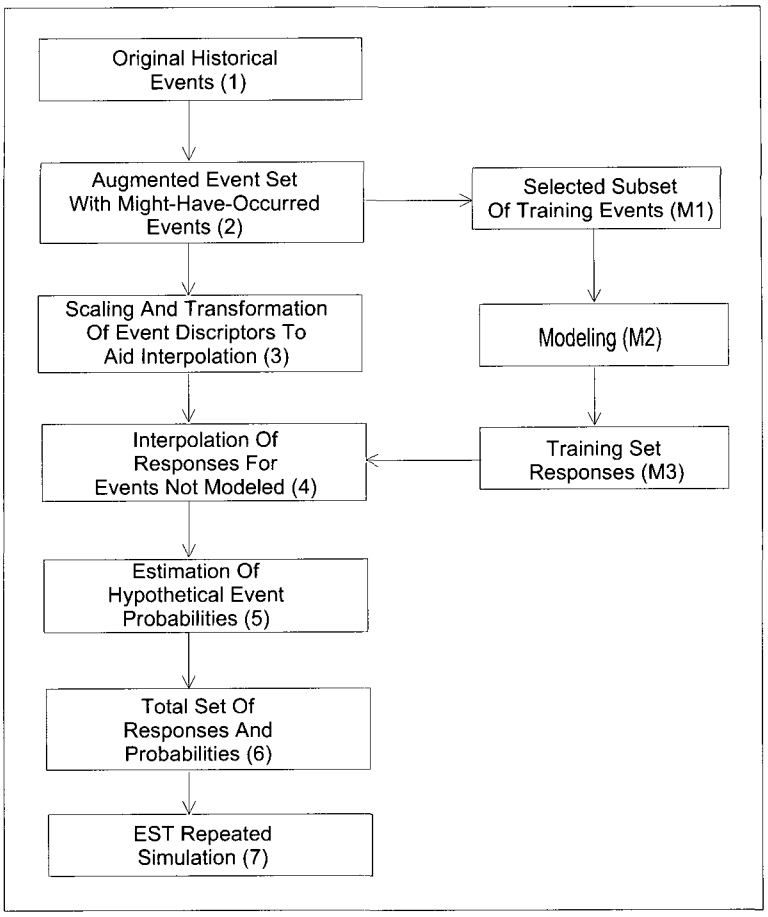


Fig. 1. Overall EST Simulation Procedure(Scheffner et al., 1999)

충분할 경우에는 이 과정을 생략할 수 도 있다.

과거 사상 자료와 발생가능한 사상 자료를 포함시켜 보완된 자료는 내삽(interpolation) 과정에서 발생하는 왜곡을 줄이기 위하여 입력벡터 변수에 대하여 자료의 변환(예: 로그 변환)을 하거나 scaling(예: 자료값의 평균제곱근이 1이 되도록 조정)하는 과정을 거칠 수 있다(블록 3). 다음 단계는 응답벡터가 없는 사상들에 대하여 Training Set의 응답벡터를 이용하여 nearest neighbor interpolation에 의하여 응답벡터를 산정하는 과정이다(블록 4). 과거에 발생했던 사상에 대해서는 발생확률을 산정할 수 있으나 발생한 적이 없는 가상적인 사상(Hypothetical Events)에 대해서는 직접적으로 확률을 부여하기 곤란하다. 이러한 가상적인 사상에 대하여 EST에서는 Gaussian Kernel Regression 방법에 의하여 확률을 산정하게 된다(블록 5). 다섯번째 블록까지가 시뮬레이션을 위한 준비과정으로서 사용자가 지정하는 선택사항에 따라 EST 프로그램내에서 자동으로 계산이 수행되어진다.

그리고 6번 블록은 미래의 사상과 응답벡터를 발생시키고 이에 대한 확률을 산정하는 과정이다. 만일 T-years 모의가 수행된다면 T년 동안 발생하는 모든 사상에 대하여 응답벡터와 이에 대한 확률을 모두 산정하게 된다. 마지막 7번 블록은 여섯번째 블록의 과정이 사용자가 지정한 횟수 N회 만큼 반복됨을 의미한다.

3.5 위험도 기반 빈도해석

어떤 태풍에 의한 영향의 발생빈도를 산정하기 위해서는 먼저 응답벡터에 대한 누적확률분포를 계산해야 한다. X_1, X_2, X_3, $\cdots$, X_n을 n개의 무작위 균일분포된 태풍의 응답변수(response variable)라고 하면, 누적확률분포는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_x(x) = \Pr[X \le x] \tag{10}$$

여기서, $\Pr[]$는 변수X가 어떤 값 x 보다 작거나 같을 확률을 나타낸다. 여기서 문제는 변수X에 대하여 사전에 어떤 특정한 확률분포형 등을 가정하지 않고 주어진 자료와 확률법칙만에 의해서 F_x를 어떻게 구할 것인가 하는 것이다.

태풍의 영향을 나타내는 응답변수x에 대하여 n개의

자료가 있다고 하자. 이 자료를 오름차순으로 정리하면 Eq. (11)과 같다.

$$x_{(1)} \le x_{(2)} \le x_{(3)} \le \cdots \le x_{(n)} \tag{11}$$

여기서, $x_{(1)}$은 가장 작은 값이며, $x_{(r)}$은 r번째 값을 나타낸다.

Gumbel plotting position에 의하여 $F_x(x_{(r)})$에 대한 경험적인 평가식 $\widehat{F}_x(x_{(r)})$은 식(12)와 같다.

$$\widehat{F}_x(x_{(r)}) = \frac{r}{(n+1)} \tag{12}$$

Eq. (12)를 이용하여 응답변수 x의 n개 자료에 대한 누적확률분포를 산정함으로써 각 응답변수값에 대한 누적확률값을 계산하여 표 등으로 정리할 수 있다.

이제 n년의 재현기간을 갖는 태풍의 영향(응답벡터)을 구하려 한다고 가정하자. 그리고 이러한 태풍이 발생할 누적확률분포는$F(x_{(n)}) = 1 - \frac{1}{n}$에 의해서 결정할 수 있다고 가정하면, 이와 같이 결정된 태풍의 누적확률값을 앞에서 응답변수x의 n개 자료에 대하여 구한 응답변수값-누적확률값표에 적용하여 구하고자 하는 태풍의 누적확률값에 해당하는 응답변수값을 내삽(interpolation) 등에 의하여 산정함으로써 n년의 재현기간을 갖는 태풍의 영향(응답벡터)을 구할 수 있다. EST는 T-years 태풍 모의를 N회 반복 수행함으로 각각의 누적확률값과 이에 대한 응답벡터의 쌍도 N개가 산정되어진다. 따라서 각 누적확률값에 대하여 Eq. (13)과 같이 표준편차를 구할 수 있다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - \bar{x})^2} \tag{13}$$

여기서, $\bar{x}$는 어느 하나의 누적확률값에 해당하는 태풍에 대한 N개의 응답벡터에 대한 평균값을 의미하며 이를 그래프상에 도시하면 하나의 단일 평균 빈도곡선식이 작성된다. 그리고 여기에 ±1-표준편차를 함께 도시하여 평균 빈도곡선식이 취할 수 있는 ±1-표준편차범위를 나타내게 된다.

4. 태풍 모의에 대한 적용 및 고찰

4.1 적용 대상 지점 선정

우리나라에 태풍이 내습할 경우 피해지역의 위치와 지리적인 특성 등에 따라 그 피해양상이 달라질 것으로 예상할 수 있다. 특히, 태풍은 장애물이 없는 해안지방에서 강력한 바람을 동반하며, 육지에 상륙하면 세력이 약해지고 지면마찰 등으로 인하여 풍속도 급격히 약화된다. 이러한 태풍의 피해특성을 고찰하기 위하여 Fig. 2에 나타난 바와 같이 해안과 내륙 및 섬지방의 6개 지점을 선정하여 태풍의 특성을 분석하기로 하였다.

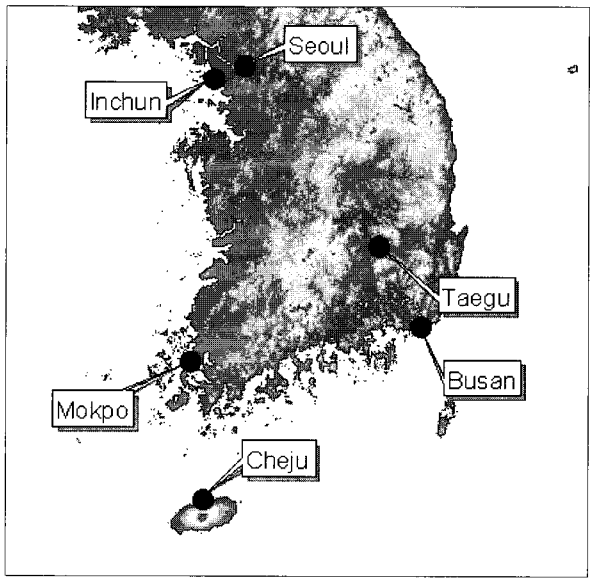


Fig. 2. Location Map of Selected Cities

분석에 이용한 자료는 기상청(1996)에서 발행한 태풍백서의 자료를 이용하였다. 태풍백서에는 우리나라 주요지점별로 1904년부터 1995년까지 92년간의 태풍자료가 수록되어 있다. 태풍백서에는 각 태풍별로 태풍의 발생부터 소멸까지의 기간과 경로, 영향을 받은 도시별로 최대풍속 및 풍향, 최소해면기압, 일최대강우량 및 총강우량 등의 자료가 수록되어 있다. 본 연구에서 분석한 대상지점과 각 지점별 태풍 자료수는 Table 1에 제시된 바와 같다.

Table 1에서 H는 노장의 해발높이, Hb는 수은기압계의 해발높이, ha는 풍속계의 지상높이, hr은 우량계의 지상높이이다. Table에 나타난 바와 같이 대체적으로 도시별 태풍 자료의 수는 태풍의 영향을 많이 받는 도시일수록 많은 것으로 나타났다. 각 지점 태풍 자료의 항목별 특성은 Table 2와 같다.

Table 2에 나타난 바와 같이 평균값으로 볼 때 최대풍속은 목포, 제주, 인천, 부산 등의 순서로 나타났고, 일최대강우량은 제주, 서울, 부산, 인천 등의 순이다. 최대풍속의 표준편차는 10m/s 이내이며, 일최대강우량의 표준편차는 100mm 이내라고 볼 수 있다. 총강우량의 표준편차는 100mm 내외로서 큰 편차를 보이고 있다. 태풍기간동안 해당 도시의 최소해면기압은 평균 995hPa

Table 1. Typhoon Data for Selected Stations

Station	Location		H(m)	Hb(m)	ha(m)	hr(m)	Number of Typhoon data	Geographic characteristic
	Latitude(N)	Longitude(E)						
Seoul	37°34′	126°58′	85.5	86.2	10.0	0.2	44	Northern inland
Inchun	37°28′	126°38′	68.9	70.3	14.0	0.5	81	Northern coastal
Taegu	35°53′	128°37′	57.6	59.0	10.0	0.6	40	Middle inland
Busan	35°06′	129°02′	69.2	69.9	17.8	0.6	149	Southeastern coastal
Mokpo	34°49′	126°23′	37.9	39.0	15.5	0.6	139	Southwestern coastal
Cheju	33°31′	126°32′	20.0	22.6	15.0	0.5	109	Southern island

Table 2. Descriptive Statistics of Typhoon Data

Station	Max. wind speed (m/s)		Max. daily rainfall (mm)		Total rainfall (mm)		Min. atmospheric pressure (hPa)		Wind direction	Most frequent month
	Average Range	Std dev	Average Range	Std dev	Average	Std dev	Average	Std dev	Average	Median
Seoul	8.9 4.0~15.8	3.1	82.4 0.5~273.2	65.4	124.1	107.2	995.9	6.8	SSW	August
Inchun	16.5 5.0~35.0	5.6	54.2 0~238.3	54.1	81.8	90.7	995.3	6.5	SSE	"
Taegu	12.6 5.8~25.3	4.5	51.4 0~116.3	34.4	81.2	66.9	992.7	8.8	ESE	"
Busan	16.4 6.8~35.0	5.9	61.8 0~439.0	98.3	83.2	87.2	995.9	9.7	SSE	"
Mokpo	19.2 6.1~42.4	8.5	50.8 0~394.7	53.1	82.4	135.8	994.9	9.2	SSE	"
Cheju	18.0 6.7~36.1	6.1	88.9 0~301.2	71.4	119.6	96.5	993.1	10.9	ESE	"

내외이고 표준편차는 10 hPa 내외로 나타났다. 최대풍속이 가장 큰 시점에서의 풍속의 주방향은 서울을 제외하고는 동남동 또는 남남동인 것으로 나타났으며, 서울은 남남서로 나타났다. 그리고 태풍이 가장 많이 발생했던 달은 모두 8월이다.

Table 2에서 최대풍속의 평균과 표준편차, 자료가 취할 수 있는 범위 측면에서 볼 때, 인천과 부산은 매우 유사한 것처럼 보인다. 그러나 이들 두 지역은 연안 도시라는 공통점은 있으나 위도 차가 크고 태풍 통과시 영향을 받는 정도가 다를 가능성이 높다. 한편, 일최대강우량의 평균값을 비교해 보면, 인천, 대구, 목포가 비슷한 값을 나타내고 있다. 그러나 일반적으로 내륙에 위치한 대구 보다 목포 지역에 태풍시 비가 많이 내린다는 것은 널리 알려져 있다.

이와 같이 제한된 양의 기록 자료를 이용하여 분석할 경우에 지역적인 특성은 통계처리과정에서 제대로 표현되지 못하고 제거되어 보편적인 경향만 나타나게 된다. 그리고 발생했던 값의 범위를 알더라도 확률적인 위험도를 고려한 값은 산정할 수 없다.

따라서 이러한 문제를 해결할 수 있는 방법으로서 본 논문에서는 EST를 적용하여 태풍의 가장 큰 피해요인이 되고 있는 최대풍속과 일최대강우량에 대하여 재현기간별로 위험도를 고려한 값의 범위를 산정하고자 한다.

4.2 입력자료의 준비 및 적용

1) 발생확률분포의 매개변수 산정

각 관측소별 발생태풍수와 관측기간으로 부터 연평균 태풍발생수를 산정하여 입력하였으며 이로 부터 연간 태풍 발생횟수별 누적확률분포를 EST 프로그램에

서 Poisson 확률분포를 이용하여 산정한 결과는 Table 3과 같다. 표에는 연간 태풍발생횟수 0에서 7까지만 제시하였으나, 프로그램에서는 연간 최대 발생가능한 태풍수를 10으로 지정해주었으므로 연간 태풍발생횟수 10개 까지의 누적 확률이 계산되어 모의에 이용되었다.

2) 입력벡터 및 응답벡터 자료의 선정

태풍백서에 제시된 자료로서 EST 모의에 이용가능한 자료는 발생시기, 최대풍속, 풍향, 일최대강우량, 총강우량, 최소해면기압 등 6가지 항목이다. 본 연구에서는 응답벡터로서 재해와 직접적으로 관계가 있는 최대풍속과 일최대강우량을 선정하였다. EST 모의시 응답벡터는 1개로 지정하여 각 지점별로 최대풍속과 일최대강우량에 대한 모의를 별도로 수행하였다. 그리고 응답벡터를 제외한 나머지 5개 항목은 입력벡터로 적용하였다. 발생시기는 월별 자료를 적용하였으며 풍향은 16개 방위로 구분하여 입력하였다.

3) 입력벡터자료의 변환

입력벡터자료는 EST 모의시 자료 항목간의 이질성으로 인한 왜곡을 최소화하기 위하여 자료의 변환을 실시하였다. 자료변환방법은 먼저 각 자료 항목의 평균을 구한 후 자료값에서 평균값을 뺀다. 그리고 평균값을 뺀 값들의 RMS(Root-Mean-Square)를 구하여 이 값으로 다시 나누어 준다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다

$$\mu_J = \frac{1}{NSTOT}\sum_{I=1}^{NSTOT} TS(I,J) \qquad (14)$$

$$\sigma_J = \sqrt{\frac{1}{NSTOT}\sum_{I=1}^{NSTOT}(TS(I,J)-\mu_J)} \qquad (15)$$

$$TSN(I,J) = \frac{TS(I,J)-\mu_J}{\sigma_J} \qquad (16)$$

여기서, μ_J : 입력벡터 J의 평균값

$NSTOT$: 총 태풍자료 수

$TS(I,J)$: Training Set에 포함된 I번째 태풍의 입력벡터J 의 값

σ_J : 입력벡터 J의 RMS

$TSN(I,J)$: $TS(I,J)$의 변환된 값이다.

4) 유사 태풍의 선정

EST는 Training Set에 포함된 태풍을 기반으로 유사성을 보이는 태풍군을 이용하여 응답벡터를 결정하게 된다. 따라서 과거에 발생했던 태풍자료를 Training Set에 포함시켜 모의하게 되면 각 태풍에 대하여 3~4개 정도의 유사 태풍(Neighborhood Array)을 결정하게 된다. 본 논문에서는 유사 태풍의 수를 4개로 지정하였다.

유사 태풍은 각 태풍간의 입력벡터 및 응답벡터들에 대한 유클리드 공간상의 거리(Euclidean distances)를 계산하여 가장 가까운 값을 나타내는 태풍부터 선정하게 된다. 태풍간의 거리는 Eq. (17)과 같이 구하게 된다.

$$DSC(I,J) = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^{NSC} SWGT(K)*(TSN(I,K)-TSN(J,K))^2}{\sum_{K=1}^{NSC} SWGT(K)}} \qquad (17)$$

여기서, $DSC(I,J)$: 태풍I와 태풍J간의 거리

NSC : 태풍특성을 나타내는 항목의 수

$SWGT(K)$: 태풍특성 K번째 항목의 가중치이다.

Table 3. Cumulative Poisson Probability Distribution for Typhoon Occurrence

Station	Avg. annual occurrence	Cumulative probability for typhoon occurrence							
		0/year	1/year	2/year	3/year	4/year	5/year	6/year	7/year
Seoul	0.47826	0.61986	0.91632	0.98721	0.99851	0.99986	0.99999	1.00000	-
Inchun	0.88045	0.41460	0.77963	0.94033	0.98749	0.99787	0.99969	0.99996	1.00000
Taegu	0.43478	0.64741	0.92889	0.99008	0.99895	0.99991	0.99999	1.00000	-
Busan	1.61957	0.19798	0.51863	0.77829	0.91847	0.97552	0.99361	0.99857	0.99972
Mokpo	1.51087	0.22072	0.55419	0.80611	0.93299	0.98091	0.99539	0.99903	0.99982
Cheju	1.49315	0.22466	0.56012	0.81056	0.93521	0.98174	0.99564	0.99910	0.99984

본 논문에서는 각 항목의 가중치에 대한 별도의 자료가 없음을 감안하여 1.0으로 균일하게 부여하였다.

5) 응답벡터의 산정

EST를 이용하여 태풍의 발생을 모의하게 되면 Training Set의 태풍중에서 난수에 의하여 임의의 태풍사상이 선택되고 이 태풍사상으로 부터 인접 Neighbor Array를 구성하는 태풍군을 이용하여 응답벡터를 산정하게 된다. 응답벡터는 EST 프로그램에서 Nearest Neighbor Kernel Procedure에 의하여 산정하게 되며 이를 수식으로 나타내면 Eq. (18)과 같다.

$$R_o = \frac{\sum_{j=1}^{n} w(v_j - v_o) R_j}{\sum_{j=1}^{n} w(v_j - v_o)} \tag{18}$$

$$w(v) = e^{-\pi v^T v/(EW)} \tag{19}$$

여기서, R_o는 구하고자하는 태풍의 응답벡터, R_j는 유사태풍j의 응답벡터,v_o는 선택된 Training Set 태풍의 특성값 벡터,v_j는 유사태풍j의 특성값 벡터, EW 는 Kernel 유효 반경으로서 EST 프로그램에서 난수를 발생시켜 산정하게 된다.

6) 모의기간 및 반복 횟수

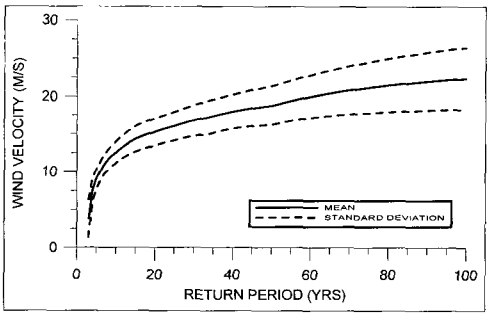
EST에 의한 태풍의 모의는 100년 단위로 100회를 수행하여 그 결과로 부터 태풍의 응답벡터에 대한 통계적인 특성을 추출하였다.

4.3 결과 및 고찰

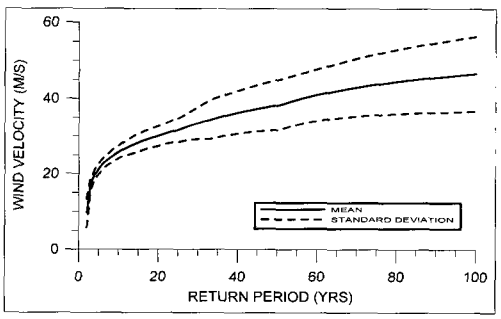
4.3.1 태풍의 풍속

EST 프로그램을 적용하여 6개 지점의 태풍 최대풍속을 모의한 결과는 Fig. 3에 제시된 바와 같다. 본 논문에서 평균값, 표준편차, 최대값과 최소값은 다음과 같이 산정된 것이다. 먼저 100년에 걸쳐 모의한 태풍자료를 통계처리하여 각 재현기간별로 태풍 최대풍속값에 대한 자료를 산정하였다. 이와 같은 과정을 100번 반복 시행하여 각 재현기간별로 최대풍속값이 100개 생성되게 되므로 재현기간별로 이들 100개의 자료를 처리하여 표준편차와 최대값 및 최소값을 산정하였다.

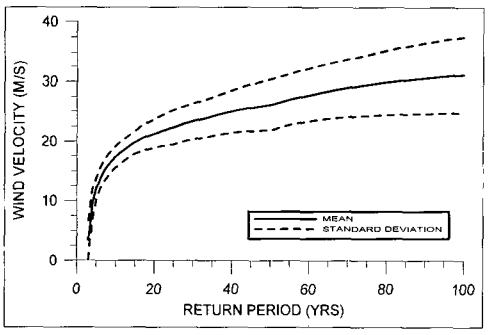
Fig. 3에서 실선은 빈도별 평균 풍속값이며, 점선은 표준편차로서 평균값이 취할 수 있는 오차의 범위(error band)이다. 서울지역의 최대풍속의 평균값은 재현기간에 따라 12.5~22.4m/s 범위로 나타났고, 표준편차는 1.4~4.0m/s 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 9.7~15.3m/s, 최대값은 15.9~36.2m/s 사이의 범위로 나타났다. 이와 같이 최대풍속이 다른 지역에 비하여 상대적으로 크지 않은 것은 서울 지역이 위치상으로 위도가



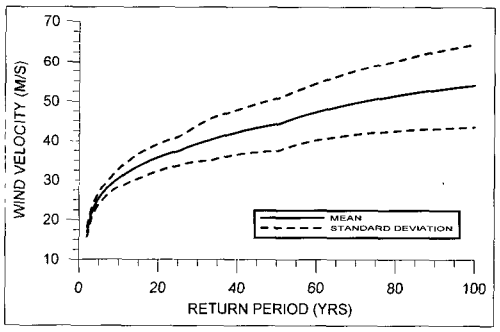
(a) Seoul



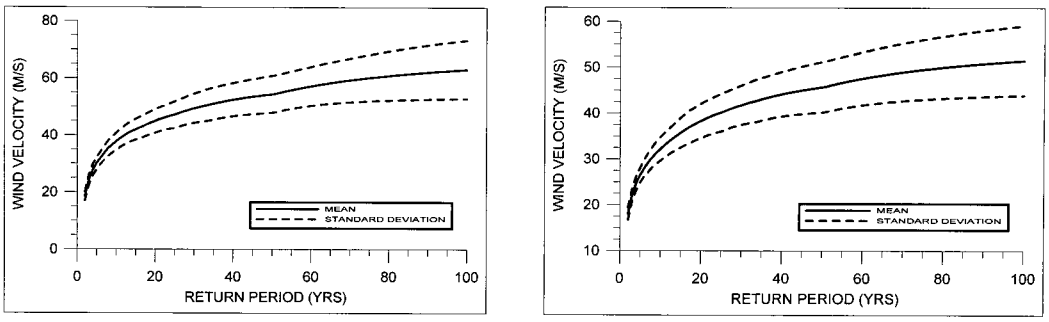
(b) Inchun



(c) Taegu



(d) Busan



(e) Mokpo (f) Cheju

Fig. 3. Wind Velocity-Frequency Plot

높은 중부지역인데다 내륙지방에 위치하여 태풍의 세력이 급격히 소멸되며 도시지역의 지표면 장애물이 많기 때문으로 추정되나 이에 대하여 구체적으로 입증된 바는 없다.

인천지역의 재현기간별 최소값의 변화는 작은데 비하여 최대값의 변화가 상대적으로 크게 나타나고 있다. 최대풍속의 평균값은 재현기간에 따라 25.6~46.5m/s 범위로 나타났고, 표준편차는 1.7~9.8m/s 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 21.3~27.8m/s, 최대값은 29.8~75.7m/s 사이의 범위로 나타났다. 이와 같이 인천 지역의 풍속이 크게 나타난 것은 인천이 해안에 위치하여 태풍의 세력이 소멸되기 전에 인천을 내습할 수 있고, 위치상으로도 태풍의 주이동 경로상에 놓일 가능성이 높기 때문으로 추정된다. 인천 지역에는 태풍의 경로와 발달상황에 따라 풍속이 67m/s를 초과하는 초태풍이 내습할 가능성도 배제할 수 없음을 알 수 있다.

대구지역 최대풍속의 평균값은 재현기간에 따라 17.3~31.1m/s 범위로 나타났고, 표준편차는 1.8~6.4m/s 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 12.1~20.2m/s, 최대값은 21.0~47.4m/s 사이의 범위로 나타났다. 이와 같이 대구 지역의 위도가 인천 지역 보다 훨씬 낮은 중남부 지방에 위치하고 있음에도 풍속이 상대적으로 작게 나타나는 것은 태풍이 육지에 상륙한 후 급격히 세력이 소멸되면서 내륙지방인 대구 지역을 통과하기 때문으로 추정된다.

부산지역 최대풍속의 평균값은 재현기간에 따라 30.4~53.9m/s 범위로 나타났고, 표준편차는 2.3~10.5m/s 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 26.4~38.6m/s, 최대값은 39.3~83.0m/s 사이의 범위로 나타났다. 이와 같이 부산 지역의 풍속이 크게 나타난 것은 부산이 해안에 위치하여 태풍의 세력이 소멸되기 전에 직접적으로 내습할 수 있고, 위치상으로도 남부지방에 위치하며 태풍의 주이동 경로상에 놓일 가능성이 높기 때문으로 추정된다.

목포지역 최대풍속의 평균값은 재현기간에 따라 37.7~63.0m/s 범위로 나타났고, 표준편차는 3.0~10.2m/s 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 30.3~46.1m/s, 최대값은 45.2~94.7m/s 사이의 범위로 나타났다. 이와 같이 목포 지역의 풍속이 크게 나타난 것은 목포가 해안에 위치하고 있을 뿐만 아니라 위치상으로도 한반도의 최남단에 위치하여 태풍의 세력이 소멸되기 전에 바로 내습할 수 있고, 태풍의 주이동 경로상에 놓일 가능성이 높기 때문으로 추정된다. 과거 태풍자료에 대한 분석에서도 목포가 태풍의 최대풍속이 가장 큰 것으로 나타났으며, EST 모의 결과 본 논문에서 분석한 지점들 중에서 태풍 풍속으로 인한 위험도가 가장 높은 것으로 나타났다.

제주지역 최대풍속의 평균값은 재현기간에 따라 32.2~51.5m/s 범위로 나타났고, 표준편차는 2.6~7.6m/s 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 27.4~36.4m/s, 최대값은 39.8~76.9m/s 사이의 범위로 나타났다. 이와 같이 제주 지역의 풍속이 크게 나타난 것은 제주가 위치상으로 한반도 최남단 도서에 위치하여 태풍의 세력이 소멸되기 전에 바로 내습할 수 있고, 태풍의 주이동 경로상에 놓일 가능성이 높기 때문으로 추정된다.

4.3.2 태풍에 동반한 강우량

EST 프로그램을 적용하여 6개 지점의 태풍에 동반한 일강우량을 모의한 결과는 Fig. 4에 제시된 바와 같다.

서울지역의 태풍에 동반되는 일최대강우량의 평균값은 재현기간에 따라 129.7~330.0mm 범위로 나타났고, 표준편차는 29.3~64.4mm 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 80.5~171.2mm, 최대값은 227.2~516.3mm 사이의 범위로 나타났다. 한편, 건교부(2000)의 한국확률강우량도에 제시된 서울의 24시간 확률강우량은 재현기간에 따라 245.7~376.4mm로 나타났다. 서울 지역의 재현

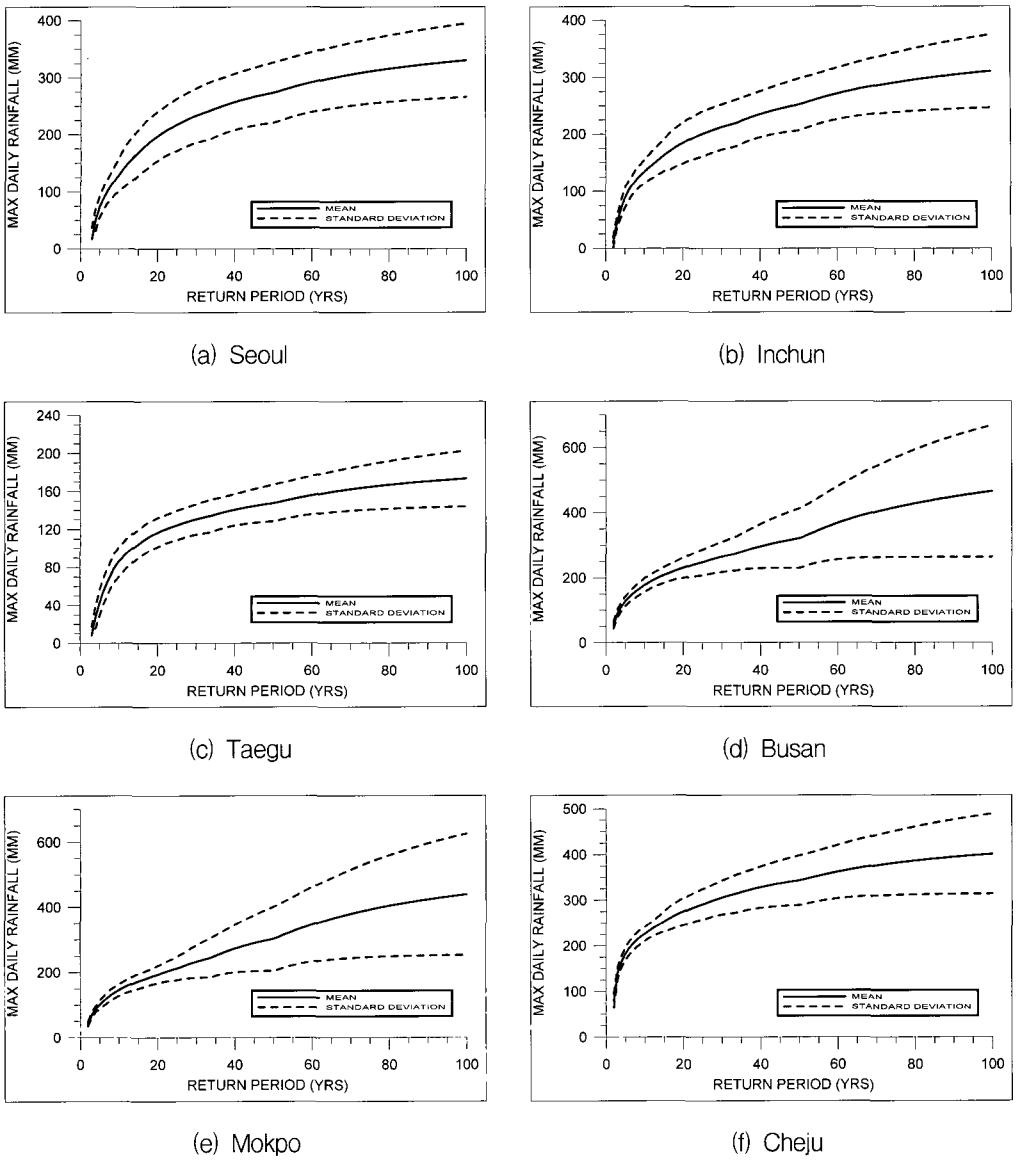


Fig. 4. Daily Rainfall-Frequency Plot

기간별 태풍에 동반된 일최대강우량의 평균값은 연최대 치계열로 부터 산정된 한국확률강우량에 비교해 볼 때 전반적으로 작게 나타났다. 이것은 자료계열의 특성에도 일부 원인이 있다. 일최대강우량은 일별로 집계된 24시간 최대강우량 자료인 반면에 한국확률강우량도 작성시 이용한 24시간 강우량은 일별 구분에 상관없이 무강우 기간이 없이 연속된 호우사상 중에서 연속 24시간 강우량이 최대인 구간을 선택하여 강우량을 산정하기 때문이다. 태풍에 동반한 일최대강우량과 한국확률강우량도의 24시간 강우량은 재현기간이 증가함에 따라 그 차이가 점차 감소해가는 것으로 나타났다. 이것은 자주 발생하는 태풍의 강우량은 다른 원인에 의하여 발생하는 호우사상들에 비하여 작지만 드물게 다량의 호우를 동반한 태풍이 서울 지역에 발생할 가능성이 있음을 의미한다.

인천지역의 태풍에 동반되는 일최대강우량의 평균값은 재현기간에 따라 133.1~310.5mm 범위로 나타났고, 표준편차는 20.5~64.1mm 범위로 나타나 서울과 비슷한 양상을 보이고 있다. 그러나 재현기간에 따라 그 양상이 달라지는데, 재현기간이 작은 비교적 자주 발생하는 태풍에 동반한 인천 지역의 일최대강우량 평균값은 서울지역 보다 다소 크지만 재현기간이 커감에 따라 서울지역의 강우량이 더 커지는 것으로 나타나 태풍에 동반한 호우에 대한 위험도는 인천이 서울 보다 다소 작은 것으로 나타났다. 그리고 최소값은 89.4~178.4mm, 최대값은 204.2~527.9mm 사이의 범위로 나타났다.

대구지역의 태풍에 동반되는 일최대강우량의 평균값은 재현기간에 따라 85.3~173.1mm 범위로 나타났고,

표준편차는 15.6~29.3mm 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 47.4~128.1mm, 최대값은 123.9~248.4mm 사이의 범위로 나타났다. 한편, 한국확률강우량도에 제시된 인천의 24시간 확률강우량은 재현기간에 따라 170.1~255.0mm로 나타났다. 대구 지역의 재현기간별 태풍에 동반된 일최대강우량의 평균값은 연최대치계열로부터 산정된 한국확률강우량에 비교해 볼 때 전반적으로 매우 작게 나타났으며, 본 논문에서 검토한 6개 지역 중에서도 가장 작은 값을 보였다. 이것은 대구 지역의 주요 호우사상은 태풍 이외의 원인에 의하여 발생하고 있으며, 태풍에 동반한 호우로 인한 위험도는 타 지역에 비하여 상대적으로 낮다는 것을 의미한다.

부산지역의 태풍에 동반한 일최대강우량의 평균값은 재현기간에 따라 176.6~465.0mm 범위로 나타났고, 표준편차는 20.1~202.4mm 범위로 나타나 본 논문에서 검토한 6개 지역 중에서 태풍에 동반한 호우의 위험도가 가장 큰 것으로 나타났다. 그리고 재현기간의 증가에 따른 표준편차의 증가도 현저하여 태풍에 동반된 이상호우가 발생할 가능성이 높음을 시사하고 있다. 그리고 최소값은 124.2~240.3mm, 최대값은 252.2~1,165.3mm 사이의 범위로 나타났다. 한편, 한국확률강우량도에 제시된 부산의 24시간 확률강우량 자료는 재현기간에 따라 249.0~383.0mm 로 나타났다.

부산 지역의 재현기간별 태풍에 동반한 일최대강우량의 평균값은 연최대치계열로부터 산정된 한국확률강우량과 비교해 볼 때 재현기간 50년을 기준으로 재현기간이 작은 경우와 큰 경우 간에 현저히 다른 양상을 나타내고 있다. 재현기간이 50년 보다 작은 경우에는 한국확률강우량 보다 태풍에 의한 호우의 강우량이 작은 것으로 나타나며, 재현기간 50년을 넘어서면서 태풍에 의한 일최대강우량이 한국확률강우량의 24시간 강우량보다 커지며, 재현기간이 증가함에 따라 그 차이는 더욱 커져가는 것으로 나타났다. 이것은 부산 지역에 빈번하게 발생하는 태풍에 동반한 호우는 타 원인에 의하여 발생하는 호우 보다 일반적으로 작지만 드물게 강력한 호우사상을 동반한 태풍이 부산 지역을 내습하고 있음을 의미한다.

목포지역의 태풍에 동반한 일최대강우량의 평균값은 재현기간에 따라 145.6~438.7mm 범위로 나타났고, 표준편차는 17.6~185.8mm 범위로 나타나 본 논문에서 검토한 6개 지역 중에서 태풍에 동반한 호우의 위험도가 부산에 이어 두 번째 큰 것으로 나타났다. 그리고 재현기간의 증가에 따른 표준편차의 증가도 현저하여 태풍에 동반된 이상호우가 발생할 가능성이 높음을 시사하고 있다. 그리고 최소값은 95.7~190.1mm, 최대값은 185.6~1,026.5mm 사이의 범위로 나타났다.

제주지역의 태풍에 동반한 일최대강우량의 평균값은 재현기간에 따라 225.5~401.1mm 범위로 나타났고, 표준편차는 15.7~87.4mm 범위로 나타났다. 그리고 최소값은 189.4~263.2mm, 최대값은 265.2~777.2mm 범위로 나타났다. 한편, 한국확률강우량도에 제시된 제주지점의 24시간 확률강우량은 재현기간에 따라 255.9~390.2mm로서 본 논문에서 검토한 6개 지점 중에서 태풍에 동반한 재현기간별 일최대강우량의 평균치와 24시간 확률강우량의 차이가 가장 작은 것으로 나타났다. 이것은 제주지방은 전형적인 태풍의 이동경로상에 위치하여 태풍의 내습이 잦을 뿐만 아니라 대부분의 주요 호우사상이 태풍과 관련하여 발생하기 때문으로 추정된다.

4.3.3 도시별 태풍의 재해위험도

앞에서 분석된 도시별 태풍의 최대풍속과 일최대강우량 자료 중에서 재현기간 100년의 평균치를 기준으로 비교하면 Table 4와 같다.

Table 4. Prioritized order for typhoon-related hazard proneness

Station	Max. wind speed (m/s)	Max. daily rainfall (mm)	Prioritized order for hazard proneness	
			Wind	Rainfall
Seoul	22.4	330.0	6	4
Inchun	46.5	310.5	4	5
Taegu	31.1	173.1	5	6
Busan	53.9	465.0	2	1
Mokpo	63.0	438.7	1	2
Cheju	51.5	401.1	3	3

Table 4에 나타난 바와 같이 태풍으로 인한 최대풍속은 목포, 부산, 제주, 인천, 대구, 서울의 순으로 나타나 해안이나 도서지방의 태풍 풍속으로 인한 재해위험도가 내륙 지방 보다 높은 것으로 나타났다. 목포는 태풍의 발생이 가장 많고 태풍의 세력이 강한 8월에 발생하는 태풍의 전형적인 포물선 이동경로와 정확하게 일치하는 지점에 위치하고 있으며, 태풍이 최초 상륙하는 해안지역에 위치하고 있어서 본 논문에서 검토한 지점 중에서 태풍으로 인한 바람의 영향을 가장 크게 받는 것으로 판단된다. 한편, 제주는 한라산으로 인한 풍속 감쇄 영향을 받을 것으로 추정된다.

태풍에 동반한 일최대강우량은 부산, 목포, 제주, 서울, 인천, 대구의 순으로 나타나 남부지방이 태풍에 동반된 호우로 인한 재해위험도가 중북부지방 보다 높은 것으로 나타났다. 이는 기단의 배치와 관련이 있는 것으로 보인다. 적도지방에서 발생한 태풍은 북태평양고기압의 가장자리를 따라 서쪽으로 전진하다가 북동쪽으로 타원형 궤적을 나타내며 우리나라 남부지방으로 접근하게 된다. 이때 중국대륙의 고기압과 편서풍의 영향 등으로 인하여 우리나라 남부지방에 도달한 태풍은 우측으로 더욱 전향하게 된다. 그러나 한반도 우측에 위치한 기단의 세력이 강하여 태풍의 진행을 방해할 경우에 태풍은 정체되거나 아예 서쪽으로 전향하는 경우가 발생하기도 한다. 이와 같이 태풍의 진로가 기단에 의하여 영향을 받아 정체될 가능성이 높은 지역은 남부지방 중에서도 동쪽에 위치한 부산이며, 이러한 기단의 영향으로 부산 지역에 큰 호우사상이 발생하는 것으로 추정된다.

재해발생요인으로서 바람과 강우가 미치는 영향은 지역에 따라 다소 달라질 수 있다. 예를 들어 배수가 전반적으로 양호한 제주도의 경우 일반적으로 타 지역에 비하여 강우 보다는 바람에 피해를 입을 가능성이 높다. 그러나 배수가 불량한 내륙지역의 경우 강우에 의한 피해가 더 클 가능성도 있다. 따라서 바람과 강우 중에서 어느 쪽이 더 재해발생에 큰 영향을 주는지를 일반화하여 논하기는 어렵다고 판단된다.

그러나 Table 4에 제시된 태풍에 따른 풍속과 강우량에 대한 재해위험도로부터 판단해 볼 때 대체적으로 남부해안지방, 제주지역, 중부해안지방, 내륙지방 순으로 전반적인 태풍의 위험도가 높은 것으로 볼 수 있다.

5. 결론 및 발전방향

본 논문에서는 우리나라에 내습하는 태풍의 위험도를 평가하기 위하여 EST를 적용하고 그 결과를 고찰하였다. 서울, 인천, 대구, 부산, 목포, 제주 등 6개 지역의 태풍자료를 이용하여 각 지점에 대한 재현기간별 최대풍속과 일최대강우량을 산정하고 지역별 재해위험도를 비교 평가하였다. 태풍으로 인한 최대풍속을 비교 평가한 결과 최대풍속은 목포, 부산, 제주, 인천, 대구, 서울의 순으로 크게 나타나 해안이나 도서지방의 태풍 풍속 재해위험도가 내륙 지방 보다 높은 것으로 나타났으며, 태풍에 동반한 일최대강우량은 부산, 목포, 제주, 서울, 인천, 대구의 순으로 나타나 남부지방이 태풍에 동반한 호우로 인한 재해위험도가 중북부지방 보다 높은 것으로 나타났다. 그리고 태풍에 따른 최대풍속과 일최대강우량에 대한 재해위험도를 종합적으로 고려하여 판단해 볼 때 남부해안지방, 제주지역, 중부해안지방, 내륙지방 순으로 전반적인 태풍의 위험도가 높은 것으로 나타났다. 본 연구결과를 통하여 EST의 태풍재해인자 평가에 대한 적용성을 판단해 볼 때 태풍의 지역적인 특성과 이에 따른 풍속 및 강우특성 등을 잘 반영하고 있는 것으로 사료된다.

앞으로 본 논문에서 적용한 EST 뿐만 아니라 다양한 태풍 영향 평가 기법을 개발 발전시켜 우리나라의 태풍 특성과 이에 대한 대책을 수립하는데 적극 활용할 수 있도록 연구개발에 노력해야 할 것이다. 그리고 본 논문에서는 태풍백서에 제시된 자료를 이용하여 분석을 수행하였는 바 추후 보다 세밀한 자료를 수집하여 태풍에 대한 정밀 분석과 체계적인 검증을 수행하는 것이 필요할 것이며 또한 본 논문에서는 태풍의 직접적인 영향으로 나타나는 바람과 강우량에 대해서만 분석하였으나 추후 태풍에 의한 다양한 피해 유형과 피해액 등에 대한 연구도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

건교부(2000). 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서: 제 1 권 한국 확률강우량도 작성.

기상청(1996). 태풍백서.

이순철(2002). EST 기법을 이용한 태풍의 재해위험인자 연구. 서울산업대학교 산업대학원 석사학위논문.

최병호, 고진석, 김동철, 엄현민(1999). "한국 해안의 최극수위분포", **1999년도 자연재해경감 학술대회(한국근해의 폭풍해일) 발표 논문집**, 한국해안·해양공학회.

Borgman, L.E., Miller, M.C., Butler, H.L., and Reinhard, R.D.(1992). *"Empirical simulation of future hurricane storm histories as a tool in engineering and economic analysis," ASCE Proc.*

Civil Engineering in the Oceans V. College Station, Texas, 2-5 November 1992.

Scheffner, N. W., Borgman, L. E. and Mark, D. J.(1996). *"Empirical simulation technique based on storm surge frequency analysis," Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, pp. 93-101.

Scheffner, N.W., Clausner, J.E., Militello, Borgman, L.E., Edge, B.L., and Grace, P.J. (1999). *Use and Application of the Empirical Simulation Technique: User's Guide,* Technical Report CHL-99-10 Final Report, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C.

(논문번호:05-88/접수:2005.07.06/심사완료:2005.08.17)