

수방능력 및 재해위험을 고려한 침수위험도 결정 Determination of Flood Risk Considering Flood Control Ability and Urban Environment Risk

이 의 훈* / 최 현 석** / 김 중 훈***

Lee, Eui Hoon / Choi, Hyeon Seok / Kim, Joong Hoon

Abstract

Recently, climate change has affected short time concentrated local rainfall and unexpected heavy rain which is increasingly causing life and property damage. In this research, arithmetic average analysis, weighted average analysis, and principal component analysis are used for predicting flood risk. This research is foundation for application of predicting flood risk based on annals of disaster and status of urban planning. Results obtained by arithmetic average analysis, weighted average analysis, and principal component analysis using many factors affect on flood are compared. In case of arithmetic average analysis, each factor has same weights though it is simple method. In case of weighted average analysis, correlation factors are complex by many variables and multicollinearty problem happen though it has different weights. For solving these problems, principal component analysis (PCA) is used because each factor has different weights and the number of variables is smaller than other methods by combining variables. Finally, flood risk assessment considering flood control ability and urban environment risk in former research is predicted.

Keywords : principal component analysis, flood control ability, urban environment risk

요 지

최근 기후변화는 짧은 시간의 지역적인 집중호우와 예상치 못한 폭우에 영향을 미치고 이는 생명과 재산의 손실에 영향을 준다. 본 연구에서는 침수위험도를 결정하기 위한 방법으로 산술평균방법, 가중평균방법, 주성분 분석방법을 이용하여 침수위험도에 따른 순위를 결정하였다. 재해연보 및 도시계획현황에서 선택한 인자들에 대한 표준화를 통해 단위를 통일시켰으며 표준화를 통한 산술평균방법, 상관관계분석을 통한 가중평균방법, 상관도가 높은 인자들을 묶어 분석한 주성분 분석방법을 통해 침수위험도를 결정하고 그 순위를 나타내었다. 본 연구에서 사용된 산술평균방법의 경우 간단하기는 하지만 각각의 인자들이 동일한 가중치를 가지는 문제점이 있고 가중평균방법의 경우 각각의 인자들이 다른 가중치를 갖기는 하지만 많은 변수들 때문에 변수들 간의 상관관계가 복잡해지는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위해 주성분 분석방법을 사용하였으며 각 지역의 수방능력 및 재해위험을 고려한 침수위험도를 결정하였다.

핵심용어 : 주성분분석, 수방능력, 재해위험

* 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 박사과정 (e-mail: hydrohydro@naver.com)

Graduate Student, Department of Civil & Environmental and Architectural Engineering, Korea University

** 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학과 석사과정 (e-mail: chseokuo@gmail.com)

Graduate Student, Department of Civil & Environmental and Architectural Engineering, Korea University

*** 교신저자, 고려대학교 공과대학 건축사회환경공학부 정교수 (e-mail: jaykim@korea.ac.kr, Tel: 82-2-3290-3316)

Corresponding Author: Professor, Department of Civil & Environmental and Architectural Engineering, Korea University

1. 서론

최근에 들어 지구온난화에 따른 영향으로 국지성 호우와 돌발성 호우로 인하여 인명 및 재산피해가 날로 증가하고 있다. 기후변화에 따라 서울과 같은 도심지역에서의 폭우가 반복되고 있으며 최근 2001년부터 유례없는 연속된 집중호우가 발생하였고 재해 위험성이 있는 강우의 발생빈도가 증가하였다. 서울시의 경우, 하수관거 개량, 빗물펌프장 증설, 하폭 확장, 제방 증고 등의 전통적 대책뿐만 아니라 빗물저류조, 빗물저류배수시설, 분산형 시설과 같은 새로운 대책도 준비하고 있다. 하지만 침수분야의 지속적인 투자에도 불구하고 홍수피해는 꾸준히 증가하고 있다. 2001년부터 현재까지 서울시 침수피해는 내배수 시설 증설과 같은 침수대책의 수립에도 불구하고 침수취약지역에 지속적으로 발생하고 있으며 아래의 Fig. 1에서 살펴보면 2001년, 2010년, 2011년 등의 서울지역 홍수피해는 침수취약지역에 발생하고 있음을 볼 수 있다.

도시내 상습 수해지구(719개소)의 피해원인은 내수침수에 의한 피해가 약 73%(524개소), 외수범람에 의한 피해가 약 27%(195개소)이다. 상습수해지구의 피해원인으로는 저지대, 배수능력부족, 하천수위상승, 하천역류, 하수관거 용량 부족 등 다양한 원인이 존재하는데 침수가 발생하는 원인은 단순히 내수침수, 외수범람으로 구분할 수 없는 지역적인 요인이 작용하고 있다. 최근에는 과거에 발생한 침수피해의 규모를 넘는 집중호우가 발생하고 있어 수해방지에 대한 대비가 필요한 실정이다. 서울을 포함한 우리나라의 도시 지역들은 급격한 도시화로 인한 불투수면적비율의 증가 등의 요인으로 침수 발생가능성 및 그 피해규모가 증가하였다. 침수를 근본적으로 완벽하

게 막을 수 있는 방법은 없으나 그 피해규모를 줄이기 위한 여러 가지 대책이 강구되어 왔다.

기존의 유하시설 용량 증설 및 통수능 확보를 초점으로 하는 기존의 대책은 막대한 예산과 시간을 필요로 할 뿐만 아니라 지구 온난화로 인한 이상기후 및 국지성 집중호우에 완벽하게 대응하기에는 곤란하다. 내배수시설에 대한 구조적인 대책과 더불어 중, 장기적인 대책을 세울 수 있는 비구조적인 대책이 필요하다. 본 연구의 목표인 수방능력을 고려한 침수위험도 결정은 재해연보 및 도시 계획현황에서의 기록을 바탕으로 하여 시, 군, 구 단위의 침수대책 투자 우선순위를 결정하는 것이다. 광역 단체에서 침수사업을 위한 단위지역별 투자 우선순위를 결정할 때 특별한 판단기준이 없으며 과거의 홍수피해를 바탕으로 단기적 침수대책에 머무르고 있는 실정이다. 단위지역별 수방능력을 고려하여 침수대책 수립시 투자 우선순위를 결정하기 위한 기준을 제시하였다.

지역 방재 및 재난 관리를 위한 연구는 지속적으로 진행되었는데 Joo et al. (2000)은 방재형 국토구축 전략에 관해 연구하였고 그 후에도 지속적으로 Kim (2003), Kim (2006), Park (2007) 등이 재난관리를 위한 지역위험도 평가 및 적용, 인적재난에 대한 지역안전도 평가방법, 지역 재난 안전도 평가를 위한 주민의식 평가항목에 대한 연구를 진행해왔다. National Disaster Management Institute (2000, 2004, 2005)는 국토 및 도시계획상의 방재제도 개선에 대한 연구, 재난관리 선진화를 위한 선진국 방재계획제도에 대한 연구를 실시하여 지속적으로 방재제도에 대한 개선 및 보완을 실시하였다. 침수위험에 대한 평가 기법 및 침수위험지표에 대한 연구도 계속되었는데 Choi et al. (2007)은 다기준 의사결정기법을 기반으로 한 침수

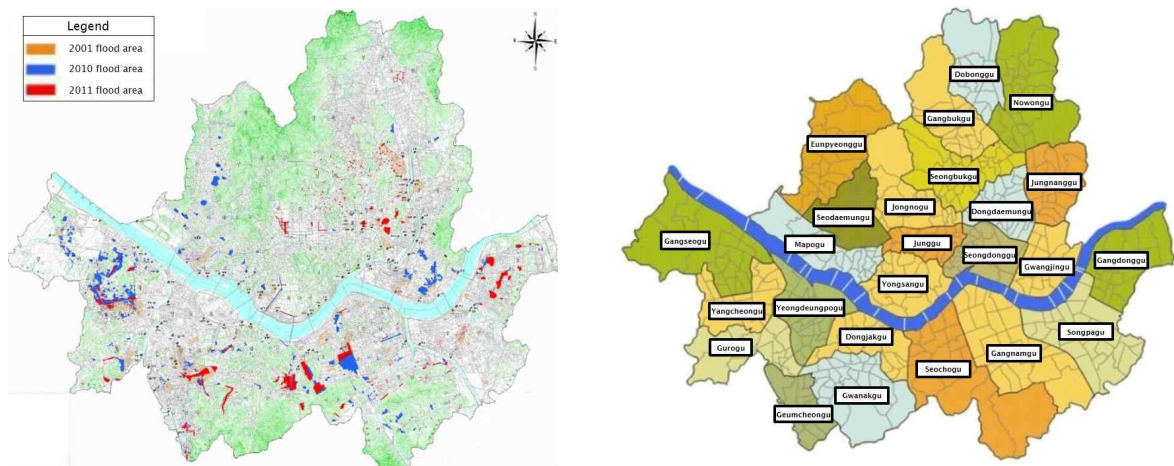


Fig. 1. Flooded Area and Division as Subareas in Seoul

위험 평가기법을 개발하였고 Lee et al. (2007)은 FCM을 이용한 침수위험지표 개발에 관한 연구를 실시하였다. 침수위험지역에 대한 분류 및 설계에 대한 연구도 진행되었는데 Lee et al. (2012)은 도시 침수 위험지역의 피해 저감을 위한 우수관망 최적설계에 대한 방법을 제시하였고 Kim (2012)은 GIS기반 하천수위변화에 따른 침수위험지역을 분류하였다.

국외에서의 방재를 대상으로 한 연구를 살펴보면 홍수 위험 분석에 대한 연구가 진행되었는데 Feng et al.(2008)은 정보 확산 이론을 기반으로 한 홍수 위험 분석을 실시하였고 Nandalal et al. (2011), Ahamd et al. (2011)은 fuzzy 모델, 3차원 퍼지방법을 이용하여 홍수 위험 분석을 실시하였다. 퍼지방법을 이용한 홍수 위험 분석은 계속되었는데 Li et al. (2012)은 다양한 퍼지세트들과 정보 확산을 바탕으로 한 홍수 위험 분석 및 평가에 대해 연구하였다. 최근의 연구로는 홍수 위험을 계산하는 방식에 대한 연구가 계속되었는데 Zhou et al. (2013)은 강우의 홍수 위험과 집중 강우에 대처하는 적응 능력을 통한 도시 침수 모델링 및 정량적 홍수 위험 계산 방식을 제안하였고 Ghanbarpour et al. (2014)은 조건부 가치추정을 이용하여 홍수 위험 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 도시침수를 저감시키기 위한 방안을 수립하기 위한 통계적 연구로 산술평균방법, 기중평균방법, 주성분 분석을 통한 결과를 도출하여 각 지역의 수방능력 및 재해위험을 고려하여 침수위험도를 결정하였다.

2. 적용 이론

2.1 침수위험순위 평가

1985년부터 2013년까지의 재해연보 자료 및 도시계획 현황 등의 자료를 기반으로 하여 침수위험을 재해와 연결시켜 고려하기 위해 서울특별시의 25개 구를 대상으로 30

개의 변수를 선택하였다. 30개의 변수들을 이용하여 산술 평균방법, 기중평균방법, 주성분 분석방법을 이용하여 각각의 순위를 산정하였다. 먼저 산술평균의 경우, 방법은 간단하지만 각각의 변수들이 동일한 가중치를 갖는 단점이 있었으며 기중평균의 경우, 각각의 변수들에 다른 가중치를 주기는 하지만 변수들 간에 높은 상관관계가 존재하는 경우 다중공선성 문제가 발생한다. 본 연구에서는 주성분 분석방법을 적용하여 주성분 변수를 획득하고 이를 설명변수로 사용하여 위와 같은 문제들을 보완하였다.

주성분 분석방법은 여러 개의 변수들을 기존 변수의 개수보다 적은 수의 변수로 묶는 방법이다. 주성분 분석방법에서 유의해야할 점은 상관계수들의 행렬에서 고유치의 값이 1이상이고 설명력이 80% 이상인 주성분을 선택하는 것이다. 주성분 분석의 값이 큰 변수는 원래의 변수의 영향이 크다는 것이므로 이 원리를 바탕으로 하여 주성분 값이 큰 변수를 파악할 수 있다. 주성분 분석을 통해 주성분 점수를 구하는 방법은 아래의 Eq. (1)이 적용된다.

$$y_{rj} = e'_j \frac{(x_r - \mu)}{\sigma} \quad (1)$$

y_{rj} 는 r 번째 개체의 j 번째 주성분 점수를 뜻하며, e'_j 는 j 번째 주성분의 고유벡터를 뜻하며, x_r 는 r 번째 개체의 측정치 벡터를 나타낸다. μ 는 모평균벡터이고, σ 는 모표준편차벡터를 나타낸다. 위의 식에서 계산된 값을 통해서 침수위험순위를 예측할 수 있다. 아래의 Table 1에서는 서울지역의 침수위험 인자의 일부분을 보여주고 있다.

2.2 산술평균방법을 이용한 계산 결과

일반적으로 산술 평균은 모든 데이터를 더해 총 개수로 나누어 구한다고 알려져 있으며 여러 변수들이 어느 값에 치우쳐져있는지, 즉 변수들의 집중경향값을 계산하기 위

Table 1. Part of Flood Risk Factor Analysis in Seoul

		Flood damage (thousand won)	Administrative area (km ²)	Impervious area (km ²)	Average population (people)	Reservoir capacity (m ³)	...
Seoul	Gwanakgu	20,329,088	29.57	11.92	526,259	8,000	...
	Nowongu	13,229,842	35.46	12.84	591,799	4,500	...
	Dobonggu	12,546,760	20.84	10.43	356,520	0	...
	Gangbukgu	9,164,591	23.58	9.39	348,593	0	...
	Seongbukgu	8,980,609	24.55	17.99	462,704	4,400	...
	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

해 사용된다. 대표적으로 1인당 국내총생산(GDP)의 경우 산술평균으로 계산하는 대표적인 지표이다. 총 n개의 변수 x_1 에서 x_n 의 산술평균 \bar{x} 를 구하는 방식은 아래의 Eq. (2)와 같다.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (2)$$

본 연구에서 사용된 변수들의 경우 단위가 다르고 값의 크기 차이가 크기 때문에 변수를 표준화하여 분석하였다. 변수를 표준화하기 위한 계산은 Eq. (3)의 Z_i 값의 계산에 나타내었다. 변수표준화한 변수의 값을 산술평균 (AVG_{area})으로 계산하면 다음의 Eq. (3)와 같고 n값은 변수의 개수에 따라 결정된다.

$$Arithmetic\ average\ score = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + \dots + Z_n}{n}, \quad (3)$$

$$Z_i = \frac{X_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad i = 1, \dots, n$$

n은 총 변수의 개수이므로 30이 되며 이 값을 계산한 뒤 순위를 측정하였다. 평균값이 계산될 때 모든 변수들이 동일한 가중치가 반영되므로, 유사한 피해를 측정하는 변수가 여러 개 있다면 이 부분에서의 값이 높은 지역의 산술평균값이 높게 나오게 된다. 실제 피해액에 영향을 많이 미치는 변수와 그렇지 않은 변수들의 가중치가 같다는 문제점을 안고 있다. 아래의 Table 2에서 보면 실제홍수피해액에 의한 순위와 산술평균점수로 구한 순위가 차이가 나는 것을 볼 수 있다. 이는 앞에서 언급한 산술평균 방법의 문제점 중 하나인 모든 변수들에 동일한 가중치를 주는 문제점 때문인 것으로 파악된다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 실시한 가중평 균을 이용한 분석을 2.3에서 언급하겠다.

2.3 가중평균방법을 이용한 계산 결과

다수의 변수의 평균을 구할 때, 중요도나 영향 정도에

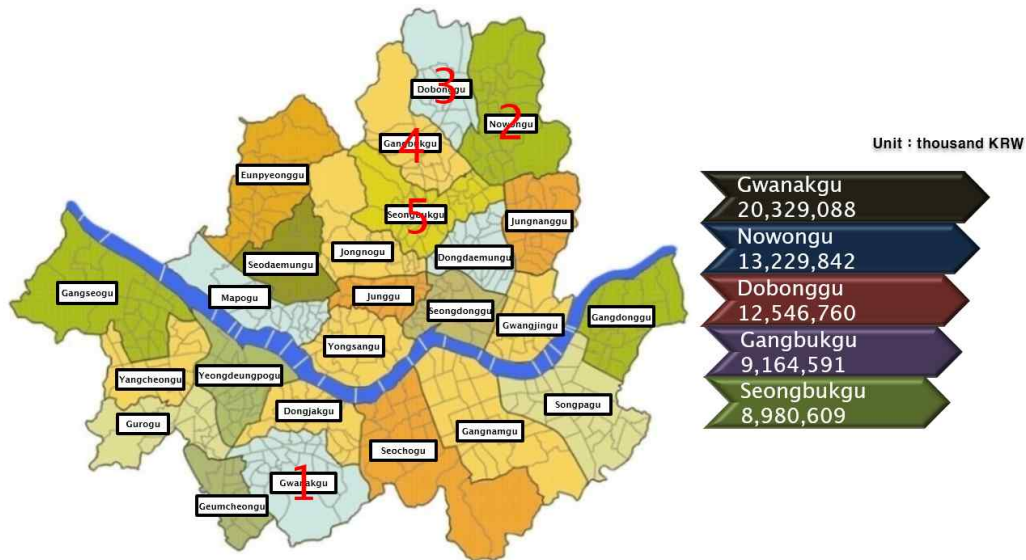


Fig. 2. Graphic Result of Flood Damage Record Based on Annals of Disaster (1985~2013)

Table 2. Flood Risk Assessment by Arithmetic Average Analysis

Rank	Area	Flood damage (thousand won)	Rank	Area	Arithmetic average score
1	Gwanakgu	20,329,088	1	Songpagu	0.105738229
2	Nowongu	13,229,842	2	Gwanakgu	0.064730659
3	Dobonggu	12,546,760	3	Dongdaemungu	0.036077917
4	Gangbukgu	9,164,591	4	Gurogu	-0.019873757
5	Seongbukgu	8,980,609	5	Jungnanggu	-0.040182759
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

따라 가중치를 곱하여 평균값을 구하는 방법을 가중평균 방법이라 한다. 변수에 가중치를 부여할 때, 주관적으로 가중치를 부여한 방법보다 객관적인 방법으로 상관계수가 높은 변수를 그룹화하여 가중치를 설정하였다. 산술 평균에서의 문제점이었던 유사한 능력을 지닌 항목의 중

복계산을 피하기 위하여 상관계수를 통해서 그룹화하였다. 아래의 Table 3은 가중평균방법을 이용한 계산 결과이다.

각 변수들의 상관계수에 따라 그룹화를 시킬 수 있으며 이를 통해 변수를 그룹화하여 가중치를 부여하였다. 각

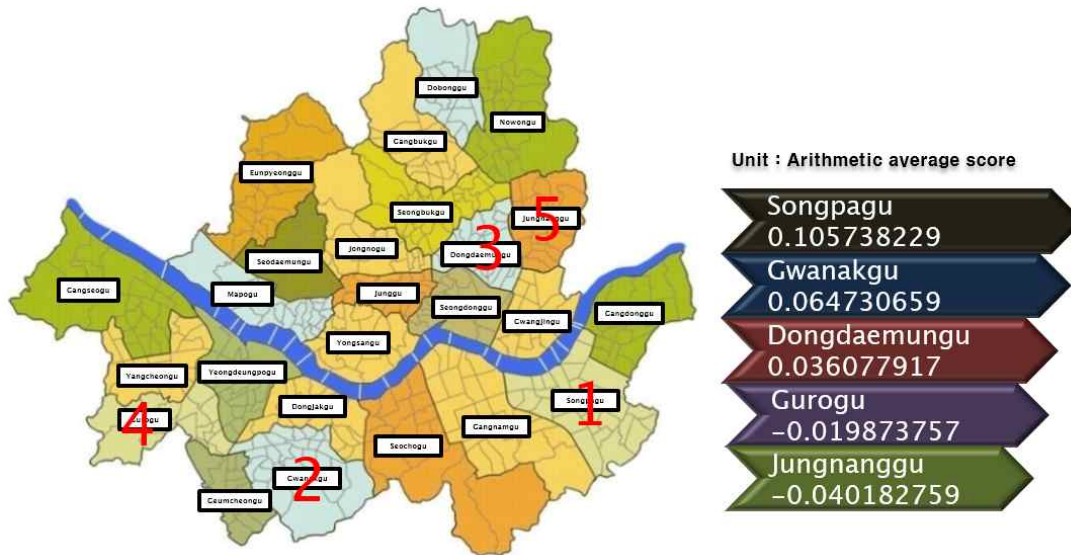


Fig. 3. Graphic Result of Arithmetic Average Analysis

Table 3. Part of Correlation by Weighted Average Analysis

	Flooded area ratio	Impervious area ratio	Personal damage ratio	No. of pump station	Public facilities damage	Flooded building	Road damage	...
Flooded area ratio	1.000	-0.265	0.219	0.507	0.556	0.568	0.418	...
Impervious area ratio	-0.265	1.000	-0.325	0.004	-0.426	-0.182	-0.402	...
Personal damage ratio	0.219	-0.325	1.000	0.108	0.555	0.528	0.523	...
No. of pump station	0.507	0.004	0.108	1.000	0.371	0.531	0.266	...
Public facility damage	0.556	-0.426	0.555	0.371	1.000	0.758	0.887	...
Flooded building	0.568	-0.182	0.528	0.531	0.758	1.000	0.612	...
Road damage	0.418	-0.402	0.523	0.266	0.887	0.612	1.000	...
.
.
.

변수들 간의 상관관계를 고려하여 나머지 인자들과의 상관관계를 고려하여 가장 높은 상관관계를 가지고 있는 것들끼리 뭉쳤다. 아래의 Table 4는 상관계수에 의한 그룹화를 나타내고 있다.

Table 4에서 상관계수가 높은 것들끼리 그룹으로 뭉친 결과를 나타내었다. 상관계수가 높다는 것은 인자의 영향이 중복되어 고려될 수 있다는 것이기 때문에 같은 그룹으로 묶어 중복을 피하였다. 변수를 15개의 그룹으로 분류하여 새로운 그룹이름을 붙였다.

Eq. (4)를 이용하여 가중평균을 구할 수 있다. Table 5에 각 변수들의 가중평균에 의한 순위와 실제 피해액에 의한 순위를 비교한 결과를 보면 가중평균에 의한 순위와 실제 피해액에 의한 순위의 결과가 다른 것을 알 수 있었

다. 이는 측정변수가 너무 많고 변수들 간의 높은 상관계수에 의해 발생하는 다중공선성 때문이라 여겨진다.

Weighted average score =

$$\frac{(\frac{A}{9} + \frac{B}{2} + C + D + E + F + \frac{G}{3} + H + \frac{I}{3} + J + K + L + M + N + O)}{15} \quad (4)$$

다중공선성이란 통계학의 회귀분석에서 독립변수들 간에 강한 상관관계가 나타나는 문제이다. 독립변수들간에 높은 선형관계가 존재하는 다중공선성의 경우 일반적으로 분산팽창요인(Variance Inflation Factor, VIF)을 통한 검사를 실시하게 되는데 이 값이 10을 넘는다면 보통 다중공선성 문제가 있다고 본다. 다중공선성 문제의 해결 방안으로는 독립변수간의 상관이 0.80 이상이면 두 개의

Table 4. Grouping according to the Correlation Coefficient

Group	Variables	Group	Variables
A	Flood damage Public facility damage Road damage Hydraulic facilities damage Stream damage Small stream damage Military facilities damage Personal facilities damage Small facilities damage	F	Average population
		G	Victims Rail damage Flooded building
		H	Death
		I	Injury Personal damage ratio Reservoir capacity
		J	Disappearance
		K	No. of pump station No. of pump Total discharge of pump
		L	Sewage damage
B	Flooded area Flooded area ratio	M	School damage
C	Administrative area	N	Port damage
D	Impervious area	O	Fishing boat damage
E	Impervious area ratio		

Table 5. Flood Risk Assessment by Weighted Average Analysis

Rank	Area	Flood damage (thousand won)	Rank	Area	Weighted average score
1	Gwanakgu	20,329,088	1	Jungnanggu	0.154091
2	Nowongu	13,229,842	2	Songpagu	0.103887
3	Dobonggu	12,546,760	3	Eunpyeonggu	0.073839
4	Gangbukgu	9,164,591	4	Gwanakgu	0.070509
5	Seongbukgu	8,980,609	5	Dongdaemungu	0.050833
.
.
.

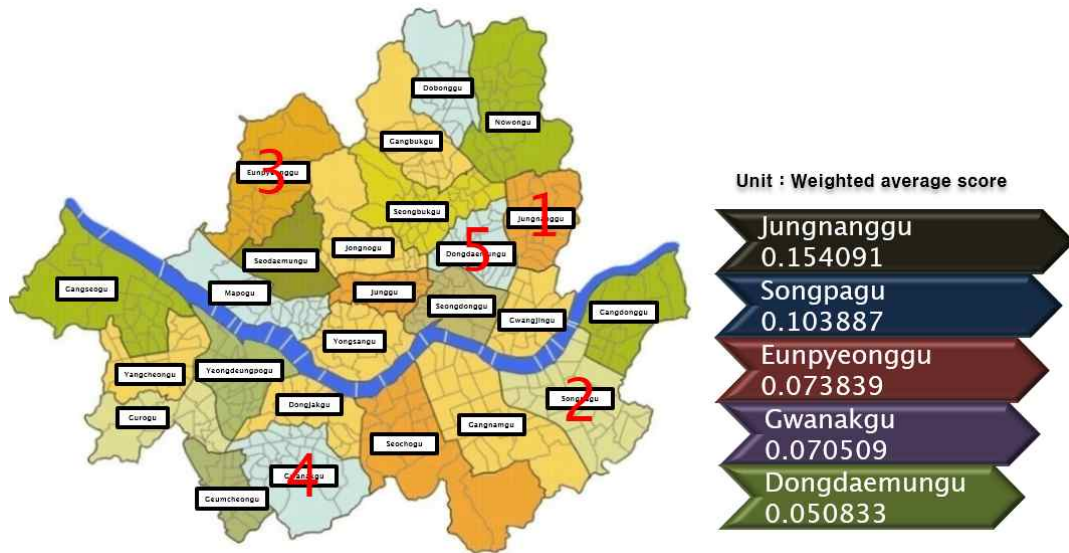


Fig. 4. Graphic Result of Weighted Average Analysis

독립변수를 하나로 묶는 방법과 독립변수가 매우 많을 때 성분분석을 통해 많은 독립변수를 보다 적은 수의 독립변수로 줄이는 방법이 있다. 아래의 Table 6은 분산팽창요인을 통한 다중공선성 진단 결과의 일부이다.

위의 Table 6의 결과를 살펴보면 많은 변수들의 분산팽창요인이 10이상인 것을 볼 수 있다. 이 결과는 변수들 간에 강한 상관관계가 나타나며 다중공선성 문제가 존재함을 보여준다. 다중공선성 문제의 해결대안으로 변수들 간의 상관관계의 크기만으로 변수들을 분류하는 것은 쉽지 않으므로 변수의 수를 정량적으로 축약하는 주성분분석이 필요하다고 여겨지며 2.4에서 활용하도록 하겠다. 아래의 Table 7은 각 변수들의 고유치와 누적설명력을 보여주고 있다.

모든 변수를 이용하여 상관관계의 크기를 분류하는 것은 쉽지 않으므로 이러한 문제를 해결하기 위해서 주성분 분석을 통해 변수를 축약하였다. 주성분 분석을 통해 차수를 줄일 수 있었으며, 일반적으로 고유치 1이상이고 누적 설명력이 80%이상인 주성분을 선택한다. 위의 결과를 바탕으로 30개의 변수를 8개의 변수로 축약하였으며 주성분 변수가 83%의 누적설명력을 가지고 있다.

2.4 주성분 분석방법을 통한 순위측정결과

선택된 주성분 변수에 의해서 고유벡터를 Table 8에 나타냈다. 이 고유벡터를 바탕으로 주성분 변수로 변수 축약을 할 수 있었다.

주성분 $Prin_1$ 은 홍수피해액(Z_1), 침수면적(Z_2), 침수면

Table 6. Results of Multicollinearity Test

	Significant probability	Collinearity Statistics	
		Tolerance	Variance Inflation Factor
Flooded area ratio	0.260	0.033	30.503
Impervious area ratio	0.141	0.363	2.752
Personal damage ratio	0.382	0.088	11.396
No. of pump station	0.953	0.019	51.744
Public facility damage	0.000	0.008	123.436
Flooded building	0.000	0.073	13.648
Road damage	0.478	0.070	14.307
Impervious area	0.115	0.118	8.474
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.

Table 7. Eigen Value and Cumulative Explanation Power of Each Components

Component	Eigen value	Cumulative explanation power	Component	Eigen value	Cumulative explanation power
1	11.847	0.39490	16	0.304	0.96586
2	3.425	0.50906	17	0.218	0.97313
3	2.722	0.59978	18	0.185	0.97929
4	1.879	0.66241	19	0.130	0.98362
5	1.517	0.71297	20	0.118	0.98756
6	1.447	0.76119	21	0.099	0.99085
7	1.172	0.80028	22	0.080	0.99353
8	1.018	0.83420	23	0.064	0.99565
9	0.842	0.86225	24	0.040	0.99698
10	0.634	0.88338	25	0.033	0.99809
11	0.561	0.90209	26	0.024	0.99889
12	0.475	0.91791	27	0.019	0.99951
13	0.403	0.93133	28	0.009	0.99981
14	0.379	0.94397	29	0.006	1.00000
15	0.353	0.95574	30	0.000	1.00000

Table 8. Eigenvectors by Principal Component Analysis

Variables	Prin ₁	Prin ₂	Prin ₃	Prin ₄	Prin ₅	Prin ₆	Prin ₇	Prin ₈
Flood damage(Z_1)	0.965	-0.110	0.112	-0.094	-0.058	0.037	0.083	0.060
Flooded area(Z_2)	0.600	0.292	0.382	-0.377	-0.032	0.052	-0.302	-0.134
Administrative area(Z_3)	0.335	-0.308	0.706	-0.104	-0.046	-0.370	0.160	-0.023
Impervious area(Z_4)	0.680	0.033	0.843	0.016	-0.212	0.218	0.271	-0.143
Flooded area ratio(Z_5)	0.667	0.308	0.064	-0.385	0.060	0.086	-0.299	-0.115
Impervious area ratio(Z_6)	-0.432	0.352	-0.137	0.213	-0.095	0.583	0.062	-0.078
Average population(Z_7)	-0.233	0.313	0.298	0.365	-0.394	-0.318	0.309	-0.152
.
.
.

적비(Z_3), 이재민(Z_8), 사망(Z_9), 공공시설피해(Z_{17}), 건물 침수(Z_{18}), 도로피해(Z_{19}), 상하수도피해(Z_{20}), 학교피해(Z_{21}), 수리시설피해(Z_{22}), 하천피해(Z_{23}), 소하천피해(Z_{24}), 철도피해(Z_{27}), 군시설피해(Z_{28}), 소규모시설피해(Z_{29}), 사유시설피해(Z_{30}) 등의 부하값이 크다. 주성분 $Prin_2$ 은 유수지용량(Z_{13}), 빗물펌프장수(Z_{14}), 펌프대수(Z_{15}), 양수량(Z_{16}) 등의 부하값이 크고 주성분 $Prin_3$ 은 행정구역면적(Z_3), 불투수면적(Z_4) 등의 부하값이 크다. 주성분 $Prin_4$ 은 평균인구(Z_7), 부상(Z_{11}) 등의 부하값이 크고 주성분 $Prin_5$ 은 인명피해율(Z_{12}), 어항피해(Z_{26}) 등의 부하값이 크다. 주성분 $Prin_6$ 은 불투수면적비(Z_6)의 부하값, 주성분

$Prin_7$ 은 실종(Z_{10})의 부하값, 그리고, 주성분 $Prin_8$ 은 항만 피해(Z_{25})의 부하값이 크다.

$$Total_{area} = 0.965Z_1 + 0.600Z_2 + \dots + 0.700Z_{30} \quad (5)$$

축약된 변수를 이용해서 주성분 점수를 획득한 후 이를 통해 순위를 측정하였다.

3. 수방능력을 고려한 침수위험순위

3.1 지역별 빗물펌프장 수방능력

도시침수를 방어하기 위한 내수배제는 각 구별로 10~

30년의 설계빈도로 설치된 빗물펌프장의 역할이 절대적이다. Seoul Metropolitan Government (2009)에서는 각 빗물펌프장의 수방능력을 평가하여 80~90년대 이후 서울시내의 도시개발 등으로 인한 유출계수의 증가 및 연최대강우량의 점차적인 증가추세를 대비하고자 하였다. Table 9에서는 서울시 하수도정비 기본계획에서 평가한 서울시내에 설치된 총 111개소의 빗물펌프장별 수해방지능력의 일부분을 보여주고 있다. 다만 빗물펌프장이 설치되지 않은 구청의 경우 100%로 가정하여 반영하였다.

본 연구에서는 빗물펌프장의 유역면적과 수방능력을 고려한 점수를 계산하기 위해 다음의 Eq. (6)와 같은 방법을 이용하여 계산하였고 점수에 반영할 가중치는 만점으로 가정한 100을 구청별 수방능력으로 나누어 Eq. (7)과 같이 계산하였다.

$$Flood\ control\ ability = \frac{(Area\ of\ A \times ability\ of\ A) + \dots + (Area\ of\ Z \times ability\ of\ Z)}{(Area\ of\ A) + \dots + (Area\ of\ Z)} \quad (6)$$

$$Ability\ factor\ in\ each\ area = \frac{100}{Flood\ control\ ability\ in\ each\ area} \quad (7)$$

Eq. (6)에 의해 구청별 수방능력을 계산한 결과는 아래의 Table 10과 같다.

3.2 도시환경을 고려한 홍수위험 평가

Son et al. (2013)은 기후변화에 대비하기 위한 도시지역의 지해 위험도를 산정하였는데 본 연구에서는 이 결과를 반영하여 주성분점수에 반영하였다. 토양피복도, 도로교통망, 수치지형도(30×30), 하천차수도, 토양배수도, 하천시설 및 환경기초시설 등을 기초자료로 사용하여 각 자료들을 그레이 인프라 인덱스와 그린 인프라 인덱스로 구분하여 산정한 후 이를 결합하여 결과를 산출하였다. 산출된 결과는 위의 Fig. 5와 같다.

위의 Fig. 5에서의 결과는 동별로 산정되었고 GiZSocre의 경우 색인 위쪽에서부터 7에서 1까지의 값을 매겨 변

Table 9. Part of Flood Control Ability according to Pump Stations

Area	Pump station	Area (ha)	Reservoir capacity (m ³)	Design frequency (year)	Current capacity (m ³ /min)	Required capacity (m ³ /min)	Flood control ability (%)
Yongsangu	Yongsan	181	121,000	20	460	652	71
	Wonhyo	80	10,271	20	880	1,148	77
	Hannam	250	35,000	10	1,200	2,345	51
	Simwon	22	510	10	160	325	49
	Bokwang	57	2,520	10	803	637	126
	Dongbinggo	9	620	10	110	101	109
	Seobinggo	2	70	5	46	33	138
	Bingchang	10	340	10	111	128	87
	Hangangno	20	570	10	330	268	123
	Samgakji	50	3,200	10	630	693	91
Moonbae	28	1,750	10	350	390	90	

Table 10. Proper Capacity Ratio of Pump Stations in Seoul

Area	Proper capacity ratio	Area	Proper capacity ratio	Area	Proper capacity ratio	Area	Proper capacity ratio	Area	Proper capacity ratio
Yongsangu	1.372	Seongbukgu	1.160	Gangseogu	1.058	Gwanakgu	1.563	Seodaemungu	1.000
Seongdonggu	0.838	Nowongu	1.111	Gurogu	1.027	Seochogu	1.278	Jongnogu	1.000
Gwangjingu	0.936	Eunpyeonggu	1.163	Geumcheongu	1.091	Gangnamgu	1.000	Junggu	1.000
Dongdaemungu	1.243	Mapogu	1.120	Yeongdeungpogu	1.081	Songpagu	1.009	Gangbukgu	1.000
Jungnanggu	1.191	Yangcheongu	1.101	Dongjakgu	1.137	Gangdonggu	1.204	Dobonggu	1.000

환하였다. 변환되어 구청별 결과를 산정한 방식은 Eq. (8) 과 같고 산정된 결과는 다음의 Table 11에 나타내었다.

$$Risk\ score = \frac{(Risk\ score\ of\ A \times Area\ of\ A) + \dots + (Risk\ score\ of\ Z \times Area\ of\ Z)}{(Area\ of\ A) + \dots + (Area\ of\ Z)} \quad (8)$$

주성분 점수, 구청별 수방능력, 그리고 재해위험을 고려하여 산정된 최종점수는 아래의 Eq. (9)에 따라 산정되었다.

$$Disaster\ score = \frac{PCA\ score + \frac{Flood\ control\ ability \times Risk\ score}{Duration\ of\ data}}{\dots} \quad (9)$$

Table 12에 있는 실제 침수피해액과 수방능력 및 재해 위험을 고려한 주성분분석 점수를 비교하여 보면 이전의 산술평균, 기중평균에 의한 결과보다 좀 더 일치함을 볼 수 있다. 다만 인명피해가 고려되지 않은 점과 강우에 의한 영향이 구별로 다른 점은 결과가 완벽하게 일치하지 않는 이유로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 침수위험순위에 영향을 미치는 변수를 사용하여 산술평균, 기중평균, 수방능력 및 재해위험을 고려한 주성분 분석을 실시하였다. 먼저, 변수의 측정단위가

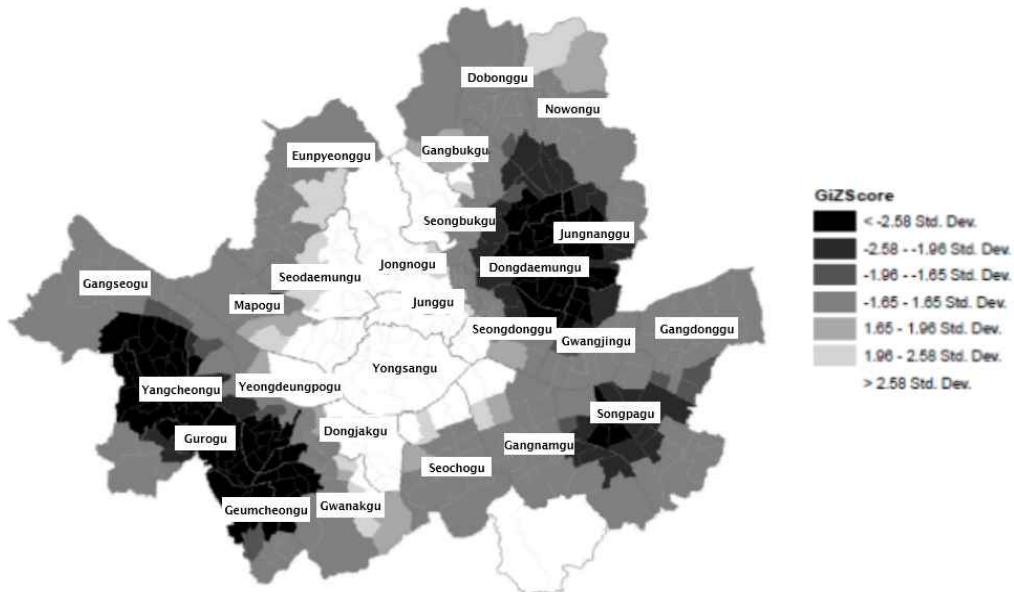


Fig. 5. Graphic Result of Urban Environmental Risk in Seoul (Park, 2013)

Table 11. Urban Environment Risk Score in Seoul

Area	Urban environment risk score	Area	Urban environment risk score	Area	Urban environment risk score	Area	Urban environment risk score	Area	Urban environment risk score
Yongsangu	1.000	Seongbukgu	1.554	Gangseogu	2.204	Gwanakgu	2.093	Seodaemungu	1.118
Seongdonggu	1.754	Nowongu	1.696	Gurogu	3.177	Seochogu	1.609	Jongnogu	1.037
Gwangjingu	2.314	Eunpyeonggu	1.616	Geumcheongu	3.297	Gangnamgu	1.645	Junggu	1.050
Dongdaemungu	6.287	Mapogu	1.398	Yeongdeungpogu	1.674	Songpagu	2.449	Gangbukgu	1.639
Jungnangu	3.356	Yangcheongu	4.911	Dongjakgu	1.202	Gangdonggu	1.795	Dobonggu	1.764

Table 12. Flood Risk Assessment Considering Flood Control Ability and Urban Environment Risk

Rank	Area	Flood damage (thousand won)	Rank	Area	PCA score considering flood control ability and urban environment risk
1	Gwanakgu	20,329,088	1	Gwanakgu	1.112754
2	Nowongu	13,229,842	2	Ganbukgu	1.020408
3	Dobonggu	12,546,760	3	Nowongu	0.873565
4	Gangbukgu	9,164,591	4	Dobonggu	0.846411
5	Seongbukgu	8,980,609	5	Jungnanggu	0.825036
.
.
.

다르기 때문에 변수를 표준화하여 산술평균을 구하고 순위비교를 실시하였다. 그 다음, 변수의 상관관계를 이용하여 몇 개의 그룹으로 나눈 뒤, 가중평균을 구하고 비교하였다. 산술평균의 경우, 유사한 항목이 많아서 동일한 가중치를 부여한 것에 문제가 발생하였고, 가중평균의 경우, 많은 변수에 의한 다중공선성 문제가 발생하여 주성분 분석을 실시하였다. 주성분 분석을 통해 변수를 축약하고 수방능력을 고려하기 위하여 서울시 빗물펌프장별 수방능력을 환산하여 고려하였으며 재해위험을 고려하기 위해 Son et al.(2013)이 제안한 서울시 도시환경의 홍수 위험도 평가 결과를 반영하여 최종점수를 산정하였다.

본 연구의 결과는 광역단체에서 침수위험 순위를 예측하고 이를 통해 치수사업의 우선순위를 결정하는데 큰 도움이 될 것으로 보인다. 하지만 본 연구에서 실시하지 못한 몇 가지 추가적인 연구들이 검토된다면 실무에 적용할 수 있는 연구가 될 것이다. 추후 재해연보 등에서 보이는 한정된 자료뿐만 아니라 유역별 유동인구수 및 이에 따른 차량대수 등의 자료를 이용하여 침수위험을 계산하면 보다 세밀한 분석이 이루어질 수 있을 것이다. 또한 내수침수와 외수범람의 영향을 위험도로 정량화하여 계산하고 내수침수의 주요 원인으로 판단되고 있는 각 구청별 우수관거의 통수능력 및 역구배에 따른 침수위험 등이 고려된다면 보다 정량적인 침수위험에 대한 판단이 가능할 것으로 생각된다. 추가적으로 현재 이루어지고 있는 지형정보에 대한 자세한 내용을 강우-유출 모형을 통해 검토하고 각 내배수시설의 안전도 판단 및 이를 바탕으로 하는 구청별 빗물펌프장, 빗물저류조 등의 내배수시설 안전도에 대한 내용이 검토된다면 시, 군, 구청에 설치하여 사용할 수 있는 실무적인 프로그램으로써의 개발도 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원 (13 AWMP-B066744-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Ahmad, S.S., and Simonovic, S.P. (2011). "A three imensional fuzzy methodology for flood risk analysis." *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 4, No. 1, pp. 3-74.

Choi, S.W., Jun, H.D., and Park, M.J. (2007). Development of an Inundation Risk Evaluation Method Based on a Multi Criteria Decision Making, *Korean Society of Civil Engineers Conference*.

Dong, X., Zeng, S., Chen, J., and Zhao, D. (2008). "An integrated assessment method of urban drainage system: A case study in Shenzhen City, China." *Frontiers of Environmental Science & Engineering in China*, Vol. 2, No. 2, pp. 150-156.

Ellis, J.B., and Marsalek, J. (1996). Overview of urban drainage: environmental impacts and concerns, means of mitigation and implementation policies. *International Association for Hydraulic Research*, Vol. 34, No. 6, pp. 723-732.

Feng, L., and Luo, G. (2008). "Flood Risk Analysis Based on Information Diffusion Theory." *Human and Ecological Risk Assessment : An International Journal*, Vol. 14, No. 6, pp. 1330-1337.

Ghanbarpour, M.R., Saravi, M.M., and Salimi, S. (2014).

- “Floodplain Inundation Analysis Combined with Contingent Valuation: Implications for Sustainable Flood Risk Management.” *Water Resources Management*, Vol. 28, No. 9, pp. 2491–2505.
- Hung, H.V., Shaw, R., and Kobayashi, M. (2010). “Flood risk management for the riverside urban areas of Hanoi: The need for synergy in urban development and risk management policies.” *Disaster Prevention and Management*, Vol. 19, Iss: 1, pp. 103–118.
- Joo S.J., Yang J.C., Yoon H.C., Kim C.H., Choi Y.H., and Jung I.S. (2000). *National Territorial Development Strategies for Disaster Prevention*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong.
- Kim, H.J. (2003). *A Study on the Regional Vulnerability Assessment and its Application for the Disaster Management*, National Disaster Management Institute, Seoul.
- Kim, W.G. (2006). *Development of Regional Risk Evaluation Method on Man-made Disaster*, National Disaster Management Institute, Seoul.
- Kim, Y.H. (2012). *GIS-based potential flood area analysis on water-level change in the river*, master’s thesis, Kyungpook national university, Korea.
- Lee, J.H., Ryu, S.H., and Song, Y.H. (2012). An Optimal Sewer Network Design to Reduce the Damage for Urban Inundation Risk Area, *Korea Water Resources Association Conference*.
- Lee, W.W., Jun, H.D., Lee, J.H., and Kim, J.H. (2007). A Development of Inundation Risk Index using Fuzzy C-Means algorithm, *Korean Society of Civil Engineers Conference*.
- Li, Q., Zhou, J., Liu, D., and Jiang, X. (2012). “Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion.” *Safety Science*, Vol. 50, No. 5, pp. 1275–1283.
- National Disaster Management Institute (2000). *A Study on the Improvement of Disaster Mitigation Institution in Urban and Regional Planning*, Ministry of Security and Public Administration, Seoul.
- National Disaster Management Institute (2004). *A Study on the Disaster Prevention and Safety Plan in the Urban Planning*, National Disaster Management Institute, Seoul.
- National Disaster Management Institute (2005). *A Study on the Disaster Prevention Planning System of Advanced countries for the advancement of Disaster Management Planning*, National Disaster Management Institute, Seoul.
- Nandalal, H.K., and Ratnayake, U.R. (2011). “Flood risk analysis using fuzzy models.” *Journal of Flood Risk Management*, Vol. 4, No. 2, pp.128–139.
- Park, B.C. (2007). *Development of Residents’ Recognition Level Evaluation Items to Rate The Level of Safety on The Occurrence of Disaster*, National Disaster Management Institute, Seoul.
- Seoul Metropolitan Government (2009). *Seoul river maintenance master plan*, Seoul Metropolitan Government, Seoul.
- Son, M.S., Park, J.Y., and Kim, H.S. (2013). “Urban Environment Risk-Evaluating Flooding Risk Indices of Seoul.” *Journal of Seoul Institute*, Vol. 14, No. 4, pp. 127–140.
- Zhou, Q., Panduro, T.E., Thorsen, B.J., and Arbjerg-Nielsen, K. (2013). “Adaption to Extreme Rainfall with Open Urban Drainage System: An Integrated Hydrological Cost-Benefit Analysis.” *Environmental Management*, Vol. 51, No. 3, pp. 586–601.

paper number : 14-088

Received : 15 September 2014

Revised : 24 May 2015 / 29 July 2015

Accepted : 29 July 2015