

기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인 도출*

김보경**, 장대원***, 장 남, 양동민

2001년 서울 집중호우를 계기로 게릴라성 폭우라는 용어가 등장한 후, 국지적, 단기적, 돌발적인 특성을 지닌 강우의 발생빈도가 매우 높아지고 있다. 특히 도시의 경우 강우에 의한 유출의 부담을 하천이 아닌 도시 배수관망이 부담함으로써 강우패턴의 변화에 따른 그 피해의 규모가 커지고 있다. 일반적으로 도시홍수의 피해는 강우의 증가와 도시화에 따른 유출율의 변화로 규명하고 있으나 피해를 발생시키는 유발요소와 실제 발생한 피해액과의 관계에서는 상이한 점이 나타난다. 본 연구에서는 이런 전제하에 도시홍수 피해와 관련 있는 항목들로 사회, 경제, 인문, 시설물, 기상학적 측면을 고려하여 24개의 요소를 선정하여 기후변화에 따른 도시홍수위험을 전반적으로 규명하고자 하였다. 도시홍수 피해액과의 상관분석을 수행하고, 최종 선정된 10개 항목들을 대상으로 요인분석을 실시하였다. 분석결과, 강우, 인문-사회, 경제, 홍수피해부문으로 4개의 요인이 추출되었으며 설명력은 67.79%였다. 이를 검토한 결과 도시홍수피해 유발요인인 강우, 피해를 가중시키는 요인인 인문-사회, 경제적 측면, 그리고 피해결과에 해당하는 침수면적이 도시홍수발생의 유의한 열개임을 확인할 수 있었다.

주제어: 도시홍수, 기후변화, 위험관리, 요인분석, 취약성

1. 서론

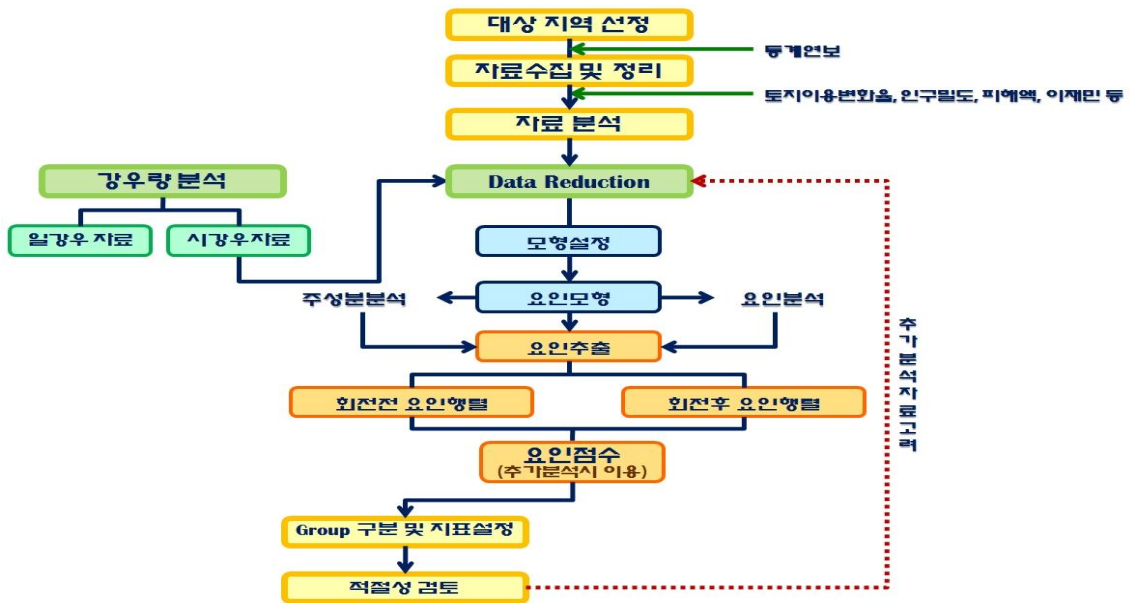
최근 짧은 시간에 강우가 집중되거나 집중호우 일수가 증가하고 국지성, 돌발성 특성을 지닌 강우가 증가하며 도시지역에 많은 피해가 발생하고 있다. 일반적으로 강우량 증가 또는 도시화를 피해 증가원인으로 언급하나 강우, 도시화 외에 피해경험유무, 피해복구사업의 정도, 인문 사회적 특성 등 지역별 특성이나 방재시설존재 여부에 따라 피해에 영향을 미칠 수 있다. 최근 3년내 발생한 대표적인 피해 사례로 2008년 7월 경북 봉화군, 2009년 7월 부산지역 일대와 2010년 9월 서울시에 발생한 집중호우로 인한 피해를 들 수 있는데, 이들은 각각 산악지형, 도시화와 해안지역 특성 등 “강우”라는 외력요소 외에 지역적·지형학적 특성에 대한 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 특히, 도시지역은 도시화에

* 본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술사업단의 「도시홍수 위험성 평가 및 통합관리방안 개발」 용역을 수행하면서 얻은 성과임.

** 제1저자, *** 교신저자

따라 평균강수량이 증가하거나(Shepherd, 2006) 강수일수가 증가하는(Changnon, 1969) 등 비도시화지역과 비교하여 수문기상학적으로 많은 차이를 보이며(임창수, 2010) 인구나 산업이 집중되고 도시 개발에 따른 토지이용상 불투수 면적 증가와 지하상가, 지하철, 반지하 주택 등 지하공간 활용 증대 등 도시화로 인하여 이재민과 침수면적당 재산피해액이 급증하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 피해를 일으키는 외력과 피해를 가중시키는 내적인 요소(예를 들어, 불투수율 증가, 인구 및 산업 집중화, 지하공간 활용 증대, 방재시설 용량 부족)에 대한 연구 및 접근이 필요하다고 볼 수 있다.

최충익(2004)은 경기지역을 대상으로 도시화에 따른 수해 취약성을 분석하였다. 이 연구에서는 3개의 가설을 설정하고 1971년부터 2002년까지 총 32년 패널데이터를 정리, 분석하여 도시화가 자연재해를 증가시키는 요인이 되었음을 확인하였고, 장대원(2010)은 1990년부터 2007년까지 우리나라 강우량과 피해액을 분석하여 1990년대와 2000년대를 분석한 결과, 최대 강우강도 및 일최대강우량의 증가폭보다 동기간에 대한 평균피해액도 증의 증가폭이 훨씬 크게 나타나 “강우”라는 외적요소보다 도시화, 산업화, 집중화와 같은 사회적 변화가 피해 규모에 더 영향을 미친다고 하였다. 이는 일반적으로 불투수율 증가로 인한 도시화의 영향으로 설명할 수 있으나 도시화의 어떤 요소들이 피해규모를 증가시키는 것인지를 명확히 설명하기에는 무리가 있다. 이는 기상수문학적인 자연적 요소와 인간, 사회·경제적 환경이라는 인문적 요소, 토지이용이나 사회기반시설과 같은 물리적 요소, 정부의 정책으로 대표되는 방재적 요소가 복합적인 상호작용을 이루면서 만들어지는 현상으로 볼 수 있기 때문이다(최충익, 2004).



<그림 1> 연구 흐름도

현재, 국외에서는 위험(Risk)을 평가하기 위하여 위험성(hazard), 취약성(vulnerability)과 노출성(exposure)을 종합적으로 고려하는 추세이다. 세계기상기구(WMO, World Meteorological Organization, 2006)에서는 홍수관리를 위한 프로그램으로 APFM(Associated Program on Flood Management)을 통해서 통합홍수관리 가이드라인과 홍수관리를 위한 정책 수립에 필요한 다양한 지침서를 발간하고 있으며 도시홍수위험관리에 대한 가이드라인을 포함하고 있다. 또한, UN의 ISDR(2002) 보고서에서도 위험(Risk)을 평가하기 위해서는 위험성과 취약성을 그 지역의 방재역량과 연계하여 평가해야 한다고 제시하고 있다. 이러한 최근 연구동향에 따라 본 연구에서는 도시홍수의 발생 및 피해와 관련이 있고 피해를 가중시키는 인자들을 추출하여 도시화에 따른 도시홍수 위험요인을 도출하였다. 이를 위하여 과거 강우량자료를 이용하여 우리나라 강우량에 대한 변동성 및 경향성을 분석하였으며 지역별 특성에 따라 도시지역에서 홍수피해를 유발하거나 가중시키는 직·간접적 요소들을 추출하고 분석하였으며 연구흐름은 <그림 1>과 같다.

II. 도시의 기후변화 영향성 분석 및 도시홍수 위험요인 도출

1. 관측자료를 이용한 강우량의 변동성 및 경향성 분석

최근에는 언론매체를 통해서 “강우패턴 변화”에 대한 연구나 각종 분석 자료, 기사를 자주 접할 수 있다. 최근 몇 년동안 짧은 시간에 강우가 집중되거나 국지성 집중호우 특성에 따라 장마기 강우량보다 7월보다 8월 강우량이 증가하고 집중호우 일수도 증가하고 있다는 내용이다. 그리고 이러한 패턴이나 특성 변화를 설명하기 위하여 연강우량, 연강우일수, 강우강도 등에 대한 양상을 제시한다. 그러나 무엇보다도 주목해야 할 것은 단순히 강우량의 증가나 강우일수의 증감에 따른 강우패턴의 변화가 아니라 과거에는 발생하지 않았던 비정상적인 기후 즉, 극한 기상사상들의 출현과 그 빈도이다. 특히, 자연유역과 달리 도시유역은 불투수율이 높아 짧은 시간에 강우가 집중되는 경우 큰 피해를 유발할 수 있다. 본 연구에서는 최근 빈번하게 발생하는 극한 기상으로 인한 강우량의 영향을 분석하기 위하여 기존 분석자료로 이용되었던 연단위(yearly)나 연평균 자료 대신 일자료(daily)와 시자료(hourly)로부터 극한기상의 발생빈도와 경향성을 분석하였다.

1) 일강우량을 이용한 극한강우사상의 변동성 및 경향성 분석

(1) 극한지수(extreme indices) 설정

비정상적인 기후가 요인이 되는 극한기상사상이란, 예측되지 않는 이례적인 현상으로 과거 30년 동안 관측된 적이 없는 기상현상을 의미하며 일정한 주기나 패턴을 보이지 않는 것이 특징이다. 본 연

구에서는 국내 극한기상현상을 분석하기 위하여 일단위(daily) 강우자료에 대한 변화양상을 객관적으로 평가하고 이를 정량화하고자 하였으며 유럽연합의 STADEX 프로젝트(2005)에서 제시한 극한지수를 참고하였다. 이 프로젝트에서는 강우와 온도와 관련한 극한지수를 총 10개 항목으로 구성하고 있으며 건설교통부(2008)에서 이 지수를 바탕으로 극한기상사상을 분석한 사례가 있다. 본 연구에서는 이 중 강우에 대한 6개 지수에 대한 분석을 실시하였으며 각 항목은 <표 1>과 같다.

각 지수들에 대하여 간략히 설명하면 다음과 같다. 집중호우 한계점이란, 강우가 발생한 날에서 90%에 해당하는 양을 의미하는 것으로 강우가 발생한 날들을 큰 순서대로 배열하였을 때 90%까지 포함되는 양으로 설명할 수 있다. 지속기간 5일 최대 강수량은 최대 5일 동안의 총 강수량으로 강우가 5일 이상 지속되었을 때 발생된 강수량을 의미한다. 강우강도는 강우량이 발생한 날에 얼마만큼의 강우가 발생하였는지를 검토하는 항목으로 과거에 비하여 강우량의 증가를 상대적으로 평가할 수 있다. 최대건조 지속기간은 습윤 지속 기간과는 반대되는 개념으로 과거 자료에서 강우가 발생하지 않은 최대 일수(day)를 고려하여 강우빈도의 변화를 평가할 수 있다(Pancura과 Lines, 2005). 집중호우 한계점 이상 강수량 비율은 강우가 발생한 날들 중 집중호우 한계점을 초과하는 강우의 출현 비율로 설명할 수 있다. 따라서 이 지수의 경향성이 큰 값을 가질수록 해당 관측소에는 과거 경험하지 못했던 강우 출현이 잦아짐을 의미한다. 마지막으로 집중호우 한계점 이상 발생빈도는 각 관측소마다 보유한 자료 기간에 대하여 집중호우 한계점을 정의하고 이 비율을 분석한 후 실제로 집중호우 한계점 이상으로 발생되었던 일수를 이용하여 경향성을 분석하게 된다. 각 지수에 대한 보다 자세한 설명은 건설교통부(2008)를 참고할 수 있다.

<표 1> 강우관련 극한지수

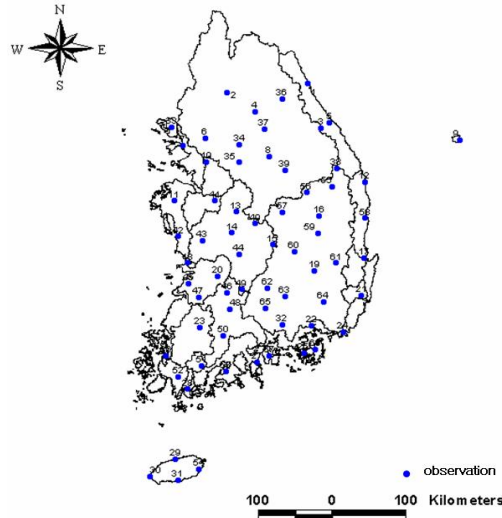
항 목	설 명	단 위
집중호우 한계점	강우 발생일의 90%의 양(mm/day)	mm
지속기간 5일 최대 강수량	최대 5일 총강수량(mm)	mm
강우강도	단일 강우강도(강우발생일의 강수량)	mm/day
최대건조 지속기간	연속 무강우의 일의 최대 일수	일
집중호우 한계점 이상 강수량 비율	발생한 사상의 총 강수량의 비율>장기간 90%	%
집중호우 한계점 이상 발생빈도	다수의 사상>장기간 강우 발생일의 90%	회

(2) 극한지수를 이용한 경향성 분석

① 자료 수집 및 관측소 현황

본 연구에서는 이미 여러 연구 결과에서 나타난 것과 같이 최근 몇 년 사이에 전 세계적으로 기후가 변화하고 있다는 사실에 중점을 두고 우리나라 전국을 대상으로 강우에 대한 극한사상을 분석하고자 하였다. 이를 위하여 기상청 산하 총 66개 관측소(<그림 2>와 <표 2>)의 관측소별 자료 보유기간에 따라 2008년까지 과거 일(daily)단위 강우자료를 수집하였으며 이 때, 자료의 정확성을 고려하여 1961년 이후 자료를 이용하였다. 분석기간은 관측소에 따라 최소 21년에서 최대 48년이며 1988년부터

관측이 개시된 철원, 고산, 장수와 봉화 지점의 4개 관측소를 제외하고 2008년까지 대체적으로 30년 이상의 자료를 보유하고 있다.



<그림 2> 기상청 산하 66개 관측소 위치

<표 2> 관측소별 분석기간

No.	관측소	분석기간	No.	관측소	분석기간	No.	관측소	분석기간	No.	관측소	분석기간
1	속초	1968	18	군산	1968	35	이천	1973	52	해남	1973
2	철원	1988	19	대구	1961	36	인제	1973	53	고흥	1973
3	대관령	1972	20	전주	1961	37	홍천	1973	54	성산포	1973
4	춘천	1966	21	울산	1961	38	태백	1986	55	봉화	1988
5	강릉	1961	22	마산	1986	39	제천	1973	56	영주	1973
6	서울	1961	23	광주	1961	40	보은	1973	57	문경	1973
7	인천	1961	24	부산	1961	41	천안	1973	58	영덕	1973
8	원주	1973	25	통영	1968	42	보령	1973	59	의성	1973
9	울릉도	1961	26	목포	1961	43	부여	1973	60	구미	1973
10	수원	1964	27	여수	1961	44	금산	1973	61	영천	1973
11	서산	1968	28	완도	1973	45	부안	1973	62	거창	1973
12	울진	1972	29	제주	1961	46	임실	1973	63	합천	1973
13	청주	1967	30	고산	1988	47	정읍	1973	64	산청	1973
14	대전	1969	31	서귀포	1961	48	남원	1973	65	거제	1973
15	추풍령	1979	32	진주	1970	49	장수	1988	66	남해	1973
16	안동	1983	33	강화	1973	50	순천	1973			
17	포항	1949	34	양평	1973	51	장흥	1973			

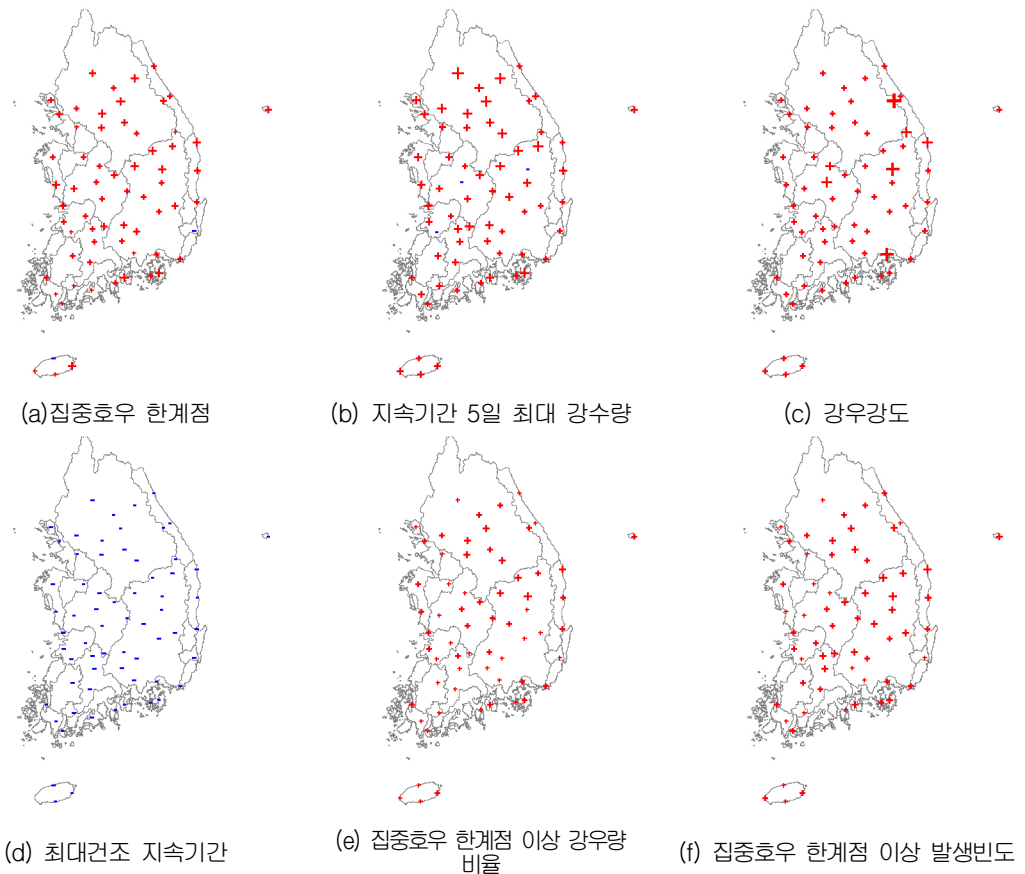
주) 각 관측소의 분석기간은 ~2008년

② 강우극한사상의 시공간적 변화 분석

우리나라에 위치한 기상청 산하 66개 관측소에 대하여 <표 1>에서 정의한 강우관련 극한지수를 분석하고 과거부터 최근까지 관측소별 발생한 강우의 경향성을 상대적으로 평가하기 위하여 강우관련

극한 지수를 도시하였다. 이 분석 결과를 통해 단순히 ‘어떤 지역에 비가 많이 왔다’는 것과 다른 지역과 비교하였을 때 상대적 평가가 가능할 것으로 판단된다. 이 때, 분석한 지수값들은 경향성 증감에 따라 각각 “+”와 “-” 기호로 표현하며 기호의 크기가 클수록 다른 관측 지점에 비하여 상대적으로 그 증가 정도가 두드러지는 것으로 평가한다. 분석 결과는 <그림 3>과 같으며 각 지수들은 계절과 지역에 따라 차이를 보였다. 단, 본 연구에서는 여름철(6월 ~ 8월)에 대한 결과를 제시하였다.

집중호우 한계점의 경우, 철원, 인천과 서울 등 중부 내륙지방을 중심으로 경향성이 크게 나타났고 지속기간 5일 최대 강수량과 비슷한 결과를 보였다. 이 지수는 특히, 철원을 포함하여 우리나라 내륙 전반과 남해안 부근에 위치한 해남이나 고흥 등의 관측소까지 증가하는 성향이 큰 것으로 분석되었다. 최대건조 지속기간은 과거 자료에서 강우가 발생하지 않은 최대 일수(day)를 고려하여 강우 빈도의 변화를 평가할 수 있는 지수(Pancura와 Lines, 2005)로 다른 지수와는 달리 전체적으로 감소하는 것으로 나타났다. 집중호우 한계점 이상 강우량 비율과 발생빈도의 증가 경향성은 우리나라 전반에 걸쳐 나타나는 것을 확인할 수 있었다.



<그림 3> 강우관련 극한지수 적용 결과

<표 3>에는 기상청 산하 66개 관측소에 대한 강우관련 극한지수의 연도별 분석 결과를 평균하고 이를 서울, 부산과 대전 관측소의 결과와 비교하였다. 결과에 따르면 서울과 부산이 각각 62.61mm와 62.28mm로 유사하게 나타났고 상대적으로 대전이 다소 작은 값을 보였으나 평균보다는 더 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 지속기간 5일 최대강수량은 서울이 평균보다 약 50mm 이상인 259.76mm로 나타나는 등 대체적으로 서울, 부산과 대전에서 평균보다 더 큰 결과를 보이는 것으로 분석되었다. 그러나 최대건조 지속기간에서는 부산을 제외한 서울과 대전이 평균보다 다소 작은 값을 보였고 집중호우 한계점 이상 강수량 비율과 발생빈도에서는 부산이 평균보다 작은 값을 보여 차이를 보였다. 그러나 집중호우 한계점과 지속기간 5일 최대강수량 지수를 통해서 강우가 집중되는 정도와 지속기간에 따른 강우가 대전보다는 서울과 부산에서 상대적으로 더 크게 나타나는 경향이 있는 것으로 해석할 수 있다.

<표 3> 서울, 부산과 대전의 강우관련 극한지수 적용 결과

구분	평균	서울	부산	대전
집중호우 한계점	53.10	62.61	62.28	56.85
지속기간 5일 최대 강수량	204.59	259.76	215.32	212.56
강우강도	22.61	25.65	24.94	23.11
최대건조 지속기간	12.94	11.63	15.17	11.55
집중호우 한계점 이상 강수량 비율	0.37	0.38	0.35	0.39
집중호우 한계점 이상 발생빈도	3.00	3.20	2.80	3.30

2) 시강우량을 이용한 강우량의 변동성 분석

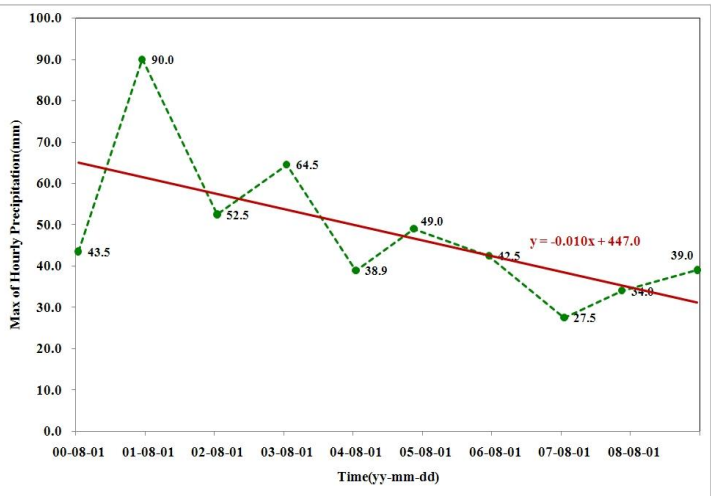
도시홍수는 도시의 건물, 도로, 주차장 등 불투수 지역이 증가하여 침투홍수량이 증가하고 도달시간이 단축되는 특성을 갖고 있으며 이는 도시내수배제 불량으로 인한 주택지, 상가나 공장 등의 침수피해의 주요 원인이 된다. 따라서 도시홍수 고려시에는 1일 강수량보다는 내부수시설 설계에 이용되는 짧은 지속기간에 강우가 집중되는 현상에 관심을 가질 필요가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 서울과 부산에 위치한 서울과 부산 기상관측소를 대상으로 최근 10년간(2000년 ~ 2009년) 시간당 최대강수량과 강우강도 30mm/hr, 50mm/hr 이상 발생횟수를 각각 분석하였다.

(1) 서울 관측소

서울관측소의 최근 10년간(2000년 ~ 2009년) 시(hourly)강우자료를 분석한 결과, 시간당 최대강수량은 2001년 90.0mm, 2003년 64.5mm, 2002년 52.5mm로 2001년에서 2003년까지 50mm 이상이었던 것으로 나타났다. 또한, 추세선 도식 결과, 서울관측소의 시간당최대강우량은 <그림 4>에 나타난 것과 같이 감소하는 경향을 보였고 시간당 강우량에 대하여 30mm 이상과 50mm 이상 발생횟수도 <그림

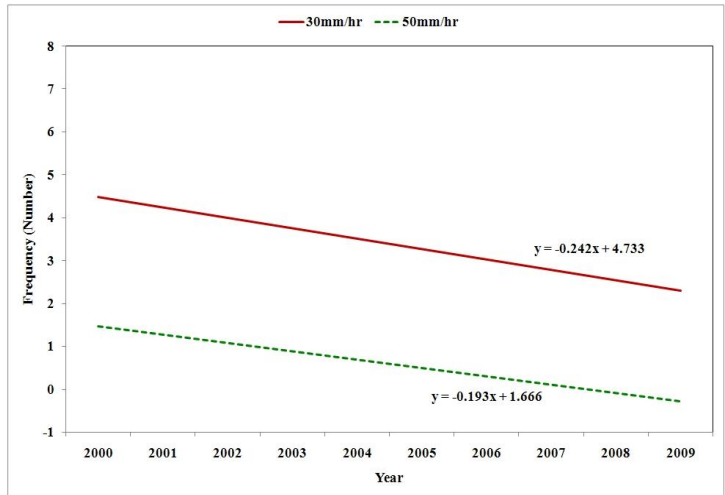
5>와 같이 감소하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다.

yyyy-mm-dd	시간당 최대강우량
2000-08-28	43.5
2001-07-15	90.0
2002-08-07	52.5
2003-08-24	64.5
2004-08-04	38.9
2005-06-26	49.0
2006-07-12	42.5
2007-08-04	27.5
2008-06-02	34.0
2009-07-09	39.0



<그림 4> 서울 관측소의 최근 10년간 연도별 시간당 최대 강우량

년도	30mm/hr 이상 발생횟수	50mm/hr 이상 발생횟수
2000	2	0
2001	6	3
2002	5	1
2003	5	2
2004	2	0
2005	3	0
2006	6	0
2007	0	0
2008	2	0
2009	3	0
SUM	31	6



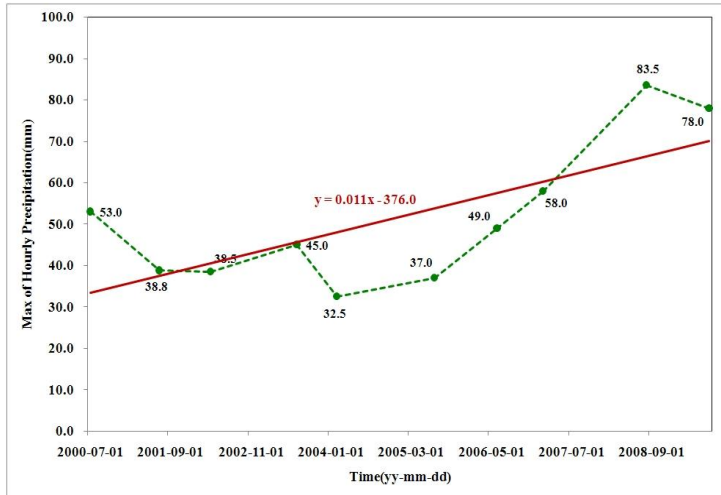
<그림 5> 서울 관측소의 최근 10년간 시간당 300mm 이상과 50mm 이상 발생 횟수

(2) 부산 관측소

부산 관측소의 최근 10년간(2000 ~ 2009) 시(hourly)강우자료를 분석한 결과, 시간당 최대강우량은 2002년 52.5mm로 2008년과 2009년에 각각 83.5mm와 78.0mm로 가장 크게 나타났고, <그림 6>과 같이 추세선을 도식한 결과, 시간당 최대강우량이 증가하는 경향을 보이는 것으로 분석되었다. 시간당 강우량에 대하여 30mm 이상과 50mm 이상 발생횟수의 경우, <그림 7과> 같이 최근 점차 증가하는 경

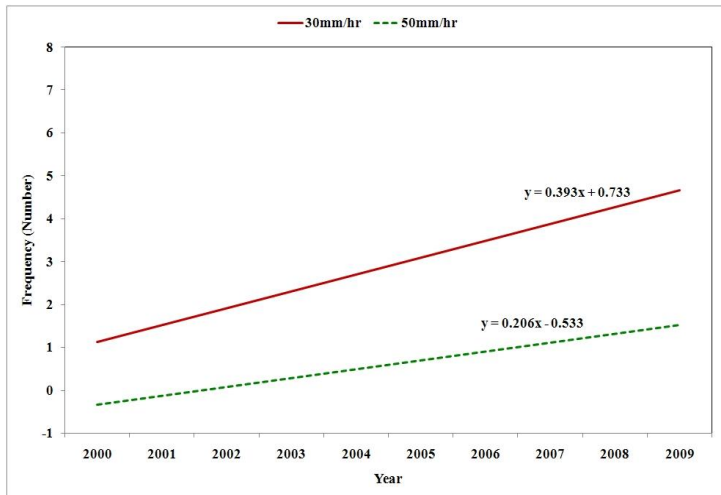
향을 보이는 것으로 나타났고 특히, 300mm/hr 이상 발생빈도가 잦아지는 것을 확인할 수 있었다.

yyyy-mm-dd	시간당 최대강우량
2000-07-14	53.0
2001-07-16	38.8
2002-08-09	32.5
2003-07-23	45.0
2004-08-19	28.0
2005-07-01	37.0
2006-06-30	49.0
2007-10-07	34.5
2008-08-13	83.5
2009-07-16	78.0



<그림 6> 부산 관측소의 최근 10년간 연도별 시간당 최대 강우량

년도	30mm/hr 이상 발생횟수	50mm/hr 이상 발생횟수
2000	4	1
2001	2	0
2002	1	0
2003	3	0
2004	0	0
2005	2	0
2006	1	0
2007	2	0
2008	6	1
2009	8	4
SUM	29	6



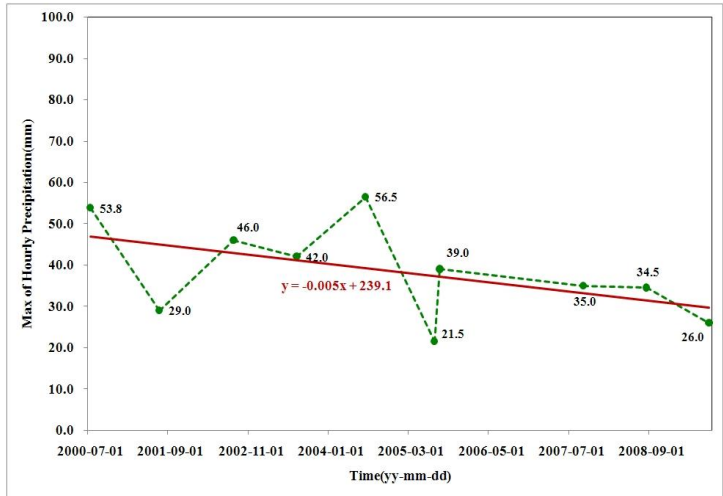
<그림 7> 부산 관측소의 최근 10년간 시간당 300mm 이상과 50mm 이상 발생 횟수

(3) 대전 관측소

2000년 ~ 2009년까지 최근 10년간 대전 관측소의 시(hourly)강우자료를 분석한 결과, <그림 8>에 나타낸 것과 같이 시간당 최대강우량은 2004년과 2000년이 각각 56.5mm 와 53.8 mm로 가장 큰 것으로 나타났다. 한편, 대전관측소의 시간당 강우량에 대하여 30mm 이상과 50mm 이상 발생횟수를 분석한 결과에 따르면 <그림 9>에 나타낸 것과 같이 발생빈도가 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났

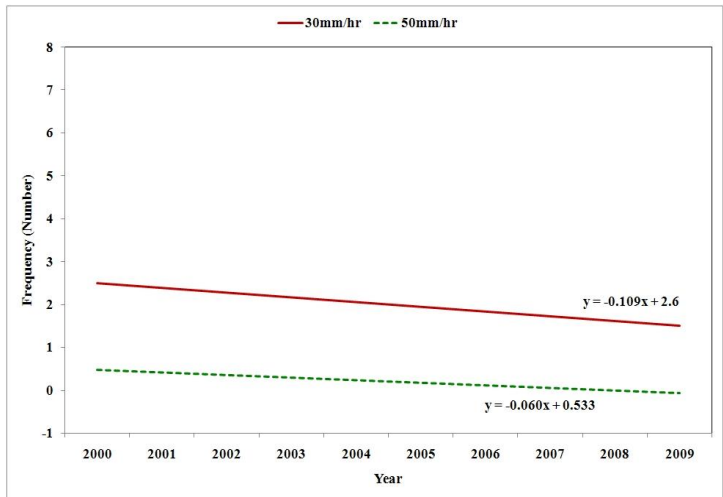
다.

yyyy-mm-dd	시간당 최대강우량
2000-07-23	53.8
2001-07-21	29.0
2002-08-06	46.0
2003-07-23	42.0
2004-07-16	56.5
2005-08-11	39.0
2005-07-02	21.5
2007-09-15	35.0
2008-08-16	34.5
2009-07-09	26.0



<그림 8> 대전 관측소의 최근 10년간 연도별 시간당 최대 강우량

년도	30mm/hr 이상 발생횟수	50mm/hr 이상 발생횟수
2000	3	1
2001	0	0
2002	3	0
2003	1	0
2004	4	1
2005	5	0
2006	0	0
2007	1	0
2008	3	0
2009	0	0
SUM	20	2



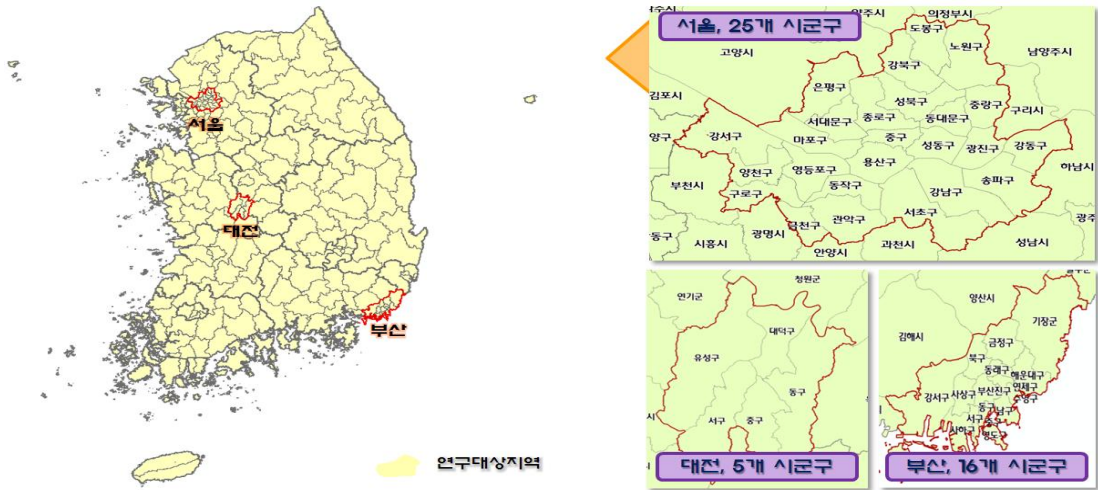
<그림 9> 대전 관측소의 최근 10년간 시간당 300mm 이상과 50mm 이상 발생 횟수

시(hourly)강우자료를 분석한 결과, 서울의 경우, 2001년부터 2003년까지 시간당 최대 강우량이 최고 90mm에 달하였고 부산의 경우, 2008년부터 2009년까지 시간당 최대 강우량이 최고 83.5mm로 나타나 큰 차이는 없었으나, 최근 10년간 서울 관측소는 연도별 시간당 최대강우량과 30mm/hr, 50mm/hr 이상 발생횟수가 감소하는 경향을 보였으나 부산 관측소는 증가하는 경향을 보였다. 그러나 대전 관측소는 서울과 부산 관측소보다 시간당 최대강우량과 발생횟수가 상대적으로 적은 것으로 분석되어 차이를 보였다.

2. 기후변화 영향성에 따른 도시홍수 위험요인 도출

1) 시범 대상지역 선정 및 자료 수집

본 연구에서는 지역특성을 고려하여 수도권, 중부권과 남부권에 대하여 각각 서울, 대전과 부산을 시범 대상지역으로 선정하였다. 이들 지역은 각각 우리나라 북부, 중부와 남부에 위치하여 지리적 위치와 대도시를 반영할 수 있으며 대규모 내륙하천(서울), 연안(부산), 내륙(대전) 등 다양한 지형적 특성을 고려할 수 있다. 또한, 구도심과 신도심이 공존하며 도시홍수피해가 발생한 지역(서울, 부산)과 그 정도가 상대적으로 낮은 지역(대전)에 대한 비교가 가능하고 자체 구축 자료와 보고서가 정리되어 있어 자료 수집과 지표를 평가하기에 적합한 지역이라고 할 수 있다(<그림 10>).



<그림 10> 시범대상지역

시범 대상지역인 서울, 대전과 부산을 대상으로 지자체별 통계연보와 재해연보, 보건복지부 통계연보 자료 등을 1994년 ~ 2008년까지 총 15년에 대하여 정리하였다. 여기서, 강우자료는 양적인 측면과 장·단기적 관점으로 구분하고 1994년 ~ 2008년까지 총 강우량의 변화정도를 확인할 수 있도록 연강우량을 정리하였으며 장기적 관점에서는 기상청 산하 66개 관측소를 대상으로 150mm/day 이상 발생 횟수를 고려하고, 일단위(daily) 강우자료에 대하여 <표 1>에서 제시한 극한지수(STARDEX, 2005)에 따른 분석을 수행하였다. 여기서, 극한지수 6개는 일단위(daily)의 강우자료를 지수화한 것으로 단위는 <표 1>에 제시하였다.

또한, 단기적 관점에서는 50mm/hr 이상 발생횟수를 고려하여 짧은 시간에 집중되는 강우를 고려하였다. 강우를 포함하여 자료를 정리한 항목은 총 24개이며 자료별 특성에 따라 지형, 강우, 인문사회,

재해, 재해취약조건, 시설물, 경제, 대피의 8개로 구분하였다. 이들 자료는 <표 4>와 같이 대체적으로 1994년부터 2008년까지 시계열 자료로 정리되어 있으나 경사도, 재해위험지구, 거주층별가구와 배수펌프장은 단일값으로 정리되어 있다. 여기서, 경사도는 DEM 으로부터 추출하는 값으로 한 개의 값을 갖게 되고 거주층별가구는 2005년 시행한 인구총주택조사에서 수집된 내용으로 본 연구에서는 반지하 주택에 대한 자료를 이용하고자 하였으나 전후 자료는 제공되지 않는 것으로 파악되었다. 이 외에 재해위험지구와 배수펌프장은 현재, 2008년 기준으로 추가 자료수집이 요구되며, 추후 각각 면적대비 침수위험 지정면적 산정과 분당 토출량을 고려하여 분석에 적용할 예정이다. 현재, 이들 자료는 모두 단일값으로 구성되어 패널데이터와의 분석에 어려움이 있으며 추후 이들 자료를 적용한 연구를 진행할 예정이다.

한편, 지형에 해당하는 토지이용변화율 자료는 지자체별 통계연보에서 구분하는 16개 항목 중에서 도시와 관련된 대지, 공장용지와 도로 3개 항목을 선정하였다.

<표 4> 도시홍수 위험요인 도출을 위한 분석자료

구분		단위	자료출처	비고	
지 형	토지이용변화율	m ²	통계연보		
	경사도※	degree	DEM 작업		
강 우	연강우량	mm	기상청	서울, 부산과 대전 각 시군구의 자료 동일	
	극한강우(50mm/dhr) 이상 발생 횟수	횟수			
	일강우(150mm/day) 이상 발생 횟수	횟수			
	STARDEX 분석결과(6개 지수)	<표 1>			
인문사회	인구	명	통계연보		
	행정구역 면적	km ²	통계연보		
	인구밀도	명/km ²	통계연보		
재 해	피해액	천원	재해연보	목적함수	
	재해빈도(시군구·년도별)	횟수	통계연보		
	이재민	명	재해연보		
	도시 침수면적	ha	재해연보		
	재해위험지구※	개소	소방방재청	2008년 기준	
재 해 취 약 조 건	사람	65세 이상	명	통계연보	
		0 ~ 4세	명	통계연보	
		국민기초생활보장수급자	명	보건복지부	2007 ~ 2009년
	여건	거주층별 가구※	가구	통계청	인구주택 총조사 (2005년)
		총주택수(비거주 구분)	가구	통계연보	
시설물	배수펌프장※ 분당 토출량	m ³	소방방재청	2008년 기준	
	도로연장	m	통계연보		

※ 단일값

〈표 4〉 도시홍수 위험요인 도출을 위한 분석자료(계속)

구분		단위	자료출처	비고
경 제	재정자립도	%	통계연보	
	지가변동률	%	한국주택 토지공사	
대 피	초등학교, 의료기관(종합병원, 병원, 보건소)	개소	통계연보	

※ 단일값

2) 지표 선정을 위한 요인분석

요인분석(Factor analysis)은 많은 측정변수를 공통적인 요인으로 묶어 자료의 복잡성을 줄이고 자료(변수)들이 동일한 구성개념을 포함하고 있는지를 파악하는 방법으로 실제 결과를 초래하게 되는 요인을 찾아냄으로써 목표로 하는 명제를 설명하는 다변량 통계 분석방법이다. 여기서, 요인은 서로 상관관계수가 높은 자료(변수)들끼리 모아 작은 수의 변수집단으로 구분하는 것을 의미한다.

이 분석을 통해 입력 변수들의 특성을 파악함으로써 상관성 여부를 판단할 수 있고 여러 개의 변수들에 내재된 정보를 이용하여 보다 적은 수의 요인으로 압축이나 요약하여 변수를 축소하거나 불필요한 변수를 제거할 수 있다. 또한, 같은 개념을 측정하려고 하는 변수들이 동일한 요인으로 묶이는지 확인하는 경우나 요인으로 묶여지지 않는 변수 중 중요도가 낮은 변수를 제거하는데 활용할 수 있다.

요인분석은 ① 분석목적 확립에 따른 자료 수집, ② 상관관계와 요인 도출, ③ 요인분석 모형 결정, ④ 요인의 수 결정과 추출된 요인의 평가, ⑤ 요인의 회전, ⑥ 요인결과 해석의 6단계로 설명할 수 있다. 먼저, 분석하고자 하는 목적에 따라 자료를 수집하고(①) 자료간의 상관관계와 적합성 검토(②)를 통해 요인분석이 가능한지를 판단하게 된다. 요인분석은 자료의 총분산을 산정하기 위하여 주성분분석 모형과 공통요인분석 모형을 선정(③)하게 되는데, 주성분분석(Principle Component Analysis, PCA)은 측정변수의 수가 많아 소수의 요인을 추출하는데 목적이 있고 공통분산이 큰 경우에 적용하는 것이 바람직하다. 반면, 공통요인분석(Common Factor Analysis, CFA)은 측정변수의 토대가 되는 잠재 차원을 찾아내므로 자료간의 상관에 대한 설명을 목적으로 하는 경우에 적용하는 것이 바람직하다. 이후, 요인의 수 결정과 추출된 요인을 평가하는 단계(④)는 사용된 자료들을 축소하는 과정으로 설명한다. 이 때, 각 요인이 기존자료의 정보를 어느 정도 설명하는지를 나타내는 고유값(Eigenvalue)과 분석자가 추출될 요인의 수를 미리 결정하는 사전결정으로 구분된다. 고유값(Eigenvalue)은 각 자료와 해당요인간 상관관계 계수를 의미하는 요인적재값의 제곱의 합으로 설명하며, 이 값이 크다는 것은 그 요인이 변수들의 분산을 잘 설명함을 의미하게 되며 대체적으로 “1”이상에서 요인의 수를 결정하게 된다. 요인의 회전(⑤)의 목적은 어떤 자료가 어떤 요인에 높게 관계되는지를 보여주는 과정으로 직각회전과 사각회전방식으로 구성되고 있다. 직각회전은 회전축이 직각을 유지하면서 회전하는 방법으로 요인간 독립성을 유지하며 Varimax, Quartimax, Equimax가 포함된다. 반면, 사각회전은 직각을

유지하지 않는 방법이며 일반적으로 직각회전의 Varimax를 많이 적용하는 것으로 알려져있다(성태제, 2007). 이러한 단계를 거쳐 요인분석이 완료되면 요인결과를 해석(⑥)하게 되며 자료들의 중요도를 판단하거나 요인점수를 산출함으로써 회귀분석이나 판별분석에 사용할 수 있다. 요인분석에 대한 보다 자세한 설명은 성태제(2007)를 참고할 수 있다.

3) SPSS를 이용한 요인분석 적용 및 결과

(1) 적용

많은 측정변수를 공통적인 요인으로 묶어 자료의 복잡성을 줄이고 측정된 변수들이 동일한 구성 개념을 측정하고 있는지를 파악하기 위하여 SPSS 통계분석 프로그램을 이용하여 요인분석을 실시하였다. 이 때, 요인분석 모형은 주성분분석을 결정하여 불필요한 항목 삭제 등 자료를 축소하고 측정변수들의 분산을 최대한 설명하도록 하였다. 요인수 결정시 고유값(EigenValue)이 1 이상이 되는 요인의 수만큼 추출하도록 하고 요인회전방식은 직각요인회전의 Varimax 를 선택하였다. 직각요인회전은 요인간 독립성을 유지하고 사각요인회전과 달리 “0”의 상관관계를 가정하지 않아 보다 실제적(realistic) 결과를 보여주며, Varimax 방식은 요인행렬을 열(column)로 정리함으로써 요인구조를 단순화 또는 명확화하고 해석이 가장 용이한 방법으로 많이 사용되고 있기 때문이다(성태제, 2007).

피해 정도를 정량적으로 평가할 수 있는 피해액을 목적함수로 하여 서울(25개 시군구), 대전(5개 시군구)과 부산(16개 시군구)의 총 46개 시군구를 대상으로 <표 4>와 같이 24개 자료를 정리하고 요인 분석을 실시하였다. 이 때, <표 4>에서 단일값으로 표현된 경사도, 재해위험지구, 거주층별가구와 배수펌프장은 요인분석에서 제외하였는데 이는 다른 자료들이 시계열과 횡단면 데이터로 이루어진 패널 데이터와는 차이가 있어 분석이 불가하기 때문이다.

(2) 결과

통계프로그램인 SPSS를 이용한 분석을 통해 단일값(경사도, 재해위험지구, 거주층별가구와 배수펌프장의 4개 항목)을 제외한 자료간 요인분석을 실시한 결과, <표 5>에 나타난 것과 같이 토지이용변화율, STARDEX 지수(3개 지수), 침수면적, 도로연장, 재정자립도와 자가변동률이 각 자료별 상관성과 공통성을 갖고 피해액에 영향을 받는 것으로 구분되었다. 여기서, 요인 수를 결정할 때에는 일반적으로 고유값(Eigenvalue)이 1 이상인 요인들이 요인수에 포함되며, 분석결과에 따라 설명된 총 분산을 살펴보면 요인수는 4개이며, 요인 1은 전체의 24.683%, 요인 2는 전체의 20.058%, 요인3과 요인4는 각각 12.892%와 10.163%의 설명력을 갖는 것으로 나타났다.

본 연구에서 4개의 요인을 추출한 결과, 전체 분산의 67.796%가 설명되고 있으며 각 변수와 요인간의 상관관계값을 의미하는 요인부하량(factor loading)이 대체적으로 0.3이상의 값을 갖는 것으로 나타났다. 첫 번째 요인은 강우이며, 두 번째 요인은 인문·사회, 세 번째 요인은 경제, 네 번째 요인은 피

해로 분류할 수 있다. 본 연구에서는 각 요인 중에서 강우는 유발인자로, 인문·사회와 경제는 가중인자로 피해는 피해인자로 구성하였다. 여기서, 유발인자는 피해액 즉, 피해를 유발하는 것으로 강우항목이 포함되었고 가중인자는 피해 발생시 피해의 크기나 정도를 증감할 수 있는 요인으로 인문·사회와 경제 항목으로 구성되었다. 피해인자는 재해발생시 피해 정도를 나타내는 것으로 침수면적을 설정하였다.

이러한 결과를 정리한다면 도시홍수의 제일 요인으로는 강우량의 변동을 들 수 있고, 그 다음으로는 토지이용변화율과 인구밀도 그리고 도로연장과 같은 도시화 집중화를 들 수 있고 마지막으로 피해면적이 요인이 될 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서는 <그림 1>에 나타난 연구 흐름도에서와 같이 현재 수집된 자료의 요인분석을 통해 불필요한 변수를 제거하여 축소하고 특성을 파악하였으며 현재, 이에 대한 적절성을 검토하는 단계에 있다. 이를 위하여 피해의 정도를 정량적으로 가늠할 수 있는 피해액에 영향을 주거나 또는 받을 수 있는 추가 분석 자료를 수집하고 있다. 그러나 현재의 분석에서는 피해 후 복구비 투입현황, 각 지자체별 시설정비 현황 등 피해를 제어할 수 있는 구조적·비구조적 대책 수립 등이 누락되어 있다. 또한, 장기간(daily)이 아니라 보다 짧은 시간위(hourly), 분단위(minutely) 집중강우의 영향을 고려할 수 있도록 AWS 자료를 이용하여 추가 분석을 수행하는 것이 필요하다. 이러한 분석과정이 완료된 이후에는 시범지역인 서울, 대전과 부산지역의 각 한 개의 구를 선정하여 지역별 특성을 더 자세히 분석할 예정이다.

<표 5> 요인분석 결과

요인		지표	1	2	3	4
유발 인자	Factor1 (강우)	강우강도	0.954	0.098	0.014	-0.009
		지속기간 5일 최대강수량	0.870	0.179	0.116	-0.064
		집중호우한계점	0.829	0.022	-0.098	-0.029
가중 인자	Factor2 (인문·사회)	지가변동률	-0.29	0.061	-0.070	-0.152
		토지이용변화율	0.024	0.945	-0.058	0.040
		인구밀도	0.066	0.884	-0.046	0.023
	Factor3 (경제)	도로연장	0.056	0.028	0.828	-0.087
		인구	-0.04	-0.314	0.588	0.222
		재정자립도	0.122	0.428	0.474	-0.126
피해 인자	Factor4 (피해)	침수면적	0.039	0.049	-0.028	0.956
고유값			2.468	2.006	1.289	1.016
설명분산			24.683	20.058	12.892	10.163
누적분산			24.683	44.741	57.633	67.796
문항수			3	3	3	1

III. 요약 및 결론

본 연구에서는 기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인을 도출하였다. 분석을 위한 대상지역으로는 지리적·지형적 특성을 고려하고 도시홍수피해 발생에 따라 그 정도의 상대적 비교가 가능한 서울, 대전과 부산을 선정하였으며 이들 지역의 통계연보와 재해연보 등 시도별 구축자료를 수집하여 기후변화에 따른 도시의 영향과 도시홍수 위험을 유발 또는 가중시키는 인자에 대한 요인분석을 실시하였다.

도시지역에서의 강우의 영향성을 평가하기 위하여 장기적 관점에서 일단위(daily) 자료를 분석한 결과, 서울, 대전과 부산 3개의 대상지역에서 모두 집중호우의 양, 지속기간과 강우강도가 증가하는 것으로 나타났다. 단기적 관점에서 시(hourly) 자료를 분석한 결과에서는 서울과 대전의 경우, 시간당 최대강우량과 극한강우(30mm/hr와 50mm/hr) 발생 횟수가 감소하는 것으로 나타났고 부산에서 증가하여 차이를 보였다. 그러나 이들 분석 결과는 서울 25개 시군구와 부산 16개 시군구를 대표하는 하나의 기상관측소 자료를 이용하여 최근 빈발하는 국지성 집중호우 사상을 반영하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 이에 따라 본 연구에서는 향후, 대표적인 지역을 대상으로 10분 단위의 AWS 자료에 대한 분석을 추가할 예정이다.

각 지자체의 통계연보와 재해연보를 정리하여 홍수피해와 관련된 자료들을 수집하고 이에 대한 자료의 축소, 특성을 분석하기 위하여 통계프로그램인 SPSS를 이용한 요인분석을 실시하였다. 그 결과, 24개 자료에서 불필요한 항목을 제외한 10개 항목으로 축소되었으며 총 4개 요인이 추출되었다. 이때, 단일값으로 제시된 경사 외에 거주층별가구, 재해위험지구와 배수펌프장은 자료를 추가로 수집하여 추가 분석을 실시할 예정이다.

요인분석 결과에 따라 추출된 4개 요인은 전체 분산의 67.796%가 설명되며, 변수와 요인의 특성에 따라 첫 번째 요인은 강우, 두 번째 요인은 인문·사회, 세 번째 요인은 경제, 네 번째 요인은 피해로 분류된다. 이들 요인은 그 특성에 따라 크게 유발인자, 가중인자와 피해인자로 볼 수 있는데 유발인자에는 직접적인 외력으로 작용하는 강우가, 가중인자에는 불투수 면적과 인구의 집중정도, 지역별 경제성을 반영할 수 있는 인문·사회와 경제가 포함되어 일반적으로 설명하는 도시화의 특성으로 구분되었다. 마지막 피해인자에는 침수면적이 포함되어 요인별 특성에 따라 도시홍수 위험요인에 대한 원인, 가중, 결과로 구성됨을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 기후변화를 고려한 도시홍수 위험요인을 도출하기 위하여 수집된 자료에 대한 축소, 특성을 파악하고 요인을 추출하였으며 현재, 적절성을 검토하고 추가 분석자료를 보완하는 단계에 있다. 또한, 도시홍수의 특성을 반영하여 요인분석시 시(hourly)단위 또는 보다 짧은 시간의 강우자료를 수집하여 분석을 진행할 예정이다.

참고문헌

- 건설교통부. 2008. 기후변화 대비 국가 물안보 확보방안(1차년도). 건설교통부.
- 대전광역시. 1994-2008. 1994-2008 통계연보.
- 보건복지부. 2007-2009. 2007-2009 국민기초생활보장 수급자 현황.
- 부산광역시. 1994-2008. 1994-2008 통계연보.
- 서울특별시. 1994-2008. 1994-2008 통계연보.
- 성태제. 2007. SPSS/AMOS를 이용한 알기쉬운 통계분석. 학지사.
- 소방방재청 중앙재난안전대책본부. 1994-2008. 1994-2008 재해연보.
- 임창수. 2010. 수문기상요소 추세에 대한 도시화 영향분석. 대한토목학회논문집. 30(1B): 71-80.
- 장대원. 2010. 홍수방어대안 선정을 위한 위험관리지수의 개발 및 적용. 인하대학교 대학원. 공학박사 학위논문.
- 최충익. 2004. 도시화에 따른 수해취약성에 관한 실증분석: 경기도 패널데이터를 활용하여. 국토연구. 42: 17-37.
- 기상청. <http://www.kma.go.kr>
- 소방방재청 국가재난정보센터. <http://www.safekorea.go.kr>
- 한국주택토지공사. <http://www.lh.or.kr>
- Changnon, S. A. 1969. Recent Studies of Urban Effects on Precipitation in United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 50: 411-421.
- ISDR. 2002. *United Nations Inter-Agency Secretariat, Living with Risk: A Global Review of Disaster Reduction Initiatives*. I.S.D.R. Editor. UN Publications, Geneva: Geneva, Switzerland.
- Pancura, M, Lines, G. 2005. *Variability and Extremes in Statistically Downscaled Climate Change Projections at Greenwood NS*. Environment Canada, Atlantic Region.
- Shepherd, J. M. 2006. Evidence of Urban-Induced Precipitation Variability in Arid Climate Regimes. *Journal of Arid Environments*. 10.1016/j.jaridenv.2006.03.022.
- STARDEX, STATistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions. 2005. <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>
- WMO, World Meteorological Organization. 2006. *The Assessment Programme on Flood Management*

량 추정) 현재 노아솔루션(주) 기술연구소 선임연구원으로 재직 중이다.

張大源: 인하대학교에서 공학 박사학위를 취득하고(홍수방어대안 선정을 위한 위험관리지수의 개발 및 적용) 현재 노아솔루션(주) 기술연구소 책임연구원으로 재직 중이다.

張 楠: 인천대학교에서 공학 석사학위를 취득하고(A Study on Ulva Bioassay for Testing Toxic Compounds in the Sewer and Wastewater Flowing to the Streams)현재 노아솔루션(주) 기술연구소 연구원으로 재직 중이다.

梁東民: 인천대학교에서 공학 석사학위를 취득하고(홍수범람 피해를 고려한 지역 시설물의 안전도 진단시스템 개발) 현재 고려대학교 대학원 박사과정 중에 있으며 노아솔루션(주) 기술연구소 소장으로 재직 중이다.

투 고 일: 2011년 1월 10일

수 정 일: 2011년 2월 21일

게재확정일: 2011년 2월 22일

The Deduction of Urban Flood Risk Factor Considering Climate Change

Bo Kyung Kim, Dae Won Jang, Nam Zhang, Dong Min Yang

In 2001, one large-scale concentrated rainfall happened in Seoul. The area was hit with sudden and unexpected downpours, and since then the Extreme Flood appeared. After that, the occurrence frequency of rainfall with local, short-term and flash characteristics is increasing rapidly. Usually, the damage study on urban flood is investigated from the change of runoff rate as a result of rainfall increase and urbanization. However, the induction factor due to such damage has nothing to do with the real amount of the damage. It means when it is rainfall, flood will discharge, so it is possible to make flood damage. When we judge the damage scale, the amount of the damage always was considered. So we should select weight factors that can reduce damage. On the premise of it, items having connection with the urban flood damage were considered in this study such as society, economic, cultural, facilities and meteorological fields. There are 24 selected factors in this study. Urban flood risk was investigated generally according to the climate change, related analysis to the amount of the flood damage was fulfilled, at last 10 items were selected and their factorial analysis were made. Four factors have been extracted and the Explanation Power was 67.79%. It was classified into four parts. The first factor was rainfall, the second one was Cultural-Social field, the third one was economy and the last one was flood damage. Through this study, obtained results are the inducing factor of urban flood damage is Rainfall, the weight factors are Cultural-Social and economic aspects, and the inundated area under this damage is also should be paid attention and checked when Urban flood happen. This is the framework of the deduction of Urban Flood Risk Factor.

Key words: urban flood, climate change, risk management, factorial analysis, vulnerability