침수피해지역 토지이용 특성과 방재대책 연구: 제주지역 사례로

A Study on the Flood Protection Measures and Land Use Characteristics of Flood Damage Areas: The Case of the Jeju Area

장미홍* · 박창열**

Jang, Mihong*, and Park, Changyeol**

Abstract

Extreme weather and urbanization have increased flood disaster risks. This study focused on flood protection measures by analyzing the spatial characteristics of flood damage areas. With the case of the Jeju area, rainfall events of June 2016, September 2007, September 2011, and October 2016 were used. The analysis found that flood damage areas were located on flat land or gentle slopes, including areas of fields and orchards. The study implies that urban planning measures to reduce stormwater runoff are necessary for residential areas and that drainage system improvements are needed in rural areas. This result indicates that, as local heavy rainfall increases, a combined set of flood protection measures at the agricultural land and urban area could be helpful for mitigating flood risk more fundamentally in the Jeju area.

Key words : Land Use, Flood Protection Measures, Flood Damage Area

요 지

최근 기상이변과 도시화로 인해 재해위험은 크게 악화되고 있다. 본 연구에서는 과거 침수피해지역의 공간적 특성을 분석하고, 침수피해 토지이용 특성을 고려한 방재대책의 시사점을 살펴보고자 한다. 호우사상은 제주지역에서 발생한 2006년 6월 집중호우, 2007년 9월 태풍 나리 및 집중호우, 2011년 9월 집중호우, 2016년 10월 태풍 차바 등을 대상으로 하였다. 각 호우사상의 침수피해지역을 살펴본 결과, 침수피해지역은 약 5% 이하의 완경사 및 평지지역에 분포되어 있으며, 밭과 과수원의 비중이 높음을 알 수 있었다. 또한, 농경지 지역에는 배수체계 개선 등이 필요하며, 저지대 주거지역은 노면수 관리를 위한 우수유출저감시설 등의 도시계획적 방재대책이 필요함을 알 수 있었다. 이 같은 연구결과는 농경지 침수피해 저감을 위한 대책과 연안 저지대에 위치한 시가지지역에 대한 대책이 제주지역에 병행되어야 함을 시사한다.

핵심용어 : 토지이용, 방재대책, 침수피해지역

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 국지성 집중호우, 기습적인 폭우 등의 발생빈도가 증가하고 있다. 중앙부처와 지자체에서 재해 저감을 위한 다양한 사업(재해예방사업 등)을 시행하고 있음에도 불구하고 이상기후 및 도시화 확대 등의 영향으로 도시지역 및 농경지 침수피해는 지속적으로 나타나고 있다. 널리 알려진 바와 같이, 반복되는 재해 요인은 강우-유

출 과정에서 외적 요인(강우 특성 등)의 변화 더불어 내적 요인(도시공간 확장 등)의 악화에 기인한다. LX (2013)는 온난화 영향으로 집중호우가 증가함에 따라 방재시설의 설계빈도 개념의 의문점을 제기하고 있으며, 대규모 개발사업에 의한 불투수면 증가, 토지이용 변화(침투율 감소 등)로 인한 하류부 유출량 증가 등 홍수위험에 대한 심각성을 지적한 바 있다. 이는 시설 중심의 구조적 방재대책의 한계를 보여주며, 구조적 대책의 보완적 수단(비구조적 대책 등)의

*정회원, 서울연구원 안전환경연구실 초빙부연구위원(E-mail: jmh@si.re.kr)

Member, Associate Research Fellow, Dept. of Safety and Environmental Research, The Seoul Institute

**교신저자, 정회원, 제주연구원 환경도시연구부 책임연구원(Tel: +82-64-729-0520, Fax: +82-64-751-2168, E-mail: cypark@jri.re.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Research Fellow, Dept. of Environmental and Urban Planning Research, Jeju Research Institute

필요성을 말해준다.

구조적 방재대책을 보완하기 위한 수단으로 다양한 방안들이 논의되고 있다(KEI, 2007, 2011; KAIA, 2008; Ha et al., 2009; GRI, 2010; NEMA, 2010; Kang and Jung, 2012; Kim et al., 2013; Lee et al., 2013; Park et al., 2013b; Yoo et al., 2013; Kim et al., 2014; Shin and Park, 2014; Kang and Lee, 2017). 대표적으로는 침수피해 최소화를 위한 도시계획적 전략(토지이용, 용도 등 배치), 유출저감 목적의 토지이용 관리방안 및 우수유출저감시설 설치, 홍수 예경보 시스템, 재해지도 작성 등을 들 수 있다. 이들 방안들은 토지이용 관점에서 크게 두 가지로 구분할 수 있다(Fig. 1 참조). 먼저, 우수유출 최소화를 위한 대책은 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법인 옥상녹화, 나무여과상자, 식생저류지 등과 같은 우수유출저감 방법들을 말한다. 즉, 노면 회복상태를 관리하기 위한 지구내 우수유출저감대책을 통해 배수시설의 유출부담을 최소화함으로써 침수피해를 줄이고자 하는 간접적인 방법이라 할 수 있다. 다음은 피해를 회피하는 전략을 들 수 있다. 이는 저지대를 비롯한 침수취약지역을 고려하여 개발입지와 토지이용을 제어하는 직접적인 방법이며, 침수피해 다발지역 또는 침수예상지역 식별에 의한 개발입지 제한, 용도에 따른 배치 또는 이전, 건축물 승고 등의 세부대책이 있다(Shin and Park, 2014; Park, 2016). 이러한 보완적 수단들은 개별 성능이 상대적으로 미미하다는 한계가 있지만, 운영여하에 따라 제한된 설계용량의 보완적 수단으로 효율적일 수 있다(Park et al., 2013a). 즉, 재해 예방 전략은 유역단위의 포괄적 관점에서 이뤄져야 하며, 대상지역의 재해 특성과 피해양상을 검토하여 이에 상응하는 대응전략을 마련하는 것이 중요하다(Kang and Jung, 2012).

이에 본 연구에서는 국내 최다우지역인 제주지역을 대상으로 과거 침수피해지역의 공간적 특성을 분석하고, 토지이용 특성을 고려한 방재전략과 시사점을 살펴본다.

2. 선행연구 검토

수재해는 자연재해의 대표적 유형이라 할 수 있다. 이로 인해 수리수문해석 기법의 개선, 피해요인 분석, 위험도 및 취약성 분석, 토지이용 관리방안, 도시계획적 대응방안 등 다양한 주제의 연구가 널리 이뤄져 왔다(Choi, 2003; KEI, 2007; KAIA, 2008; NEMA, 2010; Yoshida et al., 2011; Kang and Jung, 2012; Park et al., 2012; Saito and Ubaura, 2012; Kakimoto et al., 2012; Hirata, 2013; Park et al., 2013b; Lee et al., 2013; Shin and Park, 2014; KRIHS, 2016; Sakai and Inohae, 2016; Banba and Okai, 2017).

본 연구는 구조적 대책의 보완적 수단으로 도시계획적 방재대책(토지이용 등)을 살펴보는데 주안점을 두고 있다. 이와 관련된 사례를 살펴본다. 먼저 침수피해지역의 토지이용 및 공간적 특성에 관한 사례를 살펴보면, GRI (2010)는 경기도 수해지역을 분석하였으며, 경사 5% 이하의 평탄지, 하천변 100 m 저지대에서 주택침수발생률이 높게 나타남을 확인한 바 있다. KEI (2011)는 그린인프라(공원, 완충녹지, 공공공지, 습지 등)와 홍수피해와의 관계를 살펴보았으며, 이를 통해 그린인프라의 방재효과를 규명한 바 있다. 또한, Kang and Jung (2012)은 경기도 수해지역의 유형별(농경지, 건물, 하천, 도로·교량) 피해분포와 공간분포 경향을 분석함으로써 피해지역 분포 특성을 고려한 토지이용 관리방안을 제시하였다. Park et al. (2013b)은 서울시 상습침수지역을 유형화하고 유형별 특성에 맞는 수방전략상 시사점을 제안하기도 하였다. Yoo et al. (2013)은 부산시 침수피해지역을 내수범람형, 하천범람형, 해수범람형으로 유형화하여 집중적 방재대책의 필요성을 언급하였다. Kim et al. (2013)은 대형교차로 주변지역의 수해특성을 분석하여, 급경사 지역은 우수유출경로 변경을 통한 집수시간 지연, 저지대 지역은 신속한 우수배제 및 주변 대형건축물과의 연계를 통한 저류용량 확보 등의 방안을 제시하였다.

Fig. 1. Land Use Strategies to Mitigate Flood Damage (Shin et al., 2014)

Shin and Park (2014)는 서울시 침수피해를 대상으로 토지 이용 측면에서의 침수피해 영향요인을 분석하여, 시간당 최대강우량, 환경사 지역, 주거·상업혼재지, 상업·업무시설지, 녹지 및 오픈스페이스 등이 침수피해에 미치는 영향력에 대해 확인한 바 있다.

다음으로 토지이용과 유출특성 관계에 대한 연구를 살펴보면, Ha et al. (2009)은 1975년부터 2000년까지의 제주지역 토지이용 특성을 살펴봄으로써 직접유출률이 과거 9.7%에서 11.5%로 증가하였음을 제시한 바 있다. Lee et al. (2010)은 과천시 도시기본계획을 이용하여 장래 토지이용과 기후변화 시나리오에 따른 유출량 변화를 분석하였으며, 토지이용이 2% 변화할 때 유출량이 약 4% 증가함을 확인한 바 있다. 이와 유사한 연구로 Kim and Kim (2014)은 SLEUTH모델을 이용하여 남양주시의 미래 강우패턴 및 침수피해 양상의 변화에 대해 살펴보았으며, 기후변화 영향을 도시계획 마련 시 반영할 필요가 있음을 제시한 바 있다.

한편, 우수유출 최소화를 위한 우수유출저감기법도 살펴볼만 하다. Kim et al. (2014)은 옥상녹화와 투수성포장 등 저영향개발 기법의 우수유출 저감효과를 분석하였으며, 옥상녹화는 적용가능면적의 25% 적용, 투수성포장은 75% 적용, 옥상녹화와 투수성 포장의 복합적용의 경우 50%를 적용하는 것이 설치면적 대비 우수유출량 저감에 가장 효과적임을 제시한 바 있다. Kang and Lee (2017)는 토지이용계획 단계에서 적용가능한 저영향 설계요소를 도출하여 실제 대상지에서의 비점오염 저감효과를 분석하였으며, 저영향개발을 적용한 토지이용계획안의 불투수율과 연간 표면 유출량이 19.8%, 19.0% 감소하고, 연간 침투량은 164.1% 증가함을 밝힌 바 있다.

아울러, 도시계획적 대책 및 대응방안 연구로 Saito and Ubaura (2012)는 침수피해 대응을 위한 재해위험구역제도의 전국적 적용실태를 조사하고 재해위험구역 내에서 적용되는 개발 및 건축 규제 등 제도적용 현황에 대해 분석한 바 있다. Yoshida et al. (2011), Banba and Okai (2017)은 프랑스의 Plan de prévention des risques technologiques (PPR, 현PPRN)제도를 분석하고, 일본의 방재형 토지이용규제를 위한 시사점을 제시하였다. Sakai and Inohae (2016)은 일본 사가현 저지대 지역을 대상으로, 토지이용 변화를 분석하여 시가화구역 내의 개발이 침수예상범위를 고려하지 못하고 있음을 지적하고, 토지이용규제·유도를 통한 방재대책의 중요성을 지적하고 있으며, Kakimoto et al. (2012), Hirata (2013) 등의 연구에서도 관련 내용을 찾아볼 수 있다.

이와 같이 침수피해 저감을 위한 토지이용적 측면의 방재대책 관련 연구는 국내·외에서 널리 이뤄져왔다. 다만, 그간의 연구는 피해규모가 상대적으로 크게 나타나는 서울, 부산 등 대도시지역을 중심으로 이뤄져 왔고, 침수피해지역과 토지이용과의 관계에 기초한 도시방재 전략을 살펴본

사례는 찾아보기 어렵다. 이에 섬지역이라 기후변화 영향력이 크고, 도시와 농경지가 공존하고, 태풍 길목에 위치하여 풍수해에 취약한 여건을 갖는 제주지역을 대상으로 침수피해지역과 토지이용 특성 관계를 통계적으로 살펴보고자 한다. 궁극적으로는 관계분석을 통해 제주지역의 방재전략에 대한 시사점을 도출하고자 한다.

3. 대상 자료 및 기본 특성

3.1 대상 자료

본 연구는 국내 최다우지역인 제주지역을 대상으로 한다. 제주지역의 침수피해지역 특성을 파악하기 위해 2006년부터 2016년까지의 제주지역에서 발생한 침수피해 자료(침수흔적도 등)를 수집하였으며, 피해규모(피해액, 면적 등)를 고려하여 4건의 호우사상을 선정하였다(Table 1 참조).

Event 1(2006년 6월 30일, 집중호우)에 의한 침수피해는 대부분 제주도 동서지역에서 발생하였으며, 2007년 9월 16일 태풍 나리에 의한 Event 2는 제주도 내 인구밀도가 가장 높은 제주도 동서지역에서 큰 피해를 유발하였다. Event 3(2011년 9월 11일, 집중호우)은 제주도 지역에서 간헐적으로 침수피해 흔적을 나타내고 있으며, Event 4(2016년 10월 5일, 태풍 차바)에 의한 침수피해는 서귀포지역에서 주로 나타난 바 있다. 이들 호우사상 특성 및 침수피해 분포는 Table 1과 Fig. 2에 정리하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 대상 호우사상에 의한 침수피해는 제주도 전역에서 광범위하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.2 지형 및 토지이용 특성

일반적으로 침수피해는 경사 정도에 따라 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(GRI, 2010; Shin and Park, 2014). 본 연구에서는 기존 문헌을 참조하여 평균경사도를 이용하여 침수피해지역의 환경사 및 평지 등을 식별하였다. 이때 평균경사도는 국가공간정보포털에서 제공하는 2014년 제주특별자치도 DEM 자료를 이용하였다.

침수피해지역별로 평균경사도를 산정한 결과, Event 1의 경우는 평균경사도 1.67%로 평지에 가까운 환경사 지역으로 나타났으며, 그 외 침수피해지역들도 대체로 경사도 약 5%의 환경사 지역으로 나타났다. 즉, 침수피해가 모두 환경사 및 평지 지역에서 발생하였음을 알 수 있다. 이러한 결과는 경사도 5% 이하의 환경사, 하천 계획홍수위 이하 등의 저지대 특성이 침수위험성과 높은 상관성이 있다는 선행연구와 유사한 것이다(GRI, 2010; Shin and Park, 2014). 한편, 방재대책 관점에서 환경사 및 평지 지역은 도시계획 측면에서 양호한 입지조건이 될 수 있으나, 적정 유속확보의 어려움으로 우수배제 조건이 불리할 수 있으므로 적절한 시설(빗물펌프장 등)과 전략적 입지 전략이 필요하다.

Table 1. Precipitation and Inundation Areas by Event

Type	Date	Daily maximum precipitation (mm)		Hourly maximum precipitation (mm/hr)		Inundation area
Event 1	2006.06.30	Jeju	161.5	Jeju	62.5	Hangeong-myeon, Daejeong-eup, Gujwa-eup, Seongsan-eup
		Gosan	38	Gosan	22	
		Seongsan	152.5	Seongsan	12.5	
		Seogwipo	31	Seogwipo	89.5	
Event 2	2007.09.16	Jeju	420	Jeju	75	Jeju-si Dong area
		Gosan	113.5	Gosan	36	
		Seongsan	177	Seongsan	34.5	
		Seogwipo	265.5	Seogwipo	52	
Event 3	2011.09.11	Jeju	10.5	Jeju	10	Jochon-eup
		Gosan	0.4	Gosan	0.4	
		Seongsan	5.5	Seongsan	2	
		Seogwipo	11.5	Seogwipo	7.5	
Event 4	2016.10.05	Jeju	158.5	Jeju	51.7	Namwon-eup
		Gosan	18.2	Gosan	6.8	
		Seongsan	127.2	Seongsan	41.7	
		Seogwipo	267.7	Seogwipo	116.7	

침수피해지역의 토지이용 특성은 국가공간정보포털에서 제공하는 2016 세분류 토지피복도를 이용하였다. 세분류 토지피복도는 실제 불투수면적을 산정에 있어 보다 정확한 것으로 알려져 있다(ME and K-eco, 2013). 다만, 현실적으로 침수피해 발생연도별 토지피복도 수집이 어려우므로 2016년 세분류 토지피복도를 일괄 적용하였다. 분석결과를 살펴보면, 침수피해지역 모두 공통적으로 농업지역의 비율이 높고, 농업지역 중 특히 밭과 과수원의 비율이 높은 것을 알 수 있다. Event 2와 Event 4의 경우 시가화건조지역의 비율이 비교적 높은 것으로 나타났다 (Table 2 참조).

4. 침수피해지역의 토지이용 특성 분석

4.1 영향변수 간의 상관관계

4.1.1 침수면적과 변수들 간의 상관관계

본 연구는 침수피해의 공간적 특성을 고려하여 방재전략을 모색하는데 주안점을 두고 있다. 이를 위해 먼저, 침수피해지역과 공간적 특성들 간의 관계를 파악하고자 한다.

Table 3은 침수피해지역의 토지이용 및 공간적 특성이 침수피해 면적과 어떠한 영향을 미치고 있는지 확인하기 위해 변수들 간의 상관관계를 살펴보았다. 그 결과, Event 1은

Fig. 2. Location of Inundation Area

Table 2. Land Use Characteristics of Inundation Area

Type			Event 1	Event 2	Event 3	Event 4
Inundation area (m ²)			15,561,089	17,583,926	2,797,862	293,315
Land use	Agricultural area (%)	subtotal	80.70	60.30	82.48	80.54
		rice paddy	0.08	0.02	0.00	0.00
		field	69.70	31.73	54.61	2.13
		house crop lands	3.16	6.01	2.94	17.58
		orchard	6.40	22.26	24.08	60.81
		ect-fields	1.36	0.27	0.85	0.02
	Green area (%)	subtotal	14.98	21.46	14.76	13.03
		forest	3.25	2.75	2.47	6.98
		grassland	7.51	11.86	10.22	3.76
		wetland	0.29	1.54	0.00	1.00
		bareland	3.37	5.05	2.06	1.29
		stream	0.56	0.28	0.00	0.00
	Urbanized area (%)	subtotal	4.32	18.24	2.76	6.16
		detached houses	0.23	2.09	0.63	0.64
		apartment houses	0.00	0.23	0.00	0.00
		industrial areas	0.00	0.07	0.01	0.00
		commercial areas	0.29	2.80	0.27	0.69
		public facilities	0.55	0.11	0.14	0.00
		transportation facilities	3.26	12.93	1.71	4.82
Impervious cover (%) ¹⁾			4.32	18.24	2.76	6.16
Average slope (%)			1.67	4.84	5.40	4.04
Daily maximum precipitation (mm)			38.0	420.0	10.5	267.7
Hourly maximum precipitation (mm/hr)			22.0	75.0	10.0	116.7

Table 3. Correlation Relationship Between Inundation Area and Influence Variables

Type		Event 1	Event 2	Event 3	Event 4
Agricultural area (%)	rice paddy	0.254	0.197	-	-
	field	0.972**	0.843**	0.965**	0.295
	house crop lands	0.336	0.590**	0.094	0.622**
	orchard	0.278	0.771**	0.627**	0.890**
	ect-fields	0.321	0.190	0.025	0.080
Green area (%)	forest	-0.113	0.425**	0.920**	0.093
	grassland	0.447	0.846**	0.926**	0.335
	wetland	0.552*	0.404**	-	0.418*
	bareland	0.515*	0.637**	0.933**	0.417*
	stream	0.710**	-0.033	-	-
Urbanized area (%)	detached houses	0.478	0.191	0.809**	-0.033
	apartment houses	-	-0.046	-	-
	industrial areas	0.843**	0.273*	0.438**	0.343
	commercial areas	-0.190	0.210	-0.021	-
	public facilities	0.849**	-0.140	0.651**	-
	transportation facilities	0.939**	0.681**	0.791**	0.437*
Impervious cover (%)		-0.105	-0.222	-0.100	-0.063
Average slope (%)		0.179	-0.020	0.227	-0.364

Note. **p≤0.01, *p≤0.05

1) 불수투면적률은 ME and K-eco (2013)의 세분류 토지피복지도를 활용한 분류항목별 투수·불투수 분류기준을 참고하여 산정하였다.

밭, 수역, 상업업무시설, 공공시설, 교통시설 등과 상관관계가 높게 나타났으며, Event 2는 밭, 시설재배지, 과수원, 산림, 초지, 습지, 나지, 교통시설 등과 상관성이 높은 것으로 나타났다. Event 3의 경우 밭, 과수원, 산림, 초지, 나지, 단독주거시설, 상업업무시설, 공공시설, 교통시설 등에서 상관관계가 높은 것으로 나타났으며, Event 4는 시설재배지와 과수원에서 상관성이 높은 것으로 나타났다. 공통적으로는 농업지역의 밭과 과수원, 시가화건조지역의 교통시설지가 침수면적과 높은 상관관계를 보이고 있는 것으로 나타났다.

4.1.2 영향변수 간의 상관분석

본 연구에서는 다중회귀모형 적용에 앞서 다중공선성 문제를 최소화하기 위해 변수들 간의 상관관계를 수행하였다. 이때 상관성이 높게 나타나는 변수들은 다중회귀모형 분석시 제외하고자 한다.

변수들 간의 상관관계는 Table 4에 정리하였으며, 농업지역과 녹지지역은 다른 변수들과 높은 상관관계를 보였으며, 시가화건조지역도 다른 변수들과 높은 상관관계를 보였다. 특히, 평균경사도는 단독주거시설, 상업·업무시설, 공공시설, 교통시설 등 시가화건조지역의 변수들 및 불투수율과 높은 부(-)의 상관관계를 보였다. 이는 경사도가 낮은 지역일 수록 단독주거시설 및 상업·업무시설 등 시가화건조지역이 차지하는 비율이 높음을 나타내며, 도시계획적 차원에서

환경사 및 평지 지역은 건축물 및 시설물 등의 설치가 양호한 입지조건을 갖추고 있기 때문이다. 또한, 1일 최대강우량 변수는 단독주거시설, 공동주거시설, 상업시설, 상업업무시설, 교통시설, 불투수율 등과 높은 양(+)의 상관관계를 보였으며, 1시간 최대강우량은 불투수율 변수와 높은 상관관계를 보였다. 이는 불투수율이 높은 지역이 강우에 의한 침수위험이 높은 것으로 이해할 수 있다.

일반적으로 다중회귀분석에서 변수들 간의 다중공선성이 높으면 변수들의 개별 설명변량을 정확히 해석하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다중공선성이 우려되는, 즉 변수 간의 상관성이 존재하는 변수를 식별할 필요가 있다. Table 4에서 볼 수 있듯이, 시설재배지와 과수원, 초지와 나지, 밭과 공공시설, 상업·업무시설과 교통시설, 1일 최대강우량과 1시간 최대강우량은 높은 상관성으로 인해 다중공선성 우려가 있는 것으로 나타났다. 따라서 다중회귀모형 적용 시에는 상관계수 0.7 이상인 변수인 시설재배지, 나지, 공공시설, 상업업무시설, 1시간 최대강우량 변수를 영향변수를 제외하였다.

4.2 침수피해지역과 토지이용 간의 관계 분석

4.2.1 분석방법

본 연구는 제주지역의 침수피해의 공간적 특성을 고려한

Table 4. Correlation Relationship Between Influence Variables

Type	rice paddy	field	house crop lands	orchard	ect-fields	forest	grass land	wet land	bare land	stream	de-tached houses	apart-ment houses	indus-trial Areas	com-mercial Areas	public facilities	transportation facilities	imper-vious cover	average slope	Daily max-imum precipitation	Hourly max-imum precipitation
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬	⑭	⑮	⑯	⑰	⑱	⑲	⑳
①	1																			
②	.200*	1																		
③	.631**	.288**	1																	
④	.386**	.185*	.720**	1																
⑤	-.009	.358**	.003	.066	1															
⑥	-.006	.096	.028	.184*	.159	1														
⑦	.191*	.489**	.330**	.446**	.532**	.298**	1													
⑧	.021	.216*	.430**	.502**	-.003	.024	.271**	1												
⑨	.368**	.444**	.394**	.520**	.592**	.282**	.821**	.256**	1											
⑩	.289**	.675**	.344**	.113	.070	.001	.146	.302**	.193*	1										
⑪	-.010	.136	.041	.084	-.034	-.003	.165	.067	.095	.060	1									
⑫	-.014	-.050	-.062	.044	-.041	-.035	.017	-.070	.004	-.051	.676**	1								
⑬	.019	.034	.070	.089	-.026	-.034	.157	.150	.070	-.014	.254**	.030	1							
⑭	.204*	.133	.179*	.185*	-.014	-.024	.184*	.137	.129	.080	.637**	.491**	.233**	1						
⑮	.367**	.817**	.418**	.174*	.209*	.001	.227**	.116	.289**	.647**	.096	-.017	-.057	.177*	1					
⑯	.188*	.529**	.344**	.400**	.129	.058	.434**	.384**	.347**	.341**	.663**	.399**	.373**	.758**	.366**	1				
⑰	-.007	-.080	-.074	-.076	-.061	-.100	-.045	.016	-.057	-.019	.690**	.677**	.258**	.667**	.027	.425**	1			
⑱	-.121	-.191*	-.148	-.010	-.111	-.055	-.084	-.066	-.050	-.211*	-.204*	-.150	-.110	-.195*	-.185*	-.217*	-.249**	1		
⑲	-.051	-.091	.102	.250**	-.078	-.010	.159	.303**	.135	-.099	.362**	.317**	.270**	.384**	-.132	.406**	.460**	.050	1	
⑳	-.056	-.086	-.012	.069	-.003	-.045	.071	.140	.084	-.110	.133	.135	.111	.157	-.112	.147	.229**	-.065	.772**	1

Note. **p≤0.01, *p≤0.05

방재대책을 검토하는데 의의가 있다. 이를 위해 침수피해지역과 영향변수들 간의 관계를 통해 검토하고, 다중회귀모형을 통해 어떠한 특성이 침수피해에 어느 정도의 영향력을 갖는지 파악하고자 한다. 다중회귀분석은 두 개 이상의 독립변수와 하나의 종속변수 간의 선형관계를 파악하는 방법이다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \beta_2 x_{2i} + \dots + \beta_k x_{ki} + \varepsilon_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

여기서 n 은 표본의 수, y_i 는 i 번째 종속변수, x_{ki} 는 i 번째 종속변수의 k 번째 독립변수, β_k 는 다중회귀모형의 매개변수, ε_i 는 오차항을 나타낸다.

본 연구에서 고려한 영향변수는 강우, 지형, 토지이용 등의 특성을 포함하며, 영향변수 간의 상관관계를 근거로 시설배치, 나지, 공공시설, 상업업무시설, 1시간 최대강수량 변수는 제외하여 회귀모형을 구성하였다. 한편, 본 연구는 침수피해에 영향을 미치는 변수 도출과 그 영향력에 근거한 방재대책 도출이 관심사이므로, 변수의 수를 최소화하면서 모형의 적합도가 높게 나타날 수 있는 stepwise 방법을 사용하여 다중회귀분석을 수행하였다.

4.2.2 영향변수 선정 및 회귀분석 결과

(1) Event 1

앞서 선정한 영향변수를 적용하여 Event 1의 침수피해에 대한 다중회귀분석을 수행한 결과는 Table 5와 같다. 그 결과, 침수피해에 대한 유의한 변수로는 밭, 과수원, 산림, 초지가 선정되었으며(Table 5 참조), 모형의 설명력은 약 99%로 매우 높게 나타났다. 유의수준 99%에서 각 변수들은 유의한 것으로 나타났으며, VIF값이 모두 약 1.0 정도로 나타나고 있다. 일반적으로 VIF 값이 10 이상일 때는 다중공선성 문제가 발생할 수 있다(Neter et al., 1996). Event 1에 대한 회귀모형 결과에서 다중공선성 문제는 없는 것으로 나타났다. 이상과 같은 결과는 밭과 과수원, 산림의 비율이 침수피해 발생과 유의한 관계가 있음을 보여준다.

Table 5. Result of Multiple Regression Analysis by Event 1

Type	Event 1		
	B	p-value	VIF
constant	-6163.384	0.748	-
field	1.093	0.000	1.140
orchard	1.776	0.000	1.089
forest	0.965	0.000	1.040
grassland	1.322	0.000	1.194
Model fit	F= 2066.378		R ² = 0.999

(2) Event 2

Event 2의 경우는 초지와 과수원이 영향변수로 선정되었다(Table 6 참조). 이때 본 연구에서 적용한 다중회귀모형은 약 86%의 설명력을 보여주고 있다. 또한, 상수항을 제외한 변수들의 VIF값은 1.4 정도로 나타났으며, 이는 변수들 간의 독립성을 인정할 만 수준임을 나타낸다. Event 2에 의한 모형 결과는 초지와 과수원 비율에 따라 침수피해 영향력이 확대될 수 있음을 말해준다.

Table 6. Result of Multiple Regression Analysis by Event 2

Type	Event 2		
	B	p-value	VIF
constant	25350.761	0.269	-
grassland	5.353	0.000	1.389
orchard	1.278	0.000	1.389
Model fit	F= 164.150		R ² = 0.861

(3) Event 3

Event 3에 의한 침수피해 결과를 대상으로 살펴본 결과, 영향변수는 밭과 과수원으로 나타났다(Table 7 참조). 이때 과수원은 Event 1과 Event 2의 결과에도 포함된 것인데, 논농사보다 과수원 또는 밭작물 등을 선호하는 제주지역의 농업 특성으로 이해할 수 있다. Event 3에 대한 회귀모형의 설명력은 약 99%로 매우 높게 나타났으며, 이는 밭과 과수원 비율에 따라 침수피해 영향이 크게 달라질 수 있음을 시사한다. 또한, 각 변수의 VIF값은 1.2 정도로 나타났으며, 모형 내의 다중공선성 문제는 없는 것으로 확인되었다.

Table 7. Result of Multiple Regression Analysis by Event 3

Type	Event 3		
	B	p-value	VIF
constant	-1205.828	0.499	-
field	1.221	0.000	1.205
orchard	1.460	0.000	1.205
Model fit	F= 3972.862		R ² = 0.995

(4) Event 4

Event 4의 침수피해에 대한 다중회귀분석을 수행한 결과는 Table 8과 같으며, 침수피해에 영향을 미치는 변수로는 과수원과 밭, 교통시설 등이 선정되었다. 이때 밭에 의한 침수피해 영향력이 가장 큰 것으로 나타났으며, 교통시설이 두 번째로 높게 나타났다. 이러한 결과는 태풍 차바에 의한 피해가 도로 등의 배수체계 문제로 인해 확대되었을 여지가 있음을 보여준다. 아울러 Table 8에서 볼 수 있듯이, Event 4에 대한 회귀모형의 설명력은 약 95%로 높게 나타났으며,

변수들 간의 다중공선성 문제도 존재하지 않음을 알 수 있다.

Table 8. Result of Multiple Regression Analysis by Event 4

Type	Event 4		
	B	p-value	VIF
constant	1209.550	0.124	-
orchard	1.085	0.000	1.091
field	4.597	0.000	1.005
transportation facilities	2.977	0.000	1.090
Model fit	F= 144.899		R ² = 0.956

4.3 결과 및 시사점

앞서의 다중회귀모형 결과를 정리해보면, 종속변수인 침수피해 면적과 토지이용 특성은 모두 양(+)의 상관성을 보여주고 있다. 특히, 본 연구에서 고려한 영향변수 중 과수원과 밭 등이 침수피해에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 녹지지역인 초지와 산림지역도 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 과수원, 밭작물 등을 선호하는 제주지역의 농업 특성을 나타내는 한편, 농경지 재해예방대책의 중요성을 보여준다. 이때 농경지의 침수피해 저감을 위해서는 여건(기후, 토지피복 등) 변화에 맞춰 배수시설 정비와 같은 배수체계 개선사업을 시행해야 하고, 침수위험 지역 상류부에 저류지 설치 또는 인근 저류지 정비 등의 적극적인 대책도 검토해야 한다(MAFF of Japan, 2009). 한편, 침수피해 우려가 매우 높은 지역에 대해서는 위험지역을 매수하여 저류지 또는 공원 등 공공의 목적으로 활용하는 방안 등도 고려할 필요가 있다.

또한, 시가화면적 비율이 높은 침수피해지역에서는 도로, 주차장 등의 교통시설도 유의한 영향을 나타냄을 알 수 있었다. 이는 도시지역을 대상으로 한 선행연구들의 연구결과와 유사한 결과로 불투수율의 증가가 침수피해에 영향을 미치고 있음을 말해준다. 또한, 교통시설의 유의성은 제주지역만의 유역형상 특성에서도 이유를 찾아볼 수 있다. 제주 하천유역은 한라산을 최상단으로 하여 바다로 길쭉한 형상을 갖고 있다. 이때 교통시설은 유역형상과 직각 형태로 건설되는 경우가 많아 도로 횡단부의 배수시설 성능이 확보되지 않을 경우에도 침수피해가 자주 발생하게 된다(Jeju Special Self-Governing Province, 2014). 따라서 제주지역의 기후특성을 고려하여 도로 횡단부의 배수시설 기준을 상향하고, 정례적 점검체계를 구축할 필요가 있다.

아울러 모든 침수피해지역의 평균 경사도는 5% 미만으로 완경사 및 평지지역에 위치하고 있다. 다만, 다중회귀모형에서는 평균경사도가 유의한 변수로 선정되지 않았으

나, 영향변수들 간의 상관관계 분석에서 평균경사도는 단독주거시설, 상업업무시설, 공공시설, 교통시설, 불투수율 등과 높은 부(-)의 상관관계를 보였다. 또한, 1일 최대강우량 변수도 단독주거시설, 공동주거시설, 공업시설, 상업업무시설, 교통시설, 불투수율, 평균경사도 변수 등과 높은 양(+)의 상관관계를 보였다. 이 같은 결과는 환경사지역인 연안 중심으로 주거지가 발달해있는 제주지역의 재해 위험성을 보여준다. 도달시간이 매우 짧은 제주의 수문환경을 고려할 때 주거지의 방재대책은 적정규모의 저류지 설치(운영방안, 유지관리 등), 하천 통수능 확보 등과 같은 시설대책이 선행되어야 하며, 보완적 수단으로써 공공시설(공원 등) 우수유출저감시설 확대, 저지대 차수판 보급, 건축물 이전권고(매우 위험할 경우) 등이 강화해나가야 할 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 제주지역을 대상으로 과거 침수피해지역의 토지이용 등 공간적 특성을 분석하고, 그에 따른 방재대책의 시사점을 살펴보았다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다. 토지이용 특성 중 제주지역 침수피해에 영향을 미치는 주요 요인은 과수원과 밭의 비율이며, 영향력은 도시지역보다 비도시지역에서 더욱 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 과수원과 밭작물을 선호하는 제주지역의 농업 특성을 나타내며, 제주지역에서 1차산업의 중요성을 고려할 때 농경지 재해예방대책이 강화될 필요가 있음을 시사한다. 즉, 농경지를 포함한 유역단위의 배수체계 개선, 저류지 설치 및 유지관리 등과 같은 적극적인 대책 마련과 동시에 논, 밭, 초지, 산림지역에 대해 토지이용 관리, 개발사업 규제 등의 사전예방적 대책도 강화되어야 할 것이다. 또한, 불투수율이 높은 환경사지역, 교통시설 등의 요인도 침수피해에 영향력을 미치는 것을 알 수 있었다. 이는 제주지역의 지형·수문 특성이 반영된 것으로, 하류부에 위치한 주거지의 침수피해 회피 전략과 도로 횡단부의 배수시설 성능 개선을 위한 노력이 필요함을 보여준다. 한편, 회귀모형에서 녹지 공간의 중요성도 확인되었는데, 제주 전역에서 개발사업이 확대됨에 따라 재해위험성이 악화되고 있으므로, 재해예방 차원의 불투수율 관리 등의 규제도 필요할 것이다. 이상과 같은 연구결과는 농경지 침수피해 저감을 위한 대책과 연안 저지대에 위치한 시가지지역에 대한 대책이 제주지역에 병행되어야 함을 시사한다.

아울러 본 연구에서는 대상 호우사상의 수, 자료 수집(대상 연도별 토지피복도 등) 등의 한계로 인해 영향변수 간의 차이를 정교하게 살펴보는데 한계가 있다. 따라서 향후 침수피해 사례를 지속적으로 분석해나간다면, 제주지역의 침수피해를 저감하는데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술 지역특성화사업 「제주권 국토교통기술 지역거점센터」의 (과제번호 19DRP-B076272-06)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Banba, M., and Okai, Y. (2017). Analysis on land use and building control for flood risk management of Japan and France: Case study of ordinance for river basin management of Shiga, Japan and flood management with PPRN of France. *Journal of the City Planning Institute of Japan*, Vol. 52, No. 3, pp. 610-616.
- Choi, C.I. (2003). A study on natural hazards vulnerability in urban area by urban land use change: In case of Kyonggi Province. *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 38, No. 2, pp. 35-48.
- Gyeonggi Research Institute (GRI). (2010). *Land use management strategy based on the distribution characteristics of storm damage areas*.
- Ha, K.C., Park, W.B., and Moon, D.C. (2009). Estimation of direct runoff variation according to land use changes in Jeju Island. *Economic and Environmental Geology*, Vol. 42, No. 4, pp. 343-356.
- Hirata, T. (2013). *Disaster risk evaluation based on the changes of land use and urban structure*. Hosei University Repository, Vol. 2, pp. 15:1-15:8.
- Jeju Special Self-Governing Province. (2014). *A master plan for the reduction of damage from storm and flood*.
- Kakimoto, R., Yamada, F., and Fujimi, T. (2012). Test for the effect of land-use regulation in flood hazard area using flood risk curve: Test for the effect of land-use regulation in Kosen District, Kumamoto City. *Journal of the City Planning Institute of Japan*, Vol. 47, No. 3, pp. 901-906.
- Kang, K.H., and Lee, K.H. (2017). The development of land use planning technique applying low impact development and verifying the effects of non-point pollution reduction: A case study of Sejong City 6 District. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 18, No. 7, pp. 548-553.
- Kang, S.J., and Jung, J.C. (2012). Study on the distribution characteristics of storm damage area: The case of Gyeonggi-do. *Journal of the Korean Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5D, pp. 507-517.
- Kim, E.S., Yeon, J.S., Shin, H.S., Lee, J.S., and Choi, H.I. (2014). Study on stormwater runoff reduction effects by LID application areas. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 2, pp. 309-316.
- Kim, M.M., and Kim, U.G. (2014). Inundation analysis of urban area considering climate change using SLEUTH model. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 14, No. 3, pp. 277-290.
- Kim, W.H., Lee, B.J., Kim, J.H., and Sim, O.B. (2013). A study on the urban disaster-prevention methods and analysis of flooding characteristics of 4-way intersection areas. *Crisisonomy*, Vol. 9, No. 6, pp. 81-93.
- Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement (KAIA). (2008). *Design criteria research for abnormal weather-disaster prevention*.
- Korea Environment Institute (KEI). (2007). *A study on natural environment-friendly natural disaster mitigation policy*.
- Korea Environment Institute (KEI). (2011). *Urban renewal strategy for adapting to climate change: Use of green infrastructure on flood mitigation*.
- Korea Land and Geospatial Information Corporation (LX). (2013). *Flood inundation trace report in 2012*.
- Korea Research Institute for Human Settlements (KRIHS). (2016). *Development of the urban flooding risk prevention system (I)*.
- Lee, B.J., Kim, W.H., Song, J.I., and Shim, O.B. (2013). Spatial analysis of flood damage characteristics of small and medium-sized cities and a study on urban planning methods for flood risk reduction. *Crisisonomy*, Vol. 9, No. 6, pp. 45-63.
- Lee, D.K., Sung, S.Y., and Jung, H.C. (2010). Estimating the effect of climate change and land use change on surface runoff change: Case study of 2020 Gwacheon City master plan. *Journal of Korea Planning Association*, Vol. 45, No. 5, pp. 241-248.
- Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF) of Japan. (2009). *Outline of agricultural land disaster prevention business brochure*.
- Ministry of Environment (ME) and Korea Environment Corporation (K-eco). (2013). *A research on investigation of impervious area rate in korea and improvement plan*.
- National Emergency Management Agency (NEMA). (2010). *A study on the establishment of urban disaster prevention performance targets considering climate change*.

- Neter J., Kunter., M.H., Nachtsheim, C.J., and Wasserman, W. (1996). *Applied linear statistical models*. New York, USA: McGraw-hill/Irwin.
- Park, C.Y. (2016). Implication and land use management strategy to mitigate inundation damage. *Jeju Development Forum*, Vol. 59, pp. 35-46.
- Park, C.Y., Shin, S.Y., and Son, E.J. (2013a). Analyzing the reduction of runoff and flood by arrangement of stormwater storage facilities. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 29, No. 1, pp. 45-54.
- Park, C.Y., Shin, S.Y., and Son, E.J. (2013b). Classifying flood prone areas in Seoul using multivariate analysis. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 13, No. 2, pp. 245-255.
- Park, M.K., Song, Y.S., Kim S.D., and Park, M.J. (2012). A study on the assessment method for high-risk urban inundation area using flood vulnerability index. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 12, No. 2, pp. 245-253.
- Saito, S., and Ubaura, M. (2012). Problem and actual condition of regulation of building restrictions to reduce flood damage: Article 39 of the building standards law. *Journal of the City Planning Institute of Japan*, Vol. 47, No. 3, pp. 445-450.
- Sakai, R., and Inohae, T. (2016). A study on relationship between reality of urbanization in terms of land use change and inundation assumption area: A case study of Saga lowland area. *Journal of the City Planning Institute of Japan*, Vol. 51, No. 3, pp. 401-408.
- Shin, S.Y., and Park, C.Y. (2014). Analysis relationship between land use characteristics and flood damage areas: The case of Seoul. *The Korea Spatial Planning Review*, Vol. 81, pp. 3-20.
- Yoo, C.J., Hong, S.H., Choi, H., and Nam, K.W. (2013). A study on flood area typology using the inundation trace map: A case study of Busan Metropolitan City. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, Vol. 31, No. 5, pp. 393-400.
- Yoshida, Y., Furumoto, K., and Banba, M. (2011). A study on the land use control for natural disaster prevention by “PPR” and other measures in France. *Journal of the City Planning Institute of Japan*, Vol. 46, No. 1, pp. 88-98.

Received	October 28, 2019
Revised	October 29, 2019
Accepted	November 11, 2019