

침수피해 저감을 위한 토지이용 전략과 시사점

제주발전연구원 박 창 열

1. 들어가며

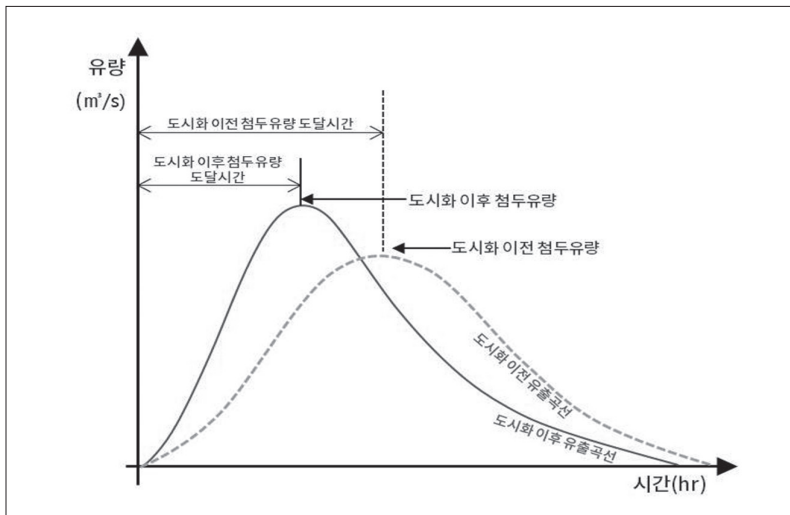
제주도는 탐라-고려-조선에서부터 1960년대까지 삼재도(三災島)라 불려질 만큼 재난에 취약한 지역이다¹⁾. 바람과 돌이 많고, 땅이 척박하고 물이 귀했기 때문이다. 제주지역의 토양 특성은 침투능이 높은 반면, 일정 규모 이상의 강우에는 유출량이 급증하게 되고, 한라산의 영향(하천경사, 유역형상 등)으로 유속이 갑작스레 증가하여 수재(水災)가 많이 발생하였다. 돌이 많고 토질이 척박하여 한재(旱災)를 자주 겪었으며, 태풍의 길목에 위치하여 잦은 풍재(風災)를 겪을 수밖에 없다. 즉, 제주지역의 입지여건과 기후환경 등은 불리한 재난환경을 여실히 보여준다.

제주지역은 최근 큰 변화(인구 및 개발수요 증가 등)에 직면해있다. 이러한 변화는 재난환경에 더욱 악영향으로 작용한다. 제주지역의 고질적 문제인 수재해 특성을 살펴보면, 태풍, 집중호우 등에 의한 외수 및 내수침수 피해가 빈번해지고 피해규모도 확대되고 있다. 이는 다양한 영향요인들에 의해 강우-유출 특성이 극단적으로 변화하고 있기 때문으로 그 변화의 정도는 도시지역에서 더욱 크게 나타난다(〈그림 1〉 참조). 지속적인 도시화의 영향으로 인해 유역특성의 변화는 유출규모를 증대시키며, 호우 규모 역시 기후변화와 기상이변으로 인해 극단적으로 변화하고 있다(IPCC,

1) 제주의 소리, 2016(재정리)

2007; 국토연구원, 2009; 소방방재청, 2010).

과거의 수방대책은 하천제방, 우수관망, 저류지 등과 같은 구조물적 대책에 집중되어 왔지만, 최근 집중호우에 의한 침수피해 증가는 유역 전반에 걸친 보다 종합적인 대책이 시급함을 시사한다(신상영·박창열, 2014; 국토교통부, 2015). 이로 인해 수방대책의 패러다임 역시 불확실한 기상이변에 대응하기 위한 보완적인 수단들을 모색하고, 물순환 체계를 회복하기 위한 방향으로 전환되고 있다(국토연구원, 2009; 서울특별시, 2013).



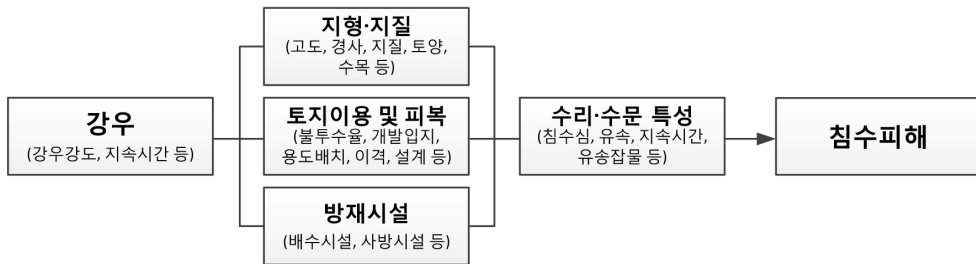
〈그림 1〉 도시화에 따른 유출수문곡선의 변화

국내외 수방대책을 살펴보면, 최근에는 장기적 관점에서 사전예방 차원의 재해저감 및 완화단계에 초점을 둔 비구조적 대책들을 중요시하고 있다. 이와 같은 비구조적 수방대책은 침수피해를 최소화하는 도시계획, 유출저감을 목적으로 한 토지이용관리, 우수유출저감시설 확충 등과 같은 적극적 대책과 풍수해 보험, 홍수에·경보시스템, 재해지도 작성 등과 같은 소극적 대책으로 구분할 수 있다(최충익, 2003; 정주철 등, 2007; 국토해양부, 2008; 강상준·조성한, 2011; 강상준·정주철, 2012; 박창열 등, 2013; 서울특별시, 2013; 이병재 등, 2013; 신상영·박창열, 2014). 그 중 도시계획적 수단을 통한 수해관리가 큰 정책적 관심사로 등장하고 있다. 이에 본 고에서는 제주지역의 침수피해 저감을 위한 토지이용 전략과 시사점을 살펴본다.

2. 침수피해 요인과 특성

1) 침수피해 영향요인

침수피해에 영향을 미치는 요인은 크게 강우특성, 유역특성, 유출의 수리·수문특성 등으로 구분할 수 있다(〈그림 2〉 참조). 이 중 유역특성은 지형, 지질·토양과 같은 자연적인 조건, 지표면의 불투수포장면, 개발밀도, 용도구성, 건축물·시설물 배치와 같은 토지피복 및 토지이용 조건, 우수관로를 비롯한 방재시설 조건 등으로 구분할 수 있다. 넓은 의미에서의 토지이용이란 토지의 피복 및 기능적 이용 상황을 말하며, 입지, 밀도, 구성, 배치, 형태 등 다양한 차원을 가진다(신상영·박창열, 2014).



〈그림 2〉 침수 피해에 영향을 미치는 요인

2) 침수 피해 유형과 특성

침수 유형은 우수의 발생원이 어디냐에 따라 하천에 의한 침수, 내수(內水)에 의한 침수, 해수에 의한 침수 등으로 구분할 수 있다. 도시지역의 침수는 과거 하천 정비뿐만 아니라 방재시설 정비수준이 높지 않았던 시기에는 하천이나 해안의 범람에 의한 외수(外水) 침수가 많았으나, 오늘날에는 제내지, 즉 시가지의 지형(저지대), 배수시설, 토지이용 등의 조건에 의해 발생하는 내수 침수가 빈번히 발생하고 있다. 특히, 내수 침수의 위험성은 기후변화에 의한 집중호우와 저지대 및 지하공간 등 취약공간의 개발에 의해 더욱 악화되고 있다.

(1) 하천으로부터의 침수

하천으로부터의 침수는 하천수 월류로 인해 발생할 수 있는데, 이는 제방 여유고가 부족하거나, 하도, 호안, 교량, 지장물 등 하천정비가 불량하거나, 하천이 적절한 용량에 정비되었다 하더라도 상류부 유량이 통수능력 이상으로 과다 유입되거나, 집중호우 시 하천에 떠내려오는 토사, 유송잡물 등의 영향에 의한 월류로부터 발생할 수도 있다. 많은 유량과 높은 유속에 의한 수압으로 인해 제방이 붕괴되어 침수가 발생할 수도 있다. 또한, 하천 하류부에서는 만조와 하천 유량의 복합적인 영향에 의한 범람이 발생할 수도 있다.



(a) 태풍 '차바' 한천 범람 피해 사례



(b) 태풍 '차바' 한천 범람위험 사례

〈그림 3〉 외수에 의한 침수 사례

자료 : 연합뉴스(2016.10.11.) 제주도, 태풍 차바 잠정 피해액 252억원... 특별재난지역 건의.

(2) 내수에 의한 침수

내수에 의한 침수는 배수시설(우수관로, 빗물받이 등)의 용량 부족, 배수시설의 노후화 및 균열, 병목·구배 불량, 토사퇴적, 막힘 등 유지관리 문제로부터 발생할 수 있다. 또는 배수유역이 과다하거나 배수경로가 비효율적인 경우에도 침수가 발생할 수 있다.

도시지역에서는 저지대 개발로 인해 배수시설이 제대로 갖추어졌다고 하더라도 집중호우에 의한 침수피해가 발생할 수 있다. 하천이나 해안의 외수위가 상승할 경우 저지대에서는 내수배제가 곤란하거나 역류할 수도 있다. 또한, 시가지 주변 지역으로부터 빗물이 저지대에 집중할 수도 있다.

불투수율 증가로 인한 노면수 확대는 자연적·인공적 배수시설로 이송되지 않고, 지표면을 따라 흐르는 유출수가 되어 하류부에 부담으로 작용한다. 선행강우로 인해

토양이 포화되어 있는 경우에도 노면수가 확대되어 유출규모 증대로 이어질 수 있다. 경우에 따라서는 지하수위의 상승에 의해 침수피해가 발생할 수도 있다. 폭우가 장기간 지속적으로 발생하면 지하수위가 급격히 상승하며, 이는 도심지역의 지하부에 침윤수로 침투할 수도 있고, 압력으로 작용할 수도 있으며, 저지대의 일시적인 용출수를 발생시킬 수도 있다.



(a) 2010. 6. 29. 집중호우 침수피해 사례



(b) 태풍 '차바' 한천 범람위험 사례

〈그림 4〉 내수에 의한 침수 사례

*자료 : 제주신문, 2010, 제주의소리, 2011

(3) 해안으로부터의 침수

해안으로부터의 침수는 월파나 해일에 의해 발생할 수 있는데, 월류된 해수의 저지대 집중 및 배수불량, 방파제나 호안과 같은 해안구조물의 유실·파손에 의한 침수 등이 발생할 수 있다. 또한, 해안선 침식에 따른 토지나 건축물, 시설물의 유실, 붕괴, 침수도 가능하다.



〈그림 5〉 해안지역에서의 침수 사례

자료 : 국토해양부, 2015

〈표 1〉 침수피해 유형과 원인

구 분	침수원인	
하천으로부터의 침수	하천수 월류	<ul style="list-style-type: none"> • 제방 여유고 부족 • 하천 정비 불량(하도, 호안, 교량, 지장물 등) • 상류부 유량의 통수능력 이상 과다유입 • 토사, 유송잡물 등의 영향에 의한 월류
	제방 붕괴	<ul style="list-style-type: none"> • 제방 붕괴로 인한 침수
	하류부 만조의 영향	<ul style="list-style-type: none"> • 만조와 하천유량의 복합적인 영향에 의한 범람
내수에 의한 침수	배수시설	<ul style="list-style-type: none"> • 배수시설(우수관로, 빗물받이, 빗물펌프장 등) 용량 부족 • 배수시설 유지관리 불량(노후화 및 균열, 병목·구배 불량, 토사퇴적, 막힘, 펌프장 운영 실패 등) • 배수유역 및 배수경로 비효율
	저지대	<ul style="list-style-type: none"> • 외수위 상승에 의한 저지대 내수배제 불량, 역류 • 주변 지역으로부터 우수의 저지대 집중
	토지피복 및 노면수	<ul style="list-style-type: none"> • 불투수율 증가 또는 토양포화로 인한 노면수 유출 증가 및 도달시간 단축
	산지부 영향	<ul style="list-style-type: none"> • 산지부로부터 토사 및 우수의 시가지 유입
	지하수	<ul style="list-style-type: none"> • 지하수위 상승에 의한 침수
해안으로부터의 침수	월파 또는 해일	<ul style="list-style-type: none"> • 월류된 해수의 저지대 집중 및 배수 불량 • 방파제, 호안 등 해안구조물의 유실·파손에 의한 침수
	해안침식	<ul style="list-style-type: none"> • 해안선 침식에 따른 유실, 붕괴, 침수

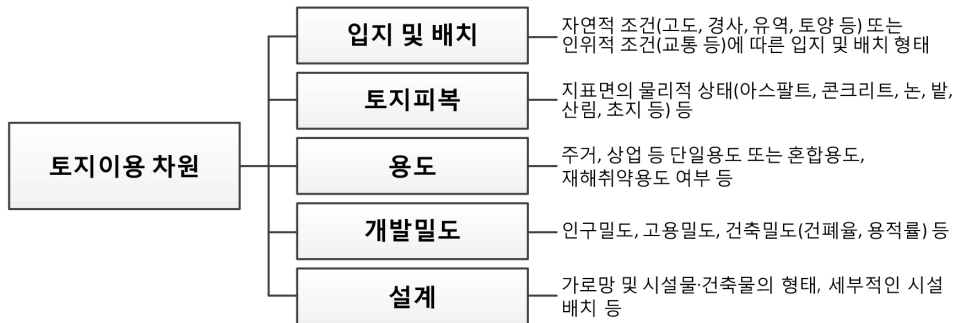
3. 침수피해 저감을 위한 토지이용 전략

1) 침수피해에 영향을 미치는 토지이용

침수피해에 영향을 미칠 수 있는 토지이용은 다양한 차원으로 구분할 수 있는데, 지형을 비롯한 자연적 조건과 관련한 입지 및 배치, 토지피복, 용도구성, 밀도, 설계적 특징 등으로 구분할 수 있다.

토지이용, 즉 지표면의 특성에 따라 배수시설이 감당해야 하는 유출부담의 정도가 다른데, 하늘에서 내린 경우는 일부 땅 속으로 침투되고 다른 일부는 증발산을 통해 대기로 흡수되며, 나머지가 노면과 배수시설에서 감당해야 하는 부분에 해당한다.

도시화에 따른 콘크리트, 아스팔트 등 불투수율의 증가는 일반적으로 침투와 증발산의 비중을 낮추고 유출을 증가시켜 동일한 경우에 대해 배수시설의 부담을 증가시키고 따라서 침수위험 또한, 높게 된다.



〈그림 6〉 침수피해에 영향을 미치는 토지이용 차원

참고로, 최근 미국의 저영향개발(LID: Low Impact Development), 영국의 지속가능도시배수시스템(SUDS: Sustainable Urban Drainage System), 호주의 빗물관리 도시설계(WSUD: Water Sensitive Urban Design) 등의 개념은 도시화에 따른 유출 및 수질관리, 빗물 재사용 등에 초점을 두고 있는 도시계획 및 토지이용과 관련된 설계기법들이라 할 수 있다(〈표 2〉와 〈표 3〉 참조).

〈표 2〉 주요 LID 대책과 수문학적 기능 평가

구 분	Bio-retention	Dry Well	Filter Strip	Swale	Rain Barrel	Cistern	Infiltration Trench
빗물 차단	높음	없음	높음	보통	없음	없음	없음
저류	높음	없음	높음	높음	없음	없음	보통
침투	높음	높음	보통	보통	없음	없음	높음
지하수 함양	높음	높음	보통	보통	없음	없음	높음
유출량	높음	높음	보통	보통	낮음	보통	높음
침투방류량	보통	낮음	낮음	보통	보통	보통	보통
유출 빈도	높음	보통	보통	보통	보통	보통	보통
수질	높음	높음	높음	높음	낮음	낮음	높음

자료 : Prince George's County, Maryland, 2000

〈표 3〉 지속가능도시배수체계(SUDS)의 주요 계획기법 사례

기 법	설 명
식생여과지대 (Filter Strip)	• 인근 불투수 지역으로부터의 유출을 처리하기 위하여 조성된 넓고 완만한 경사의 녹지대
저습지(Swale)	• 녹지로 피복된 넓고 얇은 통로로, 유출수를 이송하고 저류하며, 우수를 지하로 침투시킴
침투저류지 (Infiltration Basin)	• 유출수를 저류하기 위한 지표면의 저지대로, 미적 가치와 어메니티를 제공하기 위해 조경이 이루어짐
저류연못(Wet Pond)	• 수질처리 및 저류를 위한 영구적인 연못으로, 어메니티 및 야생동식물 서식처로서도 기능
다목적 저류지 (Extended Detention Basin)	• 평상시에는 건조한 상태로 공원 등 다른 목적으로 이용되지만, 일정 유출량 이상에 대해서는 저류기능을 담당
인공습지 (Constructed Wetland)	• 오염원 제거 및 동식물 서식처 제공을 위하여 조성된 얇은 습지대
여과배수로/다공집수관 (Filter Drain/Perforated Pipe)	• 여과배수로는 투수성 재료로 채워진 도랑으로 인근 지역의 노면수가 흘러들어 여과되고 이송되도록 한 것이며, 다공집수관은 여과배수의 바닥에 설치되어 우수를 집수하고 이송
Infiltration Device	• 일시적인 저류기능을 담당하며, 노면수를 지하로 침투시킴
투수성 포장 (Pervious Surface)	• 우수가 노면을 통과하여 하단부 저류층으로 침투하도록 함
지붕녹화 (Green Roof)	• 건물지붕의 배수층 상단부에 식생으로 덮음

자료 : CIRIA, 2007

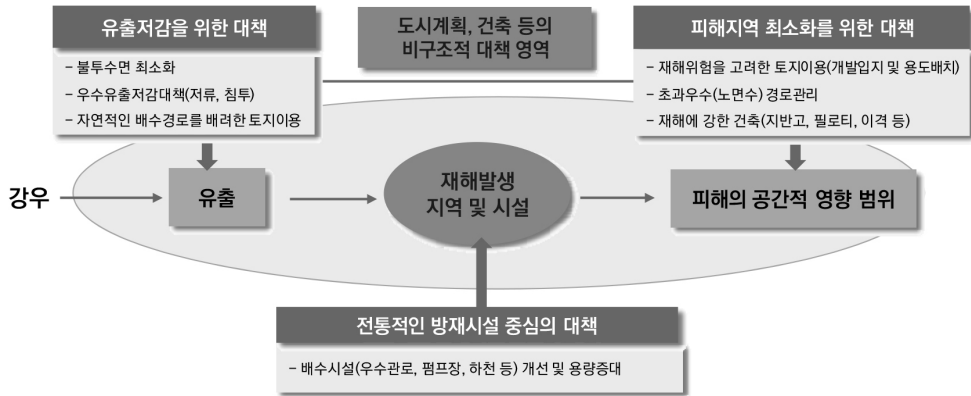
2) 침수피해 저감을 위한 토지이용 역할

침수피해를 줄이기 위한 전략으로서 토지이용의 역할은 두 가지 측면에서 볼 수 있다(〈그림 7〉 참조).

첫째, 우수유출을 최소화하는 토지이용 측면이 있는데, 이는 시가지의 불투수율 또는 유출계수를 낮추거나 침투 및 저류를 통한 유출저감대책을 통해 배수시설에 대한 유출부담을 최소화함으로써 궁극적으로 침수피해를 줄이고자 하는 간접적인 접근방법이다. 일반적으로 도시개발에 따른 물순환 왜곡을 자연상태에 가깝게 되돌리고자 하는 저영향개발(LID: Low Impact Development)과 같은 유출저감기법이 이에 해당한다고 볼 수 있다.

둘째, 초과우수로 인한 침수피해를 최소화하는 토지이용 측면이 있는데, 이는 배수시설용량을 초과하는 집중호우로 인한 피해를 줄이기 위하여 저지대를 비롯한 침수취약지역을 고려하여 개발입지와 토지이용을 제어하는 보다 직접적인 접근방법이

다. 일반적으로 좁은 의미의 침수피해를 줄이기 위한 전략이란 후자를 지칭하며, 과거 침수피해지역이나 장래 예상되는 침수피해지역을 식별하고, 그에 따라 개발입지를 제한하거나 주택을 비롯한 취약용도의 배치 또는 이전, 건축물 재배치, 및 승고(지반고 승고, 필로티) 등의 대책이 동원된다. 도시지역의 침수피해를 줄이기 위해서는 위의 두 가지 전략이 적절히 병행될 필요가 있다.



〈그림 7〉 침수피해 저감을 위한 토지이용 전략

자료 : 신상영 · 박창열, 2014

3) 환경친화적 토지이용 계획

침수피해 저감을 위한 토지이용 계획은 유역 내 우수를 발생지점에서 저류·침투 등을 통해 소화함으로써 하류부 부담을 최소화하도록 하여 재해영향을 사후적으로 저감하기보다는 사전에 예방하도록 하기 위함이다. 이를 위해서는 하천, 수계, 자연적 빗물유출경로를 대상지역의 공간구조 및 토지이용 배치계획 틀(framework)로 활용할 필요가 있다.

지역의 배수계획은 유역의 입지, 자연적 지형, 자연적인 배수체계 등을 고려하여 수립하도록 하되, 자연적인 상태에서의 배수체계의 구조와 기능을 고려하고, 빗물 유출과 오염원 배출을 최소화하려는 노력을 기울일 필요가 있다. 자연적 배수체계는 인위적 내수배제시설에 비해 유출수 이동의 효율성은 낮을 수 있으나 침투유출을 낮추는 효과가 있으며, 인위적인 내수배제시설 설치를 위한 건설비용을 절감시킬 수 있다.

자연자원의 활용을 통한 환경친화적 유출관리는 우수유출 및 홍수 감소, 저류기능 제공, 침투 촉진, 토양침식 및 토사유출 감소, 빗물오염 감소 등의 긍정적인 효과를 기대할 수 있다. 또한 자연적 배수시설, 하천, 빗물유출경로, 방재시설 등을 방재적 측면과 아울러 친수공간의 확보, 평상시 활용용도를 결합한 복합화, 빗물재활용 등 다기능·다목적 공간으로도 활용할 수도 있다.

〈표 4〉 재해저감을 위한 환경친화적인 토지이용 계획

구 분	주요 내용
자연요소의 보전과 활용을 통한 우수관리	<ul style="list-style-type: none"> • 녹지대 등의 보전과 활용 • 천변·호소 등에 자연적인 버퍼(buffer) 설정 • 홍수터로 기능하는 곳에 대한 개발 억제 • 급경사 구릉지 개발 억제 • 투수성 및 침식성이 강한 토양에 대한 개발 억제 • 자연적인 배수로 적극 활용
우수유출을 최소화하는 개발계획	<ul style="list-style-type: none"> • 개발형태를 자연지형에 순응 • 개발부지를 환경 측면에서 덜 민감한 지구로 유도 • 벌채 및 절토를 최소화 • 클러스터 개발을 통한 기능적 오픈스페이스 확보 • 창의적인 설계기법을 적용
불투수층 최소화	<ul style="list-style-type: none"> • 포장도로의 길이와 폭을 가급적 최소화 • 건물의 건폐면적을 최소화 • 포장된 옥외주차공간을 최소화하고 저류·침투를 위한 녹지대 조성

자료 : 국토교통부, 2015

4. 시사점

제주지역의 시가지 면적 확대와 인구 유입이 급증함에 따라 도시지역은 더욱 고밀화되고 있다. 특히, 제주시 동지역은 제주도민과 주요 기반체계 등이 집적된 지역으로서 사회·경제적 중요성과 과급효과가 크기 때문에 높은 수준의 방재체계가 필요하다.

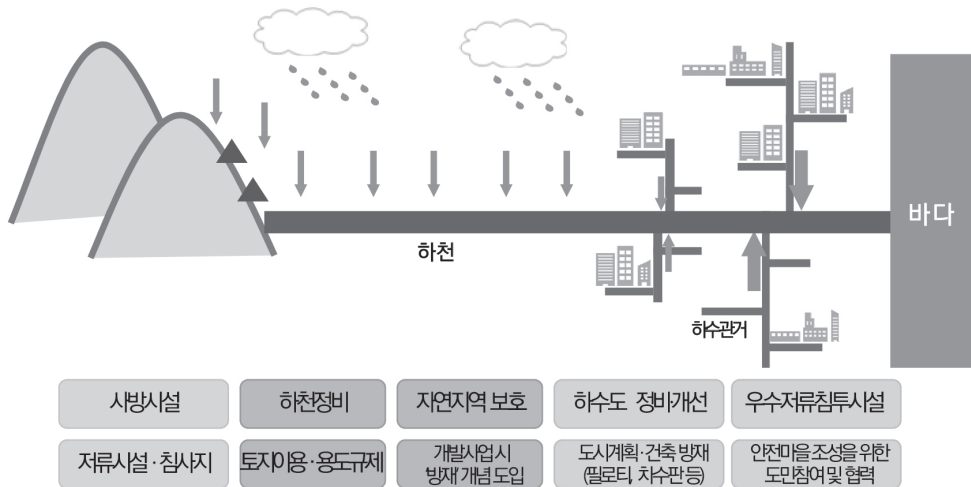
일반적으로 재해 발생 시에도 운영되어야 하는 핵심 기반시설은 경찰서, 소방서, 방재센터, 대피시설, 의료시설, 기간 교통망 등의 시설이 있으며, 원활한 재해 대응을 위해 이러한 핵심 기반시설의 입지 결정 및 배치에 있어서 여타의 시설들보다 보다 강화된 방재기준을 적용할 필요가 있다.

〈표 5〉 침수 시 방재관련 기능을 수행하는 기반시설

구 분	침수 시 방재기능을 수행하는 기반시설
교통시설	• 도로, 철도, 항만, 공항 등
공간시설	• 광장, 공원, 공공공지 등 공간시설
공공문화체육시설	• 학교, 운동장, 공공청사 등
보건위생시설	• 종합의료시설
유통공급처리시설	• 수도, 전기, 가스, 열공급설비, 방송통신시설, 공동구, 유류저장 및 송유설비

자료: 국립방재교육연구원, 2010

최근 들어, 제주지역은 급증하는 개발수요와 가용한 토지자원의 희소성으로 인해 재해에 위협한 취약지역(저지대 등)의 개발을 허용하고 있다. 이로 인해 지속적인 방재시설(저류지 등)에 대한 공공투자에도 불구하고 근본적인 위험해소가 되지 않고 재해가 반복되고 있으며, 기후변화와 기상이변은 재해위험을 더욱 가중시키고 있다. 따라서 근본적인 재해위험 해소를 위해서는 방재시설 투자뿐만 아니라 시가지 유역에서의 개발입지와 토지이용, 주요 기반시설과 건축물에 걸쳐 재해에 안전하고 강한 구조로 개선하는 종합적이고도 중층적인 대책이 필요하다(〈그림 8〉 참조) 제주발전포럼



〈그림 8〉 유역단위 방재대책 통합관리 개념도

자료: 박창열 등, 2016

* 참고문헌

- 강상준, 정주철(2012), “수해지 분포 특성에 관한 연구: 경기도 사례를 중심으로”. 대한토목학회논문집, 제32권, 제5호, pp. 507-517.
- 강상준, 조성한(2011), 도심형 빗물저류공간 조성을 위한 기초연구. 경기개발연구원
- 국립방재교육연구원(2010) 도시공간 및 시설에 대한 안전실태조사 및 방재계획 기준 설정 연구, 2010
- 국토교통부(2015), 폭우재해 저감 도시설계기술 개발.
- 국토연구원(2009), 기후변화에 안전한 재해통합대응 도시 구축방안 연구.
- 국토해양부(2008), 이상기후에 대비한 시설기준 강화 연구보고서
- 박창열, 신상영, 손은정(2013), “다변량 분석을 이용한 서울의 상습침수지역 유형화”. 한국방재학회 논문집, 제13권, 제2호, pp. 245-255.
- 박창열, 오승익(2016), “풍수해 저감을 위한 제주지역 방재성능 향상 방안”. JDI정책이슈브리프, 제252권.
- 서울특별시(2013), 서울특별시 빗물관리 기본계획(보완). 서울특별시.
- 소방방재청(2010), 기후변화를 고려한 도시방재성능 목표 설정 방안 연구.
- 신상영, 박창열(2014), “토지이용특성과 침수피해면적 간의 관계 분석: 서울을 사례로”. 국토연구, 제81권, pp. 3-20.
- 이병재, 김원현, 송주일, 심우배(2013), “공간분석을 통한 중소도시 수해특성 및 도시계획적 대응 방안 연구”. 한국위기관리논집. 위기관리 이론과 실천, 제9권, 제6호, pp. 45-64.
- 정주철, 이상범, 사공희, 이지현, 이달별(2007) 자연친화적인 자연재해완화정책에 관한 연구. 환경정책·평가연구원.
- 제주신보(2010), 29일 폭우로 도내 곳곳 침수 피해 잇따라.(2010.6.30.)
- 제주의소리(2011), 태풍 무이파 영향, 제주 최대 500mm 기록적 '폭우'.(2011.8.7.)
- 제주의 소리(2016), 제주는 '청정'과 '상생'이다.(2016. 11. 7.)
- 최충익(2003), “도시적 토지이용의 변화가 도시의 자연재해 취약성에 미치는 영향에 관한 연구”. 대한국토·도시계획학회지, 제38권, 제2호, pp. 35-48.
- CIRIA(2007) The SUDS Manual.
- IPCC(2007), Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Prince George' s County, Maryland(2000), Low-Impact Development Design Strategies: An Integrated Design Approach.