

# 気候変動と異常気象に対応した 異常洪水脆弱性分析システムの開発

DEVELOPMENT OF EXTREME FLOOD VULNERABILITY ESTIMATION SYSTEM COPING  
CLIMATE CHANGE AND ABNORMAL CLIMATE

水資源研究室 前任研究員 金炳植  
仁荷大学校 水資源システム研究所 研究員 張大元  
仁荷大学校 土木工学科 教授 徐炳夏

本研究は、異常洪水を評価するための定量手法として地域の異常洪水脆弱性指数を開発するとともに、この指数を用いてGIS基盤の脆弱性評価システムを構築することを目的とする。脆弱性指数を算定するために脆弱性指標を選定し指数算定法について研究を行った。また、各地域の特性が反映された地形学的、人文社会的、経済学的な脆弱性データと施設物データをデータベース化して資料を構築した。これらのデータを時空間データとして利用するために空間分析用データに構築し、地域の被害状況・種類、降水・極端な気象現象、潜在危険度等の分析に用いた。とりわけ、異常洪水に対する戦略として、気候変化が水工構造物に及ぼす影響について正確に評価するために、高解像度の地域気候モデルを用いて気候変動が朝鮮半島の持続時間 24 時間確率降雨量の特性に及ぼす影響について評価した。また、異常気象によって発生し得る降雨量について分析した結果をシステムに適用し、脆弱性評価を行った。

Key Words: 異常洪水, 気候変動, 脆弱性, 洪水リスク管理

## 1. 序論

21 世紀に入り、韓国を始めとする世界各国では気候変動に対する多様な取り組みが行われている。韓国の気温は 1980 年代後半から上昇しており、台風など気象異常の発生頻度も高まっている。韓国においても、夏期の豪雨災害の発生頻度が年平均 5.3 回 (1940-1970 年) から 8.8 回 (1980-1999 年) と増加している<sup>1)</sup>。

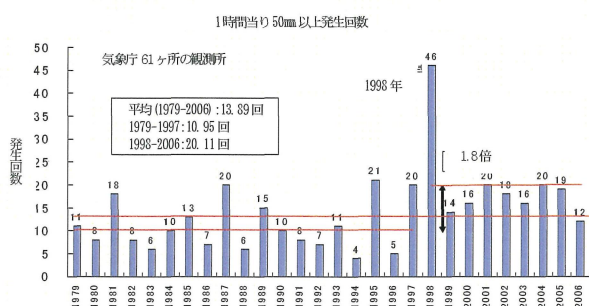


図 1. 各年度の降雨強度の変化

2000 年以後、台風等によって発生した気象災害により、経済的な被害が急激に拡大しており、2002 年台風「ル

サ」、2003 年台風「マエミー」による被害規模はそれぞれ 5 兆 4 千 696 億ウォン (死者 124 名、失踪者 60 名、被災者 8 万 8 千 625 名)、4 兆 7 千 810 億 (死者 117 名、失踪者 13 名、被災者 1 万 975 名) に上った。図 1 はここ 30 年間に発生した 1 時間当たり 50mm 以上の降雨の数である。この集中豪雨や洪水の全てが気候変動によるものとはいえないが、気候変動の影響によって朝鮮半島の降水極端事象の特性が変わりつつあることは間違いない。

一般的に、洪水対策には構造対策と非構造対策があるが、これまで韓国は構造対策にのみ力を入れてきた。異常気象による洪水の場合、構造対策だけで対応するには限界がある。構造対策は、予算や人力、構造物の周辺環境などによって実施が難しい場合がある上、異常洪水に合わせて構造対策の設計基準を限りなく強化するわけにはいかないからである。従って、異常洪水に対応するためには、構造的なアプローチとともに非構造的なアプローチを考慮しながら、適切に緩和 (Mitigation)、適応 (Adaptation)、リスク管理 (Risk management) を行わなければならない。こうした戦略を実行するためには、洪水対策の策定時に各地域の洪水脆弱性を把握して脆弱な地域に優先的に投資や対策を実施する必要がある。しかし、

これまで客観的な脆弱性評価のための根拠に関する研究はほとんど行われていない。

本研究では、異常洪水への対応戦略として、高解像度地域気候モデルを用いて気候変動が朝鮮半島の持続時間24時間確率降雨量の特性に及ぼす影響を評価するとともに、異常気象によって発生し得る降雨量について分析し、これを用いて気候変動が水工構造物の設計洪水量に及ぼす影響を評価した。そしてこの結果を気象学的な脆弱性指標として異常洪水脆弱性評価システムに採用した。異常洪水脆弱性評価システムは、気象学的な脆弱性、水文・地形学的な脆弱性、社会・経済的な脆弱性、洪水防御側面の脆弱性について評価するシステムであり、異常気象に対応して施設物の設計基準を強化したり洪水防御対策を展開する際の基本情報として利用される。

## 2. 異常洪水脆弱性指数の算定

### (1) 脆弱性に関する研究の背景と目的

韓国では流域総合治水計画に基いて治水区域単位別の洪水被害潜在性 (Potential Flood Damage; PFD) が算定されており、これを参考にして治水安全度 (施設物の設計頻度) を設定し、最終的に洪水防御対策について分析・評価を行っている<sup>2)</sup>。PFD は洪水被害に対する潜在的な脆弱性の程度を治水単位区域レベルで示す指数であり、PFD には洪水による潜在被害の程度を示す潜在性要素 (人口、財産、都市化率、社会基盤施設)、洪水被害の発生可能性と、防御能力の程度を示す危険性要素 (洪水被害額、確率降雨量、河川改修率、洪水調節容量) がある。しかし、PFD は大規模な流域を管理するために中規模・小規模流域の潜在性や脆弱性を定量的に表示しているだけで、実質的な洪水対策を提示することができないため、PFD を治水安全度として用いるには理論的な裏付けが足りない。本研究では、PFD の限界を改善し、異常気象による影響を考慮するために、気象学的な脆弱性も含めた異常洪水脆弱性評価システムを開発しようとした。

### (2) 異常洪水脆弱性指数の算定

洪水リスク管理 (Risk management) というのはある地域の洪水に対する安全性を定量的に表示するために、安全の概念と危険の概念を逆に利用した考え方である。我々は多様な種類や強度の危険にさらされているが、これらの危険を総称して危険度 (Risk) という。Ansell と Wharton (1992)<sup>3)</sup> は、危険度は「災難発生確率と災難により被った損失を結合して推定する (Risk = Likelihood X Consequence)」とし、Kron (2003)<sup>4)</sup> は自然災難の中で洪水関連の洪水事象や洪水事象発生確率を示す危険性 (hazard)、危険地域における経済的な資産や人命の露出性 (exposure)、洪水防御能力不足を意味する脆弱性 (vulnerability) の3要素を掛け合わせて洪水危険度を表現している。Benouar & Mimi (2001)<sup>5)</sup> は危険度は危険

性と脆弱性を災害管理の側面で考慮することで決められるとし、脆弱性とはある危険要素に対する強さと弱さの程度だとしている。この他にもリスクに関する多様な定義があるが、本研究ではリスク管理 (Risk Management) の側面で危険性 (hazard) と脆弱性 (vulnerability) 両方を取り入れたシステムの構築を目指した。Hazard は過去と現在の洪水に関する指標、Vulnerability は現在と未来に関する指標とした。また、既存の PFD と差別化するため、PFD の特長について研究するとともに、直接的な流域での洪水対応を考えて脆弱性に焦点を当てて研究を行った。

### (3) 脆弱性指標の選定

脆弱性指数を算定するために、まず脆弱性指標を選定した。脆弱性指標の選定においては、以前から国内で使われてきた指標も含めて考慮した。また NOAA で進められている CVAT (Community Vulnerability Assessment Tool)<sup>6)</sup> や日本の NILIM (National Institute for Land and Infrastructure Management) の FVI (Flood Vulnerability Index)<sup>7)</sup> 研究など、脆弱性関連の海外事例を調べて参照にし、韓国で特異的に使用できる部分を追加して指標を選定した。

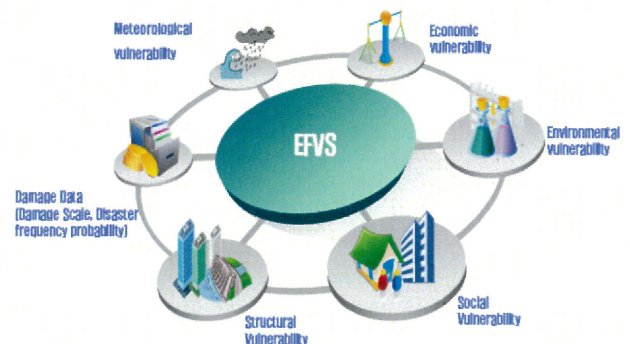


図2. 異常洪水脆弱性の選定における考慮項目

図2は洪水関連の脆弱性指標の選定において考慮した項目である。項目別に構築可能なデータと実際の洪水との関連性を考慮して、気象学的な脆弱性、水文・地形学的な脆弱性、社会・経済的な脆弱性、洪水防御の脆弱性の4つに分けて指標を選定した。また、GIS基盤の異常洪水脆弱性評価システムの計算方法と評価方法の特長を活かし、現在使用可能なデータとしての脆弱性指標と、これから構築・構築すべきデータとしての脆弱性指標の両方を考慮した。図3に選定された脆弱性指標を示した。

Components	classification	Indicators
Climatic	climate	Heavy rainfall
		Frequency of daily rainfall (P <sub>≥200</sub> mm/day)
Hydro-geological	hazard	Average slope of basin
		runoff coefficient (Using landuse map)
		Natural Hazard Risk Area
		Erosion Risk Area
		Sea Level Rise Zone
Socio-Economic	Society	Estimated Flood Inundation Map
		Density of Population
		Persons over age 70
	Economic	Financial ratios
		Land Use- Manufacturing
		Declared land value
	Environment	Toxic Release Inventory Site
		Solid Waste Facility
		Oil Facility
		Significant Habitat Areas
		Fire and Rescue
		Pump Station
Facility	Hospital	
	Waste Water Treatment Facility	
	Water Treatment Facility	
Protection	Countermeasure	Electric power station
		Flood Protection Capacity if Inland (Pump)
		Investment percent for structural counter measure (Levee)
		Flood Insurance MAP

図3. アンケートから選定された脆弱性指標

#### (4) 異常洪水に対する脆弱性の算定方法

選定された図3の指標を次の方法で評価した。まず、各項目を1-10段階に区分して評価し、重み付けを行った。計算された固有値を重ね、理想的な分配モードを用いて0-1の値を持つように評価した。このように算定された値は1-10等級に分類され、その結果が異常洪水脆弱性指数である。例えば、図4のとおり、ある流域の脆弱性指標として人口密度と流域勾配、降雨量を用いることにする。各指標の値は理想分配モードを用いて最大値に対する比率値で算出される。この値に、異常洪水に及ぼす影響程度に応じたウェイトを掛け、これを重ねると、脆弱性指標による小流域の値が求まる。

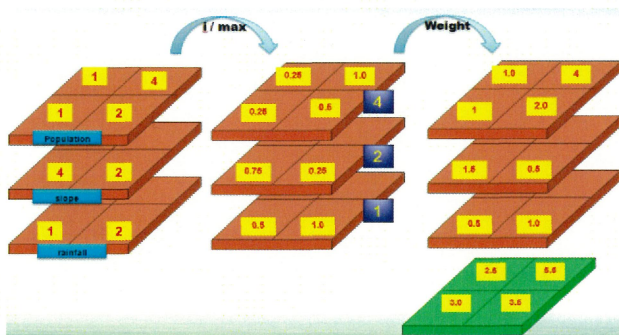


図4. 異常洪水脆弱性の算定法

### 3. 異常洪水脆弱性評価システムの構築

本研究では、異常洪水に対する脆弱性の算定法を電算化し、気象学的な脆弱性分析を評価するために、GIS基盤の脆弱性分析システムを構築した。GIS基盤の脆弱性評価システムを開発するためのフェーズ1では外国事例の分析、システム分析機能の調査、処理手順の調査を行いユーザー要求を分析した。フェーズ2ではシステム標準を設定するとともに、システムの機能と入出力の設計を行った。フェーズ3ではGISデータベースを設計し、フェーズ4では各脆弱性指標の分析モジュールの開発、フェーズ5では脆弱性評価システムを開発して最終結果を反映した。

#### (1) 気候変動脆弱性評価システムの開発と評価

本研究では、気候変動による異常洪水脆弱性を評価するために、異常洪水脆弱性において重点的に考慮した異常降雨事象の頻度を評価しようとして各気象観測所の異常気象傾向性について考慮することができるSTATE (STATistical diagnostic Tool for Extreme weather) プログラムを開発した(図5)。



図5. STATEプログラムの画面

STATEプログラムでは、Heavy rainfall threshold、Greatest 5-day rainfall、Average wet-day rainfall、Longest dry period、Heavy rainfall proportion、Heavy rainfall days、Hot-day threshold、Cold-night threshold、Frost days、Longest heat waveを用いて異常気象の傾向性を判断する。図6は66ヶ所の観測所に対して降雨異常特性を分析し、その結果の中でHeavy rainfall thresholdの夏期(6-8月)の結果を示したものである。「+」は過去から現在まで指数の傾向性が増加していることを意味し、記号が大きいほど傾向性が相対的に強いことを意味する。「-」はその反対である。

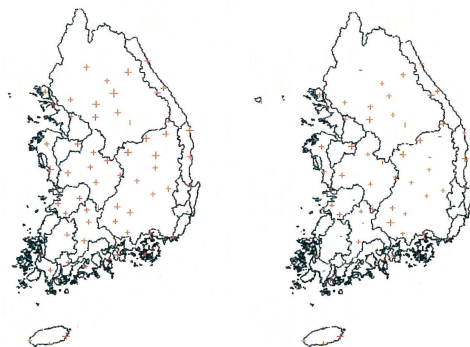


図6. STATEの結果(Heavy rainfall threshold)

これと共に、気候変動が異常降雨に及ぼす将来的な影響を評価するために、IPCC SRES A2温室効果ガスシナリオに基づき、高解像度(27km×27km)の気象庁RegCM3 RCMデータを用いて格子別の一日単位の降水時系列資料をシミュレーションした。また、バイアス補正手法と非正常性縮小手法(クオン・ヒョンハン他、2008)<sup>8)</sup>を用いて全国の観測所地点別の異常降雨データに時空間規模を縮小し、持続期間(固定時間)24時間に対する確率降雨量を算

定した。

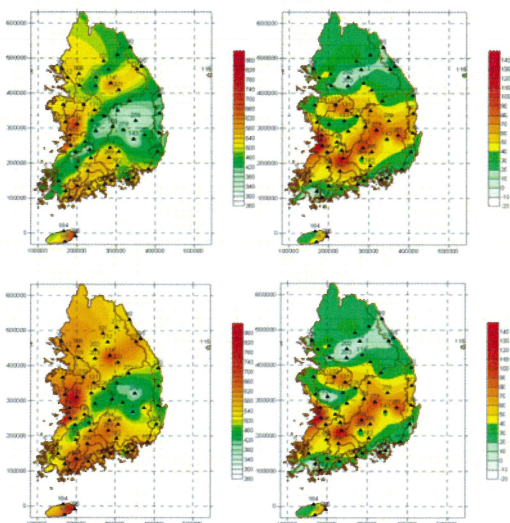


図 7. RCM から模擬した各再現期間の確率降水量の空間分布

図 7 に RCM を用いてシミュレーションされた各再現期間別の確率降水量の空間分布を示した。左上から右回りで RCM 降水量(100 年)、RCM 降水量と実測降水量の偏差(%、100 年)、RCM 降水量(300 年)、RCM 降水量と実測降水量の偏差(%、300 年)を示している。

#### (2) 脆弱性 DB の構築と評価モジュールの開発

研究とアンケートによって選定した異常洪水脆弱性指数 (EFVI) を算定するために、GIS 基盤の地形資料を基に各脆弱性指標の属性を分類して DB を構築し、その結果を layer で構成した。また、各脆弱性指標のウェイトを各ユーザーの目的に応じて入力できるように構成し、システムを通じて算定した EFVI の各属性を画面や凡例の形で表示するシステムを構築した。そして、このシステムをフェーズ 1<sup>st</sup> と 2<sup>nd</sup> に分け、フェーズ 1 では、PFD と類似した EFVI 値を表示するように構築し、フェーズ 2<sup>nd</sup> では洪水氾濫予想地域の小流域にズームインしてその地域に応じた対策を作るための意思決定支援システムを構築する計画であり、現在、構築が進められている。図 8 は EFVS の特長である。ウェイトをユーザが入力することができ、入力した指標の各流域の結果値を確認するためのウィンドウを設けていること、算出指数の結果の属性値の提示、結果に応じて一次的な洪水対策を作成できるなどの長所がある。これと同時に、各シナリオ別の流域の洪水氾濫予想図を作成してこれをシステムで利用した。

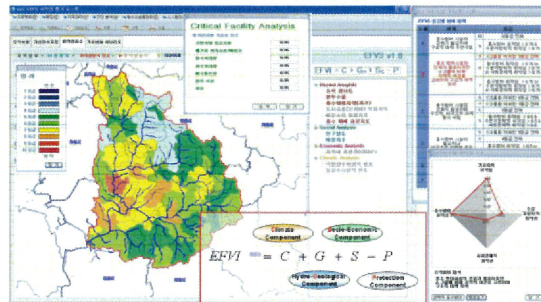


図 8. 異常洪水脆弱性評価システム

#### 4. 異常洪水脆弱性評価システムの適用及び結論

##### (1) 対象流域及び対象流域 PFD との比較

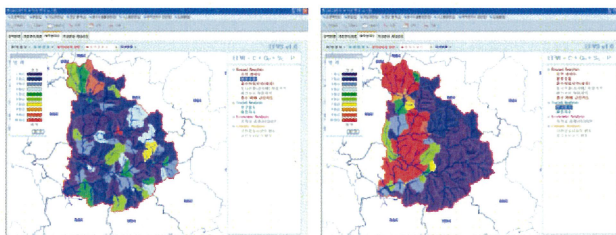
本研究は安城川流域を対象に行われた。安城川流域は流域面積 1,655.73km<sup>2</sup>、河川延長 605.24km<sup>2</sup> の河川であり、現在、流域総合治水計画が施行されていて PFD と修正 PFD の結果が算出されている流域である。流域は大都市、都市農村複合型都市、農業都市等で構成されており、最近、堤防崩壊等の洪水被害が発生している。

この研究では、安城川流域の脆弱性指標として 13 の資料を構築して試験的に適用した。ウェイトはアンケートによる AHP 分析の結果を用いた (図 9)。

components	indicators	Weights
Hydro-geological	Natural Hazard Risk Area	3
	Flood damage magnitude map	3
	Basin slope	2
	Runoff coefficient	2
Socio-economic	Fire and Rescue facility	1
	Water treatment Facility	1
	Pump Station	1
	Electric power Station	1
	Hospital	1
	Density of Population	4
Climatic	Financial ratio	3
	Frequency of Extrem rainfall (p>80mm/hr)	1
protection	Investment percent for structural counter measure(Levee)	2

図 9. 安城川流域に適用された指標とウェイト

図 10 は安城川流域に EFVS を適用した結果である。左上の図が流域の流出係数を評価した結果であり、右側が人口密度を評価した結果である。EFVI の最終結果によると、水原市と平澤市は最も危ない 9 等級であったが、これは脆弱性指標のウェイトのうち人口密度と財政指数の値が大きかったためである。



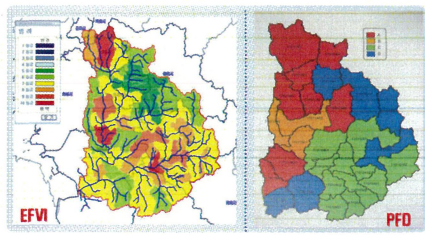


図 10. EFVS を適用した結果

EFVI と PFD を比較すると、かなり類似する部分が多いことが分かる。上図で安城川流域中間の脆弱部分は、以前、洪水氾濫が多発した地域であり、洪水氾濫図に対するウェイトが大きかったため PFD と相違する結果となった。

#### (2) EFVS の選択的な洪水防御への活用及び結論

EFVS フェーズ 2<sup>nd</sup> では、上記の脆弱性を考慮して、小流域における脆弱地点を探して地区レベルの適切な洪水対策を提示する。小流域をシステムで選択すると図 11 の流域がズームインされ、洪水氾濫図あるいは洪水氾濫予想図がどの地点に位置するかが分かる。

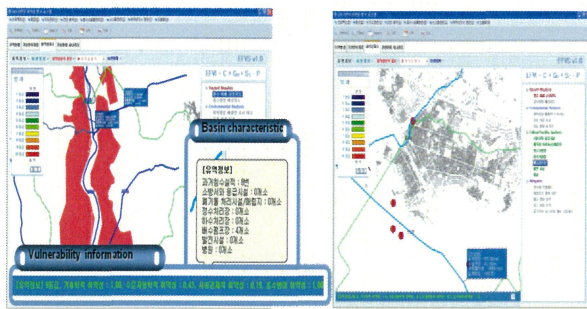


図 11. EFVS 2nd Step

またここでは、指標を選択すると EFVI 指数算定時に利用した社会・経済・環境的な重要施設物の位置が画面に

表示され(図 11)、意思決定支援ボタンを押すとその地域に適合した最終的な洪水防御方策が示される。

現在、知識基盤の意思決定を支援するために、洪水対応事例の構造化を行っている。そして、各施設物のウェイトに応じた左右・上下流に対する河川の脆弱性を明らかにするための研究を進めている。この研究は、流域の洪水対策を最終的に判断しなければならない意思決定者が重み付けを変えたり施設物の重要度を考慮しながら適切に洪水対策を進める上で重要な根拠資料として活用できるものと思われる。

#### 参考文献

- 1) サムスン経済研究所：気候変動にどう対応するか、2007
- 2) 建設交通部：水資源長期総合計画、2001.
- 3) Ansell, J., Wharton, F.: Risk: Analysis, Assessment and Management. John Wiley&Sons, pp. 203-211. 1992.
- 4) Kron, W.: Keynote lecture: flood risk = flood risk × exposure × vulnerability. proceedings of the second international conference on flood defence, 2002.
- 5) Benouar, Djillali, and Ahcene Mimi. "Improving Emergency Management in Algeria." Paper presented at Global Alliance International Workshop on Disaster Reduction, August 18-22, 2001
- 6) National Oceanic and Atmospheric Administration Coastal Services Center.:Coastal Storms Initiative-Florida Pilot Risk and Vulnerability Assessment Tool, 2004.
- 7) Richard F. Connor.: Flood Vulnerability Index, Japan Water Forum . World Water Forum. 2006.
- 8) クォン・ヒョンハン, 金炳植, 尹錫永, ペ・ヨンヘ 「気候変動シナリオを考慮した模擬手法に関する CWGEN 研究」韓国水資源学会, 2008