홍수예경보 시설 및 운영시스템에 대한 웹기반의 평가체계

Web-based Evaluation Framework for the Flood Warning Facilities and Operational System

강부식*·이주헌**·홍일표***·권진욱****

Kang, Boosik·Lee, Jooheon·Hong, Ilpyo·Kwon, Jinwook

요 지

세계기상기구(WMO)에 의하여 홍수예경보시스템의 평가를 위하여 개발된 MOFFS Ver.3의 개선을 위하여 특정유역의 홍수방어체계의 취약성을 평가하고 홍수방어시스템의 완성도를 높이기위한 DSS-FOP를 개발하였다. DSS-FOP는 지점별, 홍수사상별로 예보시스템 운영결과를 간단한 평가양식에 나타내는 시스템이며, 홍수방어구조물(Flood control infra)과 홍수조절운영(Flood control operation)으로 분류한다. 홍수방어구조물은 수문관측, 홍수방어구조물, 홍수조절지휘소로, 홍수조절운영은 자료처리 및 전송, 홍수예측모형, 예경보발령의 총 6가지 주요평가항목과 하부의 23가지 세부평가항목으로 구성하였다. 점수부여체계는 최대점수, 목표점수, 성과점수, 부족점수, 취약점수의 산정을 통하여 구조물인프라와 운영측면에서의 시스템취약부분을 평가·진단할 수 있도록 하였다. 개발된 DSS-FOP를 이용하여 국내의 한강유역과 UN/ESCAP 태풍위원회의 회원국인 태국의 Khlong U-Taphao 유역을 대상으로 적용하고 그 결과를 비교 평가하였다. 한강유역의 경우 하천정보센터 신설 및 조직강화로 인적자원측면에서 높은 성과점수를 보였으며, 향후 수문레이더 설치 등으로 관측분야에서의 개선이 기대된다. 태국의 Khlong U-Taphao 유역의 경우 목표수준을 다소 조정할 필요가 있으며, 비상행동계획의 마련이 시급하다. 더불어 홍수방어구조물에 대한 지속적인 투자가 필요한 상황이다. 이러한 DSS-FOP의 평가결과는 국가별, 유역별, 호우사상별로 관리되며, 태풍위원회 회원국의 적용 및 기술지침의 작성을 위해 많은 평가 및 조사가 축적되어야 한다.

핵심용어: 홍수예경보시스템, MOFFS, 홍수예측모형, UNESCAP

1. 서론

홍수예경보시스템은 홍수의 위험으로부터 인명과 재산을 보호하기 위하여 홍수량의 추정 및 예측, 잠재적 홍수피해에 대한 경보발령을 수행하기 위한 구조적/비구조적 방재수단이다. 이러한 홍수예경보시스템의 주요목적은 홍수시에 인명과 재산피해를 최소화하기 위한 적절한 대응책을 마련할 수 있도록 국민들에게 예상되는 홍수의 규모 및 발생가능한 시간을 정확히 예측하여 전달하는데 있다. 어느 국가 혹은 어느 유역이든지 나름대로의 홍수예경보시스템이 구축되어 있으나 고도화의 정도에 있어서는 편차가 매우 크다. 특히, 저개발국가들은 홍수방어를 위한 수공구조물

* 정회원·단국대학교 토목환경공학과 조교수·공학박사·(E-mail: bskang@dankook.ac.kr)

** 정회원·중부대학교 토목공학과 부교수·공학박사·(E-mail: leejh@joongbu.ac.kr)

*** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구실 책임연구원·공학박사·(E-mail: iphong@kict.re.kr)

**** 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원·공학석사·(E-mail: jwkwon@kict.re.kr)

이나 수문관측설비의 구축이 미흡하여 잠재적 홍수피해가 심각한 수준이다.

2. 기존의 홍수예경보 평가시스템 구성 및 최근 추세

2.1 기존 홍수예경보 평가시스템

1980년대에는 세계기상기구의 적도지역 태풍 프로그램에 가입되어 있는 국가들을 중심으로 그들이 보유하고 있는 홍수예보시스템의 성능을 평가하기 위하여 수차례의 모임이 이루어졌으며 주로 홍수예보시스템 운영결과를 중심으로 그래픽 및 수치자료 등의 출력자료를 위주로 하는 평가가 이루어 졌다. 하지만 이와 같은 평가기법은 각 시스템의 평가 자료를 준비하는데 상당한 시간과 노력을 필요로 하며 평가결과 역시 정확한 문제점을 파악하여 제시하지 못한다는 이유로 인하여 MOFFS Ver.3의 개발이 시도되었다. MOFFS(Management Overview of Flood Forecasting System) Ver.3은 90년대 초 외국의 초기 개발 중이거나 혹은 개발의 여지가 많이 남아있는 홍수예보 시스템을 평가하기 위한 기준으로 만들어진 것으로 현재의 통신체계, 기상레이더 및 위성의 활용, 물리적 기반의 강우-유출모형의 활용등에 대한 평가요소를 반영한 개선 및 보완이 필요하다.

2.2 홍수예경보 시스템의 최근 추세

최근 강우예측에 있어서 기상수치예보와 수문레이더, 인공위성등이 활용됨에 따라 홍수예경보 시스템의 구성이 과거에 비해 근본적인 변화를 겪고 있다(Krzysztofowicz, 1995). 이러한 변화는 통합수문기상서비스라는 형태로 일컬어지는데, 선진국인 미국에서도 1993년의 대홍수이래로 치수대안설정에 있어서의 다목적기법을 포함한 통합수문기상서비스의 연구가 집중적으로 이루어져 왔다(NOAA, 1994). 홍수방어를 위한 경보시스템과 응급조치계획은 완벽할 수 없고 국가별 상황에 따라 그 기준이 달라져야 하겠지만 선진화된 관측장비와 운용기술을 보유하고 있는 미국의 사례는 시사하는 바가 크다. 더불어 정량적강수예측과 수문레이더의 활용은 정확도 측면에서 논란이 계속되고 있지만 이는 기상수치예보와 수문레이더의 기계적 완성도와 관측밀도, 품질제어(Quality control)기법의 발전에 따라 개선되어지고 있는 추세이다. 분포형 강우유출모형의 활용성 또한 기존의 집중형모형과의 상대적 비교를 통해 이슈가 되고 있는데, 수문곡선모의결과에 내재되어 있는 오차는 모형자체의 물리적 혹은 수학적 기법과 입력자료에 포함된 오차등이 복합적으로 작용하고 있는바 분포형모형의 계산과정 자체는 집중형모형에 비하여 유출과정에서의 수문동력학적 특성을 모의하는데 유리하다고 알려져 있다(Vieux, 2004). 한편 유럽에서는 EURO 홍수연구사업의 성과물인 FFWRS가 운영되고 있으며, 네덜란드, 영국, 독일, 프랑스, 포르투갈등지에서 평가된바 있다.

3. 홍수예보시스템 평가체계

3.1 DSS-FOP의 구조

DSS-FOP는 기존의 MOFFS를 기반으로 발전시킨 평가체계로서 특정유역의 홍수방어체계의 취약성을 평가하고 홍수방어시스템의 완성도를 높이기위한 치수대책의 수립과 우선순위결정을 위한 진단프로그램으로 활용하기 위하여 개발되었다. 따라서 MOFFS가 홍수예경보시스템자체의 평가에 그친 반면 DSS-FOP는 구조적 홍수방어시설물에 대한 평가와 비구조적 홍수예경보시스템에 대한 평가로 이원화되어 있다. 구조적 홍수방어시설물의 평가는 시설물의 홍수방어능력과 운영체계가 평가의 주요요소이며, 비구조적 홍수예경보시스템의 평가는 개별홍수사상에 대한 홍수예측능력 및 경보발령의 적절성을 대상으로 평가하게 된다. 즉, 홍수 기간 중 홍수예보시스템을 운영하는 가운데 나타나는 결점(최소한의 조건에 미달되는 상태)을 평가하게 된다. 이러한 평가체계는

DSS-FOP와 기존 MOFFS 모두 공통적으로 상하수도관망 시스템의 관리에 효율적으로 적용된 바 있는 포인트기반의 STIRIF(Lambert, 1982)에 기반을 두고 있다.

표 1. DSS-FOP의 평가요소

구 분(점수)	주요평가항목(점수)	세부평가항목
홍수방어인프라 (110)	수문 관측시설 이용 (50)	- 기상예측 자료의 가용여부 - 위성 및 레이더 자료 - 강수관측망 - 수위관측망 - 수위관측소의 기준
	홍수 방재시설 (30)	- 홍수저류용량 - 하천개수율 - 시설물 운용 및 유지 관리
	홍수 통제소 (30)	- 홍수조절시설 - 홍수통제소(운영자수) - 홍수통제소(교육프로그램)
홍수조절운영 (140)	자료 전송 및 처리 (50)	- 강우 자료의 전송 - 수위 자료의 전송 - 기상학적 예보들의 전송체계 - 댐 자료의 전송 - 위성 및 레이더 자료의 전송체계
	홍수 예보 모델 (55)	- 홍수예측에 소요되는 시간 - 홍수예보모형의 유형 - 예보의 신뢰성 - 사용자 인터페이스 환경
	예보 및 경보 발령 (35)	- 비상대처계획 - 다음 단계 이용자에게 전달 - 최종 이용자에게 발령의 만족도

3.2 점수부여체계

DSS-FOP는 STIRIF의 점수기반의 평가체계를 기반으로 하고 있다. STIRIF에서의 평가항목은 정량적 항목과 정성적 항목이 있는데, 정성적 항목도 지점항목, 전기/기계 장비, 처리공정의 경우는 부재)에서부터 양호까지, 환경평가항목은 지속적에서 부터 부재까지, 점수는 0점에서 5점까지 부여되는데, 평가항목에 따라서 방류허용기준은 15%미만에서 95~100%까지 각각 해당되는 점수로 환산되어 평가되어진다(표 2).

표 2. STIRIF의 점수부여체계(Lambert, 1982)

Points Rating	Site factors, Elec/Mech equip. Treatment process	Environmental aspects	Effluent compliance
0	Non-existent	Continual	<15%
1	Deplorable	Frequent	15% to 34%
2	Very Poor	Regular	35% to 54%
3	Poor	Occasional	55% to 74%
4	Reasonable	Rare	75% to 94%
5	Good	Absent	95% to 100%

DSS-FOP도 점수기반의 평가체계라는 점은 STIRIF와 같으나 최대점수, 목표점수, 성과점수, 부족점수, 취약도점수등의 평가인덱스 산정을 통하여 결과에 대한 해석이 용이하도록 구성한 점이 STIRIF에 비하여 개선된 점이다. 각 평가인덱스의 산정방법 및 의미는 다음과 같다. 최대점수(Maximum points)는 시스템이 이상적으로 구성되고 운영되었을 경우에 해당하는 점수이다. 목표점수(Target points)는 경험이 풍부한 유역의 치수운영자가 판단하는 주관적인 점수로서 유역의 유출특성과 강우특성, 유역의 중요도(도시유역, 자연유역), 홍수예경보시설의 운영상 난이도등을 감안하여 해당유역에서 필요하고, 동시에 구축가능한 시설물과 운영체계에 대한 현실적인 최적의

조합에 대한 점수이다. 성과점수(Achievement points)는 홍수예보 지점에 대한 홍수예보업무를 수행함에 있어서 실질적으로 운영되는 상황에 대한 평가이다. 부족점수(Deficit Points)는 각각의 세부평가 항목별로 (T-A)의 절대값을 계산하여 평가된다. A가 T보다 큰 경우는 D는 영(0)으로 간주한다. 취약점수(Weakness Points)는 각각의 세부평가 항목별로 (Max-T)를 계산하여 홍수사상별로 평가되어 진다. W는 유역의 관리자가 목표로 하고 있는 홍수예보시스템이 이상적인 홍수예보시스템에 어느 정도 근접해 있는가를 평가하는 기준이 된다.

3.3 홍수예보모형의 평가

6가지의 주요평가항목중 홍수예보모형은 실제 예경보를 발령하는 근거가 되므로 중요도가 특히 높다고 할 수 있다. MOFFS에서는 홍수예보모형이 자료처리(Data processing)에 포함되어 있었으나 그 중요도를 감안하여 DSS-FOP에서는 별도의 주요평가항목으로 분류하여 평가가중치를 상향하였다. 홍수예보모형의 평가에 영향을 미치는 요소들은 선행예보시간, 유역면적에 따른 영향, 모델링기법, 홍수예측의 정확도와 예보시간의 적절성, 홍수예보기준수위등이 있는바, 각각의 의미와 평가기준에 미치는 영향을 검토하였다.

4. 홍수예보시스템 적용사례

4.1 한강유역

한강은 수도 서울을 관통하는 우리나라 중부의 최대하천으로서 크게 북한강수계와 남한강수계로 구성되어 있다. 유역면적은 26,356㎢ (북한지역 8,455㎢ 포함)이고, 유로연장은 481.7㎞, 유역 평균은 55.8㎞, 유역형상계수는 0.119인 남한 제1의 하천으로 전 국토면적의 약 23%를 차지하고 있다. 한강권역 홍수예보를 발령하는 기준지점은 10개소(한강 6, 임진강 2, 안성천 2)이다. 평가대상 호우사상은 2006년 7월의 호우사상을 선택하였다.

표 3. 2006년 홍수예보 발령현황

기 간	구 분	발령지역	발령일시	비고
2006.07.12	홍수주의보발령	전곡지점	07.12 19:30	-
	홍수주의보해제	전곡지점	07.12 20:30	-

4.2 태국 Khlong U-Taphao 유역

Khlong U-Taphao강 유역은 태국의 남부에 위치하고 있으며 유역면적은 약 2,400㎢이다. Khlong U-Taphao은 총길이 165km의 Thai-Malaysian 경계를 따르는 산맥으로부터 비롯된 본류하천이다. 2000년에 Hat Yai town에는 심각한 홍수가 있었는데, U-Taphao 제방을 월류한 최대 1.5m에 달하는 범람수심이 흘러나와 마을지역에 인명과 재산피해가 있었다. DSS-FOP 적용을 위하여 2005년 11월 발생한 호우사상에 대하여 평가를 실시하였으며, 결과값은 비교적 만족할만한 수준이었다.

4.3 DSS-FOP 적용결과

한강유역은 수도권을 관류하는 우리나라의 최대하천으로서 그 중요도가 매우 높은 하천이다. 따라서 목표점수(T)는 상대적으로 매우 높게 설정되어 있다. 강우관측소는 개소당 172.2㎢이며 평균이격거리는 13.1㎞로서 WMO의 기준을 만족시키고 있다. 더불어 현재 계획되어 있는 전국수문

레이다 네트웍이 완성되면 강수관측분야의 인프라가 크게 개선될 것으로 판단된다. 현재 강우-유출모형은 저류함수모형을 주모형으로 사용하고 있다. 저류함수모형은 1980년대부터 실무에 활용되어 왔으며 지속적으로 시스템개선작업이 병행되어 왔기 때문에 운영자들의 홍수유출모형에 대한 경험과 숙련도는 상당히 높은 것으로 판단된다. 한강유역의 경우 최근 조직개편으로 하천정보센터가 신설되면서 연구인력이 대폭보강되어 인적자원측면에서 상대적으로 높은 성취도를 보이고 있다. Khlong U-Taphao 유역의 경우 목표점수는 한강과 비슷한 수준을 보이고 있는 반면 목표 대비 성과를 보여주는 부족점수(D)는 운영과 인프라항목에서 목표대비 33.8%와 31.1%로서 미흡하게 나타나고 있다. 이러한 이유로는 목표수준이 과다하게 높게 설정되어 있거나 실제 운영이나 인프라가 미흡하기 때문으로 해석될 수 있는데, Khlong U-Taphao 유역의 경우 유역의 규모가 그리 크지 않기 때문에 목표점수를 다소 하향조정할 필요가 있다고 보여진다. 시스템운영에 있어서는 자료전송 및 처리분야와 홍수예보모형의 지속적 개선과 보완이 필요하다고 보여지며, 특히 비상행동계획(Emergency Action Plan)의 마련이 시급하다고 판단된다. 인프라항목에서 유역면적이 한강에 비하여 작은 규모이기 때문에 단위면적당 관측설비구축현황에서는 크게 떨어지지 않는다. 다만, 댐이나 홍수저류지, 또는 하천개수현황은 성과점수가 상당히 미흡한 수준이므로 홍수방어구조물에 대한 지속적 투자가 필요한 상황이다. 홍수통제소에서의 관리인력확보나 교육훈련분야에도 보완이 필요하다.

5. 결론

DSS-FOP는 각 홍수예보시스템의 홍수예보 지점별, 홍수사상별로 예보시스템 운영결과를 간단한 총람평가양식에 나타내는 시스템이다. 1980년대에는 세계기상기구의 적도지역 태풍 프로그램에 가입되어 있는 국가들을 중심으로 그래픽 및 수치자료 등의 출력자료에 의한 홍수예보시스템의 평가가 주로 이루어졌다. 하지만 이와 같은 평가기법은 상당한 시간과 노력을 필요로 하며 정확한 문제점을 파악하지 못하였기 때문에 MOFFS Ver.3의 개발이 시도되었다. MOFFS Ver.3은 홍수예보시스템을 정량적으로 평가하기위한 간단한 평가시스템이지만 평가자의 주관에 따라 많은 변동이 발생할 수 있으므로 이를 좀 더 객관화 할 수 있는 방법이 추가되어져야 할 것으로 판단되고, 또한 MOFFS Ver.3의 평가항목에 대한 추가적인 고려를 위하여 웹기반의 DSS-FOP를 개발하였다. 개발된 DSS-FOP를 이용하여 국내의 한강유역과 UN/ESCAP 태풍위원회의 회원국인 태국의 Khlong U-Taphao 유역을 대상으로 하여 DSS-FOP를 적용하고 그 결과를 평가하였다.

참 고 문 헌

1. Krzysztofowicz, Roman (1995), Recent advances with flood forecast and warning systems, *Reviews of Geophysics*, Vol. 33, Issue suppl. 2, pp.1139-1147.
2. Lambert, A. and A. Weston (1982), STIRIF-a points system for the sharp end, *Water Services*, Vol. 86, pp.535-536
3. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (1994), Natural disaster survey report: The Great Flood of 1993, U.S. Department of Commerce, Silver Spring, Maryland.
4. Vieux, B.E. (2004), Distributed hydrologic modelling for flood forecasting. *IAHS-AISH Publication*, 289, pp. 1-10.