

미국의 기상 및 홍수예보 시스템 소개



박재홍 |
세명대학교 토목공학과 부교수
jhpark@semyung.ac.kr



한건연 |
경북대학교 토목공학과 교수
kshanj@knu.ac.kr

미국의 수문서비스프로그램은 국립해양대기관리청(NOAA)산하 국립기상청(National Weather Service, NWS)내의 13개로 분리된 하천 예보센터에서 주로 수행되어진다. 이러한 하천예보센터의 목적은 다음과 같다. 홍수경보의 발령과 하천수위의 예보를 통해 인명을 구하고 재산피해를 감소시키는 것, 국가의 경제적 번영을 위해 기본적 수문학적 예보정보를 제공하는 것, 그리고 수자원 관리를 위해 폭넓

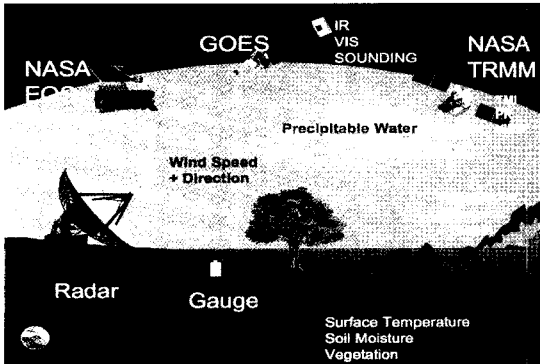


그림 1. Multiple platforms available to estimate precipitation

은 예측정보를 제공하는 것이다.

아래에 오늘날 수문서비스 프로그램들의 설명과 홍수예보센터의 임무가 어떻게 수행되는지에 대한 소개를 하였다.

예보과정-자료수집

홍수, 가뭄 혹은 정상조건의 모의 등에서 하천예보센터의 수문서비스 공급은 자료수집으로부터 시작된다. 국립기상청(NWS)은 폭넓은 다양한 실시간 자료와 자료를 수집하고 분석하며 그리고 강수를 예측하는 기술이 필요하다(그림1). 하천예보센터에서의 자료의 수준관리와 처리는 예측과정의 기본적인 부분이다. 대기온도, 눈덩이(snow pack)와 동일한 물의 양, 강수, 하천수위 그리고 저수지 자료를 위한 수문기상자료 관측망의 개발과 관리는 수문/수리 예측에 꼭 필요한 과정이다. 지상에서의 눈덩이와 동일한 물의 양과 기온 자료는 눈이 녹아 하천유량을 지배하는 지역에서는 하천예보를 생산하는데 중요하다.

자료수집과정에서 사용된 많은 센서들은 국립대기해양관리청(NOAA)의 소유가 아니라 미국지질조사국(USGS), 미국 공병단(USACE), 국립자원보존국(NRCS), 미개척국(USBR), 국립공원청(NPS), 인디안 과제국(Bureau of Indian Affairs, BIA), 테네시 계곡청(Tennessee Valley Authority, TVA), 5대호 환경 연구소(Great Lake Environmental Research Lab.), ALERT 사용자그룹(AUG), 국제 공동위원회(International Joint Commission, IJC), 국경과 물 위원회(International Boundary

and Water Commission) 그리고 많은 저수지 소유자들과 같은 NOAA의 협력자들에 의해 소유되고 운영되어진다. 그들의 목적이 수력발전, 홍수조절, 여가활동, 주운, 혹은 물 공급 등 여러 가지이지만 그들이 공급하는 정보는 국립기상청(NWS)의 수문예측과정에서 핵심적 역할을 한다.

정보를 수집하고 실시간 혹은 준실시간으로 예보를 하기 위하여 국립기상청(NWS)은 11,000 명 이상의 협조적인 관측자들, 자동자유수면 관측시스템(Automated Surface Observing Systems, ASOS)망과 눈덩이 원격 측정장치(Snow Pack Telemetry, SNOTEL) 그리고 대기설 측정프로그램(Airborne Snow Survey Program), USGS 하천유량 게이지망, 지구정지위성(GOES), NOAA 극궤도위성, WSR-88D 기상레이더와 미국 혹은 국가간의 기상모형 등을 포함하는 다양한 자료수집망과 도구들을 이용한다. 그림 2는 WSR-88D 기상레이더의 배열을 보여주며 캐나다의 레이더 정보와 결합되어 수문모형속으로 도입되어져 강수예측값을 생산하여 북동부의 하천홍수센터에 도우며 준다.

다센서 강수예측기(Multi-Sensor Precipitation Estimator, MPE)라고 불리는 도구는 하천홍수예보자로 하여금 시간별, 지역별 유역 강수 측정치를 생산하기 위해 레이더, 강우계, 위성강우 예측치를

결합할 수 있다. 예보자는 차후 24 시간에서 48 시간 동안의 강수값을 대기기상 예측모형들의 결합된 값과 기상레이더의 강수경향들을 수문예측센터(Hydrologic Prediction Center, HPC)와 함께 수문모형속으로 입력한다. 수문예측센터(HPC)는 하천예보센터에서의 매일의 예측활동을 지원하여 예측, 지침(Guidance), 결과물의 분석 등의 서비스를 제공한다. 하천예보센터를 위한 지침정보들은 매일의 정량적 강수예측값(Quantitative Precipitation Forecast)과 실시간 수치모형값 및 그의 분석내용들이다.

예보과정-모형화(modeling)

NWSRFS

국립기상청 하천예측시스템(NWSRFS)은 작은 유역에서부터 크고 복잡한 시스템에 이르기까지 하천유역에서의 다양한 수문학적 조건들하에서 하천유량 예측값들을 제공한다. 미국내에서 모두 13 개소의 하천예보센터에서 NWSRFS가 운영되어지고 있고 온두라스, 과테말라, 이집트, 체코, 남아프리카 공화국같은 여러 나라에 도입되었다. 도입된 일부 기관중에는

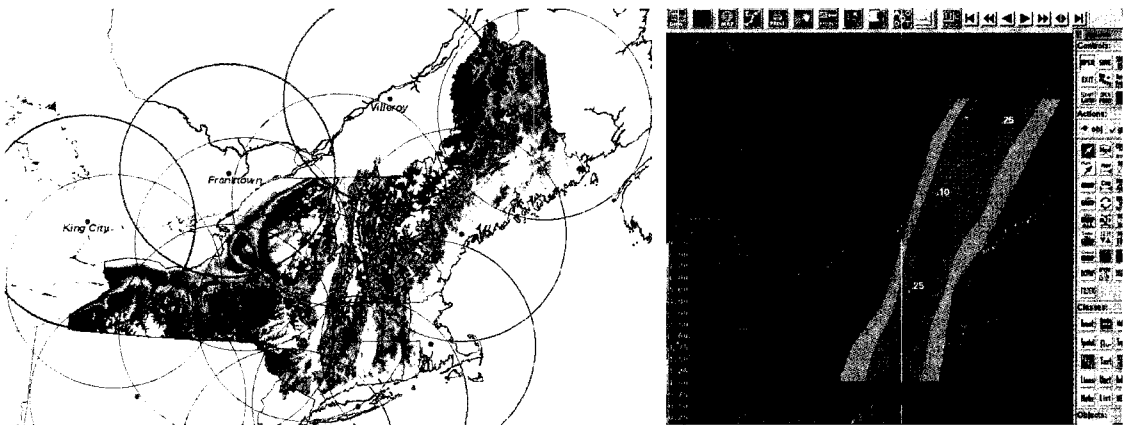


그림 2. NERFC radar coverage-forecast Quantative Precipitation Forecast

천개의 자료수집소와 수 백개의 예측지점으로 구성되어 있는 곳도 있다.

단기간 혹은 장기간 예측을 위한 확정론적 및 확률론적 예보능력을 제공하기 위해 NWSRFS는 유역을 모형화하는데 이용될 수 있는 수문·수리모형의 유연성을 제공한다.

NWSRFS에 의해 지원되는 주요한 수문/수리모형들은 선행강수지수(Antecedent Precipitation Index, API)와 Sacramento Soil Moisture Accounting(SAC-SMA), 강우/유출 모형들, SNOW-17, RES-J를 이용한 저수지 운영과 FLDWAV를 포함한 많은 수문/수리학적 추적 기법들을 포함한다. 이러한 기법들의 설명은 아래에 간략하게 설명되었다.

SAC-SMA

유출을 조절하는 상류지역과 하류지역에서 일련의 유량저장 장치인 버킷(bucket)으로 수문학적 순환과정에서의 유출을 모의하는 SAC-SMA 모형(그림4)는 많은 하천예보센터에서 이용되어진다. 이 모형은 100 mi²에서 1500 mi²에 이르는 하천유역에 대개 적용되는 공간적 덩어리인자(lumped parameter)를

가진 강우/유출모형에 개념적으로 기초되어졌다. 유역크기는 수문학적 지역, 지형, 예측지점 요구량, 이용가능한 자료에 따라 달라진다. SAC-SMA 모형은 일반적으로 6 시간 계산간격으로 실행되어지지만 어떤 시간간격으로도 실행될 수 있으며 심지어 24시간 시간간격으로 나뉘어질 수 있다. SAC-SMA 모형의 입력자료는 6시간 평균지역강우(Mean Areal Precipitation, MAP), 6 시간 평균지역 잠재증발산량(Mean Areal Potential Evapotranspiration, MAPE)이다.

SAC-SMA 모형인자들은 수동적으로 그리고 자동적으로 모형의 모의값이 과거의 관측 유량자료와 일치하도록 검증되어진다. 검증은 이상적으로는 40년의 기록값을 바탕으로 수행되어진다. 그러므로 검증인자들은 내재적으로 공간-시간크기, 지형, 지리적 위치와 검증되어야 할 게이지 관측망에 달려있다. SAC-SMA는 토양 기동에 대한 두층의 개념적 모형으로 어떤 계산과정들의 공간적 다양성을 설명하기 위해 몇 번의 개선이 이루어졌다.

6 가지 형태의 유출이 완전한 유출수문곡선을 구성하기 위해 생성된다. SAC-SMA 에서의 두 층에서의 각 층은 자유수(free water)와 구속수(tension water)성분으로 이루어진다. 토양 기동위에 떨어진

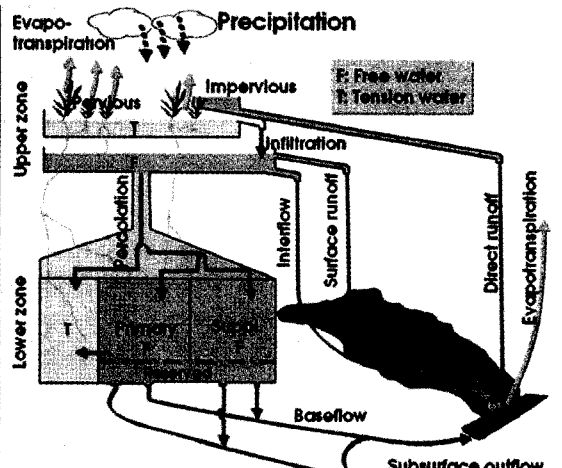


그림 3. Hydrologic Cycle and SAC-SMA rainfall/runoff Conceptual Model

강우는 처음으로 윗부분과 만나게 된다. 여기에서 어떤 불투수 지역에 떨어진 강우는 불투수층 유출을 생성하며 불투수층이 아닌 지역에 떨어진 강우는 위층 구속수 저장공간을 만나게 된다. 이 저수지를 다 채운 후 초과된 토양수는 위층 자유수 공간으로 들어가게 된다. 이 자유수 저장공간에서의 물은 중간유출로써 유출되어지거나 아래 지역의 저류공간속으로 침투되어진다. 위층의 자유수가 완전하게 차면 초과 토양수는 표면유출로서 유출된다. 대부분의 침투되어지는 물은 아래지역의 구속수 공간이 비어있으면 비록 일부는 아래지역의 자유수 공간으로 곧바로 갈 수 있을지라도 구속수 저장공간으로 흘러들어간다. 아래 지역의 구속수 공간을 채우면 모든 토양수는 아래지역 두 개의 자유수 공간으로 이동한다. 두 개의 자유수 공간은 빠르고 느린 응답기저 유량을 생성한다. 두 개의 기저유량의 조합은 다양한 수문곡선의 지체를 모형화하기 위해 설계되었다. SAC-SMA 역시 포화 초과 유출이 생성되는 다양한 포화영역의 성분을 지니고 있다.

좀 더 추운 시기에는 기온예보와 눈덩이에 상당하는 유역평균 물의 양인 융설로부터 유출을 수문학적 예측과정에 포함하는 것이 필수적이다. 하천예보센터들은 위성에 의해 유도된 눈 피복도, 강설 해석모형을 포함한 NWS국립 수문원격 측정센터(National

Operational Hydrologic Remote Sensing Center, NOHRSC)의 자료를 역시 이용한다.

SNOW-17

NWSRFS내의 눈 모형(SNOW-17)은 강설의 축적과 용해, 증발 모형이다. SNOW-17은 모형화되어 질 눈으로 덮인 지역을 결정하는데 사용되어지는 감소곡선(Depletion Curve)을 가진 지점의 눈 기둥에 대한 개념적 모형이다. SNOW-17은 눈 위의 비, 비강수층의 용해와 용해가 발생하지 아니한 기간 동안의 열교환에 대한 각각 다른 방정식을 가지고 있으며 눈과 공기의 접합면에서의 에너지 교환량에 대한 지수로써 온도를 사용한다. 검증되어지는 주요한 SNOW-17의 인자들은 비강우 용설들의 계절적인 변화를 조절하는 것들과 지역적 감소곡선 인자들이다. SNOW-17로부터의 전반적인 결과들은 높은 이슬점과 높은 풍속을 가진 기간과 같은 비정상적인 기상학적 상황을 제외하고 완전한 에너지 수지모형에서 얻어진 결과들과 비교하여 양호하다.

FLDWAV

NWSRFS의 많은 추적기법중 하나는 완전한

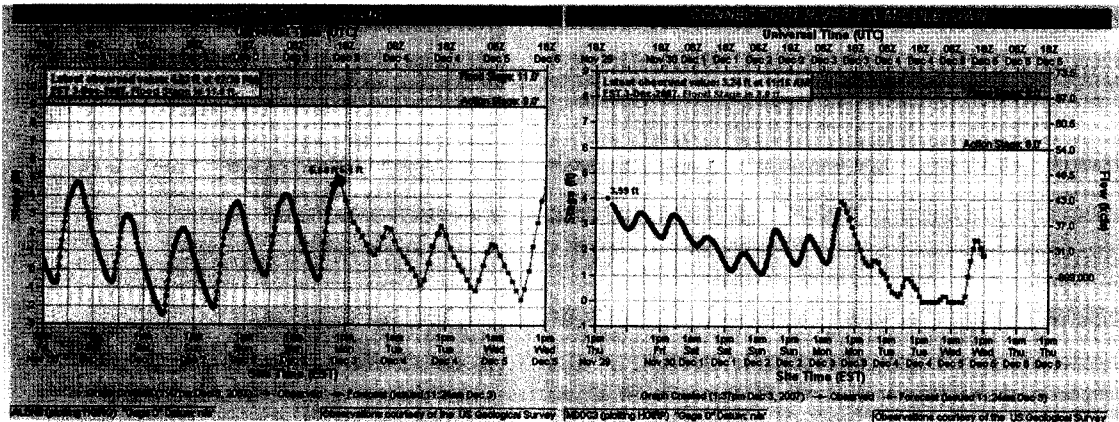


그림 4. Tidally Influenced Hudson-Connecticut River Forecast Location

Saint-Venant 방정식을 적용한 동역학적 추적도구인 FLDWAV이다. 이것은 하류의 조석 경계조건을 포함하여 하천 계곡 단면들의 복잡성을 극복하고 완전한 수문곡선을 추적한다. 하천예보센터들은 이 모형을 조석이 하천수위에 미치는 영향을 예측하기 위해 해양/하구 모형들을 가진 조석경계를 가진 하천에 이 모형을 연결하였다.

국립환경예측센터(The National Center for Environmental Predicting, NCEP)는 하루에 네 번씩 천문학적 조석에 대한 바람의 영향을 모의한다. 이것은 조석 경계조건을 가진 하천에서 예보자들에게 과도한 열대성 폭풍의 발생동안에 하천을 차오르는 surge를 예측할 수 있게 한다. 열대성폭풍예측센터(Tropical Prediction Center, TPC)는 하천 모형을 위해 바다의 상태가 도입된 하류 열대성 폭풍의 영향을 결정하기 위해 허리케인모형(SLOSH)으로 부터의 육지, 바다, overland surge를 계산한다. 이것은 하천예보센터예보자로 하여금 상류의 하천수위 예측을 위하여 조석경계조건이 도입된 열대 폭풍예측을 가능하게 한다.

IFP

Interactive Forecast Program(IFP)는 수문학자로 하여금 비표준 조건들을 설명하기 위해 실행시간 조절을 할 수 있도록 한다. 과거의 강수, 온도, 잠재가능 증발량의 시간별 기록들은 Ensemble Stream Flow 예측시스템(ESP)에서 수 주 혹은 여러달의 미래의 장기간 확률 예보를 생산할 수 있도록 한다. 통계적 과정들은 설계된 화면내에서 이러한 예측값들의 불확실성을 정량화하는데 유용하다. 이러한 출력값들에 대한 신뢰한계들은 하나의 표준편차로 나타내어진다. 홍수조절이나 수력발전 혹은 용수공급 같은 것들을 위한 저수지운영은 신뢰성 있는 예보를 준비하고 발표하기 위한 NWS의 활동에 영향을 미친다. NWS는 많은 연방, 주, 지방, 개인소유자들이 하천 예보와

연관이 있으므로 그들의 현재와 장래 운영을 결정하는 그들과 협력하고 있다. NWS의 몇 개의 저수지 모형들이 하천 예측에 영향을 주는 유역 전체에 걸쳐 저수지 운영의 대다수를 모형화할 수 있다.

RES-J 모형

Joint Reservoir Regulation Operation(RES-J)는 모형화된 Network을 나타내는 열대성 기후정보를 사용하여 단일저수지 혹은 저수지 시스템을 모형화한다. Network는 저수지, 수로와 절점으로 구성된다. RES-J는 각각의 시간단계에서 상류에서 하류까지 Network를 설명한다. 수로와 저수지의 지역적인 유량은 Network 입력자료로서 이용가능하기 때문에 RES-J가 실행되기 전에 생성되어야 한다. RES-J의 입력자료는 시간에 따른 자료의 설명, 위상정보와 요소정보(RES-J 기법을 포함), 그리고 명령언어의 기초를 형성하는 규칙으로 이루어져 있다.

CS 와 OFS

그림 5는 NWSRFS의 주요 구성성분들을 나타내며 검증시스템(Calibration System, CS)이 전체 역할구조에서 중요한 구성요소이다 라는 것을 보여준다. 검증시스템에서는 과거의 기상학적 인자들과 하천유량의 시간별 자료들이 준비되어있고 모형인자들이 검증되어진다. 운용예측시스템(Operational Forecast System, OFS)에서는 실시간 자료와 검증되어진 수문·수리학적 모형들을 이용하여 수 일후의 하천 수위 예측값을 생산하는데 사용되어진다.

예보과정-특별히 위험한 재난

NWS 관측/경보 프로그램의 일부로서 국가하천에서의 잠재적 댐 붕괴와 그의 영향들 역시 NWS 예측

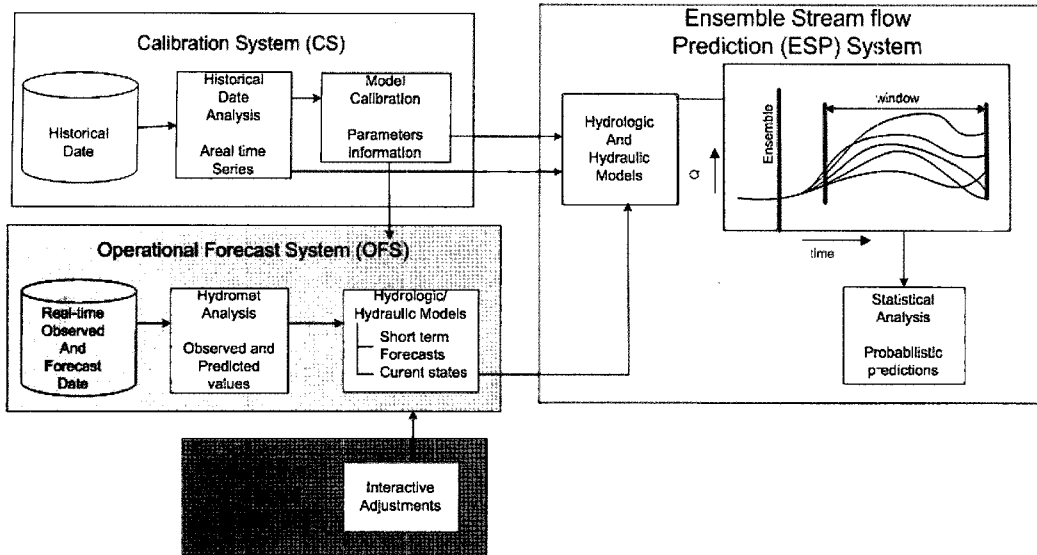


그림 5. NWSRFS Schematic

생산물내에서 제시되어진다. NWS는 간략화된 댐붕괴모형속에 적절한 댐붕괴 모형 정보를 입력하기 위하여 최근의 국가 댐자원목록(National Inventory of Dams)을 사용한다. 이 모형은 잠재적 댐붕괴 사건에서 빠르게 이용할 수 있는 댐붕괴 목록 검색 및 예측장치(Dambreak Catalogue Reviewer and Estimator, DAMCREST)라고 불리는 그래픽 인터페이스와 함께 개발되었다(그림 6). NWS는 FLDWAV, BREACH, HEC-RAS 와 고위험 잠재적 댐붕괴 시나리오에 대하여 이용하기 위하여 간략화된 댐붕괴 해석모형을 포함하여 준비된 댐붕괴 해석도구를 가지고 있다.

예보과정-생산물의 배포

단기간 확정론적 예측과 장기간 확률적 Ensemble 하천유량예측(ESP), 부가하여 국가적인 수문학적 정보서비스가 NWS 수문예측서비스 웹 사이트(<http://www.weather.gov/ahps/>)에서 제공되어진다.

첨단수문예측서비스(AHPS)는 NWS 기상, 물 그리

고 기후서비스의 핵심적 요소이다. AHPS 는 정확하고 풍부한 자료를 가진 예측 결과물의 집합체로서 홍수나 가뭄의 크기와 확률도도 역시 제공한다. 그림과 문자로 나타내어지는 결과물들은 많은 경제적 및 재난 관리자들에게 유용한 정보와 계획도구이며 정부기관, 사설연구소와 개인들로 하여금 위험에 기초한 정책, 홍수 및 가뭄에 의해 발생하는 위험을 줄이기 위한 대책들과 위험에 기초한 정책에 대한 보다 정보를 많이 이용한 결정을 할 수 있도록 한다.

AHPS의 현재 생산물들은 예측기간을 수시간에서 수개월로 조절하고 있으며 홍수와 가뭄의 발생 가능성에 대한 중요한 정보를 포함하고 있다. 어느 수위까지 홍수가 도달한 것인가 그리고 언제 침투 홍수위가 도달할 것인가와 같은 정보들은 사용자 친화적 그래픽 인터페이스와 수문곡선을 통해서 나타내어진다.

기타 다른 정보들은 아래와 같은 것들이 있다.

1. 미소, 중간, 대규모 홍수와 하천에서 홍수발생 가능성
2. 90일 동안 하천의 특정지점에서 수위, 물의 체적, 유량 등이 특정값을 초과할 가능성
3. 홍수로 침수될 주요한 도로, 철도, 경계표시 등

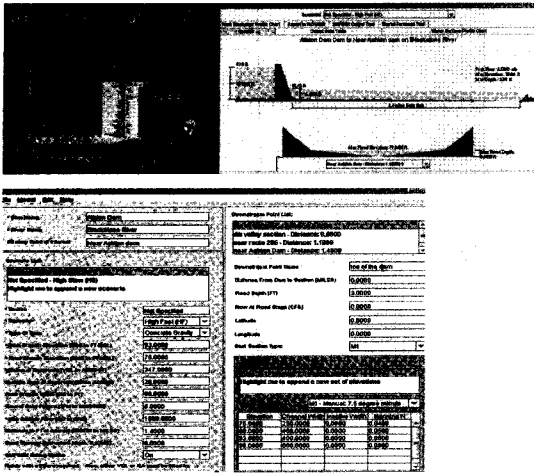


그림 6. DamCREST Tool

의 인근지도와 과거 홍수위 등

AHPS의 부가되는 특징은 이용가능한 정보를 가진 하천에서의 지점 및 유역지도이다. 이 자료들은 홍수에 대한 정보만으로 제한되어지지 않고 잠재적 가뭄에 대한 정보도 제공한다. 이러한 핵심적 집합체는 수요자와의 대화에 의한 변화의 필요성을 반영하여 시간에 걸쳐 변화될 수 있다.

맺음말

기후는 우리의 경제적 사회적 생활에 여러 가지 방법으로 영향을 준다. 극심한 기후는 크고 작게 사업의 이익과 수입에 영향을 미친다. 기후는 공동사회를 분열시키고 해체할 수 있다. 인구가 증가하고 사회 기반 구조물 건설 및 유지비용이 증가하면서 자연재해들은 사회적 안정성을 위협한다. 기후예보는 폭풍우, 극심한 더위와 추위, 홍수 등으로부터 자신들을 보호하기 위해 사회적 필요성에 부응하여 처음에 개발되었고 결과적으로 경제적 손실을 최소화할 수 있다.

미국에서 평균 해마다 133 명의 인명손실과 4십만 달러 이상의 재산피해가 홍수로 발생한다. 홍수는 완전하게 방지하는 것은 불가능하고 재산의 보호를 보

장하는 방법은 없지만 여러 자료에 의하면 좀 더 정확한 예보가 생명손실을 획기적으로 줄일수 있다는 것이 증명되고 있다. 우리나라에서도 정교한 컴퓨터 모형과 슈퍼컴퓨터, 자동화된 게이지, 지구정지궤도 위성(GOES), 도플러레이더, Advanced Weather Interactive Processing System(AWIPS)와 같은 다양한 폭넓은 자료원으로부터 많은 자료를 이용하여 홍수 예경보 시스템이 완성되어 전 국토에 걸쳐 정확하고 자세한 수문예보치가 제공 되어지기를 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설기술혁신사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과입니다.

참고문헌

Edward J. Capone(2007). The National Weather Service Forecast-Responsibility on the Nation's Rivers, The Journal of DAM SAFETY, Fall, 2007. ☞