

# 국내 원전부지의 외부침수 시물레이션

2015.10.28



경북대학교 수자원연구실  
한 건 연

# 발표 순서



I

원전부지의 침수사고

II

외부침수 메카니즘

III

확정론적 해석방안

IV

확률론적 해석방안

V

결론





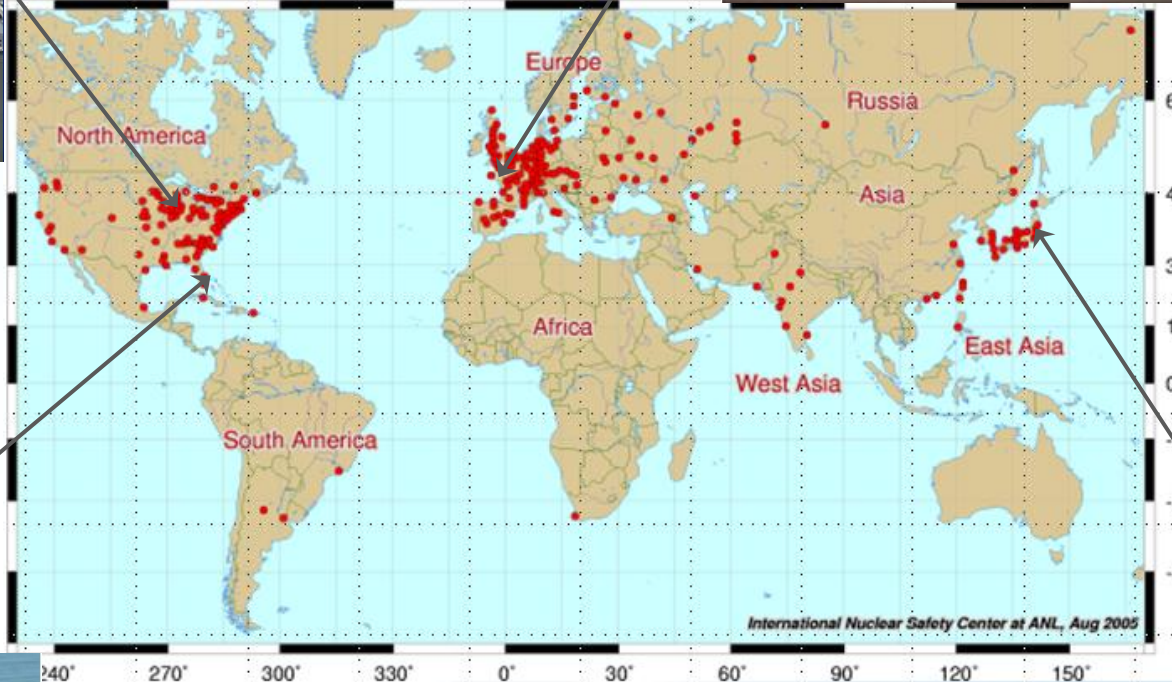
# 원전부지의 침수사고



(미국 Fort Calhoun, 2011)



(프랑스 Le Blayais, 1999)



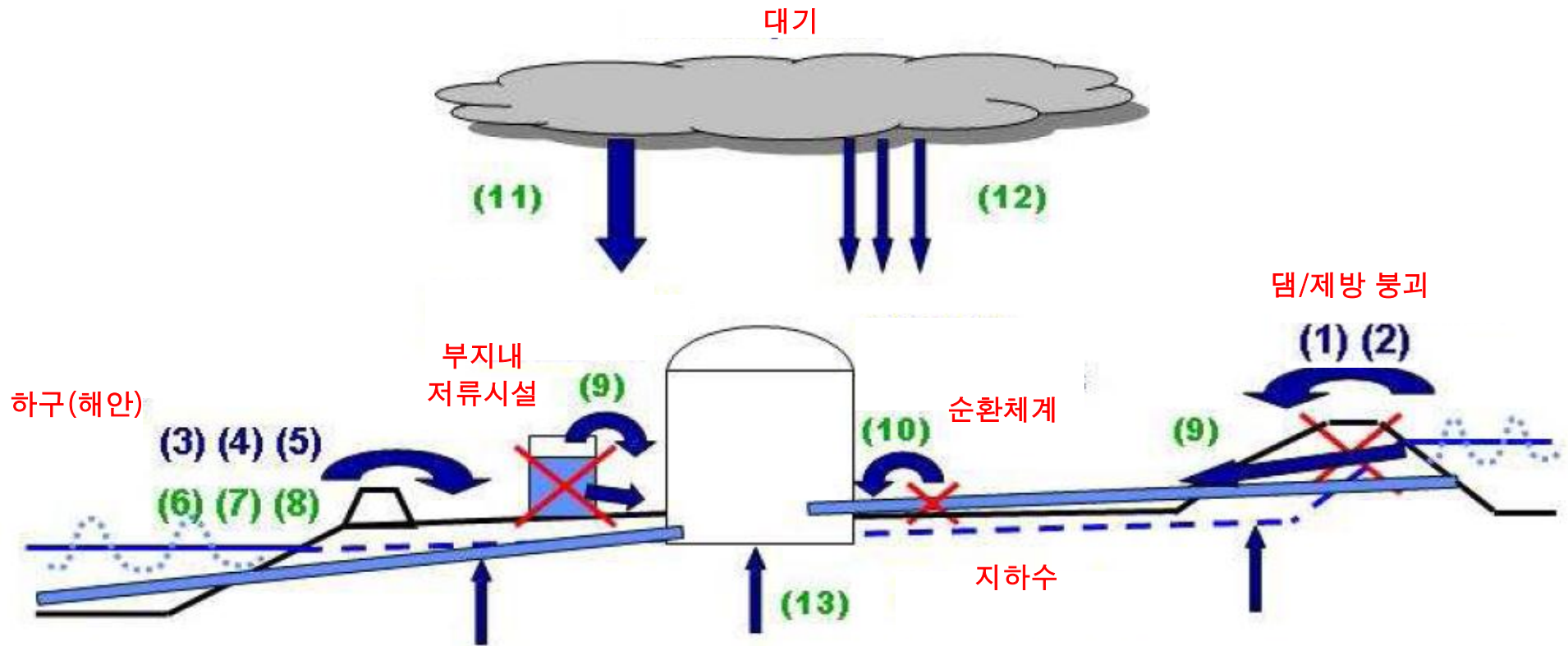
(미국 St. Luice, 2008)



(일본 Fukushima, 2011)



# 원전부지의 침수사고



- (1) 하천제방 붕괴
- (2) 댐 붕괴
- (3) 조석
- (4) 폭풍해일(태풍)
- (5) 쓰나미
- (6),(7) 풍파(하구, 해안)

- (8) 방류시설의 이상(막힘 등)
- (9) 저류시설의 붕괴
- (10) 순환체계 이상
- (11) 단시간 집중호우
- (12) 장시간 연속호우
- (13) 지하수

# 원전부지의 침수사고(교훈)

## 침수위험도 산정

- 해안의 극치사상과 극한 홍수의 중첩조건 고려가 필요함
- 기후변화에 따른 영향 고려 부족
- 다양한 극치 시나리오의 조합이 필요함

## 침수방어 대책 수립

- 불충분한 파고 고려 및 방파제의 구조
- 지하시설물에 대한 안전도 미확보
- 침수된 구역을 파악하기 어려움
- 부적절한 예보 시스템 운영

## 침수에 따른 NPP의 지원기능 과 주변여건

- 필요한 시기에 침수구역 접근성이 어려움 (도로폐쇄 및 통신두절 등)
- 부분적인 전원공급의 어려움
- 취수시설 및 방류구의 막힘현상 발생



# 외부침수 시나리오 구성

## 외부침수시 다양한 메커니즘의 조합

외부침수 메카니즘	부지 위치			
	해안+하천 지역	해안지역	하천 지역	기타
국지적 극한홍수	○	○	○	○
하천범람	○	-	○	-
댐 붕괴	○ (댐 붕괴)	-	○ (댐 붕괴)	-
폭풍해일	○	○	-	-
부진동	○	○	○ (저류지)	○ (저류지)
지진해일	○	○	○(산사태)	-
폭풍	○	○	○	○

# 해안·하천지역 적용 시나리오

## 강우에 의한 침수

조합조건	대안 I	대안 II	대안 III
주요사상	PMP	$10^{-6}$ 확률조건강수	$10^{-8}$ 확률조건강수
선행 또는 후속사상	40% PMP이하 또는 500년 강우조건	-	-
동시발생사상	지진	지진	지진
기저유량	월평균 유량	월평균 유량	월평균 유량
풍파조건	2년 빈도 바람	2년 빈도 바람	2년 빈도 바람

# 해안·하천지역 적용 시나리오

## 폭풍해일에 의한 홍수

조합조건	대안 I	대안 II	대안 III	대안 IV
주요사상	최악의태풍 및 풍파로 야기되는 해일 및 부진동	25년빈도 해일과 부진동	가능최대 해일과 부진동	PMH로부터 발생한 해일
동시발생사상	½ PMF 또는 500년 빈도 홍수	PMF	25년빈도 홍수	PMF
선행해수면조건	고조위의 10%	고조위의 10%	고조위의 10%	고조위의 10%
풍파조건	수반조건	수반조건	수반조건	수반조건



# 해안·하천지역 적용 시나리오

## 댐 붕괴 홍수

조합조건	대안 I	대안 II	대안 III
주요사상	PMP 강우조건	MCE 지진조건	병렬 및 직렬댐의 붕괴조건
동시발생사상	지류에서 계획 홍수량 유입	지류에서 평수량 유입	지류에서 계획 홍수량 유입
해안유입조건	고극조위 조건	약최고만조위조건	고극조위조건
기저유량	기저유량	기저유량	기저유량

# 해안·하천지역 적용 시나리오

## 지진해일 조건

조합조건	해안위치	하천조건(대안 I,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ)
Tsunami	PMT 쳐올림	I PMT Bore로부터의 쳐올림 Ⅱ 최악의 관측된 Tsunami Bore로부터의 쳐올림 Ⅲ SSE Tsunami Bore로부터 쳐올림 IV OBE Tsunami Bore로부터 쳐올림
선형 또는 동시발생조건	고조위의 10%	I 25년 빈도 홍수 Ⅱ PMF Ⅲ 월평균 유량과 SSE 댐붕괴 홍수 IV 25년홍수와 OBE 댐붕괴 홍수
풍파		I ~IV 한계풍향에서의 2년빈도 풍속조건

# 해안·하천지역 적용 시나리오

## 기타 고려사항

- PMSS, PMF 또는 댐 붕괴 홍수파에 의한 대규모 저류시설의 붕괴
- 관로 계통에서 발생할 수 있는 Hydraulic Transient에 의한 관로 계통의 파괴
- 기후변화의 영향을 적극적으로 고려함
  - 해수면 상승 : 70.6~88.5cm 상승 전망
  - 기온 상승 : 30년간 연평균 기온 1.2 °C 상승
  - 강우량 증가 : 지난 30년간 78mm 정도로 비교적 약하게 증가
  - 강우강도 증가 : 1970년대에 비해서 2배 이상 증가

# 외부침수에 대한 조합조건

## 확정론적 해석

### ◦ PMF 홍수

- PMP는 한국확률강우량 산정 기준에 의해 산정
- HEC-HMS에 의한 홍수량 산정
- HEC-RAS에 의한 홍수위 산정
- 단위유량도 유도후 지속시간 침수발생시간의 영향검토
- 유역에 걸친 강우로 인한 최대수위 고려
- 표면의 조도계수, 강우손실률 고려
- 2차원 분포형 강우-유출 모델 적용 가능



# 외부침수에 대한 조합조건

## 확정론적 해석

- 댐 붕괴 홍수
  - PMP, MCE 조건하에서 댐유입량 산정
  - 댐 붕괴 시나리오의 구성 (붕괴시간, 붕괴폭, 측면경사, 방법 등)
  - 댐 붕괴모형에 의한 첨두 홍수량 산정
  - 댐 붕괴 홍수류의 동수역학적 홍수 추적(DAMBRK, FLDWAV, HEC-RAS 등)
  - 조도계수에 의한 민감도 분석
  - 병렬 및 직렬 댐에 대한 분석
  - 발전소내 저류시설에 대한 해석

# 외부침수에 대한 조합조건

## 확정론적 해석

- 폭풍해일에 의한 홍수
  - 지상최대 폭풍해일 조건의 분석
  - PMH 변수의 산정
  - 확률경로 변화에 따른 최대 폭풍해일고 산정
  - SLOSH, ADCIRC 모형 등의 적용
  - 매개변수에 대한 민감도 분석
  - 기후변화에 따른 해수면 상승 고려
  - 풍파에 의한 쳐올림 높이 산정

# 외부침수에 대한 조합조건

## 확정론적 해석

- 지진해일에 의한 홍수
  - PMT 지진조건 또는 해저지진발생조건 고려
  - 진원지 판단과 특성파악을 위한 문헌 검토
  - 초기 파형조건의 설정
  - MOST, FUNWAVE, NHWave, Delft3D 모형 등 이용
  - 초기 파고 및 형상, 침수지역의 조도 등에 의한 민감도 분석 실시

# 외부침수에 대한 조합조건

## 확률론적 해석

- 각 조건론 및 조합된 조건에 대한 위험도 곡선 작성
- 조합된 사상의 독립성 및 상호의존성 검토
- 침수에 대한 2차적인 위험도 평가
  - 침수기간
  - 도달시간
  - 정수역학 및 동수역학적 외력
  - 토석류, 세굴 등을 고려



# 외부침수에 대한 조합조건

## 확률론적 해석

- 허용확률 기준 :  $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$
- 확정론적 해석과 확률론적 해석의 조합
- 불확실성에 대한 정량화 필요
- 정량화된 불확실성이 위험도 평가에 미치는 영향
- 노력에 비해 얻어지는 성과효율 검토

# 외부침수에 대한 조합조건

## Fukushima 원전사고후 각국 대응

- 미국 : Fukushima 사건 이후 'worse-case' 하에서 원자로의 안정성에 대한 규정을 재검토 중
- 영국 : 극한홍수로 부터 재해저감을 위한 새로운 대책 수립
- 프랑스 : 58개 원자로가 어떤 규모의 홍수에 견딜 수 있는지 분석
- 오스트리아 : 'stress test'를 통한 배수시스템 보강
- 독일 : 1980년 이전에 건설된 모든 원자로를 3개월간 정지시켜 운영상황 재검검 하였음

# 국내 원전부지



고리 원자력 발전소



월성 원자력 발전소



울진 원자력 발전소



영광 원자력 발전소

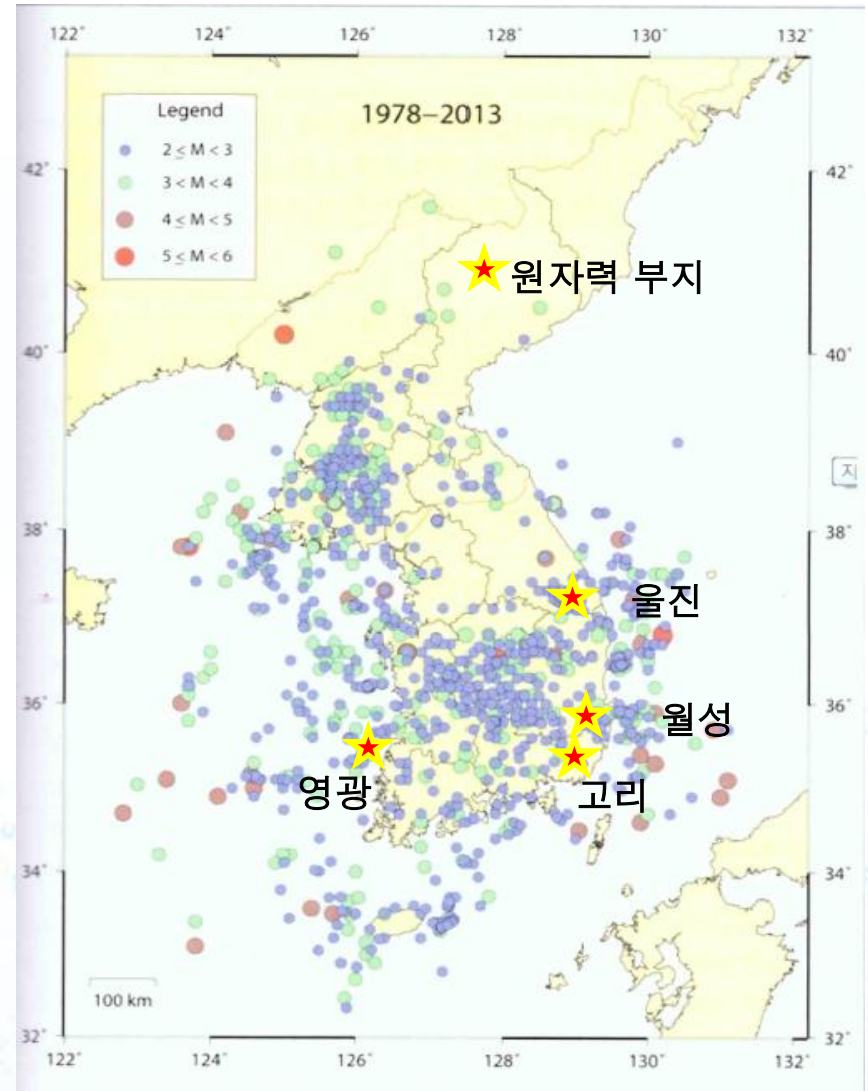


# 국내 원전부지



태풍피해

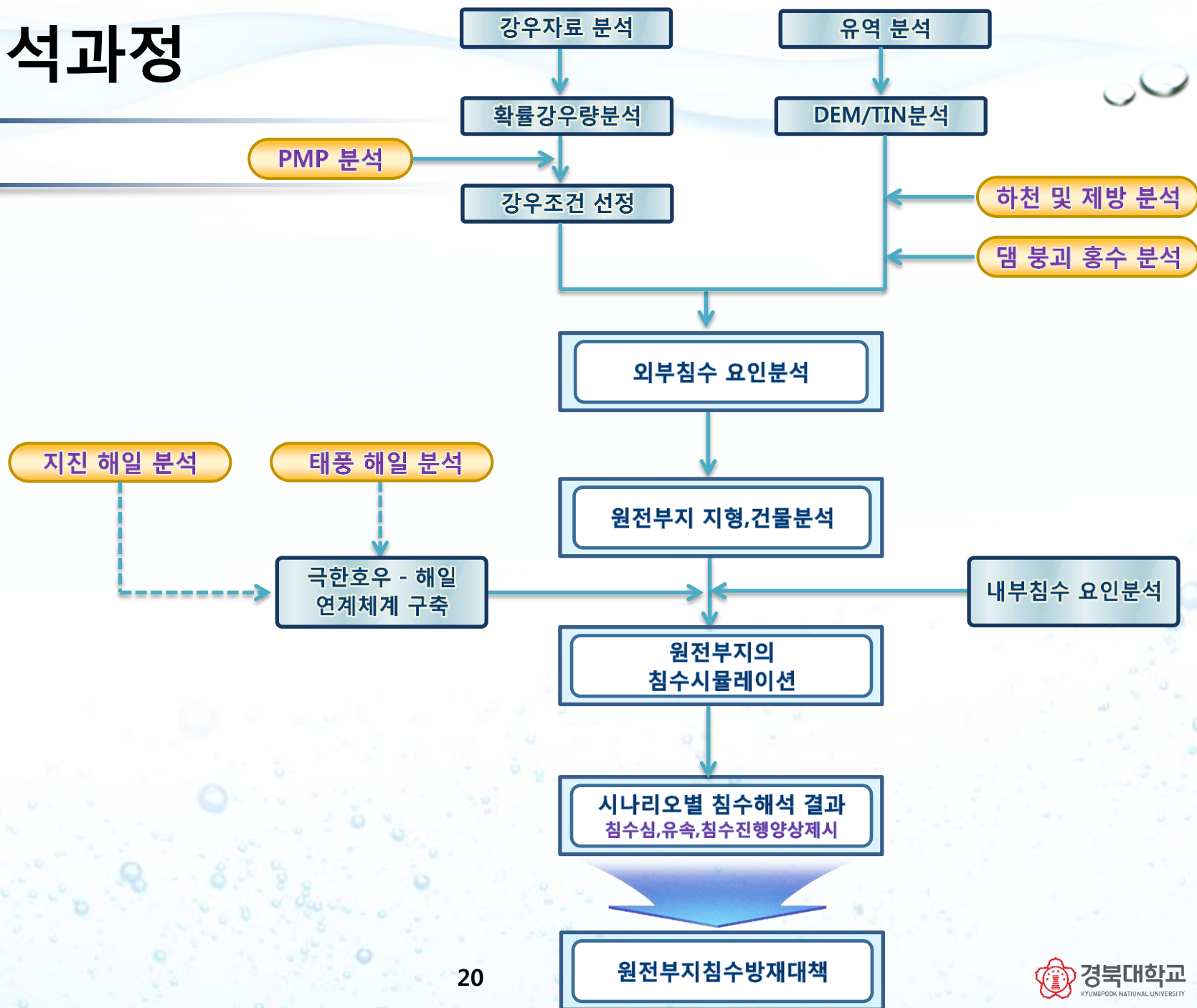
19



지진피해



# 침수해석과정



# 침수해석과정

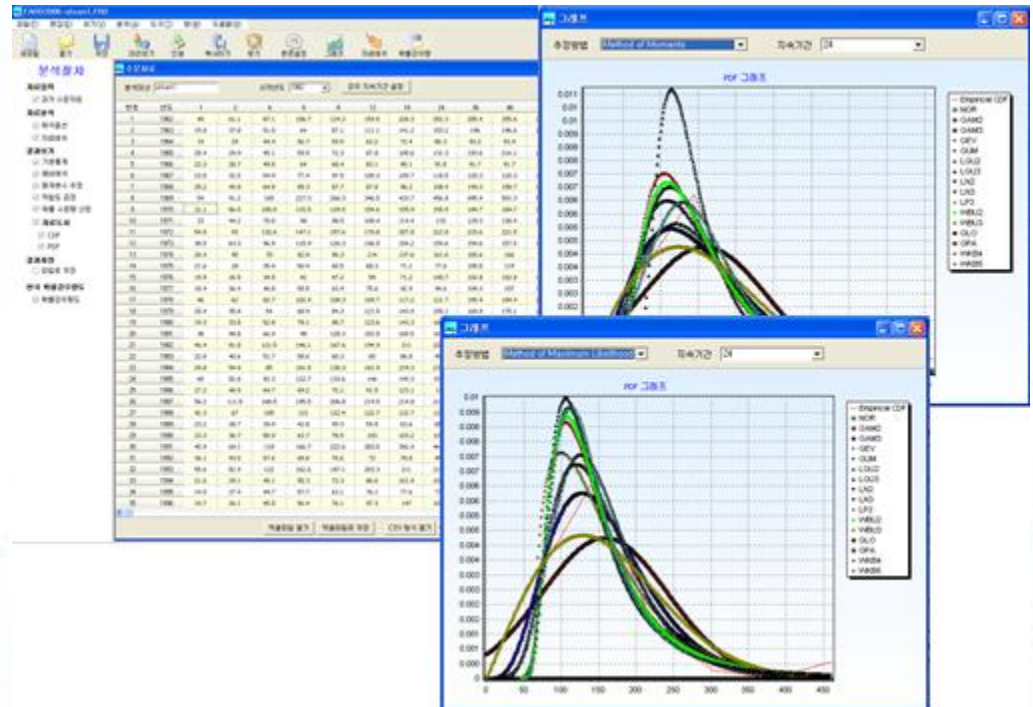
## 강우분석 과정

- 수문학적 분석을 통해 어떤 특정 초과확률에 대응하는 수문량을 추정하여 수자원 시스템 설계에 반영
  - 강우나 홍수의 발생빈도를 확률론적으로 예측하는 방법을 빈도해석 (frequency analysis)이라고 함
  - 국내에서 공인된 FARD(국립재난안전연구원 보급) 프로그램 적용

확률분포형	확률밀도함수 또는 누적분포함수
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(x-x_0)\alpha} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{[\ln(x-x_0)-\mu]^2}{\alpha^2}\right]$
Gamma	$f(x) = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} \left[\frac{x-x_0}{\alpha}\right]^{\beta-1} \exp\left[-\frac{x-x_0}{\alpha}\right]$
Log-Pearson type III	$f(x) = \frac{1}{\alpha^\beta \Gamma(\beta)} \left[\frac{\ln(x)-y_0}{\alpha}\right]^{\beta-1} \exp\left[-\frac{\ln(x)-y_0}{\alpha}\right]$
GEV	$F(x) = \exp\left\{-\left[1-\beta\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)\right]^\beta\right\}$
Gumbel	$F(x) = \exp\left[-\exp\left\{-\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right\}\right]$
Log-Gumbel	$F(x) = \exp\left[-\left(\frac{\theta-(x-x_0)}{(x-x_0)}\right)^\beta\right]$
Weibull	$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{(x-x_0)}{\alpha}\right]^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{x-x_0}{\alpha}\right)^\beta\right]$
Wakeby	$x = m + a[1-(1-F)^b] - c[1-(1-F)^d]$

확률분포형	확률밀도함수 또는 누적분포함수
Normal	$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]$
Generalized logistic	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - k\left(\frac{x-\varepsilon}{\alpha}\right)\right]^{\frac{1}{k}-1} \left[1 + \left\{1 - k\left(\frac{x-\varepsilon}{\alpha}\right)\right\}^{\frac{1}{k}}\right]^{-2}$
Generalized Pareto	$f(x) = \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{k}{\alpha}(x-\varepsilon)\right]^{\frac{1}{k}-1}$

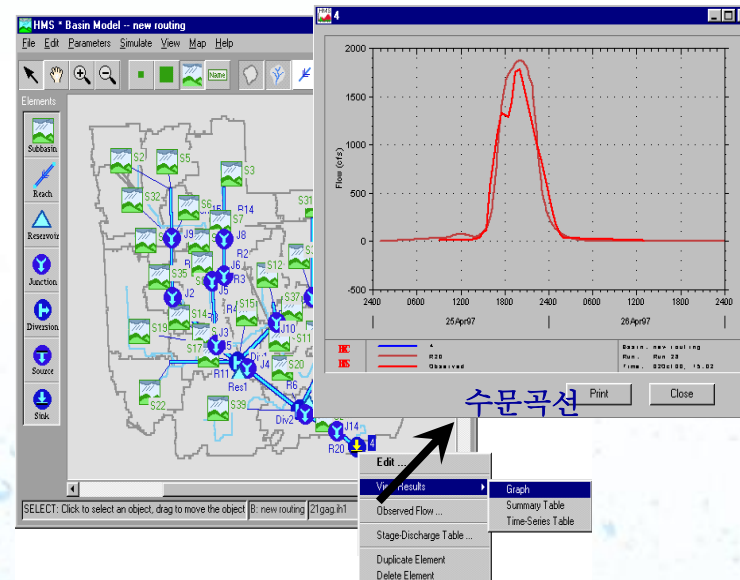
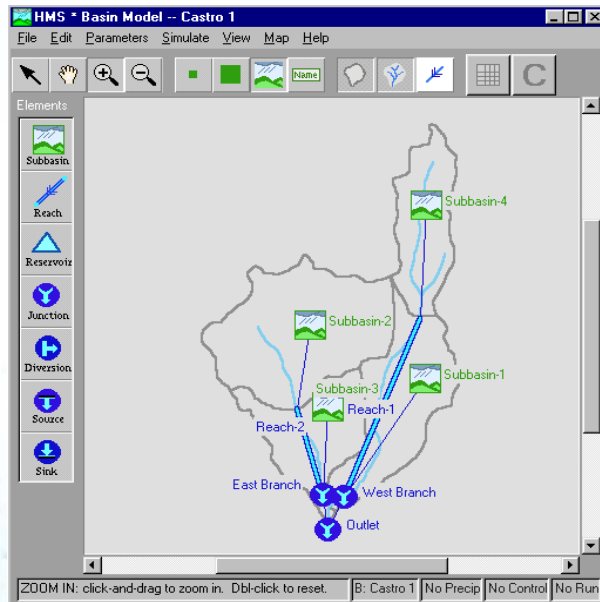


<FARD를 이용한 확률강우량 산정의 예>

# 침수해석과정

## 유역수문분석 과정

- 유역모형(HEC-HMS, 미국 육군공병단 보급)
  - 유역 유출계수, 연계성 및 유역요소
- 강우모형
  - 강우 및 증발산 자료
- 계산수행조건결정
  - 모의 계산 간격 및 시작/정지시간
- Graphical User Interface 기반, 강우 및 증발산 자료, GIS에서 지도파일 Import 가능, Connectivity 및 유출계수 중요
- 수문학적 분석을 통해 어떤 특정 초과확률에 대응하는 수문량을 추정하여 수자원 시스템 설계에 반영



수문곡선

# 침수해석과정

## 수리해석과정

- 2차원 천수 방정식

$$\frac{dh}{dt} + \nabla (uh) = R$$

$$\frac{d\mathbf{u}}{dt} + (\mathbf{u} \nabla \mathbf{u}) + \frac{v_t}{h} (h \nabla \mathbf{u}) + g \nabla (h + z) = g \mathbf{S}_f$$

- 2차원 천수 방정식의 근사해

$$g \nabla (h + z) = g \mathbf{S}_f$$

$$\begin{bmatrix} S_{fx} \\ S_{fy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{n^2 |\mathbf{u}| u_x}{h^{4/3}} \\ \frac{n^2 |\mathbf{u}| u_y}{h^{4/3}} \end{bmatrix}$$

$$|\mathbf{u}| = \frac{h^{2/3} \sqrt{I_m}}{n}$$

$$l_m^2 = s_{wx}^2 + s_{wy}^2$$

- 시간 및 공간항의 처리

$$\frac{h_i^{t+1} - h_i^t}{\Delta t} + \frac{1}{A_i} \sum_{j=1}^4 h_{ij} u_{ij} L_{ij} = R$$

$$h_{ij} = \frac{h_i + h_j}{2} \quad u_{ij} = \frac{h_{ij}^{4/3}}{n_{ij}^2 |\mathbf{u}_{ij}|} I_{n,ij}$$

$$h_i^{t+1} = h_i^t \left( 1 - \frac{\Delta t}{2A_i} \sum_{j=1}^4 a_{ij} \right) + \frac{\Delta t}{2A_i} \sum_{j=1}^4 a_{ij} h_j^t$$

$$a_{ij} = \frac{h_{ij}^{2/3}}{n_{ij}} \frac{I_{n,ij}}{\sqrt{I_{m,ij}}} L_{ij} \quad 1 - \frac{\Delta t}{2A_i} \sum_{i=1}^4 a_{ij} > 0$$

$$\Delta t < \text{ArgMax} \left( \text{ArgMin} \left( 2\Delta x^2 n_{ij} \frac{\sqrt{S_{wx,ij}}}{h_{ij}^{5/3}} \right), \Delta t_{min} \right) \text{ for all } i, j$$



# 침수해석과정

## 수리해석과정

구 분	기본방정식	장 점	단 점	프로그램명
0차원 모형	물리적 방정식에 근거하지 못하고, 저지대를 중심으로 도시	넓은 범위에 최대 침수범위를 알고자 할 경우 간단하게 이용 가능	침수지점이 월류 발생 지점이 아닌 전혀 다른 지점으로 나타내어질 수 있음	ArcGIS (상용) Delta Mapper
1차원 모형	1차원 Saint-Venant 방정식	흐름방향으로 침수현상이 나타나는 구간에서의 침수양상	복잡한 침수상황을 모의하기 위한 가정조건 많이 요구됨	HEC-RAS MIKE-11 (상용) SOBEK-CF (상용)
2차원 모형	2차원 Shallow Water Wave 방정식	침수의 전달양상이 2차원적 분포양상을 정확하게 분석	입력자료의 구축 및 프로그램 개발에 시간과 노력이 필요	FLO-2D (상용) MIKE-21 (상용) TUFLOW (상용) SOBEK-OF (상용)
3차원 모형	3차원 Navier-Stokes 방정식	침수지역에서 국부적인 3차원적 유속분포 산출	전반적인 침수파의 전달현상 모의에 한계	CFX (상용) FLUENT (상용) FLOW3D (상용)

# 침수위험도에 대한 재점검 필요

## 침수위험도 산정

- 기후변화에 따른 해안, 유역으로부터의 침수 시나리오 구성
- 침수와 관련된 모든 가능한 현상을 규명
- 각 원전부지의 홍수위험 및 영향을 재평가

## 침수방어 대책 수립

- 침수로 부터 방어해야할 모든 시설을 재점검
- 현재의 침수 방어시스템(구조물, 설비, 조직 등)을 재점검
- 필요한 부분에 대해서는 적극적인 개선 방안 도출 및 실행

## 침수에 따른 NPP지원기능과 주변여건

- 지구별로 침수과정에 대한 평가시스템을 구축
- 위험도 분석 : 부지에의 접근성, 일시적 전력 미공급, 통신망 등
- 이용가능한 모든 수단과 연계대책을 수립함

# 침수시물레이션을 위한 조건들

- 원전 부지에 대한 PMP 재산정 필요
- 원전부지 및 건물배치 등에 대한 정교한 지형자료의 구축 필요
- 극한호우 조건하에서 폭풍/지진해일 발생시 우수배제시스템 적절성 분석
- 침수방어를 위한 구조물적 취약성, 설비적 취약성, 조직체계 등 취약성을 평가
- 침수발생 경보체계(warning system)의 적절성 분석
- 기후변화에 따른 시나리오를 반영하여 원전부지 재평가 필요



# Thank you

[kshanj@knu.ac.kr](mailto:kshanj@knu.ac.kr)

<http://kwaterhan.com>