

마름/젖음 해석기법을 이용한 범람해석 적용사례



구영훈 ●●●
인제대학교 환경공학과 박사과정
yhku1986@hotmail.com



송창근 ●●●
인천대학교 안전공학과 조교수
baybreeze119@incheon.ac.kr



박문현 ●●●
동부엔지니어링(주) 수자원환경부 이사
moonth@dbeng.co.kr



김영도 ●●●
인제대학교 환경공학과 부교수
ydkim@inje.ac.kr

로 80%이하의 예년 대비 강수량을 보이는 추세이다. 또한, 최근 기상이변에 따른 자연재해 발생빈도 증가 및 피해 규모가 대형화/광역화 되고 있으며, 기후변화로 인한 극한 기상의 발생패턴이 변화되어 집중강우에 의한 침수피해는 앞으로 더욱 심각해질 것으로 전망하고 있다(IPCC, 2007). 자연재해의 유형별 피해규모는 태풍·호우와 같이 침수와 연관된 재해 피해가 가장 크게 나타나며 도시 침수와 하천범람에 의한 침수가 복합적으로 나타나고 있다(소방방재청, 2011). 따라서 반복되는 홍수를 대비하고 피해를 줄이기 위해 하천 제방, 댐 및 저류지 계획 등 각종 홍수방어 대책을 지속적으로 수립하여 홍수에 대비해오고 있다. 그러나 수공구조물의 설계빈도를 초과하는 홍수가 발생할 경우 도시 침수로 인한 피해를 불러올 수 있으며(배용훈 등, 2004), 최근 대하천사업을 통한 하천의 둔치구간에 조성된 생태공원, 체육시설 등과 같은 친수시설들은 여름철 집중 강우로 인한 침수가 발생할 때마다 막대한 유지관리 비용이 소모될 수 있다. 이러한 구조적 홍수피해 저감 대책의 한계를 극복하기 위해 최근에는 수치해석을 통하여 수리학적 거동을 해석하거나 홍수범람지역을 예측하여 홍수피해 경감에 활용하고 있다.

본고에서는 홍수로 인한 하천범람 및 홍수범람 지역을 예측하기 위한 수치해석모형의 마름/젖음 기법과 적용사례를 소개하고자 한다. 이와 같은

1. 개요

우리나라의 계절별 강수량을 보면 여름과 겨울에 집중되어 있으며, 특히 가을의 경우 전국적으

내용을 자세히 다루는 것은 그 양이 너무 방대하고 경우의 수도 너무나 복잡하므로, 수치해석 모형을 이용하여 외수범람모의를 하는 경우에 한정하여 범람해석 절차 및 적용사례를 간략히 기술하였다.

2. 외수범람모의

2.1 마름/젖음 기법

우리나라 하천은 일반적으로 수심에 비해 폭이 매우 넓으므로, 종·횡방향 유속에 대하여 수심방향으로 평균한 유속장을 구하는 천수흐름 해석이 널리 이용된다. 3차원 연속방정식과 운동량방정식을 시간 적분과 수심 적분하여 얻어지는 천수방정식을 수치 모형화하여 지형자료, 경계조건 및 매개변수 등을 입력하면 수평 2차원 평면 내에서의 유속 및 수심을 구할 수 있다. 대부분의 천수흐름 해석 모형은 구성된 격자 내의 흐름을 분석하기 때문에 지형이 복잡한 실제 하천에서의 범람모의 시 수위의 시간적 변화에 따라서 둔치 구간에서의 낮은 수심 또는 마른 구간이 발생하게 되고, 이에 따라 수치해가 불안정해지는 문제점을 내포하고

있다. 특히 태풍과 같은 홍수사상에서는 수위의 변화 폭이 커서 모의 시 수치해석의 안정성을 보장하기 위한 마름 영역 처리 기법이 필수적이다. 또한 공원이나 체육공원으로 이용되고 있는 둔치 구간이나 하천범람 시 제내지에서 모형을 적용할 경우 수위 변화를 모의하는데 있어서 시간에 따른 경계면 처리나 해당 지역의 수면 존재 유무가 수치 해석의 영역 구분이나 모의의 복잡성을 증가시키게 된다. 수체의 흐름이 주변 구조물 및 환경에 미치는 영향이 크기 때문에 모의 구간에서 수심의 증감에 따라 발생하는 절점의 마름/젖음 현상을 적절하게 재현하여 수심의 변화에 따라서 경계면을 정확하게 모의하는 것은 실제 범람해석에 있어서 매우 중요하다.

기존 연구에서는 이러한 현상을 반영하기 위하여 사전에 수위를 예측한 다음 둔치에 해당하는 경계선이나 섬에 해당하는 지형 격자를 미리 제거하여 모의를 수행하는 방법을 사용하거나 계산 과정에 있어서 모의 영역을 구분하는 방식, 해당 지형을 높지대와 같은 투수층으로 해석하여 모의를 수행하는 등의 방법이 진행되어 왔다.

기존의 마름/젖음 알고리즘은 그림 1과 같이 크게 4가지 종류로 구분할 수 있다. 첫 번째로는 임계마름수심 기법 혹은 박막(thin film) 기법으로

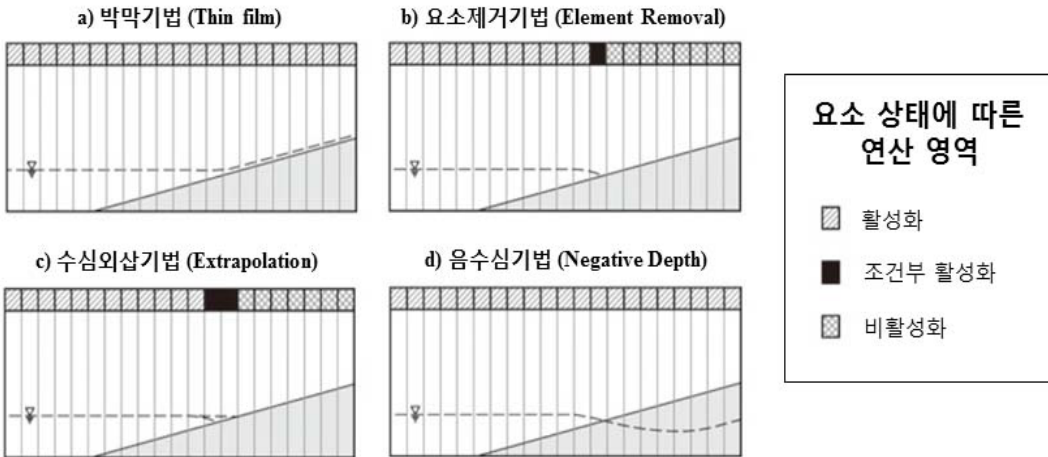


그림 1. 마름/젖음 기법의 종류

측면 혹은 상하류 경계면 내부 영역을 모의영역으로 적용하여 모든 절점 및 요소들이 수치계산에 포함되도록 하는 방법이다. 일반적으로 모의 전 최소 기준 수심(임계마름수심)을 설정하여 모의 시 절점이 기준 수심 이하로 내려가는 영역은 마름으로 처리되어 얇은 막을 펼친 것처럼 처리하는 기법이다. 이 경우 요소제거(element removal) 기법에서 발생하는 수심이 갑자기 0으로 변화하는 것에 따른 경계면의 불연속 문제를 해결할 수 있다.

두 번째 방법인 요소제거 기법에서는 모형별로 요소가 마름 상태인지 판별한 후, 모의시 그 요소를 연산 영역에서 아예 제외하는 방식이다. 흐름의 유동성을 차단시키는 위의 방식과는 달리 경계면을 계산시마다 새로 정의하여 모의를 실행한다. TELEMAC, EFDC, MIKE21 등의 모형에서 이러한 기법을 사용하였으며, 마름 구간이 확실히 정의되는 장점이 있으나, 경계면에서의 불연속 문제가 발생하여 계산에서 발산이 일어나는 확률이 증가되는 단점이 있다.

세 번째 수심외삽(depth extrapolation) 기법에서는 마름/젖음이 발생하는 수면 경계면에서 젖음에 해당하는 요소에서 외삽법을 사용하여 수심을




마름에 해당하는 요소로 적용시키는 방식이다. 모의 시 우선 경계면의 위치를 구별하는 것이 중요하며 요소를 조건부 활성화를 통하여 마름 영역의 일부 구간을 마름 경계에 포함시켜 계산한다.

네 번째 음수심(negative depth) 기법에서는 모의구간의 하상에 투수층이 있다는 것을 가정하고 물의 흐름이 이러한 투수층에 적용된다고 고려하는 방식이다. 이러한 기법을 사용하면 투수층의 존재로 수체 표면이 지형 자료 아래로 내려갈 수 있다고 볼 수 있어 음의 수심이 발생한다. 이러한 기법은 RMA2, RIVER-2D에서 사용하였으며, 과거 연구에서는 물의 흐름이 전 구간에 존재하기 때문에 박막기법의 한 종류로 분류되기도 하였다. 계산 후 질량 및 운동량 보존에 장점을 지니고 있으며, 늪지대 부근에서 조수를 모의하는 경우 좋은 결과를 보인다.

2. 2 외수범람 해석절차

외수범람은 범람흐름의 유형에 따라 1차원 해석인 유하형, 저류형, 그리고 2차원 해석인 확산형 세 가지로 구분되며, 각각이 제방 일류와 파제로 인해 발생된다(표 1).

표 1. 유형별 범람해석 분류

구분	특성	모식도
유하형 범람해석	범람류가 하천 흐름방향과 유사하게 흐르는 지형 농경지 및 산지등과 같이 범람특성이 단순한 곳에 적용 하도와 제내지가 연결된 1차원 부등류 해석수행	
저류형 범람해석	범람류가 지형에 의해 폐쇄되는 지역 범람지역을 수위-저류량 관계로 표현하여 범람수 위계산 하도와 저류지가 연계된 1차원 부정류 해석수행	
확산형 범람해석	범람시 확산형 범람흐름이 나타나는 지형 하도와 제내지의 격자망을 이용한 2차원 부정류 해석수행	

외수범람의 해석은 하도와 범람원을 구성하여 모의하는 2차원 부정류 해석을 원칙으로 한다. 그러나 해석의 효율성을 위하여 범람원인 및 범람 흐름별로 구분하고 가장 적합한 방법을 선택하여 수행할 수 있다. 만일 하나의 범람구역 안에 다른 형태의 범람유형이 동시에 존재하는 경우 2차

원 부정류해석을 실시하는 것이 타당하나 구역을 재구분하여 시행하는 것도 가능하다(국토교통부, 2008). 이외에도 범람해석 방법은 대상지역의 중요도, 범람지의 지형조건, 이용가능 자료의 범위 및 홍수위험지도의 활용목적 등에 따라 채택되어야 한다. 외수범람 해석과정은 그림 2와 같다.

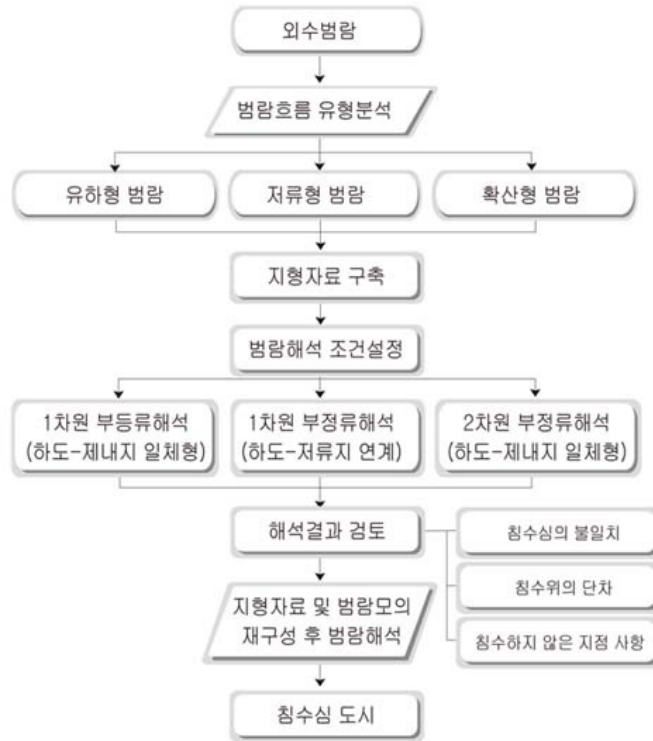


그림 2. 외수범람 해석절차

3. 적용사례

본고에서는 다음과 같이 수위강하 및 조위조건에 의해 발생하는 마름/젖음 현상을 모의한 사례와 실제 홍수사상에서 하천 적용사례를 정리하였다. 수치모의에 적용된 모형은 HDM-2D(서일원과 송창근, 2010; Song et al., 2012) 및 Nays2D이다.

3.1 수위 강하에 의한 마름 발생 영역 적용 사례

원뿔형 섬 영역에서의 마름/젖음 해석 기법을 적용하기 위해 HDM-2D를 이용하여 그림 3과 같이 바닥고 EL. 0 m부터 EL. 0.5 m까지 변화하는 원뿔형 섬 영역을 구축하고 수위가 EL. 0.6 m부터 EL. 0.3 m까지 하강하도록 경계조건을 입력하여 모의 시작 후 200 초부터 원뿔형 섬의 일부 구간에서 마름이 발생되도록 수치모의 조건을 구

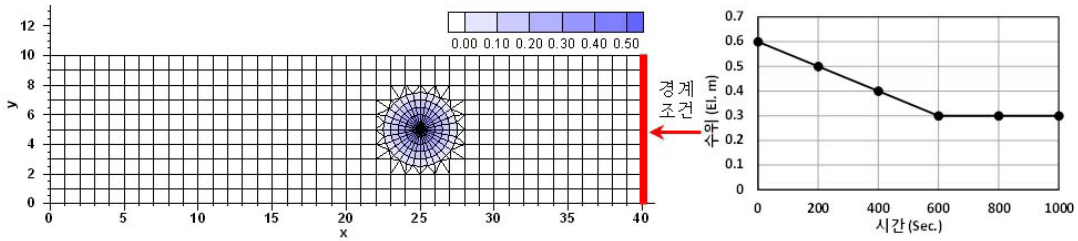
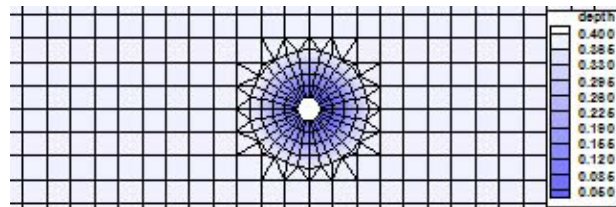
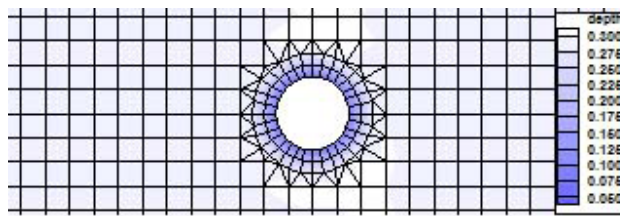


그림 3. 원뿔형 섬 영역 모의영역 바닥고(좌) 및 경계 조건(우)



(a) t=440 sec



(b) t=1,000 sec.

그림 4. 원뿔형 섬 영역 수치모의 결과

성하였다. 그림 4는 시간에 따른 수심분포를 도시한 것으로 마름이 발생한 영역은 여백으로 나타내었다. 그림 4(a)와 같이 t=440 sec.에서는 수위조건이 0.4 m 이하로 부여되어 원뿔형 섬의 최정점을 포함하는 방사형 영역에 마름이 발생하였음을 알 수 있고, 그림 4(b)에서는 수위조건이 0.3 m까지 낮아져서 보다 넓은 영역에서 마름이 발생하였음을 확인할 수 있다.

3.2 조위에 의한 마름 발생 영역 적용 사례

단순 지형(Linear bottom slope)에서 조위조건에 따른 마름/젖음 발생 영역을 모의하기 위해

HDM-2D와 Hokaido 대학의 Shimizu 교수가 개발한 2차원 부정류 흐름해석 모형인 Nays2D를 이용하여 기존 연구결과와 비교하였다. 모의를 위한 경계조건과 지형격자는 그림 5, 6에서와 같이 Heniche 등(2000)의 연구와 동일한 조건으로 모의하였다.

그림 7은 HDM-2D와 Nays2D를 이용하여 조위변화에 따른 수위변화 및 유속변화결과를 Heniche 등(2000)의 연구결과와 비교하여 나타내었다. 그림 7(a), (b)와 같이 수위가 하강함에 따라 마름이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 같은 시간에서의 수위와 유속결과는 기존연구와 비슷한 패턴을 보이는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 7(c),

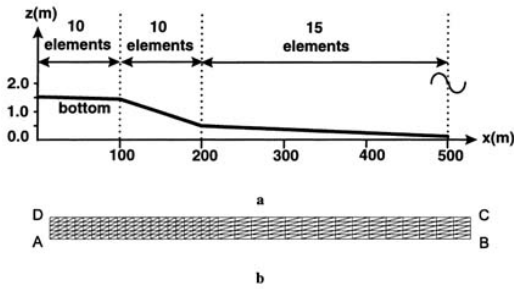


그림 5. 지형(중단면) 및 격자 (Heniche et al., 2000)

$$h = h_0 + \eta \cos 2\pi \frac{t}{T}$$

$h_0 = 1 \text{ m}$
 $\eta = 0.75$
 $T = 3,600 \text{ sec}$
 $\Delta t = 3 \text{ min}$

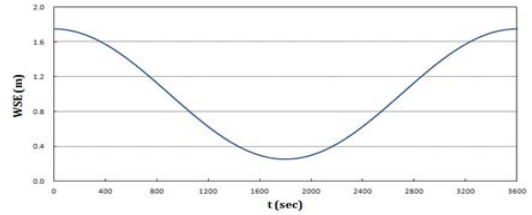
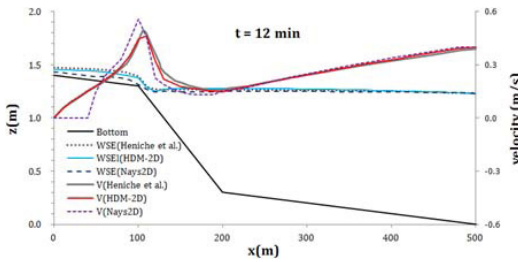
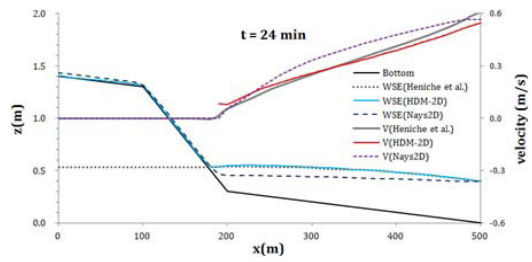


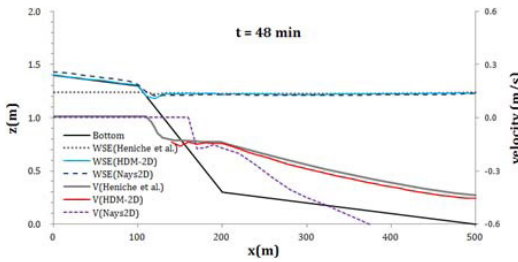
그림 6. 경계 조건 (Heniche et al., 2000)



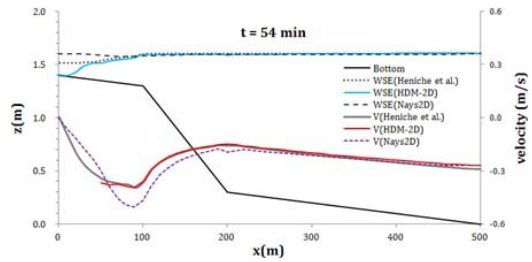
(a) t=12 min



(b) t=24 min



(c) t=48 min



(d) t=54 min

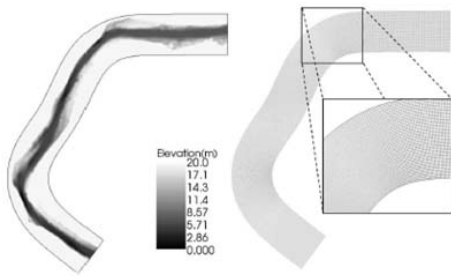
그림 7. 수치모의 결과 비교(Heniche et al., HDM-2D, Nays2D)

(d)와 같이 수위가 상승함에 따라 젖음이 발생하였으며, 수치모의 결과 기존연구와 비슷한 패턴을 보이고 있음을 알 수 있다.

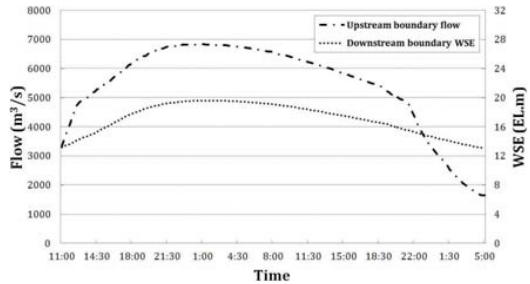
3. 3 대하천 홍수터 적용사례

대하천사업 이후 하천의 둔치구간에 생태공원

및 체육시설 등과 같은 다양한 친수시설들이 조성되어 있으며, 큰 강우사상에서 둔치구간이 침수가 발생함에 따라 마름/젖음 현상이 발생한다. 태풍 사상에서 마름/젖음 현상이 발생하는 둔치구간에서의 수리학적 영향을 분석하기 Nays2D를 실제 자연하천에 적용하였다. 모의구간은 강정고령보 하류에 위치한 화원수위관측소로부터 달성보 직



(a) 지형 및 격자 구축



(b) 경계조건

그림 8. 모의구간의 지형 구축 및 경계조건(구영훈 등, 2014)

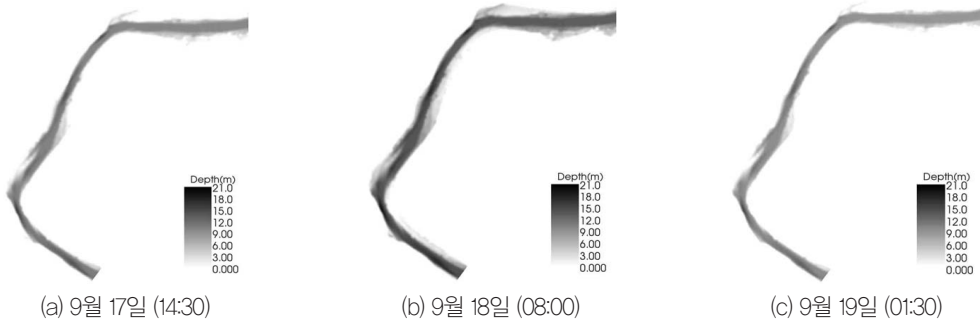


그림 9. 시간에 따른 침수심 변화(구영훈 등, 2014)

상류구간까지 약 15 km에 이르는 구간을 모의하였으며, 2012년 9월 17일부터 19일까지 태풍 산바가 내습하여 침투홍수량이 발생한 전·후로 하여 총 42시간에 걸쳐 부정류 모의를 실시하였다(그림 9).

태풍 사상에서의 실제 자연하천에 대한 흐름해석모형의 적용결과 둔치구간에서 시간에 따라 발생하는 마름/젖음 현상에 대한 모의가 가능하였다.

의 시 수위의 시간적 변화에 따라서 둔치 구간에서의 낮은 수심 또는 마른 구간이 발생하게 되므로 마름/젖음에 대한 모의가 중요하다고 판단되며, 대상지 특성을 파악하고 사용자가 반드시 필요로 하는 기능의 우선순위를 적절히 선별한 후 최적의 모형을 선정하거나 개발하고, 합리적인 절차를 따르는 것이 하천범람 모의에 있어서 현실적인 방법일 것으로 판단된다.

4. 결론

본고에서는 홍수로 인한 하천범람 및 홍수범람 지역을 예측하기 위한 수치해석모형의 마름/젖음 기법과 홍수범람 해석절차 및 실제 적용사례를 살펴보았다. 지형이 복잡한 실제 하천에서의 범람모

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11-기술혁신-C06)에 의해 수행되었습니다.



참고문헌

- 구영훈, 김영도 (2014). “홍수시 둔치구간의 수리해석을 위한 2차원 모형 비교.” 대한습지학회, Vol. 16, No. 1, pp. 93-102.
- 국토교통부 (2008). 홍수위험지도 기본계획보완 보고서. 한강홍수통제소.
- 배용훈, 조용식 (2004). “FLUMEN 모형의 홍수범람 적용성 검토.” 한국수자원학회 2004년도 학술발표회, pp. 1376-1380.
- 서일원, 송창근 (2010). “천수흐름 해석을 위한 2차원 유한요소모형의 개발.” 대한토목학회 논문집, Vol. 30, No. 2B, pp. 199-209.
- 소방방재청 (2011). 재해연보 2011.
- Heniche, M., Secretan, Y., Boudreau, P., and Leclerc, M. (2000). A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries, *Advances in Water Resources*, vol. 23, pp. 359-372.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, New York.
- Song, C. G., Seo, I. W., and Kim, Y. D. (2012). Analysis of secondary current effect in the modeling of shallow flow in open channels, *Advances in Water Resources*, vol. 41, pp. 29-48.