

# 칼만필터 기법에 의한 레이더 강우 보정 및 분포형 모형을 이용한 홍수 모의

## Radar Rainfall Adjustment by Kalman-Filter Method and Flood Simulation using two Distributed Models

배영혜\* , 김병식\*\* , 서병하\*\*\* , 김형수\*\*\*\*

Young Hye Bae, Byung Sik Kim , Byung Ha Seoh , Hung Soo Kim

### 요 지

본 연구에서는 레이더 강우를 이용하여 시공간적 변동성을 고려한 격자형 면적강우량을 산정하기 위하여 추계학적 방법인 칼만필터 기법을 이용하여 지상 강우 관측망과 레이더 강우 관측망을 조합하여 면적강우량을 산정하였다. 또한 전통적인 지상 강우량을 면적강우량으로 전환하는 기법인 Thiessen법, 역거리법, 크리깅 기법을 이용하여 면적강우량을 산정한 후 칼만필터 기법에 의해 보정된 면적 레이더 강우와 비교 하였다. 그 결과, 칼만필터 기법에 의해 보정된 레이더 강우는 실제 강우 분포와 유사한 공간분포를 가지는 원시 레이더 강우 분포를 잘 재현하면서도 강우 체적(볼륨)은 우량계 자료의 체적과 유사하게 나타났다. 그리고 칼만필터 기법에 의해 보정된 레이더 강우를 물리적 기반의 분포형 모형인 Vflo<sup>TM</sup> 모형과 준분포형 모형인 ModClark 모형에 적용하여 홍수유출을 모의하였다. 그 결과, Vflo<sup>TM</sup> 모형은 침투시간과 침투치가 관측 수문곡선과 유사하게 모의되었으며 ModClark 모형은 총 유출체적에서 좋은 결과를 나타냈다. 그러나 매개변수 검증에서는 Vflo<sup>TM</sup> 모형이 ModClark 모형보다 관측 수문곡선을 잘 재현하였다. 이를 통해 지상강우와 레이더 강우를 적절하게 조합하여 정확도 높은 면적강우량을 산정하고 분포형 수문모형과 연계하여 홍수유출모의를 실시할 경우 충분한 적용성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

**핵심용어** : 레이더 강우, 칼만필터, 격자형 분포모형, 홍수모의

### 1. 서 론

기존의 강우는 지상에 설치된 우량계에 의하여 관측이 되어 왔으며, 우량계는 점 강우량을 제공하고, 점 강우량은 우량계 주변을 둘러싸고 있는 지역의 강우량을 추정하기 위해 이용된다. 우량계 관측망은 유역 또는 특정 지역의 강우패턴을 결정하기 위해 이용되고 있으나 부족한 정보로 인해 우량계와 우량계 사이의 공간 강우분포에 대한 정확한 정보를 알 수 없다. 따라서, 수문학자들과 수문기술자들은 저해상도의 적절한 공간적 규모로 설치되어 있는 우량계를 통해 측정된 점 강우량을 Thiessen 다각형법, 역거리법(inverse distance squared weighting), 또는 지형통계학적 크리깅(Kriging) 기법 등의 공간적 내삽기법을 이용하여 유역에 대한 공간(면적) 강우량으로 변환하고자 하는 노력을 해 왔으나 불행하게도 이 기법들에 의해 추정된 공간적 분포는 강우가 실제적으로 어떻게 내리는지와 거의 연관성을 가지고 있지 않아 종종 잘못된 시간과 장소에서 잘못된 강우량을 산정한다. 최근 정확한 강우 추정을 위한 도구로써 레이더를 이용하고 있다. 레이더는

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 연구원 · E-mail : baebae@kict.re.kr  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구실 선임연구원 · E-mail : hydrokbs@kict.re.kr  
\*\*\* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 교수 · E-mail : seohydro@inha.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · E-mail : sookim@inha.ac.kr

국부적으로 떨어지는 강우 변동성을 고해상도 관점에서 제공하고, 1 km × 1 km 또는 그 이상의 크기를 갖는 격자 형태로 강우 관측을 하기 때문에 일반적인 우량계의 밀도에 비해 상당히 높은 공간 밀도의 강우에 대한 정보를 제공할 수 있다. 그러나 레이더는 강우량을 직접 측정하는 것이 아니라, 대기 중의 반사도를 측정한 후 반사도와 강우강도의 가정된 분포를 이용하여 강우량을 추정한다. 즉, 레이더는 어느 지역에 정확한 강우량을 추정하는 것이 아니라, 각 지역에 상대적으로 얼마만큼의 강우가 내렸는지를 추정함으로써 공간적 변동을 알 수 있다.

본 연구의 목적은 보정 레이더 강우와 격자형 강우-유출 모형을 연계하여 홍수유출모의를 실시함으로써 국내 유역에서의 적용성을 검토하는데 있다. 본 연구에서는 먼저, 추계학적 방법인 칼만필터 기법을 사용하여 임진강 레이더 강우자료를 실시간 보정(Adjustment)하였으며 보정된 레이더 강우 자료를 준 분포형 모형인 Modclark(Modified Clark)와 물리적 기반의 분포형 모형인 Vflo™ 모형에 입력하여 홍수유출 모의를 실시하였다. 또한, 현재 실무에서 많이 사용하는 Thiessen 방법, 역거리 방법, 크리깅(Kriging) 방법을 이용하여 지상 점 강우량 자료로부터 추정된 면적 강우량을 앞에서와 마찬가지로 두 모형에 입력하여 홍수 유출수문곡선을 산정한 후 실제 유출 수문곡선과 비교하였다.

## 2. 칼만필터 기법을 이용한 레이더 강우 보정

Ahnert (1986), Smith와 Krajewski(1991), Anagnostou 외(1998), Seo 외(1999), 그리고 Dinku 외(2002)는 레이더 자료를 이용하여 실시간 MFB를 예보하고 갱신하기 위해 칼만필터 식을 사용했다. 본 논문에서는, Chumchean et al.(2003)에 의해 제안된 식 (1)은 시간에 따른 분산을 추정하기 위해 사용하였다. 로그 레이더 강우 MFB(logarithmic mean field radar rainfall bias)  $\beta$ 는 다음과 같이 정의했다:

$$\beta_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log_{10} \left( \frac{G_{i,t}}{R_{i,t}} \right) \quad (1)$$

여기서  $G_{i,t}$ 는 지상 우량계 i와 시간 t에서 매 시간의 강우량(mm),  $R_{i,t}$ 는 지상 우량계 i와 시간 t에서 보정되지 않은 레이더 강우량(mm)이며, n은 그 시간에 가능한 레이더-우량계 한 쌍의 자료의 수이다. 그림 1은 칼만필터 기법의 흐름도를 나타낸 것이다.

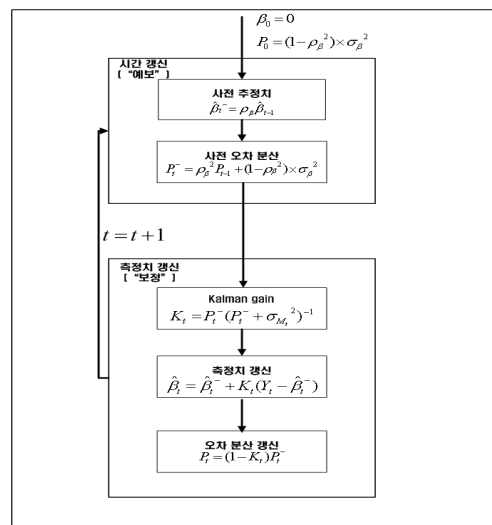


그림 1 칼만필터 기법 흐름도

## 3. Vflo™ 모형과 ModClark 모형 개요

Vflo™ 모형은 미국 Oklahoma 대학에서 개발한 물리적 기반의 분포형 수문모형으로 수치해를 구하기 위하여 공간적으로는 유한요소법(Vieux, 2001, 2002, 2004)을, 시간적으로는 유한차분 음해법을 사용하고 지표유출 산정을 위하여 운동파 방정식(Kinematic Wave Equation, KWA)을 사용한다(김병식 등, 2007). 그림 2(a)은 Vflo™ 모형의 개념을 나타낸 것이다(Vieux, 2004).

HEC의 John Peter는 실시간 수문 예측 적용에서 유역의 공간 분포와 강우의 공간 분포 정보를 이용하기 위해 ModClark을 개발하였다. ModClark 모형의 개념은 Clark의 개념적인 강우-유출 모형에서 사용하고 있는 기본 원리를 기초로 하여 공간적으로 분포된 강우자료의 모의 기능을 추가한 것이다. ModClark의 실시간 처리과정은 현재 각각의 셀에 격자 강우 자료의 적용되었으며 방법론은 그림 2(b)와 같이 도시하였다.

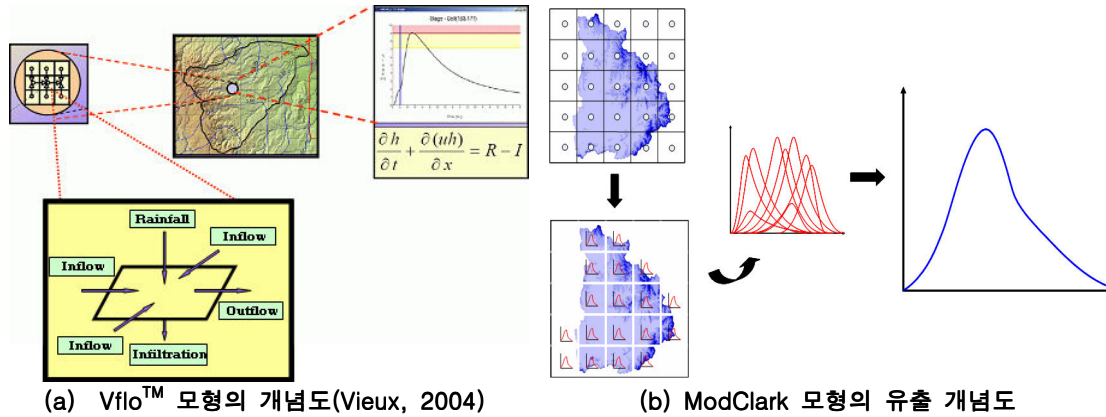


그림 2. 분포형 모형의 개념도

#### 4. 모형의 적용 및 분석

본 연구에서는 레이더 강우와 분포형 모형을 적용하여 홍수모의를 하기 위해 홍수예보를 운영하고 있는 안성천 유역을 대상유역으로 선정하여 레이더 강우를 산정하였다. 그림 3은 레이더에 의해 관측된 안성천 유역도이다. 대상 호우로는 2003년 7월 22일 01:00 - 7월 23일 04:00, 2003년 8월 19일 11:00 - 8월 20일 01:00, 2003년 8월 27일 11:00

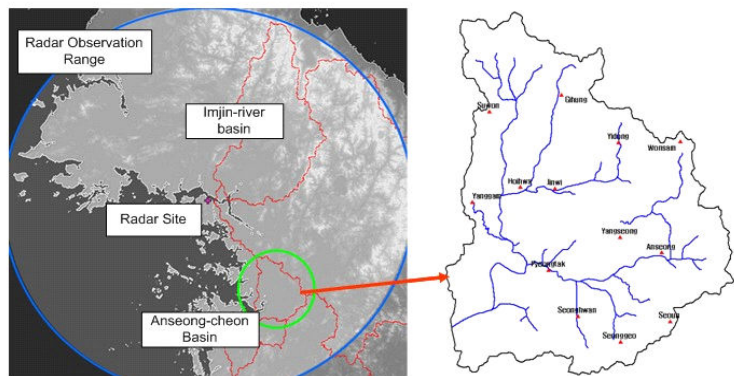


그림 3. 안성천 유역도

- 8월 27일 23:00, 2003년 9월 7일 03:00 - 9월 8일 05:00 자료를 이용하였으며, 각각의 강우사상에 대해, 강우관측소 위치에서의 보정된 레이더 강우에, 면적강우량 산정을 위해 가장 보편적으로 사용되고 있는 Thiessen법, 역거리법, 크리깅 기법을 적용하여, 지상강우를 이용한 면적강우량과 비교하였다. 그림 4는 2003년 8월 27일 16시 ~ 20시까지 자료를 이용하여 면적강우량 산정 기법에 의해 산정된 면적강우량을 이용하여 공간분포를 나타낸 것이다. 그림 4에서 보는 바와 같이, 점강우량을 면적 강우량으로 산정하는 기법에 의해 산정된 강우량을 공간적으로 분포하였을 때 실제 강우의 공간 분포와 다른 형태의 공간 분포를 확인할 수 있었다. 또한 원시 레이더가 실제 강우 분포와 비슷한 형태의 공간 분포를 가지고 있으나 과소 추정하는 경우가 있는데 이런 경우 칼만필터 기법에 의해 보정된 것을 알 수 있었다.



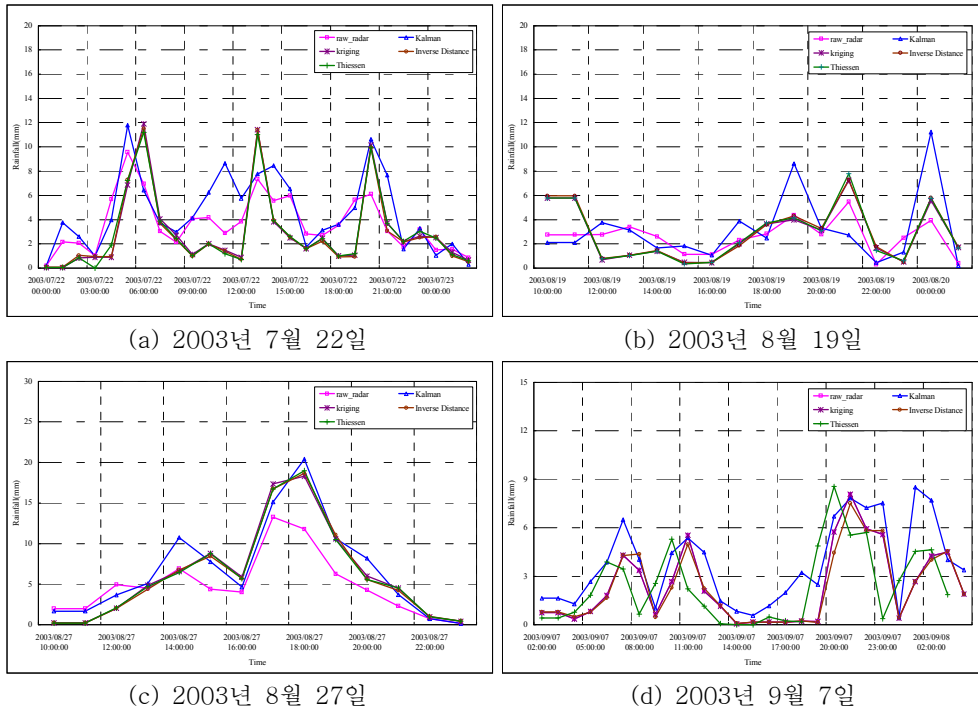
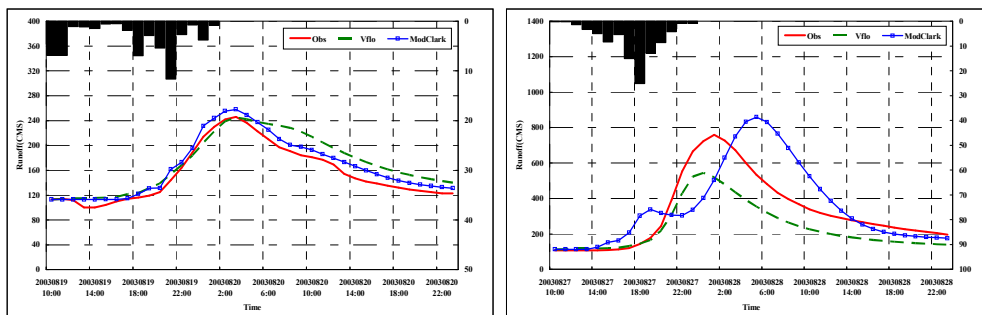


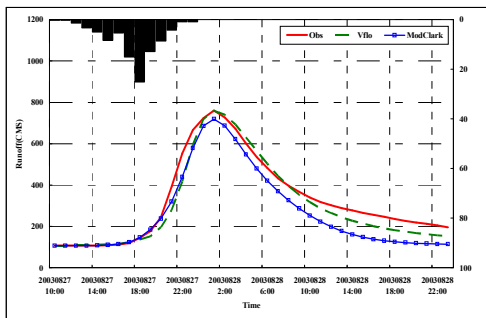
그림 5. 각 사상별 면적 강우량

그림 6 ~ 8에서 볼 수 있듯이 Vflo<sup>TM</sup> 모형의 매개변수 보정 후 유출 모의 결과가 ModClark 모형의 매개변수 보정 후 유출 모의 결과보다 관측 수문곡선을 잘 재현하고 있다. 또한 사상 검증 결과에서 보는 것과 같이, Vflo<sup>TM</sup> 모형은 침투시간을 잘 재현하였으나 침투치는 과소 추정되었다. 그러나, ModClark 모형 검증에서는 침투시간과 침투치 모두 관측 수문곡선과 유사하게 재현하지 못하였다. 표 1과 표 2는 Vflo<sup>TM</sup> 모형과 ModClark 모형의 결과를 보다 정량적으로 비교하기 위하여, 각 모형의 모의 결과에 대하여 ME(Model Efficiency), RMSE(Root Mean Square Error), MRE(Mean Relative)와 FSE(Fractional Standard Error)를 계산하였고 각각의 오차 분석 계산식은 배영혜(2008) 논문을 참고하였다. 표 1과 표 2에서 볼 수 있는 바와 같이 Vflo<sup>TM</sup> 모형의 유출 수문곡선이 ModClark 모형의 유출 수문곡선보다 관측 수문곡선을 잘 재현했음에도 불구하고 ModClark 통계치가 더 좋은 결과를 가지는 경우를 볼 수 있다.

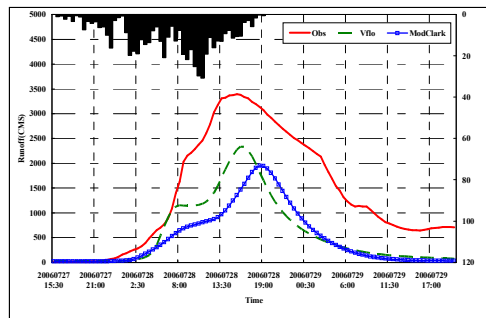


(a) 2003년 8월 19일 사상 보정 (b) 2003년 8월 27일 사상 검증  
그림 6. Vflo<sup>TM</sup> 모형과 ModClark 모형의 보정 후 결과 비교(평택 지점)



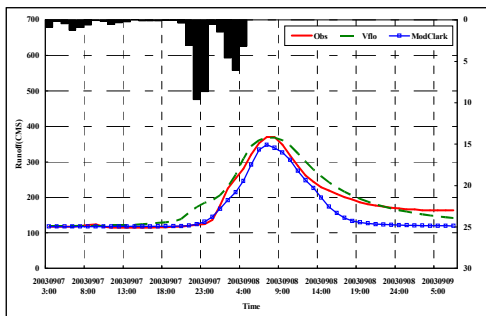


(a) 2003년 8월 27일 사상 보정

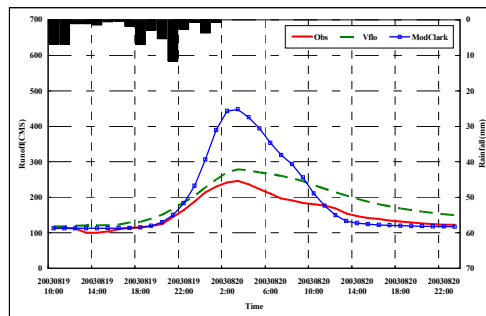


(b) 2006년 7월 27일 사상 검증

그림 7. Vflo<sup>TM</sup> 모형과 ModClark 모형의 보정 후 결과 비교(평택 지점)



(a) 2003년 9월 7일 사상 보정



(b) 2003년 8월 19일 사상 검증

그림 8. Vflo<sup>TM</sup> 모형과 ModClark 모형의 보정 후 결과 비교(평택 지점)

표 1. Vflo<sup>TM</sup> 모형과 ModClark 모형의 오차계산 결과(매개변수 보정후)

구 분 호 우 사 상	ME		RMSE		MRE		FSE	
	Vflo <sup>TM</sup>	Mod	Vflo <sup>TM</sup>	Mod	Vflo <sup>TM</sup>	Mod	Vflo <sup>TM</sup>	Mod
2003년 8월 19일	0.9075	0.9914	0.0660	0.2436	-0.034	-0.0231	0.0882	0.077
2003년 8월 27일	0.7612	0.8592	0.0551	0.0135	0.0617	-0.2733	0.1261	0.3413
2003년 9월 7일	0.9445	0.8293	0.0242	0.0324	-0.1076	-0.3326	0.1563	0.4731

표 2. Vflo<sup>TM</sup> 모형과 ModClark 모형의 오차계산 결과(모형 검증)

구 분 호 우 사 상	ME		RMSE		MRE		FSE	
	Vflo <sup>TM</sup>	Mod	Vflo <sup>TM</sup>	Mod	Vflo <sup>TM</sup>	Mod	Vflo <sup>TM</sup>	Mod
2003년 8월 19일 (2003년 8월 27일)	0.6547	0.3081	0.0086	0.0061	-0.2732	0.10635	0.3584	0.5073
2003년 8월 27일 (2006년 7월 27일)	0.2336	0.0385	0.0010	0.0009	-0.5692	-0.6414	0.7098	0.7950
2003년 9월 7일 (2003년 8월 19일)	0.3261	-2.2412	0.02816	0.01284	0.2065	0.2437	0.2317	0.5081

## 6. 요약 및 결론

본 논문에서는 안성천 유역을 대상으로 칼만필터 기법을 이용하여 레이더 강우를 보정하였으며 이 보정된 레이더 강우를 물리적 기반의 분포형 모형인 Vflo<sup>TM</sup> 모형과 개념적 분포형 모형인 ModClark 모형을 이용하여 홍수 유출을 모의하였다. 이를 통해 칼만필터 기법과 분포형 모형의 국내 적용성을 확인하고자 하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 추계학적 기법인 칼만필터 기법을 사용하여 임진강 레이더 강우를 보정한 결과, 칼만필터 기법에 의해 보정된 레이더 강우는 원시(raw) 레이더 강우 분포의 공간적 변동 특성을 유지하면서 지상 강우(우량계 강우)의 강우 심도를 잘 재현한 것으로 나타났다.

2. 점 강우량을 면적강우량으로 전환하는 기법 중 Thiessen 법과 역거리법, 크리깅법을 이용하여 산정한 면적강우량과 비교한 결과, 실제 면적강우량은 알 수 없으므로 어느 면적 강우량이 정확한지는 알 수 없으나 칼만필터 기법에 의해 산정된 면적강우량은 지상 강우량을 충실히 고려하면서도 실제 강우 분포를 잘 재현함을 확인할 수 있었다.
3. 안성천 유역 3개 호우 사상에 대하여 Vflo<sup>TM</sup> 모형과 ModClark 모형을 이용하여 평택지점에서 매개변수를 보정하고 각각 다른 사상에 대하여 모형 보정을 실시한 후 유출량을 모의한 결과를 비교하였다. 그 결과, 매개변수 보정 후 유출 모의 결과를 비교하였을 때, Vflo<sup>TM</sup> 모형은 침투 홍수량 발생시간과 침투 홍수량 모두 관측 수문곡선과 일치하였으나 총 유출 체적을 비교하였을 때 ModClark 모형의 유출 모의 결과가 관측치를 잘 재현하였다. 또한 다른 사상을 이용한 모형의 검증 결과, Vflo<sup>TM</sup> 모형은 매개변수 보정 결과처럼 관측 수문곡선에 유사하게 일치하지는 않았으나 침투 홍수량 발생 시간과 수문곡선의 형태는 관측 수문곡선을 잘 재현하였으나 ModClark 모형을 침투 홍수량 발생 시간이나 침투 홍수량 모두 잘 재현하지 못하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 Vflo<sup>TM</sup> 모형의 경우 유역내의 물리적 특성 변화에 따른 영향이나 실측 자료를 이용하여 모의하고 보정하기 때문에 매개변수 보정 및 모형의 검증 결과의 정확도가 높게 모의되지만 ModClark 모형의 경우 개념적 의미에 가까운 분포형 모형으로 유역의 물리적 특성을 거의 묘사할 수 없고 매개변수 보정이 최적화에 의해 실시되기 때문에 보정 결과의 정확도는 뛰어나지만 검증결과의 정확도는 낮게 나타나는 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 김병수, 김경준, 윤정수, 유철상 (2007). “HEC-HMS를 이용한 격자 강우의 유출 해석 비교: 레이더, 강우계 및 레이더-강우계 합성 강우의 비교”, 대한토목학회 정기학술대회, pp. 1220-1223
2. 김병식, 홍준범, 김보경, 김형수 (2007), “중랑천 유역에서의 Vflo<sup>TM</sup> 모형의 민감도 분석”, 2007년 대한토목학회 정기학술대회, pp.2010-2014
3. 김병식, 홍준범, 김형수, 최규현 (2007) “조건부 합성방법을 이용한 레이더 강우와 지상가우자료의 조합”, 대한토목학회 논문집, 제27권 제3B호 pp.255-265
4. 배영혜 (2008). “칼만필터 기법에 의한 레이더 강우 보정 및 분포형 모형을 이용한 홍수 모의”, 인하대학교 석사학위논문
5. 안상진, 윤석환 (2005), “ModClark 모형을 이용한 유출 해석”, 대한토목학회 논문집, Vol38. No.3. pp.245-257.
6. 홍준범, 김병식, 윤석영 (2006). "Vflo<sup>TM</sup>모형을 이용한 물리기반의 분포형 수문모형의 정확성 평가", 대한토목학회 논문집 제 26권, 제 6B호, pp. 613-622
7. Ahnert, P.R., Krajewski, W.F., and Johnson, E. R., (1986), “Kalman filter estimation of radar-rainfall mean field bias”, 23rd Radar Meteorology Conf. Amer. Meteor. Soc., pp.JP33-37
8. Anagnostou, E.N., Krajewski, W.F., Seo, D.-J., Johnson, E.R. (1998), "Mean-field rainfall bias studies for WSR-88D", Journal of hydrologic engineering, Vol. 3, No. 3, pp.149-159