

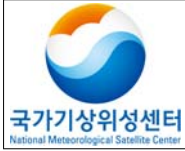
강우강도
알고리즘 기술 분석서

Code: NMSC/SCI/ATBD/RI
Issue: 1.0 Date:2012.12.21
File: NMSC-SCI-ATBD-RI_v1.0.hwp
Page: 22



강우강도(RI: Rainfall Intensity) 알고리즘 기술 분석서 (RI-v1.0)

NMSC/SCI/ATBD/RI, Issue 1, rev.0
2012.12.12



강우강도
알고리즘 기술 분석서

Code: NMSC/SCI/ATBD/RI
Issue: 1.0 Date:2012.12.21
File: NMSC-SCI-ATBD-RI_v1.0.hwp
Page: 22

REPORT SIGNATURE TABLE

Function	Name	Signature	Date
Prepared by			
Reviewed by			
Authorised by			



강우강도
알고리즘 기술 분석서

Code: NMSC/SCI/ATBD/RI
Issue: 1.0 Date:2012.12.21
File: NMSC-SCI-ATBD-RI_v1.0.hwp
Page: 22

DOCUMENT CHANGE RECORD

Version	Date	Pages	Changes

차 례

1. 개요
2. 배경 및 목적
3. 알고리즘
 - 3.1 이론적인 배경 및 근거
 - 3.2 산출방법
 - 3.3 산출과정
 - 3.3.1 입력자료
 - 3.3.2 DPM 과정
 - 3.3.3 POM 과정
 - 3.4 검증
 - 3.4.1 검증방법
 - 3.4.2 검증자료
 - 3.4.3 시공간일치방법
 - 3.4.4 검증결과분석
4. 산출결과 해석방법
5. 문제점 및 개선 가능성
6. 참고문헌

List of Tables

- Table 1 : Quality flag for the CMDPS rainfall intensity.
- Table 2 : Binary category contingency table for validation of CMDPS rainfall intensity.
- Table 3 : Multi Category contingency table for validation of CMDPS rainfall intensity.
- Table 4 : The validation result between CMDPS RI and AWS and SSM/I rainfall at 1933UTC Jul. 23 2008.

List of Figures

- Figure 1 : Microwave data for east asia region at Jul. 14. 2007.
- Figure 2 : Temporal and spatial coincident between COMS BTT and SSM/I rainrate at 0745UTC Apr. 27 2011.
- Figure 3 : Temporal and spatial coincident data between COMS BTT(brightness temperature) and SSM/I (F15) rainrate from 0033UTC Apr. 15 2011 to 2333UTC Apr. 17 2011.
- Figure 4 : PDF and CDF of COMS BTT(Brightness temperature) and SSM/I rainrate at 0745UTC Apr. 27 2011.
- Figure 5 : Lookup table between COMS BTT(brightness temperature) and SSM/I rainrate at 0745UTC Apr. 27 2011.
- Figure 6 : Fig. 6. Time series for Number of data pairs in estimated LUTs in Apr. 2011.
- Figure 7 : Estimated rainfall intensity images at 0400UTC Jul. 10 2011.
- Figure 8 : Flow chart for the CMDPS RI algorithm.
- Figure 9 : The Schematic diagram for the RI DPM procedure.
- Figure 10 : The time series of LUTs.
- Figure 11 : Estimated CMDPS RI and quality flag image on 0033UTC Nov. 17. 2008.
- Figure 12 : Diagram for the CMDPS RI POM procedure.
- Figure 13 : Flow chart for the validation of CMDPS rainfall intensity.
- Figure 14 : CMDPS rainfall intensity and Quality flag at 1933UTC Jul. 23 2008.
- Figure 15 : Validation dataset between CMDPS RI and AWS(a) and SSM/I(b) rainfall at 1933UTC Jul. 23 2008.

List of Acronyms

ACC	Accuracy
AWS	Automatic Weather Station
ARKT	Arkin Technique
BTT	Brightness Temperature
CDF	Cumulative Distribution Function
CMDPSCOMS	Meteorological Data Processing System
CMORPH	CPC MORPHed precipitation
COMS	Communication, Ocean, and Meteorological Satellite
CST	Convective–Stratiform Technique
DPM	Data Processing Module
DMSP	Defense Meteorological Satellites Program
FTP	File Transfer Protocol
GMSRA	GOES Multispectral Rainfall Algorithm
GPI	Goes Precipitation Index
HSS	Heidke Skill Score
LUT	Look–Up Table
MTSAT–1R	Multi–functional Transport Satellite
NAWT	Negri–Adler–Wetzel Technique
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
PC	Proportion Correct
PDF	Probability Distribution Function
POD	Probability of Detection
POM	Post–Processing Module
PMM	Probability Matching Method
QC	Quality Control
RMSE	Root Mean Square Error
SCaMPR	Self–Calibrating Multivariate Precipitation Retrieval
SSM/I	Special Sensor for Microwave Imager
TS	Threat Score
UTC	Coordinated Universal Time
VAM	Validation Module

1. 개요

CMDPS의 강우강도 산출방법은 COMS의 적외채널 밝기온도와 SSM/I 강우강도 자료를 이용한 경험적 추정법으로써 이러한 간접적 강우강도 산출방법은 두 위성 자료에 대한 관계성 변동에 의한 일정 수준의 오차 유발이 필연적이거나 넓은 지역에 대한 시간별 강수량 변화 계산이 용이하기 때문에 악기상에 따른 집중호우 등의 실시간 예보 등에 매우 유용하게 사용될 수 있다. 즉 동아시아 지역에 대한 강우강도의 시공간 분포 계산을 위하여 COMS 관측 시각부터 36시간 이전의 마이크로웨이브 자료(SSM/I)에 대한 육지와 해양의 강우강도 산출 조건표(Look-Up Table, LUT)가 실시간 이용되고 일정기간의 평균된 정적 조건표를 적용하여 안정적인 강우강도 산출을 유지하도록 하였다. 산출된 강우강도 결과는 한반도 영역의 자동기상관측시스템(AWS) 자료와 동아시아의 SSM/I 위성의 관측값과 비교 검증된다.

CMDPS 강우강도 산출에 대한 역사적 배경은 2장에서 논의될 것이고 3장에서는 강우강도 산출 알고리즘의 이론적 배경과 산출 방법 및 검증 방법이 설명될 것이다. 그리고 4장과 5장에서는 산출결과에 대한 해석 방법과 강우강도 알고리즘의 문제점 및 개선 가능성을 언급할 것이다.

2. 배경 및 목적

COMS 위성의 적외 및 가시광선 관측 자료들은 중규모 시스템 변화에 의하여 발생하는 구름들의 밝기 온도와 복사 방출량 및 반사율 등 강우강도 산출을 위한 유익한 시·공간 정보들을 제공한다. 정지위성 자료에 의한 강우강도 추정의 일반적인 방법은 위성 밝기온도 자료와 지상에서 관측된 강우강도 사이의 경험적 관계를 이용하는 것이다. 그러나 직접 관측된 지상 강우강도 자료의 공간 분포는 제한적이고 위성관측 자료와 시간 및 공간 불일치 때문에 정확한 경험식 산출은 쉽지 않으며 또한 강우강도는 구름의 종류와 발달 상태 그리고 지역 및 시간에 따라 그 변화 특성이 다양하기 때문에 이 방법에 의한 강우강도 산출을 더욱 어렵게 한다.

이러한 연구 결과로써 Levizzani(1999)가 지상 관측 강수량이 구름의 정상부의 특성과 관련이 있고 정지궤도 위성의 적외채널을 이용하여 강수를 추정할 수 있음을 제시하였다. 그리고 마이크로웨이브 알고리즘은 위성 궤도의 고도가 높을수록 불확실성이 증가할 수 있으나 수동 마이크로웨이브 물리 이론 등에 근거한 여러 종류의 강우강도 추정 방법들(Special Sensor Microwave/Imager, Wentz and Spencer, 1998; Spencer et al, 1989)이 SSM/I의 자료를 사용하여 개발되었다. 최근에는 마이크로웨이브와 정지위성의 적외채널 혼합 기법이 수치모델 자료동화 및 실시간 운용 연구에 활용되고 있으며 지상

관측 강수량 자료 보완을 위하여 마이크로웨이브 및 레이더 자료 등이 다양하게 이용되고 있다(Turk et al, 2003; Weng et al, 2003; Vincente et al,1998).

정지위성의 적외채널만으로 강우강도를 추정하는 방법으로써 LUT(Kurino,1997), CST(Convective-Stratiform Technique; Adler and Negri, 1988), NAWT(Negri et al,1984) 그리고 ARKT(Arkin, 1979)의 연구 결과들이 있으나 시간과 지역적인 특성 알고리즘이 반영되지 않았기 때문에 강수 시간 및 지역 변동 특성을 적절하게 분석되지 못하였다. 그리고 정지위성에 의하여 관측 및 계산되는 구름 요소들 즉 운정 온도, 구름 광학두께, 운고, 운량 및 운형 등을 이용하여 간접적으로 강우강도를 추정한 연구 결과들은 GPI(Goes Precipitation Index; Arkin and Meisner, 1987), Autoestimator(Vincente, 2002), Hydroestimator(Scofield and Kuligowski, 2003), GMSRA(Ba and Gruber, 2001) 등이 있으나 이들 연구에서 사용된 알고리즘은 시·공간적 제한 문제가 내포되어 있다. 가시광선/적외선과 마이크로웨이브 자료의 혼합된 방법이 사용된 연구로써는 CMORPH(Joyce et al,2004), ScaMPR(Kuligowski, 2002), GPROF(Kummerow et al, 2001) 등의 있으며 이들 방법은 위에 제시된 방법과 비교하여 정확성이 높으나 위성들의 관측 방법 및 시공간 불일치가 중요한 문제점으로 지적된다. 최근 구름분류와 중규모 대류계의 생존 주기를 이용한 강수량 추정 방법(Delgado et al, 2008)과 인공신경망을 이용한 방법들(Sorooshian et al., 2000; Zhang and Scofeld, 1994)이 소개되고 있으나 관련 요소들의 분석 및 실시간 발생하는 급격한 변화들이 적절하게 반영하지 못하고 있다.

CMDPS 강우강도는 정지위성의 밝기온도 자료와 SSM/I 강수 자료의 관련성에 근거하고 Atlas et al.(1990)과 Crosson et al.(1996)의 PMM(Probability Matching Method) 방법을 적용하여 경험적으로 산출된다. 이 경우 SSM/I 강수량 자료는 육지와 해양 사이의 적용 알고리즘이 다르기 때문에 COMS 밝기온도 자료도 육지·해양에 대하여 분리 산출 방법을 적용하였다. 그리고 SSM/I 관측 시각과 자료 수집 및 전송시간 지연에 따른 시간 불일치 문제 때문에 CMDPS 관측 시각부터 36시간 이전 사이의 SSM/I 자료를 CMDPS 자료와 시공간 일치 시키는 방법(동적 LUT)이 사용되나 SSM/I 자료가 36시간 이상 지연되거나 자료 부재인 비상 상황에는 일정기간 동안의 평균 자료(정적 LUT)가 사용된다. 동아시아 지역에 대하여 결과적인 강우강도 산출물 검증을 위하여 SSM/I 자료가 이용되고 한반도 지역에서는 AWS 강수량 자료가 사용된다.

CMDPS의 강우강도 산출 방법은 산출 영역과 운형을 제한할 경우 약간의 정확성 향상이 기대되나 근본적인 채널 제한 때문에 높은 정확성을 기대하기는 힘들다. 그럼에도 불구하고 정지위성에 의한 강우강도 산출은 북반구에 대하여 약 30분의 시간 간격으로 하루 48회 수행되기 때문에 실시간 및 시·공간 강우강도 변화 예측을 위한 중요 자료로 사용될 수 있으며 또한 시간 연속 및 공간 밀도 특성 때문에 수치모형 입력 자료로 활용되어 일기예보 능력 향상에 크게 기여할 수 있다.

3. 알고리즘

3.1. 이론적인 배경 및 근거(Theoretical Background)

정지위성에 장착된 10.8 및 12 μm 센서는 대기 중의 수증기에 민감하게 반응하고 구름이 존재할 경우 운정 온도 및 운고 정보를 제공한다. 즉 높은 운고는 낮은 운정 온도를 의미하며 이러한 구름 영역의 지상 강수량은 많게 나타난다(Arkin and Meisner, 1987, Adler and Negri, 1988). 마이크로웨이브 위성의 강수량 산출은 정지위성 방법과는 달리 직접적인 방법으로써 물방울 또는 얼음 등의 구름 입자에 의한 복사 방출 및 산란 특성에 따라 계산된다(Wentz and Spencer, 1998; Spencer et al, 1989). CMDPS 강우강도 산출은 위와 같이 정지위성의 연속 관측 특성과 SSM/I의 정확한 강수량 자료를 이용한 것으로써 이들의 관계는 다음 식과 같이 나타낼 수 있으며 두 위성의 정확한 시·공간 일치가 중요하게 작용한다.

$$\int_{R_i}^{R_j} P(R)dR = \int_{BTT_i}^{BTT_j} P(BTT)dBTT \quad (1)$$

식(1)은 정지위성(COMS)의 밝기온도와 SSM/I 자료의 관계를 나타낸 것으로써 Atlas et al.(1990)과 Crosson et al.(1996)이 제안한 PMM(Probability Matching Method) 방법이며 이 식에서 R은 SSM/I의 강수량이고 BTT는 COMS 적외채널의 밝기 온도이다. 이 식은 COMS 적외채널의 밝기온도 BTT의 확률분포함수(Probability Distribution Function)와 SSM/I 강수량 R의 확률분포함수의 경향이 비슷한 것으로 가정하여 BTT와 R의 누적분포함수(Cumulative Distribution Functions : CDFs)가 일치하는 각각의 BTT_i와 R_i의 값들을 계산된다.

3.2. 산출방법(Methodology)

위성자료에 의한 강수량 산출 방법은 정지위성의 밝기온도(T11)와 SSM/I 자료의 시·공간 일치 자료 생성 과정 그리고 육지와 해양 화소에 대한 PMM 및 조건표를 산출 과정으로 분리된다. SSM/I(Wentz and Spencer, 1998; Spencer et al, 1989)는 강수량 탐지 목적으로 DMSP F13~F15에 탑재된 마이크로웨이브 센서로써 그 분해능은 25km×25km이다. SSM/I 센서가 동아시아 영역(90°E~160°E, 10°N~60°N)을 관측하는 횟수는 하루 20회 이상이나 정지위성과 Fig. 1과 같이 시·공간 불일치가 발생된다. 즉 Fig. 1은 2007년 7월 14일에 SSM/I 등 마이크로웨이브 위성의 동아시아 지역을 관측 시각을 표시한 것이다.

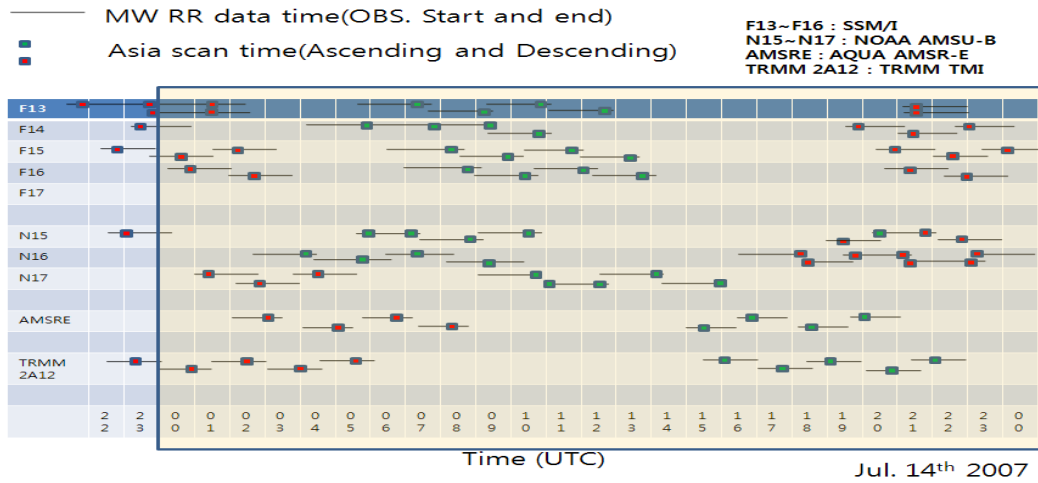


Fig. 1. Microwave data for east asia region at Jul. 14. 2007.

이 그림에서와 같이 F13~F15는 SSM/I 자료로써 1회 관측 시간은 약 120분 이상(검은 실선)이고 빨간색(ascending 노드) 및 녹색 사각형(descending 노드)은 동아시아 지역 관측 시간이며 하루 동안 동아시아 지역 관측 회수는 23회이다. 그러나 최근 F13와 F14의 관측 종료(F13:2009년 11월, F14:2008년 8월)되었기 때문에 하루 동안 동아시아 지역의 관측회수는 약 8회로 급격히 줄어든 상태이다. Fig. 1의 정보를 이용하여 SSM/I 및 정지위성 화소를 시간 일치시켰고 SSM/I의 관측 분해능(12.5km) 이내의 정지위성 밝기온도를 평균하여 공간 일치시켰다. 또한 마이크로웨이브 위성은 해양과 육상 화소에 대하여 다른 알고리즘으로 강수량이 산출되기 때문에 시·공간 일치 자료는 육지와 해양 화소각에 대하여 분리 수행되며 Fig. 2는 2011년 4월 27일 0745UTC의 육지와 해양 및 전체(육지+해양) 영역에 대한 위성 밝기온도와 SSM/I 강수량의 시·공간 일치 결과이다.

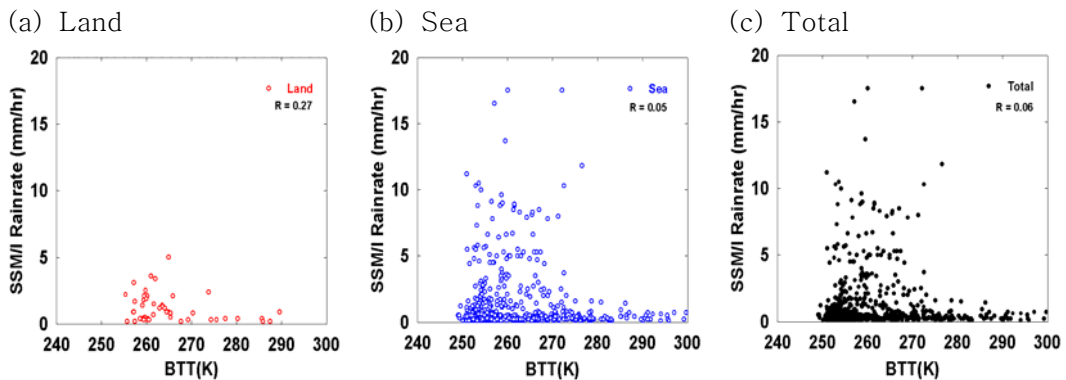


Fig. 2. Temporal and spatial coincident between COMS BTT and SSM/I rainrate at 0745UTC Apr. 27 2011.

이 그림에서와 같이 위성 밝기온도와 SSM/I 강수량의 상관관계는 해양보다 육지 화소의

경우가 높게 나타났다.

Fig. 1에 나타난 것과 같이 F15의 동아시아 영역에 대한 SSM/I의 관측 시간과 자료 처리 및 전송 시간 때문에 SSM/I 강수량 자료는 일 최대 16시간 이상의 공백이 발생할 수 있다. 따라서 2010년 4월 15일부터 4월 17일의 동아시아 영역에 대한 시·공간 일치 자료수를 분석한 결과 Fig. 3과 같이 2011년 4월 15일 00~07UTC와 15~24UTC 시간동안 지점일치 자료가 없는 것으로 나타났다.

이러한 자료 공백 해소를 위하여 정지위성(COMS) 관측 시각부터 36시간 이전 자료들을

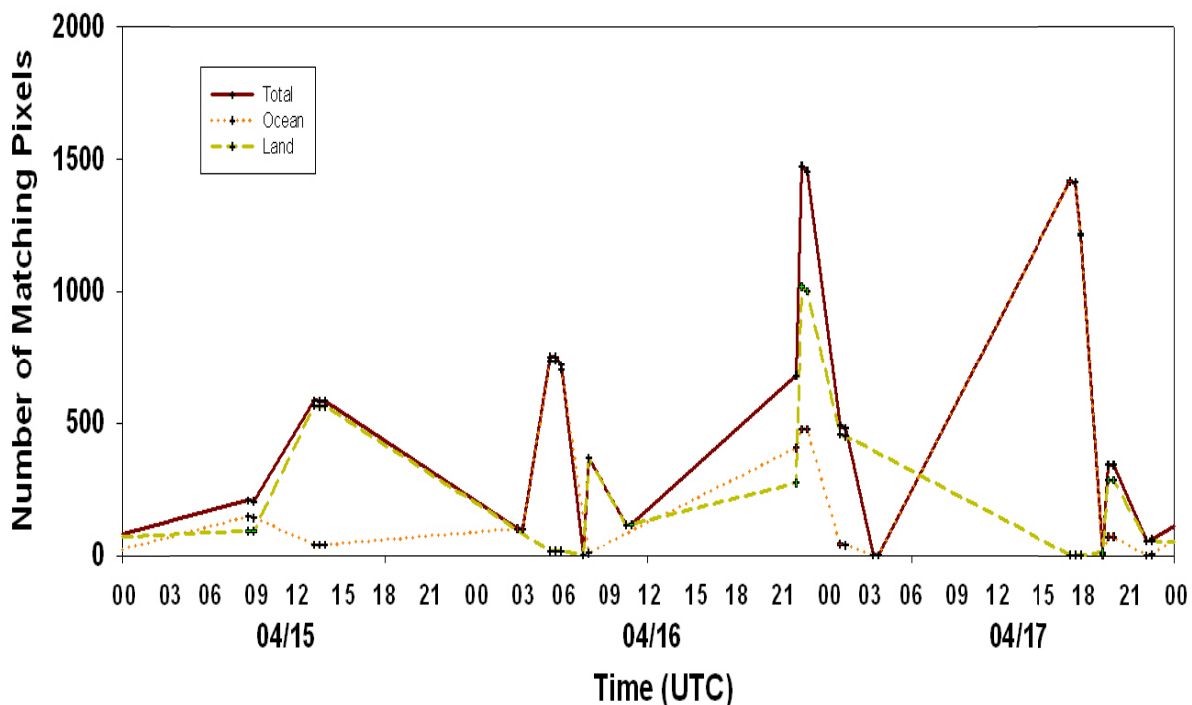


Fig. 3. Temporal and spatial coincident data between COMS BTT(brightness temperature) and SSM/I (F15) rainrate from 0033UTC Apr. 15 2011 to 2333UTC Apr. 17 2011.

시·공간 일치 자료로 사용하여 실시간 조건표를 작성하였고 동적 조건표의 개수가 적은 경우(30개 미만) 정적 조건표를 적용한다. 이 경우 COMS 밝기온도와 SSM/I 강수량 자료는 Atlas et al.(1990)과 Crosson et al.(1996)이 제안한 PMM 방법이 적용하였으며 SSM/I 최소 강수량은 0.5mm/hr으로 정의하였다. Fig. 4는 2011년 4월 27일 0745UTC에 적용된 정지위성 밝기온도와 SSM/I 강수량의 확률밀도함수(PDF)와 확률누적밀도함수(CDF)이다.

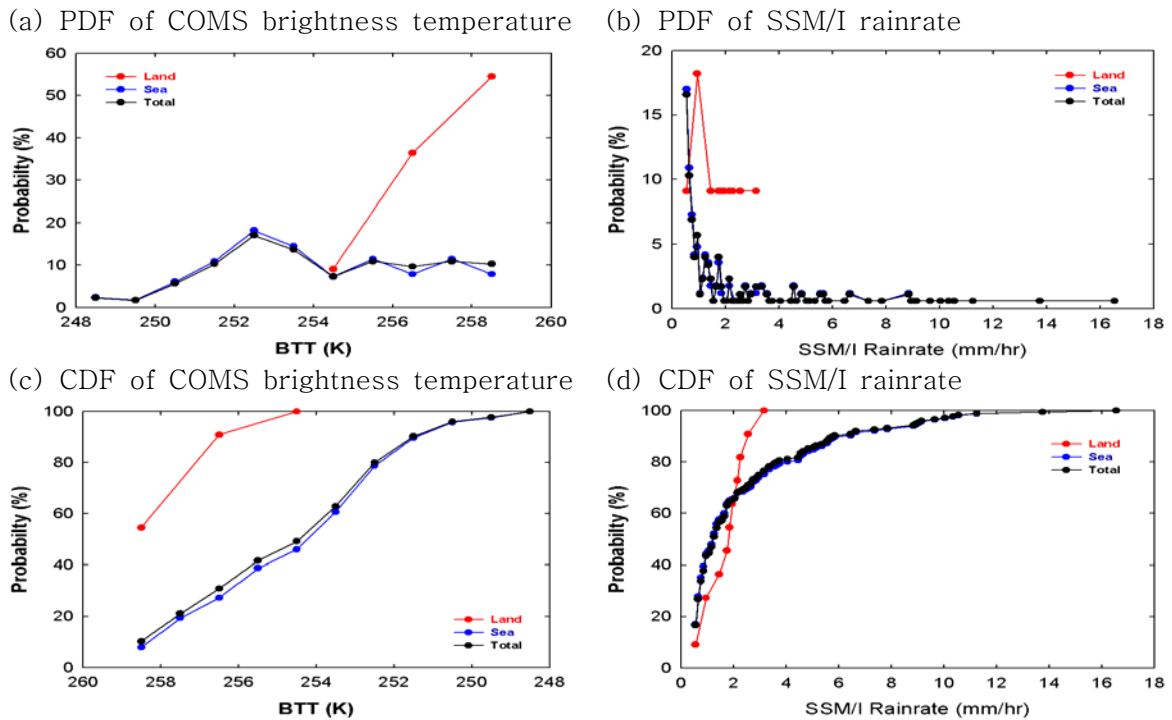


Fig. 4. PDF and CDF of COMS BTT(Brightness temperature) and SSM/I rainrate at 0745UTC Apr. 27 2011.

Fig. 4의 (c)와 (d)에서 동일한 누적확률이 나타나는 밝기온도와 강수량을 이용하여 2011년 4월 27일 0745UTC에 계산된 조건표는 Fig. 5와 같다.

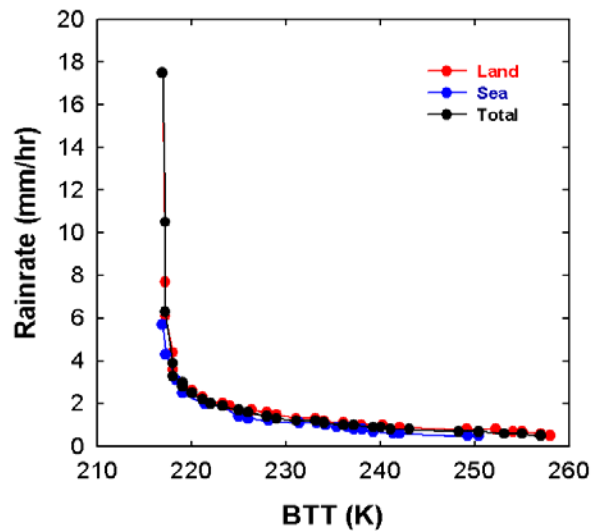


Fig. 5. Lookup table between COMS BTT(brightness temperature) and SSM/I rainrate at 0745UTC Apr. 27 2011.

Fig. 5와 같이 계산된 조건표는 육지와 해양으로 분리하여 조건표를 작성하여 강수를 산출한다. 그러나 Fig. 6에 보여 지는 것과 같이 육지 영역에 대한 조건표 개수는 해양 영역에 대한 조건표 개수보다 현저히 작다. Fig. 6은 2011년 4월 육지와 해양 및 전체 영역에 대하여 계산된 조건표 개수이다. 이러한 육지 영역의 조건표 개수 부족은 강수영역에서 육지와 해양의 공간불연속을 야기 시킨다. 즉 Fig. 7의 2011년 7월 10일 0400UTC의 강우강도(a)와 같이 육지와 해양 간의 공간불연속이 나타나게 된다. 따라서 육지영역의 LUT 작성 시 해양영역의 자료를 추가한 전체(육지+해양)의 지점 일치 결과를 이용하여 강우강도를 추정하면 Fig. 7의 (b)와 같이 연속된 강수패턴으로 산출할 수 있다. 조건표에 나타나지 않은 밝기온도에 대한 강우강도는 선형내삽 방법으로 산출되며 고위도의 강수과대모의를 해소하기 위하여 산출 강수를 위도에 대하여 보정하였다. 이때 산출된 최대 강우강도는 35 mm/hr를 초과하지 못하며 최소값은 0.5mm/hr로 제한하였다. 그리고 구름 밝기온도는 낮으나 구름의 두께가 상대적으로 얇은 권운은 적외 온도차 방법(Inoue, 1987; 2002)을 적용하여 온도차가 2.5 K 이상일 경우 무 강수 영역으로 분리하였다.

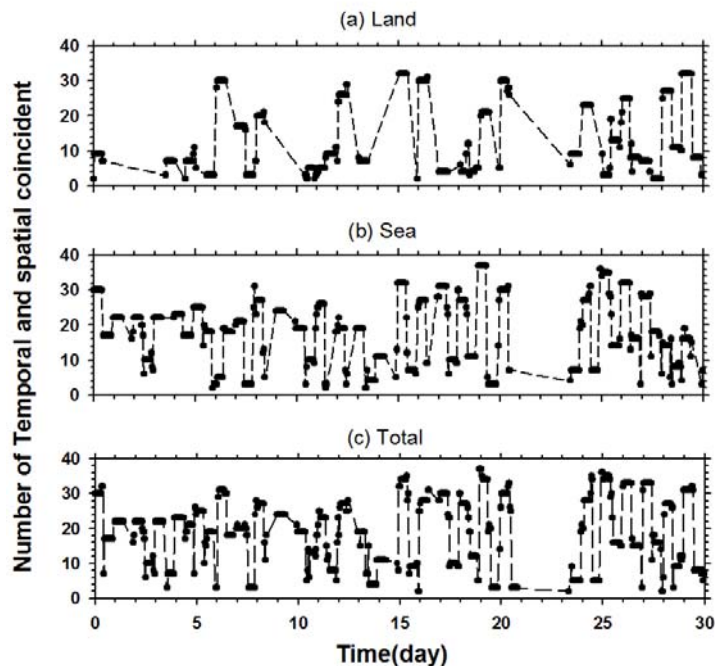


Fig. 6. Time series for Number of data pairs in estimated LUTs in Apr. 2011.

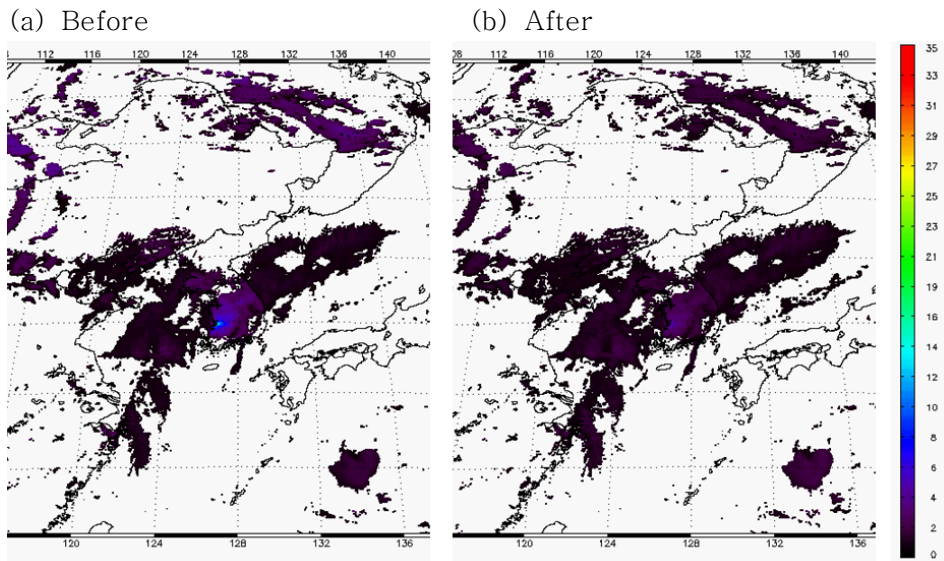


Fig. 7. Estimated rainfall intensity images at 0400UTC Jul. 10 2011.

3.3. 산출과정

CMDPS 강우강도 산출은 COMS와 SSM/I 자료를 이용한 조건표 작성 및 그 결과를 이용한 강우강도 계산 그리고 검사 및 품질 검사 과정이 중요하며 크게는 강우강도 산출(DPM)과 후처리(POM) 과정으로 나뉜다. DPM 과정은 산출물 자료들과 후처리에서 산출된 조건표를 이용하여 강수량을 산출하고 POM 과정은 CMDPS 강우강도 산출을 위하여 COMS 채널 자료와 SSM/I 강수량 자료를 이용하여 강수량 산출의 조건표를 산출하는 과정이다. SSM/I 관측 시간과 자료 수집 및 전송 시간 지연 때문에 COMS와 SSM/I 자료의 시간 일치 자료 수가 적을 경우 강우강도 산출이 불가능할 수 있다. 따라서 COMS 관측 시각부터 36시간 이전의 SSM/I 자료를 사용하여 조건표를 산출하며 이러한 과정을 도식화한 CMDPS 강우강도 산출 알고리즘은 Fig. 8과 같다.

3.3.1 입력자료

CMDPS 강우강도 산출을 위한 입력 자료는 COMS 1.5b 채널 자료 중 적외채널 밝기온도와 화소별 위경도(Geolocation) 그리고 육지해양 마스크링 자료가 필수이고 CMDPS 구름탐지(CLD) 산출물과 품질정보 및 SSM/I 자료는 강수량 산출을 위한 보조 자료로 이용되며 검증 자료로는 한반도 AWS의 15분 누적 강수량과 SSM/I 강수량 자료가 사용된다.

COMS 1.5b 자료는 정지위성 센서 관측 자료를 복사 검정하여 온도 값으로 변환된 화소

별 밝기온도 자료로서 각 화소의 위도와 경도 정보가 포함되어 있고 CMDPS 강우강도 산출을 위한 요소들 중 구름의 탐지 자료는 강수 및 무강수 산정을 위하여 사용된다. SSM/I 자료는 COMS 적외채널 밝기온도 변화와 관련하여 강우강도 관계식 산출을 위한 중요 입력 자료로서 만약 SSM/I 자료에 오류가 포함될 경우 산출된 CMDPS 강우강도의 질에 직접적인 영향이 미친다. 강수량 산출과정에 사용되는 보조 자료는 FTP 서버에 의한 실시간 갱신이 필수적이고 자료의 추출 프로그램의 구동을 통하여 자료 갱신에 대한 확인과정이 요구된다. 그리고 각각의 보조 자료는 관측 자료생성 과정에서 제공되는 추출 프로그램을 이용하여 강우강도 산출과 시공간 자료 생성 및 검증 그리고 후처리 과정 등으로 분배된다.

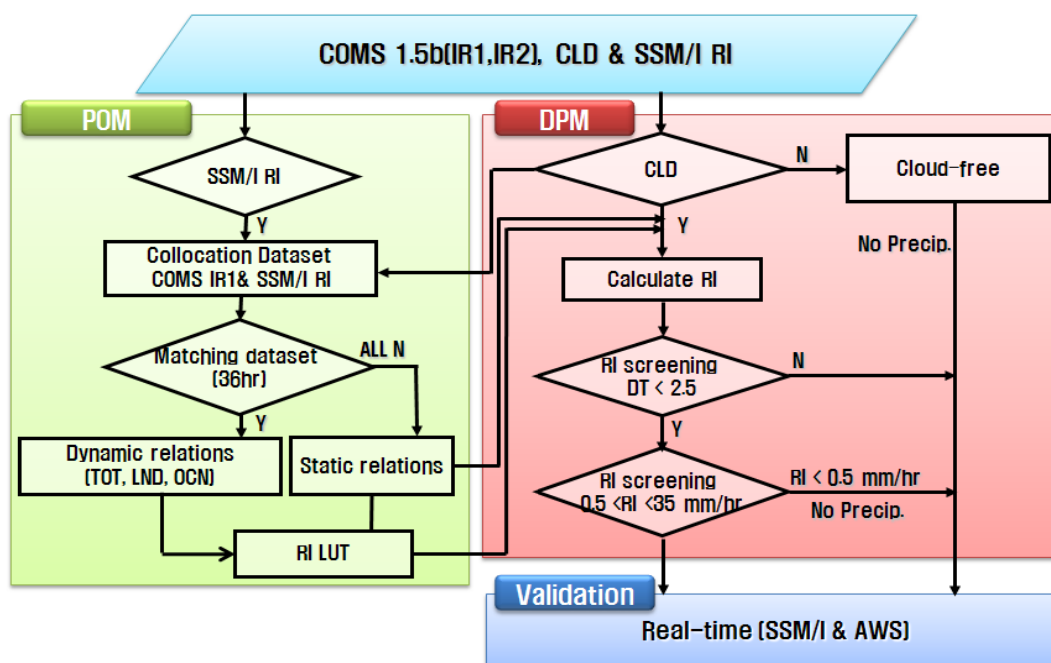


Fig. 8. Flow chart for the CMDPS RI algorithm.

3.3.2 DPM 과정

COMS 위성에서 관측된 채널 자료와 구름탐지 자료 그리고 후처리에서 생성된 조건표에 따른 강우강도 산출을 위한 DPM 과정은 Fig. 9과 같이 나타낼 수 있다.

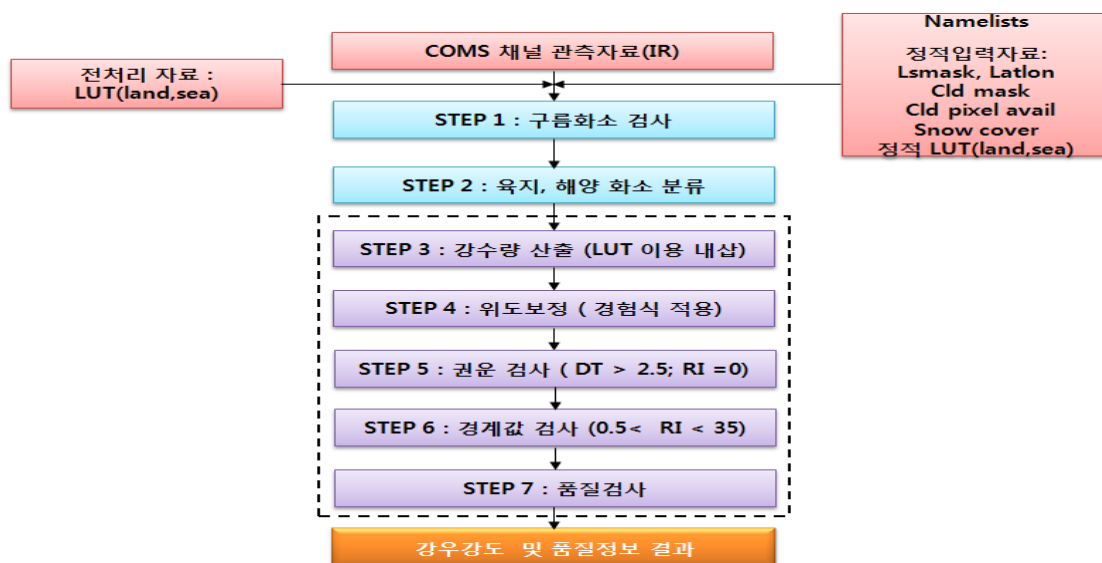


Fig. 9. The Schematic diagram for the RI DPM procedure.

강우강도는 구름화소에 대하여 산출되기 때문에 구름 탐지 산출물을 이용한 구름 및 청천 화소 구분이 우선되어야 한다. 그리고 각 구름 화소는 육지와 해양 화소로 구분하여 POM 과정에서 산출된 각각의 강우강도 조건표에 따라 강우강도를 계산한다. 그러나 조건표 작성과정에서 최저 운정온도와 최대강수량이 항상 나타나는 것이 아니기 때문에 시간에 따른 강우강도의 불연속이 발생된다. 따라서 최저운정온도(190K)와 최대강우강도(35mm/h)를 고려하여 계산된 조건표와 내삽 적용함으로써 강우강도 산출 범위를 확대 하였다. Fig. 10은 기존의 방법으로 산출된 조건표와 최저운정온도와 최대강우강도를 적용하여 산출된 조건표의 시계열을 나타낸 것이다.

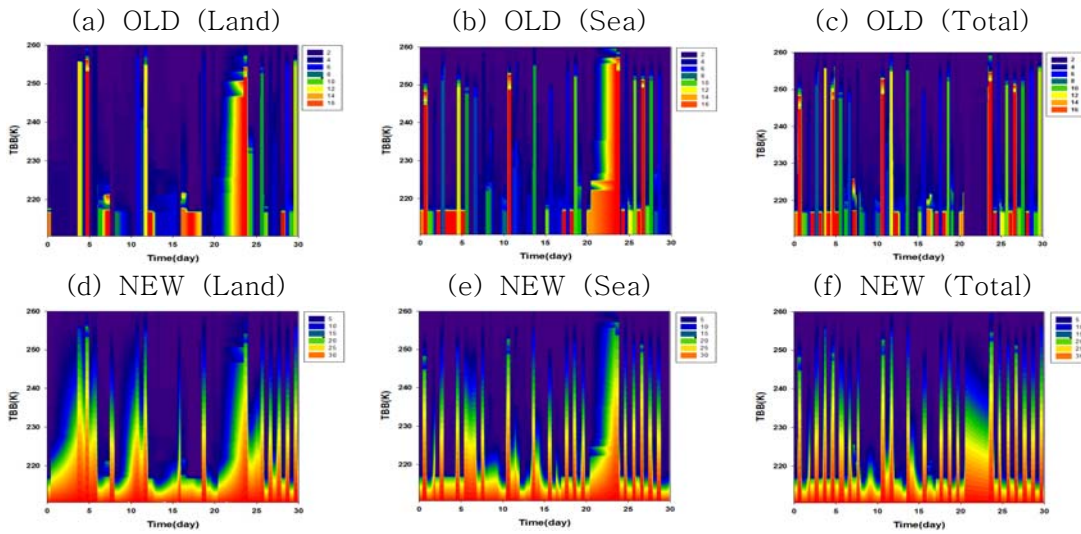


Fig. 10. The time series of LUTs.

또한 고위도의 과대한 강수 추정을 해소하기 위하여 산출 강수량은 다음의 경험식을 이용하여 위도보정을 수행하였다.

$$RI = RI_1 (1.8545 - 0.0934lat - 0.0028lat^2 - 2.733 - 5 \times lat^3) \quad (2)$$

$$RI = RI_1 (1.670 - 0.0819lat - 0.0026lat^2 - 2.874 - 5 \times lat^3) \quad (3)$$

여기서 lat 는 위도이고 RI_1 은 조건표를 적용하여 산출된 강수량이고 RI 는 위도 보정된 강수량이다. 식 (2)는 육지의 조건표를 작성하기 위하여 생성된 COMS 구름 밝기온도와 SSM/I의 강수량의 지점일치 자료를 이용하여 계산되었으며 식 (3)은 해양의 조건표를 작성하기 위하여 생성된 COMS 구름 밝기온도와 SSM/I의 강수량의 지점일치 자료를 이용하여 계산 하였다. 구름 운정온도와 강우강도의 관계를 위도대별로 구분하고 특정 위도 ($10^\circ N$)의 강수량에 대한 각 위도대의 강수량의 비율을 위도의 함수로 적합하여 계산된 경험식이다.

그리고 산출된 강수는 강수 영역의 구름 광학두께와 강우강도 범위 검사를 수행한다. 강수량이 없는 얇은 구름화소를 제거하기 위하여 각 화소는 적외온도차 방법 (Inoue,1987;2002)을 이용하여 온도차가 1.2 K 이상인 화소를 무강수 화소로 제거하고 최소 및 최대 강우강도는 0.5와 35 mm/hr로 설정하여 과소 및 과대계산 화소를 제거한다. 그리고 최종단계로써 각 화소에 대한 강우강도 산출 과정과 화소 특성에 대한 품질검사 정보를 작성한다. Fig. 11은 2008년 11월 17일 0033 UTC의 전구영역에 대한 산출 강우강도 품질검사 정보의 예이다.

(a) Estimated RI



(b) Quality flag

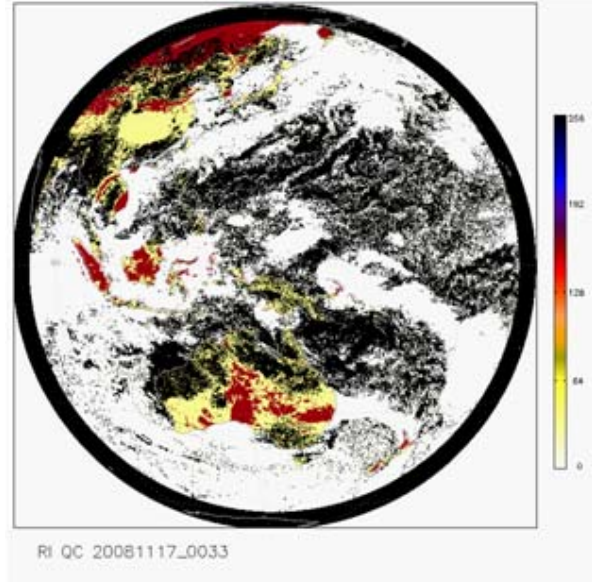


Fig. 11. Estimated CMDPS RI and quality flag image on 0033UTC Nov. 17, 2008.

산출된 강우강도 자료의 QC(Quality control)는 구름화소 판별정보와 육지·해양 화소에 대한 정보 그리고 적외차 방법의 정보 및 강수량 산출에 대한 정보들로써 Table 1과 같다. 강우강도 산출물의 품질정보는 각 화소별로 산출되며 산출정보들은 1에서 256의 값으로 표현된다.

Table 1. Quality flag for the CMDPS rainfall intensity.

Parameter	Value	Meaning
Quality flag	256	의미 없음
	1	구름산출물 품질정보 : 구름화소(100%)
	2	구름산출물 품질정보 : 구름화소(75%)
	3	구름산출물 품질정보 : 구름화소(50%)
	4	구름산출물 품질정보 : 청천화소(75%)
	5	구름산출물 품질정보 : 청천화소(100%)
	16	적외차온도 방법에 의하여 강수 제거화소
	32	육지 및 해안선 화소
	64	청천 화소
	128	강수량 산출 화소

3.3.3 POM 과정

POM 과정은 강우강도 관계식 산출 단계로써 크게 두 부분으로 구분된다. COMS 밝기온도와 SSM/I 강수량의 시·공간 일치 단계와 COMS 관측시각 이전 36시간의 시공간 일치 자료를 이용한 육지 및 해양 화소 조건표 작성 단계이다. 즉 관측 특성이 서로 다른 정지 위성(COMS)과 마이크로웨이브 위성(극궤도 위성)의 시간일치는 COMS 자료 관측화소별 시간 정보와 SSM/I 화소별 시간 정보를 이용하여 각각의 화소에 대하여 수행된다. 그리고 공간일치는 COMS자료의 화소별 육지·해양 구분이 선행되고 SSM/I 화소의 공간분해능(25 Km × 25 km)에 포함된 COMS의 밝기온도 화소를 평균하여 공간일치를 수행한다. 조건표 작성 단계에서는 COMS 관측 시각을 기준으로 이전 36시간 이내의 시공간일치 자료들을 검색하여 PMM 방법이 적용된다. 조건표는 시공간 일치된 SSM/I 강수량과 COMS 밝기온도의 누적확률 분포를 2.5 % 간격으로 나누어 최대 41개의 밝기온도와 강수량의 쌍으로 육지 및 해양에 대하여 각각 산출된다. SSM/I 자료 특성 때문에 시공간 일치 자료 수가 적을 경우는 강우강도 산출 결과의 신뢰성이 크게 낮아질 수 있으므로 조건표 자료 개수의 확인 과정이 필요하다. 이러한 POM 과정은 Fig. 12에 나타내었고 이 그림에서 녹색 사각형부분(POM_Coll)이 시공간일치 단계이며 파란색 사각형부분(POM_Coeff)이 조건표 작성 단계이다. 이와 같은 시·공간일치 자료들을 장기간(10일 이상) 평균하여 준실시간 조건표를 작성하고 특정한 시간과 공간에서 시·공간일치 자료가 없거나 부족할 경우(동적 조건표의 개수가 30개 이하) 정적인 조건표를 이용하여 강우강도를 산출될 수 있도록 하였다.

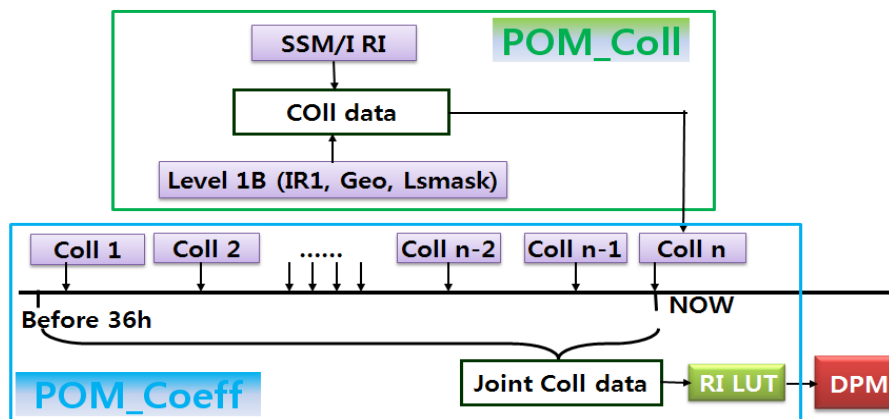


Fig. 12. Diagram for the CMDPS RI POM procedure.

3.4. 검증

3.4.1. 검증방법

강우강도 산출물 검증은 한반도의 지상 AWS 강수량 자료와 동아시아 영역의 SSM/I 강우강도 자료를 이용하여 수행되며 이들 자료는 네트워크를 통하여 갱신되기 때문에 실시간 검증이 아닌 준 실시간으로 검증된다. 강우강도 산출물과 관측 자료의 검증은 자료들 사이에 관측 방법과 시·공간 불일치의 문제 때문에 Fig. 13과 같이 시·공간 일치 과정과 검증 계산 과정 두 부분으로 나뉜다.

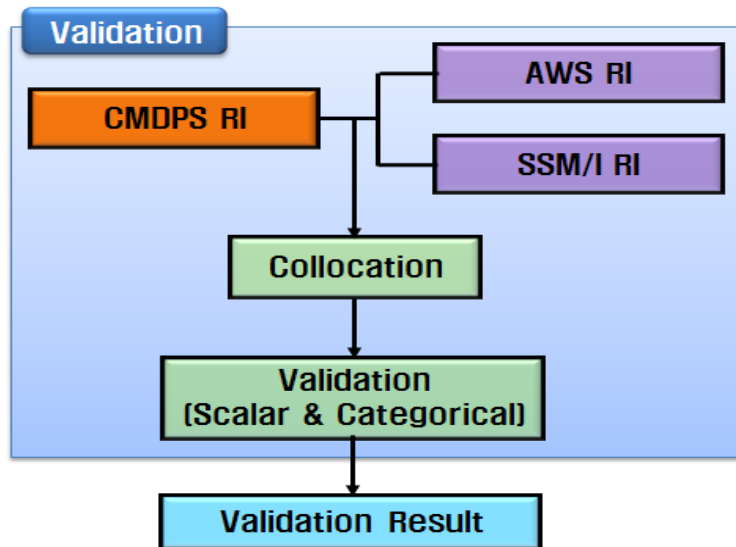


Fig. 13. Flow chart for the validation of CMDPS rainfall intensity.

시·공간 일치는 AWS 관측과 SSM/I 강우강도의 자료 특성과 시간을 고려하여 CMDPS 강우강도와 시간 일치하고 분해능 및 적용 범위에 따라 공간 일치된다. 특히 SSM/I 강우강도의 시·공간 일치방법은 POM과정의 시공간 일치 방법과 동일하며 검증 방법은 강수량에 따른 scalar 정확도 검사와 강수 유무 및 강도에 따른 categorical 정확도 검사를 수행된다. Scalar 정확도 검사로는 상관계수(Correlation coefficient)와 편이(Bias) 및 평방근 오차(Root mean Square Error: RMSE)가 사용되며 categorical 정확도 검사는 강수유무의 이중 구분 방법과 강우강도에 따라 3, 5, 10 mm/hr를 기준으로 약함, 중간, 강함으로 다중 구분 방법을 적용하여 TS(Threat Score), POD(Probability of Detection), PC(Portion Correct) 그리고 HSS(Heidke Skill Scores) 등으로 분석된다.

3.4.2. 검증자료

COMS 강우강도 산출물 검증을 위한 한반도 약 600여 지점의 AWS 강수량 관측 자료 그리고 동아시아 지역(90~160 °E, 10~60 °N)의 SSM/I 강우강도 자료가 사용된다.

가. 한반도 지역

AWS 강수량은 한반도의 유무인 관측소(약 600여 지점)의 15분 누적 자료가 사용된다. 자료의 관측 시간 주기는 1분이고 강수량 단위는 0.1 또는 0.2 mm 이며 매 15분 누적 그리고 60분 누적 강수량 자료이다. 즉 CMDPS 산출 강우강도는 정지위성(COMS)의 순간 관측 결과이기 때문에 지상 관측 자료는 구름 및 강수 관측에 영향을 미치는 시간을 고려하여 15분간 누적된 강수량을 이용한다. 한반도의 AWS 분포를 고려하여 관측 영역은 주변 30 km × 30 km를 평균하여 CMDPS 산출 강우강도와 시공간 일치성을 한다.

나. 동아시아 지역

SSM/I 강우강도는 극궤도위성 센서 자료이고 현재 운영 중인 F15 탑재체 1개의 위성 에 탑재되어 있으며 구름 속의 우적과 빙정의 방출 및 산란 복사를 근거하여 계산된다. 한 개의 극궤도위성은 동일 지점을 하루 2회 관측하고 센서의 분해능은 위성 직하점에서 25 km × 25 km로써 동 아시아 영역(90~160° E, 10~60° N) 자료를 이용하여 검증하며 POM 과정과 동일한 방법으로 시·공간 일치를 한다.

3.4.3. 시·공간 일치방법

CMDPS 강우강도 산출물 검증에 사용되는 AWS와 SSM/I 자료들은 관측 방법과 관측 주기 등이 서로 다르기 때문에 CMDPS 강우강도 산출물 검증을 위해서는 조심스러운 시·공간일치 과정이 요구된다. AWS 누적 강수량 자료는 강수 입자의 낙하 시간 및 15분 누적 특성을 고려하여 COMS 관측 시각 이후 20분의 관측 자료와 시간 일치된다. 한반도 지역 600여 지점에서 관측되어 AWS 한 지점의 관측반경은 30 km × 30 km이기 때문에 각각의 관측반경 내에 포함되는 7 × 7화소의 CMDPS 산출 강수량을 평균하여 공간 일치시킨다.

SSM/I 강우강도 자료는 각 화소의 시간과 COMS 각 화소의 시간을 계산하여 15분을 지연하여 시간일치하고 SSM/I의 직하점 분해능(25 km × 25 km)에 근거한 반경 12.5 km 이내의 CMDPS 강우강도 자료를 평균하여 공간 일치시킨다.

3.4.4. 검증결과분석

CMDPS 강우강도 산출결과 검증은 관측 자료와 비교된 정확도 판별뿐만 아니라 강수 구역 탐지와 강수의 강도 검증도 중요 요소이고 검증 방법으로는 scalar 정확도 검사 및 categorical 정확도 검사를 수행한다. Scalar 정확도 검사를 위하여 상관계수(Correlation coefficient)와 편이(Bias) 그리고 평방근 오차(Root mean Square Error: RMSE)가 계산

된다. 이중 categorical 정확도 검사는 0.5 mm/hr을 기준으로 강수유무의 판별에 대한 정확도를 판별하며 그리고 다중 categorical 정확도 검사는 강수 자료에 대하여 3, 5, 10 mm/hr를 기준으로 강우강도 판별에 대한 정확도를 POD(Probability of Detection)와 PC(Portion Correct) 및 HSS(Heidke Skill Scores) 검증 지수로 계산된다.

가. Scalar 정확도 검사

Scalar 정확도 검사는 강수량의 정확도를 검사하는 방법으로써 관측과 산출 강수량의 상관관계(Correlation coefficient)와 산출물의 평균값에 대한 편향성을 나타내는 편이(BIAS) 및 산출물의 표본 오차를 평가하기 위한 평방근 오차(RMSE) 계산은 다음과 같다.

$$\text{상관계수 (Correlation coefficient)} \quad R = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)(\hat{x}_i - \bar{\hat{x}}_i)}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - \bar{\hat{x}}_i)^2}} \quad (4)$$

$$\text{편이 (BIAS)} \quad BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i) = \bar{\hat{x}}_i - \bar{x}_i \quad (5)$$

$$\text{평방근 오차 (RMSE, ROOT Mean Square Error)} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (6)$$

여기서 \hat{x}_i 는 CMDPS 산출 강우강도이고 x_i 는 AWS 강수량과 SSM/I 강우강도이며 n 은 시공간 일치된 자료의 개수 그리고 $\bar{\quad}$ 는 평균값 나타낸다. 상관계수는 CMDPS 강우강도와 관측값의 상관성 조사를 위한 것이고 편이와 평방근 오차는 산출 강우강도와 관측값의 편차를 평가하기 위한 것이다.

나. Categorical 정확도 검사

Categorical 정확도는 산출물의 강수 또는 무강수 영역 및 강우강도 정확성을 평가하는 중요한 지표가 되며 그 방법으로 PC(Portion Correct)와 POD(Probability of Detection) 및 HSS(Heidke Skill Score) 방법이 사용된다. 강수 유무를 평가하기 위한 강우강도와 관측값의 이중 분할표는 Table 2와 같고 정확도 계산 방법은 식(6)~(9)와 같다.

Table 2. Binary category contingency table for validation of CMDPS rainfall intensity.

		Observed		Estimated distribution
		Yes (≥ 0.5)	No (< 0.5)	
Estimated	Yes (≥ 0.5)	a	b	a+b

	No(0.5<)	c	d	c+d
Observed distribution		a+c	b+d	N

Portion Correct (PC) $PC = \frac{a+d}{N}$ (7)

Probability of Detection (POD , Hit Rate) $POD = \frac{a}{a+c}$ (8)

Heidke Skill Score (HSS) $HSS = \frac{PC-E}{1-E}$ (9)

$$E = \frac{(a+b) \times (a+c) + (c+d) \times (b+d)}{N^2}$$
 (10)

PC(Portion Correct)는 전체 자료 중 산출 값과 관측값들의 동일한 강수 또는 무강수 자료 비율이며 POD(Probability of Detection)는 관측값에 대한 산출 강우강도의 강수 탐지 정확도이다. HSS(Heidke Skill Score)는 관측값에 대하여 정확한 강우강도 자료와 우연히 맞은 강우강도 자료의 차이를 평가하기 위한 것으로 일반화된 정확성 계산 기법에 속한다. 다중 Categorical 정확도 평가는 강우강도를 몇 가지 형태 또는 강도로 구분하여 평가할 수 있고 강우강도가 약함(0.5~3mm/hr), 중간(3~10 mm/hr) 그리고 강함(10 mm/hr~)의 3가지의 단계로 구분하였으며 그에 따른 다중(3×3) 분할표는 Table 3 과 같이 나타내었고 정확도 계산은 식 (11)~(14)와 같다.

Table 3. Multi Category contingency table for validation of CMDPS rainfall intensity.

		Observed			Estimated distribution
		0.5 ≤ RI < 3.0	3.0 ≤ RI < 10.0	10.0 ≤ RI	
Estimated	0.5 ≤ RI < 3.0	A ₁₁	A ₁₂	A ₁₃	R ₁
	3.0 ≤ RI < 10.0	A ₂₁	A ₂₂	A ₂₃	R ₂
	10.0 ≤ RI	A ₃₁	A ₃₂	A ₃₃	R ₃
Observed distribution		C ₁	C ₂	C ₃	N

Portion Correct (PC) $PC = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^3 A_{ii}$ (11)

Heidke Skill Score (HSS) $HSS = \frac{NC-E}{N-E}$ (12)

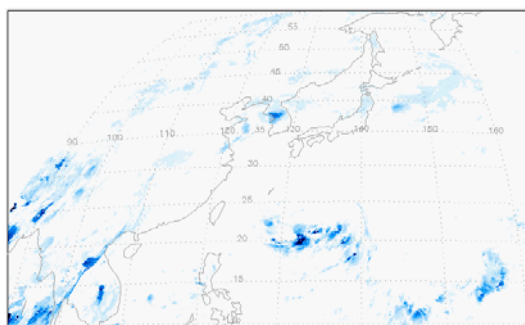
$$NC = \sum_{i=1}^3 A_{ii} \quad (13)$$

$$E = \sum_{i=1}^3 \frac{C_i R_i}{N} \quad (14)$$

4. 산출결과 해석방법

산출물은 최종 산출물과 중간 산출물로 구분되며 최종 산출물은 COMS 관측 모드에 따른 자료 전체 영역에 대해 강우강도와 품질정보로써 HDF5 형태로 저장된다. 그리고 중간 산출물인 조건표와 시공간 일치 자료로써 동아시아 지역에 대하여 ASCII 형태로 저장되고 검증 과정에서 생성되는 시·공간 일치 자료와 검증 결과는 바이너리 형태로 저장된다. 최종 산출물인 강우강도와 품질정보 결과 중 2008년 7월 23일 1933UTC의 동아시아 영역에 대한 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

(a) Rainfall intensity



(b) Quality flag

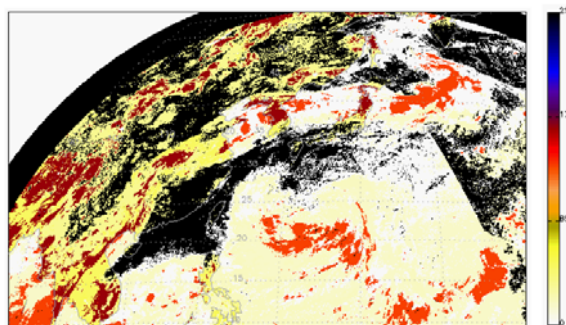


Fig. 14. CMDPS rainfall intensity and Quality flag at 1933UTC Jul. 23 2008.

강우강도는 0부터 20 mm/hr의 범위에 분포하며 파란색이 짙어질수록 강우강도가 강한 지역으로 해석된다. 품질정보는 각 화소에 대한 산출물에 대한 정보를 알 수 있고 Table 2를 이용하여 해석되며 검은색 영역은 강우강도 산출이 이루어지지 않는 영역으로 256의 값을 나타낸다.

강우강도와 품질정보는 COMS 관측 자료가 존재할 경우 수행되며 강우강도 산출 결과는 한반도 영역에서 AWS 관측 자료 그리고 동아시아 영역에서는 SSM/I 강우강도 자료와 지점일치 후 계산 및 검증된다. Fig. 15는 2008년 7월 23일 1933UTC의 강우강도 산출물과 AWS 관측 자료 그리고 SSM/I 강수량 자료의 지점일치에 대한 그림이다.

(a) Validation dataset between CMDPS RI and AWS RI

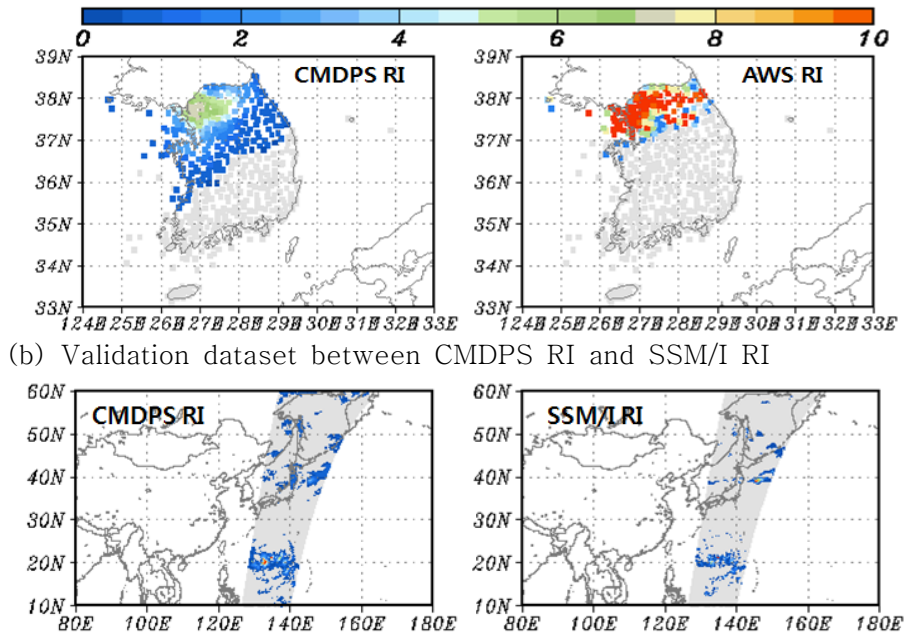


Fig. 15. Validation dataset between CMDPS RI and AWS(a) and SSM/I(b) rainfall at 1933UTC Jul. 23 2008.

Fig. 15에서 청색 및 붉은색 등으로 표시된 부분은 AWS와 SSM/I 화소들이 시·공간 일치된 영역이며 회색은 강수가 없는 부분이다. 이 그림에서 CMDPS에 의하여 산출된 강수 영역은 SSM/I 관측 자료 보다 넓게 분포되고 AWS 관측값보다 강우강도가 약하게 나타나는 것을 알 수 있다(최대강수량이 35 mm/hr로 제한되어있기 때문). 이 그림에서 AWS와 SSM/I 해상도의 자료 쌍은 3.4절에서 언급된 방법에 따라 검증되며 그 결과는 Table 4에 나타내었다.

Table 4. The validation result between CMDPS RI and AWS and SSM/I rainfall at 1933UTC Jul. 23 2008.

Validation (data #)	Scalar			Binary categorical			Multi categorical	
	R	BIAS	RMSE	POD	PC	HSS	PC	HSS
AWS(582)	0.77	-4.24	11.23	0.92	0.80	0.62	0.24	0.03
SSM/I(13595)	0.54	0.07	0.62	0.70	0.93	0.40	0.69	0.21

AWS와 SSM/I 자료 중 검증에 사용된 자료 수는 AWS의 582지점 그리고 SSM/I 의 13595 화소이다. SSM/I의 강우강도를 이용한 검증 결과는 AWS 강수량과의 검증보다 상

관계수가 작음에도 불구하고 RMSE가 낮게 나타나는 것은 CMDPS의 강우강도 산출을 위하여 SSM/I 자료가 사용되었기 때문인 것으로 분석된다. 즉 조건표 산출을 위하여 SSM/I 강우강도 자료가 사용되었기 때문에 상대적으로 AWS 강수량에 대해서는 음의 편이가 발생되고 RMSE가 크게 나타나는 결과를 초래하였으며 이중분류 또는 다중분류 검증에서 상대적으로 낮은 PC의 원인이 된다. 따라서 CMDPS 강우강도 산출결과를 지상 관측 강수량과 비교하기 위해서는 CMDPS 강우강도 산출 범위와 마이크로웨이브 자료의 정밀한 이해 및 분석이 우선되어야 할 것으로 분석된다.

5. 문제점 및 개선 가능성

COMS의 제한적인 채널 자료는 구름 속의 강수입자 분포 특성 등이 명확하게 구별되지 않기 때문에 이 COMS 자료를 이용한 강우강도 산출 결과의 정확성은 제한적이다. 따라서 COMS 채널 자료에 의한 강우강도 정확성 향상 방법으로써 시·공간적으로 운형을 제한하거나 장기적으로는 마이크로웨이브 채널을 이용하여 직접적으로 강우강도를 산출하는 것이 제안될 수 있다.

이 연구에서는 COMS 채널 자료에 의한 강우강도 산출 결과 검증을 위하여 지상 AWS 자료가 사용되나 AWS 자료는 시간 누적 자료이고 위성 관측 자료는 순간 관측 자료로 간주될 수 있기 때문에 이들 두 자료는 시간 일치되지 않는다. 따라서 COMS 자료에 의하여 산출된 강우강도 결과를 정확하게 검증 및 평가하기 위해서는 특정 지역의 조밀한 강우 관측 자료(AWS 자료 등) 및 레이더 자료 등이 요구되며 활용이 권고되며 산출된 강우강도의 정확성은 각각의 화소에 대한 평가보다는 시·공간적인 통계 평가가 더 중요할 것으로 평가된다. 그리고 강우강도 산출을 위한 마이크로웨이브 자료로서 현재의 SSM/I (F15)자료뿐만 아니라 다양한 마이크로웨이브 자료들(SSMIS, AMSU, AMSR/E, TRMM TMI)이 활용될 경우 COMS 강우강도 산출 정확성 향상에 기여할 수 있을 것이다.

6. 참고문헌

- Adler, R. F., and A. J. Negri, 1988 : A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J. Appl. Meteor.*, 27, 30–51.
- Arkin, P. A., 1979 : The relationship between fractional coverage of high cloud and rainfall accumulations during GATE over the B-scale array. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1382–1387.
- Arkin, P. A., and B. M. Meisner, 1987 : The Relationship between Large-Scale Convective Rainfall and Cold Cloud over the Western Hemisphere during

- 1982-84. Mon. Wea. Rev., 115, 51-74.
- Atlas, D., D. Rosenfeld, and D. B. Wolff, 1990 : Climatologically tuned reflectivity-rainrate relations and links to area-time integrals. J. Appl. Meteor., 29, 1120-1135.
- Ba, M., and A. Gruber, 2001 : GOES Multispectral Rainfall Algorithm(GMSRA). J. Appl. Meteor.,29,1120-1135.
- Crosson, W. L., C. E. Duchon, R. Raghavan, and S. J. Goodman, 1996 : Assessment of rainfall estimates using a standard Z-R relationship and the probability matching method applied to composite radar data in Central Florida. J. Appl. Meteor., 35, 1203-1219.
- Delgado, G., Luiz A. T. Machado, Carlos F. Angelis, Marcus J. Bottino, P. Redaño, J. Lorente, L. Gimeno, and R. Nieto, 2008 : Basis for a Rainfall Estimation Technique Using IR-VIS Cloud Classification and Parameters over the Life Cycle of Mesoscale Convective Systems. J. of Appl. Meteorol and Clim., 47, 1500-1517.
- Inoue, T. and S. A. Ackerman, 2002 : Radiative Effects of Various Cloud Types as Classified by the Split Window Technique over the Eastern Sub-tropical Pacific Derived from Collocated ERBE and AVHRR Data., J. of Meteorological Society of Japan, 80,1382-1394.
- Inoue, T., 1987 : A cloud type classification with NOAA-7 split-window measurements. J. Geophys. Res., 92, 3991-4000
- Joyce, R. J., J. E. Janowiak, P. A. Arkin, and P. Xie, 2004 : CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution, J. of Hydrometeor., 5(3), 487-503.
- Kuligowski, R. J., 2002 : A self-calibrating GOES rainfall algorithm for short-term rainfall estimates. J. Hydrometeor.,3, 112-130.
- Kummerow C., Y. Hongb, W. S. Olsonc, S. Yangc, R. F. Adlerd, J. McCollume, R. Ferraroe, G. Pettyf, D-B. Shina, and T. T. Wilheitg, 2001 : The evolution of the Goddard profiling algorithm (GPROF) for rainfall estimation from passive microwave sensors. J. Appl. Meteor., 40, 1801-1820.
- Kurino, T., 1997 : A satellite infrared technique for estimating "deep/shallow" convective and stratiform precipitation. Adv. Space Res., 19. 511-514.
- Lavizzani, V., 1999. Convective rain from a satellite prospective: Achievements and challenges. SAF Training Workshop-Nowcasting and Very Short Forecasting, Madrid, 9-11 Dec., EUMESAT, EUM P 25, 75-84.
- Negri, A. J., R. F. Adler, and P. J. Wetzels, 1984 : Rain estimation from satellites: an examination of the Griffith-Woodley technique, J. Climate Appl. Meteor., 26,

1565-1576.

- Scofield, R. A. and R. J. Kuligowski, 2003 : Status and Outlook of Operational Satellite Precipitation Algorithms for Extreme-Precipitation Events., *Weather and Forecasting*, 18, 1037-1051.
- Sorooshian, S., K.-L. Hsu, X. Gao, H. V. Gupta, B. Imam, and D. Braithwaite, 2000 : An evaluation of PERSIANN system satellite-based estimates of tropical rainfall. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2035-2046.
- Spencer R. W., H. M. Goodman, and R. E. Hood, 1989 : Precipitation retrieval over land and ocean with the SSM/I: Identification and characteristics of the scattering signal. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 6, 254-273.
- Turk, F. J., E. E. Ebert, H.-J. Oh, B.-J. Sohn, V. Levizzani, E. A. Smith and R. R. Ferraro, 2003 : Validation of an operational global precipitation analysis at short time scales. *Prepr. 12th Conf. on Satellite Meteor. and Oceanography*, Long Beach, CA, 9-13 Feb., paper 1.2, 21.
- Vincente, G. A., R. A. Scofield, and W. P. Menzel, 1998 : The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79, 1883-1898.
- Vincente, G. A., J. C. Davenport, and R. A. Scofield, 2002 : The role of orographic and parallax on real time high resolution satellite rain rate distribution. *Intl. J. Remote Sens.*, 23, 221-230.
- Weng, F., L. Zhao, G. Poe, R. R. Ferraro, X. Li, and N. C. Grody, 2003 : Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) cloud and precipitation algorithms. *Radio Sci.*, 38(4), 8068, doi:10.1029/2002RS002679.
- Wentz, Frank J. and Roy W. Spencer, 1998 : SSM/I Rain Retrievals within a Unified Ocean Algorithm, *J. of Atmos. Sci.*, 55, 1613-1627.
- Zhang, M., and R. A. Scofield, 1994 : Artificial neural network techniques for estimating convective rainfall and recognizing cloud mergers from satellite data. *Int. J. Remote Sens.*, 15, 3241-3261.