

## 수분유입방향을 고려한 강릉지역 태풍 루사의 수분최대화비 산정

### Estimation of the Moisture Maximizing Rate based on the Moisture Inflow Direction : A Case Study of Typhoon Rusa in Gangneung Region

김 문 현\* / 정 일 원\*\* / 임 은 순\*\*\* / 권 원 태\*\*\*\*

Kim, Moon Hyun / Jung, Il Won / Im, Eun Soon / Kwon, Won Tae

#### Abstract

In this study, we estimated the PMP(Probable Maximum Precipitation) and its transition in case of the typhoon Rusa which happened the biggest damage of all typhoons in the Korea. Specially, we analysed the moisture maximizing rate under the consideration of meteorological condition based on the orographic property when it hits in Gangneung region. The PMP is calculated by the rate of the maximum persisting 12 hours 1000 hPa dew points and representative persisting 12 hours 1000 hPa dew point. The former is influenced by the moisture inflow regions. These regions are determined by the surface wind direction, 850 hPa moisture flux and streamline, which are the critically different aspects compared to that of previous study. The latter is calculated using statistics program (FARD2002) provided by NIDP(National Institute for Disaster Prevention). In this program, the dew point is calculated by reappearance period 50-year frequency analysis from 5 % of the level of significant when probability distribution type is applied extreme type I (Gumbel distribution) and parameter estimation method is used the Moment method. So this study indicated for small basin(3.76  $km^2$ ) the difference the PMP through new method and through existing result of established storm transposition and DAD(Depth-Area-Duration). Consequently, the moisture maximizing rate is calculated in the moisture inflow regions determined by meteorological fields is higher 0.20 ~ 0.40 range than that of previous study. And the precipitation is increased 16 ~ 31% when this rate is applied for calculation.

**keywords** : PMP, moisture maximizing rate, Typhoon Rusa, Orographic characteristics, Gangneung

#### 요 지

본 연구에서는 2002년 강릉지역에 큰 피해를 일으킨 태풍 루사(Rusa) 호우 사례에 대하여 PMP(Probable

\* 기상연구소 기후연구실 연구원  
Researcher, Climate Research Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea  
(e-mail: mhkim@metri.re.kr)

\*\* 세종대학교 토목환경공학과 박사과정  
Ph.D Candidate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea  
(e-mail: bobilwon@paran.com)

\*\*\* 기상연구소 기후연구실 기상연구사  
Research Scientist, Climate Research Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea  
(e-mail: esim@metri.re.kr)

\*\*\*\* 기상연구소 기후연구실 기후연구실장  
Director, Climate Research Lab., Meteorological Research Institute, Seoul 156-720, Korea  
(e-mail: wontk@metri.re.kr)

Maximum Precipitation)의 산정 및 전이에서 발생할 수 있는 문제에 대해 분석하였다. PMP 산정을 위해서는 2가지 이슬점온도 산정이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 그 중 대표 12시간 지속 이슬점온도를 지상일기도, 지표 풍향, 850 hPa 수분속, 유선장 뿐만아니라 강릉 지역의 지형적 특성까지 고려하여 수분 유입 지역을 결정한 후 계산하였다. 또한 최대 12시간 지속 이슬점은 과거 42년간(1961년~2002년)의 강릉지역 이슬점 온도 자료를 통해 방재연구소에서 제공하는 FARD2002 통계프로그램을 이용하여 계산하였다. 이 프로그램에서 확률분포형으로는 Extreme Type I (Gumbel distribution)을 선정하였고 매개변수 추정방법으로 모멘트법을 사용하여 유의수준 5%에서 재현기간 50년 빈도 분석을 통해 이슬점 온도를 계산하였으며, 계산 방법을 3가지 구분하여 분석하였다. 이 결과 기존의 연구에서는 대표 및 최대 12시간 지속 이슬점의 차가 2.98°C였으나 본 연구 결과에 따르면 4.55°C(I 방법) ~ 6.05°C(III 방법)로 큰 차이를 보였다. 또한 이와 같은 과정들을 통해 수분최대화비를 산정한 결과 기존에 비해 0.20 ~ 0.40 정도 크게 산정되었으며, 이 수분최대화비를 기존 무명천 유역(면적 3.76km<sup>2</sup>)의 호우전이비 및 DAD(Depth-Area-Duration) 분석결과를 이용하여 전이한 결과에서도 16 ~ 31% 정도 강수량이 크게 계산되는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : PMP, 수분최대화비, 태풍 루사, 지형적 특성, 강릉

## 1. 서 론

최근에 발생하는 빈번한 기상이변은 기상학적인 측면뿐만 아니라 수문학적으로도 큰 이슈가 되고 있으며, 그 피해들은 과거자료에서 찾아보기 어려울 만큼 강도와 규모면에서 대형화되고 있다. 그 중 집중호우나 태풍과 같은 국지적이고 강우강도가 매우 큰 강수량의 증가는 댐과 같은 대형 수공구조물의 파괴로 인한 인명 및 재산피해의 가능성을 증대시키고 있다. Rezacova et al.(2002)은 최근 폭우사례를 통해 체코에서의 저수지 유출구조의 새로운 조치가 필요하다고 설명했고, Smith(1989)는 만약 물의 최고 수위점이 댐의 높이를 넘어간다면, 세계 모든 댐의 78% 정도가 위험해 질 것이라고 경고했다. WMO(1973)에서는 이러한 피해를 최소화하기 위해 최대가능강수량(Probable Maximum Precipitation, 이하 PMP)의 적용을 제안하고 있으며, 극한(extreme) 기상현상인 PMP를 합리적인 방법으로 추정할 수 있는 절차(WMO, 1986)도 제안하고 있다. 국내에서도 대규모 수공구조물 설계시에는 특별한 이유가 없는 한 PMP를 고려하도록 하고 있다.

일반적으로 PMP를 산정하는 방법에는 수문기상학적, 통계학적, 경험적 방법이 있다. 수문기상학적 방법은 WMO에서 제안하고 있는 방법으로 가장 많이 적용되고 있다. 국내에서도 각 방법에 따른 하천유역 PMP를 기존의 최대강수량과 비교해 본 결과 기상학적 제요소를 고려한 수문기상학적 방법이 가장 타당한 방법이라고 제안하였다(이순탁과 박정규, 1986). 통계학적 방법은 자료의 영향을 많이 받는 방법으로 자료에 따라 과다 혹은 과소 추정될 수 있는 문제점이 있다. 실제 1972년 6월에 미국 펜실베이니아 Mahantango에서 발생

한 허리케인 애그니스에 의한 홍수량은 이전에 통계적으로 추정된 결과보다 최대 10배에 해당되는 값을 보여 통계학적 방법에는 한계가 있다고 알려져 있다(건설교통부, 2000). 경험적 방법은 과거 자료를 이용하여 경험적으로 추정하는 방법으로 전문가의 주관성이 개입될 소지가 있으므로 많이 적용되지 않고 있다. 이러한 이유들로 인해 현재 많은 연구자들은 수문기상학적 방법으로 PMP를 추정하고 있다. 수문기상학적 방법은 WMO(1973, 1986)에서 제시한 것처럼 크게 수분최대화(moisture maximization), 호우전이(storm transposition), 포락(envelopment)의 단계를 통해 PMP를 산정하게 되는데, 이 중 수분최대화는 PMP를 추정하는데 주요 골간을 이루는 가장 중요한 요소라 할 수 있다(건설교통부, 2000).

수분최대화비(moisture maximizing rate)는 실제 호우시의 수분 유입 지역의 이슬점 온도에서 발생할 수 있는 가강수량과 호우지역 최대 이슬점에서 발생할 수 있는 최대가강수량의 비를 이용하여 계산되며, 일반적으로 이 값을 이용하여 호우를 최대화한다. 또한 WMO(1986) 보고서에서는 특정지역에서 발생한 호우를 다른 지역으로 전이하기 전 발생 가능한 최대 호우(PMP)로 변환하기 위해 수분최대화비를 적용하도록 하고 있다. 수분최대화비를 산정하기 위해서는 호우로의 수분유입을 대표하는 관측소의 이슬점 온도 자료가 이용된다. 따라서 수분유입을 대표하는 관측소의 선정은 매우 중요한 과정으로, 일반적으로는 지상일기도(surface weather chart)를 이용하여 강우를 형성하는 공기층의 공급원을 파악하고 그 주변의 기상관측소의 이슬점온도를 선정하여 수분최대화비를 산정하게 된다. 건설교통부(2000)에서는 우리나라의 경우 대부분의 호

우로의 수분유입은 남, 서해안을 통해 유입되고 있다고 보고 있다. 「한국가능최대강수량 추정」 보고서(건설교통부, 2000)에서도 이러한 이유로 습윤공기의 유입가정에 대한 분석은 제외하였다. 그러나 기상청은 태풍 루사가 2002년 8월에 한반도를 통과하면서 전국적으로 피해를 입혔고, 특히 강릉을 포함한 영동지역에 가장 큰 피해를 주었던 원인으로 동해상의 많은 양의 수분이 강한 북동풍에 의해 내륙으로 유입되었고, 이 수분이 지형적인 요인에 의해 영동지역에서 수렴이 일어났기 때문이라고 분석하였다(강원지방기상청, 2002). 이것은 PMP 산정시 가장 중요한 요소 중의 하나인 수분유입이 기존의 남, 서해안이 아닌 동해에서도 유입되고 있다는 것을 보여주는 사례이며, 더 나아가 관측소 지점의 지형적 특성을 고려하여 수분 유입 지역을 결정해야 함을 제시하고 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 남, 서해안에서 수분유입이 될 것이라는 가정에서 산정된 태풍 루사의 PMP와 영동지역 지형적 영향과 함께 동해상에서 유입되는 것을 고려한 PMP가 기존의 결과와 얼마나 차이를 보이는지를 분석하고자 하였다.

본 연구에서는 우선적으로 태풍 루사 기간의 강릉지역 수분최대화비를 계산하기 위해 그 지역의 지형적 특성을 고려한 대표 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 온도를 산정하고(3.2절), 관측데이터, 통계적 방법 등을 이용하여 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 온도를 산정하였다(3.3절). 이러한 이슬점 자료를 이용하여 산정한 수분최대화비와 기존 연구들에서 제시된 값들을 비교분석하였다. 또한 김남원과 원유승(2004)은 PMP를 산정하기 위해서는 DAD관계가 필수적이며, 임의지점의 PMP는 주요호우에 대하여 지속기간별 면적별 평균강수량에 수분최대화비와 전이비를 곱해 얻어진 값의 최대치로 산정된다고 하였다. 따라서 이상진 등(2004)의 연구에 따라 기존 호우전이비와 DAD(Depth-Area-Duration) 분석 결과를 이용하여 태풍 루사를 경북 무명천 유역으로 전이하여 산정한 PMP 결과와 비교한 후, 실제 PMP 전이에서 발생하는 강수량 차에 대해서도 평가하였다.

## 2. 태풍 루사(Rusa)의 기상학적 분석

2002년 8월 30일에서 9월 1일 사이에 발생한 제 15호 태풍 루사는 중심기압 950hPa, 순간최대풍속 56.7m/s(제주도 고산)를 기록했으며, 총 인명피해 246명, 재산피해 51,479억원이라는 엄청난 규모의 물질적 정신적 피해를 발생시켰다. 특히 강릉지방에는 사상 초유의 일강수량(870.5mm, 종전 305.5mm)을 기록하면서 그 지역 연평균 강수량(1,401.9mm)의 62%가 하루에 내리는, 기상청 관측 이래 가장 많은 일강수량을 기록하였다(한국

수자원학회, 2002). 이상진 등(2004)은 루사로 인한 강릉지역의 집중호우가 기존 PMP 규모를 초과하였으므로 댐설계 기준에 대한 재고가 불가피하다고 제안하기도 하였다. 이 장에서는 태풍 루사가 이러한 막대한 피해와 영향을 끼친 원인에 대해 기상학적인 측면에서 분석하였다.

### 2.1 종관적 배경

강원지방기상청(2002)의 태풍 루사 종합분석에 따르면, 태풍 루사는 우리나라를 통과한 태풍 중에서 가장 강력한 태풍으로 기록되었다. 루사는 남해안으로 상륙하여 내륙을 통과하면서 전국적으로 강한 바람과 엄청난 양의 비를 동반하였다. 이러한 태풍 루사에 관한 기상학적인 원인은 다음과 같다.

Fig. 1은 2002년 8월 31일의 일기도와 GMS(Geostationary Meteorological satellite) 적외선 영상이다. GMS는 기상 상태를 파악하여 지상에 알리는 정지궤도 위성으로, 일기도와 더불어 기상청에서 제공하고 있다. Fig. 1에서 보듯이 태풍이 북상할 때 우리나라에 동서로 북태평양고기압이 가로 놓여 편서풍대의 세력이 약해져 상층 기압골의 이동이 늦어짐에 따라 태풍의 이동속도와 전향이 늦었다. 더불어 남해상의 해수온도(평균 25°C)가 26°C로써 평년보다 높아 강한 태풍의 세력을 그대로 유지하면서 우리나라로 접근하였다(강원지방기상청, 2002). 또한 우리나라 남해안에 상륙한 후 내륙을 지나면서도 비교적 강력한 세력을 유지할 수 있었던 것은 상층의 편서풍이 약했고, 동해상에 고기압이 놓여 있었기 때문에 태풍이 동쪽으로 전향하지 못하고 계속 북상하였기 때문으로 분석된다. 이것은 Fig. 1의 GMS 적외선 영상에서도 확인할 수 있다. 태풍이 북상하는 가운데 강원도 영동지방의 주변 기압장은 북태평양 고기압 가장자리에서 저온 다습한 동풍계열의 바람이 지속적으로 유입되어 습윤역이 강화되고 850hPa(상공 1.5km) 부근의 하층대기가 매우 불안정한 상태에 있었다. 특히 강원 영동지역은 태풍이 느린 속도로 북상하여 강수지속시간이 길었으며, 북동기류의 비교적 찬성질의 기류가 지속적으로 유입되어 기상관측사상 최대의 폭우를 기록하였다(강원도, 2003).

### 2.2 관측 강수량

태풍 루사는 앞 절에서 설명한 바와 같이 북태평양 고기압의 가장자리에 위치한 강원도 영동지방으로 저온 다습한 동풍이 지속적으로 유입되면서 산악효과에 의해 집중호우가 발생한 것으로 나타났다. Fig. 2는 태풍 루사 시기의 3일간(8월 30일 ~ 9월 1일) 강릉에 내리진

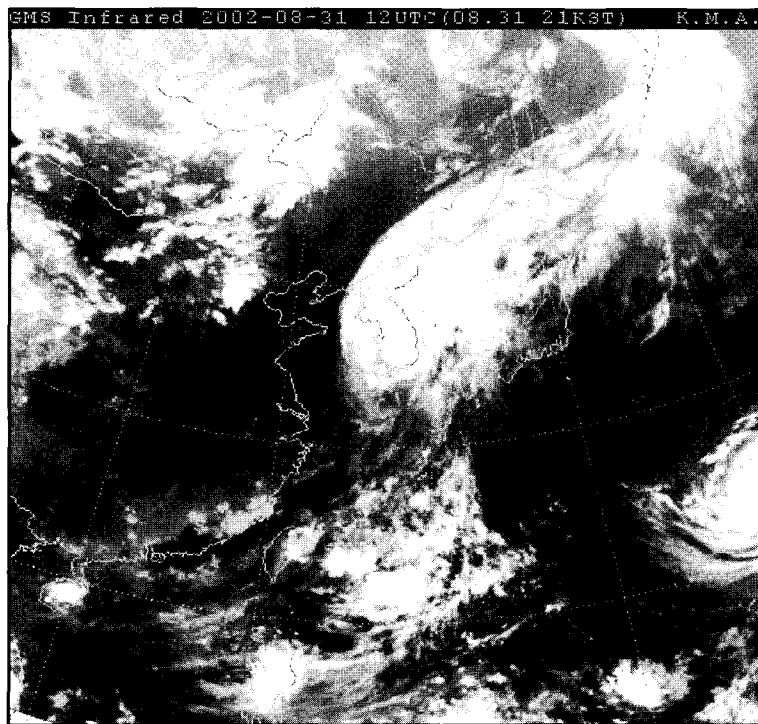
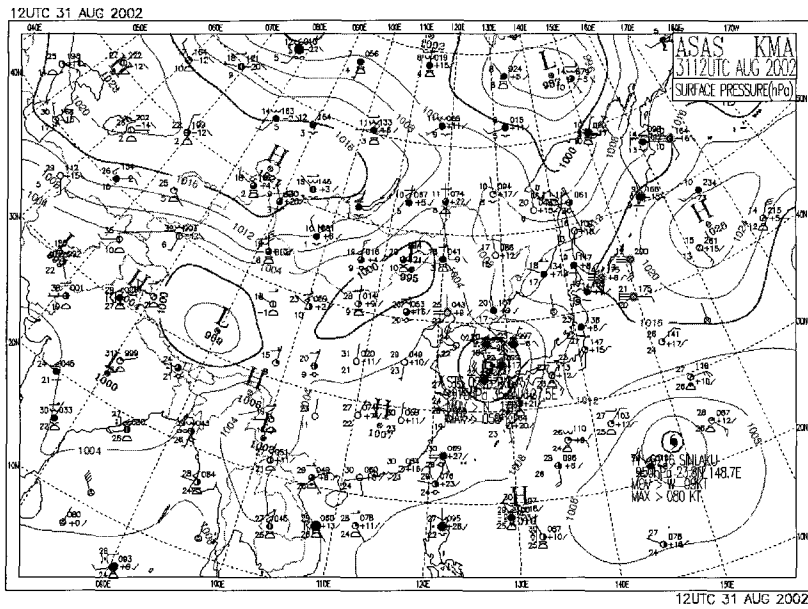


Fig. 1. 12UTC Aug. 31, 2002, Weather Chart (upper), GMS infrared image (lower) in KMA(Korea Meteorological Administration)

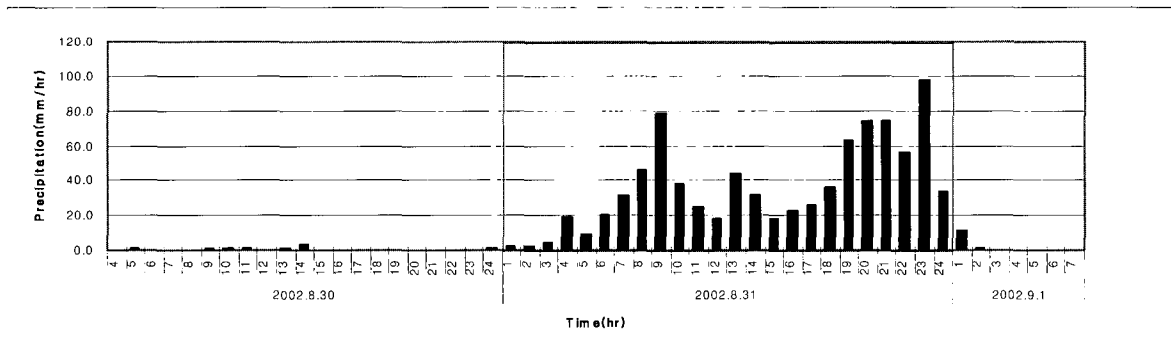


Fig. 2. Observed precipitation data in Gangneung region

시간별 강수량으로, 시간당 최고 100.0mm까지의 강수를 보이면서 총 897.5mm를 내렸고, 이 중 870.5mm가 8월 31일 하루에 내린 양으로 기상청 관측 이래 최대 일강수량을 기록하게 된 것이다. 지속기간별 최대강우량 발생시간과 최대강우량은 지속기간 12시간인 경우 8월 31일 12시부터 24시까지 576.0mm, 지속기간 24시간은 8월 31일 1시부터 9월 1일 1시까지 880.0mm, 지속기간 48시간은 8월 30일 5시부터 9월 1일 5시까지 897.5mm였다.

### 3. 수분최대화비 산정

대기 중의 수증기량에 대한 실제 강수발생량의 비율로 정의되는 호우효율은 대기의 가강수량과 깊은 관계를 가지고 있다. 그러나 가강수량을 직접 측정하기에는 많은 문제점이 있기 때문에, 가강수량과 지상 이슬점에 따른 상관관계로 호우효율을 평가하게 된다. 본 연구에서는 수분최대화비와 가강수량 산정 방법에 대해 제시하고, 태풍 루사 기간에 대해 수분최대화비를 산정하였다. 수분최대화비 산정을 위한 대표 12시간 지속 이슬점 결정을 위해 4개 기상측후소의 관측자료를 수집하고 이용하였다. 최대 12시간 지속 이슬점은 관측자료 기간의 한계를 고려하여 세 가지 방법을 적용하여 산정하고 각 이슬점에 따른 결과를 비교하였다.

#### 3.1 수분최대화비 산정 방법

수분최대화비를 산정하는 최종 목적은 가능 최대강수량을 추정하는데 있다. 이 값을 측정하기란 사실상 불가능하기 때문에 간접적인 측정방법으로 관측자료를 이용하여야 한다. 왜냐하면 집중호우나 주요 극치호우는 상층부의 공기온도와 습도를 조사하기 위한 조사망을 구축하기 전에 강우가 발생하기 때문에 직접적인 관측에는 어려움이 있기 때문이다. 따라서 지표면 근처에서의 지표(index)를 이용하여 간접적으로 추정하는 방법이 이용된다.

대기 중 수분의 대부분은 낮은 곳에 위치하며, 강우과정 중에 상부로 분포되기 때문에 대기의 낮은 곳의 수분은 강수를 발생시키는 가장 중요한 요소이다. 특히 극치호우의 경우 수분의 상승률은 매우 크기 때문에 한 시간 정도면 지표면 근처에 있던 수분이 강수를 발생하는 층의 정상까지 도달한다는 것을 이론적으로 계산을 통해 알 수 있다. 따라서 주어진 표면이슬점에 대해 수직 공기기둥에서 공기가 포화되는 지점이 아래에 위치할수록 많은 수분을 함유하게 된다. 결과적으로 포화되는 위치가 지상에 위치할 때 최대강수량이 발생하게 되는 것이다. 이러한 이유로 수문기상학자들은 극치호우

를 포화위단열(pseudoadiabatic) 대기로 가정한다(WMO, 1986; 건설교통부, 2000). 호우를 최대화하기 위해서는 두 개의 포화위단열 대기에 대한 추정이 필요한데, 하나는 최대화시킬 호우사상의 포화위단열 대기이고, 다른 하나는 발생한 호우와 동일한 연도, 동일한 장소에서 예상될 최대 포화위단열 대기이다. 기상학에서는 이 두 대기를 구분하기 위한 지표로서 1000hPa에서의 이슬점을 사용한다. 실제 포화위단열 상태를 가정할 경우 호우와 가강수량의 극치값은 표면이슬점을 기초로 하여 대략 추정할 수 있다고 알려져 있다(Miller, 1963; US Weather Bureau, 1960). 따라서 이 표면이슬점을 지표로 이용하여 가능 최대강수량을 추정하게 되며, 일반적으로 12시간 지속 최고이슬점 자료가 이용된다.

수분최대화비(R)는 Eq. (1)과 같이 호우지대의 고도를 고려한 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점에 의한 가강수량( $WP_m$ )과 대표 12시간 지속 1000 hPa 이슬점에 의한 가강수량( $WP_s$ )의 비로 정의되며, 이때 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점은 호우 발생일 약 15일 전후에서의 최대 이슬점이다(WMO, 1986, 건설교통부, 2000).

$$R = \frac{WP_m}{WP_s} \quad (1)$$

#### 3.2 가강수량 계산

가강수량은 대기의 수직 기둥(1cm×1cm)에 포함되어 있는 수증기의 총량을 나타내는 것이다. 즉, 수직 기둥의 수증기가 모두 응결된다고 가정할 경우 지표면에서부터 누적된 물의 깊이를 뜻한다. Eq. (2)는 가강수량을 산정하는 식을 나타낸 것이다. WMO 보고서(1973, 1986)에서는 1000 hPa 이슬점 온도의 함수로써 포화 비단열 대기의 1000 hPa에서 200 hPa 까지 다양한 층의 가강수량 값을 계산하여 표로 제시하고 있으며, 본 연구에서도 이 표를 이용하여 가강수량을 산정하였다.

$$W = \frac{\bar{q} \Delta p}{g \rho} \quad (2)$$

여기서  $W$ 는 가강수량(cm),  $\bar{q}$ 는 기층의 평균비습(g/kg),  $\Delta p$ 는 상·하층의 기압차(hPa),  $g$ 는 중력가속도( $\text{cm}/\text{sce}^2$ ),  $\rho$ 는 수증기 밀도( $\text{g}/\text{cm}^3$ )를 나타낸다.

#### 3.3 대표 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 산정

대표 12시간 지속 1000 hPa 이슬점은 호우시 호우로 유입하는 공기의 최고 이슬점으로 산정되며, 만약 공간

적으로 수분이 매우 적은 지역에서 유입된다면 한 위치 상에서의 이슬점만으로 결정되어질 수 있지만, 일반적으로 두 지점 이상에서의 값을 산술평균하여 사용한다. 또한 시간적 기준은 호우의 발생원인이 루사와 같은 태풍일 경우 호우 발생일의 이슬점을 대표 이슬점으로 선정하며, 본 연구에서는 2002년 홍수피해 종합 조사보고서(한국수자원학회, 2002)에 따라 2002년 8월 30일을 기준으로 하였다.

호우의 수분유입지역 선택을 위해서 먼저 Fig. 3과 같이 강릉지역 기상청 지표 관측 매시간 풍향 자료를 분석하였으며, 그 결과 8월 30일을 포함해 집중호우 전부터의 주요 풍향은 북서풍계열이었음을 알 수 있었다. 수자원관리기법 개발연구조사 보고서(건설교통부, 2000)에 따르면, 상층 관측은 호우시에 기구의 관측이 불가능하고 표면에서 관측할 수 있는 지점보다 훨씬 수가 적어 호우의 수분 유입을 결정하기에 부적절하다고 하였으며, 이런 이유로 한계수분함유층에 있어 바람 이동은 지표자료를 일반적으로 사용한다고 설명하고 있다. 이에 따라 기존 태풍 루사 시기에 강릉으로 수분이 유입되는

지역은 대관령으로 결정되었다(강원도, 2003). 그러나 지표 관측지점에서 하층바람은 지형적인 요인과 구조물의 영향을 매우 크게 받기 때문에 기상학적으로는 주로 바람의 이동방향, 즉 풍향은 Fig. 4처럼 850 hPa의 수분속과 유선장에 대한 분석을 통해서 결정하고 있다. 강원지방 기상청의 15호 태풍 루사 종합분석(강원지방기상청, 2002)에 따르면, 태풍의 가장자리와 고기압 가장자리의 기류가 합류된 남동류가 남해상에서 동해상으로 계속 유입되었고, 북쪽 한기를 동반한 북동류가 동해 중부해상에서 수렴되었다고 분석되었다. 이러한 종관적인 기압계에서의 두 기류가 강원 중부해상에 위치하였고, 이것이 강한 북동풍에 의해 내륙으로 유입되면서 매우 빠르게 발달하였다. 또한 Fig. 5와 같이 지형적인 영향에 의해 북동풍이 풍상측에서 산맥에 부딪쳐 돌아나가면서 강릉 지역은 북서풍이 유입되었고, 태풍전면에 의해 강한 동풍까지 이 지역에 합성되면서 수렴대는 더욱 발달하게 되었다. Table 1은 속초 고층 관측자료로써 지상에서 약 1.5 ~ 2.0km 상공의 풍향과 풍속을 표로 나타낸 것으로, 본격적인 태풍의 영향을 받던 8월 31일은 풍속

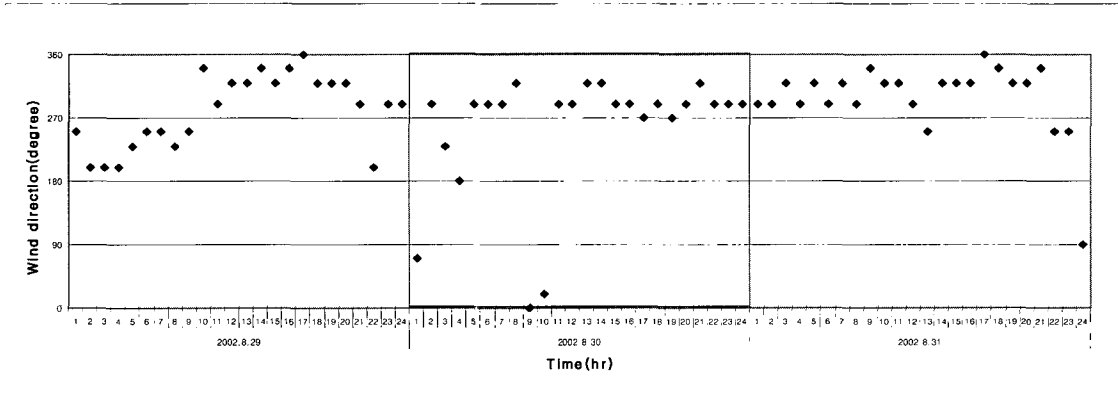


Fig. 3. Wind direction of every hour surface observation in Gangneung region (from Sep. 1 to Aug. 29, 2002)

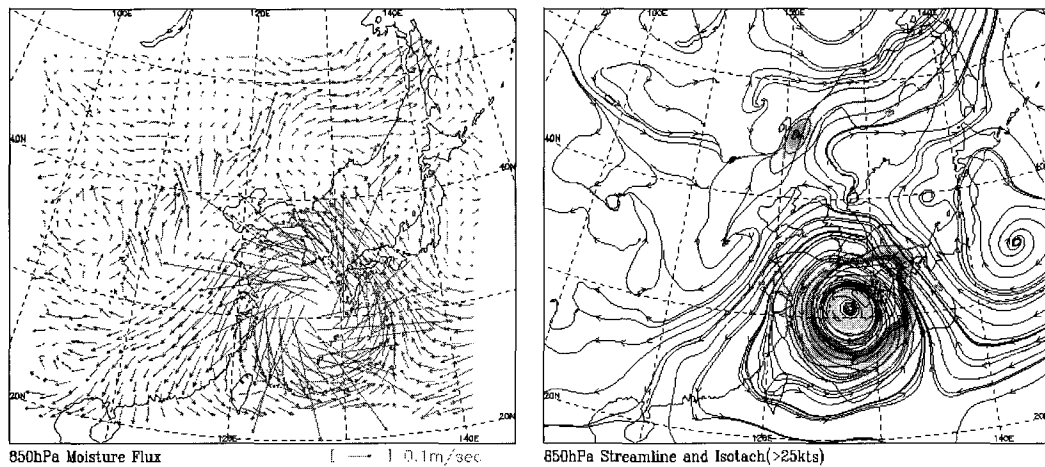


Fig. 4. 850 hPa moisture flux and stream line for 12UTC Aug. 30, 2002.

Table 1. Upper layer observation data in Sokcho for Typhoon Rusa(from Aug. 30 ~ Aug. 31, 2002)

Date	Height(hPa)	Wind direction	Wind speed(m/s)	Date	Height(hPa)	Wind direction	Wind speed(m/s)
8/30 00	850.0	SE	3.5	8/31 00	850.0	NNE	14.5
06	700.0	SE	3	06	850.0	NE	19.5
12	850.0	E	7.5	12	847.0	NE	22
18	850.0	E	7	18	No observation		

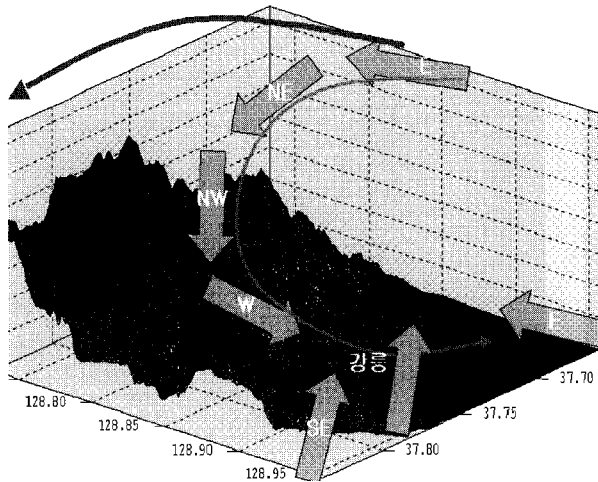


Fig. 5. Local wind 3-D figure of Gangneung region for northeast wind influx

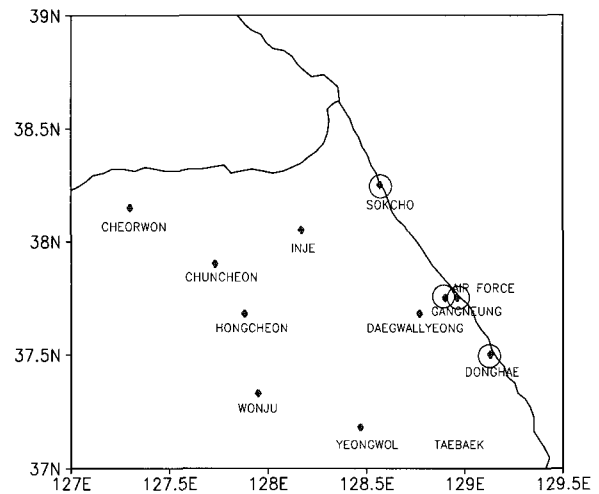


Fig. 6. Circle points are calculated for representative persisting 12 hours 1000 hPa dew points temperature.

Table 2. Estimation Value of representative persisting 12 hours dew points temperature(°C)

Time Region	3~12	6~15	9~18	12~21	15~24	Maximum value
Sokcho	19.9	19.9	20.1	19.3	19.2	20.1
Gangneung	20.0	20.4	20.6	20.6	19.9	20.6
Donghae	19.4	19.4	20.1	20.1	19.9	20.1
Air force	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
Mean						20.45

이 전날의 두 배 이상으로 증가하였고, 앞선 내용과 같이 동풍계열의 바람이 강릉으로 강하게 불어 들고 있음을 관측적으로 나타내고 있다.

본 연구에서는 이러한 기존 분석자료와 관측자료를 근거로 하여 호우로 유입되는 수분공급원이 동해쪽에 있다고 판단하였다. 따라서 호우로 유입하는 수분지역을 기존의 대관령이 아닌 동해, 속초, 공군기지 및 강릉으로 선정(Fig. 6)하여 이순탁과 박정규 (1986)과 같이 이 지점들의 동 시간대 대표 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 온도를 산술 평균하여 대표이슬점을 산정하였다. 산정 절차는 다음과 같고 결과는 Table 2에 제시하였다.

- ① 기상청에서 제공하는 데이터는 3시간 간격 데이터므로, 이 중 12시간을 한 세트, 3시간씩 지체시켜가면서 12시간 지속 이슬점 자료를 구축하였으며, 그 중에서 최소값을 선택하였다.
- ② ①의 결과로 5세트의 최소값이 산정되면, 이 5개의 이슬점 자료들 중 최대값을 선택한다. 이 값이 한 지역의 대표 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 온도가 되는 것이다.
- ③ 본 연구에서는 총 4개 지역에 대해 위와 같은 방법으로 산정한 4개의 최대값을 산술평균함으로써 태풍 루사 기간의 대표 12시간 지속 1000 hPa 이슬점을 산정하였다.

### 3.4 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 산정

일반적으로 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점은 대 상지역에서 약 50년 이상의 장기간의 기록으로부터 구 하며, 15일 또는 10일별로 12시간 지속 1000 hPa의 최 대 이슬점을 선정하도록 하고 있다(WMO, 1986). 그리 나 현실적으로 50년 이상의 자료를 구축할 수 없으므로 본 연구에서는 세 가지 방법으로 접근하여 산정하고자 하였다. 첫 번째는 관측자료 기간 중에서 태풍 루사 시 기(8월 30일)의 최대값을 결정하는 방법이고, 두 번째는 빈도분석을 통해 50년 빈도의 이슬점을 산정하는 방법 이며, 세 번째는 첫 번째 방법과 유사하나 태풍 루사의 전후 기간까지 고려하여 최대 이슬점 값을 추정하는 방 법이다.

첫 번째 방법으로 2002년 홍수피해 종합 조사보고서 (한국수자원학회, 2002)와 동일한 방법으로 1961년~ 2002년까지 42년간의 8월 30일 강릉지역 자료를 사용하 였다. Fig. 7은 이 자료의 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 온도를 나타낸 것으로, 1966년 25.6°C로써 가장 큰 값을 보였다. 루사 기간인 2002년에는 최대 20.9°C 정도였던 것으로 분석되었다.

두 번째 방법은 수자원관리기법개발연구조사 보고서 (건설교통부, 2000)에서 사용한 방법으로 빈도분석을 통 해 재현기간 50년의 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 을 산정하였다. 이 분석을 위해 방재연구소에서 제공하 는 FARD2002 통계 프로그램을 이용하였다. 본 연구에 서는 기존의 보고서(한국수자원학회, 2002)와 동일한 방 법으로 확률분포형은 Extreme Type I으로 선정하였 고, 매개변수 추정은 모멘트법으로 하였다. Extreme Type I와 모멘트법을 적용한 이유는 기존 보고서(한 국수자원학회, 2002)와 이상진 등(2004)의 연구와 같은 조건에서 수분 유입방향 결정을 다르게 하였을 때의 결

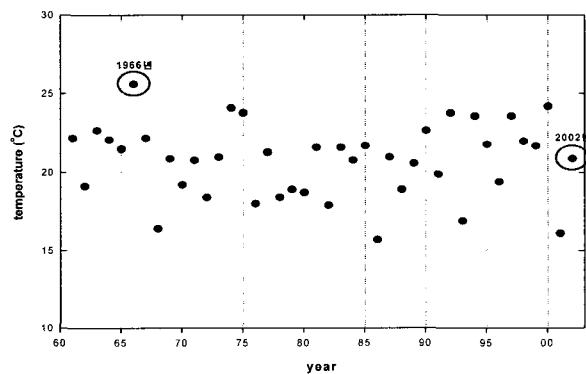


Fig. 7. Maximum persisting 12 hours 1000 hPa dew points temperature by the standard of Aug. 31, 1961~2002.

과를 비교하기 위해서이다. 50년 빈도 이슬점은 5% 유 의수준을 적용하여 산정하였다. Extreme Type I 분포 는 우리나라에서 널리 사용된 분포로 자료의 기록연한 이 짧은 경우에도 모분포의 재현성을 가장 잘 표현하는 것으로 알려져 있다.

마지막 방법으로 50년 이상의 관측기록은 아니지만 객관적인 관측 자료에 근거하여 다음과 같은 절차에 의 해 산정하였다. Fig. 8은 강릉지역의 42년간(1961년 ~ 2002년) 7월 1일 ~ 9월 31일 까지 15일별로 최대 12시 간 지속 1000 hPa 이슬점을 나타낸 것이다. 호우를 최 대화하기 위해 루사기간이 포함된 8월 16일 ~ 31일을 기준으로 하여 15일 전후 이슬점을 분석하였다. 결과적 으로 8월 1일 ~ 15일의 최대 12시간 지속 1000 hPa 이 슬점 값에서 최고값을 채택하였다.

이상의 세 방법으로 산정된 이슬점으로 수분최대화 비를 산정하고, PMP 계산에 활용하였다.

### 3.5 태풍 루사 기간의 수분최대화비 산정 및 PMP 전이

앞 절에서 산정한 대표 및 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 온도를 이용하여 루사 기간의 수분최대화 비를 추정하였다. WMO(1986)에서는 호우효율에 대한 기상변수들의 물리적 관계가 아직 완전히 파악되지 못 하였고, 측정이 거의 불가능하므로 수분최대화비에 대 한 상한계를 적용할 것을 제안하고 있다. 수분최대화비 의 임계값에 대해서, Miller et al.(1988)은 산악지형에서 호우데이터의 부족과 전이의 한계로 인해 그 임계값을 기존 1.50에서 1.70으로 완화되어야 한다고 하였다. 또 한 수자원 관리기법개발 연구조사 보고서(건설교통부, 2000)에서도 1.70 이상일 경우에는 기상학적 판단 및 자 료에 의하여 주의하도록 하였다. 따라서 본 연구에서도 상한계를 1.70으로 설정하였다.

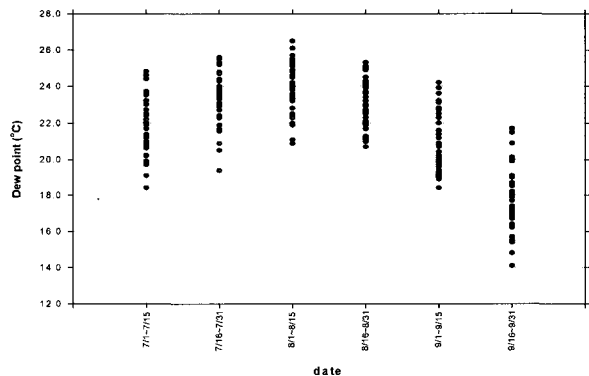


Fig. 8. Gangneung maximum persisting 12 hours 1000 hPa dew points temperature by 15 days step during 1961~2002(for 42 years)



Table 3. The moisture maximizing rate of Gangneung sub-basin by typhoon Rusa

Analysis	Height (m)	Representative 1000 hPa dew point (°C)	Representative precipitable water (mm)	Representative 1000 hPa height (mm)	Maximum 1000 hPa dew point (°C)	Maximum precipitable water (mm)	Maximum 1000 hPa height (mm)	Moisture maximizing rate
2002 year	30.00	23.00	68.0	0.60	25.98	87.86	0.75	1.29
Method I	30.00	20.45	54.5	0.52	25.00	81.00	0.60	1.49(+0.20)
Method II	30.00	20.45	54.5	0.52	25.80	86.60	0.72	1.59(+0.30)
Method III	30.00	20.45	54.5	0.52	26.50	92.00	0.75	1.69(+0.40)

Table 4. 24-hour PMP of Mumyong river catchment by Typhoon Rusa

Distribution	Lee et, al.(2004) (mm)	Method I (mm)	Method II (mm)	Method III (mm)
PMP	1,023	1,182 (16% ↑)	1,262 (23% ↑)	1,341 (31% ↑)

Table 3은 3.4절에서 세 가지 방법을 이용하여 산정된 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 온도를 이용하여 수분최대화비를 산정한 결과이다. 먼저 2002년 홍수피해 종합 조사보고서(한국수자원학회, 2002)의 분석값을 기준값으로 하여, 강릉지역 42년간 8월 31일 최대 12시간 이슬점 온도 중 최대값(I 방법)과 50년 빈도 분포로 계산된 최대 이슬점 온도(II 방법) 그리고 15일별 최대 12시간 이슬점 온도의 전후 15일 중 최고 온도(III 방법)에 따른 각각의 수분최대화비를 계산한 후 비교·분석하였다. 첫 번째 방법인 관측 최대값(1966년)을 적용했을 때는 1.49로 기존의 1.29에 비해 0.20정도 크게 산정되었으며, 두 번째 빈도분석을 통한 방법과 세 번째 15일별 전후 최고 관측 이슬점을 이용한 방법은 각각 1.59, 1.69로써 기존의 값에 비해 각각 0.30, 0.40 높게 산정되었다.

기존 연구와의 비교를 위해 이상진 등(2004)이 경북 감포지역의 무명천 유역(면적 3.67km<sup>2</sup>)에 대해 태풍 루사를 전이하여 산정하였던 PMP 결과를 이용하였다. 본 연구에서도 이상진 등(2004)이 사용하였던 호우전이비와 DAD분석 결과를 그대로 적용하여 총전이비를 추정하였으며, 24시간 PMP를 산정하고 결과를 비교하였다. 기존 연구에서는 수분유입 방향을 서쪽 방향으로 가정하고 대관령 관측소 자료를 이용하여 수분최대화비를 1.29로 산정하였다. 이 연구에서 사용된 호우전이비는 1.225로 수분최대화비에 수평전이비(1.106), 수직전이비(1.000), 지형영향비(0.859)를 곱하여 산정하였다. 본 연구에서는 Table 3에서 제시된 수분최대화비를 이용하고 나머지 전이비는 그대로 적용하여 총전이비를 각각 1.416(I 방법), 1.511(II 방법), 1.606(III 방법)으로 추정하

였다. 이를 이용하여 태풍 루사로 인해 강릉지역 호우에 대한 DAD 분석결과(한국수자원학회, 2002)로부터 유역면적 3.67km<sup>2</sup>에 해당하는 값인 835mm에 곱하여 24시간 PMP를 산정하였다. 그 결과 Table 4에 제시된 바와 같이 기존 연구는 1,023mm였으나 I 방법을 적용한 경우 1,182mm, II 방법과 III 방법의 경우는 각각 1,087mm, 1,341mm로 계산되었다. 기존 연구에 비해 각각 159mm, 239mm, 318mm 정도 높게 산정되었다.

#### 4. 토 의

본 연구에서는 태풍 루사를 기상학적 측면에서 분석하여, PMP 추정에서 가장 중요한 요소 중 하나인 수분최대화비 산정에 대해 분석하였다. 수분최대화비를 산정하기 위해서는 호우로의 수분유입을 대표할 수 있는 이슬점 온도의 선정이 필수적이다. 따라서 수분유입 방향을 결정하는 것은 매우 중요한 부분이나 기존의 연구들에서는 모든 호우로의 수분유입 방향을 서해와 남해로 가정하고 분석을 수행하여 왔다. 그러나 영동지역의 대부분 폭우는 동풍계열에 따른 동해상에서 다량의 수분 유입과 지형적인 요인에 의해 발생되며, 본 연구에서 분석한 태풍 루사의 경우도 수분 유입방향이 동해쪽이었던 것으로 확인되었다. 다음은 수분 유입방향의 변화에 따른 수분최대화비 산정이나 PMP 전이에서 나타날 수 있는 두 개의 문제점에 대해 분석하였다.

첫 번째는 유입방향에 따라 PMP 양에서 나타날 수 있는 문제점이다. 기존 연구들(한국수자원학회, 2002; 강원도, 2003; 이상진 등, 2004)에서는 강릉지역에서 태풍 루사에 대한 PMP 산정을 위해 대관령 지점의 자료를 이용하여 대표 및 최대 12시간 지속 이슬점을 결정

하였다. 그러나 본 연구에서는 속초, 강릉, 동해, 공군기지 등의 4개 지점을 선정하여 평균하여 대표 이슬점을 결정하였으며, 강릉 자료를 이용하여 세 가지 방법에 의해 최대 이슬점을 결정하였다. 결과적으로 기존의 연구들에서는 대표 및 최대 12시간 지속 이슬점의 차가 2.98°C였으나 본 연구 결과에 따르면 4.55°C(I 방법) ~ 6.05°C(III 방법)로 큰 차이를 보였다. 또한 무명천 유역에 대해 PMP 전이를 통해 강수량을 비교한 결과 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점 산정방법에 따라 약 16%(I 방법)~31%(III 방법)까지 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 수문기상학적 방법 적용시 수분유입 방향에 따라 PMP 산정에서 차이가 발생할 수 있다는 것을 보여주는 것이다. 노재식 등(1986)은 수문기상학적 방법은 일반적으로 매우 복잡하고 여러 가지 기상자료가 필요할 뿐 아니라 산정된 PMP 값이 어느 정도의 신빙성이 있는지 검토할 방법이 없고 또 많은 시간이 소요되는 단점이 있다고 하였다. 그러한 단점에도 불구하고, 많은 연구와 실무에서 수문학적 방법으로 PMP를 산정하는 것은, 다른 방법에 비해 보다 현실성이 있기 때문이다. 따라서 관측데이터의 질적인 향상과 기상학적 요인들에 대한 분석이 고려된다면, 더욱 신뢰성 있는 결과를 낼 수 있을 것으로 사료된다.

두 번째는 PMP의 전이에서 나타날 수 있는 문제이다. 본 연구에서 분석한 결과 강릉을 포함한 영동지방에 엄청난 폭우를 내렸던 태풍 루사는 태백산맥의 지형적인 영향으로 기존의 다른 지역에서 발생했던 호우와는 다른 지역적인 특성을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 지역의 지형학적 특성으로 발생했던 호우를 기존의 수문기상학적 방법을 통해 타 지역에 여과없이 전이할 경우는 결과에 대한 과학적인 신뢰성에 문제가 발생할 것으로 판단된다. 따라서 호우 분석을 통한 PMP 산정시에는 수자원 전문가뿐 아니라 기상전문가가 함께 참여하여 보다 신뢰성 높은 결론을 도출하는 것이 필요할 것으로 사료된다.

## 5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 강릉지방을 비롯하여 엄청난 피해를 발생시켰던 태풍 루사의 사례를 통해 국내 PMP 산정시 수분유입 방향에 따른 영향을 분석하였다. 기존의 가정사항과 달리 기상학적인 관점에서 수분유입 방향을 동쪽으로 결정하고 이를 고려하여 대표 및 최대 12시간 지속 1000 hPa 이슬점을 추정된 후 수분최대화비 및 PMP를 산정하여 선행 연구들의 결과와 비교하였다. 결과적으로 기존의 결과들에 비해 동쪽 방향에서의 수분

유입이 발생할 경우 수분최대화비와 PMP 값이 선행 연구결과들에 비해 크게 산정되는 것으로 나타났다. 이것은 국내유역에서 PMP 산정을 위해 호우를 분석할 경우 수분유입 방향에 대한 분석이 중요하게 고려되어야 한다는 것을 보여준다. 실제 대부분의 호우들에서는 기존의 서해나 남해를 수분유입방향으로 가정한 경우가 타당한 결과들을 보이니 태풍 루사와 같이 지형적인 영향이 큰 호우를 단순히 기존의 가정에 의한 PMP 추정과 전이할 경우에는 결과에 대한 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있을 것으로 사료된다.

전세계적으로 이상기후로 인한 극치사상의 발생 및 피해가 증가됨에 따라 국제적으로도 이러한 기상이변에 따른 수공학적 기준 변화의 필요성이 제기되고 있다. 국내에서도 2002년 루사, 2003년 매미, 2006년 집중호우 등 최근 들어 엄청난 피해를 야기한 호우사상들이 빈번히 발생함에 따라 대형 구조물에 대한 안정성 문제가 계속 이슈화되고 있다. 특히 기후온난화로 인해 미래 강수량의 강도 및 빈도가 변화될 것으로 전망됨에 따라 대형 수공구조물의 안전도 확보에 대한 불확실성은 증가될 것으로 사료된다. 따라서 향후 기후변화에 효과적으로 대처하고 적용하기 위해서는 PMP 산정에 영향을 미치는 기상변수들의 변동성에 관한 연구도 수행되어야 할 것으로 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(1-9-3)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- 강원지방기상청 (2002). 제 15호 태풍 루사(Rusa) 종합분석, 119 pp.
- 강원도 (2003). 2002 강원 수해백서. pp. 3.1-3.67.
- 건설교통부 (2000). 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서 제2권 한국 가능최대강수량 추정, 한국건설기술연구원.
- 김남원, 원유승 (2004). “최근의 기상변동과 PMP의 변화.” 2004년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 한국수자원학회, pp. 1203-1207.
- 노재식, 이원환, 이길준 (1986). “우리나라의 최대가강수량 빈도계수 산정에 관한 연구.” 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제19권, 제3호, pp. 249-257.
- 이상진, 최현, 신희범, 방상길 (2004). “수공구조물 설계

- 를 위한 PMF 및 임계지속시간 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제9호, pp. 707-718.
- 이순탁, 박정규 (1986). “하천유역의 설계 홍수량 결정을 위한 P.M.P의 산정 및 적용.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제19권, 제1호, pp. 75-86.
- 한국수자원학회 (2002). **2002년 홍수피해 종합조사 보고서**
- Miller, J.F. (1963). *Probable Maximum Precipitation and Rainfall-Frequency Data for Alaska* Technical Paper No. 47, Weather Bureau, US Department of Commerce, Washington, DC, 66 pp.
- Miller, J.F., Hansen, E.M., Fenn, D.D., Schreiner, L.C., and Jensen, D.T. (1988) *Probable maximum precipitation estimates-United States between the continental divide and the 103rd meridian*, Hydrometeorological Rep., 55A, Silver Spring, MD., 259 pp.
- Rezacova, D., Sokol, Z., and Pesice, P. (2002) “Improvement of quantitative PMP estimation by including radar precipitation and NWP model outputs”, *QPF Conference 2002 Proceedings*, pp. 23.
- Smith, D.I. (1989). “A dam disaster waiting to break”, *New Scientist*, 11, November, pp. 42-46.
- US Weather Bureau (1960). *Generalized Estimates of Probable Maximum Precipitation West of the 105th Meridian*. Technical Paper No. 38, US Department of Commerce, Washington, DC, pp. 22-25.
- WMO(World Meteorological Organization) (1973). *Manual for estimation of probable maximum precipitation*, Operational Hydrology Rep. No. 1, WMO-No. 332, Geneva, Switzerland, 190 pp.
- WMO(World Meteorological Organization) (1986). *Manual for estimation of probable maximum precipitation*, Second Edition, Operational Hydrology Rep. No. 1, WMO-No. 332, Geneva, Switzerland, 269 pp.
- (논문번호:07-04/접수:2007.01.17/심사완료:2007.08.17)