

그룹 가치스코어 모형을 활용한 강수확률예보의 사용자 만족도 효용 분석*

윤승철 · 이기광[†]
단국대학교 상경대학 경영학부

Analysis of Users' Satisfaction Utility for Precipitation Probabilistic Forecast Using Collective Value Score

Seung Chul Yoon · Ki-Kwang Lee[†]
Department of Business Administration, Dankook University

■ Abstract ■

This study proposes a mathematical model to estimate the economic value of weather forecast service, among which the precipitation forecast service is focused. The value is calculated in terms of users' satisfaction or dissatisfaction resulted from the users' decisions made by using the precipitation probabilistic forecasts and thresholds. The satisfaction values can be quantified by the traditional value score model, which shows the scaled utility values relative to the perfect forecast information. This paper extends the value score concept to a collective value score model which is defined as a weighted sum of users' satisfaction based on threshold distribution in a group of the users. The proposed collective value score model is applied to the picnic scenario by using four hypothetical sets of probabilistic forecasts, i.e., under-confident, over-confident, under-forecast and over-forecast. The application results show that under-confident type of forecasts outperforms the others as a measure of the maximum collective value regardless of users' dissatisfaction patterns caused by two types of forecast errors, e.g., miss and false alarm.

Keywords : Contingency Table, Precipitation Probabilistic Forecast, Picnic Scenario, Threshold, Collective Value Score, Users' Utility

논문접수일 : 2015년 10월 17일 논문게재확정일 : 2015년 12월 04일

논문수정일 : 2015년 11월 27일

* 이 논문은 2013년 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013S1A5A2A01019262).

† 교신저자, kiklee@dankook.ac.kr

1. 서론

기상예보라는 불완전 정보의 가치는 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 기상정보가 사용자의 의사결정을 도와 실제로 금전적인 이익을 주는 경우이고, 두 번째는 사용자의 다양한 생활에서의 편의를 제공하는 경우이다. 첫 번째 경우에 대한 기상예보의 경제적 가치는 농업, 전력, 유통, 항공, 교통 등 다양한 분야에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다 [1, 2, 4, 6, 9]. 이에 대해서는 기상예보의 정확도에 따라 야기되는 경제적 이익 및 손실을 사용자의 의사결정상황에 따라 정량화함으로써 기상예보의 경제적 가치를 측정하는 방법을 주로 사용한다.

이와 같은 방법은 이익-손실 모형(profit-loss model)을 활용하여 모델링할 수 있다[3, 8-11, 13, 14]. 기상예보를 통해 예보사용자 즉, 의사결정자가 미리 예측한 기상사건에 대한 대응행동으로부터 얻어지는 이익과 반대로 기상예보의 오류를 'Miss(특정 기상사건이 발생하지 않을 것으로 예측하였으나 실제로는 발생한 오류)'와 'False Alarm(특정 기상사건이 발생할 것으로 예측하였으나 실제로는 발생하지 않은 오류)'으로 구분하여 각각의 오류에 의한 손실을 정량화함으로써 경제적 가치를 도출하게 된다. 예를 들면, 우산 판매업자가 강수예보를 통해 다음 날 비가 올 것을 예상하고 우산재고를 많이 확보한 경우를 고려해 볼 수 있다. 다음 날 예상대로 비가 온다면 우산 판매업자는 평소보다 많은 이익을 얻을 수 있을 것이며 예상과 달리 다음 날 비가 오지 않는다면, 즉 강수예보의 False Alarm 오류가 발생한다면 많이 확보한 우산의 양만큼 재고비용에 해당하는 손실을 보게 될 것이다. 반대로 강수예보가 다음 날 비가 오지 않는다고 예측하여 우산재고를 평소와 같은 수준에서 준비하였는데, 강수예보의 Miss 오류로 인해 실제 비가 오게 된 경우 해당 판매업자는 더 큰 판매를 얻을 수 있었던 기회를 잃게 되는 기회손실을 보게 된다. 이와 같이 이익과 손실의 경우를 과거 강수예보의 정확도에 따라 종합 산출함으로써 지난 강수예보의 경제적 가치를 가치스코어(Value Score)의

정량적 수치로 산출할 수 있다[3, 11, 17, 18].

기상예보의 가치를 판단하는 두 번째 경우는 예보를 사용함으로써 얻을 수 있는 사용자 편의를 정량화하는 부분이다. 이와 관련된 가치 산출은 기상예보 제공자가 기상서비스에 대한 사용자 만족도 조사를 실시함으로써 만족도 점수를 도출하는 방법을 주로 사용하고 있다. 실제로 우리나라의 기상청은 매년 상반기와 하반기 두 차례씩 대국민 기상서비스 만족도 조사를 실시하고 있다. 해당 조사에서는 7점 리커트 스케일을 적용하여 '강수예보 서비스에 대해 만족하십니까?'와 같은 단편적인 질문의 응답을 만족도로 파악하고 있다[7]. 그러나, 이와 같은 방법은 응답자의 주관적 판단과 과거 6개월간의 평균적인 의견이기 보다는 비교적 최근의 경험이나 예보 오류로 인해 큰 피해를 본 경험들이 판단의 더 큰 비중을 차지할 개연성이 높기 때문에 만족도 점수를 그대로 받아들이기 어려운 실정이다. 실제 사례로서 기상청에서 조사한 2011년 상반기 국민 만족도 점수는 81.5점에서 2013년 하반기 만족도 점수 68.7점까지 기상서비스의 국민 만족도는 하락추세를 보였다. 그런데, 서울지역 강수예보의 정확도는 2011년 84.4%에서 2012년 88.2%로 오히려 약 4% 상승하였다[7]. 이는 예보 사용자 만족도 조사 결과와 예보정확도가 반드시 양의 상관관계를 가지는 것은 아님을 보여주는 사례로서 예보정확도를 향상시키는 것만이 예보서비스의 만족도를 제고시키는 유일한 방법은 아니라는 것을 시사한다.

이에 따라 기상예보가 제공하는 사용자 편의의 가치를 정량화하는 방법으로써 만족도 조사가 아닌 다른 방법론의 필요성이 꾸준히 제기되고 있다[7]. 이에 대한 한 가지 방법론으로서 앞서 기상예보 가치의 첫 번째 유형, 즉 실제 금전적인 가치를 산출하는데 사용되었던 이익-손실 모형을 통한 가치스코어 산출 방법론을 수정하는 연구가 진행되었다[5, 7, 11]. 해당 연구들은 기상예보의 정확도에 따른 이익 및 손실금액 대신 사용자의 효용(Utility)을 나타내는 수정된 이익-손실 모형을 도입함으로써 금전적 경제적 가치가 아닌 효용으로 표현되는 사용자 만족

도 가치를 가치스코어 수치로 산출하는 방법을 사용하였다. 이러한 방법은 Miss와 False Alarm에 대한 불만족을 각각 다른 효용 파라미터로 설정할 수 있어 각 효용 파라미터의 조합으로 표현되는 예보 사용자의 성향을 반영한 만족도 수치를 산출할 수 있는 장점을 지닌다. 그러나, 이와 같은 이익-손실 모형에 기반을 둔 사용자 만족도 정량화 방법은 개개인의 만족도는 성향에 따라 도출할 수 있지만, 다양한 성향을 가지고 있는 대중들 전체의 만족도를 반영하지 않고 있다. 따라서, 본 연구에서는 개인이 아닌 대중들의 예보 만족도를 정량화하는 방법으로서 개인 만족도를 반영하는 기존의 가치스코어 모형을 수정 보완한 그룹 가치스코어 모형을 제안하고자 한다. 이를 위해 다양한 종류의 기상현상을 예측하는 기상예보들 중에서 강수확률을 제공하는 확률예보 방식의 강수예보 서비스에 대한 국민의 만족도를 도출하는 문제를 연구범위로 설정하였다. 본 연구에서는 개인의 성향으로서 제공된 강수확률이 얼마 이상 이 되어야 다음날 비가 온다고 판단하게 되는지 그 임계값(threshold)이 각 개인마다 다르다고 가정하였다. 따라서, 그룹 차원에서 보면 임계값에 대한 확률분포가 정의될 수 있으며, 확률분포의 성격에 따라 그룹의 성향이 정의되고 해당 그룹의 만족도가 산출되는 방법을 적용하였다. 이와 관련해서 제 2장에서는 강수예보와 관련된 의사결정 상황을 유명한 소풍 시나리오를 통해 문제 정의를 하고, 제 3장에서는 본 연구에서 제안하는 그룹 가치스코어 산출 모형에 대해 설명한다. 제 4장에서는 여러 가지 사용자 그룹 특성 및 예보 특성에 따른 만족도 수치를 분석하여 사용자 그룹 특성에 따라 만족도를 높일 수 있는 가장 적합한 예보 특성을 제안하였다.

2. 문제정의

2.1 소풍 시나리오(Picnic Scenario)

본 연구에서는 일반 사용자들이 실생활에서 기상예보의 만족 또는 불만족을 느끼는 대표적인 문제로

서 Morss et al.[12]가 제안한 소풍 시나리오를 가정한다. 소풍 시나리오란 다음날 야외 소풍을 계획한 사람이 기상예보의 강수확률이 몇 %일 때 야외 소풍을 취소하고 실내 활동으로 대체하게 되는지를 개인별로 질의하는 강수확률예보의 사용자 임계값 관련 설문조사[12]에서 명명되었다.

해당 설문조사에서는 강수확률로서 0%에서 100%까지 10% 단위로 구분하여 총 11개 강수확률 중 하나를 선택하도록 하였다. 그 결과 전체 응답자 중 약 22.2%가 임계값 50%를 가장 많이 선택하였으며, 평균 임계값 역시 52%로 산출되었으며 표준편차는 18.8%로 나타났다. 즉, 다수의 일반인들은 강수확률이 50%로 예보되었을 경우 실제 비가 올 것이라고 판단한다는 것이다.

2.2 효용 파라미터 기반 2×2 분할표

소풍 시나리오에 대한 기상예보 사용자의 만족도는 효용(Utility)으로 나타낸다고 가정하면 <표 1>과 같이 4가지 상황에 대해 기상예보 사용자의 효용을 생각할 수 있다.

<표 1> 2×2 분할표

		의사결정	
		실내 활동	야외 소풍
실제 강수 유무	강수 유	Hit (1)	Miss (-A)
	강수 무	False Alarm (-B)	Correct Rejection (0)

예보 사용자는 주어진 강수확률 정보로부터 다음날 강수여부를 판단하여 예정대로 야외 소풍을 갈지 실내 활동으로 대체할지를 결정한다. 이때 사용자 고유의 임계값을 기준으로 강수확률이 본인의 임계값보다 크면 비가 올 것으로 판단하고 반대로 강수확률이 임계값보다 작으면 비가 오지 않을 것으로 판단하게 된다.

의사결정의 결과는 다음날 실제 강수유무와 의사결정의 조합에 따라 4가지 상황을 가정할 수 있다.

이때 각 상황에 따라 사용자 만족도 즉, 효용은 두 가지 만족되는 상황에 대해서 야외 소풍을 가고 당일 비가 오지 않은 경우를 0으로 하고, 실내 활동을 결정하고 당일 비가 온 경우는 1로 설정한다. 반면에 두 가지 오류 즉, 비가 오지 않을 것으로 판단하고 야외 소풍을 떠났는데 비가 오는 경우(Miss)와 비가 올 것으로 예상하고 실내 활동으로 대체하였는데 비가 오지 않을 경우에 대한 사용자 효용은 $-A(A > 1)$ 와 $-B(B > 1)$ 로 가정한다. 이는 예측 오류로 인한 불만족도를 정확한 예측에 의해 비가 오는 날 실내 활동을 함으로써 얻게 되는 만족도 1에 비해 상대적으로 어느 정도인지를 나타낸다. 예를 들어 $A = 2$ 라고 하면 야외 소풍 도중 비가 오는 경우의 불만족도는 실내 활동으로 대체되었을 때의 만족도보다 두 배의 강도로 불만족스럽다는 것을 의미한다.

3. 그룹 가치스코어 모형 분석

3.1 2×2 분할표 발생확률

<표 1>의 네 가지 상황에 대한 효용을 나타낸 2×2 분할표에서 각 상황에 대한 발생비율, 즉 발생확률($p_{11}, p_{01}, p_{10}, p_{00}$)은 주어진 강수확률예보(f_i)와 의사결정자의 임계값(p_t)에 의해 결정된다. 다음날 비가 올 것으로 예측하고 실내 활동을 결정하였는데 실제 비가 올 상황이 발생한 비율(p_{11})은 주어진 강수확률예보가 사용자 임계값보다 큰 경우에 해당하는 모든 결합확률 $p(f_i, o_1)$ 을 합산하여 산출할 수 있다. 단, o_1 은 실제 비가 온 사건을 나타내며, o_0 은 실제 비가 오지 않은 사건을 의미한다. 이와 반대로 다음날 비가 내리지 않을 것으로 예상하였으나 실제 비가 온 상황의 발생비율(p_{01})은 강수확률예보의 값이 임계값 이하인 경우에 해당하는 모든 결합확률 $p(f_i, o_1)$ 을 합산한 값이다. 이와 유사한 방식으로 다음날 비가 내릴 것으로 예측하였으나 실제 비가 오지 않은 비율(p_{10})은 강수확률예보 값이 임계값보다 큰 경우의 모든 결합확률 $p(f_i, o_0)$ 을 합산한 수치와 같다. 마지

막으로 p_{00} 즉, 다음날 비가 오지 않을 것으로 예측하였고 실제로도 비가 오지 않은 경우의 발생비율은 강수확률예보 값이 임계값 이하인 경우의 모든 결합확률 $p(f_i, o_0)$ 을 합산하여 얻을 수 있다.

<표 2> 2×2 분할표 발생확률

		의사결정	
		실내 활동	야외 소풍
실제 강수 유무	강수 유	$p_{11} = \sum_{f_i \geq p_t} P(f_i, o_1)$	$p_{01} = \sum_{f_i < p_t} P(f_i, o_1)$
	강수 무	$p_{10} = \sum_{f_i \geq p_t} P(f_i, o_0)$	$p_{00} = \sum_{f_i < p_t} P(f_i, o_0)$

3.2 강수예보의 개인 사용자 기대효용

임계값 p_t 를 갖고 있는 한 사용자가 강수확률예보를 활용함으로써 얻을 수 있는 기대효용은 <표 1>과 <표 2>의 네 가지 상황에 대한 효용 및 발생비율로부터 아래 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$E_f = p_{11} - Ap_{01} - Bp_{10} \tag{1}$$

식 (1)은 <표 2>의 결합확률을 사용하여 아래 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_f = \sum_{f_i \geq p_t} P(f_i, o_1) - A \sum_{f_i < p_t} P(f_i, o_1) - B \sum_{f_i \geq p_t} P(f_i, o_0) \tag{2}$$

식 (2)에서 보듯이 예보사용자의 기대효용은 강수확률(f_i)과 실제 강수결과(o_j)의 결합확률 $p(f_i, o_j)$ 에 의해 결정됨을 알 수 있다[16, 18]. 본 연구에서는 강수확률 f_i 는 $f_0 = 0\%$ 부터 $f_{10} = 100\%$ 까지 10% 단위로 제공되며 실제 강수결과 o_j 는 비가 관측되는 사건을 o_1 , 실제 비가 관측되지 않은 사건을 o_0 로 가정한다. 제공되는 강수확률예보가 10% 단위로 가정한 것은 실제 기상청에서 제공하는 강수확률이 10% 단위이며 Wilks[18] 또한 10% 단위의 간단한 수리적 모형으로도 기상예보의 정량적 가치를 분석하는데 충분하다는 것을 보인 바 있음을 근거로 하였다. 따라서,

10% 단위의 강수확률을 가정한다면 식 (2)는 아래 식 (3)과 같이 표시할 수 있다. 단, D 는 사용자의 임계값 p_t 보다 크거나 같은 강수확률 중 가장 작은 강수확률의 첨자를 나타낸다. 즉, $D = \operatorname{argmin}_i (f_i \geq p_t)$ 로 나타낼 수 있다.

$$E_f = \sum_{i=D}^{10} P(f_i, o_1) - A \sum_{i=0}^{D-1} P(f_i, o_1) - B \sum_{i=D}^{10} P(f_i, o_0) \quad (3)$$

식 (3)으로부터 한 사용자에 대한 강수확률예보의 기대 효용가치는 세 가지 요인에 의해 결정됨을 알 수 있다. 첫 번째 결정요인은 예보 사용자 고유의 임계값 p_t 또는 해당 임계값에 의해 결정되는 인덱스 D 이다. 두 번째는 예보 사용자 고유의 만족 및 불만족도 성향을 나타내는 두 가지 파라미터 A 와 B 의 값이다. 마지막 결정요인은 강수확률예보의 정확도 특성을 나타내는 결합확률분포 $p(f_i, o_j)$ 이다. 따라서, 본 연구에서는 각각의 세 가지 결정요인에 따라 기상예보의 총 기대효용 값이 어떻게 달라지는지 제 4장에서 분석하고자 한다. 특히, 임계값 설정에 따라 예보의 정확도가 가장 크게 영향을 받으므로 첫 번째 결정요인인 임계값의 설정이 가장 중요한데[5], 이는 개인 사용자뿐만 아니라 전체 사용자 그룹의 기대효용의 총합에도 가장 중요한 요소로 작용할 것으로 예상된다.

이와 같은 사용자 총 기대효용은 기상예보 활용 시나리오에 따라 서로 다른 척도를 가지게 될 것이므로 표준화하는 작업이 필요하다. 이를 위해 다음 절에서 기후학적 레퍼런스 기대효용, 완전정보에 의한 기대효용 및 개인 및 그룹 가치스코어 개념을 다루도록 하겠다.

3.3. 기후학적 레퍼런스 기대효용

만약 강수예보가 제공되지 않는 상황을 가정한다면 2×2 분할표 상황에서의 의사결정자는 두 가지 중 하나를 무조건 선택해야 한다. 즉, 항상 실내 활동을 하거나 항상 야외 소풍 중 하나를 선택하는 것이다 [17]. 하지만, 이 경우에도 의사결정자는 과거 경험이

나 기상자료에 의해 얻을 수 있는 강수 발생 빈도, 즉 기후학적 발생빈도를 활용하여 최고의 효용을 얻을 수 있는 의사결정을 할 것이다[17, 18]. 그러므로 아래 식 (4)와 같이 실내 활동 및 야외 소풍 두 가지 선택사항에 대해 기후학적 발생빈도 π 를 활용한 기대효용을 구해서 그 중 최대의 기대효용(E_d)을 얻을 수 있는 의사결정을 할 것이다.

$$E_d = \max(\pi - (1-\pi)B, -\pi A) \quad (4)$$

식 (4)에서 항상 실내 활동을 선택한다고 가정한다면 <표 1>에서 보듯이 강수가 왔을 때 강수 발생빈도 π 에 대해 효용은 1이고 비가 오지 않을 발생빈도 $1-\pi$ 에 대해 효용은 $-B$ 이므로 기대효용은 $\pi - (1-\pi)B$ 으로 계산된다. 마찬가지로 항상 야외 소풍을 선택한다고 가정하였을 때 기대효용은 $-\pi A$ 가 될 것이다. 위 두 선택에 대한 기대효용 중 최대가 되는 것을 기후학적 레퍼런스 기대효용(climatological reference expected utility)이라고 하고, 아래 식 (5)와 같이 변환할 수 있다.

$$E_d = \begin{cases} -\pi A & , \pi < \frac{B}{A+B+1} \text{ 일때} \\ \pi - (1-\pi)B, & \text{그밖의 경우} \end{cases} \quad (5)$$

따라서, 기상예보 없이 강수에 대한 과거의 경험이나 기상자료에 의한 기후학적 발생빈도에 의해서만 의사결정이 이루어질 경우, 강수의 기후학적 발생빈도가 $B/(A+B+1)$ 보다 작은 경우는 항상 야외 소풍을 선택하고 그 밖의 경우에는 항상 실내 활동을 선택하는 것이 최선의 의사결정임을 알 수 있다.

3.4. 정확한 강수예보의 기대효용

의사결정자가 항상 100% 정확도를 지닌 강수예보를 제공받을 수 있는 상황을 가정한다면 의사결정자는 항상 강수예보를 믿고 가장 효용을 높일 수 있는 선택을 할 것이다. 의사결정자가 π 의 빈도로 강수가 발생할거라는 기상예보를 제공받는다면, 이 경우 실내 활동을 선택할 것이므로 효용 1을 얻을 수 있다. 반대로 강수가 발생하지 않을 것이라고 예보되는 경

우는 $1-\pi$ 의 빈도로 발생할 것이고, 이 때 의사결정자는 야의 소풍을 선택할 것이므로 0의 효용을 얻게 된다. 따라서, 완벽한 강수예보에 의해 얻을 수 있는 기대효용 E_p 는 아래 식 (6)과 같이 도출된다.

$$E_p = \pi \cdot 1 + (1-\pi) \cdot 0 = \pi \quad (6)$$

3.5 개인 사용자 가치 스코어(Value Score, VS)

강수예보의 기대효용 가치는 예보 사용자가 예보를 활용함으로써 기대할 수 있는 부가적인 이익, 즉 강수예보의 활용을 통한 기대효용과 기본적인 기후학적 발생빈도 정보에 의한 기대효용(기후학적 레퍼런스 기대효용) 간의 차이 $E_f - E_{cl}$ 으로 나타낼 수 있다. 그러나, 단순한 기대효용의 차이만으로는 각 활용 시나리오 및 사용자의 개인성향에 따라 크기의 차이가 존재하므로 강수예보의 효용가치를 분석하기에는 적합하지 않다. 따라서, 기상예보가치의 보편적 활용을 위해 기존 연구들[3, 5, 17, 18]에서 가치스코어라는 개념을 도입한 바 있다. 가치스코어 VS는 전술했던 강수예보에 의한 기대효용과 기후학적 레퍼런스 효용 간의 차이 $E_f - E_{cl}$ 이 정확한 예보에 의한 기대효용과 역시 기후학적 레퍼런스 효용간의 차이 $E_p - E_{cl}$ 에 비해 상대적으로 얼마만큼의 비율을 차지하는지를 표현한 것으로서 아래 식 (7)과 같이 정의된다. 즉, 가치스코어란 100% 정확한 정보가 아닌 현실적 강수예보가 완벽하게 정확한 이상적 강수예보에 얼마나 가까이 접근해 있는지를 그 상대적 비율을 통해 나타낸 것이라고 해석할 수 있다.

$$VS = \frac{E_f - E_{cl}}{E_p - E_{cl}} \quad (7)$$

식 (7)로부터 강수예보의 이론적 가치스코어 VS는 사용자가 사용하는 불확실한 강수예보의 기대효용이 기후학적 발생빈도의 기대효용과 동일할 경우 0의 값을 갖고, 100% 정확한 강수예보의 기대효용과 동일할 경우 1의 값을 가질 수 있다. 또한, 가치스코어 값은 음의 값을 가질 수도 있게 되는데, 이는 강수예보의 정확도가 매우 낮아 얻을 수 있는 기대효용이 기후학

적 레퍼런스 기대효용보다 작을 경우 발생한다. 즉, 음의 가치스코어 값은 강수예보가 예보사용자에게 가치 있는 정보를 제공하기에 불충분한 정확도를 갖고 있다는 것을 의미하고, 이 경우 최적의 선택은 식 (5)에 의한 기후학적 발생빈도 자료를 활용하는 것이다 [17].

3.6 그룹 사용자 가치 스코어(Collective Value Score, CVS)

앞선 제 3.2절에서 언급한 바와 같이 강수예보의 활용을 통한 개인 사용자의 기대효용은 개인의 고유한 의사결정 기준 즉, 임계값에 의해 많은 영향을 받는다. 또한, 식 (2)와 식 (3)에 의한 기대효용은 특정 임계값 p_i 를 가진 개인 사용자 1인에 해당하는 기대효용을 나타낸다. 따라서, 강수예보의 전체 사용자에 대한 기대효용의 총합을 산출하기 위해서는 전체 사용자들이 가지고 있는 임계값들의 분포를 반영해야 한다. 제 3.2절에서와 같이 강수확률예보 f_i 를 $f_0 = 0\%$ 부터 $f_{10} = 100\%$ 까지 10% 단위로 설정하였듯이, 임계값 역시 $p_i^0 = 0\%$ 에서 $p_i^{10} = 100\%$ 까지 10% 단위로 설정한다면 각 임계값 $p_i^k (k=0, 1, \dots, 10)$ 을 갖는 개인 사용자의 기대효용 E_f^k 은 아래 식 (8)과 같이 정의할 수 있다.

$$E_f^k = \sum_{i=D^k}^{10} P(f_i, o_1) - A \sum_{i=0}^{D^k-1} P(f_i, o_1) - B \sum_{i=D^k}^{10} P(f_i, o_0) \quad (8)$$

단, $D^k = \text{argmin}_i (f_i \geq p_i^k)$

전체 사용자들 중 임계값 p_i^k 를 갖는 개인 사용자의 상대적 비율을 $r(p_i^k)$ 라고 하면, $\sum_{k=0}^{10} r(p_i^k) = 1$ 이 성립하고 기대효용 E_f^k 를 갖는 사용자의 상대적 비율 역시 $r(p_i^k)$ 일 것이다. 따라서, 전체 사용자 그룹의 강수예보에 대한 평균 기대가치 \bar{E}_f 는 아래 식 (9)와 같다.

$$\bar{E}_f = \sum_{k=0}^{10} E_f^k r(p_i^k) \quad (9)$$

그러므로, 다양한 임계값을 갖는 개인 사용자들의 그룹 가치스코어는 개인 가치스코어를 나타내는 식 (7)에서 E_j 대신 식 (9)의 그룹 사용자들의 강수예보에 대한 평균 기대가치 \bar{E}_j 로 대체함으로써 아래 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$CVS = \frac{\bar{E}_j - E_d}{E_p - E_d} \quad (10)$$

4. 가상데이터 분석

제 3.2절의 식 (3)에서 보는 바와 같이 강수예보의 기대가치는 임계값, 사용자의 주관적 효용 및 결합 확률분포에 의해 결정된다. 따라서, 본 연구에서는 강수예보의 그룹 가치스코어를 분석함에 있어서 위 세 가지 결정요인들의 조합에 따라 그룹 가치스코어가 어떻게 달라지는지를 확인하고자 한다. 이를 위해 사용자들이 가지고 있는 임계값의 상대비율분포 및 강수확률예보의 특성을 반영한 결합확률분포를 가상적으로 산출하여 사용자의 주관적 효용 A와 B의 조합에 따라 그룹 가치스코어 값을 비교 분석하였다.

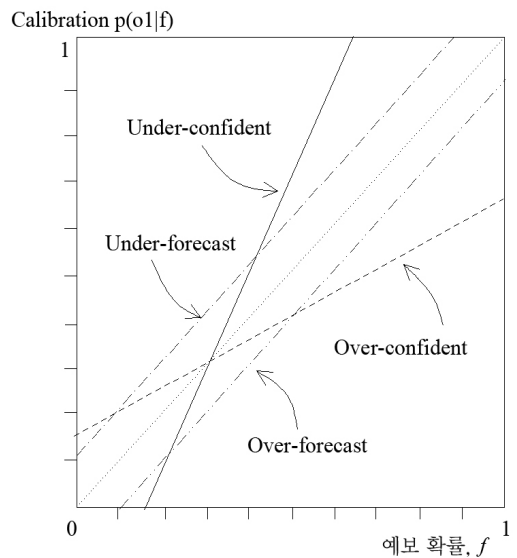
4.1 임계값의 상대비율분포

본 연구에서는 Morss et al.[12]가 수행한 강수확률예보의 사용자 임계값 관련 설문조사의 결과로부터 평균 50%, 표준편차 18.8%인 정규분포를 임계값의 상대비율분포로 가정하여 분석을 시작하기로 한다. 이후 평균을 10%, 20%, ..., 90%로 변경해 가면서 각 임계값 평균에 의해 결정된 임계값들의 상대비율분포가 그룹 가치스코어에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

4.2 이론적 결합확률분포

식 (8)에서 강수확률과 실제 강수여부 간의 결합확률분포 $p(f_i, o_j)$ 는 조건부 확률분포(conditional dis-

tribution) 및 주변 확률분포(marginal distribution)의 곱 $p(f_i, o_j) = p(o_j|f_i)p(f_i)$ 으로 표현할 수 있다[3, 11, 16-18]. 본 연구에서는 조건부 확률분포 및 주변 확률분포에 대해 기상예보의 특성을 반영하기 위해 과거 관련연구들[3, 11, 16-18]에서 이론적으로 활용했던 교정함수(calibration function) 및 정제분포(refinement distribution)를 그대로 적용하여 결합분포를 계산하였다.



〈그림 1〉 네 가지 강수확률예보의 교정함수

〈그림 1〉는 강수확률예보 특성을 반영한 대표적인 교정함수 $p(o_i|f_i)$ 의 네 가지 형태를 나타내고 있으며, 정확한 확률예보의 패턴은 가는 점선으로 표시되어 있다. 대부분의 강수확률예보로서 under-confident 유형의 강수예보가 주로 사용되는데, 강수사건의 기후학적 발생빈도 π 를 기준으로 하여 예보확률 f 가 π 보다 작은 구간에서는 실제 발생확률보다 높은 강수확률로 예보하고, π 보다 큰 구간에서는 실제 발생확률보다 낮은 강수확률을 제시하는 것이다. Over-confident 예보는 π 를 기준으로 under-confident와 정반대의 패턴으로 강수확률을 제시하는 유형이다. 그 밖에 under-forecast는 모든 확률구간에서 실제 강수 발생확률보다 낮은 강

수확률을 제공하는 것이고, over-forecast는 정반대로 실제 발생확률보다 높은 강수확률로 예보하는 형태이다. <표 3>에서 본 연구에서 사용한 위 네 형태의 교정함수 공식 및 기후학적 발생빈도 π 가 제시되어 있다.

<표 3> 교정함수의 특성

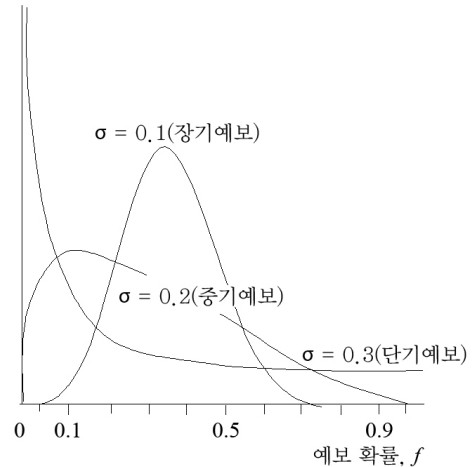
교정함수	함수식	기후학적 발생빈도(π)
Under-confident	$p(o_1 f_i) = 2f_i - \pi$	0.3
Over-confident	$p(o_1 f_i) = (f_i + \pi)/2$	0.3
Under-forecast	$p(o_1 f_i) = f_i + o_1$	0.4
Over-forecast	$p(o_1 f_i) = f_i - o_1$	0.2

강수확률예보에 대한 정제분포 $p(f_i)$ 는 아래 식 (11)과 같이 베타 분포(beta distribution)를 사용해서 표현한다[18].

$$p(f) = \frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} f^{\alpha-1} (1-f)^{\beta-1} \quad (11)$$

식 (11)에서 두 개의 분포 파라미터 α 와 β 는 양의 실수이며 Γ 는 감마 함수(gamma function)를 나타낸다. <그림 2>는 평균(μ) 0.3일 때, 표준편차(σ) 0.1, 0.2 및 0.3의 값을 가지는 세 개의 베타 분포를 나타내고 있다. 표준편차 0.1에 대한 그래프 형태는 월간예보 같은 장기예보의 특징과 흡사한 패턴으로 볼 수 있는데[18], 과거 기후학적 발생빈도에 해당하는 평균값 주변에 분포가 형성되어 있어서 정보량이 크지 않다. 이와 반대로 표준편차 0.3의 그래프는 평균을 중심으로 넓고 비교적 고르게 분포한다는 점에서 1~2일 정도의 단기예보의 패턴을 보인다고 판단할 수 있다[3, 11, 14]. 마지막으로 표준편차 0.2의 그래프는 위 두 장단기예보 패턴의 중간 정도에 해당하므로 중기예보, 즉 주간예보로 간주할 수 있다[3]. 다만 본 연구에서는 다음날 강수여부를 예측하는 소풍 시나리오에 적합한 단기예보에 해당하는 정제분포를 사용하여 분석하였다.

Probability Density



<그림 2> 정제분포($\mu=0.3, \sigma=0.1, 0.2, 0.3$)

4.3 분석 결과

본 연구에서는 단기예보를 나타내는 평균 0.3 및 표준편차 0.3의 베타분포인 정제분포를 사용하고 네 가지 형태의 교정함수에 따른 예보종류에 따라 가상의 강수확률예보에 대한 결합확률분포를 산출하였다. 이를 통해 소풍 시나리오에 대한 강수예보의 두 가지 형태의 오류인 Miss 및 False Alarm에 대한 불만족도를 나타내는 (A, B)의 크기와 예보 사용자들의 주관적 임계값의 분포에 따라 네 가지 교정함수 형태의 단기 강수예보에 대한 전체 예보 사용자들의 그룹 가치스코어를 계산하였다.

<그림 3>은 네 가지 교정함수에 의한 강수확률예보 형태에 각각에 대해 (A, B) 조합에 따른 그룹 가치스코어의 계산결과를 도식화한 것이다. (A, B) 조합은 (1, 1), (3, 3), (1, 3) 및 (3, 1)의 네 가지 조합을 가정하였다. 이는 두 가지 예보오류 형태에 대한 불만족도가 <표 1>의 Hit일 때의 만족도 기준인 1과 동일하거나 3배의 불만족을 나타내는 경우를 반영하고자 하였다. 3배를 설정한 이유는 기준 1에 비해 뚜렷한 패턴의 대비를 확보하기 위함이며 2배는 1과 2 사이의 패턴을 보이는 것으로 해석하면 무리가 없다는 것은 기존 연구[5]를 통해 증명되었다. <그림 3>의 2차원 그래프에서 가로축은 예보 사용자 그룹의

임계값 평균을 나타내고 세로축은 그룹 가치스코어 CVS의 값을 의미한다. CVS 값이 0보다 크면 해당 강수예보를 사용하여 소풍 시나리오의 의사결정을 하는 것이 사용자 효용을 높이는 효과적인 방법이라는 것을 의미한다. 반대로 CVS 값이 음수인 경우는 해당 강수예보의 수행도가 낮아서 기후학적 레퍼런스로써 과거의 평균적인 강수빈도를 활용하는 것이 더 유리하다고 해석할 수 있다.

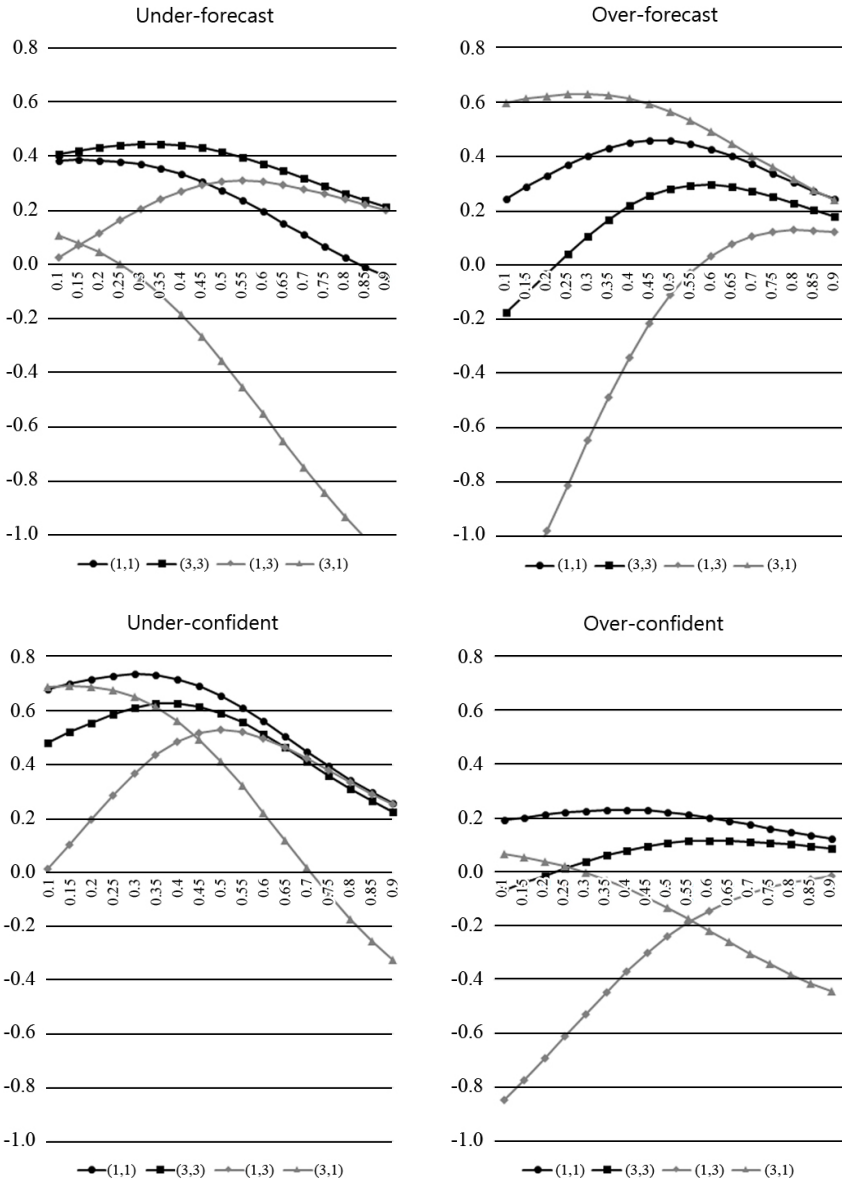
Under-confident와 Over-confident 유형의 강수 확률예보의 경우 Miss 및 False Alarm 오류에 대한 불만족도 조합 (A, B)의 값이 (1, 1)인 경우 즉, 불만족도가 Hit에 의한 만족도의 크기와 동일한 사용자 그룹에서 가장 높은 CVS 값을 나타냈다. 두 가지 오류에 모두에 대해 불만족도가 높은 (3, 3)의 사용자 그룹의 CVS 값은 당연히 (1, 1)에 비해 낮았다.

특이한 것은 (3, 3)에 비해 Miss에 대한 불만족도가 낮은 (1, 3)조합의 사용자 그룹의 CVS 값이 (3, 3) 그룹에 비해 오히려 낮다는 것이다. 이는 CVS 산출식의 특성상 (A, B)의 조합에 따라 식 (5)의 E_d 의 값이 상이하기 때문에 발생하는 현상이다. 어쨌든 예보에 의한 기대효용은 당연히 (1, 3)의 사용자가 (3, 3)보다 큰 것은 사실이지만 완전한 예보와 기후학적 레퍼런스 발생빈도에 의한 기대효용과의 상대적 크기로 보면 under-confident와 over-confident 유형의 예보가 (1, 3)의 불만족 패턴을 가지고 있는 사용자 그룹에게는 (3, 3)의 사용자 그룹보다 기후학적 레퍼런스 발생빈도를 의사결정에 활용하는 것에 비해 상대적으로 높은 효용을 부가하지 못한다는 의미이다.

Under-confident와 over-confident 예보에서 Miss와 False Alarm 오류에 대한 사용자 불만족도 조합이 서로 다른 (1, 3)과 (3, 1)을 비교해 보면 평균 임계값이 작은 구간의 사용자 그룹에서는 (3, 1)의 사용자 그룹의 CVS가 상대적으로 높고 평균 임계값이 큰 구간에서는 (1, 3)의 CVS 값이 더 높은 것으로 나타났다. 이는 임계값의 특성상 의사결정시 낮은 임계값을 사용하면 Miss할 가능성이 낮아지고 높은 임계값을 사용하면 False Alarm 오류의 가능성이 낮아지는 사실에서 타당한 결과로 받아들일 수 있다.

Under-forecast와 Over-forecast 유형의 예보에 대한 CVS값의 패턴은 서로 상이한 결과를 나타내는데, 이는 두 예보의 서로 반대되는 특성에 기인한다. 즉, under-forecast 예보는 실제 강수확률보다 낮은 확률예보를 제공하는 것이고 over-forecast는 반대로 실제 강수확률보다 높은 확률로 예보하는 경우이다. 따라서, under-forecast 예보를 사용하면 Miss할 빈도수는 많아지고 False Alarm 오류를 범할 가능성은 낮아지므로 <그림 3>의 세 번째 그래프와 같이 False Alarm 대비 Miss의 불만족도가 높은 (3, 1)의 사용자 그룹이 반대의 불만족도 패턴을 지닌 (1, 3)의 사용자 그룹보다 높은 CVS 값을 갖게 된다. 이와 반대로 over-forecast 예보에서는 (1, 3)의 불만족도 패턴을 지닌 사용자 그룹의 CVS가 더 높게 나타난다. 이와 비슷하게 (1, 1)과 (3, 3)의 불만족도 패턴을 보이는 사용자 그룹을 비교해 보면 under-forecast 예보는 (3, 3) 그룹이 (1, 1) 그룹보다 더 높은 CVS 값을 보이고 over-forecast에서는 이와 반대인 것을 알 수 있다.

<표 4>는 네 가지 예보유형 및 (A, B) 조합별로 사용자 그룹의 평균 임계값에 따라 산출된 CVS 값들 중 최대 CVS 값과 함께 해당 평균 임계값을 요약한 것이다. 네 가지 예보유형 중 under-confident 예보가 모든 (A, B) 조합에서 최대 CVS를 가지는 것을 알 수 있다. 즉, (A, B) 조합으로 나타나는 다양한 불만족도 패턴을 가지는 사용자 그룹의 유형에 상관없이 under-confident 예보가 다른 세 가지 예보 유형들보다 가장 큰 CVS값을 생산해 낼 수 있다는 것을 의미한다. 다만 최대 CVS값을 산출하기 위한 최적 임계값 평균이 (A, B) 조합에 따라 달라진다는 점에서 under-confident 예보가 모든 경우에서 항상 수행도가 높다고 주장하기는 어렵다고 판단된다. 하지만, (A, B) 조합에 따른 최적 임계값의 패턴을 분석할 수 있다면 각 사용자 그룹의 불만족도 특성에 따라 under-confident 예보를 활용함에 있어 최적의 임계값을 적용함으로써 전체 사용자 그룹의 만족도를 극대화하는 것도 가능하다는 시사점을 가진다고 할 수 있다.



〈그림 3〉 네 가지 교정함수 및 (A, B) 조합에 따른 그룹 가치스코어

〈표 4〉 네 가지 교정함수 및 (A, B) 조합에 따른 그룹 가치스코어의 최대값

(A, B)	Under-confident		Over-confident		Under-forecast		Over-forecast	
	최대 CVS	임계값	최대 CVS	임계값	최대 CVS	임계값	최대 CVS	임계값
(1, 1)	0.74*	30%	0.23	40%	0.39	15%	0.46	45%
(3, 3)	0.63*	40%	0.12	60%	0.45	35%	0.29	60%
(1, 3)	0.53*	50%	-0.01	90%	0.31	55%	0.13	80%
(3, 1)	0.69*	15%	0.07	10%	0.11	10%	0.63	30%

5. 결 론

우리나라의 경우 기상예보는 민간예보사업자 보다는 국립 기상청이 주로 제공하는 공공재적 성격이 매우 짙은 정보형태의 무형재화이다. 따라서, 기상예보의 무형의 공공재적 특성이라는 이유로 인해 우리나라보다는 상대적으로 민간기상산업이 발달한 선진국에서 기상예보의 경제적 가치 분석 연구가 활발히 진행되어 왔다. 그러나, 최근 우리나라도 점차 기상예보 사업을 민간으로 이양하는 추세에 있으며 이에 따라 우리나라에서 제공하는 기상예보의 특성에 맞는 경제적 가치의 정량화 연구에 대한 필요성이 증대되고 있다.

본 연구는 다양한 기상예보들 중 우리나라 국민들이 민감해 하는 대표적인 기상현상인 강수와 관련된 강수확률예보에 대한 전체 국민의 만족도 효용을 정량화하기 위한 수리적 모형을 제시하고 가상으로 산출한 이론적 강수예보에 이를 적용하여 그 결과를 분석하였다.

본 연구에서 제시한 수리적 모형은 그룹 가치스코어 모형으로서 기존의 가치스코어 모형이 개인 사용자의 만족도만을 정량화할 수 있는 한계를 개선하여 다양한 성향의 개인들이 모인 사용자 그룹 전체의 만족도를 반영할 수 있도록 하였다. 강수예보를 의사결정에 활용하는 기준인 임계값이 개인마다 상이한 점을 반영하기 위해 정규분포를 활용함으로써 기상예보에 대한 전체 그룹의 기대가치를 산출하는 방식이다.

제안한 그룹 가치스코어 모형은 소풍 시나리오에 적용하여 그 활용방법의 타당성을 검증하였다. 그룹 사용자의 임계값 분포가 여러 가지 평균을 가진 정규분포라고 가정하여 각각의 평균 임계값에 따라 그룹 가치스코어 값을 산출하고자 하였는데, 이 과정에서 강수예보를 교정함수에 따라 네 가지 유형으로 분류하고 예보의 결과로 인한 사용자의 만족도 패턴을 두 가지 예보오류(Miss, False Alarm)로 인한 불만족도(A, B)의 값에 따라 다양한 경우의 조합에 대한 그룹 가치스코어 값을 계산하고 그 결과를 분석하였다. 분

석결과 여러 불만족도 패턴과 상관없이 네 가지 예보 유형 중 under-confident 방식의 강수확률예보가 항상 가장 높은 그룹 가치스코어 값을 생산하였다. 따라서, 네 가지 유형의 확률예보 중 under-confident 예보가 국민의 만족도를 가장 높일 수 있는 예보 형태라고 유추할 수 있다. 다만, 그룹 가치스코어 값을 최대로 하는 임계값 평균이 사용자 불만족도 패턴에 따라 상이하므로 무작정 under-confident 예보를 사용한다고 만족도가 높아질 수는 없다. 따라서, 불만족도 패턴 조합에 따른 under-confident 예보의 활용가치를 최대화할 수 있는 최적의 임계값 패턴이 어떻게 되는지 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다. 즉, 국민들의 만족-불만족 패턴의 분포조사를 통해 주어진 강수예보 기술수준에서 국민의 만족도를 극대화할 수 있는 강수예보 방식을 선정하고 이에 따른 최적 임계값을 국민들에게 홍보할 수 있는 근거로써 본 연구결과를 활용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이기광, “택주배송게임에서 다구찌 방법에 의한 불확실 정보 기반 의사결정 연구”, 『한국산업경영시스템학회지』, 제33권, 제3호(2010), pp.162-168.
- [2] 이기광, “기상요인이 교통사고 발생에 미치는 영향 분석 : 서울지역을 중심으로”, 『한국산업경영시스템학회지』, 제38권, 제1호(2015), pp.1-7.
- [3] 이기광, 이중우, “가치스코어 모형을 이용한 기상정보의 기업 의사결정에 미치는 영향 평가”, 『한국산업경영시스템학회지』, 제30권, 제2호(2007), pp.89-98.
- [4] 이중우, 고광근, 권태순, 이기광, “국내 항공운항에서 기상현상이 결항 및 지연에 미치는 영향 분석”, 『한국항공운항학회지』, 제19권, 제1호(2011), pp.29-37.
- [5] 이중우, 이기광, “레저산업의 고객관계관리 문제에서 기상예보의 정보가치를 최대화시키는 의사결정전략 분석”, 『경영과학』, 제27권, 제1호(2010), pp.33-43.

- [6] 한창희, 이증우, 이기광, "전력 수요 예측 관련 의사결정에 있어서 기온예보의 정보 가치 분석", 『경영과학』, 제26권, 제1호(2009), pp.77-91.
- [7] 김인겸, 안숙희, 이승욱, 박기준, 김정윤, 김백조, 이기광, "강수확률예보 만족도 제고를 위한 정책 방안 : 2004~2013년 서울과 부산을 중심으로", 『기후연구』, 제9권, 제3호(2014), pp.243-255.
- [8] Epstein, E.S. and A.H. Murphy, "Use and value of multiple-period forecasts in a dynamic model of the cost-loss ratio situation," *Monthly Weather Review*, Vol.116(1988), pp.46-761.
- [9] Katz, R.W., "Dynamic cost-loss ratio decision-making model with an autocorrelated climate variable," *Journal of Climate*, Vol.6(1993), pp. 151-160.
- [10] Kim, I.-G., J.-Y. Kim, B.-J. Kim, and K.-K. Lee, "The collective value of weather probabilistic forecasts according to public threshold distribution patterns", *Meteorological Applications*, Vol.21(2014), pp.795-802.
- [11] Lee, K.-K. and J.-W. Lee, "The economic value of weather forecasts for decision-making problems in the profit/loss situation," *Meteorological Applications*, Vol.14(2007), pp.455-463.
- [12] Morss, R.E., J.K. Lazo, and J.L. Demuth, "Examining the use of weathre forecasts in decision scenarios : results from a US survey with implications for uncertainty communication", *Meteorological Applications*, Vol.17(2010), pp.149-162.
- [13] Murphy, A.H., "The value of climatological, categorical and probabilistic forecasts in the cost-loss situation," *Monthly Weather Review*, Vol. 105(1977), pp.803-816.
- [14] Murphy, A.H., " Decision making and the value of forecasts in a generalized model of the cost-loss ratio situation," *Monthly Weather Review*, Vol.113(1985), pp.362-369.
- [15] Murphy, A.H. and D.S. Wilks, "A case study of the use of statistical models in forecast verification : precipitation probability forecasts," *Weather and Forecasting*, Vol.13(1998), pp.795-810.
- [16] Murphy, A.H. and R.L. Winkler, "A general framework for forecast verification," *Monthly Weather Review*, Vol.115(1987), pp.1330-1338.
- [17] Mylne, K.R., "Decision-making from probability forecasts based on forecast value," *Meteorology Application*, Vol.9(2002), pp.307-315.
- [18] Wilks, D.S., "A skill score based on economic value for probability forecasts," *Meteorology Application*, Vol.8(2001), pp.209-219.