

## 한반도 기후변화시그널 탐지 및 예측

손건태<sup>1</sup> · 이은혜<sup>2</sup> · 이정형<sup>3</sup>

<sup>1</sup>부산대학교 통계학과; <sup>2</sup>부산대학교 통계학과; <sup>3</sup>동아대학교 경영정보과학부

(2008년 7월 접수, 2008년 7월 채택)

### 요약

본 연구는 한반도 지역의 기상기온에서 나타나는 기후변화시그널의 탐지와 예측을 목적으로 하고 있으며, 일본기상청 전지구 수치모델(MRI/JMA CGCM) 모의실험자료인 통계실험자료(대기 중  $CO_2$  농도 변화가 없다는 가정 아래 실험된 자료)와 시나리오실험자료( $CO_2$  농도가 4배까지 연 1%씩 증가하는 가정 아래 실험된 자료)를 사용하였다. 수치모델 자료기간은 142년 자료이며, 관측치로 사용되는 ECMWF 재분석자료는 43년 자료이다. 모든 자료는 42개 격자점으로 이루어진 동일한 공간구조로 구성되었다. 베이지안 지문법과 자기회귀과정인 회귀모형(AUTOREG 모형)을 각각 적용하여 격자점별로 탐지 작업을 수행하였다. 탐지 결과가 유의한 격자점에 대하여 2100년까지 예측 작업을 수행하였다.

주요용어: 기후변화, 기온, MRI/JMA CGCM, AUTOREG 모형, 베이지안 지문법.

### 1. 서론

기후변화에 관한 정부간 협의회의(IPCC) 제 3차 평가보고서 (IPCC TAR, 2001)에 따르면 인간활동에 의한 요인(anthropogenic forcing)과 자연변동성(natural variability)이 기후변화에 영향을 미치고 있다고 결론을 내리고 있다. 인간활동에 의한 요인은 산업화로 화석연료의 사용에 따른 영향을 나타내며, 자연변동성은 화산, 지진, 산불, 해양의 영향 등 국지적인 기후 특성을 반영하고 있다. IPCC 제 4차 평가보고서 (IPCC AR4, 2007)에 따르면, 기후변화가 인간활동에 의한 요인 때문에 발생했을 가능성을 90%로 추산하고 있다. 지구온난화(global warming)는 온실가스(greenhouse gas)들이 대기 중에 잔류하면서 지구에 들어오는 짧은 파장의 태양 복사에너지는 통과시키는 반면 지구로부터 나가려는 긴 파장의 복사에너지는 흡수하여 지구 대기의 온도를 상승시키는 현상이다. 온실가스로는 수증기,  $CO_2$ , 메탄, 아산화질소, 염화불화탄소 등이 있으며, 이 중  $CO_2$ 가 절반 이상을 차지한다.

대기 중  $CO_2$  농도에 대한 그림 1.1을 살펴보면  $CO_2$  농도는 산업혁명이 시작되는 1760년을 기점으로 이전에는  $280 \pm 20$ ppm 범위 안에 있었으나 (Indermühle 등, 1999), 이후 점차 증가하고 있다. 1950년 대부터  $CO_2$  농도의 증가가 뚜렷해지고 있으며, 1999년도에  $CO_2$  농도는 367ppm (Neftel 등, 1985; Etheridge 등, 1996; IPCC, 2001)이었고, 2005년도에는 379ppm까지 빠르게 증가하고 있어,  $CO_2$  농도의 증가로 인한 지구온난화의 영향이 전세계적인 문제가 되고 있다. 우리나라의 경우 그림 1.2에서 보듯이 제주도 고산에서 측정된  $CO_2$  농도가 지속적으로 증가하고 있다. 이는 한반도에서의 기후변화 연구를 위하여  $CO_2$  농도의 영향을 고려해야할 필요성을 제시한다.

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

<sup>1</sup>교신저자: (609-735) 부산 금정구 장전동 산30, 부산대학교 통계학과, 교수. E-mail: ktsohn@pusan.ac.kr

<sup>2</sup>(609-735) 부산 금정구 장전동 산30, 부산대학교 통계학과, 석사과정. E-mail: hera3087@pusan.ac.kr

<sup>3</sup>(604-714) 부산 사하구 하단동, 동아대학교 경영정보과학부, 부교수. E-mail: jeonglee@dau.ac.kr

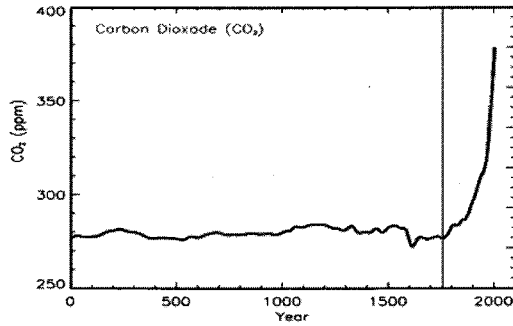


그림 1.1. 전지구  $CO_2$  농도에 대한 시계열 그림 (출처: IPCC AR4, 2007)

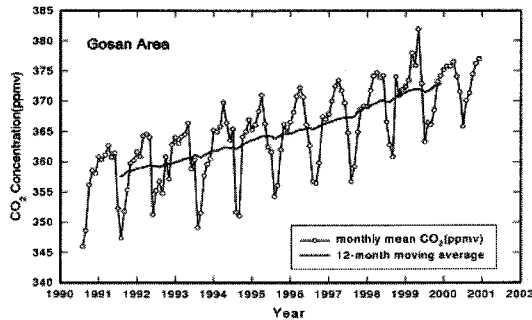


그림 1.2. 제주도 고산에서 측정된  $CO_2$  농도 변화추세 (출처: 국립기상연구소 기후연구실, 2004)

전지구 평균 지상기온은 지표 온도(ground surface temperature)와 해수면 온도(sea surface temperature)의 평균으로 이루어지며 지구 온난화를 설명하는 주요한 기후 변수로서 기후변화 연구에서 많이 사용되고 있다. 지난 50년간의 전지구 평균 지상기온의 변화는  $(0.13 \pm 0.03^\circ\text{C}/10\text{년})$ 로 지난 100년에 걸친 변화  $(0.07 \pm 0.02^\circ\text{C}/10\text{년})$ 와 비교할 때 거의 두 배가 된다 (Brohan 등, 2006; Smith와 Reynolds, 2004; Hansen 등, 2001; IPCC, 2007).

기후변화의 현황과 전망 (국가과학기술자문회의, 2007)에 따르면 현재까지 한반도 기온의 변화는 1900년 이후 평균 기온이  $1.5^\circ\text{C}$  상승하였고, 최근 10년(1996년~2005년) 동안 평균 기온은  $14.1^\circ\text{C}$ 로 평년(1971년~2000년)보다  $0.6^\circ\text{C}$  상승하였으며, 열대야( $25^\circ\text{C}$  이상) 일수도 증가하고 있다. 이와 같이 급변하는 기후변화는 이상기후 현상을 야기시켜, 국지적 특성에 따라 식량생산, 수자원 공급, 건강, 생태계, 사회 경제적 분야 등 모든 분야에 심각한 피해를 줄 것이라 예상된다. 따라서 기상변화에 의한 피해를 최소화하고 적절한 환경정책을 수립하기 위하여, 한반도를 중심으로 한 기후변화시그널의 탐지와 예측에 대한 연구가 필요하게 되었다.

기후변화시그널 탐지(detection of climate change signal)는 전지구 수치모델(global circulation model: GCM)에서 생성된 기후인자(기온 또는 강수량)의 변화가 관측값의 변화에 유의한 영향을 주는지를 통계적으로 증명하는 과정이다. 기후변화시그널 탐지를 위하여 Berliner 등 (2000)에 의하여 제안된 베이저안 지문법(Bayesian fingerprint method)은 control run data와 scenario run data를 사용하여 지문(fingerprint)를 계산하고, 지문 벡터의 계수에 대한 사전분포(prior distribution)를 혼합정규분포(mixture normal distribution)로 가정하고 있다. 재분석자료를 관측값으로 한

가능도함수(likelihood function)를 이용하여, 베イズ 규칙에 의하여 지문 벡터의 계수에 대한 사후분포(posterior distribution)를 생성한 후 기후변화시그널의 탐지를 수행하는 과정으로 이루어진다.

본 연구는 한반도지역 지상기온의 변화에 대하여 일본기상연구소(Meteorological Research Institute of Japan Meteorological Agency: MRI/JMA)의 전지구수치모델인 CGCM(Coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Model)의 모의실험자료가 주는 기후변화시그널을 탐지하고 예측하는데 목적을 둔다.

제 2절에서는 연구의 대상과 사용된 자료를 설명하였다. 한반도 지역을 연구대상으로 하였으며,  $CO_2$  농도의 변화가 없다는 가정아래 모의실험된 통제 실험자료(control run data)와  $CO_2$  농도가 4배까지 연 1%씩 증가하는 시나리오 실험자료( $CO_2$  1% year increase experiment to quadrupling scenario run data)를 수집하였다. 수치모델 자료로부터 지문값(fingerprint)을 구하여 기후변화시그널 탐지 연구에 사용하였다. 또한 재분석자료에 대한 공간적 군집분석의 결과를 바탕으로 각 격자점별로 탐지작업을 수행하기로 하였다. 제 3절에서는 기후변화시그널 탐지를 위한 연구방법을 제시하고 있으며, 적용된 베이즈안 지문법과 오차항이 자귀회귀과정인 회귀모형(AUTOREG 모형)을 이용한 기후변화시그널 탐지와 예측과정을 설명한다.

제 4절에서는 자료를 이용한 두 통계적 모형의 탐지 과정과 결과를 제시하였으며, 탐지가 유의한 격자점에 대하여 수행된 예측 결과를 등고선그림으로 제시하였다.

## 2. 자료

### 2.1. 자료 종류

기후변화시그널을 탐지의 연구대상이 되는 기후인자는 지상기온(surface temperature)이며, 연구대상 지역은 (120°E~135°E, 29°N~48°N, 이하 한반도지역으로 표현)이다. 연구에 사용된 자료는 모두 2.8°×2.8°인 격자구조로 구성하였으며, 격자점 수는 총 42개이다. 자료형태는 연평균 지상기온이며, 단위는 절대온도(°K)이다.

유럽중규모기상예보센터(European Center for Medium Range Weather Forecasts: ECMWF)의 재분석자료(이하 ERA40으로 표현)를 관측값 대용으로 사용하였다. 이 자료는 대기와 해양의 온도, 바람, 해류 등 기상학적 및 해양학적 인자들에 대해 분석하고, 과거의 기상 데이터와 해양 데이터를 이용한 자료 동화 기법으로 처리하여 분석된 자료이다. 수집된 재분석자료 기간은 43년간(1959년~2001년)이다.

기후변화시그널 탐지를 위하여 사용된 수치모델은 일본기상청에서 운용되는 전지구 수치모델(MRI/JMA CGCM)로 모의실험된 통제자료(이하 CTRL로 표현)와  $CO_2$  농도 4배가 시나리오 자료(이하 S4X로 표현)를 수집하였다. CTRL은  $CO_2$  농도가 변하지 않는다는 조건아래 자연적 변동성만 고려되어 모의실험인 자료이고, S4X는 산업혁명 이전의  $CO_2$  평균 농도인 280ppm에서 매년 1%씩 증가하여 평균 농도가 4배가 될 때까지 증가시킨 모의실험 자료이다. MRI/JMA CGCM 자료는 북동아시아 지역에서 비교적 우수한 결과를 보이는 것으로 알려져 있으며, 연도가 정해지지 않은 모의실험 자료이므로 연도가 고려된 타 자료(ECHAM4, HadCM3, CCCma GCM)와 비교하여 1959년부터 시작하는 것이 타당하다고 결정하였다. 수집된 MRI/JMA CGCM 자료기간은 142년간(1959년~2100년)이다.

### 2.2. 시계열 그림

그림 2.1은 연구대상지역의 42개 격자점에 대한 공간적 평균을 구하여 만들어진 43년간(1959년~2001년) 지상기온 자료의 시계열 그림이다.

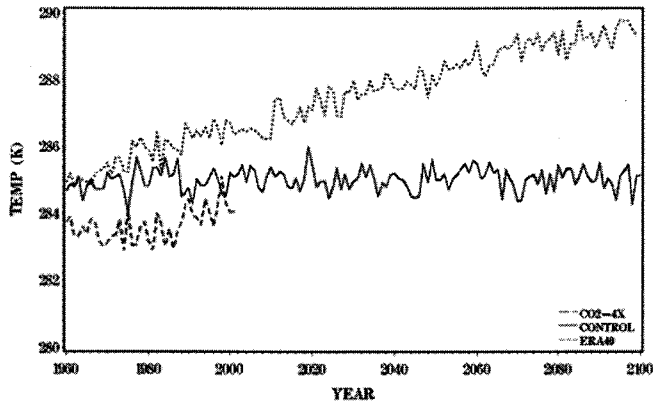


그림 2.1. 공간적 평균에 대한 시계열 그림(점선: 시나리오 자료, 실선: 통제자료, 아래 점선: 재분석자료)

시계열 그림을 살펴보면, CTRL은 정상시계열 형태를 보이고 있으며 S4X는 시간에 따라 점차 증가하는 형태를 보이고 있다. 수치모델 자료들이 재분석자료보다 높게 나타나므로, 수치모델자료가 직접적으로 기후변화를 설명한다고 할 수 없다. 따라서  $CO_2$  농도의 차이로 비롯한 CTRL과 S4X의 차이가 재분석자료의 변화에 영향을 주는지를 알아보는 탐지 작업이 요구된다. 또한 각 격자점별로 CTRL에 대하여 Shapiro-Wilk 정규성 검정을 수행한 결과 한 격자점을 제외하고 모두 정규성을 만족하는 것으로 나타났다.

### 2.3. 지문값의 공간적 형태

S4X와 CTRL의 차이를 지문값(fingerprint)라고 부르며, 각 격자점별로 시간  $t$ 에 대하여 다음과 같이 정의한다.

$$g_t = S4X_t - CTRL_t. \quad (2.1)$$

그림 2.2의 왼쪽 그림은 대상지역의 격자점별로 43년간 시간적 평균을 구하여 만들어진 등고선도이다. 기후 변화가 탐지된 경우, 지문값이 클수록 기온 변화가 크게 될 것이라 기대된다. MRI/JMA CGCM이 지니고 있는 지문값의 공간적 특성은 다음과 같다.

- (1) 연구대상지역의 모든 지문값은 0보다 크다.
- (2) 남서에서 북동방향으로 대각선 형태를 지니며 위도에 따라 상이한 공간적 형태를 나타내고 있다. 위도가 높아질수록 지문값이 증가하는 경향이 있으며, 특히 하얼빈을 포함한 만주 북부지역에서  $2.6^{\circ}C$ 이상의 값을 갖는다.

### 2.4. 재분석자료에 대한 군집분석

기후변화시그널 탐지를 위한 Berliner 등 (2000년)의 연구에서는 격자점과 시간을 함께 고려한 시공간 자료 전체에 대하여 동일한 계수를 고려하고 있다. 이 방법을 적용하여 한반도 지역에 대한 기후변화시그널 탐지 작업을 수행한 결과 기후변화시그널이 탐지되지 않았다. 이러한 결과는 국지적 기후특성과 기후변화시그널이 다름에도 불구하고 동일한 계수를 적용하였기 때문이라고 판단된다. 특히 삼면이 바

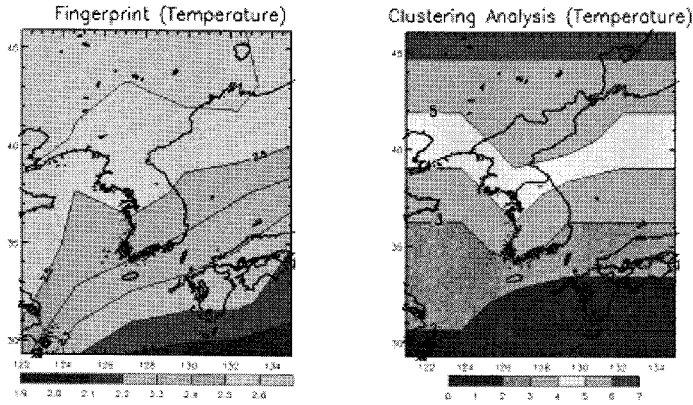


그림 2.2. 지문값의 공간적 형태(왼쪽)와 군집의 공간적 형태(오른쪽)

다로 둘러싸여있고 많은 산과 강 및 평야로 이루어져 지형이 복잡한 한반도 지역에 대한 기후 탐지에서 격자점별로 탐지계수를 달리하는 것이 옳바르다는 생각을 하게 되었다. 격자점들 사이의 유사성을 살펴 보기 위하여 군집분석을 수행하였다.

42개 격자점에 대하여 43개의 년평균 기온 자료를 사용하여 군집분석을 수행하였다. CCC(cubic clustering criterion)에 의하여 군집수는 7개로 하였다. 그림 2.2의 오른쪽 그림은 각 격자점의 군집 결과를 공간적으로 나타낸 등고선도이다. 지문값과 군집의 공간적 형태를 비교하면 공간적으로 서로 다른 형태를 보이고 있어 각 격자점별로 기후변화시그널 탐지 작업을 수행하기로 결정하였다.

### 3. 연구방법

#### 3.1. 베이저안 지문법

베이저안 지문법은 모수에 대한 사전분포를 가정하고, 자료로 얻어지는 가능도함수값을 가중치로 하여 최신회된 사후분포를 생성하여 기후변화시그널 탐지를 수행하는 기법이며, 예측치 생성에는 적당하지 못한 단점을 지니고 있다. 기본 모형을 다음과 같다.

$$Y = X \cdot \beta + N, \tag{3.1}$$

여기서  $Y = (Y_1, \dots, Y_{43})'$ 는 43년간 ERA40으로 이루어진 벡터이고,  $X$ 는  $(1, g_t)$ 를  $t$ 번째 행으로 하는  $43 \times 2$  행렬이며,  $\beta = (\beta_0, a)'$ 는 계수벡터이고,  $N = (N_1, \dots, N_{43})'$ 은 시간적인 자연변동성으로 이루어진 벡터이다.  $N$ 은 공분산행렬  $V$ 를 갖는 다변량정규분포라고 가정한다.  $a = 0$ 이면 기후변화시그널이 전혀 없는 경우가 된다. 사후분포는 식 (3.2)의 형태로 구성된다.

$$\pi(a | \text{data}) \propto L(\text{data} | a) \cdot \pi(a), \tag{3.2}$$

여기서  $\pi(a)$ 는 모수  $a$ 의 사전분포이며,  $L(\text{data} | a)$ 는 가능도함수(likelihood function)이다.  $\pi(a | \text{data})$ 는 모수  $a$ 의 사후분포이다. 각 격자점별로 베이저안 지문법은 다음과 같은 단계로 이루어진다.

[단계 1] 공분산행렬  $V$ 의 계산: 각 격자점별로 CTRL에 대하여 AR(1) 모형을 적합하고, 일차자기상관계수  $r$ 과 분산  $\gamma_0$ 을 구하여,  $V_{43 \times 43}$ 의  $(i, j)$ 항은 다음과 같이 계산한다.

$$V_{ij} = r^{|i-j|+1} \cdot \gamma_0. \tag{3.3}$$

CTRL이 백색잡음인 경우에  $V$ 는 대각성분이  $\gamma_0$ 인 대각행렬이 된다.

[단계 2] 공분산행렬의 역행렬 계산: AR(1)이 적용된 경우는 광학분해법(spectral decomposition method)을 이용하여 분산의 역행렬을 계산한다.

$$V^{-1} = \sum_{i=1}^{43} \frac{1}{\lambda_i} e_i e_i', \quad (3.4)$$

여기서  $\lambda_i$ 와  $e_i$ 는  $V$ 의 고유근과 고유벡터이다.

[단계 3] 가능도함수 계산: 모수  $a$ 의 일반화 최소제곱 추정량(generalized least square estimator)과 분산을 구한다.  $g = (g_1, \dots, g_{43})'$ 로 두면 아래의 식을 얻을 수 있다. 추정치  $\hat{a}$ 의 분포는 평균이  $a$ 이며 분산이  $(g'V^{-1}g)^{-1}$ 인 정규분포이므로, 모수  $a$ 에 대한 가능도함수는 식 (3.5)의 분포에 대한 확률밀도함수로 주어진다.

$$\hat{a} = (g'V^{-1}g)^{-1}g'V^{-1}y, \quad \sigma^2 = (g'V^{-1}g)^{-1}. \quad (3.5)$$

[단계 4] 사전분포의 모수값 추정: 사전분포의 형태는 Berliner 등 (2000)에서 사용한 혼합정규분포를 이용하였다.

$$\pi(a) = pN(0, \tau^2) + (1-p)N(\mu_A, \tau_A^2). \quad (3.6)$$

CTRL과 S4X에 대하여 폭이 43년이며 1년 씩 이동시켜 이동창(moving window)를 사용하여 식 (3.5)로 추정된 98개  $\hat{a}$  값들의 평균을 구한다.  $\tau^2$ 는 CTRL 자료를 이용하여 구한  $\hat{a}$ 의 분산이고,  $\mu_A$ 와  $\tau_A^2$ 는 S4X 자료를 이용하여 구한  $\hat{a}$ 의 평균과 분산이다. 사전분포내의 가중치  $p$  값은 0.5로 가정한다.

[단계 5] 사후분포의 추정: 사후분포는 식(3.7)~(3.11)에 의하여 구해진다.

$$\pi(a|\hat{a}) = p(\hat{a})N(\mu(a|\hat{a}), \tau^2(a|\hat{a})) + (1-p(\hat{a}))N(\mu_A(a|\hat{a}), \tau_A^2(a|\hat{a})), \quad (3.7)$$

여기서 식 (3.7)의 각 요소들은 다음의 식들로 계산된다.

$$\mu(a|\hat{a}) = \frac{\tau^2}{\tau^2 + \sigma^2} \hat{a}, \quad (3.8)$$

$$\tau^2(a|\hat{a}) = \frac{\tau^2 \sigma^2}{\tau^2 + \sigma^2}, \quad (3.9)$$

$$\mu_A(a|\hat{a}) = \frac{\tau_A^2}{\tau_A^2 + \sigma^2} \hat{a} + \frac{\sigma^2}{\tau_A^2 + \sigma^2} \mu_A, \quad \tau_A^2(a|\hat{a}) = \frac{\tau_A^2 \sigma^2}{\tau_A^2 + \sigma^2}, \quad (3.10)$$

$$p(\hat{a}) = \left[ 1 + \left( \frac{1-p}{p} \right) \sqrt{\frac{\tau^2 + \sigma^2}{\tau_A^2 + \sigma^2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{(\hat{a} - \mu_A)^2}{\tau_A^2 + \sigma^2} - \frac{\hat{a}^2}{\tau^2 + \sigma^2} \right) \right\} \right]^{-1}. \quad (3.11)$$

[단계 6] 기후변화시그널 탐지 확률 계산: 사후분포로부터 다음 식의 확률을 구하여 기후변화시그널 탐지를 수행한다.

$$P(a \in B|\hat{a}) = p(\hat{a}) \cdot \left\{ \Phi \left( -\frac{\mu(a|\hat{a})}{\tau(a|\hat{a})} + 2 \right) - \Phi \left( -\frac{\mu(a|\hat{a})}{\tau(a|\hat{a})} - 2 \right) \right\} \\ + (1-p(\hat{a})) \cdot \left\{ \Phi \left( -\frac{\mu_A(a|\hat{a})}{\tau_A(a|\hat{a})} + 2 \right) - \Phi \left( -\frac{\mu_A(a|\hat{a})}{\tau_A(a|\hat{a})} - 2 \right) \right\}, \quad (3.12)$$

여기서  $B$ 는 0을 포함한 작은 구간이며, 일반적으로 (-2·사후분포의 표준편차, 2·사후분포의 표준편차)를 사용한다. 식 (3.12)의 확률이 작은 경우에 기후변화시그널이 탐지된다고 판정한다.

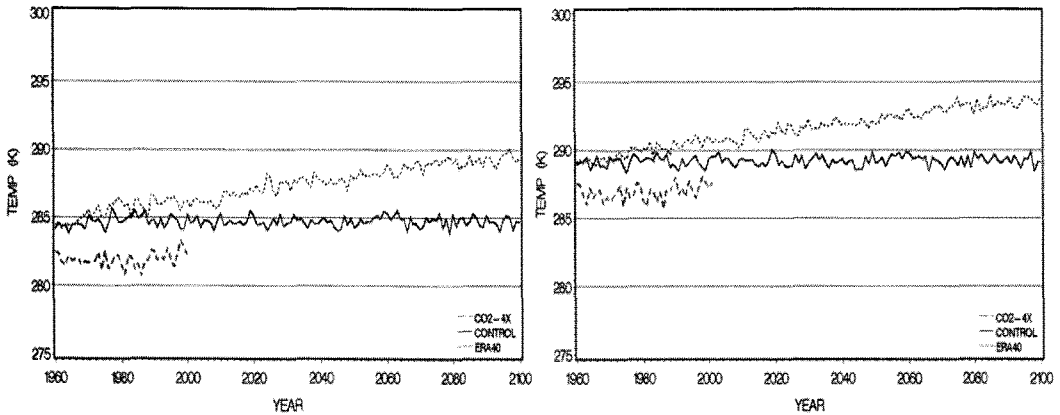


그림 4.1. 시계열 그림:서울 지역(좌), 부산 지역(우)

### 3.2. AUTOREG 모형

시계열 자료를 회귀모형에 적합시켰을 때 오차의 독립성 가정이 지켜지지 않고 자기상관관계가 시간에 따라 갖게 되리라 예상된다. 오차항이 자기회귀과정을 따르는  $p$ 차 자기회귀모형(AUTOREG 모형)을 적용한다. AUTOREG 모형은 다음과 같이 정의된다.

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot g_t + N_t, \tag{3.13}$$

여기서  $y_t$ 는  $t$ 시점의 ERA40이며,  $g_t$ 는 지문값이고,  $N_t$ 는 AR( $p$ )과정을 따르는 오차항이다.

[단계 1] 탐지단계: 각 격자점별로 AUTOREG 모형을 적용한다.  $p$ -값을 식별하여 AUTOREG 모형의 모수를 추정하고, 유의확률( $p$ -값)을 구하여  $p$ -값이 작은 경우 기후변화시그널이 탐지된다고 판단한다.

[단계 2] 예측단계: 각 격자점별로 추정된 AUTOREG 모형으로 2100년까지 예측치를 생산한다. [단계 1]에서 기후변화시그널이 탐지된 격자점에 대해서만 예측치가 의미를 갖는다. 예측치에 의한 기온 변화를 공간적으로 살펴보기 위하여 평년기온 30년(1971년~2000년)에 해당하는 재분석자료의 평균을 계산하고, 재분석자료와 예측값의 차이를 이용하여 등고선 그림을 2001년부터 2100년까지 10년 단위로 나누어 작성한다.

## 4. S4X를 사용한 한반도 지역 지상기온 기후변화시그널 탐지

### 4.1. 베이지안 지문법 결과

각 격자점별로 3.1절의 분석단계를 동일하게 적용하여 기후변화 시그널 탐지를 수행하였다. 본 논문에서는 42개 격자점 중 서울지역과 부산지역의 탐지 결과를 보이고자 한다.

4.1.1. 시계열 그림 그림 4.1에서 좌측 그림은 서울지역(126.563°E, 37.6731°N)에 대한 연평균 지상기온 자료의 시계열 그림이다. CTRL보다 S4X가 시간에 따라 점차 증가하는 형태를 보이고 있다. 서울지역 연평균 지상기온에 대한 수치모델 자료는 재분석자료보다 높게 나타나고 있다. 그림 4.1에서 우측 그림은 부산지역(129.375°E, 34.8825°N)에 대한 연평균 지상기온 자료의 시계열 그림이다.

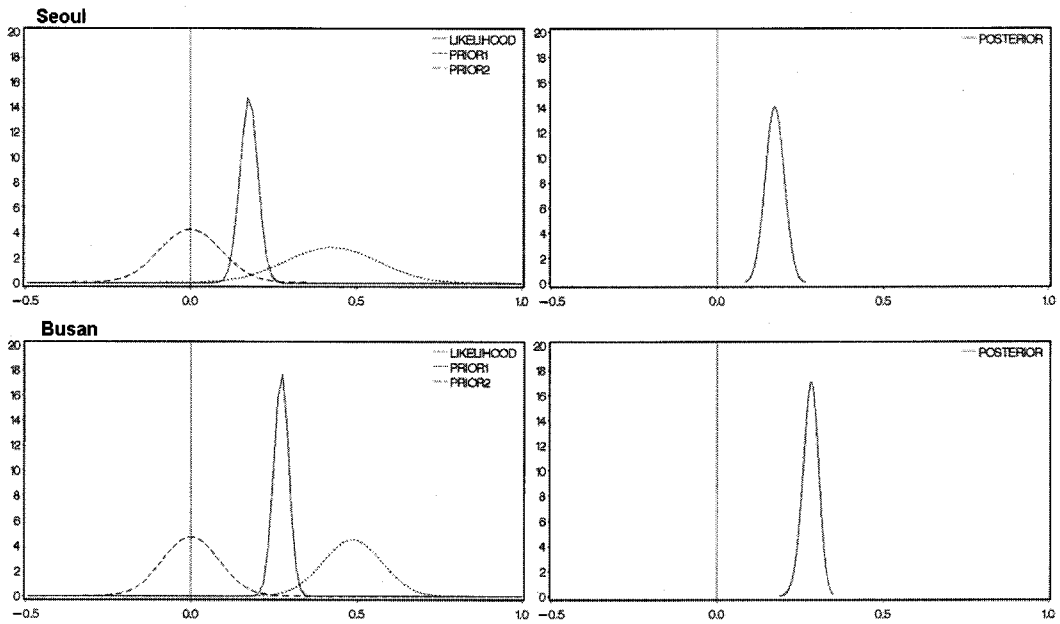


그림 4.2.  $a$ 의 가능도함수와 사전분포(좌), 사후분포(우)( $PRIOR1=N(0, \tau^2)$ ,  $PRIOR2=N(\mu_A, \tau_A^2)$ )

CTRL보다 S4X가 시간에 따라 점차 증가하는 형태를 보이고 있으며, 수치모델 자료는 재분석자료보다 높게 나타나고 있다. 따라서 서울지역과 부산지역에서 지문값이 재분석자료에 영향을 주는지를 알아보는 기후변화시그널 탐지의 가능성을 보여주고 있다.

**4.1.2. 기후변화시그널 탐지** 그림 4.2의 좌측 그림은 서울지역과 부산지역의 지상기온에 대한 가능도함수와 CTRL, S4X의 사전분포를 그린 것이고, 우측 그림은 사후분포를 그린 것이다.

서울지역에 대한 가능도함수는 평균은 0.176950, 표준편차는 0.026853를 따르는 정규분포의 확률밀도함수로부터 얻어진다. 사전분포는 평균 0, 표준편차 0.09400인 정규분포와 평균이 0.42668이고 표준편차가 0.14051인 정규분포에 대하여 각각 0.5의 가중치를 곱한 혼합분포로 구성된다. 서울지역에 대하여 모수  $a$ 의 사후분포는 다음과 같다.

$$\pi(a|\hat{a}) = 0.56617 \times N(0.16360, 0.025820^2) + (1 - 0.56617) \times N(0.18575, 0.026376^2) \quad (4.1)$$

부산지역에 대한 가능도함수의 평균은 0.27239, 표준편차는 0.022389를 따르는 정규분포이다. 사전분포는 평균 0, 표준편차 0.08507인 정규분포와 평균이 0.48705이고 표준편차가 0.08854인 정규분포에 대하여 각각 0.5의 가중치를 곱한 혼합분포로 구성된다. 부산지역에 대하여 모수  $a$ 의 사후분포는 다음과 같다.

$$\pi(a|\hat{a}) = 0.11976 \times N(0.25474, 0.021652^2) + (1 - 0.11976) \times N(0.28529, 0.021706^2). \quad (4.2)$$

## 4.2. AUTOREG 모형 결과

**4.2.1. 유의확률의 공간적 형태** 각 격자점별로 식 (3.13)의 AUTOREG 모형을 적용하여 모형을 추



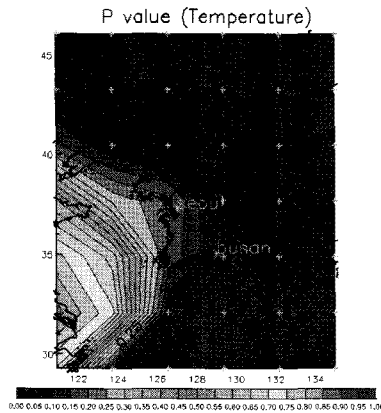


그림 4.3.  $p$ -값의 공간적 형태

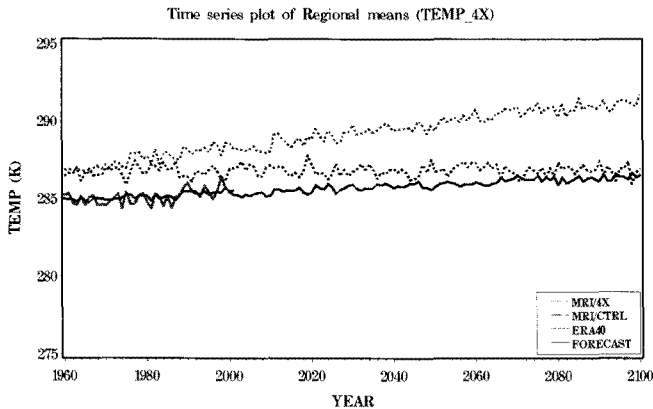


그림 4.4. 지상기온의 공간적 평균에 대한 예측값의 시계열 그림

정하고,  $p$ -값을 구하였다.  $p$ -값이 0.1보다 작은 경우 귀무가설( $H_0 : \beta_1 = 0$ )을 기각한다. 즉, 기후변화시그널이 탐지된다고 판단한다. 세부적으로 구분하면,  $p$ -값이 0.01보다 작으면 기후변화시그널이 강하게 탐지된다(strongly detected)고 하고, 0.01에서 0.05 사이에 있으면 기후변화시그널이 보통으로 탐지된다(medium-detected)고 하며, 0.05에서 0.1에서는 기후변화시그널이 약하게 탐지된다(weakly detected)고 하고, 0.1보다 크면 기후변화시그널이 탐지되지 않는다고 판단하였다.

그림 4.3은 AUTOREG 모형에서 나타난 지문값의 계수에 대한  $p$ -값의 등고선 그림이다. ‘+’는 유의하게 탐지된 격자점을 나타낸다. 등고선 그림에서 기후변화는 보라색 지역이 보통 이상으로 탐지되는 지역이며, 파란색 부분이 약하게 탐지되는 부분이다. 한반도의 세로로 중앙지역(128°E~129°E)에서 약한 탐지를 보이며, 동쪽으로 갈수록 강하게 탐지됨을 알 수 있다.

**4.2.2. 예측** 그림 4.4는 유의하게 탐지된 격자점에 한해 생성된 S4X, CTRL, ERA40 및 예측값(FORECAST)의 공간적 평균값들의 시계열 그림이다. 예측값은 추정된 AUTOREG 모형을 통하여 생성된 결과이며,  $0.118 \pm 0.063^\circ\text{C}/10\text{년}$ 의 기온증가 추세를 보이고 있다.

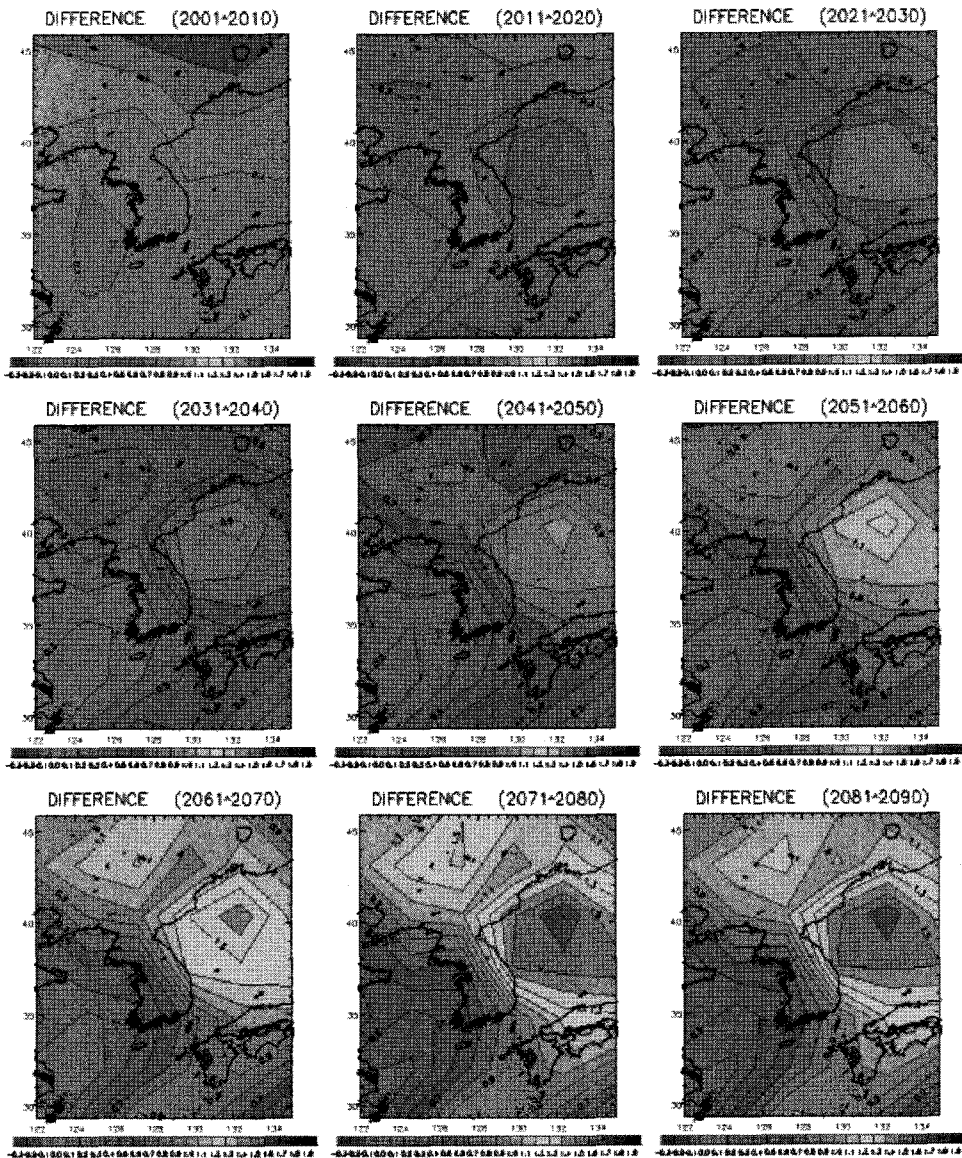


그림 4.5. 지상기온 예측값의 공간적 형태(2001년~2090년)

그림 4.5는 평년기온 30년(1971년~2000년)에 해당하는 재분석자료와 2100년까지 생성된 예측값과의 차이를 알아보기 위하여 10년 단위로 나누어 작성한 기온 변화에 대한 공간적 형태를 그린 것이다. 그림 4.4에서 '+'로 표시된 탐지된 격자점에 한해서 예측을 살펴보면, 기온 상승값은 100년 동안  $-0.3^{\circ}\text{C}$ 에서  $2.0^{\circ}\text{C}$ 까지 분포하고 있으며, 시간이 지나감에 따라 차이가 커지고 있다. 2000년대에서 한반도 지상기온은  $0.1^{\circ}\text{C}$ 로 관측값과 예측값이 별다른 차이가 없으나, 2010년대에서는  $0.3^{\circ}\text{C}$ , 2020년대에서 2060년대까지  $0.5^{\circ}\text{C}$ 에서  $1.2^{\circ}\text{C}$ 까지, 2070년대에서 2090년대까지는  $0.9^{\circ}\text{C}$ 에서  $2.0^{\circ}\text{C}$ 까지 한반도 지역에

서 기온이 상승되리라 판단된다. 특히, 동해안과 연해주 연안지역에서는 2020년대에 0.7℃ 이상 지상 기온 상승이 보이고 있으며 2090년대에는 1.9℃ 이상 온난화 경향을 보이고 있으며, 부산지역의 경우에 2050년대에는 0.7℃에서 0.9℃까지 상승하리라 예상된다.

## 5. 결론

한반도 지역에 대하여 지상기온을 대상으로 기후변화시그널 탐지 작업을 수행하였다. MRI/CGCM 수치모델 자료에서 구해진 기후변화시그널이 재분석자료에 유의한 영향을 주는지를 통계적 기법을 통하여 분석하였다. 적용된 통계적 기법은 베이지안 지문법과 AUTOREG 모형을 이용하였으며, 기후변화시그널 탐지가 되는 경우에는 추정된 AUTOREG 모형식을 통하여 예측 작업을 수행하였다. AUTOREG 모형을 적합한 결과 32개 격자점이, 베이지안 지문법에 의해 38개 격자점이 유의하게 탐지되었다. 베이지안 지문법과 AUTOREG 모형의 모수를 비교한 결과, 추정된 모수들 간에 차이가 크지 않은 것으로 보인다. AUTOREG 모형을 이용하여 지상기온에 대한 예측 작업을 수행한 결과, 연평균 지상기온의 공간적 평균에 대한 예측값의 시계열 그림을 통하여  $0.118 \pm 0.063^{\circ}\text{C}/10\text{년}$  상승함을 알 수 있다.

기후변화시그널 탐지와 예측은 수치모델의 모의실험자료에 의존하므로 지속적인 모니터링과 분석이 필요하다. 본 연구에서 제안된 탐지 및 예측과정은 다양한 기후인자와 다양한 시나리오 실험에 대한 다양한 수치모델의 모의실험 자료에 대해서 기후변화시그널 탐지 및 예측 작업에 적용될 수 있으므로 수치모델 간 비교 및 분석작업을 향후 연구방향으로 하고 있다.

## 참고문헌

- 국가과학기술지문회의 (2007). <기후변화의 현황과 전망>.
- 국립기상연구소 기후연구실 (2004). <한반도 기후 100년 변화와 미래 전망>.
- Berliner, L. M., Levine, R. A. and Shea, D. J. (2000). Bayesian climate change assessment, *Journal of Climate*, **13**, 3805-3820.
- Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I., Tett, S. F. B. and Jones, P. D. (2006). Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850, *Journal of Geophysical Research*, **111**, D12106.
- Etheridge, D. M., Steele, L. P., Langenfelds, R. L., Francey, R. J., Barnola, J. M. and Morgan, V. I. (1996). Natural and anthropogenic changes in atmospheric  $\text{CO}_2$  over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn, *Journal of Geophysical Research*, **101**, 4115-4128.
- Hansen, J., Ruedy, R., Sato, M., Imhoff, M., Lawrence, W., Easterling, D., Peterson, T. and Karl, T. (2001). A closer look at United States and global surface temperature change. *Journal of Geophysical Research*, **106**, 23947-23963.
- Indermühle, A., Stocker, T. F., Joos, F., Fischer, H., Smith, H. J., Wahlen, M., Deck, B., Mastroianni, D., Tschumi, J., Blunier, T., Meyer, R. and Stauffer, B. (1999). Holocene carbon-cycle dynamics based on  $\text{CO}_2$  trapped in ice at Taylor Dome, Antarctica, *Nature*, **398**, 121-126.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001*, [http://www.grida.no/climate/ipcc\\_tar/wg1](http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1).
- IPCC (2007). *Climate Change 2007*, <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.
- Neftel, A., Moor, E., Oeschger, H. and Stauffer, B. (1985). Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric  $\text{CO}_2$  in the past 2 centuries, *Nature*, **315**, 45-47.
- Smith, T. M. and Reynolds, R. W. (2004). Improved extended reconstruction of SST (1854-1997), *Journal of Climate*, **17**, 2466-2477.

# Detection and Forecast of Climate Change Signal over the Korean Peninsula

Keon-Tae Sohn<sup>1</sup> · Eun-Hye Lee<sup>2</sup> · Jeong-Hyeong Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Statistics, Pusan National University; <sup>2</sup>Dept. of Statistics, Pusan National University;

<sup>3</sup>Division of Management Information Science, Dong-A University

(Received July 2008; accepted July 2008)

---

## Abstract

The objectives of this study are the detection and forecast of climate change signal in the annual mean of surface temperature data, which are generated by MRI/JMA CGCM over the Korean Peninsula. MRI/JMA CGCM outputs consist of control run data(experiment with no change of  $CO_2$  concentration) and scenario run data( $CO_2$  1%/year increase experiment to quadrupling) during 142 years for surface temperature and precipitation. And ECMWF reanalysis data during 43 years are used as observations. All data have the same spatial structure which consists of 42 grid points. Two statistical models, the Bayesian fingerprint method and the regression model with autoregressive error(AUTOREG model), are separately applied to detect the climate change signal. The forecasts up to 2100 are generated by the estimated AUTOREG model only for detected grid points.

**Keywords:** Climate change, temperature, MRI/JMA CGCM, AUTOREG model, Bayesian fingerprint method.

---

---

This work was supported by Pusan National Research Grant.

<sup>1</sup>Corresponding Author: Professor, Dept. of Statistics, Pusan National University, Busan 609-735, Korea.

E-mail: ktsohn@pusan.ac.kr

<sup>2</sup>Graduate student, Dept. of Statistics, Pusan National University, Busan 609-735, Korea.

E-mail: hera3087@pusan.ac.kr

<sup>3</sup>Associate Professor, Division of Management Information Science, Dong-A University, Busan 604-714, Korea. E-mail: jeonglee@dau.ac.kr