J. Astron. Space Sci. 13(2), S181–S197 (1996)

우리별 1호 CCD 지구 관측 영상의 전처리

이 임 평 · 김 태 정 · 이 서 림 · 최 순 달
한국과학기술원 인공위성연구센터

PREPROCESSING OF THE KITSAT-1 CCD EARTH IMAGES

Impyeong Lee, Taejung Kim, Seorim Lee and Soon D. Choi
Satellite Technology Research Center, KAIST, Taejon 305-701

(Received March 20, 1996; Accepted May 4, 1996)

요 약

CCD 지구 영상 실험 장치(CCD earth image experiment, CEIE)는 우리별 1호의 주 탑재체중의 하나이다. 우리별 1호가 발사된 후에 CEIE는 이제까지 약 500여장의 세계 곳곳의 지표면 영상을 촬영하였다. 내재한 방사학적(radiometric) 오차 및 기하학적(geometric) 찌그러짐으로 인해, 관측된 영상은 지표면의 모습과 아주 다르다. 이러한 영상 데이터를 다양한 목적의 응용을 위해 처리하고 분석하기전에 이러한 오차를 제거하기 위한 전처리 과정을 반드시 수행하여야한다. 이 논문은 CEIE의 운영 결과를 요약하고 방사학적 및 기하학적 보정을 수행하는 전처리 과정을 설명한다.

ABSTRACT

The CCD earth image experiment(CEIE) is one of the main payload of the KITSAT-1. Since it was launched on Aug. 11, 1992, the CEIE has taken more than 500 images on the earth surface world-wide so far. An image from the space is very different from a feature on the real Earth surface due to various radiometric and geometric distortions. Preprocessing to remove those distortions has to take place before the image data are processed and analyzed further for various applications. This paper summarizes the result of the operation of the CEIE and describes the procedure to perform preprocessing including radiometric and geometric correction.

1. 서 론

우리별 1호는 1992년 8월 11일에 프랑스의 Ariane로켓을 이용하여 성공적으로 발사되었다. 위성의 전체 질량은 약 48.6kg이고 크기는 35.2×35.6×67.0cm^{3}이다. 과학 및 공학 실험의 수행을 위한 CCD 지구 영상 실험 장치, 디지털 신호 처리 실험 장치, 우주선 실험 장치, 디지털 축적

및 전송 실험 장치 등이 우리별 1호에 탑재되었다. 발사후 이제까지 모든 탑재체들은 어떠한 오류없이 정상적으로 동작하고 유용한 결과를 만들어내고 있다(Kim *et al.* 1992, Lee *et al.* 1993).

CCD 지구 영상 실험 장치는 두개의 카메라 시스템과 트랜스퓨터로 구현된 영상 처리 시스템으로 이루어진다. 광각 및 협각 카메라로 구성되는 두개의 카메라 시스템은 각각 2차원 CCD 센서를 사용하고 568×576 크기의 흑백 영상을 촬영한다. 광각 카메라는 96°의 field of view와 4km의 해상도를 가지며 협각 카메라는 12°의 field of view와 400m의 해상도를 가진다 (Yoo *et al.* 1994, Yoo 1992).

원격 탐사 데이터의 전처리는 데이터의 처리 및 분석 이전에 수행해야하는 모든 과정을 포함한다. 원격 탐사 임무에서 생성되는 데이터는 항상 질적으로 최적인 것은 아니다. 모든 원격 탐사 시스템은 개별적으로 카메라의 설계, 위성의 고도, 저장 시스템의 성능 등의 고유한 특성을 갖는다. 예측이 불가능한 외부로부터의 요인들은 재생 데이터의 질에 큰 영향을 끼친다. 전처리 과정은 그러한 부적당한 점들을 감소하거나 제거하는데 꼭 필요하다. 전처리 과정은 크게 방사학적 보정과 기하학적 보정으로 이루어진다(Barrett & Curtis 1982, Curran 1985).

이 논문은 CEIE의 운영 결과와 우리별 1호 CCD 영상에 적용한 방사학적 및 기하학적 보정을 포함하는 전처리 과정을 언급하고있다. 또한, 이러한 과정을 통해 보정된 몇 개의 영상들을 예시하고있다.

2. CCD 카메라의 운영 결과

우리별 1호의 CEIE에 촬영 예정 시각 및 카메라 특성 설정을 위한 두가지 변수가 원격 명령을 통해 전해진다. 지상국 운영자가 설정하는 두가지 변수는 축적 시간(integration time)과 소자 이득인데 태양각과 지표면의 반사도 등을 고려해 결정된다. 촬영된 영상의 히스토그램이 가능한 가장 균등하게 분포되도록 이러한 변수들을 제어하여야한다. 하나의 명령으로 동시에 광각 및 협각 카메라 영상을 촬영하게된다. CEIE가 영상을 촬영하면 일단 위성에 위치한 메모리 모듈에 촬영한 영상을 저장하게된다. 위성은 촬영후 몇주기동안에 영상 데이터를 지상국으로 전송한다.

우리별 1호가 발사된 이후로 CEIE는 500여장의 세계 곳곳의 영상을 촬영하였다. 촬영된 영상에 몇가지 비정상적인 현상들이 발견되었고 그 내용을 아래에서 요약하였다.

- Dark(DK): 영상의 대부분의 너무 어두운 현상
- Repetition error(RE): 위성의 주 컴퓨터와 CCD 영상 처리 시스템 사이에서의 통신 에러로 인해 전송된 영상에 몇개의 줄이 반복되는 현상
- Saturation error(SE): 소자 이득 및 축적 시간의 설정을 부적합하게하여 영상의 전체 또는 일부가 너무 밝은 현상
- Size problem(SP): 촬영된 영상의 크기가 CCD 소자의 크기(568×576)와 일치하지않는 현상

그림 1은 촬영된 영상의 비정상적인 에러의 분포 상태를 보여준다. 촬영된 영상의 약 60%는 이러한 비정상적인 현상을 보이지 않았다.

그림 2는 cloud cover assessment의 결과를 보여준다. 비정상적인 현상이 발생하지 않아서 cloud cover assessment가 의미를 가질 수 있는 영상중에서 약 반 정도는 40% 이하의 cloud cover를 유지하고있다. Cloud cover가 적은 영상들은 방사학적 및 기하학적 보정, 모자이크, 다른 위성의 영상들과 합성 등의 처리를 위해 이용되었다.

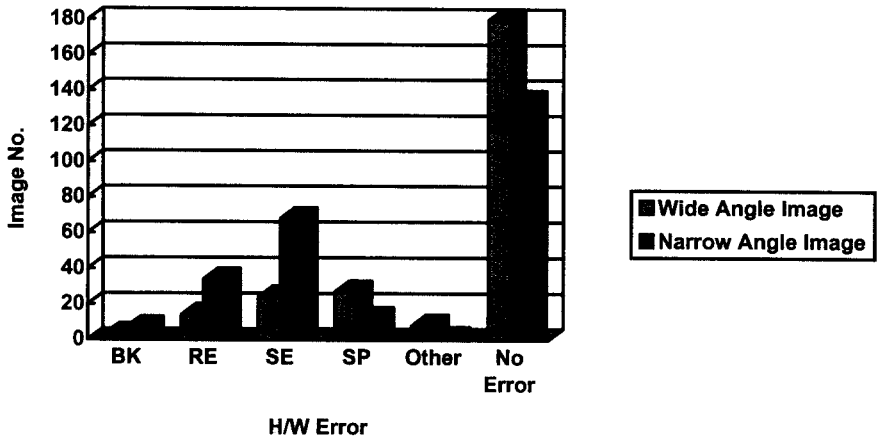

그림 1. 촬영된 영상의 비정상적인 현상의 분포.

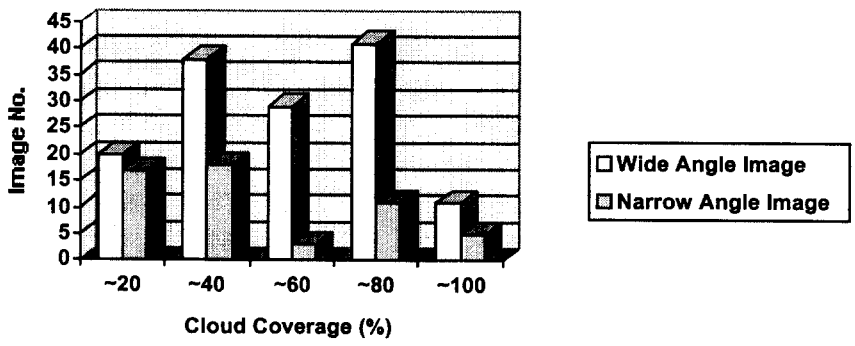

그림 2. cloud cover assessment의 결과.

3. 우리별 1호 영상의 방사학적 보정

한 영상의 방사학적 특성이란 그 영상에 기록된 신호 즉, 영상의 화소들의 밝기값이 얼마나 잘 실제의 지표면으로부터 나온 신호를 반영하는 가를 나타낸다. 이 장에서는 우리별 1호 영상의 방사학적 특성에 대해서 논해보자 한다. 그리고 우리별 1호 영상에 존재하는 에러들을 제거하고 양질의 영상을 얻어내기 위해서 우리별 1호 영상에 적용한 방사학적 보정 방식에 대해서 설명하고자 한다.

인공위성으로부터 얻어진 영상의 방사학적 특성을 결정하는 요소에는 여러가지가 있으나 중요한 요소로는 다음의 네가지로 구분할 수 있다(SPOT Image 1988).

- 대기효과(atmospheric effects): 지표면으로부터 나온 신호는 반드시 대기층을 지나 영상기구(imaging instrument)에 도달하게 된다. 따라서 대기중의 입자들에 의한 빛의 흡수, 산란 등이 일어나게 된다.
- 영상기구 내의 광학적 효과: 영상의 해상도(resolution)는 광학적인 diffraction limit에 매우 영향을 받으며 defocusing등의 광학적 이상현상(anomaly)은 영상의 방사학적 특성에 매우 손상을 준다.
- 영상기구내의 전자장치들에 의한 효과: 전자 잡음(electronic noise)은 영상신호의 가장 주요한 잡음원중의 하나이다. 따라서 CCD 소자 및 CCD 구동을 위한 전자장치들은 CCD에서 출력된 신호가 CCD로 입력되어진 신호와 비례하도록 잘 설계되어야 한다.
- 영상기구의 열화현상(degradation): 혹독한 우주환경상에 노출된 상태인 영상기구의 광학부분과 전자장치들은 시간이 흐름에 따라 급격한 열화현상을 보이며 이러한 열화현상은 영상신호의 특성을 매우 저하시킬 수 있다.

양질의 영상을 얻기 위해서는 위의 네가지 요소들을 충분히 고려하여 적절한 방사학적 보정 방법을 개발하여 영상에 적용시켜야 한다. 이러한 방사학적 보정 방법의 개발을 위해서 영상 취득 당시의 대기상태, 카메라 보정 변수(calibration parameters), 카메라의 CCD 전자장치 등에 대한 자세한 정보가 필요하다. 그러나 우리별 1호와 같은 소형위성에서는 소형위성이 갖는 여러가지 제약으로 말미암아 이러한 정보를 모두 제공해주기가 실질적으로 불가능하며 이런 정보를 모두 고려한 방사학적 보정 방법의 연구 및 개발 역시 현실적으로 어려운 일이다. 따라서 연구의 방향을 우선 우리별 1호 영상의 방사학적 특성을 분석하여, 방사학적 에러들을 검출해내고, 발견된 에러들을 교정하는 위주의 방사학적 보정 방법의 개발에 맞추었다. 우선 이제까지 우리별 1호 영상에서 검출된 방사학적 에러들은 다음과 같은 네가지로 요약될 수 있다.

- 백색띠의 존재: 대부분의 우리별 1호 영상에서 약 4화소(pixel) 넓이의 주변의 행보다 밝은 행의 띠가 발견되었다. 이 백색띠는 영상 취득시 CCD소자내의 전력증강(power surge)

으로인한 영향인 듯 싶다(Ward 1991). 이 백색띠는 최근에 찍은 사진일수록 더욱 뚜렷하게 나타나고있으며 이 사실은 우리별 1호 카메라의 우주상에서의 운용시간이 지남에 따라 생기는 열화현상이 백색띠 문제를 더 심각하게 만든다는 것을 잘 보여주고있다.

- 짝수행과 홀수행 화소의 밝기값 차이: 우리별 1호 영상의 짝수행(행 0, 2, 4 등) 화소의 평균 밝기값이 홀수행(행 1, 3, 5 등) 화소의 평균 밝기값보다 큰 것이 관찰되었다. 한 화소의 밝기값을 255로 나타낼 때 짝수행과 홀수행의 평균값은 약 3의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이 에러는 CCD 소자에서 짝수행과 홀수행을 읽어오는 방법에 기인한 것이다. CCD 소자에 기억된 영상신호를 읽을 때 우선 홀수행을 먼저 읽어내고 난 뒤 짝수행을 읽는다. 이것은 결과적으로 홀수행과 짝수행에 각각 다른 신호축적시간(integration time)을 부여한 결과가 되어 보다 긴 신호축적시간을 가진 짝수행이 더 많은 광자(photon)를 축적하게 되고 따라서 평균적으로 더 밝은 화소값을 가지게 된다.
- 화소의 포화 현상: 많은 우리별 영상에서 구름이 너무 밝게 나타났고 구름에 해당하는 화소의 밝기값은 최대치(255)로 포화(saturated)되었다. 이 현상은 영상의 질감(contrast)을 나쁘게한다. 이러한 에러가 나타나는 이유는 CCD의 영상축적시간이 너무 길고 CCD 전자장치의 이득값이 너무 높게 설정되었기 때문이다. 더욱이 구름에 해당하는 밝은 화소의 영향으로 주변의 화소들의 밝기값도 같이 증가한 듯한 경우가 자주 발생하였다. 이것은 CCD 소자내의 포화된 CCD 셀이 주변의 셀의 값에 영향을 주기 때문인 듯 하다.
- 우리별 1호에 탑재한 카메라의 열화현상: 우리별 1호를 발사한 직후에 찍은 사진들에 비하면 최근에 찍은 사진들에서 더 심한 에러를 발견할 수 있다. 예를 들어 백색띠가 나타나는 빈도도 위성의 작동시간이 길어가면서 더 심해지고 있고 영상의 질감 역시 나빠지고있다. 또한 하드웨어로 인한 에러의 횟수 역시 시간이 지남에따라 늘고있다.

위에서 밝힌 이러한 에러들을 해소하기위해 우리별 1호 영상에 적용시킨 보정 방법은 다음과 같다. $g(i,j)$가 한 영상의 i 번째 열, j 번째 행의 화소의 밝기값이라고 하자. 그러면 영상내에서 백색띠의 존재의 여부와 그 위치는 다음의 공식에 의하여 알아낼 수 있다.

$$\begin{aligned} &A_j = \sum_i g(i,j) \\ &A_j, A_{j+1}, A_{j+2}, A_{j+3} > A_{j-1} \\ &A_j, A_{j+1}, A_{j+2}, A_{j+3} > A_{j+4} \\ &A_j - A_{j-1} > T \\ &A_{j+3} - A_{j+4} > T \end{aligned} \tag{1}$$

식 (1)에서 A_j는 j번째 행에 있는 화소들의 밝기값의 평균이고 T는 사용자가 정의하는 임계값(threshold)이다. 처음 두개의 부등식은 연속되는 네개의 행이 주위의 행보다 더 큰 평균 밝기값을 가짐을 나타낸다. 뒤의 두 부등식은 백색띠내의 행의 평균 밝기값은 백색띠 주변의

행의 평균 밝기값에 비해 어느 정도 이상 밝아야함을 나타내고있다. 이와 같이 하여 백색띠의 존재의 여부와 그 위치를 알아낸후 백색띠의 제거 작업은 다음의 공식을 이용하여 실행하게 된다.

$$g(i,j) = g(i,k-1) + \frac{g(i,k+4) - g(i,k-1)}{5} \times (j-k+1), \quad j = k, k+1, k+2, k+3 \tag{2}$$

식 (2)에서 k는 백색띠가 시작하는 행이다. 백색띠는 백색띠상의 화소의 밝기값을 백색띠 상하에 있는 화소의 밝기값의 변화에 일치하도록 지정해줌으로써 제거된다.

홀수행과 짝수행의 평균 밝기값이 다르게 나타나는 에러는 다음의 비교적 간단한 공식으로 없앨 수 있다.

$$\begin{aligned} A_j &= \sum_i g(i,j) \\ g(i,j+1) &= g(i,j+1) + \frac{A_j + A_{j+2}}{2} - A_{j+1}, \quad j = 0,2,4,6,\ldots \end{aligned} \tag{3}$$

A_j는 전과 마찬가지로 j번째 행의 평균 밝기값이다. 홀수행상에 있는 화소의 밝기값은 그 홀수행의 상하에 있는 짝수행상의 화소들의 밝기값 차이에 비례하도록 새로이 설정된다. 그러나 원래의 짝수행과 홀수행의 밝기값 차이가 최대치 255중 3이므로 위의 공식을 적용하여 에러를 제거한 후에도 육안에는 그 차이가 잘 나타나지는 않았다.

4. 우리별 1호 영상의 기하학적 보정

위성에서 관측한 대부분의 지표면 영상들은 기하학적으로 크게 찌그러져있다. 이러한 찌그러짐은 주로 지구, 위성 및 궤도의 요인에 의해 비롯된다. 지구의 회전, 편구(oblateness) 모양, 곡률과 위성의 속도, 고도, 자세의 변화가 영상의 찌그러짐에 크게 기여한다. 또한, 지구의 구표면상에 편평한 영상을 투영하는 것도 기하학적 변형을 일으키는 중요한 요인이다. 이러한 변형들을 정확히 고려하지않으면 모자이크, 분류화(classification), 상호 비교, 다른 영상과의 합성 등과 같은 영상 처리 과정들이 의미 있는 결과를 내기힘들다(Mather 1987).

원격 탐사 영상에 내재한 기하학적 찌그러짐의 보정은 크게 세가지 방법을 통해 이루어진다. 첫번째는 센서, 위성, 궤도 및 지구의 기하에 근거한 모델을 이용해 보정하는 방법이다. 둘째는 관측된 영상에서 지도로부터 식별 가능한 지점(제어점, control points)들을 선택하고 관측된 영상에서 제어점의 위치와 지도상의 위치의 관계를 나타내는 함수를 유도하여, 유도된 함수를 이용해 보정하는 방법이다. 세째는 두번째 방법에서 이용하는 제어점과의 관계로부터 첫번째 방법에서 이용하는 기하학적 모델을 더 정교하게 개량하여 개량된 모델을 이용하여 보정하는 방법이다.

우리별 1호와 같은 소형 실험위성들은 대부분 실험적인 지표면 촬영 탑재체를 포함한다. 그러한 소형 실험위성들은 불충분하거나 부정확한 센서로 인해 위성의 위치 및 고도에대해 아주 한정된 정보만을 제공한다. 그러므로, 소형 실험위성들의 지표면 관측 영상을 첫번째 방법을 이용하여 정확한 기하학적 보정을 수행하기에는 많은 어려움이 따른다. 일반적으로 두번째 방법을 이용하여 기하학적 보정을 수행하는데 보정을 위해 유도된 함수는 전체 기하학적 찌그러짐의 과정을 정확하게 표현하기 어렵기 때문에 좋은 결과를 만들기 힘들다.

우리별 1호의 자세 결정 및 제어 시스템(attitude determination and control system, ADCS)은 자세의 안정화를 위해 중력 구배 붐(gravity gradient boom)을 이용하고 자세 결정을 위해 정확하고 충분한 정보를 제공하기에는 부족한 몇개의 자세 측정 센서를 포함한다. ADCS는 위성과 지구의 중심을 잇는 축에서 위성의 자세가 얼마나 벗어나있는가를 의미하는 지향 오차의 정보는 제공하지만 정확하게 어느 방향으로 벗어나있는가에 대한 정보는 자세 센서의 부족으로 인해 제공하지 못한다. 결국 위성의 자세를 표현하는 3축 정보에서 단지 1축 정보만 알 수 있다. 이로 인해 우리별 1호 영상의 기하학적 찌그러짐의 과정에 대한 정확한 모델을 수립하는데 큰 어려움이 있다. 그리하여, 초기에는 두번째 방법이 기하학적 보정을 수행하는데 주로 이용되었지만 보정된 결과는 만족스럽지 못하였다.

우리별 1호에서 기하학적 모델은 6개의 부정확한 변수들을 포함한다. 6개의 변수는 위성의 자세를 나타내는 pitch, yaw, roll각과 위치를 나타내는 위도, 경도, 고도로 이루어진다. 특히 ADCS는 오직 1축 정보만을 제공하기 때문에 3축의 정보를 갖는 위성 자세를 충분히 나타낼 수 없다. 이 논문에서는 우리별 1호 기하학적 모델의 변수들을 영상과 지도에서 선택된 제어점 사이의 관계를 이용하여 최소 평균 오차 제곱(least mean square, LMS) 방법을 통하여 추정하였다.

그림 3은 이 논문에서 적용한 기하학적 보정의 과정을 보여준다.

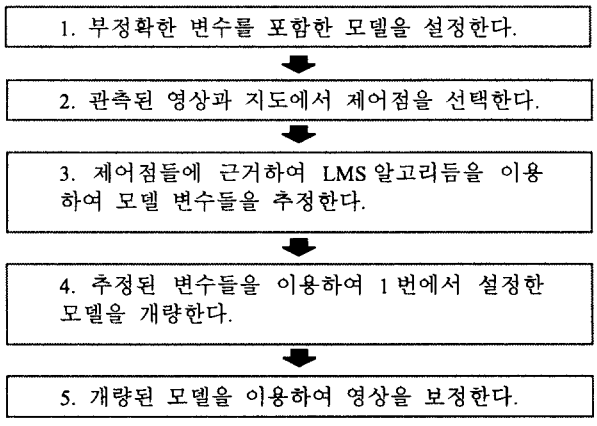

그림 3. 우리별 1호 영상의 기하학적 보정의 과정.

4.1 기하학적 모델의 수립

그림 4는 우리별 1호 CCD 카메라의 기하학적 모델을 정의하기위한 기본 원리를 보여주고 있다. CCD 센서상의 한점 A, 렌즈의 중심인 B, 지표면의 임의의 한점인 C와 같은 세가지 점이 정의되었다. A에서 B를 잇는 벡터를 $\vec{L}$로 B에서 C를 잇는 벡터를 $\vec{M}$이라 정의하자. 점 A와 점 B의 좌표를 알면 벡터 $\vec{M}$과 $\vec{L}$이 평행하다는 조건에서 점 C의 좌표를 알아낼 수 있다. 이 조건은 점 C의 상이 CCD 센서상의 점 A에 맺히는 것을 의미한다.

4개의 좌표계가 CCD 센서(C1), 위성(C2), 궤도(C3), 지구(C4)에서 각각 그림 5와 같이 정의되었다.

C1 좌표계에서 CCD 센서상의 임의의 한점을 (x, y)라 정의하고 그 점에서 맺히는 상의 지

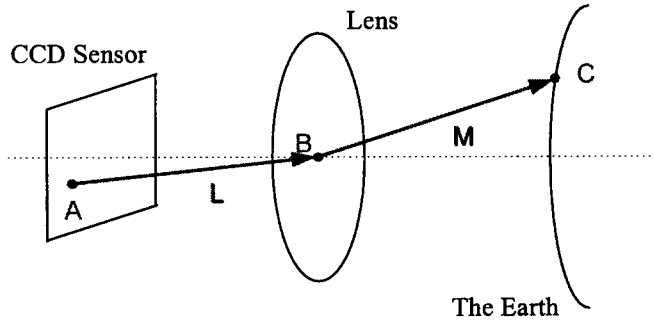

그림 4. 기하학적 모델의 유도를 위한 기본 원리.

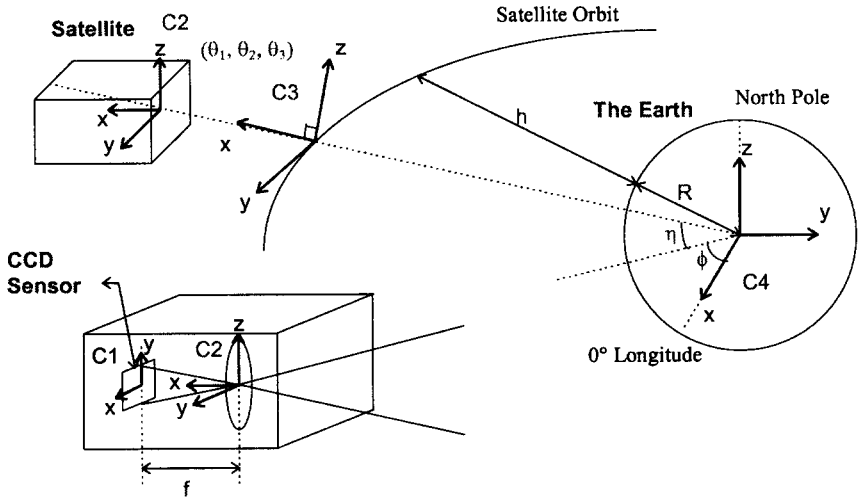

그림 5. 좌표계의 정의.

표면위의 위도, 경도의 좌표를 (α, β)라 하자. 우리별 1호의 기하학적 모델에 의하여 정해지는 함수를 T라 하고 그 역함수를 T^{-1}이라고 하면, 아래와 같은 관계를 만족한다.

$$T(x, y) = (\alpha, \beta) \tag{4}$$
$$T^{-1}(\alpha, \beta) = (x, y) \tag{5}$$

아래는 위에서 언급된 함수 T를 유도하는 과정을 언급한다. 점 A의 좌표는 C2 좌표계로 식 (6)처럼 표현되므로, 벡터 $\vec{L}$은 식 (7)처럼 유도된다.

$$\mathrm{A} = (x, y)_{C1} = (f, x, y)_{C2} \tag{6}$$
$$\vec{L}_{c2} = (0,0,0) - (f, x, y) = (-f, -x, -y)_{C2} \tag{7}$$

만약 C2와 C3 좌표계 사이의 회전행렬을 $\boldsymbol{R}_{23}$라하고, C3와 C4사이의 회전행렬을 $\boldsymbol{R}_{34}$라 하고 c_1=cosθ$_1$, s_1= sinθ$_1$, c_2=cosθ$_2$, s_2=sinθ$_2$, c_3=cosθ$_3$, s_3=sinθ$_3$, c_4=cosϕ, s_4=sinϕ, c_5=cosη, and s_5=sinη일때 벡터 $\vec{L}$은 C4 좌표계에서 아래처럼 유도된다.

$$\begin{aligned}\vec{L}_{C4} &= \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}_{34}\boldsymbol{R}_{23}\vec{L}_{C2} \\ &= \begin{bmatrix} c_4c_5 & -s_4 & -c_4s_5 \\ s_4c_5 & c_4 & -s_4s_5 \\ s_5 & 0 & c_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1c_2 & c_1s_2s_3 + s_1c_3 & -c_1s_2c_3 + s_1s_2 \\ -s_1c_2 & -s_1s_2s_3 + c_1c_3 & s_1s_2c_3 + c_1s_3 \\ s_2 & -c_2s_3 & c_2c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -f \\ -x \\ -y \end{bmatrix}\end{aligned} \tag{8}$$

점 B의 위치는 C4 좌표계에서는 위성의 위치와 거의 동일하다. 위성의 위치는 아래와 같다.

$$\mathrm{B}_{C4} = ((R+h)c_5c_4, (R+h)c_5s_4, (R+h)s_5) \tag{9}$$

지구 표면상에서 위도와 경도로 정해지는 임의의 한점 C의 좌표는 아래와 같다.

$$\mathrm{C} = (R\cos\beta\cos\alpha, R\cos\beta\sin\alpha, R\sin\beta) \tag{10}$$

점 B에서 점 C를 잇는 벡터 $\vec{M}$은 아래처럼 표현된다.

$$\vec{M} = \mathrm{C} - \mathrm{B} = (R\cos\beta\cos\alpha - (R+h)c_5c_4,\ R\cos\beta\sin\alpha - (R+h)c_5s_4,\ R\sin\beta - (R+h)s_5) \tag{11}$$

벡터 $\vec{M}$과 벡터 $\vec{L}$이 평행하다는 조건은 식 (12)과 같은 세가지 관계식을 유도한다(k는

임의의 실수).

$$\begin{aligned} R\cos\beta\cos\alpha - (R+h)c_5c_4 &= kl_x \\ R\cos\beta\sin\alpha - (R+h)c_5s_4 &= kl_y \\ R\sin\beta - (R+h)s_5 &= kl_z \end{aligned} \tag{12}$$

만약 $\cos\beta=0$이면, 이는 북극점이나 남극점을 의미하며 경도를 나타내는 α는 무의미하다. 만약 $\cos\beta\neq0$라면, k에 대한 2차 방적식이 식 (12)로부터 유도되며 식 (13)처럼 나타난다.

$$k^2(l_x^2+l_y^2+l_z^2)+2k(R+h)(l_xc_5c_4+l_yc_5s_4+l_zs_5)+(R+h)^2-R^2=0 \tag{13}$$

위성의 위치를 나타내는 좌표이기 때문에, $l_x^2+l_y^2+l_z^2$는 결코 0이 될 수 없으므로, 식 (13)의 2차 방정식을 풀어 k를 구한다. 마지막으로 식 (12)로부터 α와 β를 아래와 같이 k에대해 나타낼 수 있으며 식 (13)을통해 구한 k를 대입하여 α와 β를 구한다.

$$\begin{aligned} \beta &= \sin^{-1}\left(\frac{kl_z+(R+h)s_5}{R}\right) \\ \alpha &= \tan^{-1}2\left(\frac{kl_y+(R+h)c_5s_4}{R\cos\beta},\ \frac{kl_x+(R+h)c_5c_4}{R\cos\beta}\right) \end{aligned} \tag{14}$$

식 (13)이 2차 방정식이므로 일반적으로 2개의 상이한 k값을 얻을 수 있고, 따라서 식 (14)로부터 두 쌍의 위도 및 경도 좌표를 구할 수 있다. 두 쌍의 좌표중 위성으로부터의 거리가 더 짧은 점이 올바른 좌표이다. 식 (4)에서 정의된 함수 T는 식 (6)~(14)로부터 유도되었다.

기하학적 모델의 역함수인 T^{-1}을 식 (6)~(14)로부터 반대로 유도할 수 있다. 벡터 $\vec{L}_{c4}$는 식 (12)로부터 다음처럼 유도된다.

$$\begin{aligned} \vec{L}_{C4} &= \begin{bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{bmatrix} = \frac{\vec{W}}{k} \\ \text{where } \vec{W} &= \begin{bmatrix} R\cos\beta\cos\alpha - (R+h)c_5c_4 \\ R\cos\beta\sin\alpha - (R+h)c_5c_4 \\ R\sin\beta - (R+h)s_5 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{15}$$

$\boldsymbol{R}_{23}$과 $\boldsymbol{R}_{34}$는 좌표계사이의 회전행렬이므로 각각은 직교행렬이다(Hughes 1986). 그러므로, 벡터 $\vec{L}_{c2}$는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$\vec{L}_{C2}=\begin{bmatrix}-f\\-x\\-y\end{bmatrix}=\boldsymbol{R}_{23}{}^{-1}\boldsymbol{R}_{34}{}^{-1}L_{C4}=\frac{1}{k}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W} \tag{16}$$

k, x, y는 식 (16)으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned}k&=-\frac{1}{f}\left[\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\right]_1\\\begin{bmatrix}x\\y\end{bmatrix}&=-\frac{1}{k}\left[\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\right]_{2,3}\end{aligned} \tag{17}$$

기하학적 모델의 역함수는 식 (15)~(17)에서 결정되었다.

4.2 기하학적 모델 변수의 추정

앞에서 정의된 기하학적 모델은 6개의 미지의 또는 불확실한 변수들 (θ_1, θ_2, θ_3, ϕ, η, h)을 포함하고 있다. 이러한 변수들은 위성의 영상과 지도에서 선택한 몇개의 제어점들을 이용하여 LMS 방법을 적용하여 추정할 수 있다. 정함수 모델은 직선과 곡면의 교점을 구하는 문제인데 반해 역함수 모델은 직선과 평면의 교점을 찾는 문제로 귀결되므로 역함수 모델이 더 간단히 표현된다. 그러므로, 모델 변수의 추정을 위해 역함수 모델이 이용되었다.

몇개의 제어점을 위성의 영상과 지도를 비교하여 선택한 후 각각 (x_m, y_m)과 (α_m, β_m)라 표시하자. LMS 방법으로 제어점을 이용하여 기하학적 모델의 변수를 반복적으로 추정하게 된다. 부정확한 변수 (θ_1', θ_2', θ_3', ϕ', η', h')를 포함하는 역함수 모델은 (α_m, β_m)를 입력으로 하여 (x_m', y_m')를 출력한다.

$$\left(x_m', y_m'\right)=T^{-1}\left(\theta_1', \theta_2', \theta_3', \phi', \eta', h'; \alpha_m, \beta_m\right) \tag{18}$$

(x_m', y_m')는 아주 정확한 모델을 사용하였다면 이론적으로는 (x_m, y_m)과 같아야 하지만 그렇지 못하기 때문에 발생하는 오차를 아래와 같이 정의하자(n은 모델 변수 추정에 사용된 제어점의 개수를 의미함).

$$E=\frac{1}{n}\sum_{m=1}^{n}\left(x_m'-x_m\right)^2+\left(y_m'-y_m\right)^2 \tag{19}$$

LMS 알고리듬은 식 (19)에서 정의된 오차를 최소화하는 6개의 변수들을 결정하기 위하여 이용된다. 변수 추정을 반복적으로 수행할 때, 현재 추정된 변수들(p_n)로부터 유도되는 다음번 추정 변수들 p_{n+1}은 아래와 같은 관계식을 갖는다(c는 적절히 작은 크기의 상수임).

$$p_{n+1} = p_n - c\nabla E = p_n - c\left(\frac{dE}{d\theta_1}, \frac{dE}{d\theta_2}, \frac{dE}{d\theta_3}, \frac{dE}{d\phi}, \frac{dE}{d\eta}, \frac{dE}{dh}\right) \tag{20}$$

식 (20)에 포함된 미분값들은 아래의 식 (21)~(24)에서 유도된다. 만약 p_k를 p의 임의의 한 요소라 하면, p_k에대한 오차 E의 미분값은 다음과 같이 기술된다.

$$\frac{dE}{dp_k} = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left\{2(x_m' - x_m)\frac{dx_m'}{dp_k} + 2(y_m' - y_m)\frac{dy_m'}{dp_k}\right\} \tag{21}$$

식 (21)에 포함된 각 모델 변수에대한 x_n'와 y_n'의 미분값은 아래처럼 표현된다. 아래에서 행렬을 표기할 때, $[\,]_n$은 행렬의 n번째 요소, $[\,]_{n,m}$은 행렬의 n 및 m번째 요소를 의미한다.

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \frac{dx_n'}{d\theta_1} \\ \frac{dy_n'}{d\theta_1} \end{bmatrix} &= \left[\frac{1}{k^2}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\frac{dk}{d\theta_1}\right]_{2,3} - \left[\frac{1}{k}\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_1}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\right]_{2,3} \\
\begin{bmatrix} \frac{dx_n'}{d\theta_2} \\ \frac{dy_n'}{d\theta_2} \end{bmatrix} &= \left[\frac{1}{k^2}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\frac{dk}{d\theta_2}\right]_{2,3} - \left[\frac{1}{k}\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_2}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\right]_{2,3} \\
\begin{bmatrix} \frac{dx_n'}{d\theta_3} \\ \frac{dy_n'}{d\theta_3} \end{bmatrix} &= \left[\frac{1}{k^2}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\frac{dk}{d\theta_3}\right]_{2,3} - \left[\frac{1}{k}\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_3}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\right]_{2,3} \\
\begin{bmatrix} \frac{dx_n'}{d\phi} \\ \frac{dy_n'}{d\phi} \end{bmatrix} &= \left[\frac{1}{k^2}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\frac{dk}{d\phi}\right]_{2,3} - \left[\frac{1}{k}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{d\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}}{d\phi}\vec{W} + \boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\frac{d\vec{W}}{d\phi}\right\}\right]_{2,3} \\
\begin{bmatrix} \frac{dx_n'}{d\eta} \\ \frac{dy_n'}{d\eta} \end{bmatrix} &= \left[\frac{1}{k^2}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\frac{dk}{d\eta}\right]_{2,3} - \left[\frac{1}{k}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{d\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}}{d\eta}\vec{W} + \boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\frac{d\vec{W}}{d\eta}\right\}\right]_{2,3} \\
\begin{bmatrix} \frac{dx_n'}{dh} \\ \frac{dy_n'}{dh} \end{bmatrix} &= \left[\frac{1}{k^2}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\frac{dk}{dh}\right]_{2,3} - \left[\frac{1}{k}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\frac{d\vec{W}}{dh}\right]_{2,3}
\end{aligned} \tag{22}$$

식 (22)에 포함된 각 모델 변수에 대한 k의 미분값들은 식 (23)과 같다.

$$
\begin{aligned}
\left[\frac{dk}{d\theta_1}\right] &= -\left[\frac{1}{f}\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_1}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\right]_1 \\
\left[\frac{dk}{d\theta_2}\right] &= -\left[\frac{1}{f}\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_2}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\right]_1 \\
\left[\frac{dk}{d\theta_3}\right] &= -\left[\frac{1}{f}\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_3}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\vec{W}\right]_1 \\
\left[\frac{dk}{d\phi}\right] &= -\left[\frac{1}{f}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{d\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}}{d\phi}\vec{W}+\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\frac{d\vec{W}}{d\phi}\right\}\right]_1 \\
\left[\frac{dk}{d\eta}\right] &= -\left[\frac{1}{f}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\left\{\frac{d\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}}{d\eta}\vec{W}+R_{34}{}^{\mathrm{T}}\frac{d\vec{W}}{d\eta}\right\}\right]_1 \\
\left[\frac{dk}{dh}\right] &= -\left[\frac{1}{f}\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}\frac{d\vec{W}}{dh}\right]_1
\end{aligned}
\tag{23}
$$

식 (22)~(23)에서 포함된 행렬 또는 벡터의 각 모델 변수에 대한 미분값들은 아래와 같다.

$$
\begin{aligned}
\left[\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_1}\right] &= \begin{bmatrix} -s_1c_2 & -s_1s_2s_3+s_1c_3 & s_1s_2s_3+c_1s_3 \\ -c_1c_2 & -c_1s_2s_3-s_1c_3 & c_1s_2s_3-s_1s_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\
\left[\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_2}\right] &= \begin{bmatrix} -c_1s_2 & c_1c_2c_3 & -c_1c_2c_3 \\ s_1s_2 & -s_1c_2s_3 & s_1c_2c_3 \\ c_2 & s_2s_3 & -s_2c_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\
\left[\frac{d\boldsymbol{R}_{23}{}^{\mathrm{T}}}{d\theta_3}\right] &= \begin{bmatrix} 0 & c_1s_2c_3-s_1s_3 & c_1s_2s_3+s_1c_3 \\ 0 & -s_1s_2c_3-c_1s_3 & -s_1s_2s_3+c_1c_3 \\ 0 & -c_2c_3 & -c_2s_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\
\left[\frac{d\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}}{d\phi}\right] &= \begin{bmatrix} -s_4c_5 & -c_4 & s_4s_5 \\ c_4c_5 & -s_4 & -c_4s_5 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \\
\left[\frac{d\boldsymbol{R}_{34}{}^{\mathrm{T}}}{d\eta}\right] &= \begin{bmatrix} -s_4c_5 & 0 & -c_4c_5 \\ -s_4c_5 & 0 & -s_4c_5 \\ c_5 & 0 & -s_5 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}
\end{aligned}
\tag{24}
$$

$$\left[\frac{d\vec{W}}{d\phi}\right] = (R+h)\begin{bmatrix} c_5 s_4 \\ -c_5 c_4 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\left[\frac{d\vec{W}}{d\eta}\right] = (R+h)\begin{bmatrix} s_5 c_4 \\ s_5 s_4 \\ -c_5 \end{bmatrix}$$

$$\left[\frac{d\vec{W}}{dh}\right] = \begin{bmatrix} c_5 c_4 \\ c_5 s_4 \\ -s_5 \end{bmatrix}$$

모델 변수들은 위성의 자세와 위치에대한 아래의 두가지 조건을 만족한다고 가정하였다.

(i) 위성의 자세는 위성과 지구 중심을 잇는 축으로부터 15° 이상 벗어나지 않는다.

(ii) 궤도 모델로부터 예측된 위성의 위치는 실제 위성의 위치로부터 위도 및 경도는 2° 이하의 오차를 포함하고 고도는 30km 이하의 오차를 갖는다.

위에서 언급된 두가지 조건들은 각각 수식적으로 아래처럼 표현된다. 여기서 δ는 벗어난 각도를 의미하고, ϕ_0, η_0, h_0는 궤도 모델에서 예측된 위성의 위치를 나타내는 위도, 경도, 고도를 각각 나타낸다. 또한, $\boldsymbol{R}_{23;nm}$은 $\boldsymbol{R}_{23}$ 행렬의 n번째 행의 m번째 열의 요소의 값을 나타낸다.

$$\delta = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{\boldsymbol{R}_{23;21}{}^2 + \boldsymbol{R}_{23;31}{}^2}}{\boldsymbol{R}_{23;11}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{(c_1 c_2)^2 + (-s_1 c_2)^2}}{s_2}\right) \le 15° \tag{25}$$

$$\begin{aligned} |\phi - \phi_0| &\le 2° \\ |\eta - \eta_0| &\le 2° \\ |h - h_0| &\le 30\text{km} \end{aligned} \tag{26}$$

모델 변수들은 식 (20)을 이용하여 식 (25)~(26)의 조건을 만족하는 범위에서 반복적으로 추정될 수 있다. 이런 방법으로 추정된 변수들을 포함한 기하학적 모델을 사용하여 우리별 1호의 기하학적 찌그러짐을 제거하였다.

그림 6~8에 보이는 몇개의 사진들은 우리별 1호가 1995년 5월 8일 남부 유럽을 광각 카메라로 찍은 영상의 전처리 결과를 보여준다. 그림 6은 전처리 이전의 미가공 영상을 보여준다. 방사학적 보정이 수행된 영상은 그림 7에서 볼 수 있다. 미가공 영상의 흰색 수평선이 제거된 것을 볼 수 있다. 그림 8은 기하학적으로 보정된 영상을 위도 및 경도 격자에서 나타낸 것이다. 이 영상을 수정하기 위한 모델을 형성하기위해 추정된 모델 변수들은 표 1과 같다.

표 1. 추정된 모델 변수들의 값.

변수	이름	수치
θ_1	pitch	-10.6551°
θ_2	roll	0.0361°
θ_3	yaw	32.1341°
ϕ	longitude	28.3961°E
η	latitude	40.9716°N
h	height	1290.0651km

그림 6. 전처리 이전의 미가공 영상.

그림 7. 방사학적 보정이 수행된 영상.

그림 8. 방사학적 및 기하학적 보정을 수행한 후 위도 및 경도 좌표계로 투영한 영상.

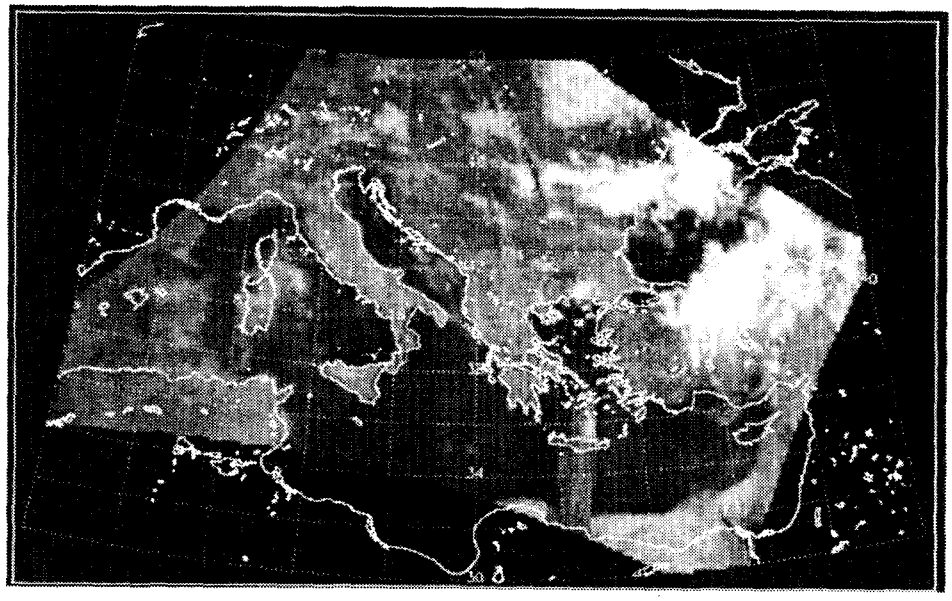

그림 9. 전처리 과정을 수행한 후 TM 좌표계로 투영하여 지도와 비교한 영상.

이 영상이 촬영될때 위성의 지향 오차는 식 (25)를 통해 약 10.7°로 계산되었다. Mercator 도법의 지도에 보정된 영상을 투영한 결과를 그림 9에서 볼 수 있다. 그림에서 흰색선은 지도에서의 해안선이다.

5. 결 론

우리별 1호의 CCD 지구 관측 실험 장치는 저가격의 위성체와 카메라를 이용한 지표면 관측의 많은 가능성을 보여주었다. 지구 관측 실험 장치는 때로는 비정상적인 현상을 보이기도 했지만 원격 탐사 응용을 위해서 처리 및 분석에 이용될 수 있는 적절한 화질과 구름이 덮힌 지역이 적은 많은 영상들을 얻었다.

전처리는 다양한 영상 응용 연구를 위해 반드시 필요한 과정이다. 이 논문에서는 우리별 1호의 영상에 내재한 방사학적 및 기하학적 변형을 분석하고 이러한 변형들을 제거하는 전처리 과정을 언급하였다. 개발된 전처리 과정은 우리별 1호 영상을 보정하는데 뛰어난 성능을 보이며 다른 원격 탐사 위성에서 촬영한 영상의 전처리 과정을 개발하는 기반으로 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

Barrett, E. C. & Curtis, L. F. 1982, Introduction to Environmental Remote Sensing 2nd Ed. (Chapman and Hall Ltd.), p.129

Curran, P. J. 1985, Principles of Remote Sensing, John Wiley & Sons Inc.

Hughes, P. C. 1986, Spacecraft Attitude Dynamics (John Wiley & Sons: New York), p.9

Kim, S. K., Sung D. K. & Choi, S. D. 1992, A Korean Experimental Microsatellite - KITSAT-1 System, AP-MCSTA

Lee, I., Sung, D. K. & Choi, S. D. 1993, Multimissional Experimental Microsatellites-KITSAT Series, the 7th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, USA

Mather, P. M. 1987, Computer Processing of Remote Sensed Images (An Introduction), John Wiley & Sons

SPOT Image 1988, SPOT Users Handbook - Volume 1 Reference Manual, CNES and SPOT Image

Ward, J. 1991, The AMSAT Journal, 14, 1

Yoo, S. K. 1992, Camera Head, SaTReC Internal Document, 6A-CAM (SaTReC: Taejon)

Yoo, S. K., Lee, S. R., Kim, H. J., Lim, H. J., Lee, H. S., Sung, D. K. & Choi, S. D. 1994, The KITSAT-2 CCD Earth Imaging System Experiment, European Symposium on Satellite Remote Sensing, Rome