

NOAA/AVHRR 영상의 기하학적 보정

서명석·신경섭·박경윤
한국과학기술연구원 시스템공학센터
(1990년 1월 15일 받음; 1990년 2월 20일 수리)

Geometric Correction of the NOAA/AVHRR Imagery

Myung-Suk Suh, Kyung-Sup Shin and J. Kyoungyoon Park
System Engineering Research Institute
Korea Institute of Science and Technology
(Received January 15, 1990; Accepted February 20, 1990)

Abstract

Methods of geometric correction for the Advanced Very High Resolution Radiometer imagery of NOAA satellites were developed and applied to the software for image processing of meteorological satellite data. The software for finding the earth location of each scan position and the software for gridding on original imagery were designed. On the assumption of circular orbits and the spherical earth, the methods developed were sufficiently accurate in the purpose of most meteorological data analyses.

1. 서 론

위성에서 지구를 관측할 때 지구의 곡률, 위성의 공전 속도, 지구 자전 및 센서(sensor)의 관측 각도 등의 복합적인 요인에 의하여 위성에 관측되는 영상은 실제 지도면상에 투사되는 영상과 다르게 나타난다. 이러한 기하학적 왜곡(geometric distortion)을 실제 영상으로 복원시키는 과정이 기하학적 보정(geometric correction)이며, 위성 영상 분석에 꼭 필요한 단계이다.

정확한 기하학적 보정을 하려면 순간순간 관측지점의 정확한 위치를 알아야 하며 이를 위하여 위성의 궤도 요소, 센서의 주사(scanning) 방법, 위성의 자세(attitude) 변화에 대한 정

보가 필요하다. 이들 요소들은 지구 중력장의 복잡성, 대기 마찰, 해와 달의 인력의 변화, 태양풍(solar wind)의 효과 등으로 작은 값이지만 시시각각 복잡하게 변한다. 따라서 완전한 의미의 기하학적 보정은 불가능하며, 영상 분석의 목적 및 대상에 따라 요구되는 정확도 범위 내에서 단순화하여 보정한다. 즉, NOAA 위성의 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)처럼 수 천 km의 폭을 1km의 화소(pixel) 크기로 관측하는 경우 수 km의 오차는 충분히 무시될 수 있는 반면, 같은 오차라도 수백 km 범위를 화소의 크기 30~80m로 관측하는 자원탐사위성인 Landsat이나 SPOT의 경우 중대한 오차가 된다.

본 연구의 목적은 NOAA/AVHRR 영상의 기하학적 보정 방법을 자체 개발하고, 이를 software(S/W)화하는 데 있다. AVHRR 영상의 기하학적 보정 방법은 Brush(1985, 1987), Brunel and Marsouin(1987), Emery et al.(1989) 등에 의해 제시되었다. 국내에서는 도입된 시스템 내에 기하학적 보정 S/W가 내재되어 있어 이 분야에 대한 자체연구가 소홀했으며 이회훈, 서애숙(1987)에 의해 개략만 소개되었을 뿐이다.

본 연구에서는 기상학적인 측면에서 요구되는 정확도를 고려하고 또 PC/AT(or 386)급에서의 실시간 분석 차원에서 보정시간을 단축하고자, 위성의 궤도를 원으로 또 지구를 구로 가정하여 보정방법을 개발하였다. 실제로 NOAA 위성궤도의 이심률은 0.001527, 지구의 이심률은 0.003367로 거의 원에 가깝다고 볼 수가 있다. 또한, NOAA 위성의 자세 정확도는 0.1°C 내외이고(Schwab 1978), 이로 인하여 위성직하점 부근에서는 1.45km, 주사각의 외곽에서는 8.85km 정도까지 오차가 생길 수 있으나(최규홍 외 1989) 본 연구에서 목적하는 정확도에는 크게 영향을 주지 않으리라 생각된다.

최근 위성 영상 자료의 응용이 여러 분야에 확대되는 추세에 따라, 국내 여러 기관에서 위성 자료 수신 및 분석 시스템이 도입되어 운영 중에 있다. 이들 시스템은 100% 외국 기술에 의해 만들어져, 앞으로 운영상에 있어 계속 외국 기술에 의존해야 하는 문제점이 있다. 따라서 외국 기술 의존도를 줄이고 나아가 시스템 국산화를 위한 국내 자체 기술 개발의 첫 단계로서 본 연구의 중요성이 있겠다.

2. NOAA/AVHRR 영상의 기하학적 보정

1) 주사각에 따른 화소의 위치

본 절에서는 위성의 각 주사위치를 지구상에서의 위치로 계산하는 방법, 즉 주사시각(t), 주사각도(α), 적도통과 경도(λ_0) 자료로부터 각 주사점의 위도(ϕ)와 경도(λ)를 결정하는 방법을 소개하겠다. 기하학적 보정의 첫 단계로, 주어진 시각의 정확한 위성 직하점(satellite subpoint)의 계산이 필요하다. 원 궤도를 도는 위성의 직하점의 위도(ϕ_s)와 경도(λ_s)는, 구면

삼각형 법칙에 의하여 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} \phi_s &= \sin^{-1}[\sin i \sin((\Theta + \theta)\Delta t)] \\ \lambda_s &= \tan^{-1}[\cos i \tan((\Theta + \theta)\Delta t)] - (\Omega - \omega)\Delta t + \lambda_0 \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

여기서 i 는 위성의 inclination, Ω 는 지구의 자전 각속도(7.292×10^{-5} rad/sec), Δt 는 적도를 통과한 후의 시간으로 AVHRR은 1초에 6 line을 주사한다. 원 궤도의 경우 위성의 perturbed mean angular velocity (θ)는

$$\theta = (\mu/r^3)^{1/2} \left[1 + 1.5J_2 \frac{a^2}{r^2} (1 - 5 \sin^2 i) \right] \quad (\text{rad/sec})$$

으로 $r = (a + h)$ (a : 지구 반경, h : 위성 고도), $\mu = 398601.2 \text{ km}^3 \text{ s}^{-2}$ (gravitational constant of the earth)이다.

한편, 위도에 따른 지구 중력장의 변화에 의해 위성궤도는 세차운동(precession)을 하게 되는데, 궤도면에 대한 세차운동의 각속도(θ)와 적도면에 대한 세차운동의 각속도(ω)는 다음과 같다.

$$\theta = 1.5 J_2 \frac{a^2}{r^2} \Theta (2 - 2.5 \sin^2 i) \quad (\text{rad/sec})$$

$$\omega = -1.5 J_2 \frac{a^2}{r^2} \Theta \cos i \quad (\text{rad/sec})$$

여기서 지구 중력 변화의 1차 보정항인 $1.5J_2$ 은 1.6238235×10^{-3} 으로 단위가 없는 상수항이다 [Brooks(1977), Shin and North(1988) 참고].

위에서 보는 바와 같이, 원 궤도의 경우 3가지 궤도 요소 Θ, θ, ω 가 모두 inclination (i)과 고도(h)만의 함수가 된다. 따라서 주어진 i 와 h 에 대하여 적도 통과 경도(λ_0)를 알면, 그 이후의 시각에 대한 위성 직하점의 위도, 경도를 식(1)에 의하여 계산할 수 있다.

AVHRR은 위성 직하점에서 위성 궤도에 직각으로 1/6초 동안에 $\pm 55.4^\circ$ 를 주사하여 2048 화소(pixel)에 대하여 관측한다. 따라서 기하학적 보정을 위하여 위성직하점에서 위성 궤도면과 경도(또는 위도)선과의 경사각(r)을 알아야 한다. 구면 삼각형 법칙으로부터 위성궤도와 경도선이 이루는 각 r (Fig. 1)은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\sin r = -\frac{\cos i}{\cos \phi_s} \dots\dots\dots (2)$$

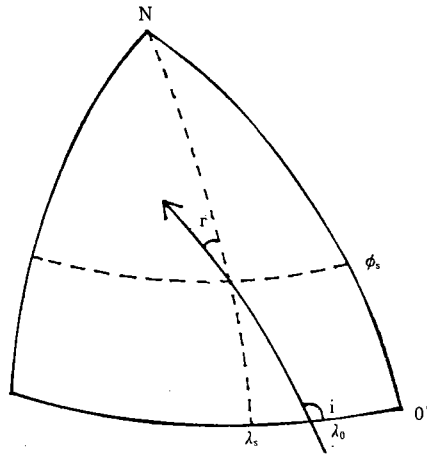


Fig. 1. Inclination angle(i) and slope(γ) of polar orbit satellite path.

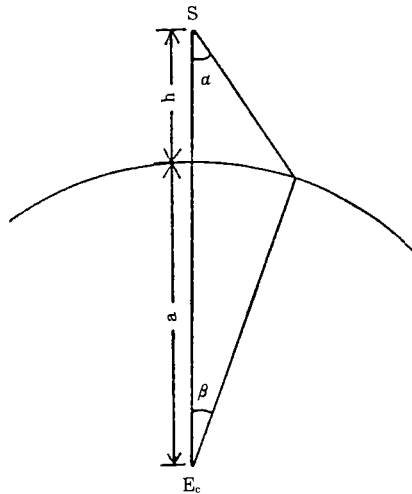


Fig. 2. Relationship between the scan angle(α) and geocentric angle(β).

위성직하점(ϕ_s, λ_s)과 궤도경사각(γ)을 구하면 구면체에서의 좌표계 변환에 의하여 각 화소의 위치를 계산할 수 있다. 먼저, Fig. 2는 위성이 지표면을 주사할 때 주사각(α)과 지심각(β)의 관계를 나타낸 것으로 지심각 β 는 삼각형의 sine 법칙에 의해 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\beta = \sin^{-1}\left(\frac{a+h}{a}\sin \alpha\right) - \alpha \dots\dots\dots (3)$$

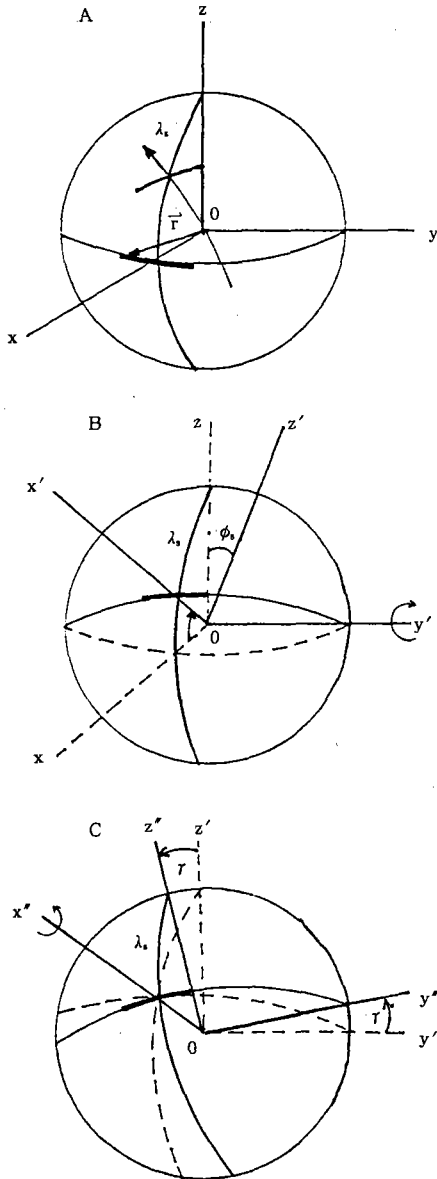


Fig. 3. Processes of Euler angle transformation for the geometric correction.

각 화소의 위치는 Fig. 3의 A와 같이 위성이 적도를 따라 주사한다고 가상할 경우 직각 좌표계에서 $r=(x, y, z)=(a \cos \beta, a \sin \beta, 0)$ 이 된다(단, r 은 column vector 이다). 다음 Fig. 3의 B와 C에서와 같이 위성직하점이 (ϕ_s, λ_s) 에 위치하였을 때, y 축에 대해서 $-\phi_s$ 만큼, x 축에 대해서 $-\gamma$ 만큼 좌표축을 회전하였을 경우 좌표축의 변환행렬식(transform matrix)은 각각

$$P_y(-\phi_s) = \begin{pmatrix} \cos \phi_s & 0 & -\sin \phi_s \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi_s & 0 & \cos \phi_s \end{pmatrix} \quad P_x(-\gamma) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}$$

이며, 종합적으로

$$P = P_y P_x = \begin{pmatrix} \cos \phi_s & -\sin \phi_s \sin \gamma & -\sin \phi_s \cos \gamma \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ \sin \phi_s & \cos \phi_s \sin \gamma & \cos \phi_s \cos \gamma \end{pmatrix}$$

이 된다. 따라서 각 화소의 위치는 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \vec{r}' = P\vec{r} = & a(\cos \phi_s \cos \beta - \sin \phi_s \sin \gamma \sin \beta) \hat{x} \\ & + a(\cos \gamma \sin \beta) \hat{y} \\ & + a(\sin \phi_s \cos \beta + \cos \phi_s \sin \gamma \sin \beta) \hat{z} \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

이를 다시 지구좌표계로 바꾸면 각 화소의 위도, 경도를 계산할 수 있다. Descending node 에 대하여는 γ 대신 $\pi - \gamma$ 를 적용하면 된다.

2) 화소의 주사위치

앞 절에서는 주사위치에 따른 각 화소의 지구상에서의 위치를 계산하였으나, 역으로 지구상의 임의의 위치를 관측하게 되는 주사위치를 결정하는 것도 중요하다. 즉, 임의의 지구상의 위치 (ϕ, λ) 를 (t, α) 의 좌표로 고치는 과정으로, 이는 기하학적 보정을 하지 않은 original 영상에 해안선 지도 및 위·경도선을 삽입하여 영상위치를 결정하는 데 특히 도움이 된다.

본 연구에서는 Brush(1985)에 의해 소개된 방법에 따라 S/W를 개발하였다. Fig. 4에서와 같이 적도에서 경도 $\lambda_0(E)$ 를 통과한 위성이 위성직하점 $S(\phi_s, \lambda_s)$ 에서 위성궤도에 직각으로 P (ϕ, λ) 점을 주사각 α (지심각 β)로 관측하였을 때, 다음 순서에 따라 P점을 지나는 주사위치를 결정할 수 있다.

만일 지구가 자전하지 않는다고 가정하면 구면삼각형 NPE에서 구면삼각형의 sine법칙으로부터

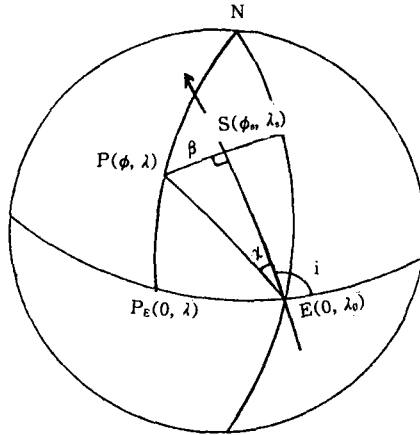


Fig. 4. Navigation along a satellite scan line.

$$\frac{\sin (\chi+i-\pi / 2)}{\sin NP}=\frac{\sin \left(\lambda_0-\lambda\right)}{\sin PE}$$

$\sin NP=\cos \phi$, $\cos NP=\sin \phi$ 이므로

$$\sin PE=\frac{\sin \left(\lambda_0-\lambda\right) \cos \phi}{\sin \left(\chi+i-\pi / 2\right)} \dots\dots\dots (5)$$

또, 구면삼각형의 cosine 법칙으로부터

$$\begin{aligned} \cos NP &= \cos NE \cos PE + \sin NE \sin PE \cos (\chi+i-\pi / 2) \\ &= \sin PE \cos (\chi+i-\pi / 2) \dots\dots\dots (6) \end{aligned}$$

식 (5)와 (6)을 합치면

$$\tan (\chi+i-\pi / 2)=\sin \left(\lambda_0-\lambda\right) / \tan \phi \dots\dots\dots (7)$$

따라서 주어진 (ϕ, λ) 와 λ_0 에 대하여 χ 를 식 (7)에 의하여 구할 수 있다. 다음, 구면삼각형 PSE로부터

$$\begin{aligned} \tan \beta &= \sin SE \tan \chi = \sin((\Theta + \theta)\Delta t) \tan \chi \\ \cos((\Theta + \theta)\Delta t) &= \sqrt{1 - \tan^2 \beta / \tan^2 \chi} \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

구면삼각형 PPE로부터 cosine 법칙에 의하여

$$\begin{aligned} \cos PE &= \cos P_E P \cos P_E E + \sin P_E P \sin P_E E \cos(\pi/2) \\ &= \cos \phi \cos(\lambda_0 - \lambda) \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

마찬가지로 구면삼각형 PSE로부터

$$\begin{aligned} \cos PE &= \cos PS \cos SE + \sin PS \sin SE \cos(\pi/2) \\ &= \cos \beta \cos[(\Theta + \theta)\Delta t] \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

식 (8), (9), (10)로부터

$$\begin{aligned} \cos \phi \cos(\lambda_0 - \lambda) &= \cos \beta \cos[(\Theta + \theta)\Delta t] \\ &= \cos \beta \sqrt{1 - \tan^2 \beta / \tan^2 \chi} \end{aligned}$$

양변을 제곱하여 정리하면

$$\begin{aligned} \sin^2 \beta (1 + \cot^2 \chi) &= 1 - \cos^2 \phi \cos^2(\lambda_0 - \lambda) \\ \sin \beta &= \sqrt{\frac{1 - \cos^2 \phi \cos^2(\lambda_0 - \lambda)}{1 + \cot^2 \chi}} \\ &= \sin \chi \sqrt{1 - \cos^2 \phi \cos^2(\lambda_0 - \lambda)} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

식 (7)과 (11)을 이용하여 지심각 β 를 구하고 이를 (8)에 대입하면 시간 Δt 를 구할 수 있다. 지금까지는 지구가 자전을 하지 않는 경우에 대하여 계산하였으나 지구 자전의 효과를 고려하여야 한다. 지구 자전의 효과는 λ 에만 영향을 주므로(ϕ 에는 영향이 없음) 식 (8)에 의하여 계산된 Δt 를 이용하여 $\lambda^* = \lambda - (\Omega - \omega)\Delta t$ 로 보정하고 λ^* 를 λ 대신 식 (7)과 (11)에 적용하여 지심각 β 를 구하고 식 (8)을 이용하여 다시 Δt 를 구하면 지구 자전의 효과를 고려할 수 있다. 지심각 β 를 알면 주사각 α 를 식 (2)로부터 계산할 수 있다.

Descending node의 경우는 식 (7)과 (11)에서 $(\lambda_0 - \lambda)$ 를 $(\lambda - \lambda_0)$ 로 바꾸고 λ_0 를 descending node의 적도 통과 경도를 사용하면 된다. 또 지구 자전의 효과는 $\lambda^* = \lambda + (\Omega - \omega)\Delta t$ 로 보정하

여 ascending node와 같은 순서에 의해 계산하면 된다.

3. 기하학적 보정 S/W

앞 장에서 살펴본 바와 같은 방법에 의하여 NOAA/AVHRR 영상의 기하학적 보정 및 gridding S/W를 개발하여 본 팀에서 개발 중인 기상위성 영상 분석 workstation(W/S)에 적용하였다. 개발된 S/W는 PC/AT(or PC/386)와 Number 9 graphics board를 이용하여 영상처리할 수 있도록 하였다. 이 board는 1280×1024 pixel resolution과 8 bit의 영상처리 기능을 갖고 있어 NOAA/AVHRR 영상처리에 적당하다고 생각된다.

기하학적 보정 S/W는 각 화소의 정확한 위치(위도, 경도)를 구한 후 여러 가지 투영기법(Mercator, polar stereographic, conformal conic)에 의하여 영상처리를 할 수 있도록 하였으며, 투영기법은 사용자가 필요에 따라 선택할 수 있도록 하였다.

매 화소에 대하여 위도, 경도를 계산할 경우 PC/AT에서 기하학적 보정에서 영상처리까지 약 2시간 이상이 소요되어 실용화에 문제점이 있다. 이를 극복하기 위하여 다음의 방법을 사용하였다. 즉, 원궤도와 구형 지구의 경우 AVHRR에서 주사각 α (지심각 β)로 관측한 화소의 위치는 식 (4)에서 보는 바와 같이 ϕ_s 와 r 만의 함수이고 r , 또한 ϕ_s 의 함수이다(식 (2)). 따라서 각 주사각에 따른 화소의 위치는 주어진 위성 궤도(h, i)에 대하여 적도통과 후의 시간(Δt)과 적도 통과 경도만의 함수가 된다(식 (1)~(4) 참고). 본 연구에서는 위성의 적도 통과 경도를 135°E(이하 기준경도라 함)로 정하여 각 주사선에서 매 20번째 화소에 대하여 위도와 경도를 미리 계산하여 이를 look-up-table로 만든 후 화일로 저장하였다. 서로 다른 경로를 지나가는 위성에서 각 화소의 위치는 기준 경도에 대하여 위도는 동일하고 경도만이 차이가 있고, 이 차이는 적도 통과 경도와 기준 경도의 차이로 조절할 수 있다. 따라서 각 화소의 위치는 이들 기준 화소의 위도·경도 화일로부터 기준경도와 적도 통과 경도차를 더한 후 선형내삽하여 계산하였으며 이 때 적도 통과 경도는 TBUS 전문으로부터 입력하게 하였다. 이 결과 PC/AT에서 약 20분이면 영상처리까지 할 수 있었으며 look-up-table은 NOAA-9, -10, -11에 대하여 내장하였다.

Gridding S/W는 original AVHRR 영상에 해안선 및 위·경도선을 그려 넣음으로써 지표면 상에서 각 화소의 위치와 값을 정확히 알 수 있게 하는 것이다. S/W는 위도, 경도 값을 관측시각(t)과 주사각(α)으로 바꾸어 주는 부분, (t, α)를 화면 좌표계로 바꾸어 주는 부분 및 영상처리 부분으로 구성되어 있다. 앞 절에서와 같이 적도 통과 경도는 TBUS 전문에서 구하여 입력한다.

AVHRR original 영상에 해안선과 5° 간격의 위·경도선을 gridding한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5a는 ascending 궤도에 대한 영상, Fig. 5b는 descending 궤도에 대한 영상에

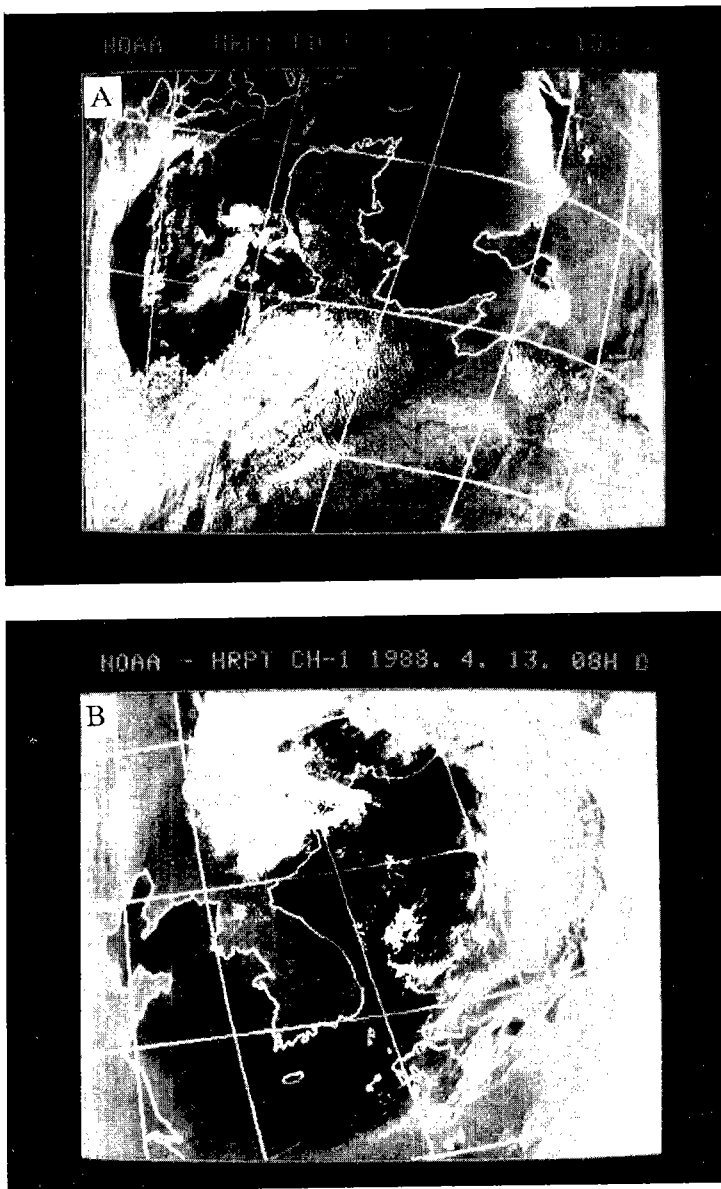


Fig. 5. Results of gridding on original NOAA/AVHRR channel-1 imagery, A: for ascending, B: for descending orbit. A and B are at 1530 LST 14 and 0820 LST 13 March 1988, respectively.

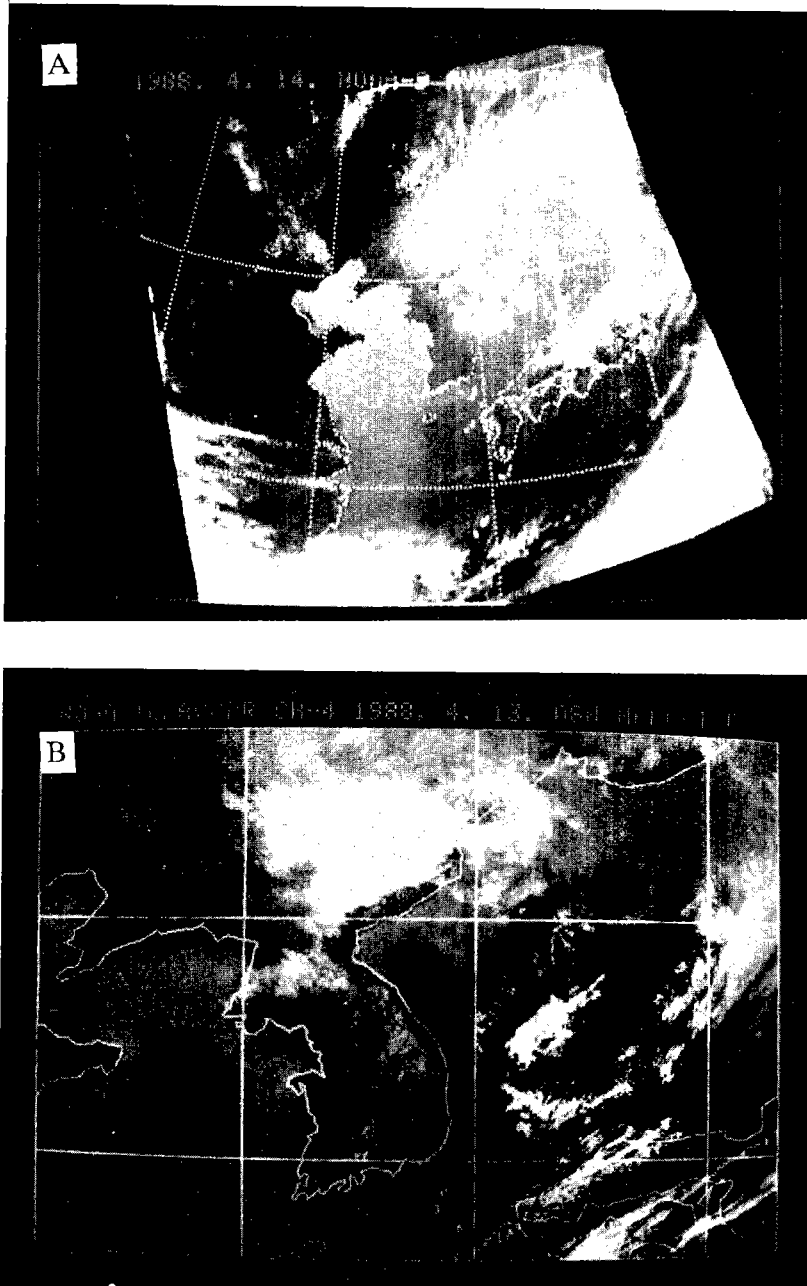


Fig. 6. Results of geometric correction on the channel-4 imagery of the Fig. 5.

gridding한 것이다. Fig. 5a의 경우 위성의 궤도가 ascending이기 때문에 영상이 거꾸로 나타나 있다.

기하학적 보정 S/W에 의하여 보정한 후 영상처리한 결과에 해안선을 삽입한 영상화면의 예를 Fig. 6에 제시하였다. 여기서 Fig. 6a는 Fig. 5a를, Fig. 6b는 Fig. 5b를 기하학적 보정을 하여 영상처리한 것이며 영상처리는 본 팀에서 개발한 KMIPS(KIST Micro-computer Image Processing System)를 사용하였다. Fig. 5와 6에 예시된 영상자료에서 오차의 크기가 1~2pixel(2~4km) 정도임을 볼 수 있다. 위의 결과로부터 본 연구에서 개발한 기하학적 보정 및 gridding S/W는 종관기상학적 또는 광역의 해수면온도 산출 측면에서 충분히 활용될 수 있다고 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 NOAA/AVHRR 위성영상의 기하학적 보정 방법에 대하여 연구하였다. 결과로 original 영상의 gridding S/W와 기하학적 보정 S/W를 자체 개발하여 개발 중인 기상위성 영상분석 W/S에 응용하였다. NOAA 위성의 궤도를 원으로 또 지구를 완전한 구로 가정하여 개발된 S/W는 기상학적인 측면에서 충분한 정확도를 가지고 사용할 수 있다고 사료된다. 따라서 NOAA 위성의 실제 타원 궤도와 지구타원체는 기하학적 보정 측면에서 10km 이내의 허용오차의 경우 충분히 무시될 수 있다.

본 연구에서 개발한 기하학적 보정 S/W는 NOAA/AVHRR에 국한하였지만 이론적으로 모든 극궤도 위성에 장치된 cross-scanning 센서에 대하여 응용될 수 있다. 하지만 좁은 지역 내에 수 km 내의 정확도가 요구되는 분야에 대하여는 지구 타원체와 타원 궤도, 그리고 자세변화를 고려하여야 하겠다.

사 사

본 연구를 수행하는 과정에서 많은 도움말을 주신 최규홍 교수님, 또 해안선의 전산입력 자료를 제공해 준 이완호 연구원께 감사를 드립니다. 본 연구는 과학기술처 특정연구 과제로 수행 중인 “기상위성자료 응용기술 개발 연구”의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- Brooks, D. R., 1977: An introduction to orbit dynamics and its application to satellite based earth monitoring missions. *NASA Ref. Publication 1009*, Washington, DC, p.80.
- Brunel, P. and A. Marsouin, 1987: An operational method using Argos orbital elements for navigation of AVHRR imagery, *Intl. J. Rem. Sens.*, **8**, 569–578.
- Brush R. J., 1985: A method for real-time navigation of AVHRR imagery, *IEEE Trans. Geo. Rem. Sens.*, GE-23, 876–887.
- _____, 1987: The navigation of AVHRR imagery, *Intl. J. Rem. Sens.*, **9**, 1491–1502.
- Emery, W. J., J. Brown, and Z. P. Nowak, 1989: AVHRR image navigation: Summary and review, *Photogram. Engineering Rem. Sens.*, **55**, 1175–1183.
- Schwalb, A., 1978: TIROS-N/NOAA A-G Satellite series, *NOAA TM-NESS-95*, Washington, DC.
- Shin, K. -S. and G. R. North, 1988: Sampling error study for rainfall estimate by satellite using a stochastic model, *J. Appl. Meteor.*, **27**, 1218–1231.
- 이희훈, 서애숙, 1987: 극궤도 기상위성 NOAA-9호의 AVHRR CH4 data로부터 해수면 온도 산출과정에 관한 연구, 대한원격탐사학회지, 제3권, 41–54.
- 최규홍, 김경미, 최용석, 최윤정 외, 1989: 기상위성자료 응용기술 개발 연구(II), III. 기상위성 궤도자료분석 및 영상자료 투영기법의 개발, 과학기술처 특정연구 개발사업보고서, p.43.