

위성 설계·제작 및 운용 정보를 반영한 영상 품질 시뮬레이션 기법 연구

조현기[†] · 김기현 · 최세철 · 이승근 · 김종민

국방과학연구소 영상정보체계개발단 연구원

A Study on the Simulation Method of Satellite Image Quality Considered Design, Manufacturing and Operation

Jo, Hyun Gee[†], Kim, Ki Hyun, Choi, Sae Chul, Lee, Seung Keun, and Kim Jong-Min

Image Information Program Executive Office

Abstract : Satellite performance can be evaluated by image quality. MTF(Modulation Transfer Function), SNR(Signal To Noise Ratio), GSD(Ground Sample Distance) etc. are important bias parameters to analyze image quality. It is necessary to estimate quality of satellite image in design stage.

In this paper, the simulating method of satellite image quality, considering design, manufacturing, and operation, is proposed. The proposed method shall be used to estimate and restore quality of satellite image.

Key Words : Satellite, Image quality, Simulation, MTF, SNR, GSD.

요약 : 위성의 성능은 위성의 최종생산물인 위성 영상 품질에 의해 평가된다. 위성 영상의 품질을 평가하는 요소로는 광학적요소인 변조 전달함수(Modulation Transfer Function : MTF), 신호대잡음비(Signal To Noise Ratio : SNR), 기하학적 요소인 해상도(Ground Sample Distance : GSD) 등이 있으며, 위성의 설계 단계에서 위성의 설계 및 제작, 관측 및 운용 환경을 반영하여 위성 영상의 품질을 예측하는 것은 필수적이다.

본 연구에서는 위성의 설계 단계에서 위성 설계 및 운용 조건을 반영한 영상 품질 시뮬레이션 방법을 제시한다. 본 연구의 결과를 통해 위성의 설계 시 영상 품질 예측에 활용 될 수 있으며, 수신된 영상의 화질 개선 연구에 활용될 것으로 기대된다. 또한 항공 영상의 품질 시뮬레이션에 확대 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서 론

섭, 2005).

위성의 설계 단계에서 위성의 설계 및 제작, 관측 및 운용 환경을 반영하여 위성 영상의 품질을 예측하는 것은 필수적이다. 때문에 본 연구에서는 위성의 설계 단계에서 위성 설계 및 운용 조건을 반영하여 영상 품질 시뮬레이션 방법을 제시하는 것을 목적으로 한다.

위성의 성능은 위성의 최종생산물인 위성영상의 품질에 의해 평가된다. 위성 영상의 품질을 평가하는 요소로는 광학적요소인 변조 전달함수(MTF), 신호대잡음비(SNR), 기하학적 요소인 해상도(GSD) 등이 있다(김희

접수일(2008년 11월 13일), 수정일(1차 : 11월 22일), 게재확정일(2008년 12월 17일).

[†]교신저자: 조현기(hgjo@add.re.kr)

MTF 성능을 반영하여 위성영상 품질 시뮬레이션을 수행한 기존 연구로는 신재민 외(2004), 김희섭 외(2005) 등이 있다. 본 연구에서는 MTF 성능뿐만 아니라, 세부적인 Noise 요소, 위성의 궤도 및 자세 그리고 지구의 자전을 고려한 기하학적 품질 분석 및 위성에서 지상수신국으로 데이터를 전송 시 수행하는 영상 압축 적용함으로써 보다 현실적인 위성영상 품질 시뮬레이션 방법을 제시한다.

본 연구에서 제시한 영상 품질 시뮬레이션은 위성의 설계 시 활용 될 수 있으며, 수신된 영상의 화질 개선 연구에 대한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

본론에서는 영상 품질 시뮬레이션 프로세스에 대한 개요 및 각 시뮬레이션 단계에 대한 구체적인 방법을 제시하였으며, 결론에서는 시뮬레이션 결과 고찰 및 향후 연구 과제를 도출하였다.

2. 본 론

1) 영상 품질 시뮬레이션

본 연구의 영상 품질 시뮬레이션 프로세스는 4단계로 수행되며, 그림 1과 같다. 먼저 1단계에서는 영상에 MTF 성능을 반영한다. 다음 2단계에서는 영상에 Noise를 적용한다. 3단계에서는 위성의 궤도 및 자세 그리고 지구의 자전을 반영한 기하 품질 시뮬레이션을 수행한다. 끝으로 4단계에서는 웨이블렛 압축을 수행한다.

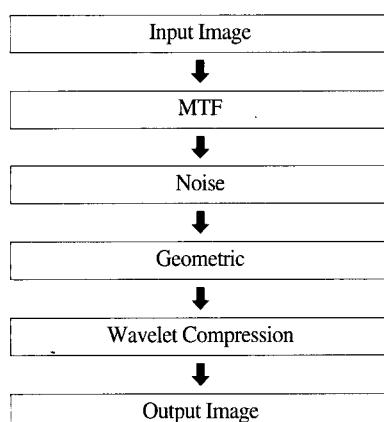


Fig. 1. Process of image quality simulation.

2) MTF 시뮬레이션

MTF는 위성 영상의 품질 지표로서, 위성영상의 선명도를 결정하는 주요 인자이다. MTF 성능은 주로 위성 탑재체의 설계 및 제작 영향을 받으며, 부분적으로 위성 본체의 성능 및 관측 조건에 영향을 받는다. MTF 시뮬레이션 프로세스는 먼저 2차원 주파수 행렬을 생성한다. 다음 MTF 계산을 수행한다. 계산된 MTF 결과는 역푸리에 변환을 통해 PSF 행렬로 변환된다. 변환된 PSF 행렬을 통해 Convolution Kernel을 생성하고, Convolution 과정을 수행한다. MTF 시뮬레이션 프로세스는 그림 2와 같다.

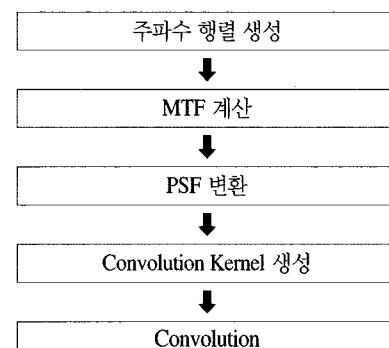


Fig. 2. Process of MTF simulation.

(1) 주파수 행렬 생성

MTF를 영상에 적용하기 위하여 먼저 2차원 주파수 행렬을 생성한다. 2차원 주파수 행렬의 특징은 중심 주파수 값이 0이고, 중심에서 동일한 거리에 위치한 지점의 주파수 값이 동일하다. 주파수 행렬의 크기는 Nyquist 주파수($f_{nyquist}$)와 관측 가능한 최대 주파수(f_{max})에 의해 결정된다(김희섭 외, 2005). 본 연구에서는 11×11 크기의 주파수 행렬을 사용하였다. 보다 정확한 MTF 적용을 위하여 위성의 진행 방향 성분 2차원 주파수 행렬(f_y) 및 위성의 진행 방향에 수직인 방향 성분 2차원 주파수 행렬(f_x), 이들을 통합한 2차원 주파수 행렬(f_{xy})을 생성한다. 2차원 주파수 행렬 생성 식은 다음과 같다.

$$f_x(i,j) = \frac{f_{max}}{TN-1} \times (j - \frac{TN+1}{2}) \quad (1)$$

$$f_y(i,j) = \frac{f_{\max}}{\frac{TN-1}{2}} \times \left(j - \frac{TN+1}{2}\right) \quad (2)$$

$$f_{xy}(i,j) = \sqrt{f_x(i,j)^2 + f_y(i,j)^2} \quad (3)$$

여기서, TN 은 주파수 행렬의 크기이며, 홀수 값을 갖는다.

(2) MTF 계산

생성한 2차원 주파수 행렬에 대해 위성의 설계 및 제작 조건을 반영한 MTF를 계산한다. 본 연구에 적용한 MTF는 다음과 그림 3과 같다.

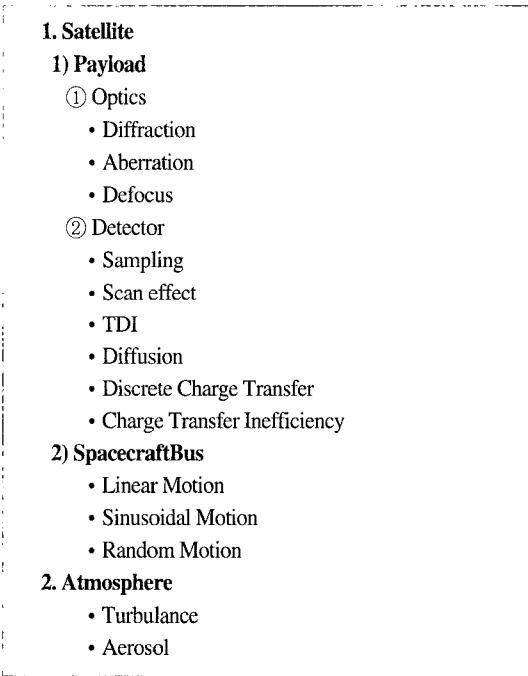


Fig. 3. Classification of MTF.

① 광학계 (Optics)

광학계 MTF는 광학계의 결상 과정에서 발생하는 물체 신호의 변형에 의해 발생하는 영상 선명도 저하를 나타낸다.

①-1 Diffraction MTF

유한 크기의 렌즈의 특성으로 인해 회절현상이 발생하며 이는 영상 품질 저하를 유발한다. 회절 MTF는 중앙 흐름(Central obscuration)이 존재하는 경우와 존재하지 않는 경우로 분류되며 아래의 식(4)~(17)에 의해 회절 MTF 계산을 수행한다.

- Obscuration ($obs > 0$)

$v \leq 1$ 이면,

$$MTF_{diff} = \frac{2}{\pi} \times [\cos^{-1}(v) - v \times \sqrt{(1-v^2)}] \quad (4)$$

$v > 1$ 이면,

$$MTF_{diff} = 0 \quad (5)$$

여기서,

v : f 를 optical cutoff frequency (f_o)로 나눈 값

f : Spatial frequency

- Obscuration ($obs < 0$)

$$MTF_{diff} = \frac{(A + B + C)}{(1 - obs^2)} \quad (6)$$

여기서,

obs (차단비): 차단지름을 광학계 지름으로 나눈 값

$0 \leq v < 1$ 이면,

$$A = \frac{2}{\pi} \times (\cos^{-1}(v) - v \times \sqrt{(1-v^2)}) \quad (7)$$

$v > 1$ 이면, $A = 0$ (8)

$$\frac{v}{obs} > 1 \text{ 이면, } B = 0 \quad (9)$$

$\frac{v}{obs} \leq 1$ 이면,

$$B = 2 \times \frac{obs^2}{\pi} \times (\cos^{-1} \frac{v}{obs} - \frac{v}{obs} \sqrt{1 - (\frac{v}{obs})^2}) \quad (10)$$

$$v > \frac{(1+obs)}{2} \text{ 이면, } C = 0 \quad (11)$$

$$0 \leq v < \frac{(1-obs)}{2} \text{ 이면, } C = -2 \times obs^2 \quad (12)$$

$$\frac{(1-obs)}{2} < v < \frac{(1+obs)}{2} \text{ 이면,}$$

$$C = T_1 + T_2 + T_3 \quad (13)$$

$$T_1 = \frac{(2 \times obs)}{\pi} \times \sin(\emptyset) + \frac{(1+obs^2)}{\pi} \times \emptyset \quad (14)$$

$$T_2 = \frac{(-2 \times (1 - obs^2))}{\pi} \times \tan^{-1} [\frac{1+obs}{1-obs} \times (\frac{\emptyset}{2})] \quad (15)$$

$$T_3 = -2 \times obs^2 \quad (16)$$

$$\emptyset = \cos^{-1} (\frac{1+obs^2 - 4 \times v^2}{2 \times obs}) \quad (17)$$

①-2 Aberration MTF

파장에 따라 광축을 벗어나 초점이 형성되어 영상 품질 저하를 유발한다. 수차 MTF는 아래의 식(18)~(19)를 통해 계산 된다.

$0 \leq v < 1$ 이면,

$$MTF_{abb} = 1 - \left(\frac{WFE}{0.18}\right)^2 \times \left(1 - 4 \times \left(v - \frac{1}{2}\right)^2\right) \quad (18)$$

$v > 1$ 이면, $MTF_{abb} = 0$ (19)

여기서,

v : f 를 optical cutoff frequency (f_o)로 나눈 값

WFE : Wave front Error

①-3 Defocus MTF

관측 대상이 depth of field 밖에 있는 경우 광학 경로 차이(Optical Path Difference)가 발생하고, 이는 비초점(Defocus) 현상을 가중시켜 영상의 품질 저하를 발생한다. 비초점 MTF는 아래의 식(20), (21)에 의해 계산 된다.

$D_l > 1$ 이면,

$$\begin{aligned} MTF_{def} &= 2 \times \frac{J_1(D_l)}{D_l} \\ &\approx 2 \times \left(\frac{1}{2} - \frac{D_l^2}{16} + \frac{D_l^4}{16} + \frac{D_l^4}{384} + \frac{D_l^6}{18432}\right) \quad (20) \end{aligned}$$

$D_l < 1$ 이면,

$$MTF_{def} = 1 \quad (21)$$

여기서,

$D_l = 8 \times \pi \times W_p \times v \times (1 - v)$

W_p : Defocus wave length

J_1 : First-order bessel function

v : f 를 optical cutoff frequency (f_o)로 나눈 값

② 검출기 (Detector)

검출기 MTF는 광영상이 CCD에 의해 전자신호로 변환하는 과정에서 CCD의 특성에 의한 영상 선명도 저하 정도를 나타낸다.

②-1 Sampling MTF

검출기 CCD의 크기 제한으로 인해 영상 품질 저하가

유발된다. 샘플링 MTF는 아래의 식(22)에 의해 계산된다.

$$MTF_{dec} = \text{sinc}(\pi \alpha f_x) = \frac{\sin(\pi \alpha f_x)}{\pi \alpha f_x} \quad (22)$$

여기서,

$$\alpha = DAS = \frac{1}{f_{dco}} = \frac{\text{detector size}}{\text{effective focal length}}$$

②-2 Scan MTF

Scanning을 수행하는 동안 위성의 움직임은 영상의 품질 저하를 유발한다. 스캔MTF는 다음의 식 (23)에 의해 계산된다(Holts, 2006).

$$MTF_{scan} = \frac{\sin(v \times t_{int} \times f_x)}{v \times t_{int} \times f_x} \quad (23)$$

여기서,

v : Scan 속도

t_{int} : 적분시간

②-3 TDI MTF

TDI(Time Delay and Integration)를 사용하는 경우, Scan 방향과 TDI의 Misalignment에 의해 영상의 품질 저하가 발생한다. TDI MTF는 다음의 식(24)에 의해 계산된다(Holts, 2006).

$$MTF_{TDO} = \frac{\sin(\pi \times N_{TDI} \times \alpha_{error} \times f)}{N_{TDI} \times \sin(\pi \times \alpha_{error} \times f)} \quad (24)$$

여기서,

N_{TDI} : TDI 수

α_{error} : Effective angular error

②-4 Diffusion MTF

빛의 확산(Diffusion) 현상으로 인해 영상의 품질 저하가 발생한다. 확산 MTF는 다음 식(25)~(29)에 의해 계산된다.

$$MTF_{diff} = \frac{A}{B} \quad (25)$$

$$\alpha = \frac{1.94861 \times 0.1^{15}}{(\lambda \times 0.1^3)^{5.71374}} \quad (26)$$

$$L = \frac{L_0}{\sqrt{1 + 4 \times \pi^2 \times (L_0 \times 0.1)^2 \times (f/100)^2}} \quad (27)$$

$$A = 1 - \frac{(1 + \alpha \times L)}{e^{\alpha \times L_{dep}}} \quad (28)$$

$$B = 1 - \frac{(1 + \alpha \times L_0)}{e^{\alpha \times L_{dep}}} \quad (29)$$

여기서,

λ : 파장

L_0 : Diffusion 길이

L_{dep} : Depletion width

②-5 Discrete Charge Transfer MTF

TDI를 사용하는 경우, 단계별 신호의 충전이 불연속 형태로 이루어짐으로써, 영상의 품질 저하를 발생한다. 불연속 충전 전달 MTF는 다음 식(30)에 의해 계산된다(김희섭, 2005).

$$MTF_{DCT} = \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \times \frac{f}{f_n} \times \frac{1}{n_\phi}\right)}{\frac{1}{2} \times \frac{f}{f_n} \times \frac{1}{n_\phi}} \quad (30)$$

여기서,

f_n : Nyquist Frequency

n_ϕ : Phase 개수

②-6 Charge Transfer Inefficiency MTF

TDI에 의해 신호의 충전의 비효율이 발생함으로써 영상의 품질저하를 발생한다. 충전 전달 비효율 MTF는 다음 식(31)~(35)에 의해 계산된다(김희섭, 2005).

$$MTF_{CTI} = \frac{1}{N \times (a^2 + b^2)} \times \sqrt{(c^2 + a^2)} \quad (31)$$

$$a = CTI \times (1 - \cos(\pi \times \frac{f}{f_n})) \quad (32)$$

$$b = CTI \times \sin(\pi \times \frac{f}{f_n}) \quad (33)$$

$$c = a - e^{-N \times a} \times [a \times \cos(N \times b) - b \times \sin(N \times b)] \quad (34)$$

$$d = b - e^{-N \times a} \times [a \times \sin(N \times b) + b \times \cos(N \times b)] \quad (35)$$

여기서,

CTI : Charge transfer inefficiency

N : Charge transfer 수

③ 위성기동 (Motion)

위성 기동 MTF는 광학계, 검출기와 함께 영상의 선명도를 저하시키는 주요 요인이다. 위성 궤도상에서 위성의 움직임과 위성 내부의 장치 및 우주 환경에 의해 발생하는 진동은 영상의 선명도 저하를 유발한다.

③-1 Linear Motion MTF

위성의 궤도상의 기동에 의해 영상의 선명도 저하가 발생하며, 선형 기동 MTF는 다음의 식(36)에 의해 계산된다.

$$MTF_{Linear} = \frac{\sin(\pi \alpha_{Linear} f_x)}{\pi \alpha_{Linear} f_x} \quad (36)$$

여기서,

$$\alpha_{Linear} = v_r \times t_{int}$$

v_r : relative angular velocity

t_{int} : 적분시간

③-2 Sinusoidal Motion MTF (Vibration)

진동에 의해 영상의 선명도 저하가 발생하며, 싸인 기동 MTF는 다음의 식(37)에 의해 계산된다.

$$MTF_{sin} = J_0(2\alpha_s \pi f) \quad (37)$$

여기서,

J_0 : Zero-order bessel function

③-3 Random Motion MTF (LOS Jitter)

LOS(Line of site) 진동에 의해 영상의 선명도 저하가 발생하며, 이는 가우시안 함수로 계산될 수 있다. 임의의 기동 MTF는 다음의 식(38)에 의해 계산된다.

$$MTF_{Jitter} = e^{-2 \times \pi^2 \times \sigma_{LOSjitter}^2 \times EFL^2 \times f^2} \quad (38)$$

여기서,

$\sigma_{LOSjitter}$: LOS Jitter로 인한 변위의 RMS

EFL : Effective Focal Length

④ 대기 (Atmosphere)

대기의 미세한 진동 및 에어로졸의 산란은 영상의 선명도 저하에 영향을 미친다.

④-1 Turbulence MTF

대기 입자의 미세한 진동으로 인해 영상의 선명도 저하를 발생시킨다. 난류 MTF는 다음의 식(40)을 통해 구할 수 있다.

$$MTF_{tur} = \exp[-57.44 \times f^{5/3} \times \lambda^{-1/3} \left\{ \int_0^R C_n^2(z) dz \right\}] \quad (40)$$

여기서,

λ : Wavelength

R : Range to target

④-2 Aerosol MTF

에어로졸에 의한 산란은 영상의 선명도 저하를 유발하며, 에어로졸 MTF는 다음의 식(41), (42)을 통해 구할 수 있다.

- $f \leq f_{aco}$ 이면,

$$MTF_{aero} = \exp[-kR - \sigma R \left(\frac{f_x}{f_{aco}} \right)] \quad (41)$$

- $f > f_{aco}$ 이면,

$$MTF_{aero} = \exp[-kR - \sigma R] \quad (42)$$

여기서,

$$f_{aco} = \frac{\alpha}{\lambda \times EFL}$$

α : Effective aerosol radius

EFL : Effective Focal Length

⑤ System MTF

앞에서 계산된 각각의 MTF는 다음의 식을 통해 시스템 MTF 행렬을 구한다.

$$MTF_{optics} = MTF_{diffraction} \cdot MTF_{aberration} \cdot MTF_{defocus} \quad (42)$$

$$MTF_{detector} = MTF_{sampling} \cdot MTF_{scan} \cdot MTF_{TDI} \cdot MTF_{Diffusion} \cdot MTF_{DCT} \cdot MTF_{CTI} \quad (43)$$

$$MTF_{motion} = MTF_{linear} \cdot MTF_{sinusoidal} \cdot MTF_{LOS Jitter} \quad (44)$$

$$MTF_{atmosphere} = MTF_{turbulence} \cdot MTF_{aerosol} \quad (45)$$

$$MTF_{system} = MTF_{optics} \cdot MTF_{detector} \cdot MTF_{motion} \cdot MTF_{atmosphere} \quad (46)$$

(3) PSF 행렬 생성 및 Convolution

앞에서 계산된 시스템 MTF 행렬에 대해 역푸리에 변환을 적용하면 PSF 행렬이 생성된다. 일반적으로 역푸리에 변환을 수행할 경우 첫 항을 제외한 값들은 좌우 대칭 형태이다. 여기에 Circular Shift를 수행하면 중앙에 대하여 대칭인 PSF 행렬을 구할 수 있다. 생성된 PSF 행렬을 정규화하여 Convolution을 수행한다.

(4) MTF 시뮬레이션 검증

본 연구에서 적용한 MTF 시뮬레이션 결과를 검증하기 Edge Method (Helder, et. al., 2002)를 적용하여 MTF 시뮬레이션 결과를 검증하였다. Edge Method의 계산 과정은 다음 그림 4와 같다.

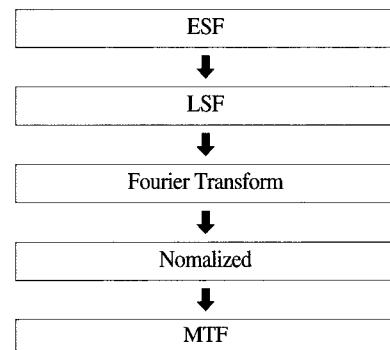


Fig. 4. Process of edge method.

3) Noise 시뮬레이션

위성 영상을 생성하기 위해 광영상을 디지털 신호로 변환하는 과정에서 신호의 정확도가 감소한다. 신호의 오차는 영상의 품질을 저하시키고, 잡음(Noise)으로 영상에 나타난다.

(1) SNR

신호대잡음비(SNR)는 영상의 품질 평가하는 중요한 지표이다. 신호대잡음비는 다음 식(47)~(49)에 의해 계산된다.

$$SNR = \frac{S(\text{signal})}{N(\text{noise})} \quad (47)$$

(2) Signal 계산

$$S = \frac{\pi A_p t_i (1 - COR^2)}{4hcF/\#^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_0 T_0 Q \lambda d\lambda \quad (48)$$

여기서,

A_p : 검출기 화소 면적

t_i : 적분 시간

COR : 중앙차폐율

$F/\#$: F-number

h : 플랭크상수(6.626196×10^{-34} Jsec)

c : 광속 (2.997925×10^8 m/sec)

λ : 파장

L_0 : 입력 Radiance

T_0 : 광학계 투과율

Q : 양자 효율

(3) Noise 계산

Noise는 Random Noise, Vertical, Horizontal Noise로 구분할 수 있으며, 각각의 Noise는 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 Random Noise는 다음 식(49)에 의해 구할 수 있다.

$$N_{\text{Random}} = \sqrt{N_{\text{Photon}}^2 + N_{\text{Readout}}^2 + N_{\text{Dark}}^2 + N_{\text{Video}}^2 + N_{\text{Quant}}^2} \quad (49)$$

여기서,

N_{Photon} : Photon Noise

N_{Readout} : Readout Noise

N_{Dark} : Dark current Noise

N_{Video} : Video chain Noise

N_{Quant} : Quantization Noise

다음 Vertical Noise 및 Horizontal Noise는 3D Noise를 적용하여 Random Noise에 대한 비에 의해 결정한다. Vertical Noise 및 Horizontal Noise는 다음 식(50), (51)에 의해 구할 수 있다(O' Shea et al, 2005, Jacobs, et al, 2001).

$$N_{\text{vertical}} = \sigma_v / \sigma_{tvh} \times N_{\text{random}} \quad (50)$$

$$N_{\text{horizontal}} = \sigma_h / \sigma_{tvh} \times N_{\text{random}} \quad (51)$$

Total Noise는 다음의 식(52)와 같다.

$$N_{\text{Total}} = \sqrt{N_{\text{random}}^2 + N_{\text{vertical}}^2 + N_{\text{Horizontal}}^2} \quad (52)$$

(4) Noise 겹침

Noise 적용 결과를 검증하기 위해 MTF 적용 영상과 Noise 시뮬레이션 결과 영상을 다음 식(53)~(54)에 의

해 SNR을 계산하였다.

$$NMSE = \frac{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [X_{\text{origin}}(m, n) - X_{\text{noise}}(m, n)]^2}{\frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [X_{\text{origin}}(m, n)]^2} \quad (53)$$

$$SNR = -\log_{10}(NMSE) \quad (54)$$

4) 기하 품질 시뮬레이션

영상의 기하 품질 시뮬레이션은 위성의 위치 및 자세, 센서와 위성 본체와의 Misalignment, 진동 등에 의해서 발생하며, 기하 품질 시뮬레이션 프로세스는 아래 그림 5와 같다.

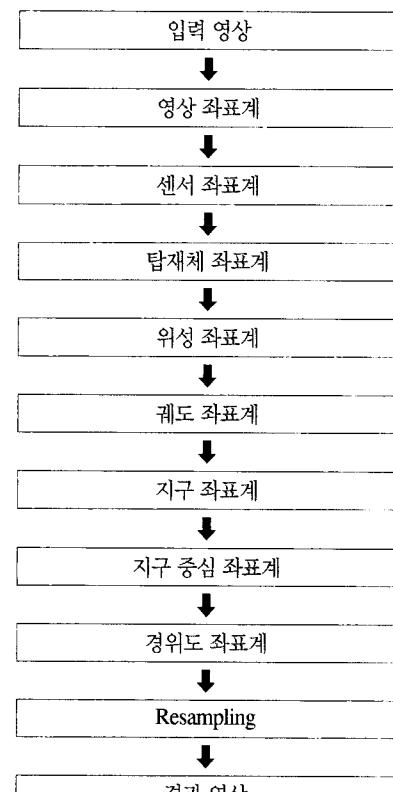


Fig. 5. Process of geometric quality simulation.

다음 그림 6은 영상, 센서, 위성, 궤도, 지구 좌표계간 기하학적 관계를 나타낸다.

(1) 영상 → 탑재체 좌표계 변환

영상좌표계로부터 센서 좌표계로의 변환은 다음 식(55)을 통해 수행된다.

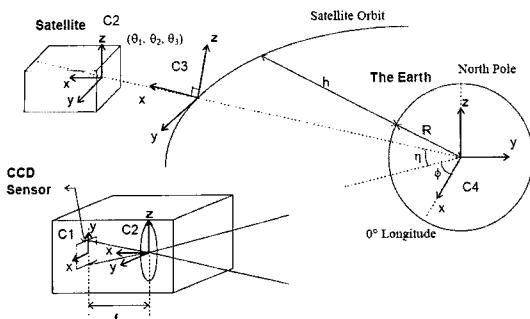


Fig. 6. Coordinate system between image, sensor, satellite, orbit and earth

$$P_1 = \left(d(c - \frac{N}{2}), 0, f \right) \quad (55)$$

여기서,

c, r : 영상의 행, 열

d : CCD화소 크기

f : Effective Focal Length

(2) 센서 → 위성 좌표계 변환

센서와 위성간의 Mounting angle을 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 라고 할 때, 센서 좌표계에서 위성 좌표계로의 변환은 다음의 식(56)를 통해 수행된다.

$$P_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \Delta X & \sin \Delta X \\ 0 & -\sin \Delta X & \cos \Delta X \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta Y & 0 & -\sin \Delta Y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \Delta Y & 0 & \cos \Delta Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \Delta Z & \sin \Delta Z & 0 \\ -\sin \Delta Z & \cos \Delta Z & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_1 \quad (56)$$

여기서,

$\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$: Mounting Angle (Misalignment 포함)

P_1 : 센서 좌표계

P_2 : 위성 좌표계 (원점 : 위성의 질량 중심)

(3) 위성 → 궤도 좌표계 변환

궤도상에서 위성 자세를 $\theta_p, \theta_r, \theta_y$ 라고 하면, 위성 좌표계에서 궤도 좌표계로의 변환은 다음의 식(57)를 통해 수행된다.

$$P_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_p & \sin \theta_p \\ 0 & -\sin \theta_p & \cos \theta_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & 0 & -\sin \theta_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta_r & 0 & \cos \theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_y & \sin \theta_y & 0 \\ -\sin \theta_y & \cos \theta_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} P_2 \quad (57)$$

여기서,

$\theta_p, \theta_r, \theta_y$: 위성의 자세(Pitch, Roll, Yaw, 자세 제어 오차 포함)

P_2 : 위성 좌표계

P_3 : 궤도 좌표계

(4) 궤도 → 지구 좌표계 변환

영상의 행, 열의 실제 지구상의 좌표는 다음의 식(58)을 통해서 구할 수 있다.

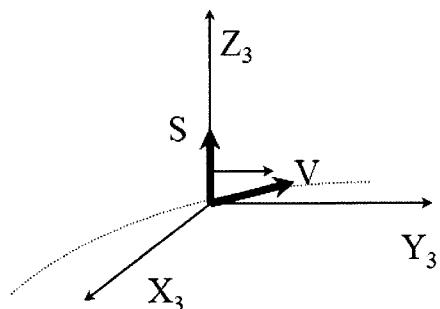


Fig. 7. Coordinate system between orbit and earth.

$$P_4 = [X_3 Y_3 Z_3] P_3 \quad (56)$$

여기서,

$$Z_3 = \frac{S}{|S|}$$

$$Y_3 = \frac{V_p}{|V_p|} \cdot V_p = V - (V \cdot Z_3) Z_3$$

$$X_3 = Y_3 \times Z_3$$

(5) 지구 → 지구 중심 좌표계 변환

영상의 행, 열의 지구 중심 좌표 그리고 위, 경도 좌표는 다음의 식을 통해서 구할 수 있다.

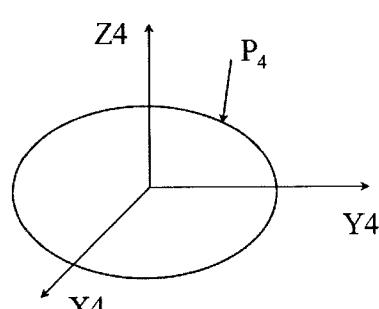


Fig. 8. Coordinate system between geodetic and geocentric.

지구 태원체 모델을 다음 식(59)이고, 지구상의 좌표를 다음 식(60) 일 때, 지구 중심 좌표는 다음 식(61)에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{X^2+Y^2}{R_e^2} + \frac{Z^2}{R_p^2} = 1 \quad (59)$$

$$P_4 = [P_x \ P_y \ P_z] \quad (60)$$

$$[X \ Y \ Z] = a[P_x \ P_y \ P_z] + [S_x \ S_y \ S_z] \quad (61)$$

여기서,

$$a = \frac{-B - \sqrt{B^2 - AC}}{A}$$

$$A = (P_x^2 + P_y^2)R_p^2 + P_z^2R_e^2$$

$$B = (P_xS_x + P_yS_y)R_p^2 + (P_zS_z)R_e^2$$

$$C = (S_x^2 + S_y^2)R_p^2 + S_z^2R_e^2 - R_e^2R_p^2$$

지구중심좌표로부터 경위도 좌표는 다음의 식(62), (63)에 의해 구할 수 있다.

$$Lat = \sin^{-1}\left(\frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}\right) \quad (62)$$

$$Lon = \cos^{-1}\left(\frac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}}\right) \quad (63)$$

(6) Resampling

영상 좌표(r, c)와 경위도 좌표(lat, lon)에 대해서 Resampling을 수행한다.

5) 웨이블렛 압축

위성에서 수신국으로 영상데이터 전송 시 전송 효율성을 위해 웨이블렛 압축을 수행한다. 본 연구에서는 JPEG2000 압축알고리즘을 적용하였다. JPEG2000의

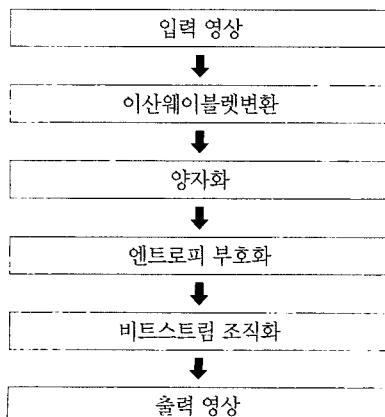


Fig. 9. Process of JPEG2000 compression.

압축 프로세스는 다음 그림 9와 같다.

3. 영상 품질 시뮬레이션 결과

고해상도 영상을 통해 MTF 15%, SNR 20, 압축률 5.33, 고도 685km, 궤도 Inclination 100도, Pitch 30도를 적용하여 영상 품질 시뮬레이션 프로세스를 수행한 결과는 다음과 같다.

1) MTF 시뮬레이션

(1) MTF 계산 결과

MTF 시뮬레이션에 적용된 MTF 계산 결과 및 MTF 주파수 행렬의 2차원 가시화 결과는 다음 그림 10, 그림 11과 같다.

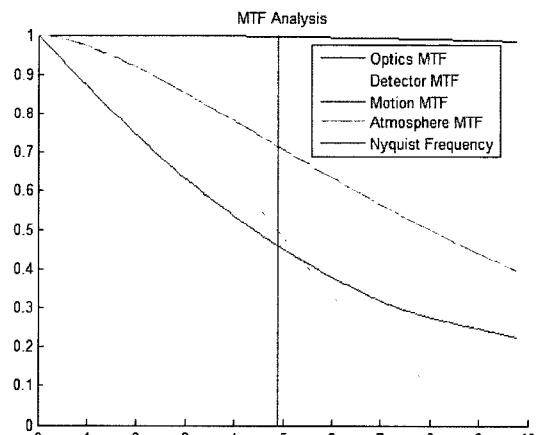


Fig. 10. Calculation result of MTF.

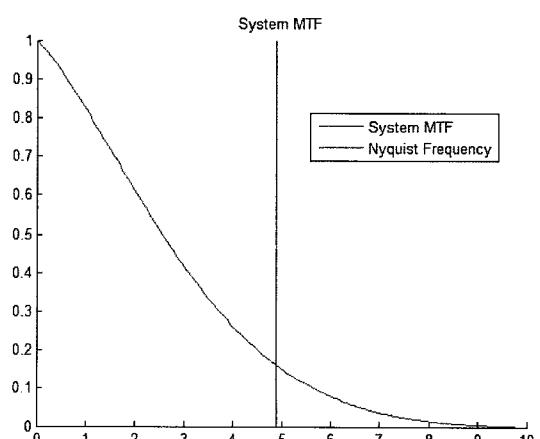


Fig. 11. Calculation result of system MTF.

(2) PSF 행렬 생성 결과

생성된 MTF 행렬에 역푸리에 변환을 수행하여 PSF를 구한 결과는 다음 그림 12와 같다.

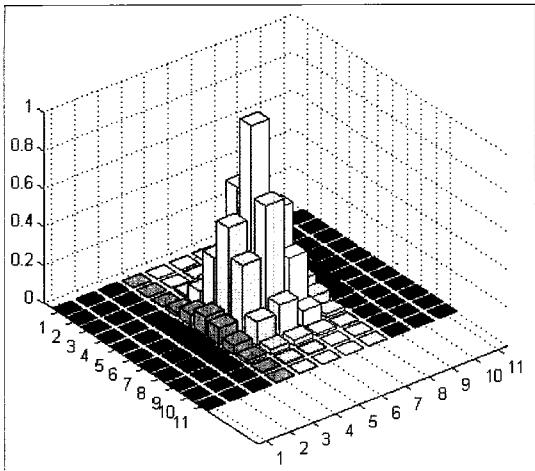


Fig. 12. Calculation result of PSF.

(3) MTF 시뮬레이션 적용 결과

PSF를 정규화하여 Test 영상 그림 13, 그림 14에 Convolution을 수행한 결과는 그림 15, 그림 16과 같으며, Edge Method를 통해 Nyquist Frequency에서 MTF를 검증한 결과 15.48%로 0.48의 차이가 있다. 일반적으로 Edge Method의 정확도는 1~2%이므로 이는 허용오차 범위에 있다고 할 수 있다.



Fig. 13. Original Image.

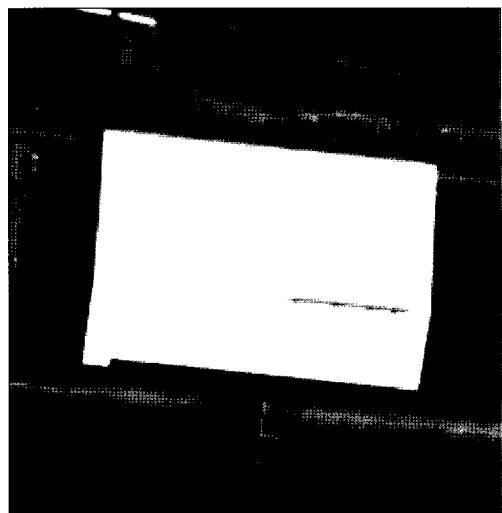


Fig. 14. Original Image (Sub).



Fig. 15. Apply MTF.

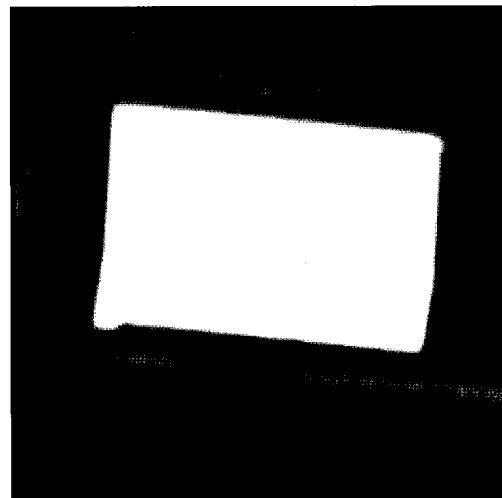


Fig. 16. Apply MTF (Sub).

2) Noise 시뮬레이션

MTF 적용 영상 그림 17에 SNR 20의 Noise를 적용한 결과는 그림 18, 그림 19와 같다. Noise 적용 결과를 검증하기 위하여 MTF 적용 영상과 Noise 적용 결과를 식(54)를 통해 계산한 결과 SNR은 19.8935로 0.1065의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 수평 방향 및 수직 방향의 Noise를 적용하는 데 있어서 Noise의 상쇄 현상으로 인해 발생한 것으로 판단된다.

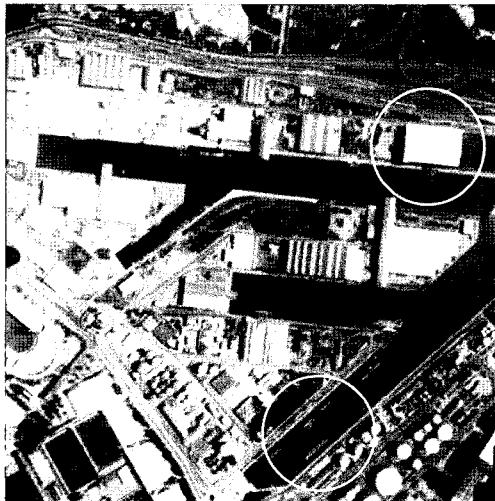


Fig. 17. Apply MTF.

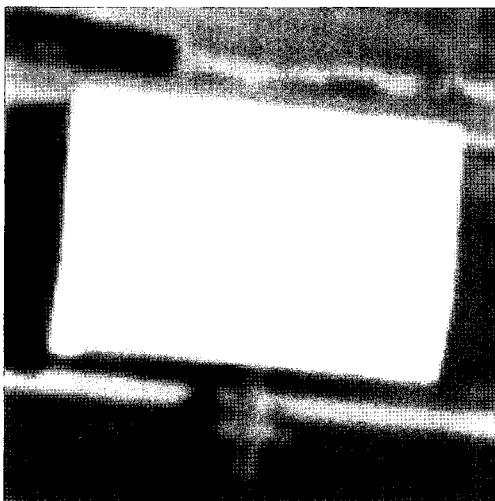


Fig. 18. Apply noise.



Fig. 19. Apply noise.

3) 기하 시뮬레이션

노이즈 적용 결과 영상에 기하 시뮬레이션을 적용한 결과는 그림 20과 같다.



Fig. 20. Apply geometric simulation.

4) 압축 시뮬레이션

기하시뮬레이션 결과(그림 21)에 압축률 5.33을 적용하여 JPEG2000압축을 수행한 결과는 다음 그림 22와 같다.

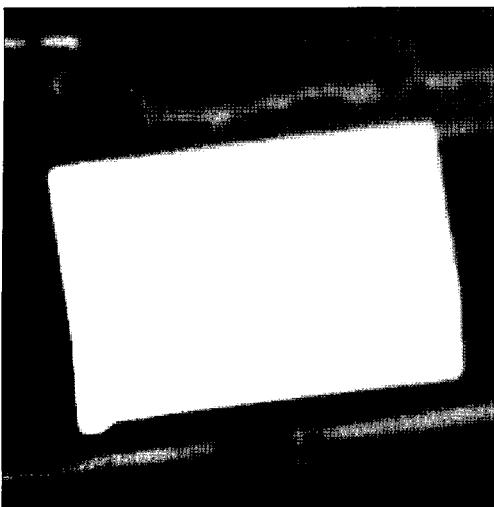


Fig. 21. Apply geometric simulation.

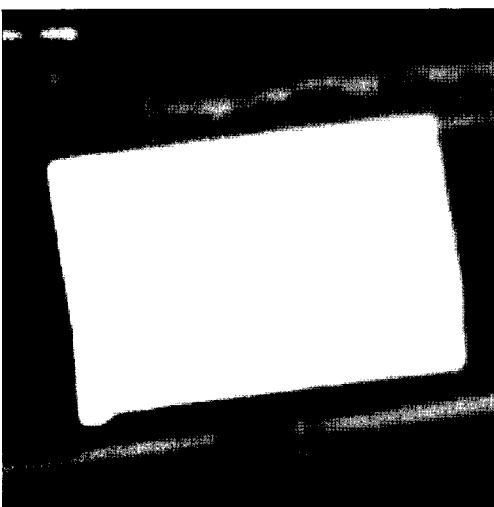


Fig. 22. Apply compression.

4. 결론 및 향후 연구

본 연구는 MTF 성능을 반영하여 위성영상 품질 시뮬레이션을 수행한 기존 연구(신재민 외(2004), 김희섭(2005))에 추가적으로 세부적인 Noise 요소, 위성의 궤도 및 자세 그리고 지구의 자전을 고려한 기하학적 품질 분석 및 위성에서 지상수신국으로 데이터를 전송 시 수행하는 영상 압축 적용함으로써 보다 현실적인 위성영상 품질 시뮬레이션 방법을 제시하였다.

본 연구를 통해 위성의 설계 및 운영 정보를 반영한 보다 정밀한 영상 품질 시뮬레이션을 수행할 수 있을 것

으로 기대된다.

실제 위성 영상의 품질은 설계된 위성의 각 부분, 우주 및 대기 환경 요소 등이 복잡한 관계가 반영되어 결정된다. 보다 정확한 영상 품질 시뮬레이션 수행을 위해 위성의 각 부분, 대기 및 우주 환경에 대한 모델링에 대해 지속적인 연구와 분석 그리고 실험이 이루어져야 할 것이다.

또한 추후 실제 위성의 설계 및 운영 정보 그리고 수신된 영상 데이터를 통해 시뮬레이션 결과의 검증에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

본 연구의 결과는 위성의 설계 시 활용 될 수 있으며, 수신된 영상의 화질 개선 연구에 대한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 또한 항공 영상의 품질 시뮬레이션에 확대 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- 김희섭, 정태원, 김규선, 2005. MTF 성능이 반영된 가상영상 제작 방법, 항공우주연구원 항공우주기술, 6(1): 97-102.
- 신재민, 임정흠, 이상률, 2003. MTF 모델링을 이용한 위성영상 품질 분석, 한국항공우주학회 추계학술대회.
- 신재민, 임정흠, 이상률, 2004. 위성영상 성능분석을 위한 Imaging System Modeling, 한국우주과학회보, 13(1): 82.
- Brian P., 2001. *Algorithm for MTF Estimation by Histogram Modeling of an Edge*, Center for Imaging Science Rochester Institute of Technology Rochester.
- Tomkinson, D. et al., 2005. NV-Therm based sensor effects for imaging simulation, SPIE, 5784: 157-169.
- Helder D. L. et al., 2002. IKONOS satellite in orbit modulation transfer function (MTF) measurement using Edge and Pulse method.
- Jcobs, E. et al, 2001. Assessment of 3-D Noise methodology for thermal sensor simulation,

- SPIE, 4372: 151-161.
- Holst, G. C., 2003. *Holt's practical guide to electro-optical systems*, JCD publishing.
- Holst, G. C., 2006. *Electro-optical imaging system performance fourth edition*, JCD publishing.
- Wang, H. S., Y. L. Lee, and E. S. Schling, 1992. TDI charge-coupled devices : Design and applications, *International Business Machines Journal*, 36(1): 83-105.
- Qertz, J. R. and W. J. Larson, 2003. *Space mission analysis and design*, Microcosm Press.
- O'Shea, P. and S. Sousk, 2005. Practical issues with 3D-noise measurements and application to modern infrared sensors, SPIE, 5784: 262-271.
- Schowengerdt, R. A., 2007. *Remote sensing : models and methods for image processing*, Elsevier Inc.