KOMPSAT-2 전정색영상과 다중분광영상의 융합기법 비교평가

오관영* · 정형섭*[†] · 이광재**

*서울시립대학교 공간정보공학과, **한국항공우주연구원

Comparison of Image Fusion Methods to Merge KOMPSAT-2 Panchromatic and Multispectral Images

Kwan-Young Oh*, Hyung-Sup Jung*[†] and Kwang-Jae Lee**

*Department of Geoinformatics, The University of Seoul, **Korea Aerospace Research Institute

Abstract : The objective of this study is to propose efficient data fusion techniques feasible to the KOMPSAT-2 satellite images. The most widely used image fusion techniques, which are the high-pass filter (HPF), the intensity-hue-saturation-based (modified IHS), the pan-sharpened, and the wavelet-based methods, was applied to four KOMPSAT - 2 satellite images having different regional and seasonal characteristics. Each fusion result was compared and analyzed in spatial and spectral features, respectively. Quality evaluation of image fusion techniques was performed in both quantitative and visual analysis. The quantitative analysis methods used for this study were the relative global dimensional error (spatial and spectral ERGAS), the spectral angle mapper index (SAM), and the image quality index (Q4). The results of quantitative and visual analysis indicate that the pan-sharpened method among the fusion methods used for this study relatively has the suitable balance between spectral and spatial information. In the case of the modified IHS method, the spatial information is well preserved, while the spectral information is distorted. And also the HPF and wavelet methods do not preserve the spectral information but the spatial information.

Key Words : KOMPSAT-2, data fusion, HPF, modified IHS, pan-sharpened, wavelet

요약 : 본 연구의 목적은 KOMPSAT-2 위성영상에 가장 일반적으로 적용 가능한 영상융합기법을 제시하는 것이다. 가장 널리 사용되는 영상융합기법인 HPF, modified IHS, pan-sharpened, wavelet을 지역적, 계절적 특성이 서로 다른 4장의 KOMPSAT-2 위성영상에 적용하였고, 각각의 융합결과를 공간적, 분광적으로 비교분석하였다. 영상융합기법의 품질평가는 시각적 분석과 정량적 분석을 병행하여 수행하였으며, 정량적 분석에는 spatial ERGAS, spectral ERGAS, SAM, Q4가 사용되었다. 종합적인 분석결과를 고려할 때, pan-sharpened가 색상정보와 공간정보의 균형적인 보존 측면에서 다른 융합기법들에 비해, 상대적으로 우수한 결과를 나타냈다. modified-IHS의 경우, 공간정보는 잘 보존하였지만 다소 큰 색상 왜곡이 발생되었고, HPF와 wavelet은 색상 왜곡은 적었지만, 공간정보의 왜곡이 발생하였다.

접수일(2011년 11월 28일), 수정일(1차 : 2012년 1월 3일, 2차 : 1월 16일), 게재확정일(2012년 1월 17일).

[†] 교신저자: 정형섭(hsjung@uos.ac.kr)

1. 서론

고해상도 위성영상을 이용한 원격탐사 기술은 관심 지역에 대하여 보다 신속하고 광범위한 정보를 획득할 수 있는 최적의 정보수집 수단이다. 또한 군사, 재해관리, 환경변화탐지, GIS 응용 등 수많은 분야에서 응용 가능한 고효율, 고부가가치의 최신 연구분야로써 그 잠재력을 인정받고 있다.

이미 국내에서도 원격탐사 기술에 지속적인 투자와 관심을 바탕으로 관련 분야에 대한 급격한 기술적 성장이 이루어졌다. 높은 공간해상도를 지닌 흑백영상과 다양한 분광 파장대를 지닌 칼라영상을 제공하는 KOMPSAT-2의 발사에 성공하였으며, 높은 효율성을 지닌 고해상 광학위성으로써 그 활용성이 꾸준히 증가하고 있다.

일반적인 고해상 광학위성에서 제공하고 있는 높은 공간해상도의 흑백영상은 개체 추출 및 판독 등에 용이하고, 분광해상도가 높은 칼라영상은 토지피복분류 등 개체의 분광특성 분석에 대한 장점을 가지고 있기 때문에, 활용의 극대화를 위해서는 고해상의 칼라영상을 제공하는 것이 가장 이상적이다. 그러나 센서의 물리적 한계로 인하여 공간해상도와 분광해상도는 서로 trade-off 관계를 지니고 있고, 결국 위성영상의 촬영 시점에서 흑백영상과 같이 높은 공간해상도를 지니는 칼라영상을 생성하는 것은 기술적으로 어려운 실정이다.

이와 같은 물리적 한계를 극복하기 위하여, 공간해상도가 높은 흑백영상과 분광해상도가 높은 칼라영상을 수학적으로 융합하여, 한 장의 고해상 칼라영상으로 재구성 하는 영상융합기술이 개발되었으며, 이는 원격탐사 분야에서 매우 중요한 연구분야로 인정받고 있다. 이러한 영상융합 기술은 국내에서 개발된 KOMPSAT-2 와도 매우 밀접한 관련이 있는 연구 주제이며, 국내 위성 산업의 성장에 있어 반드시 수행되어야 하는 핵심 기술이다.

영상융합기법은 여러 장의 영상을 합성한다는 의미에서 data fusion, image merging으로 불리며, 다중 분광영상을 흑백영상의 공간해상도와 동일하게 조정하여 선명도를 높인다는 의미에서 pan-sharpening라는 용어로도 쓰인다(최재완, 김형태, 2008). 국내외를 불문하고 수많은 영상융합기법들이 개발되었으며, 제안된

방법들을 서로 다른 센서 특징을 지닌 위성영상에 적용하고, 그 성능을 비교분석하는 연구들이 활발히 진행되었다.

대표적인 연구로 Chavez *et al*(1991)은 IHS(Intensity Hue Saturation), PCA(Principle Component Analysis), HPF(High Pass Filter) 기법을 Landsat TM영상과 SPOT 흑백영상에 적용하였고, 분석결과 HPF 합성방법이 가장 좋은 성과를 보이는 것으로 판단했으며, Vrubel(1996)은 SPOT 흑백영상과 칼라영상을 IHS, HPF, CN(Color Normalized)방법을 이용하여 하나의 영상으로 융합하였고, CN 방법이 다른 방법들에 비해 상대적으로 우수하다는 결과를 발표했다. Yocky (1996)은 SPOT 흑백영상과 SPOT XS 영상에 wavelet 변환을 적용한 융합기법을 제안하였으며, Ranchin *et al*(2000)은 ARSIS 개념의 wavelet을 이용한 영상융합기법을 제안하여 기존의 방법들보다 향상된 결과를 보여주었다. Alparone *et al*(2007)은 총 8개의 알고리즘으로 융합된 결과를 정량적, 시각적으로 평가하였으며 MRA(Multi Resolution Analysis) 기반의 융합기법이 상대적으로 좋은 결과를 나타내는 것으로 판단하였다. 국내에서 최재완과 김형태(2008)는 기존의 Fast IHS, WPCA(Wavelet-based Principle Component Analysis), GS(Gram Schmidt) spectral sharpening 융합기법에 수정된 영상 유도 기법을 줄이는 알고리즘을 제안하였고, 김용현과 김윤수(2009)는 Fast IHS 변환과 trade-off 파라미터를 이용한 융합기법을 제안하고 기존의 알고리즘 보다 향상된 성과를 보여주었다.

국내외적으로 수많은 영상융합기법이 제안되었으며, 이를 실제 위성영상에 적용하고 분석된 결과를 바탕으로 각 위성영상에 최적화된 영상융합 알고리즘을 제안하기 위한 연구가 지속적으로 진행되었다. 그러나 KOMPSAT-2 위성영상을 활용한 연구는 상대적으로 매우 미흡한 실정이며, 진행된 연구 또한 지역 및 기후 특성이 제한된 일부 영상에서 도출된 결과가 대부분이기 때문에, 보다 다양한 특성을 지닌 영상들을 활용한 연구범위의 확장 및 종합적인 분석을 통한 결과의 일반화가 요구되었다. 따라서 본 연구에서는 다양한 지역적/계절적 특성을 지닌 4장의 KOMPSAT-2 위성영상을 일반적인 상용소프트웨어에서 이용되고 있는 기법인 HPF, modified IHS, pan-sharpened, wavelet 융합

기법에 적용하고, 결과를 비교평가하여 KOMPSAT-2 영상에 가장 일반적으로 적용 가능한 영상융합기법을 제시하고자 한다.

2. 실험 및 평가방법

1) 연구자료

본 연구에 사용된 KOMPSAT-2 위성은 GSD (Ground Sample Distance) 1 m의 흑백영상과 4 m의 칼라영상을 제공 한다. 흑백영상의 파장 범위는 500–900 nm이며, 칼라영상은 4개의 밴드에서(B:450–520 m, G:520–600 nm, R:630–690 nm, NIR:760–900 nm)를 가진다(Table 1).

연구에 사용된 영상은 국내외에서 촬영된 총 4장의 KOMPSAT-2 위성영상이다(Fig. 1). 각각의 영상은 호수, 강, 산, 사막, 해안, 도심 지역 등과 같은 다양한 지형적/계절적 특성을 포함하고 있다(Fig. 1 and Table 2).

Fig. 1(a)는 고도 변화가 크지 않은 평지지역, Fig.

Table 1. Characteristics of the KOMPSAT-2 satellite system

Parameters		Values
Spectral bands	PAN	500-900 nm
	MS1 (blue)	450-520 nm
	MS2 (green)	520-600 nm
	MS3 (red)	630-690 nm
	MS4 (NIR)	760-900 nm
Ground resolutions	PAN	1 m
	MS	4 m
Footprint	15 × 15 km	
Revisit rate	28 days (orbital period)	
	3 days (by roll angle of 30 deg.)	

Table 2. Characteristics of the KOMPSAT-2 images tested

Scene ID	Acquisition data	Surface properties
(a)	2007.04.28	Plain area(Spring)
(b)	2010.05.08	Dense forest(Tropics)
(c)	2007.05.26	Coastal area(Haze)
(d)	2009.01.10	Desert

1(b)은 수풀이 우거진 밀림지역, Fig. 1(c)는 주변에 바다가 인접해있는 해안지역, Fig. 1(d)는 대부분 모래로 구성되어 있는 사막지역의 특성을 지니고 있다. Fig. 1(a, c)는 비교적 온화한 4–5월에 촬영되어 일교차가 심하지 않지만, Fig. 1(b, d)는 상대적으로 기온이 높고, 일교차가 매우 심한 열대 및 사막지역에서 촬영되었다. 또한, Fig. 1(c)는 안개낀 효과를 지닌다.

2) 연구방법

본 연구에 사용된 실험영상은 서로 다른 지역적/계절적 특성을 지닌 4장의 KOMPSAT-2 위성영상이다(Fig. 1). 각각의 실험영상에 대해 HPF, modified IHS, pan-sharpened, wavelet 기반의 영상융합 알고리즘을 적용하였고, 총 16장의 융합영상을 제작하였다. 영상 융합기법의 품질평가는 시각적 분석과 정량적 분석을 병행하여 수행하였으며, Thomas *et al.* (2006)이 제시한 표준 프로토콜(standard protocol)에 따라 진행되었다. 즉, 본 연구에서는 원래의 KOMPSAT-2 영상(칼라 4 m, 흑백 1 m)의 공간해상도를 칼라 16 m, 흑백 4 m로 강제적으로 낮춘 영상에 각각의 융합기법을 적용하여, 공간해상도 4 m의 융합영상을 만들었고, 원래의 칼라영상(4 m)과 비교하여 정량적 평가를 수행하였다. 정량적 평가에는 spatial and spectral ERGAS, SAM(Spectral Angle Mapper), Q4 index를 사용하였

Fig. 1. KOMPSAT-2 satellite images used for this study: (a) plain area, (b) dense forest, (c) coastal area, (d) desert.

Fig. 2. Assessment process used for this study.

다(Fig. 2).

(1) 영상융합기법

실험에 사용된 영상융합기법은 대표적인 RS 소프트웨어를 통해 상용화된 융합기법들로 ERDAS(HPF, wavelet, modified IHS), PCI geomatica(pan-sharpened)에서 지원하는 알고리즘을 사용하였다.

가) HPF 융합

고역통과필터(HPF) 기반의 영상융합기법은 색상과 공간정보의 보존정도가 상대적으로 높은 방법으로 알려져 있다. 일반적으로 저역통과필터는 영상의 잡음을 제거하거나 경계선을 흐리게 하여 전체적으로 부드러운 영상을 만들어주며, 고역통과 필터는 모서리나 경계선 등과 같은 영상의 세부적인 내용을 강조하여, 지형지물의 해독력을 높여 주는 특징을 가지고 있다.

본 연구에서 사용한 HPF 융합기법은 고해상의 흑백 영상에 고역통과필터를 적용하여 고주파 성분을 추출하고, 저해상의 칼라영상은 흑백영상과 동일한 픽셀크기로 변환한 뒤, 경중률이 부여된 흑백영상과 칼라영상을 서로 중첩하여 고해상의 칼라영상을 제작하는 방법이다. 또한, 마지막 단계에서는 융합된 영상과 원 영상의 평균과 표준편차를 일치시키기 위하여 선형 스트레칭이 적용된다(Gangkofner and Holcomb, 2008).

$$HP = MS_{resize} + (PAN_{hp} \times W) \quad (1)$$

여기서, HP 는 칼라영상과 흑백영상의 융합영상, MS_{resize} 는 흑백영상의 픽셀 크기로 샘플링된 칼라영상, PAN_{hp} 는 고역통과필터가 적용된 흑백영상을 의미한다. 또한, 경중률을 의미하는 W 는 아래식과 같이 정의된다.

$$W = (SD(MS)/SD(PAN_{hp}) \times M) \quad (2)$$

여기서, $SD(MS)$ 은 칼라영상의 표준편차, $SD(PAN_{hp})$ 필터링이 수행된 흑백영상의 표준편차, M 은 조정변수를 의미한다. 또한, 본 연구에서는 9×9 크기의 라플라시안 필터와, 조정변수($M=0.5$)을 이용하였다. 일반적으로 HPF 융합기법은 촬영센서와 촬영시기가 다른 영상 간에도 수용할 만한 결과를 보여주지만, 때때로 경계정보가 너무 강조되는 경향이 있다.

나) Modified IHS 융합

IHS 기반의 영상융합기법은 가장 일반적으로 사용되는 융합방법으로 RGB 공간의 칼라영상을 IHS 공간으로 변환시킨 후, 변환된 intensity 영상을 흑백영상으로 교환하는 과정을 거쳐 고해상의 칼라영상을 제작한다. 또한, 영상융합이 진행되기 전에는 흑백영상과 칼라영상에 대한 히스토그램 매칭이 수행 된다(Yakhdaki and Azizi, 2010). 그러나 흑백영상과 칼라영상의 파장대역은 완전히 일치하지 않기 때문에 융합된 영상의 색상이 왜곡되어 표현되는 문제가 발생된다(Choi, 2006). 이러한 문제를 수정하기 위하여, 다양한 방법으로 개량된 IHS 융합기법이 개발되었으며, 대표적으로 modified IHS가 널리 사용되고 있다(Siddiqui, 2003). 그러나 이 융합기법은 한번에 3개의 밴드만 처리 가능하다는 것이 가장 큰 단점으로 지적되고 있으며, 다른 시기에 촬영되었거나, 다른 센서에서 촬영된 영상간의 융합결과에는 대부분 적합하지 않은 성능을 보이는 것으

로 알려져 있다(Klonus and Ehlers, 2009).

다) Pan-sharpened 융합

Pan-sharpened는 현존하는 pan-sharpening 알고리즘에 통계적인 기법을 적용하여 발전시킨 방법으로, 최소제곱법을 이용하여 실제 칼라영상과 흑백영상, 그리고 융합된 영상간의 대략적인 관계를 파악하여, 색의 왜곡이나 데이터 의존적인 문제를 해결한 융합기법이다. 또한 각 채널의 평균값과 표준편차를 유지할 수 있다는 것도 장점이다(Zhang, 2002).

라) Wavelet 융합

연구에 사용된 wavelet 융합기법은 신호처리 및 영상처리분야에서 다양하게 적용되는 wavelet 변환을 적용한 방법이다(King and Wang, 2001). 우선, 고해상도 흑백영상을 저해상도 칼라영상의 공간해상도와 일치하도록 wavelet 변환을 적용하여, 근사영상과 세부영상을 구하고, 근사영상을 저해상도 칼라영상으로 대체한 후, 이를 역변환 하여 영상을 융합하게 된다. 여기서 wavelet 변환수식은 아래와 같이 표현된다.

$$\int_{-\alpha}^{+\alpha} \psi(t)dt = \dots \int_{-\alpha}^{+\alpha} t^{(m-1)} \psi(t)dt = 0 \quad (3)$$

여기서, $\psi(t)$ 은 generating wavelet을 의미하는데, 이는 0에 가까운 값이며, t 의 증가에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타낸다. 이 값은 진동하기 때문에 주파수 영역에서 도시하는 것이 좋다. 또한 generating wavelet은 축척계수와 변위요소에 의해 영향을 받는데 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\psi_{(a,b)}(t) = \frac{1}{a} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), a > 0, b \in R \quad (4)$$

여기서, a 는 scale factor, b 는 translation factor이다. 이러한 wavelet 융합방법은 일반적으로 색상의 보존은 대체적으로 우수하지만, 처리속도가 느리고 상대적으로 공간해상력이 떨어지는 단점이 있다.

(2) 정량적 분석기법

융합된 영상의 정량적 분석은 원래의 KOMPSAT-2 영상(칼라 4 m, 흑백 1 m)의 공간해상도를 칼라 16 m, 흑백 4 m로 강제적으로 낮춘 영상을 이용하였다. 우선 원 영상에 low-pass filter(MTF Cut-off frequency)를 적용하고, bicubic interpolation 기법을 사용하여, 영상의 공간해상도를 하향조정 하였다(Wang et al.,

2005). 또한, 정량적 평가지표는 spectral ERGAS, Q4 index, SAM을 사용하였다.

가) Spatial ERGAS

Spatial ERGAS는 Saacedra and Gonzalo(2006)이 제안한 방법으로 spectral ERGAS를 기반으로 개량되었으며, 융합된 영상의 공간해상력을 평가하기 위한 지표로 개발되었다(Ranchin and Wald, 2000). 평가지표의 계산은 히스토그램 조정된 흑백영상과 융합된 칼라영상 사이의 RMSE(Root Mean Square Error)로 계산되며, 수치가 0에 가까울수록 흑백영상이 지닌 공간해상력을 잘 유지하고 있다는 것을 의미한다.

$$ERGAS_{spatial} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{RMSE_{spatial}^2(B_i)}{M_i^2} \right)} \quad (5)$$

여기서, h 와 l 은 각각 흑백영상과 칼라영상의 공간해상도이며, N_B 는 융합영상의 밴드의 수를, B_i 는 i 번째 밴드를, M_i 는 칼라영상 i 번째 밴드의 평균복사휘도를 의미한다. 또한, $RMSE_{spatial}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$RMSE_{spatial}(B_i) = \frac{1}{N_p} \sqrt{\sum_{k=1}^{N_p} (PAN(k) - FUS_i(k))^2} \quad (6)$$

여기서, N_p 는 밴드별 픽셀 수를, FUS_i 는 융합영상의 i 번째 밴드를 의미한다.

나) Spectral ERGAS

Ranchin and Wald(2000)는 융합영상의 전역적인 분광왜곡량을 정량적으로 측정하기 위한 평가지표로 spectral ERGAS를 제안하였으며, 이는 원영상과 융합된 영상의 RMSE로부터 계산된다. 또한, 수치가 0에 가까울수록 분광왜곡량이 작다는 것을 의미한다.

$$ERGAS_{spectral} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{RMSE_{spectral}^2(B_i)}{M_i^2} \right)} \quad (7)$$

여기서 $RMSE_{spectral}$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$RMSE_{spectral}(B_i) = \frac{1}{N_p} \sqrt{\sum_{k=1}^{N_p} (PAN(k) - FUS_i(k))^2} \quad (8)$$

다) Q4

Q4는 Sangwine and Ell(2004)의 4가지 이론을 사용하여, 구조적인 유사성을 평가 하는 Q index를 일반화한 방법이다. Q4 값은 0에서 1사이 값을 가지며, 1이 가장 이상적인 값이다(Alparone et al., 2004; Wang and Bovik, 2002).

$$Q4 = \frac{|\sigma_{z_1 z_2}|}{\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}} \frac{2\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}}{\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}} \frac{2|\bar{z}_1| |\bar{z}_2|}{|\bar{z}_1|^2 + |\bar{z}_2|^2} \quad (9)$$

여기서, z_1 와 z_2 은 융합영상과 원 칼라영상의 방사 벡터, σ_{z_1} , σ_{z_2} , $\sigma_{z_1 z_2}$ 는 z_1 와 z_2 사이의 표준편차와 공분산, $\bar{z}_1$ 와 $\bar{z}_2$ 는 평균값을 의미한다. 이러한 파라미터의 계산은 지정된 윈도우를 기준으로 계산되며, 최종적인 Q4값은 각 윈도우 별로 계산된 값을 영상 전체에 걸쳐 평균한 값이다. 또한, 본 연구에서는 32 by 32크기의 윈도우를 사용하였다.

라) SAM

SAM은 원래의 칼라영상과 융합된 영상의 방사 벡터 사이의 방사각의 절대값을 이용하여 정의 된다(Kruse *et al.*, 1993).

$$SAM(v, \hat{v}) = \arccos\left(\frac{\langle v, \hat{v} \rangle}{\|v\|_2 \cdot \|\hat{v}\|_2}\right) \quad (10)$$

여기서, v 와 $\hat{v}$ 은 원 칼라영상과 융합된 영상의 방사 벡터이며, $\langle v, \hat{v} \rangle$ 은 두 방사 벡터 원소들 사이의 곱의 합, $\|v\|_2 \cdot \|\hat{v}\|_2$ 은 두 벡터 간 내적을 의미한다. 이 값이 계산된 값들을 평균하여, 최종적인 SAM값을 계산하게 된다. 만약, SAM이 0에 가까우면 융합된 영상의 방사 왜곡이 거의 없음을 의미한다. 그러나 SAM은 방사 벡터 사이의 길이차이는 고려하지 않기 때문에 융합된 영상에 대한 정확한 방사값 보존정도를 측정하기 어렵다는 단점이 있다.

3. 결과 및 분석

1) 영상별 분석

융합된 영상에 대한 품질평가는 시각적 분석과 정량적 분석을 병행하여 수행하였다. 시각적 분석의 경우, 먼저 영상 전체에서의 전반적인 왜곡의 경향성을 관찰한 후, 중요 지역을 확대하여 보다 정밀한 분석을 수행하였다. 융합된 영상의 색상과 공간적 해상력에 대한 평가는 원래의 칼라영상과 흑백영상을 기준으로 수행되었다. 공간적 세밀함에 평가에서는 건물의 모서리, 도로, 다리, 지표면, 작은 대상물 등을 중심으로 관찰하였고, 색상의 보존정도는 blurring, faded color, saturation,

color distortion 등 가장 지배적으로 나타나는 왜곡현상을 중점적으로 분석하였다.

정량적 분석에는 spatial ERGAS, spectral ERGAS, Q4, SAM의 평가지표가 사용되었다. Spatial ERGAS는 융합된 영상의 공간해상력을 평가하는 지표로 사용되었으며, 0에 가까울수록 공간적 세밀함이 잘 표현되었다는 것을 의미한다. Spectral ERGAS, SAM, Q4 index는 원 영상의 색상정보의 보존정도를 측정하는 평가지표로 사용되었으며, spectral ERGAS, SAM이 0에 가까울수록, Q4가 1에 가까울수록 색상의 왜곡이 적다는 것을 의미한다.

(1) Scene (a)

Scene (a)는 2007년 4월 28일에 촬영된 전라북도 김제시 인근의 영상으로 고도차가 크지 않은 평야와 하천 지대로 구성되어 있다(Fig. 3).

HPF와 pan-sharpened의 경우, 공간정보의 보존정도를 측정하는 spatial ERGAS는 각각 3.50과 3.94로 HPF가 다소 우세한 경향을 보였지만, 색상의 왜곡정도를 표현하는 spectral ERGAS, Q4, SAM에서는 HPF와 pan-sharpened가 각각 1.85와 1.69, 0.79와 0.85, 11.32와 4.16의 수치를 보임으로써 pan-sharpened가 다소 우세한 수치를 보였다. 특히 SAM은 2.5배 이상의 차이를 나타냈다. 이러한 결과는 시각적인 분석에서도 확인할 수 있으며, HPF는 pan-sharpened에 비해 상대적으로 채도가 높고, 빛이 바랜 색상으로 표현되었다(Fig. 3(c, e), Fig. 4(c, e), Table 3).

Modified IHS의 경우, 대상물 사이의 경계특성은 매우 잘 표현하였지만, 전반적으로 색상의 균형이 완전히 무너지는 결과를 보였다. 특히, 블루와 화이트색상의 왜곡이 심하게 나타났다. 결과적으로 spatial ERGAS는 2.53으로 가장 낮은 수치를 보였지만, spectral ERGAS, Q4, SAM의 결과는 각각 4.04, 0.75, 8.13으로 상대적으로 가장 좋지 못한 수치를 나타냈다(Fig. 3(d), Fig. 4(d), Table 3).

Wavelet은 HPF와 유사한 패턴의 색상 왜곡을 나타냈다. Q4는 0.30으로 가장 좋지 않은 수치를 나타냈지만, spectral ERGAS, SAM은 각각 2.12, 10.34로 HPF와 유사한 수치 보였다. 하지만, 전체 영상을 부분적으로 확대 영상에서는 대상물이 블록화 되어 표현되

Fig. 3. (a, b) Original KOMPSAT-2 MS and PAN images and the fused MS image (c) HPF, (d) modified IHS, (e) pan-sharpened, (f) wavelet in Fig. 1(a).

Fig. 4. (a, b) Original KOMPSAT-2 MS and PAN images and the fused MS image (c) HPF, (d) modified IHS, (e) pan-sharpened, (f) wavelet in Fig. 1(a).

Table 3. Quality evaluation results of scene (a)

Fusion method	Scene (a)			
	Spatial ERGAS (Ideal value : 0)	Spectral ERGAS (Ideal value : 0)	Q4 (Ideal value : 1)	SAM (Ideal value : 0)
HPF	3.50	1.85	0.79	11.32
Modified-IHS	2.53	4.04	0.75	8.13
Pan-sharpened	3.94	1.69	0.85	4.16
Wavelet	3.83	2.12	0.30	10.34
Mean	3.45 ± 0.64	2.43 ± 1.06	0.67 ± 0.25	8.49 ± 3.18

는 효과가 두드러지게 관찰되었고, 결과적으로 spatial ERGAS의 값은 3.83으로 상대적으로 높은 수치를 나타냈다(Fig. 3(f), Fig. 4(f), Table 3).

(2) Scene (b)

Scene (b)는 2010년 5월 8일에 촬영된 캄보디아 pursat 인근의 영상으로, 선형적인 인공구조물이 거의 없고, 전체적으로 수풀이 무성하게 우거진 열대우림지역으로 구성되어있다(Fig. 5).

HPF는 원 영상과 가장 유사한 색상을 나타냈으며,

spectral ERGAS, Q4, SAM는 각각 1.07, 0.37, 6.60으로 상대적으로 우월한 수치로 표현되었다. 그러나 공간해상력을 평가하는 spatial ERGAS는 2.16으로 가장 높은 수치를 보였으며, 결과적으로 주변지역의 미세한 표면 특성이 무시되어 표현되는 공간왜곡이 나타났다(Fig. 5(c), Fig. 6(c), Table 4).

Modified IHS의 경우, spatial ERGAS는 1.25로 가장 낮은 수치를 나타냈으며, 시각적인 관독에서도 다른 영상들에 비해 뛰어난 공간해상력을 나타냈다. 그러나 spectral ERGAS, Q4, SAM은 각각 2.60, 0.19, 7.98

Fig. 5. (a, b) Original KOMPSAT-2 MS and PAN images and the fused MS image (c) HPF, (d) modified IHS, (e) pan-sharpened, (f) wavelet in Fig. 1(b).

Fig. 6. (a, b) Original KOMPSAT-2 MS and PAN images and the fused MS image (c) HPF, (d) modified IHS, (e) pan-sharpened, (f) wavelet in Fig. 1(b).

Table 4. Quality evaluation results of scene (b)

Fusion method	Scene (a)			
	Spatial ERGAS (Ideal value : 0)	Spectral ERGAS (Ideal value : 0)	Q4 (Ideal value : 1)	SAM (Ideal value : 0)
HPF	2.16	1.07	0.37	6.60
Modified-IHS	1.25	2.60	0.19	7.98
Pan-sharpened	1.64	0.78	0.39	9.22
Wavelet	2.08	1.50	0.30	7.74
Mean	1.78 ± 0.42	1.49 ± 0.80	0.31 ± 0.09	7.89 ± 1.07

으로 매우 저조한 결과를 나타냈으며, 결과적으로 모든 실험영상의 결과들 중에서 가장 심한 색상왜곡을 보였다. 특히, 그린은 블루로, 흰색은 레드에 가까운 색으로 원 영상의 색상을 완벽하게 왜곡시키는 결과를 나타냈다(Fig. 5(d), Fig. 6(d), Table 4).

Pan-sharpened의 경우, spectral ERGAS와 Q4는 각각 0.78, 0.39으로 가장 좋은 성과를 보였지만, SAM 값은 9.22로 전체 영상들 중에서 가장 높은 수치를 나타냈다. 이러한 특성은 비록, 색상의 균형은 유지했지만 전체적인 색상이 옐로우계통의 색상으로 왜곡되어 표현

되는 결과로 나타났다. HPF와 결과를 비교하였을 때, 분광정보의 보존은 HPF가, 공간정보의 보존은 pan-sharpened가 다소 우세하게 나타났다(Fig. 5(c, e), Fig. 6(c, e), Table 4).

Wavelet의 경우, 식생지역의 색상은 잘 보존되었지만, 화이트계통의 색상이 레드에 가까운 색상으로 왜곡되어 표현되었다. 또한, 확대영상에서 많은 수의 잡음이 관찰되었고, 매우 거친 질감으로 표현되었다. 결국 이러한 특성은 상대적으로 높은 수치의 spatial ERGAS (2.08)와 spectral ERGAS(1.50)으로 나타났다(Fig.

Fig. 7. (a, b) Original KOMPSAT-2 MS and PAN images and the fused MS image (c) HPF, (d) modified IHS, (e) pan-sharpened, (f) wavelet in Fig. 1(c).

Fig. 8. (a, b) Original KOMPSAT-2 MS and PAN images and the fused MS image (c) HPF, (d) modified IHS, (e) pan-sharpened, (f) wavelet in Fig. 1(c).

Table 5. Quality evaluation results of scene (c)

Fusion method	Scene (a)			
	Spatial ERGAS (Ideal value : 0)	Spectral ERGAS (Ideal value : 0)	Q4 (Ideal value : 1)	SAM (Ideal value : 0)
HPF	2.84	1.22	0.66	8.76
Modified-IHS	1.34	3.01	0.60	6.14
Pan-sharpened	3.17	0.89	0.73	1.91
Wavelet	3.32	0.87	0.74	9.61
Mean	2.67 ± 0.91	1.50 ± 1.02	0.68 ± 0.07	6.61 ± 3.46

5(f), Fig. 6(f), Table 4).

(3) Scene (c)

Scene (c)는 2007년 5월 26일에 전라남도 함평군 인근에서 촬영된 영상으로, 바다와 해양구조물(방파제, 항구 등)을 찾아 볼 수 있으며 일부내륙 지역에서는 안개가 낀 효과가 나타났다(Fig. 7).

HPF는 전반적인 색상이 다소 어둡게 표현되는 단점이 있었지만, 공간정보의 보존정도는 상대적으로 우세하게 나타났다. 특히, spatial ERGAS는 2.84로 modified IHS 다음으로 낮은 수치를 보였다(Fig. 7(c), Fig. 8(c), Table 5).

Modified IHS의 경우, spatial ERGAS 값은 1.34로 가장 우수한 수치를 나타냈지만, spectral ERGAS와 Q4는 각각 3.01, 0.60으로 상대적으로 가장 왜곡된 수치를 기록했다. 또한, SAM은 6.14로 pan-sharpened (1.91)와 비교하여 3배 이상 큰 차이를 나타냈다(Fig. 7(d), Fig. 8(d), Table 5).

Pan-sharpened와 wavelet는 시각적으로 매우 유사한 결과를 보였으며, 상대적으로 원 영상의 색상 정보

를 잘 보존하고 있었다. 또한, 정량적 분석결과도 상호간 상당히 유사한 수치를 나타냈다(Fig. 7(e, f), Fig. 8(e, f), Table 5).

(4) Scene (d)

Scene (d)는 2009년 9월 2일에 중국 진창시 인근에서 촬영된 영상으로, 사막과 초원, 일부 산악지역으로 구성되어 있다(Fig. 9).

HPF와 wavelet는 대부분의 평가지표에서 상당히 유사한 수치를 보였다. HPF와 wavelet에서 spatial ERGAS는 0.69와 0.64, spectral ERGAS는 0.68와 0.48, SAM은 4.72와 4.11으로 거의 차이를 보이지 않았다. 하지만, Q4는 각각 0.56과 0.71으로 전체 영상에서 가장 낮은 값과 가장 높은 값을 나타냈다. 전체 영상과 확대영상에 대한 시각적 분석에서, 융합영상간 색상의 차이점은 거의 보이지 않았지만, wavelet의 공간 왜곡이 다소 크게 나타났다(Fig. 9(c, e), Fig. 10(c, e), Table 6).

Modified IHS와 pan-sharpened의 경우, spatial ERGAS는 0.51과 0.33, spectral ERGAS는 0.61과

Fig. 9. (a, b) Original KOMPSAT-2 MS and PAN images and the fused MS image (c) HPF, (d) modified IHS, (e) pan-sharpened, (f) wavelet in Fig. 1(d).

Fig. 9. Continued.

Fig. 10. (a, b) Original KOMPSAT-2 MS and PAN images and the fused MS image (c) HPF, (d) modified IHS, (e) pan-sharpened, (f) wavelet in Fig. 1(d).

Table 6. Quality evaluation results of scene (d)

Fusion method	Scene (a)			
	Spatial ERGAS (Ideal value : 0)	Spectral ERGAS (Ideal value : 0)	Q4 (Ideal value : 1)	SAM (Ideal value : 0)
HPF	0.69	0.68	0.56	4.72
Modified-IHS	0.51	0.61	0.69	6.35
Pan-sharpened	0.33	0.45	0.67	1.16
Wavelet	0.64	0.48	0.71	4.11
Mean	0.54 ± 0.16	0.56 ± 0.11	0.66 ± 0.07	4.09 ± 2.17

0.45, Q4는 각각 0.69와 0.67로 큰 차이를 나타내지는 않았다. 그러나 modified IHS와 pan-sharpened의 SAM은 각각 6.35와 1.16으로 4배 이상 큰 폭의 차이를 나타냈다(Fig. 9(d, f), Fig. 10(d, f), Table 6).

2) 종합적 분석

총 16장의 융합영상을 종합적으로 분석하였을 때, spatial ERGAS는 modified IHS에서 가장 낮은 수치를 보였으며, spectral ERGAS와 Q4는 pan-sharpened 방법에서 상대적으로 높은 결과를 나타냈다. 또한, SAM의 경우, Fig 1(b)를 제외하고, pan-sharpened 방법이 가장 낮은 수치를 나타냈다. Spatial/spectral ERGAS와 SAM의 평균은 각각 5와 12이하의 수치를 나타냈으며, Q4는 0.19-0.85사이의 수치를 보였다. 각각의 평가지표에 대한 전체 영상에서의 평균값을 비교

하였을 때, spatial ERGAS는 modified IHS에서, spectral ERGAS, Q4, SAM은 pan-sharpened에서 상대적으로 우수한 성과를 보였다. Modified IHS 경우, spatial ERGAS를 제외한 평가지표에서 다소 불안정한 결과를 나타냈으며, 특히 spectral ERGAS는 Fig. 1(d)을 제외한 모든 영상에서 다른 융합기법들의 결과보다 1.5배 이상 크게 나타났다. Fig. 11은 각 평가지표별 평가 결과를 나타내며, Table 7은 서로다른 융합기법별 각각 4장의 융합영상에서 계산된 결과의 평균값을 나타낸다.

(1) HPF 융합

색상의 보존정도는 wavelet과 유사한 성과를 보였으며, 공간정보의 보존력은 pan-sharpened 다음으로 높은 결과를 나타냈다. 또한, SAM값이 상대적으로 크게

Fig. 11. Quality evaluation results of the scenes used for this study : (A) spatial ERGAS, (B) spectral ERGAS, (C) Q4, (D) SAM.

Table 7. Quality evaluation results of 4 KOMPSAT-2 scenes used for tests

Fusion method	Scene (a)			
	Spatial ERGAS (Ideal value : 0)	Spectral ERGAS (Ideal value : 0)	Q4 (Ideal value : 1)	SAM (Ideal value : 0)
HPF	2.30 ± 1.20	1.21 ± 0.49	0.60 ± 0.18	7.85 ± 2.84
Modified IHS	1.41 ± 0.84	2.57 ± 1.44	0.56 ± 0.25	7.15 ± 1.05
Pan-sharpened	2.27 ± 1.61	0.95 ± 0.53	0.66 ± 0.19	4.11 ± 3.64
Wavelet	2.47 ± 1.42	1.24 ± 0.72	0.63 ± 0.22	7.95 ± 2.78

나타났던 Fig. 1(a, c) 영상의 경우, 블루와 그린계통의 색상이 다소 빛바랜 색상으로 표현되었다. spectral ERGAS는 평균 1.21의 수치로 pan-sharpened 다음으로 높은 성과를 나타냈으며, spatial ERGAS, Q4, SAM의 평균은 각각 2.30, 0.60, 7.85의 수치를 나타냈다(Fig. 11, Table 7).

(2) Modified IHS 융합

실험한 모든 영상에서 상대적으로 명도가 높고, 매우 큰 색상 왜곡이 관찰되었다. 식생지역의 경우, saturation (화이트색상과의 포화정도)효과가 크게 나타나 그린색상이 블루계통의 색상으로 왜곡되어 표현되었으며, 수계지역의 경우 그린색상은 블루로, 블루색상은 블랙에 가까운 색으로, 화이트색상은 레드색상으로 왜곡됨으로써 색상의 균형이 일치하지 않는 결과를 나타냈다. 색상의 왜곡은 매우 심하게 나타났지만 공간적 세밀함의 표현은 상대적으로 우수했으며, 특히 대상물 사이의 경계가 매우 뚜렷하게 구분되었다. Spatial ERGAS는 평균 1.41으로 전체 융합기법들 중에서 가장 우월한 수치를 보였다. Spectral ERGAS, Q4의 평균은 2.57, 0.56의 값으로 전체 영상에서 가장 왜곡이 심하고, 불규칙한 값으로 표현된 반면, SAM의 경우, 평균은 7.15로 pan-sharpened 다음으로 낮고 상대적으로 안정적인 변화를 나타냈다(Fig. 11, Table 7).

Modified IHS로 융합된 Fig. 1(a, c) 영상의 경우, SAM값은 상대적으로 작은 반면, spectral ERGAS는 매우 큰 값을 보였다. 시각적인 분석결과, 명도가 지나치게 강조되어, 상대적으로 큰 색상 왜곡이 관찰되었다(Fig. 4(d), Fig. 7(b)). 이러한 현상은 SAM의 경우, 방사 벡터 사이의 방사각의 차이만 나타낼 뿐, 방사 벡터 사이의 길이차이는 고려되지 않는 기본 특성에 기인한 것으로 판단된다.

(3) Pan-sharpened 융합

대부분의 영상에서 색상의 보존과 공간적 세밀함이 매우 우수한 결과를 나타냈다. Spectral ERGAS, Q4, SAM의 평균은 각각 0.95, 0.66, 4.11으로 전체 영상에서 가장 높은 성과를 보였다. 특히, SAM은 평균 4.11의 수치를 보임으로써 다른 융합기법과 비교하여 3이상 낮은 결과를 나타냈다. Spatial ERGAS는 평균 2.27으로 modified IHS(1.41)보다는 높았지만 상대적으로 좋은 결과를 보였다(Fig. 11, Table 7).

(4) Wavelet 융합

전반적으로 원 칼라영상의 색상은 잘 유지하고 있었지만, 부분적으로 확대한 영상에서는 상당량의 잡음이 관찰되고, 영상이 블록화 되어 표현되는 효과가 나타났다. Spectral ERGAS는 평균 1.24, Q4와 SAM은 각각 0.63와 7.95의 수치를 나타냄으로써, Q4는 pan-sharpened와 SAM은 HPF와 각각 유사한 수치를 나타냈다. 하지만, spatial ERGAS는 평균 2.47의 값을 나타냄으로써 전체 영상들에서 가장 수치가 높고, 불규칙한 변화를 보였다. 결과적으로 색상은 잘 유지되었지만, 영상의 판독성은 매우 저하되어 표현되었다(Fig. 11, Table 7).

4. 결 론

본 연구의 목적은 KOMPSAT-2 위성영상에 가장 일반적으로 적용 가능한 영상융합기법을 제시하는 것으로, 지역적/계절적 특성이 서로 다른 4장의 KOMPSAT-2 위성영상을 이용하여, HPF, modified IHS, pan-sharpened, wavelet 영상융합기법의 성능을 정량적, 시각적으로 비교분석하였다.

첫째, HPF 융합기법의 경우, spectral ERGAS는 평균 1.21의 수치로 pan-sharpened 다음으로 높은 성과를 나타냈으며, spatial ERGAS, Q4, SAM의 평균은 각각 2.30, 0.60, 7.85의 수치를 나타냈다.

둘째, modified IHS 융합기법은 상대적으로 처리속도가 빠르고, 대부분의 지역에서 공간적 세밀함을 가장 잘 표현하였다. 그러나 색상의 왜곡이 매우 두드러졌다. spatial ERGAS는 1.41으로 전체 융합기법들 중에서 가장 우월한 수치를 보였지만, spectral ERGAS, Q4는 2.57, 0.56의 값으로 전체 영상에서 가장 왜곡이 심하고, 불규칙한 값으로 표현되었다. 또한, SAM은 평균 7.15의 값을 나타냈다.

셋째, pan-sharpened 융합기법은 가장 안정적이고 높은 융합성적을 나타냈으며, spectral ERGAS, Q4, SAM의 평균값은 각각 0.95, 0.66, 4.11으로 다른 기법에 비교하여, 가장 높은 성능을 나타냈다. 또한, spatial ERGAS는 평균 2.27의 수치로 modified IHS 다음으로 가장 낮은 수치를 나타냈다.

넷째, wavelet 융합기법의 경우, 전반적으로 원 칼라 영상의 색상을 잘 유지하고 있었지만, 공간정보의 보존 정도는 매우 낮게 나타났다. spectral ERGAS는 1.24, Q4와 SAM은 각각 0.63과 7.95으로, Q4는 pan-sharpened와 SAM은 HPF와 유사한 수치를 나타냈지만, spatial ERGAS는 2.47으로 가장 수치가 높고, 불규칙한 변화를 보였다

종합적인 분석결과를 고려할 때, pan-sharpened는 색상정보와 공간정보의 균형적인 보존 측면에서 상대적으로 우수한 결과를 나타냈다.

사 사

이 논문은 한국항공우주연구원의 고해상도 대용량 광학영상자료 자동 모자이크 기술 개발 사업의 지원을 받아 수행되었으며, 또한 공간정보 전문 인력 양성사업의 지원을 받아 수행되었습니다. KOMPSAT-2영상을 제공해주신 한국항공우주연구원에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

- 김용현, 김윤수, 2009. Fast IHS 변환을 이용한 trade-off 영상 융합기법, 항공우주기술학회지, 8(2): 26-32.
- 최재완, 김형태, 2008. 수정된 영상유도 기법을 통한 융합영상의 분광정보 향상 알고리즘, 한국지형공간정보학회지, 16(3): 15-20.
- Alparone, L., S. Baronti, A. Garzelli, and F. Nencini, 2004. A global quality measurement of pan-sharpened multispectral imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1(4): 313-317.
- Alparone, L., L. Wald, J. Chanussot, C. Thomas, P. Gamba, and L.M. Bruse, 2007. Comparison of algorithms: Outcome of the 2006 GRS-S Data-Fusion contest, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(10): 219-228.
- Chavez, P.S., S.C. Sides, and J.A. Anderson, 1991. Comparison of three different method to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(3): 295-303.
- Choi, M., 2006. A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(6): 167-168.
- Gangkofner, U. and D. Holcomb, 2008. HP Resolution Merge, In: *ERDAS IMAGINE Help*, Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC, 2008.
- King, R.L. and J.W. Wang, 2001. A wavelet based algorithm for pan sharpening Landsat 7 imagery, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Sydney, Australia, July 9-13, 2001, 849-851.
- Klonus, S. and M. Ehlers, 2009. Performance of evaluation methods in image fusion, *International Conference on Information Fusion*,

- Seattle, USA, July 6-9, 2009, 1409-1416.
- Kruse, F.A., J.W. Boardman, A.B. Lefkoff, K.B. Heidebrecht, A.T. Shapiro, P.J. Barloon, and A.F.H. Goetz, 1993. The Spectral Image Processing System (SIPS): Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 44: 145-163.
- Saacedra, M.L. and C. Gonzalo, 2006. Spectral or spatial quality for fused satellite imagery? A trade-off solution using the wavelet a'trous algorithm, *International Journal of Remote Sensing*, 27(7): 1453-1364.
- Ranchin, T. and L. Wald, 2000. Fusion of high spatial and resolution images: the ARSIS concept and its implementation, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(1): 49-61.
- Sangwine, S.J. and T.A. Ell, 2000. Color image filters based on hypercomplex convolution, *IEEE Vision, Image and Signal Processing*, 147(2): 89-93.
- Siddiqui, Y., 2003. The modified IHS method for fusing satellite imagery, *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Anchorage, USA, May. 5-9, 2003, in CD.
- Vrabel, J., 1996. Multispectral imagery band sharpening study, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9): 1075-1083.
- Thomas, C. and L. Wald, 2006. Comparing distances for quality assessment of fused images, *European Association of Remote Sensing Laboratories*, Warsaw, Poland, May 29 - June 2, 2006: 101-111.
- Wald, L., 2000. Quality of high resolution synthesized: is there a simple criterion?, *International Conference on Fusion of Earth Data*, Sophia Antipolis, France, Jan 26-28, 2000, 99-103.
- Wang, Z. and A.C. Bovik, 2002. A universal image quality index, *IEEE Signal Processing Letters*, 9(3): 81-84.
- Wang, Z., D. Ziou, C. Armenakis, D. Li, and Q. Li, 2005. A comparative Analysis of Image Fusion Methods, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(6): 1391-1402.
- Yakhidani, M.F. and A. Azizi, 2010. Quality assessment of image fusion techniques for multisensor high resolution satellite images(case study: IRS-P5 and IRS-P6 satellite images), *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, Vienna, Austria, July 5-7, 2010, 204-209.
- Yocky, D.A., 1996. Multiresolution Wavelet Decomposition Image Merger of Landsat Thematic Mapper and SPOT Panchromatic Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9): 1067-1074.
- Zhang, Y., 2002. A new automatic approach for effectively fusing Landsat-7 as well as IKONOS images, *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Toronto, Canada, June 24-28, 2002, 2429-2431.