고해상 광학센서의 스펙트럼 응답에 따른 영상융합 기법 비교분석

이하성 · 오관영 · 정형섭[†]

서울시립대학교 공간정보공학과

Comparative Analysis of Image Fusion Methods According to Spectral Responses of High-Resolution Optical Sensors

Ha-Seong Lee, Kwan-Young Oh and Hyung-Sup Jung[†]

Department of Geoinformatics, The University of Seoul

Abstract : This study aims to evaluate performance of various image fusion methods based on the spectral responses of high-resolution optical satellite sensors such as KOMPSAT-2, QuickBird and WorldView-2. The image fusion methods used in this study are GIHS, GIHSA, GS1 and AIHS. A quality evaluation of each image fusion method was performed with both quantitative and visual analysis. The quantitative analysis was carried out using spectral angle mapper index (SAM), relative global dimensional error (spectral ERGAS) and image quality index (Q4). The results indicates that the GIHSA method is slightly better than other methods for KOMPSAT-2 images. On the other hand, the GS1 method is suitable for Quickbird and WorldView-2 images.

Key Words : GIHS, GIHSA, GS1, AIHS

요약 : 본 연구는 서로 다른 센서 특성을 지닌 KOMPSAT-2, QuickBird 및 WorldView-2 고해상도 위성영상에 영상융합기법을 적용하여 그 결과를 비교평가 하는 것이다. 사용된 기법은 대표적인 CS 기반 융합 기법인 GIHS, GIHSA, GS1 및 Adaptive IHS를 사용하였다. 영상융합 기법의 품질평가는 시각적 분석과 정량적 분석을 수행하였으며, 정량적 분석에는 SAM, Spectral ERGAS 및 Q4를 사용하였다. KOMPSAT-2 영상은 GHISA 기법의 경우 상대적으로 우수한 성능을 나타내는 반면, QuickBird와 WorldView-2영상은 GS1기법의 경우에 우수한 성능을 나타낸다.

1. 서론

고해상도 위성영상을 이용한 원격탐사 기술은 관심

지역에 대하여 보다 신속하고 광범위한 정보를 획득할 수 있는 최적의 정보수집 수단이다(Oh *et al.*, 2012). 고해상도의 위성영상 활용의 극대화를 위해서는 높은 공간

접수일(2014년 2월 20일), 수정일(1차 : 2014년 4월 9일, 2차 : 4월 11일), 게재확정일(2014년 4월 12일).

[†] 교신저자: 정형섭(hsjung@uos.ac.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

해상도의 다분광(Multi-spectral, MS)영상을 활용하는 것이 이상적이다. 그러나, 센서의 물리적 한계로 인하여 높은 공간해상도의 다분광영상을 제공하는 것은 이론적으로 불가능하다(Aiazzi *et al.*, 2002). 이와 같은 물리적 한계를 극복하기 위하여, 영상융합 기법이 개발되었다(Laben and Brower, 1998; Tu *et al.*, 2004; Aiazzi *et al.*, 2007).

영상융합 기법이란, 공간해상도가 높은 흑백(Panchromatic; Pan)영상과 분광해상도가 높은 다분광영상을 수학적으로 융합하여 높은 공간해상도의 다분광영상을 제공하는 기술이다(Zhang, 2004). 이는 원격탐사와 영상처리 분야에서 상당히 중요한 연구 분야로 인정받고 있으며, 데이터 퓨전(data fusion), 영상머지(image merging), 팬샤프닝(pan-sharpening) 등으로 불려져 왔다. 이러한 영상융합기법은 크게 Multi-Resolution Analysis (MRA)기반 기법과, Component-Substitution (CS)기반 기법으로 분류할 수 있다(Choi and Kim, 2010; Kim *et al.*, 2011).

MRA기반의 융합방법은 웨이블렛(Wavelet)이나 라플라스 피라미드(Laplacian pyramid) 등을 이용하여 흑백영상 내에 존재하는 고주파 정보를 추출한 후, 이를 다분광영상에 주입함으로써 융합영상을 생성한다(Choi, 2011). 반면, CS기반의 융합기법은 다분광영상을 이용하여 생성한 모의 저해상도 흑백영상과 고해상도의 원 흑백영상의 차를 원 다분광영상에 주입하는 방법으로, 고주파영상을 주입한다는 점에서는 MRA 기법과 동일하지만, 고주파 영상을 생성하는 방법에서 차이가 존재한다.

MRA기반의 방법은 CS 기반의 방법보다 다분광영상의 분광정보를 효과적으로 보존하지만, 처리 속도가 느리며, 흑백영상의 고주파정보로 인해 영상 내 객체들의 경계가 모호해지고, blurring 현상이 발생하게 되어 융합된 영상의 공간해상도가 흑백영상의 공간해상도 보다 현저히 낮은 지역이 발생하게 된다(Baronti *et al.*, 2011; Kim *et al.*, 2011). 그러나, CS기법은 대용량 위성영상에 적합한 빠른 속도와 흑백영상의 공간해상도를 효과적으로 보존한다는 장점이 있다(Dou *et al.*, 2007).

이와 같은 이유로 최근 개발되는 영상융합기법은 기 개발된 CS기법을 보완하는 방향으로 진행되고 있다(Aiazzi *et al.*, 2007). Laben and Brower(1998)는 분광정보를 효과적으로 보존하지만 공간정보 보존이 미흡한 특징을 지니는 Gram-Schmidt (GS) 영상융합기법을 제시

하였으며, 이는 Environment for Visualizing Images (ENVI) 상용소프트웨어에 탑재되었다. Tu *et al.*(2004)는 3개 밴드만을 이용한 Intensity-Hue-Saturation (IHS)기법이 아닌 근적외선(NIR)밴드를 포함하는 Generalized IHS (GIHS)기법과 Green밴드와 Blue밴드에 가중치를 주는 GIHS Fast (GIHSF)기법을 제시하였다. Choi *et al.*(2006)은 GIHSF기법을 기반으로 Green밴드와 Blue밴드의 가장 이상적인 계수를 구하여 융합하는 Extended IHS (EIHS)기법을 제시하였으며, Aiazzi *et al.*(2007)는 다분광영상과 흑백영상의 선형 회귀분석을 통해 각 밴드에 계수를 구하는 GIHS Adaptive (GIHSA)기법을 제시하였다. 또한, Rahmani *et al.*(2010)은 분광해상도와 공간해상도를 향상시킬 수 있는 두 가지 기법을 합친 Adaptive IHS (AIHS)를 제시하였다. 최근에는 반복적으로 고주파 정보를 추출하여 현존하는 융합기법보다 분광해상도 품질을 유지하면서 공간해상도를 향상시킨 Hybrid Pansharpening 기법이 제시되었다(Choi *et al.*, 2013).

그러나, 위와 같은 융합기법을 이용하여 제작된 융합영상의 최종적인 성능은 기본적으로 센서 자체의 특성에 기인하는 한계점이 존재한다. 왜냐하면, 각 위성센서들은 서로 다른 스펙트럼 응답특성을 지니고 있기 때문에 다른 융합영상 결과를 나타내며 색상왜곡 등이 발생하게 된다. 위성센서의 흑백밴드의 파장대역이 다분광밴드의 파장대역을 포함할 경우, 즉, 이상적인 스펙트럼 응답특성을 갖는다면 고품질의 융합영상 결과를 기대할 수 있지만 이는 현실적으로 어렵기 때문에, 센서의 스펙트럼 응답특성이 융합결과에 어떠한 영향을 끼치는지 알아볼 필요가 있다.

따라서, 본 연구에서는 고해상도 위성영상들 중 서로 다른 스펙트럼 응답특성을 지닌 KOMPSAT-2, QuickBird 및 WorldView-2 영상에 동일한 융합기법을 적용하고 융합영상결과 간 비교평가를 수행하였다. 3개의 위성영상에서 서로 유사한 지역을 선정하여, 지역적인 특성에 따른 차이를 최대한 배제하였고, 융합기법은 기 개발된 CS기법 중 GIHS, GIHSA, GS1 및 AIHS기법을 사용하였다. 또한, 영상융합 기법의 품질평가를 위해 시각적 분석과 정량적 분석을 수행하였으며, 정량적 분석에는 색상왜곡을 평가하는 Spectral Angle Mapper (SAM), Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthèse (Spectral ERGAS) 및 Q4기법을 사용하였고, 공간정보 보존을 평

가하는 Spatial ERGAS기법을 사용하였다.

2. 실험 및 평가방법

1) 연구자료

본 연구에 사용된 위성은 KOMPSAT-2, QuickBird 및 WorldView-2로 고해상도 광학위성이며, 각각의 위성은 서로 다른 파장범위와 공간해상도를 가진다. KOMPSAT-2 위성은 Ground Sample Distance (GSD) 1 m의 흑백영상과 4 m의 다분광영상을 제공하며, QuickBird의 경우 0.6 m의 흑백영상과 2.4 m의 다분광영상, WorldView-2의 경우 0.5 m의 흑백영상과 2.0 m의 다분광영상을 제공하고 있다(Table 1).

연구에 사용된 3개의 위성은 서로 다른 스펙트럼 응

답특성을 가지고 있다. Fig. 1(a)는 흑백밴드가 다분광밴드를 포함하거나, 밴드 간 중첩되지 않은 경우로써 이상적인 스펙트럼 응답을 나타내지만, 실제로 이러한 위성 영상은 존재하지 않는다. KOMPSAT-2의 경우, Blue밴드와 Green밴드가 일부 중첩되는 특징이 있으며 흑백밴드의 파장대역이 500 nm-900 nm이므로, 450 nm-520 nm인 Blue밴드를 거의 포함하지 못하고 있으며, Green밴드는 절반이상이 포함되지 못하고 있다(Fig. 1(b)). QuickBird의 경우, KOMPSAT-2에 비해 Blue밴드와 Green밴드가 450 nm-550 nm사이에 중첩이 되어있는 특징이 있으며 흑백밴드가 Blue밴드를 거의 포함하지 못하고 있으며, Green밴드가 약 40% 정도가 포함되지 못하고 있다(Fig. 1(c)). 마지막으로 WorldView-2의 경우, KOMPSAT-2, QuickBird와 달리 비해 밴드간의 중첩이 거의 없으며, 흑백밴드가 Blue밴드와 Green밴드에 약 20%이상 포함하

Table 1. Characteristics of the KOMPSAT-2, QuickBird and WorldView-2

Parameters			Values		
			KOMPSAT-2	QuickBird	WorldView-2
Spectral bands	PAN		500-900 nm	450-900 nm	450-800 nm
	MS	Coastal	-	-	400-450 nm
		Blue	450-520 nm	450-520 nm	450-510 nm
		Green	520-600 nm	520-600 nm	510-580 nm
		Yellow	-	-	585-625 nm
		Red	630-690 nm	630-690 nm	630-690 nm
		Red-edge	-	-	705-745 nm
		NIR-1	760-900 nm	760-900 nm	770-895 nm
Ground resolution	PAN		1.0 m	0.6 m	0.5 m
	MS		4.0 m	2.4 m	2.0 m

(a)

(b)

Fig. 1. Spectral response: (a) Ideal, (b) KOMPSAT-2, (c) QuickBird, (d) WorldView-2 (Calvalportal.ceos.org, www.digitalglobe.com).

(c)

(d)

Fig. 1. Continued.

(a)

(b)

(c)

Fig. 2. Satellite images used for this study : (a) KOMPSAT-2, (b) QuickBird, (c) WorldView-2.

지 못한 특성이 있으며, NIR1밴드 중 일부 750 nm-800 nm대역만 포함하고 있다(Fig. 1(d)).

본 실험에서는 Blue, Green, Red 및 NIR (NIR-1)밴드를 사용하여 동일한 영상융합 기법을 적용하였으며, 지역적 특성 차이의 영향을 최소화하기 위해 유사한 지역을 선정하였다. 선정된 위성영상들은 바다 약 20%이상, 식생지역 약 50%이상, 도심지 약 10%이상 등을 포함하며, 각각의 영상의 위치는 2007년 04월 28일에 촬영된 한국의 거금도(KOMPSAT-2), 2011년 02월 12일에 촬영된 미크로네시아연방에 위치한 코스라에섬(QuickBird)과 2010년 01월 19일에 촬영된 브라질의 리우데자네이루 항구(WorldView-2)이다(Fig. 2).

2) 연구방법

융합영상의 품질을 평가하기 위해서는 고해상도의 다분광영상을 사용하는 것이 이상적이지만, 현실적으로 고해상도의 다분광영상을 제공하는 것은 불가능하

다. 따라서 다분광영상과 흑백영상과의 공간해상도의 차이를 기준으로 각각의 영상을 해상도 차이의 비율만큼 공간해상도를 강제적으로 낮춘 영상을 사용하는 Wald *et al.* (1997)이 제안한 합성특성(Synthesis property) 평가방법을 사용하였다. 예를 들어, KOMPSAT-2 위성영상의 경우, 공간해상도 4 m의 다분광영상과 1 m의 흑백영상이 제공된다. 이를 각각의 영상에 저주파 필터(MTF Cut-off frequency)를 적용하고, bicubic 보간 기법을 사용하여, 16 m의 다분광영상과 4 m의 흑백영상으로 강제로 공간해상도를 낮춘 후, 융합기법을 적용하여 4 m의 융합영상을 제작하고 원 영상과 비교분석을 수행하였다(Fig. 3).

융합기법으로는 CS계열의 융합기법인 GIHS, GIHSA, GS의 GS1 및 AIHS기법에 적용하여 총 12장의 융합영상을 제작하였다. 융합영상에 대해 품질평가를 수행하기 위해서 시각적, 정량적 분석방법을 수행하였으며, 사용된 정량적 지표는 SAM, Spectral ERGAS, Q4를 사용하였

Fig. 3. Flow chart of this study.

으며, 공간정보 보존을 평가하기 위해 Spatial ERGAS를 사용하였다.

시각적 분석 방법은 전체영상의 전반적인 왜곡의 경향성을 관찰한 후, 주요 지역을 확대하여 공간정보 보존 정도와 색상왜곡을 중점으로 분석하였다. 공간정보 보존 정도평가에서는 건물의 모서리, 도로, 작은 대상물 등을 중점으로 관찰하였고, 색상왜곡 평가에서는 블러링(blurring), 채도(saturation), 색상(color) 등을 통해 나타나는 왜곡 현상을 중점으로 분석하였다.

정량적 분석 방법에 사용된 기법은 원 영상과의 색상 왜곡 비교평가를 위해 가장 널리 사용되고 있는 SAM, Spectral ERGAS, Q4를 사용하였으며, 공간정보 보존을 평가하기 위해 Spatial ERGAS를 사용하였다.

(1) 융합기법

CS기반의 기법은 다분광영상을 이용하여 생성한 모의 저해상도 Intensity (I) 영상과 고해상도의 원 흑백영상의 차를 원 다분광영상에 주입하는 방법이다. CS기반의 기법은 MRA기반의 기법에 비하여 뛰어난 공간해상도를 가지는 융합영상을 얻을 수 있지만, 다분광영상의 분광정보가 왜곡되는 문제를 가지고 있다. 그러나, 앞서 제시한 것과 같이 CS기법은 대용량 위성영상에 적합한 빠른 속도와 흑백영상의 공간해상도를 효과적으로 보존한다는 장점이 있다.

① GIHS 융합기법

기존의 IHS기법은 RGB 영상을 IHS 공간으로 변환시키고 IHS 공간에서 명도값을 흑백영상으로 대체한 후, 역변환을 통하여 융합영상을 제작한다. 그러나 이 기법으로 제작된 융합영상은 뛰어난 공간해상도를 제공하나 흑백밴드가 Blue밴드와 Green밴드를 완전히 포함하

지 못하여 분광정보의 왜곡을 불러일으킨다. 특히, 식생 지역과 관련성이 매우 높은 NIR밴드를 고려하지 않아 식생지역에서 상당한 색상왜곡을 발생시킨다.

이를 해결하고자, Tu *et al.*(2004)은 NIR밴드를 포함하는 GIHS기법을 제시하였으며, 이는 식(1)과 같이 δ 를 이용한 단순 사칙연산을 이용하여 적용된다.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ NIR \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \\ NIR + \delta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta &= PAN - I \\ I &= (R + G + B + NIR)/4 \end{aligned}$$

여기서, PAN 은 흑백영상이며, I 는 다분광밴드의 평균으로 구한 Intensity값을 나타낸다. 본 연구에서는 PAN 과 I 를 이용하여 δ 계수를 구한 뒤, 다분광밴드 각각에 계수를 더하여 융합영상을 수행하였다.

② GIHSA 융합기법

GIHS기법과 같이 단순히 밴드의 평균값을 이용하면 식생지역의 Intensity 값이 실제 흑백보다 적게 들어가 색상왜곡이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해, Aiazzi *et al.*(2007)는 각 밴드간에 고정된 가중치가 아닌 다분광영상과 흑백영상의 선형 회귀분석을 수행하여 가중치를 주는 GIHSA기법을 제시하였다. 이 기법은 기존의 GIHS 융합 기법에서의 I (식(2))와 PAN 영상 간의 평균 제곱오차를 최소화하는 $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3, \hat{w}_4$ 와 $\hat{b}$ 의 계수들을 추정하여 Intensity를 계산하는 것이 특징이며(식(2), (3)) 이로부터 융합영상을 제작한다.

$$\tilde{I} = w_1 \cdot B + w_2 \cdot G + w_3 \cdot R + w_4 \cdot NIR + b \quad (2)$$

$$I = \hat{w}_1 \cdot B + \hat{w}_2 \cdot G + \hat{w}_3 \cdot R + \hat{w}_4 \cdot NIR + \hat{b} \quad (3)$$

$$P^i = \sum_{i=1}^N \hat{w}_i \cdot M_i + \hat{b} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \\ NIR \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + \delta \\ G + \delta \\ B + \delta \\ NIR + \delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\delta = PAN - I$$

여기서, $\tilde{I}$ 는 GIHS기법과 같은 Intensity값이며, w_1, w_2, w_3, w_4 및 b 는 계수로서 w_1, w_2, w_3, w_4 는 0.25, b 는 0이다. $\tilde{I}$ 는 식(4)를 이용하여 구한 $\hat{w}_1, \hat{w}_2, \hat{w}_3, \hat{w}_4$ 와 $\hat{b}$ 의 계수를 이용하여 계산된 Intensity이다(식(5)). 본 연구에서는 마찬가지로 다분광밴드 각각에 δ 계수를 더하여 융합을 수

행하였다.

③ GS1 융합기법

GS1 기법은 기존 GIHS 기법에서 고주파 영상 δ 에 곱해지는 새로운 융합계수 g_i 를 정의한 것이다(Laben and Brower, 1998). 융합계수 g_i 는 다분광 영상과 Intensity의 공분산 및 분산비를 이용하여 계산된다(식 (6)).

$$g_i = \frac{cov(I, M_i)}{var(I)} \quad (6)$$

이 때, cov 는 공분산, var 는 분산을 의미한다. 하지만, 이와 같은 융합기법은 GIHS 기법에 비해 분광 왜곡량은 줄어들지만, 일부 밴드 간 공간/분광적 특성을 조절하는 비율이 상대적으로 낮게 측정되어 전체 영상 해상도가 저하되는 경우가 발생한다.

④ AIHS 융합기법

Rahmani *et al.*(2010)은 Image-adaptive coefficient 기법과 Edge-adaptive IHS 기법을 이용하여 분광해상도와 공간 해상도를 향상시킬 수 있는 AIHS를 제시하였다.

이 기법은 흑백영상과 유사한 I 를 계산하는 것으로 색상왜곡을 최소화하며 다음 식 (7)과 같다.

$$I = \sum_{i=1}^N \alpha_i M_i \approx P \quad (7)$$

여기서, M_i 는 다분광영상 i 번째 밴드의 평균, P 는 흑백영상을 말한다. α_i 는 색상왜곡을 최소화하는 계수로서 다음 식(8), (9)으로부터 계산할 수 있다.

$$\min G(\alpha) = \sum_x \left(\sum_i \alpha_i M_i(x) - P(x) \right)^2 + \gamma \sum_i \left(\max(0, -\alpha_i) \right)^2 \quad (8)$$

$$\alpha_i^{t+1} + 2\tau \sum_{i=1}^N \left[\left(\sum_x (M_i(x) M_n(x)) \right) \alpha_i^{t+1} \right] \quad (9)$$

$$= \alpha_i^t + 2\tau \sum_x (P(x) M_n(x)) + 2\tau \gamma \max(0, -\alpha_i^t)$$

여기서, $G(\alpha)$ 는 α 를 구하는 G함수를 말하는 것이며, γ 는 라그랑주 승수를 이용하여 α 값이 음의 값이 안되도록 한다.

그 다음, 흑백영상에서 edge정보를 추출하여 공간해상도를 향상시키는 Image-adaptive coefficient 기법을 사용하였다(식 (10)).

$$F_i = M_i + h(x)(P - 1) \quad (10)$$

여기서, $h(x)$ 는 edge 추출한 함수로서, 본 연구에서 사

용한 edge 추출 방법은 Perona와 Malik에 의해 제안된 exponential edge 추출 식이다(Perona and Malik, 1990)(식 (11)).

$$h(x) = \exp \left(-\frac{\lambda}{|\nabla P|^4 + \varepsilon} \right) \quad (11)$$

여기서, ∇P 는 흑백영상의 기울기, $\lambda = 10^{-9}$, $\varepsilon = 10^{-10}$ 이다.

(2) 품질평가 기법

융합영상의 품질평가를 비교평가 하기 위해 시각적/정량적 평가를 하였다. 시각적 분석 방법은 전체영상의 전반적인 왜곡의 경향성을 관찰한 후, 주요 지역을 확대하여 공간정보 보존정도와 색상왜곡을 중점으로 분석하였다. 공간정보 보존 정도평가에서는 건물의 모서리, 도로, 작은 대상물 등을 중점으로 관찰하였고, 색상왜곡 평가에서는 블러링, 채도, 색상 등을 통해 나타나는 왜곡 현상을 중점으로 분석하였다. 정량적 평가에 사용된 평가지표로 SAM, Spectral ERGAS, Q4 및 Spatial ERGAS를 사용하였다.

① SAM

SAM 원래의 다분광영상과 융합된 영상의 방사벡터 사이의 방사각의 절대 값을 이용하여 정의되며 계산식은 다음 식(12)와 같다(Kruse *et al.*, 1993).

$$SAM(v, \hat{v}) = \arccos \left(\frac{\langle v, \hat{v} \rangle}{\|v\|_2 \cdot \|\hat{v}\|_2} \right) \quad (12)$$

여기서, v 와 $\hat{v}$ 는 원래의 다분광영상과 융합된 영상의 방사벡터이며, $\langle v, \hat{v} \rangle$ 는 두 방사 벡터 원소들 사이의 곱의 합, $\|v\|_2 \cdot \|\hat{v}\|_2$ 는 두 벡터 간 내적을 의미한다. 이때, SAM값이 0에 가까울수록 색상왜곡이 없음을 나타낸다.

② Spectral ERGAS

Spectral ERGAS는 Ranchin and Wald(2000)가 융합영상의 전역적인 색상왜곡량을 측정하기 위하여 제안한 것으로, 원 영상과 융합영상의 Root Mean Square Error (RMSE)로 계산되며, 융합된 영상의 색상왜곡이 작을수록 0에 가까운 값을 나타낸다(식(13)).

$$ERGAS_{spectral} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{RMSE_{spectral}^2(B_i)}{M_i^2} \right)} \quad (13)$$

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

여기서, h 와 l 은 각각 흑백영상과 다분광영상의 공간

해상도이며, N_B 는 융합영상의 밴드의 수를, B_i 는 i 번째 밴드를, M_i 는 칼라영상 i 번째 밴드의 평균을 의미한다. N_p 는 융합영상의 화소 개수를, FUS_i 는 융합영상의 i 번째 밴드를 의미한다.

③ Q4

Q4는 효율적인 영상융합평가지수로 알려진 Q지수를 다분광영상에 일반화 되도록 수정한 것이다. 다분광영상의 한 화소를 다차원수로 가정하여 융합영상과 원다분광영상간의 분광유사도를 측정하는 방법으로 Q4는 $N \times N$ 크기의 윈도우 내의 화소로부터 최확값을 얻는 수치이며, 1에 가까울수록 좋은 결과를 나타낸다 (Alparone *et al.*, 2004). 본 연구에서는 32×32 윈도우를 사용하였다(식 (14)).

$$Q4 = \frac{|\sigma_{z_1 z_2}|}{\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}} \frac{2\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}}{\sigma_{z_1} \sigma_{z_2}} \frac{2|z_1| |z_2|}{2|z_1| + |z_2|} \quad (14)$$

여기서, z_1 과 z_2 는 융합영상과 원다분광영상의 방사벡터, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{z_1 z_2}$ 는 z_1 과 z_2 사이의 표준편차와 공분산, z_1 과 z_2 는 평균값을 의미한다.

④ Spatial ERGAS

Saadedra and Gonzalo(2006)이 제안한 방법으로 Spectral ERGAS와 마찬가지로 융합 결과와 히스토그램 조정된 흑백영상을 이용하여 RMSE를 이용하여 계산한다. 수치가 0에 가까울수록 흑백영상이 지닌 공간정보를 잘 보존한 것을 의미한다(식 (15)).

$$ERGAS_{spectral} = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N_B} \sum_{i=1}^{N_B} \left(\frac{RMSE_{spectral}^2(B_i)}{M_i^2} \right)} \quad (15)$$

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

여기서, h 와 l 은 각각 흑백영상과 다분광영상의 공간 해상도이며, N_B 는 융합영상의 밴드의 수를, B_i 는 i 번째 밴드를, M_i 는 칼라영상 i 번째 밴드의 평균을 의미한다. N_p 는 융합영상의 화소 개수를, FUS_i 는 융합영상의 i 번째 밴드를 의미한다.

3. 결과 및 분석

KOMPSAT-2, QuickBird 및 WorldView-2의 융합영상에 대해 시각적 및 정량적 분석을 수행하였다. 정량적 비

교평가를 위해서는 융합된 영상과 비교할 기준영상이 필요하나, 물리적 한계로 인해 존재하지 않기 때문에 원영상의 공간해상도를 강제로 낮추어 융합 결과를 도출하여 원영상과 비교평가를 수행하였다.

1) 정량적 분석

정량적 분석으로는 SAM, Spectral ERGAS, Q4 및 Spatial ERGAS의 평가지표를 사용하였다. SAM, Spectral ERGAS 및 Q4를 이용하여 원영상의 색상왜곡 정도를, Spatial ERGAS를 이용하여 공간정보 보존 정도를 판단하였다. SAM과 Spectral ERGAS는 0에 가까울수록, Q4는 1에 가까울수록 색상왜곡이 적다는 것을 의미하며, Spatial ERGAS는 0에 가까울수록 공간정보가 잘 보존된 것을 의미한다.

정량적 평가결과 KOMPSAT-2의 경우, GIHS기법의 SAM, Spectral ERGAS, Q4의 결과 각각 12.986, 2.393, 0.649 수치 값을 나타내어 분광정보 보존에 상대적으로 가장 좋지 못하였으나, Spatial ERGAS에서 7.276으로 공간정보 보존 정도가 높은 것으로 나타났다. 이는 GIHS기법의 특징인 뛰어난 공간해상도를 제공하나 분광정보 보존 정도가 미흡한 특징을 실제로 보였다. GIHSA기법은 SAM과 Spectral ERGAS의 결과 각각 6.611과 1.586 수치 값을 나타내어 분광정보 보존 정도 향상된 결과를 나타냈다. GS1기법의 경우, GIHS에 비해 좋은 결과를 나타냈으나, GIHSA기법 결과와 비교하면 SAM과 Spectral ERGAS에서 각각 9.472와 1.978로 미흡했다. 그러나, Q4와 Spatial ERGAS의 결과가 각각 0.679와 7.758로 보다 향상된 것으로 나타났다. AIHS기법은 GS1기법에 비해서 SAM과 Spectral ERGAS에서 각각 7.299와 1.752로 향상된 결과를 나타냈으나, Q4와 Spatial ERGAS에서 0.614와 7.956으로 낮은 수치를 나타냈다. 결과적으로, KOMPSAT-2의 경우 다분광영상과 흑백영상의 선형 회귀분석을 이용하여 가중치를 부여하는 GIHSA기법이 가장 향상된 결과를 나타내었다(Table 2).

그 이유는, 앞서 제시한 것과 같이 KOMPSAT-2의 스펙트럼 응답은 흑백밴드가 Blue밴드를 거의 포함하지 못하고 있으며 Green밴드를 절반이상이 포함하지 못하고 있기 때문에, GIHS기법과 GS1기법 같이 단순히 다분광영상내의 밴드들을 평균한 값 보다는 각 밴드를 고려하여 가중치를 주는 GIHSA기법과 AIHS기법이 향상

Table 2. Quality evaluation results of KOMPSAT-2

KOMPSAT-2	Fusion Method			
	GIHS	GIHSA	GS1	AIHS
SAM (Ideal value: 0)	12.986	6.611	9.472	7.299
Spectral ERGAS (Ideal value: 0)	2.393	1.586	1.978	1.752
Q4 (Ideal value: 1)	0.649	0.664	0.679	0.614
Spatial ERGAS (Ideal value: 0)	7.276	7.959	7.758	7.956

Table 3. Quality evaluation results of QuickBird

QuickBird	Fusion Method			
	GIHS	GIHSA	GS1	AIHS
SAM(Ideal value: 0)	19.612	17.073	7.279	12.012
Spectral ERGAS(Ideal value: 0)	5.832	5.668	4.322	5.215
Q4(Ideal value: 1)	0.590	0.557	0.699	0.556
Spatial ERGAS(Ideal value: 0)	13.097	14.515	14.085	14.493

Table 4. Quality evaluation results of WorldView-2

WorldView-2	Fusion Method			
	GIHS	GIHSA	GS1	AIHS
SAM (Ideal value: 0)	13.909	14.461	10.237	8.153
Spectral ERGAS (Ideal value: 0)	3.510	3.538	3.196	3.437
Q4 (Ideal value: 1)	0.754	0.754	0.762	0.741
Spatial ERGAS (Ideal value: 0)	4.299	4.583	4.152	4.588

된 결과를 나타낸 것이고, 그 중에서 다분광영상과 흑백영상의 선형 회귀분석을 이용하여 가중치를 부여한 GIHSA가 가장 향상된 결과 값을 나타낸 것으로 판단된다.

마찬가지로 QuickBird영상의 정량적 평가결과, GIHS 기법의 경우, SAM과 Spectral ERGAS에서 각각 19.612와 5.832로 가장 미흡한 결과를 나타내었다. GIHSA기법은 GIHS기법보다 SAM과 Spectral ERGAS에서 각각 17.073과 5.668로 분광정보 보존에 향상된 결과를 나타냈으나, Q4와 Spatial ERGAS에서 0.557과 14.515로 가장 미흡한 결과를 나타냈다. GS1기법은 SAM, Spectral ERGAS, Q4에서 각각 7.279, 4.322, 0.699로 가장 향상된 결과를 나타냈으며, Spatial ERGAS가 14.085로 향상된 결과를 나타냈다. AIHS기법 역시 SAM과 Spectral ERGAS가 각각 12.012와 5.215로 향상된 결과를 나타냈으나, GS1기법에 비해서는 미흡한 결과를 나타냈다. 결과적으로, QuickBird의 경우, GS1기법이 가장 향상된 결과를 나타냈다(Table 3).

GIHSA기법의 결과는 GIHS기법에 비해 크게 향상되지 않았으며, 이는 KOMPSAT-2와는 달리 QuickBird의

스펙트럼 응답의 다분광밴드들이 흑백밴드의 파장대역에 어느 정도 모두 포함되어 있기 때문에 GIHSA기법과 같이 가중치를 부여하였어도 큰 변화가 없는 것으로 판단되며, GS1기법의 경우 Intensity값을 구할 때 GIHSA기법과 마찬가지로 단순히 다분광밴드의 평균을 이용하여 구하게 되지만, 다분광영상내의 픽셀들의 분산정보와 Intensity값과의 공분산 정보를 고려하는 융합계수를 사용하기 때문에 향상된 결과를 나타내는 것으로 판단된다.

WorldView-2의 경우, GIHS기법의 SAM과 Spectral ERGAS에서 각각 13.909와 3.510로 미흡한 결과를 나타내었다. GIHSA기법은 QuickBird결과와는 달리 GIHS기법에 비해 SAM, Spectral ERGAS, Spatial ERGAS가 각각 14.461, 3.538, 4.583으로 미흡한 결과 값을 나타냈으나, GS1기법과 AIHS기법에서는 향상된 결과를 나타냈다. 특히, 상대적으로 GS1기법의 SAM 결과 값이 AIHS기법보다 미흡한 결과를 나타냈지만, Spectral ERGAS, Q4, Spatial ERGAS에서 각각 3.196, 0.762, 4.152로 가장 향상된 결과를 나타냈다. AIHS기법 역시 SAM 값이 8.153으로 향상된 결과를 나타냈으나, GS1기법에 비해서는 미흡한 결과를 나타냈다. 결과적으로, QuickBird와 마찬가

지로 GS1기법이 가장 좋은 결과 값을 나타냈다(Table 4).

WorldView-2의 스펙트럼 응답특성은 KOMPSAT-2와 QuickBird와는 달리 R,G,B,NIR밴드 기준으로 밴드간의 중첩되는 것이 거의 없고, KOMPSAT-2와 QuickBird에 비해 흑백밴드가 Blue, Green, Red밴드를 잘 포함하고 있으므로, 전반적으로 색상왜곡은 KOMPSAT-2와 QuickBird에 비해 적은 것으로 판단된다. 또한, GIHSA기법 결과는 GIHS기법보다 향상되지 않으며, 이는 흑백밴드가 NIR1밴드를 거의 포함하지 못하고 있고, 흑백밴드에 비해 Blue, Green, Red밴드가 포함하고 있는 대역폭이 적기 때문에 각각의 밴드에 선형회귀 방법을 이용해 가중치를 주는 방법이 효과가 적은 것으로 판단된다. 따라서, GIHS기법과 마찬가지로 단순 평균을 이용하며 다분광영상내의 픽셀들의 분산정보와 Intensity값과의 공분산 정보를 고려하는 융합계수를 사용한 GS1기법이 향상된 결과 값을 나타낸 것으로 판단된다.

2) 시각적 분석

시각적 분석은 융합영상에서 나타나는 전반적 왜곡

을 관찰하였고, 유사한 지역을 확대하여 보다 정밀한 분석을 수행하였다. 융합된 영상의 색상왜곡 평가는 원래 다분광영상을 이용하였으며, 공간정보 보존정도는 흑백영상을 기준으로 수행하였다.

KOMPSAT-2에서는 GIHS기법의 경우, 전체적인 영상에서 바다지역의 색상왜곡은 발생하지 않았으나, 식생지역과 도심지에서 푸른색과 화이트색상의 색상왜곡이 발생했다. 주요 지역을 확대하여 관찰한 결과 흑백영상의 공간적 세밀함이 잘 나타났으나, 확연히 색상왜곡을 확인했다. GIHSA기법의 경우, 색상왜곡 거의 보이지 않았으며, 공간적 세밀함이 잘 나타났다. GS1기법의 경우, 색상왜곡은 거의 보이지 않았으나, 상대적으로 공간적 세밀함은 다른 기법보다는 미흡하게 나타났다. AIHS기법의 경우, 공간적 세밀함은 잘 나타났다(Fig. 4).

Quickbird에서는 GIHS와 GIHSA기법의 경우, 공간적 세밀함은 잘 나타났으나, 전체적으로 심한 색상왜곡이 발생한 것으로 나타났다. 식생지역, 바다 및 도심에서 모두 보라색의 색상왜곡이 나타났다. AIHS기법의 경우, GIHS와 GIHSA와 마찬가지로 공간적 세밀함은 잘 보존

Fig. 4. Comparison of fused images: (a) Original KOMPSAT-2 MS, (b) PAN, (c) GIHS, (d) GIHSA, (e) GS1, (f) AIHS.

Fig. 5. Comparison of fused images: (a) Original QuickBird MS, (b) PAN, (c) GIHS, (d) GIHSA, (e) GS1, (f) AIHS.

Fig. 6. Comparison of fused images: (a) Original WorldView-2 MS, (b) PAN, (c) GIHS, (d) GIHSA, (e) GS1, (f) AIHS.

하며, 상대적으로 적은 색상왜곡이 발생하였다. GS1기법의 경우, 색상왜곡이 거의 발생하지 않고 거의 원 영상과 비슷한 결과를 나타냈지만, 상대적으로 공간적 세밀함이 부족하였다(Fig. 5).

WorldView-2에서는 앞의 두 영상과는 다르게 전체적으로 수행된 영상융합기법 모두 색상왜곡이 보이지 않았으나, 확대영상을 보았을 때, GIHS기법과 GIHSA기법에서 약간의 붉은 빛의 색상왜곡이 발생한 것을 확인하였다. 그러나, GS1기법의 경우, 색상왜곡이 거의 보이지 않으며, 공간적 세밀함이 다른 기법과 유사하게 나타났다. 또한, AIHS기법에서는 앞의 두 위성영상 결과와 유사한 결과를 보였다(Fig. 6).

결과적으로 GIHS기법은 KOMPSAT-2, QuickBird 및 WorldView-2영상에서 모두 미흡한 결과를 나타냈으며, GIHSA기법은 KOMPSAT-2영상에 공간정보 보존과 분광정보 보존의 정도가 향상된 결과를 보였다. 또한, GS1기법의 경우, QuickBird 및 WorldView-2영상에서 공간정보 보존과 분광정보 보존의 정도가 향상된 결과를 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 위성 센서의 스펙트럼 응답 특성에 의한 융합기법 결과를 비교평가하기 위해서, 서로 다른 스펙트럼 응답을 지닌 위성영상들을 동일한 융합기법에 적용하여 비교평가하였다.

사용된 영상은 서로 다른 센서 특징을 지닌 고해상도 위성영상 KOMPSAT-2, QuickBird 및 WorldView-2를 사용하였으며, 대표적인 CS기법인 GIHS, GIHSA, GS1 및 AIHS 융합기법을 적용하여 결과를 비교 평가하였다. 융합 결과를 시각적, 정량적 분석을 통해 색상왜곡과 공간정보 보존정도를 평가하였다. 시각적 분석 방법은 전체 영상의 전반적인 왜곡의 경향성을 관찰한 후, 주요 지역을 확대하여 공간정보 보존정도와 색상왜곡을 중점적으로 분석하였고, 정량적 분석 방법은 색상왜곡 비교평가에 가장 널리 사용되고 있는 SAM, Spectral ERGAS, Q4기법과 공간정보 보존정도를 평가하기 위한 Spatial ERGAS 기법을 사용하였다.

비교결과 KOMPSAT-2의 경우, GIHSA기법이 다른

기법들에 비해 상대적으로 색상왜곡이 적으며 높은 공간해상도를 나타냈으며, QuickBird에서는 GS1기법이 상대적으로 이상적인 결과 값을 나타내는 것을 확인하였다. WorldView-2의 경우, 전반적으로 모든 기법에서 향상된 결과를 나타냈지만, QuickBird와 마찬가지로 GS1기법에서 이상적인 결과를 나타내는 것을 확인하였다. 즉, KOMPSAT-2의 스펙트럼 응답은 흑백밴드가 Blue밴드를 거의 포함하지 못하고 있으며 Green밴드를 절반이상이 포함하지 못하고 있어, GIHS기법과 GS1기법 같이 단순히 다분광영상내의 밴드들을 평균한 값보다는 각 밴드를 고려하여 가중치를 주는 GIHSA기법과 AIHS기법이 향상된 결과를 나타내며 그 중에서 다분광영상과 흑백영상의 선형 회귀분석을 이용하여 가중치를 부여한 GIHSA기법을 적용할 경우 좋은 결과를 나타낼 수 있다. 나머지 QuickBird와 WorldView-2의 영상의 경우, KOMPSAT-2보다는 상대적으로 Blue, Green, Red, NIR가 흑백밴드 포함되어 있으며, 밴드간의 중첩이 적고, 흑백밴드에 비해 Blue, Green, Red밴드가 포함하고 있는 대역폭이 적기 때문에 단순 평균을 이용하여 다분광영상내의 픽셀들의 분산정보와 Intensity값과의 공분산 정보를 고려하는 GS1기법에서 좋은 결과를 나타내는 것이다.

한편, 본 연구와 마찬가지로 대부분의 연구가 영상 전체에 대해서 정량적 평가를 수행하고 있지만, 지역적 특성과 객체의 특징을 반영할 수 있도록 향후에는 신뢰성 향상을 위해 융합된 영상을 분할하고 분할된 지역에 대해 독립적으로 평가를 할 수 있는 적응적인 평가방법 연구를 진행할 예정이다.

사 사

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2012R1A1A2005801).

References

Aiazzi, B., L. Alparone., S. Baronti. and A. Garzelli,

2002. Context-driven fusion of high spatial and spectral resolution images based on oversampled multiresolution analysis, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 40(10): 2300-2312.
- Aiazzi, B., S. Baronti. and M. Selva, 2007. Improving component substitution pansharpening through multivariate regression of MS+ Pan data, *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 45(10): 3230-3239.
- Alparone, L., S. Baronti., A. Garzelli. and F. Nencini, 2004. A global quality measurement of pansharpened multispectral imagery, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 1(4): 313-317.
- Choi, J.W. and Y.I. Kim, 2010. Pan-Sharpener Algorithm of High-Spatial Resolution Satellite Image by Using Spectral and Spatial Characteristics, *Journal of the Korean Society for Geospatial Information System*, 18(2): 79-86.
- Choi, J.W, 2011. A WorldView-2 satellite imagery pansharpening algorithm for minimizing the effects of local displacement, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 29(6): 577-582.
- Choi. J.W., J. Yom., A. Chang., Y. Byun. and Y. Kim, 2013. Hybrid Pansharpening Algorithm for High Spatial Resolution Satellite Imagery to Improve Spatial Quality, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 10(3): 490-494.
- Choi, M.J., H.C. Kim., N.I. Cho. and H.O. Kim, 2006. An improved intensity-hue-saturation method for IKONOS image fusion, *International Journal of Remote Sensing*, 1(2).
- Dou, W., Y. Chen., X. Li. and D.Z. Sui, 2007. A general framework for component substitution image fusion: An implementation using the fast image fusion method, *Computers and Geosciences*, 33(2): 219-228.
- Kim, Y., E. Yangdam., Y. Kim. and Y. Kim, 2011. Generalized IHS-Based Satellite imagery Fusion Using Spectral Response Functions, *ETRI Journal*, 3(4): 497-505.
- Kruse, F.A., A.B. Lefkoff., J.W. Boardman., 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(2): 145-163.
- Oh, K.Y., H.S. Jung. and K.J. Lee, 2012. Comparison of image Fusion Methods to Merge KOMPSAT-2 Panchromatic and Multispectral Images, *Korean Journal of Remote Sensing*, 28(1): 39-54.
- Perona, P. and J. Malik, 1990. Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion, *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, 12(7): 629-639.
- Ranchin, T. and L. Wald, 2000. Fusion of high spatial and resolution images: the ARSIS concept and its implementation, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(1): 49-61.
- Rahmani, S., M. Strait., D. Merkurjev., M. Moeller. and T. Wittman, 2010. An adaptive IHS pansharpening method, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 7(4): 746-750.
- 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): 1453-1464.
- Tu, T.M., C.L. Hsu., P.Y. Tu., and C.H. Lee, 2012. An adjustable pan-sharpening approach for IKONOS/QuickBird/GeoEye-1/WorldView-2 imagery. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, IEEE Journal of*, 5(1): 125-134.
- Tu, T.M., P.S. Huang., C.L. Hung. and C.P. Chang, 2004. A fast intensity-hue-saturation fusion

- technique with spectral adjustment for IKONOS imagery, *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 1(4): 309-312.
- Wald, L., T. Ranchin. and M. Mangolini, 1997. Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images, *Photogrammetric Engineering and Remote sensing*, 63(6): 691-699.
- Zhang, Y., 2004. Understanding image fusion, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70(6): 657-661.