한국측량학회지, 제 30권 제 1호, 2012. 2 : pp. 75~86

고해상도 SAR와 광학영상의 고주파 정보를 이용한 다중센서 융합

Image Fusion of High Resolution SAR and Optical Image Using High Frequency Information

변영기[1] · 채태병[2]
Byun, Young Gi · Chae, Tae Byeong

Abstract

Synthetic Aperture Radar(SAR) imaging system is independent of solar illumination and weather conditions; however, SAR image is difficult to interpret as compared with optical images. It has been increased interest in multi-sensor fusion technique which can improve the interpretability of SAR°°images by fusing the spectral information from multispectral(MS) image. In this paper, a multi-sensor fusion method based on high-frequency extraction process using Fast Fourier Transform(FFT) and outlier elimination process is proposed, which maintain the spectral content of the original MS image while retaining the spatial detail of the high-resolution SAR image. We used TerraSAR-X which is constructed on the same X-band SAR system as KOMPSAT-5 and KOMPSAT-2 MS image as the test data set to evaluate the proposed method. In order to evaluate the efficiency of the proposed method, the fusion result was compared visually and quantitatively with the result obtained using existing fusion algorithms. The evaluation results showed that the proposed image fusion method achieved successful results in the fusion of SAR and MS image compared with the existing fusion algorithms.

Keywords : High resolution satellite images, Multispectral image, Pan-sharpening, TerraSAR-X, Spectral distortion measure

초 록

SAR는 기상상태와 태양고도 제약을 받지 않고 영상을 취득할 수 있는 장점을 갖지만 광학영상에 비해 시각적 가독성이 떨어지는 단점을 갖는다. 광학영상의 다중분광정보를 융합하여 SAR 영상의 가독성을 향상시키기 위한 다중센서 융합기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 본 연구에서는 고속 퓨리에 변환을 통한 고주파 정보 추출 및 이상치 제거과정을 통해 SAR 영상의 공간적 세밀함과 다중분광영상의 분광정보를 유지할 수 있는 새로운 다중센서 융합기술을 제안하였다. 실험데이터로는 KOMPSAT-5호와 동일한 고해상도 X-band SAR 시스템을 장착한 TerraSAR-X 영상과 KOMPSAT-2호의 다중분광영상을 사용하였다. 제안기법의 효용성을 평가하기 위해 기존에 위성영상융합에 많이 사용된 융합기법과의 시각적/정량적 비교평가를 수행하였다. 실험 결과 기존 영상융합알고리즘에 비해 분광정보 보존측면에서 보다 향상된 결과를 보임을 확인할 수 있었다.

핵심어 : 고해상도 위성영상, 다중분광영상, 영상융합, TerraSAR-X, 분광왜곡 측정치

1. 서 론

최근 다양한 센서를 탑재한 지구관측위성의 발사와 더불어 컴퓨터 기반 기술의 발달로 인해 다중센서 공간영상의 통합분석이 가능해지고 있다. 우리나라 또한 국내 최초로 기상상태에 제약을 받지 않고 영상획득이 가능한 SAR(Synthetic Aperture Radar)시스템을 장착한 KOMPSAT-5와 고해상도 광학영상인 KOMPSAT-3호를 2012년

1) 교신저자 · 정회원 · 한국항공우주연구원 위성정보 연구센터 선임연구원(E-mail:ygbyun@kari.re.kr)
2) 한국항공우주연구원 위성정보 연구센터 선임연구원 · 영상운영지원팀 팀장(E-mail: tbchae@kari.re.kr)

에 발사해 운행할 계획을 가지고 있다. 광학과 SAR 영상 등과 같은 다중센서(multi-sensor)자료를 공간 분석에 함께 사용할 경우, 개별 공간영상의 처리에 내재되어있는 불확실성을 줄이면서 보다 많은 정보를 추출할 가능성이 크다. 따라서 단일 센서 데이터만으로는 취득하기 어려운 다양한 공간/속성정보를 종합적으로 취득하고 분석하기 위한 다중센서 융합처리 기술에 대한 관심이 증대되고 있다. 일반적으로 다중센서 융합 방식은 영상의 가독성을 높이는 화소수준(pixel-level)융합 또는 변화탐지, 객체 인식 및 분류 정확도를 높이기 위한 결정수준(decision-level) 융합 등과 같이 연구목적에 따라 융합처리 수준과 방식이 달라진다(Solberg 등, 1996; Phol and van Genderen, 1998; Ban and Rangel, 2010).

SAR는 구름이나 강우 등과 같은 기상상태와 태양의 고도 제약을 받지 않고 영상을 취득할 수 있는 장점을 갖지만, 촬영기하 및 파장대역의 특성으로 인해 광학영상과 달리 영상의 가독성이 떨어지는 단점을 갖는다. 따라서 다양한 광학센서로부터 취득된 다중분광영상의 분광정보를 통합하여 SAR 영상의 가독성을 높이고자 하는 다중센서 간 영상융합기법에 대한 연구의 필요성이 점차 증가하고 있다. 동종 광학센서의 고해상도 흑백영상을 이용하여 다중분광영상의 공간해상도를 강제적으로 증가시키는 다양한 융합기법들이 개발되어 실용적으로 널리 활용되고 있지만, 이에 비해 SAR 영상과 광학영상과 같은 다중센서 간 영상융합기법에 관한 연구들은 상대적으로 미진한 실정이다(최재완 등, 2011; 변영기 등 2011). Alparone 등(2004)은 웨이블렛 변환기법을 이용하여 고해상 흑백영상의 고주파 정보와 SAR 영상의 텍스처 정보를 추출하고 이를 일반화된 IHS(Intensity-Hue-Saturation) 기법을 통해 다중분광영상에 주입하여 융합영상을 생성하였다. 이와 유사하게 Chibani(2007)는 à trous 웨이블렛 변환을 이용한 고해상도 흑백영상(PAN)과 SAR 영상에서 고주파 정보 추출과정과 이의 선택적 삽입을 통해 융합영상을 생성하기도 하였다. 하지만 이러한 방법들은 기본적으로 광학영상의 고해상도 흑백영상을 입력데이터로 활용하는 접근방식으로, 대상지역의 고해상도 흑백영상을 가용할 수 없는 경우 그 활용가능성이 떨어지는 단점을 갖는다. 고해상도 SAR 영상과 다중분광영상만을 이용한 연구로는 Hong 등(2009)이 제안한 웨이블렛과 IHS 기법을 통합한 방식이 있다. 이 방식은 다중분광영상을 통해 생성된 강도(intensity)영상과 SAR영상의 저주파 정보를 통합하고 이를 IHS 역변환 과정에서 새로운 강도영상으로 취급하여 융합영상을 생성하는 방식이다. 하지만 IHS 변환기법을 이용하는 이 방식의 경우 4개 이상의 밴드를 갖는 다중분광영상에 직접적으로 적용하기가 힘들다는 한계점을 갖는다. Zhang과 Yu (2010)은 변분(variational)모델을 이용하여 고해상도 SAR 영상인 Cosmo-Skymed SAR와 Landsat ETM+의 영상융합을 수행하였지만 변분모델로 구성된 에너지 함수의 최적화 과정이 어렵고 그에 따른 시간비용이 높다.

이에 본 연구에서는 고해상도 SAR영상과 다중분광영상만을 이용한 효과적인 다중센서 간 영상융합 기법을 개발하고 이의 활용가능성을 검증하고자 하였다. 이를 위해 고속 퓨리에 변환(Fast Fourier Transform, 이하 FFT)을 통한 주파수 필터링 과정을 통해 영상 별 고주파 정보를 추출하였고, 추출된 고주파 정보를 활용한 이상치 제거과정을 통해 보다 신뢰할 만한 고주파 정보를 다중분광영상에 주입하고자 하였다. 또한 영상 융합 시, 모든 다중분광 성분에 고주파 성분을 똑 같은 양으로 더하는 기존 방식과는 달리, 제안 방법에서는 채널별 이상치 제거과정을 통해 각기 다른 양의 고주파 정보를 다중분광영상에 주입하여 융합영상을 생성하였다. 본 연구에서는 KOMPSAT-5호와 동일한 고해상도 X-band SAR 시스템을 장착한 TerraSAR-X 영상과 현재 운행 중인 고해상도 광학위성인 KOMPSAT-2호의 다중분광영상을 실험 데이터로 사용하여 향후 발사 예정인 KOMPSAT-5호의 활용도를 높이고자 하였다.

2. 연구방법 및 범위

본 연구에서 제안하는 고해상도 SAR 영상과 다중분광영상의 융합과정은 영상 세부정보를 표현하는 고주파 정보 생성과정과 이들 데이터를 이용한 영상융합단계로 구성된다. 그림 1은 본 연구에서 고안한 융합과정의 전체적인 연구 순서도를 나타낸 것이다. 방사적인 특성이 전혀 다른 두 영상의 융합을 원활하게 수행하기 위해서는 몇 가지 전처리 과정이 필요하다. 우선 SAR 영상의 경우, 영상 내에 존재하는 스펙클(speckle)잡음을 제거하기 위하여 크기의 Lee 필터(Lee, 1980)를 적용하여 영상 처리 과정에 노이즈 영향을 최소화하고자 하였다. 또한 서로 다른 좌표체계를 갖는 두 영상의 좌표를 상호 일치시키기 위해 영상의 선형특징 요소의 지역적 특성을 반영하는 영상 정합기술을 개발하여 두 영상의 기하보정을 수행하였다. 이러한 전처리 과정 후에, 두 영상에 대하여 고속 퓨리에 변

환을 이용하여 공간영역의 신호파형을 주파수 영역으로 변환한 뒤, Kasier 고주파 필터를 적용하여 영상 별 고주파 정보를 추출하였다. 추출된 고주파 정보를 활용한 채널 별 이상치 제거 과정을 통해 생성된 고주파 정보를 다중 분광영상에 주입하여 최종 융합영상을 생성하였다. 제안 기법의 효용성을 검증하기 위해, 기존 위성영상 융합에 많이 활용된 융합기법들과의 시각적/정량적 비교평가를 수행하였다. 정량적 비교평가 방법으로는 최종 융합영상의 분광왜곡(spectral distortion)측정치 결과를 비교 평가하는 방법을 사용하였다.

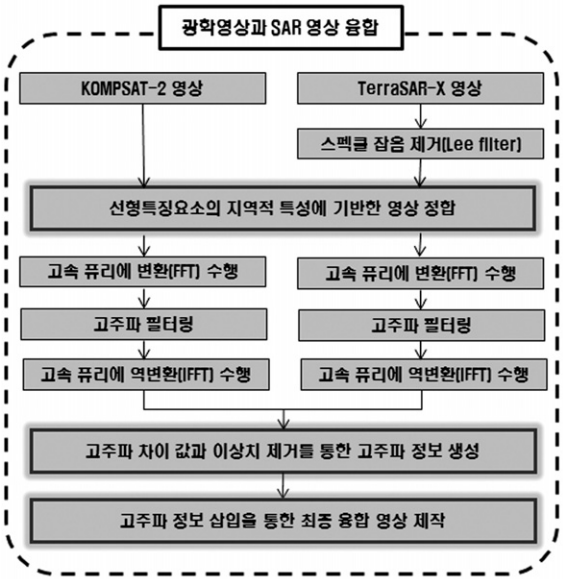


그림 1. 연구 순서도

2.1 광학영상과 SAR 영상의 정합

영상 간 기하보정(image-to-image registration)은 두 개 이상의 같은 지역에 대한 다른 시기, 다른 관점, 다른 센서에 의해서 획득된 영상을 중첩하는 과정을 말한다(Zitova and Flusser, 2003). 다중 센서 자료를 융합하기 위해서는 가장 기본적으로 수행되어야 할 전처리 작업이 영상 간 기하보정이다. 이에 본 연구에서는 KOMPSAT-2 영상과 TerraSAR-X 영상 간 기하보정을 위해 영상의 선형특징 요소들의 지역적인 특성을 고려한 자동 영상정합 기술을 개발하였다(한유경 등, 2011). 본 연구에서 고안된 광학영상과 SAR영상 간 영상정합 기술은 그림 2과 같이 크게 세 단계 처리 과정으로 구성된다. 우선 입력영상에 대하여 영상 피라미드(image pyramids) 구성한 다음 두 영상의 x, y 방향에 대한 초기 변위량(initial translation)를 상호정보량(mutual information)기법을 통해 계산한다. 다음으로 초기 변위량 차이를 최소화시킨 두 영상에 대하여 정밀한 지역적 매칭(local matching)을 수행하기 위해서 대표적인 선형 추출 기법인 Canny 에지 추출자(Canny edge operator)를 적용하여 선형정보를 추출한다. 추출된 선형 화소 간의 방향과 거리 차의 결합으로 구성된 비용함수를 통해서 유사하다고 생각되는 대응 화소를 매칭쌍으로 선정하였다. 마지막으로 추출된 매칭쌍을 이용하여 piecewise linear function과 affine transformation을 결합한 형태의 변환 모델식을 적용하여 최종적으로 TerraSAR-X 영상을 기준영상인 KOMPSAT-2 광학영상에 정합시켰다.

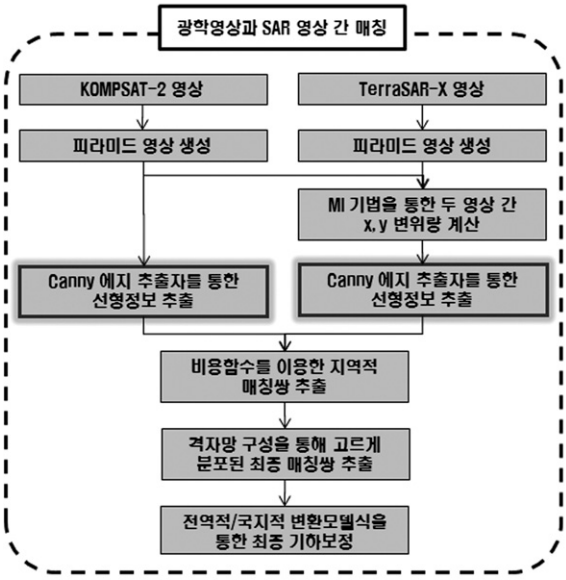


그림 2. 광학영상과 SAR 영상의 정합 순서도

2.2 주파수 변환을 통한 고주파 정보 추출

2.2.1 고속 퓨리에 변환

퓨리에 변환(Fourier Transform)은 공간영역에서의 신호파형을 주파수 영역으로 변환하는 알고리즘이다. 2차원 영상 데이터의 경우 이산 퓨리에 변환인 DFT(Discrete Fourier Transform)를 통해 추출된 주파수 스펙트럼들로 영상의 주기성 및 방향성 또는 저주파와 고주파 영역을 분리해 낼 수 있다. 모든 영상 신호는 가로와 세로 방향으로 구성된 2차원 신호이기 때문에 1차원 DFT를 영상의 가로축 및 세로축 방향으로 순차적으로 적용하면, 2차원 평면 영상 신호 $f(x,y)$을 주파수 영역의 영상으로 변환할 수 있다. 2차원 DFT 변환식 식(1)를 통해, $f(x,y)$를 구성하는 x, y의 방향의 데이터는 u, v의 방향의 주파수 영역으로

변환된다. 또한 주파수 영역의 영상 신호는 식(2) 과정을 통해 다시 공간영역의 영상으로 역변환이 가능하다.

$$F(u,v) = \frac{1}{MN}\sum_{x=0}^{M-1}\sum_{y=0}^{N-1} f(x,y)e^{-j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (1)$$

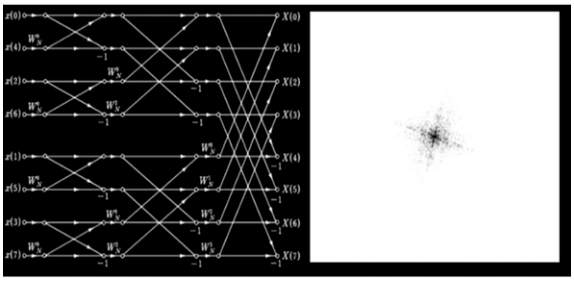
단, $0 \le u \le M-1, 0 \le v \le N-1$

$$f(x,y) = \sum_{u=0}^{M-1}\sum_{v=0}^{N-1} F(u,v)e^{j2\pi(ux/M+vy/N)} \quad (2)$$

단, $0 \le x \le M-1, 0 \le y \le N-1$

여기서, $F(u,v)$는 주파수 영역에서의 영상 신호를 의미하고, $f(x,y)$은 공간 영역에서의 영상신호를 나타내고, M, N은 영상의 가로 방향 및 세로방향의 크기를 나타낸 것이다.

그러나 실제 DFT는 연산량이 많고 복잡하여 그 처리 시간이 긴 단점이 있다. 일반적으로 총 M개의 이산 신호로 구성되어 있는 영상의 가로방향에 대한 1차원 DFT를 산출할 때의 총 계산량은 M^2에 비례한다고 볼 수 있다. M값이 클 경우 이 계산량은 방대해지며, 세로방향 연산까지 수행하는 2차원 영상의 경우 그 처리 비용은 더욱 심각해진다. 따라서 이러한 DFT의 처리 속도를 개선한 매우 효과적인 알고리즘이 FFT이다. FFT 알고리즘은 일종의 분할 정복(divide and conquer) 기법으로, 이산신호 M를 짝수와 홀수 성분으로 분할한 후 그들의 주기성을 이용하여 DFT 연산에서의 반복적인 계산과정을 제거함으로써 $M \times log_2 M$ 연산만으로도 변환을 수행할 수 있도록 처리 속도를 개선한 방법이다(Gonzalez and Woods, 2002).



(a) 8점 **Butterfly** 연산 **(b)** 대상지역의 진폭 스펙트럼

그림 3. FFT 연산과 퓨리에 스펙트럼 예시

그림 3의 (b)는 2D FFT 변환후의 주파수 성분들을 2차원 주파수 평면에 대응시킨 것으로, 수평주파수 u 와 수직주파수 v 방향으로 연속으로 수행한 경우 원점은 영상의 평균 화소값을 의미하는 직류성분(DC: Direct Current)이 되며, 수평주파수와 수직주파수 축 근처에 저주파 성분들의 분포한다. 또한 수평/수직 주파수 축에서 멀리 떨어진 부분에 줄무늬가 미세한 고주파 성분이 존재하며, 경사방향의 줄무늬는 수평주파수와 수직주파수의 양방향 성분을 갖고 있는 것을 알 수 있다.

2.2.2 고주파 필터링

주파수 영역 필터링은 주파수 영역으로 변환된 영상의 저주파 및 고주파 성분을 분리하는 과정이다. 일반적으로 주파수 영역의 저주파 성분은 영상의 전체적인 이미지 윤곽에 대한 정보가 담겨 있고, 고주파 성분은 영상의 세밀한 부분인 에지(edge)와 잡음에 밀접하게 관련되어 있다. 영상융합의 경우, 두 영상에서 상대적으로 고해상도 영상 데이터의 고주파 정보를 저해상도 영상에 주입하는 과정을 통해 저해상도 영상의 해상도 향상을 모색한다. 따라서 영상 내 의미 있는 고주파 정보 추출과 이의 통합은 영상융합 성패에 큰 영향을 끼친다. 본 연구에서는 창함수(window function)를 이용한 2차원 FIR(Finite Impulse Response) 고역 통과 필터를 이용하여 영상의 고주파 정보를 추출하였다. 창함수 기법은 퓨리에 급수 전개법으로 설계된 필터의 임펄스 응답을 미리 조정하여 깁스(gibbs)진동을 억제하는 역할을 하며, 설계 과정의 단순함과 계산의 편이성으로 인해 주파수의 영역에서의 필터 설계에 많이 채용되는 방법이다. 이상적인 주파수 응답을 유한 임펄스(impulse)로써 가장 근사하게 재현하기 위하여 FIR 필터 설계에 응용되어진 대표적인 창함수를 보면, 구형 창함수, Bartlett, Hanning, Hamming, Blackman 창함수 등이 있다(Huang, 1978). 이들 창함수는 필터의 특성을 변화 시키고자 할 때에는 임펄스 열의 길이만을 가지고 특성을 조절해야 하며, 특히 저대역 레벨은 창함수를 정함과 동시에 일정한 값으로 정해지는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 기존의 창함수들에 비해 특성의 가변이 용이한 Kasier 창함수를 이용한 고주파 필터링 과정을 통해 영상 내 고주파 성분을 추출하였다. Kasier 창함수는 통과대역폭과 저대역 레벨을 최적화 시킬 수 있는 매개변수를 포함한 0차 제 1종 Bessel 함수로 구성되어 있다. 다른 창함수에 비해 계산은 다소 복잡하지만 임펄스 열의 길이를 나타내는 매개변수와 또 따른 매개변수를 이용하여 우수한 주파수 응답 특성을 보인다. Kasier 창함수의 정의는 식(3)과 같으며, $I_0(x)$는 0차 제 1종 Bessel 함수이다.

$$Kasier(x,\tau,\alpha)=\begin{cases} I_0(\alpha\sqrt{(1-(x/\tau)^2}) & |x|<\tau \\ 0 & else \end{cases} \quad (3)$$

$$I_0(x)=1+\sum_{k=1}^{\infty}\left(\frac{(x/2)^2}{k!}\right)^2$$

여기서, τ는 임펄스 열의 길이를 제한하는 매개변수로 필터의 크기를 제어하고, α는 필터의 형상(shape)를 제어하는 매개변수이다. Kaiser 창함수의 또다른 특성은 이 두 매개변수 τ와 α를 조합하여 다른 모든 창함수의 특성을 구현할 수 있다는 것이다. 일례로 τ가 같다고 할 때, 즉 필터의 크기를 고정했을 때, α= 0 경우는 구형 창함수와 같은 특성을 보이고, α= 4.86 으로 설정하면 Hamming 창함수와 일치하는 특성을 갖는다.

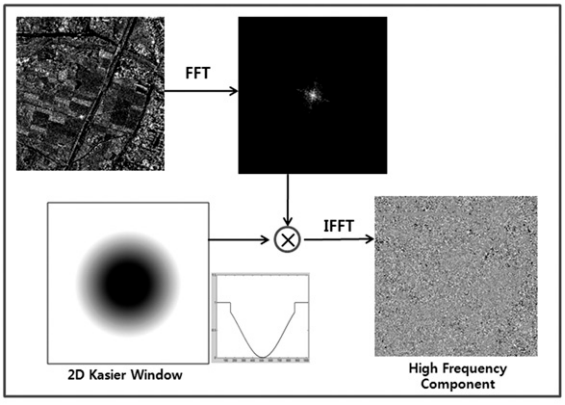


그림 4. 윈도우 창함수를 이용한 고주파 필터링

그림 4는 Kaiser 창함수를 이용하여 실험대상 영상인 TerraSAR-X 영상으로부터 고주파 정보를 추출하는 과정을 도시한 그림이다. TerraSAR-X 영상의 FFT 결과와 원영상과 같은 크기를 가지는 Kaiser 고주파 필터 마스크를 가지고, 서로 대응하는 값끼리 곱셈을 하면 필터링한 주파수 영역을 얻게 되고, 이를 FFT 역변환 함으로써 영상의 고주파 정보를 추출하게 된다. 이때 필터크기와 형상 매개변수인 τ, α를 어떻게 구성하느냐에 따라 고주파 추출정도를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 τ와 α를 각각 0.7과 3.2로 설정하여 실험을 수행하였다.

2.3 영상 별 고주파 정보에 기반한 다중센서 융합

본 연구에서 제안하는 영상융합 방식은 그림 5에 도시된 바와 같이, 원본 KOMPSAT-2 다중분광영상과 고해상도 TerraSAR-X 영상의 좌표를 표준화하고 다중분광영상의 크기를 TerraSAR-X 영상과 동일하게 조정하는 자료 입력 및 전처리 과정, 다중분광영상과 TerraSAR-X 영상의 주파수 변환을 통한 고주파 정보 생성 과정, 채널 별 이상치 제거과정을 통해 생성된 고주파 정보 주입을 통한 영상 융합과정으로 구성되고, 그 구체적인 실행순서는 다음과 같다.

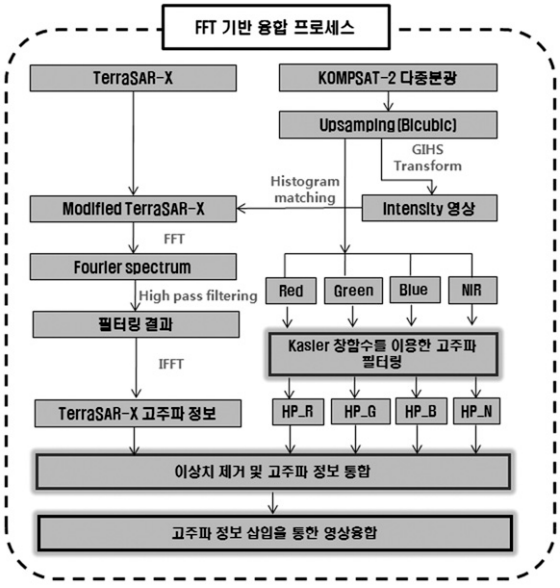


그림 5. FFT 에 기반한 영상융합 순서도

Step 1. 우선 네 개의 밴드로 구성 되어 있는 저해상의 다중분광영상의 공간해상도를 공삼차(bicubic)보간법을 사용하여 TerraSAR-X 영상의 공간해상도와 같게 업샘플링(upsampling)을 수행한다.

Step 2. 공간해상도가 확장된 다중분광영상에 대해 GIHS(Generalized IHS)변환 방식을 이용하여 가상의 강도(intensity) 영상(I_L)을 제작한다.

$$I_L=(R_E+G_E+B_E+NIR_E)/4 \quad (4)$$

여기서 R_E, G_E, B_E, NIR_E 는 공간해상도가 확장된 다중분광영상의 밴드(band) 정보로, 강도영상은 이들의 평균값으로 구성됨을 알 수 있다.

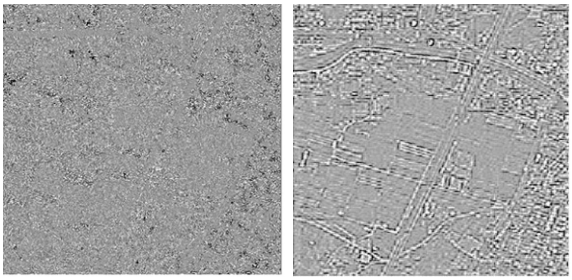
Step 3. 제작된 가상의 강도영상과 TerraSAR-X 영상과의 밝기값의 차이로 야기되는 분광왜곡을 줄이기 위해 고

해상도 TerraSAR-X 영상을 가상의 강도영상에 맞추어 히스토그램 매칭을 수행한다.

$$P_H(p) = \frac{\sigma_I}{\sigma_p}(P(p) - \mu_p) + \mu_I \quad (5)$$

여기서, μ_I, μ_p, σ_I, σ_p는 각각 강도영상과 TerraSAR-X 영상 화소값의 평균과 표준편차를 나타내고 P(p)는 TerraSAR-X 영상의 화소값을 의미한다.

Step 4. 히스토그램이 조정된 TerraSAR-X 영상과 공간해상도가 확장된 다중분광영상의 모든 밴드 대해, 앞서 설명한 주파수 공간에서의 Kasier 창함수를 이용한 고주파 필터링 과정을 통해 고주파 정보를 추출한다.



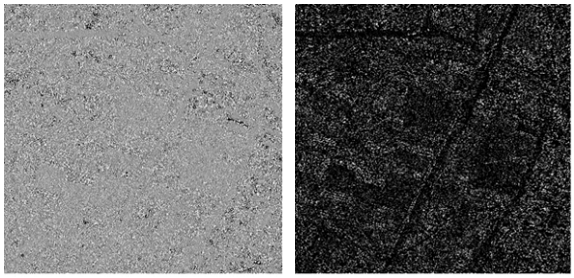
(a) TerraSAR-X의 고주파 성분 **(b) KOMPSAT-2**의 고주파 성분 **(RGB:3,2,1)**

그림 6. 주파수 필터링을 이용한 고주파 성분 추출영상

Step 5. 두 데이터의 고주파 성분 추출 비교 영상인 그림 6에서 확인 할 수 있듯이, 두 영상이 갖는 서로 다른 방사적 특성(radiometric properties)으로 인해, 고주파 추출 결과 영상 또한 상당히 다른 경향을 보임을 알 수 있다. TerraSAR-X 영상으로부터 추출된 고주파 성분의 경우, 그림 6(a) 영상에서 확인 할 수 있듯이, 지나치게 많은 영상성분들이 고주파 성분으로 추출됨에 따라 그 공간적 패턴 특성이 실제 대상지역의 패턴에 비해 과대하게 추정되었음을 알 수 있다. 영상융합과정에서 이렇게 과대 추정된 TerraSAR-X 영상의 모든 고주파 정보를 다중분광영상에 직접 주입할 경우 상당히 많은 분광왜곡이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 저해상 다중분광영상에서 추출한 고주파 정보(그림 6(b))를 기준으로, 대응하는 TerraSAR-X의 고주파 정보가 지나치게 작거나 큰 값을 이상치(outlier)로 판별하여 제거함으로써, 영상융합과정에 과대 추정된 고주파 정보의 영향을 최소화하고자 하였다. 식(6)과 같이 정의된 결정규칙을 통해, 두 데이터의 고주파 차이값이 특정 조건을 만족하는 영역($V_j(p)$)들의 고주파 정보만을 선택적으로 주입함으로써 융합영상의 분광왜곡을 감쇠하였다.

$$D_j(p) = T_H(p) - EM_j(p), \quad j = 1, \cdots, M$$
$$\left[V_j(p) = 1 | \mu_{D_j} - 3\sigma_{D_j} < D_j(p) < \mu_{D_j} + 3\sigma_{D_j} \right] \quad (6)$$

여기서, $T_H(p)$는 TerraSAR-X의 고주파 성분 값, $EM_j(p)$는 저해상 다중분광영상에서 추출한 고주파 성분 값, $D_j(p)$는 이들 두 데이터에 대한 밴드 별 고주파 정보 차이값을 나타내고, $\mu_{D_j(p)}$, $\sigma_{D_j(p)}$는 $D_j(p)$값 중에서 양의 실수 값을 갖는 영역들의 평균과 표준편차를 나타낸다. 그림 7(b)는 밴드 별 고주파 차 영상인 그림 7(a)에 이상치 제거과정을 적용하여 추출한 고주파 정보를 나타낸다. 결과영상에서 확인할 수 있듯이, 단순 차 영상에 비해 대상지역의 공간적 패턴이 보다 명확함을 확인 할 수 있다.



(a) 고주파 차 영상 **(RGB:3,2,1)** **(b)** 이상치 제거 결과 **(RGB:3,2,1)**

그림 7. 이상치 제거 과정을 통해 생성된 고주파 정보

Step 6. 공간해상도가 확장된 다중분광영상의 모든 밴드에 대해, 이상치가 제거된 밴드 별 고주파 차 정보를 식 (7)과 같이 주입하여 융합영상을 생성한다.

$$F_j(p) = RM_j(p) + V_j(p), \quad j = 1, \cdots, M \quad (7)$$

여기서, $RM_j(p)$는 TerraSAR-X와 동일한 공간해상도로 확장된 KOMPSAT-2 다중분광영상을 나타내고, $V_j(p)$는 앞선 이상치 제거과정을 통해 생성된 고주파 정보를 의미한다.

2.4 정량적 평가 측정치

융합영상의 품질을 정량적으로 평가하기 위해서는 융합영상과 동일한 공간해상도를 갖는 고해상도 다중분광영상이 참조자료로 필요하다. 하지만 이러한 고해상도 다중분광 영상은 현실적으로 취득이 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 융합영상의 공간해상도를 원본 다중분광영상의 공간해상도 크기로 강제적으로 낮춘 후, 이를 원본 다중분광영상과 비교하는 방식으로 융합영상의 품질을 평가하였다. 융합영상의 분광왜곡을 측정하기 위한 분광정보 평가지수로는 기존 연구문헌에서 가장 많이 통용되고 있는 ERGAS(Erreur Relative Globale Adimensionnelle de Synthese), UIQI(Universal Image Quality Index), CC(Correlation Coefficient)와 PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)지수를 사용하였다.

2.4.1 ERGAS 측정치

ERGAS 지수는 융합영상의 전역적인 분광정보의 질을 측정하는 대표적인 융합척도로 알려져 있으며, 구체적인 식은 다음과 같다(Ranchin 등, 2000).

$$ERGAS = 100 \times \frac{h}{l} \times \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}\frac{\mathrm{R}^2(\mathrm{B_n})}{M_n^2}}, \quad (8)$$

여기서 $R(B_n) = \sqrt{\frac{1}{X \times Y}\sum_{X \times Y}(F_n - \widehat{MS_n})^2}$

여기서, h는 고해상도 흑백영상의 공간해상도, l은 다중분광영상의 공간해상도, $R^2(B_n)$은 n번째 밴드의 융합영상(F_n)과 원본 다중분광 영상($\widehat{MS_n}$)간의 평균제곱근오차(RMSE), M_n은 융합과정에서 사용된 다중분광 영상의 n번째 밴드의 평균화소값을 의미한다. ERGAS 지수는 두 벡터의 오차 크기를 정량화한 지수로 볼 수 있고, 값이 작을수록 융합영상의 분광정보 보존력이 뛰어남을 의미한다.

2.4.2 UIQI 측정치

UIQI 측정지수는 융합영상과 원본 다중분광영상의 분광왜곡지수를 평가하는 측정치로, 두 영상의 상관도 손실 및 화소값의 대비(contrast)왜곡을 지역적으로 모델링한 정량적 측정지수로 다음과 같이 정의된다(Wang 등, 2002).

$$UIQI = \frac{4\sigma_{xy}\bar{x}\bar{y}}{(\sigma_x^2+\sigma_y^2)[(\bar{x})^2+(\bar{y})^2]} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y} \cdot \frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2+\sigma_y^2} \cdot \frac{2\bar{x}\bar{y}}{(\bar{x})^2+(\bar{y})^2} \quad (9)$$

여기서, σ_x, σ_y는 각각 원본 다중분광영상과 융합영상의 표준편차를 나타내고, $\bar{x}, \bar{y}$는 해당 영상들의 평균화소값을 의미하며 σ_{xy}는 영상 간의 공분산을 나타낸다. UIQI는 식(9)에서같이 세가지 요소로 분해 할 수 있고, 각각의 요소는 영상간의 상관도, 화소값의 밝기 왜곡과 대비 왜곡을 설명하고 값이 1에 가까울수록 융합영상의 품질이 뛰어남을 의미한다. 다중밴드 영상간의 UIQI값은 일차적으로 각 밴드별로 특정 윈도우 영역 내의 지역적인 왜곡량을 산정하고 이들의 평균값을 이용하여 밴드별 UIQI를 산출 한 후, 각 밴드별 UIQI의 평균값을 전체 융합영상에 대한 분광평가지수로 선정한다. 일반적으로 고해상도 위성영상의 경우 16, 32, 64의 윈도우 크기를 사용하며, 본 연구에서는 16의 윈도우 크기를 가지는 UIQI로 융합영상의 분광왜곡을 평가하였다(Khan 등, 2009).

2.4.3 CC 측정치

CC 측정치는 융합영상과 원본 다중분광영상의 통계적 유사성을 평가하는 측정치로, 두 영상의 전역적인 상관도를 통해 융합영상의 분광정보 품질을 평가하며 그 구체적인 식은 다음과 같다(Hong 등 2009).

$$CC_i = \frac{E[(F_i(p)-F_i(m))(MS_i(p)-MS_i(m))]}{\sigma_{F_i}\sigma_{MS_i}}, i = 1,\cdots,M \quad (10)$$

여기서, CC_i는 밴드 별 상관계수를 의미하고, $E[\ ]$는 기대값 연산자, $F_i(p)$와 $MS_i(p)$는 융합영상과 원본 다중분광영상의 i번째 밴드 성분, $F_i(m)$, $MS_i(m)$, σ_{F_i}, σ_{MS_i}는 각각 해당 밴드의 데이터별 평균값과 표준편차를 나타낸다. CC 측정지수는 값이 1에 가까울수록 융합영상이 원본 다중분광영상의 분광정보를 잘 보존하고 있음을 나타낸다.

2.4.4 PSNR 측정치

PSNR은 최대 신호크기와 잡음신호 크기 비율을 나타낸 것으로, 주로 영상 또는 동영상 손실 압축에서 화질 손실정보를 평가하는데 많이 사용되며, 이 값이 클수록 영상의 화질이 우수함을 의미한다. 이러한 PSNR 측정치는 융합영상과 원본 다중분광영상의 분광왜곡지수를 평가하기 위한 측정지수로 활용될 수 있으며 그 구체적인 식은 다음과 같다(Huynh and Ghanbari, 2008).

$$PSNR_i = 10\,log_{10}\left(\frac{MAX_I^2}{MSE_i}\right), i = 1,\cdots,M \quad (11)$$

여기서, $MSE_i = \frac{1}{MN}\sum_{p=0}^{M-1}\sum_{q=0}^{N-1}[F_i(p,q) - MS_i(p,q)]^2$

여기서, MAX_I는 해당영상의 화소가 가질 수 있는 최대값으로, 영상 화소를 몇 비트(bit; B)로 표현하느냐에 따라 2^B - 1값을 갖는다. MSE_i는 융합영상과 원본다중분광영상 사이의 밴드 별 평균제곱오차를 나타낸다. PSNR 측정치의 경우 일반적으로 값이 클수록 융합영상의 품질이 뛰어남을 나타내고, 두 영상의 차이가 전혀 없다면 분모부분이 0이 되어 PSNR이 무한대가 된다.

3. 실험 적용 및 평가

3.1 실험 데이터 및 대상지역

실험에 사용한 데이터는 대전지역으로, 4m의 공간해상도를 가지는 KOMSPAT-2 다중분광영상과 1m급의 TerraSAR-X 영상을 이용하였다. TerraSAR-X 영상의 경우 동일한 상수의 높이값을 갖는 DEM을 이용하여 UTM 좌표로 투영시킨 GEC(Geocoded Ellipsoid Corrected) 영상으로, 2008년 7월 11일 촬영되었으며, 대상지역에서는 평균 28.01° 의 입사각(incidence angle)을 보인다. KOMPSAT-2 영상은 2007년 5월 10일 촬영되었으며, TerraSAR-X 영상과 비슷한 28.41° 의 경사각(tilt angle)을 갖는다. 각 영상에 대한 특성은 표 1과 같다. 본 연구에서는 크게 두 가지 사항을 고려하여 실험 대상지역을 선정하였다. 데이터 특성이 전혀 다른 이종데이터인 광학과 SAR 영상을 융합함으로써 얼마나 시각적 가독성이 높은 영상을 생성할 수 있을 것인가에 연구에 초점을 맞추어, 기본적으로 촬영기하조건이 유사한 데이터를 이용하여 상이한 기하조건에 의해 발생할 수 있는 다양한 융합 오차요인을 최대한 배제하고자 하였다. 또한 측면관측 방식으로 데이터를 취득하는 SAR 영상의 관측방식으로 인해 발생하는 두 데이터의 지형적 오차가 영상융합과정에 미치는 영향을 최소화하기 위해, 저층 건물지역과 도로 및 경작지를 포함하는 그림 8과 같은 시외(suburban)의 편평한 지역(flat area)을 실험 대상지역으로 선정하였다. 그림 8(b)의 KOMPSAT-2 다중분광영상은 대상지역 개체 식별에 관한 독자들의 편의를 도모하기 위해, 공삼차 보간기법을 이용하여 TerraSAR-X와 동일한 공간해상도인 1m로 업샘플링한 영상을 도시하였다. TerraSAR-X 영상의 스펙클 잡음을 완화시키기 위해 전처리과정으로 Lee filter를 적용하였고, 서로 다른 방사해상도를 갖는 두 데이터의 영상융합을 위해, TerrsaSAR-X의 16bit 방사해상도를 KOMPSAT-2와 동일하게 11bit로 변환하여 실험을 수행하였다.

(a) TerraSAR-X 영상 **(b)KOMPSAT-2** 다중분광영상

그림 8. 실험 대상지역

표 1. 실험에 사용된 위성영상 특성

	KOMPSAT-2	**TerraSAR-X**
공간해상도	4m	1m
방사해상도	11 bits	16 bits
촬영각	28.41° (Tilt angle)	28.01° (Incidence angle)
촬영 날짜	2007-05-10	2008-07-11
영상 처리 수준	Standard product	GEC product

3.2 실험 결과 및 평가

본 연구에서는 SAR와 광학영상의 융합에 앞서, 이전 연구에서 개발된 선형특징요소에 기반한 자동영상정합 기술을 통해 두 데이터를 기하보정하였다(한유경 등, 2011). 검사점을 이용한 기하보정 정확도 평가 결과, 수동으로 매칭쌍을 추출한 기하보정 정확도(3.09m)와 큰 차이를 보이지 않는 3.53m의 평균제급근오차(RMSE)값을 나타냈다. 이는 촬영조건 및 센서 특성에 따라 다른 기하학적 왜곡을 포함하게 되는 SAR와 광학영상의 특성을 고려할 때 만족할 만한 수준의 정확도라 판단된다.

제안 기법의 성능 평가를 위해, 기존의 광학 위성영상 융합에 많이 활용된 대표적인 융합 기법인 GS(Gram-Schmidt) 방법, átrous 웨이블렛에 기반한 AWLP(Propotional Additive Wavelet LHS)방법과 FFT 기반의 융합 방법에 의한 융합결과와의 시각적/정량적 비교평가를 수행하였다. GS 융합 방식은 CS(component-substitution)기반의 대표적인 융합 방법으로, 다중분광영상 정보를 이용하여 생성한 가상의 강도(intensity)영상과 고해상 흑백영상의 차를 다중분광영상에 주입하여 융합 영상을 생성하는 방식이다(Dou 등, 2007). AWLP 융합 방식은 대표적인 MRA(Multi-Resolution

Analysis)기반의 융합 방법으로, 3차 스플라인 함수를 웨이블렛 스케일링 함수로 이용하여 고해상 흑백영상 내에 존재하는 고주파 정보를 추출하고, 이를 다중분광 영상에 주입하여 융합영상을 생성하는 방식으로, 다중분광영상의 분광정보 보존 측면에서 효과적인 융합알고리즘으로 알려져 있다(Nunez 등, 1999; Otazu 등, 2005). 본 연구에서 선택한 마지막 비교 융합방법으로는 제안방법과 마찬가지로 FFT 변환을 통한 주파수 성분 조작을 통해 영상융합을 수행하는 방식으로, 해닝(Hanning) 고/저주파 필터링 과정을 CS기반 융합 방법인 IHS(Intensity-Hue-Saturation)융합 프레임워크(framework)에 통합하여 융합영상을 생성하는 방식이다(Ling 등, 2007). 하지만 이 방식은 기본적으로 RGB 3원색으로 구성된 컬러 영상의 색체계 변환의 일종인 IHS 변환 기법에 그 이론적인 토대를 두고 있기 때문에 4개 이상의 밴드를 갖는 다중분광영상을 처리하지 못하는 한계점을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 이러한 기존 방식의 문제점을 일반화된 IHS(Generalized IHS)기법을 적용하여 다중분광영상을 처리할 수 있도록 개선하였고, 이를 편의상 FG 방식으로 명명하겠다.

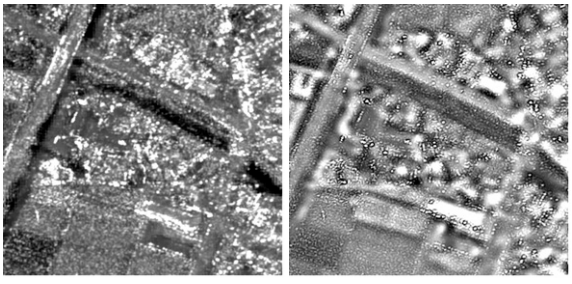
그림 9와 그림 10은 실험 대상지역 내 일부 동일 지역에 대한, 각 방법별 융합결과의 확대 영상을 나타낸다. 결과영상에서 확인 할 수 있듯이, 생성된 모든 융합 결과에서 융합 영상 내에 존재하는 거의 모든 개체에 대하여 크고 작은 열화현상이 발생함을 알 수 있다. 이는 기본적으로 서로 다른 파장대역에서 취득되는 광학과 SAR 영상의 방사학적 특성에 기인하는 것으로, 이러한 열화현상을 완전히 제거하기란 사실상 불가능에 가까운 문제이다. 시각적인 비교평가 결과, 전체적으로 공간영역데이터 처리기반인 GS 방법에 비해 주파수 영역 처리 방식인 웨이블렛과 FFT 변환에 기반을 둔 방법들이 개체들의 분광정보를 보다 잘 보존함을 시각적으로 확인 할 수 있었다. GS 방법의 경우 그림 9(a)와 그림10(a)에서 볼 수 있듯이, 거의 모든 개체들에 대해서 심한 분광왜곡이 발생하였다.

주파수 영역 처리 방식에서는 큰 분광왜곡에 의해, 원 다중분광영상의 특성을 표현하지 못하는 FG 방법보다는 AWLP 방법과 제안 방법이 상대적으로 분광왜곡이 적고 보다 우수한 성능을 보임을 확인 할 수 있다. 기존 융합 방법 중 상대적으로 가장 우수한 성능을 보이는 AWLP 방법에 비해, 그림 9(c),(d)에서 보는 것처럼 제안방법이 일부 수목 및 경작지 지역에 대하여 시각적으로 보다 선명한 영상을 생성함을 확인 할 수 있다. 또한 그림 10(c),(d)의 건물 지역의 비교영상에서 볼 수 있듯이, 측면관측 데이터 취득 방식에 기인한 SAR 데이터의 건물 외곽지역의 기하학적 왜곡이 미치는 융합오차가 제안기법이 상대적으로 작음을 확인 할 수 있다.

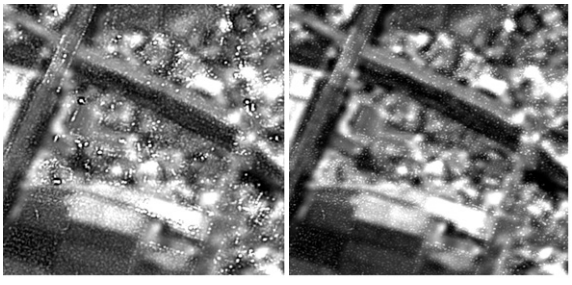
(a) GS 융합방법 **(b) FG** 융합방법

(a) AWLP 융합방법 **(b)** 제안 방법

그림 9. 일부 동일지역에 대한 결과 비교 영상(수목 및 경작지)



(a) GS 융합방법 **(b) FG** 융합방법



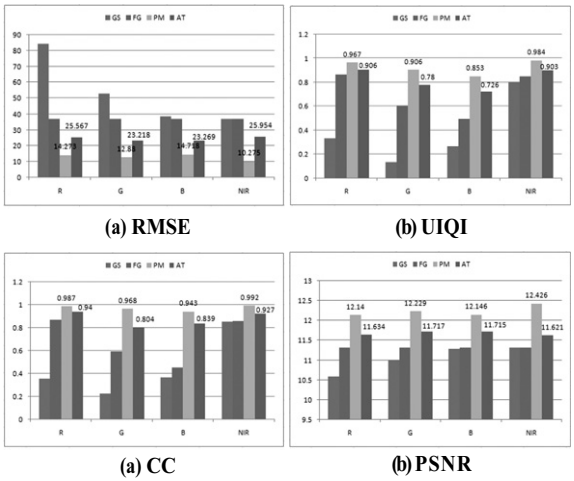
(a) AWLP 융합방법 **(b)** 제안 방법

그림 10. 일부 동일지역에 대한 결과 비교 영상(도로 및 건물)

융합기법들 간의 상대적인 시각적인 비교평가 방식은 분석자의 영상품질 판단 방식에 따라 달라질 수 있다는 맹점을 갖는다. 실제적으로 그림 9와 그림 10의 시각적인 비교평가 결과에서도 미세한 영상의 분광왜곡 및 열화현상에 의한 공간해상도 저하 현상을 한눈에 파악하기란 힘들다. 본 연구에서는 좀 더 엄밀한 비교평가를 위해 정량적 비교평가를 수행하였다. 정량적 비교평가는 앞서 언급한 것과 같이 융합영상의 공간해상도를 강제적으로 저하시킨 영상과 원본 다중분광영상의 분광학적 차이를 측정하는 2.4절에 기술한 분광정보 평가 측정치를 이용하여 이루어졌다. 정량적 비교평가 방식으로는 우선적으로 분광정보 평가 측정치를 이용하여, 각 방법별 융합결과의 밴드 별 분광왜곡 정도를 살펴보았다. RMSE 지수는 식(8)의 ERGAS 지수를 구성하는 $R(B_n)$에 해당하고, 낮은 값을 가질수록 분광왜곡이 적음을 의미한다. UIQI와 CC 측정지수는 1에 가까운 값을 가질수록, PSNR 지수는 높은 값을 가질수록 융합영상의 품질이 우수함을 나타낸다.

그림 11에서 확인 할 수 있듯이, GS 융합 결과는 사용한 모든 분광 왜곡량 평가에 있어서, 그림 9의 시각적 비교평가 결과와 마찬가지로, 타 기법에 비하여 상당히 좋지 못한 결과를 보임을 확인 할 수 있다. 또한, GS 융합의 경우 근적외 영역대 보다 가시광 영역대의 분광왜곡이 더 심함을 추가로 확인 할 수 있다.

밴드 별 정량적 비교평가 결과, 모든 분광정보 평가지수에 대해서 AWLP 방법과 제안방법이 타 기법에 비해 보다 나은 결과를 도출하였다. 상대적으로 우수한 성능을 보이는 이 두 방법을 좀 더 면밀히 살펴보면, 그림 11(a)의 RMSE 평가 지수의 경우 모든 밴드에서 제안방법이 AWLP 방법에 비해 2배 이상 좋은 결과를 보였고, UIQI 평가 지수의 경우 작게는 0.061, 크게는 0.126의 차이를 가졌고, CC 평가 측정지수의 경우 UIQI 측정지수와 유사하게 Red 밴드에서 가장 작은 0.047 차이를 보이고 Green 밴드에서 가장 큰 0.164 차이를 보였다. 마지막으로 PSNR 측정지수의 경우 그림 11(d)에서 보는 바와 같이 NIR 밴드에서 가장 큰 차이를 보였고 평균적으로 0.5 이상 좋은 결과를 보였다.



(a) RMSE (b) UIQI

(a) CC (b) PSNR

그림 11. 융합 방법에 따른 밴드 별 분광왜곡 정도 평가 (GS, FG, PM: 제안방법, AT: AWLP 방법)

시각적/정량적 평가를 종합하여 살펴보면, 일반적으로 광학위성영상 융합에 있어서 좋은 성능을 보이는 GS 융합의 경우, 시각적/정량적 평가 결과 광학영상과 SAR 영상과 같은 이종데이터 간의 영상융합에는 적합하지 않은 융합기법으로 사료된다. 주파수 영역 처리 방식인 제안방법과 AWLP 방법이 타 기법에 비해 우수한 성능을 보였고, 제안방법이 AWLP 방식에 비해 시각적으로 보다 선명한 결과를 도출하고 분광정보 보존 측면에서도 보다 효과적인 방법임을 정량적인 비교평가를 통해 확인할 수 있었다.

표 2. 분광정보 평가지수를 이용한 정량적 비교 평가 결과

	ERGAS	UIQI	CC	PSNR
GS 융합방법	1.898	0.387	0.449	11.048
FG 융합방법	1.310	0.705	0.695	11.314
제안 방법	0.445	0.927	0.972	12.235
AWLP 융합방법	0.877	0.829	0.878	11.672

4. 결 론

본 연구에서는 고해상도 TerraSAR-X 영상과 KOMPSAT-2 영상을 이용한 고해상도 융합영상 생성을 위한 방안의 하나로, 주파수 영역에서의 Kasier 창함수를 이용한 필터링 과정과 이상치 제거과정을 융합과정에 접목한 새로운 융합기법을 제안하였다. 또한 제안기법의 효용성을 검증하기 위해, 위성영상 융합에 많이 활용되고 있는 기존의 대표적인 융합기법에 의한 융합결과와 시각적/정량적

비교평가를 수행하였다. 실험 결과 전체적으로 다중 센서 간 융합에 있어 주파수 영역 처리 방식에 기반을 둔 융합기법들이 개별 개체들의 공간저하 및 균질도 측면에서 시각적으로 보다 나은 결과를 도출하였다. 다양한 분광정보 평가지수를 이용한 정량적 비교 평가 결과 역시, 웨이블렛 기반의 AWLP 방법과 FFT 기반의 제안 기법이 기존 융합방식에 비해 분광정보 보존 측면에서 보다 나은 결과를 도출하였다. 기존 융합 기법 중 가장 우수한 결과를 보이는 AWLP 방법과의 비교평가 결과, 제안기법이 AWLP 방법에 비해 분광정보 평가 지수에 따라 4.8%~49.2% 정도의 범주로 분광왜곡이 작았고, 시각적으로도 보다 선명한 결과를 보임을 확인할 수 있었다. 향후 QuickBird-2, Geoeye-1 등과 같은 더욱 다양한 고해상도 광학위성영상과 고층건물 지역을 포함한 다양한 실험대상 지역을 이용하여 위의 결과를 더욱 검증하고, 보다 의미 있는 TerraSAR-X 고주파 정보 추출 기법을 개발하여 다중센서 간 영상융합 품질을 더욱 향상시킬 수 있도록 연구를 진행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부의 2010년 기술료사업-다중위성 최적임무 촬영계획기술 개발 과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

변영기, 채태병 (2011), 결정론적 영상복원과정을 이용한 고해상도 위성영상 융합 품질 개선정도 평가, **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제 29권, 제 5호, pp. 471-479.

한유경, 변영기, 채태병, 김용일 (2011), KOMPSAT-2 영상과 TerraSAR-X 영상 간 자동기하보정, **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제 29권, 제 6호, pp. 441-449.

최재완, 김대성, 김용일 (2011), 공간 상관도 기법에 따른 하이브리드 융합영상의 공간/분광 왜곡평가, **한국측량학회지**, 한국측량학회, 제 29권, 제 2호, pp. 175-181.

Alparone, L., Baronti, S., Garzelli, A., and Nencini, F. (2004), Landsat ETM+ and SAR image fusion based on generalized intensity modulation, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 42, No. 12, pp. 2832-2839.

Ban, Y., Hu, H., and Rangel, I. M. (2010), Fusion of QuickBird MS and Radarsat SAR data for urban land cover mapping: object-based and knowledge-based approach, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 31, No. 6, pp. 1391-1410.

Chibani, Y. (2007), Integration of panchromatic and SAR features into multispectral SPOT images using the àtrous wavelet decomposition, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, No. 10, pp.2295-2307.

Dou, W., Chen, Y., Li, X., and Sui, D. Z. (2007), A general framework for component substitution image fusion; An implementation using the fast fusion method, *Computers and Geoscience*, Vol. 33, pp. 219-228.

Gonzalez, R. C., and Woods, R. E. (2002), *Digital image processing*, Prientice-Hall, New Jersey, pp. 208-213.

Hong, G., Zhang, Y., and Mercer, B. (2009), A wavelet and IHS Integration Method to fuse high resolution SAR with moderate resolution multispectral images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 75, No. 10, pp. 1213-1223.

Huang, T. S. (1978), Two-dimensional Windows, *IEEE Transaciton On Audio and Electroacoustics*, Vol. 20, No. 5, pp. 260-269.

Huynh, T. Q., and Ghanbari, M. (2008), Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment, *Electronics Letters*, Vol. 44, No. 13, pp. 800-801.

Lee, J. S. (1980), Digital image enhancement and noise filtering by use of local statistics, *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 2, No. 2, pp. 165-168.

Ling, Y., Ehlers, M., Lynn Usery, E., and Madden, M. (2007), FFT-enhanced IHS transform method for fusing high-resolution satellite images, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 61, No. 6, pp. 381-392.

Nunez, J., Otazu, X., Fors, O., Prade, A., Pala, V., and Arbiol, R. (1999), Multiresolution-based image fusion with additive wavelet decomposition, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 37, No. 3, pp. 1204-1211.

Otazu, X., González-Audícana, M., Fors, O., and Núnez, J. (2005), Introduction of sensor spectral response into image fusion method. Application to wavelet-based method, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,* Vol. 43, No. 10, pp. 2376-2385.

Pohl, C., and van Genderen, J. L. (1998), Multisensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods, and application, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 5, pp. 825-854.

Ranchin, T., and Wald, L. (2000), Fusion of High Spatial and Spectral Resolution Images: The ARSIS Concept and Its application, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 66, No. 1, pp. 49-61.

Solberg, A. H. S., Taxt, T., and Jain, A. K. (1996), A Markov random field model for classification of multisource satellite imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 34, No. 1, pp. 100-113.

Wang, Z., and Bovik, A.C. (2002), Universal Image Quality Index, *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 9, No. 3, pp. 81-84.

Zhang, W., and Yu, L. (2010), SAR and Landsat ETM+ image fusion using variational model, *Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering*, IEEE, Chengdu pp. 205-207.

Zitova, B., and Flusser, J. (2003), Image registration method: a survey, *Image and Vision Computing*, Vol. 21, No. 11, pp. 977-1000.

(접수일 2012. 01. 30, 심사일 2012. 02. 16, 심사완료일 2012. 02. 20)