Jour. Korean Earth Science Society, v. 27, no. 1, p. 83–94, February 2006

태풍 루사에 의한 강릉 사천천 주변 퇴적 환경 변화: 다중 시기 원격탐사 자료를 이용한 정보 분석

박노욱[1,*] · 장동호[2] · 지광훈[1]

[1]한국지질자원연구원 지질자원정보센터, 305-350, 대전광역시 유성구 가정동 30번지
[2]공주대학교 군사과학연구원, 314-701, 충청남도 공주시 신관동 182번지

Analysis on the Sedimentary Environment Change Induced by Typhoon in the Sacheoncheon, Gangneung using Multi-temporal Remote Sensing Data

No-Wook Park[1,*], Dong-Ho Jang[2], and Kwang-Hoon Chi[1]

[1]Geoscience Information Center, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea
[2]Research Institute for Military Science, Kongju National University, Chungnam 314-701, Korea

Abstract: The objective of this paper is to extract and analyze the sediment environment change information in the Sachencheon, Gangneung, Korea that was seriously damaged as a result of typhoon Rusa aftermath early in September, 2002 using multi-temporal remote sensing data. For the extraction of change information, an unsupervised approach based on the automatic determination of thresholding values was applied. As the change detection results, turbidity changes right after typhoon Rusa, the decrease of wetlands, the increase of dry sand and channel width and changes of relative level in the stream due to seasonal variation were observed. Sedimentation in the cultivated areas and restoration works also affected the change near the Sacheoncheon. In addition to the change detection analysis, several environmental thematic maps including microtopographic map, distributions of estimated amount of flood deposits and flood hazard landform classification map were generated by using remote sensing and field survey data. In conclusion, multi-temporal remote sensing data can be effectively used for natural hazard analysis and damage information extraction and specific data processing techniques for high-resolution remote sensing data should also be developed.

Keywords: multi-temporal remote sensing data, hazard analysis, typhoon Rusa

요 약: 이 논문에서는 2002년 9월 태풍 루사로 인해 많은 재해 피해를 입은 강원도 강릉시 사천천 유역을 대상으로 다중 시기 원격탐사 자료를 이용하여 퇴적 지질환경 변화 정보를 추출하고 분석을 수행하였다. 다중 시기 자료에 대해 자동 임계치 설정 기반 무감독 변화 탐지 기법을 적용하여 여러 시기 및 센서별 변화 정보를 추출하였다. 변화탐지 결과, 제외지에서는 태풍 루사 직후 하천 탁도 변화, 습지의 수계 혹은 퇴적물로의 변화 및 계절적인 유량 차이에 의한 하도 노출 여부 등으로 변화지역이 나타났다. 주변 농경지에서는 홍수 및 산사태 등으로 인한 토사의 퇴적, 농지 개간 등으로 인한 변화가, 기타 지역에서는 제방 공사 등으로 인한 변화가 두드러지게 나타났다. 또한 야외 조사와 원격탐사 자료를 이용하여 미지형 분류도, 범람원 지역 지표 퇴적량 분포도 및 수해 지형 분류도를 작성하였다. 결론적으로 다중 시기 고해상도 원격탐사 자료가 재해로 인한 변화 정보 추출에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대되며, 이를 위해 고해상도 자료에 적합한 자료처리 기법 개발이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

주요어: 다중 시기 원격탐사 자료, 재해 분석, 태풍 루사

*Corresponding author: nwpark@kigam.re.kr
Tel: 82-42-868-3287
Fax: 82-42-867-0421

서 론

우리나라는 여름철에 집중되는 강우 특성, 복잡한 지질 특성 등과 같은 독특한 자연환경 특성으로 인해 홍수, 산사태 등의 자연재해로 많은 피해가 발생하고 있다. 특히 여름 장마철에 강우가 집중되는데, 강우에 의한 피해는 하천의 범람으로 인한 침수 피해뿐만 아니라 산사태와 같은 다른 재해 피해를 유발시킨다. 또한 산사태로 인해 유실된 토사는 하천에 유입되어 하천 바닥의 상대적인 높이를 상승시키며, 하천 주변 범람지에 토사로 인한 홍수피해를 더욱 커지게 한다.

최근 이러한 자연 재해에 대해서 예보와 사전 대책 마련에 대한 관심이 증대되고 있지만, 대부분은 많은 시간과 인력을 투입하여 복구와 현황 파악에 치중하고 있다. 물론 복구와 관련된 현지조사가 중요한 부분이지만, 이에 뒤따르는 많은 시간과 비용은 시의성이 중요한 합리적인 재해관리에 대한 걸림돌로 작용할 수 있다. 따라서 보다 경제적인 현황 파악과 과학적인 분석 체계가 이루어져야 합리적인 재해관리 체계가 구축될 수 있다.

원격탐사 자료는 비교적 짧은 주기로 지구의 전역을 탐사하여 일관된 질의 화상을 공급하기 때문에 국토 환경 분석에 중요하게 이용될 수 있으며, 특히 자연재해 분야에의 적용 가능성 또한 높은 상황이다. 기존 위성영상들은 30 m 공간해상도의 Landsat이나 20 m 공간해상도의 SPOT 등의 중저해상도 위성 자료들이 대부분이어서 광역적 분석만이 가능하였다. 그러나 최근 공간해상도 1 m급의 IKONOS나 QuickBird와 같은 고해상도 위성 자료의 이용이 급증함에 따라 광역적 분석뿐만 아니라 정밀 분석이 가능해지고 있다. 특히 앞으로 발사될 다목적실용위성 2호는 1 m 해상도의 전정색 영상과 4 m 해상도의 다중 대역 영상을 촬영할 수 있는 고해상도 카메라(MSC)를 탑재하기 때문에 주기적으로 하천 주변 퇴적 지질환경 변화 연구에 필요한 자료를 제공할 것으로 기대된다.

하천에서의 퇴적환경 변화에 대한 많은 연구는 직접 현장에서 실측 및 실험을 통한 연구들이 대부분이나(Durgin, 1985; Borah and Ashraf, 1990; Liew, 1997; Perrone and Madramootoo, 1999; Tönis et al., 2002; Michael and Keith, 2006), 원격탐사 자료 및 GIS기법에 의한 연구도 상당수 진행되고 있다. 이들 연구들은 위성영상자료를 수문해석에 적용하거나(Miller, 1993; Gellis et al., 2000), 홍수 전 · 후의 퇴적환경 변화 탐지(Bryant and Gilvear, 1999; Zhan, et al., 2002; Sande, et al, 2003; Jerry, et al., 2004; James et al., 2005), 이밖에 SAR 자료를 이용한 홍수분석 연구 등이 활발히 진행되고 있다(Paul et al., 2003; Iain, 2005; Marouane et al., 2005). 한편, 최근의 고해상도 영상의 활용범위가 증대되면서 고해상도 자료를 이용한 정량적인 퇴적환경 변화연구의 필요성이 대두되고 있다.

이 연구에서는 다중 시기 원격탐사 자료 특히 고해상도 위성 자료의 재해 분야에의 적용 가능성을 검토하기 위해 2002년 태풍 루사로 인해 많은 홍수 및 산사태 피해를 입고, 이후 2003년 태풍 매미로 인한 홍수 피해를 입은 강원도 강릉시 사천천 일대를 대상으로 사례연구를 수행하였다.

연구 지역, 사용 자료 및 연구 방법

연구 지역

2002년 8월말 태풍 루사로 인한 집중 호우 및 산사태로 많은 피해를 입은 강원도 강릉지역을 연구 대상지역으로 하였다. 본 연구지역 주변의 주요 하천들은 집중 호우로 인한 홍수범람의 피해를 입었으며, 특히, 산사태 발생으로 인한 퇴적물의 유입으로 인한 범람이 더욱더 발생하였으며, 2003년 여름 태풍 매미로 인해 또다시 재해 피해를 입은 사천천 주변을 대상지역으로 선정하였다(Fig. 1(a)).

2002년 8월 말 제 15호 태풍 루사가 한반도를 관통하면서 전국에 걸쳐 강풍과 폭우로 많은 피해가 발생한 가운데 특히 강릉지방에 기록적인 폭우가 쏟아져 피해가 집중됐다. 지난 8월 31일 하루 동안 강릉지방에 내린 강수량은 870.5 mm였다(기상청, 조선일보 참조). 이로 인해 홍수로 인해 침수 피해와 더불어 많은 산사태 피해가 발생하였다(Fig. 1(b)). 여러 지역에서 산사태가 발생하였으나, 1998년과 2000년에 대규모 산불이 발생한 지역에서 이러한 산사태가 많이 발생하였다. 특히 산사태로 뽑힌 나무가 떠내려가다가 교각에 걸려서 물이 범람하여 주택, 도로, 농지 등에 피해를 준 것으로 나타났다(지광훈 외, 2005).

사천천은 동서로 흐르는 준용하천으로 하천의 유로연장은 23.70 km이며, 유역면적은 60.02 km^2이고, 유역의 평균 폭은 2.38 km^2이다. 주변에는 농경지 400

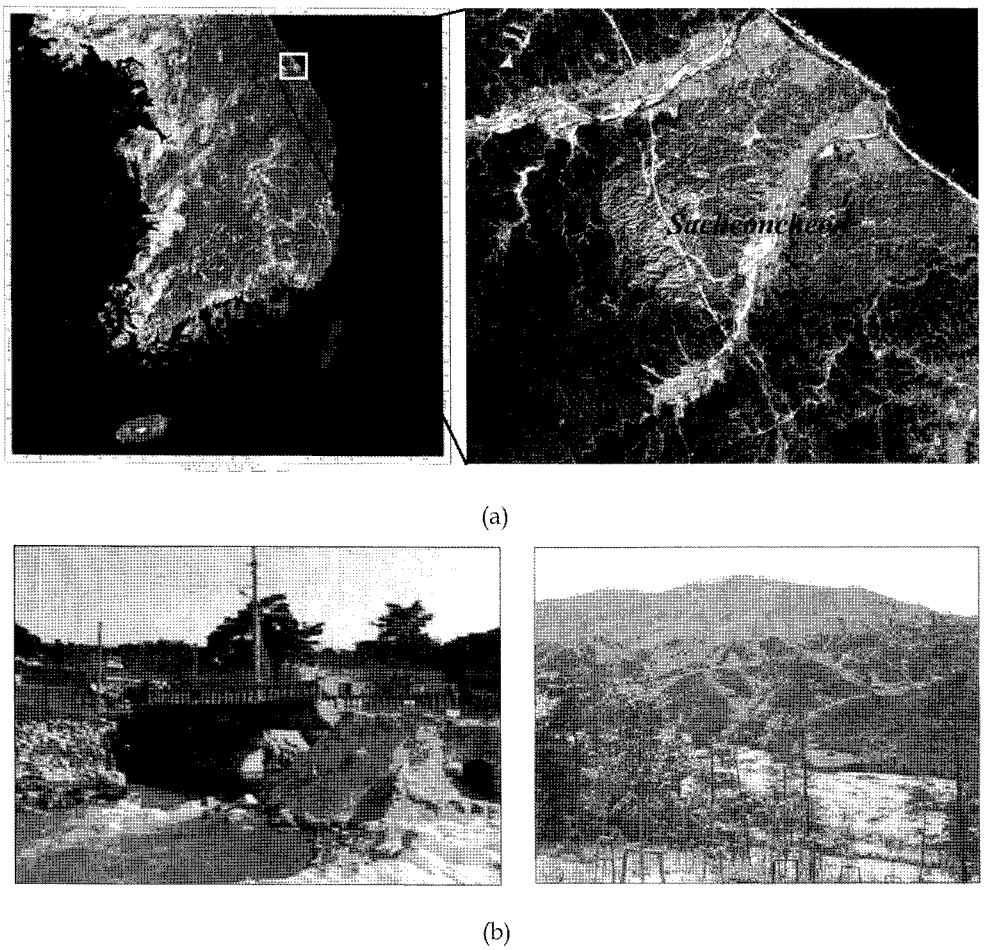

Fig. 1. (a) Location map of the study area, (b) field photos of damaged areas.

여 정보가 분포되어 있다. 기반암은 중생대 쥬라기에 형성된 대보화강암으로, 나지로 노출될 경우 침식을 쉽게 받을 수 있다. 현재 사천천 주변에는 심층풍화되어 적색을 띄는 기반암 풍화층이 최대 수~수십m를 형성하고 있다. 사천천의 중·상류부는 평활한 사면이 넓게 발달되어 있는데, 본 사면이 탁월한 이유는 한반도의 대부분의 산지지역이 최종빙기에 주빙하 환경하에서 동결파쇄에 의한 암설생산량의 증대와 동결융해의 반복에 의한 암설 이동의 결과이다. 특히 유역내의 여러 곳에서 차별침식의 결과로 생긴, 풍화층내에 끼어있는 핵석이나, 지표에 노출된 토어(tor)가 군데군데 발견된다. 사천천의 상류는 V자곡의 계곡하천을 이루고, 중하류부에서는 선상지 하도를 이루면서 하폭이 넓어지고 하상경사가 급변하는 양상을 보이고 있다. 하상 퇴적물은 중상류에서는 굵은 자갈 이상의 자갈로 주로 구성되고, 포인트 바 및 사주 등에서는 표층이 굵은 모래로 구성되어 있다. 하류부에도 자갈이 주재료이면서 다소의 부재료인 모래도 혼합되어 있다. 복단면 하도형태는 일부 하류구간 외에 나타나지 않는다(장동호, 2005).

사용 자료

이 연구에서는 시계열 원격탐사 자료로 다중 시기/센서 위성자료를 이용하였다(Fig. 2). 공간 해상도 6.6 m의 KOMPSAT-1 EOC 자료의 경우, 태풍 루사가 지나간 직후인 2002년 9월 8일에 획득한 자료를 이용하였으며, 계절적인 요인을 고려하기 위해 2001년 12월 7일, 2002년 12월 14일과 2003년 11월 14일 자료를 이용하였다. 공간 해상도 2.5m의 SPOT-5 자료는 태풍 루사와 매미 이후에 촬영된 자료를 이용하였다. 1 m급의 고해상도 자료인 IKONOS와 QuickBird의 경우 루사 이전인 2001년 10월 14일과

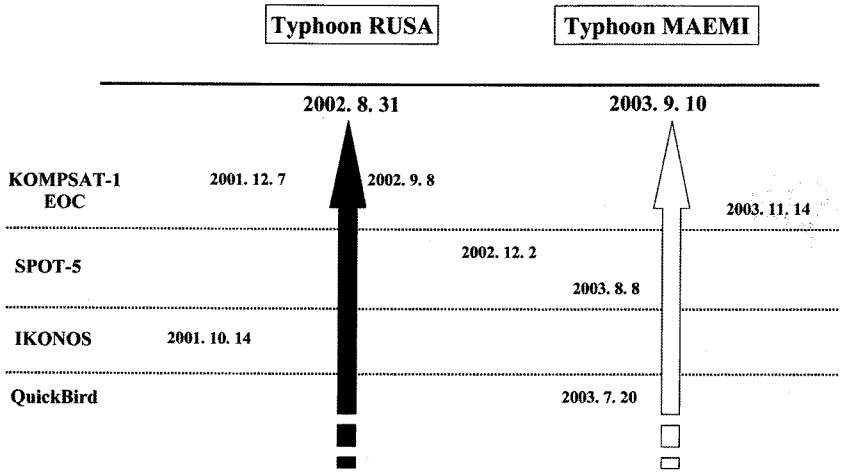

Fig. 2. Multi-temporal/sensor remote sensing data used for change detection analysis.

그 이후인 2003년 7월 20일 자료를 분석에 이용하였다. 이러한 자료들은 각각 공간범위와 영상의 크기가 달라 이 연구에서는 위성영상의 공통된 공간범위만을 사용하였으며(Fig. 3), 일부 위성 기반 하천 퇴적 주제도 작성에는 사기막 저수지의 하류부터의 자료를 이용하였다. 이러한 원격탐사 자료 이외에 기하보정과 주제정보 추출을 위해 1 : 5,000 축척의 수치지형도를 이용하였다.

연구 방법

이 연구는 고해상도 원격탐사 자료의 재해분야에의 적용성을 검토하기 위한 원격탐사 자료 기반 사천천 주변의 변화 정보 추출 과정과 원격탐사 및 현지 조사 자료기반의 연계를 통한 하천 퇴적 지질환경 주제도 작성의 두 부분으로 수행하였다(Fig. 4). 우선적으로 Fig. 2의 시계열 원격탐사 자료로 다중 시기/센서 자료를 이용하여, 사천천 주변 지역의 태풍 루사와 매미 전후의 변화정보를 추출하였다. 변화 정보 추출을 위해 우선 시기가 다른 화상에 대해서 Yamamoto et al.(2001)에 의해 사용된 다중회귀분석을 이용하여 두 시기 화상의 방사학적 차이를 보정하였다. 이후에 변화정보 추출에는 무감독 탐지 기법을 적용하여 일정 시기 사이의 변화 유무 정보를 추출하였는데, 변화된 지역과 변화되지 않은 지역을 구분하는 임계치를 가우시안 혼합 밀도 모델과 기대최대화 기법을 적용하여 자동으로 추출하는 기법(Bruzzone and Prieto, 2000; 박노욱 외, 2003)을 적용하였다.

차연산 혹은 비연산을 적용한 연산 화상의 특정 화소 X에서의 확률 밀도분포는 화소값의 증가로 인한 변화지역($\omega_{(+)\ change}$), 화소값의 감소로 인한 변화지역($\omega_{(-)\ change}$), 무변화 지역($\omega_{no\ change}$)의 3개의 클래스에 대한 가우시안 분포의 합으로 표현된다(Fig. 5(a)).

$$\Pr(X) = \Pr(\omega_{(-)\ change})\Pr(X|\omega_{(-)\ change}) + \Pr(\omega_{no\ change})\Pr(X|\omega_{no\ change}) + \Pr(\omega_{(+)\ change})\Pr(X|\omega_{(+)\ change})$$

$$= \sum_{i=1}^{n} \Pr(\omega_i)\Pr(X|\omega_i),\ n = 3 \qquad (1)$$

$$\Pr(X|\omega_i) = \frac{1}{\sigma_i\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(X-\mu_i)^2}{2\sigma_i^2}\right]$$

여기서 n은 고려하는 확률밀도함수의 개수로 화소값의 감소로 인한 변화지역, 무변화지역, 화소값의 증가로 인한 변화지역을, $\Pr(\omega_i)$는 ω_i 클래스의 사전확률, μ_i와 σ_i는 각각 클래스에서 X의 평균과 표준편차를 나타낸다.

가우시안 혼합 밀도 모델의 평균, 분산, 초기 확률 등을 추정하기 위해 기대최대화 기법을 적용하였는데, 기대최대화 기법은 불완전한 자료로부터 반복적인 연산을 통해 확률 밀도 함수의 파라미터를 결정하는 방법이다(Dempster et al., 1977). 이 방법을 통해 주어진 자료로부터 확률분포의 파라미터들의 최대우도 추정치를 찾아내게 된다. 우선 파라미터를 초기화한 후에, 파라미터들의 기대값을 계산하는 기대화 과정(E-step)과 최대우도를 가지는 새로운 추정치를 계산하는 최대화 과정(M-step)의 반복적 연산과정을 통해

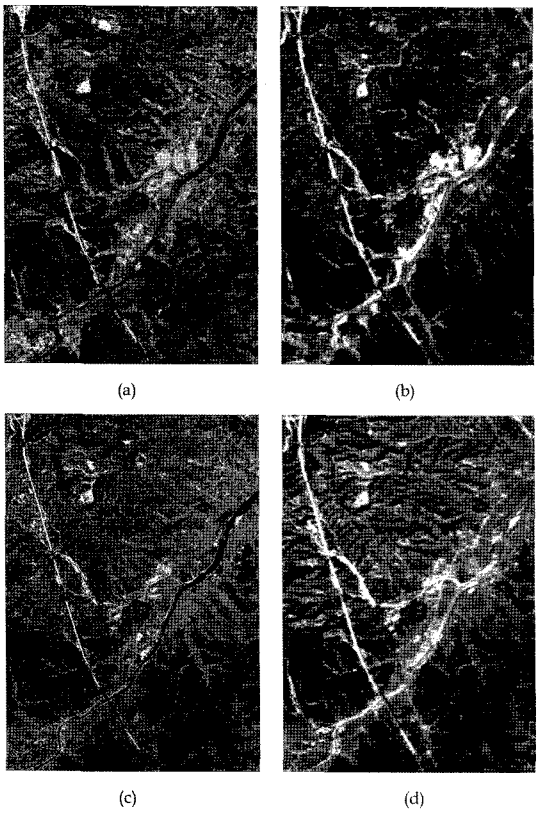

Fig. 3. Multi-temporal remote sensing images in the common area, (a) IKONOS panchromatic imagery (2001.10.14), (b) KOMPSAT-1 EOC imagery (2002. 9. 8), (c) QuickBird panchromatic imagery (2003.07.20), (d) KOMPSAT-1 EOC imagery (2003. 11. 14).

최대우도 추정치를 찾아내게 된다.

일단 가우시안 혼합 밀도함수의 파라미터들이 결정되면 이로부터 변화지역에 대한 임계치를 설정해야 하는데, 이를 위해 이 연구에서는 베이지안 최소 오차 이론을 적용하였다(Fig. 5(b)). 베이지안 규칙에 의해 각 클래스의 사후 확률(posteriori probability) $Pr(\omega_i|X)$은 혼합 밀도 $Pr(X)$, 사전 확률 $Pr(\omega_i)$, 가우시안 분포로 표현되는 조건부 확률 $Pr(X|\omega_i)$의 결합으로 다음과 같이 결정된다.

$$Pr(\omega_i|X) = \frac{Pr(\omega_i)Pr(X|\omega_i)}{Pr(X)}, \quad i = 1,2 \tag{2}$$

사전 확률과 조건부 확률로부터 식 (2)를 이용하여 사후 확률을 얻으면, 보통 사후확률 최대화의 규칙(MAP: maximum a posteriori)에 따라 특정 클래스의 사후 확률이 다른 클래스보다 클 경우 특정 클래스로 할당하게 된다.

$$\text{Decide } \omega_n \text{ if } Pr(\omega_n|X) > Pr(\omega_c|X);$$
$$\text{otherwise decide } \omega_c \tag{3}$$

이때 특정 클래스를 선택할 때 발생하는 조건부 오차(conditional error) $r(X)$와 이의 기대값에 해당하는 전체 오차 ε는 다음과 같이 정의할 수 있다(Fukunaga, 1990; Duda et al., 2000).

$$\begin{aligned} r(X) &= \min[Pr(\omega_n|X), Pr(\omega_c|X)] \\ \varepsilon &= E[r(X)] = \int r(X)Pr(X)dX \\ &= \int \min[Pr(\omega_n)Pr(X|\omega_n), Pr(\omega_c)Pr(X|\omega_c)]dX \\ &= Pr(\omega_n)\int_{R2} Pr(X|\omega_n)dX + Pr(\omega_c)\int_{R1} Pr(X|\omega_c)dX \\ &= Pr(\omega_n)\varepsilon_n + Pr(\omega_c)\varepsilon_c \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)의 적분항에서 R1과 R2는 각각 ω_n과 ω_c로 분류된 지역을 나타낸다.

베이지안 최소 오차 이론에 따르면, 분류에 따른 오차를 최소로 하는 임계치 t는 $Pr(\omega_n)Pr(X|\omega_n) = Pr(\omega_c)Pr(X|\omega_c)$를 만족하는 X에 해당된다. 이는 식 (5)의 이차방정식을 계산하여 얻을 수 있다(Bruzzone and Prieto, 2000; 박노욱 외, 2003).

$$\frac{(X-\mu_c)^2}{2\sigma_c^2} - \frac{(X-\mu_n)^2}{2\sigma_n^2} + \ln\left[\frac{\sigma_c Pr(\omega_n)}{\sigma_n Pr(\omega_c)}\right] = 0$$

$$X = \frac{[(\mu_c\sigma_n^2 - \mu_n\sigma_c^2) \pm D]}{\sigma_n^2 - \sigma_c^2}, \tag{5}$$

$$D = \sqrt{(\mu_n\sigma_c^2 - \mu_c\sigma_n^2)^2 - (\sigma_n^2 - \sigma_c^2)\cdot\left(\sigma_n^2\mu_c^2 - \sigma_c^2\mu_n^2 + \sigma_c^2\sigma_n^2 \ln\left[\frac{\sigma_c Pr(\omega_n)}{\sigma_n Pr(\omega_c)}\right]\right)}$$

여기서 계산되는 2개의 X중에서 값의 범위에 해당되는 값을 선택하면 이 값이 변화지역과 비변화지역을 구분하는 임계치 값에 해당된다.

이러한 사천천 주변의 변화 정보 추출 이외에 하천 퇴적 지질환경 주제도로 고해상도 위성자료 기반 미지형 분류도, 범람원 지역 지표 퇴적량 분포도 및

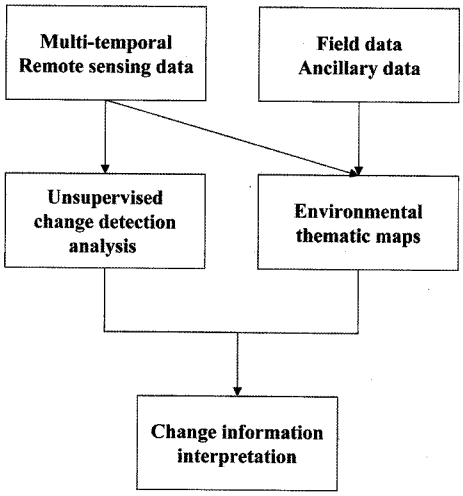

Fig. 4. Work flow applied in this study.

사천천 지역 수해지형 분류도를 작성하였다(Fig. 4). 우선 태풍 루사 전후 사천천 유역의 지형면 변화를 분석하기 위해 고해상도 위성 자료인 태풍 루사 발생 이전인 2001년 10월 14일에 촬영된 IKONOS 자료와 태풍 루사 발생 이후인 2003년 7월 20일에 촬영된 QuickBird 자료를 이용하였다. 두 자료와 토지피복도, 수치지도 등을 판독하여 미지형 분류도를 작성한 후에 직접적인 속성 비교를 통해 지형면 변화도를 작성하였으며, 현지 조사를 통해 최종적으로 검증하였다. 또한 현지에서 간이 보링기를 이용하여 획득된 최근 홍수 기원 퇴적량 자료를 내삽하여 범람원 지역 지표 퇴적량 분포도 작성하였다. 마지막으로 현지조사를 통해 수해 가능성이 높은 지형면들인 범람원 저위 하안단구면과 곡저평야 등에 대한 인위적인 변형 상태를 조사하고, 과거에 발생한 수해 흔적을 조사하여 수해지형 분류도를 작성하였다.

연구 결과

변화 정보 추출 결과

무감독 변화 탐지에는 Fig. 3의 공통영역 중에서 사천천 하도, 곡저평야 및 범람원 등을 포함하는 지역을 추출하여 그 지역을 대상으로 화상간 변화탐지를 수행하였다. KOMPSAT-1 EOC 자료의 경우 전정색 자료이기 때문에 이종 센서의 경우 전정색 자료만 이용하였으며, 공간해상도는 재배열을 통해 1m로 하였다. 자료변화 탐지 기법으로는 두 시기 자료간

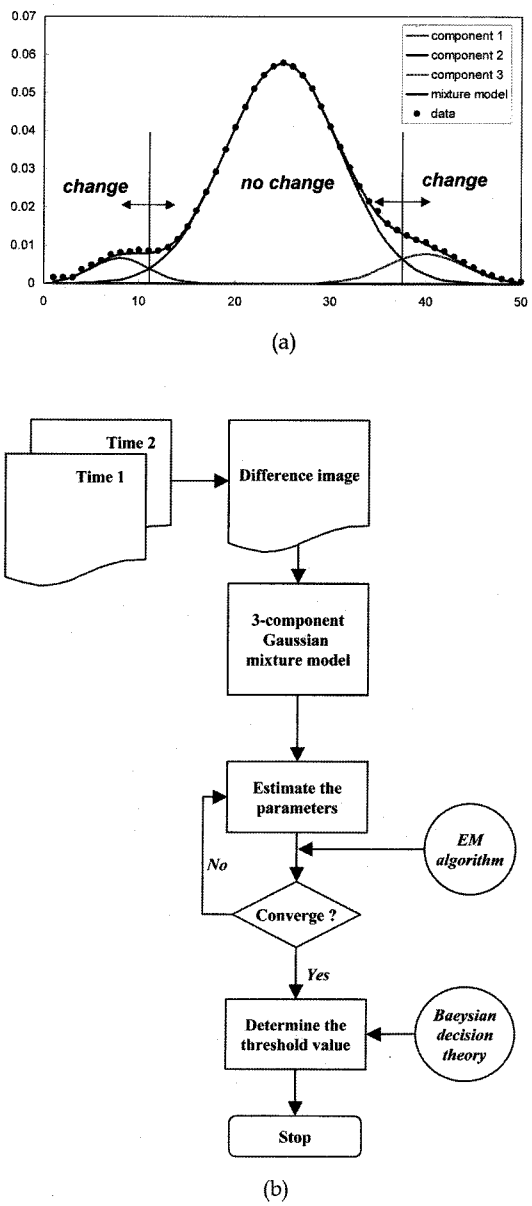

Fig. 5. (a) Example of 3-component Gaussain mixture model, (b) Procedure for the automatic determination of threshold values (from Park et al., 2003).

화소값의 차이를 구하는 차연산을 적용하였으며, 자동 임계치 계산은 기대최대화 기법과 식 (5)를 Fortran을 이용하여 프로그래밍하였다. 적용 결과 변화 정보는 비변화 지역, 화소값의 증가로 인한 변화 지역 및 화소값의 감소로 인한 변화 지역으로 나타나게 된다(Fig. 6의 범례 참조). 변화탐지 분석에 다중 시기/센서 자료를 이용하였기 때문에 여러 시기별

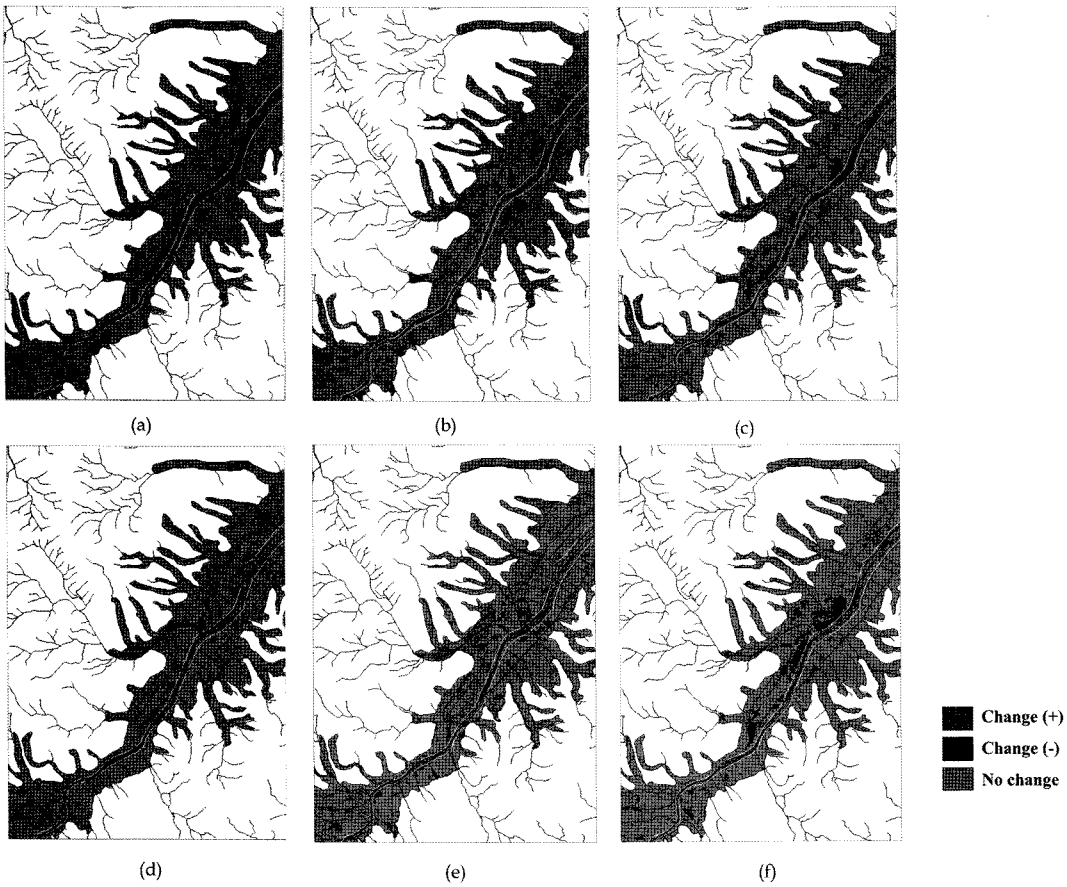

Fig. 6. Change detection results, (a) KOMPSAT-1 EOC imagery (2001. 12. 7) acquired before typhoon Rusa passage and KOMPSAT-1 EOC imagery (2002. 9. 8) acquired right after typhoon Rusa passage, (b) KOMPSAT-1 EOC (2002. 9. 8) acquired right after typhoon Rusa passage and SPOT-5 imagery (2002. 12. 2) acquired after typhoon Rusa passage, (c) KOMPSAT-1 EOC imagery (2001. 12. 7) acquired before typhoon Rusa passage and SPOT-5 imagery (2002. 12. 2) acquired after typhoon Rusa passage, (d) IKONOS imagery (2001. 10. 14) acquired before typhoon Rusa passage and QuickBird imagery (2003. 7. 20) acquired after typhoon Rusa passage, (e) SPOT-5 imagery (2003. 8. 8) acquired before typhoon Maemi passage and KOMPSAT-1 EOC imagery (2003. 11. 14) acquired after typhoon Maemi passage, (f) SPOT-5 imagery (2002. 12. 2) acquired before typhoon Maemi passage and KOMPSAT-1 EOC imagery (2003. 11. 14) acquired after typhoon Maemi passage. The black line is a stream one extracted from a topographic map. In legend, Change (+) and Change (-) mean that increases and decreases of DN values occurred during time period considered, respectively.

및 센서별 비교를 통한 변화 정보를 추출하였으며, 고려한 시기별 변화 정보의 정량적인 값은 Table 1에 제시하였다.

태풍 루사 통과 (2002. 8) 이전과 직후 화상간 비교를 위해 2001년 12월 7일과 2002년 9월 8일에 촬영된 KOMPSAT-1 EOC 화상을 비교한 결과, 하천의 범람과 산사태 등으로 유입된 토사의 영향으로 사천천 주변이 모두 화소값이 증가한 변화지역으로 탐지되었다. 제방 안쪽 지역인 제외지에서는 기존 습지 지역이 대부분 토사가 쌓인 것으로 나타났으며, 토사가 섞인 물의 흐름으로 하천수의 탁도가 높아서 수계 대부분이 변화지역으로 탐지되었다(Fig. 6(a)). 변화지역은 전술한 화소값의 증가로 인한 변화지역이 대부분을 차지하였다.

태풍 루사 통과 직후 화상간 비교를 위해 2002년 9월 8일의 KOMPSAT-1 EOC 화상과 2002년 12월 2일 SPOT-5 화상을 비교하였는데, 토사의 흐름이 시간이 경과됨에 따라 안정화되면서 제외지 내에서의 변화는 두드러지지 않으며 토사로 쌓였던 지역이 일부 개간 등으로 인해 화소값이 감소하는 양상으로

Table 1. Portion of changed and unchanged areas for each change detection case. Refer to the caption of Fig. 6 for explanation of each change detection case. Change (+) and Change (-) mean that increases and decreases of DN values occurred during time period considered, respectively

Portion in % \ Case	Fig. 6(a)	Fig. 6(b)	Fig. 6(c)	Fig. 6(d)	Fig. 6(e)	Fig. 6(f)
Change (+)	18.3	11.3	7.3	9.5	3.4	1.4
Change (-)	5.3	9.6	8.8	6.3	10.8	8.8
No change	76.4	79.2	83.9	84.2	85.8	89.8

나타나고 있다(Fig. 6(b)). 이러한 영향으로 화소값의 증가와 감소에 의한 변화지역의 비율이 유사하게 나타나고 있다.

태풍 루사 전후 동일 계절 화상간 비교를 위해 2001년 12월 7일의 KOMPSAT-1 EOC 화상과 2002년 12월 2일 SPOT-5 화상을 비교하였는데, 제외지에서는 기존 습지지역이 대부분 토사로 덮여 화소값이 상승하였고, 하천 주변에도 토사가 쌓여서 변화지역으로 탐지되었다(Fig. 6(c)). 화소값의 감소지역은 주로 농경지에서 나타났으며, 이러한 분포는 화소값의 증가에 의한 변화지역보다 유사하거나 다소 높게 나타났다(Table 1).

태풍 루사 전후 유사 공간해상도 화상간 비교를 위해 2001년 10월 14일 IKONOS 화상과 2003년 7월 20일 QuickBird 화상을 비교하였는데, 하천 사방공사와 가을과 여름이라는 계절적 변동 등으로 하천 유로가 늘어났으며, 이에 따라 화소값의 상승과 감소 지역이 제외지 주변에 나타나고 있다. 하도내에서는 태풍 루사 이후 하도내 퇴적물이 지속적으로 유입되어 하상 비고를 상승시킨 결과 하도내 습지는 감소하고 퇴적물의 면적은 증가한 것으로 나타났다. 또한 상대적으로 중저해상도 변화탐지 결과에 비해 비포장 농로가 콘크리트 포장 농로로 변화된 지역이 상대적으로 잘 나타나고 있다(Fig. 6(d)).

태풍 매미 전후 화상간 비교를 위해 2003년 8월 8일의 SPOT-5 화상과 2003년 11월 14일 KOMPSAT-1 EOC 화상을 비교하였는데, 태풍 매미에 의한 변화는 태풍 루사에 의한 변화보다는 상대적으로 양적으로 적었으며, 계절적인 영향으로 하도가 드러나거나 보 주변의 콘크리트 포장으로 인해 화소값이 상승한 지역이 나타나고 있다(Fig. 6(e)). 이 시기에는 농경지에서의 변화가 두드러져서 화소값의 감소 지역의 비율(10.8%)이 증가 지역(3.4%)보다 크게 나타나고 있다.

마지막으로 태풍 매미 전후 동일 계절 화상간 비교를 위해 2002년 12월 2일 SPOT-5 화상과 2003년 11월 14일 KOMPSAT-1 EOC 화상을 비교한 결과, 태풍 루사로 인해 쌓였던 토사들이 하천 사방공사 등으로 대부분 수계로 덮이거나 정리가 되어 많이 사라졌으며, 논과 밭에 쌓였던 토사들이 시간이 지나면서 경작지로 정리가 되어 화소값이 감소되어 나타나고 있다(Fig. 6(f)). Fig. 6(e)에 비해 전반적인 변화지역은 감소하였으나, 여전히 화소값의 감소 지역의 비율(8.8%)이 증가 지역(1.4%)보다 크게 나타나고 있다.

이상의 결과를 종합해보면, 제외지에서는 태풍 루사 직후 하천 탁도 변화, 습지의 수계 혹은 퇴적물로의 변화 및 계절적인 유량 차이에 의한 하도 노출 여부 등으로 변화지역이 나타났다. 주변 농경지에서는 홍수 및 산사태 등으로 인한 토사의 퇴적, 농지 개간 등으로 인한 변화가, 기타 지역에서는 제방 공사, 도로 포장 등으로 인한 변화가 두드러지게 나타났다. 태풍 루사와 매미로 인한 피해를 비교하였을 때에는, 태풍 매미로 인한 변화보다는 태풍 루사로 인한 변화가 크게 나타났으며, 재해로 인한 1차 변화 후에는 인위적인 사방 및 복구 공사로 인한 변화가 크게 나타났다.

하천 퇴적 지질환경 주제도 작성 결과

Fig. 7은 태풍 루사 전후 사천천 유역의 지형면 변화를 분석하기 위해 2001년 10월 14일 IKONOS 화상과 2003년 7월 20일 QuickBird 화상을 이용하여 작성된 미지형 분류도와 두 시기의 지형면 변화도를 나타내고 있다. Table 2는 Fig. 7의 태풍 루사 전후의 미지형도별 분포면적을 나타낸 것이다. 태풍 루사 전의 지형면 분류에서, 가장 높은 비율을 차지하는 지형면은 구릉성산지로 전체면적에서 63.8%(10.57 km^2)를 차지하며, 다음으로 범람원이 14.7%(2.43 km^2), 곡저평야가 10.6%(1.76 km^2), 하안단구가 5.5%(0.91 km^2), 충적선상지가 2.7%(0.44 km^2)의 순이다. 가장 낮은 비율을 차지하는 지형면은 구하도로 0.01 km^2(0.0%)의 비율을 차지하고 있다. 태풍 루사 후의 지형면 분

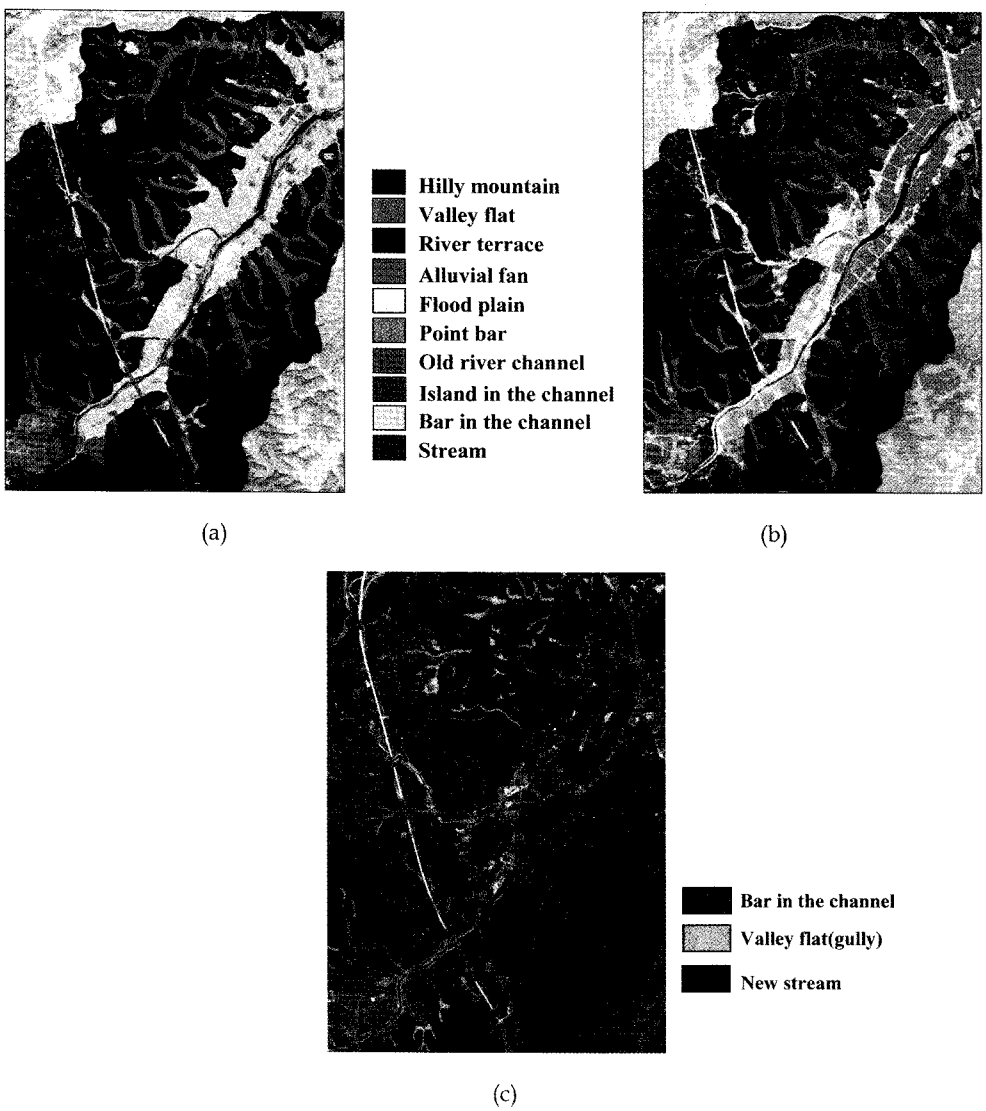

Fig. 7. (a) Microtopographic map before typhoon Rusa, (b) microtopographic map after typhoon Rusa, (c) change of microtopography.

Table 2. Area and portion of microtopography before and after typhoon Rusa

UnitData	Hilly mountain	Valley flat	Flood plain	River terrace	Alluvial fan	Stream	Island in the channel	Bar in the channel	Point bar	Old river channel	Sum
IKONOS area in km^2	10.57	1.76	2.43	0.91	0.44	0.19	0.01	0.25	0.02	0.01	16.58
(portion in %)	(63.8)	(10.6)	(14.7)	(5.5)	(2.7)	(1.1)	(0.1)	(1.5)	(0.1)	(0.0)	(100)
QuickBird area in km^2	10.04	2.20	2.44	0.91	0.46	0.25	0.01	0.19	0.02	0.01	16.58
(portion in %)	(60.7)	(13.3)	(14.8)	(5.5)	(2.8)	(1.5)	(0.1)	(1.1)	(0.1)	(0.1)	(100)

류에서, 가장 높은 비율을 차지하는 지형면은 구릉성 산지로 전체면적에서 60.7%(10.04 km^2)를 차지하며, 다음으로 범람원이 14.8%(2.44 km^2), 곡저평야가 13.3% (2.20 km^2), 하안단구가 5.5%(0.91 km^2), 충적선상지가 2.8%(0.46 km^2)의 순이다. 고해상도 위성영상을 이용하여 태풍 전·후의 지형분류도를 작성한 결과 구릉성산지와 곡저평야, 하도 내에서의 변화가 관찰된다. 특히 구릉성산지 지역은 자연재해(산사태, 홍수)로 인

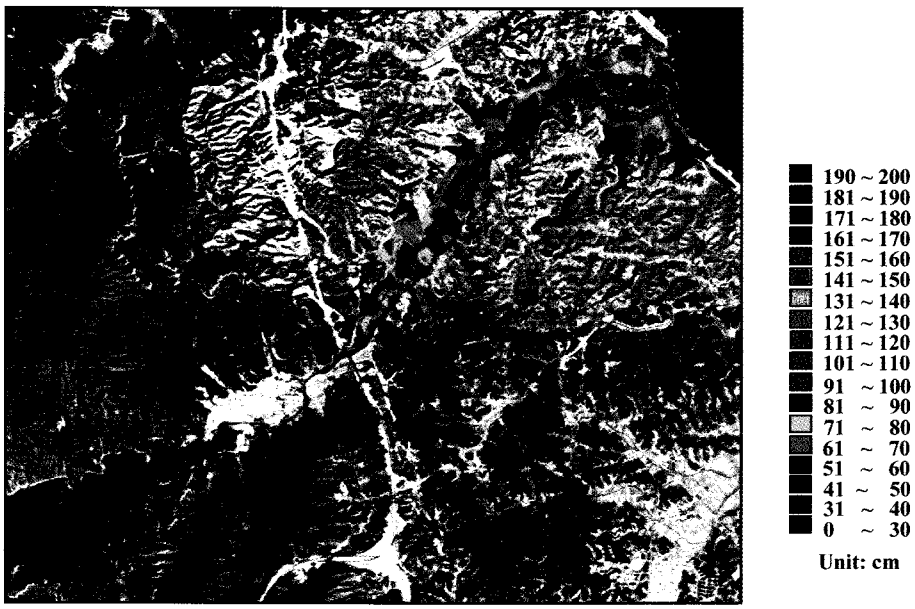

Fig. 8. Distributions of estimated amount of flood deposits near the Sachencheon draped over the KOMPSAT-1 image.

하여 면적이 축소되었고, 반면에 곡저평야 지역은 현재 우곡의 형태로 상류부 쪽으로 확대되고 있다. 하도 내에는 유수 면적이 일부 확대(0.3%)되었는데, 이는 계절적 변동에 기인한 것으로 판단된다. 이밖에도 하도 내의 바와 포인트 바 사이에 약간의 변화가 관찰된다(Fig. 7(c)). 동일한 위성 자료를 이용하여 얻어진 변화탐지 결과인 Fig. 6(d)와 양상이 다소 다르게 나타나고 있는데, Fig. 6(d)는 화소값의 증가 혹은 감소에 따른 변화지역을 나타내는 것이고 Fig. 7(c)는 화소값의 변화가 두드러지지 않더라도 지형면의 변화가 생길 수 있기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 8은 현장에서 간이 보링기를 이용하여 획득된 최근의 홍수 기원 퇴적량 자료를 내삽하여 얻어진 홍수 기원 퇴적량 추정 분포도이다. 최근의 홍수기원 퇴적량은 하도 내의 상류지역에서 나타나지 않지만, 일부 지류와 만나는 지점과 하안단구 지형면에서 50 cm 이하로 퇴적되어 있다. 중류지역은 하도 내의 bar와 지류가 만나는 지점, 포인트 바 등에서 1 m 정도 퇴적되었고, 하류지역은 2 m 정도 까지 퇴적되어 있다. 범람원 지역은 대부분 50 cm 이하로 퇴적되지만, 사천천의 주요 지류와 만나는 지점에서는 하천 범람으로 인하여 1~1.5 m까지 퇴적된 곳도 관찰되며, 특히 사천천의 중류부 지역에서 모식적으로 나타난다. 최종적으로 사천천의 하도 및 범람원 내에 퇴적된 가장 최근의 홍수 기원 추정 퇴적량은 549.31 m^3으로 나타났다.

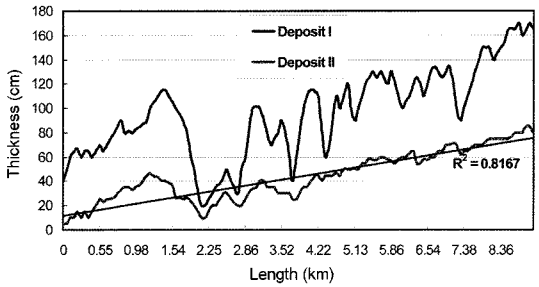

Fig. 9. Sediment thickness in the stream bed.

Fig. 9는 사천천 하도 내 퇴적물 층후를 상류부에서 하류부까지 작성한 것이다. 퇴적층은 크게 풍화잔류토층 상부의 퇴적층과 모래 퇴적층으로 구성되어지는데, 퇴적층후는 대부분 상류부에서 하류부로 갈수록 퇴적층 두께가 두꺼워 진다. 그러나 이들 퇴적층 후는 일부 소지류와 만나는 곳이나 하도 내 제방 및 다리공사 지점과 골재채취 지역에서 퇴적층의 두께가 얇아진다. 모래층(퇴적층 II)은 전반적으로 퇴적층(I)과 비슷한 패턴으로 퇴적되어 있으며, 상류부에서는 10~20 cm, 하류부에서는 50~60 cm까지 퇴적되었다. 상기의 모래 퇴적층은 기존 하도 내의 퇴적층 연대측정자료 분석결과(지광훈 외, 2005)와 비교하여 보면, 태풍 루사 이후 퇴적된 퇴적층으로 추정된다.

현재까지 연구보고된 홍수 범람 지역의 지도화는 대체로 3가지로 요약될 수 있다. 즉, 지표의 고도를

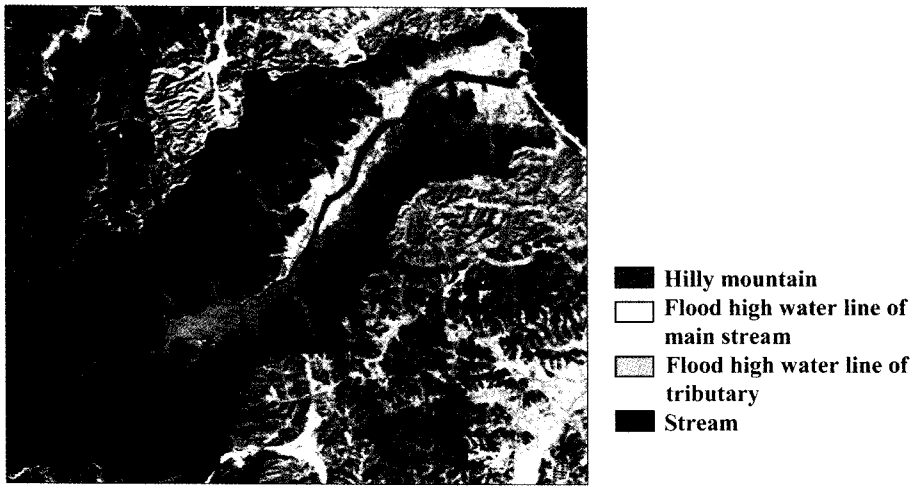

Fig. 10. Flood hazard landform classification map near the Sacheoncheon draped over the KOMPSAT-1 image.

기준으로 사용하여 수해위험지형을 지도화한 것과 하안에 발달된 하천지형의 특성을 토대로 분류하여 지도화 한 것, 마지막으로 하천의 불안정성 정도를 기준으로 분류하는 것 등이다(양동윤 외, 2003). 이 연구에서는 홍수범람지역 선정을 지표의 고도와 지형특성을 기준으로 본류 홍수 고조위선과 지류 홍수 고조위선 2개로 나누어서 작성하였다(Fig. 10). 전체 사천천 유역에서 본류 홍수 고조위선이 차지하는 면적은 4.7 km^2(12.3%)이며, 지류 홍수 고조위선이 차지하는 면적은 4.4 km^2(11.2%)이다. 전체 홍수 범람지역의 면적은 9.1 km^2이다. 이들 본류 및 지류 홍수 고조위선에 포함되는 지형 면들은 크게 범람원, 선상지성 곡저평야, 하안단구로 구분된다. 특히 범람원은 세분하여 자연제방과 구하도, 배후습지 등으로 구분할 수 있다. 본류 고조위선의 하상비고는 평균 10 m 이내이며, 대부분의 범람원 지역에 해당된다. 본 범람원 지역은 고도가 비교적 평탄하여 침수범위를 정확히 추정하기는 어렵지만, 과거 수해의 흔적이 구하도 및 범람원을 따라 이루어졌을 것으로 판단되어 본류 홍수고조위선으로 선정하였다.

결 론

이 논문에서는 다중시기 고해상도 원격탐사 자료를 이용하여 강릉시 사천천 유역의 재해로 인한 변화 정보를 추출하고자 하였다. 변화 탐지 결과 사천천 유역의 주된 변화정보는 기존 습지로 덮여 있던 일부 지역이 홍수 피해로 인해 퇴적되거나 유로의 확장 혹은 보강 공사 등으로 인해 수계지역이나 토사지역으로 변화한 것으로 나타났다. 또한 일부 계절적 변동에 따른 하천 유로 면적의 증가도 나타났으며, 하도내 습지의 감소와 모래 퇴적 지형의 증가는 하도내 퇴적물이 태풍 루사 이후 지속적으로 유입되어 하상비고를 상승시킨 결과로 판단된다. 이와 더불어 야외 조사 자료와 위성 자료를 이용하여 작성한 하천 퇴적 지질환경 주제도는 연구 지역의 재해 분석에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 결론적으로 다중 시기 고해상도 원격탐사 자료가 재해로 인한 변화 정보 추출에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

이 논문에서 적용한 변화 탐지 기법은 변화의 유무와 양만 판단할 수 있는 무감독 변화탐지 기법에 해당되기 때문에, 지표 특성간 변화(예, 습지 → 수계)를 지시하지는 못한다. 직접적인 변화 속성 정보 분석을 위해 개별적인 자료의 감독 분류 후에 비교를 수행할 예정이며, 고해상도 위성 자료의 특성을 고려하여 객체 기반 변화 탐지를 수행할 예정이다.

사 사

이 연구는 과학기술부 원격탐사 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다. 이 논문을 보완하는데 많은 도움을 주신 한성대학교 이기원 교수님께 감사드립니다.

참고문헌

박노욱, 지광훈, 이광재, 권병두, 2003, 다중시기 원격탐사 화상의 변화탐지를 위한 임계치 자동 추정. 대한원격탐사학회지, 19(6), 465-478.

양동윤 외, 2003, 주요수계 하상퇴적물에 의한 홍수재해 예측기법. 자연재해방재기술개발사업 보고서, 298 p.

장동호, 2005, 고해상도 위성영상을 이용한 홍수 전 · 후의 하도 내 퇴적환경 변화 탐지: 강릉 사천천 사례연구. 한국지형학회지, 12(3), 49-58.

지광훈 외, 2005, 산사태 등 자연재해로 발생한 하천 퇴적 지질환경 변화 탐지. 과학기술부 원격탐사기술개발사업 보고서, 226 p.

Borah, D.K. and Ashraf, M.S., 1990, Modeling storm runoff and sediment with seasonal variations. Transactions in Agriculture, 33(1), 105-110.

Bruzzone, L. and Prieto, D.F., 2000, Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(3), 1171-1182.

Bryant R.G. and Gilvear, D.J., 1999, Quantifying geomorphic and riparian land cover changes either side of a large flood event using airborne remote sensing: River Tay, Scotland. Geomorphology, 29, 307-321.

Dempster, A.P., Laird, N.M., and Rubin, D.B., 1977, Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. Journal of the Royal Statistical Society Series(B), 39(1), 1-38.

Duda, R.O., Hart, P.E., and Stork, D.G., 2000, Pattern Classification. Wiley-Interscience, New York, USA, 654 p.

Durgin, P. B., 1985, Buring changes the erodibility of forest soils. Journal of Soil and Water Conservation, 36(4), 235-240.

Fukunaga, K., 1990, Introduction to Statistical Pattern Recognition. Academic Press, London, U.K., 592 p.

Gellis, A.C., Cheama, A., and Lalio, S.M, 2000, Developing a geomorphic approach for ranking watersheds for rehabilitation, Zuni Indian Reservation, New Mexico. Geomorphology, 37, 105-134.

Iain, B., 2005, Modelling future landscape change on coastal floodplains using rule-based GIS. Environmental Modelling & Software, In Press, Corrected Proof, 1-15.

James, P.M.S., Albert, J.K., Anna, C., and Bruce, W.N., 2005, Distributary channels and their impact on sediment dispersal. Marine Geology, 222-223, 75-94.

Jerry, C.R., Vernon, L.F., Kenneth, J.O., and Carole, A.R., 2004, Sediment deposition in the flood plain of Stemple Creek Watershed northern California. Geomorphology, 61(1), 347-360.

Liew, M.W.V., 1997, Prediction of sediment yield on a large watershed in North Central China. Transaction of the ASCE, 41(3), 599-604.

Marouane, T., Robert, L., Francois, B., and Naira, C., 2005, Flood monitoring over the Mackenzic river basin using passive microwave data. Reomte Sensing of Environment, 98(15), 344-355.

Michael, D.W. and Keith, A.G., 2006, The effects watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Penasquitos Creek, California. Landscape and Urban Planning, 74(2), 125-138.

Miller, G.T., 1993, Environmental Science, Sustaining the Earth, Belmont. Wadsworth Publishing Company, California, 478 p.

Paul. S., Bruce. C., and Greg. M., 2003, The coregistration, calibration, and interpretation of multiseason JERS-1 SAR data over South America. Remote Sensing of Environment, 87(15), 389-403.

Perrone, J. and Madramootoo, C. A., 1999, Sediment yield prediction using AGNPS. Journal of Soil and Water Conservation, 54(1), 415-419.

Sande, C.J., Jong, S.M., and Roo, A.P.J., 2003, A segmentation and classification approach of IKONOS-2 imagery for land cover mapping to assist flood risk and flood damage assessment. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 4, 217-229

Tönis, I.E., Stam, J.M.T., and Graaf, J., 2002, Morphological changes of the Haringvliet estuary after closure in 1970. Coastal Engineering, 44, 191-203.

Yamamoto, T., Hanaizumi, H., and Chino, S., 2001, A change detection method for remotely sensed multisepctral and multitemporal images using 3-D segmentation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(5), 976-985.

Zhan, X., Sohlberg, R.A., Townshend, J.R.G., DiMiceli, C., Carroll, M.L., Eastman, J.C., Hansen, M.C., and DeFries, R.S., 2002, Detection of land cover changes using MODIS 250m data. Remote Sensing of Environment, 83, 336-350.

2006년 1월 18일 접수
2006년 1월 26일 수정원고 접수
2006년 1월 31일 원고 채택