시공간 영상 분석을 이용한 영상 유속계의 개발

Development of Surface Image Velocimetry with Space-Time Image Analysis

류권규*, 김남길**, 윤병만***

Kwonkyu Yu, Namkil Kim, Byungman Yoon

요 지

하천에서 물이 비교적 빠른 속도로 흘러가면 압력 변동, 하상의 조도, 하천내 구조물 등의 영향에 의해 수면이 끊임없이 변형을 일으키며 수면에 작은 물결(수면 파문)이 생긴다. 이러한 수면 파문은 유수에 의해 유수의 평균 유속으로 이류되며, 이 때문에 인간이 유수의 흐름을 시각적으로 인식할 수 있다. 이러한 표면 파문은 적절한 영상 분석을 하면 표면 유속 측정의 추적자로 이용할 수 있다. 본 연구는 유수 표면을 연속된 영상을 촬영하고, 일련의 영상을 시공간 영상(space-time image)으로 만든 뒤, 휘도 경사법(graylevel gradient method)으로 유속 벡터를 추출하는 새로운 방법을 제시하였다. 이 분석 과정은 기존의 입자 영상 유속계(PIV, Particle Image Velocimetry) 기법을 이용하는 방법보다 훨씬 간단하고 분석 시간도 크게 절약할 수 있다. 또한, 수면 파문의 전파에 따른 중력파의 영향을 시공간 영상의 처리 과정에서 잡음으로 간주하여 처리할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 개발된 루틴을 표면 영상 유속계(SIV, Surface Image Velocimtery)에 구현하여 새로운 영상 유속계를 개발하였다. 시공간 영상 분속을 이용하는 새로운 영상 유속계를 실험실 수로의 영상 자료에 적용하여 그 정확도, 적용성, 장단점 등을 분석하였다. 제안된 방법에 의한 평균류 산정 결과는 물리적으로 타당하며, 저속 또는 저휘도에서의 분석 성능이 뛰어난 것으로 밝혀졌다. 다만, 이방향 흐름의 분석에서는 문제가 있는 것이 밝혀졌다.

핵심용어 : 표면영상 유속계, 수면 파문, 시공간 영상 분석, 유속 측정

1. 서론

하천 유량을 계측하는 방법으로서 비접촉 방법이 주목받고 있다. 통상 하천의 유량은 평수시에는 휴대용의 유속계, 홍수시에는 부자 관측법이 이용되고 있지만, 특히 부자 관측법의 경우는 1) 인력의 문제, 2) 기민성의 결여(첨두 유량 결측의 가능성이 높은 점), 3) 연속 관측이 불가능한 점, 4) 부자가 유체의 속도와 일치하는가에 대한 추수성(追隨性)의 문제, 5) 부자 길이의 선택의 문제 등에 의해, 고정확도의 관측을 기대할 수 없는 것이 현황이다. 비접촉법은 이와 같은 종래 방법의 문제점을 해소할 수 있는 가능성이 높은 방법이므로, 이를 적절히 활용한다면 효율성 높고 정확도가 높은 유량 계측이 가능할 것으로 기대된다. 고품질의 유량 관측 자료는 금후의 수자원 계획 또는 치수 계획의 입안을 합리적으로 추진하기 위해 필요 불가결하다.

종래, 하천 표면의 유속 분포를 비접촉 계측하는 방법으로서 PIV 기법을 응용한 LSPIV(Large Scale Particle Image Velocimetry)이 제안되어 있다. 이것은 2차원 유속 분포를 계측하는 방법이며, 그 실용화는 거의 완료되어 있다. 또, 다른 방법으로는 광학류법(optical flow)이나 시공간영상

* 정회원・동의대학교 토목공학과 교수・E-mail : pururumi@deu.ac.kr

** 정회원・동의대학교 토목공학과 박사후 연구원・E-mail : kils0008@hanmail.net

*** 정회원・명지대학교 토목환경공학과 교수・E-mail : bmyoon@mju.ac.kr

분석법(space-temporal image analysis)법으로, 이 방법은 유량 관측법으로서 실용성을 재차 높이기 위해 계측 대상을 주류 방향성분만으로 한정하여 유속의 횡단 분포를 계측하는 방법이다. 이러한 방법은 컴퓨터 비전 분야에서 물체의 이동속도 측정을 위해 오랜 동안 연구되어 온 분야(Jahne, 2002)이며, 이를 표면 유속 측정에 처음 도입한 것은 藤田와 椿(2003)이며 이들은 후자의 방법을 STIV(Spatio-Temporal Image Velocimetry)라 불렀다. 따라서, 본 연구에서도 시공간 영상 분석법을 STIV로 부르기로 한다. 이 방법들을 간략히 비교하면 그림 1과 같다.

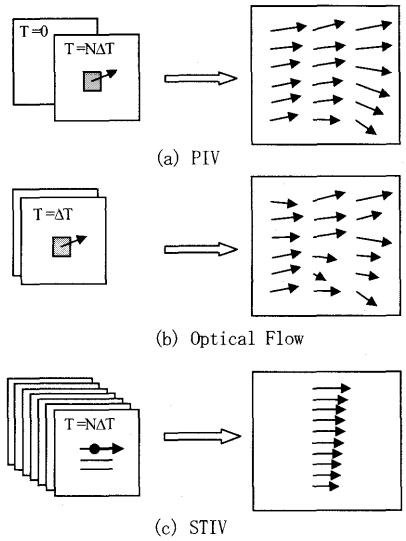

그림 1. 영상 분석 방법의 비교(藤田와 椿, 2003)

2. 표면영상유속계

2.1 표면 파문의 발생 요인

비접촉법에서 공통으로 관측되고 있는 수면의 요철은 수면에 동결된 상태로 존재하여 이류되고 있는 것은 아니며, 개개의 미소한 파가 중첩된 혼연된 상태로 존재하고 있다. 개개의 파는 선박이 만드는 것과 같은 파고가 큰 항적파(중력파)와는 달리 방향성이 없고 파장이나 파속도 작다. 이와 같은 작은 척도의 파의 발생 요인으로서는 다음을 생각할 수 있다(藤田와 椿, 2003).

a) 개수로 조면 난류장에서의 수면 근방의 압력 변동
b) 비등와(boil vortex) 등의 수면에의 충돌
c) 교각 등 하천 구조물 배후에서 발생한 후류의 흔적
d) 바람의 영향

홍수시에 관측되는 것은 이들 요인이 복합적으로 영향을 끼친 결과 생기는 수면의 교란이다. 따라서, 단순히 그 파속을 구하는 것은 어렵지만, 홍수시에 관찰되는 수면 요철의 파장이 1~10 cm 정도인 데 대해서, 수심이 수 m 규모이기 때문에 결국 심수파(deep water wave)로서 파속을 계산해 보면 10~40 cm/s 정도가 된다. 단, 현실에 이와 같은 파가 있다고 해도 개개의 파의 파향이 불규칙하여 서로 해소되기 때문에, 비디오 화상 위에 어떤 종류의 이동 매체로서 인식되는 것은 홍수의 평균류(저평지에서 2~3 m/s 정도)에 평균 유속의 높이 1할 정도의 군파속도를 가진 수면의 교란이 중첩된 장이라고 하는 것이 된다. 통상 이들의 미소 수면과 교란에는 방향성이 없기 때문에, 이들의 잡음(미소 파속의 영향)은 평균 처리에 의해 제거될 수 있다. 단, 강한 바람에 의해 방향성이 강한 중력파가 연속적으로 발생하는 경우는, 그 영향은 무시할 수 없으며, 중력파의 파속 쪽을 추적하고 말 가능성이 높다. 그러나, 이러한 바람에 대한 단점은 화상 이용법에 국한되지 않고 어느 비접촉법에서도 생기는 것이다. 어떻게 하든지 이와 같은 수면의 요철을 하안 등에서 관찰하면 '수면 파문'으로서 인식할 수 있다.

정리하면 도플러 효과를 이용하는 계측법이 비교적 작은 척도(수 cm 정도)의 수면 파문(수면의 요철)을 미시적으로 추적하는 데 대해서, 화상을 이용하는 방법에서는 중소의 척도가 혼재된 수면 파문의 장을 거시적으로 추적하는 것이 된다. 단, 이와 같은 수면 파문의 발생 조건이나 그 강도와 하천에서의 수리 조건과의 관계는 반드시 밝혀져 있는 것은 아니며, 금후의 연구가 필요하다.

2.2 시공간 영상 분석 기법

기존의 LSIV법에서 한 쌍의 영상을 상관 계수를 이용하여 유속 벡터를 추정하는 데 반하여, STIV 기법에서는 여러 장의 영상을 한꺼번에 분석하여 유속 벡터를 추정한다. 따라서, 결과적으로는 그 시간 동안의 평균 유속을 한 번에 산정하게 된다. STIV 기법에서는 여러 장의 화상에 검사선을 긋고, 이 검사선상의 휘도 분포를 시간축 방향으로 쌓아서 한 장의 영상을 생성한다. 이렇게 작성한 STIV법에 이용되는 시공간 화상의 한 예를 그림 2에 보인다. 이 예에서는 실험실 수로에 부유물을 흘리면서 촬영한 약 1.3초의 시간인 41 프레임의 비디오 화상을 이용하고 있다. 41매의 영상에서 x와 y방향으로 41 화소 길이의 선을 긋고 이 선 위의 화상을 시간적으로 축적한 영상을 같이 보이고 있다. 이 영상에서는 기존의 상관 계수 방법과 비교를 위해 실험실 수로의 영상을 이용하였지만, 실제 하천에서는 유하중으로 수면에는 다수의 수면의 요철(수면 파문)에 의해 이러한 무늬가 나타나게 된다. y방향 영상에서는 시간을 따라 영상의 이동이 확실하게 관찰되지만 x방향 영상에서는 명확한 움직임이 발견되지 않는다.

마찬가지 방법으로 실제 하천에 대해 이 방법을 적용해 보면 그림 3과 같다. 그림 3에서 알 수 있는 것은 대단히 많은 잡음이 포함되어 있지만, 전체적인 경향으로서 왼쪽 아래로 향하는 줄무늬를 확인할 수 있는 점이다. 이 중에서 상대적으로 검은 부분은 수면 요철의 움푹한 부분, 하얀 부분은 수면 요철의 튀어 나온 부분에 대응하고 있다. 또, 가장 하얗게 보이는 부분이 쇄파된 백파를 나타내고 있다. 이들 줄무늬는 중간 중간 잘려져 있지만, 국소적으로는 연속되어 있으며, 또한 각 줄무늬가 거의 평행하고 있는 점에서 그 미소 시간내(약 1.3초간)에는 수면 요철(파문)의 형상이 거의 동결된 상태로 이류되고 있다고 볼 수 있다. STIV법에서는 검사선상을 통과중인 평균류가 이 이류 상태를 불러 일으키는 요인으로 생각하고 있다. 따라서, 이 줄무늬의 기울기를 구하면 검사선상을 통과하고 있는 표면류의 유속을 얻을 수 있게 된다.

이 방법에서는 시공간 화상내에 포함된 줄무늬의 기울기를 구하기 위해, 줄무늬 경사 벡터 ∇f와 국소적인 방향 단위 벡터 $\vec{n}$의 내적의 제곱값

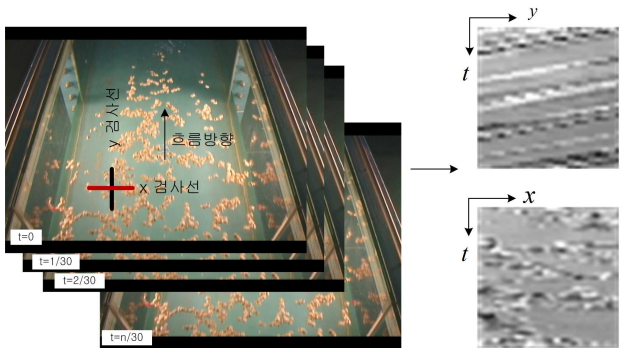

그림 2. 실험실 수로 영상에 대한 시공간 영상 분석 기법

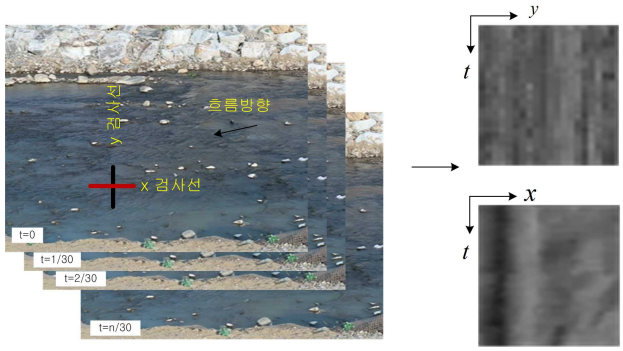

그림 3. 하천 영상에 대한 시공간 영상 분석 기법

$$H(x,t)=\left(\nabla f^{T}\,\vec{n}\right)^{2} \tag{1}$$

가 최대가 되도록 방향 벡터를 국소적인 검사 영역 A에 대해서 구한다. 즉

$$\int_{A} H(x,t)\,dx\,dt=\vec{n}^{\,T}\left(\int_{A}\nabla f\,\nabla f^{T}dx\,dt\right)\vec{n}\ \rightarrow \text{최대} \tag{2}$$

가 되는 것이 목적함수이다. 식 (5)에서 괄호 내의 적분은 화상의 휘도 경사에 관련된 텐서

$$J_{pq}=\int_{A}\frac{\partial f}{\partial x_{p}}\frac{\partial f}{\partial x_{q}}\,dx\,dt \tag{3}$$

로 된다. 여기서 p와 q는 시공간의 성분을 나타내는 지수이고, 여기서는 $x_1=x$ 및 $x_2=t$가 된다. J_{pq}는 대칭 텐서이므로, 좌표계를 적당히 회전시키면 대각화할 수 있으며, 이 때 식 (3)을 성분 표시하면(회전 후의 변수에 ′를 붙여서) 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{n'_1,n'_2\}\begin{bmatrix}J'_{11} & 0\\ 0 & J'_{22}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}n'_1\\ n'_2\end{Bmatrix}\ \rightarrow \text{최대} \tag{4}$$

이 형으로 하면, $J'_{11}\geq J'_{22}$일 때, 단위 벡터 $\vec{n}'=\{1,0\}^{T}$가 이 조건을 만족하는 것을 용이하게 알 수 있다. 이런 점에서 텐서 (행렬) J_{qp}의 고유값을 주는 회전각을 구해야 할 각도라고 하는 것을 알 수 있다. 2차원 문제의 경우의 고유값을 λ_1과 λ_2로 하면, 고유값과 회전각의 관계는 다음 식으로 주어진다.

$$\begin{bmatrix}\lambda_1 & 0\\ 0 & \lambda_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\phi & -\sin\phi\\ \sin\phi & \cos\phi\end{bmatrix}\begin{bmatrix}J_{11} & J_{12}\\ J_{21} & J_{22}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\phi & \sin\phi\\ -\sin\phi & \cos\phi\end{bmatrix} \tag{5}$$

이 식의 비대칭 성분의 비교에서

$$\frac{1}{2}(J_{11}-J_{22})\sin 2\phi+J_{12}\cos 2\phi=0 \tag{6}$$

를 얻을 수 있다. 식 (6)에서 회전각 ϕ 즉 줄무늬의 경사는 다음 식에서 구할 수 있다.

$$\tan 2\phi=\frac{2J_{12}}{J_{22}-J_{11}} \tag{7}$$

또, 줄무늬의 상관 계수는 다음 식으로 주어진다.

$$C_c=\frac{\sqrt{(J_{22}-J_{11})^2+4J_{12}^2}}{J_{11}+J_{22}} \tag{8}$$

이 상관 계수는 줄무늬의 강도를 나타내는 변수이며, 이상적인 줄무늬의 경우에 1, 완전히 형태가 없는 경우에 0의 값을 가지는 지표이다.

이상에서 식 (6)을 이용해서 시공간 각 방향의 휘도 경사의 곱을 어떤 검사 영역(A)에서 적분하면, 식 (9)를 이용해서 줄무늬의 국소적인 경사를 산출할 수 있다. 본 연구에서는 휘도 경사의 계산에는 2차 정확도의 중앙 차분을 이용하였다. 이 차분식을 공간 축방향에 대해서 보이면 다음과 같다.

$$\frac{\partial f}{\partial x}\cong\frac{f_{i+1}-f_{i-1}}{2\Delta x} \tag{9}$$

해석에 있어서는 검사 영역을 한 변이 10~20 화소 정도의 정사각형 영역으로 하고 시공간 화상

위에서 ϕ 및 상관 계수 C_c의 값의 분포를 구하고, C_c가 어떤 문턱값(threshold value) 이상이 되는 검사 영역에서의 ϕ의 평균값을 수면 파문의 이류에 관한 줄무늬의 각도로 하였다.

2.3 적용 결과

실험실 수로의 영상에 대해 기존의 상관 계수법과 새로운 STIV법을 적용한 결과는 각각 그림 4 및 그림 5와 같다. 개략적으로 살펴보면 두 방법의 결과는 큰 차이가 없는 것으로 보인다. 그러나, 세부적으로 보면 STIV법의 주흐름 방향이 아닌 x방향 유속 산정 결과는 약간의 오류가 있는 것으로 보인다. 이 때문에l 藤田와 椿(2003)가 STIV법을 주흐름 방향에만 국한해서 적용한 이유인 것으로 보인다.

그림 4. 기존 방법에 의한 영상 분석

그림 5. STIV 법에 의한 영상 분석

5. 요약 및 결론

시공간 영상 분석 기법(STIV)을 표면 영상 유속계(SIV)에 적용하였다. STIV 방법은 기존의 상관 계수법에 비해 분석 속도가 빠르다는 장점을 지니고 있다. 그러나, 주흐름 방향이 아닌 횡방향 유속 산정에는 약간의 문제가 남아 있다. 따라서, 흐름의 방향성이 확실한 경우, STIV 법을 이용한 영상 분석은 충분히 실용성이 있는 것으로 보인다.

감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

藤田一郎, 椿涼太 (2003) “視空間畵像を利用した河川表面波紋の移流速度計測,” 河川技術論文集, 9, pp. 55-60.

노영신 (2005), 영상해석기술을 이용한 하천유량측정기법 개발, 명지대학교 토목환경공학과, 박사 학위논문.

Fujita, I., Muste, M. and Kruger, A. (1998), "Large-Scale Particle Image Velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering application", J. of Hydraulic Research, IAHR, Vol.36, No.3, 397

Jahne, B. (1993). Spatio-temporal image processing, Springer.