

# 通水斷面 흐름場에서 Shear 효과를 갖는 Stokes Drift의 計算法

김 종 화 · \*박 병 수

부경대학교 · \*경상대학교

(1996년 11월 25일 접수)

## New Method of Computing the Stokes Drift including Shear Effect in the Cross - sectional Flow Field

Jong - Hwa Kim and Byong - Su Park\*

Pukyong National University · \*Kyongsang National University

(Received November 25, 1996)

### Abstract

Stokes drift(SD) and Lagrangian discharge(LD) are important factors for analysis of flushing time, tidal exchange, solute transport and pollutant dispersion. The factors should be calculated using the approached method to flow phenomena.

The aim of this paper re - examines the previous procedures for computing the SD and LD, and is to propose the new method approached to stratified flow field in the cross - section of coastal region, e.g. Masan Bay.

The intensity of velocity near the bottom boundary layer(BBL) depends on the sea - bed irregularity in the coastal estuaries. So we calculated the depth mean velocity(DMV) considering that of BBL omitted in Kjerfve's calculation method.

It revealed that BBL effect resulting in application of the bay acts largely on DMV in half more among 11 stations.

The new expression of SD and LD per unit width in the cross - section using the developed DMV and proposed decomposition procedure of current were derived as follow :

$$Q = u_0 \langle h \rangle + \frac{1}{2} H_1 \{ U_1 \cos(\phi_h - \phi_u) + \bar{U}_3 \cos(\phi_h - \bar{\phi}_{ud}) \}$$

$$LD \quad ED \quad SD(Q_{skim} + Q_{sk2})$$

The third term,  $Q_{sk2}$ , on the right - hand of the equation is showed newly and arise from vertical oscillatory shear. According to the results applied in 3 cross - sections including 11 stations of the bay, the volume difference between proposed and previous SD was founded to be almost 2 times more at some stations. But their mean transport volumes over all stations are 18% less than the previous SD.

Among two terms of SD, the flux of second term,  $Q_{skim}$ , is larger than third term,  $Q_{sk2}$ , in the main channel of cross - section, so that  $Q_{skim}$  has a strong dependence on the tidal pumping, whereas third term is larger than second in the marginal channel. It means that  $Q_{sk2}$  has trapping or shear effect more than tidal pumping phenomena.

Maximum range of the fluctuation in LD is 40% as compared with the previous equations, but mean range of it is showed 11% at all stations, namely, small change. It mean that two components of SD interact as compensating flow.

Therefore, the computation of SD and LD depend on decomposition procedure of velocity component in obtaining the volume transport of temporal and spacial flow through channels.

The calculation of SD and LD proposed here can separate the shear effect from the previous SD component, so can be applied to non - uniform flow condition of cross - section, namely, baroclinic flow field.

## 서 론

하구역 또는 연안역에서 횡단면을 통한 해수의 잔차수송량은 담수교체시간, 해수교환, 용해물질의 이동과 분산 등의 물질평형(mass balance)에 중요한 역할을 한다. 이것은 대상해역의 해양학적, 수문 기상학적 요소들에 의해 지배되며, 시공간적으로 변동한다. 이같은 해수 수송량의 결정은 횡단면의 유속을 측정함으로써 구해진다.

어떤 하구역의 통수단면에서 순간유속  $u$ 는 다음과 같이 3차원적으로 분류할 수 있다(Fischer, 1972 ; 1976).

$$u(x, y, z, t) = u_o(x) + U_1(x, t) + U_p(x, y, z) + u'(x, y, z, t) + NTFS \quad (1)$$

여기서 좌표계는 횡단면의 종방향( $x$ 축)과 연직방향( $z$ 축) 및 횡단면( $y$ 축)으로 나누었다. 그러나 본 논문에서는 식의 간소화를 위해, 모든 유속과 유량의 흐름은 종방향이며 단면의 단위폭을 가정하여  $x, y$ 축의 표시는 생략기로 한다. 또 수심은  $z$ 방향의 변화뿐이므로 그 표시를 생략한다. 식 (1)에서  $u_o$ 는 수심 평균유속의 조석평균값이며,  $U_1$ 은 그것의 편차성분이다. 그리고  $U_p$ 와  $u'$ 는 단면의 편차성분을 각각 조석 평균값( $U_p$ )과 그 편차성분( $u'$ )으로 나눈것을 의미한다. 또 NTFS는 무시된 난류변동항을 뜻한다.

그러므로 통수단면의 흐름장에서 정상상태의

해수 balance는 간단하게 다음과 같이 표현된다.

$$\overline{\langle hu \rangle} = 0 = Q_r + h\{\langle U_1 \rangle + \overline{U_s} + \overline{\langle u' \rangle}\} \quad (2)$$

여기서  $h$ 는 통수단면의 수심,  $Q_r$ 은 하천유입량, 위선은 수심평균,  $\langle \rangle$ 는 조석평균을 의미한다. 식 (2)의 우변 1항은 하천유입량의 순 외해방향(seaward) 수송이고, 나머지 3개항들은 balance유지를 위한 연안 육지방향(landward) 수송들이다. 식 (2)의 우변 2항은 주변지형의 굴곡으로 인한 trapping 효과 때문에 발생하는 항이며, 3항은 잔차수송함으로써 중력과 조석pumping 및 계절풍 등의 지속적인 바람의 영향으로 발생된 흐름을 나타낸다. 마지막 4항은 통수단면의 시공간적 흐름 변화와 해저지형 및 간헐적 바람으로 인한 분산(dispersion) 또는 전단효과(shear effect)를 나타내는 항이다. 물론 식 (2)는 단면적의 변동에 따라 더욱 세밀하게 분류가능하다.

Zimmerman(1979)은 실 잔차수송량인 Lagrange 수송량( $Q$ )을 Euler 잔차수송량( $Q_E$ )과 Stokes drift( $Q_s$ )의 합으로 이루어짐을 밝혔다. 즉

$$Q = Q_E + Q_s \quad (3)$$

이다. 식 (3)에서 Stokes drift의 수송량은 잔차수송량의 결정에 중요하게 작용함을 나타내고 있다. 그러나 그는 이 식이 성립할 조건은  $Q_s$ 가 주어진 1정점의 질량수송을 의미할 수 없으며, 조석위상의 수평 2차원적 공간변화 때문에 생긴다고 하였다.

Lagrange 잔차수송량은 수심 평균유속  $\overline{u(t)}$ 와 수심  $h(t)$ 에 의해 다음과 같이 표현되며 식 (1)의 좌변항에 해당한다.

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T \overline{u(t)} \cdot h(t) dt \quad (4)$$

식 (4)에서  $\overline{u(t)}$ ,  $h(t)$ 를 어떻게 분류하느냐 하는 것은 중요한 문제이다. 예를들면, Kjerfve(1975)는 다음과 같이 분해하였다.

$$\overline{u(t)} = \langle \overline{u} \rangle + U_1 \cos(\sigma t - \phi_u) \quad (5)$$

$$h(t) = \langle h \rangle + H_1(\sigma t - \phi_h) \quad (6)$$

식 (5),(6)을 식 (4)에 대입하고 1 조석주기동안 적분하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$Q = \langle \overline{u} \rangle \langle h \rangle + \frac{1}{2} H_1 U_1 \cos(\phi_h - \phi_u) \quad (7)$$

여기서  $\phi_u, \phi_h$ 는 각각 유속과 수심의 위상각을 의미한다. 식 (7)에서  $\langle \overline{u} \rangle \langle h \rangle = Q_E$ 를 뜻하고, 우변 둘째항은 식 (3)의  $Q_S$ 에 해당한다. 즉 Stokes 수송량은 수심과 유속변동의 상관으로 인하여 얻어진 흐름량이므로 조석 pumping현상으로 설명하고 있다(Uncles & Jordan, 1979 ; Lewis & Lewis, 1983).

따라서 담수유입량이 없는 경우

$$Q_E = -Q_S \quad (8)$$

가 된다(Uncles & Jordan, 1979 ; Mario *et al*, 1994). 이 식은 해수 balance 를 생각할 때, 담수유입에 의한 잔차 수송량은 의해 방향으로 유출되며 이의 보상류로서 Stokes drift는 연안 육지 방향으로 유입됨을 의미한다.

여기서 주목할 점은 식 (2)와 식 (7)에서 알 수 있듯이, 식 (2)의 우변 둘째항  $U_1$  성분은 식 (7)의 우변 둘째항에 해당한다. 물론 식 (7)의 둘째항은  $U_1$  성분의 주기성 변화량을 포함하고 있다. 다시말하면 식 (1)의 우변 둘째항과 식 (5)의 우변 둘째항은 같은 성분이다.

그러나 식(2)와 식(7)은 서로 모순된 설명을 하고 있다는 점이다. 다시말하면, 그동안 많은 연구자들(Dyer, 1974 ; Kjerfve, 1975 ; Tee, 1976 ;

Uncles & Jordan, 1979 ; Mario *et al*, 1994)이 유속을 성분분해하여 Stokes drift에 의한 수송량을 구하였고, 이것은 조석의 pumping현상으로 얻어진 흐름임을 설명하고 있지만 식 (2)처럼 Fisher는 조석의 trapping 현상으로 표현하고 있다. 따라서 통수단면을 통한 Stokes drift의 성분이 갖는 계산 방법을 재음미해야 할 것이다.

일반적으로 주어진 단면의 유속은 Fisher가 설명한 3차원적 표현으로 나타낼 수 있지만 실제적 계산에 들어가면 2가지 문제점에 직면하게 된다. 첫째, 유속성분을 분해함에 있어서 단면의 실제 관측점들이 통수단면 전체를 대표하는 유속값으로 인정하기 어려우므로 유속값의 단면 대표성을 만족할 수 없다. 둘째, Stokes drift와 잔차수송량의 3차원적 계산의 복잡성을 피하고 2차원적 간소화가 필요하다. 이들을 만족하기 위해 단면의 흐름량계산은 단위폭에 대한 유속값으로 표현할 수 있다.

그러므로 이러한 조건하에서 Stokes drift항의 유도는 식 (1)의 유속 성분중에서 조석 pumping의 에 다른 새로운 항이 추가될 수 있음을 암시한다.

한편 Stokes drift 의 계산에 앞서서 근본적 문제인 순간유속의 평균화에 있어서도 수심평균유속 및 조석평균유속을 바탕으로 한 물질분산,해수 교환 등의 논문들은 대부분 순간유속을 시공간적 평균유속으로 계산하여 사용하고 있지만 평균유속과 잔차수송량의 계산방법을 상세하게 설명하고 있지 않다(Fisher, 1972, 1976 ; Tee, 1976 ; Lewis & Lewis , 1979 ; Uncles & Jordan, 1979 ; 1980).

다행하게도 Kjerfve(1975)와 Kjerfve *et al* (1984)은 수심변동을 고려한 평균값을 구하는 유속점을 그림으로 상세하게 표현하였고 실질적인 계산과정을 설명하였다. 특히 수심에 대한 조차의 비율에 따라 해수 잔차수송량에 미치는 영향이 크게 다름을 명확하게 제시하였다. 그러나 Kjerfve는 수심 평균유속의 계산에서 해면경계층과 바다부근의 흐름에 대한 표현이 명확하지 않았다. 연안역에서 연직방향의 유속이 수심별로 크게 다를 수 있기 때문에 이들의 흐름변화를 반드시 고려해 놓아야 할 것이다.

그리고 단면의 흐름량 계산은 수심평균된 유속에서 시간평균하여 구하는 경우와(Kjerfve, 1975), 순서를 바꾸어 시간평균된 유속에서 수심평균하여 구하는 방법(Lewis & Lewis, 1983)에 의해서 그 값이 달라질 수 있다(Fischer, 1972; 上嶋 等, 1979).

이것은 유속의 시공간적 계산방법과 절차에 따라 Stokes drift 와 잔차수송량은 다르므로 흐름현상의 주의깊은 관찰을 필요로 함을 뜻하며, 실제 해수수송량의 접근에 기여할 것이다.

본 논문에서는 연안역의 baroclinic한 통수단면의 흐름장에서 유속의 평균값 계산 방법과 성분분해를 개량하고, Stokes drift의 성분을 새롭게 음미함으로서 현장에 보다 접근된 잔차수송량을 구함에 있으며, 기존의 Stokes drift 및 잔차수송량의 계산결과와 비교하고자 한다.

### 기존의 연구

#### 1. 수심 평균유속과 잔차수송량

Kjerfve(1975)는 현장관측자료에서 수심평균 유속  $\overline{u}(t)$ 를 다음과 같이 구하였다.

$$\begin{aligned} \overline{u}(t) &= \frac{1}{h} \int_0^h u(z, t) dz = \int_{\eta_0}^{\eta_{10}} u(\eta, t) d\eta \\ &= \frac{1}{10} \left\{ \frac{1}{2} u(\eta_0, t) + \sum_{j=1}^9 u(\eta_j, t) \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)는 어떤 순간  $t$ 에서 수심  $h(t)$ 을 무차원비  $\eta = z/h(t)$ 로 하여 표면을  $\eta_0$ 로, 바닥면을  $\eta_{10}$ 으로 한 유속점을 구하였고 수심을 등간격( $dz$ )으로 하여 10개의 소구간( $h = 10dz$ )으로 나누었다. 이 때  $x$ 는 단면에 수직한 종방향 유속이고,  $z$ 는 표면  $z=0$ 에서 연직방향의 거리이다. 식 (9)의 우변은 표면점  $\eta_0$ 의 유속을 대표점으로 하여 표층의 소구간 영역  $\frac{1}{2} dz$ 와 나머지 9 $dz$ 의 영역 유속만 계산함으로써 해저면상의  $\frac{1}{2} dz$ 에 해당하는 깊이의 유속은 평균유속의 계산에 포함시키지 않았다(Fig. 1의 왼쪽부분).

또 Kjerfve는 식 (9)를 사용하여 1 조석동안의 Lagrange 잔차수송량  $Q$ 를 다음과 같이 구하였다.

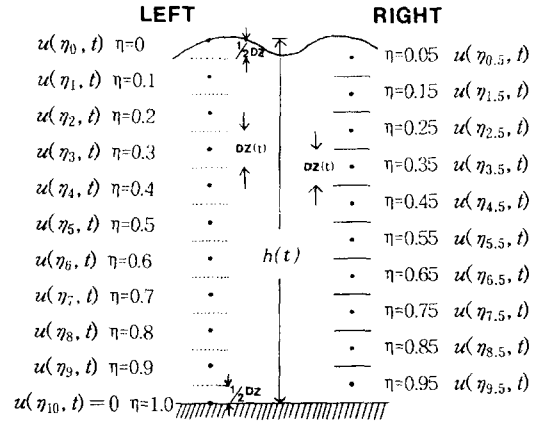


Fig. 1. Non-dimensionalized depth, and corresponding velocity notation of Kjerfve(left) and proposed method(right).

$$Q = \frac{1}{n} \left\{ \frac{1}{2} \overline{u(t_0)} h(t_0) + \frac{1}{2} \overline{u(t_n)} h(t_n) + \sum_{k=1}^{n-1} \overline{u(t_k)} h(t_k) \right\} \quad (10)$$

식 (10)는 1 조석주기  $T$  동안 일정한 시간간격으로 유속과 수심을  $n$ 번 측정(또는 보간)하여 계산된 수송량이다. 그리고 일조부등으로 인해 관측 시작 시간  $t_0$ 와 1 조석의 끝점(이어지는 1 조석의 시작점)  $t_n$ 에서의 수심은 다르게 된다. 그러나 1 조석주기 동안 일정한 시간간격으로 수심을 보간한 경우,  $t_0$ 와  $t_n$ 의 수심이 같게 되므로 식 (10)는 간단하게 표현가능하다. 또 그는 Euler 잔차수송량  $Q_E$ 를 다음식으로 표현하였다.

$$Q_E = \overline{\langle u \rangle \langle h \rangle} = \frac{1}{T^2} \int_0^T \overline{u(t)} dt \int_0^h h(t) dt \quad (11)$$

식 (11)은 어느 계산절차에 관계없이 동일하다.

그러나 현장에서 표면의 유속측정은 바람과 표면의 변동으로 측정과 정확성에 어려움이 있고 바닥면의 유속  $u(\eta_{10}, t)$ 을 0으로 가정하여도 수심이 10m, 20m인 경우 바닥면상의 소구간  $1/2 dz$ 은 각각 1m, 0.5m가 될 것이다. 따라서 식 (9)는 풍속의 영향이 크거나 수심이 10m이상되는 연안 하구역(강 또는 항만)의 잔차수송량 계산에는 실제량과 오차가 클 것으로 생각된다.

## 2. 유속의 성분분해와 Stokes drift

Tee(1976)는 유속과 수심의 변동을 다음과 같이 분류하여 Stokes drift  $U_s$ 을 구하였다.

$$\bar{u} = \langle \bar{u} \rangle + U_1 \quad (12)$$

$$h = \langle h \rangle + H_1 = \langle h \rangle + \langle H \rangle + H_2 \quad (13)$$

$$U_s = \frac{u_0 \langle H \rangle}{\langle h \rangle} + \frac{1}{T \langle h \rangle} \int_0^T (U_1 H_2) dt \quad (14)$$

적용된 Fundy만의 Minas내만은  $\langle H \rangle / \langle h \rangle$ 가 1%미만이므로 식 (14)의 우변 1항은 무시되었다.

그러므로 일조부등으로 인하여 Stokes drift에 미치는 영향은 작으므로 식 (14)의 우변 2항에서  $\langle H \rangle \approx 0$ 이 되어  $H_2 \approx H_1$ 이 된다. 따라서 Kjerfve와 Tee는 식 (7)과 같은 결과를 내놓으므로 동일한 개념이다.

한편 Lewis & Lewis(1983)는 Kjerfve와는 계산 순서를 달리하여, 조석의 주기성을 먼저 고려한 흐름을 다음과 같이 표현하였다.

$$u(t) = \langle u \rangle + U_2 \cos(\sigma t - \phi_u) \quad (15)$$

이 식은 유속의 편차성분을 고려하여 조석진폭과 위상각을 다음과 같이 세분하여 표현하였다.

$$\begin{aligned} u(t) &= \langle \bar{u} \rangle + U_1 + (\bar{U}_2 + u_{2v}) \cos(\sigma t - \bar{\phi}_u - \phi_{uv}) \\ &= u_0 + U_1 + \bar{U}_2 \cos(\sigma t - \bar{\phi}_u - \phi_{uv}) \\ &\quad + u_{2v} \cos(\sigma t - \bar{\phi}_u) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $u_0 = \langle \bar{u} \rangle$ 이다.  $U_1$ ,  $u_{2v}$ 는 수심적분하면 0이 된다. 또 수두(water volume)를 통한 위상편차  $\phi_{uv}$ 는 작으므로 수심적분하면 0이 된다. 식 (16)을 수심비를 이용한 수심요소의 평균유속으로 구한 후, 전수심에 걸쳐 적분하면 Stokes drift와 잔차량은 다음과 같이 된다.

$$Q = Q_E + \frac{1}{2} H_1 \bar{U}_2 \cos(\phi_h - \bar{\phi}_u) \quad (17)$$

식 (17)의 우변 2항은 식 (7)의 우변 2항과 같은 모양을 갖는다. 그러나 유속의 성분분해를 비교하면, 식 (16)의 우변 첫항은 식 (5)의 우변 첫항과 같고 식 (5)의 둘째항과 식 (16)의 둘째항은 성분이

다르다. 따라서 식 (17)의 우변 2항과 식 (7)의 우변 2항의 값은 서로 달라진다. 이것은 유속의 성분분해절차가 다르므로 발생된다. 또한 Stokes drift는 복잡한 지형을 갖는 천해 조석영역에서는 가장 큰 오차를 가질 수 있기 때문에 균질한 진동성분으로 인한 수평변위의 진폭올에 의존함을 밝혔다.

## 새로운 계산법의 제안

### 1. 수심 평균유속과 잔차수송량

주어진 단면의 정점에서 전수심  $h$ 는 등간격으로 10등분하여 10개의 소구간( $dz$ )으로 나누었고, 소구간의 중앙점의 유속값은 현장자료에서 무차원화된  $\eta = 0.05, 0.15, 0.25, 0.35, 0.45, 0.55, 0.65, 0.75, 0.85, 0.95$ 점의 유속을 보간하여 얻었다(Fig. 1의 오른쪽 부분). 따라서 수심 평균유속  $\bar{u}(t)$ 는 다음식과 같이 구하였다.

$$\bar{u}(t) = \frac{1}{10} \left\{ \sum_{j=0.05}^{0.95} u(\eta_j, t) \right\} \quad (18)$$

식 (18)은 단면의 수심을 등간격으로 등분하였으므로 식 (9)에서 고려하지 않았던 해저면 부분을 고려하여 평균하였다.

단위폭당 1조석동안의 잔차수송량  $Q$ 는 현장자료에서 얻은 태양시의 자료를 태음시의 1시간간격으로 보간하였고 고조시의 시간을 시작시간으로 하여  $t_0 = 0, \dots, t_n = 11$ 로 12개의 등시간을 나누고 식 (18)을 사용하여 다음 식과 같이 계산하였다.

$$Q = \frac{1}{n+1} \left\{ \sum_{n=0}^n \bar{u}(t_n) h(t_n) \right\} \quad (19)$$

식 (19)는 1조석동안 조차가 작은 곳에 적용하면 더욱 유용할 것이다. 그러므로 식 (19)는 식 (10)의 우변 1항과 2항을 갈게하여 간단화 시킨 결과이다.

### 2. 유속의 성분분해와 Stokes drift

단면의 순간유속  $u$ 는 단위폭당의 연직 흐름구조를 파악함으로써 2차원적으로 간소화할 수 있다. 여기서는  $u$ 를 수심평균한 후 조석평균하는 Fischer의 성분분해 절차에 따른다. 그러나 baroclinic

한 연안역 흐름특성을 고려하여 Kjerfve, Lewis & Lewis 처럼 조석변동이 주기성을 갖도록 표현하였다.

어떤 순간에 통수단면의 수평유속  $u(t)$ 는 연직단면의 수심평균과 그 편차로 나누어 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = \overline{u}(t) + u_d \quad (20)$$

이것은 Fischer(1972)의 첫단계 분해개념과 동일하다. 식 (20)의 우변항들을 조석평균과 주기성을 고려한 성분으로 분해하면 다음과 같다.

$$u(t) = \overline{u} + U_1 \cos(\sigma t - \phi_u) + \langle u_d \rangle + U_3 \cos(\sigma t - \phi_{ud}) \quad (21)$$

이 식에서, Lewis & Lewis(1983)처럼 단면의 단위수심( $dz$ )당 체적수송을 얻기 위해 편차유속  $u_d$ 의 두 개항(식 21의 우변 셋째, 넷째항)은 수심평균과 그것의 편차로서 유속과 위상각을 다시 분해하면 편리하다. 즉

$$\langle u_d \rangle + U_3 \cos(\sigma t - \phi_{ud}) = \overline{\langle u_d \rangle} + u_{dd} + (\overline{U}_3 + u_{3d}) \cos(\sigma t - \overline{\phi_{ud}} - \phi_{dd}) \quad (22)$$

로 나눌 수 있다.

만일 수두를 통한 위상편차가 작다면 식 (22)의 우변 셋째항의 위상각은 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$\frac{1}{h} \int_0^h \cos(\sigma t - \overline{\phi_{ud}} - \phi_{dd}) dz \approx \cos(\sigma t - \overline{\phi_{ud}}) \quad (23)$$

따라서 식 (21)을 다시 쓰면 최종적으로 다음과 같이 표현된다.

$$u(t) = u_o + U_1 \cos(\sigma t - \phi_u) + u_{do} + u_{dd} + (\overline{U}_3 + u_{3d}) \cos(\sigma t - \overline{\phi_{ud}}) \quad (24)$$

여기서  $u_{do} = \overline{\langle u_{dd} \rangle}$ 이다. 이식을 사용하여 어떤순간의 수심평균 유속  $\overline{u}(t)$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$\overline{u}(t) = \frac{1}{h} \int_0^h u(t) dz = u_o + U_1 \cos(\sigma t - \phi_u) + \overline{U}_3 \cos(\sigma t - \overline{\phi_{ud}}) \quad (25)$$

이때  $u_{do}$ ,  $u_{dd}$  및  $u_{3d}$ 는 수심적분하면 0이 된다. 이 식 (25)는 식 (5)와 비교하면, 우변에서 셋째항이 추가된 형태이다. 이 추가항은 식 (1)과 식 (2)에서 설명한  $u'$  또는  $\langle u' \rangle$  성분해에 해당한다.

식 (25)는, 엄밀히 말하여 관측정점들이 단면의 유속을 대표할 수 없으므로 또 계산의 간소화로 인해, 정점의 단위폭에 대한 유속값의 분해에서 새로운 non-zero 항이 얻어짐을 보여 주고 있다. 이것은 Fischer 가 어떤 특수한 연직흐름에 대한 식 (1) 또는 식 (2)의  $U_s$ ,  $u'$ 의 연직평균은 0이 아님을 설명한 것과 동일한 결과이다.

따라서 잔차수송에 관한 식 (4)에 식 (6)과 식 (25)를 대입하여 정리하면 Stokes drift와 잔차수송량은 다음과 같이 새롭게 표현된다.

$$Q = u_o \langle h \rangle + \frac{1}{2} H_1 \{ U_1 \cos(\phi_h - \phi_u) + \overline{U}_3 \cos(\phi_h - \overline{\phi_{ud}}) \} \quad (26)$$

식 (26)의 우변 둘째항은 식 (7)의 우변 둘째항과 비교해 보면 유속의 위상각이 수심평균된  $\overline{\phi_u}$ 와  $\phi_u$ 가 다르며, 그 결과로 식 (26)의 우변 셋째항이 추가된 형태로서, 수심과 유속편차간의 진폭 및 그 위상편차를 더 고려하였으므로 식 (26)의 Stokes drift는 연직 흐름에 대한 전단효과를 포함하고 있다.

그러므로 식 (26)의 Stokes drift에 의한 수송은 식 (7)에서 얻은 결과와 다르며, 추가된 우변 셋째항은 전단효과를 나타내므로 그 값이 클 것이다. 이와같은 표현은 단면흐름이 균질하지 않는 baroclinic한 연안역 수송량의 계산에 유용할 것으로 기대된다.

### 3. 현장 자료분석과 적용

Stokes drift와 잔차수송량의 여러가지 변수들을 구하고 여기에서 제안된 계산방법들과 정량적으로 비교하기 위하여 마산만에서 측정된 통수단면의 유속과 수심자료가 사용되었다(김 등 1992).

마산만의 3개단면 형태와 층별 수심 측정위치를 Fig. 2에 나타내었다. 이들 단면에서 얻어진 11개 정점의 1조석동안 측정된 유속자료는 뚜렷한 M2 조석의 주기성을 고려하여 조화분해하였고 다음

通水断面 흐름場에서 Shear 효과를 갖는 Stokes Drift의 計算法

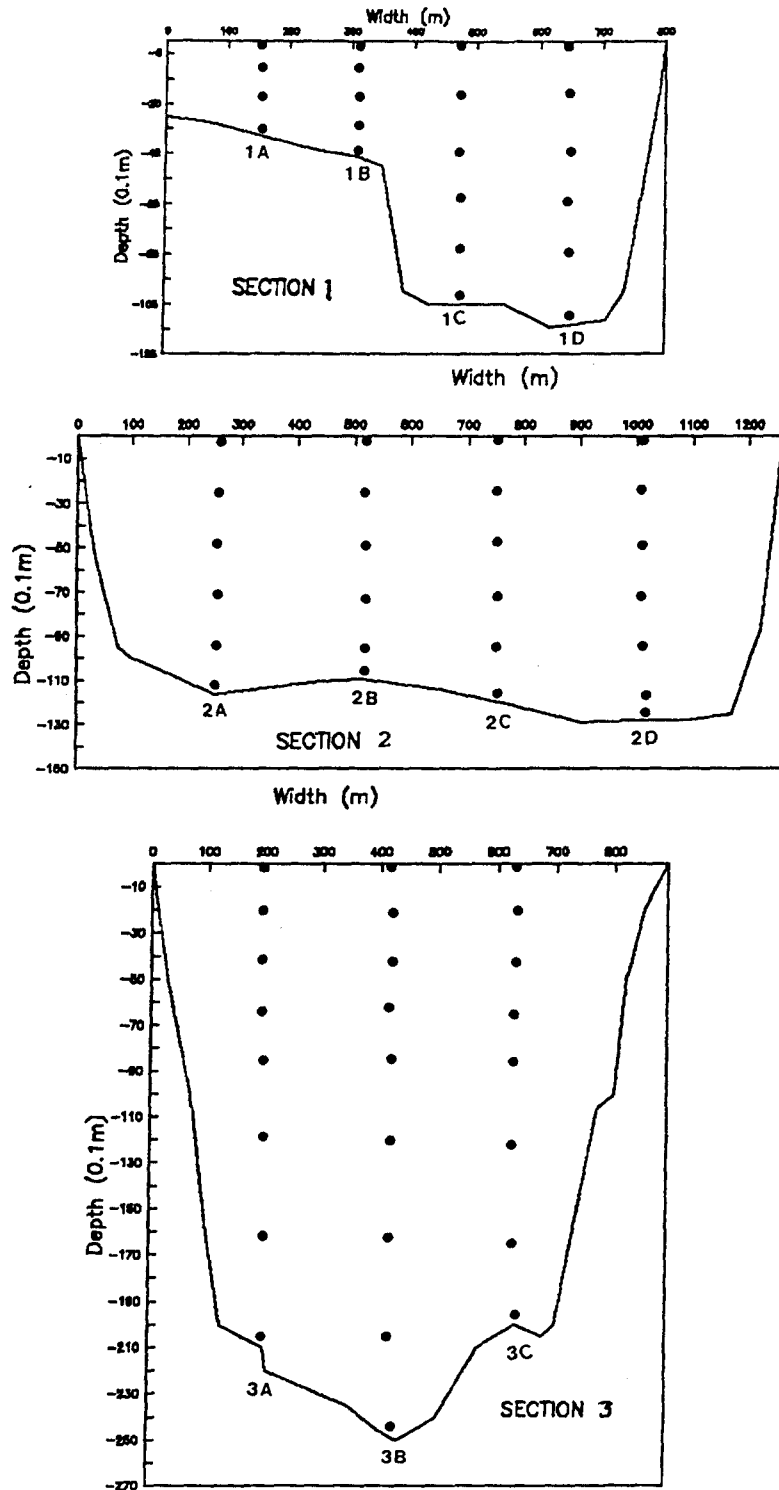


Fig. 2. Cross-section topography profiles selected for velocity observation and its sampling stations in Masan Bay.

시별로 원하는 수심층의 유속값을 3차 spline법에 의해 보간하였다.

조차로 인한 유량 변동효과를 검증하기 위해, 수심이 가장 얇은 단면1의 정점1A에서 평균수심과 조차를 보면, 소조기는 평균수심 4.12m, 조차 0.88m이고 대조기는 각각 4.27m, 1.12m였다. 그래서 평균수심에 대한 조차의 비,  $\epsilon$ ,은 소조기 0.21과 대조기 0.26이므로 조차변동으로 인한 물질수송에 영향을 주는  $\epsilon > 0.3$ 을 넘지않는다(Kjerfve *et al.*, 1984). 그러므로 마산만은 조차로 인한 잔차수송량의 변동오차가 적은 것으로 판단된다.

### 결과 및 고찰

#### 1. 수심 평균유속에 미치는 경계면층의 영향

수심 평균유속은 무차원 수심층의 순간유속 분포에 의해 결정된다. Fig. 3은 마산만의 단면1의 4개정점중 주수로에 해당하는 St.1C에서 무차원 수심을 20등분하여 얻어진 각 수심층의 유속크기를 나타낸 그림이다. Fig. 3의 윗그림에서 순간유속은 고조시(L.H. 0)와 낙조시(L.H. 3)의 표면경계층( $\eta=0\sim0.05$ )과 중층부근( $\eta=0.4\sim0.5$ )에서 외해(seaward)로 흘러나가며 표면층에서 가장 큰 유속을 보이고 있다.

Fig. 3의 아랫그림은 저조시(L.H. 6)와 창조시(L.H. 9)의 흐름방향이 윗그림과 반대방향이며 고조시와 낙조시의 표면층처럼 큰 유속변화는 없다. 여기서 주목할 점은 인접한 상하층의 흐름변화가 큰 수심층이 고조 및 낙조시의 표면층( $\eta=0\sim0.1$ )과 저면층( $\eta=0.95\sim1$ )이며, 저조시와 창조시는 저면층임을 알 수 있다.

이런 형태는 하구역 또는 연안의 흐름에서 흔히 볼 수 있는 현상이므로, 연직 단면 흐름의 평균유속 계산에는 경계면층의 흐름을 포함시켜야 할 것이다.

그래서 수심층간의 흐름차를 정량적으로 알기 위하여 St.1C, 3B에서 각 수심층의 인접 상하층간 유속차 ( $|\Delta u| = u_{low} - u_{up}$ )를 구하고 그 크기를 나타내면 Fig. 4와 같다. 이 그림에서 보면 각 조시별 경계면층( $\eta=0\sim0.05$ 와  $0.95\sim1$ ) 16곳중 12곳에

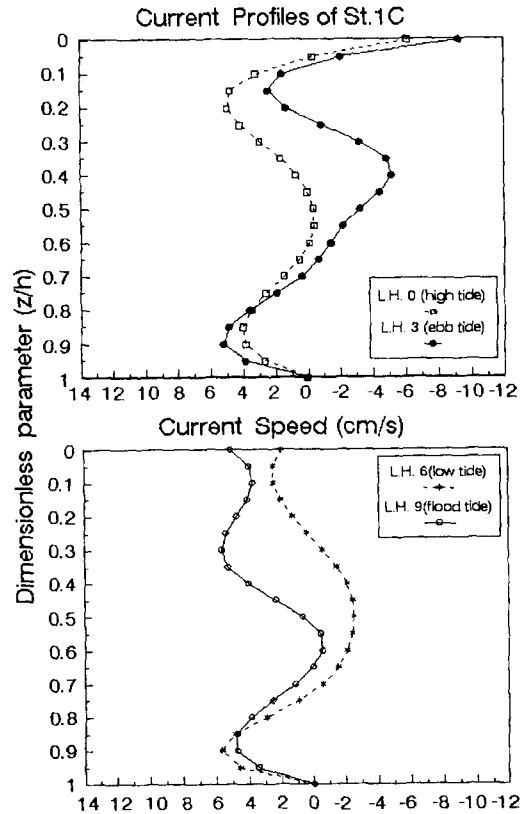


Fig. 3. Current profiles of 1C : upper part is high and ebb tide, lower low and flood tide. Minus sign means seaward flow.

서 가장 큰 유속차를 나타내고 있다.

적용된 마산만의 단면 유속 profile처럼, 연안역의 유속은 경계면층에서 대부분 최고의 유속차를 나타내므로 단면의 평균유속 계산에 있어서 경계면층의 유속이 다른 수심층에 비해 큰 영향을 줄 수 있다. 이런 현상은 표면층이 바람의 영향, 저면층이 해저면의 마찰영향 때문으로 생각된다.

따라서 수심 평균유속  $\bar{u}(t)$ 에 미치는 경계면층의 영향을 알기 위하여 Kjerfve의 식 (9)와 제안된 식 (18)을 사용하여 얻어진 평균유속값  $\bar{u}(t)$ 를 매 조시별로 나타내면 Fig. 5와 같다. 이 그림은 3개 단면에서 주수로에 해당하는 3개정점의 값을 나타내었다. 이들의 조석적 변동에서 두드러진 특징은 만안쪽의 St.1C와 만구의 St.3B에서 낙조시와 저조시에 가장 큰 차( $\Delta \bar{u} = \bar{u}_{kf} - \bar{u}_{kim}$ )를 보였다. 반면에



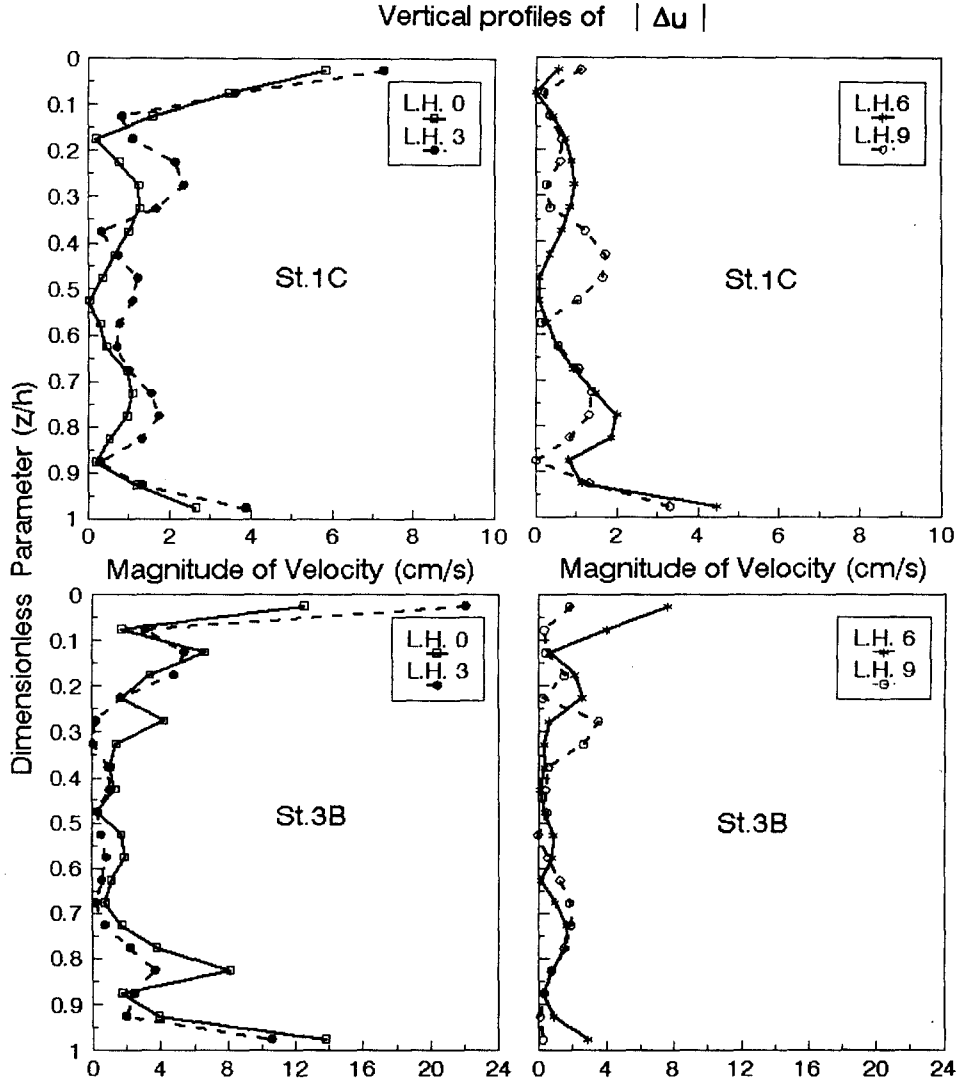


Fig. 4. Vertical distribution of difference  $|\Delta u|$  between upper( $u_{up}$ ) and lower velocity( $u_{low}$ ) at St.1C and St.3B.

St.2C에서는 1 주기동안 평균유속의 차가 적었다.

이 현상은 각 단면의 해저면 형상(Fig. 2)에서 알 수 있듯이, St.1C와 St.3B는 해저면 굴곡이 심하게 변동하나 St.2C는 평탄하기 때문일 것이다.

Kjerfve의 식 (9)에서 얻은 수심평균값이 식 (18)의 계산값과 비교하여 얼마나 영향력을 미쳤는가 하는 영향력지수(effective number)를 생각할 때, 식 (9)와 식 (18)에 의한 평균값의 차를 식 (9)의 값으로 나누어 백분율로 나타내면 다음과 같

이 표현된다.

$$\left(1 - \frac{\overline{u_{kin}}}{u_{kfo}}\right) \times 100 \quad (27)$$

식 (27)에 의해 얻어진 각 정점의 영향력지수(%)의 절대치를 조석적 변동으로 나타내면 Table 1과 같다. 여기서 경계면층의 깊이가 전수심의 10%에 해당하므로 이정도 이상의 영향력지수를 갖는 것이 121개중 38개로서 31%를 차지한다. 이들 대부

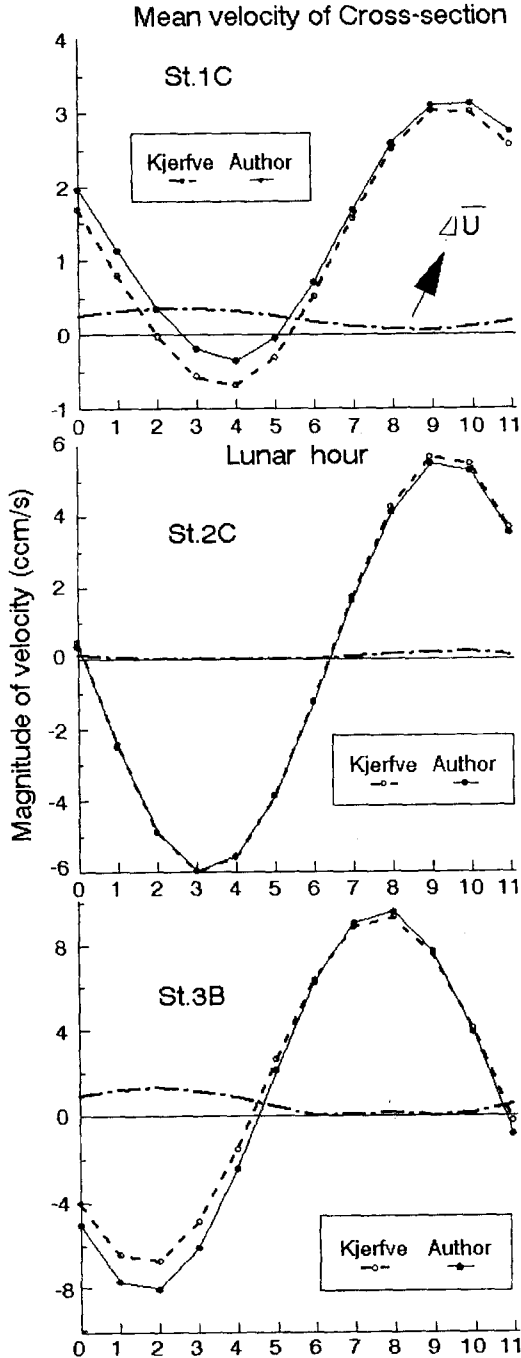


Fig. 5. Tidal variation of mean velocity,  $\bar{u}(t)$ , of Kjerfve and Kim, and difference,  $\Delta\bar{u}$ , between them.

분은 단면1( St.1C, St.1D)과 단면3( St.3B, St.3C)의 주 수소에 해당하며, 시간적으로 보면 고조시에서 저조시까지이다. 100%이상의 차가 난 3곳은 평균유속값이 0에 가까우므로 조금만 변화여도 영향력지수는 크게 되기때문이다. 또 식 (9)의 계산에서 제외된 저면경계층( $\eta=0.95\sim 1$ )은 전수심의 1/20에 해당하므로 5% 만큼의 영향을 미친다고 가정하면, 5%이상인 곳은 61곳으로 전체의 50%를 차지한다.

Table 2는 Kjerfve의 수심평균 계산식 (9)와 저자가 제안한 계산식 (18)을 사용하여 11개 정점에서 기 제시된 잔차수송량(식(7))의 parameter를 구하고 이들을 정량적으로 비교하였다.

수심평균값의 변동으로 인해 잔차수송에 미치는 경계층의 영향을 살펴보기 위하여 Table 2의 parameter 중 Lagrange 잔차수송량 Q의 변동을 비교하여 그림으로 나타내면 Fig. 6과 같다. 여기서 -기호는 바다쪽 방향의 수송을 의미한다. 그림에서 보면 수심이 수심이 10m미만인 St.1A,1B는 잔차수송량의 차가 거의 일치하고, 수심 10m이상이며 해저경사가 큰 단면일수록 유량차가 현저하였다. 이와같이 단위폭당의 잔차수송량을 단면전체로 생각할 때, 잔차수송량의 변동은 크게 될 것이다.

Table 2에서 나타낸 Kjerfve와 저자가 제안한 잔차량과 Stokes drift의 변화율을 백분율로 하여 나타낸 영향력 지수를 각각  $(Q_{kfv} - Q_{kim})/Q_{kfv}$ ,  $(Q_{skfv} - Q_{skim})/Q_{skfv}$ 라하여 각 정점별로 나타내면 Fig. 7과 같다. 여기서 -기호는 Kjerfve의 수송량보다 적은 비율을 의미한다.

잔차수송량 계산식 (7)을 구함에 있어서 식 (9)에 의해 계산된  $Q_{kfv}$ 는 식 (18)에 의해 계산된 량  $Q_{kim}$  보다 St.2A,2B와 St.3B,3C에서 18~64%범위로 증가하였고 그외의 정점에서는 작은 변동이거나 오히려 감소하여 St.2C에서 최대 감소율은 46%였다. 따라서 11개 정점에서 산술평균된  $Q_{kfv}$ 의 증가율은 4.8%로 나타나고 있다. 이런 잔차량의 변동은 식 (9)에 의한 계산값이 식 (18)에 비해 큰 값을 나타냄을 의미한다.

그러나 Stokes drift에 대한 비교로서 나타낸 수송량간의 변동비율은  $Q_{skfv}$ 가 전 정점에서 오히려

Table 1. Tidal variation of effective number of  $\bar{u}$  in each station

St. No.	Lunar Hour											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1A	4.6	3.5	3	2.5	3.5	1.4	0.6	0.3	0.2	1	7	7.8
1B	2.4	1.7	3	4.1	6	136	3.3	0.5	2.6	4.2	6.3	17.4
1C	15.6	41.8	1958	65.4	47.3	83.5	34.7	7.5	3	2.4	3.8	7.3
1D	7	48.2	17.7	9.9	11.1	21.2	18.7	3.5	1.1	0.1	0	0.6
2A	7.4	4.5	3.8	3.7	3.7	7.4	0.7	1.7	1.8	1.7	1.2	1.3
2B	8.8	20.5	4.1	2.6	2.3	2.8	6.7	11.4	4.2	3.5	3.8	4.9
2C	27	2.8	0.2	0.3	0.4	0.1	3.7	5.4	3.5	3.4	3.8	3.7
2D	79.2	9.2	4.5	3	3.1	1.7	11.3	0.1	0.6	1.1	2.5	6
3A	6.9	5.3	4.9	5.2	7.2	32.7	7.2	3.4	3.5	5.9	28.3	13.8
3B	24.9	19.9	20.5	25.7	63	19.1	1.8	1.9	2.5	1.3	5	309
3C	33.2	18.5	14.2	11.4	7.6	34.2	15.7	10.8	7.9	4.6	1.4	40.7

Table 2. Parameters of net discharge computed with eqs.(9) and (18)

St. No.	$u_0$		$U_1$		$\phi_{kfv} - \phi_{kim}$		$Q_s (10^{-3} m^3/s)$		$Q (10^{-2} m^3/s)$	
	kjervfe	kim	kjervfe	kim	kjervfe	kim	$Q_{skfv}$	$Q_{skim}$	$Q_{kfv}$	$Q_{kim}$
	1A	0.997	0.963	4.215	4.274	135	136	-8.33	-8.59	3.428
1B	0.468	0.473	4.768	4.907	127	125	-8.29	-8.13	1.743	1.786
1C	1.177	1.4	1.896	1.771	74	71	1.78	1.96	13.432	15.96
1D	1.372	1.51	4.035	3.892	98	99	-1.67	-1.81	16.043	17.66
2A	0.286	0.244	5.263	5.405	107	107	-5.2	-5.34	3.062	2.522
2B	0.19	0.108	2.861	2.834	73	73	2.78	2.75	2.458	1.514
2C	-0.209	-0.292	5.919	5.812	80	80	3.44	3.38	-2.255	-3.293
2D	-0.741	-0.94	8.487	8.58	97	98	-2.93	-3.38	-10.213	-12.921
3A	-2.672	-3.141	10.941	11.147	136	136	-31.05	-31.63	-61.25	-71.514
3B	1.286	0.723	8.126	8.925	125	124	-20.11	-21.54	30.459	16.101
3C	0.463	0.244	8.644	9.54	126	129	-19.46	-22.99	7.601	2.732

Note :  $Q_{skfv}$ ,  $Q_{skim}$  mean  $Q_s$  based on eq.(9),(18) and  $Q_{kfv}$ ,  $Q_{kim}$  mean  $Q$  based on same equations.

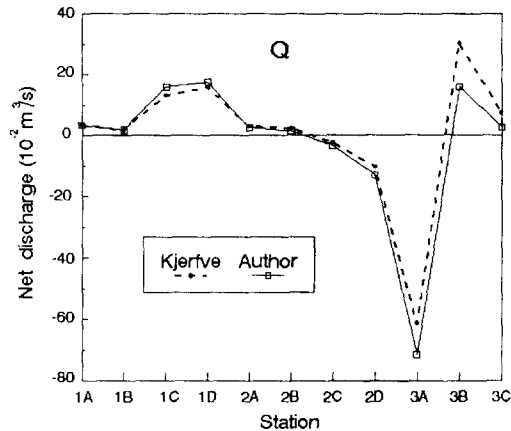


Fig. 6. Lagrangian net discharge of  $Q_{kfv}$  and  $Q_{kim}$  in each station.

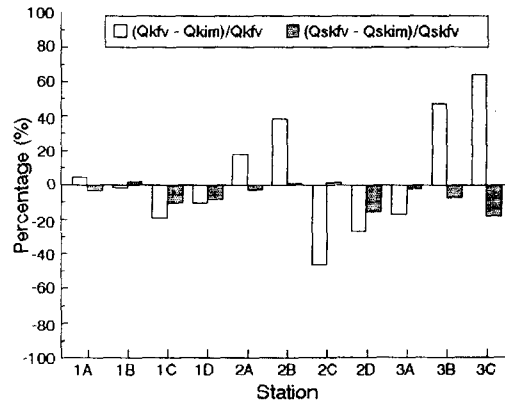


Fig. 7. Percentage of  $(Q_{kfv} - Q_{kim})/Q_{kfv}$  and  $(Q_{skfv} - Q_{skim})/Q_{skfv}$ .

5.6%로 감소하였다. 즉  $Q_{skim}$ 의 수송량이 대체로 크게 나타나고 있다. 이것은 식 (7)의 parameter에서  $u_0$ 와  $Q$  또는  $U_1$ 과  $Q_s$ 간의 변동과 상관이 있을 것으로 추정된다(Table 2 참조).

결론적으로 수심단면의 평균유속 계산에는 현장의 흐름형태를 충분히 고려하여야 하며 이로 인해 미치는 영향은 잔차수송량과 Stokes drift에 크게 변화를 주고 있음을 알 수 있다.

## 2. 유속의 성분분해

흐름의 계산에는 수심 단면의 평균유속 산출방법도 중요하지만, 유속성분의 분해절차는 매우 중요하다. 왜냐하면 유속성분의 분해절차에 따라서 동일 성분의 유속이라도 그 값이 서로 다르며, 심지어 non-zero 성분항이 zero로 되는 경우가 있기 때문이다(上嶋, 1979).

또 단면구간을 어떻게 나누느냐에 따라 서로 달라진다. Ratray & Dworski(1980)는 단면분할의 3가지 특징을 잘 표현하였고 분할방법에 따라서 단면유속값이 크게 차이를 보여 주었다. 그의 결론은 현장의 지형과 흐름자료에 근접한 형태를 선택해야 함을 주장하였다.

이와같이 유속의 성분분해는 시간적 분해와 공간적 분할 및 분해의 순서를 신중히 검토해야 함을 의미한다.

공간적 분해중 단면적의 분할방법은 Ratray & Dworski(1980)의 3가지 형태중에서 하나를 택하여 유속분해를 할 수 있으나 각각 장단점이 있으므로, 본 연구에 적용된 마산만은 단면폭이 1000m

미만은 3정점, 1500m미만인 곳은 4개의 정점을 정하여 얻은 유속자료이므로, 단위폭당의 유속성분으로 분해함으로서 단면적의 선택과 유속의 단면 대표성 여부를 없애고 단면의 총별 순간흐름에서 수심 평균유속을 먼저 계산함으로서 비균질성 흐름을 중시하였다.

본 연구에 사용된 유속의 분해절차를 몇가지 조건으로 나타내면 Fig. 8과 같다.

Table 3은 Fig. 8의 흐름도에 의해 시공간적 분해절차에 따라서 St.1C를 예로들어 얻어진 유속의 각 성분항에 대한 값을 서로 비교하였다. 여기서 유속 성분분해의 시공간적 분해절차에 따라 성분항이 서로 다르게 표현되었으며 계산된 실제 유속 값도 다르게 나타났다.

식 (1)은 공간분해를 먼저하여 분해된 단순한 형태이며 단면적을 고려하여 분해하면 식 (1)의 우변 3항은  $U_s = U_{sv} + U_{st}$ ,  $u' = u'_v + u'_t$ 로서 단면의 3차원적 표현이며 Fischer(1972)가 이미 밝힌 바 있다.  $U_{st}$ 와  $u'_t$ 는 단면적 분해로 인해 생긴 항이므로 단면의 횡변화 성분이다. Fischer의 유속분해는 이론적으로 표현가능하지만 현장조사의 대표적 유속점을 대상으로 할 때 현실적이지 못하며, 대표적 유속을 인정한다 하더라도 대부분의 항들은 시공간적으로 적분하면 0이 되어 없어진다.

Kjerfve의 식 (5)와 Tee의 식 (12)는 Fischer의 식 (1)의 1,2항과 그 값이 동일하지만 Kjerfve는 흐름의 성질을 조화분해하여 표현하였다.

Lewis & Lewis의 식 (16)은 시간적 분해를 먼저 행하여 분해된 항들이다. Table 3에서는  $U_1$ 과  $U_{2v}$

Table 3. Comparison of decomposed velocities using the various equations at St.1C

Terms of eqs.	Fischer (eq. 1)	Kjerfve (eq. 5)	Tee (eq. 12)	Lewis & Lewis (eq. 16)	Author (eq. 24)
$u_0$	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4
$U_1$	1.771 cos( $\sigma t - 291$ )		1.771 cos( $\sigma t - 291$ )	0	
$U_s$	0				
$u'$	0				
$\overline{U_1 \cos(\sigma t - \phi_u)}$		1.771 cos( $\sigma t - 291$ )			1.771 cos( $\sigma t - 291$ )
$\overline{U_2 \cos(\sigma t - \phi_u)}$				2.214 cos( $\sigma t - 278$ )	
$u_{2v} \cos(\sigma t - \phi_u)$				0	
$u_{d0}$					0
$u_{dd}$					0
$\overline{U_3 \cos(\sigma t - \phi_{ud})}$					1.882 cos( $\sigma t - 161$ )
$u_{3d}$					0

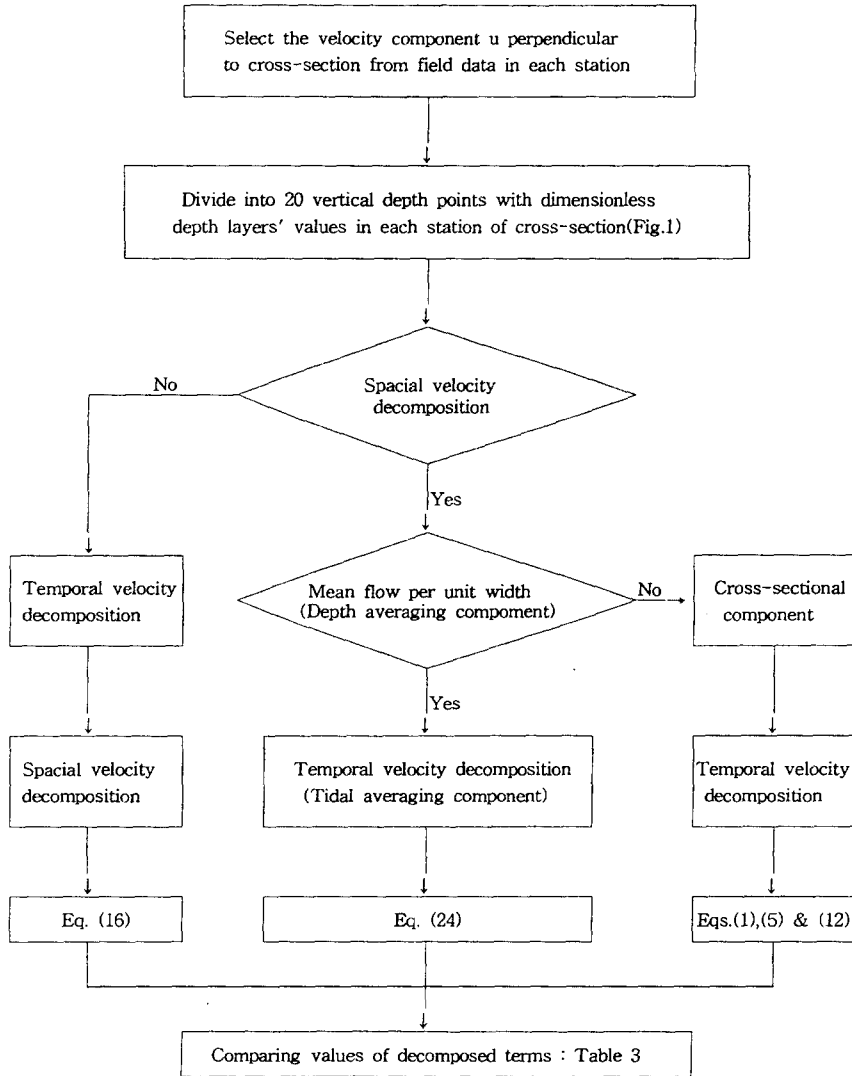


Fig. 8. Flow chart for the procedure of velocity decomposition.

$\cos(\sigma_t - \bar{\phi}_u)$ 의 값을 수심적분하면 zero가 되고 조석적 변동을 갖는 편차성분의 수심평균값  $\bar{U}_2 \cos(\sigma_t - \bar{\phi}_u)$ 의 값이 존재한다. 이 항은 식 (5)의  $U_1 \cos(\sigma_t - \bar{\phi}_u)$ 와 값이 다르므로 동일 성분이 아님을 알 수 있다.

본 논문에서 제안한 식 (24)는 공간적이고 단위 폭당의 분해이므로 현장 유속점의 단면 대표성 여부를 없애고 2차원적으로 단순화시켰고 식 (16)과는 그 값이 근본적으로 다르며 식 (5)의 성분외에 연직 유속편차의 변동성분항 값이 추가되었다. 또

한 추가된  $\bar{U}_3 \cos(\sigma_t - \bar{\phi}_{ud})$ 는 식 (16)의  $\bar{U}_2 \cos(\sigma_t - \bar{\phi}_u)$ 와 성분이 다르며 Fischer의 3차원식 (1)에서 zero였던  $u'$ 성분중 단면의 연직변화 성분에 해당한다. 대부분의 연안하구역 흐름에서 물질수송에 미치는 지배적 기여성분은 연직 전단효과임을 고려할 때, 잔차수송량의 기여성분으로 포함된 것은 의미있는 것으로 생각된다.

또 Table 3에서 처럼, 어떤 시공간 분해절차의 순서에 관계없이 동일한 값을 갖는 성분은  $u_0$  항임을 알 수 있다.

### 3. Stokes drift $Q_s$

유속의 성분분해 절차를 달리함으로서 얻어진 Stokes drift 와 잔차수송량의 변동을 비교하기 로 한다. Table 4는 식 (17)과 식 (26)의 Stokes drift 의 parameter들을 계산하여 얻은 값을 나타내었다. 여기서 - 기호는 통수단면을 통한 외해방향 수송량을 의미한다.

식 (17)의 parameter 중에서  $\bar{u}_2$ 는 조석편차의 수심평균값을 의미하며 그 진폭이 대체로 크다. 수 심과 유속의 변동으로 인한 위상차  $\phi_h - \phi_u$ 는  $90^\circ$  보 다 작으면 Lagrange 잔차량이 Euler의 그것보다 크게 되고  $90^\circ$  보다 크면 Lagrange 잔차량이 작게 된다. 적용된 마산만의 단면의 정점들을 Table 4에 서 처럼 St.1C, 2C를 제외하고 그 위상차가  $90^\circ$  보 다 크므로 Euler 수송량의 값이 크다.

식 (26)의 parameter 중에서  $\bar{u}_3$ 는 단면 편차값 에서 조석평균의 편차성분중 연직 방향성분으로 그 값은  $\bar{u}_2$  보다 훨씬 적게 나타났다. 그리고 편차 유속성분과 수심간의 위상차  $\phi_h - \phi_{ud}$ 는 전부  $90 \sim 270^\circ$  사이이므로 그 값이 -를 나타내고 있다. 이 것은 잔차수송량에 대한 보상류의 하나로 전단효 과를 갖고 있음을 의미한다.

Stokes drift를 비교하기 위하여 Table 4의 Lewis & Lewis(식 17)의  $Q_{sl}$ 과 Table 2의  $Q_{skim}$ (식 7 또는 식 26의 우변 둘째항)의 차를 백분율로 나 타내어 백색 막대그래프로, 또  $Q_{skim}$ 과 식 (26)의

우변 셋째항  $Q_{sk2}$  간의 값을 백분율로 하여 흑색막 대그래프로 나타낸 그림은 Fig. 9이다.  $(Q_{sl} - Q_{skim})/Q_{sl}$ 의 백분율 크기에서 St.1C,2B는  $Q_{sl}$  값 이  $Q_{skim}$ 의 값보다 1.8~2배정도로 크게 나타난 것 외에는 대체로 비슷한 값을 나타내었다. 이들의 백 분율을 평균하면 18%를 나타내어  $Q_{sl}$ 의 값이

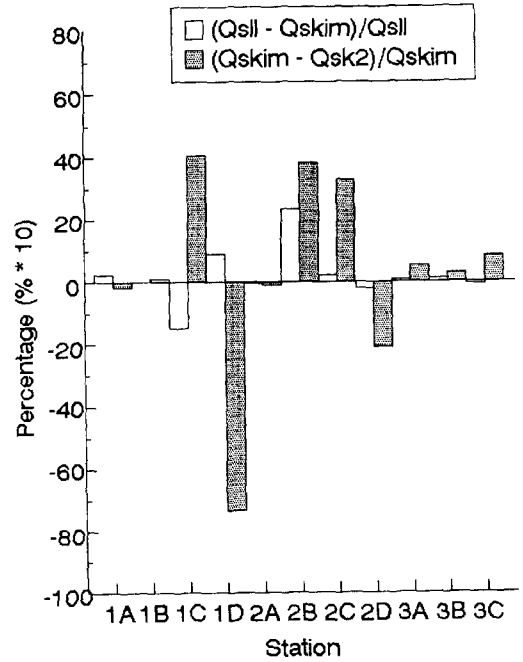


Fig. 9. Percentage of  $(Q_{sl} - Q_{skim})/Q_{sl}$  and  $(Q_{skim} - Q_{sk2})/Q_{skim}$ .

Table 4. Comparison of Stokes drift's parameters and net discharge between eqs. (17) and (26)

St. No.	Eq.(17)				Eq.(26)			
	$\bar{U}_2$ (cm/s)	$\phi_h - \phi_u$ ( $^\circ$ )	$Q_{sl}$ ( $10^{-2}m^3/s$ )	$Q_l$ ( $10^{-3}m^3/s$ )	$\bar{U}_3$ (cm/s)	$\phi_h - \phi_{ud}$ ( $^\circ$ )	$Q_{sk2}$ ( $10^{-2}m^3/s$ )	$Q_k$ ( $10^{-3}m^3/s$ )
1A	5.466	139	-11.53	2.963	4.02	155	-10.18	2.239
1B	5.354	121	-7.97	1.802	2.79	205	-7.31	1.055
1C	2.214	84	0.79	15.843	1.882	201	-5.98	14.035
1D	5.294	200	-14.8	16.361	5.577	205	-15.04	16.156
2A	5.488	106	-5.11	2.545	1.964	207	-5.91	1.931
2B	3.526	100	-2.03	1.036	2.323	182	-7.71	0.743
2C	6.095	78	4.25	-3.206	2.537	205	-7.7	-4.063
2D	9.469	96	-2.8	-12.864	4.533	215	-10.51	-13.973
3A	11.794	137	-34.03	-71.754	3.923	172	-15.33	-73.047
3B	9.512	125	-23.54	15.901	3.637	191	-15.41	14.56
3C	10.004	124	-21.43	2.888	4.815	256	-4.46	2.286

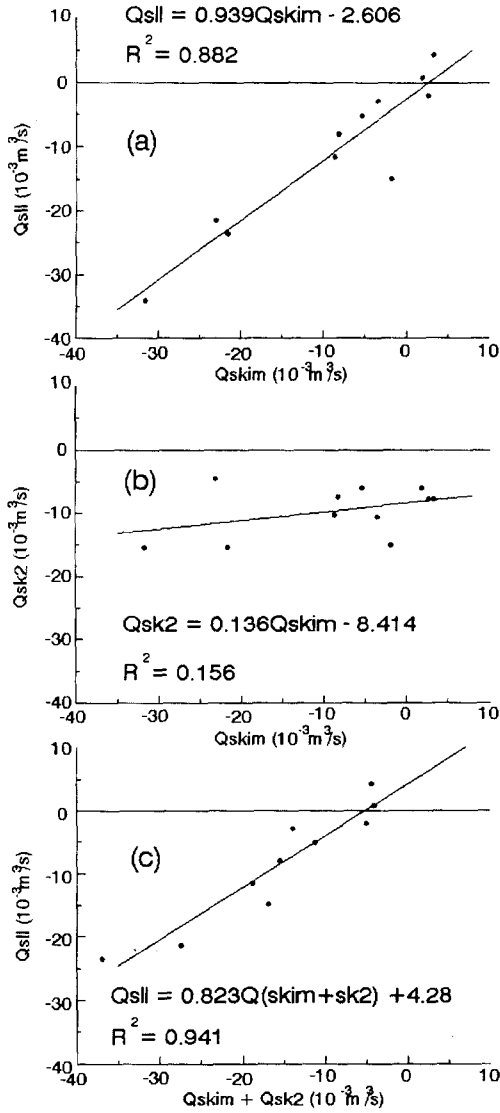


Fig. 10. Regression analysis of Stokes drifts ; (a) is relation of  $Q_{skim}$  and  $Q_{sk2}$  and (b), (c) are relation of  $Q_{skim}$  and  $Q_{sk2}$ ,  $Q_{skim} + Q_{sk2}$  and  $Q_{sk2}$  respectively.

$Q_{skim}$  값보다 약간 큼을 알 수 있다. 여기서 Fig. 7과 Fig. 9를 비교해 볼때 이들의 크기관계는  $Q_{sk2} > Q_{skim} > Q_{kfv}$ 의 순이다. 즉 식 (7), 식 (17)의 Stokes drift는 흐름평균된 계산법과 유속의 분해방법에 따라 그 결과는 약간씩 차이를 의미한다.

한편 Fig. 9의 흑색 막대그래프는 식 (26)의 Stokes drift  $Q_{skim}$  과  $Q_{sk2}$  값을 백분율로 나타낸 그

림이다. 전반적으로 2배이상의 큰 차를 보이는 곳이 5개 장소( St.1C, 1D, 2B, 2C 및 2D)이며, 그의 6개 장소에서는 대체로 비슷한 값을 보였다.

즉 주수로인 단면1의 St.1C, 1D와 단면2의 St.2C, 2D에서 큰 차를 보였고 만구(St.3A, 3B 및 3C)에서는 서로 비슷한 값을 가졌다. +의 값을 갖는 St.1C, 2B 및 2C는  $Q_{skim}$  이 큰 곳이므로 조석의 pumping현상이 강한 흐름구조를 형성하고 있다고 생각된다. 그러나 -의 값을 갖는 곳(St.1D, 2D)은  $Q_{sk2}$ 의 값이 월등히 크기 때문에 조석의 trapping효과와 연직의 shear효과가  $Q_{skim}$  보다 크게 작용한 것으로 추정된다.

그리고 만구에서는 +값이 약간 크므로 pumping 효과가 약간 우세하나 trapping 효과 또는 shear 효과도 상당히 작용하고 있는 것으로 생각된다.

Fig. 10은 식 (7), (17) 및 (26)의 Stokes drift에 대한 관계를 상관식으로 표현하고 그림으로 나타내었다.

Fig. 10(a)는 수심단면의 개량된 유속평균 계산법으로 얻은  $Q_{skim}$  과  $Q_{sk2}$ 의 관계이며, 이들은 상관성이 높아서 결정계수  $R^2=0.882$  였다. 또 Fig. 10(c)도  $Q_{sk2}$ 과 제안된 식 (26)의 Stokes drift  $Q_{skim} + Q_{sk2}$ 의 합과의 상관성은 매우 높아서  $R^2=0.941$ 이 였다. 그러나 Fig. 10(b)의  $Q_{skim}$ 과  $Q_{sk2}$ 는  $R^2=0.156$ 으로서 상관성이 없었다. 또  $Q_{sk2}$ 의 값은 모두 음의 값을 나타내므로, 마산만의 shear흐름은 항상 만외로 작용하고 있음을 알 수 있다.

따라서 Fig. 10에서 종합적으로 알 수 있듯이,  $Q_{skim}$ 과  $Q_{sk2}$ 는 직접적 상관성은 아주 희박하나 이들의 합과  $Q_{sk2}$  또는  $Q_{skim}$ 의 상관성은 매우 높았음을 알 수 있다.

#### 4. Lagrange 잔차수송량 Q

다음으로 Euler 수송량과 Stokes drift의 합으로 이뤄진 잔차수송량 Q의 변동을 비교해 보기로 한다. Table 4의  $Q_{ll}$ 을 기준으로  $Q_{kim}$ ,  $Q_k$ 의 변화를 보기 위해 나타낸 그림은 Fig. 11과 같다. 여기서 Fig. 11(a)는  $Q_{kim}$ ,  $Q_{ll}$  및  $Q_k$ 의 변동량을, Fig. 11(b)는  $Q_{ll}$ 과  $Q_k$ 의 백분율을 나타내었다.

Fig. 11(a)에서 이들 잔차수송량의 크기는 정점

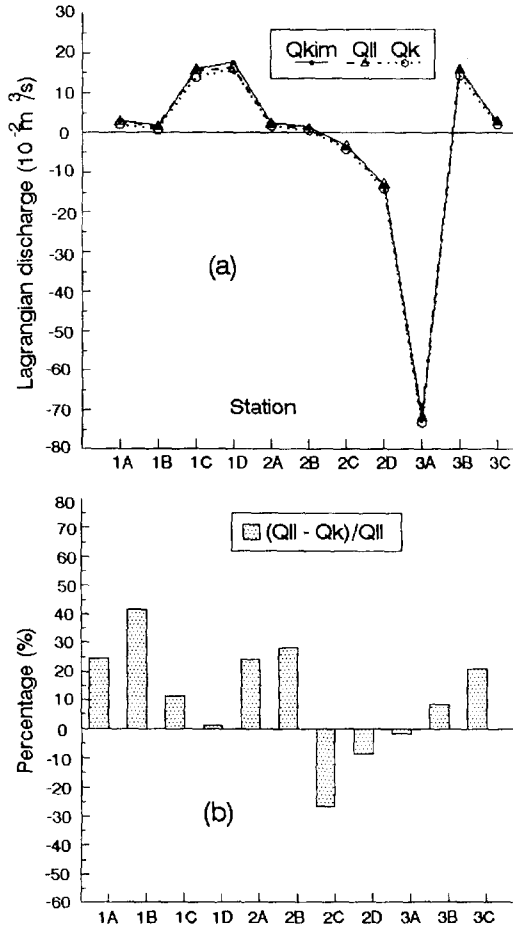


Fig. 11. Variability of Lagrangian discharges(a), and percentage between  $Q_{II}$  and  $Q_k$  (b).

에 따라 다소 변동이 있으나, 대부분 비슷하거나 거의 같은 곳도 있다. Fig. 11(b)에서는  $Q_{II}$ 이  $Q_k$ 보다 큰 곳이 대부분이며, St.1B에서 최대 42%로 변동하였다. 그러나  $Q_k$ 가 가장 큰 곳은 St.2C로  $Q_{II}$ 보다 30%정도 크게 나타났다. 따라서 전 정점에 대한 평균은  $Q_{II}$ 이  $Q_k$ 값보다 11% 높게 나타나므로 적은 변동을 보였다.

잔차수송량의 상관관계를 나타낸 회귀분석 그림은 Fig. 12(a),(b) 및 (c)이다.  $Q_{kim}$ ,  $Q_{II}$  및  $Q_k$ 는 서로간에 상관성이 아주 높아서  $R^2=0.999$ 를 나타내었다. 그러므로 이들 잔차수송량간에는 변동이 적으며 상관성이 매우 높으므로, 잔차수송량의 산출은 계산절차와 방법이 변하여도 그 변동은 적음을

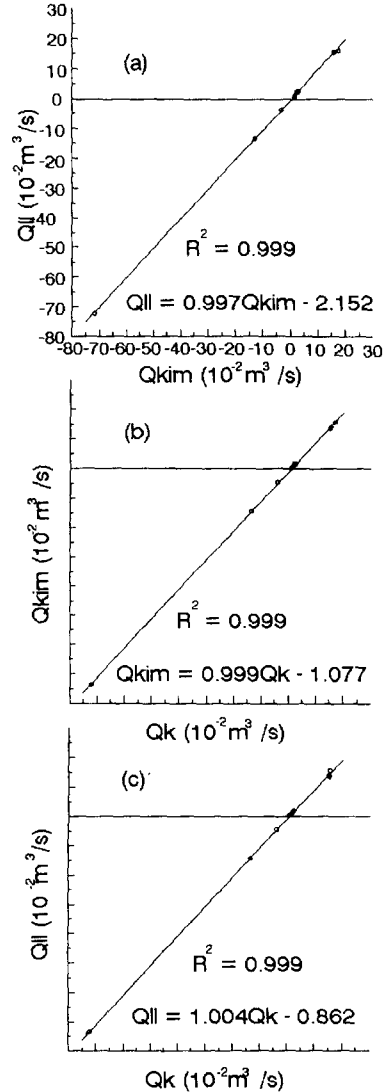


Fig. 12. Regression analysis of (a)  $Q_{II}$  and  $Q_k$ , (b)  $Q_{kim}$  and  $Q_k$ , (c)  $Q_{II}$  and  $Q_k$ .

알 수 있다.

결론적으로 제안된 식 (26)에서 Stokes drift를 구성하는 두 성분항은 기존의 Stokes drift 항을 단면의 흐름구조에 적용가능토록 세분하여 놓은 결과임을 알 수 있다.

### 요약 및 결론

Stokes drift(SD)와 Lagrangian 잔차수송량



(LD)은 담수교체시간,해수교환 및 용해물질의 이동과 분산현상의 분석을 위한 중요한 요소들이다. 또한 이들은 보다 현장에 접근된 방법으로 산정되어야 한다.

그리고 SD와 LD의 계산은 흐름의 단면적 표현을 위한 수심 평균유속과 시공간적 흐름의 체적계산을 위한 유속의 성분 분해절차에 의존하므로, 본문에서는 기존의 SD와 LD의 계산법을 재검토하고, 성층된 연안역의 통수단면 흐름에 접근된 산정법을 제안코자 하였다.

Kjerfve의 수심 평균유속 계산을 개량하여 흐름 변동이 심한 경계면 저층의 유속을 고려했을 때, 마산만의 현장자료에 적용하여 얻은 수심 평균유속은 산입된 저면 경계층비율보다 더 큰 영향을 미친 곳이 50%로 나타났다.

단면의 유속의 성분분해에서, 유속의 시공간적 분해절차 및 순서를 다르게 함으로서 얻어진 성분항들은 동일 성분항이라도 유속값이 다름을 현장 유속자료의 계산에서 알 수 있었다. 이것은 기 보고된 연구자들의 결과와 동일한 결론임이 확인되었다.

유속의 수심 평균계산의 개량과 단면의 성분분해에 따라 유도된 SD와 LD는 단면의 단위폭에 대한 유속자료를 이용하고, 유속성분의 분해순서를 현장 흐름구조에 적합하도록 유도함으로서 새로운 계산식을 얻었다(식 26참조). 이 식에서 추가된 우변 셋째항( $Q_{sk2}$ )은 shear 성분을 나타낸다.

마산만의 3개단면 11개 정점에 적용한 결과, SD는 기존의 것들보다 최대 2배이상의 큰 변동차를 보인 곳도 있으나 전 정점의 평균 변동율은 오히려 18% 적게 나타났다. SD의 두 성분중 우변 둘째성분( $Q_{skim}$ )은 단면의 주 수로에서 둘째보다 큰 값을 가지므로 조석 pumping 현상이 강하며, 셋째성분( $Q_{sk2}$ )은 단면의 가장자리 부근에서 더 큰 값을 보이고 모두 만구방향의 흐름을 가지므로 trapping 효과 또는 shear 효과가 강한 것으로 추정된다.

LD는 기존의 것들과 비교할 때 최대 변동폭이 40%이며 전 정점에 평균하여 11%의 변동을 보였다. 따라서 LD의 변동이 적다는 것은, Eulerian 잔차수송량(ED)이 어떤 계산절차에 관계없이 동일함으로, 구성하는 SD의 두 성분이 서로 보상류로

서 작용함을 뜻한다.

그러므로 기존의 SD는 균질한 흐름을 갖는 해 표면 공간의 흐름변화에서 얻어진 계산방법이라면, 제안된 SD는 shear 효과의 성분을 갖는 항을 분리해 냄으로서 연안의 Baroclinic 한 흐름현장에 적용가능한 계산법이라 사료된다.

또 이들의 변동폭은 단면의 단위폭당으로 얻어진 결과이나 이를 확대하여 단면 전체로 계산하면 그 변동폭은 클 것으로 기대된다. 이때 공간적 단면 분할방법에 따라 shear효과의 차가 다르므로 현장에 적절한 단면 분할법의 선택이 필요하다.

앞으로 shear효과를 갖는 SD의 영향을 3차원 수치모델링에 적용하여 재검토하고자 한다.

## 참 고 문 헌

- 1) Dyer, K. R.(1974) : The Salt Balance in Stratified Estuaries, Est. and Coast. Mar. Sci., 2, pp. 273 - 281.
- 2) Fischer, H. B.(1972) : Mass Transport Mechanisms in Partially Mixed Estuaries, Jour.Fluid Mech., 53, pp. 671 - 687.
- 3) Fischer, H. B.(1976) : Mixing and Dispersion in Estuaries, Ann. Rev. Fluid Mech., 8, pp. 107 - 133.
- 4) Kjerfve, B.(1975) : Velocity Averaging in Estuaries Characterized by a Large Tidal Range to Depth Ratio, Est. and Coast. Mar. Sci., 3, pp. 311 - 323.
- 5) Kjerfve, B. and Seim, H. E.(1984) : Construction of Net Isopleth Plots in Cross - sections of Tidal Estuaries, Jour. Mar. Res., 42, pp. 503 - 508.
- 6) 김종화, 이문옥, 강주복(1992) : 馬山灣의 오염물질 輸送에 미치는 바람效果, 한국어업기술학회지, 제 28권제 4호, pp.385 - 397.
- 7) Lewis, R. E. and Lewis,J.O.(1983) : The Principal Factors Contributing to the Flux of Salt in a Narrow,Partially Stratified Estuary, Est. and Coast. Mar. Sci., 16, pp. 599 - 626.
- 8) Mario Pino Q, Gerardo M.E.Perillo and Pablo Santamarina(1994) : Residual Fluxes in a Cross - section of the Valdivia River Estuary, Chile, Est. Coast. and Shelf Sci., 38, pp. 491 - 505.

- 9) Rattray, M. and Dworski, J. G.(1980) : Comparison of Methods for Analysis of the Transverse and Vertical Circulation Contributions to the Longitudinal Advective Salt Flux in Estuaries. Est.and coast. Mar. Sci., 11, pp. 515 - 536.
- 10) Tee, K. T.(1976) : Tide - induced Residual Current, 2 - D Nonlinear Numerical Tidal Model, Jour. Mar. Res., 34(4), pp. 603 - 628.
- 11) 上嶋英機,早川典生,國司秀明(1979) : 感潮河川における物質輸送の機構について(第2報), 第 26回 海講論集, pp. 623 - 627.
- 12) Uncles, R.J. and Jordan, M. B.(1980) : A One - Dimensional Representation of Residual Currents in the Severn Estuary and Associated Observations, Est. and Coast. Mar. Sci., 10, pp. 39 - 60.
- 13) Uncles, R. J. and Jordan, M. B.(1979) : Residual Fluxes of Water and Salt at Two Stations in the Severn Estuary, Est. and Coast. Mar. Sci., 9, pp. 287 - 302.
- 14) Zimmerman, J. T. F.(1979) : On the Euler - Lagrange Transformation and the Stokes' drift in the Presence of Oscillatory and Residual currents, Deep - sea Res., 26A, pp. 505 - 520.