

SCS 流出曲線指數法을 이용한 灣內 淡水 交替時間의 推定

Estimates of Flushing Time in a Bay using the SCS Curve Number Method

김종화* · 장선덕** · 송현구***

Kim, Jong Hwa · Chang, Sun Duck · Song, Hyun Ku

Abstract

The SCS Curve Number(CN) method has become widely accepted as a procedure of estimating stormflow volumes for design and natural events in small watersheds. The applicability of this method for calculating the flushing time was evaluated as compared with the net volume transport (NVT) method in Masan Bay, Korea. It is shown that the flushing time using the CN method ranged from 10.9 to 15.3 days under the well mixed condition, that the time using the NVT method was 13.9 days⁽⁵⁾ averaged over 6 days of field data. These results were revealed that two methods calculated the approximate times as shown above. The relationships between the run-off, Q_r , and the flushing time, t , are expressed as the following forms.

$$t_1 = 228.79Q_r^{-0.9996} \quad \text{in case of well mixed condition,} \quad (1)$$

$$t_2 = 131.06Q_r^{-1.0} \quad \text{in case of two layered model.} \quad (2)$$

Those empirical expressions are represented that the relationships between Q and t are nonlinear as those as Bumpus⁽¹⁷⁾ obtained in Boston Inner Harbour. Therefore, the CN method will permit calculation of the flushing time for any given bay to be unexpected as water balance under the condition of short-time (0.5 day) data, instead of NVT method based on the long-time (at least 3 days over) data.

요 지

항만의 단기 관측자료에 의한 해수의 수송은 조석간차류와 바람응력 등으로 해수의 평형상태를 유지하기 어렵다. 이로인해 순 용적수송량이 만외로 유출되어야 함에도 불구하고 짧은 주기동안 만내로 유입됨으로써 담수 교체시간을 계산할 수 없었다.⁽⁵⁾ 본 연구는 1 조석 주기의 단기관측과 유역의 강우량 자료로부터 SCS의 유효강수량을 계산함으로써 담수 교체시간의 추정가능성을 검토하였다. 완전혼합을 가정하여, 여름철 마산만에 적용된 담수 교체시간은 외해수의 염분변화에 따라 10.9~15.3일로 분포하였다. 이는 여름철 마산만에서 순 용적 수송량(NVT)에 의한 평균 체류시간 13.9일에⁽⁵⁾ 상당히 근접된 값이다.

* 정희원 · 부산수산대학교 부교수

** 정희원 · 부산수산대학교 총장

*** 부산수산대학교 조교

강한 성층을 이룬 홍수기의 경우 2층모델에 적용하면, 만구에서 교체시간은 1.2일로 추정되어 완전 혼합모델에서 얻은 2.1일보다 작은 값이다. 이것은 홍수기에 유입된 담수가 대부분 상층을 통하여 만외로 유출되기 때문이다. 또 마산만에서 얻은 담수 유입량 Q_1 과 교체시간 t 와의 상관관계식을 완전혼합과 2층 모델의 2가지 조건으로 나타내었고, 이들이 비선형적 관계를 가지고 있음을 알 수 있었다. 이런 관계는 보스턴 내만에서 직접 하천 유입량을 조사한 결과⁽¹⁷⁾와 근접된 형태를 보였다. 따라서 이 식들은 만의 흐름구조와 농도의 성층정도에 따라 달리 적용할 수 있고, 담수유입량의 변동에 의한 담수 교체시간의 예측을 가능케 한다. 그러므로 순 용적 수송량의 계산으로 구할 수 없는 단기관측자료는 SCS 유출곡선지수법에 의해 담수 교체시간의 추정이 가능할 것이다.

1. 序 論

해안지형으로 둘러싸여 수괴의 거동에 다소 제한적인 항만은 하천으로부터 유입되는 담수량에 의존하여 수괴이동과 혼합과정은 물론 용해된 물질분포가 많이 달라진다.

그러므로 항만에 유입된 각종 담수의 유입량을 보다 정확하게 추정하는 것은 오염물질의 총체적 규제와 수질개선을 위한 가장 기본적인 결정요소이다. 또 유입물질의 만외유출이 어떤 과정을 거쳐서 얼마동안 만내에 머물러 있는가 하는 교체(체류)시간과 만내수의 일부가 신선한 외해수와 어느 정도 치환될 것인가 하는 치환과정은 만내 자정능력의 지표가 될 것이다.

이와같이 담수 교체시간 또는 치환시간과 관련된 문제에서 담수의 정확한 추정은 담수 교체시간을 결정짓는 선결조건이 된다.

그동안 여러가지 방법으로 만내 담수 존재량과 담수 유입량을 추정하여 담수 교체시간을 결정하였다. Ketchum⁽¹⁾은 담수의 만내 존재비율로서 만내에 축적된 담수존재량을 구한 후, 이것을 측정된 하천 유입량으로 나누어 교체시간의 계산방법을 제안하였다. 또 그는 하구역을 몇개로 구획(segment)하여 각 구획마다 조석prism에 의해 교환율을 계산하고, 하천유입량을 교환율로 나누어서 구획내에 축적된 하천유입량을 계산하였다.⁽²⁾ 그러나 이 경우에 각 구획마다 완전혼합을 가정한 것이며 염분분포는 필요치 않다.

Arons 등⁽³⁾은 혼합장 이론을 도입하여 확산계수에 의해 담수비를 구하였다. 또 성층된 2층의 흐름구조를 갖는 하구역은 상하층의 염분차와 하천 유입

량을 측정하여 계산함으로써 담수 교체시간을 결정하였다.⁽⁴⁾

한편 남⁽⁵⁾은 마산만의 만구에서 6일간의 수심별 관측자료에서 단면을 일정한 격자를 갖는 소구간 면적으로 분할하고, 관측기간동안의 순 용적수송량(NVT)을 담수 유입량으로 간주하여 담수 교체시간을 계산하였다.

최근에는 50개월간의 장기 관측자료를 사용하여 Yanagi 등⁽⁶⁾과 柳 등⁽⁷⁾은 담수유입량의 시간변동과 이들의 응답함수를 전개해서 만내의 담수존재량을 구함으로써 평균 체류시간을 얻는 방법을 제안하였다.

그러나 이들의 계산방법은 모두 현장의 장기 관측과 많은 측정장소를 필요로 함으로써 장비와 인력 등 막대한 경비가 소요되므로 현실적 어려움이 따르며, 소하천이 많은 경우 하천유입량의 측정이 곤란하게 될 것이다.

본 연구는 만구의 단기 관측자료로서 기존방법인 순 용적수송량의 추정에 의한 교체시간의 결정이 어려움을 제시하고, 하천유입량을 직접 측정하지 않고 강수량자료에 의한 만내 담수유입량을 계산하는 SCS 유출곡선 지수법(이하 CN법이라 칭한다)을 사용하여 담수 교체시간의 추정가능성을 새롭게 제안하고자 한다.

2. 資料 및 方法

2.1 淡水 存在量

하천으로부터 유입된 담수 유입량 Q_1 과 만내에 남아 있는 담수 존재량(총 담수량)을 V_1 라 할 때, 유입된 담수가 해수와 완전 혼합하여 얼마동안 만

내에 체류하다가 만외로 유출되는 가를 나타내는 담수 교체 시간 t_1 는 다음 식으로 주어진다.

$$t_1 = \frac{V_f}{Q_c} \quad (1)$$

이 식은 하천수와 함께 유입된 오염 물질이 제거되는 데 소요되는 시간을 의미한다. 식 (1)의 담수 존재량 V_f 는 만내의 해수 총량 V 에서 염분 총량을 뺀 것과 같으므로 만내 평균 염분 S 에 대한 담수비 (freshness) f 를 다음과 같이 도입하였다.

$$f = \frac{S_0 - S}{S_0} = 1 - \frac{S}{S_0} \quad (2)$$

식 (2)에서 S_0 는 기준 염분으로서 염분 S 와 무관한 외해 염분 또는 관측 기간 중 최고 염분 값을 의미한다.

따라서 담수 존재량은

$$\begin{aligned} V_f &= V - \int \left(\frac{S}{S_0} \right) dV \\ &= \int \left(1 - \frac{S}{S_0} \right) dV = \int f dV \end{aligned} \quad (3)$$

로 표현 가능하다. 여기서 $\int \left(\frac{S}{S_0} \right) dV$ 는 염분 총량이다.

식 (3)은 각 구획면적에 적용할 수 있도록 유한함으로 나타내면

$$V_f \sim \sum f_n V_n \quad (4)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서 f_n 는 V_n 내의 f 의 평균값이고 첨자 n 는 각 구획의 수를 의미한다. 그러므로 해수 총량 V 는 다음과 같다.

$$V = \sum V_n = \sum (V_f + \Delta V_n) \quad (5)$$

여기서 V_f 는 저조시의 구획된 만의 체적이고 ΔV_n 은 조위 변동으로 인한 체적 변동을 의미하며 조위 H 와 표면적 A 의 곱으로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\Delta V_n = H_n A_n \quad (6)$$

2.2 淡水 流入量

만내에 유입되는 담수 유입량은 많은 하천과 유입량의 시간적 변동으로 인해 더욱 추정하기 곤란

하다. 담수 유입량은 일반적으로 만구의 횡 단면을 통하여 만외로 유출되는 순 용적 수송량(NVT)과 같으며, 이때 만내의 강우량, 증발량 등에 의한 영향은 무시될 만큼 작다고 가정한다. 그러면 담수 유입량 Q_c 은

$$Q_c = \frac{1}{T} \int_0^T \int_0^h \int_0^B U dy dz dt \quad (7)$$

로 표현된다. 여기서 U 는 단면 직각 방향의 유속, h 는 수심, B 는 만구의 폭, T 는 측정 기간을 나타낸다. 또 y, z 는 단면상에서 각각 횡과 연직방향을 나타낸다.

식 (7)을 이용하기 위해서는 유속이 단면 전체를 대표할 수 있는 적정 간격의 정점수와 수심 방향의 층별 측정이 필요하며, 측정기간도 조석의 지형효과 및 바람 응력 등을 제거하기에 충분히 긴 시간동안 관측 되어야 한다.

따라서 관측 기간이 1~2일 정도로 짧은 경우, 식 (7)의 방법을 적용하는 것은 적합하지 못할 것이다. 그러므로 1조석 주기간의 만구 관측자료로 담수 존재량 V_f 를 구하고, 담수 유입량은 SCS의 CN법⁽⁸⁾을 사용하여 유효 강우량을 추정, 하천으로부터 담수 유입량 Q_c 을 결정하는 것이다.

CN법은 하천유역의 설계와 유효강우량 및 최대 첨두유량(peak flow) 등을 추정하기 위해 세계적으로 널리 사용되어 일반화되었다. 이 방법은 Hawkins⁽⁹⁾와 Hope 등⁽¹⁰⁾에 의해 더욱 정교하게 다듬어 졌다. 여기서는 USDA(NEH-4)⁽⁸⁾에서 주어진 표준 CN법을 사용하여 누가 강우량, 최대 저유량 및 누가 유효강우량과의 관계를 나타내면 다음과 같다.

$$Q_c = \frac{(P_c - 0.2R)^2}{P_c + 0.8R}, \quad P_c > 0.2R \quad (8)$$

여기서 Q_c 는 누가 유효강우량(mm), P_c 는 누가 강우량(mm)이며 R 은 최대 저유량(mm)이다.

R 의 값은 이론적으로 0에서 무한대까지의 범위이지만 이 변동 범위를 0에서 100의 크기로 한정하여 도입하면⁽¹⁰⁾ 유효강우 곡선지수 CN은

$$CN = \frac{1000}{\frac{R}{25.4} + 10} = \frac{25400}{R + 254} \quad (9)$$

로 표현된다. 여기서 CN값은 R과 관계지워지므로 토양의 선행 습도 조건(Antecedent Moisture Condition : AMC)에 따라 변동될 수 있다.

2.3 現場 觀測

마산만을 대상으로 하여 1992년 7월의 소·대조기(갈수기·홍수기)에 3개 단면 11개 정점에서 각각 1조석 주기동안 유속, 염분 및 수심을 측정하였다 (Fig. 1). 사용선박과 측정기기는 인용문헌을 참고바란다.⁽¹⁶⁾

각 단면에서 총별 수심 측정은 연직 방향으로 1 또는 2 미터 간격으로 측정하였고 유속, 염분 및 수온의 값은 난류 변동 성분이 제거 가능한 40초 이상의 평균된 값을 읽었다. 상세한 측정시간과 기상상태는 Table 1과 같다.

이들 현장 자료는 각 단면에서 같은 시간 간격과 태음시로 환산하기 위하여 Cubic spline에 의해 내삽 보간되었다.⁽¹¹⁾ 보간된 자료는 조석의 주기성을 고려하여 조화 분해하였다.

3. 結果 및 考察

3.1 鹽分 變動

담수 체류 시간의 추정은 주어진 만 전체가 완전 혼합이라는 가정을 전제로 하여 유도되었다. 따라서 만의 종단면과 각 횡단면에서 염분 분포의 특성을 파악함으로써 만내의 혼합 정도를 식별할 수 있을 것이다.

Fig. 2는 수산진흥원⁽¹³⁾에서 10년간 관측된 마산만의 염분 평균값을 종단면으로 나타내었다. 겨울에는

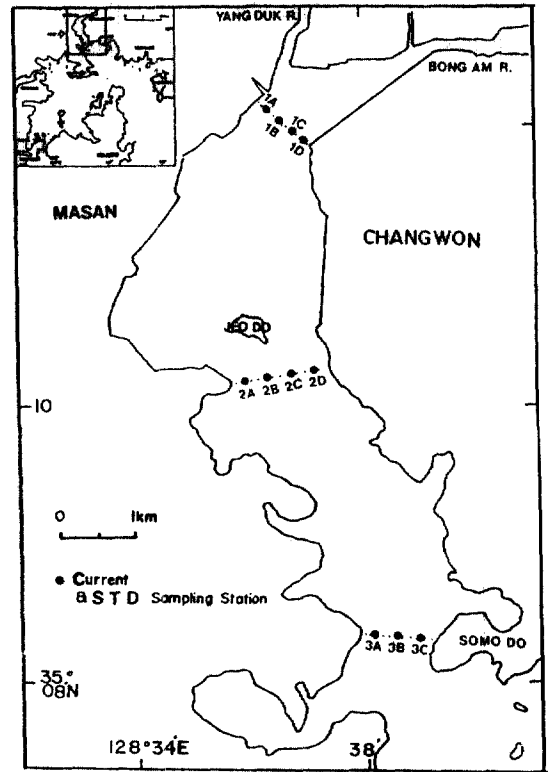


Fig. 1. Location map of oceanographic stations in Masan Bay

표층과 저층이 거의 같은 염분분포를 하고, 만구의 염분(단면 3)은 약 33%이다. 반면에 여름은 표층과 저층간의 염분차가 2~3%이고 만구의 저층은 약 31%이다. 따라서 여름철의 마산만은 표층과 저층의 염분차로 성층되어 있고, 겨울철은 균질한 상태임을 알 수 있다.

Table 1. Details of oceanographic observations in Masan Bay, 1992

Section	Duration of observation		Number of Station	Wind(m/sec)		Item of observation
	Neap	Spring		Neap	Spring	
1	04:00-16:35	07:00-18:30	4	SE	SSE	T, S, V, d
	7 July	16 July		5	3	
2	18:00-06:30	16:00-04:30	4	SSE	SSE	T, S, V, d
	7-8 July	15-16 July				
3	08:00-20:30	06:00-18:30	3	SSE	S	T, S, V, d
	8 July	17 July		4.5	5	

N.B.: T is temperature, S salinity, V velocity, and d depth.

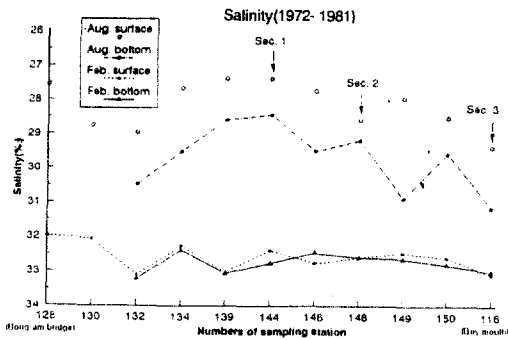


Fig. 2. Longitudinal distribution of salinities averaged in Masan Bay during 10 years

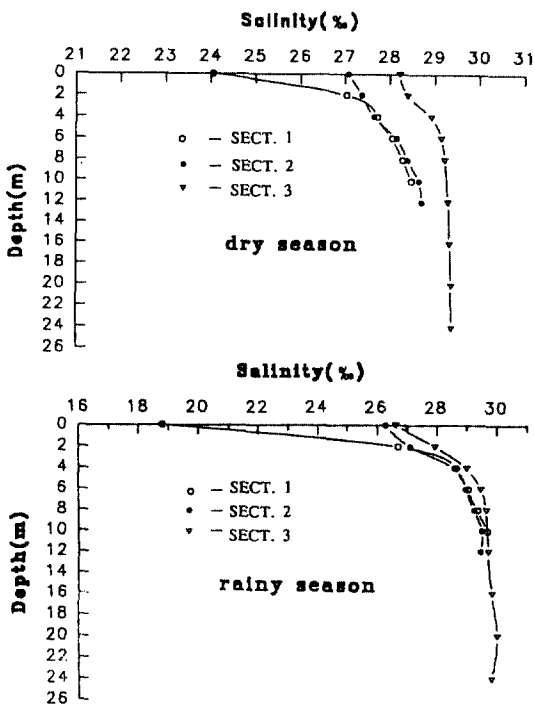


Fig. 3. Transectional mean of salinities averaged at dry(upper) and rainy season(lower) of Masan Bay

Fig. 3은 현장에서 측정된 값으로써 갈수기와 홍수기의 각 횡단면에서 단면 평균된 염분값을 나타내었다. 갈수기의 염분 분포는 24~29.3‰로 분포하고 표층에서 각 단면간의 염분차가 4% 정도이다. 단면 2와 3(만의 중앙과 만구)의 연직 분포차는 1~1.5% 정도이나 단면 1(만의 안쪽)은 약 4.5%로 그 차이가 크다.

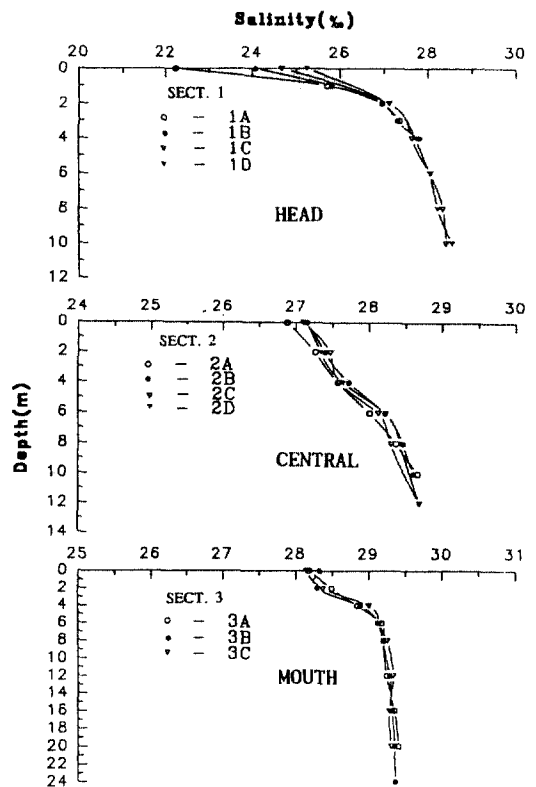


Fig. 4. Tidally averaged salinities at the head, the central part and the mouth of Masan Bay with no precipitation

홍수기의 염분 분포는 약 18.8~30‰로 분포하여 갈수기보다 염분 편차가 심하며 저층의 염분 값이 갈수기의 값보다 큰 것이 특징이다. 그리고 단면 2와 3은 연직 분포차가 3.5% 정도이나 단면 1은 약 11%의 큰 분포차가 있다. 그러나 표층을 제외하고 4m 이상의 수심에서는 3개 단면 모두 염분 값이 비슷하다. 그러므로 염분약층은 만의 안쪽(단면 1)과 중앙부근(단면 2)에서 4m 층에, 만구부근에서 4~6m 층에 존재한다.

각 단면의 횡 방향에 대한 염분 분포를 보면 Fig. 4 및 Fig. 5와 같다. Fig. 4은 갈수기, Fig. 5는 홍수기의 분포도이다.

갈수기는 단면 1의 표층부근에서 다른 단면에 비해 횡 방향으로 염분차가 커서 약 3% 이상이다. 홍수기는 대체로 각단면 모두 횡방향의 염분변동이 적게 나타났다. 갈수기와 홍수기의 단면 1에서 공통적으로 서쪽인 1A 정점이 가장 염분 농도가 낮

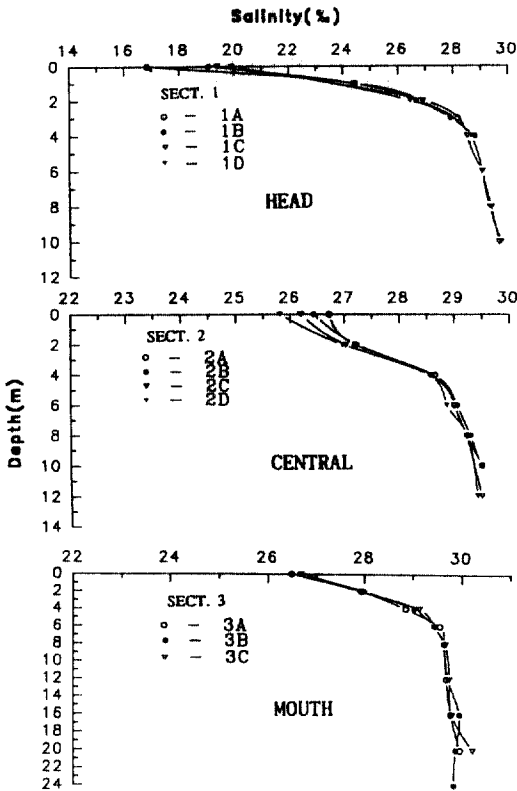


Fig. 5. As in Fig. 4 but after precipitation

았다. 이것은 하천수가 대부분 단면의 서쪽 해역으로 흘러 나옴을 의미한다. 결국 만내의 횡방향 염분은 동고서저 현상을 보이고 있다. 이와같이 상류단면1에서의 염분분포는 지구자전의 결과로 인해 가속화되므로 횡단면의 완전혼합을 기대하기 어렵다.⁽²⁾

3.2 淡水 存在量 V_f

만내에 존재하는 담수 존재량 또는 담수총량은 식 (3)에서처럼 만내염분, 외해염분 및 해수용적에 의존하여 변동한다. 이들 변수중 만내염분은 3개 단면의 평균염분값으로 소조기 27.922%, 대조기 27.902%를 사용하였다. 만의 용적은 해도의 수심과 표면적을 곱한 후 조위변동값을 더하여 계산된 값으로 소조기(갈수기) $168 \times 10^6 \text{ m}^3$, 대조기(홍수기) $174 \times 10^6 \text{ m}^3$ 이었다. 오차를 줄이기 위해 해도의 표면적은 타마야 디지털 면적계(plane 6 모델)를 사용하였다.

외해염분은 대상해역의 만내 염분과 무관한 외해수의 염분값으로 정의된다. 남⁽⁵⁾은 만구단면에서 측

정된 염분의 극치를 외해염분으로 가정하였다. 이 가정조건은 만내 평균염분과 무관한 외해염분으로 보기 어렵다.

본 논문에서는 외해염분을 결정하기 위해 다음과 같은 가정을 전제로 하였다.

1) 관측기간 중 만구에서 측정된 염분값은 담수 존재량에 직접 영향을 미친다고 가정하여 사용하지 않았다.

2) 만구단면에서 측정된 기존자료중에서 택할 경우

가) 저층의 염분값은 장기간에 걸쳐 평균된 값을 사용하되, 만구로부터 대조기의 낙조때 1조석행정 이상의 떨어진 해역에서 얻은 염분보다 큰 값을 선택한다.

나) 상하층의 염분값이 거의 일정한 값을 갖는 시기의 자료를 선택한다.

이를 만족하기 위해 최근 수진원^(12,13)에서 조사한 4년간(1985~1988)의 저층 평균된 염분값 32.83%와 10년간(1972~1981) 만구에서 평균된 겨울철 염분값 33%를 사용하여 비교하였다.

3.3 淡水 流入量 Q_f

식 (7)에 의한 담수 유입량의 계산은 단면을 소 구간면적으로 나누어 유한함으로 구할 수 있다. 여기서는 1조석 주기간 관측된 자료를 surfer 프로그램에 입력하여 각 단면별로 순 용적 수송량을 계산하였다.⁽¹⁴⁾ 이것을 남⁽⁵⁾의 계산결과와 함께 나타내면 Table 2와 같다.

Table 2에서 보면 1981년 7월 28일 소조기에 관측된 남⁽⁵⁾의 순 용적 수송량은 $207 \text{ m}^3/\text{sec}$ 이다. 공교롭게도 김⁽¹⁴⁾의 1992년 7월 8일 소조기에 관측된 수송량 $212.2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 와 비슷하고 두 경우 모두 만내로 유입되고 있다. 이것은 관측당시의 해양과 기

Table 2. Net discharges at each section in Masan Bay

Authors	Section 1		Section 2		Section 3	
	Neap	Spring	Neap	Spring	Neap	Spring
Kim ⁽¹⁴⁾	58.85	45.76	102.5	-17.93	212.2	-3.82
Nam ⁽⁵⁾					207	

N.B.: Minus sign means seaward flow.

상조건이 서로 비슷함을 의미한다.

남⁽⁵⁾은 만내로 유입되는 원인을 잔차류의 유향특성으로 간주하여 잔차류의 주기특성이 나타날 수 있는 충분히 긴 기간동안 관측된 자료의 사용이 필요함을 역설하고 있다. 그래서 그는 1조석 관측 자료로서 담수유입량의 계산이 불가능함을 밝히고, 만구의 상·중·하층에서 대·소조기가 포함된 6일간의 장기계류 관측자료로부터 담수유입량 10.8 m³/sec를 얻었다.

그러나 1조석주기의 단기 관측자료에서 유입하는 순용적 수송량은 잔차류의 영향으로 간주할 수 있으나, 이것보다 더 큰 영향을 주는 요소는 이 해역에서 부는 여름철 남풍때문으로 생각된다. 하여튼 두 관측자료는 모두 거의 같은 유량으로 만내로 유입되는 현상이 일어나므로, 이 수송량을 담수 유입량으로 추정할 수 없다. 따라서 1조석 주기에서 얻은 수송량은 일시적 유입현상으로 간주하여, 유역의 강우량에 의한 담수 유입량의 추정을 시도하였다.

소조기에 관측된 7~8일은 보름 정도 강우량이 없었으므로 여름철 평균 담수 유입량인 10.8 m³/sec⁽⁶⁾로 간주하여 갈수기의 담수 교체시간의 추정에 사용되었다. 대조기인 15~17일 관측시는 6일전(9일)부터 장마가 시작되었으며, 관측 3일 동안 58.8 mm의 강우량⁽¹⁵⁾을 기록하였다. 이 자료로부터 유효 강우량을 산정하여 담수 유입량 Q_e을 계산하였다.

CN값은 선행 습도 조건(AMC)에 따라 3개 등급으로 나누는데, 본 연구에서는 평균 값인 AMC-2에 제시된 기준값을 사용하였다. 따라서 CN값은 임야 73, 포장(건물) 91 및 포장(도로) 90 및 전답 84이다.

그러므로 마산과 창원의 도시계획도 상에 표시된 유역의 종류 별 면적(A_R)을 전체 면적(A_T)으로 나눈으로써 대상유역의 CN값으로 대표된다.

즉

$$CN = \frac{A_R}{A_T} = \frac{(96.3 \times 73 + 32.96 \times 91 + 7.42 \times 90 + 10.47 \times 84)}{147.15} = 78.672 \quad (10)$$

이다. 이 값을 식 (9)에 대입하면

$$R = \frac{25400}{CN} - 254 = 68.86, \quad 0.2R = 13.772 \quad (11)$$

가 된다. 따라서 9~11일은 총 강우량이 11.6 mm로 13.772 mm보다 적으므로 초기손실로 보아 무시할 수 있으며, 누가 강우량과 R 값을 식 (8)에 대입하여 누가 유효강우량 Q_e를 얻었다. 담수 유입량은 유효 강우량에 식 (10)에 나타난 총유역면적 147.15 km²를 곱하므로써 얻을 수 있다. 12일에서 17일까지 계산된 누가강우량, 유효 강우량, 담수 유입량 등을 Table 3에 나타내었다.

Table 3의 결과로부터 7월 9일부터 15일까지의 담수 유입량은 13.557 m³/sec이며, 7월 16일까지의 유입량은 45.691 m³/sec, 7월 17일 12:00까지의 유입량은 116.994 m³/sec이다.

3.4 淡水 交替時間

3.4.1 완전 혼합모델(one layered model)

만내의 담수 존재량과 담수 유입량을 식(1)에

Table 3. Calculated results of effective rainfall and run-off in Masan Bay, July of 1992

Date	Rainfall (mm)	Cumulative rainfall (mm)	Effective rainfall (mm)	Cumulative effective rainfall (mm)	Run-off (m ³ /sec)
12	25.8	37.4	5.947	5.947	10.128
13	2.1	39.5	1.051	6.998	1.79
14	1.2	40.7	0.571	7.57	0.974
15	0.8	41.5	0.39	7.96	0.664
16	30.4	71.9	18.868	26.828	32.135
17	27.6	99.5	20.933	47.761	71.303

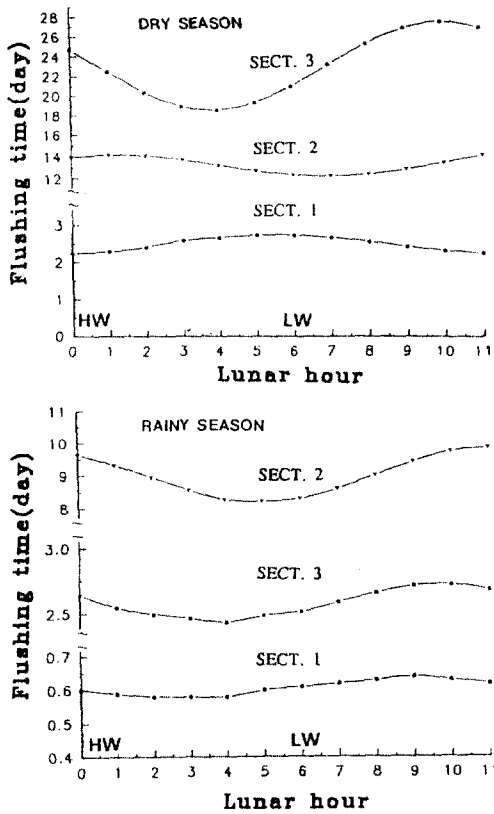


Fig. 6. Tidal variation of flushing time at dry season(upper) and rainy season(lower)

대입하여 계산된 교체시간을 매 태우시별로 나타내면 Fig.6과 같다. 갈수기(Fig.6의 윗 그림)는 단면1에서 교체시간이 조석변동에 관계없이 거의 일정하게 변하고 약 2.1일의 값을 나타내었다. 단면3에서는 조석과 함께 변하며 18~26일 정도의 높은 값을 나타내었다.

반면에 홍수기(Fig.6의 아래)는 단면 1과 3에서 각각 0.6일, 2.6일 정도로써 큰 차가 없다. 또 단면 3의 교체시간은 갈수기보다 약 11배 정도로 현저하게 적게 나타났다. 이런 현상은 만의 용적이 적으므로 만전체가 홍수유입의 영향을 쉽게 받고 있음을 의미한다.

Table 4는 만구에서 1조석 평균된 교체시간과 6일간 평균된 남⁽⁵⁾의 계산결과와 비교하였다. 외해수 염분이 동일하면, CN법에 의해 계산된 갈수기와 홍수기의 평균 교체시간은 15.3일이므로 순 용적 수송량에 의한 값보다 1.4일 더 길게 나타났다. 또 본 관측기간과 다른 만구단면의 최대값인 32.83%로 계산하면, 평균하여 10.9일이 된다. 따라서 이들 값은 순 용적수송량에 의한 계산값 13.9일에 상당히 근접된 결과를 가져왔다.

3.4.2 부분 혼합모델(two layered model)

마산만은 수심이 10 m 미만이면 계절풍의 영향을 크게 받아 흐름의 수평 및 연직분포가 다르고,⁽¹⁶⁾ 홍수기는 상하층의 염분차가 3.5~11%로 분포한다(Fig. 3).

또 Fig. 7에서 보면, 만구에서의 연직 흐름분포는 여러 층으로 형성되어 있다. 즉, 표층은 바람응력으로 만안쪽으로 유입되고 상층의 4~5m까지는 폭우유입으로 만외로 흘러나간다. 6m 이상의 수심에서는 대체로 외해수가 만안쪽으로 유입함을 볼 수 있다.

그러므로 간단한 흐름의 2중구조를 가정하여 보다 현장에 접근된 담수 교체시간을 계산해 보기로 한다. Fig. 8은 마산만에서 2층의 염분과 흐름구조를 가정한 종단면도이다.

Fig. 8에서처럼 염분수송의 연속조건을 생각하면

Table 4. Flushing time compared CN method with net volume transport(NVT) method

Method	Condition	32.83%			30.0%		
		f	V_f ($\times 10^4 m^3$)	t (Day)	f	V_f ($\times 10^4 m^3$)	t (Day)
CN	Dry	0.19	1,830	19.6	0.154	2,585	27.7
	Rainy	0.115	1,997.7	2.1	0.154	2,675	2.8
NVT	Averaged of 6 days ⁽⁵⁾				0.083	1,299	13.9

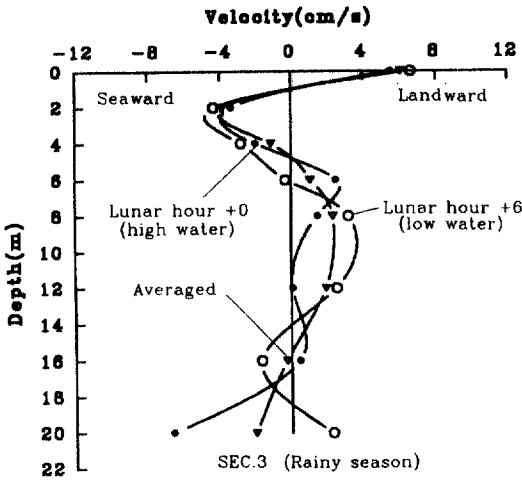


Fig. 7. Vertical variation of flow velocities at the mouth of Masan Bay. Triangle denotes the mean speed, solid circle the speed at high water and open circle that at low water

다음과 같이 표현가능하다.

$$Q_U - Q_L = Q_r \quad (12)$$

$$Q_U S_U = Q_L S_L \quad (13)$$

여기서 첨자 U, L은 각각 상층과 하층을 의미한다. 따라서 Q_U , Q_L 은 다음과 같다.

$$Q_U = \frac{S_L Q_r}{S_L - S_U} \quad (14)$$

$$Q_L = \frac{S_U Q_r}{S_L - S_U} \quad (15)$$

그러므로 2층 모델에서의 담수 교체시간 t_2 는 다음과 같이 표현된다.

$$t_2 = \frac{V}{Q_U} = \frac{V(S_L - S_U)}{S_L Q_r} \quad (16)$$

결국 식 (2)에서 S_0 와 S 를 어떤 부분의 값으로 계산하는가에 따라 완전혼합 모델과 2층 혼합 모델로 구분된다. 즉, 완전혼합일 때 S_0 은 외해수의 염분값으로, S 는 전층의 평균염분값으로 주어진다. 반면에 2층 혼합모델은 S_0 을 하층의 평균 염분값으로, S 를 상층의 평균 염분값으로서 계산된다.

Fig. 3의 염분분포와 Fig. 8의 흐름패턴을 적용하여, 2층 혼합 모델에서 상층 염분값은 표층에서 4 m까지로 하고 하층 염분값은 6 m에서 저층까지의 평균값으로 취하였다. 식(16)에 의해 홍수기의 만구에서 계산된 담수 교체시간은 1.2일로 추정되었다. 이 값은 완전 혼합 모델에서 계산된 2.1일보다 작았다.

Table 3의 일별 강우량을 바탕으로 담수 유입량의 변동에 따른 교체시간의 상관관계를 나타내면 Fig. 9와 같다.

또 마산만에서 얻은 상관관계식과 결정계수 R^2 은 다음과 같다.

$$\text{완전 혼합인 경우 } t_1 = 228.79 Q_r^{-0.9996}, R_2 = 0.902 \quad (17)$$

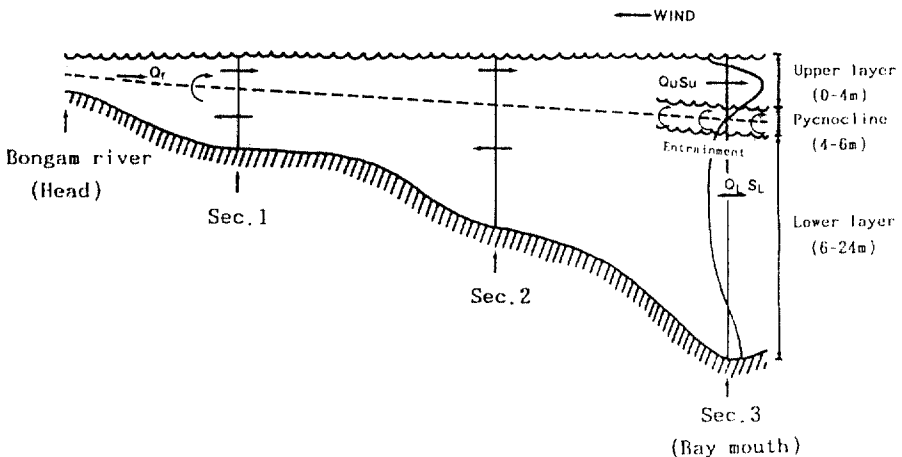


Fig. 8. Schematic representation of two layered transport model with entrainment at the mouth of Masan Bay

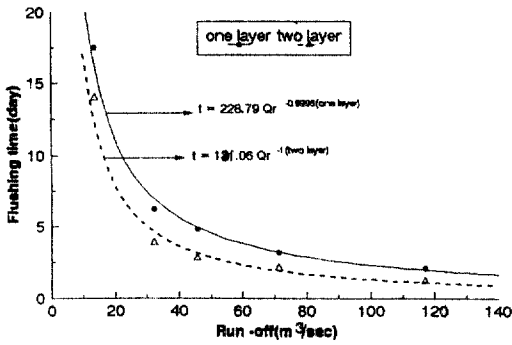


Fig. 9. Relationships between run-off (Q_r) and flushing time (t). Solid line is one layered model, dotted line two layered model in Masan Bay

2층 흐름인 경우 $t_2 = 131.06Q_r^{-1.0}$, $R^2 = 0.886$.
(18)

Fig. 9에서 보면, 담수 유입량과 교체시간과의 양적 변동관계는 2층 모델의 경우, 담수 유입량이 60 m^3/sec 이상으로 증가하면 교체시간이 거의 일정하게 유지되어 약 3일 이하로 떨어진다. 또 담수 유입량이 10 m^3/sec 이하로 감소하면 13일 이상으로 증가하고 있다.

보스톤 내만에서 직접 하천 유입량을 측정한 Bumpus⁽¹⁷⁾의 결과를 보면, $t = 65.018Q_r^{-0.536}$, $R^2 = 0.844$ 였다. 즉 담수 유입량이 16 m^3/sec 이상일 때 교체시간은 거의 일정하게 유지되어 약 2.5일 이하로 나타났다. 또 2.8 m^3/sec 로 하천 유입량이 감소하면 교체시간은 5일 이상으로 완만하게 증가함을 볼 수 있다.

柳 등⁽⁷⁾은 마산만의 약 262배에 해당하는 대판만에서 하천 유입량이 297 m^3/sec 일 때 담수 교체시간은 45일임을 밝혔다. 이들은 응답담수의 전개에서 하천유입량과 교체시간의 상관관계를 선형적 변화로 가정하였다.

그러나 Fig. 9와 Bumpus⁽¹⁷⁾의 결과처럼 담수 유입량과 교체시간은 비선형적 관계를 유지하고 있다. 또 이들의 값은 해당만의 체적, 해안선의 형태 및 수심 등으로 다르게 나타남을 알 수 있다.

4. 要約 및 結論

항만에서 담수의 체류 또는 교체시간의 추정은 오염물질의 총체적 규제와 수질개선을 위한 가장 중요한 결정요소이다. 이를 위해 만내의 담수 존재량(총량)과 하천의 담수유입량에 대한 계산방법은 다양하게 전개되었다.

기존의 계산방법은 만구에서의 장기관측을 통한 순 용적수송량, 주파수 응답곡선의 변동, 혼합장 이론의 도입 등으로 담수 존재량과 담수 유입량을 구하였다.

본 연구는, 측정곤란한 소하천이 많고 조석잔차와 바람응력 성분이 제거되기 어려운 1조석 주기의 만구관측과 하천 유역의 강우량을 자료로 한 SCS의 유효강수량 계산법을 도입하여, 담수 교체시간을 추정하였다.

여름철 마산만에서 CN법으로 계산된 담수 교체시간은, 완전 혼합을 가정하여 32.83%의 외해염분을 적용하면 갈수기와 홍수기 평균 10.9일이며, 외해수염분을 33%로 적용하면 평균 15.3일로 추산된다. 이들 값들은 10.9~15.3일로 분포하여 남⁽⁶⁾의 NVT에 의한 평균 교체시간 13.9일에 상당히 근접된 결과이다.

또 성층된 경우 2층모델에 적용하면 홍수기의 만구에서 교체시간은 1.2일로 추정되어 완전 혼합 모델에서 얻은 2.1일보다 작은 값이다. 이것은 홍수기에 유입된 담수가 대부분 성층을 통하여 만외로 유출되기 때문이다.

마산만에서 얻은 담수 유입량 Q_r 와 교체시간 t 와의 상관관계는 다음과 같다.

완전 혼합인 경우 $t_1 = 228.79Q_r^{-0.9996}$,
2층 흐름인 경우 $t_2 = 131.06Q_r^{-1.0}$.

이 식들은 담수 유입량에 따라 담수 교체시간이 다른 비선형적 관계를 유지하고 있다. 이런 관계는 보스톤 내만에서 직접 측정된 Bumpus⁽¹⁷⁾의 상호상관과 근접된 형태를 보였다.

따라서 만의 흐름구조와 농도의 성층정도에 따라 달리 적용함으로써 하천유입량에 의한 담수 교체시간의 예측을 가능케 한다. 그러므로 담수 교체시간을 추정함에 있어서, SCS의 유출곡선지수법을 이용함으로써 단기관측에 의한 비용절감 효과는 물론 소하천이 많아 측정하기 곤란한 항만에 적용 가능할 것이다.

앞으로 계절적이고 지속적인 장·단기간의 유속,

염분 및 하천유입량을 동시에 실측하고, CN값을 유역현실에 적합하게 개량해야 할 것이다. 그 결과, 보다 현장에 접근된 담수 교체시간의 예측은 물론 외해수 농도의 새로운 결정법이 함께 유도될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Ketchum, B.H., "Hydrographic Factors Involved in the Dispersion of Pollutants introduced into Tidal Waters", *J. Boston Soc. Civil Engrs.*, 37, 1950, pp. 296-314.
2. Ketchum, B.H., "The Exchanges of Fresh and Salt Waters in Tidal Estuaries", *J. Mar. Res.*, 10, 1951, pp. 18-38.
3. Arons, A.B. and Stommel, H., "A Mixing Length Theory of Tidal Flushing", *Trans. Am. Geophys. Un.*, 32, 1951, pp. 419-421.
4. Bowden, K.F., "The Mixing Process in Tidal Estuary", *Intern. J. Air Water Pollution*, 7, 1963, pp. 343-356.
5. 남기수, "馬山灣의 淡水交替時間", 해양연구소보, 제 4권, 1982, pp. 1-10.
6. Yanagi, T. and Ohba, T., "Frequency Response of Fresh Water Content in Shelf Water", *La Mer*, 24, 1986, pp. 3-10.
7. 柳哲雄, 高橋曉, "大阪灣의 淡水應答特性", 海と空, 第 64卷, 第 2號, 1988, pp. 63-70.
8. United States Department of Agriculture, National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, 1972, p. 527, Soil Conservation Service, Washington, D.C.
9. Hawkins, R.H., "Runoff Curve Number with Varying Site Moisture", *J. Irriga. and Drainage Div., Am. Soc. Civil Engineers*, 104, 1978, pp. 389-398.
10. Hope, A.S. and Schulze, R.E., "Improved Estimates of Stormflow Volume using the SCS Curve Number Method", *Rainfall-Runoff Relationship*, Ed. by V.P. Singh, Water Resources Publications, Colorado, 1982, pp. 419-430.
11. Nakamura, S., "Applied Numerical Methods with Software", Prentice-Hall, 1991, pp. 540-548.
12. 수산진흥원, 한국 연안어장 보전을 위한 환경오염 조사연구, 제 84호, 1989, pp. 222-223.
13. 수산진흥원, 한국 연안어장 보전을 위한 환경오염 조사연구, 제 58호, 1983, pp. 148-150.
14. 김종화, "폐쇄성 内灣에 있어서 物質分散에 미치는 支配的 要因", 부산대학교 대학원 박사학위논문, 1993, p. 104.
15. 기상청, 1992년 7월의 기상월보, p. 19.
16. 김종화, 이문옥, 강주복, "馬山灣의 오염물질 輸送에 미치는 바람效果", 한국어업기술학회지, 제 28권, 제 4호, 1992, pp. 385-397.
17. Bumpus, D.F., Unpublished Records from Wood Hole Oceanographic Institution Files, Quoted by B.H. Ketchum, "Circulation in Estuaries", Coastal Engineering, Contributed No. 642 from Woods Hole Oceanographic Institution, 1953, pp. 65-76.
(接受: 1994. 5. 13)