

## 음향도플러유속계(ADP)를 이용한 부유사 농도 관측 Observation of suspended sediment concentration profiles from ADP

오병철<sup>1</sup>, 추용식<sup>1</sup>, 정병순<sup>2</sup>

Bungcheol Oh<sup>1</sup>, Yongshik Chu<sup>1</sup>, and Byungsoon Jung<sup>2</sup>

### 1. 서 론

ADP(Acoustic Current Profiler)는 수중에서 음파를 발사하여 해수와 함께 이동하는 부유입자에 의하여 반사되는 음향의 Doppler 효과를 이용하여 여러 개의 수층에서 유속과 유향을 측정하는 장비이다. Doppler 효과에 의한 반사음향의 주파수 차이가 부유입자의 속도에 따라 달라지는 것을 이용하여 해수의 흐름을 관측할 수 있다. 이때, 해수중의 부유입자 농도가 진하면 수신기에 도달하는 반사음향의 세기가 강하게 되므로 반사음향의 강도로부터 부유퇴적물의 농도를 측정할 수 있게 된다. 따라서, ADP에 수신되는 음향의 Doppler 천이와 강도를 이용하여 유속과 유향의 연직분포뿐만 아니라 부유퇴적물 농도의 연직분포도 관측이 가능하게 된다. 또한, 부유퇴적물의 플럭스 계산도 가능해진다.

기존에는 부유사 농도 변화 및 부유물질의 이동 플럭스를 평가하기 위하여 고정된 한 정점에서 13시간 또는 25시간 동안 유속관측과 부유퇴적물 농도측정을 위한 해수채집을 실시하였지만, ADP를 사용하면 훨씬 수월하게 장기간에 걸친 부유퇴적물의 이동양상을 파악할 수 있다. 최근에는 ADP 장비를 이용하여 유속관측뿐만 아니라 부유퇴적물의 연구에도 많이 활용하고 있는 추세이다(Tuban and Corson, 2000, 해양수산부 2001).

부유퇴적물에 의한 음향의 산란강도는 부유퇴적물의 특성에 따라 크게 변화하므로 관측할 때마다 해수를 채수하여 부유퇴적물 농도와 음향강도 사이의

상관관계를 검증한 후 자료해석에 사용하여야 한다.

본 연구에서는 영광해역에서 현장관측한 자료를 이용하여 ADP에서 방사되는 음파의 음향계수를 정한 후 이론 식인 부유사 농도식에 적용하여 실측치와 비교·검토 한다.

### 2. 음향계수 해석

ADP에서 방사되는 음파신호는 부유퇴적물, 해수면(해저면에 계류한 경우) 또는 해저면(선박 부착의 경우)에 산란(반사)되어 일부가 수신기로 되돌아온다. 반사음향이 생기는 원인은 해수중에 부유퇴적물, 플랑크톤 등이 음파에 대한 반사체 역할을 하기 때문이다. 음파의 산란강도는 빔의 퍼짐(*beam spreading*), 해수의 흡수(*water absorption*), 입자에 의한 감쇠(*particle attenuation*), 송신출력 및 산란계수 등 여러 가지 요인에 의하여 결정된다.

해수의 체산란강도(*water-mass volume backscattering strength*)와 부유퇴적물의 농도는 다음과 같은 관계를 갖는 것으로 알려져 있다(Thevenot and Kraus, 1993).

$$S_v = 10 \log_{10}(\sum_i n_i \sigma_i) + 10 \log_{10} \frac{C}{C_0} \quad (1)$$

여기서,  $n_i$ 는 부유입자의 입도분포에서 계급  $i$ 에 해당하는 부유입자의 수,  $\sigma_i$ 는 계급  $i$ 의 단일입자의 산란단면적,  $C$ 는 부유퇴적물의 농도( $\text{mg/l}$ )이며,  $C_0$ 는

<sup>1</sup> 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan, Seoul 425-600, Korea)

<sup>2</sup> 국민대학교 건설시스템공학부 (School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University, Seoul, 136-702, Korea)

부유퇴적물의 입자 크기의 변화 폭은 크지 않으므로 위의 식에서  $n_i$ 와  $\sigma_i$ 는 상수로 취급할 수 있다.

산란강도와 체산란강도 사이에는 다음 식과 같은 관계가 성립한다(Gordon, 1996).

$$E_{11} = \frac{1}{\beta}(S_L + S_v) - E_{12} \quad (2)$$

여기서,  $E_{11}$ 은 ADP로부터 얻어지는 음파산란 신호 강도(counts),  $E_{12}$ 는 음파 빔의 퍼짐과 해수의 흡수 등에 의한 음파 강도의 손실,  $\beta$ 는 부유퇴적물의 입자 크기와 관련된 상수,  $S_L$ 은 음파 송신강도(dB), 그리고  $S_v$ 는 해수의 체산란강도(dB)를 의미한다. 특히, (2)식에서  $E_i = E_{11} + E_{12}$ 를 거리 보정된 음향강도(range normalized echo intensity)라한다. 식(1)과 식(2)를 정리하면 다음의 식(3)과 식(4)가 된다.

$$\log_{10} C = K + 0.1\beta E_i \quad (3)$$

$$K = \log_{10} \left( \frac{C_0}{\sum_i n_i \sigma_i} \right) - 0.1S_L \quad (4)$$

또한, 거리 보정된 음향강도는 다음 식으로 표현된다(Nortek AS, 2001).

$$E_i = kE_A + 20\log_{10} R + 2\alpha_w R \quad (5)$$

여기서,  $k = 0.43\text{dB/count}$ ,  $E_A$ 는 ADP로부터 읽은 산란강도(counts),  $R$ 은 음파 빔을 따르는 거리(range),  $\alpha_w$ 는 물의 흡수계수(dB/m)이다.  $R$ 은 측정 기기에 따라 다를 수 있으며, 본 연구에서 사용한 Sontek ADP의 음원과 농도 측정 위치(cell)과의 거리( $R$ )는 아래의 식으로 계산된다.

$$R = \frac{H_0 - H}{\cos 25^\circ} \quad (6)$$

여기서,  $H_0$ 는 수면과 음원의 연직거리,  $H$ 는 수면으로부터 농도관측점까지의 연직거리를 의미한다. 그러므로 해수를 채수하여 구한 부유퇴적물 농도를 구하면 식(3), 식(5) 및 식(6)으로부터 음향계수  $K$ 와  $\beta$ 를 최소자승법으로 구할 수 있다.

한편, 물의 음파흡수계수는 Fig. 1.에서 보는 바와 같이 주파수가 증가함에 따라 커지며 해수의 염분

도가 클수록 커지는 성질이 있다. 본 연구에서 이용한 Sontek의 ADP는 음원의 주파수가 1MHz이므로 이에 해당하는 해수의 흡수계수는  $\alpha_w = 0.32\text{dB/m}$ 를 사용한다.

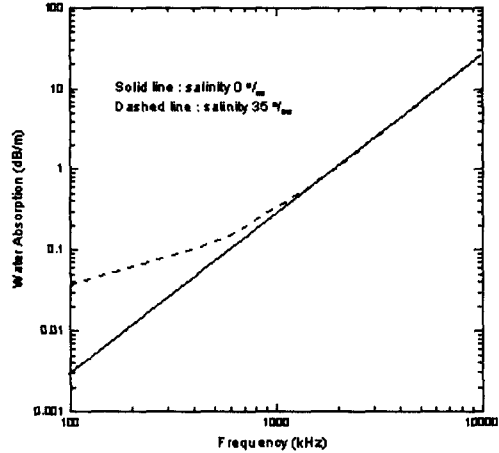


Fig. 1. 음파의 주파수에 따른 물의 흡수계수 ( $\alpha_w$ ).

### 3. ADP 관측 및 계수 결정

본 실험의 대상 해역은 Fig. 2.의 영광 해역의 수심 8.5m 지점(G3 지점)으로 Sontek사의 ADP를 해저면에 계류하여 2002년 01월 26일 13시 00분부터 2002년 02월 02일 12시 10분까지 10분 간격으로 8일간 유속과 부유퇴적물 농도를 관측하였다. ADP Transducer의 위치는 해저면으로부터 0.5m, 관측 수심간격은 0.5m로 설정하였으며 ADP가 유속을 측정할 수 없는 구간(blank distance)은 0.5m이다. 그러므로, 해저면상 1.5m 지점이 관측의 시작점이 된다.

Fig. 3.은 영광 해역에서 ADP를 계류하여 관측한 음파 산란강도와 같은 지점에서 중층에서 25회 해수를 채수하여 측정된 부유퇴적물의 농도를 식(3)의 관계를 이용하여 회귀분석한 결과를 나타낸 것이며, 회귀식은 다음과 같다.

$$\log_{10} C = -0.7362 + 0.04453E_i \quad (n=25, R=0.7) \quad (7)$$

위의 Fig. 3.에서 직선은 식(3)을 나타내며, 위와 아래에 있는 두 개의 꼭선은 99% 신뢰구간이다. Dot는 부유퇴적물의 농도를 나타낸 것이다. 식(7)과 식(3)을 비교하면  $K = -0.7362$ ,  $\beta = 0.4453$ 임을 알 수 있다. 위의 계산된 음향계수를 이용하여 관측된 자료들을 보정하여 부유사 농도를 구한다.

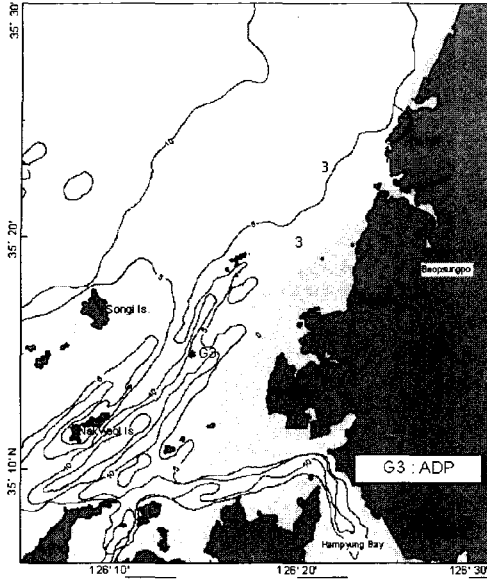


Fig. 2. ADP 관측 위치도.

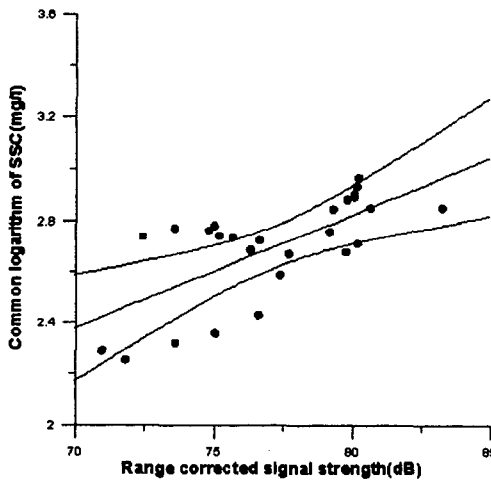


Fig. 3. ADP 음파 산란강도와 부유퇴적물 농도의 관계.

#### 4. 관측 결과

부유물질 농도에 관한 이론 분포식은 정상상태의 충분히 발달된 흐름조건과 포물선-상수형의 혼합형 난류 확산계수의 가정하에 도출된 것으로 아래의 식으로 표현된다(van Rijn, 1993).

$$\frac{C}{C_a} = \begin{cases} \left( \frac{h-z}{z} \frac{a}{h-a} \right)^{S_n}, & \frac{z}{h} < 0.5 \\ \left( \frac{a}{h-a} \right)^{S_n} e^{-4.5 \left( \frac{z}{h} - \frac{1}{2} \right)}, & \frac{z}{h} \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

$$S_n = w_s / \beta \kappa u. \quad (9)$$

여기서,  $C$ 는 농도,  $C_a$ 는  $z=a$ 에서의 기준 농도,  $h$ 는 수심,  $w_s$ 는 침강속도,  $\beta$ 는 수립자와 부유사와의 확산 차이에 대한 계수,  $\kappa$ 는 von Karman의 상수(=0.4),  $u$ 는 저면의 마찰속도이며,  $S_n$ 은 부유계수(suspension number)로서 부유입자의 침강속도와 마찰속도에 의해 결정된다.

Fig. 4는 부유물질 농도의 전형적인 연직분포를 나타낸다. 이 그림에서 실선은 식(8)을 나타낸 것으로 현장에서 얻은 관측치와 잘 일치한다.

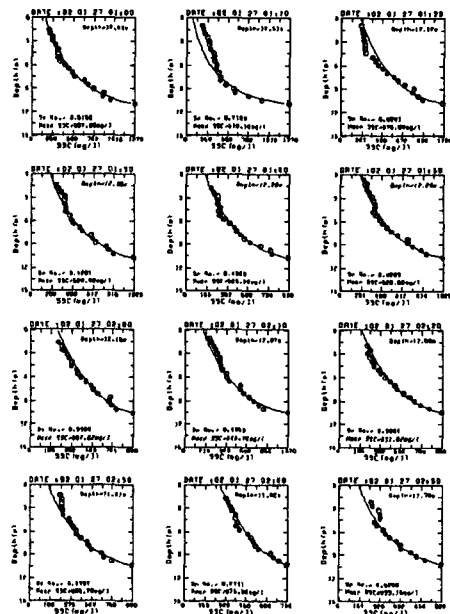


Fig. 4. 관측 부유퇴적물 농도분포와 이론분포의 비교.

그림에서 부유계수가 작으면 부유사 농도는 균일 분포에 가까워짐을 알 수 있다. 관측한 부유사 농도 분포결과로부터 구한 부유계수는 전체적으로는 0.1~1.1 범위로 나타났으며, 대부분 0.4~0.6 범위에 분포하는 것으로 나타났다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 영광 해역을 대상으로 한 정점에서 관측한 ADP 결과를 이용하여 부유사 농도 변화를 얻어내었다.

이론식(8)에서 제시된 부유물질 농도의 연직분포 곡선의 검증은 앞으로도 여러 장소에서 이루어져야 할 필요가 있지만, 전반적으로 관측결과와 이론치

## 5. 결 론

본 연구에서는 영광 해역을 대상으로 한 정점에서 관측한 ADP 결과를 이용하여 부유사 농도 변화를 얻어내었다.

이론식 (8)에서 제시된 부유물질 농도의 연직분포 곡선의 검증은 앞으로도 여러 장소에서 이루어져야 할 필요가 있지만, 전반적으로 관측결과와 이론치가 잘 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 4.는 여러 가지 제약조건으로 단순화된 상황에서 유도된 농도분포 이론식이 현장 상황에 충분히 실용적으로 적용할 수 있음을 보여주고 있다고 사료된다

앞으로 이와 같은 방법을 이용하면 시간 및 인력에 제약없이 연속적인 연직 부유사 농도 변화를 파악할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 해양수산부, 2001. 부유토사발생량평가 및 오탁방지 막 효율에 관한 연구용역(Ⅱ) : 266.
- Gordon, R.L., 1996. Acoustic Doppler Currents Profilers Principles of Operation: a Practical Primer(second edition for Broad Band ADCPs), *RD Instruments*, 98 55 Businesspark Ave. San Diego, California 92131 USA, pp. 29~32.
- Nortek AS, 2001. Monitoring sediment concentration with acoustic backscattering instruments, *Nortek Technical Note*, No. 003, p. 5
- Tubman, M.W. and Corson, W.D., 2000. Acoustic monitoring of dredging-related suspended sediment plumes, ERDC TN-DOER-E7, *U.S. Army Eng.*, WES, Vicksburg, MS.
- Thevenot, M.M. and Kraus, N.C., 1993. Comparison of acoustical and optical measurements of suspended material in the Chesapeake Estuary, *J. Mar. Environ. Eng.*, Vol. 1, pp. 65~79.
- van Rijn, L.C., 1993. Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, *Univ. of Utrecht*.