감조하천의 소류사의 이동으로 인한 하상변동
Bed topography due to bed load transport in tidal river

이 정 규*
Lee, Jong-Kyu

1. 서 론

감조하천이 일반하천과 현저하게 다른 특징은 하천이 해수와 접하고 있기 때문에 **河川水理量**이 시간에 따라 변하는 **不定流**의 특성을 갖는다. 특히 조차가 큰 경우에는 하천류가 조석의 영향을 받아 밀물때는 역류가 일어나서 일부 하천구간에서는 **反轉流**(reversing flow)가 생길 수 있다. 한강과 금강의 하구부에서는 실제로 반전류가 하구로부터 상당한 거리까지 발생하고 있다. 따라서 이와 같은 **反轉流**가 생기는 구간에서는 **掃流砂**의 이동특성도 일방향흐름으로만 일어나는 대부분의 하천에서와는 다를 것으로 생각된다.

하천의 감조구간에서 일어나는 수리현상은 크게 나누어 조석의 영향을 받아 하천류의 특성이 변하는 **不定流現象**과 이에 따르는 하상의 지형변동현상이라고 볼 수 있다.

감조구간의 하상변동에 관한 연구는 주로 현지의 관측자료를 이용하는 것이 보통이다[최병호(1986), Suga, et al.(1987), Sawamoto, et al.(1987)]. 아직까지는 감조구간의 지형변동을 예측할 수 있는 모형은 개발되어 있지 않은 것 같다.

하천의 곡선구간에서 일어나는 하상변동에 관한 연구는 곡류부의 하상변동예측모형과 횡방향 하상경사를 구하는 식들이 발표되었다[Kikkawa, et al.(1976), Zimmerman and Kennedy(1978), Shimizu and Itakura(1989), Yen and Ho(1990)].

이들의 연구는 모두가 유량이 일정한 **定常流**에 대한 것이기 때문에 곡류부의 흐름이 부정류이거나 감조구간과 같이 반전류가 일어나는 구간에는 이 모형을 그대로 적용할 수는 없을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 감조구간에서 이동상 수리실험을 실시하여 하천곡류부에서 횡방향하상단면과의 관계를 검토하였으며 하상변동에 어떤 영향이 미치는가를 연구하였다.

2. 곡류부의 하상변동이론

하천의 곡류부에서는 원심력이 작용하기 때문에 흐름의 **機構**가 직선수로와는 아주 다른 특성을 가진다. 일반적으로 그림 1과 같이 곡류부흐름을 지배하는 힘은 연직방향유속분포의 불균등성으로 생기는 원심력과 전단응력 및 횡방향수면경사에 의하여 발생하는 반경방향압력경사이다. 이와 같은 지배력으로 인하여 곡류부에서 나선형흐름이 발생하게 되고 횡방향하상경사도 일어난다. 다시 말하면 수로와 유선의 곡률때문에 유체에 작용하는 단위질량당 원심력은 하상으로부터 윗쪽으로 증가하며 수면가까이에서 최대가 된다. 그 결과 하층부에 있는 유체는 내측하안쪽으로 이동하게 된다. 따라서 유체는 곡선수로를 흐를 때 2차류가 발생된다.

이송된 토사농도가 높은 하상부근에서는 2차류가 토사를 곡선수로의 내측으로 이동시키며 수로의 내측가까이에 그중의 일부가 퇴적된다. 반면에 외측하안이나 하상은 흐름의 상층부에 있는 토사함량이 적은 유체에 의하여 침식되기 쉬워서 세굴이 일어나게 된다. 따라서 곡선수로에서는 이동상 하상일 때는 횡방향경사를 이루게 된다[Odgaard(1984)].

---

* 한양대학교 토목공학과 교수

2.1 횡방향 하상경사이론

2.1.1 입자평형모형

하상이 평형상태일 때는 그림 2와 같이 하상을 따라 이동하는 입자에 작용하는 힘은 평형상태에 있다는 가정하에 식을 유도하였다[Ikeda(1974), Engelund(1974), Kikkawa, et al.(1976), Falcon and Kennedy(1983)].

즉 경사진 평형하상위에 있는 입자에 작용하는 유체항력의 반경방향평면성분(하상에 평행) F_r은 水中입자중량 W_s와 같다.

$$F_r = W_s \sin\beta \tag{1}$$

여기서 $\sin\beta$는 하상면의 횡방향경사이다.

식(1)에서 F_r은 경험과 가정에 의하여 결정될 수 있으며 연구자에 따라 계수만이 약간 다른 식들이 식(2)의 형태로 유도된다.

$$\sin\beta = K\frac{d}{r} \tag{2}$$

여기서 K는 계수, d는 수심이다.

2.1.2 Odgaard모형

Odgaard는 횡방향하상경사와 하상면특성과를 관련시켜 경사식을 유도하였다[Odgaard(1981, 1982,1984)]. 평형상태일 때 하상구성입자는 반경방향과 종방향으로 정역학적으로 안정상태이면서 종방향으로 한계운동상태(impending motion)에 있다고 가정하였다. 즉 하상구성입자의 크기는 입자가 종방향으로 지지점을 중심으로 막 회전하려고 하는 상태의 입자의 크기와 같은 것이다.

그림 3은 이러한 상태의 입자에 작용하는 힘을 나타낸 개념도이다. 한개의 입자에 작용하는 중력, 양력 및 항력의 지지점에 관한 모멘트를 등식으로 놓으면 한계하상전단응력(편평한 하상) τ_{cr}은 다음과 같다.

$$\tau_{cr} = \theta(\rho_s - \rho) g D_{cr} \tag{3}$$

여기서, θ : Shields 매개변수
D_{cr} : 한계상태인 입자의 직경
ρ_s : 토사입자의 밀도
ρ : 물의 밀도
g : 중력가속도

Odgaard(1984)는 Darcy-Weisbach관계식과 반경방향하상응력 및 반경방향의 수면경사가 일정하다는 가정하에서 횡방향하상경사를 구하는 다음식을 유도하였다.

$$\frac{d}{d_c} = \left[1 + 4.8 F_{Dcr}\sqrt{\theta}\sqrt{\frac{r_c}{r} - 1}\right]^{-2} \tag{4}$$

여기서, D_c : 단면의 중심선상의 수심
r_c : 단면의 중심선의 반경
F_{Dcr} : D_{cr}에 대한 입자푸르드수$\left(= \dfrac{V}{\sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right) g D_{cr}}}\right)$
V : 평균유속

식(4)는 하천의 水理조건이 주어지면 곡선수로의 횡방향단면형상을 구하는 식이다.

지금까지의 유사나 하상형상에 관한 연구는 정상상태를 대상으로 하였기 때문에 감조하천과 같이 하천류가 부정류일때 적용할 수 있는 유사량공식이나 횡방향경사를 구하는 모형은 거의 없다.

3. 수리실험

3.1 실험장치

실험장치는 그림 4와 같으며 길이 40m, 폭 18m, 깊이 0.7m의 조류실험모형을 개조하여 이용하였으며 모형의 일단에 웨어형 조석발생장치가 설치되어 있는데 주요제원은 다음과 같다[상세한 것은 건설부(1991) 참조].

웨어의 범위 : 최고 M.S.L. +10.0 cm
최저 M.S.L. -18.5 cm
웨어의 최대수직변위속도 : 1.13 mm/s
급수량 : 500 ℓ/s
웨어제어용 수위측정기(진동침식) 측정범위 : 12 cm
정도 : 0.1 cm

하천류는 급수수조를 이용하여 공급한다. 해수역과 하천수역의 비는 체적으로 약 1:500정도이다. 실험수조는 폭 40cm, 길이 320cm의 곡선수로를 설치하였다.

3.2 실험방법

실험은 곡선수로에서 고정상과 이동상 실험을 실시하였으며 이동상 실험때는 수로바닥에 5cm 깊이로 실험사를 깔았다. 수리실험은 하천류만 있는 경우, 조석류만 있는 경우, 하천류와 조석류가 공존하는 경우로 나누어 실시하였다. 실험사는 곡선수로에 d_{50}=0.15mm의 규사와 0.21mm의 자연사 2가지의 경우에 대하여 실시하였다. 이동상 실험은 조석의 1주기를 6분으로 하여 10주기에 해당하는 60분동안 실시한 후 하상의 변동량을 측정하였다. 하상변동의 측정지점은 곡선수로에서 약 50cm 간격을 가진 17개 단면으로 나누어 각 단면마다 3~5개 지점에서 하상횡단면을 측정하였다. 하천유량은 4.32ℓ/s로 일정하게 공급하였고 수위측정은 용량식 수위계를 측점에 설치하고 기록계에 연결하여 기록하였으며 유속은 각 측점의 바닥에서 1.5cm되는 위치에서 전자식 유속계로 측정하였다.

4. 실험결과의 고찰

곡선수로에 대한 이동상 수로바닥의 횡방향 하상변동에 관한 검토는 실측단면의 형상을 이론적인 계산단면과 비교하여 보았다. 단면계산은 완전히 발달된 곡류부에 대하여 유도된 식(4)를 이용하여 구하였다. 식(4)에 대입하는 값으로는 원칙적으로 이동상 수로에서 측정된 값을 사용하는 것이 좋지만 본 실험의 경우에 많은 지점에서 유속과 수심을 이동상 수로에서 측정하는데 많은 제약이 있었기 때문에 여기서는 근사적으로 유속은 고정상 곡선수로에서 측정된 평균유속을, 모래의 비중은 2.65, 중앙점의 수심은 곡선수로의 단면 ④의 중앙점에서 측정한 실험종류별 수심의 평균치를 취하였다.

여기서 채택된 단면은 수로의 양끝의 영향이 크게 미치지 않을 것으로 생각되는 ③,④,⑤ 단면을 선정하였다. 선정된 단면에 대하여 단면형상을 계산에 의하여 구했으며 실측단면과 비교하였다. 그림 5와 6은 하천류에 대하여 입경별로 실측단면과 계산단면을 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 입경에 관계없이 실측단면과 계산단면이 잘 일치하지 않고 있다. 이것은 곡선수로에서 실험시간이 짧아서 하상이 평형상태에 이르지 못한 것으로 생각되며 또한 유속이 느려서 곡선수로의 구간에서 완전발달곡류(fully developed bend flow)가 제대로 형성되지 않았기 때문으로 생각된다.

Odgaard(1984)의 실험에서는 곡선수로의 중심각이 180°인 경우에 곡선수로의 시점에서 흐름방향을 따라 만곡각이 19°인 단면에서 계산단면과 잘 일치한 것(이때 유속은 0.475m/s이었다)과는 큰 차이가 난다.

다음에 조석류에 대하여 입경별로 실측치와 계산치를 비교한 것이 그림 7과 8이다. 조석류의 경우에는 하천류에 비하여 실측치와 계산치가 상당히 일치하는 경향을 보여주고 있다. d_{50}이 0.21mm일 때보다 0.15mm인 경우에 더 잘 일치하는 경향이 강하게 나타났다. 이것은 조석류의 유

속이 하천류의 유속보다 훨씬크기 때문에 곡선수로내의 흐름이 완전발달곡류에 가깝게 형성된 것으로 생각되지만 0.21mm인 경우에 차이가 크게 나타나는 것은 실험시간이 부족한 것으로 생각된다.

끝으로 하천과 조석이 공존하는 경우에 실험치와 계산치를 비교한 것이 그림 9와 10이다. 이 때는 앞의 두 경우와는 달리 단면 ③에서는 차이가 있으나 단면 ④와 ⑤에서는 실험치와 계산치가 아주 잘 일치하고 있다. 특히 d_{50}가 0.15mm인 규사가 0.21mm인 자연사 보다 더 잘 일치하고 있다. 이것은 하천과 조석이 공존하는 경우에 유속이 크고 유사이동량이 많기 때문에 빨리 횡방향 하상으로 평형상태에 도달한 것으로 생각되며 단면 ④의 만곡각이 약 18°로 Odgaard (1984)의 실험치와 거의 일치한다.

5. 결 론

감조하천에 대한 이동상수리실험을 통하여 곡선수로에서 발생되는 횡방향하상변동특성을 Odgaard의 이론식과 비교검토하였다.

곡선수로의 횡방향하상경사는 Odgaard모형과 비교해볼 때 본 실험에서는 하천류와 조석류가 공존할 때 아주 잘 일치하였으나 조석류만 있을 때는 어느 정도 일치하는 경향을 보였고, 하천류만 있을 때는 일치하는 정도가 낮았다.

하천류의 실험에서는 유속이 느리고 소류력이 작아서 하상모래의 이동량이 많지 않았고 실험시간이 충분히 길지 않아서 평형상태에 이르지 못했기 때문이 아닌가 생각된다.

감조하천의 곡류부의 외측하안에서 세굴이 특히 심하게 나타나는 경향을 보여주기 때문에 외측하안에 세굴방지를 위한 보호공이 필요할 것으로 생각된다.

6. 참고문헌

1. Engelund, F.(1974), "Flow and Bed Topography in Channel Bends", J. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol. 100, No. HY11, Nov.
2. Falcon, M. A. and Kennedy, J. F.(1983), "Flow in Alluvial-River Curves", J. of Fluid Mechanics, Vol. 103, Aug.
3. Ikeda, S.(1984), "On Secondary Flow and Dynamic Equilibrium of Transverse Bed Profile in Alluvial Curved Open Channel", Proc. of JSCE, No. 229
4. Kikkawa, H., Ikeda, S. and Kitagawa, A.(1976), "Flow and Bed Topography in Curved Open Channels", J. of the Hydraulics Div., ASCE, Vil. 102, NO. HY9, Sept.
5. Odgaard, A. J.(1981), "Transverse Bed Slope in Alluvial Channel Bends", J. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol. 107, No.HY12, Dec.
6. Odgaard, A. J.(1982) "Bed Characteristics in Alluvial Channel Bends", J. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol.110, No4, Apr.
7. Odgaard, A. J.(1984), "Flow and Bed Topography in Alluvial Channel Bends", J. of the Hydraulic Eng., ASCE, Vol.110., No.4, Apr.
8. Sawamoto., M., Shuto, N. and Taniguchi, T.(1987), "Topography Change Process at the Abukuma River Mouth", Proc. of JSCE, No.387, II-8
9. Shimizu, Y. and Itakura, T.(1989), "Calculation of Bed Variation in Alluvial Channels", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.115, NO.3, March
10. Suga, K., Ishikawa, T., Nadaoka, K. and Tanaka, H.(1987), "Formation of Sand Terrace on Front of a River Mouth and its Decline", Proc. of JSCE, NO.381, II-7
11. Yen, C. and Ho, S.(1990), "Bed Evolution in Channel Bends", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol.116, No.4, Apr.
12. Zimmermann, C. and Kennedy, J. F.(1978), "Transverse Bed Slopes in Curved Alluvial Streams", J. of the Hydraulics Div., ASCE, Vol.104, NO.HY1, Jan.
13. 최병호(1986), "錦江河口 潮間帶 砂州의 變遷過程", 항만, Vol.10, No.3
14. 건설부(1991), "III.감조하천의 소류사의 변동특성연구", 국제수문개발계획 연구보고서

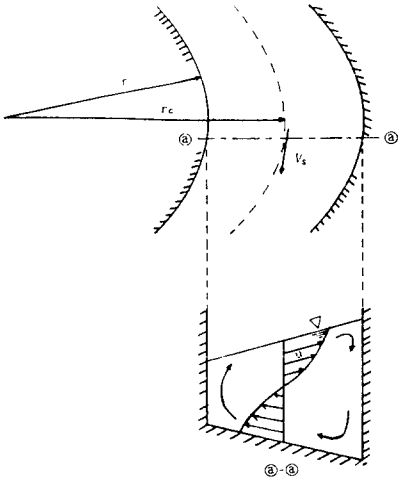

그림 1. 곡류부의 흐름의 개념도

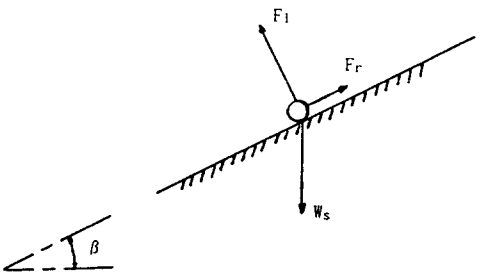

그림 2. 토사입자에 작용하는 힘의 반경방향 평면성분

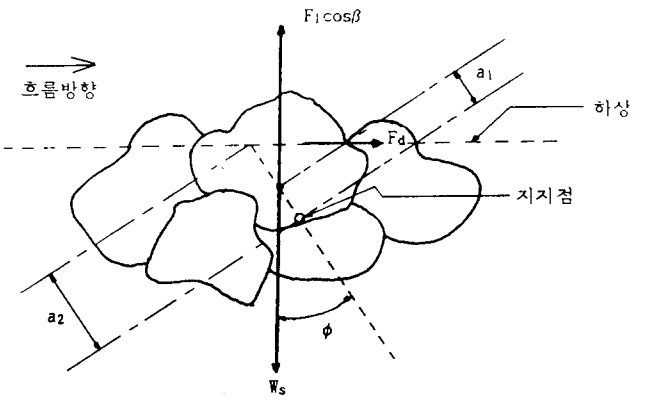

그림 3. 토사입자에 작용하는 힘의 종방향 수직평면성분

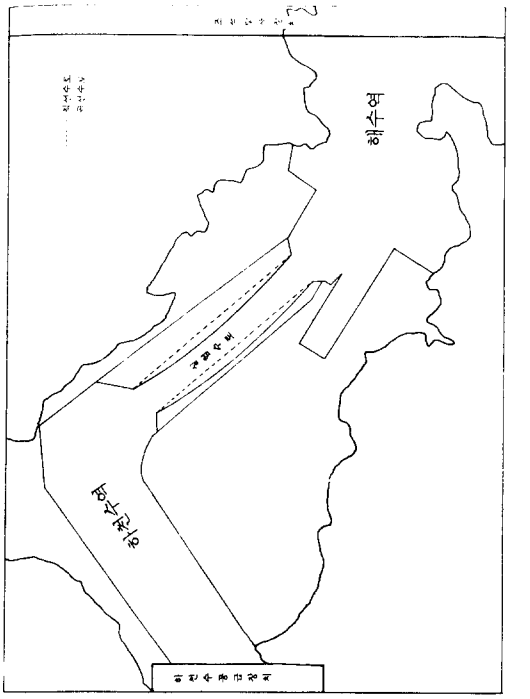

그림 4-1. 수리실험 배치도

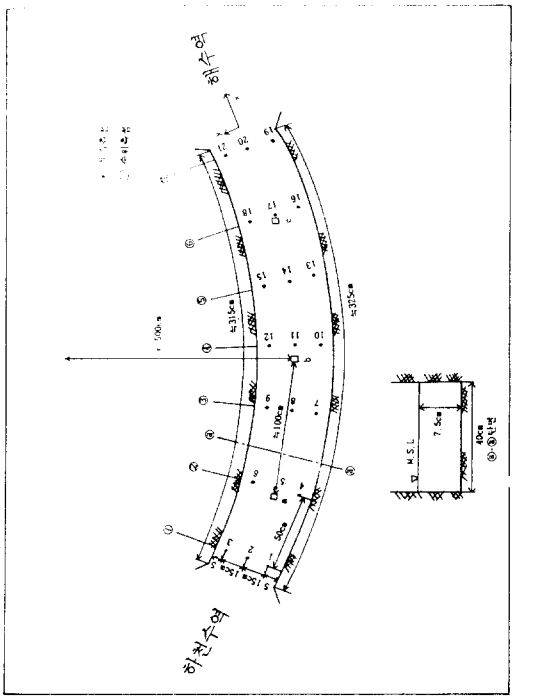

그림 4-2. 곡선수로의 상세도

그림 5. 하천류에 의한 실측단면과 계산단면 (d_{50}=0.15mm)

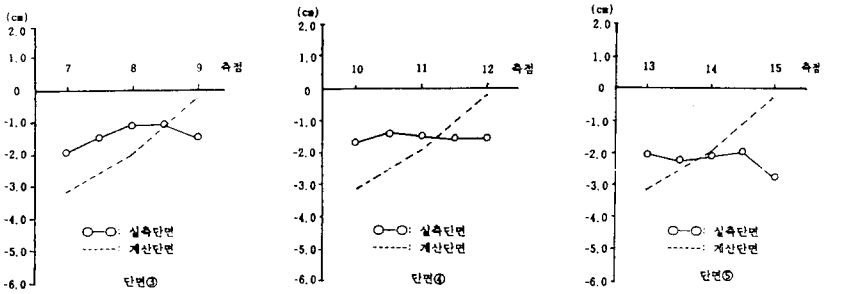

그림 6. 하천류에 의한 실측단면과 계산단면 (d_{50}=0.21mm)

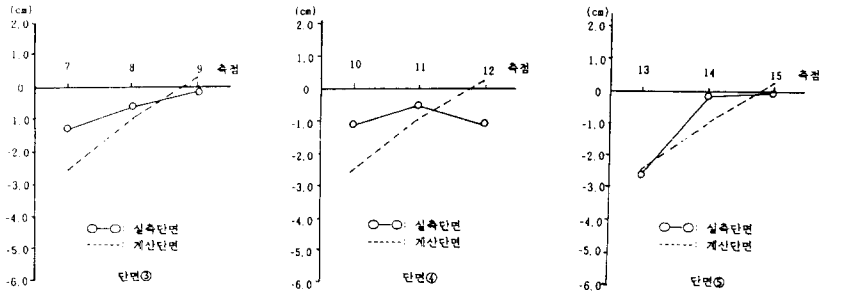

그림 7. 조석류에 의한 실측단면과 계산단면 (d_{50}=0.15mm)

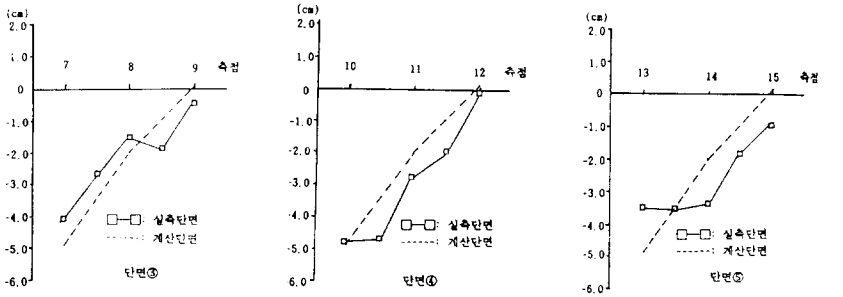

그림 8. 조석류에 의한 실측단면과 계산단면 (d_{50}=0.21mm)

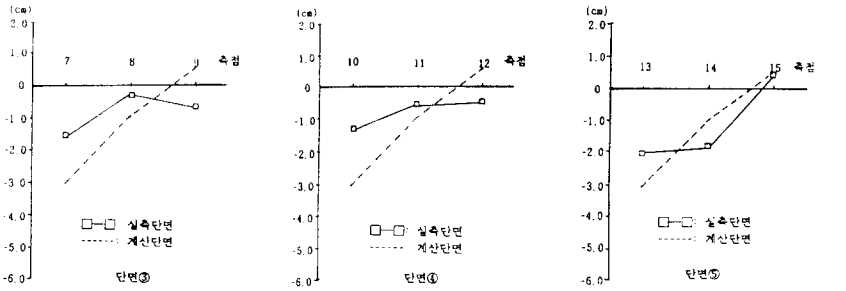

그림 9. 하천류+조석류에 의한 실측단면과 계산단면 (d_{50}=0.15mm)

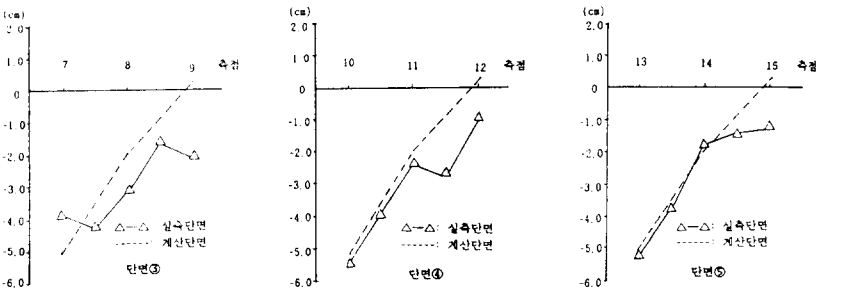
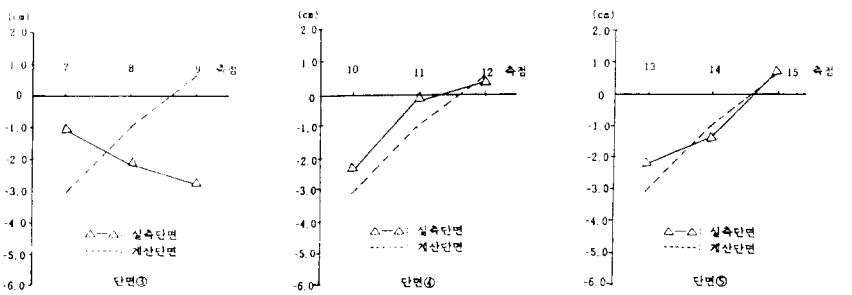
그림 10. 하천류+조석류에 의한 실측단면과 계산단면 (d_{50}=0.21mm)