

만곡수로에서 하상재료 변화에 따른 흐름과 하상변동 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Characteristics of Flow and Bed Topography with Changing Bed Material in a Curved Channel

정재욱* / 윤세익**

Jung, Jae Wook / Yoon, Sei Eui

Abstract

The objective of this study is to analyze the characteristics of flow and bed topography with changing bed material in a 180-degree, with constant-radius curved experimental channel. Sand($D_{50} = 0.56$ mm, $S = 2.65$) and anthracite($D_{50} = 0.26$ mm, $S = 1.54$) were selected as bed materials. The maximum scour depth was found to be about two times for the mean flow depth at the outer bank of bend angle $30^\circ \sim 60^\circ$, and in case of anthracite, it was found upper part of bend angle $5^\circ \sim 15^\circ$ than that of sand. Regardless of bed materials the path of maximum streamwise velocity is skewed inwards in the upper part of the bend, the maximum velocity shifts outwards, and it lagged downward as bed roughness increases. The maximum skewed angle of flow grows faster in the smooth bottom than in the rough one, and its value also increases. The secondary flow in anthracite bottom was measured larger than that of sand one, and two cells of secondary flow was found in this experiment.

Keywords : curved channel, bed material, maximum scour depth, secondary flow, the skewed angle of the flow

요 지

본 연구에서는 치수 및 이수에 있어서 항상 어려움을 겪고 있는 개수로 만곡구간에서 하상재료의 변화에 따른 흐름 및 하상변동 특성을 분석하기 위하여 중심각 180° 인 만곡수로를 제작하고, 모래($D_{50} = 0.56$ mm, $S = 2.65$)와 안트라사이트($D_{50} = 0.26$ mm, $S = 1.54$)를 하상재료로 선택하여 실험을 실시하였다. 실험 결과, 최대 세굴심은 만곡각 $30^\circ \sim 60^\circ$ 외측제방부근에서 평균수심의 약 2배까지 실측되었으며, 최대세굴심의 발생위치는 안트라사이트인 경우에 모래에서보다 $5^\circ \sim 15^\circ$ 정도 상류부에서 관측되었다. 종단면 최대유속선은 하상재료와 관계 없이 내측에서 외측으로 편이되고 있으며, 하상이 거칠수록 하류로 이동하였다. 하상이 매끄러울수록 흐름의 최대 편의각은 만곡수로 상류부에서 발생하고 있으며, 그 크기도 증가하였다. 안트라사이트의 경우가 모래의 경우보다 2차흐름이 크게 발생하는 것으로 실측되었으며, 두 개의 핵이 존재하는 현상이 관측되었다.

핵심용어 : 만곡수로, 하상재료, 최대세굴심, 2차흐름, 유향, 흐름의 편의각

* 경기대학교 대학원 박사과정

** 경기대학교 토목공학과 교수

1. 서 론

수자원의 중요성이 증대됨에 따라 수자원 이용을 위한 하천구조물의 건설, 홍수방재를 위한 하천개수, 건설재료로서의 무분별한 골재 채취 등 하도의 안정을 위협하는 일련의 작업들이 진행되고 있다. 이로 인하여 하상이 급격히 변동하고 기존의 하천구조물이 직접, 간접적으로 피해를 입고 있으며, 과거에는 사용되지 않고 있던 만곡부 부근에서도 토지이용이 증대되고 있는 실정이다. 만곡하천에서의 하상은 흐름특성, 만곡도, 단면의 형태, 하상재료의 특성 등이 조금만 변하여도 직선수로 구간에서 보다 예민하게 변동된다. 아직까지 이와 같은 하상변동 상황을 일괄적으로 분석하는 이론이 확립되지 않고 있어서 만곡하천 구간을 설계 시공할 때에는 이론적인 근거보다도 설계자의 경험, 유사한 인접 하천의 예, 모형실험 결과 등에 의존하고 있는 실정이다.

만곡수로에 관한 최초의 실험은 나선류의 존재를 확인시킨 Thomson(Chow, 1959)으로부터 시작되며, 이 후 다양하게 전개되어 왔다. Rozovskii(1961)는 만곡부 중, 횡단면의 유속분포, 2차흐름의 생성과 소멸, 에너지 손실 등을 분석하고, 실측치와 비교함으로써 만곡수로의 흐름분석에 큰 공헌을 하였다. Yen(1970)은 중심각 90°인 만곡수로에서 차원해석으로부터 얻어진 무차원 변수들을 이용하여 하상경사와 흐름특성간의 상호관계를 분석하였으며, Hooke(1975)는 만곡수로에서 유량을 변화시키며 하상경사, 사주의 발생위치 등을 실측하여 하상전단응력과 유사량 이송에 관한 연구를 하였다. Jackson(1975)은 Wabash River의 하류부에서 4구간을 선정하여 만곡수로 형상에 따른 최대유속과 하상경사, 하상재료 입경과 사구의 관계 등의 자료를 단계적으로 측정하여 제시한 바 있으며, Bridge와 Jarvis(1976, 1977)는 수학적 모형검증을 위해 River South Esk에서 적정수위가 유지될 수 있는 기간을 택하여 유속, 2차흐름, 수면경사, 사주 발생지역에서의 유사 입경분포 등을 실측하여 하상의 전단응력분포를 분석하였다. Onishi 등(1976)은 만곡수로의 폭과 만곡의 정도가 마찰계수와 유사량에 미치는 영향을 분석하였으며, 이들은 만곡수로에서는 직선수로에서 보다 유사량의 발생률이 높으며, 만곡손실은 사주(point bar)에 영향을 받는 형상항력과도 관계가 있다고 발표한 바 있다.

De Vriend(1982)는 수심이 얇은 직사각형 만곡수

로에서의 수치모형을 개발하기 위해 만곡각 180°인 만곡수로에서 흐름방향 및 횡방향의 연직유속 분포와 2차류 강도, 수면형상 등을 실측하였고, Dietrich와 Smith(1983, 1984)는 만곡수로에서의 유사이송 및 사주의 영향을 분석하기 위하여 Muddy Creek에서 실측하였으며, 횡방향 유사이송량은 흐름방향 유사량에 비해서 약 10 % 정도의 범위를 차지하고 있다고 발표한 바 있다. Odgaard(1984)는 중심각이 180°인 만곡수로에서 흐름 및 하상변동에 관한 실험을 실시하여 흐름특성치와 하상변동 구간의 지체현상 등을 분석하였다. Parker와 Andrews(1985)는 만곡수로에서 흐름이 하상재료의 입경분포에 관한 영향을 연구하는 과정에서 Bridge와 Jarvis(1976)의 자료를 사용한 바 있으며, Ikeda 등(1987)은 만곡수로에서 하상재료의 분포 및 하상의 형상예측 모형개발을 위해 중심각이 270°인 만곡수로에서 하상재료는 모래($D_{50} = 0.95$ mm)를 사용하여 실험을 수행하였다. Bergs(1990)는 만곡수로에서 수로곡률, 사주와 세굴공, 흐름특성치들과의 관계를 얻기 위하여 중심각이 180°인 만곡수로에서 실험을 실시하였는데, 이들 실험에서 횡방향 유사이송량은 흐름방향에 비해서 약 2~4 %의 범위를 차지한다고 제시되었으며, 이는 Dietrich와 Smith(1984)의 실측결과와 비교할 때, 3~5배 작게 관측되었다. Bridge(1992)는 자연하천에서 실측된 자료(River South Esk, Muddy Creek, River Dommel 및 Hooke's laboratory)들로부터 흐름과 유사이송, 하상변동, 입자분포에 관한 모형들을 재평가 하였다. Fares와 Herbertson(1992)은 중심각이 60°인 만곡수로 외측부에 웨어가 설치된 월류수로를 제작하여 만곡부와 월류부 간의 흐름특성을 분석하였고, Jin과 Steffler(1993)는 2개의 실험자료(De Vriend, 1976; Steffler, 1984)를 근거로 하여 유한요소법을 적용, 만곡수로에서의 2차류의 흐름특성을 평가하였다. James(1994)는 여러 개의 만곡수로 실험 자료를 가지고 만곡손실에 영향을 끼치는 변수들을 예측하고 있는 다양한 방법들을 새롭게 평가한 바 있으며, Talmon 등(1995)은 횡방향 하상경사를 갖는 수로상에서 유사의 이송방향을 실험적으로 연구하였다.

국내에서는 고재용(1975)이 만곡수로에서 하상변동에 관한 연구를 시작하였으며, 송재우(1980)는 사행구간에서의 기하학적 접근을 시도하여 사행특성 인자간의 상관관계를 구명하였고, 윤세의(1986)는 부정류의 연속방정식과 운동방정식을 적용하여 만곡수로내의 유

속 및 수위분포, 최대유속선의 이동경로, 유향의 편각 등에 관하여 분석한 바 있다. 윤세의와 이종태(1990)는 운동량식과 힘의 평형원리를 이용하여 2차 흐름과 횡방향 하상경사를 계산하였으며, 정용태 등(1994)은 선형 및 지수관계식을 적용하여 횡방향 하상경사에 대한 식을 산출하였고, 송재우 등(1994)은 만곡수로에서의 기존 횡방향 하상경사 예측모형들을 연구대상 유역 만곡부와 만곡점부에 적용하여 분석하였다. 차영기와 이대철(1991)은 최대횡방향 하상경사와 유속분포에 의한 지체거리로 부터 홍수시 제방의 위험단면의 예측방법을 제안하였고, 김윤태 등(1997)은 수리모형을 통해 얻어진 횡방향 수면차의 실측값과 기존의 모형들을 비교, 분석하였으며, 정재욱 등(1997)은 만곡수로에서의 고정상 및 이동상 실험으로부터 흐름특성을 분석한 바 있지만, 만곡수로에서 하상재료의 변화에 따른 흐름 및 하상변동에 관한 특성을 실험적으로 분석한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 고정상 만곡수로에서 예비실험을 실시한 후 하상재료를 포설하여 이동상의 흐름특성을 분석하였다. 또한, 이동상 만곡하천에서의 유량 및 하상재료를 변경시키며 실험을 실시하여 그 결과를 분석함으로써 수치모형 개발시 기초자료를 제공하고, 만곡하천을 설계, 시공 및 관리시 필요한 흐름 및 하상변동 자료를 제공하는 것이 그 목적이다.

2. 실험 내용 및 방법

본 실험에서는 기초실험으로서 만곡부 고정상 실험을 먼저 실시하고 그 자료를 바탕으로 이동상 실험을 실시하였다. 수리실험은 만곡현상이 뚜렷이 파악될 수 있으며, 실무에서 비교적 안전 측면에서 검토할 수 있는 만곡각 180°인 만곡수로를 선택하였고, 유입유량은 직사각형 위어로 측정하였으며, 위어를 통과한 유량은 정류장치를 이용하여 정류시킨후 하류로 이동되도록 구성하였다. 이 실험은 국립건설시험소에 설치된 만곡수로를 이용하였으며, 실험수로의 제원은 표 1과 같다.

직선하천과는 달리 만곡하천에서는 단면의 횡방향을 따라 유속의 크기가 다르기 때문에 조도계수를 정확히

맞추기가 어렵다. 따라서 실험의 단순화를 위하여 본 류구간의 조도가 일정하다고 가정하였다. 즉, 본류 유입유량을 서서히 증가시켜 계획된 유량에 도달시키면서 수로 하류단 수문을 서서히 열어 수로내 흐름이 등류수심에 되도록 하고, 사면이 충분히 발달될 때까지 수심의 변동 상태를 계속 관찰하였다.

유량공급 방법은 실험수로 내에 시료를 20 cm의 두께로 포설한 후 수로 하류단 수문을 닫고, 미소유량을 수로 내에 공급하면서 하상재료의 공극을 물로 채운 다음, 하상표면 위로 물이 올라 오기 시작하면 유입유량을 증가시켜 실험유량에 도달하도록 조절하였다. 하상재료는 수리모형 실험시 상사법칙에 모래보다 적합하며, 모래보다 비중도 작은 안트라사이트와 하천에서 쉽게 구할 수 있는 자연사를 선택하였다.

체분석 결과 얻어진 모래의 평균입경(D_{50})은 0.56 mm, 안트라사이트는 0.26 mm 정도이며, 모래와 안트라사이트의 기하표준 편차(σ)는 각각 1.65와 2.73이다. 실험에서 관측된 수리량은 수위, 유속, 유향 등이며, 본류 만곡부를 만곡각 15°씩 13개 단면으로 구분하고, 만곡부 입구로부터 상류로, 출구로부터 하류로 하폭의 4배 정도까지 측정선을 분할하였으며(그림 1), 격점번호 No. 3에서 만곡이 시작되어 No. 15에서 끝나게 된다. 각 측정선마다 5개의 관측점을 설정하였으며, 벽면의 효과를 고려하여 벽면에 가까운 측점은 벽면으로부터 평균수심 정도를 이격시켰으며, 격점간의 간격은 30 cm이다.

각 관측점에서 수심은 3회를 측정하여 평균하였으며, 유속은 이동상 만곡수로에서의 2차흐름의 특성을 파악하기 위하여, 각 관측점마다 상대수심 구간을 설정하고, 연직유속 분포를 관측하였다. 유속측정에 사용된 계기는 2차원 유속계(모델명 : VM-201)와 3차원 유속계(모델명 : ACM-300)를 사용하였으며, 이로부터 흐름방향의 유속과 횡방향 및 연직방향의 유속을 관측할 수 있었고, 유향도 비교적 정확히 측정할 수 있었다.

유향을 육안으로 확인하기 위하여 과망간산칼륨($KMnO_4$)을 사용하였으며, 관측점에 실을 설치하였다

표 1. 실험수로 제원

하상재료	제원	길이 (m)	수로폭 (m)	유량 (ℓ/sec)	중심각 (θ)	곡률반경 (m)	경사	하상재료		
								D_{50} (mm)	비중	σ
모래		34	1.5	80, 112	180°	5.5	1/750	0.56	2.65	1.65
안트라사이트				모래하상과 동일				0.26	1.54	2.73

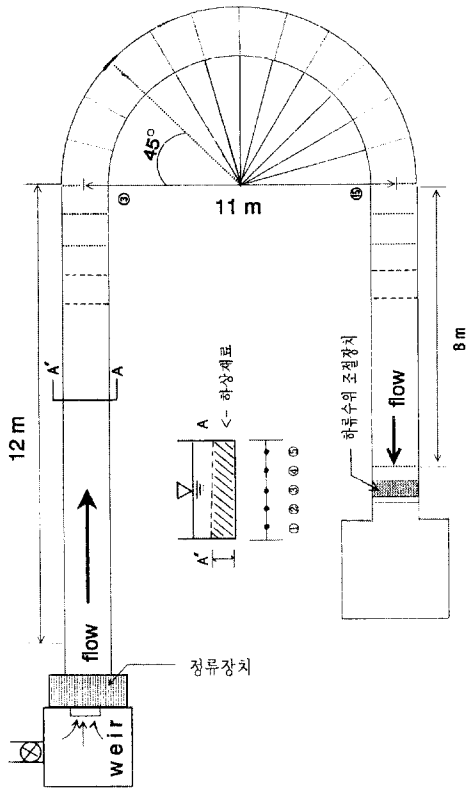


그림 1. 실험수로 및 관측점 위치도

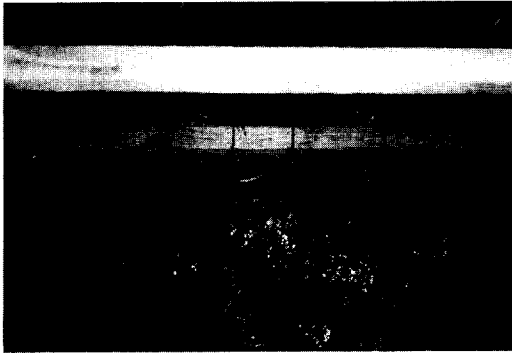


그림 2. 유향측정(사진)

(그림 2).

유사량을 실험수로 하류단 밑에 150 cm × 50 cm × 60 cm 크기의 상자 2개를 제작하고 내부에 기는 체를 깔 다음, 등류수심과 하상에서의 사련이 충분히 발생하였을 때에 일정시간 간격으로 유사를 받아

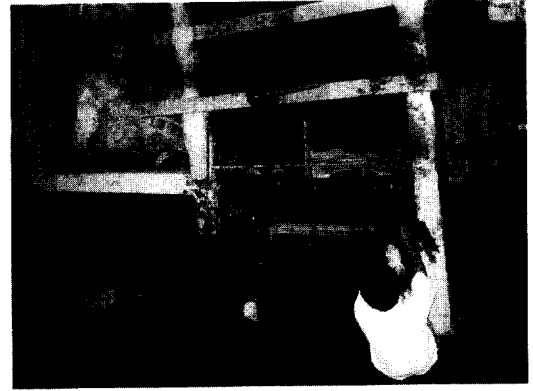


그림 3. 유사량 측정(사진)

유사량을 측정하였다(그림 3).

기초실험을 위한 고정상 수로에서 사용한 하류수위 조절장치와는 별도로 이동상 실험에서는 유사량 채취를 위해 별도의 하류수위 조절장치를 제작하여 수위를 조절함과 동시에 유사를 채취하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 흐름

수로 직선부에서 만곡부로 흐름이 진행되면 만곡부 상류부에서 발생한 외측부 감속작용이 하류부로 진행되면서 외측으로 향한 변화속도 성분이 발생되어 외측 유속이 커지고 외측 하안이 받는 에너지도 증가한다. 이 구간에서는 외측제방에 가해지는 힘이 크기 때문에 제방붕괴가 빈번히 발생하게 된다. 그림 4는 하상재료를 변화시켜가며 만곡수로에서의 종단면 최대유속의 이동경로를 표시한 것이다. 하상재료와는 무관하게 만곡수로 입구부분에서는 내측에서 최대유속이 발생하다가, 만곡수로 정점(crown) 부근에서는 단면의 중앙에서, 출구부근에서는 외측에서 최대유속이 발생한다. 즉, 최대유속선은 내측으로부터 서서히 외측으로 이동되는 현상을 확인할 수 있었다.

하상재료별로는 내측에서 외측으로 편이되는 규모가 고정상에서 가장 크며 모래인 경우가 가장 작다. 특히, 고정상인 경우에 최대유속은 만곡각 120° 부근 외측부에서 발생하였으며, 하상의 조도가 작을수록 종방향 최대유속선의 발생구간도 만곡수로 외측부로 이동되고 있다. 즉, 하상이 매끈할수록 원심력에 의한 영향을 크게 받아 만곡수로 상류부에서 흐름이 발달되고 결국,

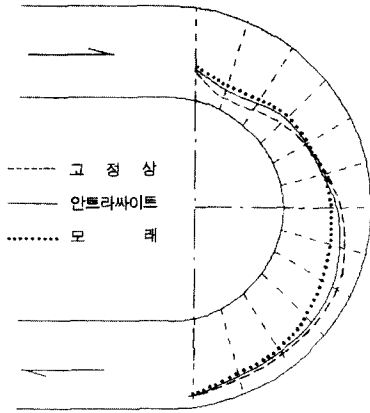


그림 4. 최대유속선의 이동경로 (Q=112 l/s)

중단면 최대 유속선의 외측편의 현상이 빠르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한, 만곡각 50° 부근에서는 편위의 전이가 발생되고 있으며, 이는 하상재료에 의한 흐름의 발달과정을 잘 나타내 주고 있다.

그림 5는 실험수로 중심부에서의 만곡각별 유향의 편위각을 나타낸 것이다. 여기서, (-)부호는 내측 제방 쪽으로 유향이 편위되는 것을 나타내고, 반대로 (+) 부호는 외측 제방 쪽으로 유향이 편위되고 있음을 나타낸다. 일반적으로 고정상인 경우, 만곡수로 입구에서는 유향이 내측으로 향하며, 정점에서는 외측으로 향하고 있으며, 출구에서는 다시 외측으로 향하는 편위각이 존재한다고 발표된 바 있다(윤세의, 1986). 본 실험에서는 하상재료별로 고정상인 경우에 유향의 편위각이 가장 크게 관측되었으며, 이후 안트라사이트, 모래의 순서로 나타났다.

편위되는 경향은 세가지 하상조건이 유사하게 나타

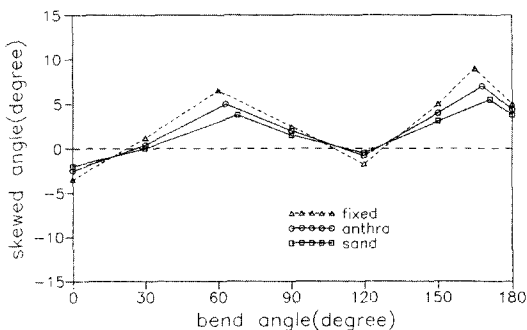


그림 5. 만곡각별 유향의 편위각 변화(단면 중심부)

났으며, 그 범위는 -5° ~ 13° 까지 관측되었는데, 만곡각 60° 단면까지는 외측으로 향하는 유향의 편위각이 8° 까지 증가하였다. 특히, 이 구간에서 유향의 편위각이 최대로 발생하는 지점은 하상재료별로 약간의 차이를 나타냈으며, 고정상에 비해서 이동상인 경우에 약 5° ~ 10° 정도 만곡수로 하류부로 발생구간이 이동되었다. 이후 유향의 편위각은 다시 감소하다가 만곡각 105° ~ 120° 단면에서 유향의 재분포가 발생하며 이 구간에서의 편위각은 중심부 접선방향과 거의 일치하는 값을 나타냈다. 편위각은 다시 증가하여 만곡각 165° 구간에서 최대치를 나타냈으며, 이 구간에서 제방에 작용하는 외력이 증가함을 의미한다.

그림 6과 7은 만곡각 30° 와 135° 에서 하상재료별로 나타낸 횡단면 수위분포도이다. 이 때 사용된 H_0 는 횡단면별 중심부에서의 수위이고, 이를 기준으로 내측, 중심, 외측의 관측점을 비교하였으며, r_{crit} 는 수로중심선에서의 곡률반경을 나타낸 것이다.

만곡각 30° 및 135° 의 두 단면에서 고정상에서의 수면경사가 가장 크고 이후 안트라사이트, 모래의 순

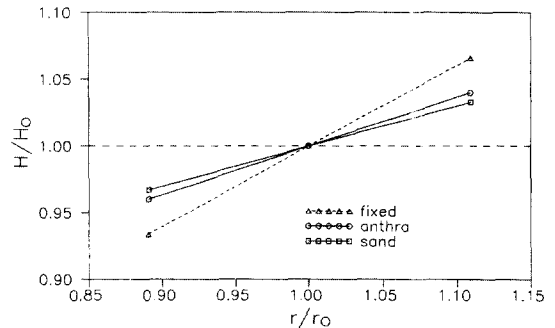


그림 6. 횡단면 수위분포도(만곡각 30° 단면)

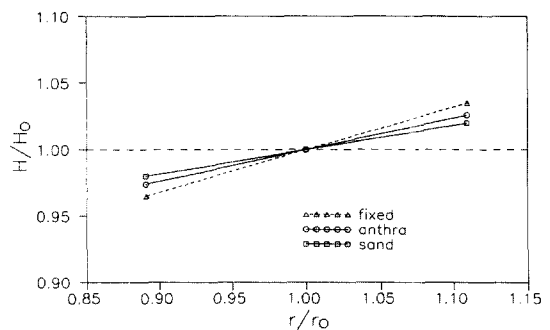


그림 7. 횡단면 수위분포도(만곡각 135° 단면)

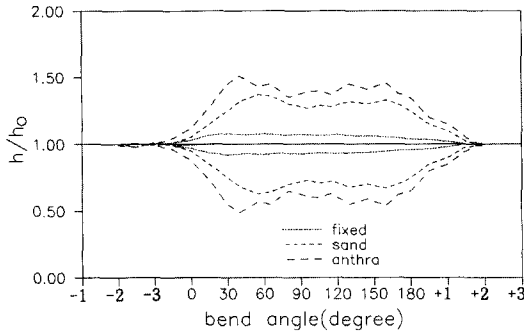


그림 8. 종단면 수심분포도(Q=80 l/s)

으로 실측되었다. 하상조도가 모래, 안트라사이트, 고정상의 순으로 크기 때문에 주방향 평균유속이 고정상에서 최대가 되며, 모래에서는 최소가 된다. 따라서, 횡방향 수위분포는 이에 비례하여 크게 실측되었으며, 30° 단면에서 더욱 크게 실측된 것은 이 부근에서 흐름의 회전이 더 크기 때문으로 생각된다.

그림 8은 만곡수로에서의 종단면 수심분포도를 이동상과 고정상으로 구분하여 비교한 것이다. 여기서, h/h_0 는 종단면 중심부에서의 평균수심에 대한 내, 외측지점의 수심을 나타낸 것이다. 고정상 만곡수로와는 다르게 이동상 만곡수로에서의 h/h_0 값은 증가하고 있다. 고정상 만곡수로에서는 만곡각 15°~30° 부근에서 최대 횡방향 수면차가 발생하고 있었지만 이동상의 경우에는 만곡각 30°~50° 부근에서 최대 수심을 보이고 있었다. 이는 이동상 수로가 고정상 수로에서 보다 하상전단력이 커져서 흐름의 발달 시작구간이 하류로 지체되고 있음을 알 수 있다. 즉, 2차흐름의 생성이 이동상인 경우, 고정상에서 보다 하류부로 지체되기 때문으로 판단된다.

안트라사이트의 경우, 최대 수면차의 발생구간이 모래에 비해서 수로 상류부로 이동하였다. 이러한 흐름은 하류로 진행되면서 다소 안정을 보이다가 만곡각 165° 부근에서 수심이 다시 증가하고 있다. 또한, 모래에 비해서 안트라사이트에서의 하상이 매우 불규칙적으로 변하고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 안트라사이트가 모래에 비해서 벽면의 효과가 크고 전단응력이 작으므로 2차 흐름의 영향을 많이 받은 것으로 판단된다.

그림 9는 만곡각 60° 구간에서의 2차흐름의 연직 유속분포를 나타낸 것이다. 이 때, Y는 임의점에서의 수심, H는 평균수심이고, V_r 은 횡방향 유속, V_s 는 중

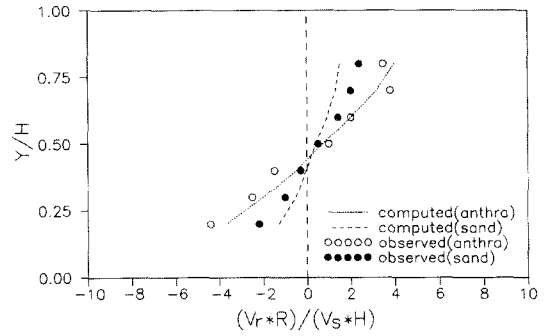


그림 9. 2차흐름의 연직분포(60°, 중심부)

방향 평균유속이며, R은 곡률반경이다. 만곡각 60°, 중심부에서의 2차흐름 연직 유속분포는 안트라사이트가 모래에 비해 크게 나타나고 있다. 이는 안트라사이트의 전단응력이 모래보다 작기 때문에 나타난 결과로 생각된다. 2차흐름의 연직 유속분포는 모래의 경우보다는 안트라사이트의 경우가 계산치와 유사한 경향을 나타내고 있다. 이는 식 (1)에서 횡방향 전단응력의 영향을 충분히 고려하지 못한 결과로 판단된다.

$$V_r = \frac{V_{0m}H}{\chi^2 r} [F_1(\eta) - \frac{1}{m} F_2(\eta)] \quad (1)$$

여기서, V_{0m} 는 주방향 흐름의 평균유속, H는 평균수심, χ 는 von karman 상수, η 는 평균수심에 대한 수로바닥으로부터의 수심비(Y/H), m은 상수이며

$$F_1(\eta) = \int \frac{2 \ln \eta}{\eta - 1} d\eta, \quad F_2(\eta) = \int \frac{\ln^2 \eta}{\eta - 1} d\eta \text{ 이다.}$$

횡방향 전단응력이 작은 안트라사이트에서는 모래보다 2차흐름이 크게 실측되었다. 또한, 계산치에 비해 실측치가 약간 크게 나타났지만 그 경향은 비교적 잘 일치하고 있었다. 계산식에서 사용된 횡방향 마찰항의 영향으로 횡방향 유속의 최대치는 흐름방향의 유속에 비해 모래에서는 약 7.2%, 안트라사이트인 경우에는 8.6% 정도로 관측되었으며, 이는 일반적으로 수심이 얇은 조건하에서 알려진 최대치 10%에 비하면 합리적인 결과로 판단된다(Odgaard와 Bergs, 1988).

그림 10은 만곡각 60° 외측부에서의 2차흐름의 연직분포를 나타낸 것이다. 양핵(two cell)이 수면 부근에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 이러한 핵은 만곡부의 입구 부분과 하류구간에서도 종종 발생하였으며,

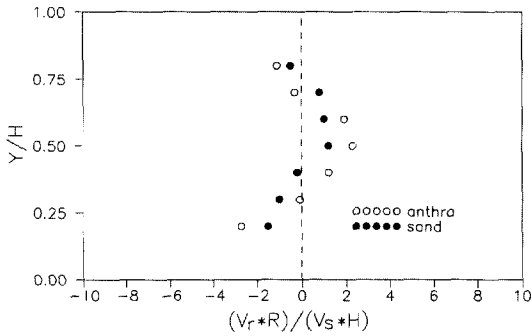


그림 10. 2차흐름의 연직분포(60°, 외측부)

전반적으로 외측벽으로부터 내측으로 수심의 1.5배, 수면으로 부터는 수심의 1/2의 영역에 존재하고 있는 것을 알 수 있었다. 안트라사이트의 경우에 핵의 강도가 크게 관측되었다. 이러한 현상은 3차원 모형개발시에는 고려해야 한다. 이는 h/B , R/B 의 값(B 는 수로폭)과 하상의 재료 등에 따라서 변화될 것으로 생각된다. 또한, 이러한 양핵(two cell)은 흐름이 직사각형 단면의 만곡관이나 얼음으로 덮인 하천에서 발생한다고 발표된 바 있다(De Vriend, 1981).

횡방향의 수면경사와 연직 속도분포로 인하여 2차흐름(secondary flow) 및 나선류(spiral flow)가 생겨서 자연하천에 있어서는 횡단면의 형태에 영향을 주게 된다. 표 2는 2차흐름에 의한 횡방향 전단응력을 작다고 가정하여 계산한 횡방향 수면차를 관측치와 비교한 것이다. 계산치(Bergs, 1990)가 비교적 작게 산정되고 있지만 전체적인 경향은 횡방향 수면차(∇h)의 계산결과와 본 실험의 관측치는 비교적 잘 일치하고 있다. 계산치가 작게 산정된 이유는 횡방향 전단응력의 항과 형상조도의 영향을 고려하지 못했기 때문으로 판단되며, 이동상 수로에서는 수면차를 정확히 계산하기 위하여 이들을 고려해야 할 것으로 판단된다.

3.2 하상변동

그림 11과 12는 유량이 112 ℓ/s 일 때, 모래와 안

표 2. 횡방향 수면차 비교(단위 : cm)

유 량 (ℓ/s)	만곡각	30°		60°	
		모래	안트라사이트	모래	안트라사이트
112	계산치	0.602	0.635	0.574	0.597
	관측치	0.765	0.832	0.662	0.711
80	계산치	0.482	0.501	0.475	0.487
	관측치	0.583	0.611	0.552	0.573

트라사이트에서의 하상지형도를 나타낸 것이며, 수심을 'cm' 단위로 표시하였다. 외측제방을 따라서는 세굴이, 내측제방부에서는 사주(point bar)가 형성되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 현상은 특히 만곡부 정점부에 도달하기 전에 대부분 나타나고 있는데, 최대 수심은 외측 제방부를 따라서 만곡각 30°~60° 구간에서 평균수심의 1.5~2배에 해당하는 큰 값이 나타났으며, 만곡각 160°~180° 외측 제방 부근에서도 비교적 큰 세굴이 발생되었다. 이 결과는 Bergs(1990)의 실험과도 유사한 경향을 보여 주고 있다.

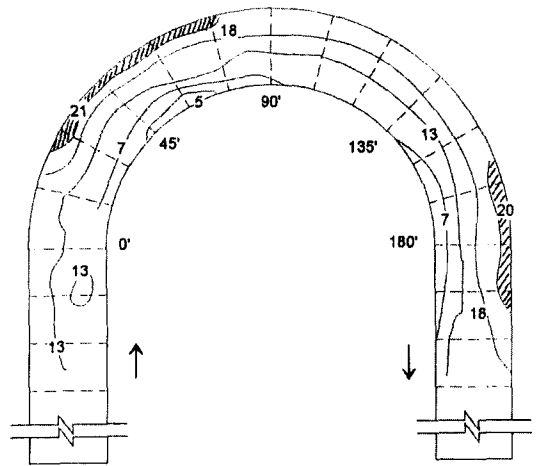


그림 11. 하상지형도(모래, Q=112 ℓ/s , 단위:cm)

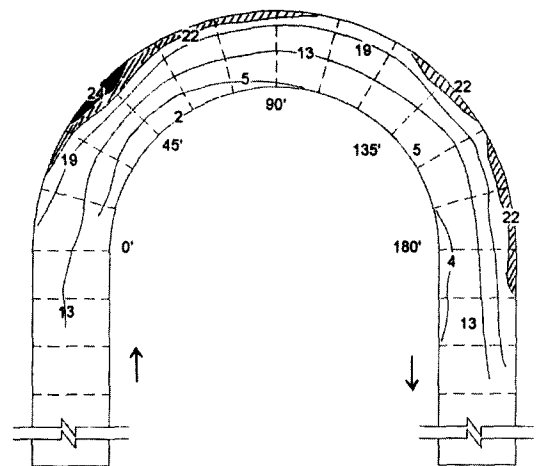


그림 12. 하상지형도
(안트라사이트, Q=112 ℓ/s , 단위:cm)

하상재료가 모래일 경우에 비해서 안트라사이트의 경우가 최대 세굴심의 위치는 모래보다 상류부에서 발생하고 있으며, 세굴깊이 역시 더 커지고 있다. 반곡각 30°~60°와 160°~180° 구간에 수공구조물 설치시 세굴특성을 특별히 고려해야 한다. 따라서, 수리실험에서 하상재료의 특성에 따라 최대세굴심의 위치가 변동되고 있음을 확인할 수 있었으며, 하상재료의 상사성을 고려한다면 안트라사이트의 경우가 모래보다 실제 하천의 하상변동을 더욱 잘 모의할 수 있다고 판단된다. 특히, 반곡부 내측에 퇴적되는 양은 더욱 큰 차이를 나타내고 있어서 반곡부 실험시 하상재료의 선택이 매우 중요하다. Dietrich와 Smith(1984)의 현장실측치와 비교하면 외측벽면을 따라 전반적으로 발생하는 세굴의 정도가 모래보다 안트라사이트의 경우에 더욱 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

그림 13은 반곡각 135° 단면에서 계산한 횡방향 하상경사식(Odgaard, 1986a; 1986b)의 결과와 실측치와의 관계를 나타낸 것이다. 이 때, 계산치는 수로중심선을 기준으로 횡단면 내, 외측으로 절점을 구분하고 각각의 격점에서 계산된 횡방향 하상경사율을 격점 간격으로 곱하여 제방 내, 외측에서의 상대수심(d/d_c)을 산정하였다. 여기서 d 는 입의 점에서의 수심이며, d_c 는 수로중심선에서의 수심을 나타낸 것이다.

계산 결과, 안트라사이트의 경우가 모래보다 전반적으로 횡방향 하상경사가 크게 나타났다. 모래에서는 외측에서 계산치 및 실측치의 차이가 5~7% 정도 생겼지만, 안트라사이트에서는 최고 17%의 오차가 발생하였다. 이는 계산식의 유도과정에서 부유사의 영향이 고려되지 못한 점과 실제 관측에서 안트라사이트가 모래에 비해 벽면 효과를 비교적 크게 받았던 것이 원인인 것으로 생각된다. 또한, 수로중심선에서 제방

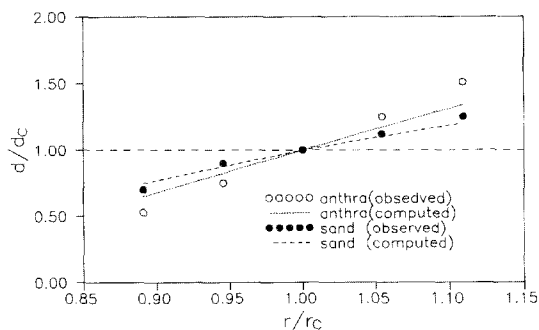


그림 13. 횡단면 상대수심 비교

내, 외측으로 향하면서 계산치와 실측치의 차이가 크게 나타났는데, 수로 중심선으로부터 내, 외측으로 격점별 계산되어 가는 과정에서 발생한 누적오차가 영향을 미친 것으로 판단된다.

그림 14는 횡방향 하상경사도이다. 이 때 사용된 하상고(D_c)는 각각의 반곡부 흐름방향 중심선에서의 하상고이며 이를 기준으로 내측, 중심, 외측의 관측점을 비교하였다.

흐름이 반곡 유입부로 진행되면서 45°~55° 구간에서 크게 나타났던 횡방향 하상경사의 차이는 반곡각 105° 구간에서 약간 감소하다가 165° 구간에서 다시 증가하고 있다. 모래의 횡방향 하상경사는 반곡각 55° 부근에서 가장 크게 나타나고 있었지만, 안트라사이트의 경우에는 45° 구간에서 가장 크게 측정되었다. 모래와 안트라사이트의 횡방향 하상경사의 차이는 45° 구간에서 크게 나타났다. 이는 안트라사이트의 한계소류력이 모래보다 작기 때문에 2차흐름의 생성이 안트라사이트인 경우는 모래보다 상류부에서 발생하기 때문이며, 모래의 경우는 안트라사이트와 비교하면 흐름의 발달 시작구간이 하류로 지체되고 있음을 알 수 있다. 즉, 하상재료의 특성별로 최대세굴심과 최대횡방향 하상경사의 발생위치가 변화되고 있으며, 동일 흐름조건에서도 하상재료의 한계소류력의 크기에 따라서 최대세굴심의 위치는 변화된다. 따라서, 횡방향 하상경사는 입자와 비중이 작을수록 더욱 커지고 있음을 확인할 수가 있었으며 이는 조도계수의 영향뿐만 아니라, 안트라사이트의 경우, 2차흐름의 강도의 증가에 따른 횡방향 하상전단응력을 무시할 수 없음을 뜻한다.

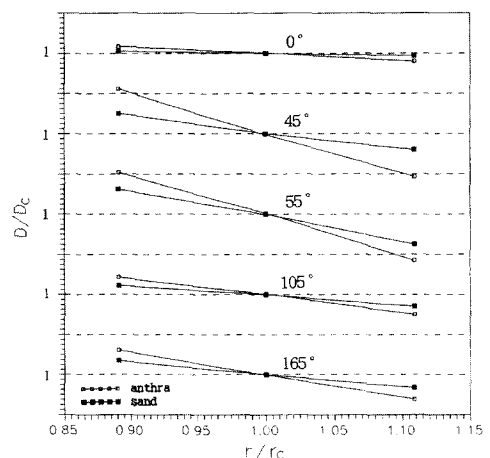


그림 14. 횡방향 하상경사

표 3. 총유사량 비교

하상재료		유 량	
		80 (l/s)	112 (l/s)
모 래 (g/cm/min)	계산치(E·H)	2.8	5.1
	실 측 치	9.7	14.3
안트라사이트 (g/cm/min)	계산치(E·H)	53.1	99.8
	실 측 치	71.1	112.3

표 3은 만곡부 하류구간에 설치된 유사채취기로 부터 실측된 모래 및 안트라사이트의 총유사량과 일반적으로 지명도가 높고 널리 이용되는 공식중의 하나인 Engelund-Hansen(E-H)식을 사용한 계산치를 나타 낸 것이다.

만곡수로 중심부의 수리특성치를 이용하여 총유사량을 계산하였다. 총유사량의 계산치보다 만곡수로에서의 실측치가 더 크게 나타났는데, 이는 Onishi 등(1976)의 결과와도 유사하다. 만곡부의 특성상 원심력으로부터 발생하는 2차흐름이 하상입자를 연행 및 부유시키고, 만곡부 내측에서 발생하는 사주의 영향이 수로 횡 단면간 단위유량을 불균일하게 분포시켰기 때문에 만 곡수로에서의 유사량이 직선수로에 비해서 크게 나타 난 것으로 생각된다.

이와 같은 조건의 실험으로 만곡하천에서의 하상재 료에 따른 흐름 특성을 일반적으로 완벽하게 분석할 수는 없으나, 현재까지 문제가 발생되고 있으면서도 특별한 연구결과가 없는 만곡하천에서의 하상재료 변 화에 따른 흐름 특성을 어느 정도는 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러 앞에서 서술한 결과는 하폭 에 대한 수심비, 곡률반경에 대한 하폭의 비, 수공구조 물의 설치 유·무, 유량비 등에 따라서 크게 변화될 수 있다고 생각된다.

4. 결 론

만곡수로에서의 하상재료 변화에 따른 흐름 및 하상 변동 특성을 분석하기 위하여, 고정상 실험을 수행하 고 동일 흐름조건하에서의 모래와 안트라사이트를 하 상재료로 선택하여 실험을 실시하였다. 그 결과를 요 약하면 다음과 같다.

(1) 하상재료의 한계소류력 크기에 따라서 최대세굴 심의 위치가 변화되었으며, 하상세굴심은 안트라사이트 가 모래에 비해서 만곡각 5°~15° 정도 상류부에서 나타났다. 두 경우를 고려하면, 만곡부 외측 제방 3 0°~60° 구간에서 평균수심의 약 2배까지 나타났으며,

만곡각 160°~180° 외측제방 부근에서도 비교적 큰 세굴이 발생하였다.

(2) 중단면 최대유속선은 하상재료에 관계없이 수로 입구 내측으로부터 서서히 외측으로 이동되며, 유량이 증가할 수록 외측 편외 현상도 증가하였다. 만곡각 50° 부근에서는 편외의 현상이 발생되고 있으며, 최대 유속선이 외측제방에 가장 가까이 접근하는 지점은 정 접에서 하폭의 2~4배 정도 하류지점에서 나타났는데, 하상 거칠수록 발생지점은 하류로 지체되었다.

(3) 만곡각 60° 단면까지는 외측으로 향하는 유향 의 편외각이 8° 까지 증가하였으며, 다시 감소하여, 만 곡각 165° 구간에서 최대치를 나타내었다. 하상이 매 크러울수록 흐름의 최대편외각은 만곡수로 상류부에서 발생하고 있으며, 그 크기도 증가하였다.

(4) 하상재료가 안트라사이트인 경우, 모래보다 2차 흐름이 크게 실측되었다. 계산치에 비해 관측치가 약 간 크게 나타났지만 그 경향은 비교적 잘 일치하였으 며, 횡방향 하상전단 응력을 무시해서는 안 될 것으로 생각된다. 또한, 양핵(two cell)이 존재함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 고재웅 (1975). "만곡수로에서의 하상변동에 관한 연 구." 한국수문학회지, 한국수문학회, 제8권, 제2 호, pp. 75-80.
- 김운태, 김지호, 박영진, 송재우 (1997). "만곡수로에 서의 횡방향 수면경사 산정모형의 비교 연구." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제17권, 제II -2호, pp. 129-135.
- 송재우 (1980). 우리나라 하천의 사형특성에 관한 연 구. 박사학위논문, 연세대학교.
- 송재우, 최인호, 김지호 (1994). "유로만곡부의 횡방 향 하상경사 산정모형에 관한 연구." 대한토목학 회 논문집, 대한토목학회, 제14권, 제6호, pp. 1395-1404.
- 윤세의 (1986). 수심이 얇은 고정상 만곡수로에서의 흐름특성 해석. 박사학위논문, 연세대학교.
- 윤세의, 이종태 (1990). "만곡수로에서의 곡률반경 변화에 따른 흐름특성." 한국수문학회지, 한국수 문학회, 제23권, 제3호, pp. 435-444.
- 정용태, 최인호, 송재우 (1994). "유로 만곡부의 횡방 향 하상경사에 관한 연구." 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제14권, 제1호, pp. 143-150.

- 정재욱, 백창식, 윤세의, 이종태 (1997), “만곡수로에
서의 흐름 및 하상변동에 관한 실험적 연구.”
1997년도 학술발표회 논문집, 한국수자원학회,
pp. 15-20.
- 차영기, 이대철 (1991). “만곡수로의 횡방향 하상경
사와 흐름특성.” 한국수문학회지, 한국수문학회,
제24권, 제1호, pp. 99-107.
- Bergs, M.A. (1990). *Flow processes in a curved
alluvial channel*. Ph. D. Thesis, The
University of Iowa.
- Bridge, J.S. and Jarvis, J. (1976). “Velocity
profiles and bed shear stress over various
bed configurations in a river bend.” *Earth
Surface Processes*, Vol. 2, pp. 281-294.
- Bridge, J.S. and Jarvis, J. (1977). “Flow and
sedimentary processes in the meandering
river South Esk, Glen Clova, Scotland.”
Earth Surface Processes, Vol. 1, pp.
303-336.
- Bridge, J.S. (1992). “A revised model for water
flow, sediment transport, bed topography and
grain size sorting in natural river bend.”
Water Resources Research, Vol. 28, No. 4,
pp. 999-1013.
- Chow, V.T. (1959). *Open channel hydraulics*.
McGraw-Hill Books Co., pp. 439-486.
- De Vriend, H.J. (1976). *A mathematical model of
steady flow in curved shallow channels*.
Report No. 76-1, Dept. of Civ. Engrg., Delft
Univ. of Tech.
- De Vriend, H.J. (1981). “Velocity redistribution
in curved rectangular channels.” *J. of Fluid
Mech*, Vol. 107, pp. 423-439.
- De Vriend, H.J. (1982). *Waterloopkundig
laboratorium Delft Hydraulics Laboratory*.
Tow.
- Dietrich, W.E. and Smith, J.D. (1983). “Influence
of the point bar on flow through curved
channels.” *Water Resources Research*, Vol.
19, No. 5. pp. 1173-1192.
- Dietrich, W.E. and Smith, J.D. (1984). “Bed load
transport in a river meander.” *Water
Resources Research*, Vol. 20, No. 10, pp.
1355-1380.
- Fares, Y.R. and Herbertson, J.G. (1992).
“Behaviour of flow in a channel bend with a
side overflow(flood relief) channel.” *J. of
Hydraulic Research*, Vol. 31, No. 3, pp.
383-402.
- Hooke, R.L.B. (1975). “Distribution of sediment
transport and shear stress in a meander
bend.” *J. of Geology*, Vol. 83, pp. 543-565.
- Ikeda, S., Yamasaka, M. and Chiyoda, M. (1987).
“Bed topography and sorting in bends.” *J.
Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 113, No. 2, pp.
190-206.
- Jackson, R.G., II, (1975). “Velocity-bed-form-
texture patterns of meander bends in the
lower Wabash River of Illinois and Indiana.”
Geological Society of America Bulletin, Vol.
86, pp. 1511-1522.
- James, C.S. (1994). “Evaluation of methods for
predicting bend loss in meandering
channels.” *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol. 120,
No. 2, pp. 245-253.
- Jin, Y.C. and Steffler, P.M. (1993). “Predicting
flow in curved open channels by
depth-averaged method.” *J. Hydr. Engrg.*,
ASCE, Vol. 119, No. 1, pp. 109-124.
- Odgaard, A.J. (1984). “Flow and bed topography
in alluvial channel bend.” *J. Hydr. Engrg.*,
ASCE, Vol. 110, No. 4, pp. 521-536.
- Odgaard, A.J. (1986a). “Meander flow model. I:
development.” *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.
112, No. 12, pp. 1117-1136.
- Odgaard, A.J. (1986b). “Meander flow model. II:
applications.” *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, Vol.
112, No. 12, pp. 1137-1150.
- Odgaard, A.J. and Bergs, M.A. (1988). “Flow
processes in a curved alluvial channel.”
Water Resources Research, Vol. 24, No. 1,
pp. 45-56.
- Onishi, Y., Jain, S.C. and Kennedy, J.F. (1976).
“Effects of meandering in alluvial streams.”
J. of the Hydr. Div., ASCE, Vol. 102, No.
HY7, pp. 899-917.

- Parker, G. and Andrews, E.D. (1985). "Sorting of bed load sediment by flow in meander bends." *Water Resources Research*, Vol. 21, No. 9, pp. 1361-1373.
- Rozovskii, I.L. (1961). *Flow of water in bends of open channels*. Translated from Russian by the Israel program for scientific translations, Jerusalem, Israel
- Steffler, P.M. (1984). *Turbulent flow in a curved rectangular channel*. Ph. D. thesis, University of Alberta, Canada.
- Talmon, A.M., Van Mierlo, M.C.L.M. and Struiksma, N. (1995). "Laboratory measurements of the direction of sediment transport on transverse alluvial-bed slopes." *J. of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 495-517.
- Yen, C.L. (1970). "Bed topography effect on flow in a meander." *J. of the Hydr. Div., ASCE*, Vol. 96, No. HY1, pp. 57-73

<최종본 접수일 : 1998년 4월 16일>