

# 수로만곡부의 침식방지를 위한 날개벽공법의 실험적연구

尹 龍 男 高麗大學校 教授 (工博)

정 성 원 高麗太學校 大學院卒

## 1. 서 론

과학의 발달과 더불어 인간의 생활 수준이 향상됨에 따라 하천 관리의 중요성 또한 증대되고 있다. 일반적으로 자연하천은 만곡수로라고 가정할 수 있으며 이 만곡수로에서는 흐름의 원심력과 부차류 (secondary flow)로 인하여 유선이 직선이 아니고 나선 운동을 하며, 이러한 현상으로 인하여 하천의 외측 제방부가 세굴되어 제방의 안전도에 문제가 발생한다. 따라서 하천 만곡부의 제방 안전을 위하여 水制 (spur dike), 또는捨石工 (ripraps)을 사용해왔으나 여러 문제점이 발생하고 있는 실정이다.

본 小考에서는 하천 만곡부에서의 제방 침식 현상을 방지할 수 있는 공법으로 최근에 발표된 날개벽 (vane) 공법의 실무 가능성 및 효율성 판단을 목적으로 한다.

## 2. 대상 하천 및 모형 수로

대상 하천 구간은 달천강과 남한강 본류의 합류지점 (탄금교)에서 달천강 상류로 13.4 km에서 16.0 km까지의 2.6 km의 180° 만곡 구간 (충북 증원군 상모면 소재)를 선택하였다. 달천강 하천 정비 기본 계획에 의하면 달천강 대상구간 시점까지의 유역 면적은 1372.78 km<sup>2</sup>이고, 유로연장은 108.7 km이며, 달천강 전 유역의 년평균

강우량은 1238.8 mm, 확률홍수량은 50년 확률홍수량이 2980m<sup>3</sup>/sec, 100년 확률홍수량은 3310m<sup>3</sup>/sec, 150년 확률홍수량은 3500m<sup>3</sup>/sec이다. 대상 하천 만곡부의 평균 하폭은 153.75 m이며 평균곡률 반경은 520 m이다.

하천 만곡부의 흐름은 자유표면을 가지는 개수로이므로 중력이 지배적인 힘이 되므로 Froude 법칙을 적용할 수 있다. 따라서 유속비, 시간비 및 유량비는 다음의 관계가 성립한다.

$$V_r = \sqrt{g_r \cdot L_r} = L_r^{1/2}$$

$$T_r = L_r / V_r = L_r^{1/2}$$

$$Q_r = A_r \cdot V_r = L_r^{5/2}$$

따라서 모형수로의 축척비는 국립건설시험소의 수리실험실의 펌프용량 및 가용면적을 고려하여  $L_r = 80$ 으로 정하였다.

그에 따라 시멘트 모르타르로 제작된 모형수로의 각종 제원 및 실험 유량은 표 - 1과 같다.

표 - 1. 모형수로 제원 및 실험 유량

원형/모형 제원및유량	대 상 하 천	모 형 수 로
하 폭 B	150 m	1.876 m
곡률반경 Rc	520 m	6.5 m
최대가능수심 y	9 m	0.1125 m
	3300 m <sup>3</sup> /sec	57.7 l/sec
	2500 m <sup>3</sup> /sec	52.4 l/sec
실험유량 Q	2000 m <sup>3</sup> /sec	43.7 l/sec
	2000 m <sup>3</sup> /sec	34.9 l/sec
	1500 m <sup>3</sup> /sec	26.2 l/sec

모형수로는 구형으로 제작되었으며 만곡부 입구 및 출구에는 각각 15 m, 13 m의 직선부 수로가 설치되었고, 모형수로의 끝에는 수면 경사를 조절할 수 있도록 Tail gate를 설치하였다.

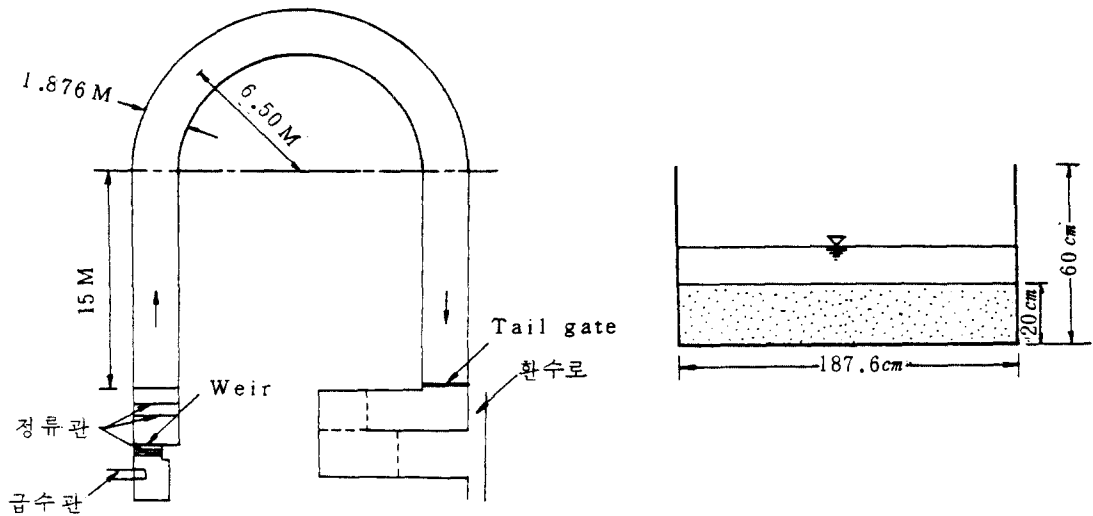


그림 - 1. 모형수로 평면도 및 횡단면도

### 3. 실험 개요 및 자료의 분석

본 실험은 하천의 180° 만곡부에서의 세굴 및 퇴적현상을 파악하고 또한 날개벽이 세굴 및 퇴적 현상에 미치는 영향을 파악함으로써 날개벽의 가능성 및 효율성을 판단하는것은 목적으로 한다. 따라서 고정상 실험 및 이동상 실험으로 나누어 실시하였다.

#### 3.1 고정상 실험

고정상 실험은 하천 만곡부에서의 수리특성을 측정, 분석하여 수면곡선의 변화와 유속 및 소류력의 분포 특성을 파악하여 세굴

및 퇴적현상을 규명함으로써 이동상 실험의 세굴 및 퇴적 현상과 비교 분석하는 것을 목적으로 한다.

따라서 흐름특성과 점소류력을 파악하기 위하여 5개 실험 유량에 대하여 각각 중, 횡방향으로 수면과 유속을 측정하였다. 일반적으로 개수로 바닥에서의 점소류력은 Preston Tube 나 열선 ( hot film anemometer ) 등에 의하여 직접 측정하거나 연직 유속 분포 곡선의 바닥부근 유속구배를 구하여 대수 유속분포식으로 간접적으로 계산할 수 있다. 본 실험은 소류력의 직접 측정이 가능하지 못하였으므로 미소 유속계를 사용하여 점유속을 측정함으로써 연직 유속분포 곡선의 바닥 경계면 부근 ( 바닥에서 수심의 10 ~ 15 % 이내 ) 의 유속구배 ( velocity gradient ) 를 사용하여 점소류력을 계산하였다.

J. C. Bathurst 에 의하면 바닥 경계면 부근의 연직방향 유속분포식은 다음과 같다.

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{K} \ln y + C = \frac{2.303}{K} \log_{10} y + C \dots\dots\dots (1)$$

$$U_* = \left( \frac{\tau_0}{\rho} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

여기서 U는 바닥면으로부터 거리 y인 점에 있어서의 점유속, C는 상수, K는 Von Karman의 우주상수 ( K = 0.41 ), U\*는 마찰속도, τ<sub>0</sub>는 점소류력, ρ는 물의 밀도이다.

또한 각 측정에서의 수심에 따른 유속을 반대수지에 표시하면 유속분포식은 다음과 같다.

$$\log_{10} y = aU + b \dots\dots\dots (3)$$

식 (1), (2), (3)을 연립으로 풀어  $\tau_0$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\tau_0 = \rho \left( \frac{K}{2.303 a} \right)^2 = \rho \left( \frac{1}{5.617 a} \right)^2$$

수평수로에서의 흐름의 평균소류력은 수면경사와 수심에 직접 비례한다.

$$\bar{\tau}_0 = \gamma R h S_w$$

여기서  $\bar{\tau}_0$ 는 평균소류력,  $\gamma$ 는 물의 단위중량,  $R h$ 는 동수반경,  $S_w$ 는 수면경사이다.

고정상 실험결과 각 실험유량에 대한 평균수심, 수면경사 및 평균 소류력은 표 - 2와 같다.

표 - 2. 각 실험 유량에 따른 평균수심, 수면경사 및 평균소류력

실험유량	수심 $y$ cm	동수반경 $R h$ m	수면경사 $S_w$	평균소류력 $\bar{\tau}_0$ kg/m <sup>2</sup>
3300 I CMS	10.07	0.0909	1/2415	0.0376
3300 II CMS	12.97	0.1139	1/5297	0.0215
3300 III CMS	14.52	0.1257	1/6920	0.0182
3000 CMS	9.65	0.0875	1/2556	0.0342
2500 CMS	8.94	0.0816	1/3095	0.0264
2000 CMS	8.16	0.0751	1/3585	0.0209
1500 CMS	7.39	0.0685	1/4330	0.0158

만곡부에서의 유속 측정 결과 모든 실험 유량에서 최대유속은 만곡부 전반부에서는 모형수로 내측에서 발생하여 중앙부에서는 수

로 중심으로 이동하다가 후반부에서는 외측으로 치우치는 경향을 보였다. 그림 - 2 는 실험유량이  $Q_p = 3300 \text{ m}^3/\text{sec}$  , 상대수심  $\eta = 0.6$  지점에서의 횡단면별 최대유속의 분포를 나타낸다.

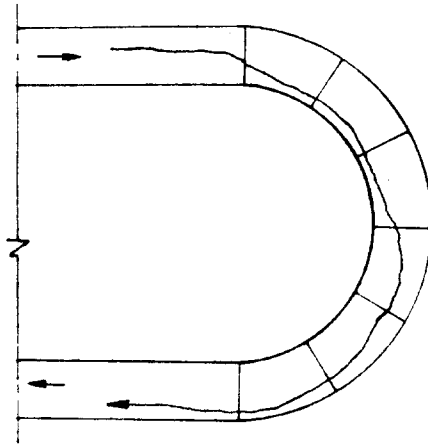


그림 - 2 . 최대유속 분포도 (  $Q_p = 3300 \text{ m}^3/\text{sec}$  ,  $\eta = 0.6$  )

수로 만곡부에서의 소류력 분포는 바닥 경계면 부근에서의 유속 ( 상대수심  $\eta = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.4$  ) 을 외삽에 의하여 구하여 유속구배를 계산하였다. 따라서 외삽과정에서 임의성을 배제하기 어려웠으며, 계산결과 각 실험유량 사이의 일관성이 없으며, 후속 이동상 실험의 결과와는 상이한 양상을 나타냈다. 따라서 추후의 후속 실험에서 바닥 경계면 부근의 유속의 직접 측정이 요구되어진다.

### 3.2 이동상 실험

이동상 실험은 만곡부에서의 세굴 및 퇴적현상을 파악하고, 날개벽을 설치했을때의 세굴 및 퇴적현상과 비교 분석하여 날개벽의 실무 적용 가능성 및 효율성을 판단함을 목적으로 한다.

따라서 본 실험은 대표 실험 유량을 선정 (  $Q_p = 3300 \text{ m}^3/\text{sec}$  ) 하

여 고정상 실험을 한 구형  $180^\circ$  만곡 모형수로에 평균 입경  $0.3\text{ mm}$ 의 비교적 균질한 모래를  $20\text{ cm}$  두께로 수평으로 깔아 실험유량을 통수하여 7시간, 14시간, 21시간 ( $T_p = 62.6$ 시간,  $125.2$ 시간,  $187.8$ 시간)에 해당하는 시간에 하상을 포인트 게이지 및 사면 측정기로 측정하여 하상의 변화에 따른 세굴 및 퇴적 현상을 정량적으로 파악하였다.

또한 이 하상에  $20\text{ cm} \times 20\text{ cm} \times 0.4\text{ cm}$ 의 plexiglass 판으로 제작된 날개벽을 곡률반경  $r = 6.97\text{ m}$  (만곡부의 외측으로 수로폭의  $3/4$  되는 지점)의 선상에 흐름방향과  $15^\circ$ 로 만곡부 구간에 총 42개를 중심간격  $60\text{ cm}$ 로 수심의  $1/3$  정도의 높이로 하상에 고정하여 같은 유량, 같은 시간으로 실시하여 하상의 변화를 측정하여 세굴 및 퇴적현상을 파악하였다.

날개벽 설치전의 세굴 및 퇴적현상은 만곡부 전구간에 걸쳐 통수시간에 비례하며 수로 외측은 세굴이 심화되고 수로 내측은 퇴적이 이루어지는 경향을 나타냈다. 만곡부 전반부  $\theta = 50^\circ \sim 70^\circ$  사이에서 세굴이 특히 심했으며 중앙부 ( $\theta = 90^\circ$  부근)에서는 수로 외측은 세굴되고, 내측은 퇴적되는 현상이 둔화되다가 다시 후반부에서 심화되다가 만곡부 출구 부근 ( $\theta = 170^\circ \sim 180^\circ$ )에서 외측의 세굴 현상이 극에 달하였다.

날개벽 설치 후의 세굴 및 퇴적 현상은 수로 외측과 날개벽 사이에서는 만곡 전구간에 걸쳐 퇴적 현상이 발생하며 날개벽 내측에 상대적으로 새로운 세굴이 진행되어 가는 현상을 보였다.

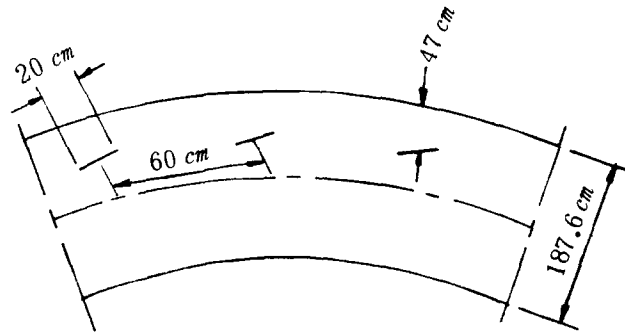
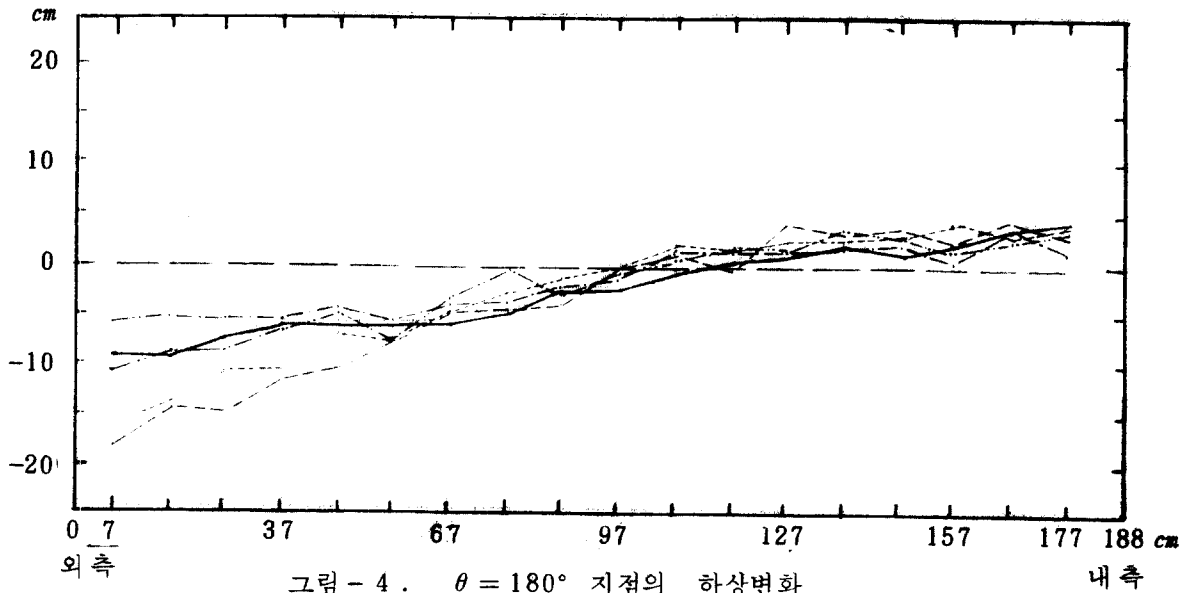


그림 - 3 . 날개벽의 배치

그림 - 4 는 세굴이 가장 크게 나타난 만곡부 출구 지점 ( $\theta = 180^\circ$ )에서의 세굴 및 퇴적 현상을 나타낸다.

날개벽 설치 전, 후의 만곡부 각 측정 단면에서의 최대 세굴 깊이는 그림 - 5 와 같이 날개벽 설치 전에는 통수 시간이 진행됨에 따라 세굴 정도가 심해지며 날개벽 설치 후에는 몇개 단면을 제외하고 일반적으로 세굴 정도가 완화되는 현상을 보였다. 만곡부 전구간에 날개벽 설치 전, 후의 횡단면별 하상 경사의 변화는 표 - 3 과 그림 - 6 에 나타나 있다. 몇개 측점을 제외하고 역시 전반적으로 하상 경사가 완화되는 현상을 보인다.





- — — 기준수평하상
- - - - 날개벽설치 전 7시간
- · - · " 14시간
- - - - " 21시간
- · - · 날개벽설치 후 7시간
- — — " 14시간

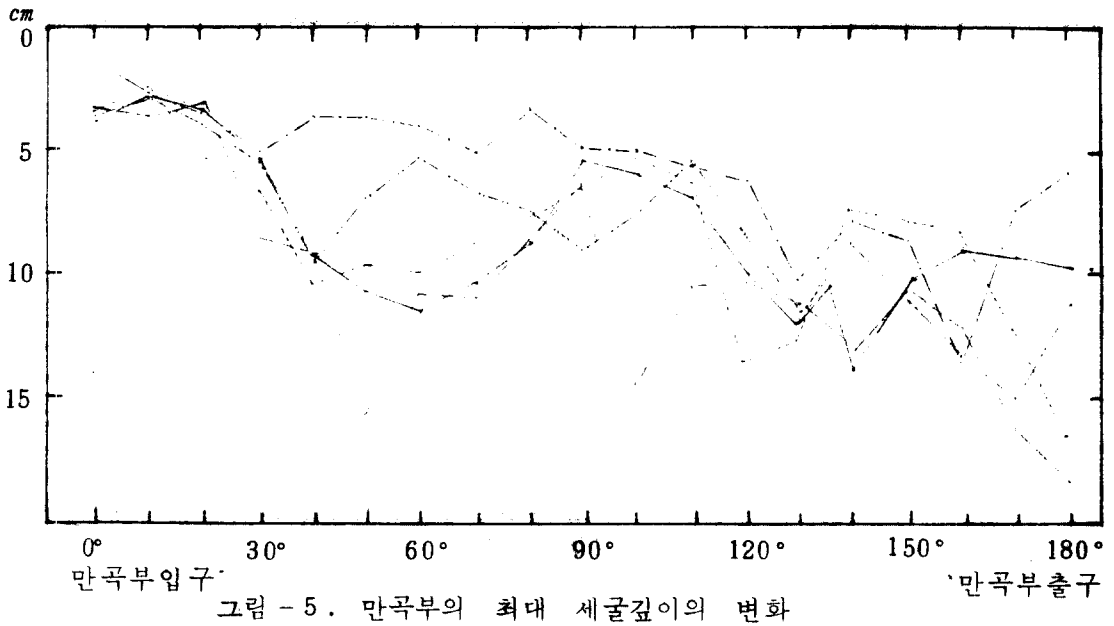


표 - 3 . 횡 단면 별 하상경사

SECTION No.	.....WITHOUT WAVES.....			...WITH WAVES....	
	7 hr	14 hr	21 hr	7 hr	14 hr
5	-0.102	-0.070	-0.218	-0.181	-0.208
6	0.007	-0.134	-0.070	-0.044	0.018
7	0.173	0.270	0.309	0.202	0.105
8	0.184	0.430	0.667	0.458	0.464
9	0.196	0.527	0.811	0.908	0.823
10	0.091	0.591	1.045	0.901	1.164
11	0.121	0.401	0.783	0.931	1.132
12	0.255	0.344	0.751	0.609	0.712
13	0.327	0.501	0.622	0.452	0.385
14	0.246	0.672	0.349	0.322	0.239
15	0.391	0.525	0.818	0.364	0.395
16	0.404	0.499	0.750	0.455	0.505
17	0.464	0.539	0.837	0.734	0.706
18	0.545	0.640	-0.824	0.888	0.936
19	0.470	0.691	0.772	0.522	1.064
20	0.577	0.843	0.757	0.576	0.591
21	0.565	0.833	1.012	0.470	0.477
22	0.723	1.023	1.243	0.613	0.527
23	0.577	0.863	1.337	1.204	0.937

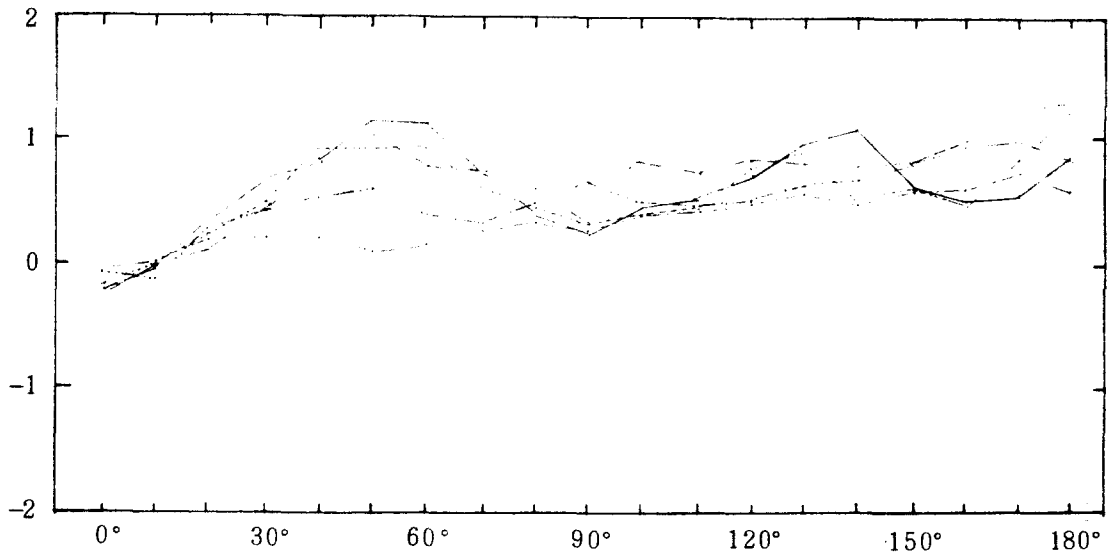


그림 - 6 . 횡 단면 별 하상경사의 변화

#### 4. 중간 결론 및 후속 실험

만곡수로에서의 고정상 및 이동상 실험은 추후 계속 진행되므로 지금까지의 실험 자료에 의한 간략한 분석과 그에 따른 중간 결론은 다음과 같다.

- 1) 만곡부에서의 유속분포는 최대 점유속이 만곡부 전반부에서는 내측에서 발생하다가 중앙부에서 수로의 중심으로 이동하며, 후반부에서는 수로의 외측으로 치우치는 경향을 보였다. 이는 만곡부의 곡률 반경과 수로폭의 비 ( $r_c/B$ )에 따라 상당한 변화가 예상되어진다.
- 2) 만곡부에서의 소류력 분포는 소류력을 직접 측정치 못하여 바닥 경계면 부근의 속도구배에 의하여 계산되어 임의성을 배제하기 어려웠으며 따라서 이동상 실험의 결과와는 일치하지 않는 경향을 보였다.
- 3) 날개벽을 설치하지 않은 수평하상에서 일정 실험유량을 통수 시킴에 따라 통수 시간이 경과함에 따라  $\theta = 60^\circ$  부근의 수로 외측에서 세굴이 심화되며,  $\theta = 90^\circ$  부근에서 세굴이 둔화되다가 만곡 후반부에서 세굴이 다시 심화되어  $\theta = 170^\circ \sim 180^\circ$  부근에서 세굴현상이 극도에 달함을 보였다. 이는 만곡부의 부차류 및 나선류의 영향에 의한 것으로 풀이되며 만곡도 및 곡률반경에 따른 상당한 변화가 예상된다.
- 4) 일정 실험 유량하에서 날개벽을 설치하여 하상 변동을 조사 해본 결과 날개벽과 외측벽 사이의 전구간에서 퇴적 현상이 발생한 반면 날개벽 내측에서 세굴이 되는 현상을 보임에

따라 유심선이 외측벽에서 날개벽 내측으로 이동하는 성향을 보였다.

따라서 수로 만곡부에서의 날개벽 공법은 침식을 방지할 수 있음을 실험적으로 알 수 있다. 그러나 날개벽 내측에서의 새로운 세굴 현상을 방지할 수 있는 방법 및 날개벽 공법의 효율성을 높일 수 있는 방안이 후속 실험에서 강구되어야 할 것이다.

또한 후속 실험에서는 다음의 고려 사항이 추가되어야 한다.

- 1) 고정상 실험에서 소류력 계산을 위한 바닥 경계면 부근의 유속 측정
- 2) 날개벽의 재원, 간격, 갯수 및 배열등의 조정에 따른 효율성 판단
- 3) 확률 홍수량이 아닌 평상시 하천 유량에서의 날개벽 효과
- 4) 날개벽 내측선에서의 새로운 세굴 현상의 방지