

全面越流形 階 段式魚道の 水理特性

○김진홍*, 양승진**, 장전근***

1. 서론

전면월류형 계단식어도는 최근까지 선진국의 기존 하천에 설치되었으며, 우리나라에서도 지금까지 동해안 하천 또는 서,남해안의 방조제에 부속 설치되고 있거나 설치중이다.¹⁾ 그러나 최근들어 선진국에서는 기존의 전면월류형 계단식어도가 특정 어류의 이동만을 고려하고 있으며, 더우기 어도 내에서의 흐름현상이 어류이동에 바람직스럽지 못하다는 이론이 제기됨에 따라, 기존 어도의 수리학적 현상 및 어류이동에 미치는 영향을 재검토하고 있으며, 이의 대책으로서 새로운 형태인 Denil식 어도, Ice harbour식 어도 및 Vertical slot식 어도들이 제시되고 있다. 따라서 본 연구에서는 우리나라 하천 특성 및 어류이동 특성을 고려한 어류이동에 효율적인 어도설계법 연구의 일환으로서 기존의 전면월류형 계단식어도의 수리특성을 수리실험에 의해 규명하고자 한다.

2. 전면월류형 계단식어도의 특성 및 수리현상

전면월류형 계단식어도는 그림 1에 나타나 있듯이 격벽에 notch와 orifice가 서로 대각선 형태로 설치된 구조물로서, 유량이 작으면 흐름은 notch로 흐르게 되고 유량이 많으면 전면월류 형태로 된다. 따라서 흐름이 작을 때는 notch로만 흐르게 함으로써 소량의 흐름에도 어류이동을 가능케 하는 것을 목적으로 하고 있다. 또한 이 어도는 notch를 통한 월류현상이 낙차흐름을 형성하기 때문에 어류의 상류이동을 용이하게 함으로써 notch가 없는 직사각형이나 사다리꼴의 단순격벽보다 유리하다고 알려져 왔다.²⁾ 이같은 이유로 해서 전면월류형 계단식어도는 선진국의 하천에 널리 설치되었었고, 우리나라도 동해안의 하천과 서,남해안의 방조제 및 하천에 설치되었거나 지금도 설치중이다.¹⁾

그러나 최근들어 선진국에서는 전면월류형 계단식어도의 수리특성이 어류이동에 바람직하지 못하다는 내용이 발표되었으며, 다음과 같은 여러 문제점을 지니고 있다고 하였다.³⁾

전면월류형 계단식어도의 문제점

- 1) 격벽 직하류부에 기포, 와류, 순환류 등이 형성되어 어류이동에 비효율적이다.

* : 광주대학교 공과대학 토목공학과 조교수

** : 광주대학교 공과대학 토목공학과 석사과정 졸업

*** : 광주대학교 공과대학 토목공학과 석사과정

- 그림 2에 나타나 있듯이 격벽 직하류부에는 수위상태에 따라 도수, standing wave가 발생하며 이로 인해 많은 기포, 와류가 발생된다. 또한 notch와 잠공이 대각선 방향으로 설치되어 주흐름이 아닌 부분에서는 수평순환류가 발생된다. 일반적으로 어류는 기포, 와류영역을 기피하는 경향이 있으며 순환류가 발생하면 어류는 순환류에 거슬러 계속 순환하기 때문에 어도 내에서의 체류시간이 길어지고 따라서 어류이동에 비효율적이다.

2) 낙하류와 표면류가 동시에 나타남으로써 흐름의 불안정성이 발생한다.

- 격벽을 월류하는 흐름은 유량의 변화, 격벽 낙차, pool 간격 등에 따라 낙하류, 표면류 및 낙하류와 표면류가 교대로 나타나는 천이류가 발생한다. 만약 어도를 통한 낙하류와 표면류가 수시로 바뀌는 천이류 상태를 나타내면 어류의 이동에 바람직하지 못하다는 것은 분명한 사실이다.

3) 횡파가 발생할 수 있다.

- 기존의 계단식어도는 흐름이 전 격벽을 통해 월류하므로 격벽 부근으로부터 공기의 입,출입이 불가능하게 된다. 따라서 월류하는 흐름은 그림 3에서 보는 바와 같이 부착nappe와 박리현상이 교대로 발생되며, notch가 zig-zag로 설치되어 있으므로 흐름은 횡방향 성분을 갖게 되고 이로 인해 횡파가 발생한다.

3. 수리실험 및 계측

기존 전면월류형 계단식어도의 수리현상을 분석하기 위해 수리실험을 하였다. 모형제작은 광주대학교 토목공학과 수리실험실에서 실시하였으며, 모형축척은 기존 계단식어도의 표준구조물 규격과 실험수로 여건을 고려하여 1/5로 하였다. 실험수로는 폭이 40cm, 높이 40cm, 길이가 20m이며 구배조정이 가능한 가변경사수로이다. 수로 내에 설치된 어도는 notch와 orifice가 인접 격벽과 서로 대각선 방향으로 되어 있으며, notch의 규격은 깊이가 4cm, 폭이 13cm이고, orifice는 깊이와 폭이 각각 8cm의 정사각형으로 되어 있다. 격벽간 거리는 30cm이며 격벽 낙차는 3cm로서 어도경사는 1/10에 해당한다. 모형은 격벽, 어도 바닥 모두 두께 12mm의 방수합판을 사용하였으며 격벽이 어도 바닥에 잘 부착되도록 투명 silicon을 사용하였다.

실험조건으로는 유입량에 따른 notch와 잠공 및 격벽 pool에서 흐름을 관찰하고 수위와 유속을 측정하였다. 어도 유입량은 유량조절밸브를 이용, 조절하였다. 유입량 수위는 수로 상류단에 위치한 실험수로 수문을 사용하여 조절하였다. 또한 하류단 수위는 실험수로 끝단에 설치된 상,하 수직이동 weir를 사용하여 조절하였다. 흐름의 관찰은 수로의 측벽이 투명유리로 제작, 설치되어 있어 관찰이 가능하다. 기포영역 및 와류현상을 정량적으로 분석하기 위해 측벽 유리판에 투명 scale을 제작, 설치하고 염료를 주입하였으며, 강한 조명등을 설치하고 비디오카메라를 이용하여 흐름현상을 촬영하였다. 촬영된 흐름현상은 다시 시간측정용 비디오테이프에 녹화함으로써 시간별 흐름현상을 분석할 수 있도록 하였다.

흐름의 유속은 2방향 디지털유속계를 사용하여 측정하였으며, 수위는 point gauge와 투명자물병, 이용하여 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

기존 전면월류형 계단식어도를 통한 흐름현상은 그림 4에 나타나 있다. 그림 4를 보면 notch를 통한 흐름은 표면류를 나타내면서 S자형을 그리고 있고, 격벽부를 통한 흐름은 낙하류를 나타내고 있다. 이 흐름은 격벽을 월류하면서 곧바로 바닥으로 잠입한 후 orifice를 통해 분출되는 흐름과 합쳐지면서 하류측 notch 부근에서 솟아오르는 현상을 보이고 있다. 솟아오른 흐름은 notch를 통해 흐르는 표면류에 합쳐지면서 하류측 notch를 향하고 있다. 따라서 기존의 계단식어도는 낙하류와 표면류가 동시 나타나며, 낙하류 영역은 인접격벽과 zig-zag 형태로 나타나는 불안정한 모습을 보이고 있다. Notch를 통한 흐름이 표면류를 나타내는 이유는 격벽간 거리에 비해 월류유량이 많기 때문이며, 격벽부를 통한 흐름이 낙하류를 나타내는 이유는 월류유량이 notch 흐름보다 작고 잠공을 통한 분출류의 영향으로 판단된다.

격벽을 월류한 흐름은 직하류부에서 많은 기포를 발생시키고 있다. 이 기포는 격벽 최상류단 pool에서는 발생되지 않으나 하류로 갈수록 기포발생이 많아지며 발생영역도 커지고 있다. 이는 notch와 orifice가 인접 격벽과 대각선 방향으로 설치되어 있어 흐름이 중,횡 방향을 동시에 갖고 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 최상류단 pool에서는 흐름은 종방향 성분만 갖고 있기 때문에 기포가 거의 발생되지 않았으나 그 다음 pool부터 흐름은 횡방향 성분을 갖기 시작하면서 기포가 발생되고, 하류 pool로 갈수록 횡방향 성분이 커지면서 기포발생도 비례하여 커지는 것으로 나타났다.

그림 5는 무차원유량 \hat{Q} 에 따른 기포발생 정도를 나타내고 있다. 여기서 무차원유량 \hat{Q} 는 Katopodis(1987)에 의해 정의된 값으로 다음 식으로 표시된다.⁴⁾ 즉,

$$\hat{Q} = \frac{Q}{bSL^{3/2}\sqrt{g}} \text{-----} (1)$$

여기서 Q 는 어도를 통과하는 유량(m^3/s)이며 S 는 흐름의 경사, b 는 어도 폭(m), L 은 격벽 사이의 거리(m)이다. 또한 N 은 pool의 총 갯수, n 은 대상지점까지의 pool 갯수, H 는 pool의 수심(m), h 는 기포의 수직영역(m), l 은 기포의 흐름방향 영역(m)을 나타낸다. Katopodis의 결과에 의하면 $\hat{Q} = 0.22\sim 0.31$ 이 두 상태의 천이 상태이며 \hat{Q} 가 0.31 보다 크면 표면류 상태, \hat{Q} 가 0.22보다 작으면 낙하류 상태를 나타낸다고 하였다.⁴⁾ 본 실험에서는 $\hat{Q} = 0.20\sim 0.40$ 에서 천이류 상태가 나타났고 \hat{Q} 가 0.20보다 작으면 낙하류, \hat{Q} 가 0.40보다 크면 표면류 상태로 나타났다. Katopodis의 실험결과에 비해 본 실험 결과에서 얻어진 천이상태 영역이 더 넓은 것은 그만큼 흐름이 불안정하다는 것을 나타내는데, 이는 Katopodis의 실험은 계단식어도의 격벽이 notch가 없는 단순 격벽인데 반해 본 실험의 경우 격벽에 notch와 잠공이 서로 대각선 방향으로 설치되어 있어 잠공으로 부터의 분출류와 격벽월류 흐름이 S자 형을 나타내는 등 흐름이 복잡하고 불안정하기 때문인 것으로 판단된다. 상기 언급한 월류 흐름이 S자형을 나타낸다는 것은 흐름의 유속이 종방향과 횡방향 성분을 동

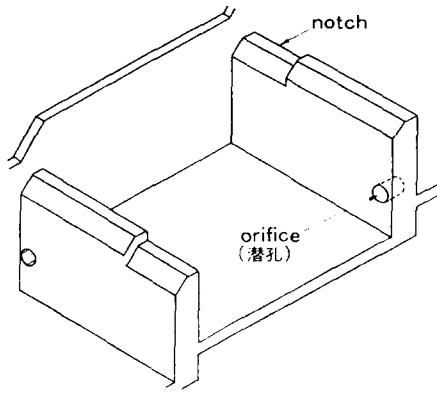


그림 1. 기존 전면월류형 계단식어도

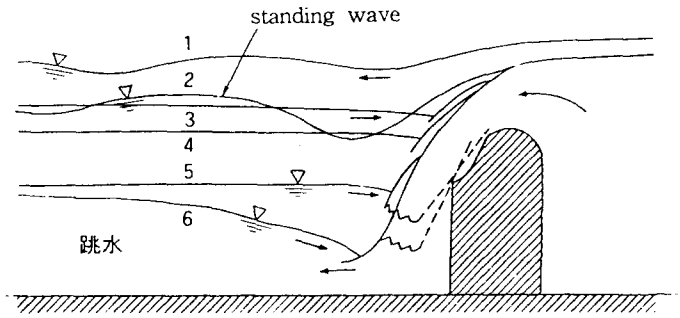
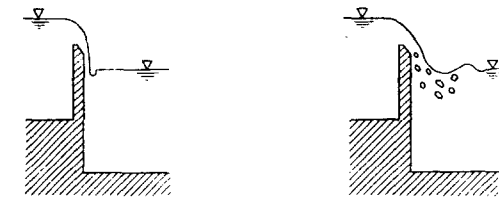
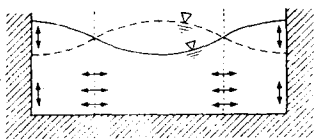


그림 2. 수위상태에 따른 수면상태



(a) 부착 nappe

(b) 박리



(c) 횡파

그림 3. 격벽 하류부에서의 흐름상태

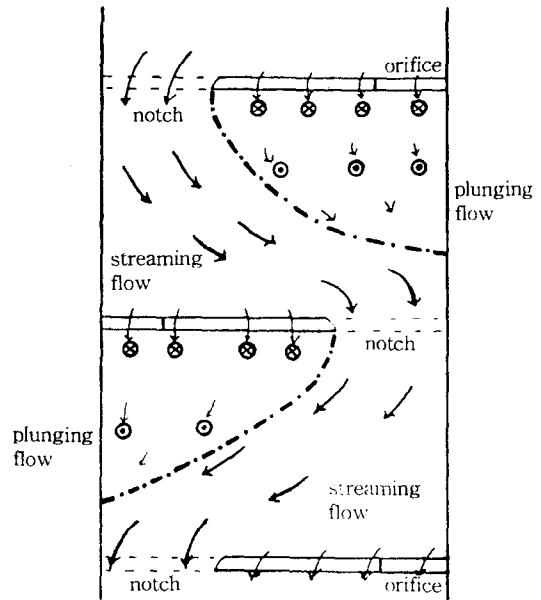


그림 4. 격벽 월류 흐름 현상 (평면도)

시에 갖고 있음을 뜻한다. 이는 앞서 언급했듯 notch와 잠공이 일직선으로 설치되어 있지 않고 인접격벽과 대각선 방향(zig-zag 방향)으로 설치되어 있기 때문이며 이로 인해 격벽을 월류한 흐름은 부착 nappe와 박리가 교대로 발생하여 결국 흐름은 좌, 우로 요동을 치는 횡파 현상까지 나타났

다. 그림 6은 무차원 유량과 횡파 발생 주기를 나타내고 있다. 그림 6을 보면 무차원유량의 증가에 따라 크게 차이는 나지 않으나 횡파 발생주기는 짧아지고 있음을 알 수 있다. 특히 천이류 상태에서는 발생주기가 갑자기 작아짐을 알 수 있는데 이는 그만큼 횡파가 자주 발생하며 흐름도 불안정함을 뜻한다. 그림 6에는 무차원 유량값에 따른 낙하류와 표면류 영역도 함께 표시되어 있다. 실선이 본 실험에서 얻은 측정치이며 점선은 Katopodis의 실험 결과치이다. 측정 결과 횡파 발생주기는 대체적으로 부착 nappe와 박리의 교대 발생주기와 일치하고 있음을 알 수 있었으며, 대략적인 값을 볼때 낙하류에서는 5~7초 간격, 표면류에서는 3~5초 간격이며 천이류 상태에서는 1~3초 간격을 나타내었다.

상기 사항을 종합해 볼 때 기존의 전면월류형 계단식어도는 notch와 잠공이 서로 반대방향에 설치되어 있으며, 또한 인접격벽과 zig-zag형태로 설치되어 있어 흐름이 매끄럽지 못하고 S자형을 그리면서 이로 인해 다음과 같은 문제점이 발생된다. 즉,

- ① 흐름이 시간에 따라 일정치 못하고 표면류와 낙하류가 동시에 나타나는 불안정을 보이고 있다.
- ② 주 흐름이 S자형을 그리면서 유속은 종방향과 횡방향 성분을 동시에 갖고 이로 인해 와류, 순환류가 발생된다.
- ③ 상기 원인으로 흐름은 부착 nappe와 박리 및 이로 인한 횡파가 주기적으로 나타나는 혼란스런 양상을 나타내고 있다.

5. 맺음말

수리실험 결과 기존의 전면월류형 계단식어도는 어류 이동에 효율적이지 못하며, 어류 이동을 효율적으로 하기 위한 새로운 형태의 계단식어도가 요구된다. 현재 선진국에서는 이의 대책으로 부분월류형 계단식어도인 Ice harbour식 어도, vertical slot식 어도 및 Larinier식 어도 등이 제시되고 있다. 한편 Ice harbour식 어도는 기본형, 돌기설치형, 도류벽설치형 등 여러 형태가 있으며, vertical slot식 어도와 Larinier식 어도를 혼합한 여러 형태들도 제시되고 있다. 따라서 이들 어도에 대한 수리현상의 분석과 동시에 우리나라 하천특성과 어류이동 특성을 고려한 적정 어도형태의 개발이 필요하다 하겠다.

참 고 문 헌

1. 김진홍 : “계단식어도에서 격벽형상에 따른 수리학적 특성 및 어류의 상류이동”, 「한국수자원학

회지」 제 29권 제 6호:102~114, 1996.

2. 中村中六 : 「魚道の 設計」, 東京 : 財團法人 ダム水源池環境整備センター, 1994.
3. 中村俊六 : 「魚道 の はなし」, 東京 : 財團法人 リバフロント整備センター, 1995.
4. Katopodis, C. : "A Guide to Fishway Design" 「Internal report, Canada Dept. of Fisheries and Oceans」 Vol. 15, No. 2 : 27~42, 1987.

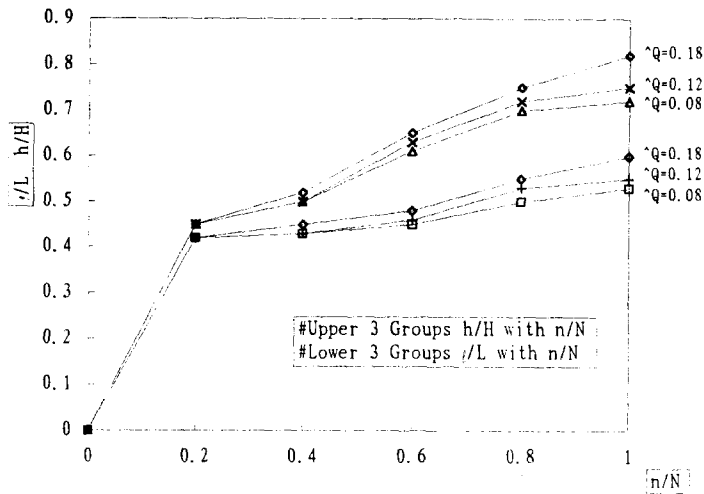


그림 5. 무차원유량에 따른 기포발생 정도

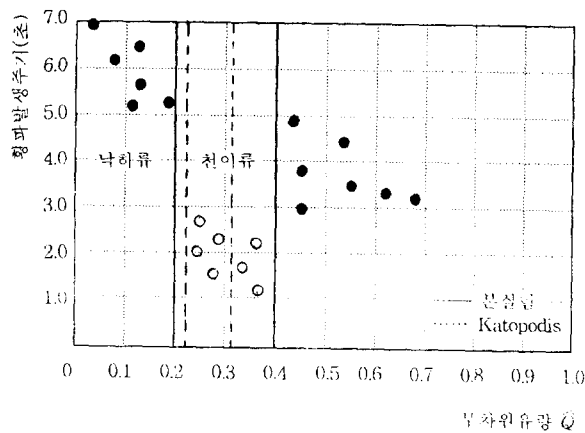


그림6. 무차원유량과 횡파발생 주기와의 관계