

테트라포드 사방댐의 적용성 평가*
- 산청군 홍계리 지역을 대상으로 -

김기흥¹⁾·박재현²⁾·마호섭³⁾

¹⁾ 경남과학기술대학교 토목공학과 ²⁾ 경남과학기술대학교 산림자원학과 ³⁾ 경상대학교 산림환경과학부

Applicability Evaluation of Tetrapod Debris Barrier*
- A Case of Honggyeri Area in Sanchung County -

Kim, Ki Heung¹⁾·Park, Jae Hyeon²⁾ and Ma, Ho Seop³⁾

¹⁾ Dept. of Civil Eng., Gyeongnam National University of Science and Technology,

²⁾ Dept. of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology,

³⁾ Dept. of Forest Environmental Resources, Gyeongsang National University.

ABSTRACT

In order to connect eco-corridor and to harmonize with natural environment, it is necessary to construct small debris barrier. Therefore, we will evaluate applicability of small debris barrier which made of tetrapod utilized in construction of seashore protection facilities and breakwater.

From result compared with the adaptation processes in fields, tetrapod were stabilized to critical tractive force. Stability evaluation method on sliding and overturn of tetrapod debris barrier was developed, and hereafter could be applied to similar debris barriers.

According to results analyzed to continuity on sediment supply in debris barrier, boulders were deposited in upstream and gravels were deposited in downstream. Therefore, tetrapod debris barrier will be able to prevent in the long-term the erosion of river bed in down-stream, and the maintenance is

* 이 연구는 2011년 산림과학기술개발사업 연구비지원에 의해 수행되었음.

First author : Kim, Ki Heung, Dept. of Civil Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology, 150, Chilam-Dong, Jinju, Gyeongnam 660-758, Korea,
Tel : +82-55-751-3294, E-mail : khkim@gntech.ac.kr

Corresponding author : Park, Jae Hyeon, Dept. of Forest Resources, Gyeongnam National University of Science and Technology, 150, Chilam-Dong, Jinju, Gyeongnam 660-758, Korea,
Tel : +82-55-751-3248, E-mail : pjh@gntech.ac.kr

Received : 3 January, 2012. **Revised** : 7 February, 2012. **Accepted** : 9 February, 2012.

easy because dredging is not necessary. Current were formed in between the tetrapod provided eco-corridors for fishes and shellfishes.

Key Words : *Continuity, Overturn, Sediment, Sliding, Stability.*

I. 서 론

하천 상류의 계류에는 토사재해를 방지하기 위하여 사방댐, 바닥막이공, 바닥다지기공 등 횡단구조물이 많이 설치되어 있다. 특히, 지금까지 설치된 사방댐은 산사태 및 토석류 발생시 다량의 토사를 저류할 수 있는 불투과형 사방댐으로 되어 있어 저사기능은 우수하나 생태통로를 차단하여 어류의 이동을 저해할 뿐만 아니라 주변의 자연경관을 훼손하고 있다. 또한, 불투과형 사방댐의 저류지에 쌓인 낙엽의 부패로 인한 수질악화 등 환경적 측면에서 계류 생태계 파괴의 주요인으로 평가되어 이에 대한 개선대책이 필요하다(박재현, 2002; 前川, 1999; 遠藤 등, 2006; 沼田・神田, 2008). 아울러, 사방댐 내의 퇴사는 주기적으로 준설이 필요할 뿐만 아니라 하류로의 토사공급을 차단하므로 하류 하천구간의 장기적 하상저하를 유발하여 하천구조물의 파괴원인이 되기도 한다(白江 등, 2000).

토사재해 방지 및 경감을 목적으로 시공된 불투과형 사방댐은 방재효과를 제고할 수 있어도 계류를 횡단방향으로 차단하기 때문에 최근 계류 생태계 파괴의 원인으로 지적되고 있다. 이 때문에 방재적 기능의 발휘, 계류 생태계에 대한 영향 부하의 경감을 위하여 불투과형 사방구조물의 슬릿트(slit)화가 검토되고 있지만 아직 사례가 흔하지 않으며, 어떠한 효과를 나타낼 것인가에 대한 이론적 체계가 미흡한 실정이다.

따라서, 생태통로 확보 및 주변의 자연환경과 조화를 이룰 수 있는 중소형 사방댐 공법의 개발 및 도입이 필요하므로, 본 연구에서는 해안보전시설 및 방과제에 사용되는 테트라포드(Tetrapod)를 활용한 사방댐 공법의 적용성을

평가하고자 하였다.

테트라포드를 야계사방 구조물로서 활용할 경우에는 다음과 같은 장점이 있다. ① 정사면체가 기본 형상이므로 중심의 위치가 낮아 유수력에 대한 안정성을 확보할 수 있다. ② 일렬로 배치할 경우 블록과 블록 사이에 수로가 형성되므로 유사이송의 연속성을 확보하고, 생태통로를 유지할 수 있다. ③ 하부의 중심부가 지지점보다 높기 때문에 야계에서 간단한 평탄작업으로도 거치가 가능하다. ④ 블록주변에 사석이 채워질 경우 맞물림 효과에 의하여 구조적으로 활동 및 전도에 대한 안정성을 확보할 수 있다. ⑤ 상부가 기둥역할을 하므로 슬릿트 사방댐과 같은 유목 차단효과를 발휘할 수 있다. ⑥ 블록의 중심이 낮은 형상이므로 운반시 안전성을 확보할 수 있다. ⑦ 접근근소가 없는 계곡부에 헬기 등을 이용할 경우 자연환경 훼손을 최소화하면서 구조물 설치가 가능하다는 여러 가지 장점이 있다.

본 연구에서는 테트라포드의 파괴원인, 파괴형태 및 설치상태 등 설계의 전제조건을 명확히 하고, 이들에 대한 분류 지표(指標)로서 유체력, 토압, 하상저하를 외적(外的) 요인으로 하는 구조모델에 대한 역학적 안정성, 유사공급의 연속성 및 생태통로 기능 확보에 대한 적용성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

1. 조사대상지의 현황

연구 대상지의 위치는 그림 1에 나타난 바와 같이 경남 산청군 삼장면 홍계리이며, 지방하천인 평촌천 지류의 상류 계곡으로서 홍계1지구는 폭 28m인 구간에 5ton급 테트라포드 11기를

표 1. 연구대상지의 홍수량 산정결과.

| 지구 | 항목 | 유역면적 (km ²) | 유출계수 | 도달시간 (min) | 적용빈도 (년) | 강우강도 (mm/hr) | 홍수량 (m ³ /sec) |
|--------|----|-------------------------|------|------------|----------|--------------|---------------------------|
| 홍계 1지구 | | 2.70 | 0.80 | 4.373 | 100 | 140.4 | 86.11 |
| 홍계 2지구 | | 1.00 | 0.80 | 1.458 | 100 | 140.4 | 28.70 |

2009년 11월에 설치하여 소형 사방댐을 완공하였고, 홍계2지구는 폭 25m인 구간에 유목차단을 위한 강제 스크린을 부착한 5ton급 테트라포드 10기로 사방댐을 2010년 12월에 완공하였다. 본 연구를 수행하기 위하여 테트라포드 사방댐의 시공전후에 지형측량, 하상재료조사 및 모니터링을 포함한 현장조사를 시행하였다. 또한, 표 1에 나타난 수문자료를 이용하여 테트라포드 사방댐 설치구간에 대한 수리계산 결과를 근거로 구조물의 안정성과 적용성을 평가하였다. 수리계산에서 산정된 수심, 유속, 소류력, Froude수 등의 수리학적 인자를 이용하여 단위체적중량 2.5ton/m³의 사석의 직경 및 중량을 계산한 다음 사석의 중량과 같은 테트라포드의 체적을 환산하여 소류, 활동 및

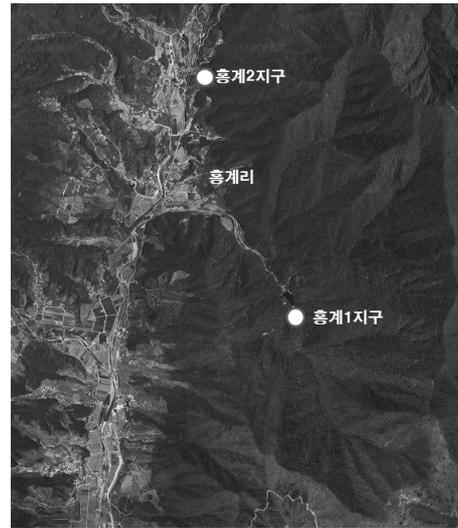


그림 1. 연구 대상지.



(a) 시공직후(2009) (b) 시공후 1년 경과(2010년) (c) 시공후 2년 경과(2011)
사진 1. 홍계 1지구의 현황.



(a) 시공직후(2010) (b) 시공직후(2010년) (c) 시공후 1년 경과(2011년)
사진 2. 홍계 2구의 현황.

표 2. 테트라포드의 제원

(단위 : mm)

| 종별 (t형) | 실중량 (t) | 체적 (m ³) | 거푸집면적 (m ²) | h | d | S | r1 | r2 | r3 | b | c | e |
|---------|---------|----------------------|-------------------------|------|------|------|-----|-----|-----|------|----|------|
| 4.0 | 3.68 | 1.6 | 8.62 | 1790 | 1920 | 2140 | 425 | 265 | 195 | 865 | 70 | 1170 |
| 5.0 | 4.60 | 2.0 | 10.00 | 1930 | 2075 | 2305 | 460 | 285 | 210 | 935 | 75 | 1260 |
| 6.3 | 5.75 | 2.5 | 11.52 | 2070 | 2225 | 2470 | 495 | 310 | 225 | 1010 | 80 | 1360 |
| 8.0 | 7.36 | 3.2 | 13.74 | 2260 | 2430 | 2700 | 540 | 335 | 245 | 1095 | 90 | 1475 |
| 10.0 | 9.20 | 4.0 | 15.88 | 2430 | 2610 | 2905 | 580 | 360 | 265 | 1175 | 95 | 1590 |

전도에 대한 구조적 안정성 평가를 시행하였다.

본 연구는 시범사업으로 설치한 테트라포드 사방댐의 현장 적용성과 구조적 안정성을 평가하기 위하여 테트라포드의 소류, 활동 및 전도에 대한 안정검토를 수행하고, 사후모니터링을 통하여 사방댐 설치 전후의 퇴사량입경분포 및 사방댐 하류로의 토사 통과 등을 분석하였다. 사진 1 및 사진 2는 본 연구대상자인 홍계 1 및 2지구의 테트라포드 사방댐의 설치현황으로서 시공 직후부터 경년변화를 나타낸 것이다.

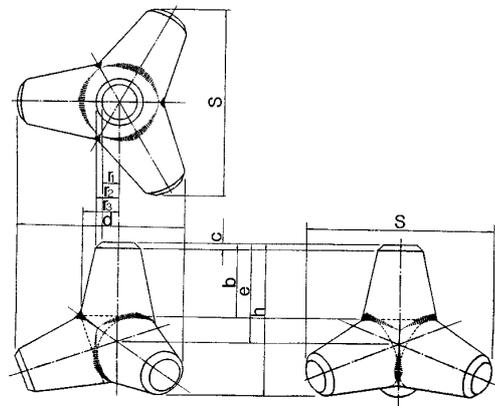


그림 2. 테트라포드의 제원.

2. 조사방법

테트라포드(Tetrapod : T.T.P)은 1949년 프랑스에서 개발되어 지금까지 세계 각지에서 이용되면서 해안에서의 소파효과와 더불어 구조적 안정성이 입증되었다. 테트라포드의 제원은 그림 2 및 표 2와 같고 0.5ton ~ 64ton까지 17종이 있으며, 본 연구에서는 5ton급을 적용하였으나 필요에 따라 더 큰 중량을 활용할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 테트라포드를 이용한 사방댐의 현장 적용성을 검토하는 것이므로 유체력, 토압, 하상저하를 외적(外的) 요인으로 하는 구조모델을 제시하며, 각 모델별로 역학적 안정성을 검토

하였다. 따라서, 시범사업 야계에 대한 검토결과에 따라 5ton급 테트라포드를 기준으로 안정성을 평가하였다.

테트라포드의 현장 적용성 평가 중에는 역학적 안정성 평가가 가장 중요하며, 이를 위해서는 우선 유수에 의한 유체력과 토압 및 수압 등의 외력을 산정해야 한다. 또한 계안에 작용하는 소류력, 테트라포드에 작용하는 항력 등의 유체력은 유속의 크기와 밀접한 관계가 있다. 테트라포드의 유체력에 대한 안정성 평가는 파괴유형을 토대로 그림 3~6과 같이 소류모델, 활동모델 및

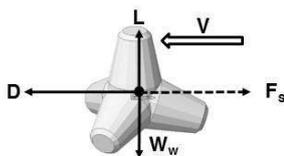


그림 3. 힘의 평형모델.

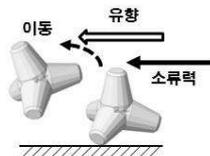


그림 4. 소류모델.

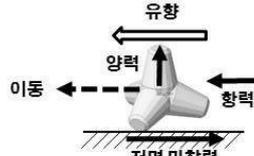


그림 5. 활동모델.

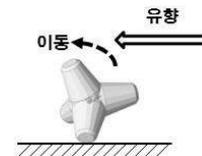


그림 6. 전도모델.

$$v_c = \left(\frac{80.9 d 10^{-4} h^{1/3}}{g n^2} \right)^{1/2} = 0.029 d^{1/2} h^{1/6} n^{-1} \quad (1)$$

$$d = \frac{g n^2 v_c^2 h^{-1/3}}{80.9 \times 10^{-4}} = 1,211 n^2 v_c^2 h^{-1/3} \quad (2)$$

전도모델로 구분하여 수행할 수 있다. 테트라포드는 단체(單體)로 취급할 경우 유체력에 대하여 소류에 대한 안정, 활동에 대한 안정 및 흐름방향의 전도에 대한 안정에 대하여 검토하였다.

일반적으로 유속 V 인 흐름 중에 설치된 테트라포드에 작용하는 힘은 그림 3에 나타낸 바와 같이 항력(抗力) D , 양력(揚力) L , 수중에서의 블록의 자중 W_m , 블록과 하상의 마찰력 F_s 에 의하여 결정된다.

1) 소류에 대한 안정성 평가

마찰속도가 어느 한계를 초과하여 하상 사력(砂礫)의 이동이 시작하는 한계소류력(限界掃流力)(τ_c)과 한계마찰속도(u_{*c})에 대해서는 여러 경험식이 제안되어 있다(Shields, 1936; 岩垣, 1956). 급류하천에 있어서는 사력의 입경이 mm 단위로 되는 경우가 없다. 경심, 입경이 주어졌을 때의 한계마찰속도에 대응하는 평균유속을 구할 수 있으며, 입경이 일정한 모래의 한계소류력은 입경과의 관계로부터 입경 3mm 이상의 사력이 이동을 시작하는 한계유속과 자갈(사력)의 입경의 관계는 다음 식 (1) 및 (2)에 의해 추정한다(岩垣, 1956).

여기서, v_c 는 한계유속, h 는 H.W.L(계획홍수위)시의 수심(m), d 는 입경(cm), n 은 조도계수, g 는 중력가속도($9.8m/sec^2$)이다. 위 식 (1) 및 (2)에서 조도계수는 각 하천마다 다르지만 급류하천은 대부분 단단면이므로 하상의 평균적인 조도계수를 n 으로 하면 한계유속 v_c 와 테트라포드의 중량 W (ton)과의 관계는 수심 h (m)의 변수이며, 검토결과 동일 조도계수의 조건에서 수심이 증가하면 소류에 대한 안정성이 증가한다. 한계소류력 공식은 평균유속공식과 같은 개념의 식이므로 급류하천은 대부분 단단면이므로 그 적용

성이 일반하천보다 유리하다.

또한, 한계소류력은 일반 하상재료를 대상으로 하지만 구조물에 대해서는 안전률을 적용한 한계상태설계법이 제안되어 있다. 하상재료의 평균입경 d_m 과 한계마찰속도 U_{*c} 의 관계 및 岩垣(Iwakaki)의 실험식을 MKS(m-sec)단위로 바꾸면 $U_{*c}^2 = 0.809 d_m$ (단, $d_m \geq 0.00303m$)이다. $U_{*c}^2 = g H I_e$ 이므로 Manning 공식에서 $I_e = U_{*c}^2 / g H$ 를 대입하면 식 (3)과 같이 하상재료의 이동 한계유속 V_d 가 구해진다.

$$V_d = \frac{1}{n} H^{2/3} I_e^{1/2} = \frac{1}{n} H^{2/3} \left(\frac{0.809 d_m}{g H} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$= \frac{H^{1/6} \sqrt{0.809 d_m}}{n \sqrt{g}}$$

야계사방 재료로서 자연석을 사용할 경우는 홍수시에도 이동하지 않는 중량 및 크기를 가지는 것으로 해야 한다. 구조물 주변의 국소유속 V_g 는 구조물로부터 떨어진 위치에서의 평균유속 V_m 에 대하여 최대 2배 정도로 설계하며 식 (4)와 같다. 여기서, V_m 은 만곡이나 세굴 등의 영향을 고려한 하안의 대표유속 V_0 를 이용한다.

$$V_g = 2 \cdot V_m \quad (4)$$

사석의 입경산정방법에는 한계상태설계법과 통상상태설계법의 2가지를 고려하는 방법이 있지만, 일반적으로 재료가 붕괴된 상태에서도 안정을 확보해야 하므로 식 (5)와 같이 한계상태설계법으로 소요입경을 산정한다.

$$d \geq F_s \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} (0.94 C_L + 0.162 C_D) \frac{V_g^2}{g} \quad (5)$$

여기서, d 는 사석의 직경(m), F_s 는 안전률(1.

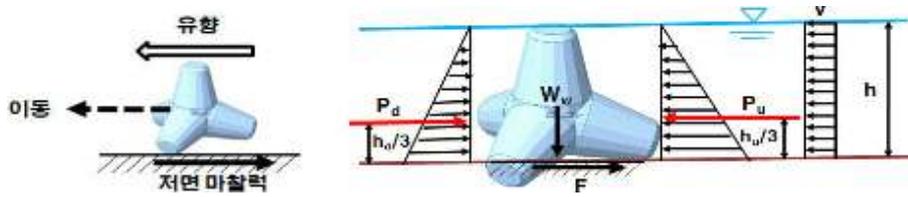


그림 7. 테트라포드의 활동 모델.

2~1.5), ρ_w 는 물의 밀도(1.0), ρ_s 는 콘크리트 밀도(2.3), C_L 는 양력계수(0.32), C_D 는 항력계수(0.4), V_g 는 국소유속(m/sec), g 는 중력가속도(9.8m/sec²)이다. 또한, 사석은 횡단경사(하류단)에 따라서 배치되기 때문에 다음 식으로 표현되는 Lane의 보정계수 K 에 의해 입경을 보정한다. 사면각도를 θ , 재료의 정지마찰각도를 ϕ 라 하면 식 (6)과 같으며, 소요입경은 식 (7)로서 구한다(川口 등, 2004).

$$K = \cos \theta \sqrt{1 - \tan^2 \theta / \tan^2 \phi} \quad (6)$$

$$d' = d/K \quad (7)$$

2) 활동 및 전도에 대한 안정성 평가

테트라포드에 작용하는 유체력이 저면마찰력을 초과하는 경우에는 블록의 밀립현상으로서 흐름의 작용력을 전체적으로 받는 경우에 발생하며, 그 기본 개념은 그림 7과 같다(安田, 2004).

이 경우 흐름이 테트라포드를 월류하며 직상하류의 수심 차이에 의한 정수압 차이와 동수압만 고려하면 된다. 또한 저항력인 마찰력은 블록의 전체적에 부력이 작용하므로 테트라포드의 수중무게와 마찰계수의 곱으로 산정될 수 있다. 따라서, 그림 7의 힘의 평형방정식은 식 (8)과 같다(林健 등, 2001; 重枝 등, 2004).

$$\frac{wh_u^2}{2} A - \frac{wh_d^2}{2} A + \frac{KV^2}{2} A = \mu W_w \quad (8)$$

여기서, h 는 수심(m)으로서 h_u 및 h_d 는 각각 상류단 및 하류단의 수심이며, A 는 테트라포드

의 흐름방향 연직투영면적, W_w 는 테트라포드의 수중무게, F 는 마찰력, P 는 정수압, K 는 테트라포드의 형상계수, V 는 평균유속, μ 는 마찰계수이다.

(1) 수압 산정

흐름 중에 설치되는 구조물에 작용하는 수압은 정수압과 동수압으로 구분되는 데, 일반적으로 구조물이 수중위어의 상태가 되면 상하류의 정수압은 무시하고, 급류구간에서의 큰 유속을 고려한 동수압만을 반영하면 된다. 정수압 및 동수압은 식 (9)~(11)과 같다

$$\text{상류단 정수압 } P_u = \frac{wh_u^2}{2} A, \quad (9)$$

$$\text{하류단 정수압 } P_d = \frac{wh_d^2}{2} A, \quad (10)$$

$$\text{동수압 } P_k = \frac{KV^2 A}{2} \quad (11)$$

여기서, P_k 는 동수압(ton), K 는 단면형상에 따른 저항계수(장방형 : 0.07, 원형 : 0.04 적용)이며, 동수압의 작용위치는 0.6H로 하였다.

(2) 블록의 자중

공칭중량 5톤 테트라포드 제원표에서 실제중량 4.6(ton)을 적용한다. 100년 빈도의 홍수시 테트라포드 야계사방댐은 완전월류에 의하여 침수되므로 전체적에 대한 부력을 검토하여 수중무게를 산정한다. 테트라포드의 수중무게는 식 (12)로 산정된다.

$$W_w = W - w_s V_T \quad (12)$$

테트라포드 전체가 부력을 받는 것으로 가정하므로 수중중량은 2.2ton으로 산정되었다. 여기서, w_s 는 월류수의 단위체적당중량(1.2ton/m³)이고, V_T 는 테트라포드의 체적(m³)이다.

(3) 활동에 대한 안정성 평가

흐름 중에 설치된 테트라포드의 활동에 대한 안정검토는 안전율 1.5일 때 식 (13)의 조건을 만족시켜야 한다.

$$\frac{KAV^2/2}{\mu W_w} > 1.5 \tag{13}$$

여기서, 테트라포드 사방댐이 설치되는 구간은 주 하상재료는 사력이므로 활동에 대한 저항력 검토시 하상재료와 테트라포드의 마찰계수 $\mu = 0.65$ 로 하였다.

(4) 전도에 대한 안정성 평가

유체력의 작용에 의하여 1 점을 지지점으로 하여 부재가 회전하면서 넘어지는 현상으로서 테트라포드의 경우 그림 8과 같이 하류단에 지지점이 2개인 경우와 1개인 경우로 분리하여 검토하여야 한다.

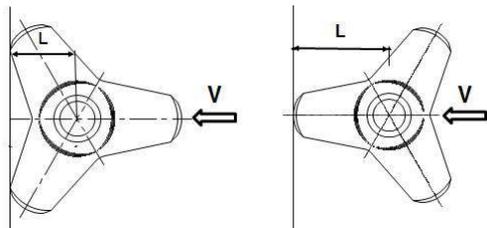


그림 8. 테트라포드의 평면배치에 따른 전도 평가.

흐름 중에 설치된 테트라포드의 전도에 대한 안정검토는 그림과 같이 블록의 평면배치에 따라 작용모멘트의 팔길이가 다르지만 2가지 경우 모두 안전율 2.0일 때 식 (14)의 조건을 만족시켜야 한다. 저항모멘트는 $M_r = W_w \times L$, 작용모멘트는 $M_a = (KAV^2/2) \times 0.6h$ 이다.

$$\frac{(KAV^2/2) \times 0.6h}{W_w \times L} > 2.0 \tag{14}$$

3) 유사공급의 연속성 및 생통통로 기능 평가
투과형 사방댐으로서 유사공급의 효과를 평가하기 위하여 2010년의 지형측량 결과와 2011년 지형측량 결과를 이용하여 사방댐 상하류의 퇴적 현황을 조사하고 퇴적량 및 하류로의 유사 이송량을 측정하였다. 또한, 선격자(표적) 및 20cm 간격으로 분할한 1m×1m의 격자망을 이용하여 하상재료를 조사, 분석하였다.

테트라포드 사방댐의 생통통로 기능 평가를 위하여 댐 상류에 서식하는 어패류를 조사하였다.

III. 결 과

본 연구에서는 1차원 수리계산 프로그램인 HEC-RAS를 이용하여 야계입지해석에 필요한 유속, 수심, 소류력, Froude수 등 수리학적 인자를 산정하였다. 표 3 및 표 4는 홍계 1 및 2지구의 수리계산 결과로서 대부분의 구간에서 2.0m/sec이상의 유속을 나타내어 홍수시 세굴 및 측방 침식이 발생하는 하도이며, Froude수가 1이상으로서 사류상태의 흐름이므로 강성호안 및 바닥막이공 등 구조물 계획이 필요함을 알 수 있다. 그림 9와 10은 대상지의 평면도와 횡단면도이다.

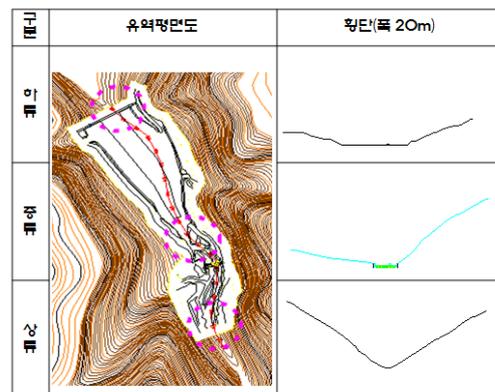


그림 9. 홍계 1지구의 평면도 및 횡단면도.

표 3. 홍계 1지구의 수리계산결과.

| 측점 | 최심하상고 (m) | 홍수위 (m) | 수리수심 (m) | 유속 (m/s) | 소류력 (N/m ²) | Fr수 |
|----------|-----------|---------|----------|----------|-------------------------|------|
| No.10 | 274 | 276.39 | 2.10 | 0.44 | 6.97 | 0.10 |
| No.11 | 273 | 276.40 | 2.45 | 0.34 | 4.01 | 0.07 |
| No.12 | 275 | 276.32 | 0.79 | 2.79 | 386.20 | 1.00 |
| No.12+13 | 276 | 276.95 | 0.43 | 3.63 | 823.14 | 1.77 |
| No.12+14 | 276 | 277.43 | 0.83 | 2.87 | 552.52 | 1.00 |
| No.12+15 | 276 | 277.83 | 1.27 | 1.19 | 62.81 | 0.34 |
| No.13 | 277 | 277.82 | 0.79 | 1.72 | 146.92 | 0.62 |
| No.14 | 278 | 279.11 | 0.40 | 2.67 | 431.39 | 1.34 |
| No.15 | 280 | 280.71 | 0.59 | 2.40 | 313.33 | 1.00 |
| No.16 | 281 | 281.73 | 0.63 | 2.60 | 359.53 | 1.05 |
| No.17 | 282 | 282.83 | 0.71 | 2.63 | 355.10 | 1.00 |
| No.18 | 281 | 283.41 | 1.39 | 1.53 | 96.90 | 0.41 |

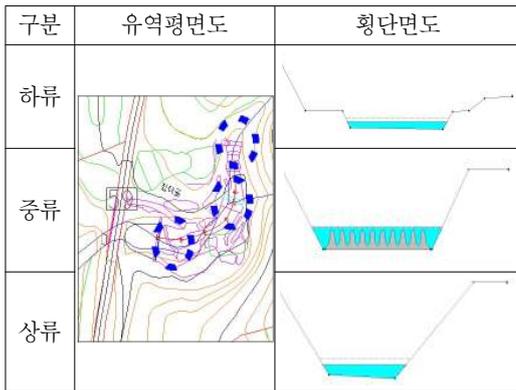


그림 10. 홍계 2지구 평면도 및 횡단면도.

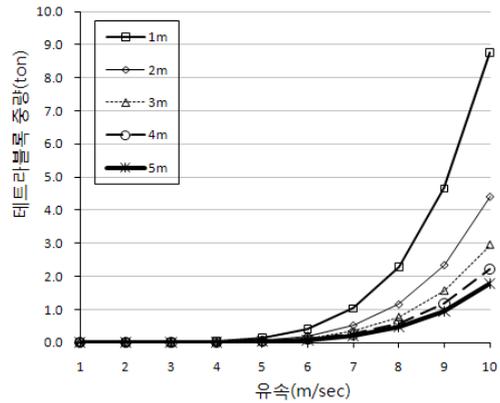


그림 11. 수심별 한계유속-테트라포드 중량.

1. 소류에 대한 안정성 평가 결과

급류하천의 단단면 특성 및 평균유속을 적용하는 한계소류력 이론을 대상구간에 적용한 결과, 조도계수 0.06이하 및 유속 6m/sec 이하의 조건하에서는 표 5~8 및 그림 11~14에 제시한 바와 같이 5ton급 테트라포드가 소류에 대한 안정성을 확보할 수 있는 것으로 평가되었다.

2. 활동 및 전도에 대한 안정성 평가

활동에 대한 안정성을 평가한 결과 표 9에 나타난 바와 같이 사방댐 설치지점의 유속이 4.0m/sec 이하일 경우에 대해서 적용 가능함을 확인하

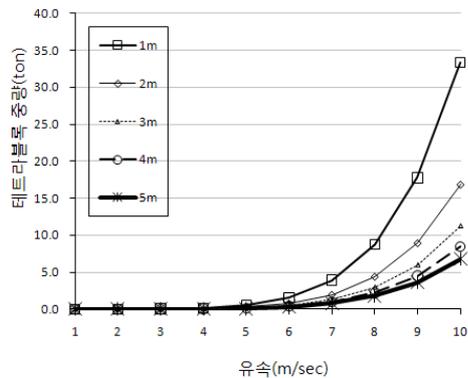


그림 12. 수심별 한계유속-테트라포드 중량.

표 4. 홍계 2지구의 수리계산결과.

| 측점 | 최심하상고 (m) | 홍수위 (m) | 수리수심 (m) | 유속 (m/s) | 소류력 (N/m ²) | Fr 수 |
|----------|-----------|---------|----------|----------|-------------------------|------|
| No. 0 | 243.61 | 244.34 | 0.62 | 2.49 | 331.65 | 1.01 |
| No. 0+15 | 241.44 | 244.67 | 2.37 | 0.44 | 6.58 | 0.09 |
| No. 1 | 244.03 | 244.69 | 0.54 | 2.29 | 293.57 | 1.00 |
| No. 2 | 243.94 | 245.33 | 0.90 | 1.53 | 111.08 | 0.52 |
| No. 3 | 245.26 | 246.08 | 0.69 | 2.57 | 342.03 | 0.99 |
| No. 3+13 | 245.63 | 246.57 | 0.44 | 3.42 | 712.46 | 1.65 |
| No. 3+14 | 245.63 | 246.96 | 0.77 | 2.76 | 489.08 | 1.01 |
| No. 3+15 | 245.63 | 247.32 | 1.13 | 1.24 | 69.04 | 0.37 |
| No. 4 | 246.19 | 246.54 | 0.31 | 8.03 | 4376.35 | 4.64 |
| No. 5 | 251.46 | 252.59 | 0.87 | 2.92 | 411.51 | 1.00 |
| No. 6 | 251.46 | 253.26 | 1.40 | 1.6 | 106.29 | 0.43 |
| No. 7 | 251.46 | 253.43 | 1.53 | 1.42 | 81.83 | 0.37 |
| No. 8 | 251.46 | 253.56 | 1.62 | 1.31 | 68.69 | 0.33 |

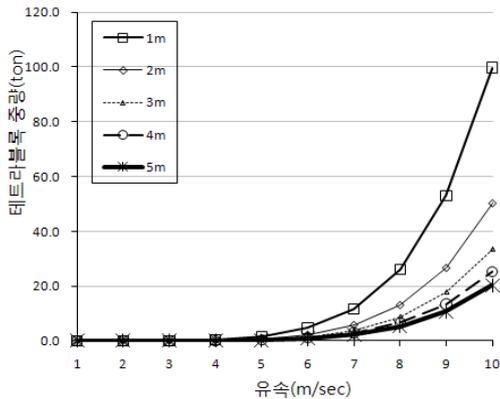


그림 13. 수심별 한계유속-테트라포드 중량.

표 5. 수심별 한계유속과 테트라포드 중량(ton).

| 구분 (n=0.04) | 수심(m) | | | | |
|----------------|-------|------|------|------|------|
| | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| 1.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3.0 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 4.0 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 5.0 | 0.14 | 0.07 | 0.05 | 0.03 | 0.03 |
| 6.0 | 0.41 | 0.21 | 0.14 | 0.10 | 0.08 |
| 7.0 | 1.03 | 0.52 | 0.35 | 0.26 | 0.21 |
| 8.0 | 2.30 | 1.16 | 0.77 | 0.58 | 0.47 |
| 9.0 | 4.65 | 2.34 | 1.57 | 1.18 | 0.95 |
| 10.0 | 8.76 | 4.41 | 2.95 | 2.22 | 1.78 |

표 6. 수심별 한계유속과 테트라포드 중량(ton).

| 구분 (n=0.05) | 수심(m) | | | | |
|----------------|-------|-------|-------|------|------|
| | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 |
| 1.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 2.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3.0 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.00 |
| 4.0 | 0.14 | 0.07 | 0.05 | 0.03 | 0.03 |
| 5.0 | 0.52 | 0.26 | 0.18 | 0.13 | 0.11 |
| 6.0 | 1.56 | 0.78 | 0.53 | 0.40 | 0.32 |
| 7.0 | 3.93 | 1.98 | 1.32 | 1.00 | 0.80 |
| 8.0 | 8.76 | 4.41 | 2.95 | 2.22 | 1.78 |
| 9.0 | 17.75 | 8.94 | 5.98 | 4.50 | 3.61 |
| 10.0 | 33.40 | 16.82 | 11.26 | 8.47 | 6.79 |

그림 14. 한계유속과 테트라포드 중량.

표 7. 수심별 한계유속과 테트라포드 중량(ton).

| 구분 (n=0.06) | 수심(m) | | | | | |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | |
| 한계 유속 (m/sec) | 1.0 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 2.0 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | 3.0 | 0.07 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| | 4.0 | 0.41 | 0.21 | 0.14 | 0.10 | 0.08 |
| | 5.0 | 1.56 | 0.78 | 0.53 | 0.40 | 0.32 |
| | 6.0 | 4.65 | 2.34 | 1.57 | 1.18 | 0.95 |
| | 7.0 | 11.73 | 5.91 | 3.95 | 2.97 | 2.38 |
| | 8.0 | 26.14 | 13.16 | 8.81 | 6.63 | 5.31 |
| | 9.0 | 53.00 | 26.69 | 17.86 | 13.44 | 10.77 |
| | 10.0 | 99.73 | 50.21 | 33.61 | 25.28 | 20.27 |

표 8. 한계유속과 테트라포드 중량(ton).

| 유속(m/s) | 테트라포드중량(ton) |
|---------|--------------|
| 1.0 | 0.00 |
| 2.0 | 0.00 |
| 3.0 | 0.00 |
| 4.0 | 0.02 |
| 5.0 | 0.07 |
| 6.0 | 0.22 |
| 7.0 | 0.56 |
| 8.0 | 1.25 |
| 9.0 | 2.54 |
| 10.0 | 4.79 |

표 9. 활동에 대한 안정성 평가 결과.

| V(m/sec) | A(m ²) | K | P _k (ton)① | W _w (ton) | μ | F(ton)② | F _s (안전율=②/①) | 기준치 |
|-------------|--------------------|-------------|-----------------------|----------------------|-------------|-------------|--------------------------|------|
| 1.00 | 2.44 | 0.04 | 0.05 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 29.30 | >1.5 |
| 2.00 | 2.44 | 0.04 | 0.20 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 7.33 | |
| 3.00 | 2.44 | 0.04 | 0.44 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 3.26 | |
| 4.00 | 2.44 | 0.04 | 0.78 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 1.83 | |
| 5.00 | 2.44 | 0.04 | 1.22 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 1.17 | <1.5 |
| 6.00 | 2.44 | 0.04 | 1.76 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 0.81 | |
| 7.00 | 2.44 | 0.04 | 2.39 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 0.60 | |
| 8.00 | 2.44 | 0.04 | 3.12 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 0.46 | |
| 9.00 | 2.44 | 0.04 | 3.95 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 0.36 | |
| 10.00 | 2.44 | 0.04 | 4.88 | 2.20 | 0.65 | 1.43 | 0.29 | |

였다. 표 9에서 V는 유속, A는 테트라포드의 흐름방향 투영면적, K는 단면형상에 따른 저항계수, P_k는 수압, W_w는 테트라포드의 자중, μ는 정지마찰계수, F는 마찰력, F_s는 안전률이다. 유속이 5.0m/sec 이상의 고유속일 경우에는 동수압에 급격한 증가에 의하여 안전률이 급감하므로 테트라포드의 중량을 증가시켜야 안정조건을 충족할 수 있다.

또한, 전도에 대한 안정성은 표 10과 같이 사방댐 설치지점의 유속이 4.0m/sec 이하일 경우에 대해서 적용 가능하나 하류단의 지지점이 2개일 경우에는 1개일 경우보다 상류측의 저항모멘트가 감소하여 안정조건을 만족하지 못하므로 하류단의 지지점이 1개가 되도록 거치해야 하는 것으로 평가되었다. 표 10에서 V는 유속, A는 테트라포드의 흐름방향 투영면적, K는 단면형상에 따른 저항계수, P_k는 수압, L은 수압 작용점 및 테트라포드의 도심까지의 거리, M_a는 수압에 의한 작용모멘트, W_w는 테트라포드의 자중, M_r은 테트라포드의 자중에 의한 저항모멘트, F_s는 안전률이다. 역학적 안정성 평가결과에서 알 수 있듯이 5ton 테트라포드로 안정성이 부족할 경우에는 중량을 증가시킨 8ton급 또는 10ton급을 활용할 수도 있다.

표 10. 전도에 대한 안정성 평가 결과.

(a) 하류단에 지지점이 2개인 경우

| V(m/sec) | A(m ²) | K | P _k (ton)① | L(m) | M _a (t.m)① | W _v (ton) | L(m) | M _r (t.m)② | F _s (안전율=②/①) | 기준치 |
|----------|--------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|----------------------|------|-----------------------|--------------------------|------|
| 1.00 | 2.44 | 0.04 | 0.05 | 1.16 | 0.06 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 31.67 | >2.0 |
| 2.00 | 2.44 | 0.04 | 0.20 | 1.16 | 0.23 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 7.92 | |
| 3.00 | 2.44 | 0.04 | 0.44 | 1.16 | 0.51 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 3.52 | |
| 4.00 | 2.44 | 0.04 | 0.78 | 1.16 | 0.91 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 1.98 | |
| 5.00 | 2.44 | 0.04 | 1.22 | 1.16 | 1.42 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 1.27 | |
| 6.00 | 2.44 | 0.04 | 1.76 | 1.16 | 2.04 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 0.88 | <2.0 |
| 7.00 | 2.44 | 0.04 | 2.39 | 1.16 | 2.77 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 0.65 | |
| 8.00 | 2.44 | 0.04 | 3.12 | 1.16 | 3.62 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 0.49 | |
| 9.00 | 2.44 | 0.04 | 3.95 | 1.16 | 4.59 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 0.39 | |
| 10.00 | 2.44 | 0.04 | 4.88 | 1.16 | 5.66 | 2.20 | 0.82 | 1.79 | 0.32 | |

(b) 하류단에 지지점이 1개인 경우

| V(m/sec) | A(m ²) | K | P _k (ton)① | L(m) | M _a (t.m)① | W _v (ton) | L(m) | M _r (t.m)② | F _s (안전율=②/①) | 기준치 |
|----------|--------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|----------------------|------|-----------------------|--------------------------|------|
| 1.00 | 2.44 | 0.04 | 0.05 | 1.16 | 0.06 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 48.97 | >2.0 |
| 2.00 | 2.44 | 0.04 | 0.20 | 1.16 | 0.23 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 12.24 | |
| 3.00 | 2.44 | 0.04 | 0.44 | 1.16 | 0.51 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 5.44 | |
| 4.00 | 2.44 | 0.04 | 0.78 | 1.16 | 0.91 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 3.06 | |
| 5.00 | 2.44 | 0.04 | 1.22 | 1.16 | 1.42 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 1.96 | <2.0 |
| 6.00 | 2.44 | 0.04 | 1.76 | 1.16 | 2.04 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 1.36 | |
| 7.00 | 2.44 | 0.04 | 2.39 | 1.16 | 2.77 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 1.00 | |
| 8.00 | 2.44 | 0.04 | 3.12 | 1.16 | 3.62 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 0.77 | |
| 9.00 | 2.44 | 0.04 | 3.95 | 1.16 | 4.59 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 0.60 | |
| 10.00 | 2.44 | 0.04 | 4.88 | 1.16 | 5.66 | 2.20 | 1.26 | 2.77 | 0.49 | |

3. 유사공급의 연속성 및 생태통로 기능 평가

계류유역의 환경 재생 및 보전을 위한 수서동물의 이동 및 유사의 연속성 확보 평가에서는 사진 3 및 4에서 알 수 있는 바와 같이 작은 전석(512 ~ 256mm) 이상의 입경이 큰 하상재료는 상류에 퇴적되고, 큰 호박돌(256 ~ 128mm) 이하는 대부분 하류로 이송되는 것으로 나타났다. 또한, 연구대상지에 대한 지형측량 결과 표 11에 나타난 바와 같이 상류측 퇴적량에 비하여 하류측 퇴적량이 상대적으로 많았으며, 특히 2011년의 경우 태풍 “무이파”에 의한 집중호우로 유역 전체

의 토사 유출이 많이 발생한 것으로 분석되었다. 따라서, 상류에서 이송된 유사 중 입경이 큰 작은 전석 이상은 테트라포드 사방댐에 의한 배수영향으로 퇴적되고, 작은 입경은 하류로 이송되는 효과를 확인하였다.

또한 테트라포드의 사이의 공극을 통과하는 흐름을 이용하여 수서동물이 소상하여 서식하고 있었다. 사진 5는 홍계 1지구에서 포획된 어패류이며 많은 치어들이 서식하고 있었고, 홍계 2지구에서는 다슬기는 확인하였으나 서식어류는 발견할 수 없었다. 그 원인은 홍계 1지구의 경우는



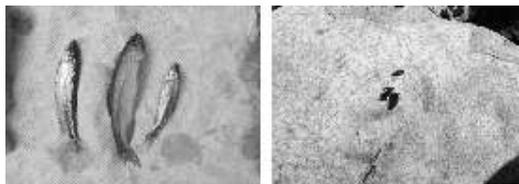
(a) 상류부 하상재료 (b) 하류부 하상재료
 사진 3. 홍계 1지구 하상재료 퇴적상황.



(a) 상류부 하상재료 (b) 하류부 하상재료
 사진 4. 홍계 2지구 하상재료 퇴적상황.

표 11. 테트라포드 사방댐 상·하류의 퇴적량.

| 구 분 | 사방댐 상류 퇴적량(m ³) | | 사방댐 하류 퇴적량(m ³) | |
|--------|-----------------------------|-------|-----------------------------|--------|
| | 2010년 | 2011년 | 2010년 | 2011년 |
| 홍계 1지구 | 22.40 | 28.79 | 59.60 | 228.49 |
| 홍계 2지구 | - | 11.86 | - | 283.55 |



(a) 갈겨니 및 버들치 (b) 다슬기
 사진 5. 홍계 1지구 서식 어패류.

하류에 위치하는 다목적 이수댐에 서식하는 어패류가 테트라포드 사방댐의 상류로 소상하여 서식하므로써 생태통로 기능을 다하지만, 홍계 2지구의 경우는 하류에 위치한 저류수가 없는 불투과형 사방댐에 의한 생태통로 차단되어 소상하는 어류가 없는 것으로 추측된다. 따라서, 계류에서 상·하류의 생태통로 확보와 유사이송의 연속성을 확보하기 위해서는 과거에 시공된 불투과

형 사방댐을 투과형 사방댐으로 개선할 필요가 있다. 생태통로 기능에 대한 평가를 위해서는 향후 체계적인 모니터링에 의한 계속 연구가 필요하다.

IV. 고 찰

연구대상지역 2개 지구의 수심이 5ton 테트라포드의 중심점으로부터의 높이 1.26m와 거의 같은 1.13m와 1.27m로서 월류하고, 소류력이 가장 크게 작용하는 조건하에서 안정성 평가를 수행하였다.

소류력은 동일 조도계수와 유속조건에서는 수심이 작을수록 크게 작용하는 것으로 분석되었으며, 또한 동일수심에서는 조도계수가 클수록 소류력이 크게 작용하는 것으로 분석되었다. 본 연구대상지에서는 적용된 조도계수 0.04일 경우에 8.0m/sec 이하의 유속조건에서도 테트라포드는 소류에 대하여 안정한 것으로 분석되었다.

활동에 대한 안정성 평가 결과, 유속의 증가에 따른 동수압의 증가로 인하여 4.0m/sec까지는 1.83(허용 안전률)>1.5(기준 안전률)로서 안정한 것으로 분석되었으나 5.0m/sec 이상에서는 동수압이 유속의 제곱에 비례하여 증가하므로 불안정한 것으로 나타났다.

전도에 대한 안정성 평가는 테트라포드의 기하 구조적 특성상 평면 배치시 하류단의 지지점이 2개일 경우에는 1개일 경우로 구분하여 수행하였다. 하류단의 지지점이 2개인 경우 4.0m/sec까지는 1.98(허용 안전률)<2.0(기준 안전률)로 분석되어 불안정한 것으로 분석되었으나 지지점이 1개인 경우에는 3.06(허용 안전률)>2.0(기준 안전률)로서 안정한 것으로 평가되어 4.0m/sec까지는 적용할 수 있는 것으로 분석되었다. 본 연구대상지의 경우 상류부에는 입경이 굵어 마찰각이 큰 하상재료가 테트라포드 지지점의 윗부분에 퇴적되어 자중을 증가시킬 뿐 아니라 하상재료의 상호 맞물림 효과에 의하여 전도에 대한 안정성

을 더욱 증가시킬 것이다.

본 연구에서는 5ton급 단일 테트라포드에 대해서만 평가를 하였지만 상류유역 규모에 따라서는 더 무거운 8ton급이나 10ton급 테트라포드를 적용하면 그 활용도를 높일 수 있을 것이다.

테트라포드 사방댐 설치목적의 하나인 생태통로 확보 및 사방구조물 하류에 대한 유사공급의 연속성을 평가하였다. 홍수 전후에 대한 하상재료를 분석한 결과, 상류에는 입경이 큰 작은 전석(512~256mm) 이상의 하상재료를 퇴적시키고, 큰 호박돌(256~128mm) 이하는 대부분 하류로 이송시키므로써 비교적 양호하게 기능을 발휘하고 있음을 확인하였다. 이러한 결과를 볼 때 불투과형 사방댐은 하류로의 유사공급을 차단하여 하류하천의 장기적인 하상저하로 호안 및 제방 등 하천구조물의 파괴를 초래하지만, 테트라포드 사방댐을 활용하여 유사공급을 연속시킨다면 이를 예방할 수 있을 것이다. 또한, 불투과형 사방댐은 장기적인 퇴사로 인하여 주기적인 준설이 필요하지만 테트라포드 사방댐은 상당량의 토석을 하류로 이송함으로써 준설이 거의 필요 없으며, 규모가 작기 때문에 계류에 적정한 간격으로 설치하면 유속 및 유사이송의 중단적 안정성도 확보할 수 있다.

생태통로 기능 확보 측면에서 보면 하류에 어패류 서식환경이 갖추어진 홍계 1지구에서는 다목적 이수댐에 서식하는 어패류가 소상하는 것을 확인할 수 있었으나, 서식환경이 갖추어지지 않은 홍계 2지구에서는 서식어류는 발견할 수 없었다. 따라서, 상류에 투과형 사방댐을 건설해도 하류에 저류수가 없는 불투과형 사방댐이 존재하면 생태통로 기능을 확보할 수 없으므로 상·하류의 생태의 종적 연속성을 고려하여 불투과형 사방댐을 개선해야 할 것이다.

지금까지 테트라포드 및 유사한 재료를 적용한 선행연구가 전무하므로 계속 연구가 필요하다고 본다.

V. 결 론

테트라포드 사방댐의 현장 적용성을 평가함에 있어서 역학적 안정성, 유사공급의 연속성 및 생태통로 확보 기능을 조사, 분석하여 그 효과 및 유의사항을 밝히고자 하였다.

소류에 대한 안정성 검토에서 이론식의 결과와 설치 후 현장에서의 적응과정을 비교한 결과, 테트라포드가 소류에 대한 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였으며, 소류력은 하도경사 및 횡단형상에 따라 다르므로 유역규모 및 유출량을 고려하여 그 안정성을 검토해야 한다.

일반적인 사방댐의 안정성 검토와는 방법론에서 다른 테트라포드의 사방댐의 활동 및 전도에 대한 안정성 검토 방법을 적용하여 향후 유사한 사방구조물에 대한 활용방법을 제시하였다.

유사공급의 연속성을 분석한 결과, 작은 전석급 이상은 상류에 퇴적시키고, 큰 호박돌 이하는 테트라포드 사이의 공간을 통하여 하류로 이송시킴으로서 사방댐 설치로 인한 하류 하상의 장기저하를 방지할 수 있고, 작은 전석급 이하의 많은 양의 토석을 하류로 공급함으로써 준설이 필요없어 유지관리가 용이함을 입증하였다.

테트라포드 사이에 형성된 공간 및 블록 하부 공간을 통하여 형성되는 흐름을 이용하여 계류에 서식하는 어패류가 소상할 수 있으므로 생태통로 기능을 확보하고 있었다.

따라서, 현재 대부분의 사방댐 형식으로 채택되어 건설되고 있는 불투과형 사방댐에서 지적되고 있는 문제점을 해결하기 위해서는 수문학적 유역특성을 반영하고, 자연경관 및 생태계를 보전할 수 있는 다양한 형식의 사방댐공법의 개발이 필요하다.

향후에는 모니터링에 의한 불투과형 사방구조물의 효과와 문제점을 정리하여 방재 및 수생물권 보존을 위한 목적을 명확히 하여 투과형 사방구조물 계획과 평가방법을 마련해야 할 것이며, 투과형 사방구조물의 토사유출과 하상변동,

하상구조변화의 실태를 파악, 방재상의 평가와 생물의 응답과 그 메카니즘을 규명할 필요가 있다. 또한, 기설치된 불투과형 사방구조물 등의 개축에 의한 새로운 유역보전방법을 모색해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2009-2011년 산림과학기술개발사업 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

인 용 문 헌

- 박재현. 2002. 계류생태계 보전을 고려한 환경친화적 사방전략(I). 한국환경복원녹화기술학회지 5(5) : 67-75
- 白江健造·平松晉也·水山高久. 2000. 既設床固工のスリット化に伴う土砂排出. 砂防學會誌 53(3) : 37-42.
- 沼田雄一·沖田知美. 2008. 知床ルシャ川における治山ダム改良工事の概要について. 砂防學會誌. 61(2) : 39-42
- 安田陽一. 2004. 局所流を利用した流れの景觀へのアプローチ. 流體力とその應用に関する研究論文集. 第3卷 : 9-17.
- 岩垣雄一. 1956. 限界掃の流力流體力學的研究. 土木學會論文集. 第41號 : 1-21.
- 遠藤辰典·坪井潤一·岩田智也. 2006. 河川工作物がイワナとアマゴの個體群存續におけるおよびす影響. 保全生態學研究. 11 : 4-12.
- 林健二郎·藤井優廣·重村利幸. 2001. 開水路中における圓柱群に作用する流體力に関する實驗. 水工學論文集 第45卷 : 475-480.
- 前川光司. 1999. 溪流魚の生態と砂防工事の影響. 溪流生態砂防學. 東京大學出版會.
- 重枝未玲·秋山壽一郎·野中雅之·淺野孝典. 2004. 定常自由表面流中の水沒物體に働く流體力. 水工學論文集 第48卷 : 877-882.
- 川口廣司·福岡捷二·渡邊明英. 2004. 設置角度の異なる越流型水制周邊の流れと流體力分布特性. 水工學論文集 第48卷 : 811-816.
- Shield A. 1936. Applicant of similarity principles and turbulence research to bed-load movement. Mitteiluung der Preussischen Versuchsanstalt und Schiffbau 26 : 5-24.