

수리실험을 통한 보 연결부 제방 세굴 특성 분석

정석일 · 이승오[†]

홍익대학교 토목공학과

(2016. 10. 10. 접수 / 2017. 3. 4. 수정 / 2017. 7. 28. 채택)

Experimental Analysis for Characteristics of Bank-Scour around Barrier

Seok Il Jeong · Seung Oh Lee[†]

Department of Civil Engineering, Hongik University

(Received October 10, 2016 / Revised March 4, 2017 / Accepted July 28, 2017)

Abstract : Typical flow regime of overflow at barrier or weir constructed in mid and small streams becomes as the submerged flow during most flood events. One of major causes of barrier failure has been reported as the levee-scour near the conjunction node between barrier and levee. However, most related design guidelines in Korea have not mentioned about the protection of levee around barrier or weir in detail. Furthermore, most previous researches have focused on the flow characteristics of overflow around several types of weirs but they did not have considered the material properties of levee itself. In this study, local scour near barrier was investigated with different material properties of levee under the submerged overflow condition which is assumed to reenact a flood event. Based on results from Fritz *et al.*⁶⁾ and Mavis *et al.*⁷⁾, a theoretical formula was also proposed in initial stage of laboratory experiments. And hydraulic experiments were carried out for the verification of the proposed formula. Levee was installed in the prismatic trapezoidal open channel and most parts were made of concrete except for movable section in which scour was expected to occur for the efficiency of experimental procedure. Each compaction of movable section in levee was followed by the basis of the KS F 2312. Further, after performing the experiments to find the optimum water content for each sediment, the specific amount of water was injected before flowing water. The difference between the proposed theoretical formula and experiment results was not much but considerable, which might be caused by the effect of compaction. For theoretical approach, it seemed that the formula did not take into account the compaction of levee, thus the correction coefficient for levee compaction determined in the literature was considered. Finally, the formula for the length of scour around barrier or weir was proposed, which can be useful to predict a levee in the reference design of revetment in mid and small streams. As shortly future study, scour length of levee around barrier or weir under different flow conditions such as perfect overflow condition will be studied and it will be able to contribute to suggest the design formula or criteria under all overflow conditions near barrier or weir.

Key Words : bnk-sour, mvable hydraulic experiment, sbmerged overflow, brrier structure

1. 서론

보는 하천에서 취수나 하상유지를 위한 하천횡단구조물로 일반적으로 본체, 물받이, 바닥보호공 등으로 구성되며, 홍수시 수공구조물의 피해사례 중 제방 다음으로 많은 부분을 차지하고 있다. KICT(Korea Institute of Construction Technology)¹⁾에서 1987년부터 2004년까지 9개년간의 보 및 낙차공 피해 현황을 분석한 결과 보 및 낙차공의 파괴 유형 중 70.4%로 가장 많았으며, 구조물 자체의 불안정(14.8%), 상하류 하천

시설물 영향(11.1%), 하상세굴에 의한 파괴(3.7%)로 나타났다. 홍수시 보 연결부 파괴의 주요 원인으로서는 과대한 홍수로 인한 유속증가에 의한 파괴가 73%로 가장 큰 원인이었으며, 제방 월류에 의한 제방 연결부 파괴(13.0%), 만곡부에 설치로 인한 파괴(10.0%) 등이 주요 원인이었다. 이러한 보 연결부의 파괴는 연결제방의 붕괴로 이어져서 제내지 침수를 야기하여 홍수피해가 가중되는 특징이 있다. 하지만 River design standard²⁾ 등의 여러 설계기준은 이러한 보 연결부 세굴에 대한 규정을 간략하게 제시하였으며, 보 연결부 주변의 수리

[†] Corresponding Author : Seung Oh Lee, Tel : +82-2-325-2332, E-mail : seungoh.lee@gmail.ac.kr
Department of Civil Engineering, Hongik University, 94Wausan-ro, Mapo-gu, Seoul 04066, Korea

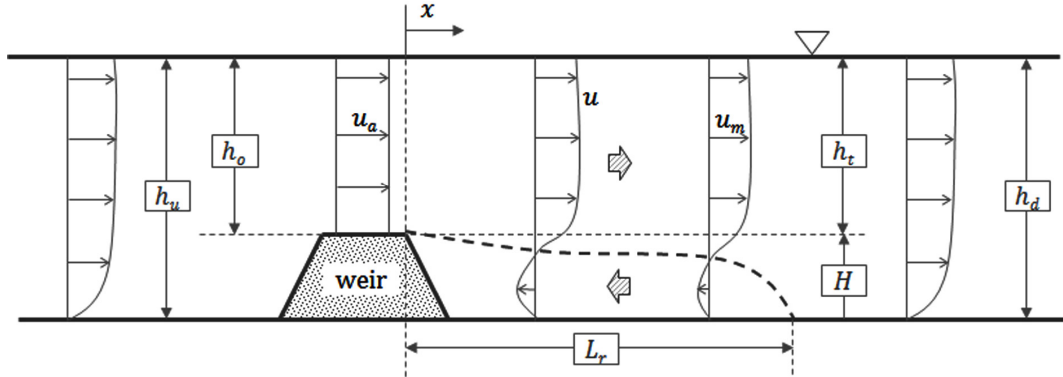


Fig. 1. Schematic of Fritz's hydraulic test(Fritz et al.).

학적 특성을 반영했다고 보기는 어렵다. 국외 연구 사례를 살펴보면, Escarameia and May³⁾가 연결부의 사석 크기에 대한 연구를 수행하였으며, 유속을 주요 변수로 삼았다. Pilarczyk⁴⁾와 Maynord⁵⁾는 사석 크기에 대하여 설계유속과 수심을 사용하여 결정하였다. 국내에서는 KICT¹⁾에서 보 주변부 세굴 길이에 대한 연구를 수행하였으며, 보 상류의 수리학적 물리량과 세굴길이의 관계를 정량적으로 제시하였다. 그러나 이러한 연구들은 고정상 실험으로 수행되었기 때문에, 제체의 특성(함수비, 다짐도 등)을 고려한 제방에서 발생하는 세굴 특성을 반영하지 못하였고, 현장 적용성에 있어서도 다소 어려움이 있다고 판단하였다. 이에 본 연구에서는 홍수시에 발생하는 보 월류 흐름의 대표적인 형태인 잠수월류(submerged overflow)에서의 보 연결부 세굴 길이에 대해 이론 및 실험적인 접근을 수행하였다. 잠수월류의 특성상 제체는 항상 물에 잠겨있다는 특성을 고려할 때, 상기 진술한 제체의 특성 중 함수비는 본 연구에서는 고려하지 않았다.

2. 기본이론

Fritz et al.⁶⁾는 잠수월류에서의 흐름 특성을 실험을 통해 분석하였다. Fig. 1은 실험 개념도이다. 그들은 실험을 통해 바닥 역방향 흐름 (bottom recirculation)의 길이가 하류수심 h_d 와 y_t 의 함수임을 알아내었으며, 이를 다음 식(1)과 같이 나타내었다.

$$L_r/h_d = 6.8(1 - y_t)^{1/6} \quad (1)$$

여기서, y_t 는 h_t/h_o 인 무차원수이며, h_d 는 하류 수심이다. 그리고 최대 유속을 나타내는 무차원수(U_m)는 식 (2)와 같다.

$$U_m = \frac{(u_m - u_u)}{(u_A - u_u)} \quad (2)$$

여기서, u_m 은 각 지점별 최대 유속(m/s), u_u 는 각 단면별 평균유속(m/s)이고, u_A 는 보 하류부의 접근유속(월류유속, m/s)이다. Fritz et al.⁶⁾은 실험을 통하여 U_m 을 다음과 같이 나타내었다.

$$U_m = \exp(-2.3X^2) \quad (3)$$

여기서, X 는 x/L_r 로 나타낸 무차원 수이며, Fig. 2는 이 두 변수의 관계를 나타낸다.

결국 하류부에 발생하는 최대유속은 보의 선단 길이와는 관계가 없다는 것을 알 수 있다. 식 (1) ~ (3)을 이용하면, 다음과 같은 식이 도출된다.

$$\frac{(u_m - u_u)}{(u_A - u_u)} = \exp\left(-0.338 \frac{x}{(1 - y_t)^{1/6} h_d}\right) \quad (4)$$

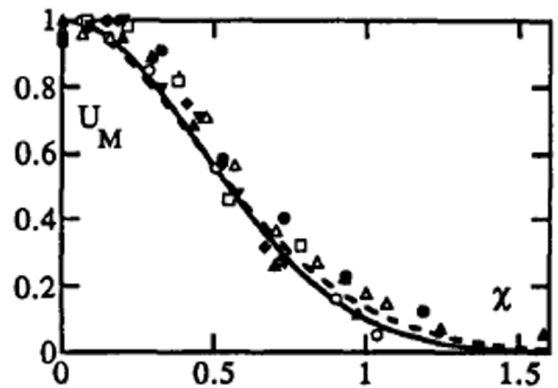


Fig. 2. Decay of Maximum Velocity $U_m(X)$ for surface Jet (Fritz et al.).

식 (4)를 이용하면, 각 지점별 최대 유속을 구할 수 있으며, 제방을 구성하고 있는 유사의 한계유속(critical velocity, u_c)을 u_m 에 대입한다면, 도출되는 x 가 결국 보 하류부 세굴길이(L_{sd})가 될 것이다. 유사의 한계유속은 Mavis *et al.*⁷⁾가 다음과 같이 나타낼 수 있다고 하였다.

$$u_c = 0.153(\gamma_s/\gamma - 1)^{1/2}d_{50}^{4/9} \quad (5)$$

위 식에서 한계 유속은 m/s단위로 환산된 것이며, u_c 는 유사의 한계유속(m/s), γ_s 와 γ 는 각각 유사와 물의 단위 중량(kg중/m³)이며, d_{50} 은 유사의 평균입경(mm)이다. 위의 식들을 정리하여 보면, 보 하류부의 이론적인 제방 세굴 길이(L_{sd} , m)는 다음과 같다.

$$\frac{(u_c - u_u)}{(u_A - u_u)} = \exp\left(-0.338 \frac{L_{sd}}{(1 - y_t)^{1/6} h_d}\right) \quad (6)$$

식 (6)의 검증용 위해 수리실험을 수행하였으며, 하류부 세굴길이에 영향을 주는 인자를 정리하여 보면, 다음과 같다.

$$L_{sd} = f(u_u, u_A, y_t, H, d_{50}) \quad (7)$$

여기서, u_u 와 u_A 는 연속방정식에 의해 유량 Q 와 수심 및 폭의 함수이며, y_t 는 보의 높이와 수심으로 나타낼 수 있으므로, 식(7)은 다음 식 (8)과 같이 유량, 보의 높이, 하류 수심 및 유사입경으로 다시 정리가 가능하다.

$$L_{sd} = F(H, Q, h_b, d_{50}) \quad (8)$$

따라서, 본 연구에서는 보의 높이, 유량, 하류 수심 및 유사의 입경에 변화에 대하여, 보 하류부에서의 세굴 현상에 대해서 이론적인 세굴 길이 검증을 위한 수리실험을 수행하였다.

3. 수리모형실험

3.1 수리모형실험장치

길이 9.0 m, 폭 2.0 m인 직선 개수로에 보와 제방을 설치한 후 실험을 진행하였다. 안정된 흐름을 유지하기 위해 수로의 유입부에 정류벽과 수심 변화에 따라 조절 가능한 수문을 설치하였다. 유입유량은 디지털 유량계(ULSFLOW309P, 오차범위: $\pm 10^{-3}$ m³/s)를 사용하

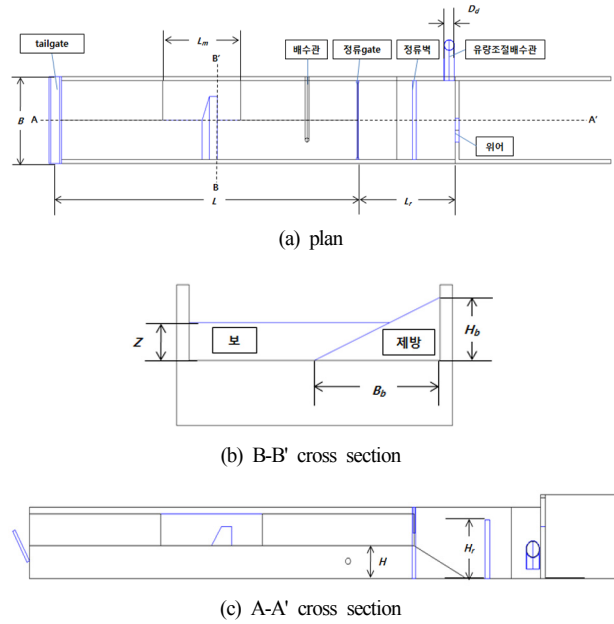


Fig. 3. Layouts of experiment channel with barrier and levee on left side.

여 제어하였다. 제방의 경사는 하천설계기준(2009)에서 1V:3H를 권장하지만, 현재 우리나라의 하천에 설치되어 있는 대다수의 제방이 1V:2H이기 때문에, 1V:2H로 결정하였다.

실험의 효율성과 편의성을 위해 Fig. 3에서와 같이 이동상 구간과 고정상 구간을 각각 구분하여 설치하였다. 이동상 구간은 보 중심으로 상류와 하류방향으로 각각 2.0 m로 결정하였다. 이동상 구간 외의 구간은 시멘트 몰타르를 이용하여 제작하였다. 상세한 실험수로의 제원을 Table 1에 제시하였다.

이동상 제방에 설치된 제방의 재료는 중앙입경(d_{50})이 각각 0.95 mm(Type A), 0.87 mm(Type B), 0.65 mm(Type C), 0.58 mm(Type D)로 사질성 흙을 사용하였다. 동일한 재질의 흙을 각각 크기가 다른 3개의 채를 제작하여 거른 후 제방을 축조하였다.

Table 1. Dimensions of experimental channel

Attribute	Dimension (m)	Attribute	Dimension (m)
Length of channel (L)	7.0	Height of channel (H_b)	0.5
Width of channel (B)	2.0	Width of levee (B_b)	1.0
Length of Head tank (L_r)	2.0	Height of channel bed (H)	0.5
Length of movable section (L_m)	2.0	Height of flow straightener (H_r)	0.95
Diameter of bypass pipe (D_d)	0.25	Height of weir (Z)	0.1-0.3

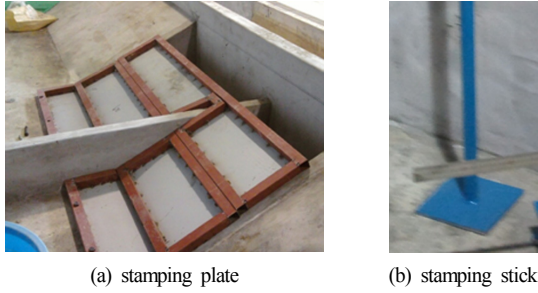


Fig. 4. Equipments for construction of levee.

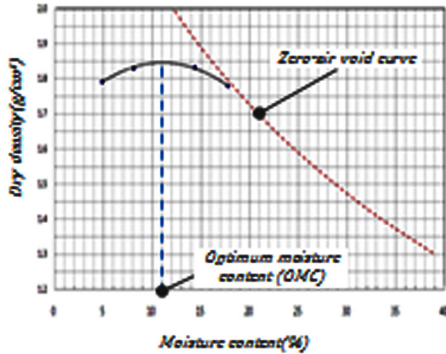


Fig. 5. Curve of moisture content for levee sand.

각 실험마다 제방 축조시 일정한 다짐도를 위하여 Fig. 4(a)와 같은 다짐판을 자체 제작하였으며, 0.1 m씩 성토 후 Fig. 4(b)의 다짐봉(20 kg)를 사용하여 다짐을 수행하였다. 다짐은 KS F 2312(2001)규정에 명시된 다짐 방법을 응용하여 수행하였다. KS F 2312 규정 중 레머 질량이 가장 크고 다짐 층수가 가장 많은 다짐방법 호칭 D를 참고하였으며, 이에 다짐 시험기의 압력과 다짐봉의 압력을 동일하게 하기 위하여, 다짐봉의 밑판 제원을 결정하였다.(28 cm × 28 cm) 또한 봉의 낙하 높이 및 층당 다짐 횟수를 각각 30 cm, 55회로 결정하여 KS F 2312 규정을 충실히 따르고자 하였다. 다짐과 동시에 제방의 최대 강도를 위하여 Fig. 5를 이용하여 제체가 최적함수비가 되도록 정량의 수분을 공급하면서 다짐을 수행하였다.

보의 높이는 실험 규모를 감안하여 0.110 m, 0.215 m, 0.310 m로 결정되었으며, 윗폭, 아랫폭 및 기울기는 하천설계기준(2009)에 제시된 식에 의해 결정하였다.

$$\text{윗폭} = \frac{h_1}{\sqrt{r}}, \text{아랫폭} = \frac{H+h_1+d}{\sqrt{r}} \quad (9)$$

여기서, h_1 은 월류수심(m), r 은 콘크리트 비중(일반적으로 2.3), H 는 보의 높이(m)이다. 그러나 수리실험을 수행하기 위해 식(9)의 값이 결정되어야 하지만, 보의

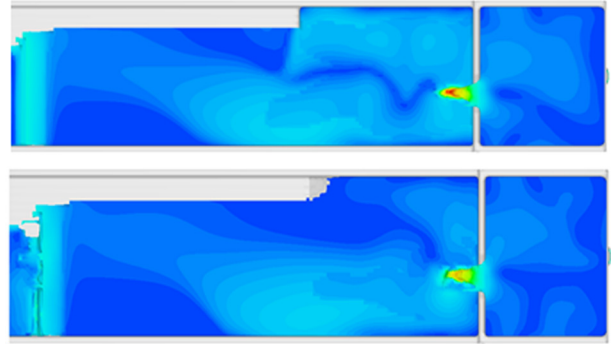


Fig. 6. Numerical result from FLOW-3D for determining fundamental dimensions of barrier for hydraulic experiments.

월류 수심 및 접근 수두 등 기본적인 인자에 대해서 실험 수행 전에 파악할 수 없기 때문에, 3차원 수치모형을 활용하여 사전 수치실험을 수행 하였다. 본 연구에서는 다수의 선행 연구에서 개수로 흐름 모의에 활용성이 높은 FLOW-3D (Flow Science Inc.)를 이용하여 보의 제원을 결정하는 사전기초 자료를 확보하였다.

3.2 수리모형실험 조건 및 방법

본 연구는 유량과 하류 수위를 변경하여, 보 상류 Froude 수를 변화시키고 이에 따른 세굴 길이를 측정하는 방법으로 수행되었다. 유입유량은 디지털 유량계(MODEL: Ulsoflow 309P, 정확도: ±0.5%)를 이용하여 측정하였으며, 초기 유입되는 유량에 의하여 발생하는 세굴로 인하여 실험의 오차가 발생할 가능성이 있기 때문에 이를 최소화하기 위하여, 실험 전 단계에서 수로에 물을 매우 천천히 채우고(약 0.2 l/s 공급), 보 상류 수위를 확인한 후, 목표 실험유량을 공급함으로써 본 실험을 수행하였다. 목표 실험유량값을 맞출 때까지 유량조절배수관으로 수로 내로 공급되는 유량을 우회시켰으며, 지속적인 관측으로 평형세굴에 도달되었고 판단되었을 때부터 추가로 30분을 진행한 후, 수로 내 물을 천천히 배수하였다. 배수시간이 충분치 않을 경우, 에너지 경사가 급하게 발생하여 배수시 발생할 수 있는 보 주변 유속 증가로 인해 평형세굴심에 도달한 국부세굴심에서 추가 세굴이 발생할 수 있기 때문이다. 유속 및 수위 측정은 예비실험으로 수위 곡선을 작성하여 안정된 흐름이 형성되는 지점(보를 중심으로 상류와 하류 방향으로 각각 2.0 m)에서 횡방향으로 3점 수심방향으로 3점을 측정하였다. 측정에 사용한 유속계는 ACM2-RS (ALEC, 정확도 ±5 × 10⁻³ m/s)였다. 상류와 하류의 수위 변화는 초음파 수위계(오차범위: ±10⁻⁴ m)를 사용하여 측정하였으며, 발생한 세굴의 길이는 배수를 완전히 시킨 후, 자체 제작한 세굴길이측정 장치

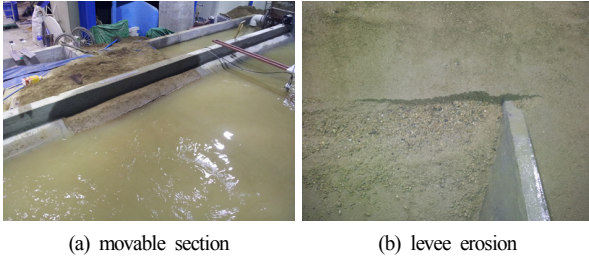


Fig. 7. Scene of experiment.

(정확도: $\pm 5 \times 10^{-4}$ m)를 이용하여 측정하였다.

Fig. 7(a)는 실험 중 모습으로 보를 지나면서, 통수단면적이 좁아지고 이로 인하여 빠른 유속이 발생하여 세굴이 되는 모습을 보여준다. Fig. 7(b)는 평형세굴심 도달 후 실험수로 내 물을 천천히 배수한 후 제방의 세굴 모습이다. 그리고 상하류 수위차에 따라 이동상 제방구간을 벗어나는 세굴길이는 본 연구에서 제외하였으며, $d_{50} = 0.95$ mm을 기준으로, 3개의 보 높이에 대해 수리실험을 수행하였으며, 나머지 유사 크기에 대해서는 보 높이 0.215 m에 대해서만 수행하였다. 이러한 실험 조건들을 무차원화 하여 Table 2에 제시하였다.

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 보 하류부 연결부 부근의 제방 세굴 길이 도출을 위하여 이론적인 접근을 수행하였으며, 이를 검증하기 위하여, 차원해석을 통해 변수를 결정하고, 수리실험을 수행하였다. Table 2는 실험 조건 및 실험 결과를 무차원화 하여 도출한 것이다.

Table 2. Experimental results

Case	d_{50}/H	$y_t(=h_t/h_o)$	u_c/u_n	U_m	$\frac{L_{sd-cx}}{L_{sd-cp}}$
1	0.0086	0.0000	2.3456	0.4036	1.4865
2	0.0086	0.9167	1.2890	0.5681	1.5506
3	0.0031	0.9091	2.7764	0.1283	2.4173
4	0.0031	0.9091	2.2211	0.4008	1.3443
5	0.0044	0.0909	2.5780	0.3098	2.1053
6	0.0044	0.9048	1.9503	0.3746	1.7873
7	0.0044	0.8261	1.5603	0.5642	1.7921
8	0.0040	0.0909	2.4792	0.3530	2.8322
9	0.0040	0.9048	1.8755	0.4238	2.6336
10	0.0030	0.1429	4.3558	0.2075	2.7788
11	0.0030	0.0909	2.1779	0.4848	2.1655
12	0.0027	0.1429	4.1407	0.2583	3.7453
13	0.0027	0.0909	2.0703	0.5318	2.3448

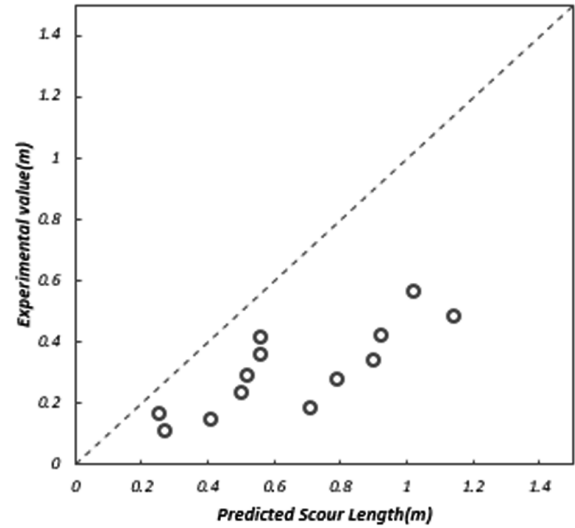


Fig. 8. Comparison between experimental results and calculated value using Eq. (6).

Fig. 8은 식 (6)의 계산결과와 실험 결과를 비교한 것이다. MAPE (Mean Absolute Percentage Error, $MAPE = \frac{1}{N} \sum \frac{|F_t - A_t|}{A_t}$)와 SMAPE (Symmetric Mean Absolute

Percentage Error, $SMAPE = \frac{2}{N} \sum \frac{|F_t - A_t|}{(|A_t| + |F_t|)}$),는 각각

약 51.4%, 71.4%로 나타나, 이론값과 실험값이 일정한 관계를 갖는다고 보기 어렵다고 판단된다. 이러한 현상이 발생한 원인은 Mavis *et al.*⁷⁾의 연구가 점성이 없는 단일 사립자를 이용한 반면에, 본 연구는 최적다짐도를 위해 물을 공급해 가며, 다짐을 수행하였기 때문인 것으로 판단된다. 현재까지 제방 다짐과 세굴 길이의 관계를 정량적으로 제시한 연구가 없기 때문에, Lee *et al.*⁸⁾의 연구를 참고하였다. Lee *et al.*⁸⁾은 하천제방의 붕괴 양상과 축조 재료 및 다짐도의 영향에 대해 분석하였는데, 최소 다짐횟수와 최대 다짐횟수에 대한 붕괴 평균 폭이 약 2.0배 차이가 나는 것으로 나타났다. 이를 실험값에 대한 보정계수로 결정하고, Fig. 9와 같이 1:1 curve를 다시 작성하였다.

Fig. 9는 다짐의 영향을 고려한 실험결과와 식 (6)을 이용한 이론적인 세굴 예측 길이를 비교한 것이다. 1:1 관계가 잘 나타난 것으로 판단되며, MAPE와 SMAPE는 각각 약 23.7%과 24.6%으로 나타났다. 오차 분석을 Table 3에 정리하였다.

최종적으로 보정계수를 이용하여 다짐도가 있는 제방에 대한 보 하류부 세굴길이를 나타내는 식을 제안하면 다음과 같다. 식 (6)에서 우변 상수항이 (-)0.338에서 보정계수의 영향으로 (-)0.169로 변경된 것이다.

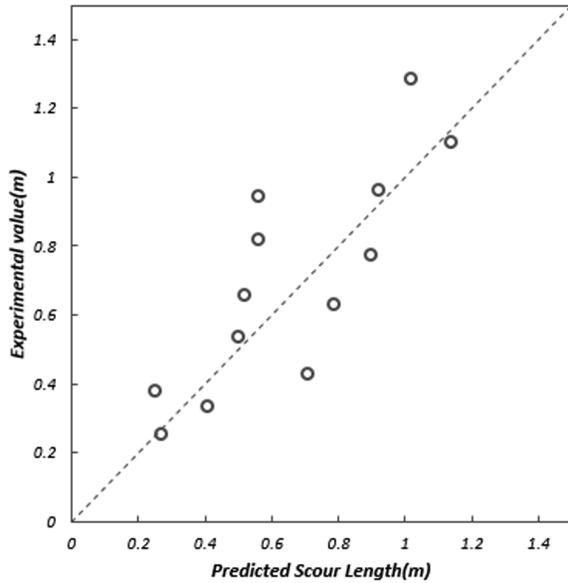


Fig. 9. 1:1 Curve for experimental results with compaction effect.

Table 3. Error Analysis

	MAPE	SMAPE	Averaged Deviation
Before calibration	51.4%	71.4%	0.348 m
After calibration	23.7%	24.6%	0.147 m

$$\frac{(u_c - u_u)}{(u_A - u_u)} = \exp\left(-0.169 \frac{L_{sd}}{(1 - y_t)^{1/6} h_d}\right) \quad (9)$$

식 (9)를 이용하면, 홍수시 잠수월류 형태의 흐름이 발생하는 보 하류 제방 세굴길이를 예측할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구는 홍수시 보 및 낙차공 주변부에서 발생하는 잠수월류 형태의 빠른 유속이 발생시키는 하류부 제방 세굴 길이를 이론적으로 접근 하였으며, 수리실험을 통하여 이를 검증하였다. 본 연구의 주요 결과를 정리하면, 첫째, 이론적인 접근은 Fritz *et al.*⁶⁾의 보 주변부에서 발생하는 수리적 특성과 Mavis *et al.*⁷⁾의 유사 특성을 고려하여 새로운 식을 제안하였다. 둘째, 제안된 식에서 도출된 주요 변수를 고려한 수리실험을 통하여 이를 검증하였다. 이 과정에서 이론식으로 계산된 값과 실험결과와의 절대평균백분율오차는 약 50%가 나타났다. 이는 기존 연구에서는 제체의 수분함양 또는 다짐도를 고려하지 않은 것으로 판단하였다. 따라서 본 연구에서는 다짐의 영향을 추가로 고려하여

최종적으로 수정된 보 하류부 제방 세굴길이 산정식을 제시하였다. 본 연구의 주요 결과는 중소 하천에서 홍수 발생시 큰 피해를 줄 수 있는 보 하류부 접속 제방 세굴에 대해 정량적인 값을 도출하였으며, 이는 제방 사면 보호공 등의 길이 산정에 큰 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서 발생하는 세굴과 Lee *et al.*⁸⁾ 연구에서의 세굴의 특성이 다소 차이가 날 수 있기 때문에, 이 부분에 대해서는 실험을 통해 향후 검증을 수행할 것이다. 그리고 잠수월류 및 완전월류 형태의 다양한 흐름에 대해서 보 하류부 주변 제방 세굴에 대해 검토한다면, 보다 세분화 되고, 체계적인 기준 내지는 관계식을 제공하는 데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글: 본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역 특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(13SCIPS04)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

- 1) Korea Institute of Construction Technology, “Development of Design Techniques for Barrier and Drop Structures”, KAIA, 2006.
- 2) Korean Water Resources Associations, River Design Standard, 2009.
- 3) M. Escarameia, May, R.W.P, Channel Protection-Turbulence Downstream of Structures, Report SR 313, HR Wallingford, 1992.
- 4) K. W. Pilarczyk, “Stability Criteria for Revetments”, Hydraulic Engineering, Proceedings of the 1990 National Conference. American Society of Civil Engineers, New York, pp. 245-250, 1990.
- 5) S. T. Maynard, “Corps Riprap Design Guidance for Channel Protection”, River, Coastal and Shoreline Protection: Erosion Control using Riprap and Armour Stone, pp. 41-52, 1993.
- 6) H. M. Fritz and W. H. Hager, “Hydraulics of Embankment Weirs”, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, Issue 9, pp. 963-971, 1998.
- 7) F. T. Mavis and L. Laushey, “Formula for Velocity at Beginning of Bed-Load Movement is Appraised”, Civil Engineering, ASCE, Vol. 19, Issue 1, pp. 38-39, 1949.
- 8) J. T. Lee and S. T. Lee, “An Experimental Study on the Collapse Phase of a River Levees (II) -Effect of the Soil Properties and Compactness”, Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 34, Issue 2, pp.141-154, 2001.