

## 홍수와 선단의 축척효과에 대한 보정계수 산정

정석일<sup>1</sup>, 김수영<sup>2</sup>, 이승오<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>홍익대학교 토목공학과, <sup>2</sup>한국건설기술연구원

### Estimation of Modification Factor for Scale Effect of the Front of Flood Wave Propagation

Seok-il Jeong<sup>1</sup>, Soo young Kim<sup>2</sup>, Seung Oh Lee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Hongik University

<sup>2</sup>Hydro Science and Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building  
Technology

**요약** 최근의 이상기후로 인하여 수공구조물의 안전성이 제고되고 있으며, 이에 따라 수공구조물의 붕괴에 대한 연구가 증가하고 있다. 특히 제방 등 수공구조물의 월류로 인한 붕괴로 발생하는 홍수와 선단의 초기 이동속도는 제내지의 위험성을 예측하고, EAP(Emergency Action Plan) 등을 수립하는 기초자료가 된다. 이러한 선단홍수와 선단의 정확한 예측을 위해 수리실험이 다수 수행되고 있으나, 많은 연구에서 초기의 홍수와 선단에서 발생하는 표면장력에 의한 축척효과(Scale effect)를 고려하지 않고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 계면활성제(surfactant)와 영상 분석 장비를 이용한 표면장력 도출 수리실험 및 급 개폐가 가능한 수조를 이용한 홍수와 전파 실험을 통하여, 계면활성제 농도와 표면장력 관계, 표면장력과 홍수와 전파속도 관계, 표면장력과 Weber Number 관계를 도출하여, 초기 홍수와 선단에서 발생하는 표면장력에 의한 축척효과 보정계수 및 축척효과를 받지 않는 한계조건(critical condition)을 제시하였다. 연구결과 Weber Number가 약 12.2 이하일 경우 보정 계수가 필요한 것으로 나타났으며, 그 이상인 경우 축척효과를 무시할 수 있는 것으로 나타났다.

**Abstract** Recently, there has been increasing concern regarding the collapse of hydraulic structures due to abnormal climate conditions. Therefore, numerous studies of the collapse of hydraulic structures have been carried out. In particular, the velocity of the propagation of a flood wave-front is important for predicting the inundation safety and establishing an EAP (Emergency Action Plan). Although many hydraulic tests have been conducted for precise predictions of a flood wave-front, the scale effect from downsizing has not considered. In this study, the relationships between surface tension and the concentration of surfactant, between surface tension and the velocity of flood wave propagation, and between surface tension and the Weber Number were derived through hydraulic tests using a surfactant and image analysis equipment. Based on these relations, the modification factor for the scale effect of the front of flood wave propagation was suggested. The results highlight the necessity of a modification factor when the Weber Number is lower than 12.2, but the scale effect can be ignored when the Weber Number over 12.2.

**Keywords** : Flood wave propagation, Hydraulic test, Scale effect, Surface tension, Weber number

### 1. 서론

이상기후로 인하여 여러 가지 원인을 고려한 홍수와

에 대한 연구가 증가하고 있다. 특히 홍수와 선단의 이동 속도 추정에는 제내지의 위험성을 예측하고, EAP 등을 수립하는데 매우 중요한 자료가 될 수 있다. 제내지에서의

\*Corresponding Author : Seung Oh Lee(Hongik Univ.)

Tel: +82-2-325-2332 email: seungoh.lee@hongik.ac.kr

Received March 7, 2016

Revised (1st May 31, 2016, 2nd June 1, 2016)

Accepted June 2, 2016

Published June 30, 2016

선단 홍수파에 대한 예측을 하기 위해서는 해당 지역의 하천특성, 수리특성 및 제방 등 수공구조물 특성뿐만 아니라, 제내지의 지형 및 토지이용 현황 등을 조사하여 수리실험이나 수치모의를 수행해야 하는 것이 일반적이다. 수치해석의 경우 수리실험에 비하여 경제성 및 효율성 측면에서 뛰어날 수 있으나, 제방 붕괴과정 및 메커니즘을 반영하기가 불가능하다. 이에 반해 수리모형실험의 경우 제방 붕괴 양상 및 그 과정의 재현이 가능하기 때문에, 제내지에서의 선단홍수파 전파에 관한 보다 정확한 양상을 파악할 수 있을 것이다.

[1]은 수평의 직사각 수로에서 댐 붕괴로 인한 홍수파 실험을 수행하였으며, [2]는 하류단의 수위가 있는 경우와 없는 경우에서의 홍수파 실험을 2차원 적으로 수행하였다. 또한 [3]은 댐 붕괴 초기 상태의 특성에 대해 실험과 이론을 비교하였으며, [4]는 직사각형 개수로에서 선단 홍수파 형상에 대한 연구를 수행하였다. 국내연구로는 [5]가 이동상 제방 붕괴에 따른 선단홍수파의 이동속도에 대한 연구를 수행하였다.

그러나 이러한 연구는 실제 크기의 하천이 아닌 축소 모형 또는 개수로에서 수행되었기 때문에, 초기 홍수파의 전파가 축척효과(Scale effect)의 영향을 받을 가능성이 매우 크다. 축척효과란 기하학적으로 서로 닮은 모형이나 물체에서 계측되는 여러 가지 물리량이 크기의 영향을 받아 역학적 상사법칙을 만족시키지 못하는 현상으로, 수리실험의 경우 유체의 특성(점성력 등)으로 인하여 발생한다. 일반적으로 상사법칙에 따라 모형을 축소하는 수리실험[6]에서 나타나며, 특히 선단 홍수파의 경우 파가 진행되면서 수심이 낮아지고, 유속이 느려지기 때문에 그 영향은 점차 증대된다고 할 수 있다. 이러한 축척효과의 한계 조건에 대하여 [7]은 다음과 같이 제한하고 있다. (1) 표면파(surface wave) 길이는 0.017 m 이상. (2) 표면 유속은 0.23 m/s. (3) 수심은 0.015 m를 초과해야 함. 그러나 홍수파 전파 실험에서 이러한 조건이 모두 만족되기란 쉽지가 않으며, 이러한 조건이 만족되지 않는다는 것은 홍수파 전파가 표면장력의 영향을 받아 오차가 발생한다는 의미이다.

본 연구에서는 이러한 초기 선단 홍수파의 표면장력 영향을 고려한 보정 계수 산정에 대한 연구를 수행하였다. 연구는 크게 4가지 과정을 거쳐 수행하였다. 첫째는 농도-표면장력의 관계 규명이며, 둘째는 표면장력-홍수파 전파 속도 관계 규명이다. 셋째는 표면장력과 Weber

Number( $We$ )의 관계를 도출하는 것이며, 마지막은  $We$ 를 이용하여 한계조건을 제시하는 것이다. Fig. 1은 이러한 연구과정을 도식화 한 것이다.

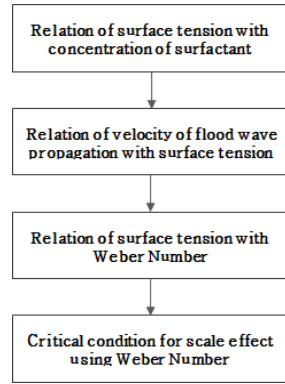


Fig. 1. Contents of research

## 2. 기본이론

### 2.1 표면장력(Surface Tension)

표면장력은 액체의 표면이 스스로 수축하여 되도록 작은 면적을 취하려는 힘의 성질을 말하며 계면장력의 일종이다. 분자 사이에 작용하는 힘에 따라 분자가 서로 접촉하여 응축하려고 하며, 이 결과 표면적이 적은 원모양이 되려고 한다. 특히 물은 수소 결합에 의해 분자 간의 인력이 크기 때문에 다른 액체에 비해 표면장력이 크다. 이러한 원인으로 인하여 규모가 작은 수리실험 수행시 축척효과가 발생하기도 한다. 이와 유사한 개념으로 부착력(adhesive force)이 있다. 부착력은 표면장력과 마찬가지로 분자의 인력으로 작용되지만, 동일 물질이 아닌 서로 다른 물질의 분자사이의 인력으로 발생하게 된다.

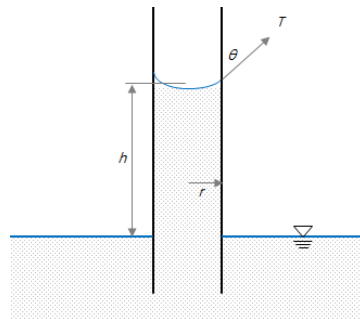


Fig. 2. Capillarity phenomenon

대표적으로 표면장력을 확인할 수 있는 방법으로 모세관 현상(capillarity phenomenon)이 있다. 물 위에 작은 관을 세우면 표면장력과 부착력 때문에 관 속의 수위가 상승하게 되며, 이러한 현상을 모세관 현상이라고 한다(Fig. 2 참조) 또한, 관의 직경과 수면의 상승 사이에는 Eq. (1)과 같은 관계가 성립한다.

$$h = \frac{2T\cos\theta}{\rho gr} \quad (1)$$

여기서,  $h$ 는 수주의 높이(m),  $T$ 는 수주에 작용하는 힘으로 표면장력과 부착력의 합력(N/m)이고,  $r$ 은 관의 반경(m),  $\theta$ 는 수면과 관의 접촉각이다.

### 2.2 Weber Number ( $We$ )

Weber Number는 유체역학에서 사용되는 무차원 수이다.  $We$ 는 액체 중의 기포의 운동 또는 액체 중의 이것과 섞이지 않는 다른 액적의 운동을 취급할 때 사용되며 Eq. (2)와 같다.

$$We = \frac{l u^2 \rho}{\sigma} \quad (2)$$

여기서,  $l$ 은 기포 또는 액적의 지름 또는 이들을 불러내는 노즐의 지름 등의 대표 길이(m),  $u$ 는 유속(m/s),  $\rho$ 는 유체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>),  $\sigma$ 는 표면장력(N/m)이다.  $We$ 는 표면장력의 영향을 나타내는 수로, 관성력과 표면장력의 비, 또는 운동에너지와 표면장력에 의한 에너지 비를 나타내기 때문에, 본 연구에서 다루는 홍수파 전파 속도와 표면장력의 영향을 잘 나타낸다고 판단하여,  $We$ 를 이용한 한계 조건 및 보정 계수를 제시하였다.

## 3. 수리실험

### 3.1 농도-표면장력

계면활성제의 농도와 표면장력의 관계 분석을 위해 수리실험을 수행하였다. 실험은 얇은 유리관의 모세관 현상을 이용하여 진행되었으며, Eq. (1)을 이용하여 표면장력을 산정하였다.

물의 표면장력을 낮추기 위해 사용된 계면활성제(surfactant)는 석유계의 일반 세제(LAS(linear alkylbenzene

sulfonate))를 이용하였다. 실험은 계면활성제의 농도(%)를 변화시켜가며 직경 0.001 m의 얇은 유리관에서의 물의 상승 높이 및 접촉각을 측정하였다. 정확한 관측을 위해 Fig. 3과 같이 물에 색소를 섞고, 초정밀 카메라를 이용하여 측정하였다. 실험은 각 case당 3번씩 반복하여 측정하였으며, 이를 평균한 값을 선택하였다. 또한 온도 변화에 따른 영향을 없애기 위해 물의 온도는 20 ℃로 동일하게 설정하였다.

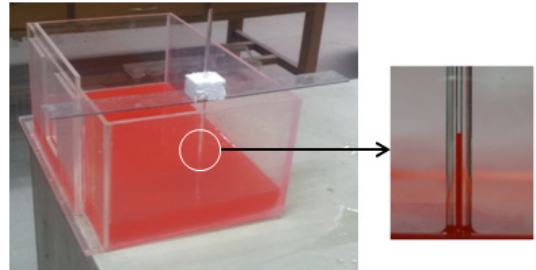


Fig. 3. Surface tension test using capillarity phenomenon

계면활성제의 농도를 약 0.0~3.0%로 변화시켜 총 23case에 대해서 수행한 결과를 Fig. 4에 도시하였다.

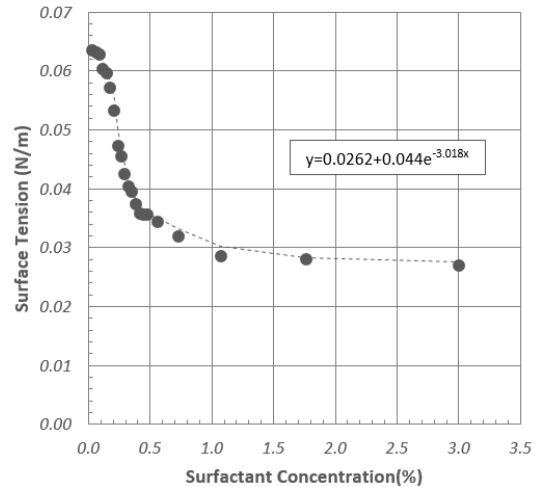


Fig. 4. Relation of surface tension with concentration of surfactant

실험실에서 사용하는 물, 유리의 가공 상태, 색소 및 측정오차 등으로 인하여 일반적인 물의 표면장력(약 0.07 N/m)에 비해 약 0.005 N/m정도 작은 값이 나온 것으로 판단되며, 일반적으로 농도가 증가함에 따라 표면장력이 감소하는 경향이 나타났다. 특히 0.7~0.8%에서

급격한 기울기의 변화를 보였는데, 이는 양이온 계면활성제를 사용한 기존의 연구결과 매우 유사한 경향이다[8].

### 3.2 표면장력-홍수파 전파속도

농도와 표면장력 실험의 관계를 바탕으로 수조 내의 계면활성제 농도를 증가시키면서 홍수파 전파 속도를 측정하고 이를 바탕으로 유속 비를 도출하였다.

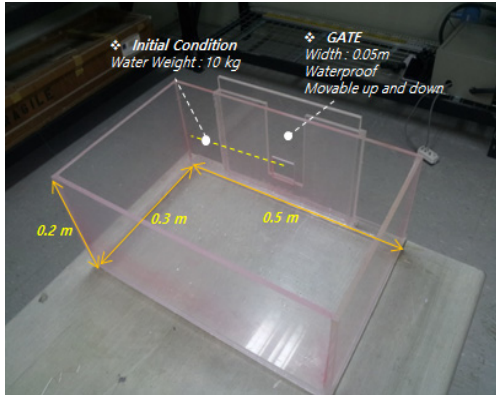


Fig. 5. Head-tank for test

실험에 사용되는 수조는 Fig. 5와 같이 개폐가 가능한 수문이 설치되어 있으며, 이를 이용하여 홍수파를 발생시켜, 홍수파 전파 속도를 측정하였다. 실험은 전자저울을 이용하여 10kg의 다양한 농도의 계면활성제 용액을 제작하고 이를 수조에 옮긴 뒤, 충분한 안정화 시간을 두었다.



Fig. 6. Flood wave propagation

홍수파의 전파는 디지털 카메라를 이용하여 측정하고, 이를 Auto-CAD를 이용하여 분석하였다. 홍수파의

속도는 홍수파가 한 방향으로 퍼지는 것이 아니기 때문에, 각 case당 동일 시간동안 홍수파가 퍼진 범위를 측정하여, 이에 제곱근을 취함으로써 평균이동거리를 계산하는 방식을 취하였다. Fig. 6는 홍수파가 전파되는 모습을 나타내며, Table 1 및 Fig. 7은 Fig. 4의 결과를 이용하여 표면장력을 산정하고, 홍수파의 평균 이동속도와와의 관계를 정리한 것이다.

Table 1. Results of flood wave propagation according to variation of surface tension

| No. | Surface Tension (N/m) | Velocity of Flood Wave Propagation (cm/s) |
|-----|-----------------------|---|
| 1   | 0.0318                | 20.8                                      |
| 2   | 0.0335                | 20.6                                      |
| 3   | 0.0356                | 20.7                                      |
| 4   | 0.0375                | 20.7                                      |
| 5   | 0.0392                | 20.3                                      |
| 6   | 0.0415                | 20.1                                      |
| 7   | 0.0441                | 20.0                                      |
| 8   | 0.0468                | 20.1                                      |
| 9   | 0.0505                | 19.8                                      |
| 10  | 0.0542                | 19.4                                      |
| 11  | 0.0587                | 19.2                                      |
| 12  | 0.0641                | 19.1                                      |
| 13  | 0.0675                | 18.0                                      |
| 14  | 0.0703                | 15.5                                      |

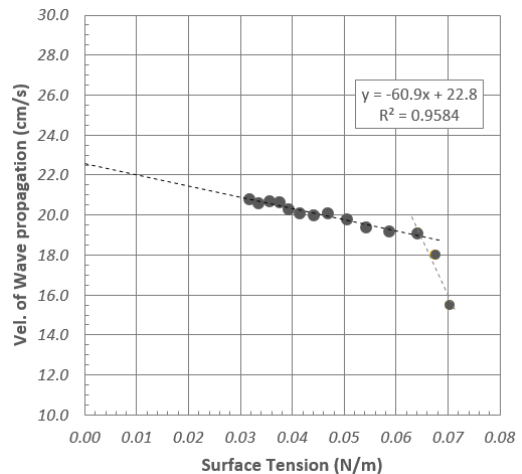


Fig. 7. Relation of surface tension with velocity of flood wave propagation

실험에서 표면장력이 가장 클 때의 전파속도는 약 15.5 cm/s로 나타났으며, 표면장력이 무시된다고 가정하였을 때의 전파속도는 22.8 cm/s(y절편 값)로 두 전파

속도의 비는 1.52로 나타났다.

### 3.3 실험 결과 분석

Fig. 8은 Fig. 4와 Fig.7 및 Eq. (1)을 이용하여, 도출된  $We$ 와 표면장력의 관계를 보여준다. 선단 홍수파의  $We$ 는 표면장력이 증가함에 따라 선형적으로 감소하는 것으로 나타났다.

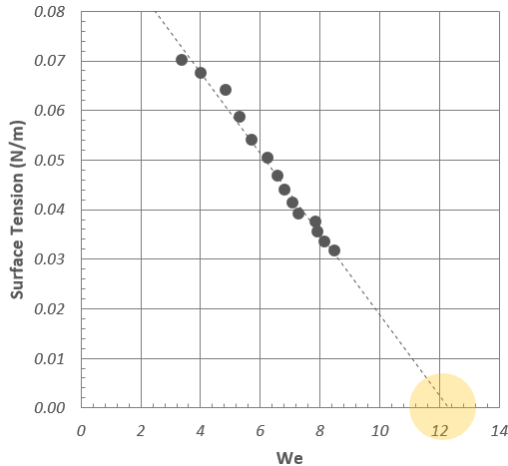


Fig. 8. Relation of surface tension with  $We$

Fig. 8에서 표면장력의 값이 0이 되는  $We(x$ 절편)를 보여준다.  $We$ 가  $x$ 절편의 값을 가질 때, 선단 홍수파는 결국 표면장력의 영향을 받지 않는 조건이 되며, 이는 축척효과를 무시할 수 있는 한계조건이라 할 수 있다. 다시 말해 홍수파 선단의 운동에너지의 크기가 표면장력 에너지의 약 12배 이상이 되었을 때, 표면장력의 영향을 무시할 수 있으며, 12배 이하인 상태가 되었을 경우에는 Fig. 8을 이용하여,  $We$ 에 따른 표면 장력을 구하고, 이 값과 Fig. 7에서 대응되는 전파 속도를 찾아,  $y$ 절편 (=22.8 cm/s)과의 비를 선단홍수파의 전파 속도에 곱함으로써, 축척효과를 보정할 수 있을 것이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 선단 홍수파 전파 실험 시 발생할 가능성이 있는 표면장력에 의한 축척효과에 대한 연구를 수행하였으며, 홍수파의 특성에 따라 축척효과를 받는 한계 조건(critical condition)으로  $We \geq 12.2$ 를 제시하였

다. 또한  $We < 12.2$ 인 경우에는(축척효과를 받는 경우) 본 연구에서 도출된 연구 결과를 이용한 보정계수를 제시하여, 홍수파 전파에 대한 수리실험 시 기존 보다 정확한 연구 성과 도출이 가능할 것이라 판단된다. 다만 홍수파가 전파되는 제재지의 물리적인 특성(경사, 조도 등)을 본 연구에서는 반영하지 못하여, 향후에는 이를 고려한 연구를 수행하여 좀 더 다양한 연구에 도움이 되고자 한다. 또한 선행연구에서 수행되었던 홍수파 전파 관련 실험 자료를 본 연구와 결부시켜 새로운 경향을 도출하고, 이를 검증하는 작업을 수행하고자 한다.

## References

- [1] Dressler, R. F., "Comparison of Theories and Experiments for the Hydraulic Dam-break Wave", *Association of Scientific Hydrology*, No.38, pp.319-328, 1954.
- [2] Bellos, V., Soulis, J. V. and Sakkas, J. G., Experimental Investigation of Two Dimensional Dam-Break Unduced Flows, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.30, No.1, pp. 47-63, 1992.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00221689209498946>
- [3] Stansby, P. K., Chegini, A. and Barnes, T. C. D. "The Initial Stages of Dam-break Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol.374, pp. 407-424, 1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022112098009975>
- [4] Bukreev, V. I. and Gusev, A. V., "Initial Stage of the Generation of Dam-break Waves," *Doklady Physics*, Vol.50, No.4, pp. 200-203, 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/1.1922561>
- [5] Soo Young, K., Ho Je S., Dong Kyun, K., and Seung Oh, L., "Estimation of the Flood Wave Propagation According to Variation of Flood Plain Roughness for Levee Breach," *Proceedings of the 10th Annual Meeting of Asia Oceania Geosciences Society*, Brisbane, Australia, pp. 24-28 June, 2013.
- [6] Un, J., Eun-Kyung, J., Jun-Wook, K., Experimental Study on Mechanism Analysis of Headcut Erosion in the Noncohesive Sediment Bed, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 16, No. 2 pp. 1500-1506, 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.2.1500>
- [7] Novak, P., Cabelka, J., "Models in hydraulic engineering; physical principles and design applications," Pitman Advanced Publishing Program, 1981.
- [8] Ji Sung, K., Jong Choo, L. "Interfacial Properties of Imidazoline Cationic Surfactant", *Korean Chemical Engineering Research*, Vol.47, No.1, pp. 38-45, 2009.

**정 석 일(Seok-il Jeong)**

[정회원]



- 2012년 2월 : 홍익대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 2015년 11월 : 한국농어촌연구원 연구원
- 2015년 12월 ~ 현재 : 홍익대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>

수리학, 해안공학, 수문학

---

**김 수 영(Sooyoung Kim)**

[정회원]



- 2011년 2월 : 홍익대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2014년 8월 : 홍익대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2014년 7월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 박사후 연구원

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험

---

**이 승 오(Seung Oh Lee)**

[정회원]



- 1999년 2월 : 한양대학교 일반대학원 토목공학과 (수공학석사)
- 2006년 5월 : Georgia Tech. 토목환경공학 (공학 박사)
- 2007년 9월 ~ 현재 : 홍익대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

토목/건축, 수리학, 수리실험