

# 교각에 설치된 사석보호공의 침하량 산정식 도출에 관한 실험 연구

## An Experimental Study to develop the Subsidence Equation for Riprap Protection around the Pier

지 운\* · 여운광\*\* · 이원민\*\*\* · 강준구\*\*\*\*

Ji, Un · Yeo, Woon Kwang · Lee, Won Min · Kang, Joon Gu

### Abstract

Riprap filter should be installed around the pier to prevent riprap subsidence due to sediment winnowing or leaching between the riprap and bed layers. However, riprap protection without filters is commonly applied in the field because of ambiguous specifications and technical and economical difficulties to install the filter layer. Therefore, the hydraulic experiments were conducted in this study to measure and analyze the riprap subsidence quantitatively with different conditions for thickness of riprap layer, approached velocity, sizes of riprap and bed material. As the velocity was increased and size of bed material and thickness of riprap layer were decreased, the subsidence was increased. Consequently, the dimensionless riprap subsidence equation was derived using the synthesized experimental results. The results of this study could be employed as a standard criterion or predictor to evaluate the subsidence stability.

Keywords : riprap protection, sediment winnowing, filter design, riprap subsidence equation

### 요 지

교각 세굴 방지를 위해 사석보호공을 설치하는 경우 하상의 유사이탈로 인한 보호공의 침하현상이 발생할 수 있으며 따라서 사석층과 하상 사이에 필터층의 설치가 반드시 필요하다. 하지만 국내의 명확하지 않은 필터설치 기준과 설치를 위한 기술적 어려움 그리고 고가의 공사비와 같은 문제점으로 인해 현장에서는 필터 없는 사석보호공을 주로 시공하고 있다. 이에 본 연구는 다양한 조건의 사석 포설두께, 접근 유속, 사석과 하상토의 입경을 갖는 수리실험을 통해 필터층이 없는 사석보호공의 침하량을 정량적으로 측정 및 분석하였으며 실험 결과, 접근유속이 증가할수록, 하상토의 입경이나 포설두께가 감소할수록 최대침하량은 증가하는 양상을 보였고 일정 시간 후에는 침하량이 최대값에 도달하여 유사이탈이 더 이상 발생하지 않음을 알 수 있었다. 또한 본 논문에서 수행된 실험결과 자료들을 최종적으로 종합하여 하상토 입경 계수가 포함된 필터층 없는 사석보호공의 무차원 침하량 산정식을 제안하였으며 이러한 연구 결과들은 추후 필터층 없이 시공되는 사석 보호공의 침하 안정성 평가를 위한 지표로 활용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 사석보호공, 유사이탈, 필터 설계, 사석침하량 산정식

### 1. 서 론

세굴 현상은 하천 또는 해상에 건설된 교량의 교각 주위에 발생하는 것으로 교량의 안전에 직접적인 영향을 미치며 현재 국내외에서 다양한 연구 및 실험을 통해 여러 세굴 방지대책 및 공법들이 개발되어 오고 있다. 현재까지 개발된 세굴을 방지하기 위한 공법으로는 교각에 보강 구조물을 추가하는 방법, 교각 바닥에 여러 종류의 매트를 설치하는 방법, 교각 둘레에 사석을 배치하는 방법 등이 있으며 그 중 사석을 이용한 교각보호공법은 실제 시공시 사석 확보의

용이성뿐만 아니라 교각 건설 중이나 저수위 상태에서 쉽게 교각 주변에 배치할 수 있는 장점이 있기 때문에 가장 많이 활용되고 있다. 사석보호공은 한 번 설치되면 사석이 제 자리에 남아있는 한 세굴 방지에 좋은 효과를 발휘한다는 장점이 있지만 사석의 유실여부를 쉽게 확인할 수 없기 때문에 조사와 관리가 어려운 단점이 있으며, 사석 매트에서 사용되는 암석은 시간이 지남에 따라 혹은 홍수로 인해 이동되거나 소실되는 문제가 있다. 또한 세굴보호공의 사석크기와 하상재료 입자의 크기 차이 때문에 사석 층 공극사이로 하상재료가 이탈하는 현상이 발생하기도 하며, 이는 사

\*정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 박사후 연구원 (E-mail : juncivil@gmail.com)

\*\*정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (E-mail : yeo@mju.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 교신저자 · 명지대학교 토목환경공학과 석사과정 (E-mail : m2wlee@mju.ac.kr)

\*\*\*\*정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 (E-mail : jgkang02@kict.re.kr)

석보호공의 침하에 지배적인 영향을 미치기도 한다(지운 등, 2008). Wörman(1989), Chiew(1995), Lim and Chiew(2001), Lauchlan and Melville(2001) 그리고 지운 등(2008)은 사석보호공의 다양한 붕괴 형태에 관한 연구를 수행하였으며, 그 결과 사석붕괴 형태를 전단붕괴, 유사이탈붕괴, 가장자리붕괴, 하상형상 변화에 의한 불안정화로 분류하고 각각의 붕괴 원인을 정의한 바 있다.

사석보호공을 현장에 적용한 국내 시공사례로는 현재 시공 중인 인천대교, 부산의 구포대교 등이 있다. 현장에서 사석보호공을 적용시키는 경우, 사석과 하상 입자 크기에 따라 그 비율이 기준 이상이면 사석층과 하상 사이에 필터를 시공해야 하지만 현장여건상 시공이 불가능한 경우가 있고 시공시 막대한 경제적 비용이 추가되는 경우도 발생하는 등 많은 문제점을 가지고 있다. 앞서 사석보호공의 시공 사례로 언급한 해상교량인 인천대교의 경우, 필터층의 시공에 있어서 현장의 깊은 수심으로 인한 기술적 어려움 때문에 수리모형실험을 통한 안정성 평가를 실시하여 필터층 없는 사석보호공으로 시공하도록 결정한 바 있다(삼성건설 JV, 2007). 필터 없는 사석보호공의 침하에 관한 연구는 Wörman(1989), Lauchlan and Melville(2001)에 의해 수행된 바 있으며, 이 중 Wörman(1989)의 연구에서는 사석층을 통한 하상입자의 침식과 이송에 대하여 유속, 사석크기, 하상재료의 크기에 따른 침하량의 관계를 실험을 통해 유도하여 침하량 산정식을 제시하였고, 최종적으로는 다층의 사석과 필터로 이루어진 사석보호공 층이 단층의 필터 없는 사석 층으로 대체될 수 있음을 제안한 바 있다. 그러나 Wörman(1989)의 연구는 하상도와 사석의 크기차가 상대적으로 작은 조건에 대해서만 실험이 이루어졌으며, 이에 따라 해상 교량이나 강 하류와 같이 하상도와 사석의 입경차가 커지는 경우에 대해 적용이 난해하다는 단점을 가지고 있다. 또한 Lauchlan and Melville(2001)은 사석보호공의 안정성을 수리실험 결과를 이용하여 그래프로 제시하였으나 하상도의 입경이 고려되지 않아 실제 현장에 적용하는데 다소 문제점이 있다. 따라서 본 논문은 Wörman(1989) 및 Lauchlan and Melville(2001)의 연구가 갖는 단점을 최대한 보완하여 해상 교량이나 강 하류와 같이 하상도와 사석의 입경차가 커지는 조건에도 적용할 수 있는 안정성 지표를 제시하기 위해 다양한 조건을 고려하여 수리실험을 실시하였다.

본 연구에서는 사석보호공의 침하에 있어서 필터의 역할을 확인하기 위해 필터 설계 기준에 맞춰 필터에 사용되는 사석 필터 크기를 계산하였으며, 수리실험을 통해 필터가 설치된 경우와 설치되지 않은 경우의 사석보호공 침하량을 관측하였다. 또한 교량에 설치되는 사석보호공의 사석과 하상도의 입자 크기 차이로 인한 유사이탈 현상이 사석보호공의 침하에 미치는 영향을 평가하기 위해 각기 다른 유속조건 및 사석보호공의 포설두께, 하상도 및 사석의 입경 조건을 갖는 37가지의 수리실험을 실시하였으며 실험 결과를 분석하고 이를 활용하여 사석보호공 침하량 산정식을 제안하였다. 본 연구는 향후 필터를 설치하지 않고 사석보호공을 설계, 시공할 경우 이에 대한 침하량을 평가하기 위한 산정식을 개발하는데 그 목적이 있다.

## 2. 사석보호공의 붕괴 형태 및 유사이탈 현상

Chiew(1995) 그리고 Lauchlan and Melville(2001)은 사석붕괴의 다양한 형태를 전단붕괴(Shear Failure), 유사이탈붕괴(Winning Failure), 가장자리붕괴(Edge Failure), 하상형상 변화에 의한 불안정화(Destabilizing by the Progression of Bed Forms)로 분류하여 정의하였다. 먼저 전단 붕괴는 사석이 본래 설치된 자리를 이탈하여 이동하는 현상으로 물의 흐름으로 인한 전단력이 사석에 영향을 줌으로써 발생한다고 정의하였다. 둘째, 유사이탈 붕괴는 난류와 사석 사이의 공극으로 침투되는 물의 흐름에 의해 하상재료가 사석 사이로 이탈하여 발생하는 것이며, 가장자리 붕괴는 사석 층 주변부에서 발생하는 세굴에 의해 방호역할을 하는 사석 층의 지지가 약화되는 것이 주원인으로 사석이 인근에 발달된 세굴공으로 떨어지면서 나타나는 현상이라고 정의하였다. 마지막으로 하상형태 변화에 의한 불안정화는 흐름이 발생하면서 바닥형상에 영향을 주어 바닥형상의 변동이 발생하고 이로 인해 사석 층이 불안정하게 되어 발생하는 현상으로 정의하였다.

다양한 붕괴 형태 중 유사이탈 붕괴는 사석보호공의 침하와 가장 밀접한 관련이 있다. 유사이탈 현상에 대해 발생 메커니즘을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 총적하천의 바닥은 흐름에 의해 쉽게 침식되는 사립자들로 구성되어 있으며, 이러한 입자들은 처음에는 움직이지 않고 있다가 유속이 점차 증가하여 일정 조건 이상이 되면 움직이기 시작한다. 이 때, 흐름에 의해 사립자들이 움직이기 시작하는 흐름 조건을 한계 조건이라 하는데 이러한 한계조건은 모래와 같은 비점착성 유사와 점토와 같은 점착성 유사의 경우가 매우 다른 양상을 보인다(우효섭, 2001). 동일한 입경의 비점착성 모래의 경우, 개별 사립자의 물리적 특성이 같으므로 이론적으로 한계 조건이 발생하면 모든 입자들이 동시에 움직이기 시작할 것으로 기대되지만, 실제 현상으로는 난류에 의한 순간적인 양력의 발생이 흐름 조건보다 더 지배적인 요인으로 작용하여 시, 공간상에서 불규칙적으로 입자들의 움직임이 발생한다.

사립자 운동의 이론(그림 1)을 토대로 한 사석보호공에서의 유사이탈 현상은 그림 2와 같이 설명할 수 있다. 대부분의 자연하천은 수로경사가 매우 작으므로 흐름방향으로 작용하는 중력은 구형 유사 입자에 작용하는 다른 힘에 비해

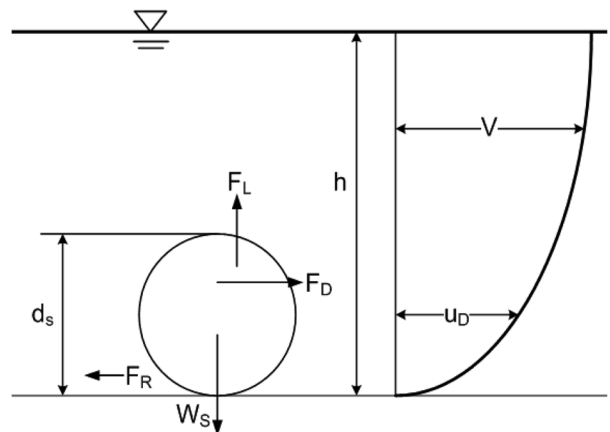


그림 1. 하상에 위치한 사립자에 작용하는 힘(우효섭, 2001)

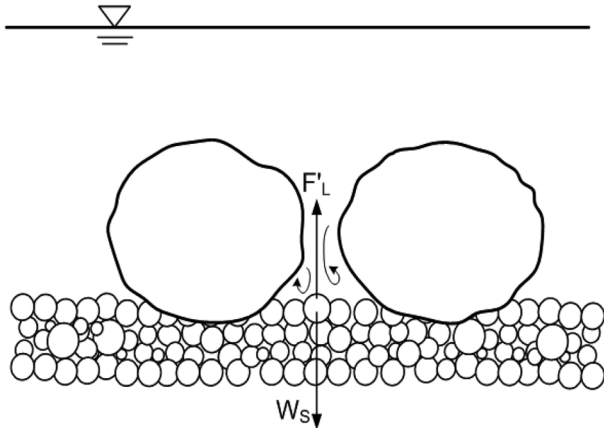


그림 2. 사석 공극 사이에 위치한 사립자에 작용하는 힘

무시할 수 있을 정도로 작다고 가정한다(Yang, 2003). 그림 1에서와 같이 하상에 위치한 개별 사립자에 작용하는 힘들은 각각 항력  $F_D$ , 양력  $F_L$ , 사립자의 수중중량  $W_s$ , 그리고 저항력  $F_R$ 이며  $F_L \geq W_s$  혹은  $F_D \geq F_R$ 의 조건을 만족할 경우, 입자의 움직임이 발생한다. 사석의 공극사이로 유사가 이탈되는 현상은 난류와 공극사이의 침윤 흐름(seepage flow)에 의해 발생하는 현상(Melville and Coleman, 2000)이며 사석층 아래에 위치한 하상토의 개별 사립자에 작용하는 힘을 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림 2와 같이 사석의 공극 사이에 위치한 사립자의 경우, 작용하는 힘의 관계가 다소 차이가 있다. 먼저 주변에 위치한 사석으로 인해 수평 방향으로 작용하는 힘의 효과가 상쇄되고 입자에 작용하는 양력과 난류의 영향으로 인해 발생하는 힘을 합한  $F'_L$ 과 사립자의 수중중량  $W_s$ 만 입자에 작용하게 된다. 이러한 경우에는  $F'_L \geq W_s$ 의 조건이 발생할 때 입자의 움직임이 시작되어 유사이탈 현상이 발생하는 것이다.

### 3. 필터설계 기준

일반적으로 필터는 사석보호공의 유사이탈 붕괴를 방지하는 역할을 수행하며, 필터의 종류로는 필터 구성 재료에 따라 입경별로 분류된 사석을 이용한 사석 필터, 직물 등을 이용하여 사용 특성에 맞게 제작된 토목섬유 필터 그리고, 이 둘을 혼합한 형태의 합성 필터 등이 있다. 이 중 사석 필터는 사석을 구하기 쉽고 내구성이 좋으며, 기능 수행에 있어 신뢰성이 있다는 장점이 있어 가장 많이 사용된다.

사석 필터의 기능에 대한 연구는 De Abreu-Lima and Morgan(1951), Jetter(1951), Manamperi(1952), Sherman(1953), Karpoff(1955), Zweck and Davidenkoff(1957), Sherard 등(1984), Kenney and Lau(1985), Kenney 등(1985), La Fleur 등(1989), Aberg(1993) 등에 의해서 이루어졌으며, 사석 필터에 대한 여러 연구들을 바탕으로 한 사석 필터의 설계 기준 또한 많은 연구자들에 의해 제시되었다. 본 연구에서는 그 중 대표적인 사석 필터의 설치 요구 기준 및 설계 기준들에 대해 다음과 같이 정리하였다.

먼저, Terzaghi(1949)가 제시한 필터 설계 기준은 필터층의 설계에 대한 연구에 자주 인용되는 기준으로, 일반적인 제방 호안의 필터 설계뿐만 아니라 세굴 방지를 목적으로

설치되는 사석보호공의 필터 설계시에도 적용될 수 있는 기준이며, 특히 Melville and Coleman(2000)은 교각세굴 사석보호공 필터 설계시 Terzaghi Criteria(1949)를 이용할 것을 권고하고 있다.

Gregorius(1985)는 사면 보호를 위한 사석보호공의 사석 필터 설치 요구 기준과 설계 기준을 제시하였으며, 만일 현장 조건이 설치 요구 기준을 만족시키지 못한다면 제시된 필터 설계 기준에 따른 사석 필터를 설치해야 함을 언급하였다.

미개척국(U.S.Bureau of Reclamation)에서 제시한 기준은 흙댐의 사석 필터 설계시 사용되는 기준으로 둘 이상의 필터층이 필요할 경우, 큰 사석을 사용한 필터 재료의 입경과 하상토 입경을 이 기준에 적용하여 작은 사석으로 구성된 필터층을 설계하도록 하고 있다(USBR, 1987). 또한 일반적으로 사석 필터는 적당한 투과성을 가질 수 있도록 균일한 입자로 분포되어야 하며 필터를 시공하는 과정에서 입자들이 분리되지 않도록 유의해야 함을 지적하고 있다.

미연방 고속도로청(Federal Highway Administration)에서도 필터층의 설치 요구 기준과 설계 기준을 제시한 바 있다. FHWA(2001)에 의하면 필터를 구성하는 사석의 크기는 5 mm부터 최대 76 mm에서 89 mm까지의 범위를 가져야 하며, 필터층의 두께는 사석층의 두께에 따라 결정되지만 152 mm에서 228 mm보다 작지 않아야 한다는 기준을 제시하고 있다. FHWA(1989)에서는 이와는 별도로 단층 필터일 경우 15 cm에서 38 cm, 복층 이상의 필터일 경우에는 10 cm에서 20 cm의 필터층 두께가 적당하다는 기준도 제시하고 있다. 특히 미연방 고속도로국의 문헌들에 의하면 모든 경우에 적용할 수 있는 필터 설계 기준은 존재하지 않는다고 명시하고 있으며, 또한 하상토가 매우 고운 입자일 경우, 하상토와 마찬가지로 매우 작은 사석으로 구성된 한 층 이상의 필터가 반드시 필요하다는 기준도 함께 제시하고 있다.

CIRIA(Construction Industry Research and Information Association)에서는 모든 경우에 적용 가능한 좀 더 구체적이고 엄격한 필터 설계 기준을 제시하고 있다. 특히 CIRIA(2002)에 제시된 사항 중 필터의 균일성에 대한 조건 사항은 필터를 구성하는 사석 중에서 비교적 큰 입자들 사이로 좀 더 작은 입자가 이탈되지 않도록 하는데 목적이 있으며, 이는 난류 흐름과 같이 수리력이 큰 경우에 그 중요성이 가중됨을 지적하고 있다. 또한 설계된 각각의 필터층은 100 mm 이상이어야 하며, 단층일 경우에는 150 mm 이상의 필터층의 설계가 필요하고, 이는 하상토의  $d_{100}$  또는 1.5  $d_{50}$  이상일 것으로 규정하고 있다.

마지막으로 Keller(2005)는 하상토가 점착성이 적은 모래나 점토로 이루어지고, 수압이 특별히 크게 작용하며, 기타 불확실한 요인이 영향을 미치고 있는 제방의 사면에서는 필터층이 필요하다고 언급하였다. 또한 이와 함께 하천의 제방에 적용 가능한 필터 설치 요구 기준을 제시하였다.

### 4. 수리실험

#### 4.1 실험 장치 및 재료

본 수리실험에 사용한 개수로 장치는 길이 25 m(수조포함), 높이 0.8 m, 폭 0.8 m, 최대 하상경사는 0.77%까지 조절

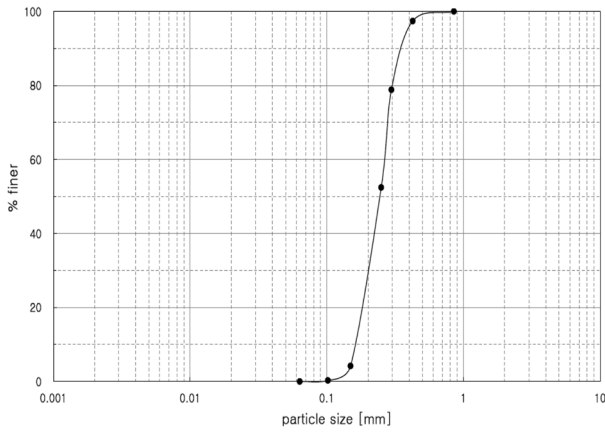


그림 3. 하상토 입도분포곡선( $d_{50}=0.24$  mm)

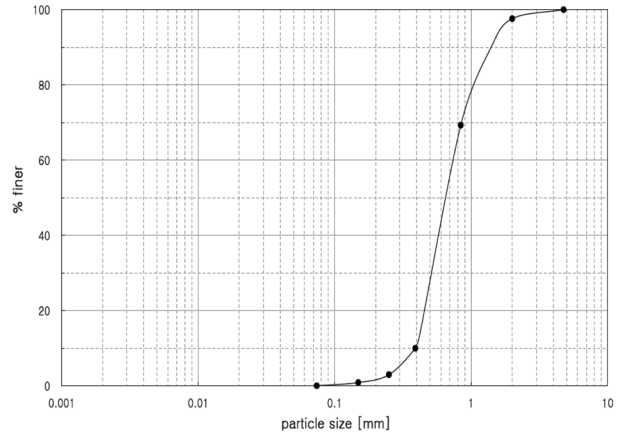


그림 6. 하상토 입도분포곡선( $d_{50}=0.65$  mm)

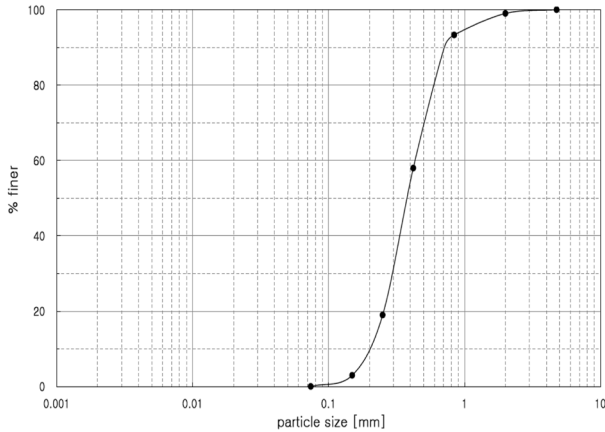


그림 4. 하상토 입도분포곡선( $d_{50}=0.36$  mm)

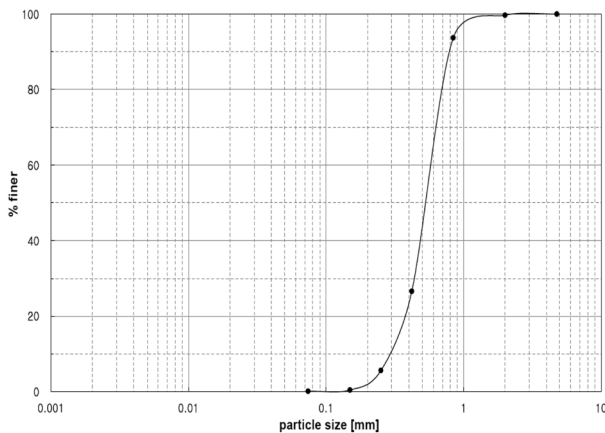


그림 5. 하상토 입도분포곡선( $d_{50}=0.53$  mm)

이 가능한 직선형 순환수로이다. 개수로 상류단에는 유량을 조절할 수 있는 사각 위어가 설치되어 있으며, 수로의 끝에는 수위를 조절할 수 있는 수문이 설치되어 있다. 실험에 사용한 교각은 수로의 크기를 고려하여 10 cm 폭의 매끄러운 표면을 가지는 원형 아크릴 모형교각이다. 수리실험에 사용된 하상토의 중앙입경( $d_{50}$ )은 각각 0.24 mm와 0.36 mm, 0.53 mm, 0.65 mm이며, 각 하상토의 입도분포곡선은 그림 3에서 그림 6과 같다. 그리고 사석보호공을 구성하게 될 사석은 각각의 입경을 등가지름 환산공식을 이용, 산정하여 중앙입경( $D_{50}$ )이 각각 4 cm, 6 cm가 되는 사석을 선별, 수집하여 실험에 활용하였다. 하상토와 사석 모두 비중은 일반 모래의 경우인 2.65의 값을 가진다. 또한 필터의 설치 유무에 따른 침하량을 측정, 비교하는 실험에 사용될 필터재료는

중앙입경이 5 mm인 사석을 이용하였다.

본 실험에서는 최대 침하량에 도달되는 시간보다는 최대 침하량 값을 획득하는 것이 사석층 설계 또는 계산 측면에서 좀 더 안전한 값들을 제시할 수 있다는 점을 고려하여 유사 공급 장치를 설치하지 않은 Clear-water condition을 적용하였으며, 사석층의 침하량 즉, 세굴심은 시간에 따라 주기적으로 측정하여 최대세굴심에 도달하는 시간을 관측하였다.

#### 4.2 실험 조건 및 내용

필터의 기능이 사석보호공의 침하에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 필터를 설치하였을 경우와 설치하지 않았을 경우에 대한 수리실험을 수행하였다. 두 경우 모두 5.2절의 표 1에 명기된 15 실험안과 동일한 조건을 적용하였으며, 필터의 설치유무만을 다르게 하였다. 필터를 설치하는 실험을 실시하기 위해 앞서 조사된 여러 기준 중, 필터 설치 요구 기준과 필터 설계 기준을 모두 제시하고 있는 Gregorius(1985)와 FHWA(1989, 2001)의 기준을 살펴보았다. 그러나 이 중 Gregorius(1985)의 필터 설계 기준은 사면에 설치되는 사석보호공의 필터 설계를 위한 방법으로 제안이 되었으며 특히 필터 설계 기준의 마지막 항목이  $D_{50}(\text{Filter}) > 85$  mm로 제시되어 본 수리실험을 위한 스케일에 적용하기는 무리가 있을 것으로 판단되었으므로 이러한 제약 조건이 없는 FHWA(2001)의 필터 설계 기준을 이용하여 수리실험 조건에서의 사석 필터를 설계하였다. 일반적으로 필터를 구성하는 재료의 입경은 하상토와 사석의 입경을 고려하여 결정하며, 필터층의 입도분포 결정시 보통 사석층의 입도분포 결정 방법과 동일한 방법을 사용한다. 본 연구에 적용된 FHWA(2001) 기준을 이용한 필터 설계식은 식 (1)에서 식 (11)과 같다.

먼저, 필터의 필요성 유무를 판단하기 위하여, 식 (1)~식 (3)과 같은 조건 계산을 하였다.

$$\frac{d_{50}(\text{Riprap})}{d_{50}(\text{Base})} = \frac{40}{0.36} = 111 > 40 \quad (1)$$

$$\frac{d_{15}(\text{Riprap})}{d_{15}(\text{Base})} = \frac{26}{0.23} = 113 > 40 \quad (2)$$

$$\frac{d_{15}(\text{Riprap})}{d_{85}(\text{Base})} = \frac{26}{0.78} = 33.3 > 5 \quad (3)$$

위 식의 결과, 필터 역할을 할 수 있는 충분히 가는 입자

는 사석층에 존재하지 않기 때문에 필터층의 설치가 필요한 것으로 나타났다. 하상 측에 위치하게 될 필터의 속성은 식 (4)에서 식 (7)과 같다.

$$\frac{d_{50}(\text{Filter})}{d_{50}(\text{Base})} < 40, d_{50}(\text{Filter}) < 40 \times 0.36 = 14.4 \text{ mm} \quad (4)$$

$$\frac{d_{15}(\text{Filter})}{d_{15}(\text{Base})} > 5, d_{15}(\text{Filter}) > 5 \times 0.23 = 1.15 \text{ mm} \quad (5)$$

$$\frac{d_{15}(\text{Filter})}{d_{15}(\text{Base})} < 40, d_{15}(\text{Filter}) < 40 \times 0.23 = 9.2 \text{ mm} \quad (6)$$

$$\frac{d_{15}(\text{Filter})}{d_{85}(\text{Base})} < 5, d_{15}(\text{Filter}) < 5 \times 0.75 = 3.75 \text{ mm} \quad (7)$$

또한, 사석층 쪽에 놓여질 필터의 속성은 식 (8)에서 식 (11)과 같다.

$$\frac{d_{50}(\text{Riprap})}{d_{50}(\text{Filter})} < 40, d_{50}(\text{Filter}) > 40/40 = 1 \text{ mm} \quad (8)$$

$$\frac{d_{15}(\text{Riprap})}{d_{15}(\text{Filter})} > 5, d_{15}(\text{Filter}) < 26/5 = 5.2 \text{ mm} \quad (9)$$

$$\frac{d_{15}(\text{Riprap})}{d_{15}(\text{Filter})} < 40, d_{15}(\text{Filter}) > 26/40 = 0.65 \text{ mm} \quad (10)$$

$$\frac{d_{15}(\text{Riprap})}{d_{85}(\text{Filter})} < 5, d_{85}(\text{Filter}) > 26/5 = 5.2 \text{ mm} \quad (11)$$

결정된 필터의 설계 구간은 그림 7로 나타내었으며 필터 재료의 중앙입경( $D_{50}$ )은 5 mm, 필터 포설두께( $T_f$ )는 7.5 mm로 결정하여 필터층을 사석층과 하상도 사이에 설치한 후 실험을 실시하였다.

또한 필터를 설치하지 않았을 경우, 다양한 조건에서의 최대침하량( $S_R$ )을 산정하기 위해 접근유속은 0.22 m/s에서 0.31 m/s까지 변화시켰으며, 수심 범위는 0.22 m부터 0.39 m까지 적용하여 수리실험을 실시하였다. 또한 사석보호공의 포설두께는 30 mm에서 90 mm로 변화하는 조건을 적용하였으며 중앙입경이 각각 0.24 mm와 0.36 mm, 0.53 mm, 0.65 mm인 하상도와 40 mm, 60 mm의 등가입경을 가지는 사석을 활용하여 각 조건이 실험결과에 주는 영향을 평가하였다. 접근유속은 교각의 영향을 받지 않는 상류지점에서 1차원 유속계를 이용하여 측정하였으며 유속계로 인한 흐름 변화가 교각에 미치지 않는 범위에서 실시하였다.

모든 실험에서는 매 30분마다 사석보호공의 침하량을 측정하여 최대침하량에 도달하는 시간과 최대침하량의 변화를 시간별로 관측하였으며, 별도로 각 실험안에 따라 1에서 37

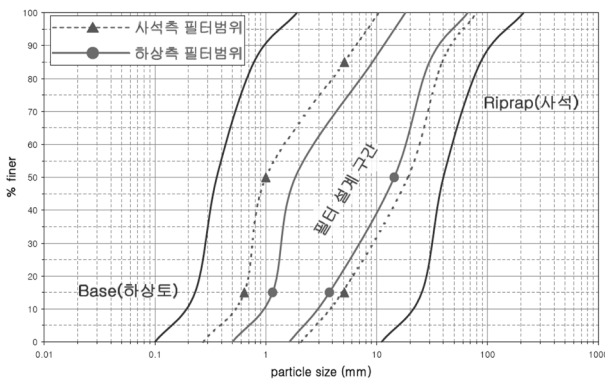


그림 7. 수리실험에 설치되는 사석필터의 설계

까지의 실험안 고유번호를 부여하여 구분하였다. 자세한 실험 조건은 실험의 결과와 함께 표 1에 나타내었다.

## 5. 실험 결과 및 분석

### 5.1 필터설치 유무에 따른 침하량 비교

사석보호공에 필터가 설치되었을 경우와 설치되지 않은 경우의 침하량을 각각 측정하여 필터가 유사이탈 붕괴에 대해 사석보호공 내에서 어떠한 역할을 하는지를 정성적, 정량적인 방법으로 분석하였다. 실험은 침하량이 일정한 값에 수렴되는 시간까지 실시하였으며, 그 결과 필터를 설치하지 않은 조건에서는 2장에서 설명한 바와 같이 사석으로 인해 수평 방향으로 작용하는 힘의 효과가 상쇄되고 입자에 작용하는 양력과 난류의 영향으로 인해 발생하는 힘이 사립자의 수중 중량보다 커지게 되어 유사이탈이 발생하고 이로 인한 최대 침하량이 25 mm로 측정되었다. 반면, 동일한 조건의 필터를 설치한 실험에서는 최대 10시간 이상의 지속적인 흐름 발생 조건하에서도 침하가 전혀 관측되지 않았으며, 필터의 설치하는 하상의 유사이탈 현상으로 인한 사석보호공의 침하를 감소시키거나 제거하는데 탁월한 효과가 있음을 알 수 있었다. 또한 그림 8, 9에서와 같이 두 경우 모두 수로의 상류단 방향(그림의 왼쪽 방향)으로 사석보호공 부근에 사립이 발달하면서 가장자리가 일부 붕괴되었음을 관측할 수 있었다.

앞 장에서 설명한 바와 같이 실험조건에서 사석포설두께가



그림 8. 필터를 설치한 실험의 결과



그림 9. 필터를 설치하지 않은 실험의 결과

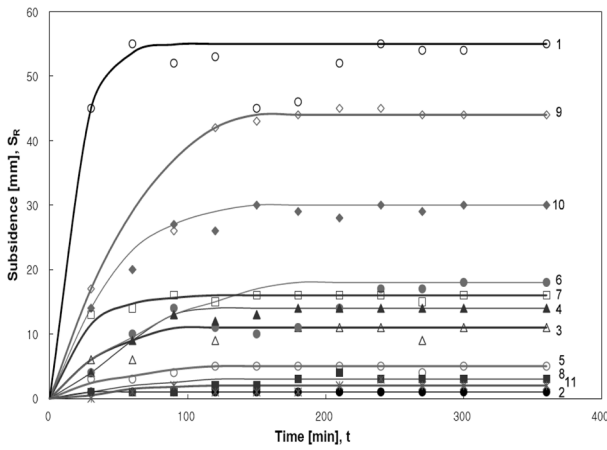


그림 10. 시간에 따른 침하량( $d_{50}=0.24$  mm)

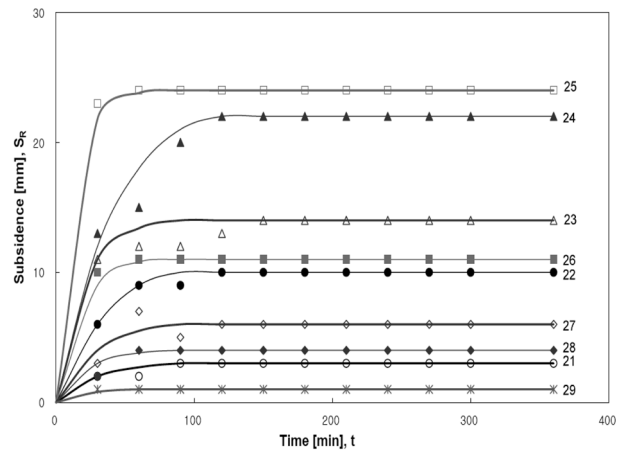


그림 12. 시간에 따른 침하량( $d_{50}=0.53$  mm)

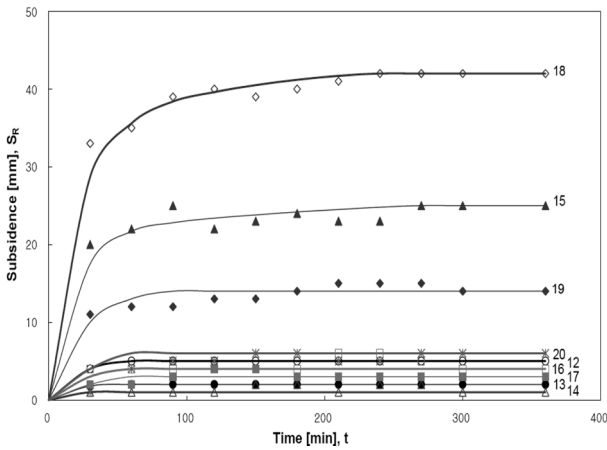


그림 11. 시간에 따른 침하량( $d_{50}=0.36$  mm)

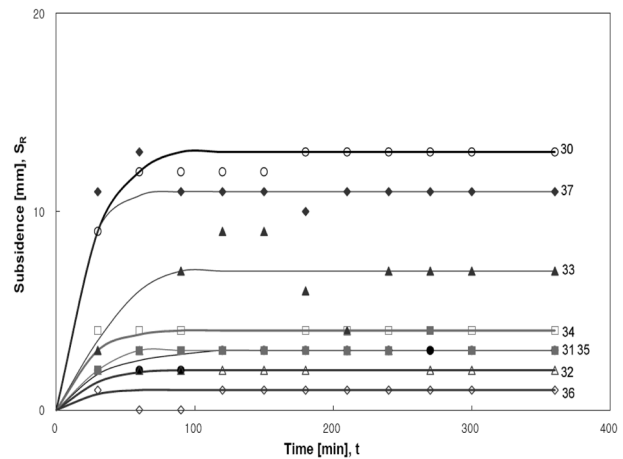


그림 13. 시간에 따른 침하량( $d_{50}=0.65$  mm)

30 mm입을 고려하면 필터가 없는 경우의 25 mm 침하량은 사석 두께의 83%에 해당하는 높이라는 것을 알 수 있었다. 하지만 Lauchlan and Melville(2001)는 연구를 통해 사석의 침하가 곧 사석보호공의 안정성 파괴로 단정할 수는 없고, 실험이 경과하면서 하상의 변화로 인한 사석의 침하가 진행되다가 결국 사석의 크기만큼 침하하여 하상 바닥과 같은 높이가 되지만 층을 지어 침하하기 때문에 보호 역할을 할 수 있는 능력은 여전히 남아있으며 때로는 교각을 보호하는데 더욱 효과적일 수 있음을 제시한 바 있다.

## 5.2 사석보호공의 침하량 결과 분석 및 산정식 개발

다양한 실험 조건에서의 시간( $t$ ) 경과에 따른 침하량의 변화를 관측하여 각 하상토의 입경에 따라 그림 10에서 그림 13으로 나타내었다. 이 그래프들에 나타난 37가지의 실험결과를 살펴보면 동일한 사석보호공의 포설두께를 가지는 실험의 경우, 접근유속이 증가할수록 사석보호공의 최대침하량이 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 접근유속을 동일하게 하고 사석보호공의 포설두께를 달리 한 결과, 사석보호공의 포설두께가 클수록 최종침하량이 작아짐을 알 수 있었다. 하상토의 중앙입경 크기 또한 침하량에 영향을 주는 요소이며, 실험안 1, 18, 25, 30과 실험안 3, 16 및 실험안 7, 20, 32 등의 결과를 비교해 보면 동일한 접근유속과 사석입경 및 포설두께의 조건에서 하상토의 중앙입경이 0.24 mm인 경우 침하량이 가장 큰 경향을 나타냈으며, 0.36 mm인 경

우의 침하량은 이보다 감소하였고, 0.53 mm, 0.65 mm의 순으로 침하량이 작게 관측되었다. 한편 접근유속, 하상토의 입경 및 사석포설두께가 동일하지만 사석의 입경이 달라지는 경우는 실험안 2와 8의 결과에서 보여지듯이 사석입경이 커짐에 따라 유사가 이탈될 수 있는 공극이 커질 수 있어 더욱 많은 침하가 발생한다는 것도 알 수 있었다. 이 밖에도 접근유속의 크기에 상관없이 비교적 포설두께가 낮은 사석층은 유사이탈 현상이 모두 발생하는 것으로 나타났다. 특히 유속이 가장 빠른 실험안 1 및 실험안 18의 경우 유사이탈 현상으로 사석이 모래 하상에 완전히 침하하여 최종적으로 사석 크기 높이만큼 침하가 발생하였다.

가장자리 붕괴는 접근유속이 비교적 크거나 하상토의 입경이 작고 사석의 입경이 클수록 더욱 잘 관측되었다. 하지만 가장자리 붕괴가 사석보호공의 침하에 큰 영향을 주지 않음이 관측되었으며, 연구동향에서도 파악하였듯이 유사이탈 현상이 사석보호공의 침하량을 증가시키는데 더욱 직접적인 영향을 주는 것으로 분석되었다. 포설두께가 큰 조건에서는 높은 사석보호공 층으로 인한 가장자리 붕괴를 제외하고는 유사이탈에 의한 침하량은 비교적 적게 나타났다.

시간에 따른 침하량의 양상을 살펴본 결과, 모든 실험안에서 실험 시작 후 200분 이내에 완전히 최대침하 상태에 도달하는 것을 알 수 있었다. 대부분의 실험에서 특히 접근유속이 비교적 빠른 경우 최대침하에 이르는 시간이 상대적으로 짧게 나타나는 경향을 보였다. 표 1은 각 실험안의 유량,

표 1. 실험 조건 및 최대침하량

실험안	유량, Q [m <sup>3</sup> /s]	접근유속, V [m/s]	수심, h [m]	하상입경, d <sub>50</sub> [mm]	사석 입경, D <sub>50</sub> [mm]	포설두께, T <sub>R</sub> [mm]	최대침하량, S <sub>R</sub> [mm]
1	0.068	0.31	0.28	0.24	40	30	55
2	0.068	0.22	0.39	0.24	40	90	1
3	0.068	0.26	0.33	0.24	40	60	11
4	0.068	0.28	0.30	0.24	40	60	14
5	0.068	0.24	0.35	0.24	40	60	5
6	0.068	0.31	0.28	0.24	60	90	18
7	0.068	0.31	0.28	0.24	40	90	16
8	0.068	0.22	0.39	0.24	60	90	3
9	0.068	0.31	0.28	0.24	60	45	44
10	0.068	0.28	0.30	0.24	60	45	30
11	0.068	0.24	0.35	0.24	40	90	2
12	0.068	0.22	0.39	0.36	40	30	5
13	0.068	0.22	0.39	0.36	40	60	2
14	0.068	0.22	0.39	0.36	40	90	1
15	0.068	0.26	0.33	0.36	40	30	25
16	0.068	0.26	0.33	0.36	40	60	4
17	0.068	0.26	0.33	0.36	40	90	3
18	0.068	0.31	0.28	0.36	40	30	42
19	0.068	0.31	0.28	0.36	40	60	14
20	0.068	0.31	0.28	0.36	40	90	6
21	0.068	0.24	0.35	0.53	40	60	3
22	0.068	0.24	0.35	0.53	40	30	10
23	0.068	0.28	0.30	0.53	40	30	14
24	0.068	0.31	0.28	0.53	60	45	22
25	0.068	0.31	0.28	0.53	40	30	24
26	0.068	0.26	0.33	0.53	60	45	11
27	0.068	0.28	0.30	0.53	60	90	6
28	0.068	0.26	0.33	0.53	60	90	4
29	0.068	0.22	0.39	0.53	60	90	1
30	0.068	0.31	0.28	0.65	40	30	13
31	0.068	0.31	0.28	0.65	40	60	3
32	0.068	0.31	0.28	0.65	40	90	2
33	0.068	0.28	0.30	0.65	40	30	7
34	0.068	0.26	0.33	0.65	40	30	4
35	0.068	0.24	0.35	0.65	60	45	3
36	0.068	0.24	0.35	0.65	60	90	1
37	0.068	0.31	0.28	0.65	60	45	11

접근유속, 수심, 하상입경 및 사석입경, 사석 포설두께 등의 실험조건을 나타낸 것으로 각 실험안 별 최대침하량을 산정하여 함께 나타내었다.

산정식의 도출을 위해 실험에 고려된 변수들을 이용하여 II정리를 통한 무차원화를 선행하였고, 그림 14와 같이 x축의 무차원 상수를  $T_R/(D_{50}F_7^2)$ , y축의 무차원 상수를  $S_R/d_{50}$ 으로 결정하였다. 각각의 축이 로그 눈금 간격으로 나타나 있는 무차원 그래프에 최대침하량을 도시한 결과, 각 하상도 입경별로 그 결과가 뚜렷한 경향을 나타내고 있음을 알 수

있었다. 그림 14에서 실선은 하상도 중앙입경이 0.24 mm인 경우의 추세선을, 굵은 점선은 하상도 중앙입경이 0.36 mm인 경우의 추세선을 나타내고 있으며, 가는 점선은 하상도 중앙입경이 0.53 mm인 경우의 추세선, 혼합형 점선은 하상도 중앙입경이 0.65 mm인 경우의 추세선을 각각 나타낸다. 또한 원모양의 점은 입경 4 cm의 사석을 삼각형 모양의 점은 입경 6 cm의 사석을 활용한 결과임을 각각 나타내고 있다. 최종적으로 실험 결과를 활용한 하상도 입경에 따른 사석보호공의 침하량 산정식을 식 (12)에서 (15)와 같이 도출

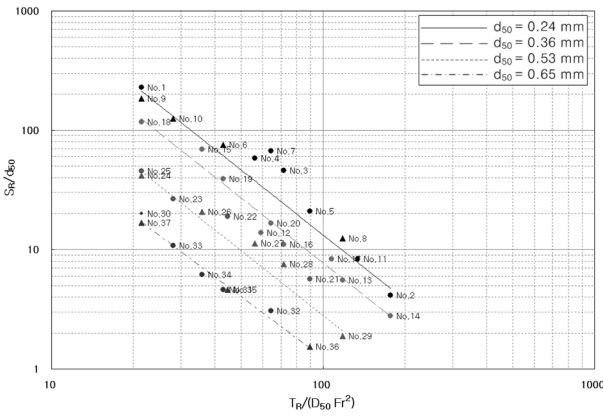


그림 14. 실험결과의 무차원그래프

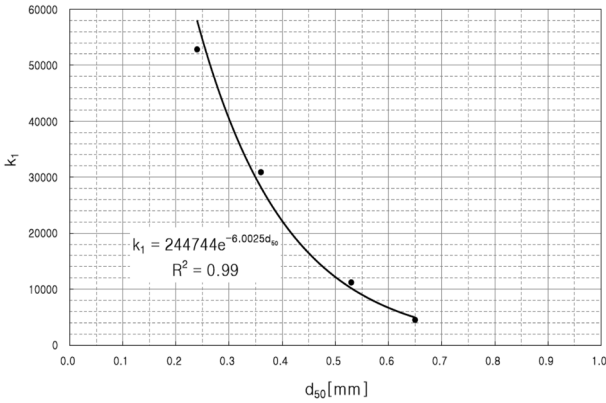


그림 15. 하상토 입경과  $k_1$ 계수의 관계그래프

하였다. 산정식에서 결정계수( $R^2$ ) 값은 모두 0.93 이상으로 실험 결과와 산정식의 높은 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 각각의 산정식은 식 (16)과 같이 일반적인 형태의 산정식으로 나타낼 수 있었다. 식 (16)에서  $k_1$ 은 하상토의 중앙입경을 고려한 계수로 정의할 수 있으며 하상토 입경과  $k_1$  계수와의 관계는 그림 15와 같고 관계함수를 식 (17)과 같이 도출하였다. 이 식의 결정계수 역시 0.99로 상관관계가 매우 높음을 알 수 있다.

하상토 입경( $d_{50}$ )이 0.24 mm인 경우 :

$$\frac{S_R}{d_{50}} = 52821 \left[ \frac{T_R}{D_{50} F_r^2} \right]^{-1.8}, R^2 = 0.93 \quad (12)$$

하상토 입경( $d_{50}$ )이 0.36 mm인 경우 :

$$\frac{S_R}{d_{50}} = 30890 \left[ \frac{T_R}{D_{50} F_r^2} \right]^{-1.8}, R^2 = 0.95 \quad (13)$$

하상토 입경( $d_{50}$ )이 0.53 mm인 경우 :

$$\frac{S_R}{d_{50}} = 11195 \left[ \frac{T_R}{D_{50} F_r^2} \right]^{-1.8}, R^2 = 0.95 \quad (14)$$

하상토 입경( $d_{50}$ )이 0.65 mm인 경우 :

$$\frac{S_R}{d_{50}} = 4498 \left[ \frac{T_R}{D_{50} F_r^2} \right]^{-1.8}, R^2 = 0.98 \quad (15)$$

$$\frac{S_R}{d_{50}} = k_1 \left[ \frac{T_R}{D_{50} F_r^2} \right]^{-1.8} \quad (16)$$

$$k = 244744e^{-6.0025d_{50}}, R^2 = 0.99, d_{50} \text{ 은 mm 단위} \quad (17)$$

## 6. 결 론

본 연구에서는 각기 다른 접근유속, 하상토의 중앙입경, 사석의 중앙입경 및 사석층의 포설두께 조건 하에서 각각의 변수들이 사석보호공의 유사이탈 현상으로 인한 침하에 미치는 영향을 검토하고 그 침하량을 산정하기 위해 37가지의 수리실험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 필터설치 유무에 따른 침하량 비교실험 결과, 필터를 설치한 경우에는 유사이탈로 인한 사석보호공의 침하가 발생하지 않았다. 따라서 필터설치는 사석보호공의 여러 붕괴 양상 가운데 유사이탈 붕괴 방지에 매우 효과적임을 알 수 있었고, 이는 가장자리 붕괴와는 연관성이 없음을 알 수 있었다.
2. 수리실험 결과, 접근유속이 증가할수록, 사석포설두께가 작을수록 그리고 하상토의 입경이 작을수록 침하량이 커짐을 알 수 있었다. 특히 사석이 한 층으로 포설된 경우는 두 층 이상으로 포설된 경우보다 많은 침하가 발생했다.
3. 실험에 고려된 변수들과 침하량을 II정리를 활용한 무차원 그래프에 도시한 결과는 그림 14와 같으며, 높은 결정계수 값을 가지며 하상토의 중앙입경에 따라 변화되는  $k_1$ 을 포함하는 침하량 산정식을 도출하였다.
4. 경미한 유사이탈은 최대침하량에 도달할 때까지 발생하였으나 최대침하량에 도달한 후에는 유사이탈 현상은 더 이상 발생하지 않음을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 개발한 침하량 산정식을 이용하여 최대침하량을 사석보호공의 설계 단계에서부터 미리 예측할 수 있으며 제반 설계 조건을 고려하여 유사이탈에 의한 사석보호공의 붕괴 위험성을 정량적으로 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문에서 제시한 필터없는 사석보호공의 침하량 산정식은 사석보호공의 설계 및 시공에 있어서 필터층이 존재하지 않는 경우, 유사이탈로 인한 침하량을 평가하는데 활용될 수 있으며 향후에 보다 다양한 조건을 가지는 추가적인 실험을 실시함으로써 좀 더 일반화되고 신뢰성 있는 침하량 산정식으로 발전할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 삼성건설JV(2007) 인천대교프로젝트 세굴조사보고서.  
 우효섭(2001) 하천수리학. 청문각.  
 지운, 여운광, 이원민(2008) 필터 없는 사석보호공의 유사이탈로 인한 침하 안정성 평가를 위한 실험 연구. 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제41권, 4호, pp. 445-454.  
 Aberg, B. (1993) Washout of grains from filtered sand and gravel materials. *Journal of Geotechnical Engineering*. ASCE, Vol. 119, No. 1.  
 Chiew, Y.M. (1995) Mechanics of riprap failure at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, Vol. 121, No. 9, pp. 635-643.  
 CIRIA (2002) *Manual on scour at bridges and other hydraulic structures*. Construction Industry Research and Information Association, Westminster, London, U.K.  
 De Abreu-Lima, C. and Morgan, S. (1951) *Protection Earth Dams by riprap of Uniform Size*. Thesis submitted to the State University of Iowa, Des Moines, Iowa.  
 FHWA (1989) *Design of Riprap Revetment*. Hydraulic Engineering Circular No.11, Publication No. FHWA-IP-89-016, Federal



- Highway Administration, U.S.A.
- FHWA (2001) *River Engineering for Highway Encroachments*. Publication No. FHWA NHI01-004, Federal Highway Administration, U.S.A.
- Gregorius, B.H. (1985) *Waterway design procedures-Guidelines*. Civil Division Publication, Ministry of Works and Development, Hamilton, New Zealand.
- Jetter, K. (1951) *Tests on Sand Dikes Protected against Erosion by Overflowing Water*. Thesis submitted to the State University of Iowa, Des Moines, Iowa.
- Karpoff, K.P. (1955) *The Use of Laboratory Tests to Develop Design Criteria for Protective Filters*. Proceedings of the American Society for Testing and Materials, Vol. 55, No. 4.
- Keller, R.J. (2005) *Guidelines for the Design of River Bank Stability and Protection using Riprap*. Catchment Hydrology, Australia.
- Kenney, T.C. and Lau, D. (1985) Internal stability of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, No. 3.
- Kenney, T.C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G.I., Omenge, G.N., and Ume, C.A. (1985) Controlling constriction sizes of granular filters. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, No. 3.
- La Fleur, J., Mlynarek, J., and Rollin, A.L. (1989) Filtration of broadly graded cohesionless soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 115, No. 12.
- Lauchlan, C.S. and Melville, B.W. (2001). Riprap protection at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 127, No. 5, pp. 412-418.
- Lim, F.H. and Chiew, Y.M. (2001) Parametric study of riprap failure around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*. ASCE, Vol. 39, No. 1, pp. 61-72.
- Manamperi, H.D.S. (1952) *Test of Graded Riprap for protection of Erosible Material*. Thesis submitted to the State University of Iowa, Des Moines, Iowa.
- Melville, B.W. and Coleman S.E. (2000) *Bridge Scour*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, U.S.A.
- Sherard, J.L., Dunnigan, L.P., and Talbot, J.R. (1984) Filters for silts and clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 6.
- Sherman, W.C. (1953) *Filter Experiments and Design Criteria*. U.S.Army Waterways Experiment Station. Vicksburg, MS.
- Terzaghi, K. (1949) *Theoretical Soil Mechanics*, Wiley, New York.
- USBR (1987) *Design of Small Dams-Third Edition*. the Bureau of Reclamation, U.S.A.
- Wörman, A. (1989) Riprap protection without filter layers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 12, pp. 1615-1630.
- Yang, C.T. (2003) *Sediment Transport Theory and Practice*.
- Zweck, H. and Davidenkoff, R. (1957) Etude experimentale des filtres de granulometrie uniforme. *Fourth International Conference on Soil Mechanics & Foundation Engineering*, American Society of Civil Engineers, New York, N.Y.

(접수일: 2008.9.29/심사일: 2008.11.3/심사완료일: 2008.12.18)