

# 한강 하구 신곡수중보 하류에서 하상변동 - 2009년부터 2010년까지

황승용\* · 이삼희\*\*

Hwang, Seung-Yong\*, Lee, Samhee\*\*

## Bed Changes downstream the Singok Submerged Weir in the Han River Estuary - from 2009 to 2010

### ABSTRACT

The bed change survey was carried out and its tendency was analyzed at the downstream of the Singok Submerged Weir in the Han River Estuary (HRE). In order to focus on the bed change in the low flow channel, we calculated the mean bed elevation based on the bankfull discharge. Thanks to the amount of bed changes calculated by using the 'averaged bed', we could compare the riverbeds of various periods with consistent criteria. In the HRE, revealed was the bed change cycle between degradation by flood and aggradation by tide at the non-flood season.

**Key words** : Han River Estuary, Bed change, Mean bed elevation, Averaged bed, River survey

### 초 록

한강 하구 신곡수중보 하류에서 하상변동 조사를 실시하고 평균 하상고와 하상변동량을 계산하여 하상변동 경향에 대해 검토하였다. 저수로 하상변화에 초점을 맞추기 위해 부등류 계산을 통한 시행착오법으로 '저수로 만재 유량'을 설정하여 평균 하상고를 산정하였다. '평균 하상'을 기준으로 계산된 하상변동량 덕분에 여러 시기 하상을 일관된 기준으로 비교할 수 있었다. 한강 하구에서 하상변동 경향은 홍수에 따른 저하와 비홍수기 조석에 따른 상승의 순환으로 드러났다.

**검색어** : 한강 하구, 하상변동, 평균 하상고, 평균 하상, 하천측량

## 1. 서론

강원도 태백시에서 발원하여 황해로 빠져나가는 한강은 유로연장이 약 494 km이며, 유역면적은 약 35,770 km<sup>2</sup>로서 한반도 전체 면적의 15 %가 넘는 대하천이다(MOLIT, 2014). 평시 유출량도 커서 한강대교 관측소에서 평수량이 약 162 m<sup>3</sup>/s이고 갈수량은 약 54 m<sup>3</sup>/s이다(MOLIT, 2016). 조석 운동이 활발한 황해와 만나는 하구들은 평시에 수위 변동이 크고 밀물의 유속이 매우 강한 편이다. 특히, 한강은 황해로 흘러나가는 우리나라 하천 중에서 규모가 가장 크고 하굿둑이 없어 그 특징이 더욱 두드러진다.

한강의 하천 구조물 중에서 하굿둑처럼 물이나 유사의 이동을 제한하기 위한 횡단 구조물로서 가장 하류에 설치된 것이 신곡수중보(1988년 6월 준공)이다. 그 위치는 공릉천 합류점(하천 측량 기점, 단면 No. 0)으로부터 상류로 약 22 km, 하구로부터는 대략 38 km 정도이다(Fig. 1 참조). 이로부터 약 7 km 하류에는 일산대교(2007년 12월 준공)가 가설되어 있으며, 신곡 수중보만큼은 덜 하겠으나, 횡단 구조물로서

\* 종신회원 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 수석연구원

(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · syhwang@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 국토보전연구본부 선임연구위원

(Corresponding Author · Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology · samhee.lee@kict.re.kr)

Received October 29, 2018/ revised November 11, 2018/ accepted November 15, 2018



Fig. 1. Site Map of the Han River Estuary

한강 하구 흐름과 하상변동에 끼치는 영향에 대해서는 의문의 여지가 없을 것이다(Fig. 1 참조).

KICT(2002)는 한강 하구에서 이루어진 과거 조사 자료를 검토하고 한강 하천정비 기본계획(MOCT, 2002)의 일환으로 2000년 홍수기 전에 실시된 하천 측량 자료와 함께 비교하였다(Kim and Yoon, 2003). 또한, 갑조 구간에 대한 체계적인 하천관리를 위해 정기적인 하상변동 조사도 제안하였다. 이에 따라 2004년부터 2010년까지 기간 동안 한강 신곡수중보 하류에 대해 비교적 정기적인 하천 현장조사와 하상변동 경향에 대한 분석 및 검토가 이루어졌다(MOCT, 2005; MLTM, 2008, 2009, and 2010).

2000년 이후 한강에서 가장 큰 홍수는 2006년 7월 16일에 발생했으며, 한강대교 관측소에서 일유량이 약 22,900 m<sup>3</sup>/s로 보고 되었다(MOCT, 2007). 이날 20시 30분에 기록된 한강홍수통제소 실시간 수문자료에 따르면 수위가 해발 10.22 m이고, 이때 순간 홍수량이 약 31,400 m<sup>3</sup>/s로 추정되었다(HRFCO, 2018). 이에 따른 하상변동 또한 상당했을 것이다. 홍수기 직후인 2006년 9월 하상을 직전 해인 2005년 5월의 그것과 비교했을 때, 신곡수중보(단면 No. 51)로부터 하류의 어로한계선 인근 단면 No. 5까지 누적 하상변동은 약 26 Mm<sup>3</sup>(=10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>)의 세굴이었다(MOCT, 2005).

한강 하구에서는 홍수 뿐 만 아니라 황해의 조석운동으로 수위 변동이 심하고 밀물 때 강한 유속으로 인한 역류가 나타난다. 이것은 약 3시간 밀물과 약 9시간 썰물이 교대하는 한강 하구 조석 특성 때문이다(Oh et al., 2003). 2004년 12월의 관측 결과에 따르면, 전류 관측소 인근에서 밀물 유속이 약 2.3 m/s이다(MOCT, 2005). 짧은 밀물 때 강한 유속으로 야기된 세굴로 하상재료는 상류로

거슬러 올라갈 수 있으며, 긴 썰물 때 느려진 유속으로 하구를 완전히 빠져나가지 못할 수 있다. 그러므로 한강 하구에서는 평소 조석 때문에 퇴적이 일어날 여지가 크다. 큰 홍수가 없었던 2004년 8월부터 2005년 5월까지 신곡수중보로부터 하류 단면 No. 5까지 누적 하상변동량은 약 33 Mm<sup>3</sup>의 퇴적이었다(MOCT, 2005).

한강 하구 하상변동에는 홍수와 조석의 영향이 상보적으로 나타난다고 볼 수 있다. 즉, '유의할 만한' 홍수에 따라 하상이 쓸려 나가고 홍수가 없는 기간 동안 조석으로 말미암아 도로 매워질 수 있다(MOCT, 2005). 과거 자료에 2006년의 관측 자료를 추가하여 분석한 결과로부터 Hwang et al.(2007)은 신곡수중보 하류에서 누적 하상변동 경향은 '홍수기 하상 저하(2000년~2004년) → 비홍수기 하상 상승(2004년~2005년) → 홍수기 하상 저하(2005년~2006년)'로 진동한다고 주장하였다.

Hwang et al.(2007)의 보고 이후 한강 하구에서 하상변동 조사는 2008년, 2009년, 2010년에 수행되었으며, 이후 조사에 대해서는 보고된 바가 없다. 이 연구에서는 2009년과 2010년에 한강 하구에서 이루어진 하상변동 조사 성과(MLTM, 2009 and 2010) 중에서 하천 측량, 해발 하상고 변화, 하상변동량 계산을 통하여 한강 하구 신곡수중보 하류에서 하상변동을 분석하고 그 경향에 대해 검토한다. 2009년에는 하상변동에 대한 단일 홍수의 영향을 살펴보기 위해 홍수기 전에 하천 측량을 실시하고 홍수의 발생 직후에 다시 측정하였다. 또한, 비홍수기 퇴적 경향 파악을 위해 2010년 홍수기 전에도 조사가 이루어졌다. 더불어, 분석 기간에 해당하는 수문자료로서 팔당댐, 한강대교, 행주대교, 전류 관측소 등의 해발 수위와 유량 자료를 검토하였다. 이 중에서 한강대교 관측소의 유량자료를 주로 참조하였다.

## 2. 하상고 변화

### 2.1 하상변동조사 측량과 최신 하상고

과거 하상고와 현재 하상고를 비교하기 위해 대상 구간에서 하천 측량을 실시하였다. 이 측량은 하상변동조사 측량에 해당되며, 지형현황 측량과 종단 및 횡단 측량으로 구성된다(KWRA, 2009). 지형현황 측량에 대해, 2002년에 수립된 한강 하천정비기본계획(MOCT, 2002)에 보고된 평면도와 측점을 활용하였다. 과거 500 m 간격의 단면을 정규 단면으로 두고 수심측량을 실시하였다. 측량 시기는 홍수기 전(2009년 6월), 홍수 후(같은 해 8월), 그 다음해 홍수기 전(2010년 6월)이다. 민간인 통제선 내 현장조사 여건의 변화로 한강 측량 기점은 2000년 측량 조사의 기점(공룡천 합류점) 보다 상류인 단면 No. 15로 후퇴하였다.

종횡단 측점의 표고를 측정하기 위해 국립지리원에서 매설한

기본 수준점에서 대상 구간까지 수준 측량을 실시하여 현지에 매설된, 하천정비기본계획에 의한 수준점(표석)을 확인하고 연결하여 폐합하였다. 왕복측정 값의 교차를 3급 수준측량의 허용 범위 내에 들도록 유지하였다. 수면에서 실시한 수심 측량에서 수심 측정에는 음향측심기(AquaRuler 200, ㈜소나테크)를, 위치 결정에는 DGPS (G12/BR2, Magellan Co.)를 이용하였다.

Fig. 2는 2009년 홍수기 전(그림에서 'Jun '09'), 홍수 후(그림에서 'Aug '09'), 2010년 홍수기 전(그림에서 'Jun '10') 세 차례에 걸친 측량 성과로부터 단면 별 최심 하상고(아래 부분)와 그 변화(위 부분)를 보인 것이다. 또한, 그림의 위 끝에는 대상 구간 내 주요 지점으로 공릉천 합류점(단면 No. 0), 전류 관측소(단면 No. 17), 일산대교(단면 No. 31+200), 신곡수중보(단면 No. 51) 등의 위치(그림에서 ⊕)를 표시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 일산대교를 기준으로 그 상류보다는 그 하류에서 최심 하상고 변화가 더 활발하다. 특히, 일산대교 하류 일부와 전류 관측소 직상류 단면들에서 그 변화가 매우 크다. 2009년 7월 15일에 일유량 규모로 약 13,000 m<sup>3</sup>/s가 넘는 홍수가 발생하였는데, 최심하상 변화에 큰 영향을 끼쳤다.

2009년 홍수기 전과 홍수 후 최심 하상고 비교에서 상승과

저하의 최댓값이 각각 약 1.48 m(단면 No. 50)와 약 9.88 m(단면 No. 51)이다(Fig. 2의 위 부분 참조). 또한, '평균 상승고'(대상 구간 내 상승고의 평균값)와 '평균 저하고'(대상 구간 내 저하고의 평균값)는 각각 약 0.78 m와 약 3.39 m로 나타났다. 따라서 '평균 변동고'(평균 상승고와 평균 저하고의 차이)는 약 2.61 m의 저하로서 2009년 이후 기록된 평균 변동고 중에서 가장 크다(MOCT, 2005; MLTM, 2008). 일유량 규모로 2009년 이후 세 번째로 큰 홍수 타도 있었으나, 2009년 홍수 후 조사가 단일 홍수에 비롯된 영향을 살펴볼 목적으로 세굴된 하상이 채 회복하기 전에 이루어진 것도 한 원인일 수 있다.

2009년 홍수 후와 2010년 홍수기 전 하상을 비교해 볼 때, 상승과 저하의 최댓값이 각각 약 9.72 m(단면 No. 28)와 약 3.25 m(단면 No. 45)이다(Fig. 2 위 부분 참조). 또한, 유일한 저하를 보인 단면 No. 45를 제외하면, 2009년 홍수 후 2010년 홍수기 전까지 비홍수기 하상은 전반적으로 상승되었음을 알 수 있다. 평균 상승고와 저하고를 따져보면, 각각 약 2.71 m와 약 1.25 m로서 변화 폭이 비교적 크다. 그러나 평균 변동고는 약 1.46 m의 상승에 그쳐 오히려 2009년 홍수기 전과 홍수 후를 비교한 경우에 비해 작게 나타난다.

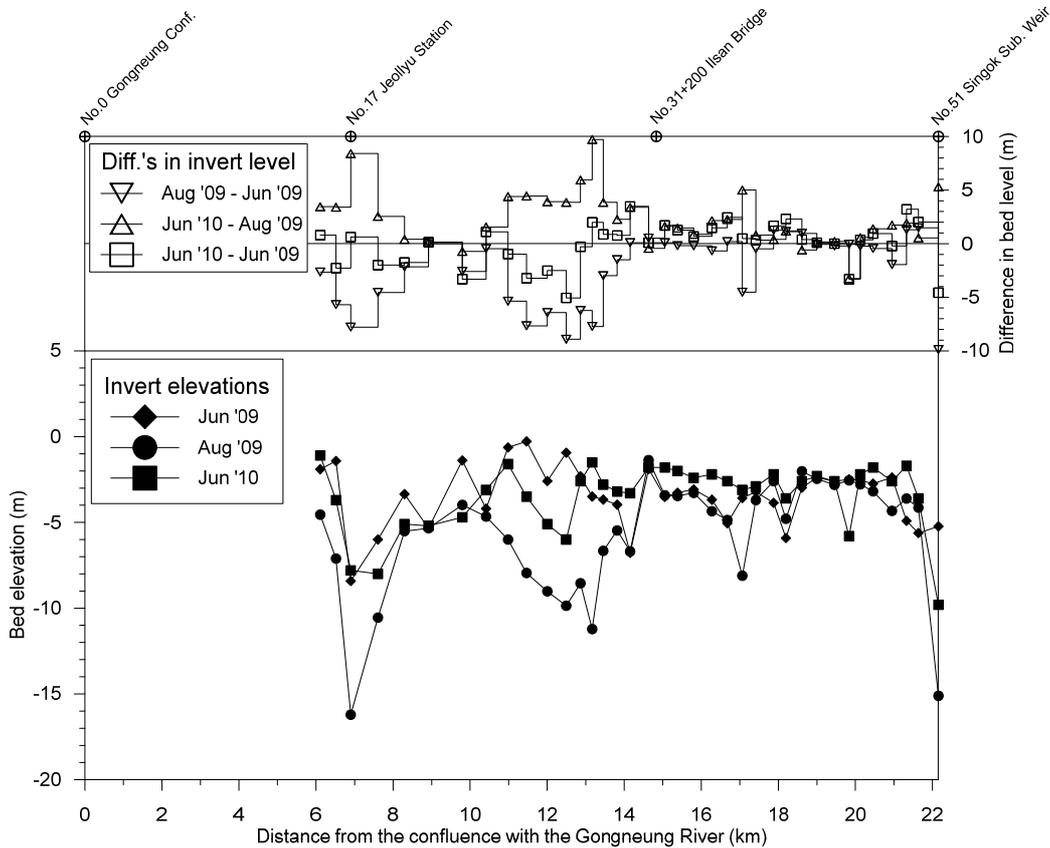


Fig. 2. Invert Elevations Downstream the Singok Sub. Weir

참고로 2009년 홍수기 전과 2010년 홍수기 전 자료에서 최심 하상고 변화를 살펴보면, 평균 상승고는 약 1.22 m인 반면 평균 저하고가 약 2.46 m이다(Fig. 2의 위 부분 참조). 따라서 2010년 홍수기 전 하상이 2009년 홍수기 전에 비해 전반적으로 약간 더 낮은 것으로 평가할 수 있다.

### 2.2 평균 하상고 변화

최심 하상고를 이용한 분석은 하상의 물리적인 변화를 직접 평가할 수 있는 장점이 있으나, 하상고의 시간 또는 공간(중단) 변화 경향을 파악하고자 하는 경우에는 오히려 불리할 수 있다. 이를 극복하기 위해 단면의 대표 하상고로서 평균 하상고를 이용하여 분석할 수 있다.

어떤 단면에서 평균 하상고는 ‘미리 정해진’ 수위로부터 이에 따른 흐름 단면적을 수면폭으로 나누어 구한 수리 평균 수심 (hydraulic mean depth)을 뺀 값이다. 따라서 단면 별 평균 하상고를 비교하여 하상고의 중단 변화를 분석하려면, 각 단면에 부여할 수위를 하천 구간에 일관되게 설정할 필요가 있다. 이때, 하천 구간에 설정된 설계 홍수량으로부터 부등류 계산으로 각 단면에 결정된 설계 홍수위가 손쉬운 선택이 될 것이다(KWRA, 2009).

Fig. 3은 한강 하류의 설계 홍수량(37,000 m<sup>3</sup>/s)에 기반한 평균 하상고(아래 부분)와 그 변화량(위 부분)을 보인 것이다. 다소 어수선했던 최심 하상고의 중단 변화(Fig. 2 참조)에 비해 하상고의 중단 변화와 시기 별 상승과 저하 경향이 보다 분명하게 드러남을 알 수 있다(Fig. 3 참조). 즉, 일산대교를 기준으로 그 상류와 하류에서 하상고 변화 경향이 보다 명확하게 대조된다.

그런데 고수부지가 잘 발달된 복단면일 때, 설계 홍수량에 기반한 평균 하상고는 저수로 하상 변화에 둔감할 수 있다. 또한, 고수부지 침수 여부에 따라 흐름 단면적과 수면폭 변화가 크므로 평균 하상고 계산이 크게 달라질 수 있다. 한강 신곡수중보 하류에서는 ‘산남습지’로 불리는 구간(단면 No. 15~No. 20 우안)이 그러한 사례에 해당될 것이다(Fig. 4 참조). Fig. 3의 아래 부분에서 점선에 빈 동그라미로 나타낸 하상고(그림에서 ‘Avg. Aug '09’)는 2009년 홍수 후 해당 구간에서 단면 내 저수로 하상고의 평균값을 표시한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 설계 홍수위로부터 구한 평균 하상고와 차이가 크다.

Fig. 4는 전류 관측소 직상류 우안에 있는 산남습지를 가로지르는 단면 No. 16의 횡단면도이며, 설계 홍수위(그림에서 ‘design’)를 점선으로 표시하였다. 산남습지 내 표고의 급격한 용기는 예전에

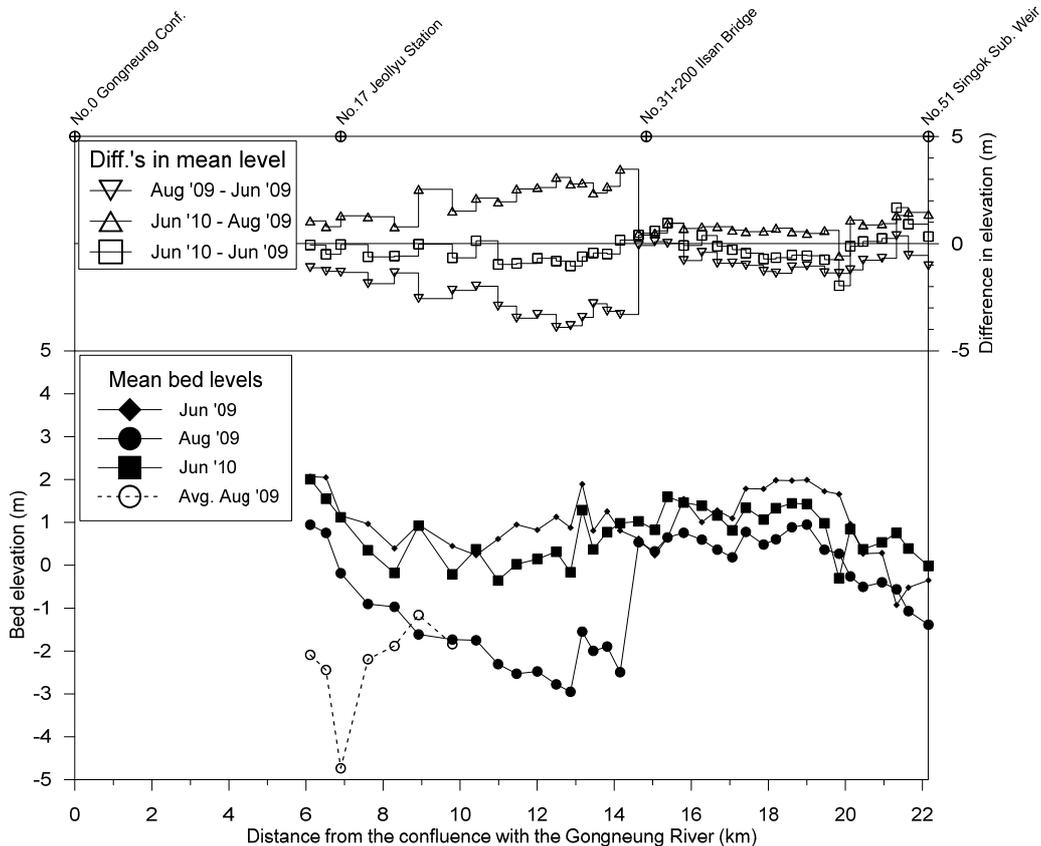


Fig. 3. Mean Bed Elevations Based on Design Flood

경작에 따른 독과 제방이다. 그림에서 알 수 있듯이, 평균 하상고 계산에 고수부지(여기에서는 습지)에서 수면폭과 흐름 단면적의 영향이 클 수 있다. 고수부지보다는 저수로 하상 변화에 주안점을 두기 위해 설계 홍수량 대신 저수로를 가득 채워 흐르는 유량(이후,

‘저수로 만제 유량’; 그림에서 ‘bankfull’)에 기반한 평균 하상고를 분석하였다. 이때, ‘저수로 만제 유량’을 산남습지 구간(단면 No. 15~No. 20)을 기준으로 부등류 계산에 따라 수위가 고수부지를 넘지 않도록 시행착오법으로 결정하였다. 그 결과로서 6,600 m<sup>3</sup>/s

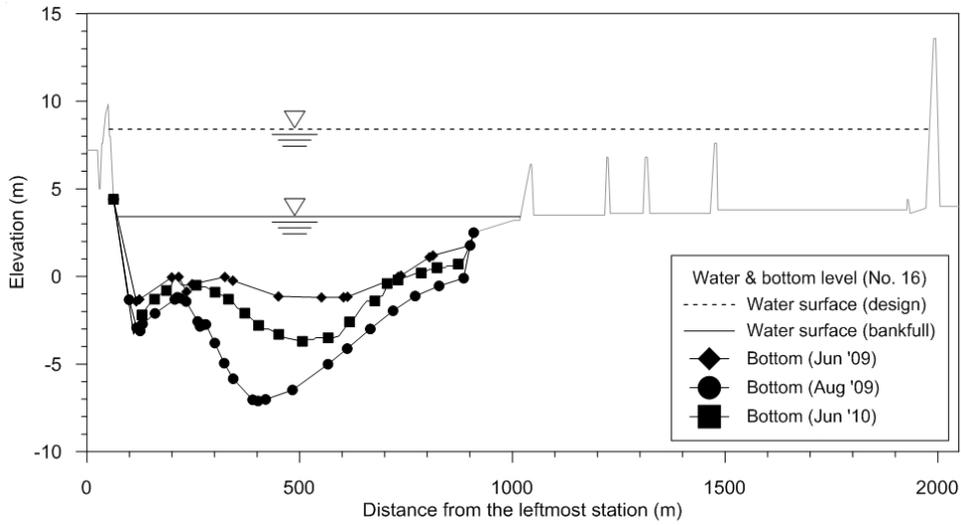


Fig. 4. Design and Bankfull Stages (Section No. 16)

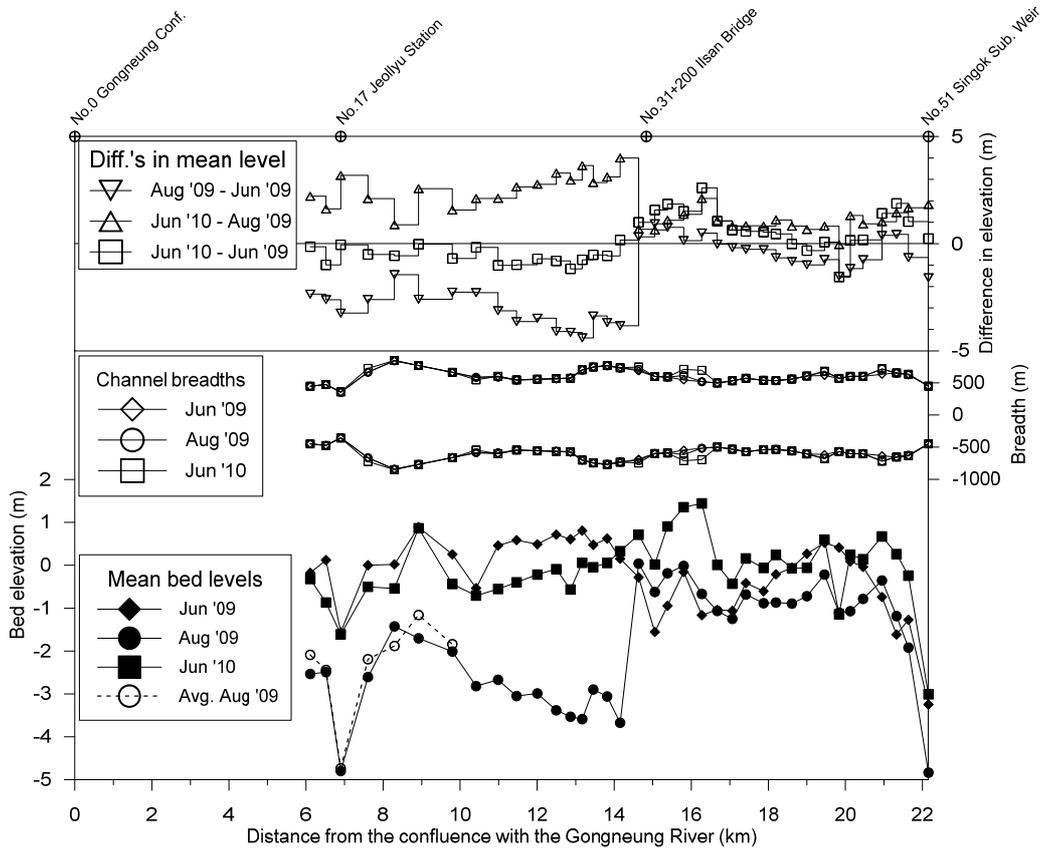


Fig. 5. Mean Bed Elevation Based on Bankfull Discharge

정도가 적당하였으며, 계산된 수위가 고수부지 표고 높이보다 높을 때에는 고수부지를 차단하여 흐름이 저수로에 국한되도록 인위적으로 조정하였다.

‘저수로 만제 유량’(6,600 m<sup>3</sup>/s)으로 설정했을 때 한강 하류 평균 하상고와 그 변화를 Fig. 5에 보였다. 설계 홍수량에 기반한 평균 하상고(Fig. 3의 아래 부분 참조)와 비교해 보면, 신곡수중보와 전류 관측소 인근에서 중단변화 경향의 차이가 나타난다. 설계 홍수량에 견주어 ‘저수로 만제 유량’에 기반한 평균 하상고의 변화 경향이 신곡수중보와 전류 관측소 인근에서 최심 하상고의 그것과 잘 부합한다(Figs. 2 and 5 아래 부분 참조). 특히, 산남습지 구간에서 그 차이가 두드러져서 ‘저수로 만제 유량’에 기반한 평균 하상고는 저수로 하상고의 평균과 잘 일치하며, 전류 관측소 상류와 하류에 걸쳐 하류로 하상경사가 역전되던 현상도 해소된다(Fig. 5의 아래 부분의 아래 참조). 한편, 2010년 홍수기 전 평균 하상고를 살펴보면, 일산대교 직상류 구간에서 예년에 견주어 다소 큰 폭의 상승이 눈에 띈다. 그 이유는 해당 구간에서 저수로 폭이 예년에 비해 넓어졌기 때문이며, 아래 그림의 위에 저수로 폭의 중단 변화를 표시하였다.

2009년 홍수기 전과 홍수 후 평균 하상고 변화에서 일산대교를 기준으로 상류보다는 하류에서 하상고 변화가 매우 활발한 점은 최심 하상고 변화에서 확인한 바와 같다. 그러나 2009년 홍수 후 일산대교 직하류에서 나타나는 평균 하상고의 큰 저하는 최심 하상고 변화에서 포착되지 않는 현상이다(Fig. 2 참조). 평균 하상고에서 보이는 이러한 변화는 3장에서 다룰 하상변동량 변화 경향과 잘 일치한다. 또한, 일산대교 직상류에서는 홍수 후에도 하상이 오히려 상승하는 것으로 나타났는데, 이는 설계 홍수량에 기반한 평균 하상고 변화에서는 잘 드러나지 않는다. 이러한 현상 역시 3장에서 다룰 하상변동량 변화 경향과 잘 부합한다.

2009년 홍수기 전과 2010년 홍수기 전 평균 하상고에서 변화가 크지 않다는 것은 2009년 홍수 후 하상이 이전 상태로 거의 회복되었음을 의미한다. 2010년 홍수기 전 평균 하상고는 일산대교를 기준으로 하류에서는 약간 덜 회복되고 상류에서는 오히려 약간 더 상승된 것으로 나타났다(Fig. 5의 위 부분 참조).

### 3. 하상변동량 계산

#### 3.1 계산 방법과 그 절차

하상변동량은 기준이 되는 어떤 하상(‘기준 하상’)과 살펴보고자 하는 특정 시점 하상 사이의 변화량이며, 그 경향은 세굴 또는 퇴적으로 드러난다. 예를 들어 홍수 전후 하상변동량을 구하려면, ‘기준 하상’을 홍수 전 하상으로 두고 각 단면의 횡단면에서 ‘기준 단면’과 홍수 후 단면이 이루는 하천 내 퇴적면적과 세굴면적을

먼저 구한다. 이 값을 각 단면의 대푯값으로 간주하여 직전 단면으로부터 거리의 반과 직후 단면까지 거리의 반을 더한 값과 곱하여 얻은 퇴적량과 세굴량의 차를 각 단면의 홍수 전후 하상변동량으로 두게 된다(MOCT, 2005; Hwang et al., 2007). 이것은 KWRA (2009)에서 소개된 하상변동량 계산 방법과 차이가 있는데, 그 방법에 따르면 각 단면에서 실제 하상고가 아닌 평균 하상고를 이용한다. 또한, 세굴량과 퇴적량이 별도로 산정되지 않아 한 단면에서 두 양이 맞먹게 되면 하상변동의 활발함을 판단하기 어려울 수 있다(MOCT, 2005; Hwang et al., 2007). 따라서 이 연구에서는 Hwang et al.(2007)에 따라 하상변동량을 산정한다.

실제 하상변동량을 계산할 때, 한 단면 내에서 흐름으로 말미암아 실질적으로 변동되는 하상(저수로와 고수부지 포함)을 대상으로 하였으며, 호안, 제방 등 인위적인 구조물은 확인되는 대로 배제하였다. 하상변동량 계산에 포함되는 횡단 범위(계산폭)가 각 단면마다 다를 수 있으므로 계산하려는 단면의 앞과 뒤 단면에서 계산 폭의 변화를 가중치로 고려하여 산정하였다. 예를 들어, 계산하려는 어느 단면에서 측정된 세굴 또는 퇴적 면적과 계산 폭이 각각  $A$ 와  $B$ , 앞과 뒤의 단면으로부터 거리가 각각  $L_f$ 과  $L_r$ , 앞과 뒤의 단면에서 계산 폭이 각각  $B_f$ 과  $B_r$ 라면 해당 단면에서 세굴량 또는 퇴적량,  $V$ 는 다음과 같다(MLTM, 2008).

$$V = \frac{A}{2B} (L_f B_f + L_r B_r) \quad (1)$$

MLTM(2008)에 따라 한 단면에서 세굴 또는 퇴적이 두드러진 위치를 결정하기 위해 먼저 해당 단면에서 총 세굴량 또는 총 퇴적량이 그 단면의 총 변동량(단면 내 퇴적량과 세굴량의 합, 하상변동량은 그 차)의 25 %를 초과하는지 검사하여 세굴이나 퇴적이 활발한지 판정하였다. 만약 단면의 총 세굴량 또는 총 퇴적량이 그 이하라면 판정을 유보하였다. 그렇지 않고 단면에서 연속하여 발생하는 세굴량이나 퇴적량의 최댓값이 총 세굴량 또는 퇴적량의 25 %를 초과하면 그 위치를 주 세굴 또는 퇴적 위치로 결정하였다. 다만, 그 이하인 경우에 대해서는 판정을 유보하였다. 여기에서 이용된 두 기준(25 %)은 분석 과정에서 판별의 편의를 위해 임의로 설정한 것이며, 각 단면에서 주요 발생위치를 재검토하여 무리한 위치 결정으로 판단되면 바로잡았다(MLTM, 2008).

#### 3.2 한강 신곡수중보 하류 구간에서 하상변동량 (2009~2010)

Eq. (1)을 이용하여 ‘기준 하상’을 2009년 홍수기 전의 하상으로 두고 홍수 후의 단면 별 세굴량, 퇴적량, 주요 발생위치, 하상변동량 등을 계산하였다. 대상 구간 내 최대 세굴량과 퇴적량은 각각 3.01

Mm<sup>3</sup>(단면 No. 20)와 0.60 Mm<sup>3</sup>(단면 No. 34)이다. 최대 하상변동은 세굴량이 가장 큰 단면 No. 20에서 발생했으며, 2.97 Mm<sup>3</sup>의 세굴이었다. 평균 세굴량(대상 구간 내 세굴량의 평균값)과 평균 퇴적량(대상 구간 내 퇴적량의 평균값)은 각각 1.04 Mm<sup>3</sup>와 0.11 Mm<sup>3</sup>이다. ‘평균 하상변동량’을 평균 퇴적량과 평균 세굴량의 차이로 정의하여 계산했을 때, 그 값은 0.93 Mm<sup>3</sup>로서 세굴이다. 이것은 2000년 이후 기록된 평균 하상변동량 중에서 가장 큰 값이다(MOCT, 2005; MLTM, 2008). 그 원인은, 최심 하상고 변화에서 살펴본 바와 같이 홍수로 세굴된 하상이 채 회복되지 않았기 때문인 것으로 보인다.

2009년 홍수 후를 기준으로 2010년 홍수기 전 하상변동량을 계산해보면, 최대 세굴량과 퇴적량은 각각 0.27 Mm<sup>3</sup>(단면 No. 19)와 3.10 Mm<sup>3</sup>(단면 No. 20)이다. 평균 세굴량과 평균 퇴적량은 각각 0.05 Mm<sup>3</sup>와 0.96 Mm<sup>3</sup>이다. 따라서 하상변동 경향은 퇴적이고 평균 하상변동량은 0.91 Mm<sup>3</sup>으로서 2009년 홍수기 전 대비 홍수 후 세굴 경향 평균 변동량과 맞먹는 양이다.

Fig. 6에 단면 별 하상변동량(실선)을 나타냈으며, 이것을 신곡 수중보로부터 하류로 누적하여 점선으로 표시하였다. 비교를 위해 2008년 홍수기 후 대비 2009년 홍수기 전과 2009년 홍수기 전 대비 2010년 홍수기 전 하상변동량도 함께 보였다. 앞서 하상고 변화에서 살펴본 바와 같이, 일산대교 상류와 하류에서 하상변동량 규모가 서로 다르다. 일산대교 상류에서 하상변동량은 그 하류에 견주어 규모가 작고 홍수 후에도 퇴적이 발생하는 등 하류에서 하상변동 경향과 차이가 있다. 이러한 양상은 ‘저수로 만제 유량’

에 기반한 평균 하상고 변화에서 이미 확인된 바 있다. 또한, 일산대교 하류에서 세굴 또는 퇴적 경향 역시, 평균 하상고 분석에서 보인 바와 같이, 명백하게 드러난다. 다만, 변동량 크기 분포가 평균 하상고 변화와 서로 다른 이유는 평균 하상고 계산과 달리 하상변동량 계산에는 계산 폭과 단면 사이 거리가 반영되기 때문이다.

누적 하상변동량 변화를 살펴보면(Fig. 6 참조), 2009년 홍수기 전 대비 홍수 후와 2009년 홍수 후 대비 2010년 홍수기 전 누적 하상변동량은 퇴적과 세굴의 경향만 다르고 그 총량은 동일하다. 따라서 2009년 홍수기 전 대비 2010년 홍수기 전 하상변동량을 하류로 누적해보면 영이 된다. 한편, 2008년 홍수기 후 대비 2009년 홍수기 전 하상변동 경향은 일산대교 하류에서는 퇴적이 두드러지나, 그 상류에서는 일부 구간에서 보이는 미미한 퇴적을 제외하면 대부분 세굴로 나타난다. 2008년 홍수 규모가 크지 않고 하천측량 시기 또한 다소 늦기는 하였으나, 상당한 구간에서 비홍수 기간 동안 세굴 경향이 지배적인 것은 이례적이다.

#### 4. 하상변동 분석

##### 4.1 평균 하상의 설정

하상변동량은 대체로 홍수(기)를 기준으로 과거 하상 대비 현재의 하상을 평가하는 상대적인 값으로 표현되므로 ‘기준 하상’이 바뀌면 같은 시기임에도 하상변동량이 완전히 달라진다(Fig. 6에서 ‘Jun '10 - Aug '09’와 ‘Jun '10 - Jun '09’ 참조). 따라서 여러

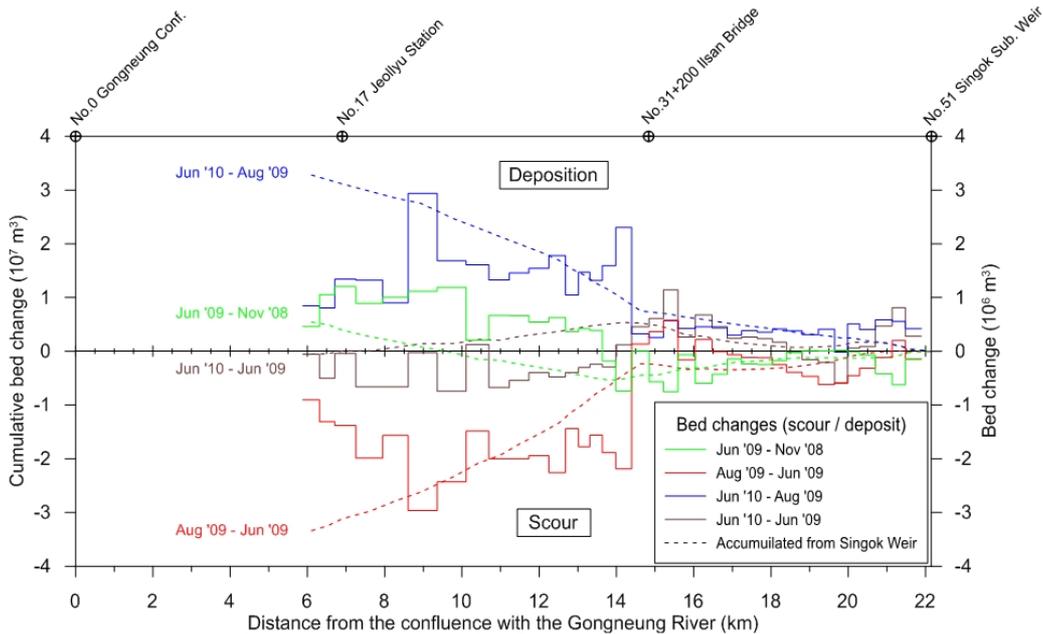


Fig. 6. Bed Changes downstream the Singok Sub. Weir ('08 ~ '10)

시기 하상을 동일한 잣대로 비교하기 위해서는 기존에 이용되던 과거 하상과 달리 어느 정도 일정한 기준 하상이 필요하다. 살펴보려는 목적에 따라, 여러 시기에 걸친 ‘평균 하상’, 장기간 모의를 통한 ‘안정 하상’, 하도 설계에 따른 ‘계획 하상’ 등을 기준 하상으로 둘 수도 있을 것이다.

한강 하류 하상이 홍수와 조석 등으로 말미암아 자주 바뀌기는 하나, 그간 축적된 자료로부터 ‘평균 하상’을 상정할 수 있을 것이다. 이것을 기준 하상으로 두고 하상변동량을 따져보는 것도 여러 시기 하상을 일관된 기준으로 비교할 수 있는 한 방법일 것이다.

또한, 통계적인 의미가 있을 정도로 자료가 축적되면, 초과 확률 계산을 통한 재현기간 설정 등에서 확률과 통계를 통한 분석도 가능할 것이다.

획득 가능한 하천측량 자료 중에서 조사의 동질성이 비교적 유지되는 것으로 판단되는 성과는 2004년부터 2010년까지 총 9회의 자료들이다(MOCT, 2005; MLTM, 2008, 2009, and 2010). 하천조사의 어려움을 감안하면, 짧은 기간 동안 적지 않은 양이다. Fig. 7에 보인 바와 같이, 각 단면에서 2004년 이후 측정된 각 측정점의 위치에서 그 외 하상고를 보간하고 그 위치에서 하상고

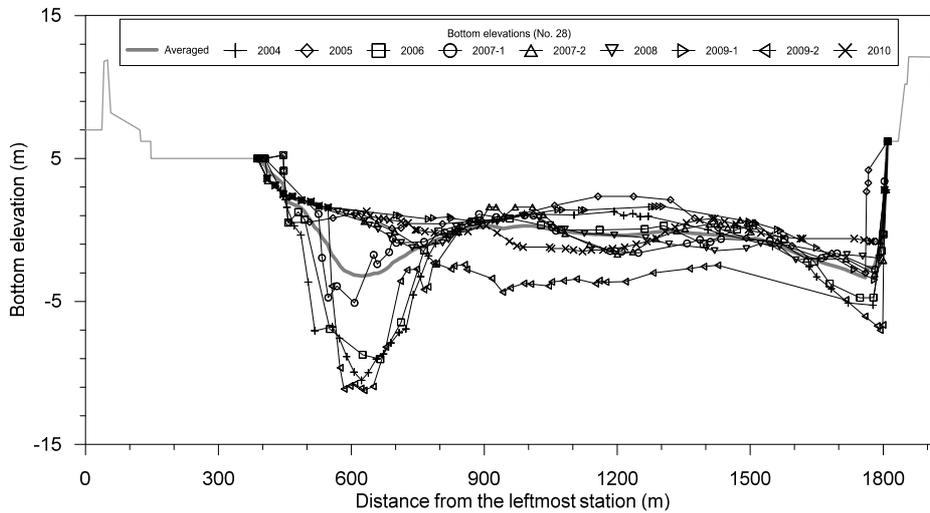


Fig. 7. Determination of 'Averaged Bed' (Sec. No. 28)

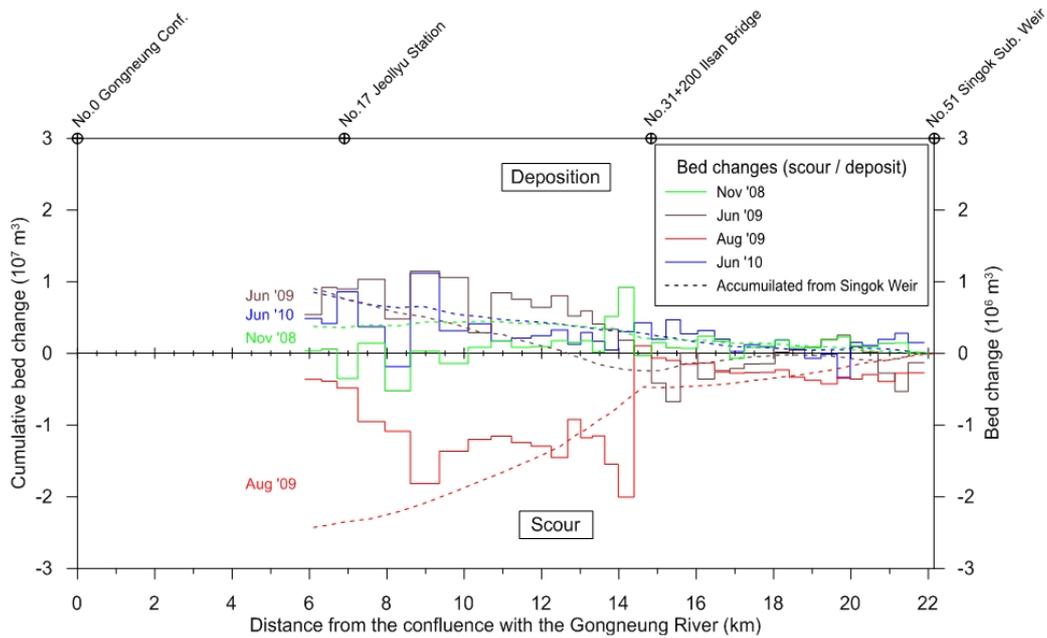


Fig. 8. Bed Changes to 'Averaged Bed' ('09 ~ '10)

값들을 산술 평균하여 그 횡단면의 ‘평균 하상’을 결정하였다. 비록 통계적 의미를 부여하기에는 자료가 부족함이 있으나, 하상변동의 시간적 변화 경향을 판단할 때 유용한 기준이 될 것이다.

#### 4.2 평균 하상 기준 신곡수중보 하류의 하상변동

Fig. 8은 ‘평균 하상’을 기준으로 계산된 2009년 홍수기 전(그림에서 ‘Jun '09’), 2009년 홍수 후(그림에서 ‘Aug '09’), 2010년 홍수기 전(그림에서 ‘Jun '10’) 하상변동량을 함께 나타낸 것이다. 그 정의에 따라 Fig. 8에서 두 곡선 사이의 차는 Fig. 6의 곡선과 일치한다. 예를 들어, Fig. 8에서 ‘Aug '09’와 ‘Jun '09’의 차이는 Fig. 6에서 곡선, ‘Aug '09 - Jun '09’과 동일하다. ‘평균 하상’을 기준으로 둔 변동 규모가 직전 하상 대비 하상변동량의 그것보다 대체로 작다. 그 이유는 ‘평균 하상’이 대체로 양쪽 극단에 해당하는 홍수(기) 전과 후 하상 사이에 있으므로 그 둘의 차이보다 ‘평균 하상’ 대비 각각의 하상변동량이 더 작을 수밖에 없기 때문이다.

‘평균 하상’을 이용한 하상변동량을 직전 하상 대비 하상변동량(Fig. 6 참조)과 대조해 보면, 관측 시기 별 하상변동 비교가 보다 직관적이고 그 규모가 실제로 더 가까움을 알 수 있다. 즉, ‘평균 하상’을 이용한 하상변동량 덕분에 2009년 홍수 후 하상 세굴이 다른 시기 하상변동에 비해 어느 정도로 큰 규모인지 한눈에 알 수 있다. 또한, 2009년 홍수기 전과 2010년 홍수기 전 하상변동이 총 누적량으로는 비슷하나 일산대교를 기준으로 세굴과 퇴적 경향이 서로 다름을 직접 비교를 통해 쉽게 파악할 수 있다.

그림에서 같은 비홍수기인 2010년 홍수기 전에 전하여 2009년 홍수기 전 일산대교 직상류의 일부 구간(단면 No. 33~No. 36)은 ‘평균 하상’보다 낮아 세굴로 평가된다(Fig. 8 참조). MLTM (2010)는 그 원인 중 하나로 해당 구간 좌안에서 이루어진 준설 사업을 지적한 바 있다. 그러나 과거 준설량과 횡단면 변화 등을 재검토해 본 결과, 해당 구간에서 준설과 세굴 사이의 직접 관련을 찾을 수는 없었다.

Fig. 9는 ‘평균 하상’을 기준으로 2004년부터 2010년까지 조사 시기 별 하상변동량을 한꺼번에 나타낸 것이다. 각 시기 별 하상변동 규모를 동일한 기준으로 비교할 수 있다. 퇴적 경향 중에서는 홍수기 전인 2005년(그림에서 ‘May '05’)이 두드러지고 세굴 경향으로는 2009년 홍수 후가 탁월하다. 2009년 홍수 후에 상당한 규모의 세굴 경향에 대해서는 3장에서 언급한 바 있다. 2005년에는 당시에는 없었던 일산대교 상류에서 퇴적이 두드러지며, 그 이후 일산대교 직상류에서 홍수기 전 퇴적 부진과 대조된다. 그 대신 2009년과 2010년 홍수기 전에는 일산대교 하류에서 퇴적이 상당하다. 또한, 일산대교가 건설되기 전인 2004년(그림에서 ‘Aug '04’)과 2005년을 제외하면, 일산대교 상류에서 변동폭은 작고 그 하류에서 변동폭은 크게 나타나므로 그 상류 하상은 어느 정도 안정을 이루고 있는 것으로 짐작된다.

#### 4.3 하상변동과 홍수 이력

Fig. 10은 ‘평균 하상’에 대한 하상변동량을 신곡수중보로부터 누적하여 보인 그림으로서 시기 별 하상변동 경향과 누적량을

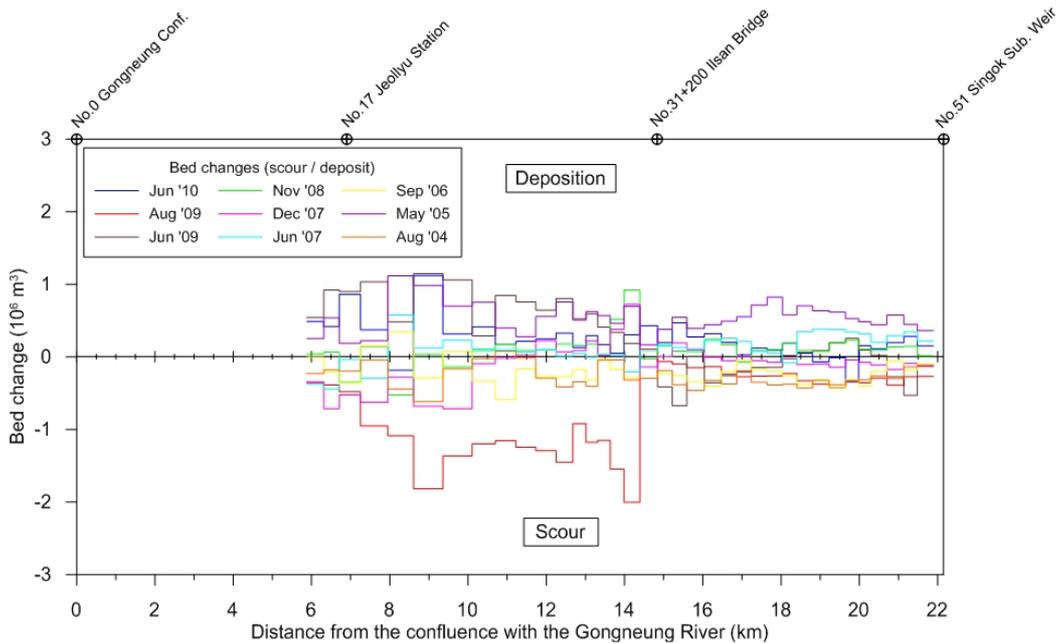


Fig. 9. Bed Changes to 'Averaged Bed' ('04 ~ '10)

비교할 수 있다. 그림에서 2009년 홍수 후 세굴 규모가 매우 큰 것을 재확인할 수 있으며, 2009년과 2010년 홍수기 전의 퇴적이 2005년 홍수기 전의 그것에 크게 못 미치는 것을 알 수 있다. 또한, 2008년 홍수기 후의 경우(그림에서 'Nov '08'), 3장에서 살펴본 바와 같이, 하상변동 규모나 경향이 이례적이다.

수세 효과가 유달리 작았던 2008년을 제외하면, 대체로 홍수기 전에는 퇴적 경향이며, 홍수(기) 후에는 세굴 경향으로 나타난다. 즉, 신곡수중보 하류에서 누적 하상변동량 경향은 '홍수기 하상

저하(2004년) → 비홍수기 하상 상승(2005년) → 홍수기 하상 저하(2006년) → 비홍수기 하상 상승(2007년 홍수기 전) → 홍수기 하상 저하(2007년 홍수기 후) → 비홍수기 하상 상승(2009년 홍수 전) → 홍수기 하상 저하(2009년 홍수 후) → 비홍수기 하상 상승(2010년 홍수기 전)'과 같은 순환을 보인다.

총 누적 하상변동량과 그 시기를 홍수 발생 시기와 비교한 Fig. 11을 살펴보면, 한강 하류에서 하상변동 경향은 매년 발생하는 홍수로 하상이 세굴되고 홍수가 없는 비홍수기에는 조석으로 말미암아

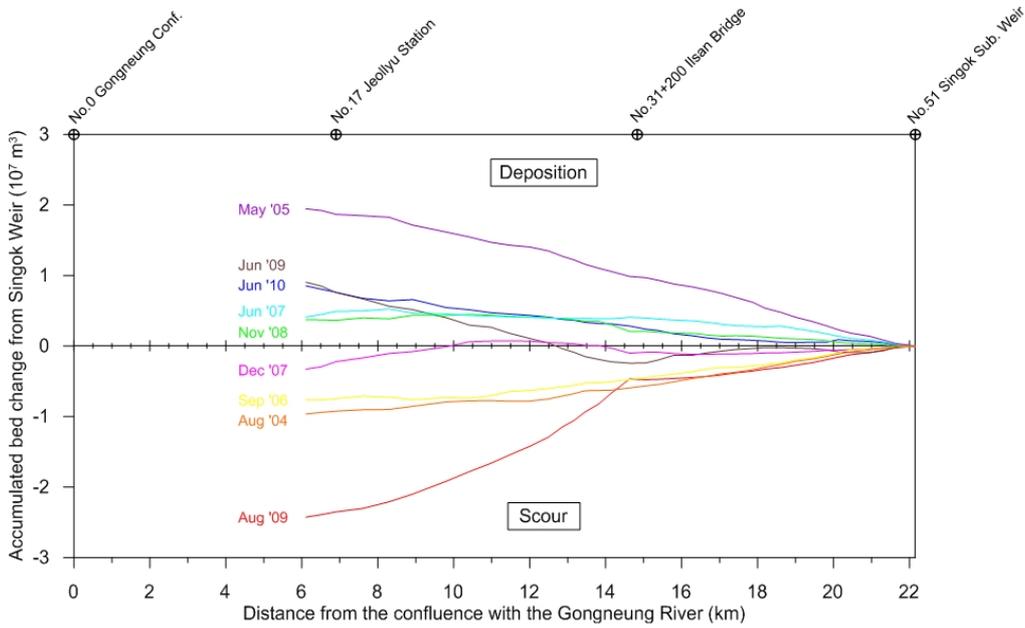


Fig. 10. Cumulated Bed Changes to 'Averaged Bed' ('04 ~ '10)

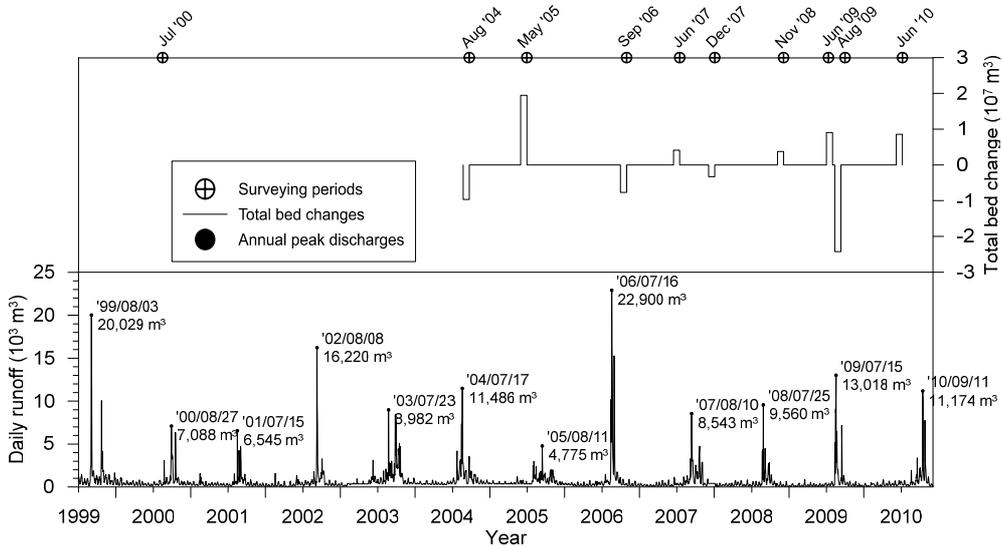


Fig. 11. Total Cumulative Bed Changes and Daily Runoffs

도로 매워지는 것이 다시 확인된다. 비홍수기, 즉 홍수기 전에는 언제나 퇴적 경향을 보인다. 또한, 2008년 홍수기 후를 제외하면, 홍수(기) 후에는 세굴 경향이 어김없이 나타난다. 그러나 하상변동 규모는, 2004년, 2006년, 2009년 홍수(기) 후를 살펴보면, 홍수가 지나간 뒤 언제 조사하는지에 따라 다르게 나타난다.

## 5. 결론

2009년부터 2010년까지 한강 하구 신곡수중보 하류에서 하상변동 조사를 실시하였다. 2009년에는 하상변동에 대한 단일 홍수의 영향을 살펴보기 위해 홍수기 전에 하천 측량을 실시하고 홍수 발생 직후에 다시 측정하였다. 또한, 비홍수기 퇴적 경향 파악을 위해 2010년 홍수기 전에도 조사가 이루어졌다. 획득한 측량자료로부터 하상고 변화를 살펴보고 하상변동량을 계산하여 신곡수중보 하류 하상변동을 분석하고 그 변동 경향에 대해 검토하였다.

고수부지보다는 저수로 하상변화에 초점을 맞추기 위해 부등류 계산을 통한 시행착오법으로 ‘저수로 만제 유량’을 설정하여 평균 하상고를 산정하였다. ‘저수로 만제 유량’에 기반한 평균 하상고를 이용함으로써 최심 하상고에 의한 분석에 비해 하상고의 종단 변화와 시기 별 상승과 저하 경향을 보다 분명하게 드러낼 수 있었다. 또한, 산남습지 구간에서 저수로 평균 하상고와 일치, 일산 대교 직상류에서 홍수 후에 나타난 하상 상승 포착 등 설계홍수량에 기반한 평균 하상고 분석으로는 확인하기 어려운 하상고 변화 양상을 잘 파악할 수 있었다.

Hwang et al.(2007)에 따라 실측한 단면자료로부터 퇴적량과 세굴량을 각각 계산하고 단면 사이 거리도 고려하여 하상변동량을 산정하였다. 2009년 홍수기 전에 비해 홍수 후 평균 하상변동량은  $0.93 \text{ Mm}^3$ 로서 세굴이었으나, 2009년 홍수 후 대비 2010년 홍수기 전의 그것은 퇴적 경향의  $0.91 \text{ Mm}^3$ 으로서 직전의 세굴 경향 평균 변동량과 맞먹는 양으로 드러났다. 즉, 평균 또는 누적의 의미에서 2009년 홍수로 세굴된 하상이 그 이전 상태로 회복되었음을 의미한다.

한강 하구에서 2004년 이후 관측된 하상자료를 이용하여 ‘평균 하상’을 설정하고 이를 기준으로 하상변동량을 계산함으로써 기준 하상에 따라 상대적이던 한계를 벗어나 여러 시기 하상을 일관된 기준으로 비교하고 분석할 수 있었다. ‘평균 하상’을 기준으로 계산된 하상변동량 덕분에 한강 하구에서 시기 별 하상변동량을 실제에 가깝게 파악할 수 있으며 변동 규모를 서로 비교할 수 있었다. 또한, 그 누적량을 일유출 이력과 대조함으로써 한강 하구에

서 하상변동 경향이 홍수에 의한 저하와 비홍수기 조석에 의한 상승의 순환임을 확인하였다.

## 감사의 글

이 연구는 한강홍수통제소의 일부 지원에 의한 것이다. 과업의 감독을 맡아 아낌없는 성원을 보내준 한강홍수통제소 연구사 박성식 박사께 특별한 감사를 표한다. 또한, 당시 팀원으로서 과업에 참여한 최 미경 박사께 감사드린다. 하천측량에 대해서는 (주)선영종합엔지니어링의 노고가 있었음을 밝혀둔다.

## References

- Han River Flood Control Office (HRFCO) (2018). *Realtime hydrologic data - stage data*, Available at: <http://hrfco.go.kr> (Accessed 21 May 2018) (in Korean).
- Hwang, S.-Y., Lee, S. H. and Park, J. M. (2007). "Influence of floods and tides on the bed changes in the han river estuary." *Proc. 2007 KSCE Conf.*, KSCE, pp. 4149-4152 (in Korean).
- Kim, C. Y. and Yoon, K. S. (2003). "Morphological change studies of the lower Han River using the past bathymetry profiles." *Proc. 2003 KSCE Conf.*, KSCE, pp. 1931-1936 (in Korean).
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT) (2002). *Analysis of bed changes in the lower Han River* (in Korean).
- Korea Water Resources Association (KWRA) (2009). *River design criteria and guidelines* (in Korean).
- Ministry of Construction and Transportation (MOCT) (2002). *Master plan for river maintenance in the Han River system - Supplements* (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT) (2014). *List of rivers in Korea* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM) (2008). *2006-2008 Research report on bed changes in the lower Han River* (in Korean).
- MLTM (2009). *2009 Research report on bed changes in the lower Han River* (in Korean).
- MLTM (2010). *2010 Research report on bed changes in the lower Han River* (in Korean).
- MOCT (2005). *Research report on bed changes in the lower Han River* (in Korean).
- MOCT (2007). *2006 Korea annual hydrological report* (in Korean).
- MOLIT (2016). *2016 Korea annual hydrological report* (in Korean).
- Oh, Y. M., Hwang, S.-Y. and Kim, S. E. (2003). "Measurement of turbidity and current at Han River downstream." *Proc. 2003 KWRA Conf.*, KWRA. pp. 851-854 (in Korean).