

미시시피강의 주운이 하천환경에 미치는 영향

서 일 원*

1. 미시시피강의 주운 개발 연역

미시시피강에서 주운이 시작한 것은 지금으로부터 약 160년 전이다. 그리고 주운시스템이 지금의 모습으로 운영되기 시작한 것은 1930년대에서 부터이다. 1824년부터 상업적인 용도에 적합하고 신뢰성있는 주운시스템을 위하여 미시시피강에 다양한 하천개수를 실시하고 수리시설물을 설치하게 된다. 우선 갈수시에 주운에 적합한 수심의 확보를 위하여 하천의 유목, 사주, 모래톱 등을 제거하고, 수심이 얕은 여울의 암반을 절취하고, 또한 사행하는 습지나 배수지(backwater area) 등을 차단함으로써 주하도에 물의 흐름을 유도하도록 개수공사를 시행하였다. 1878년에는 주운수로의 수심을 1.37m(4.5 ft)로 유지하도록 하는 하천법령이 제정되었고, 이는 1907년에 다시 주운수로의 수심을 1.83m(6 ft)로 유지하도록 변경되었다. 이러한 수심을 확보하기 위하여 강의 양안에서 강의 중앙으로 흐름을 가로지르는 날개 수제(wing dike)가 설치되었다. 이러한 수제는 강의 흐름을 중앙으로 유도하여 주운에 필요한 수심을 확보하게 하며, 또한 주하도 또는 주하도내에 위치한 주운수로에 유사가 퇴적되는 것을 감소시키는 역할을 한다. 1927년에는 미시시피강 상류구간(미네아폴리스-오하이오강 합류점)의 주운수로를 수심 2.74m(9 ft), 폭 91.4m(300 ft)로 유지하도록 하는 법령이 제정되었

다. 이에 따라 증가된 수심을 확보하기 위하여 1930년부터 1953년 사이에 29개의 갑문-댐(lock and dam)이 건설되었다. 이러한 갑문-댐의 운영과 더불어 약 200여개 지점에서 정기적인 하상 준설이 시행되었으며, 또한 672km(420mile)의 구간에 호안공사가 시행되었다.

미시시피강 상류구간의 주운시스템은 일리노이강 및 카스카스키아강의 주운시스템과 연계하여 운영되고 있으며, 이 세 강의 주운 수로의 총길이는 1912km(1195 mile)이다(그림 1참조). 일리노이강의 주운은 1822년에 일리노이-미시간 운하를 건설하는 것을 기점으로 시작되었다. 1900년에 이르러서는 시카고 하수-주운 운하가 건설되어 일리노이-미시간 운하를 대신하게 되고, 오늘날의 갑문-댐 시스템은 1960년에 완공되었다. 일리노이강의 주운을 위하여 총 8개의 갑문-댐 시스템이 운영되고 있다. 현재 미시시피강 상류구간의 주운시스템의 효율적인 운영을 위하여 총 29개의 갑문-댐이 운영되고 있다. 갑문의 폭은 56-100 ft, 길이는 320-1200 ft, 그리고 낙차는 5-49 ft이다. 날개수제의 총 갯수는 약 1800개이며, 주운을 위한 호안의 총 연장은 420 mile이다. 또한 정기적인 하상 준설이 시행되고 있으며, 1986~88년 기간에는 년평균 $11.5 \times 10^6 \text{yd}^3$ 하상 준설이 시행되었다. 미시시피강 상류구간의 주운 통행량은 1940년 이후 꾸준한 증가추세를 보이고 있다. 주 수송 대상품은 곡물, 유지종자(땅콩, 코코넛 등), 석유제품, 그리고 석탄

* 서울대학교 토목공학과 교수

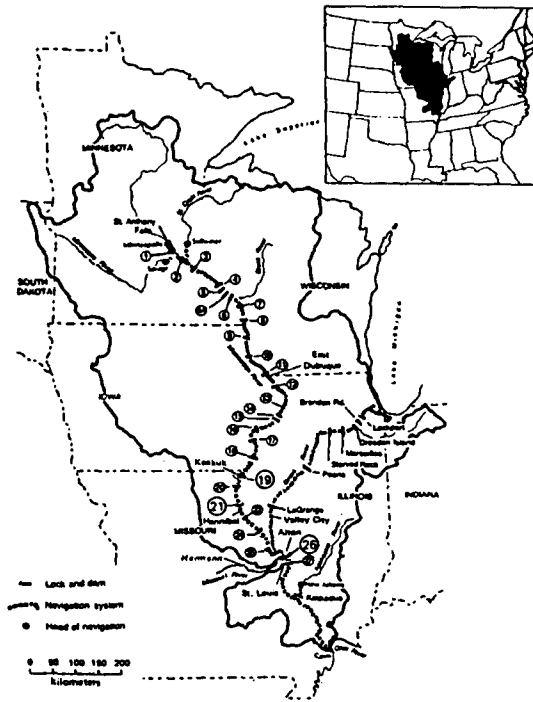


그림 1. 미시시피강 상류구간 주운시스템 개요
(인용 : Bhowmik, 1993)

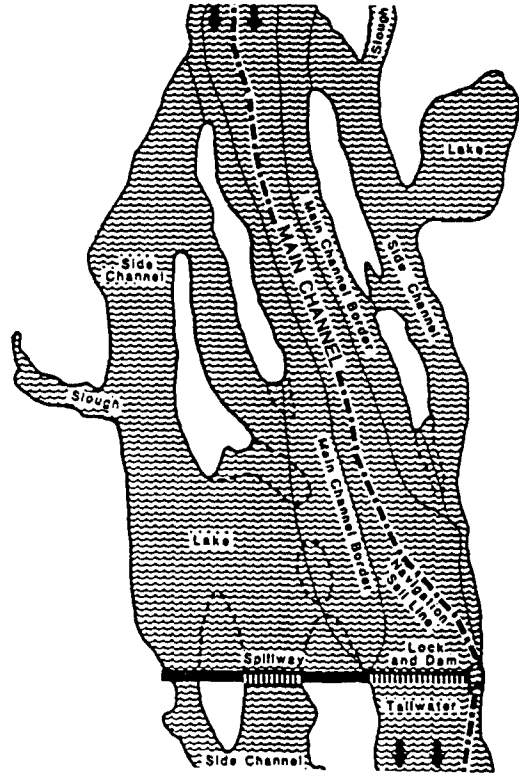


그림 2. 미시시피강 상류구간의 전형적인 수중서식처
(인용 : 미 육군 공병단, 1990)

이며, 그 외에 농산물과 비금속 광물 및 관련제품들이다. 이러한 상품의 선적 및 수송을 위하여 총 475개의 터미날이 운영되고 있으며, 비상업용 소형 선박을 위한 부두의 갯수도 200개에 이르고 있다.

2. 주운시스템에 의한 환경 영향 평가

강위를 통행하는 선박은 추진시스템이 수류를 일으키고 물을 배제함으로써 강의 환경 및 생태계에 많은 영향을 주게 된다. 미시시피강을 통행하는 상업선박은 주하도와 하도경계에 위치한 수중서식처(그림 2 참조)에 다양한 물리적인 변화를 야기시킨다. 이러한 물리적인 변화는 수중서식처에 생물학적으로 악영향을 초래하게 된다. 선박통행에

다른 환경영향은 선박의 크기, 형태, 속도, 그리고 통행 방향에 좌우되며, 수로의 크기 및 형태, 하상구조 및 하상재료의 구성, 수로내에서 선박의 통행 위치, 선박 통행에 직접, 간접적인 영향을 받는 생체의 민감도에 따라 결정된다.

미시시피강을 통행하는 전형적인 상업용 선박은 그림 3에서 나타난 바와 같이 화물을 적재하는 바지선과 이를 밀고 가는 예인선(tow boat)로 구성된다. 이러한 선박은 통행시 우선 수위저하와 파랑을 일으키게 된다(그림 4 참조). 선박 통행에 의해 야기된 물의 운동은 난류를 발생시켜서 하상을 교란시키고 유사를 재부유케 만들음으로써 하상 및 수중에 서식하는 생물체에 나쁜 영향을 미치게 된다. 수위저하-파랑 연속과정은 비교적 짧은 시간동안 지속되지만 이에 의한 난류운동은 수중에 서식

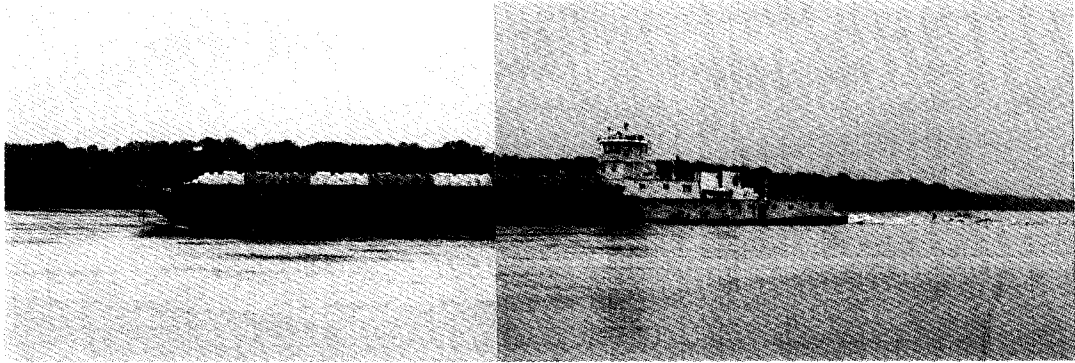


그림 3. 바지선과 예인선으로 구성된 주운 선박

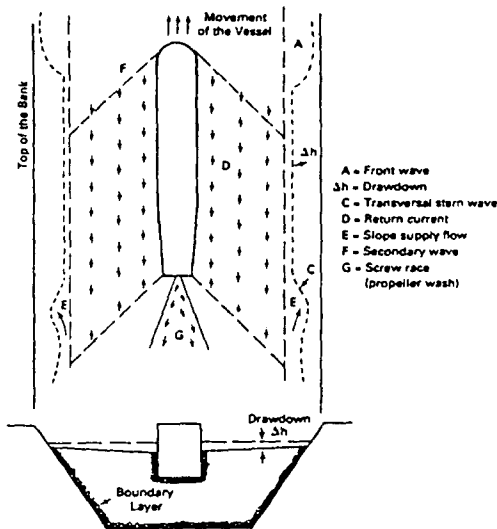


그림 4. 주운 선박에 의한 물의 운동 개력도
(인용: Bhowmik과 Mazumder, 1990)

하는 생물체가 자신에게 적합한 서식처로부터의 분리를 야기한다. 나아가서 만양 선박 통행에 의해 주하도의 물이 배수지에 유입, 유출되게 되면, 이에 의한 난류 및 파랑 운동은 배수지에 퇴적되어 있는 많은 양의 유사를 재부유시키게 되는 것이다.

1970년대부터 많은 연구자들이 미시시피강의 주운 선박이 하천생태계에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하여 왔다. 그러나 이러한 연구들은 충분한

기간동안 수행되지 않았기 때문에 상업용 주운에 의한 물리적인 영향을 정확하고 적절하게 규명하고 정량화 하기에는 미흡한 점이 많았다. 또한 물리적인 조건의 변화와 생물학적인 변화와의 관계를 정확하게 규명하지 않았기 때문에 미시시피강의 주운 선박이 하천에 서식하는 식물과 동물에 미치는 영향에 대해 제대로 밝혀지지 않고 있는 실정이다. 그리하여 종래의 연구들은 조사가 수행된 특정 지점 및 조건에 국한되었기 때문에 적용성이 떨어지며 미시시피강 전체에 걸쳐서 일반화할 수 없는 것이 대부분이다. 이에 따라서 미 육군 공병단의 St. Louis 지부(1990)는 지속적으로 증가하는 주운 화물수송 부담을 해결하기 위한 미시시피강 26번 갑문-댐 증설에 따른 추가적인 영향을 평가하고, 상업용 선박에 의한 물리적·생물학적인 영향을 정량화하기 위한 체계적이고 장기적인 연구를 수행하고 있다. 이 연구에 의해 주운이 미시시피강의 중요한 자원에 미치는 영향이 정확하게 밝혀진 후 이러한 영향을 저감하기 위한 방법에 관한 후속 연구가 수행될 예정이다. 미 육군 공병단(1990)은 우선 수자원 및 관련 육상자원에 관한 경제·환경 규정 및 지침과 국가경제개발(National Economic Development) 정책에 의거하여 미시시피강의 중요한 자원을 7개의 그룹으로 분류하여 지정하고 있다. 이들은 표 1에 수록한 바와 같다.

표 1. 미시시피강의 중요한 자원 분류

자 원	내 용
배수지, 측수로 및 습지	다양한 어류의 서식, 산란, 피난 장소 및 먹이를 제공
어류의 알, 유충, 및 성체	26개 어종이 보호어종으로 지정됨
섬조개	척추생물의 먹이 공급원
대형수생식물	플랑크톤, 저서생물, 어류 등의 생활의 중요한 연결체
무척추생물	수중 생태계 먹이사슬의 중간단계에 위치
물새류	철새보호법령에 지정
플랑크톤	수중 생태계 먹이사슬의 최하단계에 위치

미 육군 공병단(1990)은 주운활동이 표 1에 제시된 자원에 미치는 영향을 조사, 분석, 평가하기 위하여 총 16분야의 세부연구를 수행하는 것을 제안하고 있다. 이들은 표 2에 수록한 바와 같다.

3. 미시시피강의 주운이 수중서식처에 미치는 물리적 영향

미시시피강과 일리노이강의 주운 선박 통행이 수중서식처에 미치는 물리적 영향을 조사, 분석, 평가하는 세부과제들(표 2에서 제 1,2,5 과제)은 일리노이주 수자원연구소에서 수행되고 있다. 그림 5는 주운에 의한 물리적 영향 평가, 저감 및 관리방안의 개념도이다. 일리노이주 수자원연구소의 주운 영향 연구팀은 그림 5에 표시된 유속, 난류, 유사, 파랑 등의 물리적인 특성의 변화를 현장에서 관측하였으며, 이와 병행하여 기존의 유속측정 자료를 분석하였고 또한 지형정보시스템(Geographical Information System)을 이용하여 제작된 주제도를 분석하여 미시시피강의 수중서식처 특성을 구명하였다.

미시시피강과 일리노이강에 위치한 수위관측소 및 주운영향 관측지점에서 측정한 유속 및 수심 자료를 분석한 결과, 유속과 수심의 횡방향 분포는 모두 다항식과 지수식의 합성식으로 표현할 수 있음이 밝혀졌다(Seo와 Bhowmik, 1991a). 이 식의 일반적인 형태는 그림 6에 주어진 바와 같으며, 그림 6에 수로의 사행(곡률반경)에 따른 유속의 횡

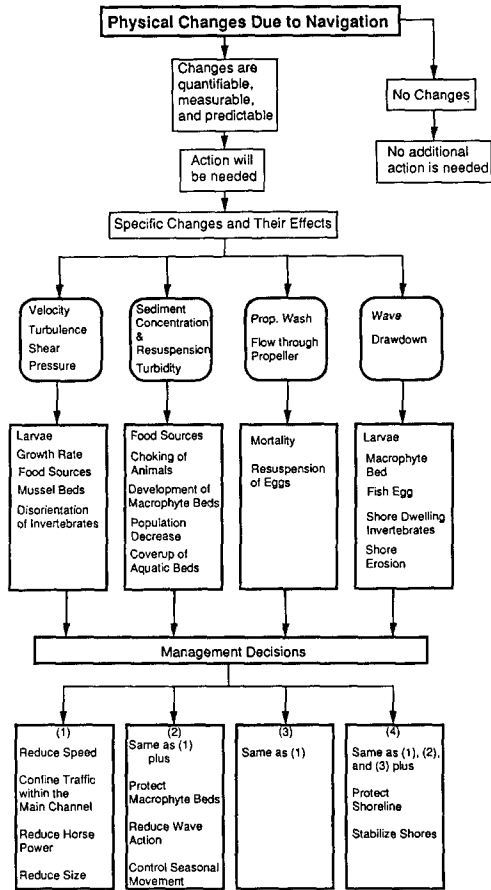


그림 5. 주운에 의한 물리적인 영향 평가 및 저감방안 개념도

표 2. 주운 영향 세부연구과제와 연구기간 및 경비

연구과제	연구방법	연구기간 (5)	연구경비 (10 ³ US \$)
1. 주운통행에 의한 물리적인 영향	실험실/현장	5	5,045
2. 주운통행이 측방하도 및 배수지의 유사에 미치는 영향	현장	5	3,080
3. 주운통행이 유·치어류에 미치는 영향	실험실/현장	4	888
4. 주하도 및 하도경계에 서식하는 섭조개류에 미치는 영향	실험실/현장	3	405
5. 주운통행이 배수지에 미치는 물리적/생물학적 영향	현장	5	3,781
6. 주하도 및 하도경계에 서식하는 어류(성어)에 미치는 영향	현장	5	842
7. 주운통행에 의한 수위저하가 어류의 알과 유충에 미치는 영향	실험실	2	125
8. 주운통행에 의한 부유사가 대형수생식물에 미치는 영향	실험실/현장	7	611
9. 주운통행에 의한 파랑이 대형수생식물에 미치는 영향	현장	5	234
10. 주운통행이 하상기질에 서식하는 대형 무척추생물에 미치는 영향	현장	5	545
11. 주운통행이 이동성 물새에 미치는 영향	현장	3	91
12. 주운통행에 의한 전단력과 탁도증가가 조류의 번식에 미치는 영향	실험실/현장	1	202
13. 주운통행이 어업에 미치는 영향	조사	4	59
14. 주운통행에 의한 탁도 및 부유사 증가가 어류의 생장에 미치는 영향	실험실	1	130
15. 주운영향에 관한 자료관리	기술개발	8	2,600
16. 주운시스템을 위한 하천개발 일반관리비	연구	3	550
	합계	9	21,268

방향분포를 같이 도시하였다. 자연하천에서의 상업적 주운에 따른 물리적 영향을 구명하기 위해서는 우선 중요한 수중서식처에 대한 구체적이고 체계적인 연구가 필요하다. 그림 2에 도시한 수중서식처 중에서 주하도는 빠른 유속과 주운수로에서 선박의 운항으로 발생하는 난류 등으로 인해 유용한 수중서식처로서의 기능이 상대적으로 감소된다. 이에 반해 하천의 수변공간, 사대 혹은 저장대, 늪지, 복잡한 분포의 모래섬, 지류 및 2차 흐름, 여울, 가는 모래지역 등은 중요한 수중서식처로서의 기능을 갖고 있다. 이와 같은 하천 공간은 수생물의 산란을 위한 식물이 자라고 있으며, 성장을 위한 유기물과 연체동물 등이 풍부하고, 어린 물고기 등이 생활화할 수 있는 공간을 제공하며, 물새와 동물 등의 휴식공간과 먹이를 구할 수 있는 공간을 제공한다. Seo와 Bhowmik(1991b)은 미시시피강의 제 13번 pool의 수중서식처 특성을 분석하여 하천의 사행성, 굴곡 정도, 하천 분류 및 분류수로의

수평각 등 중요한 세부자료를 제시하였다. 주운에 관련된 특성으로서 주운수로의 평균폭은 894 ft, 곡률반경은 7839 ft, 중심각은 39.4°이며 구간 평균 사행도는 1.07로 나타났다.

그림 7은 미시시피강과 일리노이강에서 유속, 난류, 유사, 파랑 등의 수리학적 자료를 관측하기 위한 측정장비의 설치 모식도이다. 현장측정은 여러개의 지점에서 수행되었으며, 시간적인 변화를 구명하기 위하여 한 지점에서 약 2주 정도의 기간 동안 계속되었다. 유속 및 난류는 현장용 전자기유속계로 측정하였으며, 하상재료는 Ponar 채취기로 채취하고, 부유사는 특수하게 제작된 채취기 및 펌프로 채취하여 채취한 시료의 농도는 유사분석실에서 측정하였다. 파랑 및 수위는 전자식 파랑계와 수위계로 측정하였다. 우선 주운 선박 통행이 없을 때는 배경 자료(ambient data)를 장기간 측정하였으며, 선박 통행이 일어날 때에는 측정빈도를 높여서 측정하였다. 그림 8은 시간에 따른 유속의 변화

특집 : 주운 및 운하건설

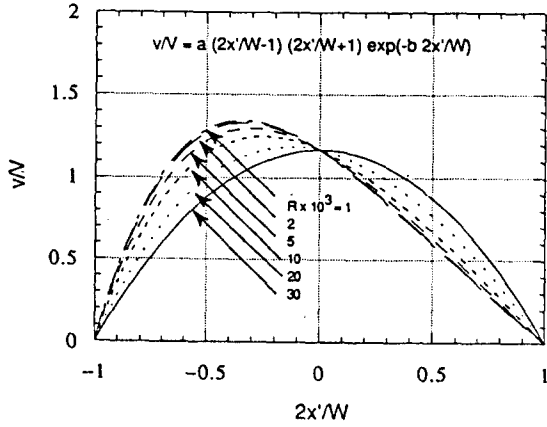


그림 6. 미시시피강 및 일리노이강의 전형적인 횡방향 유속분포 (인용 : Seo와 Bhowmik, 1991)

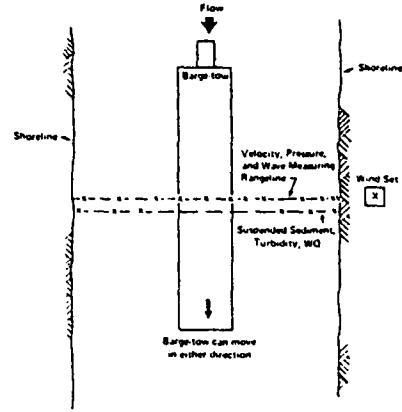


그림 7. 현장에서 수리화적인 자료 측정 개요 (인용 : Bhowmik과 Payne, 1990)

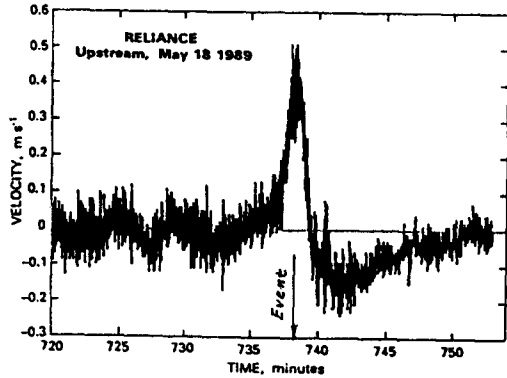


그림 8. 일리노이강에서 측정된 유속 변화(인용 : Bhowmik과 Mazumder, 1990)

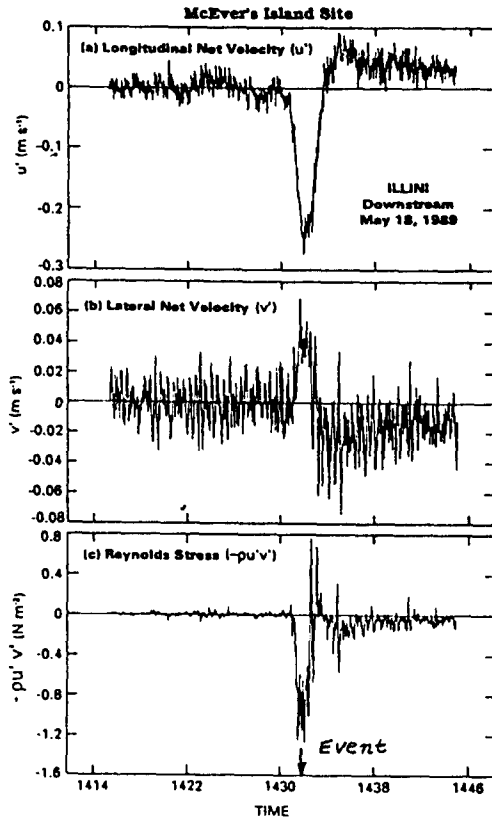


그림 9. 일리노이강에서 측정된 난류, 전단력 변화(인용 : Mazumder et al, 1993)

의 일례를 도시한 것이고, 그림 9는 난류 및 전단력의 변화를 도시한 것이며, 그림 10은 시간에 따른 부유사의 농도 변화를 도시한 것이다. 여기서 u 는 흐름방향의 난류성분이고, v 는 횡방향의 난류성분이다. 이들 그림에서 선박 통행이 일어날 때에 유속, 난류, 그리고 부유사 농도가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 선박통행시 유속과 난류성분의 증가는 그림 4에 표시한 바와 같이 선박운동에 의한 귀환류(return current)에 의한 것으로 구명되었으며(Mazumder et al., 1993), 부유사 농도의 증가는 수위저하, 귀환류, 그리고 파랑 모두에 의한 것으로 구명되었다. 그리고 이러한 부유사

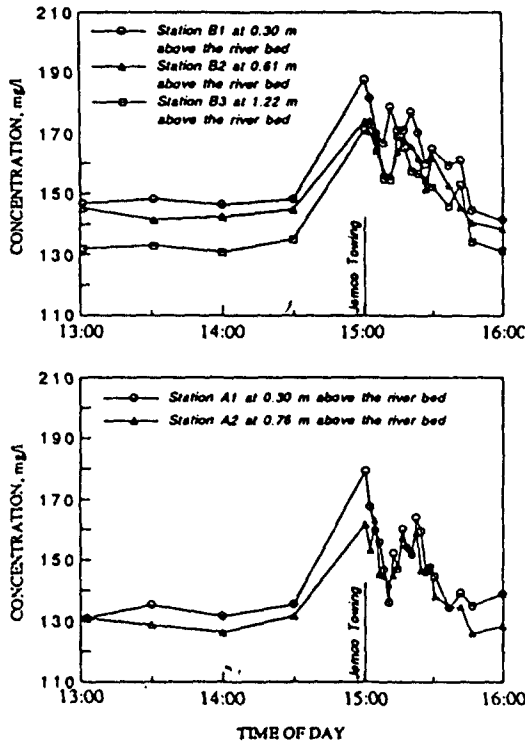


그림 10. 주운선박에 의한 부유사 농도 변화(인용 : Xia et al, 1993)

농도의 증가는 선박이 상류방향으로 운행할 때가 하류방향으로 운행할 때보다 크게 일어나는 것으로 밝혀졌다(Xia et al., 1994).

4. 감사의 글

본고는 필자가 미국 일리노이주 수자원연구소에서 연구원으로 근무할 당시(1990~1991)에 본인과 본인이 소속되었던 주운영향 연구팀에 의해 수행된 연구의 일부를 정리한 것입니다. 본고를 위하여 자료를 활용할 수 있도록 배려하여 준 일리노이주 수자원연구소에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- Bhowmik, N.G., 1993, "Effects of Natural and Man-Made Events on the Land-Water Interfaces of Large River Basins," *Wetlands and Ecotones*, National Institute of Ecology, New Delhi, India, 101-122.
- Bhowmik, N.G., and Mazumder, B.S., 1990, "Physical Forces Generated by Barge-Tow Traffic within a Navigable Waterway," *Proceedings of 1990 National Conference on Hydraulic Engineering*, ASCE, 604-609.
- Bhowmik, N.G., and Payne, B.S., 1990, "Techniques for Studying the Physical Effects of Commercial Navigation Traffic on Aquatic Habitats," *Technical Rep. EI-90-10*, US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Mazumder, B.S., et al., 1993, "Turbulence in Rivers due to Navigation Traffic," *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE, 119(5), 101-122.
- Seo, I.W., Bhowmik, N.G., 1991a, "Classification of Aquatic Areas of Three Pools in the Upper Mississippi River System," *Interim Rep.*, Illinois State Water Survey, Champaign, IL.
- Seo, I.W., Bhowmik, N.G., 1991b, "Velocity Distribution of the Illinois and Mississippi Rivers," *Interim Rep.*, Illinois State Water Survey, Champaign, IL.
- US Army Corps of Engineers, St. Louis District, 1990, "Plan of Study for Navigation Effects of the Second Lock Melvin Price Locks and Dam," St. Louis, Missouri.
- Xia, R., et al., 1994, "Temporal and Spatial Variations of Suspended Sediment Concentration During Navigation Traffic in a Natural River," *Proceedings of 1990 National Conference on Hydraulic Engineering*, ASCE, 1131-1135.