

자갈하천에서 하상변동과 식생변화와의 상관관계 조사

© 이삼희¹⁾

1. 서론

근래, 유역 및 하천 개발과 더불어 일본 전역의 자갈하천에서 삼림과 같이 안정적으로 존재하는 密生植生域(이하 안정식생역이라함)이 진행되고 있는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 하도내 지피 상황은 하천관리상 ① 하도내 조도의 상승(치수관리상의 문제), ② 하도내의 생물 서식환경의 변화(자연환경의 변화) 등과 같은 현안과제로 이어지고 있다. 한편, 하도내 식물도 하상재료나 하상지형과 마찬가지로 하도를 구성하는 중요한 요소로 인식하기에 이른 시점이므로, 하도계획 및 하도관리에서 그동안 주된 관심의 대상이었던 하상재료나 하상지형과 같이 하도내 식물의 거동 역시 주된 관심사로 부각되고 있다. 다시말해, 하도내 식생동태를 예측하는 기법의 개발이 필요한 시기가 도래했다고 생각할 수 있다. 이를 위해서는 안정식생역의 매카니즘에 대한 해명이 우선 검토되어야 하므로, 본고에서 일본 다마가와(多摩川)의 자갈하천 구간에서 일어나고 있는 안정식생역의 확대과정에 대해 수리학적 생태학적으로 상세히 조사·분석을 하였다. 여기에서 하도내 식생의 동태와 하상변동이 어떻게 서로 영향을 미쳤는가에 착안하여 고찰하였다.

2. 하상변동과 식생변화와의 상관성

2.1 조사대상지구에서의 하도특성

홍수, 유사이동 등 하천의 물리적 작용에 의해 야기되는 하상의 상승 혹은 저하와 식생변화와는 어떻게 영향을 미쳤는지를 분석한다. 조사대상하천은 하상변동 및 하천식생에 관한 자료의 확보가 가능한 다마가와(多摩川)를 대상으로 하였으며, 그림 1과 같이 같이 하천식생변화 직접적인 인위적인 교란이 없었던 3지구를 선정하여 조사하였다.

조사구간의 하도특성은 표 1과 같다. 그림 2는 쇼후바시(調布橋)지점(59.7km)과 이시하라(石原)지점(28km)에서 연최대유량에 대한 경년변화를 나타낸 것이다. 나가타바시(永田橋) 지구에서의 연평균최대유량은 600m/s이다. 1968~1995년까지의 최심하상고의 종단형태는 그림 3에서 보는 바와 같다. 이 구간의 하상변동의 특징으로는 취수보, 하상보호공,

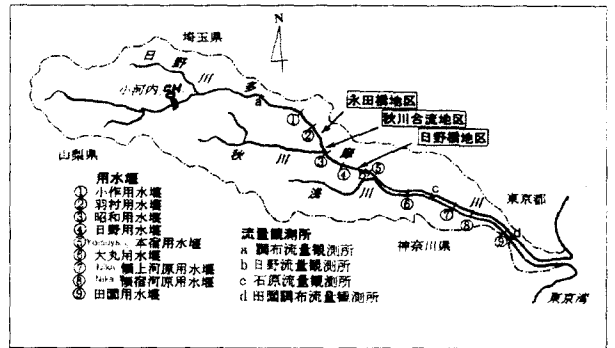
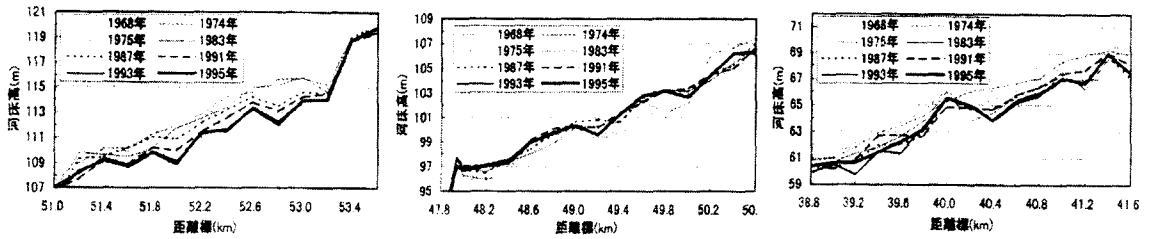


그림 1. 다마가와(多摩川)의 조사대상구간

표 1. 다마가와(多摩川) 조사대상지구별 하도특성

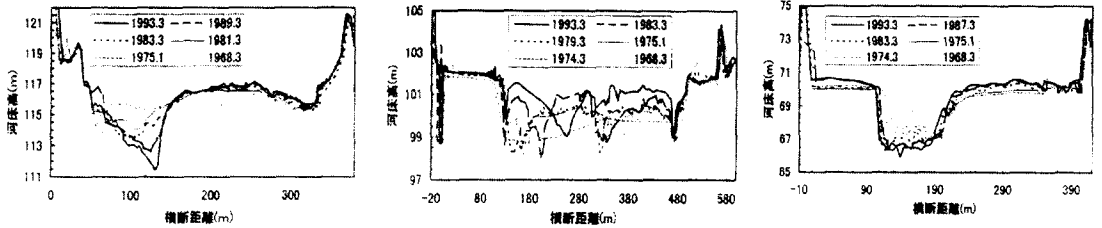
조사지구	나가타바시 (永田橋) 지구	아끼가와(秋川) 합류지구	히노바시 (日野橋) 지구
거리폭	51.0-53.0km	51.0-53.0km	51.0-53.0km
세그먼트구분	세그먼트 1	세그먼트 1	세그먼트 1
평균하폭	1/218	1/219	1/282
평균저수로폭	275m	467m	371m
하상변동경향	하상저하	하상상승	하상저하
하상평균입경	약35mm	약35mm	약30-35mm

1) 한국건설기술연구원 선임연구원, samhee.lee@kict.re.kr



a) 나가타마시 지구(53.4km지점 취수보) b) 아끼가와 합류지구(48km지점에 취수보) c) 히노바시 지구(40.0, 41.4km지점 교각보호공)

그림 3. 조사구간의 하상변동



a) 나가타마시 지구 52.4km측선

a) 아끼가와 합류지구 48.6km측선

a) 히노바시 지구 40.8km측선

그림 4. 지점별 대표측선의 횡단형태

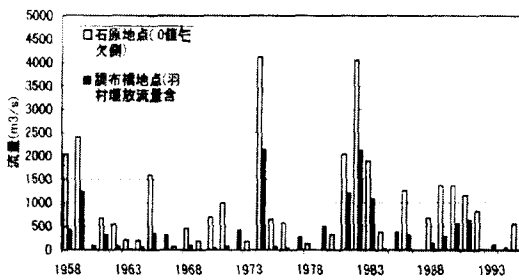


그림 2. 연최대유량

교각보호공 등과 같은 횡단수리구조물 등이 곳곳에 설치되어 있다. 이에 따라, 종단적으로 볼 때 상류측 횡단구조물에 가까울수록 하상저하가 크고, 하류측 횡단구조물에 가까울수록 하상이 안정 혹은 상승하는 경향이 있다. 암반 등 난침식층인 넓게 노출되는 장소에서는 하상변화가 그다지 현저하지 않다. 그리고, 비교적 큰 지천의 합류는 하상상승에 기여하는 경우가 있다. 따라서, 53.4km의 하무라(羽村)용수보 직하류에 있는 나가타마시 지구에서는 전반적으로 하상이 내려가고, 취수보 직상류에 위치하면서 아끼가와 지천이 합류하는 아끼가와 합류지구에서는 뚜렷한 하상상승이 일어나고 있다. 하류측의 횡단구조물에서 조금 떨어진 곳에 위치하는 히노바시 지구에서도 거의 전반적으로 하상이 저하한다. 그림 4에서는 각 조사지구의 대표지점에서 하상횡단형의 경년변화를 나타낸다. 나가타마시 지구와 히노바시 지구에서는 횡단적으로 볼 때 하상저하(저수로)와 나머지 부분(고수부지형태)에서는 하상상승에 기인하여 결국, 횡단면 형상이 복단면화가 일어나고 있다. 복단면화의 진행하기 시작한 주된 시기는 히노바시 지구(1970년대 전반까지)가 나가타마시 지구(1980년대 이후)보다 빠르다. 한편, 아끼가와 합류지구에서는 1968년 당시부터 안정적으로 존재하는 고수부지의 사이에 폭이 넓은 저수로가 있으며, 이 횡단형상은 크게 보면, 평탄하고 상승경향을 보이고 있다. 유심부가 저수로의 가운데 안정적으로 고정된 것은 아니고, 횡단적으로 꽤 가늘게 변동하고 있다.

2.2 조사대상지구에서의 식생변화 특성

조사대상의 3지구에 대해서는 1977년(히노바시 구간은 1976년), 1983년, 1994년의 현존 식생도가 매우 정교하게 작성되어 있다. 이를 토대로, 나가타마시 지구의 52.2-52.6km측선간의 저수로 중앙에서 우안측(면적 8.3ha), 아끼가와 합류지구의 48.4-48.6km의 저수로내(면적 13.2ha)에서 각 식생군

표 2. 식물군락의 경년 변화

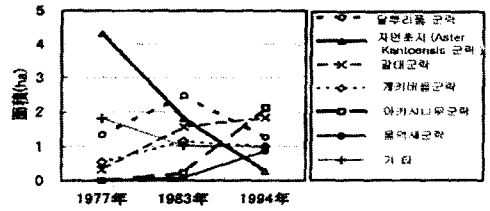
구분	식물군락	나가타바시, 히노바시 지구	아끼가와 합류지구
A	나지, Asteretum kantoensis	→	→
B	달뿌리풀, 개키버들, 미국가막사리	→	→
C	갈대, 물억새, 돼지풀, 아카시나무	→	→

주) 상방향의 화살표는 식물점유면적 증가
 하방향의 화살표는 식물점유면적 감소
 점선화살표는 1977(1976)- 1983년 변화
 실선화살표는 1983 - 1994년 변화

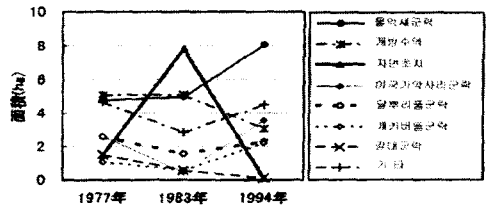
락의 총면적을 산출했으며, 그 결과는 그림 5와 같다. 여기서 평균점유면적이 전면적의 2-3% 정도에 미치지 않는 군락은 제외했다. 이 그림에서 각 지구의 식물군락의 변화에는 나가타바시와 히노바시 지구는 아끼가와 합류지구와는 분명한 차이가 있다. 표 2는 안정식생역의 발달 혹은 감소에 직접적으로 작용한 식물군락을 중심으로 경년변화를 나타낸다. 그림 2에서 1974년과 1982년에 아주 큰 홍수가 있던 것을 알 수 있다. 이것과 그림 2에서 나가타바시 및 히노바시 지구와 아끼가와합류 지구의 식생변화의 차이는 1982년 홍수에 대한 응답의 차이를 나타낸다고 볼 수 있다. 즉, 아끼가와 합류지구에서는 1982년 홍수에 의해 특히 달뿌리풀, 개키버들, 미국가막사리군락 등 식물군락이 파괴되어 자연 나지가 되어, 시간이 경과하면서 그 곳에 같은 식물이 재생한 것으로 조사되었다. 이는 하상상승 경향이 큰 구간일수록 홍수에 의한 식물군락의 파괴와 홍수후의 재생이라고 하는 변동이 활발하며, 반대로 하상저하 경향이 있는 장소에서는 홍수가 식물파괴작용이 크지 않고, 오히려 홍수가 새로운 식생이 번성하게 자라도록 조장하고 있음을 강력히 시사하는 것이다. 이것은 장기적이며 거시적 하상변동 경향과 식생동태의 관계를 고려하는데 중요하다.

2.3 식물군락에서의 입지조건 특성

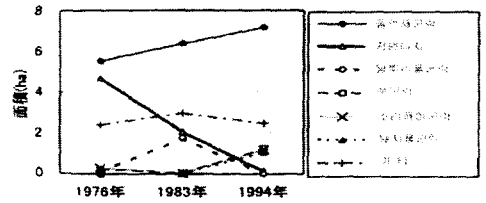
나가타바시 지구에서 52.2, 52.4, 52.6km측선, 아끼가와 합류지구 48.4, 48.6km측선, 히노바시 지구 40.6, 40.8km측선을 기준으로 폭2m의 벨트 트랜sect를 설정해, 식물과 입지조건(표층하상재료 입경 및 퇴적두께, 지하수위)에 대해 상세히 조사하였다. 표층세립토층 깊이를 가로축(퇴적깊이), 지하수위에서의 하상면까지의 높이를 세로축(比高)으로 한 비고-퇴적깊이좌표(입지조건을 대표하는 것으로 조사되었음)상에 얻어진 자료를 표기하여, 각 식물군락의 분포상황을 조사했으며, 그 결과는 그림 6과 같다. 여기서, 표층세립토층은 주로 복단면화에 의해 생긴 고수부지에서 자갈하상위에 퇴적한 중사입경이하의 층을 가리킨다. 이 그림에서 우선 비고-퇴적깊이 좌표상의 각 식물군락의 분포상황이 표-3, 그림 7에서 나타내는 것과 같이 I, II, III형으로 나눌 수 있다. 이들의 3형태 각각의 분포역은 일부 중복하는 부분도 있지만, 전체적으로는 서로 다르다는 것을 알 수 있다. 이것은 이들 3형태 가운데 어느 방향으로 진행하는가하는 것은 입지조건에 의해 대개 규정된다는 것을 나타내고 있다. 이들은 입지조건 변화로부터 식물군락의 변화를 어느 정도 추정 가능하다는 사실을 의미한다. 또한 각 형태에 속하는 식물군락을 보면, 표 2의 A군락이 I형, B군락이 II형, C군락이 III형에 거의 대응하고 있다. 이들의 형태분류는 3 조사지구에서 일어난 식생변화의 특성이 다르



a) 나가타바시 지구



b) 나가타바시 지구



c) 나가타바시 지구

그림 5. 지구별 식물의 점유면적

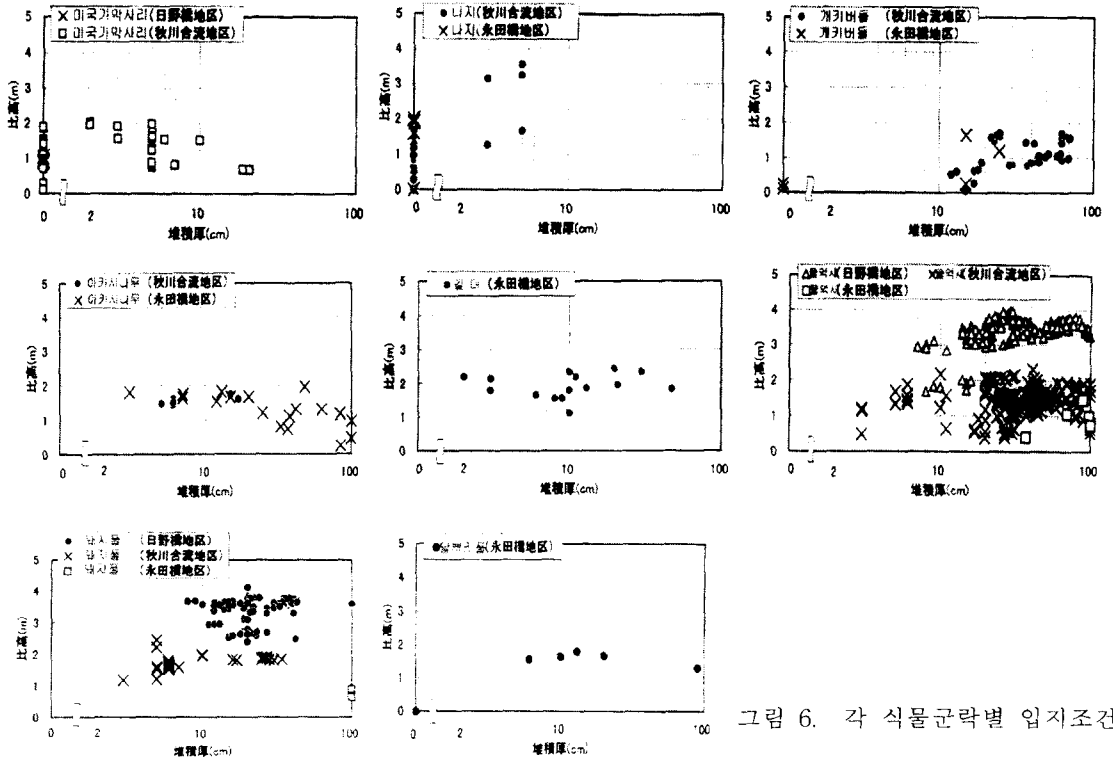


그림 6. 각 식물군락별 입지조건

표 3. 식물군락의 입지조건에 의한 식물분포 형태 분류

분류형태	식물군락	입지조건(생육환경)
I 형	나지, 미국가막사리, <i>Asteretum kantoensis</i>	표층재료가 자갈이다.
II 형	달뿌리풀, 개키버들	표층재료가 자갈의 경우와, 세사-중사의 경우로 나누어진다. 저자는 표층세립토사가 없음을 대응하고, 후자는 표층세립토사의 존재에 대응한다.
III 형	갈대, 물억새, 돼지풀, 아카시나무	표층세립토층의 입경인 미세사-중사가 표층재료가 된다.

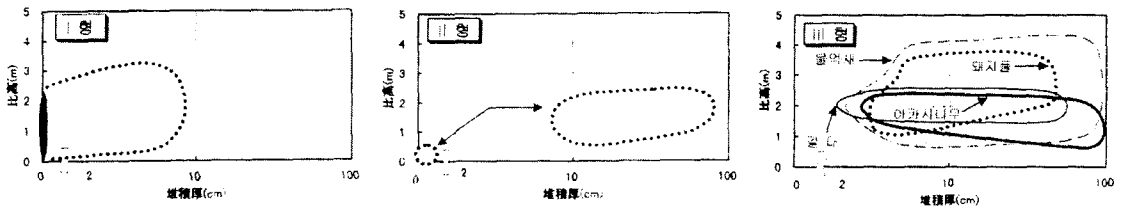


그림 7. 각식물군락의 형태 분류

다는 것을 설명하는데도 의미가 있음을 나타낸다. 다시말해, 하상변동 경향이 다르다면, 같은 홍수가 발생해도 다른 입지조건을 초래하고, 이는 표 2에 나타난 식생변화의 다른 이유에 대해 상당부분 설명이 가능하다.

3. 식생의 수리적 특성에 의한 세립토사 퇴적

그림 7에서 표시한 것과 같은 식생동태와 안정식생역의 진행과정을 식생이 가지고 있는 수리특성을 통해 입증하는 것은 중요하다. 이를 통해 하도내 식물의 동태에 예측 모델의 개발이 가능성이 기대되기 때문이다. 이에 따라, 식생에 의해 세립토사의 퇴적을 촉진시킬 수 있는가에 대해 검토하였다. 여기서 적용한 수리량은 나가타바시 지구를 자료를 사용하였다. 그리고, 그림 8에서는 다마가와를 포함한 일본 지방에서 각 식물군락의 형태조사를 토대로 추정한 투과계수 K값의 범위를 나타내고 있다. 투과계수 K는 유속을 v, 에너지경사를 Ie라고 둘 때, $v=K(Ie)^{1/2}$ 로 정의된다. 그림 가운데 K값은 물의 흐름에 의해 크게 변형해서 식물 높이가 1/4로 된 상태까지를 상정하고 있다. 한편, 기준면 농도식에서 판단하면, 대개 $u^*(\text{마찰속도})/Wo(\text{침강속도}) < 1$ 을 충족시키면 $Ca(\text{기준면 평형유사농도})=0$ 의 조건이 성립한다고 말할 수 있다. 여기에서, 대상토사(0.15mm)에 대해서, $u^*=K(Ie)^{1/2}/\phi$ 을 이용해서, $u^*/wo=1$ 이 되는 K값(Kc값이라고 정의함)을 구하고, 그림 8에 표시했다. 여기에서 ϕ 는 유속계수이고 똑같이 자갈하상면을 상정해서 $\phi=13$ 이라 두었다. 유량에 따라서 Ie가 조금 변화하기 때문에 Kc값은 폭을 가지고 표시되고 있다. $K < Kc$ 가 $Ca=0$ 의 조건에 대응하는 것을 이해하고 그림을 보면, 대표지점에 대해서는, *Aster kantoensis* 등 K값이 크다. 일부의 군락종을 제외하면, 식물의 존재에 따라 $Ca=0$ 의 조건이 만들어질 가능성이 충분하다고 판단할 수 있다. 다시말해, 참고로, 그림 8에서 밀생도가 낮고 높음을 의미하는 K가 Kc값보다 우측에 위치하면 퇴적현상이 일어나지 않고, Kc값보다 좌측에 위치하면 퇴적현상이 일어난다.

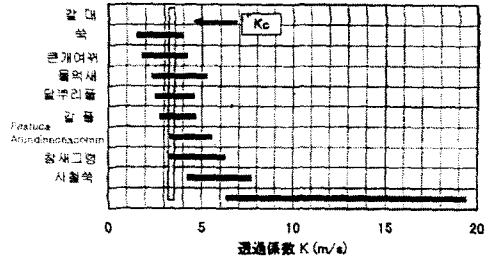


그림 8. 각 식물군락에 의한 투과계수

4. 자갈하상에서의 안정식생역 진행 과정에 관한 고찰

사진 1에서 보는 나가타바시 지구와 히노바시 지구에서 진행되고 있는 안정식생역은 2.2에서 살펴본 바와 같이 주로 물억새, 아카시나무, 돼지풀, 갈대, 쭉 등의 식물군락에 의해 기인하였다. 이들은 2.3에서 분류한 III형에 속하며, 표층세립토층 깊이가 '0'인 곳에는 분포하지 않는다. 이는 자갈하상의 나지상태에서 안정식생역이 확대하기 위해서는 표층세립토층이 존재해야 한다는 것을 뜻한다. 그림 7의 I형에서 III형으로 입지조건 변화이다. 이와 같은 입지조건 변화에는 I형에서 세립토사가 퇴적함에 따라 곧바로 III형으로 되는 경우와 II형을 거쳐 III형으로 천이하는 경우가 일어난다는 것을 알 수 있었다. 즉, 자갈하상 나지에 달뿌리풀이 발아 및 정착, 성장하고, 홍수시 달뿌리풀이 흐름에 영향을 미쳐 부유사에 의한 세립토사가 퇴적하면서, II형 혹은 III형이 되고, 궁극적으로 III형으로 천이했음을 뜻한다. 한편, III형에 속하는 4개 군락사의 변화는 반드시 물리적 과정을 요구하지 않으므로, 기본적으로 식물군락의 사회적 질서규제(내인적 질서규제)에 의해 생물학 천이가 진행될 것으로 유추해 볼 수 있다.

이를 토대로 사진 1과 같이 자갈하상의 나지형태 지피(I형, '74년 사진전경)에서 안정식생역(III형, '96년 사진전경)으로 이어지는 과정

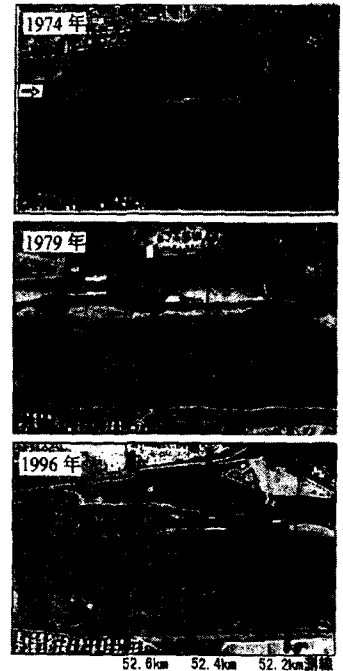


사진 1. 안정식생역의 진행전경 (나가타바시 지구, '74년은 중심부 나지, '96년은 '74년의 나지부에 식생이 밀생)

을 종합하면 그림 9와 같다. 여기서 짙은 검은 화살표는 입지조건
의 물리적 과정이 상대적으로 상
당히 중요한 변화를 나타내며, 얇은
화살표는 생물적 과정이 중요
한 변화를 나타낸다. III형에 이르
기 위해서는 반드시 퇴적이라는
입지조건 물리적 과정이 요구됨
을 나타내고 있다. 한편, 입지조건
의 물리적인 변화를 받아 식물군
락이 바뀌는 경우, 혹은 III형, II
형 가운데 식물군락사이 어떻게
변하는가하는 것은 생물적인 과정
이 중요하다. 참고로, 그림 9에서
는 홍수에 의한 식생과피는 포함
하지 않았다. 이 변화는 3.에서 살
펴본 바와 같이 홍수의 규모에 따
라 각장소에서 하상재료의 이동
형태를 조사함으로써 추정가능할
것으로 기대된다.

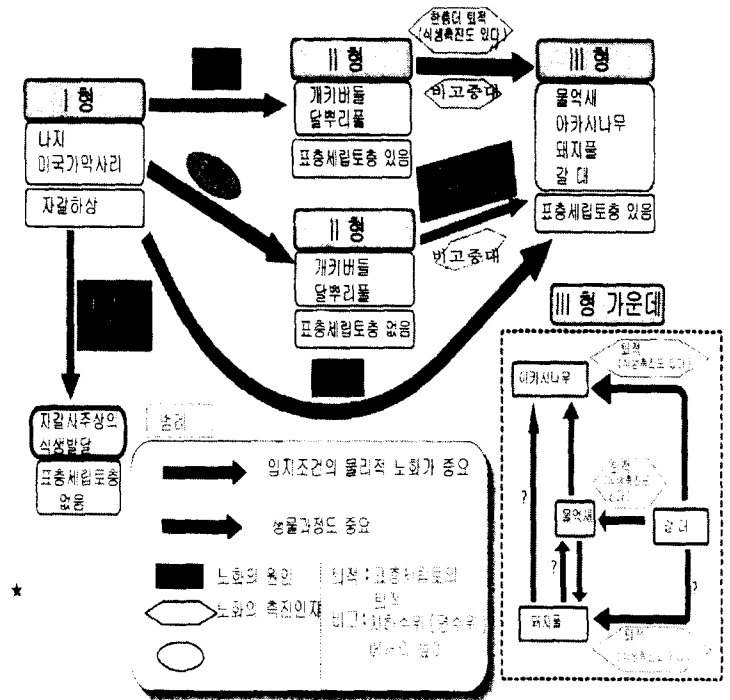


그림 9. 자갈하상에서 안정식생역의 발달과정

5. 결론

다마가와(多摩川)의 자갈하천 구간에서 일어나고 있는 안정식생역의 확대과정을 통해 수리학적 생태학적으로 상세히 조사·분석한 결과, 하도내 식생의 동태와 하상변동이 상호 밀접한 관계에 있음이 정량적으로 입증되었다. 이를 통해 자갈하상에서 안정식생역의 발달과정에 대한 예측기법의 개발에 대한 가능성을 제시하였다.

감사의 글

본 연구를 수행함에 있어 일본 하천환경관리재단 야마모토(山本) 기술고문님, 일본 건설성 토목 연구소 후지타(藤田) 하천연구실장님께서 현장조사에 대한 많은 지원과 자세한 가르침을 주셨습니다. 이에 대해 깊은 감사를 드리는 바입니다.

참고문헌

- Auble, G.T., J.M. Friedman and M.L. Scott, 1994. "Relating riparian vegetation to present and future streamflows", *Ecological Applications*, Vol.4, No.3, pp.544-554.
- Itakura, T. and T. Kishi, 1980. "Open channel flow with suspended sediments", *Pros.ASCE, Journal of the Hydraulics Division*, 106, HY8, 1325-1343.
- Rosgen, D., 1996. *Applied River Morphology*, Hilton Lee Silvey.
- 建設省九州地方建設局, 1997. 河道内における樹林化質態調査報告書.
- 藤田光一, John A. MOODY, 宇多高明, R.H. Meade, 1995. "川幅縮小機構についての考察-パウダー川と川内川の観察", 渡邊敏, 李參熙, 塚原隆夫, 1998. "礫床河川の植生繁茂におよぼす土砂堆積作用の重要度", 日本土木學會, 第4回 河道水理と河川環境シンポジウム論文集.
- 山本晃一, 藤田光一, 佐々木克也, 有澤俊治, 1993. "河岸形成における土砂と植生の役割", 土木技術資料, 第35巻8號, pp54-60.
- 池田駿介, 泉典洋, 1991. "浮流砂の横断方向擴散係數について", 日本土木學會 論文集, No.443.
- 清水義彦, Tsujimoto, T., 北村忠紀, 1991. "植生に覆われた砂床流れの浮流砂濃度分布", 日本土木學會 水工學論文集(第35巻).
- 鷲谷いづみ, 矢原敬一, 1996. 保全生態學入門, 文一総合出版.