

도시 저지대의 침수 원인 조사 대책

- 수원시 평동지구 침수 원인 분석 및 대책을 중심으로 -



오 경 두 ▶▶▶

육군사관학교 건설환경학과 교수
우리학회 수자원분과 위원장
한국물모듬 기술위원회 부위원장
한국방재협회 자문위원
okd0629@kma.ac.kr



심 순 보 ▶▶▶

(주)이 산 상임고문/충북대학교 명예교수
한국수자원학회/대한토목학회 참여회원
한국방재협회/한국하천협회 자문위원
shimsb2100@dreamwiz.com



심 기 오 ▶▶▶

소방방재청 방재연구소 풍수해방재연구팀장
shimko@nema.go.kr

사진 1.1은 2009년 7월 12일 집중호우기간에 침수 피해를 입은 평동 침수지역을 나타낸 것이다.

평동 침수지역에서 서호천을 따라 2.4km 상류에 위치한 서호저수지는 정조 23년(1799년)에 축조되었다. 서호저수지의 집수면적은 21.23km²로 만수시 저수지 수면적은 24ha이며 최대 담수량은 1,200,000m³이다. 저수지 제방은 코아형 월댐으로 폭 4m 높이가 2m인 수문 4개가 있고 폭 58m의 월류형 여수로가 있다. 그리고 1975년 초당 50m³를 방수할 수 있는 폭 4m 높이가 2m의 철근콘크리트 박스형 사이펀이 설치되었다.

서호천은 안성천수계 황구지천의 지류인 지방2급 하천으로 유역면적은 30.85km²이며 매산천 합류후의 계획홍수량은 100년 빈도 405m³/s이다. 매산천은 평동천이라고도 하며 유역면적 2.14km²인 도시 소하천으로 평상시 유량은 거의 없으며 홍수소통만을 담당

1. 개요

2009년 7월 12일 새벽 2시경부터 수원지역에 내린 집중호우로 수원시 권선구 평동 일대 주택 159가구, 농경지 5필지, 사업장 4개소가 침수되었다. 필자들은 한국방재협회 요청에 의하여 7월 17일 소방방재청 재해경감대책협의회 전문가 현지조사를 실시하였다. 그 후 자료수집 및 분석을 거쳐 8월 중순에 재해경감대책협의회 보고서를 제출하였다. 보고는 동 보고서의 내용을 기초로 작성한 것이다.



사진 1.1 수원시 권선구 평동 침수지역 위치도



사진 1.2 매산천 하류부(교량에서 하류방향으로 바라본 모습)

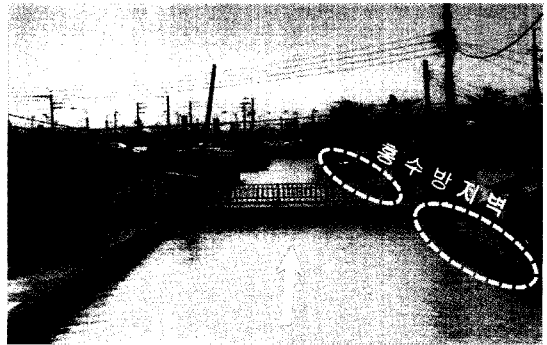


사진 1.4 매산천 범람 모습(출처: 수원시 제공)

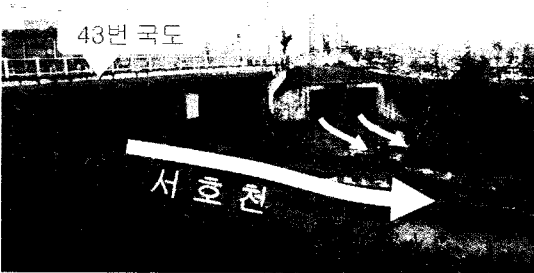


사진 1.3 매산천 하구 서호천 합류부(2련 박스)

하고 있다. 사진 1.2에서 매산천 우안 평동지역을 따라 높이 1m의 홍수방지벽이 설치된 것을 볼 수 있다. 사진 1.3은 매산천이 서호천에 합류하는 하구부 모습이다. 2련 박스로 되어 있고 박스 위로는 43번 국도가 지나가고 있다. 사진 1.4는 금번 침수시 매산천의 범람 모습이다. 사진 1.2를 촬영했던 교량은 상판만 물위에 나와 있으며, 매산천 우안 나무가 서 있는 지점 하류쪽으로는 홍수방지벽이 물속에 잠겨 있다. 홍수흔적조사를 통하여 당시 최고 수위는 EL.26.5m인 것으로 분석되었다.

2. 강우 분석

금번 평동지역 침수를 발생시킨 강우를 티센법과 레이더 강우 처리기법인 RAIDOM¹⁾ 기법으로 분석하였다. 시간별 지상 관측 강우량은 표 2.1과 같다.

표 2.1 시간별 강우량 (단위:mm)

시 간 (2009년 7월 12일)	관 측 소					
	수원 기상대	수원 시청	장안 구청	권선 구청	팔달 구청	입북동 사무소
02:00~03:00	8.0	8.5	14.0	8.0	7.0	10.5
03:00~04:00	29.5	30.0	40.5	29.5	25.0	30.5
04:00~05:00	33.0	42.5	26.5	39.0	35.0	17.5
05:00~06:00	36.0	30.5	48.0	37.0	38.0	44.5
06:00~07:00	30.0	23.0	44.0	30.5	25.5	40.0
07:00~08:00	34.5	38.5	56.0	35.0	37.5	32.5
08:00~09:00	44.5	41.5	40.5 ²⁾	49.0	45.0	41.5
09:00~10:00	27.0	26.5	29.5	30.0	27.5	32.0
10:00~11:00	11.5	12.0	12.0	12.5	8.0	10.5
11:00~12:00	15.0	16.5	23.5	16.0	16.0	13.0
12:00~13:00	1.5	4.5	3.0	2.0	3.0	1.5
합 계	270.5	274.0	337.5	288.5	267.5	274.0

1) RAIDOM 기법은 오경두교수가 개발한 레이더 강우 이미지 디지털 자료 변환 기법으로서 기상청 인터넷 홈페이지에서 레이더 이미지를 다운로드 받아 강우자료를 생성하는 기법이다. 보다 자세한 내용은 물과 미래 5월호 특집 「미래지향적인 소하천 치수계획을 위한 소고」와 제20회 수공학위협교재 「제IV편 레이더강우에 의한 홍수유출 모의」 및 강의 동영상(한국수자원학회 홈페이지 <http://www.kwra.or.kr> 자료실-수공학위협교재)을 참고하기 바란다.

2) 표 2.1에서 수원시에서 제공한 장안구청의 08:00부터 09:00사이의 강우량은 오류로 판단되어 동일 시간대의 레이더 강우량을 이용하여 보정하였다. 수원시청의 지상측정 강우량 41.5mm를 기준으로 동시간대 두 지점의 레이더 강우량 비 0.97을 곱한 값을 0.5mm 단위로 반올림하여 장안구청지점의 강우량 40.5mm를 구하였다.

표 2.1에서 수원기상대 자료를 제외한 나머지 자료는 수원시에서 제공한 자료들이다. 2009년 7월 12일 내린 호우는 국지적인 특성이 강한 호우로서 서호천 유역의 북동쪽에 위치한 장안구청지역의 강우가 가장 많았던 것으로 분석되었다.

그림 2.1은 6개 지상관측소에서 관측된 시강우량을 이용하여 분포형 강우-유출모형의 입력자료를 구축하기 위한 티센다각망이다. 서호천유역 외부의 인접한 관측소를 티센다각망에 포함시키기 위하여 분포형 강우-유출모형의 모의영역 보다 넓은 범위를 티센영역으로 선정하였다. 서호천유역에 대한 각 관측소의 티센 영역을 살펴보면 강우량이 가장 많았던 장안구청의 티센 영역이 가장 넓은 것을 알 수 있다. 서호천 상류에 위치한 장안구지역은 해발 582미터의 광교산 등 산악지형을 형성하고 있는데 이러한 지형

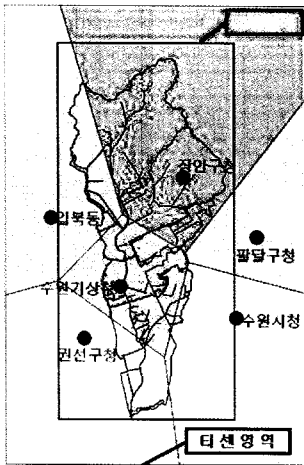


그림 2.1 티센 강우 계산 다각형

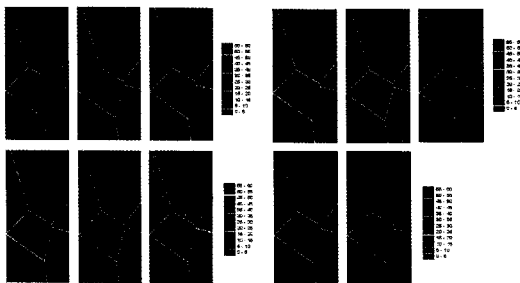


그림 2.2 티센 시강우 자료(2009.7.12 2:00~13:00)

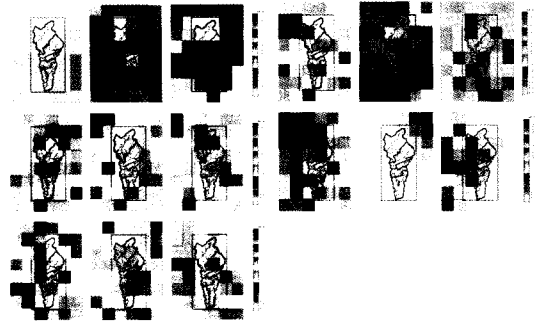


그림 2.3 레이더 강우자료(2009.7.12 0:00~14:00)

적인 특성이 강우량에 영향을 미친 것으로 추정된다.

서호천유역에서 관측된 호우의 시간당 최대 강우강도는 60mm/hr 이내로서 5년 빈도 이내의 비교적 약한 호우였다. 그러나 6시간 이상의 지속기간에 대한 강우량은 50~80년 빈도 정도로 분석되었으며, 이렇게 6시간 이상 지속된 강우는 서호천을 포함한 황구지천수계 상류유역의 임계지속기간을 포함하고 있어서 하천의 대규모 범람을 유발한 것으로 추정된다.

강우-유출 모의에는 지상관측 강우량과 레이더 강우량의 두 가지 강우량을 적용하여 비교하였다. 그림 2.2는 ArcView에서 시간별 티센 강우 그리드를 작성하여 모의영역만을 잘라낸 것으로 분포형 강우-유출모형의 시간별 강우입력자료들이다.

그림 2.3은 기상청 레이더 강우 영상을 RAIDOM 기법으로 처리하여 디지털 강우 그리드자료로 변환한 것이다. 레이더 강우는 지상관측 강우를 이용하여 보정하였다. 이와 같이 레이더와 지상관측소를 함께 이용하는 멀티센서(multi-sensor)체계의 경우 지상에서 관측된 정확한 강우량과 불균일한 강우의 공간분포를 제공하는 레이더 강우의 강점을 결합하여 매우 정확한 강우량 분포를 구할 수 있다. 그림 2.3에는 매시 정각의 강우자료를 보여주고 있지만 분포형 모형에는 20분 간격으로 입력하였다. 기상청 레이더 강우는 10분 간격으로 작성되므로 10분 간격으로 입력 가능하지만 유역 크기 등을 감안하여 20분 간격으로 입력하였다.

그림 2.4는 2009년 7월 12일 02:00부터 13:00까



(a) 지상관측강우 (b) 레이더강우

그림 2.4 누적강우량 비교(2009.7.12 2:00~13:00)

지 11시간 동안 내린 누적강우량을 비교한 것이다. 지상관측소에서 관측된 누적강우량은 250~350mm였으며 장안구청이 많고 나머지 관측소는 큰 차이가 없었다. 그러나 레이더 누적강우량은 200~400mm로 강우 편차가 클 뿐만 아니라 공간적인 분포도 훨씬 복잡하게 나타났다. 흰색 점선 원안에 위치한 지역이 매산천유역으로 금번 침수가 발생한 평동지구는 이 유역의 하구부에 위치하고 있다. 매산천유역은 다른 지역보다 강우량이 상대적으로 적은 것으로 분석되었다.

금번 7월 12일 호우가 발생하기 한 달 전부터 수원 기상청에 기록된 일강우량을 정리하면 표 2.2와 같다. 6회에 걸쳐 265.5mm의 많은 비가 내렸으며 특히, 2일전에 131.0mm의 집중호우가 내렸고 전날까

표 2.2 선행 강우량

일 시	일강우량(mm)	비 고
2009년 6월 20일	39.0	
2009년 6월 29일	37.5	
2009년 7월 2일	55.5	
2009년 7월 7일	2.5	
2009년 7월 9일	131.0	침수 2일전 발생
2009년 7월 11일	1.5	
합 계	265.5	-

지도 약간의 비가 내리면서 유역 토양이 포화 상태를 유지하고 있었다.

3. Vflo™ 강우-유출모형 구축

본고에서는 평동지구를 포함한 서호천유역의 강우 유출을 모의하기 위하여 Vflo™ 분포형 강우-유출모형을 구축하였다. Vflo™ 분포형 모형은 유역을 정사각형 그리드 셀의 집합으로 구성하며 운동파방정식(kinematic wave analogy)에 의한 유역 및 하도추적을 수행한다. 그림 3.1에 제시된 바와 같이 Vflo™ 분포형 모형의 매개변수는 수치고도모형(DEM), 토지피복도, 토양도의 3가지 기본주제도로부터 GIS기법으로 일괄 처리하여 산정하며 지상관측 강우뿐만 아니라 레이더 강우를 포함한 이동강우의 모의가 가능하다.

분포형 모형은 물리적 매개변수와 동수역학적 홍수추적기법을 채택하여 강우유출모형의 신뢰성과 일관성을 크게 제고시켰을 뿐만 아니라 집중형모형의 결함인 스케일 문제³⁾가 발생하지 않아서 유역 규모에 상관없이 대유역과 소유역을 동시에 모의할 수 있다. 그림 3.2는 서호천유역의 분포형 모형 매개변수 구축에 적용된 수치고도모형(DEM), 토지피복도, 토양도들이다.

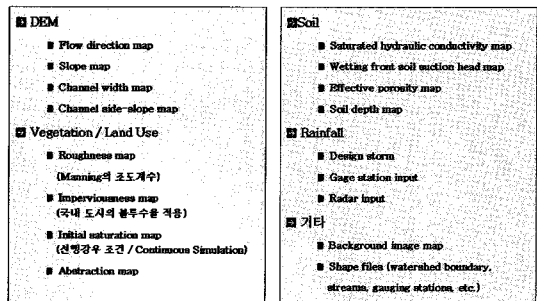
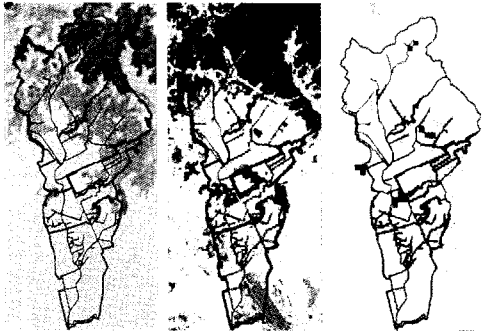


그림 3.1 분포형 모형 입력자료(오경두 등, 2006)

3) 현재 널리 사용되고 있는 Clark 합성단위도법 등의 집중형 모형(lumped model)은 유역을 세분하면 할수록 유역 하구의 홍수량이 증가하는 스케일 문제가 발생한다. 이를 최소화할 수 있는 적절한 소유역 분할 규모로 50~100km² 정도를 적용하고 있다.



(a) 수치고도모형(DEM) (b) 토지피복도 (c) 토양도

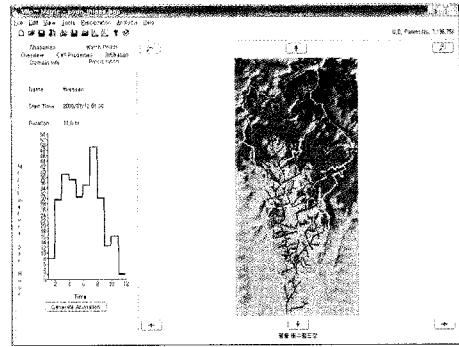
그림 3.2 분포형 모형 매개변수 기본주제도

수치고도모형(a)으로부터 지표면 흐름방향, 지표면 및 하도 경사, 하도망, 하폭, 하천 제방경사 등의 매개변수를 작성하였다. 토지피복도(b)로부터는 지표면 및 하도의 조도계수, 도시화지역 불투수율 등의 매개변수를 작성하였으며, 토양도(c)로부터는 투수계수, 토양흡인수두, 토양공극율, 토심 등 침투관련 매개변수를 작성하였다. 상세한 매개변수 작성절차와 기준 값 등은 제20회 수공학원상포재 및 강의 동영상 을 참고하기 바란다.

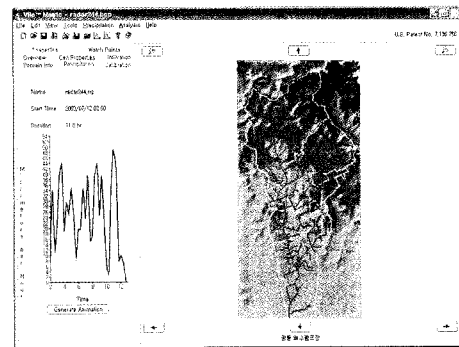
그림 3.3은 수치고도모형, 토지피복도, 토양도로부터 작성한 매개변수와 지상관측강우와 레이더강우를 각각 입력하여 구축한 분포형 강우-유출모형이다. 분포형 모형의 격자가 30m 간격으로 조밀하여 배경 유역도가 나타나지 않기 때문에 격자는 표시하지 않았다. 모의 영역은 가로방향으로 194열, 세로방향으로 405행으로 서호천유역을 포함하고 있는 5.82km×12.15km의 직사각형 영역이다.

그림 3.4는 구축된 분포형 강우-유출모형에서 평동배수펌프장유역을 확대하여 나타낸 것이다. 그림 3.3에서는 격자를 표시하지 않았지만 그림 3.4에는 격자를 표시하였다. 평동배수펌프장유역은 서호천과 매산천 사이에 위치한 매우 작은 유역이다. 하수관망도를 이용하여 지표면 흐름체계를 구성하였다.

Vflo™ 분포형 모형에서 원하는 지점을 선택하여 클릭하면 해당 지점으로 유입되는 셀들에 대한 종합적인 자료를 제공해준다. 그림 3.5는 평동배수펌프장



(a) 지상관측강우



(b) 레이더강우

그림 3.3 분포형 강우-유출모형 구축

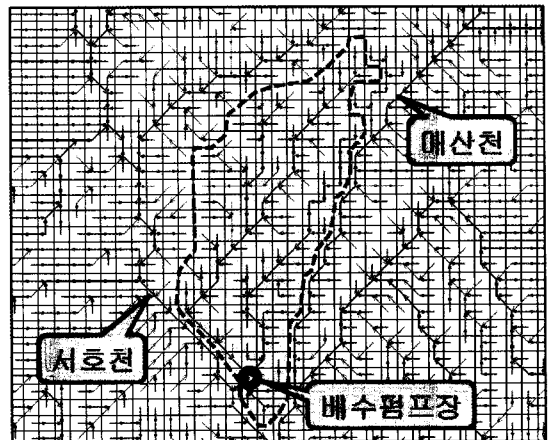


그림 3.4 평동 배수펌프장 유역 강우-유출 모형

유역에 대한 유역특성, 매개변수(최소치-평균값-최대치), 강우자료 등을 나타낸 것이다.

평동배수펌프장유역은 집수면적이 0.15km²로 하수도 관망을 나타내는 하도셀 44개와 지표면 유출 셀 74개를 포함한 총118개의 셀로 구성되어 있다. 평균

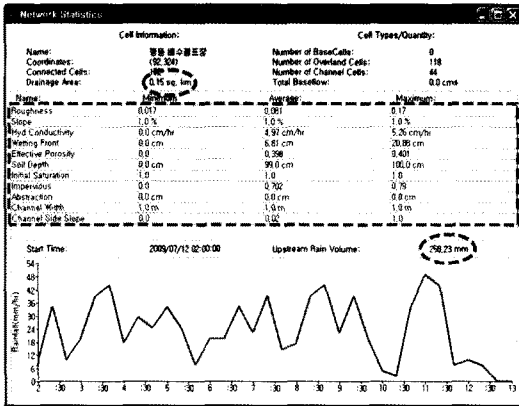


그림 3.5 평동 배수펌프장 유역 특성

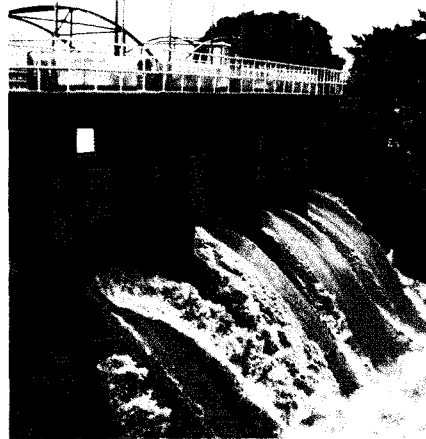


사진 4.1 서호 배수갑문 방류 모습
(출처: <http://blog.daum.net/kim5250/11291784>)

조도계수는 0.081이고 유역경사는 1%로 도시화된 평지를 형성하고 있다. 박스 하단의 그래프는 시간별 유역평균 레이더 강우량을 나타낸 것이다. 유역평균 총강우량은 258.23mm이다.

4. 홍수량 산정

평동배수펌프장유역을 포함한 서호천유역의 홍수량을 산정하기 위하여 호우사상이 발생하기전 유역 토양의 초기함수조건을 60%, 80%, 100% 등 3가지 경우로 구분하여 검토하였다⁴⁾. 한편 서호에는 4개의 수문과 초당 50m³를 방수할 수 있는 사이펀이 설치되어 있는데 수문은 국립식량과학원에서 관리하고 있으며 사이펀은 일정 수위에 도달하면 자동으로 작동하게 되어 있다⁵⁾. 서호의 수문관리대장에는 시간대별로 개방한 수문의 숫자만 기록되어 있어 저수지 추적이 어려운 여건이어서 유입량이 그대로 방류되는 조건으

로 모의하였다. 수문관리대장에 의하면 2009년 7월 11일 23:00에 집중호우에 대비하여 2개의 수문을 개방하여 예비방류를 실시하였으며, 집중호우가 내린 7월 12일 05:10에 3문, 05:50에 4문의 수문을 전부 개방하였다.

그리고 07:40부터 10:50까지 사이펀이 작동하였다⁶⁾. 사이펀 방수량은 Vflo™ 분포형 모형에서 관측유량(observed data)으로 별도로 입력하였다. 그런데 사이펀으로 방류되는 유량도 역시 서호로 유입되는 유량의 일부이므로 서호의 방류량이 중복되어 계산되어진다. 물론 서호저수지의 60만m³ 이상의 유효저수용량이 완충적인 역할을 담당할 수 있지만 저수지 추적이 어려운 상황에서 이를 반영하는 것은 쉽지 않은 일이다. 따라서 본고에서는 사이펀 방수량의 영향을 0%, 50%, 100%로 구분하여 검토하였다. 사이펀 방수량의 영향이 0%라는 것은 사이펀의 방수량을 포함한 방류량이 그 시점의 서호저수지 유입량과 일치하는 것이고,

- 4) 앞의 2. 강우분석에서 제시된 바와 같이 선행강우가 많아서 유역 토양이 포화상태에 가까운 매우 습윤한 상태였을 것으로 판단하였다. 여기에서는 토양습윤상태에 따른 강우-유출을 비교하기 위한 목적으로 약간 습윤한 상태(60%), 상당히 습윤한 상태(80%), 포화상태(100%)로 구분하여 검토하였다.
- 5) 길에스브론슨(<http://blog.daum.net/kim5250/11291784>)에 의하면 예전에 집중호우로 서호가 범람하면서 독이 붕괴되어 큰 피해를 입은 적이 있다고 한다. 사이펀은 독을 보호하기 위한 조치로 보인다.
- 6) 평동사무소에 의하면 평동지역의 침수는 07:50에 보도블럭이 수중에 떠다닐 정도의 강력한 하수도 역류와 매산천에 연한 홍수방지벽의 월류가 동시에 발생하면서 시작되었고 이후 침수상태를 유지하다가 11:00에 급격하게 물이 빠져나갔다. 서호에서 2.4km 하류에 위치한 평동지역의 침수 및 퇴수 시간과 사이펀 작동 시간 사이에 정확하게 10분의 시간차가 발생하고 있다.

100%라는 것은 서호저수지 유입량에 사이펀 방수량을 더한 유량이 방류량이라는 의미이다.

강수량은 지상관측소에서 관측된 티센 시강우량과 20분 간격의 기상청 레이더강우를 적용하였다. 유역 토양의 초기함수조건 3가지와 사이펀 방류량 영향 3가지에 지상관측강우량과 레이더강우량 2가지를 적용하여 모의한 홍수량 산정 경우는 총18개 케이스이다. 본고에서는 매산천을 연한 홍수방지벽을 월류한 시점과 퇴수한 시점이 관측되었으므로 이를 이용하여 홍수 수문곡선의 적합도를 판정하였다. HEC-RAS를 이용하여 작성된 매산천 합류점의 수위-유량곡선으로부터 홍수방지벽을 월류하는 유량이 286m³/s로 분석되었다. 모의한 18가지 케이스 중에서 홍수량이 증가하면서 월류를 시작하는 시점 중에 가장 시간적으로 차이가 큰 경우는 09:35으로 시간 차이는 105분이다. 한편, 홍수량이 감소하면서 수위가 홍수방지벽 아래로 하강하는 시점 중에 가장 시간적으로 차이가 큰 경우는 09:00로서 시간 차이는 120분이다. 각 케이스별 비교를 위한 상대 점수는 다음의 식으로 산정하였다. 월류시간과 퇴수시간이 모두 일치하면 100%이고 월류시간과 퇴수시간 둘 다 관측된 시간과 차이가 가장 클 경우 0%가 된다.

$$\text{상대점수}(\%) = 100 - \left(\frac{\text{월류시간 차이}}{105} \times 50 + \frac{\text{퇴수시간 차이}}{120} \times 50 \right)$$

표 4.1에 제시된 바와 같이 유역 토양의 초기함수비가 60%인 경우 사이펀이 작동하지 않았거나 사이펀 방수량의 영향이 50% 이내일 경우 매산천 합류점 수위는 월류 수위 EL.26.5m 이내로 평동지역은 월류에 의한 침수피해를 입지 않을 것으로 분석되었다.

지상관측강우의 경우 유역 초기함수비 80%와 사이펀 방수량이 100% 영향을 미치는 조건에서 상대 점수는 61.6%로 가장 높았다. 지상관측강우는 전반적으로 조기에 월류가 발생해서 조기에 퇴수가 이루어지는 것으로 모의되었다.

레이더강우는 호우 발생 이전 유역 토양의 습윤도가 증가할수록 상대 점수가 높게 나타났다. 유역 토양이 100% 포화된 상태에서 사이펀이 100% 영향을

표 4.1 강우-유출 모의 조건별 월류/퇴수 발생 시간 비교

초기함수비 (%)	사이펀 (%)	상대 점수		비 고
		지상관측강우	레이더강우	
60	0	-	-	월류수위 미달
	50	-	-	
	100	48.5% (08:15~09:25)	31.3% (09:35~10:15)	
80	0	42.9% (07:35~09:00)	55.1% (08:45~10:15)	월류/퇴수 발생시간에 따른 상대점수 부여
	50	51.8% (07:45~09:10)	68.8% (08:25~10:25)	
	100	61.6% (07:35~09:45)	87.9% (08:05~10:50)	
100	0	13.4% (06:20~09:15)	83.0% (07:45~10:25)	
	50	24.1% (06:25~09:35)	91.4% (07:45~10:45)	
	100	32.4% (06:25~09:55)	95.5% (07:45~11:05)	

주는 조건에서 월류 수위와 퇴수 수위에 도달하는 시간은 관측된 시간과 각각 5분 이내로 일치하여 가장 높은 상대 점수 95.5%를 나타냈다. 레이더강우의 경우 전반적으로 지상관측강우 보다 관측된 월류 및 퇴수 시간과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

그림 4.1은 유역 토양이 100% 포화된 상태에서 사이펀이 100% 영향을 주는 조건에서 매산천 합류점의 시간별 홍수량과 범람 수위와의 관계를 나타낸 것이다. 이 지점 상류에서 관측된 평균 강우량은 311.32mm이며, 사이펀 유량이 반영된 평균 유출고는 328.79mm로 계산되었다. 강우-유출모의 결과 침투홍수량은 391.98m³/s로 09:30경에 발생하는 것으로 계산되었다. 계산된 침투홍수량은 월류 발생 시각의 홍수량 보다 106m³/s 정도 증가하지만 평동사무소에 의하면 침수지역의 수위는 별다른 변화가 없었다고 한다. 이것은 월류 이후에 침수구역이 천변저류지 역할을 했기 때문으로 판단된다.

그림 4.2는 평동배수펌프장으로 유입되는 홍수량 수문곡선이다. 평동배수펌프장은 펌프정 수위가 3.4m에 이르면 펌프 1기가 가동하고, 3.8m에 이르면 2기가 자동으로 가동하게 되어 있다.

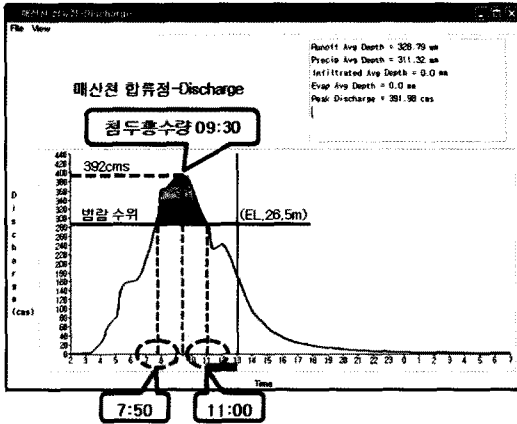


그림 4.1 범람 수위와 시간별 홍수량 관계

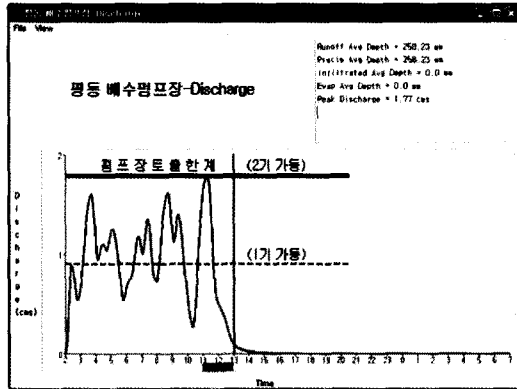


그림 4.2 펌프장 유입 홍수량 수문곡선

평동배수펌프장 가동자료에 의하면 7월 12일 05:00부터 14:00까지 2기가 가동했고 그후 15:40까지 1기가 가동했으며 15:40에 펌프 가동이 종료되었다. 평동배수펌프장유역에 내린 강우량은 258.23mm였으며 유입 첨두홍수량은 1.77m³/s로 펌프장 토출능력 1.8m³/s 이내였다. 그런데 강우가 종료된 13:00 이후로도 2시간 40분이나 펌프가 계속 가동된 것은 매산천이 월류하면서 유입된 외수와 하수도 관로로 역류한 외수 때문으로 판단된다(역류에 대한 상세한 설명은 5. 침수원인과 대책 참조). 평동지구 침수는 도시유역의 자체 유량이 비록 적더라도

직접적인 영향을 줄 수 있는 지배구역에 의하여 침수가 발생할 수 있음을 보여주는 중요한 사례이다. 평동지구 침수를 유발할 수 있는 지배구역은 서호천 중상류(서호저수지와 사이편 포함)와 하폭이 좁고 보가 설치된 서호천 하류 및 매산천 등을 포함한다.

5. 침수원인분석과 대책

5.1 우수관망체계

침수원인을 분석함에 있어서 침수 당시의 시간별 침수 상황을 정확하게 파악하는 것이 무엇보다도 중요하다. 그림 5.1 (a)는 평동사무소에서 침수상황을 시간대별로 관내 지도에 표시한 것이다. 그림 5.1 (a)의 침수상황도에서 노란색으로 표시된 지역은 07:00경에 침수발생 신고가 접수된 지역들이다. 그림 5.1 (b)는 필자들이 하수관망도를 이용하여 우수배제체계와 외수범람 이전에 침수가 신고된 지역을 표시한 것이다.

서호천 수위 상승에 따른 매산천의 월류는 07:50에 발생했고 이 지역들의 침수원인은 외수의 범람과 무관하므로 내수침수 피해지역으로 분류했다. 침수지역의 하수관망 구성을 기준으로 A지구, B지구, C지구의 3개 내수피해 침수지역으로 구분하였다.

A지구는 연립주택지역으로 지형 구조상 이 지역을 배수하는 600mm 하수관로 중에 그림 5.1 (b)의 1번 지점 관로가 역구배를 형성하고 있는 것으로 판단된다⁷⁾. 또한 2번 지점의 관로는 상류에서 비교적 급한 경사로 내려오는 같은 직경의 600mm 하수관로에 거의 직각으로 합류하고 있다. 이와 같이 하수관로가 자연적인 물 흐름을 무시하고 매설된 것은 매설이 용이한 도로를 따라서 매설하였기 때문으로 판단된다. 합류후의 하수관거는 800mm 관으로 관경이 증가되었다가 3번 지점에서 관경이 다시 600mm로 감소하는 우수관망체계의

7) 평동사무소에 의하면 외수가 퇴수한 후에도 연립주택 지역의 물이 배수되지 않아서 주민들이 중장비를 동원하여 배수로를 개척하였다고 한다.

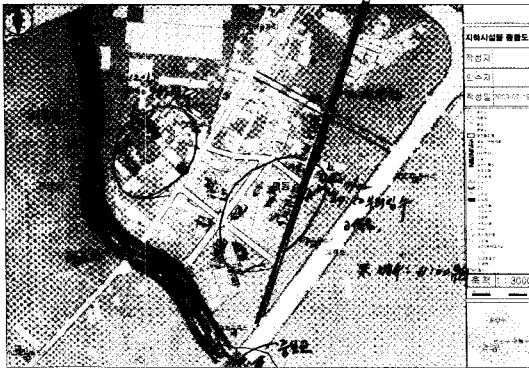


그림 5.1 (a) 침수상황도(좌) (b) 내수 침수원인 분석도(우)

표 5.1 내수 침수피해 원인 및 대책

피해 지역	피해 원인	대 책	비 고
A지구	역구배, 관경 축소	관로 이설, 관경 확대	SK케미칼 인근 연립주택지역
B지구	관경 축소, 역구배 가능성	관경 확대, 관로 구배 확인 점검	매산천변 저지대 단독주택지역
C지구	통수능 부족	관경 확대	근린공원주변 단독주택지역

불합리한 점이 조사되었다.

B지구는 매산천을 연한 단독주택지역으로 일부 지형적으로 도로보다 낮은 저지대를 형성하는 지역이기도 하지만 특히 4번 지점에서 관경이 600mm에서 450mm로 감소하는 것으로 조사되었다. 그리고 지형적 특성으로 볼 때 매산천을 연한 하수관로는 역구배를 형성하고 있을 가능성이 높은 것으로 판단된다.

C지구는 450mm 지선 1개와 600mm 지선 4개가 합류된 유량을 5번 지점에서 700mm 관으로 배수하고 있어 통수능이 부족한 것으로 판단된다.

그림 5.2는 2009년 7월 12일 일요일 07:50경 매산천 외수가 홍수방지역을 넘어 역류하는 상황에서 하수관이 동시에 역류하면서 범람지역이 확대되는 상황을 나타낸 것이다. 평동사무소에 의하면 이때 매산

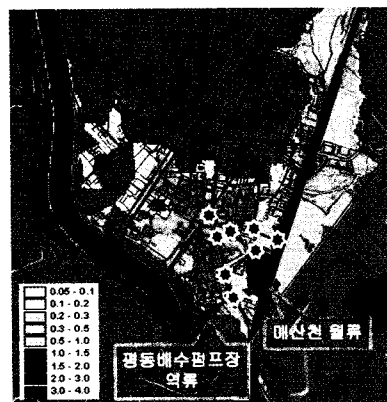


그림 5.2 평동지역 외수 침수 범람도

천 외수위와 평동 저지대의 내수위는 약 1m 정도 수위차가 있었다고 한다. 이러한 수위차로 인한 강력한 하수관 역류로 매산천을 연한 도로상에 큰 공동이 형성되었던 것으로 판단된다(사진 5.1)⁸⁾.

5.2 배수펌프장

평동배수펌프장유역은 외수와 연결되는 지점이 배수펌프장 한 곳 뿐이다. 평동배수펌프장 일반현황에 의하면 배수펌프장은 2001년 준공되었으며 1.5m×1.5m 역류방지수문 1문과 범람방지수문 4문이 설치

8) 주민이 당시 매산천 월류와 도로상에 형성된 공동에 대해 설명하고 있다. 대문 밖 도로 바닥이 지진이 난 것처럼 흔들렸으며 강력한 수압으로 보도블럭이 물속을 떠 다녔다고 한다. 그리고 도로에 형성된 공동으로 인하여 대피과정에서 큰 위험을 당할 뻔했다고 한다. 매산천에 인접한 이 지점은 지표면 표고가 EL.25.5m 정도로 하수관망이 지나가는 지점 중에 가장 저지대에 속한다.



사진 5.1 하수관 역류로 인한 공동 형성



사진 5.2 외수가 역류한 경로로 추정되는 역류방지수문

되어 있다. 사진 5.2는 서호천 외수의 유입경로로 추정되는 역류방지수문이다. 평상시 평동배수펌프장유역내에서 발생하는 유량은 이 수문을 통하여 서호천으로 자연방류되며 외수위 상승시 수압에 의해 자동으로 차단되어 역류를 방지하는 중요한 침수방지 시설이다. 역류방지수문이 제대로 작동하지 않았을 경우 서호천의 외수가 직접 평동지역으로 유입되었을 수 있다. 7월 12일 07:50경 서호천 외수위가 급상승함에 따라 외수가 역류방지수문을 통하여 하수관망에 유입되면서 평동지역에 강력한 하수관 역류가 발생한 것으로 판단된다. 앞의 그림 4.2에 제시된 바와 같이 07:50경 평동배수펌프장유역의 유입 홍수량은 펌프 1기만 가동해도 충분히 배수할 수 있는 양이었으므로 내수로 인한 하수관망의 역류 가능성은 희박하다고 판단된다.

5.3 침수방지 방안 검토

그림 5.3은 7월 12일 침수 당시의 수위를 HEC-

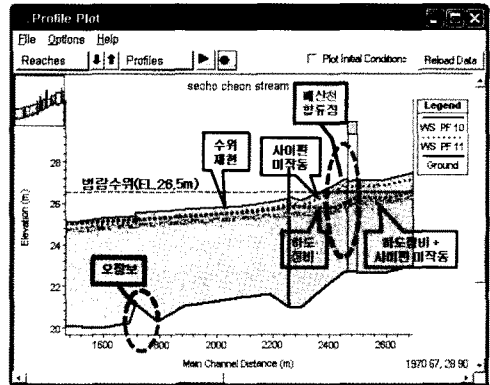


그림 5.3 침수방지 방안별 계산된 홍수위

RAS를 이용하여 재현한 후 사이펀 미작동, 하도 정비, 사이펀 미작동과 하도 정비를 동시에 수행하는 3가지 방안에 대하여 매산천 합류점 수위 변화를 모의한 것이며 표 5.2에 그 효과를 비교하여 정리하였다. HEC-RAS 수위 모의시 평동지역의 침수지역을 홍수터로 입력하지 않고 하도만을 대상으로 모의한 결과 매산천 합류점의 서호천 수위는 EL.27.1m까지 상승할 것으로 분석되었다. 그러나 침수발생 당시 평동의 침수위는 EL.26.5m로 계산치 보다 0.6m 낮았다. 이것은 평동 침수지역이 마치 천변저류지와 같은 역할을 담당하면서 서호천 수위가 더 이상 상승하는 것을 막았기 때문으로 분석된다.

대책 1안으로 사이펀을 미작동할 경우에 대하여 분석한 결과 매산천을 연한 홍수방지벽의 월류가 여전히 발생할 것으로 분석되었으며 침수지역의 범위는 사이펀 작동시와 동일하나 침수시간이 70분 단축되는 것으로 분석되었다.

대책 2안으로 현재 실시설계가 진행중인 서호천 개수공사가 이루어지는 경우를 상정한 하도 정비 방안을 모의한 결과 서호천 홍수위는 EL.25.8m로 홍수방지벽 하단 0.7m에 머물러 평동지역은 월류에 대하여 안전할 것으로 분석되었다. 서호천은 국토관리청(서울청)에서 100년 빈도를 계획빈도로 기존 하도폭 40m를 50m로 확폭하는 방안을 포함한 하도정비 실시설계가 진행중에 있다.

대책 3안으로 하도 정비가 이루어진 상태에서 사

표 5.2 침수방지 방안별 검토 결과

구 분	수위 (EL.m)	범람여부	비 고
수위 재현	26.5	범람	하도만을 고려할 경우 홍수위는 EL.27.1m
			하도만을 고려할 경우 홍수위는 EL.26.8m
사이편 미작동	26.5	미범람	서호천 개수공사 실시설계(서울청) 구간으로 현재 과업이 진행중에 있음 (하도 확폭, 하도 준설, 오장보 철거 등)
하도 정비	25.8		
대 책	하도 정비 + 사이편 미작동	25.6	

이편을 미작동할 경우 추가적으로 0.2m의 수위하강이 가능한 것으로 분석되었으나 서호저수지의 월류 위험을 방지하는 사이편 기능의 중요성을 감안할 때 하도 정비 이후에 사이편을 미가동하는 것은 타당성이 없는 것으로 판단된다.

매산천 하구부는 본류인 서호천에 합류하는 지점에서 서호천쪽으로 돌출한 선형을 형성하고 있다. 이러한 합류부의 불리한 선형으로 인하여 매산천의 우수흐름이 지체되는 영향을 받을 것으로 판단하였다. 본고에서는 그 영향을 저감하는 방안으로 매산천 하구부에 도류제를 설치하는 방안을 검토하였다. 그림 5.4는 SMS RMA2 2차원 수치모형을 이용하여 도류제 설치 전후의 유속을 비교한 것이며 그림 5.5는 도류제 설치 전후 수위변화를 비교한 것이다.

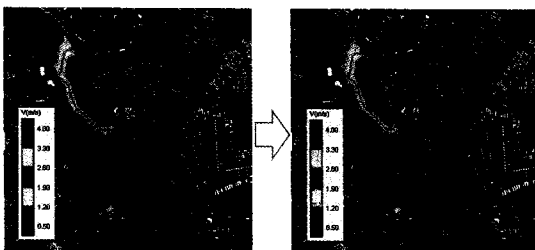


그림 5.4 매산천 하구부 도류제 설치 전후 유속 비교

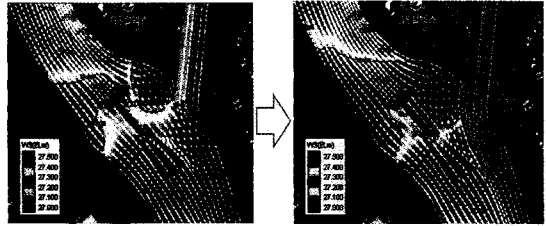


그림 5.5 매산천 하구부 도류제 설치 전후 수위 비교

도류제 설치로 서호천 본류는 합류부에서 5cm 이내의 국부적인 수위 상승이 발생하며 매산천은 10cm 정도의 수위 하강효과가 발생하는 것으로 분석되었다. 이와 같이 도류제 설치로 인한 효과가 비교적 미미한 것은 매산천의 유속과 유량이 서호천 본류에 비하여 상대적으로 작기 때문으로 판단된다. 이번 홍수 기간중 매산천의 침투유량은 28.2m³/s로 계산되어 서호천 본류 유량 363.8m³/s의 1/13 정도에 불과한 것으로 분석되었다.

5.4 침수원인 및 대책 종합 검토

결론적으로 평동지역의 침수를 근원적으로 방지하기 위해서는 현재 실시설계중인 서호천 개수공사를 조속히 시행하여 외수위가 과도하게 상승하는 것을 막아야 할 것으로 분석되었다. 그리고 금번 평동배수 펌프장유역에 내린 강우는 최대 강우강도가 시간당 60mm/hr 이내로 비교적 작은 편이었으나 펌프장 토출한계에 근접하는 유량이 발생하였다. 펌프장 용량 증설이 시급하다고 판단된다⁹⁾. 또한 외수위가 유입된 경로로 추정되는 역류방지수문을 비롯한 침수방지시설을 확인하고 정비하는 것이 필요하다고 사료된다.

6. 개선방안 및 결론

6.1 평동지구 침수사례의 교훈

9) 평동배수펌프장 일반현황에 의하면 100년 빈도로 설계되어 있으나 10년 빈도 호우에도 펌프 용량이 부족할 것으로 판단된다.

본고를 통하여 2009년 7월 12일 07:00경부터 13:00경까지 발생한 수원시 권선구 평동지구의 침수 원인과 대책을 사례로 조사 분석함으로써 도시저지대의 침수원인과 대책수립에 대한 보편적인 기준과 방안을 제시할 수 있을 것으로 분석되었다.

- 1) 침수피해를 입은 평동지역의 유역평균 강우량은 시간당 최대 60mm/hr 이내로서 시강우량 기준으로 5년 빈도 이내였으며, 전체 호우에 대한 누적강우량은 258mm로 약 30년 빈도에 해당되며 서호천유역내에서 상대적으로 강우량이 작은 지역으로 분석되었다.
- 2) 서호천 본류 유역의 유역평균 강우량은 매산천 합류점을 기준으로 누적강우량이 311mm로 80년 빈도에 해당하는 강우량이었다.
- 3) 평동지역에 당일 07:00경에 발생한 침수피해는 내수배제불량으로 인한 피해로 판단되며, 주요 원인은 하수관망의 역구배 형성, 관경 축소, 통수능 부족 등으로 판단된다.
- 4) 평동지역에 당일 07:50부터 11:00 사이에 발생한 광범위한 침수피해는 서호천 수위 급상승에 따른 매산천 외수 범람과 하수관망의 역류가 주요 원인이었다.
- 5) 서호저수지의 독을 보호하기 위해 설치된 사이펀의 자동 작동으로 서호천 본류의 홍수량은 계획 홍수량에 근접하였으며, 평동지역의 침수를 70분간 가중시키는 영향을 미쳤다. 방류시설 운영에 따른 하류부 영향을 검토하여 치수 대책을 수립하는 것이 필요함을 보여준 사례라고 할 수 있다.
- 6) 평동배수펌프장에 설치된 역류방지수문을 통하여 서호천 외수가 역류한 것으로 판단된다. 역류방지수문을 비롯한 침수방지시설의 주기적인 점검과 정비가 필요할 것으로 사료된다.
- 7) 금번 평동배수펌프장유역에 내린 강우는 계획 빈도 보다 훨씬 작았으나 배수펌프장의 토출한계에 거의 근접하는 유량이 발생한 것으로 분석되었다. 오래전에 건설된 배수펌프장의 용량에

대한 재검토와 대책이 시급한 것으로 판단된다.

- 8) 평동지역의 외수 침수방지를 위해서는 현재 시설계중인 하도 정비를 조속히 시행해야 할 것으로 분석되었다. 도시저지대 침수방지를 위한 가장 기본적이고 중요한 대책은 외수위를 낮추는 것이 금번 평동지구 침수분석 사례에서 재확인되었다.

6.2 지배구역의 영향 분석

도시저지대 침수를 사전에 예방하기 위해서는 자체 유역의 문제 뿐만 아니라 지배구역에 대한 개념 정립과 대비가 필요할 것으로 분석되었다.

- 1) 도시저지대 자체 소유역에 대해서는 내수배제와 관련한 문제들이 우선적으로 검토되어야 할 것으로 판단된다.
 - (a) 하수관망의 관경이나 구배가 적정하게 구성되어 있는지 정밀하게 점검해야 하며, 대부분의 경우 복잡한 시스템을 구성하고 있으므로 관망해석 프로그램을 이용하여 분석해야 할 것으로 판단된다.
 - (b) 배수펌프장은 토출능력과 우수지 용량, 펌프장 운영 방법 등이 적정한지 건설된지 일정기간이 경과하면 주기적으로 재점검해야 할 것으로 판단된다.
 - (c) 역류방지시설이 제대로 작동하는지 우기 이전에 사전예방 차원에서 점검해야 하며 큰 홍수가 지나간 후 다시 확인해야 할 것으로 판단된다.
- 2) 외수와 관련한 문제들은 지배구역을 포함하여 분석해야 할 것으로 판단된다. 외수위에 영향을 줄 수 있는 하천, 저수지, 배수시설 등 배수관련 수리시설이 상류에 위치하거나 보 등 지장물이 하류에 위치할 경우 그 영향을 분석하여 대비해야 할 것으로 판단된다. 금번 평동지구의 침수는 자체 유역의 문제가 아니라 서호천 외수의 영향이 결정적이었던 것으로 분석되었으며, 서

호저수지를 보호하기 위하여 설치된 사이펀도 저수지 하류부의 침수를 가중시키는 요인이 되었던 것으로 분석되었다.

6.3 침수사고의 조사

평동지구 침수사태를 조사하면서 다음의 사항들이 중요한 것으로 나타났다.

- 1) 침수지역 및 피해 현황(특히 침수범람지역을 도면에 표시한 자료 등)
- 2) 유역내의 상세한 강우자료(특히 강우의 공간적 분포를 파악할 수 있는 자료)
- 3) 유역내의 유출관련 자료(하천 수위자료, 저수지나 배수펌프장 유입량자료 등)
- 4) 배수펌프장, 배수갑문, 사이펀 등 배수시설의 시설 용량과 운영자료
- 5) 침수시작 시점과 위치 및 침수의 진행 그리고 퇴수 상황에 대한 자료
- 6) 하수관망의 구성(관경, 구배, 연결상태 등)에 관한 자료
- 7) 외수위와 관련된 자료(사진자료, 홍수흔적 등)
- 8) 하도 지장물, 지천 합류부, 하폭 축소부 등 유수 흐름 지장 자료
- 9) 역류방지시설의 위치와 작동상태
- 10) 제방이나 홍수방지벽의 월류 발생시 위치와 시각 및 지속시간
- 11) 하수관망의 역류발생시 위치와 시간 및 지속시간
- 12) 하천기본계획 등 관련 치수계획
- 13) 과거 침수피해에 대한 자료

6.4 개선방향

본고를 집필하면서 느낀 점과 앞으로의 개선방향을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 지방2급하천에 대해서도 체계적인 홍수에경보 시스템을 구축해야 한다. 특히 침수피해가 우려

되거나 침수피해가 발생했던 하천에 대해서는 우선적으로 홍수에경보시스템을 구축하고 주민들에 대한 신속한 경보전파와 대피방안을 강구해야 한다.

- 2) 배수갑문이나 사이펀 등의 배수시설은 통합적이고 체계적인 치수계획안에서 운용되어야 한다. 부적절하게 운용될 경우 수해를 방지하기 위해 설치한 시설이 오히려 수해를 가중시킬 수 있다.
- 3) 동장과 통장 등 일선 지도자들에 대한 체계적인 재난재해 대처 교육이 필요하다. 금번 평동지구 침수는 일요일 아침에 발생하여 자칫 인명피해를 초래할 가능성이 컸다고 판단된다. 동장이 새벽부터 현장 상황을 면밀히 파악하고 적시에 주민대피 방송을 하였으며 통장들이 골목마다 호루라기를 불면서 주민들을 깨워 대피시킴으로써 인명피해를 방지할 수 있었다. 일선 지도자들에 대한 사례중심의 재난재해 대처 교육의 필요성을 보여준 사례라고 할 수 있다.
- 4) 평소에 재난재해에 대한 주민 훈련과 교육이 중요하다. 평동지역은 2001년에도 침수피해를 입은 경험이 있다. 그 당시 침수피해를 경험했던 주민들은 많은 비가 내리자 사전에 대피준비를 하여 큰 동요없이 차분히 대피하였으나 최근에 이주해 온 주민들은 잠결에 황망히 대피할 수 밖에 없었다. 평소 주민들에 대한 교육과 대피 훈련의 중요성을 보여주는 사례라고 할 수 있다.

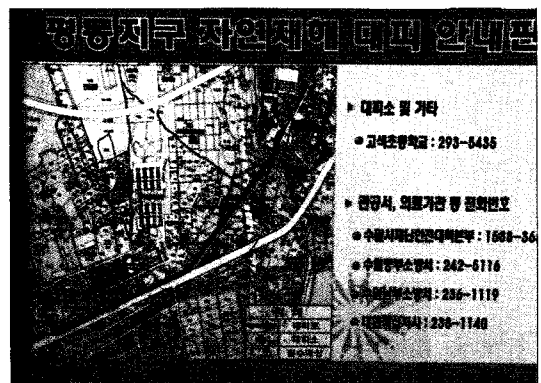


사진 6.1 침수지역에 설치된 대피 안내판

- 5) 평소 눈에 잘 띄지 않는 침수방지시설들에 대한 주기적인 점검과 정비가 필요하다. 역류방지수문은 외수의 침입을 막는 매우 중요한 시설이지만 제대로 작동되지 않는다면 외수가 유입되는 통로가 된다. 이와 같이 점검이 쉽지 않은 방재 시설들에 대해서는 전문용역업체로 하여금 주기적으로 점검하도록 규정을 정비할 필요가 있다.
- 6) 침수피해를 입었을 경우에는 당시 상황을 피해지역 주민과 일선지도자들을 대상으로 상세히 파악하고 관련 자료를 확보하는 것이 침수원인 규명과 정확한 대책수립에 결정적으로 중요하다.
- 7) 앞으로 레이더강우와 지상관측강우의 상호보완

적 운용과 분포형 강우-유출모형의 적용은 시공간적으로 편차가 큰 집중호우와 이로 인한 홍수를 예측하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

본건 침수피해에 대한 현장조사에 참여하여 침수 당시의 상황과 피해조사에 필요한 관련 자료를 제공해 주신 경기도청 교통건설국, 수원시 권선구 건설과, 수원시 권선구 평동사무소 관계자 여러분께 심심한 감사의 뜻을 표합니다. ☺

참고문헌

1. 건설교통부. 치수정책수립을 위한 강우-유출 모형의 적용성 분석 연구. 2007.
2. 경기도. 황구지천수계 하천기본계획(서호천, 영화천, 수원천, 광교천). 2009.7.
3. 국립식량과학원. 서호저수지 수문관리대장.
4. 국립식량과학원. 서호제방 집중호우 시간대별 조치사항.
5. 기상청. 수원 기상실황표. <http://www.kma.go.kr/common>.
6. 수원시. 2009. 7. 12(일) 집중호우에 따른 자연재난피해 보고.
7. 수원시. 서호저수지 시설현황.
8. 수원시. 평동배수펌프장 가동자료.
9. 수원시. 평동일대 하수관망도(전산자료).
10. 수원시. 평동일대 수치지도(전산자료).
11. 수원시. 평동주민센터일원 관망도.
12. 수원시. 평동 호우피해 복구상황.
13. 수원시. 침수피해지역 시간대별 침수 및 배수현황.
14. 오경두, 박상우, 류재희, 문용주, 안경렬. 도시홍수량산정을 위한 분포형모형 적용방안. 제12회 도시홍수재해관리기술세미나-도시유역종합치수계획의 실무와 정책-, 도시홍수재해관리기술연구사업단. pp. 21-73. 2006.
15. 한국수자원학회. 분포형 모형 Vflo™에 의한 수문해석. 제20회 수공학익습교재. 2009.2.
16. Vieux, B.E. Distributed Hydrologic Modeling Using GIS, 2nd ed., Kluwer Academic Publishers, 2004.
17. Zheng Fang. Enhancing a Distributed Hydrologic Model: Addition of Storm Water Pipe Analysis within a GIS Framework in an Urban Area. Report for 2005TX193B.