우수유출저감시설 시범사업 소개
- 침투통을 중심으로 -

심 재 현 (국립방재연구소 연구기획팀장)
안 재 찬 (국립방재연구소 연구1팀 연구원)

1. 서론

2002년 7월 30일~8월 1일 우리나라를 강타한 태풍 루사(RUSA)는 사망 213명, 실종 33명 등 246명의 인명피해와 5조 1천479억원에 달하는 재산피해와 강릉지역에 연평균 강수량의 62%에 달하는 870.5mm에 이르는 강우량을 발생시켰다. 이는 자연적인 요인뿐만 아니라 인위적인 요인도 함께 가중되면서 피해를 확산시켜 풍수해에 대한 경각심과 함께 홍수저감을 위한 구조적·비구조적 대책의 중요성이 대두되게 되었다.

이러한 풍수해 예방을 위한 최선의 대책은 강우시 발생되는 우수를 최대한 저류 또는 지하에 침투시켜 하천유입량이 최소화되도록 하는 것으로 외국에서는 1970~1980년대부터 홍수 등의 재해예방과 하천의 건천화 방지를 위하여 도로, 주차장 등 공공시설은 물론 주택, 아파트 등 사유시설까지도 우수유출저감시설의 설치를 법적으로 제도화하고 있다.

우리나라의 경우 행정자치부 국립방재연구소의 주관으로 침투통 및 투수성 포장의 시범사업을 통해 설계, 시공, 저감효과 분석 및 유지관리 등에 연구를 수행하고 있으며, 현재 정부에서도 이 시설과 관련하여 적극적인 제도 마련중에 있는 것으로 파악된다.

본 고에서는 우수유출저감시설중 침투통 시범사업을 대상으로 하여 설계 및 시공절차, 계측방법 및 1999~2002년까지의 계측을 통한 치수효과 분석 및 유지관리 방안 등에 대해 소개하여 일선 방재업무 관련자의 침투통에 대한 이해를 돕고자 한다.

2. 시설 설계 및 시공

본 장에서는 침투통의 설치를 위한 현장조사, 위치선정, 시공, 저감효과의 계측방법 등에 대해 개략적으로 설명하고자 하며, 더 자세한 내용은 우수유출저감시설 설치기법 연구(Ⅳ)(국립방재연구소, 2001)을 참고하길 바란다.

1) 현장조사

침투시설의 단일 설치 및 연계 설치시 표층 지반의 침투능력 산정 및 설계 침투량의 신뢰성과 정확도 향상을 위해 현장조사를 실시하여야 하며, 현장조사시에는 다음 표 1.의 사항들을 고려하여야 한다.

2) 위치선정 및 설치규모

위치 선정 및 설치 규모는 하수도 시설 기준을 따라 산정하였으며 단, 다음과 같은 지형조건에는 시설을 설치할 수 없다.

- 산사태 위험지역, 급경사지 등 우수침투에 의해 지반의 안정성에 문제가 발생할 우려가 있는 지역
- 지하건물의 밀집 등으로 우수침투시 주변지역의 건물에 누수 등 문제가 발생할 우려가 있는 지역
- 투수계수가 10^{-5}cm/sec보다 작은 토양(시공지역의 터파기 공사후 물이 5시간 동안 0.18cm 이하로 침투되는 토양)

표 1. 주요 현장조사시 검토항목

항 목	주 요 내 용
자료조사	과거 문헌조사의 수집·정리를 통해서 대상지역의 지반특성을 파악하고 침투시설의 설치 여부 결정
토질·지하수위 수질 조사	현장 침투시험에 관계되는 지반상황, 또는 막힘을 규정하는 유입 수질의 파악 등 보다 신뢰성 높은 침투 능력 평가를 목적으로 필요에 따라 실시
현장침투시험	Bore-hole법 등의 간이형 시험방법을 이용, 침투시험을 실시함으로써 대상지반의 침투능력 측정
침투능력 평가	현장침투시험 결과로부터 여러 가지 지반조건에 대한 침투능을 투수계수 등으로 산정하고 침투능 곡선 작성

- 입도분포도에서 점토가 40% 이상을 차지하는 지역
- 공장주변지역 또는 매립지 주변지역 등에서의 수질오염이 우려되는 지역

3) 시설 구조

- 침투통은 통 본체, 충진쇄석, 모래, 투수시트, 연결관(집수관, 배수관, 투수관 등), 부대시설(막힘방지시설) 등으로 구성된다(그림 1).
- 침투통은 연결관의 접합 및 유지관리, 그리고 수두의 확보를 고려하여 결정하도록 하며, 내경 또는 내부치수는 300~500mm를 표준으로 한다. 단, 협소한 장소에서는 150mm정도를 최소로 한다.
- 침투통과 침투통을 조합하여 설치하는 시설에서는 침투통의 측면을 투수성 구조로 처리하지 않고 저면의 바닥으로부터 투수되는 구조로 한다.

4) 설치방법

- 침투통은 집수정과 침투층으로 구분한다.
- 침투층은 집수정의 크기에 따라 모래와 쇄석층으로 구분하여 시공한다.
- 침투통은 침투층을 설치하는 측면에 지하실을 가진 구조물 등이 있는 경우에는 지하구조물 심도보다 1m를 더 굴착하여 측면을 수밀시공한다.
- 침투통 설치후 저감효과의 계측을 위해 필요한 monitoring 시스템의 설치을 위한 공간 확보를 고려하여야 한다.

5) Monitoring 기기설치

- 시범사업지구에서의 침투통의 저감효과의 정량화 분석을 위해 설치한다.
- 침투시설 설치구간 내 집수정에 유량 측정기기를 설치하며 설치기기는 센서 4개의 최소 소형 컴퓨터 1대 이상 설치하여야 한다.

6) 시공시 고려사항

- 개발부지 조성시 공사중 중기로 인한 토양의 다짐을 방지하기 위해서 밧줄로 경계선을 만들어야 한다.
- 침투통 주변의 시공시에는 궤도나 많은 타이어를 가진 백호 등을 사용해서 굴착하여야만 한다. 이는 보통 고무타이어는 다짐으로 인해 침투능 감소를 유발시키기 때문이다. 이러한 이유 때문에 불도져 사용은 피해야 한다. 굴착한 재료는 함몰이나 유입이 일어나지 않도록 침투시설 시공지역으로부터 적어도 3m 이상 이격해야 한다.
- 깨끗하고, 세척된 2~7cm 입경의 자갈골재를 굴착된 공간 내에 넣고 유출수의 통로를 만들기 위해 가볍게 다짐공을 한다. 이 때 세척하지 않은 자갈은 토양과 여과망사이의 공극이 막힐 위험이 있어 유의해야 한다.

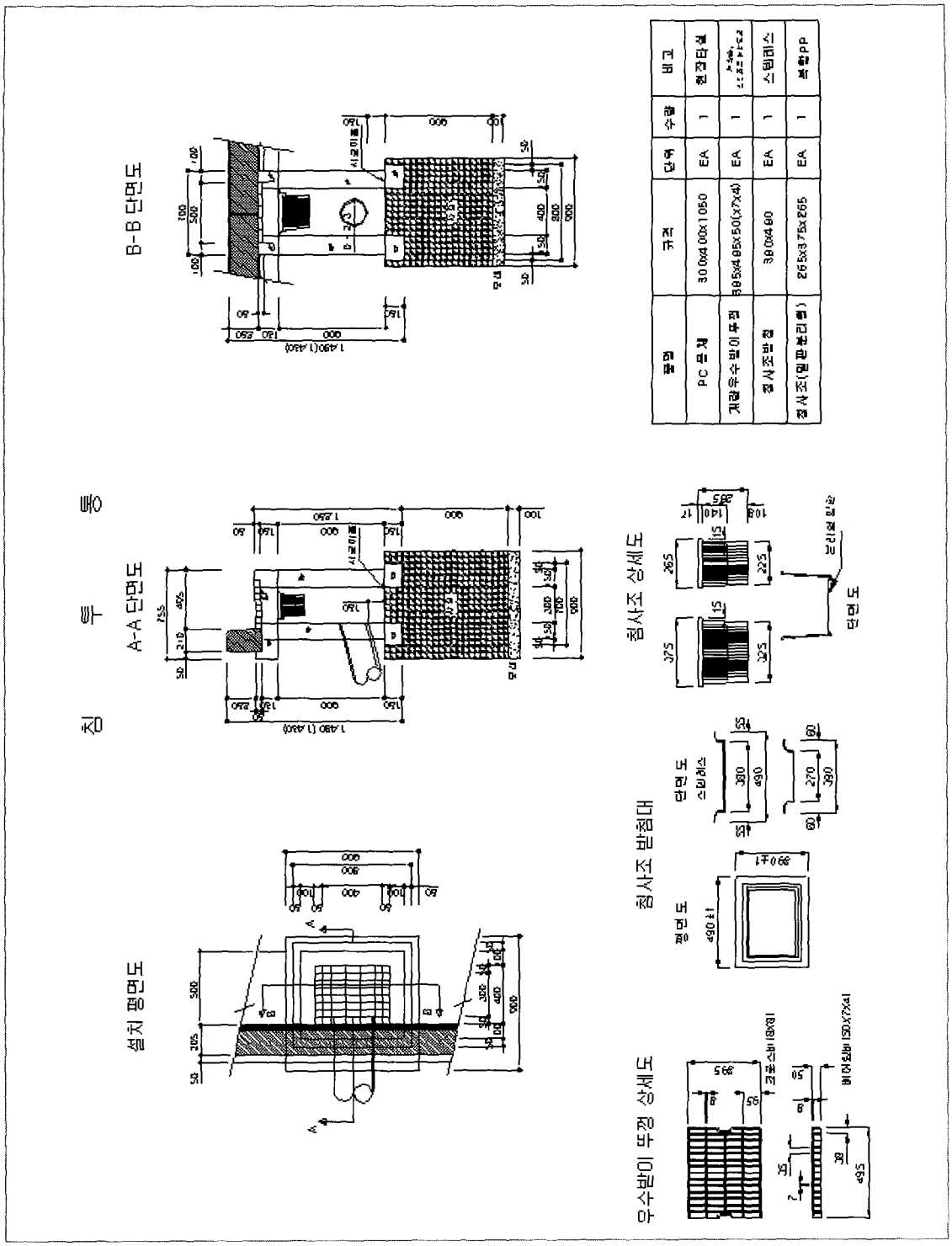

그림 1. 침투통 표준 구조도

3. 현장계측 및 자료 수집

1) 현장 계측

현장의 물리량(예, 강우, 수위, 수온, 기온, 지하수위 등)을 전기적 신호로 바꾸어 주는 센서, 센서로부터 감지된 전기적 신호의 변화를 컴퓨터로 입력할 수 있도록 변환하여 주는 A/D 변환기, 이러한 자료획득 과정을 수행하고 해석과 저장 그리고 통신을 제어하는 데어터로거 혹은 컴퓨터, 자료를 원격지로 송수신하는 통신기와 마지막으로 전원을 공급하는 전원부로 구성된 실시간 모니터링 시스템을 설치·운영중에 있다.

또한, 2002년부터 전국에 시범 설치된 우수유출저감시설에 대한 계측은 관리자나 또는 관련자가 인터넷을 통하여 확인 할 수 있도록 웹사이트를 구축, 운영하여 계측 현황 및 자료의 확인을 실시간으로 확인하도록 하였다. 그림 4.는 우수유출 저감시설의 모니터링을 위한 홈페이지 메인 화면으로서 모니터링 시스템의 일반사항, 우수유출저감시설 개요, 침투통 구조 및 시공, 실시간 모니터링, Analysis, 모바일 서비스 등에 대한 자료등을 링크시켜 방문자의 이해를 돕도록 하였다.

현재 인터넷을 이용한 실시간 모니터링은 1시간에 1번 자동으로 업데이트되며, 현장에서 1분 간격(우기시)으로 측정된 강우 자료, 일반집수정과 침투통의 수위자료, 현장 모니터링 결과를 한 눈에 알아볼 수 있도록 구성하였다.

2) 자료 수집 및 효과 분석 방법

실시간 모니터링 방법을 이용하여 침투통과 일반침투통의 수위와 현장의 강우를 측정하게 되며 가공하지 않은 최초의 자료는 아래 그림 5.와 같다. 자료의 구성은 날짜, 시간, 분강우량, 일반침투통 수위(아날로그값), 침투통 수위(아날로그값)으로 되어있다. 여기서, 각 침투통의 수위는 각 센서에 따른 각각의 환산식으로 수위값을 계산한다.

계측된 수위를 이용하여 침투통과 일반침투통의 배수관을 통해 유출되는 유량을 산정하였으며, 이를 통해 침투량을 산정하였다.

각 침투통에서 배수관을 통해 방류되는 유량을 계산하기 위해서 그림 6.과 같이 배수관을 원형웨어로 간주하였으며, 다음의 식과 같이 월류 유출량을 계산하였다.

그림 2. F-DAS 계기 보관함 외부

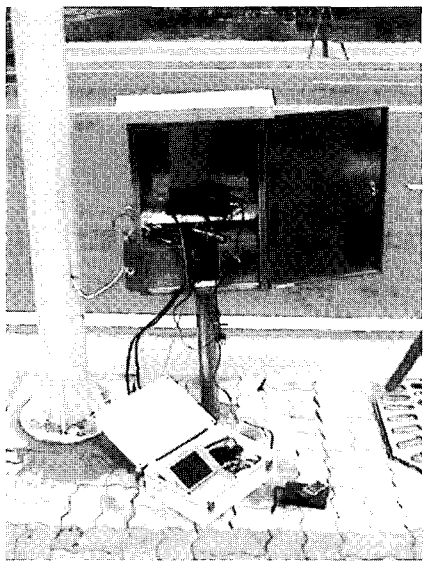

그림 3. F-DAS 계기 보관함 내부

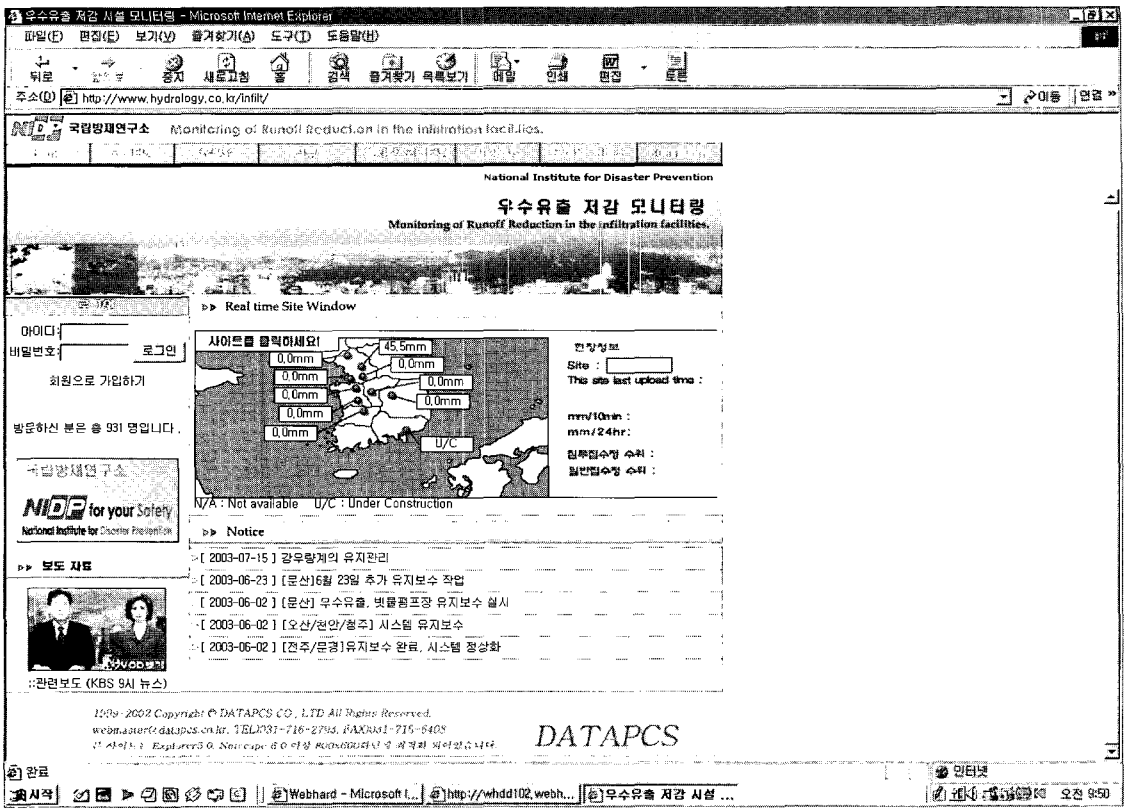

그림 4. 우수유출 저감시설 모니터링 홈페이지(http://www.hydrology.co.kr/infilt/)

```
010411 115401 0000 0916 0813
010411 115531 0000 0912 0807
010411 115603 0000 0928 0811
010411 115900 0000 0929 0820
010411 120001 0000 0918 0822
010411 120124 0000 0921 0806
010411 120201 0000 0920 0801
010411 120300 0000 0923 0805
010411 120426 0000 0910 0803
010411 120500 0000 0902 0806
010411 120601 0000 0931 0806
010411 120722 0000 0922 0813
010411 120802 0000 0920 0798
010411 120901 0000 0932 0802
010411 121019 0000 0904 0797
010411 121100 0000 0917 0803
010411 121201 0000 0906 0809
010411 121323 0000 0922 0797
010411 121400 0000 0928 0790
010411 121501 0000 0922 0805
010411 121628 0000 0921 0802
010411 121702 0000 0918 0810
010411 121802 0000 0924 0807
```

그림 5. 수집 자료

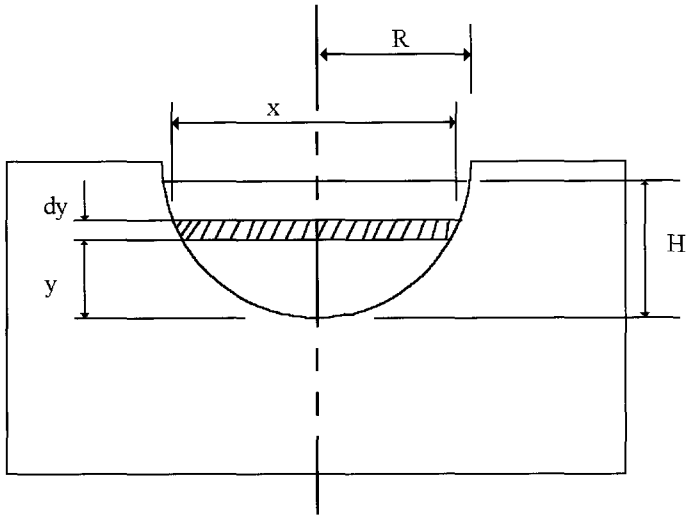

그림 6. 유출량 산정을 위해 가정된 원형웨어

$$Q = \int_A dQ = \int_A dA = \int_0^H V x dy$$
$$= \int_0^H \sqrt{2g(H-y)}\, x dy$$
$$= 2\sqrt{2g}\int_0^H \sqrt{H-y}\,\sqrt{R^2-(R-y)^2}\, dy$$

여기서, R은 배수관의 반경, H는 월류수심, A는 단면적, g는 중력가속도, x는 미소면적 dA의 수평거리, 그리고 y는 원형관저로부터 미소면적 dA까지의 수직거리이다. 위 식은 해석적 적분이 불가능하므로 수치적분을 이용하여 측정된 각 수위에 따른 유량을 산정하였고 적분된 값의 웨어손실은 고려하지 않았다(c=1). 그리고 전체 유량곡선을 시간에 대해 적분하여 전체 유출량을 산정하였다.

4. 유출량 산정 및 유출저감 효과 분석

1) 실제 호우사상에 대한 유출저감 효과 분석

각 시범시설에서 관측된 실제 호우사상과 일반집수정 및 침투통에서의 수위 자료를 근거로 하여 총유출량을 산정하여 저감효과를 비교 분석하였다. 수집된 실제호우사상은 강우센서로부터 측정된 자료로서 시범지역에 발생한 강우를 거의 대부분 측정하였다. 그러나 일부 시범시설의 수위센서는 집수정으로 유입되는 점착성 물질(토사와 먼지 등으로 이루어짐)에 의해 압력도파관이 막히거나 유입수에 포함된 이송잡물에 의한 타격으로 일부센서에 대해 신뢰성이 제기되어 유출저감효과 분석은 양호한 자료에 대해서만 이루어졌다. 표 2.은 전국시범시설에 대한 총유출량을 산정하여 유출저감효과를 비교한 것이다. 전체적으로 41%~100%의 유출저감효과를 나타냈으며 평균 84%의 유출저감효과를 보이고 있다.

그 예로, 문경지역(2002. 6. 24, 7.5mm 강우 발생)의 경우 일반집수정에서는 1.72m³의 유출이, 침투통에서는 약 0.057m³의 유출이 발생하여 총 유출저감효과는 약 97%를(그림 7), 논산지역(2002. 8. 30, 80.5mm 강우 발생)의 경우 일반집수정에서는 13.038m³, 침투통에서는 6.343m³의 유출이 발생하여 약 65%의 우수유출저감효과를 나타내었다(그림 8).

또한, 집중호우의 경향을 보인 강우사상을 보인 모든 시범사업지역에서도 약 40~70%의 유출저감효과를 보이고 있음을 알 수 있었다(그림 9).

2) 침투통 영향을 받는 영역을 변경한 모의 결과

유역 내 총 도로연장 14,980m에 30m간격으로 도

표 2. 전국시범시설 우수유출저감효과 분석결과(2002년)

지 점	날 짜	총강우량 (mm)	지속시간 (hr)	일반시설 유출량(m^3)	침투통 설치시 유출량(m^3)	유출량 저감율(%)
안 산	2002/8/27	131.5	12.5	8.802	1.769	80
	2002/8/31	60.5	29.2	2.702	0.595	78
오 산	2002/7/5	58.0	37.3	6.414	1.804	72
	2002/7/14	44.0	8.5	2.334	1.369	41
	2002/7/19	40.5	12.5	1.909	0.227	88
	2002/8/10	17.0	10.7	0.032	0	100
문 경	2002/5/16	4.5	7.5	0.540	0.095	82
	2002/6/12	6.5	8.3	0.852	0.088	89
	2002/6/24	7.5	17.7	1.72	0.057	97
논 산	2002/8/27	34.5	2.3	9.345	3.796	59
	2002/8/30	80.5	30.8	13.038	6.343	65
마 산	2002/5/14	49.5	114.7	7.446	1.238	83
	2002/6/23	39	22.5	11.111	0.143	99
	2002/7/19	70	11.3	13.029	1.391	89
전 주	2002/6/23	20	16.5	0.646	0	100
	2002/6/30	31	9.2	0.367	0.177	52
	2002/7/22	41	10.1	2.262	0.864	62
청 주	2002/5/17	3	1.3	0.074	0.012	84
	2002/6/12	5	3.5	0.43	0	100
	2002/6/24	5.5	16.3	0.756	0.066	91

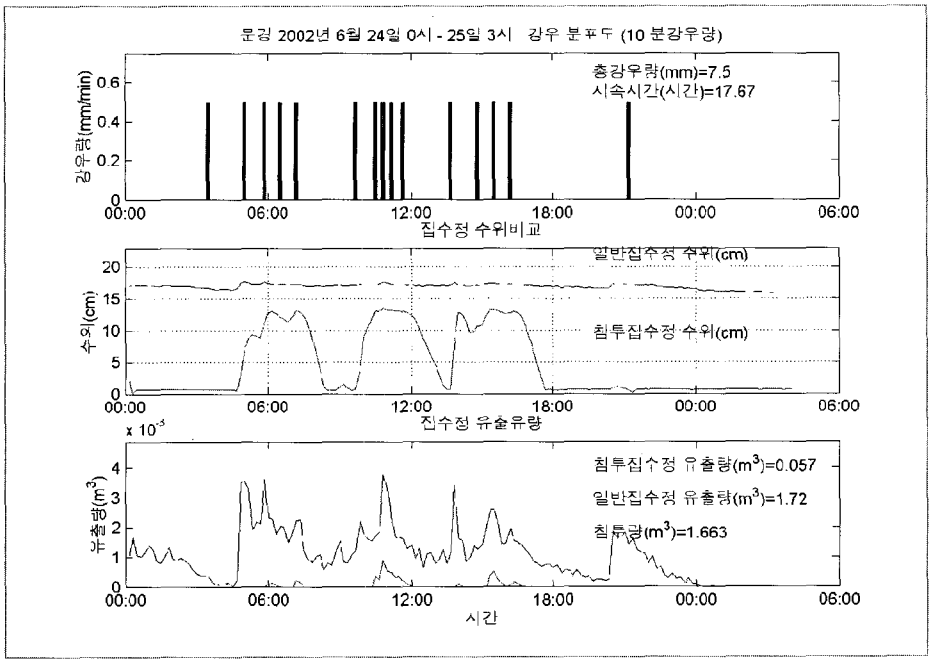

그림 7. 문경 지점의 유출저감효과(02/06/24)

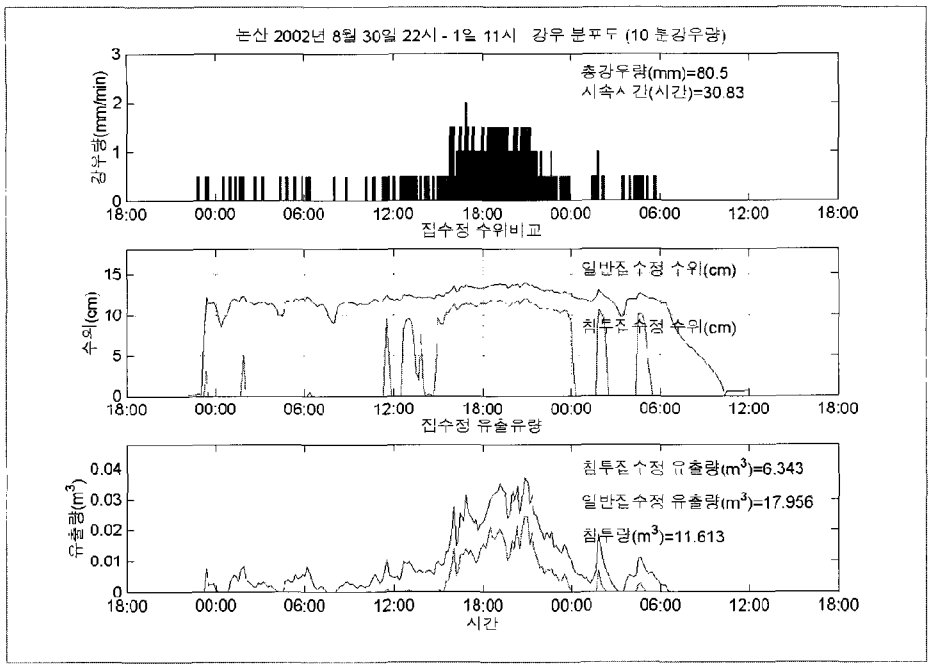

그림 8. 논산 지점의 유출저감효과(02/08/30)

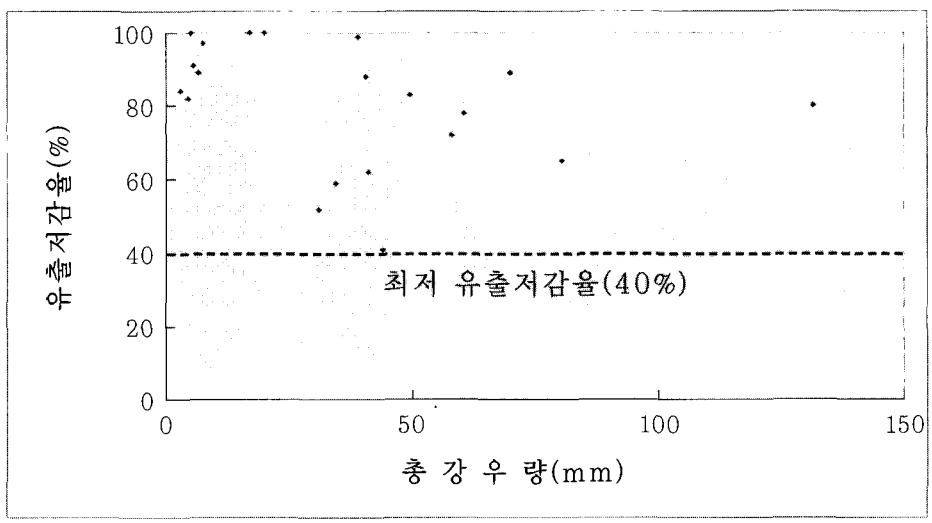

그림 9. 총강우량 - 우수유출저감율의 관계(2002년도)

로 양측에 모두 1,045개의 침투통이 설치되었다고 가정하여 2002년 각 호우사상에 대해 수치모의를 수행한 결과를 기술하였다. 본 절에서는 한 강우사상에 대하여 침투통의 영향을 받는 영역을 각각 1배, 1.5배, 3배의 경우로 변경하여 수치모의를 실행하였다.

모의 결과 우수유출저감효과는 각각 15.8%, 23.4%, 34.3%의 증가를 보여 침투통의 증설과 함께 저감효과도 비례적으로 증가함을 알 수 있었으며, 그림 10.~그림 12. 및 표 3은 각각의 모의 결과를 나타내었다.

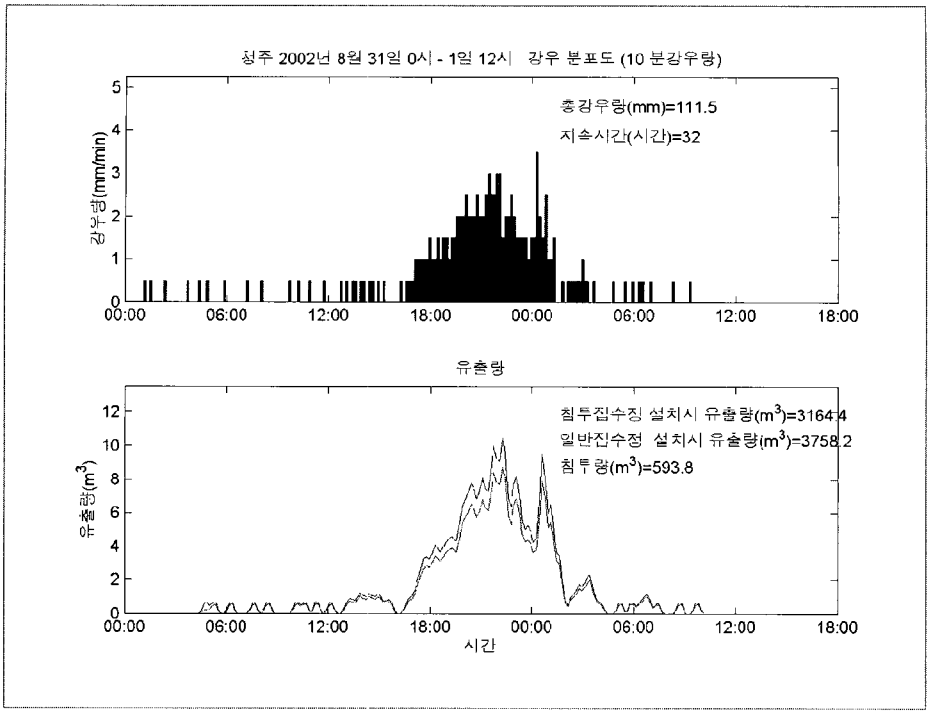

그림 10. 청주대상유역의 유출수문곡선(02/08/31)

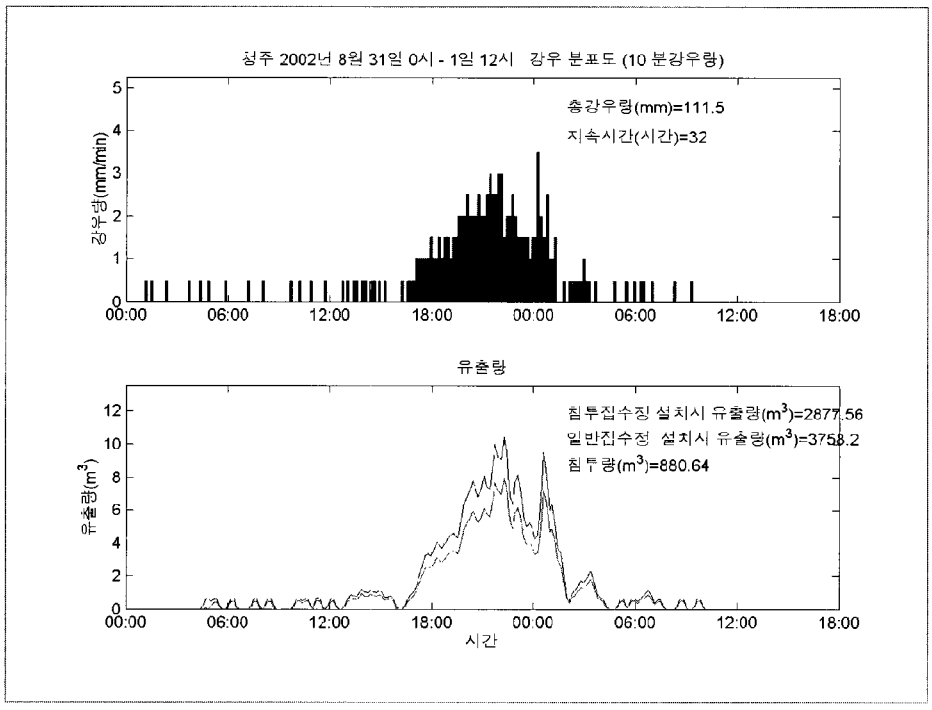

그림 11. 침투통의 영향 영역변화(1.5배)에 대한 유출수문곡선(02/08/31)

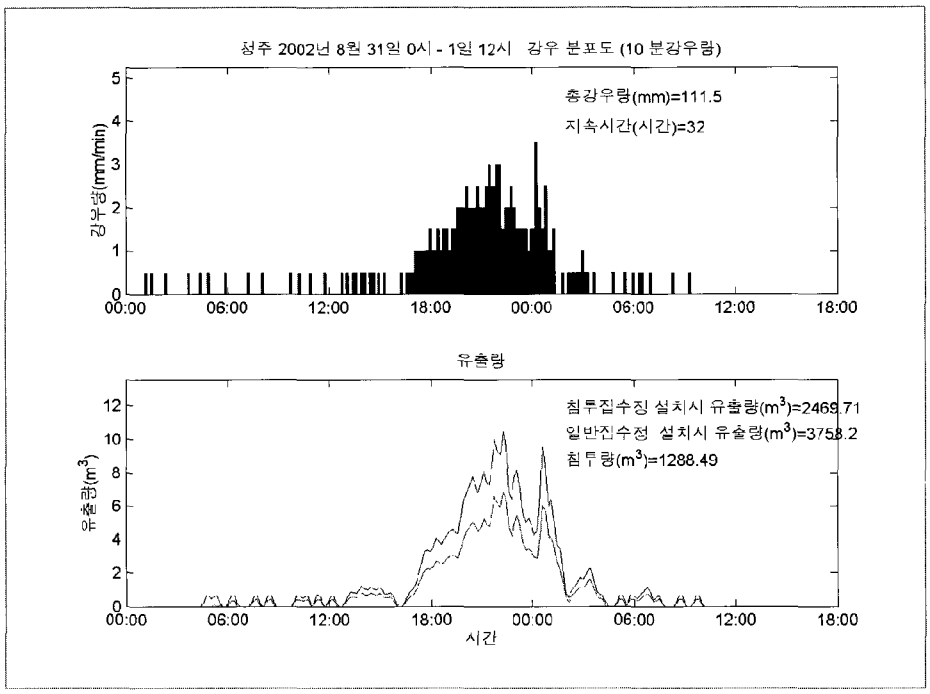

그림 12. 침투통의 영향 영역변화(3배)에 대한 유출수문곡선(02/08/31)

표 3. ILLUDAS의 유출량 모의결과

날 짜 (침투통의 영역비)	총강우량 (mm)	지속시간 (hr)	일반시설 유출량(m^3)	침투통 설치시 유출량(m^3)	유출량 저감량(m^3)	유출량 저감율(%)
2002/8/31(1배)	111.5	32	3758.20	3164.40	593.8	15.8
2002/8/31(1.5배)	111.5	32	3758.20	2877.56	880.64	23.4
2002/8/31(3배)	111.5	32	3758.20	2469.71	1288.49	34.3

5. 유지 관리

본 절에서는 현재(2002년 9월)까지 설치된 전국 시범사업 시설에 대한 유지관리 현황을 조사하고, 개선되어야 할 사항을 분석 및 제시하였다.

시범지역마다 공통적으로 발생하고 있는 문제는 침투 및 일반 집수정내에 대부분 이 물질과 토사가 유입되어 이에 따른 집수정내 청소가 필수적인 것으로 조사되었다. 특히 도로 주변의 토사나 기타 쓰레기 등을 인위적으로 침투통으로 바로 투입시키거나 강우에 의해 토사 및 이물질, 오물의 유입이 많은 것으로 조사되었다. 이에 대해 향후 설치될 침투통의 경우 오물제거용 망(필터)을 스크린과 함께 설치하여 오염원의 유입을 막는 방법이 적절할 것으로 판단되며, 여름철 우기전 집수정의 상태를 점검하여 토사제거 및 청소 작업 수행과 더불어 정기점검 또는 수시점검을 행하여야 할 것으로 보인다. 또한 유지관리 점검횟수는 여름철 우기 전 1회, 우기 중 2회, 우기 후 1회, 초겨울 1회, 봄 1회로 1년중 최소 5~6회의 유지관리 및 점검이 필요한 것으로 판단되며, 이 중 초겨울과 봄은 모니터링 시스템의 유지관리에 해당된다.

모니터링 시스템에 대한 공통적인 문제점은 수위센서가 토사의 퇴적으로 인하여 오차율이 커지는 문제점이 발생하고 있으나 이는 토사 및 쓰레기 유입을 제어하였을 경우 자연적으로 해결될 것으로 판단된다. 기타 데이터로거와 태양열 전지 그리고 기타 전

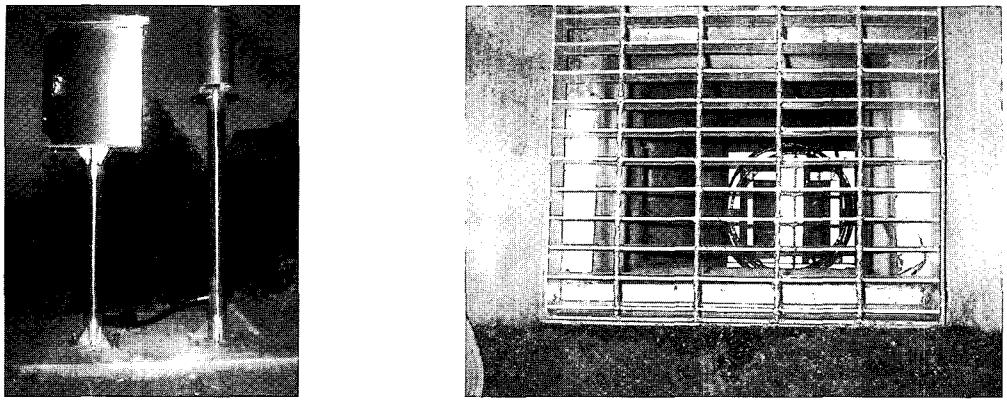

그림 13. 논산 지점 시스템 전경(좌)과 집수정내 수위센서

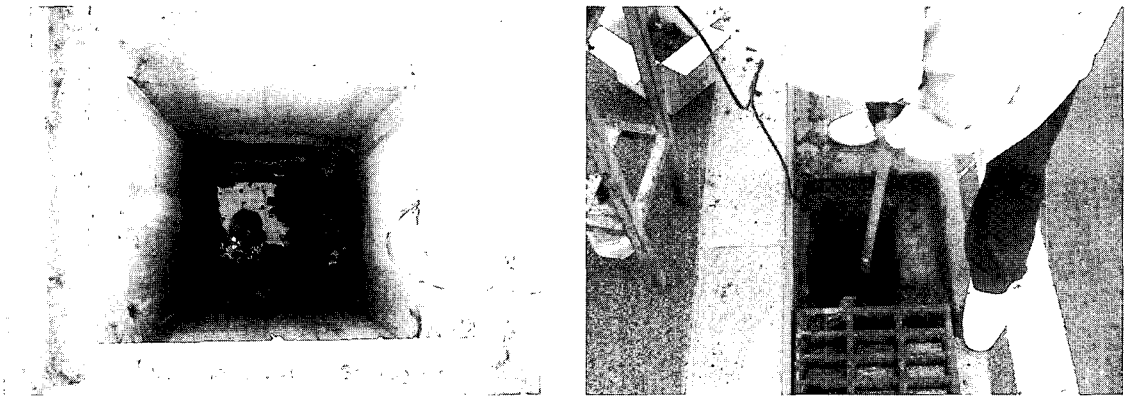

그림 14. 집수정에 쌓인 토사 및 이물질(좌)과 이를 제거하는 모습(우)

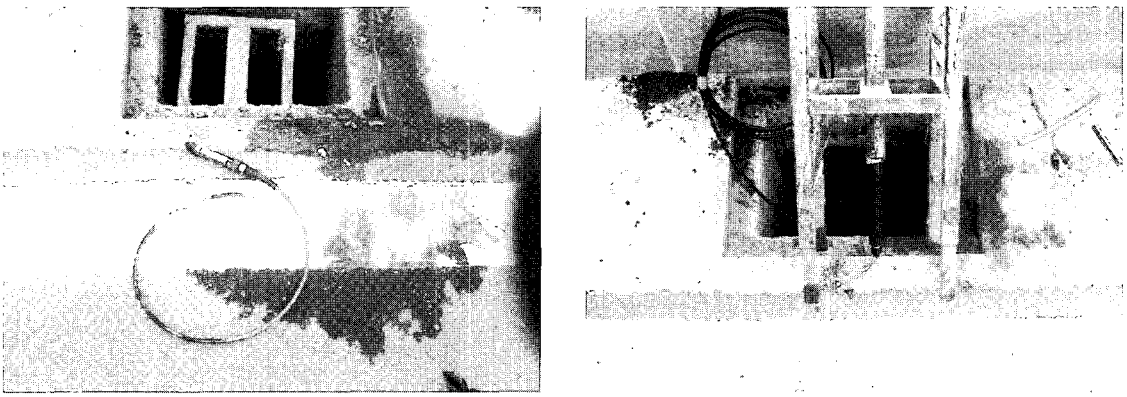

그림 15. 집수정의 교체대상 오산지점 센서(좌)와 교체 후 센서(우)

원공급장치와 강우량계는 대부분 정상작동하고 있으나 연 1~2회 정기점검은 고 정밀/고 효율의 계측을 위해 필요하다고 판단된다.

6. 결론

우수유출저감시설을 설치함으로써 치수적인 측면

으로는 첨두 유량의 경감, 지체시간 감소, 지표유출량 감소를, 이수적인 측면으로 지하수 함양과 수자원 확보를, 환경적 측면으로서는 토양 생태계의 보존, 도시하천의 기저 유출 증가로 인한 도시하천의 건천화 방지 등의 효과를 기대할 수 있다.

이와 같이 홍수량 경감외에도 종합적인 측면에서 기대효과를 가지는 우수유출저감시설의 제도화는 시급히 요구되어야 할 것으로 판단되며, 토지이용도가 높은 도시지역에서는 다목적 저류시설이 아니더라도 소규모 개인시설 또는 공공시설의 우수유출저감시설을 설치하여 홍수 방재에 힘을 기울여야 할 것으로 보인다.

아울러 다양한 조건에서의 저감효과 분석 및 지속적 관측이 필요하며, 향후 시설 확대 실시시 그 기능의 유지를 위해서 적절한 유지관리 방안 및 시간에 따른 저감효과의 변화도 계속적으로 분석되어야 한다고 판단된다.

일본의 경우 특정 주택단지를 시범유역으로 선정하여 우수유출저감시설을 설치하고, 시설의 경년 변화를 10년 이상 분석하고 있으며, 시간의 경과에 따른 토사퇴적에 의한 기능변화도 병행하여 활발하게 연구되고 있는 실정이며 이를 이용하여 확대 실시시 기준으로 정하여 설치를 유도하고 있다.

또한, 침투통이외의 다양한 침투시설 및 저류시설의 시범운영 및 제도화를 통한 시설 기준 마련과 더불어 저감효과의 지속적인 분석을 통하여 종합적인 기준을 차츰 마련해 나가야 할 것으로 보인다.