

대규모 간선에 있어서 써차지 흐름에 동반되는 맨홀뚜껑 비산현상에 관한 연구

A Study of Manhole Bursting due to Surcharged Flow in Large Sewer System

최 성 열*

Choi, Sung-Mo

Abstract

The mechanism of manhole bursting which occurs at excess rainfall events is studied by using both the physical model and the numerical model (SWMM ; Storm Water Management Model). The result of numerical simulation to steep pressure rising agrees well with that of the physical model at the sewer system under surcharged flow. A cause of manhole bursting is an expansion and spout of the condensed air at manhole that results from the surcharged flow and press wave propagation caused by gate operation or closure of conduit at pumping station.

Key Words : SWMM, Surcharged Flow, Expansion and Spout of Condensed Air, Manhole Bursting

요 지

본 연구는 집중호우 시에 발생하는 맨홀뚜껑의 비산(飛散)현상의 원인을 수리모형과 수치모형(SWMM)을 사용하여 밝힌 연구이다. 대규모 간선에서 써차지 흐름의 급격한 수두상승 현상에 대해 수치모형과 수리모형 결과가 매우 잘 일치하였다. 맨홀 뚜껑이 비산 하는 현상의 원인은 펌프장의 게이트 조작이나 간선의 막힘 등으로 발생하는 써차지 흐름에 따른 압력전파에 의해 기인하는 맨홀 내 잔존압축공기피의 맨홀에서의 팽창·분출에 의한 것으로 나타났다.

핵심용어 : SWMM, 써차지 흐름, 압축공기피의 팽창·분출, 맨홀뚜껑 비산현상

1. 서 론

호우시의 맨홀뚜껑 비산현상은 고도성장기의 급격한 도시화의 진전에 수반되어 대도시 역의 대규모 간선하수관망시스템에 나타나게 되었다. 그림 1은 이와 같은 맨홀뚜껑 비산에 의해 일어난 피해 사례 중 하나이다. 그림 중 상단은 맨홀에서 물기둥이 분출하고 있으며, 하단은 맨홀을 지탱하고 있는 주변 구조물이 통째로 파괴된 사례를 보여주고 있다.

이와 같은 맨홀뚜껑 비산의 원인으로는 ① 계획규모를 상회하는 호우의 발생, ② 예상을 상회하는 속도로 불투수면적이 증대하여, 계획강우에 대한 유출량이 계획유출량을 상회하는 것, ③ 하류 하천에 있어서의 배출제약, 펌프장의 운전조정 등에 의한 써차지 흐름의

발생과 이에 따른 압력전파, ④ 급경사구간, 관 접속방식에 의한 관내 공기피의 잔존 등을 들 수 있다.

이러한 맨홀뚜껑 비산현상의 메커니즘은 상술한 개별적 원인으로만 일어나는 것이 아니라 복합적인 원인에 기인하여 발생하는 것으로 밝혀졌다. 즉, 대규모 하수관이 만관 상태에 있어서의 천이류에 동반되는 관내 압력전파가 관내에 남아 있던 잔류공기피를 압축시키며, 이 압축공기피가 이동하면서 맨홀에서 개방(開放)됨에 따라 맨홀뚜껑이 비산 되는 것으로 밝혀졌다.

2. SWMM 모형

(1) SWMM의 개요

SWMM^{1,2)}은 미국환경보호청(EPA)에서 개발된 것으로서, 도시의 유출현상과 유량 및 부하량의 양면에

* 정회원, (주)방재안전기술원 대표이사(ceo@dpsi.or.kr)

있어서 우천시의 합류식 하수의 집수, 이송, 처리 및 방류처에 이르기까지를 종합적으로 표현할 수 있는 수치모형이다.

이 모형의 구성은, 지표면 유출(Runoff), 물질이송(Transport) 및 하수관거해석(Ext-ran)의 3개 모듈로 구성되어 있다.



그림 1. 맨홀뚜껑 비산 사례 (일본 0000시 사례, 1997년 8월)

(2) SWMM의 기초방정식

1) 지표면유출해석모형(Runoff)

강우의 지표면유출을 모의하는 모듈로서, 유출모에 사용되는 해석방법으로는 선행강우, 토지이용, 지형경사, 침투손실 등을 고려할 수 있는 비선형 저류합수법을 채택하고 있다.

표 1. 소유역의 분류

구분	특성	비고
A1	불침투역	요면(凹面)저류 있음
A2	침투역	요면(凹面)저류 있음
A3	불침투역	요면(凹面)저류 없음

유출해석은 대상 간선의 집수구역울 몇 개의 소유역으로 분할하고, 이것을 장방향으로 근사 시키며, 소유역은 표 1에 나타낸 바와 같은 기준으로 3개의 구역으

로 다시 분할시킨다. 유출계산은 소유역마다 행하게 되며, 그림 2와 같이 그 총합을 소유역으로부터의 유출로 간주한다. 유출 계산법은 식 (1)과 같은 지표유출을 그림 3과 같이 비선형 저류로부터의 유출로 생각하는 것이며, 유역경사, 증발량, 요면저류, 침투손실 등을 고려할 수 있다.

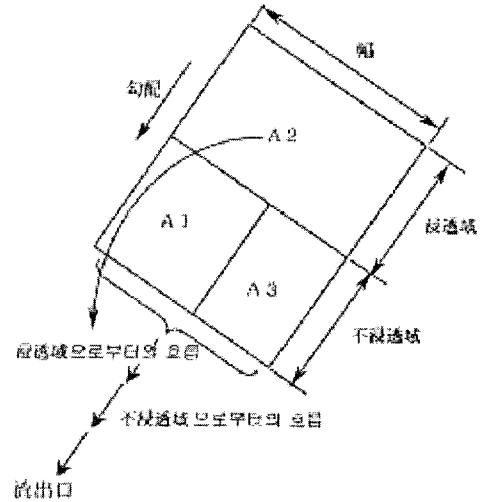


그림 2. 소유역 구분의 모식도

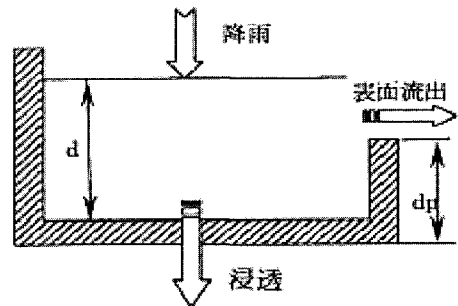


그림 3. 비선형 저류의 모식도

비선형 저류모형에서는 요면저류나 침투·불침투 유역을 고려하여, 식 (2)의 Manning 운동방정식과 연속방정식을 조합하여 풀게 되며, 지표면 유출수문곡선을 작성하게 된다. 비선형저류모형의 기초식을 이하에 제시한다.

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A_i - Q \quad (1)$$

여기서, V는 수량, d는 수심, A는 소유역면적, Ai는 유효강우(=강우강도-침투능), Q는 유출량, 그리고 t는 시간이다.

$$Q = W \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} I^{1/2} \quad (2)$$

여기서, W는 소유역의 폭, n은 조도계수, dp는 요면저류, 그리고 I는 지표경사이다.

식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)을 유도한다.

$$\frac{dd}{dt} = i + WCON(d - d_p)^{5/3} \quad (3)$$

여기서,

$$WCON = \frac{W \cdot I^{1/2}}{A \cdot n}$$

또한 침투능 계산에는 Horton 식, Green-Ampt 식 등을 사용할 수 있다.

2) 하수관수리 해석모형(Extran)

Extran은 우수·오수가 하수관망을 통하여 방류구에 이르기까지의 흐름을 모의하는 것으로, 통상 관거는 링크(link)에 해당하며, 맨홀은 노드(node)에 해당한다. 링크에 있어서의 유량은 일정하다고 가정하며, 노드에서의 저류능력은 무시한다. 관거시스템에서 발생하는 개수로 흐름과 만관 흐름을 고정도로 모의하기 위해서, 양자의 흐름을 Dynamic Wave로 취급하여, 링크에 대해서는 운동방정식을, 노드에 대해서는 연속식을 적용하는 해석법을 사용하고 있다.

Extran 모듈에서의 하수관 흐름이나 개수로 부정류 문제를 풀기 위한 편미분방정식은 개수로에 있어서의 1차원 점변 부정류방정식인 St. Venant 방정식이나 천수방정식으로 알려져 있다. 이 St. Venant 방정식의 적용에는 흐름이 점변적으로 변화하는 1차원 흐름이라는 점, 수직가속도를 무시할 수 있다는 점, 정수압과 마찰저항이 정상류와 같다는 점 등의 가정이 필요하다.

횡유입(q), 단면적(A), 유량(Q)을 종속변수로 하는 비정상류의 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} + qA(S_e + S_c + S_f - S_o) = q \quad (5)$$

여기서, $\partial Q/\partial t$ 는 국부관성항, $\partial(Q^2/A)/\partial x$ 는 이류관성항, $gA \partial y/\partial x$ 는 압력경사, S_e 는 유입·유출손실, S_c 는 관축소·관확대 손실, S_f 는 마찰경사, 그리고

So는 관저경사이다.

이들 연속식과 운동방정식은 하나의 관거 속에서 Q는 일정하다는 가정 하에 연속식과 운동방정식을 결합한 방정식계를 유도하고, $\partial(Q^2/A)/\partial x$ 를 선형화하여 관저경사를 변형하여 전개함으로써 최종적으로 다음 식을 얻는다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gkV|Q|}{R^{4/3}} - \frac{\partial A}{\partial t} + Q \frac{\partial V}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

3) SWMM의 수치해법

a) 차분방정식 및 음적시간무계항

식 (6)을 완전음적차분으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_{t+\Delta t} &= Q_t - g \cdot A \cdot \Delta t \cdot |V_t| Q_{t+\Delta t} / R^{3/4} \\ &\quad + V(\Delta A/\Delta T) \cdot \Delta t \\ &\quad - Q_{t+\Delta t} \cdot Q_t [1/A_{up} - 1/A_{dn}] / L \\ &\quad - g \cdot A [(H_{dn} - H_{up})/L] \Delta t \end{aligned} \quad (7)$$

이 식을 $Q_{t+\Delta t}$ 에 대해서 풀면, 완전음적 Dynamic Flow 방정식(시간가중치 $\theta=1.0$)의 차분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{Q_t - V \cdot \Delta A/\Delta T \Delta t - g \cdot A(H_{dn} - H_{up})/L \cdot \Delta t}{\left\{ \frac{g \cdot k|V|\Delta t}{R^{4/3}} + \frac{Q_t(1/A_{up} - 1/A_{dn})\Delta t}{L} \right\}} \quad (8)$$

SWMM에서는 식 (7)의 시간가중치 θ 를 사용하여 음적으로 풀게 되나, θ 의 사용례로서 Dynamic Flow 방정식에 있어서의 수두경사항인 식 (7) 좌변의 5번째 항은 이하와 같이 표현할 수 있다.

제5항 =

$$\begin{aligned} &\theta \cdot g \cdot A^{n+1/2} [(H_{dn}^{n+1/2} - H_{up}^{n+1/2})L] \cdot \Delta t + \\ &(1 - \theta)gA^n [(H_{dn}^n - H_{up}^n)/L] \Delta t \end{aligned} \quad (9)$$

b) 수치해법

식 (7)의 V, R, A는 t 또는 t+ Δt 시간에 있어서 관상류부, 중류부, 그리고 하류부의 평균값이다. 식 (7)과 식 (8)에 있어서의 기본적인 미지수는 $Q_{t+\Delta t}$ 와 H_{up} 및 H_{dn} 이다. 모든 V, R, A변수는 관거 중앙에 있어서의

Q와 관 끝단에 있어서의 H에 차례로 연결되게 된다. 관 유량 Q와 맨홀 수심 H와를 관련시키는 식은 노드에 있어서의 다음 식이다.

$$\frac{\Delta H}{\Delta t} = \frac{0.5 \Sigma Q_t + 0.5 \Sigma Q_{t+\Delta t}}{0.5 \Sigma A_{St} + 0.5 \Sigma A_{St+\Delta t}} \quad (10)$$

식 (7)과 식 (8)을 반복적으로 풀어서 Δt 의 계산종료 시에 각 관구에 있어서의 유량과 맨홀에 있어서의 수두를 결정한다. 이 2개의 식에 대한 수치통합은 선형화 된 연속방정식과 운동량방정식에 대한 부족완화법 (under relaxation factor method)을 사용한 반복계산법을 사용함으로써 달성된다.

c) Extran의 수렴조건

반복법으로서는 부족완화계수 ω (<1)을 사용한다. ω 의 전형적인 적용범위는 0.5~0.75이다. 각 반복과정에 있어서 Q_{n+1} 의 새로운 추정치와 맨홀에 있어서의 새로운 수심의 추정치는 다음과 같다.

$$Q_{n+1} = (1 - \omega)Q_{n+1/2} + \omega Q_{n+1} \quad (11)$$

$$Y_{n+1} = (1 - \omega)Y_{n+1/2} + \omega Y_{n+1} \quad (12)$$

새로운 계산단계에 있어서의 수치해는 추정된 관거 유량이나 맨홀 수심의 상대오차가 각각의 수렴한계를 만족했을 경우 얻어지는 것으로 판단한다.

d) 써차지 시의 유량과 수두의 계산

써차지 흐름의 해석모형으로는 만관부 관벽의 물의 탄성계수에 의한 압력전파를 관정에 붙인 가상의 협소한 슬롯 내의 자유수면으로서 표현하는 프리스만 슬롯 (Preissmann slot) 모형을 사용한다.

이 모형에 있어서의 문제점은 물과 관거 벽의 탄성 특성에 의해 특징 지워지는 압력전파속도(또는 슬롯 폭 : Bs)의 결정법이라 할 수 있다. 물의 압축성만을 고려하는 경우의 압력전파속도는 1,400 m/s이나, 실용적인 경험법칙에 있어서, Chun 등³⁾은 40 m/s, Sjöberg⁴⁾는 50 m/s, 나카무라(中村) 등⁵⁾는 20 m/s 등을 사용하고 있다. 또한 라테랄 모형과 프리스만슬롯 모형의 비교에서 와타나베(渡辺) 등⁶⁾은 20~50 m/s의 값을 산출하고 있다. 또한 사메가와(魚生川) 등⁷⁾은 공기의 압축성까지를 고려하여 전파속도를 산출하여, 상술한 범위 내의 결과를 제시하고 있다. 본 연구에서는 이상에서와 같은 이유로 40 m/s를 채택하여, $Bs = gA/c^2$ 의 식으로부터 $Bs = 0.005D$ 를 사용한다.

3. 맨홀비산현상의 재현

1) 맨홀뚜껑 비산현상의 메커니즘

본 연구의 대상이 되는 A 간선은 그림 4와 같이 ⑥~⑬ 맨홀에 걸쳐 13%의 급경사구간과 각각에 수반되는 10개소의 감세보가 간선 내에 존재하며, 공기를 빼기 위한 형태의 맨홀뚜껑(공기배제맨홀뚜껑)을 설치하고 있음에도 불구하고 초과호우 시 비산현상이 다발하고 있는 상황이다. 1997년 8월 7일의 실적유량에 대

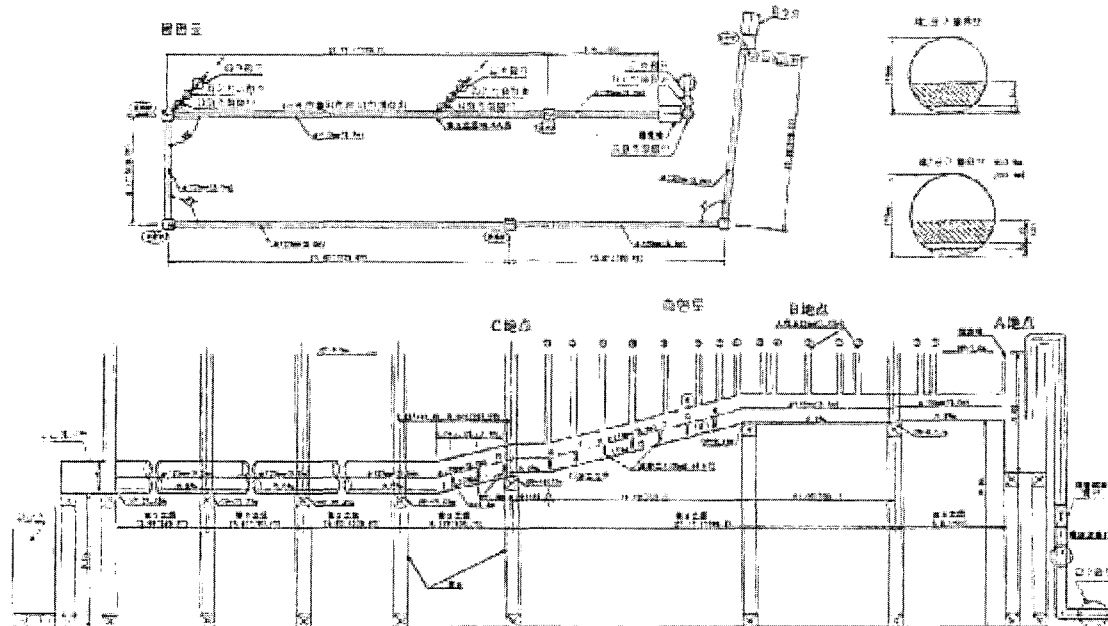


그림 4. A 간선수로 수리모형실험 평면 및 측면도

해서 지표유출 모듈인 Runoff를 사용하여 유역전체로부터 A간선에 유입되는 수문곡선을 산출하여, 이를 1/50으로 제작된 수리모형의 유량조건으로 하여 수리모형실험을 실시했다.

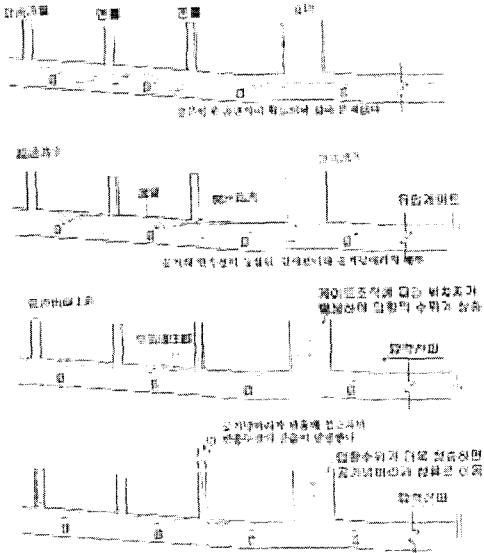


그림 5. 맨홀뚜껑 비산현상의 메커니즘

수리모형실험의 결과 비산현상의 메커니즘을 확인하였으며, 그림 5는 맨홀뚜껑 비산의 전형적인 패턴을 모식도로 나타낸 것이다.

결론적으로 말하자면, 급회 파악된 맨홀뚜껑 비산현상의 메커니즘은 ① 감세보 구간에서 도수현상이 발생하여, ② 유량의 증가에 따라 감세보마다 공기괴가 잔류하고, ③ 하류 펌프장 게이트 조작에 따른 써차지에 동반된 압력전파가 발생하였고, ④ 이 압력전파가 잔류 공기괴를 압축하여 상류 측으로 밀어붙여, ⑤ 최종적으로 이 압축공기괴가 맨홀에 있어서 팽창되면서 분출하는 과정에서 맨홀뚜껑이 비산한 것으로 관측되었다.

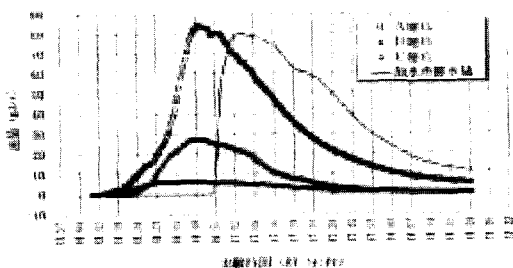


그림 6. 수리모형으로의 유입 경계수문곡선

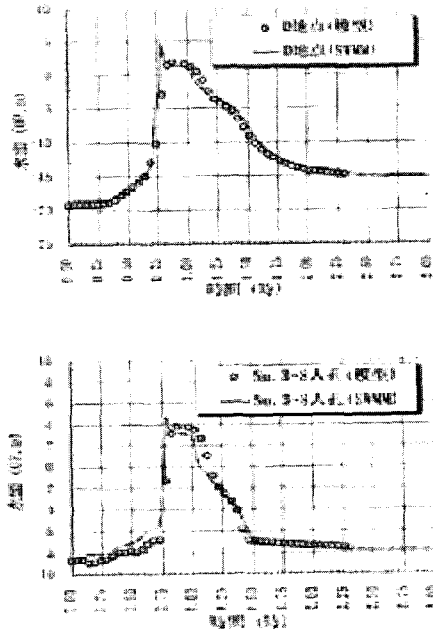


그림 7. 수치실험과 수리실험과의 비교도

2) SWMM 모듈의 검증

하수관수리해석에 사용하는 Extran 모듈의 검증을 그림 4의 수리모형실험을 사용하여 실시하였다. 검증에 사용한 수치모형은 23개의 맨홀과 22개의 관거, 3개소의 유입지점, 1개소의 유출지점으로 구성되어 있다. 또한 수치모형은 감세공을 갖지 않은 상태에서 펌프장의 수문 조작 및 펌프 조작을 하지 않은 상태로 행하였다. 실험에 사용한 유출수문곡선은 상술한 실험케이스에 있어서 분출현상이 발생할 것 같은 그림 6의 유입수문곡선을 부여하고 있다. 또한 이 때의 하류단의 경계조건은 모형의 침사지로부터 양수조에 떨어지는 월류유량의 시계열의 추정치를 사용했다. 그림 7은 모형실험과 수치 해석치를 비교한 것으로, 그림에서 볼 수 있듯이 수치해석해의 상승부분의 침도가 수리실험에서는 완만하게 나타나고 있으나 전체적으로는 수두의 급격한 증가 현상을 잘 재현하고 있다고 인정된다. 수리모형에 있어서 침예한 침도가 보이지 않은 이유는 모형축척(1/50)에 의한 물의 점성이나 표면장력이 실제의 상황과 상이한 것 때문인 것으로 판단된다.

3) 맨홀뚜껑 비산현상의 재현

A간선의 수리모형실험 결과를 사용하여 검증된 SWMM 모형을 B간선에 적용한다. B간선은 그림 8의 계통도에서 보이는 바와 같이 1개의 대규모 방수로(직경 10 m), 13개의 중간선과 1개의 펌프장(그림 중 抽水所로 표시)으로 구성되어 있다. 이 유역은 유역경사가

완만하기 때문에 과거로부터 상습침수지역이었으며, 이를 해소하기 위해서 기존 관거 유량의 일부를 분수소(分水所 : 기존의 간선으로부터 하수를 대규모 간선으로 분수하기 위한 시설, 그림 중에 □로 표시)에서 차집하여 대규모 방수로로 분수(分水)시키는 하수관망 시스템이 구축되어 있다.

이 간선에 있어서 No. 6번 점검맨홀(그림 중 ⊗로 표시) 및 C 분수소(그림 중 ⊕로 표시)에서 비산현상이 발생했으며, 당시의 제반상황을 고려하여 수치모형을 구축하였고, 비가 내리기 시작한 1997년 8월 7일, 오전 3시 30분 경에서부터 오전 8시 30분까지를 수치모의 했다.

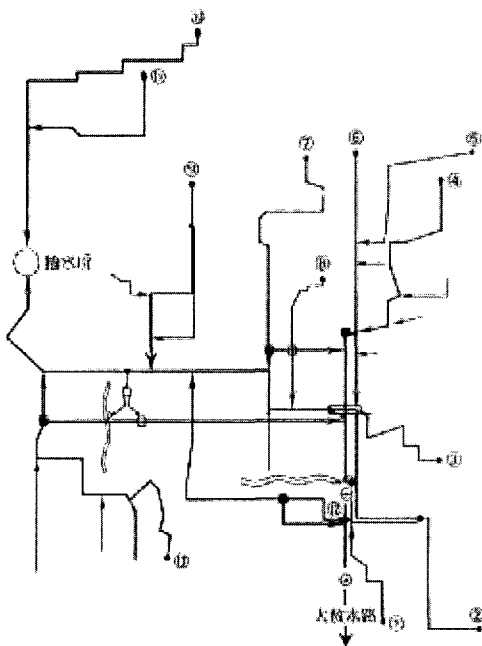


그림 8. B간선의 하수 계통도

표 2. 모형에 사용한 SWMM 계수

항 목	값
Flow Tolerance	0.0001
Head Tolerance	0.0001
Under-Relaxation Parameter	0.65
Time Weighting Factor	0.65
Conduit Roughness Factor	1.0
Maximum Time Step Iteration	10
Time Interval	10 초

표 2는 금회의 Runoff 와 Extran 해석에 사용한 모형 인자의 제원을 나타낸 것이다. 그림 9는 당시의 강우로 인하여 분수가 발생한 No. 6 번 점검맨홀과 맨홀 뚜껑의 비산이 있었던 C 분수소에 있어서의 압력수두의 시계열을 나타낸 것이다.

비산 발생 당시 현지 목격증언에 의하면, No. 6 번 점검맨홀의 분수현상은 개략 5시 15분 경에 일어났었다. 분수현상이 입항 내 공기의 초기압축과정에서 일어난 것인지 또는 입항 내 수두의 침투 발생시에서 일어났는지는 단언할 수 없으나, 그림에서 알 수 있듯이 수위 상승은 양 지반고를 넘고 있지는 않으나 써차지의 전파에 의한 압력수두의 급격한 상승이 No. 6 번 점검맨홀 지점과 C 분수소에 있어서 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

수리모형실험의 결과를 감안하여 고찰해 보면, 맨홀 뚜껑 비산현상의 원인은 이와 같은 압력수두의 이상상승에 동반된 점검맨홀 내의 압축공기의 분출에 있다고 판단된다. 즉, 관내 압력의 급격한 상승과 압축공기파의 분출이 동시에 일어날 때, 맨홀 뚜껑이 이와 같은 압력상승을 견디지 못하게 되어 파손 또는 비산 하는 경우, 압축공기의 순간적인 분출과 이에 동반되는 맨홀 내의 수면의 급속한 상승에 의해 맨홀뚜껑의 비산에 동반된 분수 등의 현상이 일어난 것으로 확인되었다.

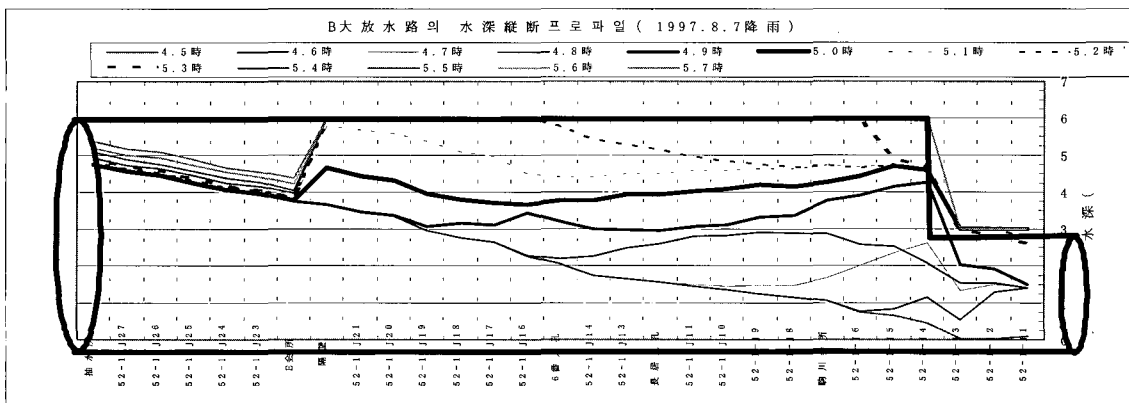


그림 9. B 방수로의 수심중단프로파일의 시계열도

이와 같은 압력수두의 급격한 상승의 직접적인 원인은 설계강우를 상회하는 강우에 의한 급속한 유입이 하류단의 격벽에 의해 차단되거나 게이트의 급격한 폐쇄에 의해 발생하는 것으로 추정된다. 즉, 그림 9에서 대규모 방수로에 있어서 수심의 종단변화를 살펴보면, 급격히 증가한 하수가 하류단의 격벽에서 막힌 후, 써차지 흐름을 일으켜 압력이 상류역에 전파함으로써 No. 6 번 점검맨홀의 압력이 급격히 상승하여 상류 측에 공기피가 잔류할 가능성을 확인할 수 있다.

4) 맨홀뚜껑 비산현상에 대한 대책

상술한 대규모 간선에서 발생 가능한 맨홀뚜껑 비산현상을 예방 내지 경감시키기 위한 대책으로는 최성열 등(8)에서 관내 공기가 잔류하지 못하게 하는 대책(공기분출관의 설치), 수문운영의 합리화, 초지저류량의 제한, 공기피를 야기 시키는 시설물의 철거, 내압력 맨홀의 설치 등을 들 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 맨홀뚜껑 비산현상에 대한 대책방안을 제안하기 위하여 수리실험과 수치실험을 병용하면서 비산현상의 메커니즘을 구명한 것이다. 본 연구를 통해 확인된 사항을 다음과 같다.

- ① 써차지 흐름을 포함한 비산현상에 대한 수치모의는 SWMM 모형을 적용함으로써 고정도로 구현할 수 있었다.
- ② 맨홀뚜껑 비산현상 메커니즘의 정성적인 원인은 하류단 게이트의 급격한 폐쇄나 격벽의 존재 등에 의해 일어나는 써차지발생과 이에 따른 압력 전파에 동반된 관내 압축공기의 팽창 및 분출이었다.
- ③ 양 실험결과에 기초하여 예방대책으로는 침사지

의 초지저류량의 제한, 공기피를 야기 시키는 구조물(감세보)의 개선 및 철거 등임을 확인하였다.

참 고 문 헌

- 1) W.C. Huber, J.P. Heaney, and B.A. Channingham.(1981) Storm water management model bibliography, EPA/600 /3-85-077, Cincinnati.
- 2) J.A. Cunge and M. Wegner.(1984) Mathematical modeling of complex surcharge systems, Proc. 3rd int. Conf. on urban storm drainage, Vol. 1, pp. 363-373.
- 3) J.A. Cunge and M. Wegner.(1964) Numerical integration of Barré de Saint-Venant's flow equations by means of an implicit scheme of finite differences, La houille Blanche, No. 1, 99. 33-39.
- 4) A. Sjöberg.(1981) Sewer network models DAGVL-A and DAGVL-DIEF, Proc. 2nd Int. Conf. on urban storm drainage, Vol. 1, pp. 127-136.
- 5) 中村 榮一, 清水 勉, 伊藤 修(1979) 合流式下水管の浸水對策シミュレーション, 第16回下水道研究發表會講演集, pp.53-56.
- 6) 渡辺 政弘(1989) 都市下水道流域の流出と流出抑制に關する基礎的研究, 愛媛大學博士論文, p.89.
- 7) 魚生川登, 谷澤 克, 新井 和(1997) 空氣が込められている地下放水路の流れにおける壓力波の伝播速度, 土木學會論文集, No.5, 79/ II-41, pp.191-196.
- 8) 崔 成烈 外(1999) 大規模 幹線の 安定的 運營に關する 檢討業務報告書, 建設技術研究所, pp. 5-10.

◎ 논문접수일 : 2004년 3월 23일

◎ 심사의뢰일 : 2004년 4월 01일

◎ 심사완료일 : 2004년 6월 21일