

Grid based Rainfall-runoff Model User's Manual

최윤석, 김경탁

한국건설기술연구원 수자원하천연구소

v.GRM2018.09
2018.9



한국건설기술연구원
KOREA INSTITUTE of CIVIL ENGINEERING and BUILDING TECHNOLOGY

History

GRM(Grid based Rainfall-runoff Model)은 한국건설기술연구원에서 개발된 격자 기반의 물리적 분포형 강우-유출 모형이다. GRM 모형의 개발 연혁은 다음과 같다.

- ▶ GRM 모형은 2008년에 처음 개발되었다. 지표면 유출, 하도 유출, 지표하 유출, 흐름 제어 유량 등을 모의할 수 있었다. 수자원 지리정보시스템인 HyGIS의 add-on인 HyGIS-GRM으로 개발되었다.
- ▶ 2010년에는 기저유출 모의가 추가되었다. 실시간 강우자료를 이용한 실시간 유출해석 모듈이 개발 되었다.
- ▶ 2012년에는 단일 유역에서의 다지점 보정 기법이 개발되었다.
- ▶ 2014년에는 침투, 지표하 유출, 기저유출 모의 기법이 개선되었다. 오픈소스 GIS인 MapWindow GIS(v.4.8.8)에서 실행할 수 있는 plug-in인 MW-GRM이 개발되었다.
- ▶ 2015년에는 계산시간 간격(dt)에 대한 민감도가 개선되었다. 실시간 유출해석 모듈에서 실시간 흐름제어(flow control)를 모의할 수 있도록 개선되었다. 다수의 유역시스템을 연계 해석할 수 있는 다지점 보정기법이 개발되었다.
- ▶ 2017년에는 GRM 모형을 GIS 및 GUI와 분리하여 독립적인 실행파일로 개발하였다. .NET을 이용한 병렬계산 기법과 계산시간 간격(dt)을 변화시킬 수 있는 기법이 적용 되었다.
- ▶ 2018년에는 오픈소스 GIS인 QGIS에서 실행할 수 있는 plug-in인 QGIS-GRM이 개발되었다.

GRM 모형은 한국건설기술연구원에서 지속적으로 개발되고 있으며, 모형의 안정성 향상, 기능 추가, 모델링 S/W 개발 등이 진행되고 있다.

2018. 03.

목 차

1. GRM 모형의 개요	1
1.1 모형구조	1
1.2 지표 흐름	2
1.3 침투	3
1.4 지표하 유출	4
1.5 기저유출	5
1.6 지배방정식의 이산화	6
1.7 Flow control	8
1.8 Calculation time step	10
2. 모형 매개변수	11
2.1 토양 매개변수	11
2.2 토지피복 매개변수	14
2.3 하폭	16
2.4 초기포화도	17
2.5 최소경사	17
2.6 하도 조도계수	18
2.7 건천차수	19
2.8 매개변수 보정계수	19
2.9 매개변수 추정	19
3. 다지점 보정	20
3.1 단일 유역 다지점 보정 기법	21
3.2 소유역 연계 다지점 보정 기법	22
4. 입력자료	24
4.1 공간자료	25
4.2 수문자료	27
4.3 GRM 프로젝트 파일	29

4.4 GRM Static 데이터	38
5. 출력자료	41
6. GRM-PEST	42
7. GRM Real Time	43
참 고 문 헌	45
부 록	49
가. GRM 프로젝트 파일 사례(유역 하나, Watch point 하나인 경우)	49
나. 유량 출력파일 사례(Watch point 하나인 경우)	55
다. GRM 프로젝트 파일 사례(다수 유역, 다수 Watch point, flow control이 있는 경우)	56
라. 유량 출력파일 사례(다수의 Watch point인 경우)	65
마. 실행환경 설정	66
바. 실행 파일, 샘플 자료	66
사. GRM 모형 실행 방법(Console window)	68
아. GRM 모형 실행 방법(GRMAalyzer)	69

표 목 차

표 1.1 Reservoir operation 기능의 적용을 위한 저수지 조건	9
표 2.1 GRM 모형의 입력자료와 매개변수	11
표 2.2 토성에 따른 Green-Ampt 침투 매개변수	12
표 2.3 토양통에 대한 토양심 분류	13
표 2.4 토지피복 속성별 조도계수	14
표 2.5 투수성에 따른 토지피복 항목 분류	15
표 2.6 토지피복도 속성별 불투수율	15
표 2.7 자연 하천에서의 조도계수	18
표 3.1 GRM 모형의 다지점 보정 대상 매개변수	21
표 4.1 GRM의 입력자료	24
표 4.2 GRM 입력 공간자료	26
표 4.3 GRM 입력 수문자료	27
표 4.4 프로젝트 xml 파일에서의 테이블 정의	29
표 4.5 ProjectSettings 테이블 명세서	30
표 4.6 SubWatershedSettings 테이블 명세서	34
표 4.7 WatchPoints 테이블 명세서	35
표 4.8 FlowControlGrid 테이블 명세서	35
표 4.9 GreenAmptParameter 테이블 명세서	36
표 4.10 SoilDepth 테이블 명세서	36
표 4.11 LandCover 테이블 명세서	37
표 4.12 GRM static xml 파일의 테이블 정의	38
표 4.13 GreenAmptSoilParameter 테이블 명세서	38
표 4.14 SoilDepthParameter 테이블 명세서	39
표 4.15 LandCoverParameter 테이블 명세서	39
표 4.16 GRM에서 사용되는 토성 코드 및 이름	39
표 4.17 GRM에서 사용되는 토양심 코드 및 이름	40
표 4.18 GRM에서 사용되는 토지피복 코드 및 속성	40
표 5.1 GRM의 모의결과 파일	41
표 7.1 실시간 유출해석 환경설정 파일(.REF) 구조	43
표 7.2 GRMRTStarter에서 제공되는 API	44

그 림 목 차

그림 1.1 수문성분의 유출과정	1
그림 1.2 검사체적에서의 수문성분 입출력	2
그림 1.3 비대칭 사다리꼴 하도 단면	3
그림 1.4 복단면 하도	3
그림 1.5 운동파 지표하 유출 모형	4
그림 1.6 이산화를 위한 검사체적 설정	6
그림 1.7 하폭이 격자 크기보다 작은 경우의 하도 격자	7
그림 1.8 하폭이 격자 크기보다 크거나 같은 경우의 하도 격자	7
그림 3.1 다지점 보정 매개변수 적용 방법	21
그림 3.2 소유역 연계 다지점 보정 기법의 개념도	23
그림 4.1 흐름방향 인덱스	25
그림 4.2 VAT 파일 예시	26
그림 4.3 수문자료 입력파일 사례	28
그림 7.1 REF 파일 사례	43

1. GRM 모형의 개요

1.1 모형구조

GRM(Grid based Rainfall-runoff Model)은 강우-유출 사상을 모의하기 위한 물리적 기반의 분포형 강우-유출 모형이다. 지표면 유출과 하도 유출의 해석을 위해서 운동파 모형을 이용하고 있으며, 침투량 산정은 Green-Ampt 모형을 이용하고 있다. 지배방정식의 해석은 유한체적법을 이용하고 있으며, 비선형항에 대해서는 Newton-Raphson 방법을 이용하여 수렴해를 도출한다(최윤석, 2010).

지표 유출은 지표면 유출(overland flow)과 하도 유출(channel flow)로 구분하였으며, 직접유출은 지표면 유출과 지표하 유출로 구성된다. 지표면 유출은 침투초과유출(Horton, 1933)과 포화초과유출(Dunne과 Black, 1970)에 의해서 발생하며, 침투 과정과 지표하 유출은 토양수대(soil water zone)(Bras, 1990)에 대해서 모의한다.

검사체적에 대한 수문성분의 입출력 모식도(한국건설기술연구원, 2011a)에서 흐름방향을 x 방향으로 설정하고, 수평 성분 중 흐름에 직각인 방향을 y 방향으로 설정하며, h 는 수심을 나타낸다. 검사체적으로서의 유입 수문성분은 상류 검사체적에서의 지표 유입량과 횡방향 유입량 및 강우량으로 구성되며, 검사체적으로부터의 유출 수문성분은 지표 유출량과 침투량으로 구성된다. 이때 침투량은 지표하 유출에 기여한다. 지표하 유출은 하류가 하천인 경우 하천의 횡방향 유입으로 작용하며, 포화된 지표면인 경우에는 지표면 유입에 기여한다(Beven과 Kirkby, 1979).



그림 1.1 수문성분의 유출과정



그림 1.2 검사체적에서의 수문성분 입출력

1.2 지표 흐름

지표흐름(surface flow)은 지표면 흐름(overland flow)과 하도 흐름(channel flow)으로 구분할 수 있으며, 이에 대한 유출해석을 위해서 운동파 방정식을 적용하고 있다. 운동파 방정식은 연속방정식과 운동량방정식의 조합으로 해석되며, 지표면 흐름에서의 연속방정식은 식 (1.2.1)과 같고, 하도 흐름에서의 연속방정식은 식 (1.2.2)를 적용한다. 식 (1.2.2)에서는 하도에서의 유효강우량을 생성항으로 분류하고, 측방유입량은 지표하 유출, 기저유출, 하도 셀에서의 지표면 유출량을 포함하고 있다(최윤석, 2010). 운동파 모형에서의 운동량 방정식은 식 (1.2.3)과 같다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r - f + \frac{q_r}{\Delta y} \quad (1.2.1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = r \Delta y + q_L + q_{ss} + q_b \quad (1.2.2)$$

$$S_0 = S_f \quad (1.2.3)$$

여기서 q : 단위 폭당 유량($q = uh$), u : x 방향 유속, r : 강우강도, f : 침투율, q_r : 복귀류, A : x 방향에 직각인 흐름 단면적, Q : 유량, h : 수심, q_L : 지표면 흐름에 의한 측방유입, q_{ss} : 하도로 유입되는 지표하 유출, q_b : 기저유출, t : 시간

식 (1.2.3)에 의해서 Manning의 유속공식에서 마찰경사 대신에 바닥경사를 적용함으로써 유속을 계산할 수 있다. 수심이 작은 지표면 흐름에서는 동수반경으로 수심을 근사적으로 적용하며, 하도 추적에서의 동수반경은 비대칭 사다리꼴 단면을 적용할 수 있다.

$$u = \frac{R^{2/3} S_0^{1/2}}{n} \quad (1.2.4)$$

여기서 n : 조도계수, R : 동수반경

$$R = \frac{b_s \cdot h}{b_s + 2h} \approx h \quad (1.2.5)$$

여기서 b_s : 지표면 흐름에서 검사체적의 폭($b_s \gg h$)

$$R = \frac{b + \frac{h^2}{2} \left(\frac{1}{SLB} + \frac{1}{SRB} \right)}{b + h \times \sqrt{1 + \frac{1}{SLB^2}} + h \times \sqrt{1 + \frac{1}{SRB^2}}} \quad (1.2.6)$$

여기서, $SLB = h/bLB$, $SRB = h/bRB$, b : 하폭



그림 1.3 비대칭 사다리꼴 하도 단면

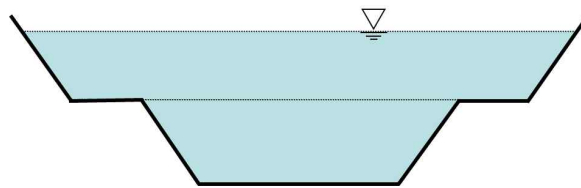


그림 1.4 복단면 하도

1.3 침투

GRM은 강우강도가 침투율보다 클 때 발생하는 침투초과유출과 토양의 포화시 발생하는 포화초과유출을 모의할 수 있으며, 침투량 산정을 위하여 Green-Ampt 모형을 적용한다. Green-Ampt 모형에서는 식 (1.3.1)과 같이 누가침투량을 계산하고 있으며, 침투율은 누가침투량을 이용해서 식 (1.3.2)로 계산된다.

$$F(t) = Kt + \Delta\theta\psi \ln\left(1 + \frac{F(t)}{\Delta\theta\psi}\right) \quad (1.3.1)$$

$$f(t) = K\left(\frac{\psi\Delta\theta}{F(t)} + 1\right) \quad (1.3.2)$$

여기서 $F(t)$: t 시간에서의 누가침투량, $f(t)$: t 시간에서의 침투율, $\Delta\theta$: 토양수분함량변화($\Delta\theta = (1 - S_e)\theta_e$), S_e : 유효포화도($S_e = (\theta - \theta_r)/(\eta - \theta_r)$), θ : 수분함량($\theta_r \leq \theta \leq \eta$), θ_r : 잔류 수분함량($\theta_r = \eta - \theta_e$), η : 공극율, θ_e : 유효공극율, ψ : 습윤전선흡인수두, K : 수리전도도

1.4 지표하 유출

Beven(1981)은 포화상태에서의 지표하 흐름의 모의를 위해서 운동파 모형을 적용한 바 있다. 운동파 모형을 이용한 지표하 흐름은 포화된 검사체적 내에서의 동수경사가 지표면 경사와 같다는 가정에 기반하고 있으며, 식 (1.4.1)을 이용해서 지표하 유출을 계산한다.

$$q_{ss} = KD_s \sin(S_a) \quad (1.4.1)$$

여기서 q_{ss} : 지표하 유출, D_s : 포화된 토양 깊이, S_a : 지면의 경사각

운동파 모형에 의한 지표하 유출의 모의는 깊이가 D 인 토양에 대해서 다음 그림과 같이 나타낼 수 있다(최윤석, 2010). GRM에서는 검사체적에서의 지표하 유출의 동수경사를 지표면 경사와 동일한 일정한 값으로 가정하며, 포화된 토양 깊이에 대해서 지표하 유출을 모의한다. 이때 침투에 의해서 포화된 토양의 깊이가 발생하면 지표하 유출은 하도 흐름에서의 측방유입 성분으로 기여하고, 검사체적에서의 토양이 완전히 포화될 경우($D_s = D$) 지표면 유출에 기여하는 포화초과유출과 국부적인 복귀류(Dunne과 Black, 1970)를 모의한다.

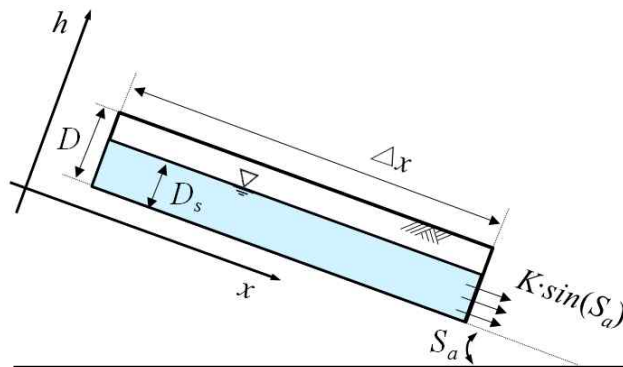


그림 1.5 운동파 지표하 유출 모형

Sloan과 Moore(1984)는 완전히 포화된 토양이 포함된 임의 구간에서의 유출량 계산을 위해서 물수지에 기반한 Simple Storage-Discharge 모형을 제안하였다. 식 (1.4.2)는 완전히 포화된 토양에서의 포화초과유출과 지표하 유출을 나타내고 있으며, GRM에서 각 성분은 하류 검사체적에 대해서 지표면 유입량과 측방유입 혹은 복귀류의 모의에 적용된다. 특히 강우와 유출이 발생되면 포화된 토양의 깊이는 가변적이다. 그러므로 완전히 포화된 토양에 대해서만 모의하고 있는 포화초과유출과 복귀류가 발생하는 검사체적도 가변적이게 된다 (Dunne and Black, 1970; Bras, 1990; 박종관 등, 2006).

$$q_o = i_s L_s + q_{ss} \quad (1.4.2)$$

여기서 q_o : 임의 구간 하단부에서의 단위 폭당 유량, L_s : 지표면까지 포화된 구간의 지표면 길이, i_s : 포화된 수면과 직각으로 유입되는 외부로 부터의 유입률

1.5 기저유출

GRM에서는 토양을 2개의 층으로 구분한다. 상부에 있는 A 층에서는 침투와 지표하 유출을 모의하고, 하부의 B 층에서는 기저유출을 모의한다. A 층이 포화될 경우 B 층으로의 침투현상이 발생하며, 침투깊이는 식 (1.5.1)과 같이 계산한다.

$$p = K_{Bv} \times \Delta t \quad (1.5.1)$$

여기서 K_{Bv} : B 층에서의 연직 투수계수, p : Δt 시간 동안의 침투량

B 층에서의 횡방향 유량은 Darcy의 법칙(Freeze and Cherry, 1979)을 기반으로 식 (1.5.2)와 같이 계산할 수 있으며, 이때 Δx 구간에서의 수두차를 지표면 경사와 같다고 가정하고 식 (1.5.3)을 적용한다.

$$q_{Bh} = K_{Bh} D_B \frac{dz_B}{dx} \quad (1.5.2)$$

$$q_{Bh} = K_{Bh} D_B \sin(S_a) \quad (1.5.3)$$

여기서 z_B : B 층의 수위, K_{Bh} : B 층의 횡방향 투수계수, D_B : B 층의 수심, q_{Bh} : B 층의 단위폭당 횡방향 유량

비피압대수층과 하천과의 유량 교환은 비피압대수층의 수심(h_B)이 하도 수심(h_{ch})보다 클 경우($h_B > h_{ch}$)에는 식 (1.5.4)를 이용하여 하도로 유입되는 기저유출량을 계산하고, 비피압

대수층의 수심이 하도 수심보다 작을 경우($h_B < h_{ch}$)에는 식 (1.5.5)를 이용하여 하도에서 토양 B 층으로의 유출을 계산한다.

$$q_b = K_{Bh} \frac{h_B - h_{ch}}{h_{ch}} b \quad (\text{for } h_B > h_{ch}) \quad (1.5.4)$$

$$q_b = K_{Bh}(h_B - h_{ch}) \quad (\text{for } h_B < h_{ch}) \quad (1.5.5)$$

여기서 h_B : 비피압대수층의 수심, h_{ch} : 하도 수심, b : 하폭, q_b : 검사체적 단위 길이 당 기저유량

1.6 지배방정식의 이산화

GRM은 유한체적법을 이용하여 지배방정식을 이산화 하며, 이를 위한 검사체적의 설정은 다음 그림과 같다(최윤석 등, 2008). 검사체적의 번호는 변수의 아래첨자 i 로 표시하고 있으며, 검사체적의 중심부를 p , 검사체적으로 유입이 발생하는 상류 방향($-x$ 방향)의 검사체적면을 w , 유출이 발생하는 하류 방향(x 방향)의 검사체적면을 e 로 표시한다(Patankar, 1980).

지표면 및 하도 흐름해석을 위한 연속방정식을 검사체적 CV_i 에 대해서 x 와 t 항에 대해 적분 한 후 이산식을 작성하면 식 (1.6.1) 및 식 (1.6.2)와 같고, 비선형항은 Newton-Raphson 방법으로 반복 계산하여 수렴해를 도출한다(최윤석, 2010). 식 (1.6.1)에서 하나의 격자에서 지표면 흐름과 하도 흐름을 함께 모의해야 하는 경우에는 지표면 흐름의 해석에 적용되는 Δy_i 로 격자의 y 방향 크기(Δy)에서 하폭(b)을 제외한 길이를 적용한다.

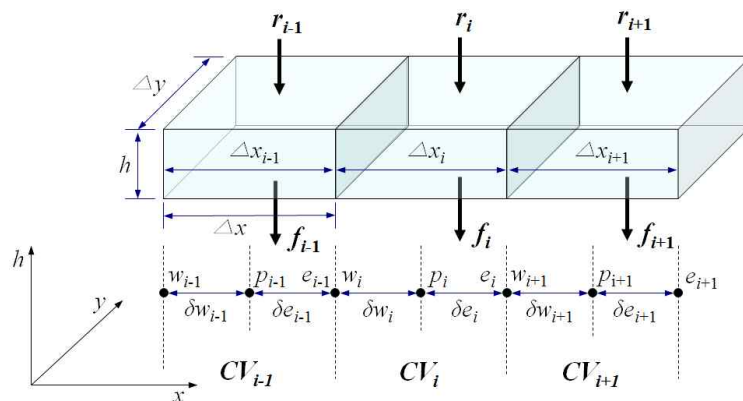


그림 1.6 이산화물을 위한 검사체적 설정

$$h_{ip}^{j+1} = h_{ip}^j - \alpha (\bar{u})_{ie}^{j+1} h_{ie}^{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \alpha (\bar{u})_{iw}^{j+1} h_{iw}^{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} - (1 - \alpha) \{ (\bar{u})_{ie}^j h_{ie}^j - (\bar{u})_{iw}^j h_{iw}^j \} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \{ \alpha S_i^{j+1} + (1 - \alpha) S_i^j \} \Delta t \quad (1.6.1)$$

여기서 S_i : 생성 항($S_i = r_i - f_i + \frac{q_{ri}}{\Delta y_i}$), $\Delta y_i = \Delta y - b_i$, b_i : 검사체적 CV_i 에 설정된 하폭

$$A_{ip}^{j+1} = A_{ip}^j - \alpha(\bar{u})_{ie}^{j+1} A_{ie}^{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \alpha(\bar{u})_{iw}^{j+1} A_{iw}^{j+1} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} - (1 - \alpha) \{ (\bar{u})_{ie}^j A_{ie}^j - (\bar{u})_{iw}^j A_{iw}^j \} \frac{\Delta t}{\Delta x_i} + \{ \alpha S_i^{j+1} + (1 - \alpha) S_i^j \} \Delta t \quad (1.6.2)$$

여기서 S_i : 생성 항($S_i = r_i \Delta y_i + q_{Li} + q_{ssi} + q_{bi}$)

하도의 특성을 가지는 임의의 검사체적은 하폭과 격자 크기에 따라서 다음 그림과 같이 하폭이 격자 크기보다 작은 경우와 하폭이 격자 크기보다 크거나 같은 경우로 구분된다. 하폭이 격자 크기보다 작은 경우에는 해당 검사체적에 대해서 지표면 유출, 하도 유출 모의에 필요한 모든 수문성분이 모의되며, 하폭이 격자 크기보다 크거나 같은 경우에는 하도 유출만이 모의된다. 이때 해당 검사체적에서 발생한 강우는 하폭의 범위 안에서 발생하는 경우와 하폭의 범위 밖에서 발생하는 경우로 구분된다. 하폭 내에서 발생한 강우는 하천의 직접 유출에 모두 기여하고, 하폭 밖의 지표면 부분에서 발생한 강우는 지표면 유출 과정에서와 같이 침투 과정의 해석을 거친다. 그러므로 하도 유출 해석을 위한 식 (1.6.2)에서의 Δy_i 는 하폭이 격자의 크기보다 크거나 같은 경우에는 격자의 y 방향 크기와 같은 값을 적용($\Delta y_i = \Delta y$)하며, 하폭이 격자의 크기보다 작은 경우에는 하폭을 적용($\Delta y_i = b_i$)한다.

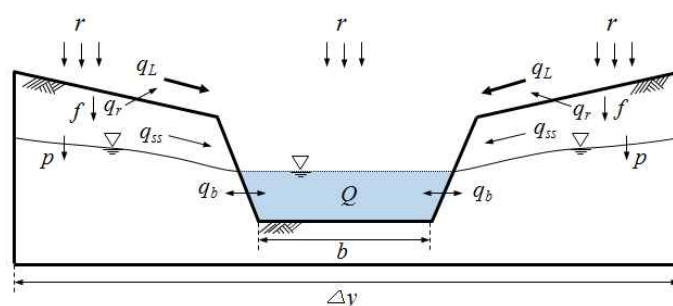


그림 1.7 하폭이 격자 크기보다 작은 경우의 하도 격자

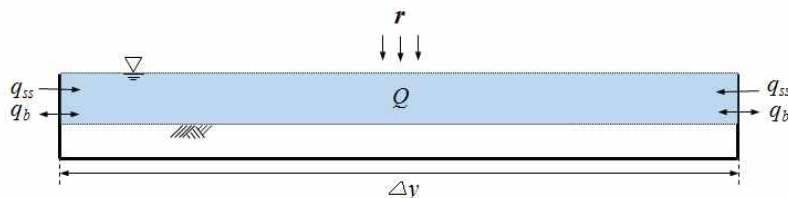


그림 1.8 하폭이 격자 크기보다 크거나 같은 경우의 하도 격자

1.7 Flow control

GRM은 강우에 의한 직접유출과 같은 자연유하의 모의와 함께 Flow control 모듈을 이용해서 유역내에서 발생하는 인위적인 유량 조건의 변동을 유출모의에 반영할 수 있다. Flow control 모듈을 이용해서 모의할 수 있는 유량 조건은 "Reservoir outflow", "Inlet", "Reservoir operation", "Sink flow", "Source flow" 이다. Flow control 기법은 하도 흐름특성 및 지표면 흐름특성을 가지는 격자에 대해서 모두 적용할 수 있으며, 하나의 유역내에서 다수의 Flow control 조건을 복합적으로 적용함으로써 강우에 의한 직접유출량과 함께 유출모의 기간에 발생하는 다양한 유량조건의 변동을 유출모의에 반영할 수 있다(한국건설기술연구원, 2011b).

1.7.1 Reservoir outflow

"Reservoir outflow" 기능에서는 저수지로 지정된 격자를 기준으로 유역을 상류와 하류로 분리해서 유출모의를 수행하며, 저수지 운영 식을 고려하지 않는다. 저수지로 지정된 검사체적에서의 유출량은 식 (1.7.1)과 같이 사용자에게 의해서 입력된 저수지의 관측 유출 수문곡선을 이용하여 설정되며, 저수지 직하류에 위치한 검사체적은 저수지의 유출량을 상류단 경계조건에 포함시켜서 유출모의를 수행한다.

$$q_{ie} = q_o \quad (1.7.1)$$

여기서 q_{ie} : 저수지로 설정된 검사체적 i 에서 유출되는 단위 폭 당 유량, q_o : 저수지의 관측 유출수문곡선으로 부터 계산된 단위 폭 당 유량

1.7.2 Inlet

Inlet으로 지정된 격자를 기준으로 유역을 상류와 하류로 구분한다. 특정 격자를 기준으로 유역을 분할하여 유출모의를 수행하는 것은 "Reservoir outflow"와 동일하나, "Inlet"에서는 Inlet으로 지정된 격자의 상류는 유출모의를 수행하지 않는 특징이 있다. 저수지 운영 식을 고려하지 않으며, Inlet 격자에 대해서 유출 수문곡선이 주어진다면 Inlet 격자에서의 유출량은 식 (1.7.1)과 동일한 방법으로 계산되고, 이는 Inlet의 하류 셀에서 상류단 경계조건으로 적용된다.

이와 같은 "Inlet" 기능은 댐과 저수지가 포함된 대유역에서 댐 혹은 저수지로부터의 관측 유출 수문곡선이 있을 경우, 댐과 저수지 상류 영역을 모의대상 영역에서 제외하고 하류 영역만을 모의할 수 있으며, 이로 인해서 유출모형에서 필요로 하는 공간자료 및 시계열 수문자료의 구축 영역을 줄일 수 있는 장점이 있다. 격자 기반의 분포형 모형에서는 모의대상 영역이 줄어들 경우 유역을 구성하는 격자의 개수가 줄어들게 되며, 유출모의 소요시간을 단축시킬 수 있다. 또한 동일한 유출모의 시간을 적용할 경우에는 유역의 격자 크기를 작게

구성할 수 있으며, 이를 통해서 격자 크기의 스케일 문제에서 발생될 수 있는 격자 형식의 지형 및 수문자료의 불확실성을 줄일 수 있다.

1.7.3 Reservoir operation

“Reservoir operation” 기능에서는 저수지에서의 저류 영향과 저수지 운영을 유출모의에 반영할 수 있다. GRM에서는 초기저류량, 최대저류량, 최대저류율, 일정방류량, 수위-저류량 및 수위-방류량 관계에 의한 ROM(Reservoir Operation Method)을 동적으로 모의할 수 있으며, 이를 위해서는 다음 표와 같은 저수지 제원과 ROM이 필요하다.

표 1.1 Reservoir operation 기능의 적용을 위한 저수지 조건(최윤석, 2010)

구분		설명
제원	초기저류량	저수지의 초기 저류량
	최대저류량	저수지의 최대 저류량
	최대저류율	최대 저류량의 가용율
ROM	Automatic ROM	저수지의 최대 가능 저류량에 도달하기 전까지는 저수지 유출이 발생하지 않으며, 최대 가능 저류량에 도달 할 경우, 저수지로 유입되는 모든 유량이 유출
	Rigid ROM	저수지의 저류량이 설정된 방류량 보다 작을 경우는 모두 방류. 저수지의 저류량이 설정된 방류량 보다 클 경우 설정된 일정 유량을 방류하다가 저류량이 저수지의 최대 가능 저류량을 초과할 경우 저수지로 유입되는 유량이 모두 방류
	일정 방류량	저수지의 용량에 관계없이 일정한 양을 일정한 시간 동안 방류
	저류량-방류량 관계식	저류량-방류량 관계식 혹은 수위-저류량, 수위-방류량 관계식을 이용하여 저류량과 방류량을 계산(소스코드 수준에서만 지원됨)

1.7.4 Sink flow / source flow

“Sink flow”는 임의 격자에 대해서 모의된 유출량의 일부가 배제되는 조건을 모의하고 있으며, “Source flow”에서는 임의 격자에 대해서 모의된 유출량에 추가되는 유량 조건이 있을 경우 이를 반영하여 유출모의를 수행한다. “Sink flow”와 “Source flow”에 의해서 배제 혹은 추가되는 유량은 수문곡선으로 주어지며, 지표면 유출 및 하도 유출모의시 생성항(source term)으로 적용된다. “Sink flow” 혹은 “Source flow”는 하도 셀에 대해서 “Reservoir operation” 기능을 동시에 적용할 수 있으며, 이를 통해서 저수지 운영을 함께 모의할 수 있다.

1.8 Calculation time step

GRM 모형의 계산시간 간격은 전체 모의기간에서 하나의 계산시간 간격(Δt)을 적용하는 경우와 계산된 유량에 따라서 계산시간 간격을 달리 적용하는 경우로 구분된다. 하나의 계산시간 간격을 적용하는 것은 사용자에게 의해서 설정된 계산시간 간격을 모의기간 동안 계속 동일한 값으로 적용하는 것이다. 계산시간 간격을 변경시키는 것은 CFL (Courant–Friedrichs–Lewy) 조건을 이용해서 계산 단계마다 계산시간 간격을 변화시키는 것이다. CFL 조건은 다음 식과 같다.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{u_{\max}} \quad (1.8.1)$$

여기서 u_{\max} : t 시간에서 계산된 전체 격자에서의 유속 중 최댓값, Δt : $t + \Delta t$ 시간에서의 계산시간 간격

2. 모형 매개변수

GRM 모형은 강우-유출 현상을 물리적으로 해석하고 있으며, 이를 위해서 격자별로 부여된 물리적인 매개변수를 사용한다. 이때 유역경계, 하천망, 토양, 토지피복 등에 의해서 설정되는 물리적 매개변수는 이론적으로는 사용자에게 의한 매개변수 추정 대상에서 제외되어야 하지만, 모형의 지배방정식의 제약과 자료의 생성과정 및 스케일의 문제로 인하여 필요에 따라서는 매개변수 추정의 대상이 되기도 한다.

GRM에서는 물리적인 특성을 반영하는 고정된 매개변수가 아닌 사용자에게 의해서 추정되어야 하는 매개변수로 토양의 초기포화도, 하도 최소경사, 하도 조도계수, 건천차수 등을 제시하고 있으며, 토양 및 토지피복 특성별로 설정된 각 매개변수를 일괄적으로 보정하기 위한 매개변수 보정계수를 적용할 수 있다.

표 2.1 GRM 모형의 입력자료와 매개변수

모형 입력자료	설정 매개변수
유역	검사체적 번호, 격자크기, 유출해석 영역
흐름방향	상하류 검사체적, 흐름 관계, 계산 순서
흐름누적수	
경사	경사, 하도 최소경사
하천망	최소하폭, 하천 검사체적, 하천차수, 건천차수, 하도 조도계수
토지피복도	지표면 조도계수, 불투수율
토양도	Green-Ampt 매개변수, 유효토심
강우	강우, 초기포화도
유량(지점자료)	초기유량

2.1 토양 매개변수

GRM은 침투과정의 모의를 위해서 Green-Ampt 모형을 이용하고 있다. 이에 따라 침투 초과유출을 모의하기 위한 토양속성별 Green-Ampt 모형의 매개변수와 포화초과유출과 지표하 유출을 모의하기 위한 토양심을 설정해야 한다.

Green-Ampt 모형을 이용하여 침투량을 계산하기 위해서는 토양에 대한 공극율, 유효공극율, 습윤전선흡인수 등 및 수리전도도와 같은 물리적 특성을 알아야 하며, 이러한 토양 특성은 토양 수분의 실측을 통해서 얻을 수 있다(Brakensiek 등, 1981). Rawls 등(1983)은 미국 내 약 5,000개의 토양을 분석하고, 토성별 Green-Ampt 모형의 매개변수의 평균값을 제안하였다. Green-Ampt 모형에서 토양의 유효포화도를 결정하는데 적용되는 초기수분함량(θ)을

제외한 모든 매개변수는 토성에 따라서 미리 정해진 값을 이용하며, 유출모의 과정에서 각 매개변수를 추정할 수 있다. 초기수분함량(θ)은 실측 혹은 매개변수 추정에 의해서 결정될 수 있으며, 선행강우와 같은 유역의 수문학적 조건에 따라서 달라질 수 있다.

한국에서 일반적으로 활용할 수 있는 토양도는 한국농업기본도, 한국개략토양도, 개략토양도 및 정밀토양도가 있다(김경탁, 1998). 이 중 정밀토양도는 현지 조사를 위주로 수행된 정밀토양조사에 의해서 작성된 토양도로 한국토양을 토양통(soil series)으로 분류하고 이를 토양구(soil type), 토양상(soil phase)으로 세분하고 있으며, 가장 작은 단위인 토양상에 대한 물리적 특성을 포함하고 있다(농업기술연구소, 1992).

Green-Ampt 모형의 매개변수는 토성(soil texture)별로 설정되어 있으며, 정밀토양도에서는 토양구에 대해서 이와 동일한 토성 분류를 적용하고 있다. 또한 포화초과유출의 계산을 위한 한국토양의 토양심은 정밀토양도의 토양통을 기준으로 분류하고 있으며, 토양조사사업의 성과를 바탕으로 다음과 같은 토양심 분류별 값의 범위를 설정하고 있다(농업기술연구소, 1992).

표 2.2 토성에 따른 Green-Ampt 침투 매개변수(Rawls 등, 1983; Chow 등, 1988)

Soil Texture	Porosity (η)	Effective porosity (θ_e)	Residual moisture content ($\theta_r = \eta - \theta_e$)	Wetting front soil suction head ($ \psi_f $)[cm]	Hydraulic conduct. (K) [cm/hr]
Sand (사토)	0.437 (0.374-0.5)	0.417 (0.354-0.479)	0.02	4.95 (0.97-25.35)	11.78
Loamy sand (양질사토)	0.437 (0.363-0.505)	0.401 (0.329-0.472)	0.036	6.13 (1.35-27.93)	2.99
Sandy loam (사양토)	0.453 (0.351-0.554)	0.412 (0.283-0.54)	0.041	11.01 (2.67-45.46)	1.09
Loam (양토)	0.463 (0.375-0.55)	0.434 (0.334-0.533)	0.029	8.89 (1.33-59.37)	0.34
Silt loam (미사질양토)	0.501 (0.42-0.581)	0.486 (0.394-0.577)	0.015	16.68 (2.92-95.38)	0.65
Sandy clay loam (사질식양토)	0.398 (0.332-0.463)	0.33 (0.235-0.424)	0.068	21.85 (4.42-108.1)	0.15
Clay loam (식양토)	0.464 (0.409-0.518)	0.309 (0.279-0.5)	0.155	20.88 (4.79-91.9)	0.1
Silty clay loam (미사질식양토)	0.471 (0.418-0.523)	0.432 (0.347-0.516)	0.039	27.3 (5.67-131.49)	0.1
Sandy clay (사질식토)	0.43 (0.37-0.489)	0.321 (0.207-0.434)	0.109	23.9 (4.08-140.1)	0.06
Silty clay (미사질식토)	0.479 (0.425-0.532)	0.423 (0.334-0.511)	0.056	29.22 (6.13-139.3)	0.05
Clay (식토)	0.475 (0.427-0.522)	0.385 (0.269-0.5)	0.09	31.63 (6.39-156.4)	0.03

표 2.3 토양층에 대한 토양심 분류(농업기술연구소, 1992)

토양심 분류		토양심[cm]	
		미농무성	정밀토양조사
Very shallow	매우얕음	0 - 10	0 - 20
Shallow	얕음	10 - 30	20 - 50
Moderately deep or Moderately shallow	보통	35 - 50	50 - 100
Deep	깊음	50 - 60	100 - 150
Very Deep	매우깊음	> 60	> 150

GRM은 토양층 A에서 B로의 침누계산을 위해 불포화투수계수를 사용한다. Fredlund et al. (1994)에 의하면 Averjanov (1950)는 토양의 포화도를 이용하여 아래와 같은 power function 형식의 불포화투수계수 산정식을 제안하고 있다. Fredlund et al. (1994)에서는 n 값으로 3.5를 제시하였으며, Noh et al. (2015)에서는 장기간의 연속형 모의에서 n 값으로 12를 사용한바 있다. GRM에서는 강우-유출 사상의 모의를 위한 n 값으로 6.4를 기본값으로 제시하고 있다.

$$K_u = K_s S_r^n \quad (2.1.1)$$

여기서 K_u : 불포화투수계수, K_s : 포화투수계수, S_r : 토양의 포화도
 $\{ = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \}$, θ_r : 잔류 수분함량, θ_s : 포화 수분함량, n : 계수

GRM은 power function 형식의 식과 함께 다음의 식을 선택해서 사용할 수 있으며, 이 식에서 GRM은 n 의 기본값으로 0.2, m 의 기본값으로 0.1을 제시한다.

$$K_u = n K_s S_r \quad (2.1.2)$$

$$K_u = m K_s \quad (2.1.3)$$

2.2 토지피복 매개변수

유역의 토지피복은 지표면 흐름의 계산을 위한 조도계수와 불투수율의 설정에 영향을 미친다. GRM에서는 강우에 의한 지표면 유출의 모의를 위해서 Engman(1986), Vieux(2004) 등에 의해서 제안된 토지피복에 따른 조도계수를 참고하여 다음 표와 같이 적용하고 있다.

표 2.4 토지피복 속성별 조도계수

토지피복도 대분류(환경부)		조도계수
속성 값	속성	
100	시가화/건조지역	0.015
200	농업지역	0.035
300	산림지역	0.1
400	초지	0.15
500	습지	0.07
600	나지	0.02
700	수역	0.03

지표면에서의 불투수 영역은 강우가 발생하더라도 토양으로의 침투가 발생되지 않는 영역을 의미한다. 사공호상(2003)은 1m의 공간해상도를 가지는 IKONOS 위성영상을 이용해서 토지피복을 표 2.4와 같이 투수지역과 불투수지역으로 구분하고, 이를 안양시의 토지용도별 항목에 적용함으로써 토지용도별 불투수율을 산정하였다. GRM에서는 사공호상(2003)의 연구 결과 중 환경부의 토지피복도 대분류 속성에 대응하는 항목에 대한 불투수율을 적용하였으며, 이는 표 2.5와 같다. 표 2.5에서 불투수율은 0~1의 범위를 가지며, 불투수율이 "1"인 경우 해당 토지피복 속성을 가지는 격자는 모두 불투수 영역으로 설정된다. 또한 수역과 습지에서의 토양은 항상 포화된 것으로 볼 수 있으므로, 강우에 의한 침투가 발생하지 않는 것으로 가정하고 불투수율을 "1"로 설정하고 있다.

표 2.5 투수성에 따른 토지피복 항목 분류(사공호상, 2003)

투수지역	불투수 지역
식생	도로
경작지	콘크리트 구조물
비닐하우스	아파트
하천	단독주택
나대지	연립주택
기타초지	주택 외 건물
철도	공장

표 2.6 토지피복도 속성별 불투수율(사공호상, 2003)

토지피복 속성	토지이용 속성(Sagong, 2003)	불투수율	
		값의 범위	평균
시가화/건조지역	상업지역	0.641-0.947	0.853
농업지역	논	0.107-0.456	0.391
	밭	0.053-0.504	
	비닐하우스	0.422-0.842	
산림지역	개발제한구역, 비시가화지역, 산림	0.001-0.05	0.025
초지	초지	0.14-0.86	0.44
수역	-	-	1
나지	나지	0.12-0.81	0.442
습지	-	-	1

2.3 하폭

하폭은 하도 유출을 모의하기 위한 매개변수이다. GRM에서는 사다리꼴 비대칭 복단면을 모의할 수 있으며, 이 때 하폭은 하도에서의 통수단면적을 결정하는데 이용된다. 유역에서의 하천은 불규칙적인 복단면과 하폭을 형성하고 있으며, 이러한 다양한 하도의 형상을 모든 하천 격자에 대해서 입력하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 홍수 유출모의를 위해서는 객관성 있는 매개변수를 이용하여 모든 하천 격자에서 일관성 있는 모의결과를 얻을 수 있도록 하폭을 입력하는 것이 중요하다(오경두, 2009). GRM에서는 격자에서의 흐름누적수를 이용하는 방법과 계획하폭 공식을 이용하는 방법을 적용할 수 있다.

2.3.1 흐름누적수를 이용하는 방법

유역 격자에서 흐름누적수는 하류에 있는 격자 일수록 크며, 일반적으로 하폭 또한 하류의 하폭이 상류에 비해서 넓다. 흐름누적수를 이용하는 방법은 이러한 현상을 반영하여 흐름누적수에 비례하여 하폭을 설정하는 방법이다. 이때 임의 검사체적(CV_i)에서의 하폭은 식 (2.3.1)과 같이 계산할 수 있다. 유역에서 최하류에 있는 격자는 최대 흐름누적수를 가진다. 식 (2.3.1)을 이용해서 계산된 하폭은 최하류 격자에서 최댓값이 설정되고, 상류에 있는 격자 일수록 작은 값이 설정된다. 식 (2.3.1)을 이용해서 하폭을 결정할 경우 최하류 격자에 해당하는 지점의 실측 하폭을 적용할 수 있으며, 이를 이용하여 상류 격자에 대해 일관된 방법으로 하폭을 설정할 수 있다(최윤석, 2010).

$$b_i = \frac{FA_i \times b_{max}}{FA_{max}} \quad (2.3.1)$$

여기서 b_i : CV_i 에서의 하폭, FA_{max} : 최하류 검사체적의 흐름누적수, FA_i : CV_i 에서의 흐름누적수, b_{max} : 최하류 검사체적에서의 하폭

2.3.2 계획하폭 공식을 이용하는 방법

건설교통부(2005)에서는 하도계획 수립시 계획홍수량에 따른 계획하폭의 설정을 위해서 경사와 유역 면적과 같은 지형적 특성을 이용한 경험공식을 제안하고 있다. 남부지방(호남, 영남)에서는 식 (2.3.2), 중부지방(경기, 강원, 충청북)에서는 식 (2.3.3)을 적용한다.

$$B = 1.698 \frac{A_w^{0.318}}{S_0^{0.5}} \quad (2.3.2)$$

$$B = 1.303 \frac{A_w^{0.318}}{S_0^{0.5}} \quad (2.3.3)$$

여기서 A_w : 유역면적[km^2], S_0 : 하상경사

계획하폭 공식을 이용하여 격자별 하폭을 계산하기 위한 유역면적(A_w)으로는 각 격자별 유역면적을 적용하며, 격자별 유역면적은 해당 격자의 흐름누적수와 격자 면적의 곱으로 다음 식과 같이 계산된다. 또한 하상경사(S_0)는 모형의 입력자료인 경사 레이어에서 설정된 각 격자별 경사를 적용할 수 있다.

$$A_{wi} = (FA_i + 1) \times (\Delta y)^2 \quad (2.3.4)$$

여기서 A_{wi} : 임의 검사체적 i 의 유역 면적

2.4 초기포화도

초기포화도는 침투해석시 침투율, 최대 가능침투량 등을 계산할 때 사용되는 매개변수로써 유출해석 시점에서의 선행강우 등에 의한 토양의 포화도를 나타내고 있다. 초기포화도는 모형 보정 과정에서 "0~1"의 범위에서 추정되며, 선행강우가 클수록 1에 가까워 질 수 있다. 격자별로 설정된 토양 포화도 래스터 자료가 있을 경우에는 사용자에게 의해서 초기포화도를 추정하지 않고, 이 자료를 이용하여 유출해석을 할 수 있다.

2.5 최소경사

운동파 모형에서는 유속의 계산을 위해서 마찰경사로 지면의 경사를 사용하고 있다. DEM의 flat area 보정 과정에서는 원본 DEM의 변형을 최소화하기 위해서 매우 작은 값의 고도 보정이 이루어지며, 따라서 flat area 처리 과정을 거친 영역의 지면 경사는 매우 작은 값을 가질 수 있다. 이와 같은 매우 작은 지면 경사를 운동파 모형에 적용할 경우에는 유속과 유량이 "0"에 가까운 값으로 계산되는 문제가 있다. 운동파 모형에 적용할 수 있는 최소 지면 경사에 대해서는 다수의 연구가 진행 된 바 있으며(Ponce 등, 1978; Woolhiser와 Liggett, 1967 등) 주로 0.0001 ~ 0.01의 범위에서 검토되었다. 또한 Henderson(1966)과 ASCE(1996)는 홍수파 해석시 0.002(10ft/mi) 이상의 하상경사를 가지는 하천에서 운동파 모형을 적용하는 것이 적절함을 제시한 바 있다.

하도 및 지표면 최소경사 매개변수는 DEM의 flat area 보정 과정에서 발생된 매우 작은 경사값을 가지는 격자를 포함하고 있는 경사레이어를 운동파 모형에 적용하기 위해 사용자에게 의해서 추정되는 매개변수이다. 최소경사는 홍수추적에서 유속의 계산에 관여함으로써 유량과 홍수파의 도달시간에 영향을 미치게 되며, 유역과 하천의 특성 및 적용된 DEM의 특성을 고려하여 유출모의 과정에서 추정되어야 한다.

2.6 하도 조도계수

하도의 조도계수는 하도의 형태, 바닥의 구성 물질, 식생, 관리여부에 따라서 다양한 값을 가질 수 있다(Chow, 1959). Chow(1959)는 하도의 조도계수 선정에 대한 기존의 연구를 종합하여 다양한 하도 조건에 대한 조도계수를 제안한 바 있으며, 이 중 자연 하천에 대한 조도계수는 표 2.6과 같다. Chaudhry(1993)는 자연 하천에서의 조도계수로 "Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools", "Bottom: gravels, cobbles, and few boulders" 및 "Bottom: cobbles with large boulders"를 제안하고 있으나, 실제 유출모의에서는 대상 유역의 하도 특성을 반영할 수 있는 하도 조건과 각 하도 조건별 조도계수의 범위 내에서 추정되는 것이 바람직하다.

표 2.7 자연 하천에서의 조도계수(Chow, 1959)

구 분		조도계수		
		최소	보통	최대
Streams on plain	Clean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
	Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
	Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
	Same as above, but some weeds and stones(㉠)	0.035	0.045	0.050
	Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
	Same as ㉠, but more stones	0.045	0.050	0.060
	Sluggish reaches, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
	Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stand of timber and underbrush	0.075	0.100	0.150
Mountain streams, no vegetation in channel, banks usually steep, trees and brush along banks submerged at high stage	Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
	Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

2.7 건천차수

GRM은 하폭 내에서 발생된 강우에 대해서는 모든 강우가 직접유출에 기여하는 것으로 모의한다. 따라서 입력된 하천 래스터 레이어의 하천망이 조밀할 경우 작은 강우에 의해서도 직접유출이 크게 모의될 수 있다. 그러나 자연하천에서는 선행강우가 작을 경우 하천 상류에 있는 지류는 건천일 경우가 있으며, 건천에서는 침투과정이 먼저 발생하게 된다.

건천에서의 초기 침투현상을 유출해석시 반영하기 위해서 GRM에서는 건천차수를 이용한다. 입력된 하천망이 조밀할 경우 선행강우량, 하천유출량 등을 고려하여 건천차수를 입력할 수 있으며, 건천으로 설정된 하천은 지표면 유출과 동일한 과정을 거쳐서 직접유출량이 계산된다. 건천차수는 “0 ~ 최대하천차수”의 범위에서 추정된다. 건천차수 매개변수를 유출해석시 적용하기 위해서는 하천망 래스터 파일에 하천차수가 입력되어 있어야 한다. HyGIS 등과 같은 수문학적 지형정보 생성 소프트웨어를 이용해서 하천망 데이터의 셀 값으로 하천차수를 입력할 수 있으며, 최대하천차수 또한 하천망 데이터를 통해서 확인할 수 있다.

2.8 매개변수 보정계수

유출모의에 적용된 토지피복과 토양 속성에 부여된 조도계수와 Green-Ampt 모형의 매개변수를 일정한 비율로 보정하고자 할 경우에는 각각의 매개변수에 대한 보정계수를 적용할 수 있다. 매개변수 보정계수는 모의 대상 전체 격자에 대해서 각 매개변수에 곱해지는 값으로 1을 입력할 경우 대상 매개변수는 초기에 설정된 값이 그대로 유출모의에 적용된다.

2.9 매개변수 추정

물리적 모형에서는 현장조사에 의해서 구축된 공간자료를 이용하여 설정된 매개변수는 실제 값을 대표한다는 가정을 바탕으로 하고 있다. 따라서 유출해석 과정에서 사용자에게 의해서 추정되는 주요 매개변수는 초기포화도, 하도 최소경사, 하도 조도계수, 투수계수, 토양심 등과 같이 모든 셀에 대해서 관측값의 설정이 어렵고, 불확실성과 유출해석 민감도가 상대적으로 큰 매개변수를 대상으로 한다.

GRM 모형은 호우사상의 유출모의를 목적으로 하고 있다. 그러므로 모형 보정은 침투유량, 침투시간 및 총유출량에 대해서 실측 수문곡선을 재현하는 것을 주요 대상으로 하며, 계산된 수문곡선의 전체적인 형태가 관측수문곡선을 잘 재현하는지를 추가적으로 고려한다. 모형의 보정은 유출모의시 일반적으로 적용되는 시행착오법을 비롯한 다양한 최적화 기법을 적용할 수 있다.

모형의 적합도 평가는 침투유량, 침투시간, 총유출량에 대한 상대오차, 시계열 자료의 평균제곱근오차(RMSE), 정규화된 평균제곱근오차(nRMSE), 평균상대오차(MAPE), 상관관계수(CC), 모형 효율계수(ME, Nash-Sutcliffe efficiency) 등 다양한 목적함수를 이용할 수 있다.

3. 다지점 보정

대부분의 분포형 모형에서는 단일 유역에 대해서 동일한 격자 크기를 가지도록 모형을 구축하고, 격자별로 설정된 하나의 매개변수군을 이용한 유출해석을 수행하고 있다. 이때 상이한 유출특성을 가지는 다수의 소유역을 포괄하는 유역(Ajami et al, 2004)의 경우 하나의 매개변수군을 이용한 유출해석은 소유역의 물리적 및 수문학적 특성이 모형에 적절히 반영되기 어려운 문제점이 있다.

분포형 모형은 격자로 구분된 유역내 임의 지점에 대해서 손쉽게 유출해석 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다(Beven and O'Connell, 1982). 이때 모형 보정지점 외의 다른 임의 지점에 대한 유출해석 결과의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 유출해석 결과를 출력하는 지점의 유역과 모형 보정지점 유역 간에 물리적, 수문학적 유사성을 확보할 수 있도록 모형을 구축해야 한다(Pilgrim, 1983; Dawson et al., 2006). 모형 보정 유역과 유출해석 결과를 출력하는 유역의 물리적, 수문학적 유사성을 확보하기 위한 가장 직관적인 방법은 유출해석 결과출력 지점과 가까운 지점에 대해서 모형을 보정할 수 있도록 모형을 구축하는 것이며 (Ajami et al., 2004; Merz, R. and Blöschl, 2004; Young, 2006), 이를 위해서는 유역내 다수의 지점에 대해서 모형을 보정(다지점 보정)할 수 있어야 한다.

다지점 보정 기법은 하나의 유역시스템에서의 다지점 보정과 다수의 소유역시스템을 연계한 다지점 보정으로 구분된다. 하나의 유역은 유역내에 검증 가능한 유량 관측소가 다수 있을 경우, 이를 이용하여 다수의 소유역으로 분할 할 수 있다. 단일 유역 다지점 보정 기법은 하나의 유역에 있는 다수의 유량관측소를 기준으로 구분된 소유역 영역들에 대해서 해당 관측유량을 이용해서 일괄적으로 모형을 보정할 수 있는 기법이다. 이 기법에서 모든 소유역은 같은 크기의 격자로 구성되어 있으므로 소유역별로 다양한 해상도를 적용할 수 없으나, 하나의 유역내 다수의 지점에 대해서 간편하게 모형을 보정할 수 있는 장점이 있다.

소유역 연계 다지점 보정 기법은 GRM 모형의 flow control 모듈을 이용하여 각 유역의 유출해석 결과를 연계함으로써 다수의 유역을 합친 전체 영역에 대한 유출해석 결과를 향상시킬 수 있는 기법이다. 이때 각 소유역은 독립된 유역시스템으로써 서로 다른 해상도를 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 소유역별 특성에 적합한 자료를 개별적으로 적용함으로써 각 소유역의 특성을 최대한 반영할 수 있는 장점이 있다. 또한 각 소유역은 개별적 프로세스에 의해서 유출해석이 진행되므로, 프로세스 분할에 의한 병렬계산 효과로 인하여 전체 유역 계산에 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다. 일반적인 수문사상 모의에서 소유역 연계 다지점 보정기법은 하나의 유출해석 결과 시계열 전체를 다른 유역의 flow control 모듈에 일괄 적용하는 과정을 거친다. 그러나 GRM 모형의 실시간 해석모듈(GRM Real Time)을 이용하는 실시간 유출해석시스템에서는 강우자료 뿐만 아니라 Flow control 입력자료 또한 실시간으로 입력되어야 하며, 각 소유역이 동적으로 연계되어 유출해석이 진행된다.

3.1 단일 유역 다지점 보정 기법

단일 유역 다지점 보정 기법은 동일한 격자 크기를 가지는 유역에 대해서 하나의 유역시스템으로 모형을 구축하고, 유역내 다수의 유량관측소에 대해서 일괄적으로 모형을 보정하기 위한 기법이다. 소유역 구분된 유역 래스터 자료를 이용하여 소유역별로 매개변수를 설정하고, 소유역별로 모형을 보정한다. 다지점 보정 모듈에서는 임의 유역에 대해서 설정된 매개변수를 상류 영역 전체에 적용하는 것을 기본 정책으로 하며, 상류에 있는 소유역 중 매개변수를 설정한 소유역이 없을 경우에는 단일 매개변수군이 적용된다(최윤석 등, 2012).

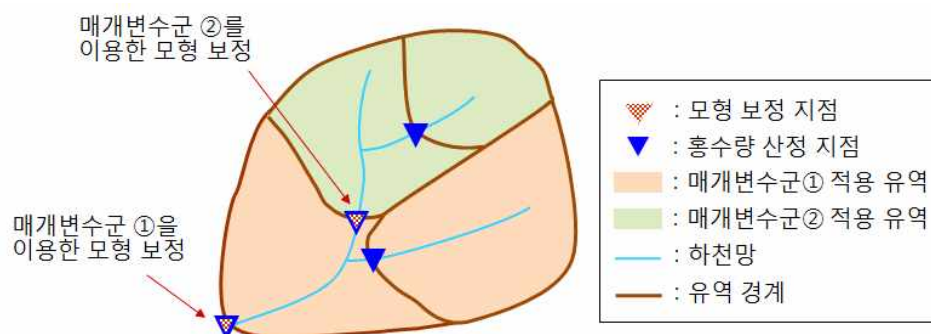


그림 3.1 다지점 보정 매개변수 적용 방법

표 3.1 GRM 모형의 다지점 보정 대상 매개변수

구분	다지점 보정 대상 매개변수	영문약어
지형관련	지표면 최소경사	MinSlopeOF
	하도 최소경사	MinSlopeChBed
	최소하폭	MinChBaseWidth
	하도 조도계수	ChRoughness
	건천차수	DryStreamOrder
토지피복, 토양 관련	지표면 조도계수 보정계수	CalCoefLCRoughness
	공극률 보정계수	CalCoefPorosity
	습윤전선흡인수두 보정계수	CalCoefWFSuctionHead
	수리전도도 보정계수	CalCoefHydraulicK
	토양심 보정계수	CalCoefSoilDepth
수문 조건	초기포화도	IniSaturation
	초기유량	IniFlow

GRM 모형은 xml 형식의 프로젝트 파일을 이용해서 모델링 프로젝트의 환경과 매개변수를 저장한다. 다지점 보정 정보는 xml 프로젝트 파일에 소유역 매개변수 테이블(SubWatershedSettings)로 저장된다. 소유역 매개변수 테이블은 소유역 번호를 키 값으로 하고, 소유역별로 입력된 매개변수를 저장하고 있으며, 프로젝트 열기 명령을 통해서 기존에 저장된 소유역별 매개변수를 재사용 할 수 있다. (4.3 GRM 프로젝트 파일 참고)

3.2 소유역 연계 다지점 보정 기법

다양한 수문학적 특성과 면적을 가지는 유역에 대해 물리적 모형을 이용하여 신뢰성 있는 유출해석을 수행하기 위해서는 각 유역의 특성에 적합한 모형의 구축이 필요하다. 분포형 모형을 이용한 유출해석에서는 일반적으로 단일 유역 시스템에 대해서 동일한 격자크기를 가지도록 모형을 구축하고, 하나의 매개변수군을 이용하였다. 그러나 상이한 수문학적 특성을 가지는 다수의 소유역에 대해서 단일 격자 크기로 모형을 구축하고 단일 매개변수군을 이용해서 모형을 보정할 경우, 소유역의 물리적 및 수문학적 특성이 적절히 반영되기 어렵다. 그러므로 유역 특성별로 각기 다른 유역 시스템을 구축하고, 각 유역 시스템을 통합 모델링 할 수 있는 기술이 필요하다.

소유역 연계 다지점 보정 기법은 GRM의 Flow control 모듈을 이용해서 소유역별로 모형을 구축하고, 각 소유역의 유출해석 결과를 연계함으로써 전체 유역의 유출해석을 수행하는 기법이다. 이때 상류에 있는 유역의 유출해석 결과는 Flow control 모듈의 Inlet 기능을 이용하여 하류 소유역으로 전달된다(한국건설기술연구원, 2015). 소유역 연계 다지점 보정 기법에서 각 유역별 유출해석을 동적으로 실행시키기 위해서는 GRM의 실시간 해석 모듈 (GRM RT)을 적용한다. GRM RT에서는 강우자료 뿐만 아니라, 댐방류량과 같이 flow control 모듈의 입력자료를 실시간으로 입력하여 유출해석을 수행한다. 그러므로 하류 유역에서는 상류 유역의 모의결과를 실시간으로 전달 받아서 전체 유역을 동적으로 모의할 수 있다. GRM RT의 사용방법은 본 사용설명서의 GRM RT 부분을 참고할 수 있다.

소유역 연계 기반의 다지점 보정 기법에서는 소유역별 특성을 반영하여 격자 크기를 다르게 모형을 구축할 수 있으며, 소유역별로 최적화된 모형 보정이 가능하다. 이를 통해서 단일 유역 시스템에서 최하류 지점만을 보정한 유출해석 결과에 비해 유역내 임의 지점에 대한 유출해석 결과를 향상시킬 수 있다. 그러나 각 유역별 입력자료를 독립적으로 구축하고 모형보정 또한 유역별로 분리된 프로세스에서 수행해야 하는 불편함이 있다. 이러한 모형구축 과정은 매우 복잡할 뿐만 아니라, 소유역간의 유량보존 및 홍수추적 문제를 안정적 해석하고 모델링 시스템을 신뢰성 있게 운영하기 위해서는 많은 노력이 필요하다.



그림 3.2 소유역 연계 다지점 보정 기법의 개념도

4. 입력자료

GRM은 프로젝트 단위로 실행된다. GRM 모형의 프로젝트 파일은 .gmp의 확장자를 가지며, xml 형식으로 저장된다. GRM 프로젝트 파일에는 GRM 실행에 필요한 입력자료와 모의 환경, 매개변수 등을 저장하고 있다. GRM은 DEM, 토양도 및 토지피복도를 이용해서 생성된 지형 및 공간자료와 강우 래스터 파일을 입력자료로 이용한다. DEM 분석을 통해서 생성되는 유역, 경사, 흐름방향, 흐름누적수, 하천망 파일은 수문학적 공간정보를 생성할 수 있는 GIS 도구를 이용해서 생성할 수 있다. 입력자료 생성을 위한 GIS 도구는 HyGIS, ArcGIS 등과 같이 DEM 분석을 통한 수문학적 공간정보 생성 도구를 포함하고 있는 범용 S/W를 이용할 수 있다. GRM은 ASCII 래스터 포맷을 이용한다. 그러므로 GIS 도구를 이용해서 생성된 다양한 포맷의 데이터를 ASCII 포맷으로 변환하여 모형에 적용한다.

표 4.1 GRM의 입력자료

구분	자료의 종류	포맷	활용 가능한 원본 데이터	비고
지형	유역경계	ASCII	DEM (수치 지형도, 원격탐사 영상)	하천망과 하폭 데이터는 선택적 입력
	경사			
	흐름방향			
	흐름누적수			
	하천망			
토지피복	하폭	ASCII	토지피복도 원격탐사 영상	GRM 매개변수는 환경부 대분류 토지피복 속성을 참조값으로 제공
	토지피복도			
토양	토성	ASCII	정밀토양도 글로벌 토양정보	
	토양심			
수문	강우	ASCII	관측, 추정	래스터 형식의 분포형 강우 시계열 혹은 테스트 형식의 유역 평균강우량 시계열 자료 중 선택적 사용
		텍스트		
	유량	텍스트	관측, 추정	텍스트는 flow control 모의를 위한 특정 격자에서의 유량 시계열, 보정지점에서의 초기 유량 ASCII 포맷 자료는 모든 하천 격자에서의 초기유량
		ASCII		
	포화도	ASCII	추정된 값	초기포화도 매개변수 대신, 유역내 모든 격자에서의 초기포화도를 ASCII 파일로 입력할 수 있음(선택적 적용)

GRM에서 사용하는 흐름방향 정보는 D8 방법에 의한 단방향 흐름정보로서, 흐름방향 래스터 데이터의 값(흐름방향 인덱스)에 의해서 흐름방향을 판단한다. GRM에서는 1시 방향(북동, NE)을 1로 설정하는 방법과 12시 방향(북, N)을 1로 설정하는 방법, 3시 방향(동, E)을 1로 설정하는 방법 및 TauDEM의 흐름방향 설정 방법을 모두 적용할 수 있다. DEM으로부터 흐름방향 정보를 생성하는 경우, GIS S/W 마다 흐름방향에 대응하는 인덱스가 각기 다를 수 있으므로, 흐름방향 데이터 적용시 주의해야 한다.

128	1	2
64	C	4
32	16	8

(a) 12시 방향에서 시작하는 인덱스
(StartsFromN)

64	128	1
32	C	2
16	8	4

(b) 1시 방향에서 시작하는 인덱스
(StartsFromNE)

32	64	128
16	C	1
8	4	2

(c) 3시 방향에서 시작하는 인덱스
(StartsFromE)

4	3	2
5	C	1
6	7	8

(d) TauDEM에서 설정되는 흐름방향
인덱스(StartsFromE_TauDEM)

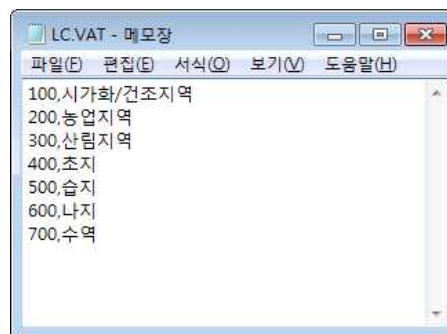
그림 4.1 흐름방향 인덱스

4.1 공간자료

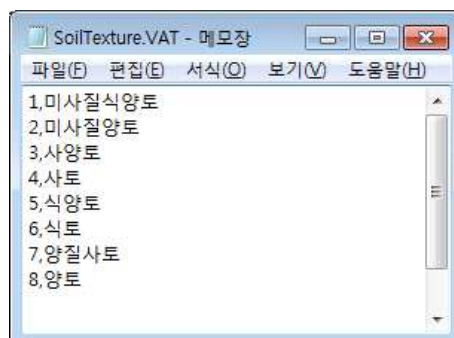
GRM은 ASCII 포맷의 래스터 데이터를 입력자료로 이용하며, GRM 모형 구동에 필요한 래스터 자료는 다음의 표와 같다. 토지피복과 토성, 토양심 래스터 파일은 숫자로 그 값이 입력되어 있다. 그러므로 각 래스터 파일에 포함된 숫자와 실제 유출해석에 사용할 속성의 대응이 필요하다. GRM에서는 이를 위해서 VAT(Value Attribute Table) 텍스트 파일을 이용한다. VAT 파일은 텍스트 편집기를 이용해서 사용자가 직접 작성하거나, GIS 소프트웨어를 이용해서 자동으로 생성할 수도 있다. 토지피복과 토양에 관련된 모형의 매개변수는 GRM Static DB(예를 들어, C:\WGRM\GRMStaticDB.xml)에 저장되어 있으며, 이를 이용하여 각 속성별 매개변수의 기본값을 설정한다.

표 4.2 GRM 입력 공간자료

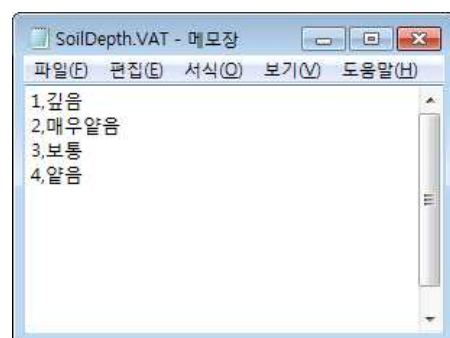
자료명		정의	데이터 형
한글	영문		
유역	Watershed	유역 영역이 구분된 래스터 파일	Integer
경사	Slope	격자별로 부여된 최급경사 정보	Double
흐름방향	FlowDirection	D8 방법에 의한 단방향 흐름 정보	Integer
흐름누적수	FlowAccumulation	흐름누적수	Integer
하천망	Stream	하천망	Integer
하폭	ChannelWidth	하천망과 동일한 위치에 입력된 하폭 정보	Single
토성	SoilTexture	토성	Integer
토양심	SoilDepth	토양심	Integer
토지피복도	LandCover	토지피복	Integer



(a) 토지피복 VAT 파일



(b) 토성 VAT 파일



(c) 토양심 VAT 파일

그림 4.2 VAT 파일 예시

4.2 수문자료

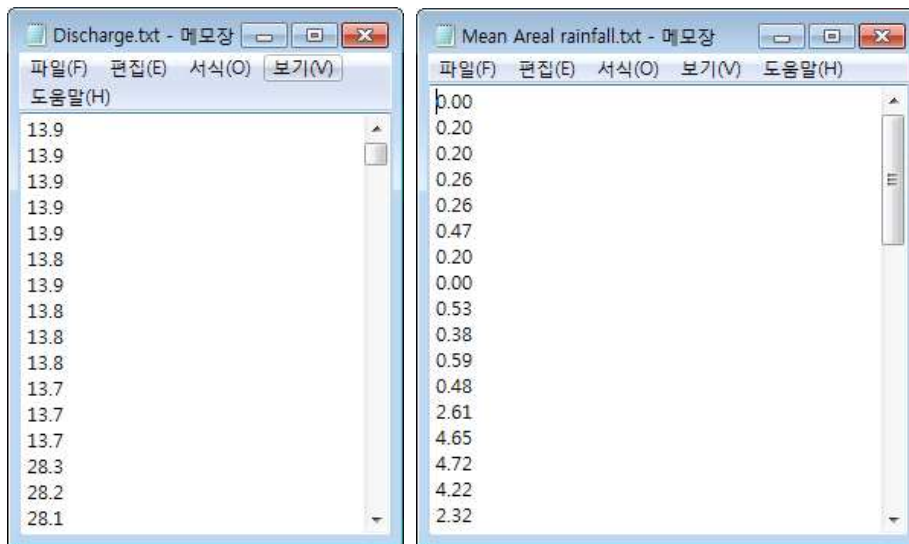
GRM에서는 텍스트로 된 유역 평균 강우와 공간 분포된 강우 래스터 파일을 선택해서 적용할 수 있다. 이때 분포형 강우 래스터 자료는 강우관측소에서 관측된 지점 강우를 공간 보간하거나 레이더 혹은 수치예보자료 등과 같은 분포형 강우 자료를 이용하여 생성한다.

GRM에서 유량은 flow control 강우자료와 유량자료 정보는 텍스트 파일로 저장된다. 이때 유역 평균강우량과 유량은 텍스트 시계열로 저장되며, 격자 분포된 강우량 ASCII 래스터 파일을 이용할 경우에는 강우 시계열 ASCII 파일의 목록을 저장하고 있다.

관측 혹은 추정된 토양의 초기포화도를 유출해석에 적용할 경우에는 ASCII 포맷으로 저장된 초기포화도 자료를 적용할 수 있다. 이 자료를 적용할 경우에는 초기포화도 매개변수가 유출해석 과정에서 추정되지 않는다.

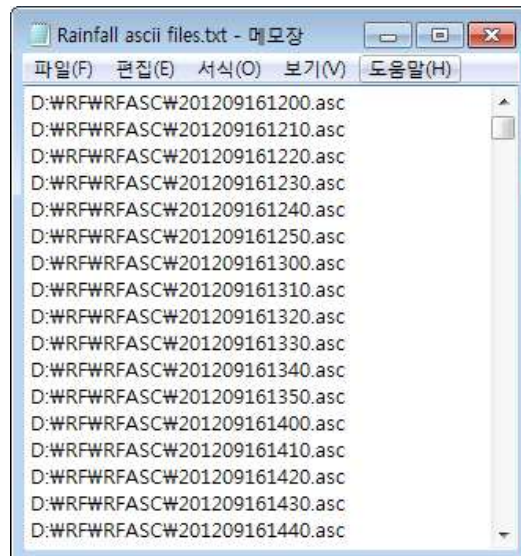
표 4.3 GRM 입력 수문자료

자료명		정의	데이터 형
한글	영문		
강우	Rainfall	유역 평균강우량[mm] 텍스트 파일	Single
		격자 분포형 강우량[mm] ASCII 파일	
유량	Discharge	Flow control 모의에 적용되는 자료로 관측 혹은 계산된 유량[CMS]	Single
포화도	Soil saturation ratio	ASCII 포맷으로 저장된 모든 격자에서의 토양 포화도 (선택적 적용)	Single



(a) 유량 입력파일

(b) 유역 평균강우량 입력파일



(c) ASCII 래스터 강우 입력파일

그림 4.3 수문자료 입력파일 사례

4.3 GRM 프로젝트 파일

GRM은 프로젝트 파일 (.gmp)을 이용해서 실행된다. GRM을 콘솔 창(Console window)에서 실행하기 위해서는 gmp 파일을 스위치로 설정하고 실행한다.

(예를 들어, D:\Wgrm.exe "projectFilePahAndName.gmp")

gmp 파일은 xml DB 형식으로 저장된다. gmp 파일에 포함된 테이블과 각 테이블의 내용, 각 테이블의 필드 이름 및 설명, 각 필드의 설정 방법 등은 다음의 표와 같다. gmp 파일은 사용자가 텍스트 에디터를 이용해서 작성할 수 도 있으나, 일부 항목(격자 위치 등)은 직관적으로 그 값을 얻기 어려운 것도 있다. 그래서 gmp 파일은 GRM 모형의 GUI S/W(MapWindow plug-in, QGIS plug-in 등)를 이용해서 자동으로 생성하는 것이 편리하다.

gmp 파일에 한글이 포함되어 있을 경우에는 UTF-8 포맷으로 저장해야 하며, 한글이 포함되어 있지 않을 경우에는 ANSI 혹은 UTF-8 포맷으로 저장하면 된다.

표 4.4 프로젝트 xml 파일에서의 테이블 정의

테이블 명	설명	필수 여부
ProjectSettings	모형 실행을 위한 환경설정, 입력파일, 글로벌 매개변수	필수
SubWatershedSettings	소유역별로 설정된 매개변수	필수
WatchPoints	사용자 지정 출력 대상 격자 정보	필수
FlowControlGrid	사용자 지정 흐름조절 대상 격자, 흐름조절 형태, 자료의 특성, 저수지 제원, ROM 정보	필수
GreenAmptParameter	입력된 토성 자료 속성과 유출모의에 적용된 Green-Ampt 매개변수	필수
SoilDepth	입력된 토양심 자료 속성과 유출모의에 적용된 토양심 값	필수
LandCover	입력된 토지피복 자료 속성과 유출모의에 적용된 조도계수 및 불투수율	필수

표 4.5 ProjectSettings 테이블 명세서

필드 명	설명	데이터 형식	필수 여부
ProjectFile	gmp 파일의 경로와 이름	String	필수
GRMSimulationType	모델링 형식(SingleEvent 혹은 RealTme)	String	필수
WatershedFile	유역 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
SlopeFile	경사 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
FlowDirectionFile	흐름방향 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
FlowAccumFile	흐름누적수 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
StreamFile	하천망 ASCII 파일 경로와 이름	String	필수
ChannelWidthFile	하폭 ASCII 파일 경로와 이름	String	선택
InitialSoilSaturationRatio-File	토양 초기포화도 ASCII 파일 경로와 이름	Single	선택
LandCoverDataType	토피지복 자료 형식(File 혹은 Constant)	String	필수
LandCoverFile	토피지복 ASCII 파일 경로와 이름 LandCoverDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용	String	선택
LandCoverVATFile	토피지복 ASCII 파일 VAT 파일 경로와 이름 LandCoverDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용	String	선택
ConstantRoughnessCoeff	토지피복 조도계수 값 LandCoverDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Single	선택
ConstantImperviousRatio	불투수율 값 LandCoverDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Single	선택
SoilTextureDataType	토성 자료 형식(File 혹은 Constant)	String	필수
SoilTextureFile	토성 ASCII 파일 경로와 이름 SoilTextureDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용	String	선택
SoilTextureVATFile	토성 ASCII 파일 VAT 파일 경로와 이름 SoilTextureDataType으로 File을 설정할 경우에만 사용	String	선택
ConstantSoilPorosity	공극률 값 SoilTextureDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Single	선택
ConstantSoilEffPorosity	유효 공극률 값 SoilTextureDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Single	선택
ConstantSoilWetting-FrontSuctionHead	습윤전선 흡인수두 값 SoilTextureDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Single	선택
ConstantSoilHydraulic-Conductivity	수리전도도 값 SoilTextureDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Single	선택

<ProjectSettings 테이블 명세서(계속)>

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
SoilDepthDataType	토양심 자료 형식(File 혹은 Constant)	String	필수
SoilDepthFile	토양심 ASCII 파일 경로와 이름 SoilDepthDataType으로 File을 설정할 경우에 만 사용	String	선택
SoilDepthVATFile	토양심 ASCII 파일 VAT 파일 경로와 이름 SoilDepthDataType으로 File을 설정할 경우에 만 사용	String	선택
ConstantSoilDepth	토양심 값 SoilDepthDataType으로 Constant를 설정할 경우에만 사용	Single	선택
InitialChannelFlowFile	초기 유량 ASCII 파일 경로와 이름 하천망 격자에 대해서만 값이 입력됨	Single	선택
RainfallDataType	강우자료 형식 (TextFileMAP 혹은 TextFileASCgrid)	String	필수
RainfallInterval	강우 자료의 시간 간격(분)	Integer	필수
RainfallDataFile	강우자료 파일의 경로와 이름	String	필수
FlowDirectionType	흐름방향 정보의 형식 StartsFromN, StartsFromNE, StartsFromE, StartsFromE_TauDEM 중 하나 선택	String	필수
GridCellSize	격자 크기 값(m)	Integer	필수
IsParallel	병렬계산 여부(true 혹은 false) 설정하지 않을 경우에는 false가 적용 됨	String	선택
MaxDegreeOfParallelism	병렬화 개수. -1을 입력하거나, 설정하지 않을 경우에는 최대값이 설정됨.	Integer	선택
SimulStartingTime	모의기간 시점. 시간 포맷이 설정된 경우에는 DateTime format으로 입력(예, 2012-09-16 12:00). 그렇지 않을 때는 0을 사용	String	필수
SimulationDuration	모의 기간(시간)	Integer	필수
ComputationalTimeStep	계산시간 간격(분)	Integer	필수
IsFixedTimeStep	고정된 계산시간 간격 사용 여부(true 혹은 false) 설정하지 않을 경우에는 true가 적용됨	String	선택
OutputTimeStep	출력시간 간격(분)	Integer	필수
CrossSectionType	하도 단면 형식 (CSSingle 혹은 CSCompound)	Single	필수
SingleCSChannel- WidthType	하폭 계산 방법 (CWGeneration 혹은 CWEquation)	String	필수

<ProjectSettings 테이블 명세서(계속)>

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
ChannelWidthEQc	하폭 계산식 계수 SingleCSChannelWidthType으로 CWEquation을 설정한 경우에만 사용	Single	선택
ChannelWidthEQd	하폭 계산식 계수 SingleCSChannelWidthType으로 CWEquation을 설정한 경우에만 사용	Single	선택
ChannelWidthEQe	하폭 계산식 계수 SingleCSChannelWidthType으로 CWEquation을 설정한 경우에만 사용	Single	선택
ChannelWidthMostDown-Stream	하천 최하류 지점의 하폭 CrossSectionType으로 CSCompound를 설정한 경우에만 사용	Single	선택
LowerRegionHeight	하도 복단면에서 저수부 높이 CrossSectionType으로 CSCompound를 설정한 경우에만 사용	Single	선택
LowerRegionBaseWidth	하도 복단면에서 저수부 바닥 하폭 CrossSectionType으로 CSCompound를 설정한 경우에만 사용	Single	선택
UpperRegionBaseWidth	하도 복단면에서 고수부 바닥 하폭 CrossSectionType으로 CSCompound를 설정한 경우에만 사용	Single	선택
CompoundCSChannel-WidthLimit	복단면 하도를 적용할 하폭 제한 범위 (이 값 이하의 하폭을 가지는 하천 구간은 단 단면 적용) CrossSectionType으로 CSCompound를 설정한 경우에만 사용	Single	선택
BankSideSlopeRight	우측 제방 경사	Single	필수
BankSideSlopeLeft	좌측 제방 경사	Single	필수
SimulateInfiltration	침투 모의 여부(true 혹은 false)	Boolean	필수
SimulateSubsurfaceFlow	지표하 유출 모의 여부(true 혹은 false)	Boolean	필수
SimulateBaseFlow	기저유출 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수
SimulateFlowControl	Flow control 모의 여부(true 혹은 false)	String	필수

<ProjectSettings 테이블 명세서(계속)>

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
MakeIMGFile	래스터 이미지 파일 생성 여부 (true 혹은 false)	String	필수
MakeASCFile	ASCII 래스터 파일 생성 여부 (true 혹은 false)	String	필수
MakeSoilSaturationDistFile	토양포화도 분포도 출력 여부 (true 혹은 false) (MakeIMGFile 혹은 MakeASCFile 중 하나가 true여야 적용됨)	String	필수
MakeRfDistFile	강우 분포도 출력 여부 (true 혹은 false) (MakeIMGFile 혹은 MakeASCFile 중 하나가 true여야 적용됨)	String	필수
MakeRFaccDistFile	누적강우 분포도 출력 여부 (true 혹은 false) (MakeIMGFile 혹은 MakeASCFile 중 하나가 true여야 적용됨)	String	필수
MakeFlowDistFile	유량 분포도 출력 여부 (true 혹은 false) (MakeIMGFile 혹은 MakeASCFile 중 하나가 true여야 적용됨)	String	필수
PrintOption	모의 결과 텍스트 파일 출력 옵션 (All, DischargeFileQ, AllQ 중 택 1) All: 모든 모의 결과 출력 DischargeFileQ : *Discharge.out 파일만 생성 하고, 유량 값 만 포함 AllQ : *Discharge.out 파일과 watchpoint 별 모의 결과 파일을 생성하고, 유량 값만 포함	String	필수
WriteLog	로그파일 기록 여부(true 혹은 false) 이 필드가 없으면 false로 설정됨	String	선택
AboutThisProject	프로젝트 설명 사용자 입력	String	선택
AboutWatershed	유역 설명 사용자 입력	String	선택
AboutLandCoverMap	강우자료 설명 사용자 입력	String	선택
AboutSoilMap	토성도 설명 사용자 입력	String	선택
AboutSoilDepthMap	토양심도 설명 사용자 입력	String	선택
AboutRainfall	강우자료 설명 사용자 입력	String	선택
ProjectSavedTime	프로젝트 저장 시간 GUI 소프트웨어에서 자동으로 저장됨	String	선택
ComputerName	컴퓨터 이름 GUI 소프트웨어에서 자동으로 저장됨	String	선택
ComputerUserName	컴퓨터 사용자 이름 GUI 소프트웨어에서 자동으로 저장됨	String	선택
GRMVersion	사용된 GRM 모형의 버전 GUI 소프트웨어에서 자동으로 저장됨	String	선택

표 4.6 SubWatershedSettings 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
ID	유역 번호 유역 구분자로 0보다 큰 정수 입력	Integer	필수
IniSaturation	초기포화도 매개변수(0~1 사이의 값 입력) 토양포화도 ASCII 파일이 입력된 경우에는 이 매개변수는 유출해석에 사용되지 않음	Single	필수
MinSlopeOF	지표면흐름 최소 바닥 경사 조건 매개변수	Single	필수
UnsaturatedKType	불포화투수계수 계산 방법 선택 (Constant, Linear, Exponential 중 택 1) 값이 설정되지 않으면 'Linear'이 적용됨 'Constant'를 입력할 경우에는 Green-Ampt 매개변수에서 제시된 값에 계수가 곱해진 고정값으로 적용됨	String	필수
CoefUnsaturatedK	불포화투수계수 계산을 위한 계수 UnsaturatedKType이 'Linear'인 경우에는 0.2, 'Exponential'인 경우에는 6.4, 'Constant'인 경우에는 0.1이 기본값으로 적용됨	Single	필수
MinSlopeChBed	하도흐름 최소 바닥 경사 조건 매개변수	Single	필수
MinChBaseWidth	최소 하폭 조건 매개변수	Single	필수
ChRoughness	하도 조도계수 매개변수	Single	필수
DryStreamOrder	건천차수 조건 매개변수 하천 차수를 입력하며, 0을 입력한 경우에는 건천차수 적용하지 않음	Integer	필수
IniFlow	초기 유량 매개변수 대상 유역 하천의 최하류 지점에서의 모의시작 시점에서의 관측유량 입력 초기유량 ASCII 파일이 입력된 경우에는 이 매개변수는 유출해석에 사용되지 않음	Single	필수
CalCoefLCRoughness	토지피복도에 의해 설정된 조도계수 보정 매개변수	Single	필수
CalCoefPorosity	토양 공극율 보정 매개변수	Single	필수
CalCoefWFSuctionHead	토양 습윤전선 흡인수두 보정 매개변수	Single	필수
CalCoefHydraulicK	토양 수리전도도 보정 매개변수	Single	필수
CalCoefSoilDepth	토양심 보정 매개변수	Single	필수
UserSet	현재 유역의 매개변수가 사용자에게 의해서 설정된 매개변수인지 여부	Boolean	필수

표 4.7 WatchPoints 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
Name	Watch point 이름	String	필수
ColX	Watch Point 격자의 위치. 열 번호 좌상단(0,0)으로 부터 번호 부여 (최대값은 열의 개수 - 1)	Integer	필수
RowY	Watch Point 격자의 위치. 행 번호 좌상단(0,0)으로 부터 번호 부여 (최대값은 행의 개수 - 1)	Integer	필수

표 4.8 FlowControlGrid 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
ColX	Flow control 격자의 열 번호 WatchPoints 테이블의 ColX와 같은 방법으로 입력	Integer	필수
RowY	Flow control 격자의 행 번호 WatchPoints 테이블의 RowY와 같은 방법으로 입력	Integer	필수
Name	Flow control 격자의 이름	String	필수
ControlType	Flow control 종류 (ReservoirOutflow, Inlet, SinkFlow, SourceFlow, ReservoirOperation 중 택 1)	String	필수
DT	유량 자료의 시간간격(분)	Integer	필수
FlowDataFile	유량 자료의 파일 경로와 이름 ControlType이 ReservoirOperation 인 경우에는 'ReservoirOperation'을 입력	String	필수
IniStorage	저수지 초기 저류량(m^3) ControlType이 ReservoirOperation 인 경우만 사용	Single	선택
MaxStorage	저수지 최대 저류량(m^3) ControlType이 ReservoirOperation 인 경우만 사용	Single	선택
MaxStorageR	저수지 최대 저류가능 비율 ControlType이 ReservoirOperation 인 경우만 사용	Single	선택
ROType	저수지 운영 종류 (AutoROM, RigidROM, ConstantQ 중 택1) ControlType이 ReservoirOperation 인 경우만 사용 **저류량-방류량 관계식의 적용은 'SDEqation' 옵션으로 직접 코드로 씀	String	선택
ROConstQ	일정 방류량 (CMS) ControlType이 ReservoirOperation 인 경우만 사용 ROType이 RigidROM 혹은 ConstantQ 인 경우에 적용	Single	선택
ROConstQDuration	일정 방류 기간(시간) ControlType이 ReservoirOperation 인 경우만 사용 ROType이 ConstantQ 인 경우에 적용	Integer	선택

표 4.9 GreenAmptParameter 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
GridValue	토성 래스터 파일에서의 셀 값	Integer	필수
USERSoil	사용자 지정 토성 속성 이름	String	선택
GRMCode	토성 코드 (Static DB의 GreenAmptSoilParameter 테이블에서 'GRMCode' 필드 값 참조)	String	필수
GRMTextureE	토성 영문 이름 (Static DB의 GreenAmptSoilParameter 테이블에서 'SoilTextureE' 필드 값 참조)	String	선택
GRMTextureK	토성 한글 이름 (Static DB의 GreenAmptSoilParameter 테이블에서 'SoilTextureK' 필드 값 참조)	String	선택
Porosity	공극율	Single	필수
EffectivePorosity	유효공극율	Single	필수
WFSoilSuctionHead	습윤전선 흡인수두	Single	필수
HydraulicConductivity	수리전도도	Single	필수

표 4.10 SoilDepth 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
GridValue	토양심 래스터 파일에서의 셀 값	Integer	필수
UserDepthClass	사용자 지정 토양심 속성 이름	String	선택
GRMCode	토양심 코드 (Static DB의 SoilDepthParameter 테이블에서 'GRMCode' 필드 값 참조)	String	필수
SoilDepthClassE	토양심 영문 이름 (Static DB의 SoilDepthParameter 테이블에서 'SoilDepthClassE' 필드 값 참조)	String	선택
SoilDepthClassK	토양심 한글 이름 (Static DB의 SoilDepthParameter 테이블에서 'SoilDepthClassK' 필드 값 참조)	String	선택
SoilDepth	토양심 값	Single	필수

표 4.11 LandCover 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형식	필수 여부
GridValue	토지피복 래스터 파일에서의 셀 값	Integer	필수
UserLandCover	사용자 지정 토지피복 속성 이름	String	선택
GRMCode	토지피복 코드 (Static DB의 LandCoverParameter 테이블에서 'GRMCode' 필드 값 참조)	String	필수
GRMLandCoverE	토지피복 영문 이름 (Static DB의 LandCoverParameter 테이블에서 'LandCoverE' 필드 값 참조)	String	선택
GRMLandCoverK	토지피복 한글 이름 (Static DB의 LandCoverParameter 테이블에서 'LandCoverK' 필드 값 참조)	String	선택
RoughnessCoefficient	조도계수	Single	필수
ImperviousRatio	불투수률	Single	필수

4.4 GRM Static 데이터

GRM Static 데이터는 GRM 모형에서 이용되는 토양과 토지피복에 대한 매개변수의 기본 참조 값을 xml 형식으로 저장하고 있다(GRMStaticDB.xml). GRM 프로젝트 파일(.gmp)을 작성할 때, 토양, 토지피복에 대한 각 매개변수의 기본값은 GRM Static 데이터를 이용해서 설정할 수 있다. GRM Static 데이터의 테이블 정의와 각 테이블별 상세사항은 아래 표와 같다.

표 4.12 GRM static xml 파일의 테이블 정의

테이블 명	설명
GreenAmptSoilParameter	토성별 Green-Ampt 매개변수 값
SoilDepthParameter	토양심 계급별 토양심 값
LandCoverParameter	토지피복 속성별 조도계수와 불투수율 7개로 분류된 토지피복 속성을 기본값으로 제시함

표 4.13 GreenAmptSoilParameter 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형
GRMCode	토성 코드	String
SoilTextureE	토성 영문 이름	String
SoilTextureK	토성 한글 이름	String
PorosityMin	공극율 최소값	Single
PorosityMax	공극율 최대값	Single
PorosityDefault	공극율 기본값	Single
EffectivePorosityMin	유효공극율 최소값	Single
EffectivePorosityMax	유효공극율 최대값	Single
EffectivePorosityDefault	유효공극율 기본값	Single
ResidualMoistureContent	잔류 수분함량	Single
WFSoilSuctionHeadMin	습윤전선 흡인수두 최소값	Single
WFSoilSuctionHeadMax	습윤전선 흡인수두 최대값	Single
WFSoilSuctionHeadDefault	습윤전선 흡인수두 기본값	Single
HydraulicConductivity	수리전도도	Single

표 4.14 SoilDepthParameter 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형
GRMCode	토양심 코드	String
SoilDepthClassE	토양심 계급 영문 이름	String
SoilDepthClassK	토양심 계급 한글 이름	String
SoilDepthMin	최소 토양심	Single
SoilDepthMax	최대 토양심	Single
SoilDepthDefault	토양심 기본값	Single

표 4.15 LandCoverParameter 테이블 명세서

필드 명	정의	데이터 형
GRMCode	토지피복 코드	String
LandCoverE	토지피복 영문 이름	String
LandCoverK	토지피복 한글 이름	String
RoughnessCoefficient	조도계수	Single
ImperviousRatio	불투수률	Single

각 속성에 대해서 GRM 모형에서 사용되는 코드는 아래와 같다. 또한 각 속성별 매개변수 값은 GRMStaticDB.xml 파일을 참고할 수 있다.

표 4.16 GRM에서 사용되는 토성 코드 및 이름

GRMCode	SoilTextureE	SoilTextureK
C	Clay	식토
CL	ClayLoam	식양토
L	Loam	양토
LS	LoamySand	양질사토
S	Sand	사토
SC	SandyClay	사질식토
SCL	SandyClayLoam	사질식양토
SiC	SiltyClay	미사질식토
SiCL	SiltyClayLoam	미사질식양토
SiL	SiltLoam	미사질양토
SL	SandyLoam	사양토
USER	User defined attribute	사용자 정의 속성

표 4.17 GRM에서 사용되는 토양심 코드 및 이름

GRMCode	SoilDepthClassE	SoilDepthClassK
D	Deep	깊음
M	ModeratelyDeepOrModeratelyShallow	보통
S	Shallow	얕음
VD	VeryDeep	매우깊음
VS	VeryShallow	매우얕음
USER	User defined attribute	사용자 정의 속성

표 4.18 GRM에서 사용되는 토지피복 코드 및 속성

GRMCode	LandCoverE	LandCoverK
AGRL	Agricultural Area	농업지역
BARE	Bare	나지
FRST	Forest	산림지역
GRSS	Grass	초지
URBN	Urban	시가화/건조지역
WATR	Water	수역
WTLD	Wetland	습지
USER	User defined attribute	사용자 정의 속성

5. 출력자료

GRM에서의 모든 수문성분은 유역내 모든 격자에서 계산되며, 사용자는 계산결과를 출력할 셀을 watch point로 지정한다. Watch point로 설정된 셀에서의 계산결과는 프로젝트 파일(gmp)의 ProjectSettings에서 GRMSimulationType이 SingleEvent로 설정된 경우에는 텍스트 파일로 저장되고, GRMSimulationType이 RealTme으로 설정된 경우에는 텍스트 파일과 데이터베이스(SQL 등)로 저장할 수 있다. 또한 유역내 모든 격자에 대한 모의결과는 ASCII 파일 혹은 이미지 파일(png)로도 출력할 수 있다(gmp 파일에서 MakeIMGFile, MakeASCFile 옵션 이용).

주요 계산결과는 유량이며, 수심의 경우 GRM과 같은 수문학적 모형이 아닌 하천 수리모형을 이용하거나 수위-유량 관계 곡선식을 이용해서 계산되어야 한다. Watch point 별로 만들어 지는 계산결과 파일에서는 유량, 포화도 등과 같은 다양한 결과를 포함하고 있다.

표 5.1 GRM의 모의결과 파일

Simulation Type	출력파일	내용
SingleEvent	[Project name]Discharge.out	모든 Watch point에서의 유량 계산결과, 유역 평균강우량, 소요된 계산시간
	[Project name]FCData.out	모든 flow control grid에서의 Flow control 유량 자료 (flow control을 모의한 경우에만 출력됨)
	[Project name]FCStorage.out	모든 Watch point에서의 저수지 저류량 (flow control을 모의하고, ROM이 적용된 경우에만 기록됨)
	[Project name]NP_- [watchpoint name].out	대상 watch point에서 출력되는 모든 계산결과 (유량, 하천 셀의 경우 기저유량 수심, 토양수분 함량, 토양포화도, 격자 강우량, watch point 상류 평균강우량, Flow control 자료, 저류량) (Watch point마다 파일 하나씩 생성)
RealTme	[Project name]RealTime_- [watchpoint name].out	해당 watch point에서의 상류 유역평균 강우량, 유량 계산결과
	DB 저장	해당 watch point에서의 상류 유역평균 강우량, 유량 계산결과
ASCII file		유량, 토양포화도, 강우, 누적강우의 분포를 ASCII 파일로 저장
Image file		유량, 토양포화도, 강우, 누적강우의 분포를 png 파일로 저장

6. GRM-PEST

GRM 모형은 범용 매개변수 추정 모형인 PEST(Doherty, 2010)와 GRM을 자동으로 연동하여 모형을 보정할 수 있는 모듈을 제공한다. GRM-PEST는 GRM 실행을 위한 GUI를 포함하고 있는 모델링 S/W를 통해서 PEST 입력파일을 자동으로 생성하고 실행시킬 수 있다. GRM-PEST는 MW-GRM(MapWindow plugin of the GRM model)에서 제공된바 있다. PEST 입출력 파일 및 이론적 상세 사항은 PEST 모형의 매뉴얼(Doherty, 2010)을 참조할 수 있다.

7. GRM Real Time

GRM RT(Real Time) 모듈은 실시간 유출해석 시스템 구축을 위한 API로 제공된다. 실시간 유출해석시에는 실시간으로 수집되는 유역평균 강우량 혹은 레이더 등을 이용해서 생성된 분포형 강우자료를 이용한다. 분포형 강우자료를 이용할 경우에는 대상 유역의 지형자료와 동일한 영역에 대해서 동일한 격자 크기로 clipping과 resampling 하는 과정이 선행되어야 한다.

실시간 유출해석을 위한 환경변수는 xml 텍스트 파일(.REF)을 이용한다. REF 파일은 현재 유역의 유출해석 프로젝트 파일(gmp)의 경로와 이름, 실시간 강우자료가 저장되는 경로, flow control 자료의 실시간 수신여부, (소유역 연계 다지점 보정 기법 적용시)하류에 연결되는 소유역 정보 등과 같은 유역시스템 구성 정보 및 유출해석 초기 환경정보가 포함된다.

표 7.1 실시간 유출해석 환경설정 파일(.REF) 구조

파일명	필드명	설명
[Project name].REF	ProjectFPN	현재 유역의 유출해석 프로젝트 파일 이름, 경로
	RTRFolderName	실시간 강우자료 수신 폴더 경로
	IsFC	Flow control 격자 포함 여부
	IsDWSExist	하류에 연결되는 유역이 있는지 여부
	CWCellColXToConnectDW	현재 유역에 있는 격자 중 하류 유역과 연결할 격자의 열 번호(좌측에서 시작하여 우측으로 증가되는 번호)
	CWCellRowYToConnectDW	현재 유역에 있는 격자 중 하류 유역과 연결할 격자의 행 번호(상단에서 시작하여 하단으로 증가되는 번호)
	DWCellColXToConnectCW	하류 유역에 있는 격자 중 현재 유역과 연결할 격자의 열 번호(좌측에서 시작하여 우측으로 증가되는 번호)
	DWCellRowYToConnectCW	하류 유역에 있는 격자 중 현재 유역과 연결할 격자의 행 번호(상단에서 시작하여 하단으로 증가되는 번호)
	RFInterval_min	강우자료의 시간간격[분]
	OutputInterval_min	출력 시간간격[분]
	RTstartingTime	실시간 유출해석 시작 시간 [yyyymmddhhmm]

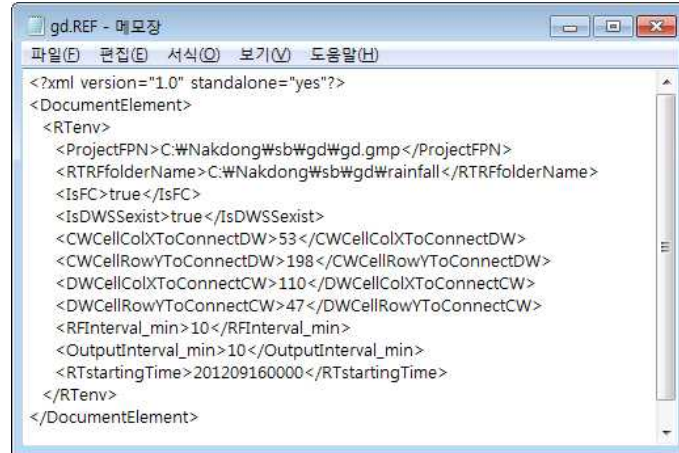


그림 7.1 REF 파일 사례

GRM RT를 응용시스템으로 구현하기 위해서는 GRMCore.dll을 이용한다. GRMCore.dll에서는 GRM RT를 구현하고 실행하기 위한 사용자 API를 제공하며, 아래 표와 같다.

표 7.2 GRMRTStarter에서 제공되는 API

클래스	API	기능
cRTStarter	New(REF_FPN As String)	실시간 유출해석 환경 파일을 이용한 객체 생성 -REF_FPN : REF 파일 경로와 이름
	SetUpAndStartGRMRT()	실시간 유출해석 시작
	StopRTsimulation()	실시간 유출해석 종료
	UpdateWSPars(wsid As Integer, iniSat As Single, minSlopeLandSurface As Single, UnsKType As String, coefUnsK As Single, minSlopeChannel As Single, minChannelBaseWidth As Single, roughnessChannel As Single, dryStreamOrder As Integer, ccLCRoughness As Single, ccSoilDepth As Single, ccPorosity As Single, ccWFSuctionHead As Single, ccSoilHydraulicCond As Single, Optional iniFlow As Single = 0) As Boolean	GRM 매개변수 메모리 업데이트 -wsid : 소유역 번호 -iniSat : 토양 초기포화도 -minSlopeLandSurface : 지표면 최소경사 -UnsKType : 불포화투수계수 계산 방법 -coefUnsK : 불포화투수계수 계산 계수 -minSlopeChannel : 하도 최소경사 -minChannelBaseWidth : 최소하폭 -roughnessChannel : 하도 조도계수 -dryStreamOrder : 건천차수 -ccLCRoughness : 토지피복 조도계수 보정계수 -ccSoilDepth : 토양심 보정계수 -ccPorosity : 토양 공극률 보정계수 -ccWFSuctionHead : 토양 습윤전선흡인수두 보정계수 -ccSoilHydraulicCond : 토양 수리전도도 보정계수 -iniFlow : 초기유량[CMS]
	SaveParsToProjectFile()	매개변수를 GRM 프로젝트 파일(.gmp)에 저장

참 고 문 헌

- 건설교통부. 2005. 하천설계기준.해설. pp. 262-265.
- 김경탁. 1998. GIS 적용에 따른 유출응답에 관한 연구. 박사학위논문, 인하대학교, pp. 94-98.
- 노성진, 최신우, 최윤석, 김경탁. 2014. 레이더 강우 및 분포형 수문모형의 공간해상도가 매개변수 추정에 미치는 영향 평가. Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 34(5), pp. 1443-1454.
- 농업기술연구소. 1992. 증보 한국토양총설. 토양조사자료 13, 농촌진흥청, pp. 283-290.
- 박종관, 조경민, 양해근, 마루이 아츠나오. 2006. 호우시 구릉지 완사면에 발달된 'U자골' 곡두부에서의 지중수 거동. 대한지리학회지, 41(6), pp. 670-681.
- 사공호상. 2003. IKONOS 위성영상을 이용한 불투수지표면 분석방법에 관한 실증연구. 한국 GIS 학회지, 11(4), pp. 509-518.
- 오경두. 2009. 분포형 모형 VfloTM에 의한 수문해석. 제20회 수공학 워크샵 교재, 한국수자원학회, pp. 32-136.
- 최윤석. 2010. 지리정보시스템 기반의 물리적 분포형 강우-유출 모형 개발 및 평가. 박사학위논문, 인하대학교.
- 최윤석, 김경탁, 이진희. 2008. 유한체적법을 이용한 격자기반의 분포형 강우-유출 모형 개발. 한국수자원학회논문집, 41(9), pp. 895-905.
- 최윤석, 최천규, 김경탁. 2012. 분포형 모형의 다지점 보정 모듈 개발 - GRM 모형을 중심으로. 한국지리정보학회지, 15(3), pp. 103-118.
- 한국건설기술연구원. 2011a. HyGIS 개발 및 적용. 과학기술부.
- 한국건설기술연구원. 2011b. HyGIS-GRM User's manual.
- Ajami, N.K., Gupta, H., Wagener, T., Sorooshian, S. 2004. Calibration of a semi-distributed hydrologic model for streamflow estimation along a river system. Journal of Hydrology, 298, pp. 112-135.
- ASCE. 1996. River hydraulics. Technical engineering and design guides as adapted form the US Army Corps of Engineers, no. 18, ASCE Press, New York, pp. 58-61.
- Averjanov, S.F. 1950. About Permeability of Subsurface Soils in Case of Incomplete Saturation. Eng. Collect. 7, as Quoted by P. Ya. Polubarinova Kochina, The Theory of

- Ground Water Movement, English Translation by J.M. Roger De Wiest, 1962.
- Bras, R.L. 1990. Hydrology : an introduction to hydrologic science. Addison-Wesley publishing company, pp. 283-388.
- Beven, K. 1981. Kinematic subsurface stormflow. Water Resources Research, 17(5), pp. 1419-1424.
- Beven K.J., O'Connell P.E. 1982. On the role of a physically-based distributed modeling in hydrology. Institute of Hydrology Report No.81, Wallingford, UK, pp. 7-10.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences, 24(1), pp. 43-69.
- Bouwer, H. 1966. Rapid field measurement of air entry value and hydraulic conductivity of soil as significant parameters in flow system analysis. Water Resources Research 2(4), pp. 729-738.
- Brakensiek, D.L., Engleman, R.L., Rawls, W.J. 1981. Variation within texture classes of soil water parameters. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 24(2), pp. 335-339.
- Chaudhry, M.H. 1993. Open-channel Flow. Prentice-Hall, pp. 82-86.
- Choi, Y.S., Choi, C.K., Kim, H.S., Kim, K.T., Kim, S.J. 2015. Multi-site calibration using a grid-based event rainfall-runoff model: a case study of the upstream areas of the Nakdong River basin in Korea. Hydrological Processes, 29, pp. 2089-2099.
- Choi, Y.S., Je, Y.H., Kim, K.T., Kim, J.H. 2015. MapWindow Plug-in of GRM Model Using Open Source Software. Proceedings of FOSS4G SEOUL 2015.
- Chow, V.T. 1959. Open-channel hydraulics. McGraw-Hill, pp. 101-123.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. 1988. Applied hydrology. McGraw-Hill, pp. 110-147.
- Dawson, C.W., Abrahart, R.J., Shamseldin, A.Y., Wilby, R.L. 2006. Flood estimation at ungauged sites using artificial neural networks. Journal of Hydrology, 319, pp. 391-409.
- Doherty, J. 2010. PEST: Model-Independent Parameter Estimation User Manual : 5th Edition. Watermark Numerical Computing, Australia.
- Dunne, T., Black R.D. 1970. An experimental investigation of runoff production in permeable soils. Water Resources Research, 6(2), pp. 478-490.

- Engman, E.T. 1986. Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(1), pp. 39-53.
- Fredlund, D.G., Xing, A., Huang, S. 1994. Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, pp. 533-546.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice Hall, Inc., New Jersey, pp. 15-236.
- Henderson, F.M. 1966. *Open channel flow*. Macmillan Publishing Co., Inc., New York, pp. 355-383.
- Horton, R.E. 1933. The role of infiltration of hydrologic cycle. *Transactions:American Geophysical Union*, 14, pp. 446-460.
- Merz, R., Blöschl, G. 2004. Regionalisation of catchment model parameters. *Journal of Hydrology*, 287, pp. 95-123.
- Noh, S.J., An, H., Kim, S.H., Kim, H.J. 2015. Simulation of soil moisture on a hillslope using multiple hydrologic models in comparison to field measurements. *Journal of Hydrology*, 523, pp. 342-355.
- Pilgrim, D.H. 1983. Some problems in transferring hydrological relationships between small and large drainage basins and between regions. *Journal of Hydrology*, 65, pp. 49-72.
- Ponce, V.C., Li, R.M., Simons, D.B. 1978. Applicability of kinematic and diffusion models. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 104(HY3), pp. 353-360.
- Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Miller, N. 1983. Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydarulic Engineering*, 109(1), pp. 62-70.
- Sloan, P.G., Moore, I.D. 1984. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), pp. 1815-1822.
- Vieux, B.E. 2004. *Distributed Hydrologic Modeling Using GIS*. Kluwer Academic Publishers.
- Woolhiser, D.A., Liggett, J.A. 1967. Unsteady, one-dimensional flow over a plane - the rising hydrograph. *Water Resources Research*, 3(3), pp. 753-771.
- Young, A. 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320, pp. 155-172.

부 록

가. GRM 프로젝트 파일 사례(유역 하나, Watch point 하나인 경우)

```
<?xml version="1.0" standalone="yes"?>
<GRMProject xmlns="http://tempuri.org/GRMProject.xsd">
  <ProjectSettings>
    <ProjectFile>C:/GRM/Sample/SampleProject.gmp</ProjectFile>
    <GRMSimulationType>SingleEvent</GRMSimulationType>
    <WatershedFile>C:/GRM/Sample/Data/WiWatershed.asc</WatershedFile>
    <SlopeFile>C:/GRM/Sample/Data/Wi_Slope_ST.asc</SlopeFile>
    <FlowDirectionFile>C:/GRM/Sample/Data/WiFDir.asc</FlowDirectionFile>
    <FlowAccumFile>C:/GRM/Sample/Data/WiFAC.asc</FlowAccumFile>
    <StreamFile>C:/GRM/Sample/Data/WiStream6.asc</StreamFile>
    <ChannelWidthFile />
    <LandCoverDataType>File</LandCoverDataType>
    <LandCoverFile>C:/GRM/Sample/Data/wilc200.asc</LandCoverFile>
    <LandCoverVATFile>C:/GRM/Sample/Data/wilc200.vat</LandCoverVATFile>
    <ConstantRoughnessCoeff />
    <ConstantImperviousRatio />
    <SoilTextureDataType>File</SoilTextureDataType>
    <SoilTextureFile>C:/GRM/Sample/Data/wistext200.asc</SoilTextureFile>
    <SoilTextureVATFile>C:/GRM/Sample/Data/wistext200.vat</SoilTextureVATFile>
    <ConstantSoilPorosity />
    <ConstantSoilEffPorosity />
    <ConstantSoilWettingFrontSuctionHead />
    <ConstantSoilHydraulicConductivity />
    <SoilDepthDataType>File</SoilDepthDataType>
    <SoilDepthFile>C:/GRM/Sample/Data/wisdepth200.asc</SoilDepthFile>
    <SoilDepthVATFile>C:/GRM/Sample/Data/wisdepth200.vat</SoilDepthVATFile>
    <ConstantSoilDepth />
    <InitialSoilSaturationRatioFile />
    <InitialChannelFlowFile />
    <RainfallDataType>TextFileMAP</RainfallDataType>
    <RainfallInterval>60</RainfallInterval>
    <RainfallDataFile>C:/GRM/Sample/Data/RF_MAP.txt</RainfallDataFile>
    <FlowDirectionType>StartsFromNE</FlowDirectionType>
    <GridCellSize>200</GridCellSize>
    <IsParallel>true</IsParallel>
    <MaxDegreeOfParallelism>-1</MaxDegreeOfParallelism>
    <SimulStartingTime>0</SimulStartingTime>
    <SimulationDuration>80</SimulationDuration>
    <ComputationalTimeStep>5</ComputationalTimeStep>
    <IsFixedTimeStep>true</IsFixedTimeStep>
```

```

<OutputTimeStep>60</OutputTimeStep>
<CrossSectionType>CSSingle</CrossSectionType>
<SingleCSChannelWidthType>CWEquation</SingleCSChannelWidthType>
<ChannelWidthEQc>1.698</ChannelWidthEQc>
<ChannelWidthEQd>0.318</ChannelWidthEQd>
<ChannelWidthEQe>0.5</ChannelWidthEQe>
<ChannelWidthMostDownStream>260</ChannelWidthMostDownStream>
<LowerRegionHeight>0</LowerRegionHeight>
<LowerRegionBaseWidth>0</LowerRegionBaseWidth>
<UpperRegionBaseWidth>0</UpperRegionBaseWidth>
<CompoundCSChannelWidthLimit>0</CompoundCSChannelWidthLimit>
<BankSideSlopeRight>1.5</BankSideSlopeRight>
<BankSideSlopeLeft>1.5</BankSideSlopeLeft>
<SimulateInfiltration>true</SimulateInfiltration>
<SimulateSubsurfaceFlow>true</SimulateSubsurfaceFlow>
<SimulateBaseFlow>true</SimulateBaseFlow>
<SimulateFlowControl>false</SimulateFlowControl>
<MakeIMGFile>false</MakeIMGFile>
<MakeASCFile>false</MakeASCFile>
<MakeSoilSaturationDistFile>true</MakeSoilSaturationDistFile>
<MakeRfDistFile>true</MakeRfDistFile>
<MakeRFaccDistFile>true</MakeRFaccDistFile>
<MakeFlowDistFile>true</MakeFlowDistFile>
<PrintOption>All</PrintOption>
<WriteLog>false</WriteLog>
<AboutThisProject />
<AboutWatershed />
<AboutLandCoverMap />
<AboutSoilMap />
<AboutSoilDepthMap />
<AboutRainfall />
<ProjectSavedTime>2018-2-14 16:34</ProjectSavedTime>
<ComputerName>CYS-PC</ComputerName>
<ComputerUserName>CYS</ComputerUserName>
<GRMVersion>2018.02</GRMVersion>
</ProjectSettings>
<SubWatershedSettings>
  <ID>1</ID>
  <IniSaturation>0.96</IniSaturation>
  <MinSlopeOF>0.0001</MinSlopeOF>
  <UnsaturatedKType>Linear</UnsaturatedKType>
  <CoefUnsaturatedK>0.2</CoefUnsaturatedK>
  <MinSlopeChBed>0.0005</MinSlopeChBed>
  <MinChBaseWidth>30</MinChBaseWidth>
  <ChRoughness>0.045</ChRoughness>
  <DryStreamOrder>0</DryStreamOrder>

```

```

<IniFlow>94.8</IniFlow>
<CalCoefLCRoughness>1</CalCoefLCRoughness>
<CalCoefPorosity>1</CalCoefPorosity>
<CalCoefWFSuctionHead>1</CalCoefWFSuctionHead>
<CalCoefHydraulicK>1.3</CalCoefHydraulicK>
<CalCoefSoilDepth>1</CalCoefSoilDepth>
<UserSet>true</UserSet>
</SubWatershedSettings>
<WatchPoints>
  <Name>MD</Name>
  <ColX>21</ColX>
  <RowY>39</RowY>
</WatchPoints>
<GreenAmptParameter>
  <GridValue>1</GridValue>
  <USERSoil>미사질식양토 </USERSoil>
  <GRMCode>SiCL</GRMCode>
  <Porosity>0.471</Porosity>
  <EffectivePorosity>0.432</EffectivePorosity>
  <WFSoilSuctionHead>27.3</WFSoilSuctionHead>
  <HydraulicConductivity>0.1</HydraulicConductivity>
</GreenAmptParameter>
<GreenAmptParameter>
  <GridValue>2</GridValue>
  <USERSoil>미사질양토</USERSoil>
  <GRMCode>SiL</GRMCode>
  <Porosity>0.501</Porosity>
  <EffectivePorosity>0.486</EffectivePorosity>
  <WFSoilSuctionHead>16.68</WFSoilSuctionHead>
  <HydraulicConductivity>0.65</HydraulicConductivity>
</GreenAmptParameter>
<GreenAmptParameter>
  <GridValue>3</GridValue>
  <USERSoil>사양토</USERSoil>
  <GRMCode>SL</GRMCode>
  <Porosity>0.453</Porosity>
  <EffectivePorosity>0.412</EffectivePorosity>
  <WFSoilSuctionHead>11.01</WFSoilSuctionHead>
  <HydraulicConductivity>1.09</HydraulicConductivity>
</GreenAmptParameter>
<GreenAmptParameter>
  <GridValue>4</GridValue>
  <USERSoil>사토</USERSoil>
  <GRMCode>S</GRMCode>
  <Porosity>0.437</Porosity>
  <EffectivePorosity>0.417</EffectivePorosity>

```

```

    <WFSoilSuctionHead>4.95</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>11.78</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <GreenAmptParameter>
    <GridValue>5</GridValue>
    <USERSoil>식토</USERSoil>
    <GRMCode>C</GRMCode>
    <Porosity>0.475</Porosity>
    <EffectivePorosity>0.385</EffectivePorosity>
    <WFSoilSuctionHead>31.63</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>0.03</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <GreenAmptParameter>
    <GridValue>6</GridValue>
    <USERSoil>양질사토</USERSoil>
    <GRMCode>LS</GRMCode>
    <Porosity>0.437</Porosity>
    <EffectivePorosity>0.401</EffectivePorosity>
    <WFSoilSuctionHead>6.13</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>2.99</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <GreenAmptParameter>
    <GridValue>7</GridValue>
    <USERSoil>양토</USERSoil>
    <GRMCode>L</GRMCode>
    <Porosity>0.463</Porosity>
    <EffectivePorosity>0.434</EffectivePorosity>
    <WFSoilSuctionHead>8.89</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>0.34</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <SoilDepth>
    <GridValue>1</GridValue>
    <UserDepthClass>얕음</UserDepthClass>
    <GRMCode>S</GRMCode>
    <SoilDepth>25</SoilDepth>
  </SoilDepth>
  <SoilDepth>
    <GridValue>2</GridValue>
    <UserDepthClass>보통</UserDepthClass>
    <GRMCode>M</GRMCode>
    <SoilDepth>75</SoilDepth>
  </SoilDepth>
  <SoilDepth>
    <GridValue>3</GridValue>
    <UserDepthClass>깊음</UserDepthClass>
    <GRMCode>D</GRMCode>

```

```

    <SoilDepth>125</SoilDepth>
  </SoilDepth>
  <SoilDepth>
    <GridValue>4</GridValue>
    <UserDepthClass>매우얕음</UserDepthClass>
    <GRMCode>VS</GRMCode>
    <SoilDepth>10</SoilDepth>
  </SoilDepth>
  <LandCover>
    <GridValue>1</GridValue>
    <UserLandCover>수역</UserLandCover>
    <GRMCode>WATR</GRMCode>
    <RoughnessCoefficient>0.03</RoughnessCoefficient>
    <ImperviousRatio>1</ImperviousRatio>
  </LandCover>
  <LandCover>
    <GridValue>2</GridValue>
    <UserLandCover>시가화/건조지역</UserLandCover>
    <GRMCode>URBN</GRMCode>
    <RoughnessCoefficient>0.015</RoughnessCoefficient>
    <ImperviousRatio>0.853</ImperviousRatio>
  </LandCover>
  <LandCover>
    <GridValue>3</GridValue>
    <UserLandCover>나지</UserLandCover>
    <GRMCode>BARE</GRMCode>
    <RoughnessCoefficient>0.02</RoughnessCoefficient>
    <ImperviousRatio>0.442</ImperviousRatio>
  </LandCover>
  <LandCover>
    <GridValue>4</GridValue>
    <UserLandCover>습지</UserLandCover>
    <GRMCode>WTLD</GRMCode>
    <RoughnessCoefficient>0.07</RoughnessCoefficient>
    <ImperviousRatio>1</ImperviousRatio>
  </LandCover>
  <LandCover>
    <GridValue>5</GridValue>
    <UserLandCover>초지</UserLandCover>
    <GRMCode>GRSS</GRMCode>
    <RoughnessCoefficient>0.15</RoughnessCoefficient>
    <ImperviousRatio>0.44</ImperviousRatio>
  </LandCover>
  <LandCover>
    <GridValue>6</GridValue>
    <UserLandCover>산림지역</UserLandCover>

```

```
<GRMCode>FRST</GRMCode>
<RoughnessCoefficient>0.1</RoughnessCoefficient>
<ImperviousRatio>0.05</ImperviousRatio>
</LandCover>
<LandCover>
  <GridValue>7</GridValue>
  <UserLandCover>농업지역</UserLandCover>
  <GRMCode>AGRL</GRMCode>
  <RoughnessCoefficient>0.035</RoughnessCoefficient>
  <ImperviousRatio>0.391</ImperviousRatio>
</LandCover>
</GRMProject>
```

나. 유량 출력파일 사례(Watch point 하나인 경우)

Project name : SampleProject.gmp 2017-10-18 16:41 by GRMCore2017 beta
Output data : Discharge[CMS]

DataTime	[MD]	Rainfall_Mean	FromStarting[sec]
0	94.20855	0	0
1	94.0425	0.2	0
2	94.428	0.2	0
3	95.26047	0.26	0
4	96.03966	0.26	0
5	96.43736	0.47	0
6	96.11489	0.2	1
7	95.18248	0	1
8	94.23956	0.53	1
9	93.73375	0.38	1
10	94.06026	0.59	1
11	94.83338	0.48	1
12	96.09375	2.61	2
13	97.88503	4.65	2
14	100.0421	4.72	2
15	102.9258	4.22	2
16	106.4718	2.32	2
17	112.0597	3.58	2
18	121.7061	3.32	2
19	138.5302	2.05	3
20	163.9824	7.77	3
21	197.7056	10.4	3
22	257.3974	8.92	3
23	389.864	9.7	3
24	627.8921	8.65	3
25	840.0349	7.32	4
26	966.605	4.41	4
27	984.8084	1.38	4
28	938.363	2.03	4
29	854.1904	2.7	4
30	753.0909	1.54	4
31	655.4438	0.16	5
32	570.9659	0.46	5
33	500.7943	0.12	5
34	441.0729	0.21	5
35	387.7297	0.15	5
36	341.2569	0.33	5
37	302.5433	0.33	5
38	271.0864	0.08	6

....

....

....

....

다. GRM 프로젝트 파일 사례(다수 유역, 다수 Watch point, flow control이 있는 경우)

```
<?xml version="1.0" standalone="yes"?>
<GRMProject xmlns="http://tempuri.org/GRMProject.xsd">
  <ProjectSettings>
    <ProjectFile>C:/GRM/SampleGHG/GHG500.gmp</ProjectFile>
    <GRMSimulationType>SingleEvent</GRMSimulationType>
    <WatershedFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_Watershed.asc</WatershedFile>
    <SlopeFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_Slope_ST.asc</SlopeFile>
    <FlowDirectionFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_FDir.asc</FlowDirectionFile>
    <FlowAccumFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_FAc.asc</FlowAccumFile>
    <StreamFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_Stream.asc</StreamFile>
    <ChannelWidthFile />
    <LandCoverDataType>File</LandCoverDataType>
    <LandCoverFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_lc.asc</LandCoverFile>
    <LandCoverVATFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_lc.vat</LandCoverVATFile>
    <ConstantRoughnessCoeff />
    <ConstantImperviousRatio />
    <SoilTextureDataType>File</SoilTextureDataType>
    <SoilTextureFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_SoilTexture.asc</SoilTextureFile>
    <SoilTextureVATFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_SoilTexture.vat</SoilTextureVATFile>
    <ConstantSoilPorosity />
    <ConstantSoilEffPorosity />
    <ConstantSoilWettingFrontSuctionHead />
    <ConstantSoilHydraulicConductivity />
    <SoilDepthDataType>File</SoilDepthDataType>
    <SoilDepthFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_SoilDepth.asc</SoilDepthFile>
    <SoilDepthVATFile>C:/GRM/SampleGHG/watershed/GHG_SoilDepth.vat</SoilDepthVATFile>
    <ConstantSoilDepth />
    <InitialSoilSaturationRatioFile />
    <InitialChannelFlowFile />
    <RainfallDataType>TextFileASCgrid</RainfallDataType>
    <RainfallInterval>10</RainfallInterval>
    <RainfallDataFile>C:/GRM/SampleGHG/ghg_rf_201609021600.txt</RainfallDataFile>
    <FlowDirectionType>StartsFromNE</FlowDirectionType>
    <GridCellSize>500</GridCellSize>
    <IsParallel>true</IsParallel>
    <MaxDegreeOfParallelism>-1</MaxDegreeOfParallelism>
    <SimulStartingTime>2016-09-02 16:00</SimulStartingTime>
    <SimulationDuration>56</SimulationDuration>
    <ComputationalTimeStep>5</ComputationalTimeStep>
    <IsFixedTimeStep>false</IsFixedTimeStep>
    <OutputTimeStep>10</OutputTimeStep>
    <CrossSectionType>CSSingle</CrossSectionType>
```



```

<SingleCSChannelWidthType>CWGeneration</SingleCSChannelWidthType>
<ChannelWidthEQc>1.698</ChannelWidthEQc>
<ChannelWidthEQd>0.318</ChannelWidthEQd>
<ChannelWidthEQe>0.5</ChannelWidthEQe>
<ChannelWidthMostDownStream>400</ChannelWidthMostDownStream>
<LowerRegionHeight>0</LowerRegionHeight>
<LowerRegionBaseWidth>0</LowerRegionBaseWidth>
<UpperRegionBaseWidth>0</UpperRegionBaseWidth>
<CompoundCSChannelWidthLimit>0</CompoundCSChannelWidthLimit>
<BankSideSlopeRight>1.5</BankSideSlopeRight>
<BankSideSlopeLeft>1.5</BankSideSlopeLeft>
<SimulateInfiltration>true</SimulateInfiltration>
<SimulateSubsurfaceFlow>true</SimulateSubsurfaceFlow>
<SimulateBaseFlow>true</SimulateBaseFlow>
<SimulateFlowControl>true</SimulateFlowControl>
<MakeIMGFile>false</MakeIMGFile>
<MakeASCFile>false</MakeASCFile>
<MakeSoilSaturationDistFile>true</MakeSoilSaturationDistFile>
<MakeRfDistFile>true</MakeRfDistFile>
<MakeRFaccDistFile>true</MakeRFaccDistFile>
<MakeFlowDistFile>true</MakeFlowDistFile>
<PrintOption>All</PrintOption>
<WriteLog>false</WriteLog>
<AboutThisProject />
<AboutWatershed />
<AboutLandCoverMap />
<AboutSoilMap />
<AboutSoilDepthMap />
<AboutRainfall />
<ProjectSavedTime></ProjectSavedTime>
<ComputerName>CYS-PC</ComputerName>
<ComputerUserName>CYS</ComputerUserName>
<GRMVersion>2018.03</GRMVersion>
</ProjectSettings>
<SubWatershedSettings>
  <ID>1</ID>
  <IniSaturation>0.95</IniSaturation>
  <MinSlopeOF>0.0001</MinSlopeOF>
  <UnsaturatedKType>Linear</UnsaturatedKType>
  <CoefUnsaturatedK>0.2</CoefUnsaturatedK>
  <MinSlopeChBed>0.0002</MinSlopeChBed>
  <MinChBaseWidth>50</MinChBaseWidth>
  <ChRoughness>0.045</ChRoughness>
  <DryStreamOrder>0</DryStreamOrder>

```

```

<IniFlow>19</IniFlow>
<CalCoefLCRoughness>1</CalCoefLCRoughness>
<CalCoefPorosity>1</CalCoefPorosity>
<CalCoefWFSuctionHead>1</CalCoefWFSuctionHead>
<CalCoefHydraulicK>2.2</CalCoefHydraulicK>
<CalCoefSoilDepth>1</CalCoefSoilDepth>
<UserSet>False</UserSet>
</SubWatershedSettings>
<SubWatershedSettings>
  <ID>2</ID>
  <IniSaturation>0.95</IniSaturation>
  <MinSlopeOF>0.0001</MinSlopeOF>
  <UnsaturatedKType>Linear</UnsaturatedKType>
  <CoefUnsaturatedK>0.2</CoefUnsaturatedK>
  <MinSlopeChBed>0.0002</MinSlopeChBed>
  <MinChBaseWidth>50</MinChBaseWidth>
  <ChRoughness>0.045</ChRoughness>
  <DryStreamOrder>0</DryStreamOrder>
  <IniFlow>0</IniFlow>
  <CalCoefLCRoughness>1</CalCoefLCRoughness>
  <CalCoefPorosity>1</CalCoefPorosity>
  <CalCoefWFSuctionHead>1</CalCoefWFSuctionHead>
  <CalCoefHydraulicK>2.2</CalCoefHydraulicK>
  <CalCoefSoilDepth>1</CalCoefSoilDepth>
  <UserSet>False</UserSet>
</SubWatershedSettings>
<SubWatershedSettings>
  <ID>3</ID>
  <IniSaturation>0.95</IniSaturation>
  <MinSlopeOF>0.0001</MinSlopeOF>
  <UnsaturatedKType>Linear</UnsaturatedKType>
  <CoefUnsaturatedK>0.2</CoefUnsaturatedK>
  <MinSlopeChBed>0.0002</MinSlopeChBed>
  <MinChBaseWidth>50</MinChBaseWidth>
  <ChRoughness>0.045</ChRoughness>
  <DryStreamOrder>0</DryStreamOrder>
  <IniFlow>0</IniFlow>
  <CalCoefLCRoughness>1</CalCoefLCRoughness>
  <CalCoefPorosity>1</CalCoefPorosity>
  <CalCoefWFSuctionHead>1</CalCoefWFSuctionHead>
  <CalCoefHydraulicK>2.2</CalCoefHydraulicK>
  <CalCoefSoilDepth>1</CalCoefSoilDepth>
  <UserSet>False</UserSet>
</SubWatershedSettings>

```

```

<SubWatershedSettings>
  <ID>4</ID>
  <IniSaturation>0.95</IniSaturation>
  <MinSlopeOF>0.0001</MinSlopeOF>
  <UnsaturatedKType>Linear</UnsaturatedKType>
  <CoefUnsaturatedK>0.2</CoefUnsaturatedK>
  <MinSlopeChBed>0.0002</MinSlopeChBed>
  <MinChBaseWidth>50</MinChBaseWidth>
  <ChRoughness>0.045</ChRoughness>
  <DryStreamOrder>0</DryStreamOrder>
  <IniFlow>0</IniFlow>
  <CalCoefLCRoughness>1</CalCoefLCRoughness>
  <CalCoefPorosity>1</CalCoefPorosity>
  <CalCoefWFSuctionHead>1</CalCoefWFSuctionHead>
  <CalCoefHydraulicK>2.2</CalCoefHydraulicK>
  <CalCoefSoilDepth>1</CalCoefSoilDepth>
  <UserSet>False</UserSet>
</SubWatershedSettings>
<SubWatershedSettings>
  <ID>5</ID>
  <IniSaturation>0.95</IniSaturation>
  <MinSlopeOF>0.0001</MinSlopeOF>
  <UnsaturatedKType>Linear</UnsaturatedKType>
  <CoefUnsaturatedK>0.2</CoefUnsaturatedK>
  <MinSlopeChBed>0.0002</MinSlopeChBed>
  <MinChBaseWidth>50</MinChBaseWidth>
  <ChRoughness>0.045</ChRoughness>
  <DryStreamOrder>0</DryStreamOrder>
  <IniFlow>8.4</IniFlow>
  <CalCoefLCRoughness>1</CalCoefLCRoughness>
  <CalCoefPorosity>1</CalCoefPorosity>
  <CalCoefWFSuctionHead>1</CalCoefWFSuctionHead>
  <CalCoefHydraulicK>2.2</CalCoefHydraulicK>
  <CalCoefSoilDepth>1</CalCoefSoilDepth>
  <UserSet>true</UserSet>
</SubWatershedSettings>
<SubWatershedSettings>
  <ID>6</ID>
  <IniSaturation>0.95</IniSaturation>
  <MinSlopeOF>0.0001</MinSlopeOF>
  <UnsaturatedKType>Linear</UnsaturatedKType>
  <CoefUnsaturatedK>0.2</CoefUnsaturatedK>
  <MinSlopeChBed>0.0002</MinSlopeChBed>
  <MinChBaseWidth>50</MinChBaseWidth>

```

```

<ChRoughness>0.045</ChRoughness>
<DryStreamOrder>0</DryStreamOrder>
<IniFlow>0</IniFlow>
<CalCoefLCRoughness>1</CalCoefLCRoughness>
<CalCoefPorosity>1</CalCoefPorosity>
<CalCoefWFSuctionHead>1</CalCoefWFSuctionHead>
<CalCoefHydraulicK>2.2</CalCoefHydraulicK>
<CalCoefSoilDepth>1</CalCoefSoilDepth>
<UserSet>False</UserSet>
</SubWatershedSettings>
<SubWatershedSettings>
  <ID>7</ID>
  <IniSaturation>0.95</IniSaturation>
  <MinSlopeOF>0.0001</MinSlopeOF>
  <UnsaturatedKType>Linear</UnsaturatedKType>
  <CoefUnsaturatedK>0.2</CoefUnsaturatedK>
  <MinSlopeChBed>0.0002</MinSlopeChBed>
  <MinChBaseWidth>50</MinChBaseWidth>
  <ChRoughness>0.045</ChRoughness>
  <DryStreamOrder>0</DryStreamOrder>
  <IniFlow>0</IniFlow>
  <CalCoefLCRoughness>1</CalCoefLCRoughness>
  <CalCoefPorosity>1</CalCoefPorosity>
  <CalCoefWFSuctionHead>1</CalCoefWFSuctionHead>
  <CalCoefHydraulicK>2.2</CalCoefHydraulicK>
  <CalCoefSoilDepth>1</CalCoefSoilDepth>
  <UserSet>False</UserSet>
</SubWatershedSettings>
<WatchPoints>
  <Name>GHG_md</Name>
  <ColX>9</ColX>
  <RowY>93</RowY>
</WatchPoints>
<WatchPoints>
  <Name>GHG_gh</Name>
  <ColX>82</ColX>
  <RowY>72</RowY>
</WatchPoints>
<WatchPoints>
  <Name>GHG_YCD</Name>
  <ColX>107</ColX>
  <RowY>42</RowY>
</WatchPoints>
<FlowControlGrid>

```

```

<Name>gh_fc_ycd</Name>
<ColX>107</ColX>
<RowY>42</RowY>
<ControlType>Inlet</ControlType>
<DT>10</DT>
<FlowDataFile>C:/GRM/SampleGHG/ghg_fc_ycd_201609021600.txt</FlowDataFile>
<IniStorage />
<MaxStorage />
<MaxStorageR />
<ROType />
<ROConstQ />
<ROConstQDuration />
</FlowControlGrid>
<GreenAmptParameter>
  <GridValue>1</GridValue>
  <USERSoil>미사질식양토</USERSoil>
  <GRMCode>SiCL</GRMCode>
  <Porosity>0.471</Porosity>
  <EffectivePorosity>0.432</EffectivePorosity>
  <WFSoilSuctionHead>27.3</WFSoilSuctionHead>
  <HydraulicConductivity>0.1</HydraulicConductivity>
</GreenAmptParameter>
<GreenAmptParameter>
  <GridValue>2</GridValue>
  <USERSoil>미사질양토</USERSoil>
  <GRMCode>SiL</GRMCode>
  <Porosity>0.501</Porosity>
  <EffectivePorosity>0.486</EffectivePorosity>
  <WFSoilSuctionHead>16.68</WFSoilSuctionHead>
  <HydraulicConductivity>0.65</HydraulicConductivity>
</GreenAmptParameter>
<GreenAmptParameter>
  <GridValue>3</GridValue>
  <USERSoil>사양토</USERSoil>
  <GRMCode>SL</GRMCode>
  <Porosity>0.453</Porosity>
  <EffectivePorosity>0.412</EffectivePorosity>
  <WFSoilSuctionHead>11.01</WFSoilSuctionHead>
  <HydraulicConductivity>1.09</HydraulicConductivity>
</GreenAmptParameter>
<GreenAmptParameter>
  <GridValue>4</GridValue>
  <USERSoil>사토</USERSoil>
  <GRMCode>S</GRMCode>

```

```

    <Porosity>0.437</Porosity>
    <EffectivePorosity>0.417</EffectivePorosity>
    <WFSoilSuctionHead>4.95</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>11.78</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <GreenAmptParameter>
    <GridValue>5</GridValue>
    <USERSoil>식양토</USERSoil>
    <GRMCode>CL</GRMCode>
    <Porosity>0.464</Porosity>
    <EffectivePorosity>0.309</EffectivePorosity>
    <WFSoilSuctionHead>20.88</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>0.1</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <GreenAmptParameter>
    <GridValue>6</GridValue>
    <USERSoil>식토</USERSoil>
    <GRMCode>C</GRMCode>
    <Porosity>0.475</Porosity>
    <EffectivePorosity>0.385</EffectivePorosity>
    <WFSoilSuctionHead>31.63</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>0.03</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <GreenAmptParameter>
    <GridValue>7</GridValue>
    <USERSoil>양질사토</USERSoil>
    <GRMCode>LS</GRMCode>
    <Porosity>0.437</Porosity>
    <EffectivePorosity>0.401</EffectivePorosity>
    <WFSoilSuctionHead>6.13</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>2.99</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <GreenAmptParameter>
    <GridValue>8</GridValue>
    <USERSoil>양토</USERSoil>
    <GRMCode>L</GRMCode>
    <Porosity>0.463</Porosity>
    <EffectivePorosity>0.434</EffectivePorosity>
    <WFSoilSuctionHead>8.89</WFSoilSuctionHead>
    <HydraulicConductivity>0.34</HydraulicConductivity>
  </GreenAmptParameter>
  <SoilDepth>
    <GridValue>1</GridValue>
    <UserDepthClass>깊음</UserDepthClass>

```

```

    <GRMCode>D</GRMCode>
    <SoilDepth>125</SoilDepth>
  </SoilDepth>
  <SoilDepth>
    <GridValue>2</GridValue>
    <UserDepthClass>매우얕음</UserDepthClass>
    <GRMCode>VS</GRMCode>
    <SoilDepth>10</SoilDepth>
  </SoilDepth>
  <SoilDepth>
    <GridValue>3</GridValue>
    <UserDepthClass>보통</UserDepthClass>
    <GRMCode>M</GRMCode>
    <SoilDepth>75</SoilDepth>
  </SoilDepth>
  <SoilDepth>
    <GridValue>4</GridValue>
    <UserDepthClass>얕음</UserDepthClass>
    <GRMCode>S</GRMCode>
    <SoilDepth>25</SoilDepth>
  </SoilDepth>
  <LandCover>
    <GridValue>100</GridValue>
    <UserLandCover>시가화/건조지역</UserLandCover>
    <GRMCode>URBN</GRMCode>
    <RoughnessCoefficient>0.015</RoughnessCoefficient>
    <ImperviousRatio>0.853</ImperviousRatio>
  </LandCover>
  <LandCover>
    <GridValue>200</GridValue>
    <UserLandCover>농업지역</UserLandCover>
    <GRMCode>AGRL</GRMCode>
    <RoughnessCoefficient>0.035</RoughnessCoefficient>
    <ImperviousRatio>0.391</ImperviousRatio>
  </LandCover>
  <LandCover>
    <GridValue>300</GridValue>
    <UserLandCover>산림지역</UserLandCover>
    <GRMCode>FRST</GRMCode>
    <RoughnessCoefficient>0.1</RoughnessCoefficient>
    <ImperviousRatio>0.05</ImperviousRatio>
  </LandCover>
  <LandCover>
    <GridValue>400</GridValue>

```

```
<UserLandCover>초지</UserLandCover>
<GRMCode>GRSS</GRMCode>
<RoughnessCoefficient>0.15</RoughnessCoefficient>
<ImperviousRatio>0.44</ImperviousRatio>
</LandCover>
<LandCover>
  <GridValue>500</GridValue>
  <UserLandCover>습지</UserLandCover>
  <GRMCode>WTLD</GRMCode>
  <RoughnessCoefficient>0.07</RoughnessCoefficient>
  <ImperviousRatio>1</ImperviousRatio>
</LandCover>
<LandCover>
  <GridValue>600</GridValue>
  <UserLandCover>나지</UserLandCover>
  <GRMCode>BARE</GRMCode>
  <RoughnessCoefficient>0.02</RoughnessCoefficient>
  <ImperviousRatio>0.442</ImperviousRatio>
</LandCover>
<LandCover>
  <GridValue>700</GridValue>
  <UserLandCover>수역</UserLandCover>
  <GRMCode>WATR</GRMCode>
  <RoughnessCoefficient>0.03</RoughnessCoefficient>
  <ImperviousRatio>1</ImperviousRatio>
</LandCover>
</GRMProject>
```


라. 유량 출력파일 사례(다수의 Watch point인 경우)

Project name : GHG500.gmp 2018-03-19 13:32 by GRMCore2018

Output data : Discharge[CMS]

DateTime	[GHG_md]	[GHG_gh]	[GHG_YCD]	Rainfall_Mean	FromStarting[sec]
2016-09-02 16:00	19	8.4	6	0	0
2016-09-02 16:10	19	8.4	6	0.03	0
2016-09-02 16:20	18.99	8.39	6	0.07	0
2016-09-02 16:30	19.05	8.4	6	0.18	0
2016-09-02 16:40	19.05	8.41	5	0.2	0
2016-09-02 16:50	19.05	8.42	6	0.18	0
2016-09-02 17:00	19.08	8.42	6	0.15	0
2016-09-02 17:10	19.06	8.43	6	0.19	0
2016-09-02 17:20	19.05	8.46	6	0.14	0
2016-09-02 17:30	19.11	8.47	5	0.19	0
2016-09-02 17:40	19.16	8.49	6	0.28	0
2016-09-02 17:50	19.18	8.51	6	0.2	0
2016-09-02 18:00	19.16	8.53	6	0.23	0
2016-09-02 18:10	19.18	8.55	6	0.24	0
2016-09-02 18:20	19.2	8.56	6	0.15	0
2016-09-02 18:30	19.24	8.58	6	0.24	0
2016-09-02 18:40	19.31	8.61	6	0.4	0
2016-09-02 18:50	19.41	8.66	6	0.54	0
2016-09-02 19:00	19.44	8.7	6	0.35	0
2016-09-02 19:10	19.5	8.75	6	0.4	0
2016-09-02 19:20	19.59	8.82	6	0.41	0
2016-09-02 19:30	19.89	8.87	6	0.41	0
2016-09-02 19:40	20.05	8.95	6	0.38	0
2016-09-02 19:50	20.04	9.03	6	0.36	0
2016-09-02 20:00	20.18	9.14	6	0.38	0
2016-09-02 20:10	20.22	9.24	6	0.4	0
2016-09-02 20:20	20.28	9.33	6	0.33	0
2016-09-02 20:30	20.39	9.44	5	0.39	0
2016-09-02 20:40	20.46	9.56	6	0.41	0
2016-09-02 20:50	20.51	9.68	6	0.44	0
2016-09-02 21:00	20.52	9.81	6	0.5	0
2016-09-02 21:10	20.55	9.96	6	0.31	0
2016-09-02 21:20	20.59	10.12	6	0.26	0
2016-09-02 21:30	20.65	10.33	6	0.31	1
2016-09-02 21:40	20.7	10.51	6	0.24	1
2016-09-02 21:50	20.75	10.68	6	0.26	1
2016-09-02 22:00	20.84	10.86	6	0.27	1
2016-09-02 22:10	20.97	11.04	6	0.25	1
2016-09-02 22:20	21.02	11.22	6	0.26	1

....

....

....

....

....

마. 실행환경 설정

1. .NET framework 4.5 이상이 설치되어 있지 않을 경우에는 **GRM 실행시 애러(.NET Framework 버전 관련 애러)**가 발생하므로, **GRM 실행 애러가 있을 경우 설치 필요함**
2. PC에 .NET Framework가 설치되어 있지 않으면 아래 경로에서 설치가능하다.

<https://www.microsoft.com/net/download/framework> (여기서 .net framework 4.5 설치)

바. 실행 파일, 샘플 자료

GRM 모형은 소프트웨어 설치과정을 필요로 하지 않고, 단지 dll과 exe를 복사하여 사용한다.

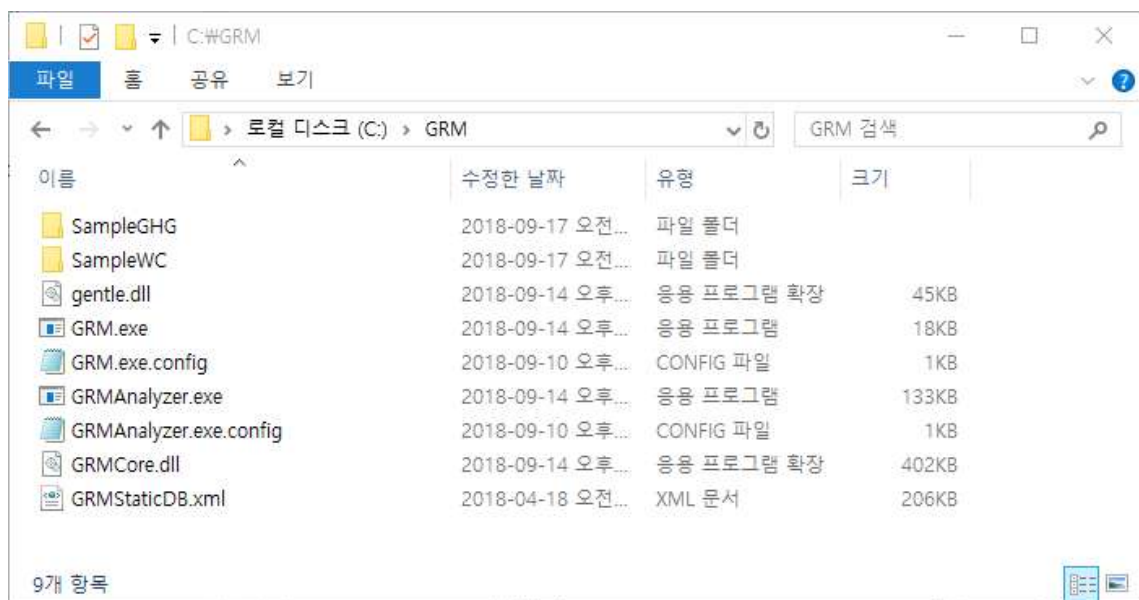
1. <https://github.com/floodmodel/GRM/tree/master/DownloadStableBinariesAndSampleData>

에서 필수파일(GRM.exe, GRM.exe.config, GRMCore.dll, GRMAnalyzer.exe, GRMAnalyzer.exe.config, gentle.dll) 참고용 파일(GRMStaticDB.xml), 샘플데이터(SampleGHG.zip, SampleWC.zip)를 다운로드 한다.

2. Windows 10 이상의 OS에서는 웹에서 다운로드한 실행파일(exe, dll, zip 등)의 차단을 해제해야 한다. 다운로드한 모든 파일을 선택한 후 마우스를 우클릭하여, 아래의 그림과 같이 [차단해제]를 선택하고 [확인] 버튼을 클릭한다.



3. GRM.exe와 GRMAnalyzer.exe는 gentle.dll, GRMCore.dll, GRM.exe.config, GRMAnalyzer.exe.config 파일과 같은 폴더에 있어야 실행이 가능하다. 다운로드한 각 파일을 'C:\WGRM' 폴더에 배치할 경우의 폴더 구조는 아래와 같다.
4. SampleGHG.zip은 SampleWC.zip은 GRM을 실행하기 위한 샘플 프로젝트와 자료를 포함하고 있다. SampleGHG.zip은 SampleWC.zip을 압축을 풀고 아래 그림과 같이 'C:\WGRM' 폴더에 배치한다. 'C:\WGRM' 폴더가 아닌 다른 폴더에 GRM 파일들을 배치할 경우에는 이에 맞게 gmp 파일(C:\WGRM\SampleWC\SampleProject.gmp, C:\WGRM\SampleGHG\GHG500.gmp) 과 강우 파일(C:\WGRM\SampleGHG\ghg_rf_201609021600.txt) 의 내용을 수정해야 한다.



<파일 및 폴더 위치>

사. GRM 모형 실행 방법(Console window)

GRM 모형은 모델링 소프트웨어(QGIS-GRM, GRMAnalyzer 등)의 메뉴로 실행하는 방법과 console 창에서 사용자가 직접 실행하는 방법이 있다. Console 창에서 실행시키는 방법은 아래와 같다.

1. 입력 공간자료와 VAT 파일, 수문 시계열 자료를 준비한다.
2. 텍스트 편집기를 이용해서 gmp 파일을 작성한다.
3. Console 창에서 gmp 파일을 argument로 입력하여 GRM.exe를 실행시킨다.

예를 들어,

GRM.exe 파일이 'C:\WGRM' 폴더에 있고, SampleProject.gmp 파일이 'C:\WGRM\Sample' 폴더에 있을 경우의 실행문은 아래와 같다.

```
C:\WGRM>GRM.exe C:\WGRM\Sample\SampleProject.gmp
```

프로젝트 파일 및 경로에 공백이 있는 경우에는 "" 표로 묶어서 입력한다.

```
C:\WGRM>GRM.exe "C:\WGRM\Sample\Sample Project.gmp"
```

GRM.exe 파일과 gmp 파일이 같은 폴더에 있을 때는 프로젝트 파일의 경로를 입력하지 않아도 된다. 즉, GRM.exe 파일과 gmp 파일이 모두 'C:\WGRM' 폴더에 있는 경우 다음과 같이 실행시킬 수 있다.

```
C:\WGRM>GRM.exe SampleProject.gmp
```

"/f 폴더경로"를 입력하여 실행할 경우에는 해당 폴더에 있는 모든 gmp 파일에 대해서 GRM 모형을 일괄 실행할 수 있다.

```
C:\WGRM>GRM.exe /f C:\WGRM\Sample
```

"/fd 폴더경로"를 입력하여 실행할 경우에는 해당 폴더에 있는 모든 gmp 파일에 대해서 GRM 모형을 일괄 실행하고, 모의결과 중 유량 파일(*discharge.out)을 제외한 모든 파일을 지운다

```
C:\WGRM>GRM.exe /fd C:\WGRM\Sample
```

"/?"를 입력하여 사용방법 도움말을 볼 수 있다.

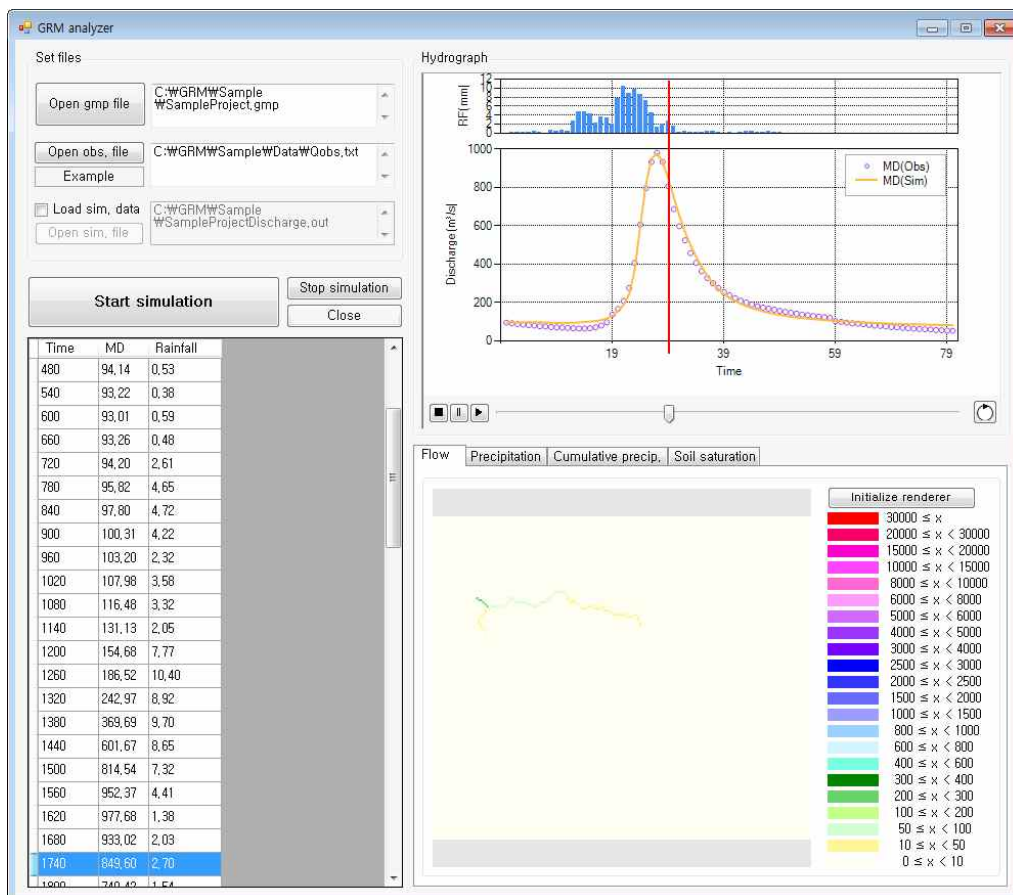
```
C:\WGRM>GRM.exe /?
```

아. GRM 모형 실행 방법(GRManalyzer)

GRManalyzer는 모의결과를 관측자료와 쉽게 비교할 수 있는 실행환경을 제공한다.

(PrintOption 중 "All"을 선택했을 때에만 사용가능)

1. 입력 공간자료와 VAT 파일, 수문 시계열 자료를 준비한다.
2. 텍스트 편집기를 이용해서 gmp 파일을 작성한다.
3. GRManalyzer.exe를 실행시킨다.
4. [Open gmp file] 버튼을 클릭해서 유출모의할 gmp 파일을 선택한다.
5. [Open obs. file] 버튼을 클릭해서 관측자료를 선택한다.
6. [Start simulation] 버튼을 클릭해서 유출모의를 시작한다.
7. 새로운 유출모의가 아닌, 기존의 계산결과를 다시 보고자 할 경우에는 [Load sim. data] 옵션을 체크하고, [Open sim. file]을 클릭해서 유출해석 결과 중 *Discharge.out 파일을 선택한다. 그리고 [Apply settings] 버튼을 클릭한다.



<GRManalyzer 실행 화면>