

제 1 장

KICT-UF 모형 이론

KICT-UF (KICT Urban Flood)

고정확도 도심홍수 통합해석 모형

1.1 분포형 강우-유출 해석

1.2 우수관망 해석

1.3 지하공간 해석

1.4 지표수-우수관망-지하공간 침수 해석

1. KICT-UF 모형 이론

도시구역에서의 홍수해석에 관한 연구는 집중형 수문학적 모형 기반의 강우-유출 모형과 우수관망의 해석을 연계한 국외모형을 활용하는 것이 일반적이다. 외국에서 개발된 기존 유출모형들은 국내와 다른 도시특성 및 강우특성, 배수구역의 특성치를 고려하여 개발되었다. 국외 모형을 국내 도입하는 문제들을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 그 성과는 하수도 및 도시하천의 설계 등에 활용되고 있다.

도시구역의 홍수량 산정을 위하여 국내에서 사용되고 있는 모형들로는 합리식, RRL, ILLUDAS, SWMM 모형 등이 있다. 합리식과 RRL 모형은 적용이 간편하다는 장점이 있으나, 사용자의 매개변수 적용에 따라 산출되는 유출량에 차이가 있는 문제점이 있다. 한편, ILLUDAS 모형은 지표면의 특성과 배수관로의 연결을 반영하여 도심지 유출량을 산정하므로 앞의 두 모형보다는 정확한 계산결과를 기대할 수 있다. 그러나, 배수계통에 각종 수리구조물이 설치된 경우에는 계산에 한계가 있는 것으로 알려져 있다. 국내에서 우수관망 및 도심지 홍수해석에 가장 일반적으로 적용되고 있는 모형은 DPA에서 개발한 SWMM 모형이다. SWMM 모형은 소배수구역에서 큰 배수구역까지 적용이 가능하고, 침투량 산정에는 Horton(1933) 또는 Green-Ampt 식을 사용한다. 수로와 관로에 대한 해석을 위하여 RUNOFF 블록, TRANSPORT 블록, EXTRAN 블록 등의 다양한 계산방안을 제시하고 있다.

한국건설기술연구원에서는 도심지역에서 발생하는 침수를 정밀하게 해석하기 위해서 강우에 의한 지표면의 침수, 지표면에서 우수관망으로 유입되는 우량, 지표면 침수가 지하공간으로 전파되는 과정을 동시에 해석할 수 있는 기법의 개발하였다. 도심지역의 분포형 강우-유출모형, 우수관망해석 모형, 준3차원 지하공간 침수해석모형 등의 요소별 해석기술을 연계하여 도심홍수를 통합적으로 해석할 수 있는 KICT-UF(Urban Flood) 모형을 개발하였다.

강우에 의한 도심지역의 우수거동을 예측하여 우수관망에 유입되는 우량을 산정하고 관망으로 유입되지 못한 우수에 의한 침수를 모의하기 위해서

지표수 모형과 우수관망 모형을 연계하여 하나의 모형으로 구축하였다(그림 1 참조). KICT-UF 모형에서는 지표수 거동 해석을 위해서 도심 지역의 우수 거동을 공간적으로 정밀하게 모의할 수 있는 분포형 모형을 채택하였다. 2차원 천수방정식을 이산화하여 도심지의 우수거동을 정확히 해석 할 수 있는 2차원 지표수 유동 모형을 개발하였으며, 우수관망의 해석을 위해서는 해석 기술이 공개되어 있는 EPA SWMM 모형을 채택하였다. 지표수모형과 우수관망 해석모형의 source code를 통합하여 하나의 모형을 결합하였다. KICT-UF 는 그림 2와 같이 수치고도, 토지피복, 강우량관측소의 위치 등을 반영하여 지표수의 거동을 모의한다. 그림 3은 KICT-UF를 이용하여 2011년 사당천 배수분구의 도심홍수를 수치모의한 결과를 나타내고 있다. 지표수 해석모형의 유효수량 산정기법은 SCS CN 기법을 적용하였으며, 주요 도로와 건물 등을 수치격자에 반영하여 모의를 수행하였다. 수치모의 결과에 나타난 바와 같이 KICT-UF 모형 지형 및 시설물 특성을 반영하여 우수가 배제되고 침수가 발생하는 현상을 정밀하게 모의할 수 있다.



[그림 1] KICT-UF 주요 특징



[그림 2] KICT-UF 지표수 모의 입력자료

도시지역의 지하공간은 지상과 각층을 연결하는 다양한 시설들로 연결되어 있다. 계단, 에스컬레이터 및 주차장 유입구 등의 층간연결시설 중에서 계단은 흐름의 불연속 지점이 발생하므로 지하공간의 특성을 반영할 수 있는 기법의 적용이 필요하다. KICT-UF의 개발에서는 천수방정식을 유한체적 기법을 이용하여 이산화하고 급변류를 해석할 수 있는 모형을 구축하고 각 층을 연결하는 연결시설을 유하하는 흐름을 구현할 수 있도록 하였다.

1.1 분포형 강우-유출 해석

홍수의 전파를 해석함에 있어서 공학적으로 유용하게 활용되고 있는 지배방정식은 천수방정식(Shallow Water Equations)이다. 천수방정식은 Navier-Stokes 방정식을 시간적분한 Reynold 방정식을 다시 수심방향으로 적분하여 얻어지며 수평 2차원 평면 내에서의 유속 및 수면의 변화를 기술하는 식이다. 일반적으로 보존형 방정식이 충격파의 질량이나 운동량 보존성에 있어서 더 우수하고(Saavedra 등, 2003) 상류에서 사류로의 천이류 재현에 적합하며(Bourdarias와 Gerbi, 2007) Reynolds 수가 매우 큰 흐름에서 정확성과 안정성이 있는 것으로 알려져 있다(Dresback 등, 2002). 보존형의 천수방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1)$$

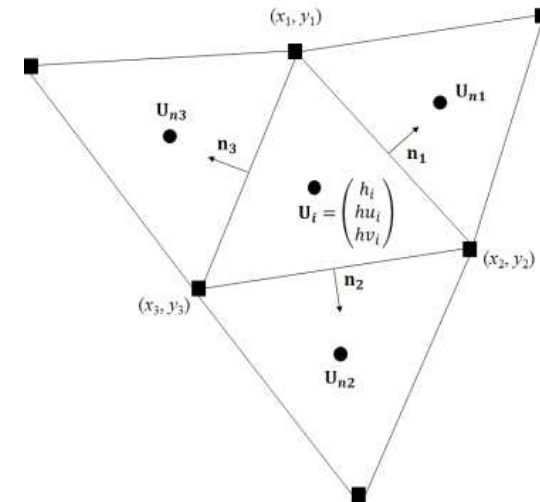
식 (1)의 보존형 변수 벡터 \mathbf{U} 와 x -축 및 y -축 방향의 흐름률 벡터 \mathbf{F} 와 \mathbf{G} 및 생성항 \mathbf{S} 는 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + 1/2gh^2 \\ huv \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} hu \\ huv \\ hv^2 + 1/2gh^2 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{S} = gh \begin{pmatrix} e - d \\ S_{ox} - S_{fx} \\ S_{oy} - S_{fy} \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (2)에서 h 수심이며, u 와 v 는 각각 x -축 및 y -축 방향의 수심평균 유속을 나타낸다. 생성항에 포함된 S_o 와 S_f 각각 하상경사와 마찰경사를 나타내며, 마찰경사는 Manning 공식 또는 Chezy 공식을 이용하여 적용할 수 있다. 도심유역에 내린 강우는 연속방정식의 생성항에 포함된 e 로 반영되며, 투수성 지표면에서 발생하는 침투량은 생성항의 d 로 지배방정식에 반영한다. 식 (2)의 변수들은 그림 3과 같은 삼각형 수치격자의 중심에 정의되며, 수치격자 각 변(cell interface)에서 정의되는 흐름율을 산정하고 흐름율에 따른

수치격자내의 물리적 변화를 산정하여 우수유동을 해석한다. 불규칙한 삼각형 격자망에 대하여 식 (1)을 이산화하기 위하여 식 (3)과 같이 적분하여 유한체적법을 적용한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_A \mathbf{U} dA + \oint_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} d\Omega + \oint_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} d\Omega = \oint_{\Omega} \mathbf{S} d\Omega \quad (3)$$



[그림 3] 삼각망 격자의 변수정의

Cell interface에서의 흐름율을 산정하기 위해서는 균일(Uniform) 가정 또는 1차원 선형 가정을 적용하여 cell interface 중앙의 변수를 산정한다. 본 연구에서는 수치격자내의 수심 및 유속은 균일하다는 가정을 도입하여 cell center의 변수가 cell interface의 변수와 동일하다는 가정을 도입하였다. Cell interface에서의 흐름율은 Approximate Riemann 기법을 도입하여 산정하였다. Approximate Riemann 기법은 Euler 방정식의 불연속한 흐름특성 모의를

위하여 개발되었으며, 천수방정식의 급변류 및 홍수와 모의에 널리 적용되고 있는 기법이다. 강우-유출을 dynamic wave 모형으로 해석하기 위하여 approximate Riemann 기법을 도입한 다수의 연구가 우수한 성과를 보였다.

본 연구에서는 approximate Riemann 기법 중 HLLC 기법을 이용하여 천수방정식을 이산화 하였다. HLLC기법은 흐름물의 3개의 특성곡선으로 분할하여 계산하는 방법으로서, HLL기법을 이차원 천수방정식에 적용할 때 발생하는 전단흐름에 의한 영향의 오차를 보완하는 기법이다. HLLC기법은 Fraccarollo와 Toro(1995)에 의해 제안되었으며, Billet과 Toro(1997)은 HLLC기법을 천수방정식에 적용하여 물리적인 타당성을 검증하였다. 한방향의 흐름에 대하여 생성항의 영향을 생략하면 지배방정식을 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

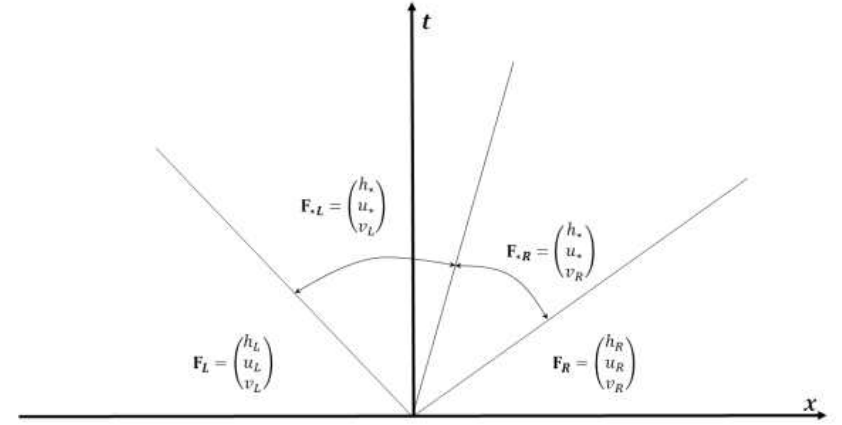
$$\frac{\partial}{\partial t} \oint_A U dA + \oint_{\Omega} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} d\Omega = 0 \quad (4)$$

식 (4)는 세 개의 변수에 대한 벡터로서 세 개의 고유값(Eigen value)을 가지며, 그림 4와 같이 세 개의 파속에 의해 구분되는 네 개의 구간으로 구분되는 식 (5)와 같은 해로 구성된다.

$$\tilde{\mathbf{U}} = \begin{cases} \mathbf{U}_L & \text{for } 0 \leq S_L \\ \mathbf{U}_L^* & \text{for } S_L \leq 0 \leq S^* \\ \mathbf{U}_R^* & \text{for } S_* \leq 0 \leq S_R \\ \mathbf{U}_R & \text{for } S_R \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

Riemann 해를 네 개의 구간으로 구분하는 파속은 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} S_L &= \min(u_L - \sqrt{gh_L}, u_* - \sqrt{gh_*}) \\ S_* &= u_* = \frac{u_L + u_R}{2} + \sqrt{gh_L} - \sqrt{gh_R} \\ S_R &= \max(u_R + \sqrt{gh_R}, u_* + \sqrt{gh_*}) \end{aligned} \quad (6)$$



[그림 4] HLLC 기법을 이용한 Approximate Riemann해법

검사체면에서의 흐름률은 식 (5)와 (6)의 결과를 이용하여 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\mathbf{E} = \begin{cases} \mathbf{E}_L & \text{for } 0 \leq S_L \\ \mathbf{E}_L^* = \mathbf{E}_L + S_L(\mathbf{U}_L^* - \mathbf{U}_L) & \text{for } S_L \leq 0 \leq S^* \\ \mathbf{E}_R^* = \mathbf{E}_R + S_R(\mathbf{U}_R^* - \mathbf{U}_R) & \text{for } S_* \leq 0 \leq S_R \\ \mathbf{E}_R & \text{for } S_R \leq 0 \end{cases} \quad (7)$$

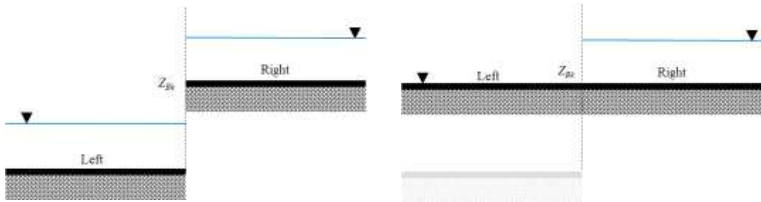
식 (7)은 Riemann 근사해로서, 1차 정확도의 해를 제공하며 생성항이 없는 지배방정식에 적합하므로 지형에 의한 하상경사 및 바닥마찰을 반영하여야 하는 천수방정식에는 이산화에 의한 불균형 현상으로 수치진동이 발생하게 된다. 이와 같은 생성항과 흐름물의 불균형을 해결하기 위하여 하상경사와 수심의 조건을 고려한 hydrostatic reconstruction기법(Simons et al., 2014)을 모형에 도입하였다. 수치격자의 하상경사 S_o 는 식 (8)과 같이 각 cell interface의 하상경사에 대한 적분식으로 표현될 수 있다.

$$\int_{\Omega} S_o d\Omega = \oint_F \mathbf{f}_{bk} \cdot \mathbf{n} d\Gamma = \sum_{k=1}^3 \mathbf{f}_{bk} \cdot \mathbf{n} l_k \quad (8)$$

여기서 \mathbf{f}_{bk} 는 k-cell interface에서 좌우측의 수심 및 하상고에 의하여 산정되는 압력경사이고, \mathbf{n}_k 는 k-cell interface의 연직방향 단위벡터, l_k 는 k-cell interface의 길이이다. 식 (2.8)의 \mathbf{f}_{bk} 는 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\mathbf{f}_{bk} \cdot \mathbf{n}_k = \begin{bmatrix} 0 \\ -n_{xk} \frac{g}{2} (d_k^L + d_L) (z_{Bk} - z_B^L) \\ -n_{yk} \frac{g}{2} (d_k^L + d_L) (z_{Bk} - z_B^L) \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (9)의 d_k^L 은 k-cell interface의 좌측 수심으로 $d_k^L = \eta_k^L - z_{Bk}^L$ 로 정의되며, η_k^L 은 intercell 좌측 격자의 자유수면 높이이다. 또한 d_L 과 z_B^L 은 각각 cell interface의 좌측 격자 중심에서 정의된 수심과 지반고이다. d_k^L 을 산정하기 위한 z_{Bk}^L 는 그림 5와 같이 2단계에 걸쳐 산정한다. 우선 cell interface의 좌우측 격자의 지반고 중에서 높은 값을 z_{Bk}^L 로 채택하고, 좌측 격자의 자유수면높이와 z_{Bk}^L 중 낮은 값을 최종 z_{Bk}^L 로 선정한다.



(a) Riemann 상태의 수심관계 (b) 흐름율 계산을 위한 상태 가정

[그림 5] Hydrostatic reconstruction 기법 적용을 위하여 변수 가정

흐름율을 산정하는 식 (4)와 하상경사를 고려한 식 (9)를 이용하여 지배방정식 (1)을 이산화하면 식 (10)과 같다.

$$\frac{\mathbf{U}^{n+1} - \mathbf{U}^n}{\Delta t} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^3 (\mathbf{E}_k + \mathbf{f}_{bk}) \cdot \mathbf{n}_k l_k + S_f \quad (10)$$

1.2 우수관망 해석

우수관망 흐름 해석을 위하여 EPA SWMM 4.4 모형 중에서 관망해석에 필요한 EXTRAN 블록 일부를 본 모형에 반영하였다. EXTRAN 블록은 San Francisco에서 도시유역 유출해석을 위해 Shubinski와 Roesner(1973)에 의해 개발되었다. 당시에는 San Francisco 모형이라 불리웠으나, 1981년 미국 환경청에서는 기존 SWMM 모형의 TRANSPORT 블록을 보완하기 위해 이를 SWMM 모형에 삽입시켰으며, TRANSPORT 블록과 구분하여 EXTRAN (Extended Transport Model) 블록으로 설정하였다. EXTRAN 블록은 기존 도시유출모형들이 계산할 수 없었던 LOOP형 관망형태의 흐름, 배수, 역류, 압력류(surge)계산과 웨어, 오리피스, 저류지, 펌프장 등에서 흐름의 추적 계산이 가능하도록 설계된 수리모형이다.

EXTRAN 블록은 배수관망 시스템에서 유량과 수심을 계산하기 위해 개수로/관수로 등으로 유입되는 RUNOFF 블록 또는 타 지표면유출 모형으로부터의 유입수문곡선으로부터 Dynamic 지배방정식을 사용하여 추적한다. 이 모형은 합류, 분류 시스템으로 구성되는 도시배수유역에서 유출현상을 모의할 수 있으며, 자연수로와 같은 임의 단면의 수로도 사다리꼴로 근사시켜 계산한다. 흐름을 정류로 가정하고 유출해석을 하는 경우 배수곡선을 구할 수 없으므로, 이러한 문제점을 보완하기 위하여 EXTRAN 블록은 흐름을 부정류로 계산하도록 설계되었다.

기본방정식으로 1차원 부정류 점변류 방정식(St. Venant 방정식)인 Dynamic방정식을 사용하며, 수치해석적으로 시간에 대해 전진법인 양해법(Explicit Method)을 사용한다. 연산 시간간격(time-step)은 시스템내에서 가장 짧은 수로/관로를 통과하는 파속의 크기를 고려하여 결정되며, 배수시스템을 LINK와 NODE로 구성하여 기존의 유출모형이 관망형태를 수지상 형태로 한정된 점을 보완할 뿐만 아니라, LOOP형 배수관망, 웨어, 오리피스, 펌프 등의 수리구조물로 인한 측방류 유입, 부분적인 압력류 등을 계산할 수 있다.

EXTRAN 블록은 물리적인 배수시스템에 대한 점변부정류 방정식(St. Venant 방정식)의 해를 구하는데 유용하도록 관로 시스템은 NODE(접합점)와 NODE에 연결된 LINK(관로)들로 구성된다. LINK는 NODE와 NODE 사이를 연결하며, 유량을 전송하는 관로와 같다. LINK에서의 주요 수리특성치들은 조도계수, 길이, 단면적, 동수반경과 수면폭 등이다. 여기서 단면적, 동수반경, 수면폭 등은 수심의 함수로 나타낼 수 있다. LINK내에서 중요한 독립변수는 유량(Q)이다. 수치적분의 해는 LINK에서의 평균유량을 나타내며, 각 연산 단위시간구간에서는 일정하다고 가정한다. 한편, EXTRAN 블록에서 관로구성시 관로의 길이는 수치해석의 안정조건에 부합해야 한다. NODE는 배수시스템에서의 맨홀 또는 접합점 등과 같은 시스템내의 저류요소이다. NODE와 관련된 변수들은 유량, 수심, 수표면적 등이며, 중요한 종속변수는 수위(H)이다. NODE의 체적은 NODE 사이에 연결된 양 관로 길이의 중간까지 저류된 물의 체적과 같다고 가정한다. EXTRAN 블록에서의 LINK와 NODE의 계산특성치는 표 1과 같다.

[표 1] EXTRAN 블록의 계산 특성

	제한사항	특성치	반영 상수
NODE	<ul style="list-style-type: none"> $\sum Q$=저류량의 변화 	<ul style="list-style-type: none"> 체적 단면적 수심 	<ul style="list-style-type: none"> 경사 지반표고
LINK	<ul style="list-style-type: none"> 유입량 = 유출량 	<ul style="list-style-type: none"> 단면적 동수반경 수면표고 유량 유속 	<ul style="list-style-type: none"> 수리 손실계수 관로형태 관로길이 관로경사 조도계수

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (12)$$

EXTRAN 블록은 LINK에서 식 (12)의 운동량방정식을 NODE에서는 식 (11)의 연속방정식을 해석하여 표 1의 특성치를 산정한다. 수심이 얇은 흐름에 있어서 이송항($\partial(Q^2/A)/\partial x$)은 운동량방정식의 여러항들 중에서 가장 작은 값을 갖는 동시에 계산결과에 불안정성을 유발하기 때문에 생략한다. 간편하고, 안정된 해를 구하기 위해 식 (13)을 식 (12)에 대입하여 운동량 방정식을 변형시킨다.

$$\frac{Q^2}{A} = V^2 A \quad (13)$$

식 (13)을 식 (12)에 대입하고 정리하면 EXTRAN 블록에서 하수의 흐름추적에 사용되는 다음의 기본방정식 식 (14)가 유도된다.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (14)$$

EXTRAN 블록에서는 운동량방정식의 해를 구하기 위해 차분방정식을 사용하는데, 3가지의 각기 다른 연산기법을 이용하여 해를 구할 수 있다. 먼저, Manning식으로 마찰경사를 나타내면 다음과 같다.

$$S_f = \frac{k}{gAR^{4/3}} Q |V| \quad (15)$$

여기서, k 는 gn^2 이며, 속도의 절대값을 사용한 것은 S_f 를 흐름방향으로 설정하여 마찰력이 항상 흐름방향과 반대가 되도록 설정하기 위함이다. 식 (15)를 식 (14)에 대입하고 유한차분법의 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t - \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V_t| Q_{t+\Delta t} + 2\bar{V} \left[\frac{\Delta A}{\Delta t} \right]_t \Delta t + \bar{V}^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - g\bar{A} \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t \quad (16)$$

$Q_{t+\Delta t}$ 에 대해 위의 식을 정리한 다음의 유한차분 방정식이 LINK내에서의 기본방정식이다.

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{k\Delta t}{R^{4/3}} |V|} \left[Q_t + 2\bar{V} \left[\frac{\Delta A}{\Delta t} \right]_t \Delta t + \bar{V}^2 \frac{A_2 - A_1}{L} \Delta t - g\bar{A} \frac{H_2 - H_1}{L} \Delta t \right] \quad (17)$$

식 (17)의 \bar{V} , \bar{R} , \bar{A} 는 시간 t 에서, LINK 양단에서의 단면평균 유속, 동수반경, 통수단면의 가중평균 값이다.

위 식(17)에서 미지값은 $Q_{t+\Delta t}$ 와 LINK 양 끝단 NOD에서의 수심 H_1 , H_2 이며, 변수 \bar{V} , \bar{R} , \bar{A} 는 유량 Q 와 수심 H 로 구성된다. 운동량방정식을 해석하기 위해서는 유량 Q 와 수심 H 에 대한 연속방정식의 해석이 필요하므로, NODE에서의 연속방정식을 해석한다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_t \Delta t}{A_s} \quad (18)$$

식 (18)을 수심에 대하여 차분화하여 식 (19)를 유도하며, A_s 는 각 NODE에서의 수표면 면적이다.

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \frac{\sum Q \Delta t}{A_s} \quad (19)$$

식 (17)과 (19)를 기반으로 각 연산시간구간 Δt 에서 NODE의 수심 H 와 LINK 내 유량 Q 를 산정한다. 두 방정식의 수치적분 과정에서는 기본적으로 2차 Runge-Kutta방법과 같은 수정 EULER방법을 사용한다.

1.3 지하공간 해석

지하공간의 침수해석 수치기술은 지표수를 해석하는 기술과 이론적으로 동일하다. 그러나, 도시지역의 지하공간은 지상과 각층을 연결하는 다양한 시설들로 연결되어 있다. 도심지역에서 대표적으로 확인할 수 있는 층간 연결시설인 계단, 에스컬레이터 및 주차장 진입로 등은 지형특성을 경사면으로 구분할 수 있으며, 환기구, 엘리베이터 등은 연직방향으로 각 층을 연계하므로 일종의 저류공간으로 가정이 가능하다. 이와 같은 구조물의 특성을 이용하면 계단, 에스컬레이터 및 주차장 유입구 등은 각 층을 연결함에 있어 상층의 특정 지점과 하층의 특정지점을 연속된 구조물로 연결하여 수치격자로 표현이 가능할 것으로 판단된다. 그 중에서 주차장 유입구는 차량통행을 위하여 연속된 경사를 유지하고 있으므로 기존 수치격자 생성기법을 으로 표현이 가능하다. 계단 또는 에스컬레이터는 불연속 지점이 발생하므로, 불연속 함수를 활용하거나 불연속 지점을 급격한 경사로 표현하는 방법을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 환기구 및 엘리베이터의 경우에는 각 층을 수직으로 연결하므로 기존의 2차원 기반의 수치격자 변형하여 적용하는 기법이 필요하다.

지하공간의 침수해석의 지배방정식은 식 (1) 및 (2)로 정의되며, 식 (7)의 Riemann 근사해로서 흐름율을 계산한다. 각층을 연결하는 불연속 구조물 주변의 해석정확도 향상을 위하여 수치해를 2차 정확도로 확장하고 수치진도에 의한 문제를 해결함과 동시에 생성항에 의한 문제를 해결하기 위하여, MUSCL 기법을 개선한 수면경사법(Surface Gradient Method)을 KICT-UF에 적용하였다.

Zhou 등(2001)은 하상경사가 있는 경우, 기존의 MUSCL기법이 수심의 경사를 이용하여 변수를 2차정확도로 확장하는 기존의 방법은 하상경사 및 수면에서 급격한 변화가 발생하는 경우 물리적인 현상을 정확히 반영하지 못하는 점을 개선하기 위하여 수면경사법을 제안하였다. 수면경사법에 의한 보

준변수의 경사는 식 (20)과 수면경사식을 이용하여 식 (21)과 같이 계산된다.

$$\eta = \eta_i + (x - x_i)\delta\eta_i \quad (20)$$

$$\delta\eta_i = G\left(\frac{\eta_{i+1} - \eta_i}{x_{i+1} - x_i}, \frac{\eta_i - \eta_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}\right) \quad (21)$$

여기서, η 는 수위, G 는 수치진동의 발생을 피하기 위한 경사 제한자로, 재구성된 자료가 기존 자료의 값을 넘지 않도록 제한하기 위해 사용된다.

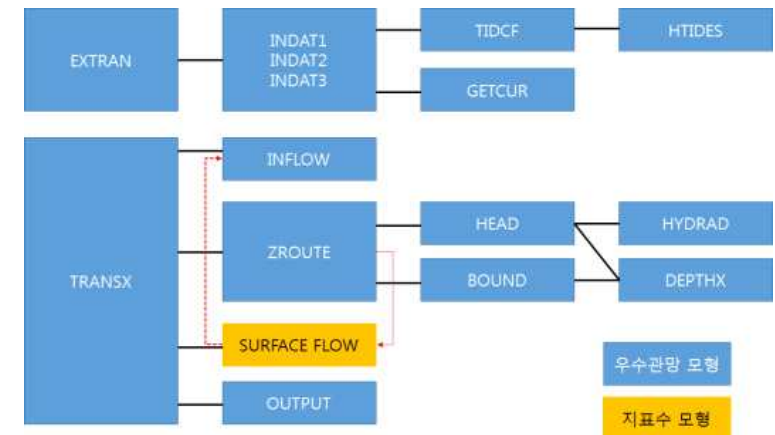
본 연구에서는 2차원 수치격자 생성기법을 활용하여 다층의 지하공간 구조물의 수치격자를 생성하였다. 우선 각 층을 표현하는 평면 격자 및 각 층을 연결하는 시설물의 격자를 지하공간을 이루는 각 요소의 수치격자를 구성한다. 각 연결지점의 수치격자를 공유할 수 있도록 병합기법을 적용하여 지상, 지하1층 및 지하2층 등 다수의 층으로 구성된 지하공간 시설의 수치격자를 정확하게 생성할 수 있다(그림 5).



[그림 5] 지하공간 침수모의 개념

1.4 지표수-우수관망-지하공간 침수 해석

도심 홍수 공간해석 모형 구축을 위하여 지표수 모의와 우수관망 모의를 위한 모형을 각각 개발하였으며, 이를 하나로 연계하여 통합해석이 가능한 모형을 구축할 필요가 있다. 본 과제에서는 우수관망 해석모형을 기본으로 지표수 모형을 우수관망 모형의 부함수로 추가하여 하나의 모형으로 구축하도록 하였다. 그림 6은 통합 모형의 부함수 연계 구조를 간략히 도시한 것으로, 주함수는 지하수 해석 모형의 EXTRAN 모형이며 우수관망으로 유입되는 유입량을 지표수에서 산정하도록 모형을 구축하였다.



[그림 6] 도심 홍수 공간해석 통합모형 부함수 연계도

우수관망에서 지표로 분출되는 잉여유량은 우수관망 해석결과에서 산정되며, 산정된 잉여유량을 지표수의 생성항에 추가하여 지표면에서 발생하는 도심 홍수를 공간적으로 해석할 수 있는 모형을 구축하였다.

제 2 장

KICT-UF 기능

2.1 시스템 요구사항

2.2 메인화면

2.3 프로젝트 관리

2.4 강우-유출 모의 자료 구축

2.5 우수관망 모의 입력자료 구축

2.6 모의 실행 및 결과

2.7 프로그램 설치

2. KICT-UF 기능

2.1 시스템 요구사항

(1) 개발환경

- 1) OS : Windows 7
- 2) 개발언어 : MS Visual Studio 2015
- 3) 프로그램 실행 최소 요구사항

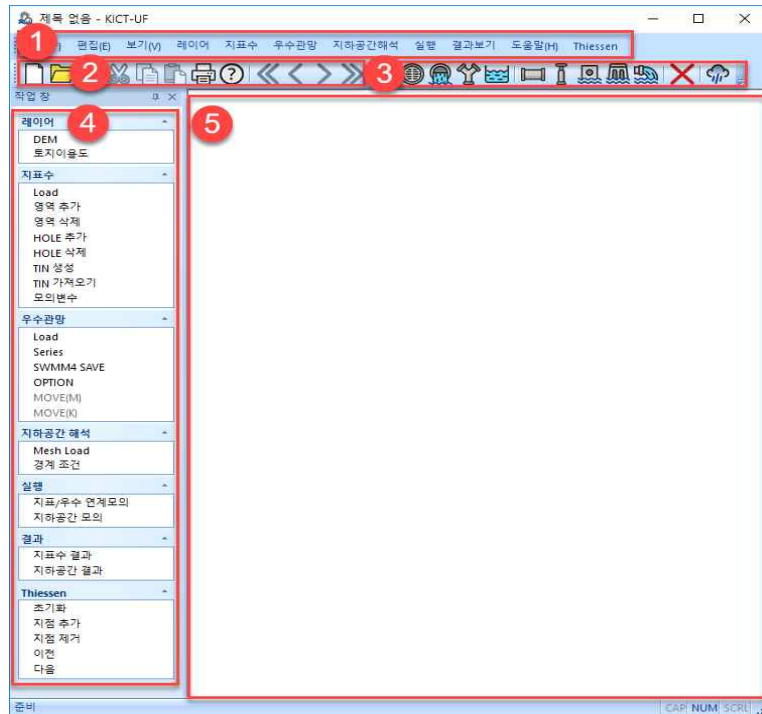
프로그램을 실행하기 위한 최소 요구사항은 다음과 같다.

[표 2] 최소 요구사항

분류	기준	비고
운영체제	Windows XP	SP3 이상
CPU	1.6 GHz 이상	
화면해상도	1024 * 768	
메모리	1GB 이상	2GB 이상 권장

2.2 메인화면

도심지 침수공간 모의 해석 프로그램 KICT-UF의 메인화면을 나타낸다.



[그림 7] KICT-UF 메인화면

			<ul style="list-style-type: none"> -우수관망 : 우수관망 모의자료 설정 -지하공간해석 : 지하공간 모의자료 편집 -실행 : 모의자료 모의 -결과보기 : 모의결과 자료 표출 -Thiessen : Thiessen 편집
2	표준	Tool bar	<ul style="list-style-type: none"> - 새 글 - 불러오기 - 저장하기 - 인쇄 - About - 처음 - 이전 - 다음 - 끝
3	우수관망 tool	Tool bar	<ul style="list-style-type: none"> - 우수관장 자료 편집 - Node Add <ul style="list-style-type: none"> Junction Outfall Divider Storage - Link Add <ul style="list-style-type: none"> Conduit Pump Weir Orifice Outlet - Remove - Gage Add
4	메뉴 (도킹창)	Dock menu	- Menu 주요 기능 목록
5	화면	View	- 프로그램 화면

[표 3] 메인화면 설명

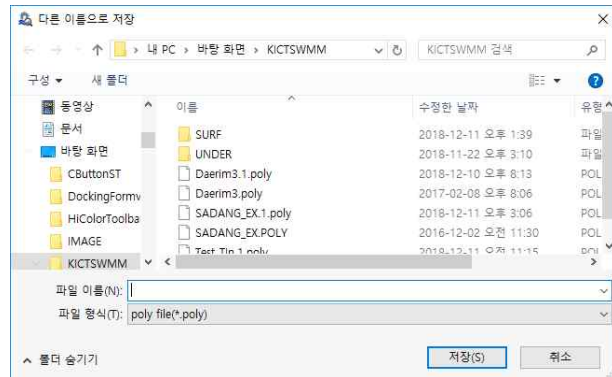
화면설명			
NO.	항목명	종류	항목설명
1	메인메뉴	Menu bar	<ul style="list-style-type: none"> -파일 : 새 글, 저장, 불러오기 등 -편집 : 기본 편집 기능 -보기 : 도구모음, 상태표시줄 외 기타 화면 제어 -레이어 : DEM, 토지이용도 자료 로드 -지표수 : 강우-유출 모의자료 편집

2.3 프로젝트 관리

2.3.1 프로젝트 생성 및 저장

- 지표수 영역 자료 및 Tin 자료 저장

: Tin 생성 메뉴 선택 시, 영역파일(*.poly)을 저장파일을 생성 할 위치 및 파일명을 입력할 창이 나타난다. Tin 파일은 영역파일 저장 경로 또는 로드한 파일 위치에 파일명.ptl로 생성됩니다.

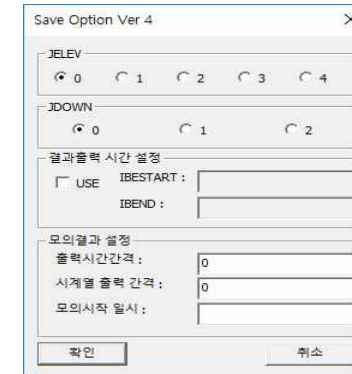


[그림 8] 지표수 저장

- 우수관망 자료 생성 및 저장

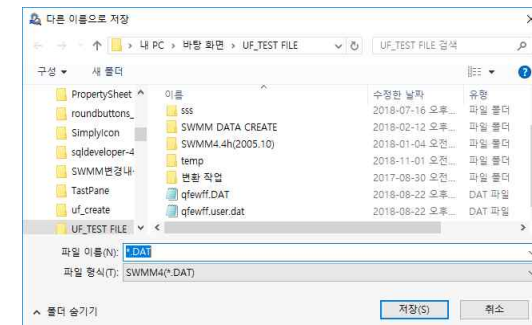
: 우수관망 Tool 도구를 이용하여 관장자료 생성

SWMM SAVE4 항목 선택 시 SWMM4 출력 옵션 선택창 표출됩니다.



[그림 9] SWMM4 출력옵션 설정창

출력옵션 선택 및 입력 후 확인 시 *.data 파일(SWMM4 FORMAT)의 파일명 입력 및 저장경로 설정창을 표출합니다.



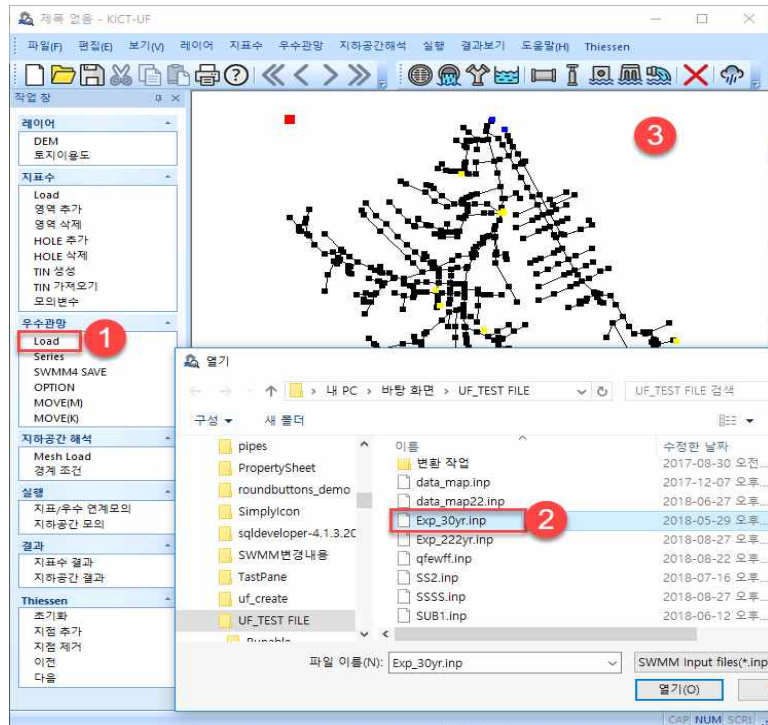
[그림 10] SWMM 저장경로 설정

확인시 해당파일명의 *.DATA 파일 및 SWMM5의 형식의 inp파일, User설정파일을 생성합니다.

생성 파일 : (저장파일명).data, (저장파일명).user.data, (저장파일명).inp

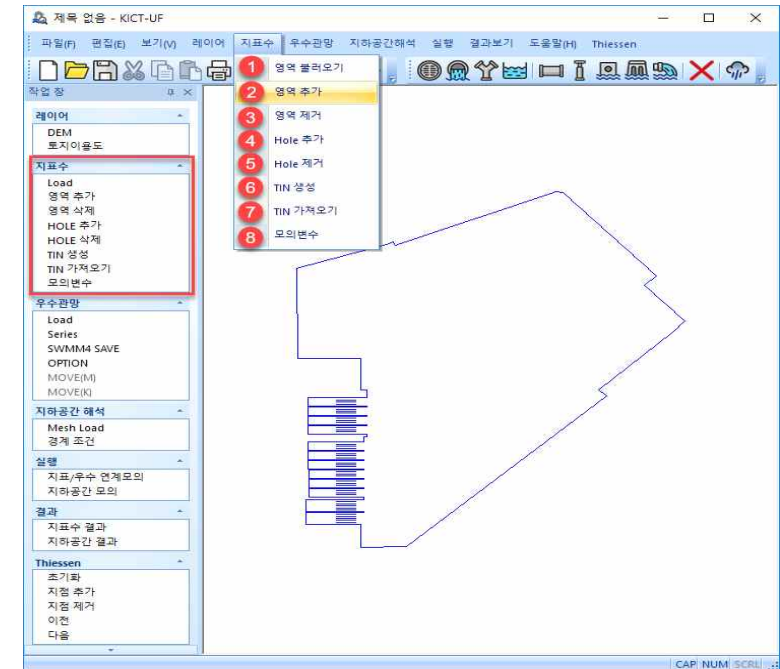
2.3.2 프로젝트 불러오기

지표수 영역 불러오기, Tin 가져오기, 우수관망 불러오기, MeshLoad, DEM, 토지이용도 등 개별적으로 Load 합니다.



[그림 11] 우수관망 불러오기

2.4 강우-유출 모의 자료 구축



[그림 12] 강우-유출 모의자료 구축 화면

[표 4] 강우-유출 모의자료 구축 화면 설명

화면설명		
NO.	항목명	항목설명
1	Load	- 기존 생성 된 Tin 자료를 불러옵니다.
2	영역 추가	- 영역 경계나 내부영역을 작성합니다.
3	영역 삭제	- 영역을 선택하여 해당영역을 제거합니다.
4	Hole 추가	- 영역 내 Hole을 추가합니다.
5	Hole 삭제	- 영역 내 Hole을 제거합니다.
6	Tin 생성	- Tin 자료를 생성합니다.
7	Tin 가져오기	- 기존 생성된 Tin 자료를 가져옵니다.
8	모의변수	- 모의조건을 입력합니다.

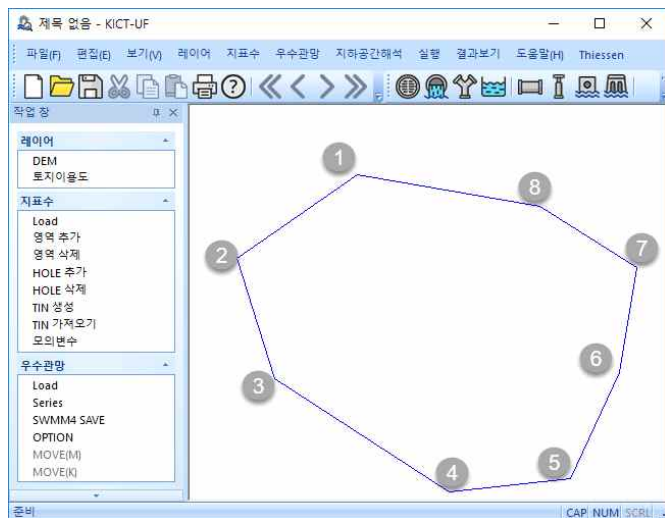
2.4.1 강우-유출 모의 영역 설정

모의영역 설정은 기존 생성 된 파일을 불러오거나 영역추가 기능을 사용하여 영역 경계 및 영역을 작성합니다.

영역을 그릴 때에는 시계/반시계 방향으로 지점을 선택하고 마우스 우 클릭 시 선택한 지점을 대상으로 영역을 그립니다.

(1) 영역 추가

- 1) 영역추가 항목을 선택
- 2) 시계/반시계 방향으로 지점 선택
- 3) 마우스 우클릭 시 기능 비활성화
- 4) 선택 지점 및 종료 지점을 기준으로 영역표출



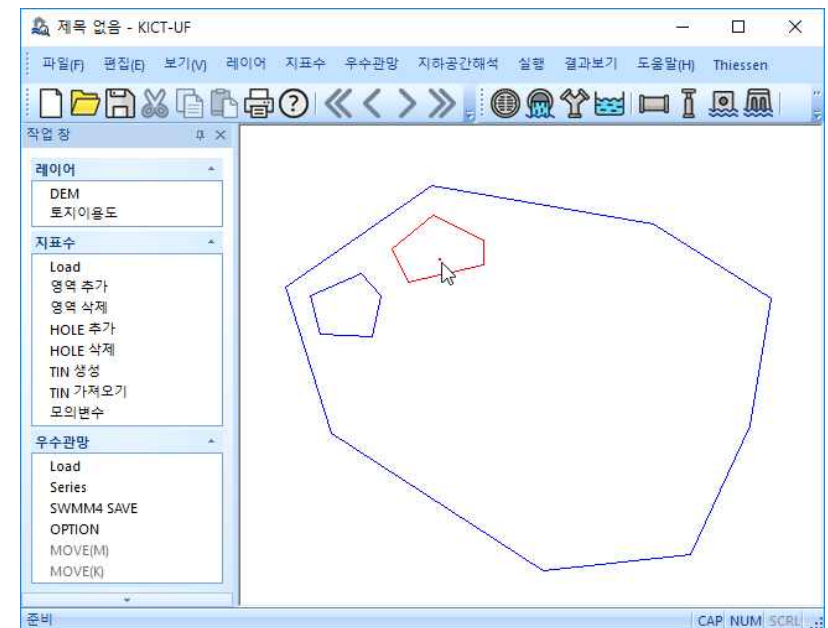
[그림 13] 영역 추가 입력 화면

(2) Hole 추가/삭제

Hole은 영역 내 추가 시 격자 생성 시에 해당 부분은 제외됩니다.

Hole 추가/삭제 항목 선택 후 화면상의 영역 선택 시 추가/삭제 됩니다.

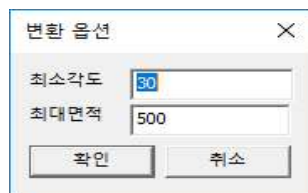
- 1) Hole 추가/삭제 항목 선택
- 2) 영역 내부 클릭 시 추가/삭제
- 3) 마우스 우클릭 시 Hole 추가/삭제 기능 비활성화



[그림 14] Hole 추가 화면

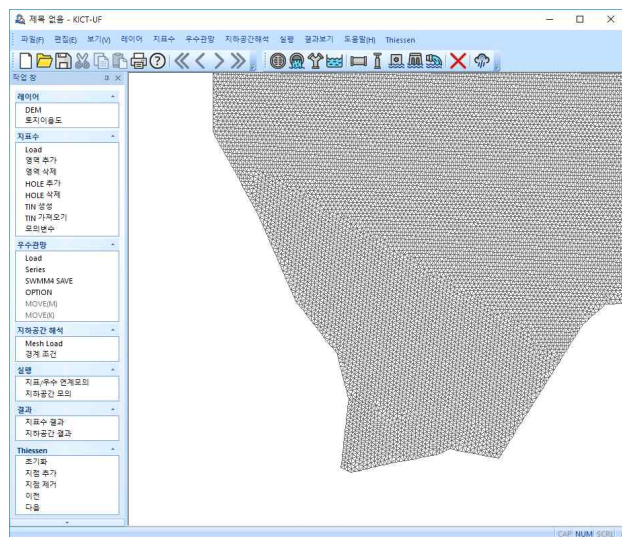
2.4.2 강우-유출 모의 계산격자 생성

지표수 모의영역 생성 또는 Load 후 해당영역의 격자 생성을 위해서 Tin 생성 항목을 선택합니다. Tin 생성 항목을 선택 시 격자의 최소각도와 최대면적을 입력 후 확인 시 격자 생성 및 Tin 파일을 생성 합니다.



[그림 15] Tin 생성 변환옵션

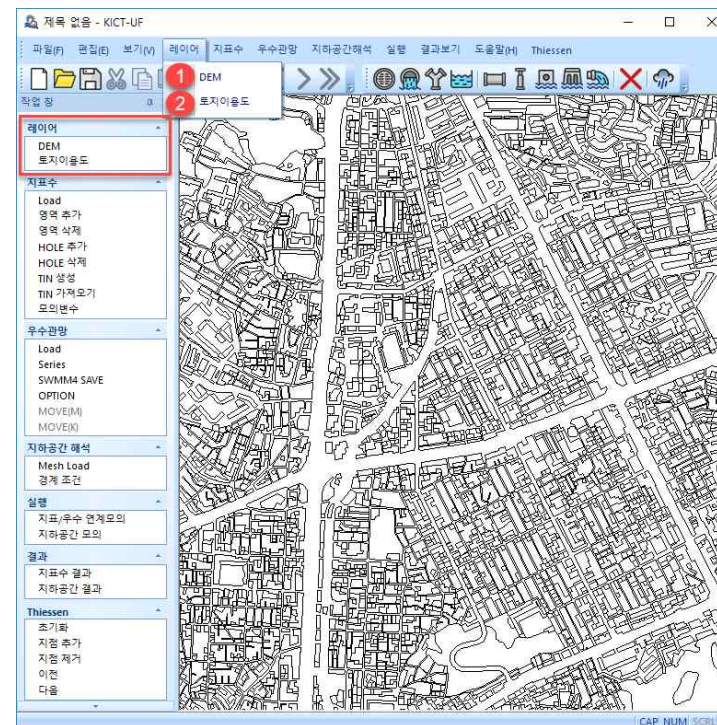
Tin가져오기는 기존 생성된 수치모의 격자 파일을 읽어 화면에 표출 합니다.



[그림 16] Tin 가져오기

2.4.3 지형자료 및 토양자료 불러오기

(1) 지형자료 읽어오기



[그림 17] 지형자료 및 토양자료 불러오기 화면

[표 5] 지형자료 및 토양자료 불러오기 화면설명

화면설명		
NO.	항목명	항목설명
1	DEM	- 지형자료 파일선택 탐색창 표출 - Raster files(*.asc) 파일 선택
2	토지이용도	- 토지이용도 파일선택 탐색창 표출 - Vector files(*.shp, *.dwg, *.dxf) 파일 선택

(2) 토지이용도 SCS 및 조도계수 설정

Name	Code	CN-A	CN-B	CN-C	CN-D	Mann N
1	주거지역	110	81.0	88.0	91.0	93.0
2	공업지역	120	61.0	75.0	83.0	87.0
3	상업지역	130	89.0	92.0	94.0	95.0
4	위락시설지역	140	77.0	85.0	90.0	92.0
5	교통지역	150	98.0	98.0	98.0	98.0
6	공공시설지역	160	77.0	85.0	90.0	92.0
7	논	210	61.0	72.0	79.0	82.0
8	밭	220	64.0	85.0	82.0	85.0
9	하수처리장	230	89.0	92.0	94.0	95.0
10	하수관	240	32.0	58.0	72.0	79.0
11	기타지역	250	75.0	85.0	90.0	93.0

[그림 18] 토지이용도와 SCS 및 조도계수 매칭 설정

토지이용도를 불러오면 다음과 같은 창이 뜨며 각 폴리곤 영역의 특성을 지정된 대푯값으로 설정할 수 있도록 한다.

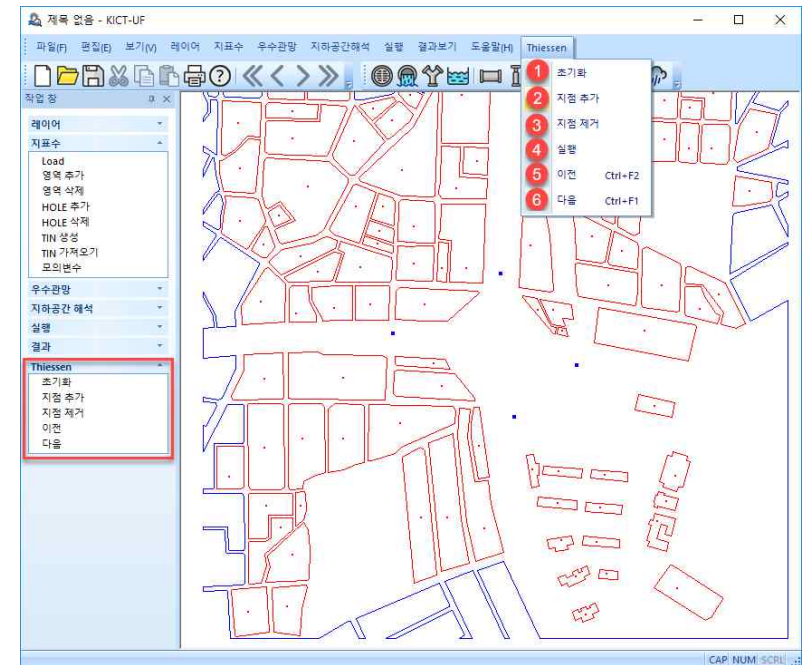
[표 6] 토지이용도와 SCS 및 조도계수 매칭 설정 화면설명

화면설명		
NO.	항목명	항목설명
1	Open	- 각 지정영역에 대한 대푯값이 설정된 파일 읽어오기
2	Save	- 변경된 대푯값 저장
3	CN등급	- 지정한 등급으로 대푯값 설정
4	적용	- Field에서 지정한 필드로 자료값 설정
5	확인	- 지정한 내용으로 입력 데이터 생성
6	취소	- 작업 내용 취소

2.4.4 강우 관측소 위치 및 시계열 자료 입력

(1) Thiessen

1) 화면설명



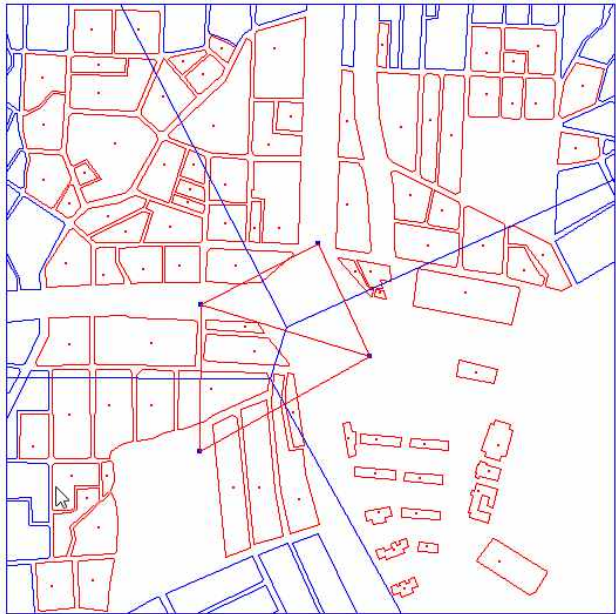
[그림 19] Thiessen 지점 추가 화면

[표 7] Thiessen 지점 추가 화면설명

화면설명		
NO.	항목명	항목설명
1	초기화	- 화면에 추가 된 강우관측소를 초기화 합니다.
2	지점 추가	- 관측소 지점 추가 (■)
3	지점 제거	- 선택 관측지점 삭제
4	실행	- 관측소 범위 산정
5	이전	- 이전으로
6	다음	- 다음으로

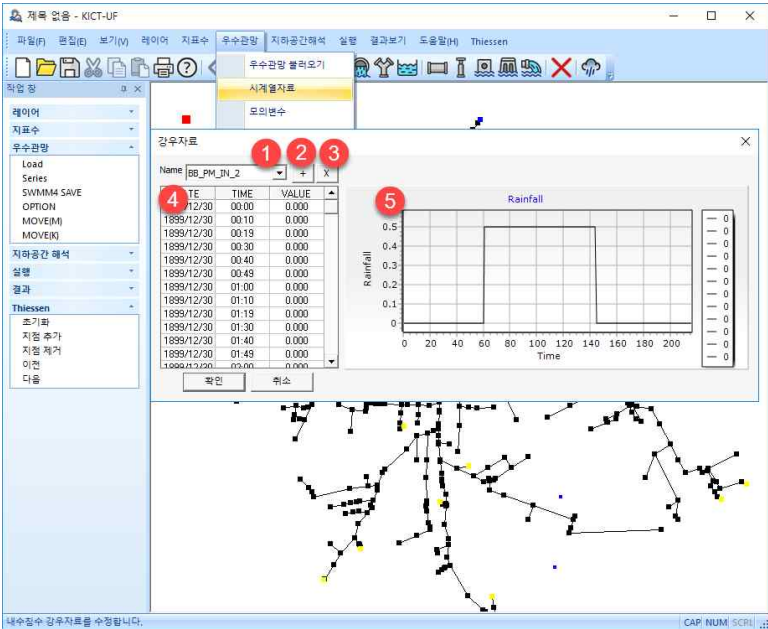
2) Thiessen의 실행

각 관측소 간의 영역 내 범위를 산정합니다.



[그림 20] Thiessen 실행 예시

(2) 시계열 자료 입력



[그림 21] 시계열 자료입력 화면












[표 8] 시계열 자료입력 화면설명

화면설명			
NO.	항목명	종류	항목설명
1	Name	Combo box	- 시계열 자료 목록을 합니다.
2	우수관망 tool	Button	- 시계열 자료를 추가 합니다.
3	삭제	Button	- 선택 된 자료를 삭제 합니다.
4	시계열 자료입력	Table	- DATA/TIME/VALUE 날짜/시간/강우량을 입력합니다.
5	그래프	Graph	- 시계열 자료를 그래프 형태로 표출합니다.

2.5 우수관망 모의 입력자료 구축


우수관망 모의 입력자료 구축은 메뉴창의 우수관망과 우수관망 도구창을 이용하여 자료 구축 및 편집합니다.

[표 9] 우수관망 모의 입력자료 항목설명

메뉴	항목명	항목설명
우수관망 메뉴	Load	우수관망 자료를 불러옵니다.
	Series	시계열 자료를 추가 및 편집합니다.
	SWMM4 Save	SWMM4 파일(*.data)로 저장합니다.
	Option	우수관망 자료 옵션 설정
	Move(M)	우수관망 영역 이동 - 마우스 입력 및 이동으로 영역 제어
	Move(K)	우수관망 영역 이동 - x축, y축 값 입력하여 영역 제어
우수관망 Tool		맨홀(Junction) 노드를 추가 합니다.
		유출구(Outfall) 노드를 추가 합니다.
		분할(Divider) 노드를 추가 합니다.
		저장(Storage) 노드를 추가 합니다.
		관로(Conduit) 링크를 추가 합니다.
		펌프(Pump) 링크를 추가 합니다.
		위어(Weir) 링크를 추가 합니다.
		오리피스(Orifice) 링크를 추가 합니다.
		유출관(Outlet) 링크를 추가 합니다.
		입력 자료를 선택하여 제거 합니다.
		강우(Gage) 노드를 추가 합니다.

2.5.1 맨홀 입력자료 구축 및 편집

1) 입력 활성화

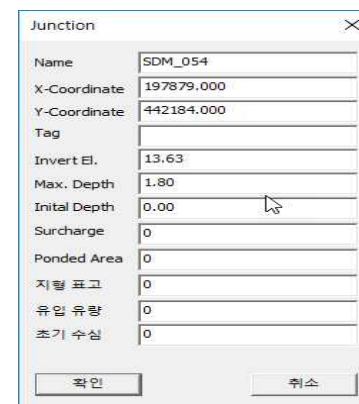
-  선택 시 입력 활성화

2) 자료 입력 (■ 형태의 Node생성)

- 입력 활성화상태에서 화면영역에 클릭 시 해당 지점에 맨홀 생성
- 마우스 오른쪽 버튼 클릭 시 입력 종료

3) 상세정보

- 화면상의 ■(맨홀)에 커서를 가져간 후 마우스 오른쪽 버튼 클릭 시 메뉴가 호출되며 메뉴에서 속성 선택 시 맨홀의 설정창이 나타납니다.



The image shows a 'Junction' property window with the following fields and values:

Name	SDM_054
X-Coordinate	197879.000
Y-Coordinate	442184.000
Tag	
Invert El.	13.63
Max. Depth	1.80
Initial Depth	0.00
Surge	0
Pondered Area	0
지형 표고	0
유입 유량	0
초기 수심	0


Buttons at the bottom: 확인 (OK), 취소 (Cancel).

[그림 22] 맨홀(Junction) 속성창

맨홀의 속성값을 입력하는 화면으로 각 입력변수는 Junction 클래스 변수와 연결되어 있으며 사용자가 확인을 누르면 클래스의 변수값이 변경되며, 취소 시에는 반영 되지 않습니다.

2.5.2 관로 입력자료 구축 및 편집

1) 입력 활성화

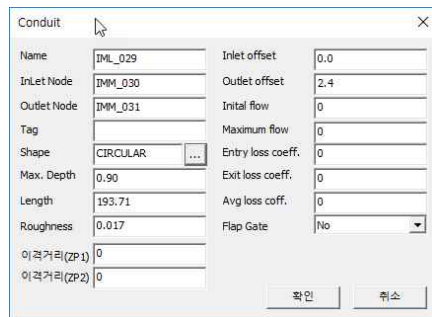
-  선택 시 입력 활성화

2) 자료 입력 (Node 사이의 선)

- 입력 활성화상태에서 화면에 두 개의 노드를 선택
- 마우스 오른쪽 버튼 클릭 시 입력 해제

3) 상세정보

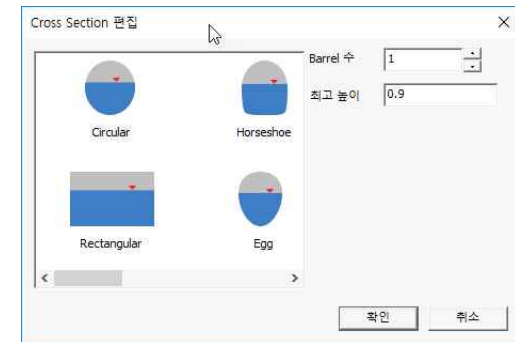
- 화면상의 두 Node(맨홀) 사이의 선(관로)에 커서를 가져간 후 마우스 오른쪽 버튼 클릭 시 메뉴가 호출되며 메뉴에서 속성 선택 시 해당 관로의 설정창이 나타납니다.



[그림 23] 관로(Conduit) 속성창

5) 관로 종류 편집




- 관로 생성시 관로종류는 Circular로 설정되며, 관로종류 변경은 상세 정보화면 Shape항목의 ... 버튼 선택 시 관로종류를 변경 할 편집 창이 나타납니다.



[그림 24] 관로종류 선택 및 편집

2.5.3 펌프, 웨어, 오리피스 입력자료 구축 및 편집

1) 입력모드 활성화

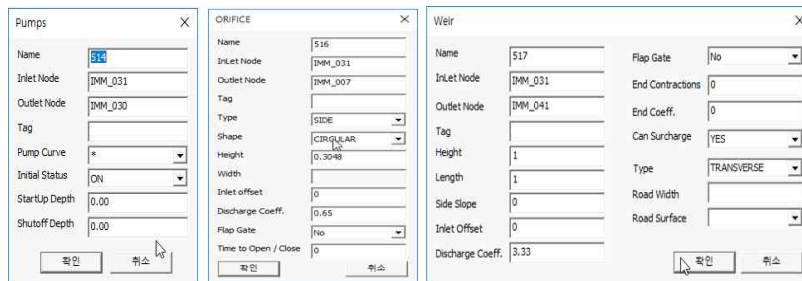
-    선택 시 입력모드 활성화

2) 자료 입력

- 입력 활성화상태에서 화면에 두 개의 노드를 선택
- 마우스 오른쪽 버튼 클릭 시 입력 해제

3) 상세정보

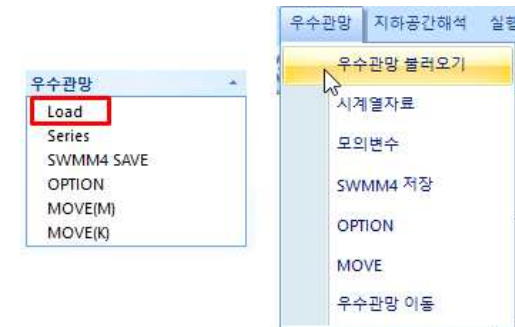
- 화면상의 두 Node(팬홀) 사이의 선(관로)에 커서를 가져간 후 마우스 오른쪽 버튼 클릭 시 메뉴가 표출되며 메뉴에서 속성 선택 시 해당 관로의 정보를 나타내는 팝업창을 표출합니다.



[그림 25] Pump, Orifice, Weir 속성창

2.5.4 우수관망 입력자료 불러오기

- 1) 메뉴창의 우수관망 항목의 Load 선택 또는 메뉴의 우수관망의 우수관망 불러오기 선택합니다.

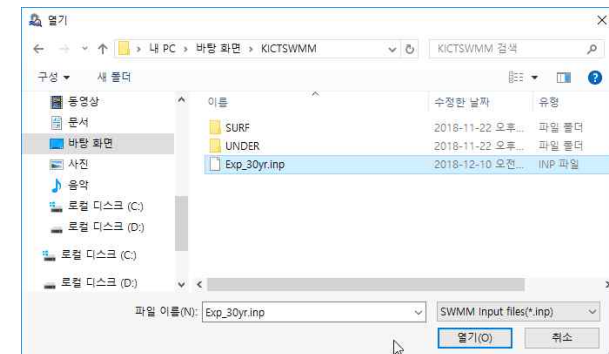


[그림 26] 우수관망 불러오기

2) 입력자료 선택

우수관망 불러오기 및 Load 선택 시 파일선택 창을 표출합니다.

- SWMM input files (*.inp) 형식의 파일 선택

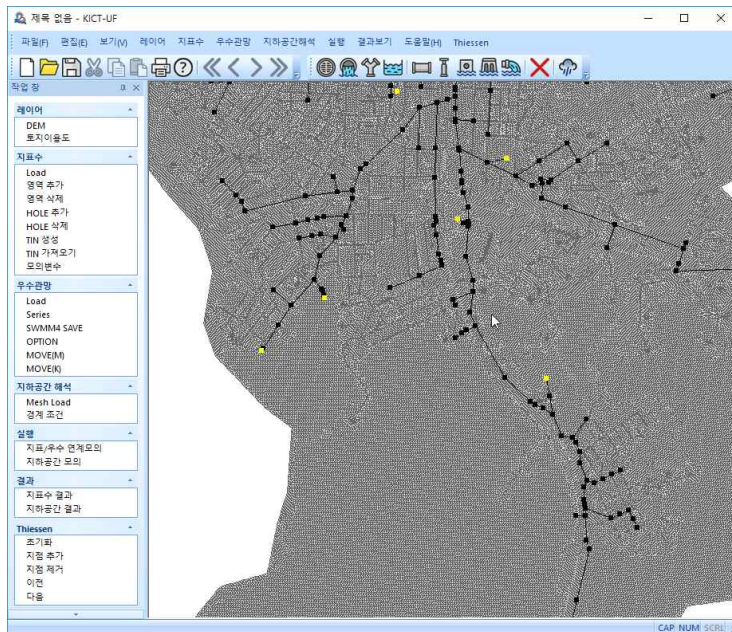


[그림 27] 우수관망 불러오기 파일선택 창

2.6 모의 실행 및 결과

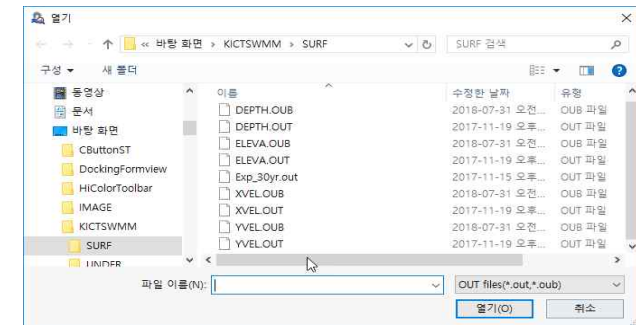
(1) 지표 / 우수관망 모의

- 1) Tin 가져오기 또는 Tin 생성, 우수관망 Tool 사용하여 작성 또는 우수관망 불러오기



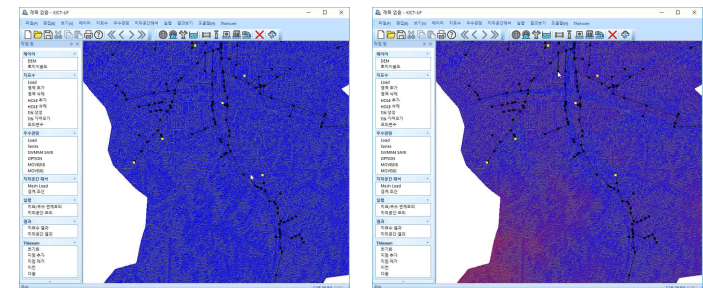
[그림 28] Tin, 우수관망 예시 화면

2) 지표/우수 연계모의 실행 OutFile(*.OUT,*.OUB) 선택



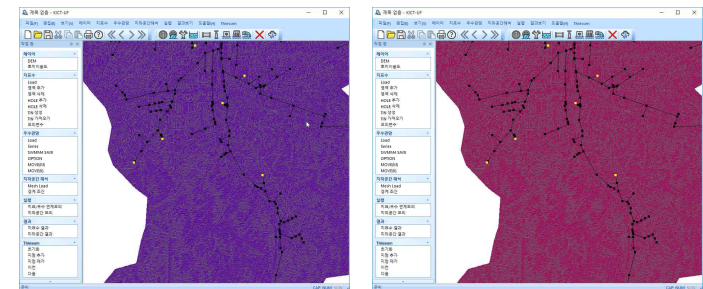
[그림 29] 지표/우수연계 모의 모의파일 선택창

3) 모의 결과 출력 타입 별 예시 화면



[그림 30] DEPTH

[그림 31] ELEV

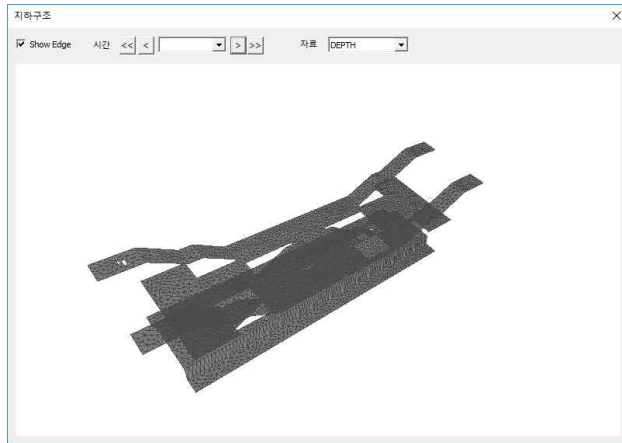


[그림 32] XVEL

[그림 33] YVEL

(2) 지하공간 해석 모의

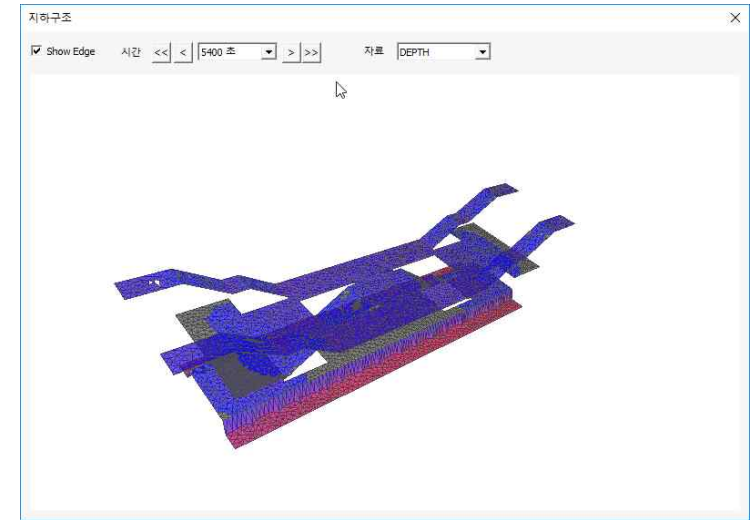
1) MeshLoad 선택 *.PLB 또는 *.PLT 파일 불러오기



[그림 34] 지하공간 예시 화면

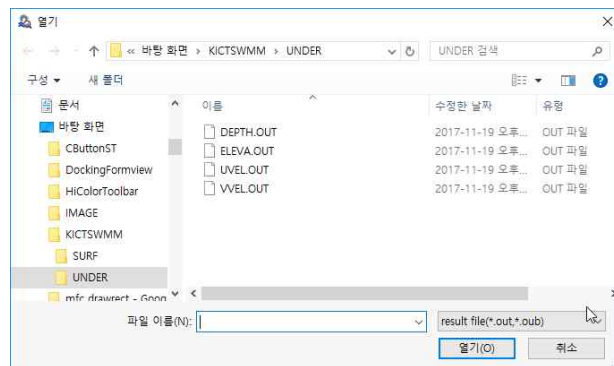
3) 모의 결과 출력

- 시간, 자료 선택항목에 따른 지하공간 모의 결과를 표출



[그림 36] 지하공간 모의 결과 화면

2) 지하공간 모의 실행 result file(*.out,*.oub) 선택



[그림 35] 지하공간 모의 모의파일 선택창

2.7 프로그램 설치

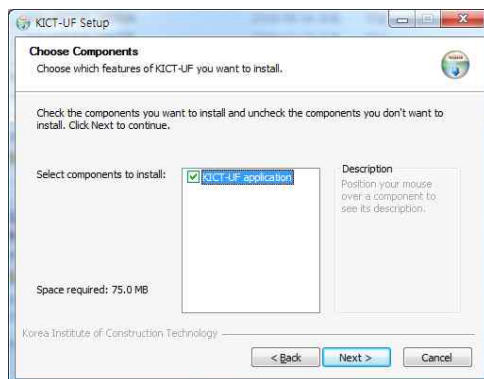


[그림 37] 프로그램 설치 시작화면

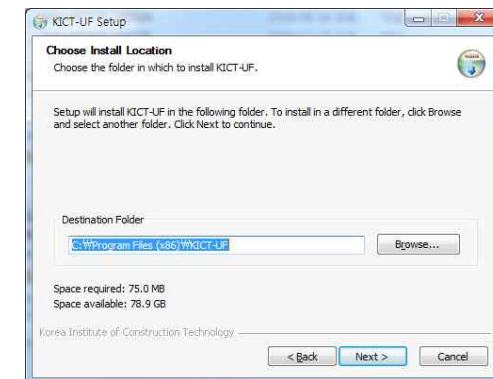
SetupKICTUF.exe 파일을 더블클릭하여 설치 프로그램을 실행한다.

[다음] 버튼을 클릭하면 다음 단계로 진행함.

[취소] 버튼을 클릭하면 설치를 취소함.



[그림 38] 프로그램 설치 설정화면

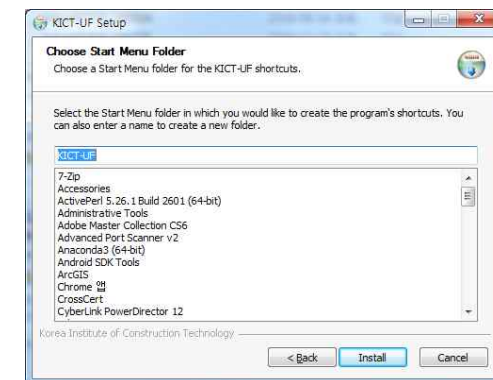


[그림 39] 프로그램 경로 설정 화면

프로그램 설치 경로(기본 설치 경로는 C:\Program Files(x86)\KICT-UF)와 사용자 설정이 가능함.

[다음] 버튼을 클릭하면 다음 단계로 진행함.

[취소] 버튼을 클릭하면 설치를 취소함.



[그림 40] 프로그램 설치 진행 화면

설치 준비가 되면 [install] 버튼을 클릭하여 설치를 시작함.

[뒤로] 버튼을 클릭하면 설치 경로 및 사용자 재설정이 가능함.

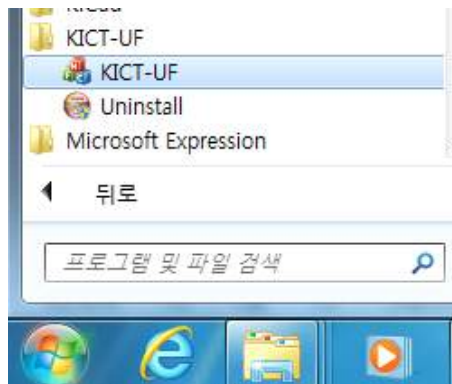
[취소] 버튼을 클릭하면 설치를 취소함.



[그림 41] 프로그램 설치 완료 화면

설치가 시작되면 프로그레스바와 함께 설치 진행률이 나타남.

[Finish] 버튼을 클릭하여 설치를 완료함.



[그림 42] 윈도우 시작버튼에 프로그램 등록