

**분포형 강우유출모형 병렬화 처리기법 적용****Application of MPI Technique for Distributed Rainfall-Runoff Model**

정성영\* / 박진혁\*\*/ 허영택\*\*\* / 정관수\*\*\*\*

Chung, Sung Young / Park, Jin Hyeog / Hur, Young Teck / Jung, Kwan Sue

**Abstract**

Distributed Models have relative weak points due to the amount of computer memory and calculation time required for calculating water flow using a numerical analysis based on kinematic wave theory when compared to the conceptual models used so far. Typically, the distributed models have been mainly applied to small basins. It was necessary to decrease the resolution of the grid to make it applicable for large scale watersheds, and because it would take up too much time to calculate using a higher resolution. That has been one of the more difficult factors in applying the model for actual work. In this paper, MPI (Message Passing Interface) technique was applied to solve the problem of calculation time as it is one of the demerits of the distributed model for performing physical and complicated numerical calculations for large scale watersheds. The comparison studies were performed a single domain and a divided small domain in Yongdam Dam watershed in case of typhoon 'Ewiniar' at 2006. They were compared to analyze the application effects of parallelization technique. As a result, a maximum of 10 times the amount of calculation time was saved but keeping the level of quality for discharge by using parallelization code rather than a single processor.

**Keywords** : parallelization, MPI, distributed model, flood discharge, GIS

**요 지**

지금까지 분포형 모형은 개념적 모형에 비해 운동역학적인 이론에 근거하여 물의 흐름을 수치해석으로 추적해 나가기 때문에 많은 컴퓨터 메모리용량이 요구되고 계산수행시간이 상대적으로 오래 걸리는 단점이 있었다. 그래서 분포형모형의 적용은 주로 소유역에 국한되어 적용되어왔으며, 대유역에 적용하기 위해서는 격자의 해상도를 낮추거나 소유역 적용과 동일한 해상도에서는 계산 시간이 많이 소요되어 실무적용을 어렵게 하는 요인이 되어왔다. 이에 대해 본 연구에서는 MPI (Message Passing Interface)기법을 적용하여 물리적이고 복잡한 수치계산을 하는 분포형모형의 단점 중 하나인 대유역 적용시의 계산소요 문제를 해결하고자 하였다. 또한 병렬화 기법의 적용효과를 분석하기 위하여 단일 영역에서 계산된 결과와 다수의 소영역으로 분할하여 수행되어진 계산 결과를 비교하였다. 용담댐 유역에 2006년 태풍 '에위니아' 사상을 대상으로 병렬화 계산을 수행한 결과 단일 프로세서에서 분포형모형을 수행하는 것보다 병렬코드에서 수행한 경우가 유출계산 값의 변동 없이 최고 10배에 해당하는 계산시간이 단축되었다.

**핵심용어** : 병렬화, MPI, 분포형모형, 홍수유출, 지리정보시스템

\* K-water 남강댐관리단 단장

Director, Namgang Dam Office, K-water, Jinju, 660-811, Korea (e-mail: sungyoung@kwater.or.kr)

\*\* 교신저자 K-water 수자원연구소 책임연구원

Corresponding Author, Principal Researcher, KIWE, K-water, Daejeon 306-711, Korea (e-mail: park5103@kwater.or.kr)

\*\*\* K-water 물관리센터 선임연구원

Senior researcher, Water Resources Operations Center, K-water, Daejeon 306-711, Korea (e-mail: korcivil@hanmail.net)

\*\*\*\* 충남대학교 토목공학과 교수

Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

## 1. 서 론

최근 GIS 및 인공위성을 이용한 토양 및 지형에 대한 정보구축이 진행되어 유역에 대한 정확하고 상세한 각종 수문매개변수의 수집이 가능하게 되었다. 또한 컴퓨터의 기능 향상과 수치모의의 기술 향상으로 인해 강우와 지형 및 토양특성의 공간분포와 비균질성을 고려하여 유역 유출을 계산할 수 있는 물리적이반의 분포형 유출모형에 대한 활용성이 증대되고 있다(박진혁 등, 2007). GIS기술의 급속한 발전은 다양한 공간자료들을 통합하여 다루는 것이 가능해졌고, 수량과 수질의 공간적인 분포특성을 충실히 반영하여 최근에 분포형 유출모형을 이용한 유역 수리·수질 모형의 구축이 활발하게 연구되고 있다(박진혁과 강부식, 2006). 분포형 유출모형과 관련된 최근의 연구동향을 살펴보면, 홍수기모형으로 격자기반의 레이더 강우와 연계한 연구와, 유역의 복잡한 지형특성이나 인위적인 영향 등을 충분히 고려할 수 있도록 물순환적인 측면에서 접근하여 모형이 보다 복잡화되고 있고, 각종 물리적 수문매개변수 추출에 GIS를 도입하는 경우가 증가하고 있다(박진혁과 허영택, 2008a). 그러나 지금까지 국내에서 개발된 분포형 모형은 개념적 모형에 비해 입력자료의 구축에 많은 시간과 노력이 필요하며, 특히 유출계산시 운동역학적인 이론에 근거하여 물의 흐름을 수치해석으로 추적해 나가기 때문에 많은 컴퓨터 메모리용량이 요구되고 계산수행시간이 상대적으로 오래 걸리는 단점이 있었다. 그래서 지금까지 분포형 모형의 적용유역은 비교적 소유역에 국한되어 적용되어 왔으며, 대유역에 적용하기 위해서는 격자의 해상도를 낮추거나 소유역 적용과 동일한 해상도에서는 계산 시간이 많이 소요되어 실무적용을 어렵게 하는 요인이 되어 왔다.

이에 대해 본 연구에서는 병렬화기법을 적용하여 물리적이고 복잡한 수치계산을 하는 분포형모형의 단점의 하나인 계산소요 문제를 해결하기 위하여 영역분할을 통하여 대유역 적용시 계산시간을 획기적으로 단축하고자 하였다. 병렬화 처리기법이란 지역적으로 메모리를 따로 가지는 프로세스들이 데이터를 공유하기 위해 데이터를 송신, 수신하여 통신하는 방식을 이용하여 작업 할당 및 데이터 분배 등 효율적 계산기법으로 분포형모형 및 기상모델링 등 광범위한 지역을 대상으로 대용량 수치해석 시 효과적으로 활용가능하다. 김병욱과 양성봉(2000), 허영택(2006)은 다양한 영역분할에 따른 병렬화 효과를 검토하여 대상영역을 정방형의 다차원 영역분인 경우가 병렬처리 효과면에서 뛰어난 것을 제시하였다.

본 연구에서는 자체 개발한 물리적이반의 분포형모형(K-DRUM;K-water hydrologic & hydraulic Distributed RUoff Model)을 활용하여 유출해석을 한 바 있는 용담댐유역을 대상으로 병렬화 계산의 적합성 및 효율성에 대하여 검토하였다. MPI기법을 이용한 병렬화 계산의 적용 효과를 분석하기 위하여 단일 영역에서 계산된 결과와 다수의 소영역으로 분할하여 수행되어진 계산 결과를 비교하였으며, 노드별 배열크기 감소와 그에 따른 계산속도 향상을 확인하고자 하였다. 또한, 효율적이고 수치적으로 정확하며 다양한 기종의 클러스터 시스템에서도 실행될 수 있도록 호환성을 가지는 분포형모형의 병렬코드 개발과 영역분할 기법을 통한 최적의 병렬화기법을 제시하고자 하였다.

## 2. 병렬화기법

### 2.1 병렬화기법의 개요

병렬화란 한 가지 연속적인 일에 걸리는 부하를 분산하기 위하여 하나의 연산을 여러 개의 프로세서로 분산하여 다중처리 하도록 하는 것이다. 다중처리는 비대칭 다중처리(AMP: Asymmetrical MultiProcessing)와 대칭 다중처리(SMP: Symmetrical MultiProcessing)로 나누어진다. 비대칭 다중처리(AMP)의 경우, 프로세서는 각자의 할 일이 정해져 있어 프로세서 하나는 운영체제프로그램만을 실행하고, 다른 것들은 사용자가 명령한 프로그램만을 실행하는 식으로 구별된다. 따라서 CPU가 두 개 이상인 비대칭 다중처리(AMP) 머신에서는 두 프로그램의 동시 실행 시 시간단축의 효과를 볼 수 없게 된다. 반면, 대칭 다중처리(SMP) 머신의 경우 모든 프로세서가 동등하게 시행되기 때문에 비대칭 다중처리와 달리 CPU가 많을수록 시간을 단축하는 효과가 있다.

슈퍼컴퓨터는 단일시스템 내에서 프로세서마다 다른 메모리를 쓰고 프로세서와 메모리를 연결하는 시스템 버스와 비슷한 방법으로 프로세서 사이를 연결하게 된다. 이러한 방식을 초병렬 처리시스템(MPP: Massively Parallel Processor system)이라고 하며, 클러스터의 경우 프로세서 간 연결을 네트워크를 이용하게 되는데 이런 관점에서 초병렬 처리시스템에 속한다.

OpenMP와 같이 SMP머신에서 실행되는 프로그램은 모든 프로세서가 알 수 있는 특정메모리 주소를 프로그램이 지정해 주고, 그곳에서 두 프로세서가 동시에 값을 사용하게 하여 데이터를 손실하는 일이 없도록 하는 메모리 I/O관리가 중요하게 된다. 반면에 MPI, PVM과 같은 MPP머신에서 실행되는 병렬프로그램은 두 프로세서가 메시지를 주고받기 위해 서로 연결된 구조를 프로그램이

사용할 수 있게 하는 방법이 필요하다. 클러스터에서는 두 프로세서가 네트워크로 연결되어 있기 때문에 병렬 프로그램은 네트워크를 통해서 메시지를 다른 프로세서로 보낼 수 있는 함수를 사용해야 한다. MPI 자체는 125개의 부프로그램들로 구성되어 있는 병렬 라이브러리들에 대한 표준규약이다. MPI는 약 40개 기관이 참여하는 MPI 포럼에서 관리되고 있으며, 1992년 MPI 1.0을 시작으로 현재 MPI 2.0까지 개발된 상태이며 이들 MPI를 따르는 병렬 라이브러리는 Ohio supercomputer center에서 개발한 Lam-MPI와 Argonne National Laboratory에서 개발한 MPICH가 있다.

## 2.2 MPI (Message Passing Interface)

프로세서의 개수를 늘리는 하드웨어의 변화만으로 시스템이 병렬처리 가능하게 되는 것은 아니다. 이를 지원하기 위한 소프트웨어적인 변화도 필요하게 된다. 처리해야 되는 코드를 적절히 분할하여 각 프로세서에 할당해주고 따로 계산된 결과를 모아 하나로 정리해주는 역할을 할 프로그래밍 모델들을 고려해야 한다.

가장 기본적인 병렬처리 프로그래밍 모델은 여러 개의 프로세서나 스레드들을 생성하여 이를 각각의 프로세서에 할당해 주는 방법이다. 하지만 이것만으로 병렬프로그래밍이 끝나는 것이 아니라, 각각의 프로세서에서 계산된 값들을 모아 하나의 데이터로 만들어 다시 다른 프로세서로 전달하는 경우도 고려해야 한다. 이와 같이 각각의 프로세서간의 동기화나 데이터 교환에 대한 방식들이 병렬 프로그램의 정확성과 효율성을 높이는데 중요한 요소가 된다.

메시지 전달 방식의 프로그래밍 모델에서 각각의 프로세서는 독립된 메모리 공간을 가지며, 하나의 문제를 해결하기 위해 프로세서는 메시지를 통해 데이터를 교환하게 된다. 간단한 하위 프로그램에서 사용되는 데이터 패킷형태로 메시지를 보내는 프로세서, 소스의 위치, 데이터

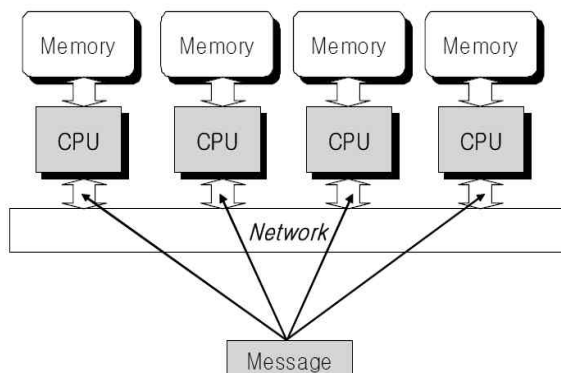


Fig. 1. Structure of Message Passing Model

타입, 데이터 길이, 메시지를 받는 프로세서 등 다양한 정보를 포함하고 있다. 메시지 전달 방식의 간단한 형태는 점대점 방식으로 한 프로세서가 다른 프로세서로 직접 메시지를 보내는 것이다.

이 메시지 송신 방법에 따라 동기화/비동기화 방식으로 나누어지기도 한다. 본 연구에서 사용한 MPI는 메시지 전달방식의 표준화 인터페이스이다. 이 방식은 프로세서 간 메시지 흐름과 모형의 구조 및 통신정보 배분을 프로그램 내에서 코드로 정의해야 하기 때문에 프로그래밍이 어려운 단점이 있지만, 모형의 병렬화를 극대화시킬 수 있어 병렬화에 따른 계산효율을 최대로 높일 수 있는 장점이 있다.

Fig. 1에 메시지 전달모델의 구조를 나타내고 있다.

## 2.3 분포형모형의 병렬코드 개발

분포형모형의 병렬화를 위해서는 우선, 대상유역을 소영역으로 분할하고 분할된 소영역 간의 공유 영역을 지정하여 통신용 격자 정보를 저장한다. 소영역은 각각 병렬노드에서 개별적으로 단위시간 동안 수행되며 수행된 정보는 인접 소영역으로 통신을 통해 전달하게 된다. Fig. 2에 대상유역을 소영역으로 분할한 형태(좌)와 소영역의 계산 범위와 통신범위를 나타내었다. 대상유역 분할은 가로 4개와 세로 4개로 총 16 개의 소유역으로 가로와 세로의 크기는 동일하다. 분할된 소유역에서 내부격자들은 계산대상이 되고, 외부격자들은 인접 소유역에서 통신으로 받은 정보를 이용하여 내부격자의 경계조건으로 사용되게 된다.

Fig. 3은 대상노드와 인접 노드간 통신을 수행할 경우 통신 순번을 나타내고 있다. 중앙 노드를 중심으로 그림과 같이 순번을 정하고 통신을 반대방향에 있는 인접노드와 통신할 경우 통신할 경우 발생할 수 있는 교착상태를 방지할 수 있는 장점이 있다.

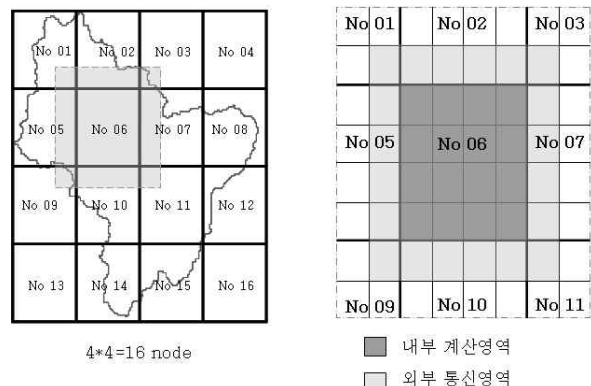


Fig. 2. Division of Domain

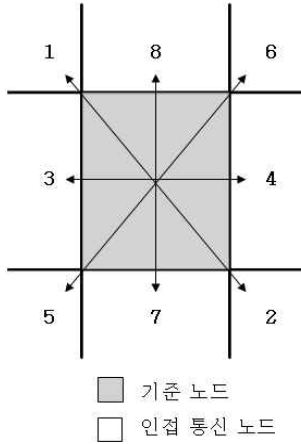


Fig. 3. Communication Order between Neighboring Node

### 3. K-DRUM 모형의 개요 및 이론

본 연구에서 활용한 모형은 레이더를 활용한 홍수유출 해석모형으로 개발한 K-DRUM모형 (박진혁과 허영택, 2008b)이다. 유역내 수평 유출량산정 모듈로서 평면 분포형의 격자형을, 연직분포형으로 다층모형을 이용해서 격자기반다층유출모형을 적용한다. 연직구조는 A~B층의 수평유출량은 하천으로 유입하고, C층은 하천유량에 영향을 미치지 않는 지하수층으로 가정하였다 (Fig. 4).

동일한 유출특성 및 부하발생특성을 가지는 토지피복을 하나로 묶어서 산림지역, 논지역, 밭지역, 도시지역, 수역 등 8종류로 재분류하여 격자마다 모자이크법을 적용하여 토지피복의 영향을 상세하게 파악할 수 있도록 고려하였다. 본 모형은 단순화된 조건하에서 사용하기 적합한 해석해가 존재하여 검증이 용이하고 넓은 범위의 조건하에서 적용성이 우수하며 강우-유출로 인한 지표흐름을 추적하기 위하여 보편적으로 적용하고 있는 운동파 해석법 (kinematic wave)을 이용하였다 (박진혁과 허영택, 2008a).

지표 흐름 및 A층 (얇은면 흐름)은 중간유출을 고려한 운동파법을 적용하였고, B층 (지표하 흐름)과 C층 (지하수 흐름)은 선형저류법을 적용하였다. 각층에서의 유출해석을 위한 지배방정식과 각각의 변수에 대한 내용은 다음과 같다 (Beven, 1979).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r, \quad r = R + U_B - f \quad (1)$$

$$q = \begin{cases} \alpha(h - d_A)^m + \beta h \\ \alpha h \end{cases}, \quad \text{when } \begin{cases} h \geq d_A \\ h < d_A \end{cases}, \quad (2)$$

$$d_A = \lambda_A D_A, \quad m = \frac{5}{3}$$

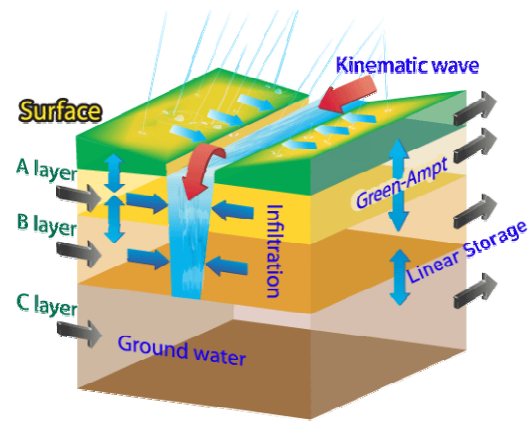


Fig. 4. Basic Structure of the Model

$$\alpha = \frac{\sqrt{\sin\theta}}{n} \quad (\text{Manning type}), \quad (3)$$

$$\beta = \frac{k_A \sin\theta}{\lambda_A} \quad (\text{Darcy type})$$

$$U_B = \begin{cases} S_B - d_B \\ 0 \end{cases}, \quad \text{when } \begin{cases} S_B - d_B \geq 0 \\ S_B - d_B < 0 \end{cases}, \quad d_B = \lambda_B D_B \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_B}{dt} &= I_B - O_B, \quad I_B = f_A + U_C, \\ O_B &= O_{h_B} + O_{v_B}, \quad O_{h_B} = k_{h_B} S_B, \\ O_{v_B} &= k_{v_B} S_B \end{aligned} \quad (5)$$

$$U_C = \begin{cases} S_C - d_C \\ 0 \end{cases}, \quad \text{when } \begin{cases} S_C - d_C \geq 0 \\ S_C - d_C < 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$d_C = \lambda_C D_C$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_C}{dt} &= I_C - O_C, \quad I_C = O_{v_B} + O_{CVP}, \\ O_C &= O_{h_C}, \quad O_{h_C} = k_{h_C} S_C \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,  $h$ : 수심 (m),  $q$ : 단위폭당 유량 ( $\text{m}^2/\text{sec}$ ),  $R$ : 강우강도 (m/sec),  $f$ : Green-Ampt식으로 산출한 침투강도 (m/sec),  $\theta$ : 사면경사각,  $n$ : Manning의 조도계수,  $k_A$ : A층의 투수계수 (m/sec),  $\lambda_A, \lambda_B, \lambda_C$ : A, B, C층의 공극율,  $D_A, D_B, D_C$ : A, B, C층의 유효토심 (m),  $d_A, d_B, d_C$ : A, B, C층의 포화저류가능량 (m),  $U_B$ : B층에서 A층으로 복귀하는 유량강도 (m/sec),  $U_C$ : C층에서 B층으로 복귀하는 유량강도 (m/sec),  $S_B, S_C$ : B, C층의 저류량 (m),  $I_B, I_C$ : B, C층의 유입강도 (m/sec),  $O_B, O_C$ : B, C층의 유출강도 (m/sec),  $O_{h_B}, O_{h_C}$ : B, C층에서의 횡방향 유출강도 (m/sec),  $O_{v_B}$ : B층에서의 종방향 유출강도 (m/sec),  $k_{h_B}, k_{h_C}$ : B, C층에서의 횡방향 투수계수 (m/sec),  $k_{v_B}$ : B층에서의 종방향 투수계수 (m/sec),  $O_{CVP}$ : C층의 상류경계로 유입하는 유입유량강도 (m/sec)

강우발생 시 토양내부로의 침투강도를 계산하기 위하여 Mein and Larson (1973)이 제안한 Green-Ampt식을 이용하였고 수식은 다음과 같다.

$$F_t = k_s \Delta t + \psi (\theta_s - \theta_0) \ln \left( 1.0 + \frac{F_t}{\psi (\theta_s - \theta_0)} \right), \quad (8)$$

$$f_t = k_s \left( 1.0 + \frac{\psi (\theta_s - \theta_0)}{F_t} \right)$$

여기서,  $F_t$ :  $t$ 시간에서의 누가침투량 (m),  $k_s$ : 유효투수 계수 (m/sec),  $\Delta t$ : 계산시간 간격 (sec),  $\psi$ : 습윤선 흡입수 두 (m),  $\theta_s$ : 포화 함수비,  $\theta_0$ : 초기 함수비,  $f_t$ :  $t$ 시간에서의 침투강도 (m/sec)

$t$ 시간에서의 누가침투량은 비선형식이기 때문에 Newton-Raphson법을 이용하였고 초기조건으로 전 시간단계에서의 누가침투량을 이용하였다.

하도에서의 유출을 계산하기 위한 지배방정식과 각각의 변수에 대한 내용은 다음과 같다 (Beven, 1979).

$$\frac{\partial A_r}{\partial t} + \frac{\partial Q_r}{\partial x} = q_r, \quad Q_r = \alpha_r A_r^{m_r}, \quad (9)$$

$$\alpha_r = \left( \frac{\sqrt{I}}{n} \right) \left( \frac{m}{(2\sqrt{1+m^3})^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad m_r = \frac{4}{3}$$

여기서,  $A_r$ : 하도의 유하단면적 ( $m^2$ ),  $Q_r$ : 유량 ( $m^3/sec$ ),  $q_r$ : 횡유입량 ( $m^2/sec$ ),  $I$ : 하도경사,  $n$ : 하도의 조도계수,  $m$ : 하도의 범면경사

각각의 격자에 적용한 초기조건 및 상류단 경계조건은 다음과 같다.

$$A(0, x) = A_0(x), \quad 0 \leq x \leq L \quad (10)$$

$$A(t, 0) = A_B(t), \quad 0 \leq t$$

여기서,  $A$ : 유하단면적 ( $m^2$ ),  $L$ : 하도 및 사면의 길이 (m),  $A_0$ : 시간  $t=0$ 에서의 유하단면적 ( $m^2$ ),  $A_B$ : 격자의 상류단 유하단면적 ( $m^2$ )

지표흐름 및 하도흐름에 대한 지배방정식에 초기조건 및 경계조건을 이용하여 수치해를 얻기 위하여 본 모형에서 사용한 유한차분 근사기법은 각종 수치기법 중에서 비교적 안정적으로 계산이 수행되는 Beven (1979)의 차분스킴을 적용하였다. Eqs. (1) and (9)와 같은 형태의 편미분 방정식을 시간과 공간 평면상에서 적절한 차분간격에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{q_i^{t+1} - q_i^t}{\Delta t} + \gamma c_{i-1/2}^{t+1} \left( \frac{q_{i+1}^{t+1} - q_i^{t+1}}{\Delta x} - r \right) + \quad (11)$$

$$(1 - \gamma) c_{i+1/2}^t \left( \frac{Q_{i+1}^t - q_i^t}{\Delta x} - r \right) = 0$$

$$c_{i-1/2} = 0.5(c_i + c_{i-1}), \quad c = \frac{dq}{dA}$$

여기서,  $\Delta x$ : 공간차분간격 (m),  $\Delta t$ : 시간차분간격 (sec),  $q_i^t$ : 위치  $i$ 와 시간  $t$ 에서의 유량 ( $m^3/sec$ ),  $\gamma$ : 시간가중계수,  $c$ : 운동과 속도 (m/sec)

위 식은 미지의 값  $q_{i+1}^{t+1}$ 에 대하여 비선형식이기 때문에 Newton-Raphson법을 이용하여 반복 수렴계산을 하여  $q_{i+1}^{t+1}$ 을 구한다 (박진혁과 허영택, 2008b).

## 4. 병렬화기법을 이용한 K-DRUM 계산시간 검토

### 4.1 대상유역

병렬화 기법을 적용한 분포형 모형의 적용성을 평가하기 위해 용담댐 유역을 적용대상지로 선정하였다. 용담댐 유역의 유역면적은 930  $km^2$ 이며, 유역의 경사는 대체로 남고북저의 형태를 취하고 있어 주하천인 금강분류가 전 북 장수군에서 발원하여 유역의 북쪽출구에 위치한 용담댐으로 흘러나간다. 유역의 지형지세 및 하도, 강우 및 수위관측소 등 기본현황은 Fig. 5에 나타나 있다 (한국대댐회 홈페이지). 모형의 입력자료 중 강우자료는 격자단위로 구성되어 있기 때문에 강우자료 역시 격자단위로 적용한다. 모형의 격자해상도와 동일한 레이어 강우자료의 경

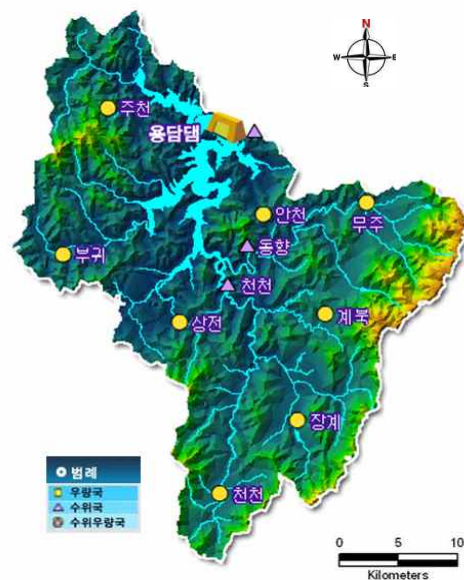


Fig. 5. Study Area

우 특별한 전처리과정 없이 바로 입력강우자료로 사용할 수 있지만 모형의 해상도와 다른 경우나 지점 관측강우 자료인 경우는 티센법, 역거리가중법, 크리징 (Krigging) 기법 등을 이용하여 강우를 분포시킬 수 있다. 본 연구에서는 역거리가중법을 적용하여 유역 내 강우량의 공간적 분포를 산정하였다. 2010년 기준 용담댐 유역 내에 실시간 T/M전송장비를 갖춘 강우관측소는 7군데가 있으며, 무주관측소는 용담댐 유역 외에 위치하나 용담댐 유역 내에 티센면적을 갖고 있으므로 티센망구성에 포함되는 관측소는 총 8개소이다. 용담댐 유역 내 강우관측소에 대한 고도분석결과 관측소가 대체로 티센다각형 내의 평균고도에 훨씬 못 미치고 있어 실제 강수보다 과소 관측될 소지가 있다고 판단된다. 유역 내 수위관측소는 천천, 동향, 용담댐 등 3개소가 운영되고 있다 (박진혁 등, 2009).

#### 4.2 GIS수문매개변수 구축

유역의 수문학적인 특성은 지형, 토지피복, 토양 등에 의해 크게 좌우된다. 본 연구에서는 한국수자원공사의 유역조사 정보제공시스템으로부터 30m 해상도의 DEM, 토지피복도 및 토양도를 이용하여 HEC-GeoHMS를 ArcView에 탑재하여 K-DRUM모형의 입력인자로서 ASCII포맷의 공간분포형 수문매개변수들을 추출하였다. 계산단위해상도는 하천망 재현정도, 수문매개변수 해상도, 강우자료 해상도 및 계산시간을 고려하여 적절한 크기로 결정하게 된다. 본 연구에서는 계산단위해상도를 250m 단위로 결정하였고, 각각의 수문매개변수 자료를 계산단위해상도로 변환하였다. Table 1은 K-DRUM모형에서 입력자료로 사용되는 수문매개변수 산정을 위한 원시자료의 출처, 매개변수명, 산정방법 및 기준에 대하여 정리하였다.

#### 4.3 병렬화 계산시간 검토

병렬화 계산을 위하여 필요한 구성요소는 병렬프로세서 (클러스터기반)와 병렬화 코딩이 완료된 프로그램 필요하다. K-water 물관리센터에서 보유하고 있는 병렬클러스터 시스템 카오스 (CHAOS)는 8개의 컴퓨팅 노드로 구성되어 있으며, 각 노드당 4개의 프로세서 (CPU)를 탑재하여 총 32개의 프로세서를 보유하고 있다. 카오스 시스템의 외형은 Fig. 6에 나타나었다.

시스템의 운영체제로 Linux를 사용하고 병렬라이브러리는 MPICHI를 사용하며 각 노드 사이에 통신을 통해 상호 정보교환이 가능하다. 각각의 프로세서는 2.3GHz의 처리속도를 가지고 있으며 2G DDR2 형식의 32개 메모리를 보유하고 있다. 카오스 시스템에 대한 사양 및 규격은 Table 2와 같다.

용담댐유역에서 태풍 ‘에위니아’ 사상 (2006년 7월 8일 01시~ 7월 23일 23시)을 대상으로 병렬화 기법을 적용한 K-DRUM 모형을 이용하여 유출해석을 수행하여, 대상유역 내에 위치한 용담댐 지점에서의 관측 유출량과 수치모의를 통한 계산 유출량을 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내

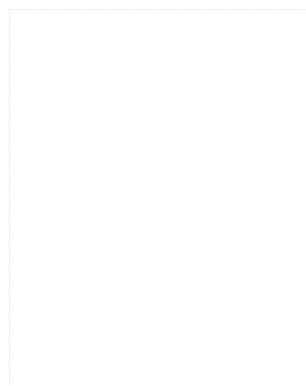


Fig. 6. Appearance of CHAOS System

Table 1. Main Hydrological Parameters

Original data	Hydrological parameters	Remark
DEM	Basin slope	ArcView (Spatial Analysis)
	Riverbed slope	ArcView (Spatial Analysis)
	Flow direction	HEC-GeoHMS
Land Cover	Roughness coefficient of land covers	Reclassify as 8 types
Soil Map	Efficient soil depth	Green-Ampt infiltration process
	Saturated conductivity	
	Wetting front suction	
	Effective porosity	
Grid resolution		250 m

Table 2. Specifications and Standard of CHAOS System

Division	Contents
Processor	AMD Opteron Quad OS8356 2.3 GHz
Node number	Computing node 8 (number)
CPU core	32 (number)
Memory	Server 2 G DDR2 PC2-5300 RegEcc 32 EA
Complier	PGI 7.1-4
Parallel libraries	MPICH 1.0
Operating system	Linux

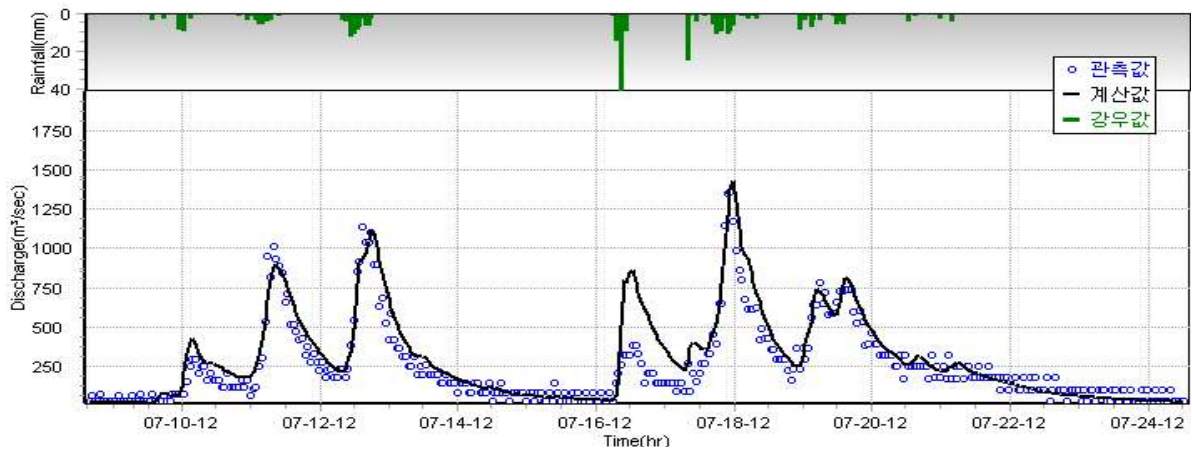


Fig. 7. Comparison of Discharge at Yongdam Dam Site

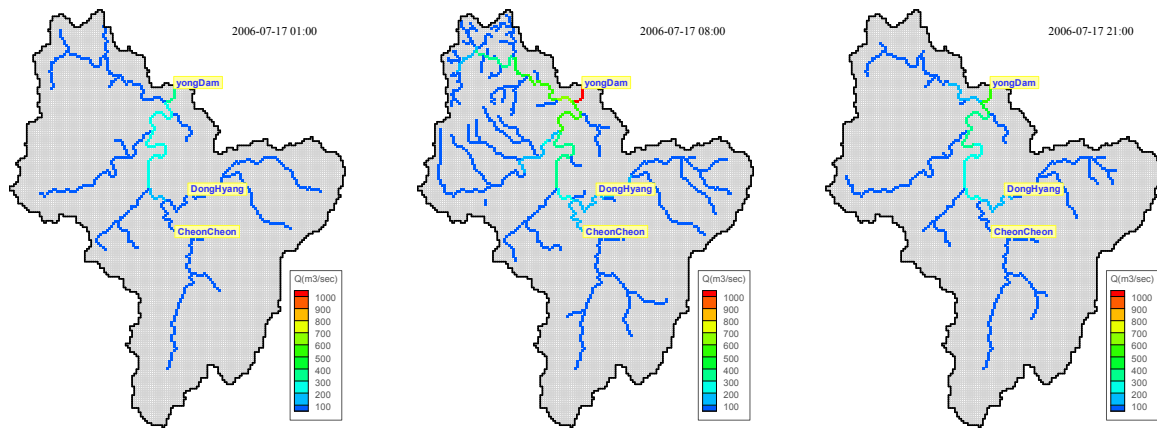


Fig. 8. Distribution of River Discharge at the Flood (2006)

었다. 비교 결과 K-DRUM 모형을 이용한 유역 내 강우-유출에 대한 유출량의 재현성은 양호한 것으로 나타나고 있다.

Fig. 8은 침투유량시 하천유출량을 분포형모형의 주된 장점중 하나인 전 유역에 대하여 유역 내 임의의 지점에 대한 유출량을 파악하기 위하여 K-DRUM의 계산 결과

값을 이용하여 시-공간적 분포를 나타내고 있다.

대상영역을 소유역으로 분할하여 병렬화 계산을 수행할 경우 분할 개수 및 형태에 따른 계산수행 시간을 통해 병렬화 계산의 효과를 검토하였다. 영역분할은 단일프로세스 계산부터 가로 및 세로방향으로 분할 개수를 1개씩 증가하여 최대 25개의 다중프로세서 계산을 수행하였다.

Table 3. Calculation Time According to Calculation Conditions and Domain Division

Division	Contents				
Space interval(m)	250				
Time interval(sec)	1200				
Total calculation grid number(EA)	14,876				
Domain division method	Square division				
Domain division number(W×H, EA)	1×1=1	2×2=4	3×3=9	4×4=16	5×5=25
Calculation time (sec)	481.79	172.69	89.75	51.80	34.84

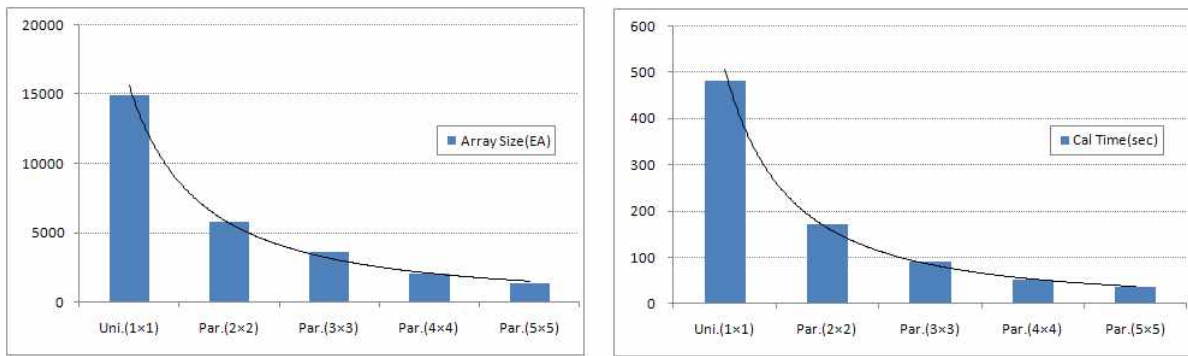


Fig. 9. Saving Effect of Calculation Time According to Node Number

또한 분할 형태에 따른 영향을 파악하기 위해 영역분할 형태를 25개의 가로 및 세로방향 위주로 분할한 경우도 검토하였다. 수치모의에 사용된 계산 조건과 영역분할 개수(계산에 사용된 프로세서의 개수) 및 계산수행 시간은 Table 3과 같다. 계산단위시간은 경우자료 단위시간과 차분방정식의 발생오차를 고려하여 전체 계산시간을 최소화 할 수 있도록 1,200초로 설정하였다.

분할개수가 1일 경우 단일프로세서로 계산한 것과 같으며 계산시간은 약 482초가 소요되지만 분할개수가 증가할수록 계산시간은 감소하고 있으며 최대 25개의 영역분할로 25개의 프로세서가 분할계산 할 경우 계산시간은 약 34초로 영역분할을 통한 병렬화 기법의 효과가 매우 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 사용 노드 개수에 따른 노드당 배열크기 및 계산시간을 그래프로 나타내었다. 일반적으로 병렬형태나 사용노드개수에 따라 순수하게 계산에 필요한 시간 이외로 노드 간 통신 등 시스템 구동에 소비되는 시간이 증가하여 노드개수의 증가에 비해 계산시간 감소효과가 줄어들 수 있다. 본 연구에서 사용한 노드 개수 및 영역분할 형태의 병렬화는 노드수가 제공형태로 증가함에 따라 배열크기와 계산시간은 제공형태로 감소하고 있어 병렬화 효과가 양호하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 물리적이고 복잡한 수치계산을 하는 분포형모형의 단점의 하나인 대유역 적용시의 계산소요 문제를 해결하기 위하여 분포형 강우유출모형인 K-DRUM 모형을 기반으로 MPI 병렬화 기법을 적용한 병렬 분포형 강우유출모형을 개발하였다. 병렬화 기법의 적용효과를 분석하기 위하여 단일 영역에서 계산된 결과와 다수의 소영역으로 분할하여 수행되어진 계산 결과를 비교하였으며, 수행속도와 그에 따른 속도의 향상을 측정하였다. K-DRUM을 활용하여 유출해석을 한 바 있는 용담댐 유역을 대상으로 유출계산을 수행한 결과, 대상영역을 소영역으로 분할한 개수가 증가함에 따라 계산에 요구되는 노드별 배열크기 및 수행시간은 제공형태로 감소하였다. 결과적으로 단일 프로세서에서 K-DRUM을 수행하는 것보다 병렬코드에서 수행한 경우가 단일 프로세서 사용 시의 유출결과와 동일하지만 최고 10배에 해당되는 계산시간이 단축되었다. 본 연구에서 개발한 병렬 강우유출모형은 향후 수계통합 등 대유역을 대상으로 강우유출 해석 시 요구되는 계산수행 시간을 획기적으로 단축 가능하여 대유역 적용 시 실무에서 적용 가능성이 높을 것으로 기대된다. 특히, 유역관리 개념의 변화에 따라 통합유역관리의 필요성이 증대되면서 댐상·하류를 포함한 유역전체의



유출계산이 요구됨에 따라 향후에는 대유역권을 대상으로 연구를 지속적으로 추진할 필요가 있다. 또한 강우사상별, 유역 크기별, 분할개수에 따른 프로세서의 사용개수별, 병렬화 형태 및 다양한 병렬기법 적용에 따른 병렬효과를 분석하여 최적의 병렬화 기법 선정이 필요하다고 사료된다.

### 참고문헌

김병욱, 양성봉 (2000) “MPI 기반의 병렬 생성·회전 난류 시뮬레이션” **정보처리학회논문지**, 한국정보처리학회, 제7권, 제1호, pp. 57-64.

박진혁, 강부식 (2006) “댐유역 홍수예측을 위한 GIS기반의 분포형모형과 집중형모형의 유출해석 비교.” **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제9권, 제3호, pp. 171-182.

박진혁, 강부식, 이근상, 이을래 (2007). “레이더와 Vflo를 이용한 남강댐유역 해석.” **한국지리정보학회논문집**, 한국지리정보학회, 제10권, 제3호, pp. 13-21.

박진혁, 허영택 (2008a) “유역특성을 반영한 공간격자기반의 분포형모형 개선.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제3D호, pp. 431-436.

박진혁, 허영택 (2008b) “홍수유출해석을 위한 운동과기

반의 분포형모형 개발 및 적용.” **한국수자원학회논문집**, 대한토목학회, 제41권, 제5호, pp. 455-462.

박진혁, 허영택 (2009). “K-DRUM 개선을 위한 초기토양함수 자동보정기법 개발.” **한국지리정보학회논문집**, 한국지리정보학회, 제17권, 제2호, pp. 71-79.

박진혁, 허영택, 류경식, 이근상 (2009) “GIS격자기반 K-DRUM을 활용한 용담댐유역 홍수유출모의.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제29권 제1D호, pp. 145-151.

한국대담회 홈페이지, [http://www.kncold.or.kr/korean/dam/k\\_dam9.html](http://www.kncold.or.kr/korean/dam/k_dam9.html).

허영택 (2006) “Cavity Formation and Its Remote Sensing in Sand Layer.” 교토대학 박사학위논문

Beven, K. (1979) “On the generalized kinematic routing method.” *Water Resources Research*, Vol. 15, pp. 1238-1242.

Mein, R.G., and Larson, C.L., (1973). “Modeling the infiltration component of the rainfall-runoff process.” Bulletin 43. Water Resources Research, Center, MN.

논문번호: 10-034	접수: 2010.04.20
수정일자: 2010.07.09/08.05	심사완료: 2010.08.05