반도체디스플레이기술학회지 제15권 제2호(2016년 6월)
Journal of the Semiconductor & Display Technology, Vol. 15, No. 2. June 2016.

배터리 팩 수치해석 해의 비교를 통한 병렬연산 효율성 연구

김광선† · 장경민*

†한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부
*한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과

A Study for Parallel Computing Efficiency Comparing Numerical Solutions of Battery Pack

Kim Kwang Sun† and Jang Kyung Min*

†School of Mechatronics Engineering, Koreatech
*Graduate School of Mechatronics Engineering, Koreatech

ABSTRACT

The parallel computer cluster system has been known as the powerful tool to solve a complex physical phenomenon numerically. The numerical analysis of large size of Li-ion battery pack, which has a complex physical phenomenon, requires a large amount of computing time. In this study, the numerical analyses were conducted for comparing the computing efficiency between the single workstation and the parallel cluster system both with multicore CPUs'. The result shows that the parallel cluster system took the time 80 times faster than the single work station for the same battery pack model. The performance of cluster system was increased linearly with more CPU cores being increased.

Key Words : Parallel Computing Efficiency, Li-ion Battery Pack, Numerical Analysis, Cluster System

1. 서 론

최근 리튬 이온 배터리가 중대형 기기(전기 자동차, 대용량 에너지 저장장치)등에 사용되고 있다. 이러한 중대형 기기에는 배터리 하나가 아닌 여러 개를 묶어 팩으로 구성하여 출력을 확보하게 되는데, 이 경우 발열이 중요한 문제가 된다. 따라서 배터리 팩을 설계할 때, 효율적 냉각이 이루어지도록 설계하는 것이 중요하다[1-3].

발열을 고려한 배터리 팩을 설계하기 위해서는 배터리의 위치 등을 조절하여 적절한 유로를 확보하여야 한다. 과거에는 실험을 통한 설계가 주였으나 최근에는 시뮬레이션을 통한 설계방법이 적용되고 있다.[4-6].

배터리의 발열문제는 충,방전 조건 및 패키지 형태, 재질 등에 영향을 받으며, 전기화학적 현상에 의한 발열을 포함하기 때문에 물리 현상이 매우 복잡하다. 또한 중대형 팩의 경우는 배터리가 적게는 수십 개에서 많게는 수천 개까지 집적되기 때문에 대용량 팩을 설계할 때는 시뮬레이션을 진행하는 컴퓨터의 성능이 무엇보다 중요하다.

따라서 본 연구에서는 직렬 2개 및 병렬 2개로 구성된 배터리 팩의 해석에 4개의 코어를 가진 멀티 코어 CPU를 장착한 윈도우OS워크스테이션과 LINUX OS 병렬처리 컴퓨터 클러스터를 적용 함으로서 두 시스템의 컴퓨터 연산능력을 비교하였고 이의 이용 가능성을 검토하였다.

2. 배터리 시뮬레이션 모델

2.1. Geometry

본 연구에 사용된 테스트용 시뮬레이션 모델은 사각 배터리를 2S2P로 연결하여 패키지화 한 것이다. Fig. 1에 3차원 모델을 나타내었다. 시뮬레이션을 위한 격자는 다면체 격자를 사용하였으며, Star-CCM+ 11.02버

†E-mail : kskim@koreatech.ac.kr

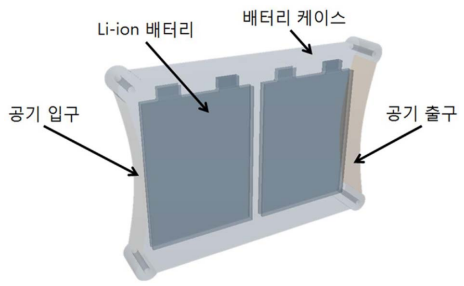

Fig. 1. 3D Geometry of battery pack for test.

전을 이용하여 약 250만개 정도를 생성하였다.

2.2. 지배방정식

본 연구에서 테스트용으로 사용된 배터리 시뮬레이션 모델은, 배터리의 전기화학적 현상 및 공기 유동에 의한 팩의 냉각을 모사한다. 따라서 계산을 수행할 방정식은 전기화학 방정식과 일반적인 CFD 방정식 두 종류가 필요하다.

2.2.1 전기 화학 방정식

리튬 이온 배터리의 물리적 현상은 식(1)~(7).의 지배방정식에 의해 결정 될 수 있으며 각각의 방정식은 전해질 및 고체상에서의 전압 및 물질 수송(농도)에 대한 현상, 배터리 내부에서의 전류 평형, 열역학적 이론에 기반한 에너지 평형을 에너지 평형을 나타낸다[7-8].

• Potential in the electrolyte

$$\nabla\Phi_2 = -\frac{i_2}{\kappa} + \frac{2RT}{F}(1-t_+^0)\left(1+\frac{d\ln f_\pm}{d\ln c}\right)\nabla\ln c \quad (1)$$

• Potential in the solid

$$I - i_2 = -\sigma\nabla\Phi_1 \quad (2)$$

• Transport in the electrolyte

$$\varepsilon\frac{\partial c}{\partial t}\nabla\cdot\varepsilon D\left(1-\frac{d\ln c_0}{d\ln c}\right)\nabla c + \frac{t_-^0\cdot i_2 + i_2\cdot\nabla t_-^0}{z_+\upsilon_+ F} - \nabla\cdot c v_0 + \alpha j_- \quad (3)$$

• Transport in the solid

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial_X}\left(D_s\frac{\partial_{C_s}}{\partial_X}\right) \quad (4)$$

• Reaction rate

$$j = \frac{i_2}{F}\left[\exp\left(\frac{\alpha_{a,2}F(\Phi_1-\Phi_2)}{RT}\right) - \exp\left(\frac{\alpha_{c,2}F(\Phi_1-\Phi_2)}{RT}\right)\right] \quad (5)$$

• Current balance

$$\nabla i_2 = \alpha i_n \quad (6)$$

• Energy balance

$$\dot{Q} = IV + \int\sum_i \alpha i_{n,i}(x)\left(U_i(c_s(x)) - T\frac{\partial U_i(c_s(x))}{\partial T}\right)dx + C_p\frac{dT}{dt} \quad (7)$$

위에 기술한 지배방정식들은 각각의 이론에 대한 일반적인 형태이다. 수많은 패키지 프로그램 및 In-house 코드를 사용한 연구에서는 위 방정식들을 기초로 약간의 변형을 가한 방정식들이 사용된다. 본 연구에서 사용한 패키지 프로그램인 Star-CCM+에서도 위 방정식에서 변형된 형태를 사용하고 있다.

2.2.2 CFD 방정식

공기 유동에 의한 팩의 냉각과 열전달을 계산하는 방정식을 아래에 기술하였다. 식 (8)은 유체의 유동 특성에 영향을 주는 중속 변수들을 표현하기 위한 일반적인 보존 원리를 나타낸다. 이 식으로부터, 식 (9)~(11)이 얻어진다[9].

• Governing Equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \nabla\cdot(\rho\mu\phi) = \nabla\cdot(\Gamma\nabla\phi) + Z \quad (8)$$

• Mass conservation

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho\mu) = Z \quad (9)$$

• Momentum

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla\cdot(\rho\mu u) = \nabla\cdot(\mu\nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + B_x + V_x \quad (10)$$

• Energy

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y}\upsilon + \frac{\partial T}{\partial z}w\right) = \nabla\cdot k\nabla T + Z \quad (11)$$

2.3. 해석 조건

본 연구에 사용된 시뮬레이션 모델은 전기화학적 반응 및 전통적인 CFD문제로 구분 지을 수 있다. 먼저 전기화학 반응에 관련된 조건으로는 배터리 제원과 전류가 흐르기 위한 부하 조건이 필요하다. 배터리는 양극 활물질로 $LiNiCoMnO_2$, 음극 활물질로 Graphite, 전해질은 Ethylene Carbonate, Ethyl Methyl Carbonate, 그리고 $LiPF_6$의 혼합물이다. 부하 조건은 5C의 일정 전류로 20분간 방전하는 것으로 하였으며 초기 SOC는 100%이다. 식 (12)~(13)에 양극, 음극에서의 반응식을 나타내었다.

Table 1. Properties of Materials.

	Positive electrode	Negative electrode
Density [g/cm^3]	4.74	2.2
Molecular Weight [g/mol]	91	72
Diffusion coefficient [cm^2/s] at 25℃	1.002E-10	2.2314E-8
Activation energy [J/mol]	41295	2000
Electrical conductivity [S/cm]	1000	0
Heat capacity [J/g-K]	2	0.71
Thermal conductivity [W/m-K]	2	1000

• Negative electrode reaction

$$Li \leftrightarrow Li^{+} + e^{-} \quad (10)$$

• Positive electrode reaction

$$NiCoMnO_2 + Li + e^{-} \leftrightarrow LiNiCoMnO_2 \quad (11)$$

화학 반응에 사용된 반응 상수 등은 배터리 설계 프로그램인 Battery Design Studio (ver.10.06)의 데이터베이스에서 제공하는 값을 사용하였으며, Table 1에 그 값을 나타내었다.

CFD 시뮬레이션은 외부로부터 유입된 공기가 배터리 및 팩을 냉각시키는 것이다. 이 문제를 위한 조건으로는 유입구의 유량 및 출구 조건, 케이스의 열전달 조건 등이 있다. 공기의 유량은 0.5 kg/s, 출구는 대기압 조건이며 케이스는 단열로 하였다.

총 시뮬레이션 시간은 600s 로 비정상 상태 해석을 진행하였으며, 워크스테이션 과 클러스터 시스템에서 동일한 시뮬레이션 파일로 코어 수에 따른 계산 속도 테스트를 진행하였다.

2.4. 워크스테이션 시스템

본 연구에 사용된 워크스테이션의 기본 구성을 Fig. 2에 나타내었으며 자세한 제원은 Table 2에 나타내었다. 일반적으로 워크스테이션과 같이 하나의 본체를 갖는 컴퓨터는 병렬 연산을 할 때 공유메모리 시스템으로 작동한다. 공유 메모리 시스템의 가장 대표적 형태는 Symmetric Multi-Processor로, 모든 프로세서가 주 기억 장치 및 I/O장치를 서로 공유하며 하나의 운영체제에 의해 동작한다. 이 시스템에서는 여러 CPU와 주변 장치가 데이터 버스를 통해 연결되며 Quick Path Interconnect 등의 버스 프로토콜을 통해 고속 통신을 수행한다. SMP와 유사하나 다른 개념으로, Chip Multi-Processor가 있다. CMP란 SMP처럼 여러 개의 CPU를 하나의 컴퓨터에 장착하는 것이 아니고, 하나의 칩에 여러 개의 코어가 장착된 형태를 말한다. Fig. 3에 SMP와 CMP의 차이를 도시하였다. 본 연구에 사용된 워크스테이션 시스템은 하나의 운영체제에 의해 동작하며, 각각의 프로세서는 쿼드코어 CPU이므로 CMP가 적용된 SMP 시스템이다[10-11].

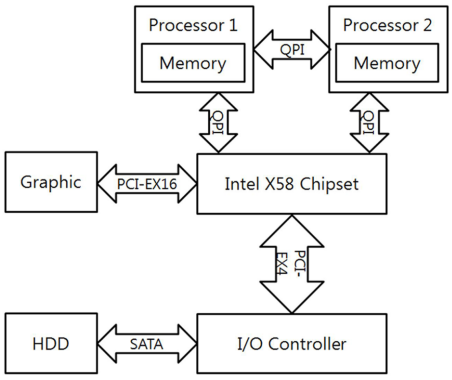

Fig. 2. Schematic diagram of workstation system.

Table 2. Description of workstation used for test.

Device/Protocol	Description
CPU (Quad Core)	Intel Xeon E5620 2.4Ghz
L1 Data Cache	32KB×4 / Processor
L1 Instruction Cache	32KB×4 / Processor
L2 Cache	256KB×4 / Processor
L3 Cache	12MB
Graphic	nVidia Quadro 2000
Memory	DDR3 PC3-10700, 96GB
HDD	7200rpm, 1TB
QPI	6.4 GT (Max)
SATA	3GB/s
PCI-E X16	PCI-E 2.0
PCI-E X16	PCI-E 2.0
O/S	Windows 7 64bit

이상의 시뮬레이션 조건 및 하드웨어를 사용하여 해

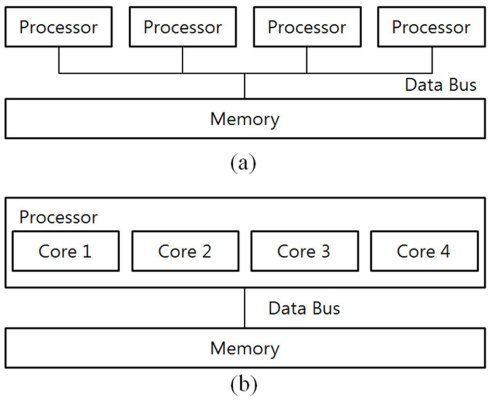

Fig. 3. Comparing of SMP(a) and CMP.

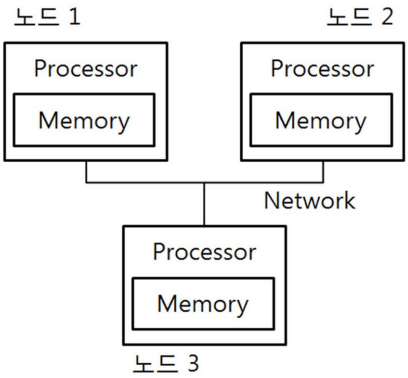

Fig. 4. Distributed memory system.

석을 진행한 결과, 총 계산 시간은 약 83.3시간이 소요되었다. 일반적으로 배터리 팩을 구성할 때, 적게는 수십 개에서 많게는 수백 개의 배터리를 직/병렬 연결하여 사용하는 것을 감안하면 전체 시스템을 해석하는데 있어 큰 어려움이 있을 것으로 생각된다.

3. 클러스터 시스템

클러스터와 같은 시스템을 분산메모리 시스템이라고 하는데, 분산 메모리 시스템은 노드라고 불리는 물리적으로 독립된 컴퓨터를 고속 네트워크로 연결한 형태로, 클러스터 또는 그리드가 여기에 해당한다. Fig. 4에 분산 메모리 시스템의 구조를 나타내었다. 분산 메모리 시스템에서 각각의 노드는 SMP 또는 CMP로 구성이 가능하며, Massage Passing Interface를 이용해 노드간의 메시지 교환을 수행하면서 이를 통해 각각 진행되는 내용을 체크할 수 있도록 되어 있다. 분산메모리 시스템의 가장 큰 강점은 수많은 독립 노드를 수평적으로 확장이 가능하여 대규모 대용량의 데이터를 처리하기에 가장 적합한 구조라는 점이다[12]. Fig. 5에 본 연구에 사용된 클러스터의 기본 구성을 나타내었으며, 자세한 제원은 Table 3에 나타내었다.

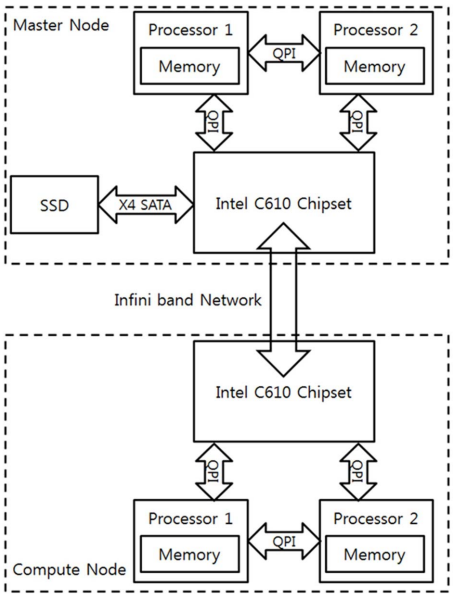

Fig. 5. Schematic diagram of cluster system.

Table 3. Description of cluster system used for test

Device/Protocol	Description
CPU (Dodeca Core)	Intel Xeon E5-2670 v3 2.3Ghz
L1 Data Cache	32KB×12 / Processor
L1 Instruction Cache	32KB×12 / Processor
L2 Cache	256KB×12 / Processor
L3 Cache	30MB
Graphic	Internal Graphic
Memory	DDR4 PC4-1700, 256GB
SSD	600GB
QPI	9.6 GT (Max)
SATA	6GB/s
Infiniband Network	FDR 56Gb/s
O/S	Linux

본 연구에 사용한 클러스터 시스템은 마스터 노드와 계산노드 두대로 구성되었으며, Infiniband network에 의해 데이터를 주고 받는다. 사용한 MPI는 Star-CCM+에서 기본으로 제공하는 Intel MPI (Ver. 5.0.3.48)을 사용하였다.

5. 결과 및 토의

5.1. 4 core 시뮬레이션

기존의 워크스테이션 시스템과 클러스터 시스템의 기본 성능 비교를 위해 각각 4개의 Core를 사용하여 해석을 진행하였다. 해석은 Physical Time 600 s 를 시뮬레이션 하였으며 총 계산 횟수는 12000회이다. 해석 결과, 워크스테이션 시스템에서는 1회 계산하는데 약 25초 정도 소모되었으며, 총 해석 시간은 83.3시간으로 나타났다. 클러스터 시스템에서는 1회 계산당 0.3초, 전체 해석시간은 약 1.1시간으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

같은 코어수로 진행한 시뮬레이션에서, 두 시스템은 약 80배정도의 속도차이를 보인다. 그 이유를 몇 가지로 추론할 수 있는데, 첫째는 CPU의 성능차이이다. 둘다 Intel 사의 서버용 CPU인 Xeon CPU이며 동작 속도도 비슷하지만, 두 CPU는 상당한 세대 차이를 보이는 것들이며 그로 인해 기본적인 구조가 다르다.

둘째는 워크스테이션과 클러스터의 구조 차이이다. 워크스테이션에서는 그래픽 작업, 계산 작업, 저장 등의 모든 작업을 매 계산마다 업데이트 해주어야 하지만, 클러스터는 계산 노드가 따로 있어 해당 노드에서는 계산만 수행한다. 따라서 모든 작업을 한 시스템에서 수행해야 하는 워크스테이션이 더 느릴 수 밖에 없다.

셋째로 데이터를 주고받는 데이터 버스의 성능 차이이다. 워크스테이션에서는 프로세서 끼리 QPI를 사용해 정보를 주고 받고,그래픽 카드와 HDD는 PCI방식을 사용한다. 반면 클러스터에서는 계산노드에서 계산한 결과가Infiniband network를 통해 곧장 마스터 노드로 넘어와 저장되기 때문에 기본적으로 데이터 병목현상이 있는 워크스테이션이 느릴 것으로 생각된다.

5.2. Cluster 시스템 성능

클러스터 시스템의 계산성능을 파악하기 위해 4core부터 시작하여 총 48core까지 사용하여 해석을 진행하였고, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에 따르면 48개까지 해석에 사용되는 코어를 증가 시킬 때, 해석속도가 거의 선형적으로 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 특히 코어가 48개일 때 약 2분만에 12000회의 계산이 끝나는 것으로 나타나는데, 배터리가 100개정도 들어가는 배터리 팩이라면 약 50분만에 해석 결과를 얻을 수 있는 성능이다. 또한, 보통 병렬 계산은 어느 정도 이상의 코어 개수를 증설하더라도 성능 개선이 일어나지 않는 포화점이 존재하는데, 이 결과로는 해당 지점을 확인하기 어렵다.

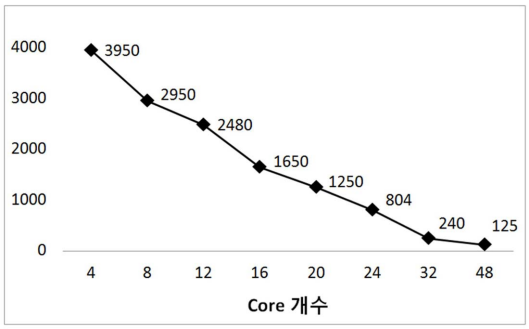

Fig. 6. Computing time according to number of core.

6. 결 론

본 연구에서는 복잡한 물리현상을 갖는 대형 시스템의 시뮬레이션에 병렬 연산 시스템의 적용 가능성 여부에 대하여 연구를 진행하였다. 첫째로, 현재 사용되는 병렬 연산 시스템에 대하여 정리하였고, 둘째, 테스트에 사용할 250만개 정도의 격자를 갖는 복잡한 물리현상의 배터리 모델을 정의하였다. 셋째, 워크스테이션과 클러스터 시스템의 비교를 위해 클러스터 시스템을 구축하였다.

테스트 결과 기존의 워크스테이션으로는 배터리 팩과 같은 복잡하고 격자가 많은 시스템의 시뮬레이션에 어려움이 있음을 확인했으며, 병렬 연산 클러스터 시스템이 이와 같은 연구에 큰 도움이 될 수 있음을 확인하였다. 그러나 현재 시스템에서 어느 정도까지 코어 수를 증설하는 것이 가장 이상적인가에 대해서는 확인하지 못하였다.

Nomenclature

E : Potential in electrolyte
E_0 : In porous media, the conductivity is corrected by the Bruggeman relation
R : Universal gas constant Temperature
K : Kelvin temperature scale
F : Faraday's number
T : Temperature
t_i^0 : Transference number of species 'I' with respect to the solvent velocity
f_+ : Mean molar activity coefficient of an electrolyte
c : Salt concentration in the electrolyte
I : Total current density in the cell
i_2 : Current density in the electrolyte

Φ_l : Potential in the solid
σ : Effective electronic conductivity of a porous electrode
ε : Volume fraction(of electrolyte unless otherwise specified)
D : Salt diffusion coefficient
c_i : Concentration of species 'i'
z_+v_+ :Charge balance for a binary electrolyte
v_i : moles of ion 'i'
αj_i : Rate of production of species 'i' per unit volume
D_s : Diffusion coefficient of Li in an insertion electrode
j : Total flux due to reaction
$\alpha_{a,s}, \alpha_{c,s}$:Transfer coefficient describing between anode/cathode and electrolyte
i_n : Transfer current normal to the surface of the active material
U : Thermodynamic potential measured with respect to a Li reference electrode
C_p : Heat capacity
λ : Thermal conductivity
η : Voltage loss
φ : Dependent variable
Γ : Diffusion Coefficient
Z : Generation term
U : Velocity of x-direction
p : Pressure
B_x : Volumetric force of x-direction per volume
V_x : Viscous force of x-direction
μ : Viscosity coefficient
c_p : Specific heat at constant pressure

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로, 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. NRF-2013R1A2A1A01013835)입니다. 본 연구를 진행함에 있어 도움을 주신 클루닉스(주)와 CD-Adapco 社에 감사드립니다.

참고문헌

1. Jang, H., Jang, K.M., and Kim, K.S., "A Research on the Assessment of Thermal Performance of Energy Storage Li-Ion Battery Pack", KSSDT, 13(1), pp.101-108, (2014).
2. West, R. E., and Kreith, F., "A Vision for a Secure Transportation System Without Hydrogen and Oil," ASME J. Energy Resour. Technol., 128(3), pp. 236–243,(2007).
3. Smith K. and Wang C. Y., "Power and Thermal Characterization of a Li-ion battery Pack for Hybrid-electric Vehicles," Journal of Power Sources, Vol 160, pp.662- 673,(2006).
4. Bajura, R. A. and Jones, E. H. Jr., "Flow distribution manifolds," ASME J. of Fluids Engineering, Vol. 98, pp. 656-666, (1976).
5. Hu, M. H., Qin, D. T., Shi, W. K., and Yang, Y. L., "A study on temperature field of Ni2MH batteries for hybrid electric vehicle," Automotive Engineering, Vol. 29 (1), pp. 37-40, (2007).
6. Kyung-Min Jang and Kwang Sun Kim, "Numerical Analysis of Inner Reaction Effects of Cylindrical Li-ion Battery by Discharge Rates", Proc. of IMECE-63610, 2011 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Vol 4, pp.975-981(2011).
7. E.Thomas, J.Newman, and R.M.Darling, Advances in Lithium-Ion Batteries, B. Scrosati and W. van Schalkwijk, eds., New York: Kluwer Academic Publishers, (2002).
8. C. Marc Doyle, Design and Simulation of Lithium Re-chargeable Batteries, Ph.D Thesis, University of Cali-fornia, Berkeley, (1995).
9. Suhas V. Patankar, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill, pp11~14, (1980).
10. Z. Lan, and P. Deshikachar, "Performance Analysis of a Large-Scale Cosmology Application on Three Cluster Systems," Proc. of 2003 IEEE International Conference on Cluster Computing (Cluster 2003), pp. 56-63(2003).
11. Kim, J. N., Kim, H. J. and Lee, C. H., "The Node Scheduling of Multi-Threaded Process for CC-NUMA System," The Transactions of the Korea Information Processing Society, Vol. 7(2), pp. 488~496(2000).
12. Rolf Rabenseifner, "Hybrid Parallel Programming: Performance Problems and Chances," Proc. of the 45th CUG Conference 2003, pp. 1~11(2003).

접수일: 2016년 5월 20일, 심사일: 2016년 6월 2일,
게재확정일: 2016년 6월 10일