

논문 2004-41CI-3-2

이질적인 분산 시스템에서의 개선된 브로드캐스트 알고리즘

(Improved Broadcast Algorithm in Distributed Heterogeneous Systems)

박 재 현*, 김 성 천*

(Jaehyun Park and Sungchun Kim)

요 약

최근 이질적인 분산 컴퓨팅 환경 상에서의 공동 작업들이 나날이 늘어나고 있다. 고속의 원거리 네트워크의 유용성(availability)은 화상 회의, 분산된 대화식의 시뮬레이션, 그리고 공동의 시각화(collaborative visualization)와 같은 공동의 멀티미디어 응용들을 가능하게 하였다. 이와 같은 응용들과 분산된 고성능 컴퓨팅에서의, 효율적인 그룹 통신은 매우 중요하다. 일반적인 그룹 통신으로는 브로드캐스트, 멀티캐스트 등이 있다. 기존의 FEF, ECEF, look-ahead 와 같은 휴리스틱 알고리즘들은 이러한 이질적 분산 시스템에서의 브로드캐스트와 멀티캐스트를 위한 메시지 전송 트리를 구성하여 준다. 하지만 이러한 알고리즘들은 각 단계에서의 최적의 해를 선택하기 때문에 지역적 최적해(local optimum)에 빠질 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 노드와 네트워크 모두가 이질적인 기존의 통신 모델 상에서 보다 효율적인 집합적 연산을 위한 트리를 구성해주는 개선된 브로드캐스트 알고리즘을 제안한다. 기존의 휴리스틱 알고리즘들이 지역적 최적해에 빠질 수 있는 점을 감안하여, 보다 합리적이고, 유용성 있는 edge 선택 기준을 제시하였다. 여러 가지 통신비용에 대한 성능 평가를 통하여, 개선된 휴리스틱 알고리즘은 기존의 알고리즘보다 적은 완료 시간을 가지며, 특히 look-ahead 알고리즘보다 낮은 계산 복잡도를 가지는 장점을 가짐을 알 수 있다.

ABSTRACT

Recently, collaborative works are increased more and more over the distributed heterogeneous computing environments. The availability of high-speed wide-area networks has also enabled collaborative multimedia applications such as video conferencing, distributed interactive simulation, and collaborative visualization. Distributed high performance computing and collaborative multimedia applications, it is extremely important to efficiently perform group communication over a heterogeneous network. Typical group communication patterns are broadcast and multicast. Heuristic algorithms such as FEF, ECEF, look-ahead make up the message transmission tree for the broadcast and multicast over the distributed heterogeneous systems. But, there are some shortcomings because these select the optimal solution at each step, it may not be reached to the global optimum. In this paper, we propose a new heuristic algorithm that constructs tree for efficiently collective communication over the previous heterogeneous communication model which has heterogeneity in both node and network. The previous heuristic algorithms may result in a locally optimal solution, so we present more reasonable and available criterion for choosing edge. Through the performance evaluation over the various communication cost, improved heuristic algorithm we proposed have less completion time than previous algorithms have, especially less time complexity than look-ahead approach.

Keywords : RT CORBA, CORBA, real time, scheduling, hard real time

I. 서론

일반적으로, 이질적 분산 시스템은 이질적인 워크스테이션, 멀티프로세서들, 그리고 이동(mobile) 노드들의 집합으로 구성되어 있으며, 이러한 노드들은 ATM,

FFDI, 이더넷, 그리고 무선 채널 등과 같은 서로 다른 종류의 통신 링크 상에서 프로토콜의 일반적인 집합을 사용하여 서로 통신한다^[1,2,3]. 이와 같은 이질적인 환경에서의 멀티캐스트, 브로드캐스트와 같은 그룹 통신을 효율적으로 수행하는 것은 대단히 중요하다.

멀티캐스트와 브로드캐스트 등과 같은 집합적 연산(collective operation)을 위한 최적 트리(optimal tree)의 구성 문제는 동질적 분산 시스템에서 광범위하게 연구

* 정회원, 서강대학교 컴퓨터학과
(Sogang University, Dept. of Computer Science)
접수일자: 2003년4월25일, 수정완료일: 2004년4월14일

되어 왔다. 대표적인 알고리즘으로써 MPI(Message Passing Interface)는 이진 트리(binomial tree)를 기반으로 한 방법을 사용하고 있으며, 이러한 브로드캐스트 알고리즘의 통신 위상(topology)는 일반화된 피보나치 트리(Fibonacci tree)가 된다^[4]. 그러나 위와 같은 방법은 동질적 분산 시스템을 가정하고 연구되었으므로, 각 노드간의 통신비용이 서로 다른 이질적 분산 시스템 환경에서는 오히려 비효율적이다. 이질적 분산 시스템에서의 최적의 브로드캐스트 스케줄을 찾는 문제는 NP-complete하기 때문에, FEF(Fastest Edge First), ECEF(Earliest Completing Edge First), look-ahead와 같은 여러 가지 휴리스틱 알고리즘들이 제안되었다^[3]. 이와 같은 휴리스틱 알고리즘은 노드와 네트워크 링크의 이질성을 고려한 통신 구조를 기반으로 하고 있다.

기존의 휴리스틱 알고리즘이 그리디(greedy) 접근법을 사용하기 때문에, 지역적 최적해(local optimum)에 빠질 수 있고, 특히 look-ahead 알고리즘은 효율적이긴 하나 높은 계산 복잡도를 가지므로, 본 논문에서는 이질적 컴퓨팅 환경에서의 브로드캐스트를 위해 유용성 있는 edge 선택 기준을 제시한, 개선된 알고리즘을 제안한다.

II. 이질적 분산 시스템을 위한 통신모델

N개의 노드를 지닌 이질적인 분산 시스템에서 컴퓨팅 노드와 네트워크 링크를 N개의 꼭지점을 가진 방향성 그래프(directed graph) G로 표현할 수 있다. G 내에서의 edge (v_i, v_j) 는 노드 P_i 와 노드 P_j 사이의 경로(path)를 나타내며, 서로 다른 지연시간과 대역폭을 지니는 다중 네트워크들의 링크를 포함한다. edge (v_i, v_j) 의 값 C_{ij} ($0 \leq i, j < N$)는 P_i 로부터 P_j 까지의 브로드캐스트 메시지를 보내는 시간을 나타낸다. 그래프가 항상 대칭적(symmetric)일 필요는 없다(즉 $C_{ij} \neq C_{ji}$). 이러한 정보는 식 (1)에서 보여지는 것처럼 $N \times N$ 통신 행렬(communication matrix) C로 나타낼 수 있다. 이 때 각 엔트리의 단위는 초(sec)이다. Globus의 이질적 분산시스템의 GUSTO 시험대에서의 측정을 토대로 만든 통신행렬은 다음과 같다.^[7]

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 146 & 325 & 39 \\ 146 & 0 & 163 & 115 \\ 325 & 163 & 0 & 257 \\ 39 & 115 & 257 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

III. 기존의 휴리스틱 알고리즘과 문제점

브로드캐스트와 멀티캐스트 문제를 위한 알고리즘은 다음의 형식을 사용하여 서술할 수 있다. 노드들은 A, B, 그리고 I의 세 개의 집합으로 나뉜다. 집합 A는 이미 메시지를 받은 노드들로 구성되고, 집합 B는 메시지를 받아야 하는 노드들로 구성된다. I는 그 외의 다른 노드들을 포함한다. 처음에, 집합 B가 멀티캐스트를 위한 목적지(destination) 노드들로 구성되는 반면에, 집합 A는 근원지(source) 노드로 구성된다. 브로드캐스트 문제에서 I는 공집합이 된다. 매 단계에서, 집합 A에 속한 송신 노드와 집합 B에 속한 수신 노드가 선택된다. 멀티캐스트 문제에서, 낮은 통신 시간을 위한 경로가 존재한다면, 메시지는 집합 I에 속한 노드 중의 하나를 통해 보내질 수도 있다. 각 통신 이벤트 후에, 수신 노드(그리고 선택된 매개 노드)는 집합 A로 옮겨진다. 통신 스케줄은 |D|의 단계(즉 '목적지의 수'만큼의 단계)를 거치게 된다. 따라서, 브로드캐스트의 경우에는 노드의 수가 N일 경우 N-1의 단계를 거치게 된다. 기존 알고리즘들인 FEF, ECEF, look-ahead은 이와 같은 과정을 수행하게 되며, 차이점은 매 단계에서의 edge 선택 기준이 다르다는 것이다.

FEF 휴리스틱은 각각의 단계마다 집합 A에 속한 노드 P_i 와 집합 B에 속한 노드 P_j 에 대한 가장 작은 값을 지닌 edge (v_i, v_j) 를 선택한다. ECEF 휴리스틱에서의 edge의 선택은 각 edge의 값과 송신 노드의 준비 시간(ready time)에 의해 결정된다. 선택된 통신 이벤트는 가장 일찍 끝날 수 있는 것이 된다. 따라서 선택된 edge는 다음의 합이 최소가 되는 edge가 된다. Look-ahead 알고리즘은 ECEF 휴리스틱에서 향상된 알고리즘으로, edge선택을 위해 look-ahead 값인 L_j 를 고려해주는 방법이다. 이 알고리즘은 비대칭 디지털 가입자 회선(Asymmetric Digital Subscriber Lines; ADSL)을 가진 시스템에서와 같이, 비대칭 비용 행렬의 경우에 좋은 결과를 보이지만 높은 계산복잡도를 가지는 단점이 있다.

기존의 휴리스틱 알고리즘들인 FEF, ECEF, look-ahead 들은 모두 그리디(greedy) 접근법을 사용하고 있다. 이와 같은 그리디 방법은 단계별로 최적의 값을 선택하는 방법으로써, 비교적 간단하지만 지역적 최적해(local optimal)의 문제가 발생할 수 있게 된다

그림 1은 식(1)을 그림으로 표현한 것으로 기존 알고

리즘에 의해 P_3 가 집합 A에 포함된, 즉 1단계 진행된 상황을 보여주고 있다. 식(1)의 경우를 예를 들면, 기존의 FEF, ECEF, look-ahead 알고리즘은 그림 1 (a)와는 달리 P_3 에서 P_1 으로의 값이 115인 edge를 선택하게 된다. 이 때의 완료시간은 317이 된다. 만약 그림 1 (a)와 같이 P_0 에서 P_1 으로의 edge를 선택함을 가정할 경우는, 현 단계에서 좋지 않은 성능을 보이지만, 완료 시간이 296로, 앞의 경우보다 21만큼 줄어들게 된다.

이러한 문제가 발생하는 이유는 기존의 알고리즘들이 매 단계상에서의 최소값만을 edge 선택 기준으로 고려하기 때문이다. 따라서 새로운 휴리스틱 알고리즘에서는 이를 개선하기 위한 새로운 edge를 선택하기 위한 기준을 설정한다.

또 다른 문제점으로써 look-ahead 알고리즘의 계산 복잡도가 $O(N^3)$ 라는 점이다. 게다가 look-ahead 값으로 어떤 것을 선택하느냐에 따라서 계산 복잡도는 더 늘어날 수 있다. 새로운 휴리스틱 알고리즘은 look-ahead와 같이 그 다음 단계를 고려하지 않는다. 그 대신 비대칭 비용 행렬의 경우에도 좋은 결과를 얻을 수 있는 노드 쌍 선택 기준을 설정함으로써, 브로드캐스트 완료 시간을 줄일 수 있으며, 또한 Look-ahead에서 초래되는 부가적인 비용 줄여 계산 복잡도를 낮출 수 있다.

IV. 새로운 휴리스틱 알고리즘

제안한 새로운 휴리스틱 알고리즘은 기존 알고리즘과 전체적인 과정 및 단계가 유사하다. 따라서 브로드캐스트의 경우 노드 수가 N개 일 경우 N-1단계로 이루어진다. 각각의 단계마다 특별한 기준에 의하여 송신 노드와 수신 노드 쌍의 edge를 선택하게 된다. 이 때의 edge (v_i, v_j)의 선택 기준은 기존의 알고리즘들이 edge 값에 근거한 최소값을 선택하는 방식과는 다르다. 집합 A에 속한 각각의 송신 노드들에 대해서, 집합 B에 속한 수신 노드들로의 edge 값들을 비교한다. 이때 가장 작은 값을 가진 $C^i_{min} = \min\{C_{ij}, i \in B\}, i \in A$ 값과, 그 다음으로 작은 $C^i_{2ndmin} = \min\{C_{ij}, i \in B, C_{ij} \neq C^i_{min}\}, i \in A$ 를 찾아서 이것들의 차를 구한다. 이 때의 '차'는 edge를 선택하기 위한 유용성이 된다.

$$\text{유용성} = | C^i_{min} - C^i_{2ndmin} | \quad (2)$$

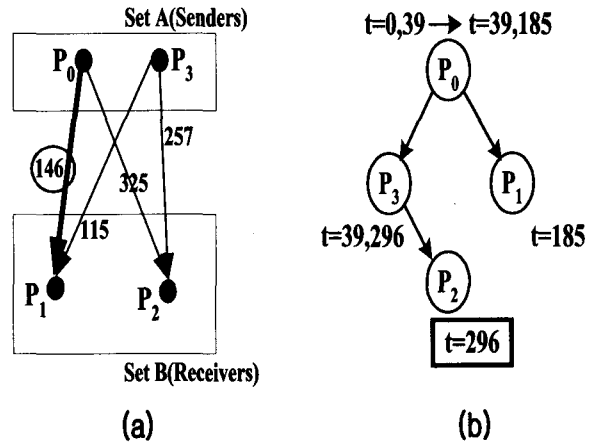


그림 1. P_0 에서 P_1 으로의 edge를 선택함을 가정한 예 Fig. 1. Select route from P0 to P1.

각각의 송신 노드들에 대해 식(2)를 구한 후 이 값들을 비교하여 가장 큰 값을 가지는 노드를 선택하고, 선택된 노드의 최소 edge C^i_{min} 를 선택한다. '차'가 커질수록 유용성은 증가하며, 이 때 식(2)에 의해서는 송신 노드를 선택하게 되고, 선택된 송신 노드에서의 최소 edge C^i_{min} 로 수신 노드를 선택하게 된다. 또한 전체적인 edge들의 값과 송신 노드의 준비 시간도 고려해야 한다. 예를 들어 노드 P_1 의 C^1_{min}, C^1_{2ndmin} 각각이 30, 50 이고 노드 P_4 의 C^4_{min}, C^4_{2ndmin} 이 130, 160이라고 한다면 식(2)에 의해 노드 P_4 가 송신 노드로 선택되게 되고, 그때의 edge 값은 130이 될 것이다. 만약 이런 방식으로 트리를 만들어 메시지를 전송한다면, 나쁜 성능을 보일 것이다. 따라서, 각 노드들에 대한 edge들의 값을 식(2)와 함께 반영하여야 한다. 또한 유사한 이유로 송신 노드의 준비시간 R_i 역시 반영해 주어야 한다. 결국 각 단계에서 송신 노드와 수신 노드의 쌍을 결정하는 edge의 선택 기준은 다음과 같다.

$$\text{edge 선택기준} = \frac{| C^i_{min} - C^i_{2ndmin} |}{\text{avg}(C^i_{min}, C^i_{2ndmin}) \times R_i} \quad (3)$$

식(3)은, 식(2)를 최소 edge C^i_{min} 와 그 다음 최소 edge C^i_{2ndmin} 의 평균과 R_i 의 곱으로 나눈 값으로써, 노드 선택의 유용성은 그들 두 값의 평균과 R_i 가 작을수록 높아지게 된다. 즉 이들의 관계는 반

비례한다.

새로운 휴리스틱 알고리즘은 각각의 단계마다 송신 노드 P_i 와 수신노드 P_j 에 대하여 식(3)에 의해 edge를 선택하게 한다. 이 같은 edge의 선택은 매 단계상의 송신 노드와 수신 노드를 결정하고, 수신 노드로써 P_j 가 선택되어지면, P_j 는 수신 노드들의 집합인 B에서 송신 노드들의 집합인 A로 옮겨진다. 개선된 휴리스틱 알고리즘의 과정은 다음과 같다. 브로드캐스트를 위한 과정이며, 노드의 수는 N으로 가정한다.

[단계 1] 근원지 노드에서 목적지 노드로의 최소 값을 지니는 edge를 선택한다. Look-ahead 방식을 사용하여도 좋다.

[단계 2] N-3번 반복한다.

(각 단계마다 식(3)에 의해 edge를 결정한다.)

[단계 N-1] edge와 R_i 의 합의 최소 값을 지니는 edge를 선택한다.

기존 알고리즘과 마찬가지로, 개선된 알고리즘은 처음에 각 노드로부터 나가는 edge들을 그것들의 값에 의

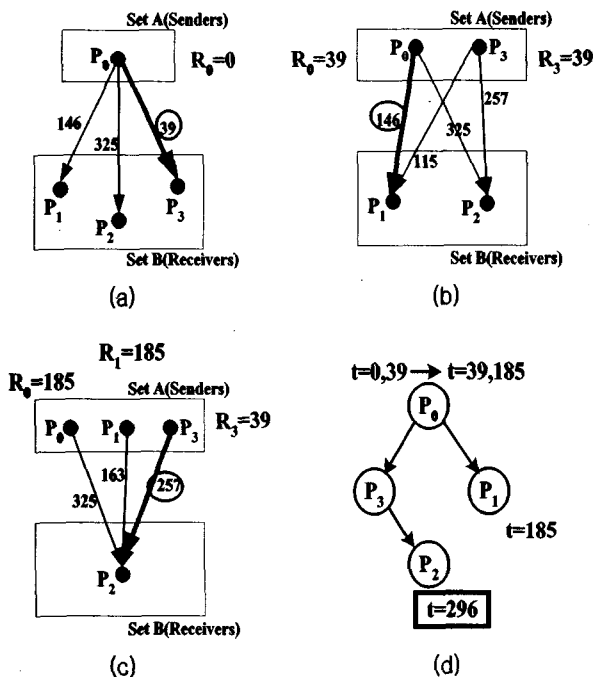


그림 2. 4개 노드를 위한 개선된 휴리스틱 알고리즘을 적용한 통신 스케줄
 Fig. 2. Adapting advanced heuristic scheduling algorithm for 4 node.

한 오름차순으로 정렬한다. 따라서 이 단계에서 $O(N^2 \log N)$ 시간이 걸리게 된다. 나머지 시간도 look-ahead를 제외한 다른 알고리즘과 유사한 과정을 지닌다. 따라서 개선된 휴리스틱 알고리즘의 전체 수행 시간은 $O(N^2 \log N)$ 이 된다.

그림 2는 4 개의 노드를 가진 시스템에서의 브로드캐스트를 위한 개선된 휴리스틱의 예를 보여주며, 식(1)의 비용 행렬을 사용하였다. 그림 2 (a)는 초기 상황을 보여주고 있으며, [단계 1]을 적용하여 근원지 노드에서 가장 작은 edge를 선택하게 된다. 그림 2 (b)는 [단계 2]에 의해 P_0 에서 P_1 으로의 edge가 선택되는 과정을 보여준다. 그림 2 (c)는 마지막 단계로써, 가장 작은 값을 가지는 P_3 에서 P_2 로의 edge가 선택되게 됨을 보여준다. 그림 2 (d)는 각각의 단계에 의해 생성된 브로드캐스트 트리를 보여준다. 기존의 휴리스틱을 사용한 것에 비해서 완료시간이 줄어들었음을 알 수 있다.

V. 성능 평가

본 논문에서 제안하는 이질적 분산 시스템에서의 개선된 집합적 알고리즘과 기존의 휴리스틱 알고리즘을 비교 평가하였다. 시뮬레이션은 SUN ULTRA 60 (Solaris 2.6) 시스템에서 SUN WorkShop Compilers C/C++ 4.2를 이용하여 수행하였다. 기존의 휴리스틱 알고리즘인 FEF, ECEF, look-ahead 알고리즘과 새로이 제안한 개선된 휴리스틱 알고리즘을 II장에서 서술한 이질적 분산 시스템의 통신 모델을 기반으로 생성한 대칭적(symmetric) 비용 행렬과 비대칭적(asymmetric) 비용 행렬에 대해 각각 적용하였다. 이러한 비용 행렬에 대해 노드 수에 따라서, 브로드캐스트를 하였을 경우에 대한 성능 평가를 실시하였다.

측정해야할 성능 평가 기준은 노드 수에 따른 완료시간(completion time)이며 단위는 초(second)이다. 성능 평가를 위해 임의의 통신 행렬을 생성하였으며, 이러한 통신 행렬을 위해 쌍방향 네트워크 지연시간(pair wise network latencies)은 10μsec에서 1msec의 범위 내에서 임의로 선택하였고, 대역폭은 10kB/s에서 200MB/s의 범위 내에서 임의로 선택함을 가정하며, 메시지의 크기는 1MByte와 4MByte로 한정하였다.

다음의 그림들은 대칭적 비용 행렬에서의 노드 수에 따른 완료 시간의 변화를 비교한 것이다. 대칭적 비용

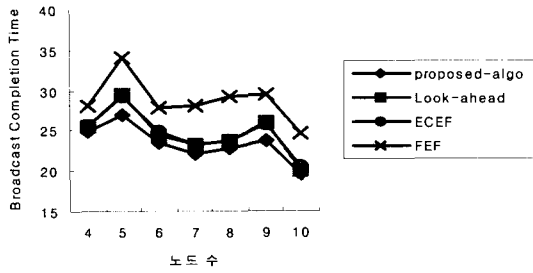


그림 3. 대칭적 비용 행렬에서의 완료시간/노드 수 (1MB)

Fig. 3. Complete time/node no. in symmetric communication matrix (1MB).

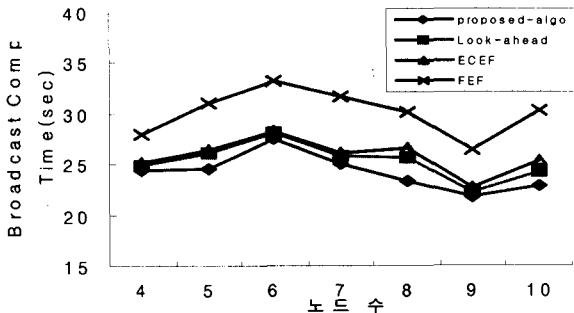


그림 4. 대칭적 비용 행렬에서의 완료시간/노드 수(4MB)

Fig. 4. Complete time/node no. in symmetric communication matrix (4MB).

행렬에서의 그림상의 특징은 ECEF 알고리즘과 look-ahead 알고리즘의 완료 시간이 각각의 노드 수에 대해 거의 비슷하게 나타난다는 점이다. 모든 경우에서 FEF의 결과가 가장 높은 완료시간을 가짐으로써, 가장 나쁜 결과를 보여주고 있다. 그림을 보면 10usec에서 1msec의 범위를 가지는 노드의 이질성은 완료 시간에 많은 영향을 주지 않음을 알 수 있으며, 네트워크의 성능에 의해 완료 시간이 결정되게 됨을 알 수 있다. 그래프를 살펴보면 노드의 수가 늘어나도 각각의 노드 수에 따른 완료 시간은 거의 비슷하거나 오히려 작아지는 경우를 볼 수 있는데, 이와 같은 이유는 송신 노드의 수가 많아짐에 따라서, 각각의 서로 다른 노드 쌍들의 메시지 전송이 동시에 일어날 수 있기 때문이다. 즉, 각각의 서로 다른 노드 쌍들에 대한 메시지 전송은 독립적이다. [그림 3]과 [그림 4]에서 볼 수 있듯이 새로운 휴리스틱 알고리즘이 기존의 look-ahead나 ECEF에 비해 평균 5~6%의 성능 향상을 보이고 있다.

다음의 그림들은 비대칭적 비용 행렬에서의 노드 수에 따른 완료 시간의 변화를 비교한 것이다. 비대칭적 비용 행렬에서의 그래프상의 특징은 look-ahead 알고리

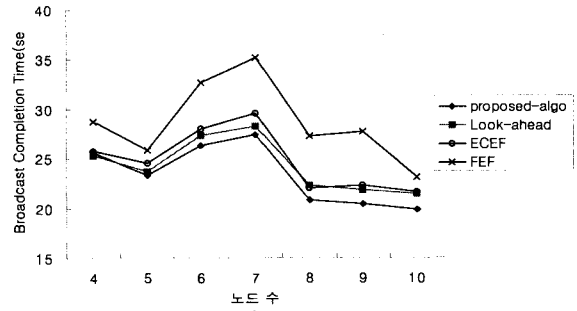


그림 5. 비대칭적 비용 행렬에서의 완료시간/노드 수(1MB)

Fig. 5. Complete time/node no. in asymmetric communication matrix (1MB).

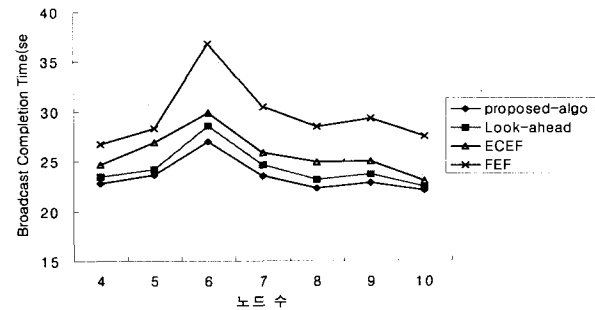


그림 6. 비대칭적 비용 행렬에서의 완료시간/노드 수 (4MB)

Fig. 6. Complete time/node no. in asymmetric communication matrix (4MB).

즘이 ECEF 알고리즘에 비해 좋은 결과를 보인다. 대칭적 비용 행렬과 마찬가지로 FEF 알고리즘은 좋지 않은 결과를 보여주고 있다. 그림 5와 그림 6에서 볼 수 있듯이 새로운 휴리스틱 알고리즘은 기존의 look-ahead 알고리즘에 비해 4%의 성능향상을 보이며, ECEF 알고리즘에 비해 평균 6~9% 정도의 성능 향상을 보이고 있다. 휴리스틱 알고리즘은 기존의 look-ahead 알고리즘에 비해 4%의 성능향상을 보이며, ECEF 알고리즘에 비해 평균 9%의 성능 향상을 보이고 있다.

전반적으로 제안한 새로운 알고리즘은 전체적으로 look-ahead 알고리즘에 비해 4~6%의 성능 향상을 보이고 있다. 완료 시간의 성능 향상 측면에서는 향상 정도가 작지만, look-ahead 알고리즘의 높은 계산 복잡도를 비교한다면 개선된 휴리스틱 알고리즘은 매우 효율적임을 알 수 있다.

VI. 결 론

PC나 워크스테이션 그리고 네트워크 장비의 상품적 성질과 함께 고속 네트워크 기술의 발전은 고성능 컴퓨

팅 환경을 이질적 분산 시스템으로 초점을 맞추게 하였다. 이러한 이질적 분산 시스템에서의 브로드캐스트나 멀티캐스트와 같은 집합적 통신 연산들은 공동의 멀티미디어 응용과 같은 작업에서 자주 사용되므로, 이러한 연산의 효율적인 수행은 매우 중요하다.

노드와 네트워크가 모두 이질적인 환경에서의 효율적인 집합적 연산의 수행은 동질적 환경에서의 그것보다 어렵고 복잡하다. 따라서 이질적인 환경만을 위한 집합적 연산의 스케줄링 알고리즘이 요구되며, 기존의 FEF, ECEF, look-ahead 알고리즘들은 각각의 단계에서 가장 작은 완료 시간을 보이는 edge를 선택하는 방법을 제시하고 있다. 하지만 이러한 알고리즘들은 지역적 최적해(local optimum)에 빠질 수 있으며, 비대칭 통신 비용에서 좋은 성능을 보이는 look-ahead 알고리즘은 $O(N^3)$ 라는 높은 계산 복잡도를 보인다. 새로운 휴리스틱 알고리즘은 이를 개선하기 위하여, 새로운 edge 선택 기준을 제시하였다. 이러한 방법을 사용한 결과, 본 논문에서 제안한 개선된 알고리즘은 look-ahead 알고리즘에 비해 평균 4~6%의 완료 시간에서의 성능 향상을 보였으며, 계산 복잡도를 $O(N^3)$ 에서 $O(N^2 \log N)$ 로 낮추었다.

하지만 제안한 알고리즘 역시 휴리스틱한 알고리즘이기 때문에, 항상 최적의 값을 보일 수는 없으며, 특정 통신 비용에 대해서는 기존 기법에 비해 높은 완료 시간을 보일 수 있다. 이러한 점은 각각의 시스템의 특성을 파악하여, edge 선택 시에 필요한 변수들에 적절한 가중치를 부여함으로써 보완될 수 있을 것이다.

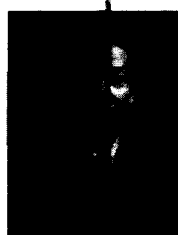
참 고 문 헌

- [1] M.Banikazemi, V.Moorthy, and D.K.Panda, "Efficient Collective communication on heterogenous networks of workstations", In Proc. Intl.Conf. Parallel Processing, pp.460-467, 1998.
- [2] T.Anderson, D.Culler, and D.Patterson, "A case for NOW(Networks Of Workstations)", IEEE Micro, pp.54-64, February 1995.
- [3] Pangfeng Liu, Da-Wei Wang, "Reduction Optimization in Heterogeneous Cluster Environments", Proceedings of the 14th International Parallel & Distributed Processing Symposium, pp. 477-482, May 2000.
- [4] Prashanth B. Bhat, C. S. Raghavendra, Viktor K. Prasanna, "Efficient collective communication in distributed heterogeneous systems", Proceedings of the 19th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, pp.15-24, May 1999.
- [5] Nicholas T. Karonis, Bronis R. de Supinski, Ian Foster, William Gropp, Ewing Lusk, John Bresnahan, "exploiting hierarchy in parallel computer networks to optimize collective operation performance", Proceedings of the 14th International Parallel & Distributed Processing Symposium, pp. 377-384, May 2000.
- [6] Mohammad Banikazemi, Jayanthi Sampathkumar, Sandeep Prabhu, Dhabaleswar K. Panda, P. Sada yappan, "Communication Modeling of Heterogeneous Networks of Workstations for Performance Characterization of Collective Operation", Proceedings of the Heterogeneous Computing(HCW '99), pp.125-133, April 1999.
- [7] I.Foster and C.Kesselman, "Globus: A metacomputing infrastructure toolkit". Intl. Journal of Supercomputer Applications, 11(2): pp.115-128, 1997.
- [8] M.Banikazemi, V.Moorthy, and D.K.Panda, "Efficient Collective communication on heterogenous networks of workstations", Technical report OSU-CISRC-03/98-T07, Dept. of Computer and Information Science, The Ohio State University, March 1998.

저 자 소 개

박재현(정회원)

1999년 서강대학교 컴퓨터학과 학사 졸업.
2001년 서강대학교 컴퓨터학과 석사 졸업.
<주관심분야: 통신, 컴퓨터, 분산, 병렬처리>



김성천(정회원)

1975년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.
1979년 Wayne State University, M.S.
1982년 Wayne State University, Ph.D.

<주관심분야: 통신, 컴퓨터, 분산, 병렬처리>