선형 팽창기 영역에 기초한 초집중기의 구성

The Construction of Superconcentrator Based on Linear Expander Bounds

박병수*, 조태경**

상명대학교 컴퓨터시스템공학과*, 상명대학교 정보통신공학과**

Byoung-Soo Park(bpark@smu.ac.kr)*, Tae-Kyung Cho(tkcho@smu.ac.kr)**

요약

병렬 컴퓨터 구조의 통신 시스템에 있어서 수많은 반도체 소자의 연결을 가능하게 하는 선형 사이즈의 팽창기(expander)가 병렬 상호 연결망과 관련된 여러 분야에서 활발히 연구 되어왔다. 그러나 이러한 병렬 컴퓨터 구성의 주요한 단점이 프로세서와 메모리간의 병렬 상호 연결망 구성에 있어서 극도로 상승된 비용으로 인하여 제한되어 왔다. 선형 사이즈의 팽창기, O(n)를 이용한 집중기는 기존의 병렬 상호 연결망보다 이론적으로 최적의 병렬 상호연결망 구조로 구성될 수 있다. 그러나 현존하는 이러한 구조는 커다란 팽창 상수를 갖는 팽창기에 근거한다. 이는 현실적으로 적당한 사이즈의 네트워크의 구성에 비현실성을 내포한다. 따라서 커다란 팽창 상수를 줄임으로서 현실성 있는 팽창기를 이용하여 집중기(concentrator)를 구성하는 것이 요구된다. 이 논문은 향상된 팽창 상수를 집중기 구성에 적용하여 그 집중기의 사이즈를 줄이는 방법을 제안한다.

■ 중심어 : | 팽창기 | 집중기 | 초집중기 | 선형사이즈 | 상호 연결망 |

Abstract

Linear order Concentrators and Superconcentrators have been studied extensively for their ability to interconnect large numbers of devices in parallel, whether in communication systems or in parallel computers. One major limitation on the efficiency of parallel computer designs has been the prohibitively high cost of parallel communication between processors and memories. Linear order concentrators, O(n), can be used to construct theoretically optimal interconnection network schemes. Existing explicitly the defined constructions are based on expanders, which have large constant factors, thereby rendering them impractical for reasonable sized networks. It demands the construction of concentrator which uses the expander with the smaller expansion constant.

This paper introduces an improvement on the method of constructing concentrators using expanders, which reduce the size of resulting concentrator built from any given expander by a constant factor.

■ keyword : | Expander | Concentrator | Superconcentrator | Linear Size | Interconnection Network |

접수번호 : #050106-001
접수일자 : 2005년 01월 06일
심사완료일 : 2005년 01월 26일
교신저자 : 박병수, e-mail : bpark@smu.ac.kr

I. 서 론

최근 고도의 병렬 처리 계산 시스템에 있어서 가장 중요한 역할 중의 하나는 정보 전달에 있어서 컴퓨터 구조의 프로세서간의 통신과 전체 분산 메모리(global shared memory) 구조에 있어서 프로세서와 메모리간의 통신이라 할 수 있다. 따라서 고도의 병렬 처리 구조의 통신 성능의 향상을 위한 방법으로서 분리되어 서로 독립된 연결 경로에 따라 모든 정보를 병렬로 처리하는 것이 요구된다. 이러한 일대일(point-to-point) 방법으로 연결하기 위하여 최적의 베네스(Benes) 네트워크[5]와 많은 다른[6] 멀티 스테이지 네트워크 또한 셔플익스체인지(shuffle-exchange)[25] 네트워크와 같은 한 스테이지에서 재귀하는(recirculating) 네트워크 그리고 하이퍼큐브(hypercube) 네트워크 등이 제안되어 왔다. 그러나 이러한 네트워크는 연결 계산의 복잡도[18] 및 정보의 전달에 요구 되는 시간[4, 22]에 있어서 많은 제한적 요소를 지니고 있다[19]. 이러한 문제의 돌출로 인하여 많은 연구 활동이 현존하는 네트워크 구조보다 용이하게 연결 알고리즘을 구현 가능하고, 최적의 하드웨어의 복잡성을 지닌 새로운 인터커넥션(interconnection) 네트워크 구조를 개발하는데 그 관심을 기울여 왔다.

병렬 처리 컴퓨터에서 효율적으로 n개의 정보 흐름(stream)을 연결하기 위해 출발지(source)와 목적지(destination)사이에 n개의 분리된 경로로 된 네트워크를 구성할 필요가 있다. 병렬 처리는 병렬 알고리즘과 데이터 구조의 폭 넓은 범주에서 응용되기 때문에 가장 강력한 인터커넥션 알고리즘 방법으로 바로 모든 n개의 정보 흐름(stream)에 대하여 출발지-목적지 쌍을 형성할 수 있는 것이다. 그러한 상호 연결 네트워크를 구축하기 위한 하나의 방법으로 초집중기(superconcentrator)를 사용하는데, 이것은 입력 노드의 정보 흐름(stream)을 두 가지의 출력 노드 부분으로 구분한다. 그 후 출력 노드의 각 부분을 또 다시 순환적으로 두 부분의 부가적인 초집중기(superconcentrator)로 양분한다. 이와 같이 각 입력의 정보 흐름(stream)이 원하는 목적지로 연결될 때까지 반복한다[16, 20]. 이러한 목적에 부합되도록 응용된 하나의 단순한 구조가 Benes 네트워크 인데, 이것은 일대일(point-to-point)로 연결되기는 쉽지 않지만[5, 19], 초집중기(superconcentrator)로서 연결한다면 훨씬 용이하다[18]. 그 초집중기(superconcentrator)에 있어서 특정한 출발지-목적지의 쌍이 요구되지 않고, 각 입력은 두 부분의 출력 중 한 부분에만 연결된다는 것이 그 차이점이다. 베네스(Benes) 네트워크는 하드웨어 복잡도가 순환적으로는 $O(\mathbf{log}n)$을 갖지만, 모든 순환 후 종합적인 하드웨어 복잡도(complexity)는 $O(n\mathbf{log}n)$이므로 이것이 가장 최적의 복잡도를 갖는 하드웨어 구조는 아니다.

그러므로 최적 조건의 하드웨어 복잡도를 갖는 상호 연결 네트워크를 구축하기 위해 복잡도가 $O(n)$이 요구되는데 이것이 바로 선형 사이즈의 초집중기이다.

Pinsker[23], Valiant[28]와 Pippenger[24]는 집중기(concentrator)라고 정의된 기본적인 두 스테이지 구조를 사용하여 초집중기(superconcentrator)를 구현하는 방법을 소개하였다.

또한, Pippenger[24]는 내부 구성을 알 수 없는 형태로서 수학적 이론에 의한 집중기(concentrator)의 존재성을 입증하였다. Pippenger에 의하여 소개된 집중기는 6의 배수인 n개의 입력 노드와 $2n/3$개의 출력 노드를 갖는다. 각 입력 노드는 임의의 출력 노드로 연결되는 경로 6개로 구성되어, 일종의 두 부분으로 구성된 그래프(bipartite graph) 형태이다. 따라서 이러한 집중기는 $6n$개의 연결 경로를 갖는 선형 하드웨어 복잡도를 갖는다. 그러나 명확한 연결 경로의 구조는 알 수가 없다. 최근, Leighton[14]이 초집중기(superconcentrator)에 근거한 스플리터(splitter) 네트워크를 통해 간단하고, 보다 빠른 연결 알고리즘으로 연결 경로를 계산할 수 있지만 명확한 정보 전달을 위한 퍼뮤테이션(permutation) 알고리즘 형태는 아니다. 그러므로 남은 과제는 실용적인 집중기(concentrator)의 명확한 구조를 결정하는 것이다.

보다 최근에 Margulis[16], Gabber와 Galil[9], 그리고 Alon과 Gali[3]는 집중기(concentrator)를 구성하기 위한 팽창기(expander)라고 불리는 일종의 두 부분으로 구성된 그래프(bipartite graph) 형태의 구조를 소개하였으며 더욱 정확하게 그것을 정의하였다. 따라서 팽

창기(expander)를 근거로 한 집중기로부터 그림 1. 과 같은 구조의 초집중기를 구성함으로써 지금까지 상호 연결 네트워크에 있어서 최적의 하드웨어 복잡도를 갖는 네트워크를 구성하는 것을 가능하게 하였다. 이러한 이론은 중요한 이론적 결과이지만 선형 초집중기와 관련한 밀도 상수는 매우 비현실적으로 나타내고 있다. 예로서, Alon과 Galil에 의하여 제안된 초집중기는 122의 밀도 상수를 갖는다. 이것은 식, $\log_2 n \leq 122$에서 n의 선택을 의미하므로 Benes 네트워크가 현실적으로 훨씬 더 좋은 결과를 산출함을 의미한다. 즉, 현재 구현되는 네트워크 크기보다 훨씬 큰 $n=2^{122}$을 의미한다. 또한 퍼뮤테이션(permutation)의 수가 일정함에도 불구하고, 네트워크의 구조를 용이하게 구성 하는 것이 어려울 만큼 많은 연결 경로가 있지만, 그 구조의 복잡도는 선형 $O(n)$의 연결 경로를 구성한다. 따라서 초집중기의 밀도 상수의 결과를 줄이기 위하여 연구의 현재 관심은 더 향상된 팽창기를 찾는데 집중되어 왔다.

본 논문에서는 집중기와 초집중기의 하드웨어 복잡도 면에서 밀도의 향상 측면을 보여주고 있다. 이것은 기존의 집중기와 같은 효율적인 집중기 네트워트에 반영될 때 매우 중요한 요인으로 작용한다.

2. 팽창기를 이용한 초집중기

정의된 기본 팽창기는 $n(n=m^2)$개의 입력 노드와 출력 노드로 구성되며, 여기서 m은 정수이다. 각 입력 노드는 7개의 연결 함수들에 의하여 출력 노드로 연결되는데, 이들의 연결 형태는 각각의 연속적인 행과 열에서 이동(shift) 또는 역이동(shift-back)되는 형태로서 각 열과 행으로 왼쪽과 오른쪽으로 회전하듯이 연결된다 (여기서 + 는 모듈러(**mod**)를 의미한다).

$$\sigma_0(x, y) = (x, y)$$
$$\sigma_1(x, y) = (x, y+2x)$$
$$\sigma_2(x, y) = (x, y+2x+1)$$
$$\sigma_3(x, y) = (x, y+2x+2)$$
$$\sigma_4(x, y) = (x+2y, y)$$
$$\sigma_5(x, y) = (x+2y+1, y)$$
$$\sigma_6(x, y) = (x+2y+2, y)$$

우선, 하나의 집중기를 정의하고, 그것을 이용하여 초집중기를 구성하기위한 방법을 제시한다. 또한, 집중기를 구성하기 위한 팽창기의 적용 방법도 설명하고, 다음 절에서 팽창기를 기반으로 한 집중기의 구성에 있어서 향상된 방법이 보여진다. (n, θ, k)집중기는 n개의 입력과 θn개의 출력으로 구성되고, 그 입력으로부터 출력으로 연결되는 경로의 수가 kn을 넘지 않는 두 단계의 연결 네트워크이다. 이 네트워크의 특성은 $X \leq n/2$ 일 때 입력 X의 모든 집합에 대하여 그 집합의 각 입력은 다른 나머지의 입력의 출력과 공유함이 없이 최소한 하나의 출력에 연결경로를 갖는다. 여기서 θ는 1보다 작기에 이러한 특성은 최대로 $n/2$개의 활성화된 입력의 경로는 독립된 경로로 출력 경로에 연결 가능하고, 반면에, 사용되지 않는 $(1-\theta)n$개의 입력은 θn개의 출력경로로 연결되지 않는 것을 의미한다.

Pippenger[19]에 의하면 집중기(concentrator)로부터 초집중기(superconcentrator)를 구축하기 위해서는, 네트워크가 n개의 입력, n개의 출력으로 구성이 되며, 각각 입력 노드에 대응되는 각각의 출력 노드에 직접 연결되어야 한다. 더욱이 $A = B$일 때, 입력 A의 집합을 출력 B의 집합으로 순환적 방법에 의해 연결하기 위해서는 A의 입력을 직접 경로로 연결된 B의 출력과 연결한다. 만일, $A>n/2$ 이라면, 입력들에 있어서 최대 $n/2$개를 연결하기 위해 직접경로를 사용하는 것이 불가능할 것이다. 이 때 입력 측과 출력 측이 동일하게 반사(mirror image) 구조의 형태를 취하는 집중기(n, θ, k)를 통하여 연결 가능하다. 이와 같이 두 개의 구조 사이에서 단지 θn개의 입력과 θn개의 출력경로가 전체적인 초집중기(superconcentrator) 구조로 반복적으로 설정된다.

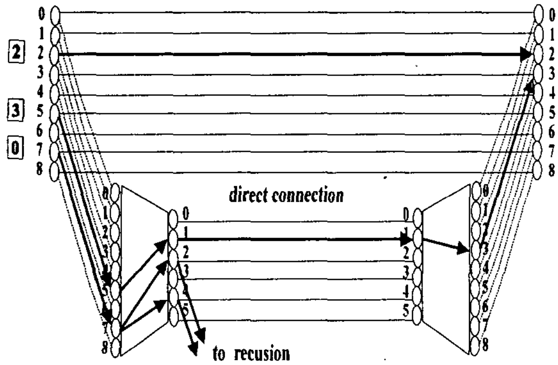


그림 1. 집중기를 이용한 순환적 초집중기의 구조

이 구조는 그림 1. 나타낸 것과 같이 직접경로가 존재하는 경우는 입력부분에서 출력부분으로 직접 연결되지만 직접경로가 존재하지 않을 경우는 집중기를 통하여 우회하여 경로설정이 이루어진다. 예를 들면 그림 1에서 입력노드 2, 5, 7이 출력노드 2, 3, 0로 연결이 이루어지도록 하기위하여 노드 2의 경우는 직접경로를 통하여 연결이 되지만 노드 5 와 노드 7의 경우는 직접적으로 노드 3과 노드 0으로 연결될 수 없기 때문에 아래에 있는 집중기를 통하여 연결이 되도록 구성한다. 따라서 다음 단에서도 직접경로가 있을 때까지 계속적으로 반복하게 된다. 이것이 바로 초집중기 구조인데 이 구조의 연결 경로의 수에 관한 전체 하드웨어 복잡도 $S(n)$은 아래의 식과 같이 표현된다.

$S(n)=n+2kn+ S(\theta n)$

위의 식을 $S(n)$에 관한 식으로 변환하면 식 (2)와 같다.

$$\frac{S(n)}{n}=\frac{2k+1}{1-\theta} \tag{1}$$

예를 들어, Pippenger의 $(n, 2/3, 6)$집중기에 이 공식을 적용하면 $S(n)=39n$이 산출된다. 그러한 집중기를 명확히 구축하기 위해서는 하나의 팽창기 (n, k, d)를 정의한다. 이 논문에서 사용될 (n, k, d) 팽창기는 n개의 입력과 n개의 출력을 가지며, 각 입력이 연결 경로에 의하여 kn개 출력으로 연결된 두 단계 네트워크 이다. 이러한 방식으로 선택된 연결경로는 $|X| \le n/2$ 만큼의 입력 X의 집합에 대하여 부등식 (2)에 따라 연결된 출력 $|\Gamma_X|$의 집합 형태로 구성된다.

$$|\Gamma_X| \ge \left[1 + d\left(1 - \frac{|X|}{n}\right)\right]|X| \tag{2}$$

다시 말하면, 부등식 (2)에서 사용된 d의 값에 따라 각 입력은 더욱 많은 출력에 연결될 수 있다. 이 구조의 하드웨어의 복잡도는 경로의 모든 수,(kn)에 의하여 결정된다.

팽창기로 구성된 집중기는 **part A**와 **part B**, 두 부분의 결합으로 구성될 수 있다. **part A**는 $\left(\left\lceil \frac{n'q}{q+1} \right\rceil, k, d\right)$ 팽창기이고, **part B**는 입력부분이 팽창기에 있어서 $\left\lceil \frac{n'q}{q+1} \right\rceil$개 출력에 독립된 q개의 경로를 갖도록 구성된다. 따라서 n'은 다음과 같이 결정된다:

$$n \ge \left\lceil \frac{n'q}{q+1} \right\rceil + \left\lceil \frac{n'}{q+1} \right\rceil \tag{3}$$

n이 증가함에 따라, $n'-n$은 작아지게 되고, 결국 $n' \cong n$이 된다.[9] 다음 절에서 집중계수 (q)의 특정한 범위에 대하여 이 구성이 $(n, q/(q+1), k)$ 집중기 임을 나타낸다. 이것을 증명하기위하여 다음 정리 1의 Hall's Matching Theorem[10]가 요구된다.(증명 없이 사용됨)

정리 1. n개의 입력 노드와 θn개의 출력 노드로 구성되고, X개의 입력 노드($|X| \le n/2$)가 n개의 입력 노드로부터 임의로 선택되어 고정된 연결 링크를 통하여 각 입력이 어떤 출력되는 두 스테이지 연결 네트워크가 주어진다면, X개의 출력 노드에 연결되는 출력의 수량은 적어도 $|X|$개와 같다. 이때, X로 연결 되는 모든 입력 노드는 독립된 출력 노드로 연결된다.(완전한 매칭)

위에서 정의된 네트워크가 $(n, q/(q+1), k)$ 집중기 임을 증명하기위하여 단지, 입력 집합 X의 모든 선택에 대하여 그것에 연결되는 출력 노드의 수는 적어도 $|X|$

개와 같다는 사실이 요구된다.

3. 팽창상수에 따른 집중기의 사이즈 정합

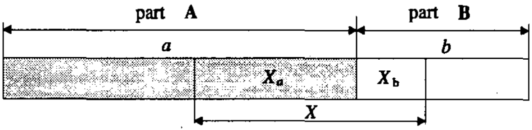


그림 2. 입력 노드의 부분 집합 구조

정리 2. 집중계수 (q)가 식,$(q^2+1)(q-1)/q^2 \ge 2/d$,를 만족한다면, 정의된 구조는 하나의 $(n, q/(q+1), k)$집중기이다.

증명: 그림 2.에서처럼 X의 집합을 **part A**와 **part B**로 나누고 그 각각의 부분 집합을 $X_a \subseteq X$와 $X_b \subseteq X$로 정의한다. 만일

$$X - b \ge \frac{X}{q}$$

그러면 **part B**의 각 입력은 q의 출력에 독립된 경로를 갖기 때문에 **part B**는 이 정리를 만족한다. 즉:

$$\Gamma_X \ge \Gamma_{X_b} = q X_b \ge q\frac{X}{q} = X$$

part A의 경우, 다음과 같은 식을 얻는다.

$$X_b < \frac{X}{q} \rightarrow X - X_b = X_a >$$

$$X - \frac{X}{q} = \frac{q-1}{q} X$$

따라서,

$$\Gamma_{X_a} \ge 1 + d\left(1 - \frac{X_a}{\tilde{n}}\right) X_a$$

여기서, $\tilde{n} = qn/(q+1)$. 식(5)가 다음 조건식 (6)과 (7)에 따라 증명되어야 한다.

$$\Gamma_X \ge \Gamma_{X_a} \ge X \rightarrow \frac{\Gamma_{X_a}}{X} \ge 1 \qquad (4)$$

또는

$$\frac{\Gamma_{X_a}}{X} \ge \frac{[1 + d(1 - X_a/\tilde{n})]}{X} \qquad (5)$$

조건식은

$$X \le n/2 \qquad (6)$$

와

$$X_a \le \tilde{n}/2 \qquad (7)$$

이다. 부등식(7)의 조건은 **part A**의 팽창기가 X_a 의 값에 대한 팽창성을 보장하기 위한 조건이다. 부등식(6)과 (7)에 따라 부등식(5)에서 Γ_{X_a} 의 최소값을 찾기 위해 X_a 의 관하여 미분을 구하면, 최대값은 구간 밖에서 발생하고, X_a 가 식(8)과 같을 때 최소값을 구할 수 있다.

$$X_a = \frac{q-1}{q} X \qquad (8)$$

위의 식으로부터

$$\Gamma_{X_a\,\min} \ge 1 + d\left(1 - \frac{(q-1)\,X/q}{\tilde{n}}\right) \frac{q-1}{q} X \,/\, X \qquad (9)$$

을 얻는다. 이것은 다음 식으로 변환된다.

$$\frac{\Gamma_{X_a\,\min}}{X} \ge 1 + d\left(1 - \frac{(q-1)\,X/q}{\tilde{n}}\right) \frac{q-1}{q} \qquad (10)$$

식(10)에 $\tilde{n}$=qn/(q+1)을 대입하면

$$\frac{\Gamma_{X_a \min}}{X} \geq$$

$$1 + d(1 - \frac{(q-1)\ X\ /q}{qn/(q+1)})\ \frac{q-1}{q} \quad (11)$$

을 얻는다. $X = n/2$의 값에 일치하는 $\Gamma_{X_a \min}$의 최소값을 찾으면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$\frac{(q^2+1)(q-1)}{q^2} \geq \frac{2}{d} \quad (12)$$

그러므로, 부등식(12)를 만족하는 q의 값을 선택하면 부등식(4)를 만족하게 되어 정리 2를 만족시킨다.(**증명 끝**)

이전 결과에 비하여 부등식(12)는 새로운 결과이며, 부등식 (10)은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\Gamma_{X_a \min}}{X} \geq\ 1 + d(1 - \frac{X_a}{\tilde{n}})\ \frac{q-1}{q} \quad (13)$$

X_a 의 최대값은 $\Gamma_{X_a \min}$의 최소값을 산출하기에 부등식(7)의 조건에 따라 $X_a = \tilde{n}/2$를 적용하면 다음 식이 유도된다.

$$\frac{\Gamma_{X_a \min}}{X} \geq\ 1 + d(1 - \frac{\tilde{n}/2}{\tilde{n}})\ \frac{q-1}{q} \quad (14)$$

이 식을 간소화 하면

$$q \geq 1 + \frac{2}{d} \quad (15)$$

이 식은 식(8)을 만족하는 것이 불가능하므로 q의 더 큰 값을 산출할 수 있다. 또한 부등식 (6)을 만족한다면, $X_a = \frac{\tilde{n}}{2}$을 갖는다.

$$X_a = \frac{\tilde{n}}{2} = \frac{q-1}{q} X \quad (16)$$

식(16)은 다음을 의미한다.

$$X = \frac{q}{q-1} \cdot \frac{\tilde{n}}{2} = \frac{q^2}{q^2-1} \cdot \frac{n}{2} \geq \frac{n}{2} \quad (17)$$

부등식 (12)와 (15)의 결과에 따라 집중계수(q)와 팽창상수(d)의 관계를 그림 3의 그래프에 나타내었다. 이 식들은 매우 적게 향상된 면을 보이지만, d의 값이 상승하면 그 것의 차이는 중요한 결과로 나타내질 수 있다. Pippenger[24]의 입증을 볼 때, 집중기의 구성이 팽창기를 고려한다면 q=2 와 일치하게 된다. 이것으로부터 부등식(13)을 이용하면 d=1.6일 때 식 (15)에서 $q \geq$ 2.25를 갖게 된다.

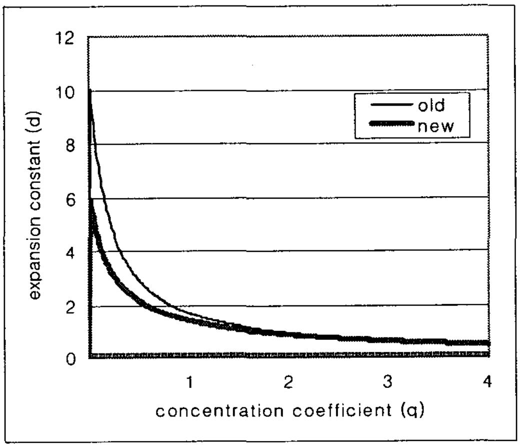


그림 3. 집중계수 q 값에 따른 팽창상수 d의 변화

이러한 q의 값은 직접적으로 초집중기의 밀도(Density)에 영향을 미친다. Gabber와 Galil의 식을 이용하면 k=5와 $d=(2-\sqrt{3})/4$ 그리고 q=30.856404일 때 초집중기의 밀도는 다음과 같다:

$D=(2k+3)q+1=(2*5+3)*30.8564+1=402.13$

향상된 식을 사용하여 q=30.8251을 적용하면

$D=(2k+3)q+1=(2*5+3)*30.8251+1=401.7263$

Gabber와 Galil는 또한 k=7와 $d=(2-\sqrt{3})/2$일 때 q=15.9282와 D=271.78을 얻었다. 향상된 식을 사용하면, q=15.8692와 D=270.777을 얻을 수 있다. 보다 최근 결과로서, Alon과 Galil는 k=9와 d=0.41173759로 팽창기를 구성했다. 이는 q=5.8574와 D=124.006을 나타내

지만 새로운 식을 적용하면 q=5.71309와 D=120.975 로 구성할 수 있다. 그림 3에 나타난 것처럼 이러한 작은 개선이 d가 증가될 때 매우 중요한 개선이 될 수 있다.

4. 결 론

본 논문은 팽창기를 이용하여 집중기와 초집중기의 하드웨어 복잡도를 밀도로 표현할 때 성능이 향상되었음을 입증한다. 즉, d=1.6일 때를 기준으로 12.5% 정도가 증가되었다. 이러한 밀도의 향상은 Pippenger의 집중기와 같은 가장 효율적인 집중기 네트워트에 반영 될 때 매우 중요한 요인으로 작용한다. 이 논문에서 제시된 밀도가 팽창기를 이용하여 구성될 때 최적의 집중기로 구성되었는지는 입증해야 될 또 다른 문제로 남아있지만, Pippenger가 구성한 방법으로 하드웨어를 구성한다면 이 결과는 실질적으로 매우 중요성을 나타내고 있다. 또한 위의 결과는 [2]와 [9]에 제시된 구조에 한정되는 것이 아니라, 모든 팽창기에 적용될 수 있다. 따라서 이 결과는 현재 또는 미래의 병렬 컴퓨터 산업에 있어서 병렬 컴퓨터 구조에 관한 지속된 기초 연구에 영향을 미칠 것이다. 지속적으로 다양화하는 정보산업의 발달 속에 병렬 컴퓨터의 중요성이 점차 확산되고 있는 현실에서 본 연구의 잠재적 영향은 매우 중요하다고 인식된다.

참 고 문 헌

[1] M. Ajtai, J. Komlos and E. Szemeredi, "Sorting in clogn Parallel Steps," Combinatorica, Vol.3, No.1, pp. 1-19, 1983.

[2] N. Alon and V. D. Milman, "Eigenvalues, expanders and superconcentrators," Proc. 25th Annual IEEE Symp. on Foundations of Comp. Sci., pp. 320-322, 1984.

[3] N. Alon, Z.Galil and V. D. Milman, "Better Expanders and Superconcentrators," Journal of Algorithms 8(1987), pp. 337-347, 1987.

[4] K. E. Batcher, "Sorting networks and their applications," in Proc. of 1968 Spring Joint Computer Conference, pp. 307-314.

[5] V. E. Benes, Mathematics Theory of Connecting Networks and Telephone Traffic, Academic Press Pub. Company, 1965.

[6] C. Clos, "A study of non-blocking switching networks," Bell. Syst. Tech. J., Vol.32, pp. 406-424, 1953.

[7] F. R. K. Chung, "On Concentrators, superconcentrators, generalizers and nonblocking networks," Bell System Tech. J. 58, pp. 1765-1777, 1978.

[8] R. Cypher and G. Plaxton, "Deterministic Sorting in Nearly Logarithmic Time on the Hypercube and Related Computers," Proceedings of the Twenty-Second Annual ACM Symposium on the Theory of Computing, pp. 193-203, 1990.

[9] O. Gabber and Z. Galil, "Explicit construction of linear sized superconcentrators," J. Comput. Sys. Sci. Vol.22, pp. 407-420, 1981.

[10] P. Hall, "On representatives of subsets," Journal of the Londin Mathematical Society, Vol.10, pp. 26-30, 1935.

[11] D. M. Koppelman and A. Y. Oruc, "A self-routing permutation network," Proceedings, 1989 International Conference on Parallel Processing, 1989.

[12] M. Garey, F. Hwang and G. Richards, "Asymptotic Results for Partial Concentrators," IEEE Trans. on Communications, Vol.36, No.2, pp. 214-217, 1988.

[13] Sh. Jimbo and A. Maruoka, "Expanders obtained from affine transformations," Proc. 7th Annual ACM Symposium on Theory of Computing, pp. 88-97, 1985.

[14] F. T. Leighton and B. M. Maggs, "Fast algorithms for routing around faults in multibutterflies and randomly-wired splitter networks," IEEE Trans. Comput., Vol.C-41, No.5, pp. 324-332, 1981.

[15] C. E. Leiserson, "Fat-Tree: Universal networks for hardware-efficient supercomputing," IEEE Transactions on Computers, Vol.C-34, No.10, pp. 892-901, 1985.

[16] G. A. Magulis "Explicit construction of concentrators," Problemy Peredachi Informatsii, 9(4), 1973, 71-80; (English translation in Problems of Inform. transmission, pp. 325-332, 1975.

[17] S. Nakamura and G. Masson, "Lower Bounds on Crosspoints in Concentrators," IEEE Trans. on Computers, Vol.C-31, No.12, pp. 1173-1178, 1982.

[18] D. Nassimi and S. Sahni, "Parallel permutation and sorting algorithms and a New Generalized Connection Network," Journal of ACM, Vol. 29. No. 3, pp. 642-667, 1982.

[19] D. Nassimi and S. Sahni, "Parallel algorithms to set up the Benes permutation network," IEEE Trans. Comput., Vol.C-31, No.2, pp. 148-154, 1982.

[20] B. Park, "Improved Bounds on Linear Size Expander," Proc. First International Conference on Massively Parallel Computing Systems, pp. 96-101, 1994.

[21] B. Park, "Bounds on Linear Expander Based Superconcentrators," Proc. Of the 6th Transputer /Occam International Conference, Vol.39, pp. 170-182, 1994.

[22] M. S. Paterson, "Improved sorting networks with depth," Algorithmica, Vol.5, pp. 75-92, 1990.

[23] M. S. Pinsker, "On the Complexity of a concentrator," Proc. 7th International Teletraffic Conference, pp. 318/1-318/4, 1973.

[24] N. Pippenger, "Superconcentrators," SIAM J. Comput., pp. 298-304, 1977.

[25] H. S. Stone, "Parallel processing with the perfect shuffle," IEEE Trans. Comput., Vol.C-20, pp. 153-161, 1971.

[26] E. Upfal, "An O(logN) Deterministic Packet routing Scheme," Twenty-first Annual ACM Symposium on the Theory of Computing, pp. 241-250, 1989.

[27] L. G. Valiant, "On Nonlinear Lower Bounds in Computational Complexity," Proc. 7th Annual ACM Symposium on Theory of Computing Albuquerque, pp. 45-53, 1975.

[28] L. G. Valiant and G. Brebner, "Universal schemes for parallel communication," Proc. 13th Annual ACM Symposium on Theory of Computing Albuquerque, pp. 263-277, 1981.

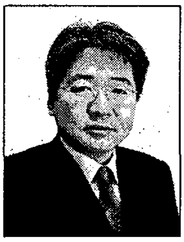
저 자 소 개

박 병 수(Byoung-Soo Park) 정회원

- 1986년 : 한양대학교 전자공학과 (공학사)
- 1989년 : 한양대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1994년 : 텍사스 A&M(공학박사)
- 1995년~현재 : 상명대학교 컴퓨터시스템공학과 교수

<관심분야> : 임베디드 시스템, 병렬 알고리즘

조 태 경(Tea-Kyung Cho) 정회원



- 1984년 : 한양대학교 전자통신공학과(공학사)
- 1986년 : 한양대학교 전자통신공학과(공학석사)
- 2001년 : 한양대학교 전자통신공학과(공학박사)
- 2003년~현재 : 상명대학교 정보통신공학과 교수

<관심분야> : 초고속정보통신망, e-Learning