

드와 동료 집단 가운데 존재하는 가상의 핵(nucleus) 사이에 하나씩의 정보를 유지하므로, 정보량은 $O(N)$ 으로 경계노드의 수에 비례하고 정확성은 앞의 두 방법의 중간쯤어서 가장 널리 사용된다.

표준 방법들을 개선하기 위한 제안으로 대칭망에서는 신장 트리 방법[2]이, 비대칭망에서는 Lee의 비대칭망 방법[3,4]이 있다. 이 중 신장 트리 방법은 대칭망에서만 사용할 수 있으므로 앞으로는 언급하지 않으며, Lee의 비대칭망 방법은 완전 그물망 정보 중에서 어떤 링크로 직접 연결된 두 경계노드 사이에 그 링크를 사용하지 않고도 더 나은 조건을 가진 다른 경로가 있으면 그 링크를 삭제하는 방법이다. 삭제된 정보는 필요할 경우 나머지로부터 복원할 수 있는데, 그 계산 복잡도가 정보를 축소할 때나 복원할 때 각각 $O(N^3)$ 이나 된다[4,5].

3. 셔플넷 집단화

셔플넷(shufflenet) 집단화 방법은 완전 그물망 정보를 셔플넷 형태로 바꾸어 전송하고, 전달받은 다른 그룹의 노드는 필요할 경우 이 셔플넷 정보로부터 완전 그물망을 복원해내는 방법이다.

하나의 셔플넷은 p 와 k 두 개의 인자로 표현되는데, (p, k) 셔플넷은 총 $N=kp^k$ 개의 노드를 한 열에 p^k 개씩 총 k 개의 열에 늘어놓고 각 노드로부터 p 개의 링크가 다음 열의 노드들로 연결된다. 단, 마지막 열의 노드에서 출발한 링크는 맨 첫 번째 열의 노드로 순환되는 형태를 가진다. 다음 열 노드 중에서 어느 노드에 연결되는가는 일정한 규칙이 있는데 상세한 것은 [6]을 참조하기 바란다. 그림 1의 (a)는 (2,2) 셔플넷의 예이다.

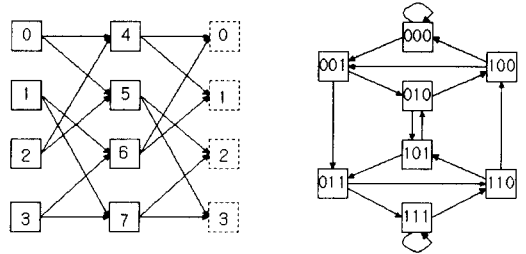
셔플넷 구조는 다음과 같은 이유로 상태 정보 집단화에 유리하다. 첫째, 셔플넷은 임의의 노드에서 모든 다른 노드로의 방향성 있는 연결을 제공할 수 있으므로, 비대칭망의 집단화에 적합하다. 둘째, 경계노드 수 $N=kp^k$ 일 때 링크의 수가 pN ($p \ll N$) 개에 불과하므로 완전 그물망의 경우보다 확장성이 있고, 마지막으로 모든 노드간의 연결이 $(2k-1)$ 홑으로 제한되므로 지연 시간이 크지 않다.

셔플넷 방법은 각 동료 집단의 실제 구조로부터 완전 그물망을 구성한 후 각 경계노드를 셔플넷 노드에 사상시켜 셔플넷 형태로 바꾼다. 이때 자연히 $N(N-1)$ 개의 링크 중에서 pN 개만 남게 되고, 이를 외부 동료 집단에 전송하면, 외부에 있는 노드는 필요한 경우 이 셔플넷 정보로부터 완전 그물망을 재구성해 낸다. N 개의 완전 그물망 노드를 셔플넷 노드로 사상하는 방법은 총 $pN = N!$ 이나 되므로 적절한 휴리스틱 알고리즘이 필요한데, 대역폭 정보의 정확성을 유지하는데 초점을 둔 방법, 지연 시간 정보의 정확성에 초점을 둔 방법, 그리고 두 가지를 절충한 방법이 [7]에 제안되어 있다. 이 알고리즘들의 계산 복잡도는 $O(N^2 \log N)$ 이고, 셔플넷에서 완전 그물망을 재구성할 때의 복잡도는 $O(N^3 / (pk^2))$ 이다[5].

셔플넷의 노드 수는 언제나 $N=kp^k$ (p, k 는 정수)로 표현되어야 하므로, 한 동료 집단의 경계노드의 수와 일치하지 않을 수가 있다. 따라서, 우리가 제한한 모든 휴리스틱 알고리즘은 셔플넷 노드가 경계노드보다 같거나 짧게 정한 후 하나의 경계노드를 여러 개의 셔플넷 노드에 할당할 수 있도록 했다 [5,7]. 여러 번 할당되는 경계노드의 경우는 실제로 그 노드가 가지고 있는 링크 상태 정보가 셔플넷 정보에 많이 남아있게 되므로, 정보의 정확성을 향상시키는 결과를 가져온다.

4. de Bruijn 집단화

셔플넷 방법은 노드 수가 $N=kp^k$ 으로 표현되므로, 어떤 경우 경



(a) (2, 2) shufflenet (b) (2, 3) de Bruijn

그림 1 셔플넷과 de Bruijn 그래프

계노드의 수가 하나 늘어났을 뿐인데도 필요한 셔플넷 노드의 수는 갑자기 커질 수가 있다. 예를 들어 경계노드의 수가 여덟 개일 때는 (2,2) 셔플넷으로 표현할 수 있고 포함되는 링크의 수는 16개에 불과하지만, 아홉 개가 되면 (3,2) 셔플넷으로 표현해야 하고 포함되는 링크 수도 54개로 갑자기 늘어난다. 물론, 이 경우에도 완전 그물망에서 필요로 하는 72개의 링크보다는 적고 정보의 정확성이 완전 그물망과 거의 일치하지만, 셔플넷 대신 de Bruijn 집단화를 사용하면 27개의 링크만으로 표현이 가능하다.

셔플넷과 마찬가지로 de Bruijn 그래프도 두 개의 인자 (Δ, d) 로 표현되는데, 전체 노드의 수가 $N=\Delta^d$ 로서 $N=kp^k$ 인 셔플넷보다 더 다양한 개수의 노드를 가질 수 있으므로, 경계노드 수의 변화에 좀 더 효율적으로 대처할 수 있다. de Bruijn 그래프 각 노드는 0부터 $(\Delta - 1)$ 까지의 숫자로 이루어진 d 자리의 수를 고유 식별자로 가지고, 자기 식별자의 두 번째 자리 숫자부터 끝까지가 어떤 노드 식별자의 첫 번째 자리 숫자부터 마지막 바로 직전 숫자까지와 일치하면 해당 노드로 링크를 연결한다. 따라서, 각 노드는 Δ 개의 출력 링크를 가지며 총 링크의 수는 ΔN 개가 된다. 셔플넷에서는 두 노드 사이의 경로가 k 홑이 넘을 경우에는 복수 개의 경로가 존재해서 그 중 더 나은 경로를 택하게 되지만, de Bruijn 그래프에서는 라우팅 특성상 두 노드 사이에는 무조건 단 하나의 경로만 존재하게 되고, 경로의 최대 홑 수는 d 로 제한된다. de Bruijn 그래프의 보다 상세한 특성은 [6]을 참조하기 바라고, (2,3) de Bruijn 그래프의 예가 그림 1 (b)에 있다.

de Bruijn 그래프 방법에서는 완전 그물망 정보를 de Bruijn 그래프로 바꾸어 이 그래프에 나타난 링크 정보만을 전송하고, 필요한 경우 여기서 완전 그물망을 재구성한다. 완전 그물망의 경계노드를 de Bruijn 그래프 노드로 사상하는 방법은 셔플넷의 경우와 거의 비슷하지만, de Bruijn 그래프에서는 식별자의 모든 숫자가 같은 Δ 개의 노드가 사이클을 가지므로 주의해야 한다. 이 방법에서도 하나의 경계노드를 여러 번 할당할 수 있도록 해서 경계노드 수와 de Bruijn 그래프의 노드가 일치하지 않을 수 있는 문제를 해결했다.

계산 복잡도는 완전 그물망을 de Bruijn 그래프로 축소할 때 $O(N^2 \log N)$, 다시 복원할 때 $O(N^2)$ 이다.

5. 실험 및 분석

지수 분포를 이용하여 대역폭 평균이 622Mbps인 링크와 30개의 노드로 이루어진 망 50개를 구성하고, 경계노드의 수를 4개부터 30개까지 변화시켜 가며 별모양 방법, 셔플넷 방법, de Bruijn 방법 정보의 정확성을 완전 그물망을 기준으로 비

교하였다 (그림 2,3). 그림에서 BW또는 DLY로 표시된 것은 완전 그물망 정보를 서플넷이나 de Bruijn 그래프로 축소할 때 각각 대역폭 정보와 지연 시간 정보만을 고려한 경우이고, BW-DLY로 표시된 것은 두 가지를 동시에 고려한 경우이다.

대역폭 정보의 경우 별모양 방법은 경계노드 수가 많아짐에 따라 급격히 부정확해지는 반면, 서플넷과 de Bruijn 방법은 각 그래프의 노드 수를 경계노드 수에 맞게 조절하여 완전 그물망에 가까운 정확성을 항상 유지할 수 있다. 예를 들어, 서플넷 그래프에서 경계노드 수가 24개가 될 때까지는 계속 정확성이 낮아지다가 25개가 되면, 그 전까지 사용하던 (2,3) 서플넷을 버리고 (4,2) 서플넷으로 바꾸면서 정확성이 향상되는 것을 볼 수 있다. 이는 (2,3) 서플넷의 총 노드 수가 24개로 경계노드 수와 정확히 일치하여 각 경계노드가 서플넷에 한 번씩밖에 나타날 수 없는 반면, (4,2) 서플넷은 노드 수가 32개이므로 25개의 경계노드 중 7개는 서플넷에 한 번씩 더 나타날 수 있기 때문이다. 이 7개의 노드는 그렇지 않으면 생략되어야 할 정보를 서플넷에 나타날 수 있게 해 준다. de Bruijn 방법에서도 똑같은 현상을 관찰할 수 있다.

한편, 지연 시간 정보의 경우에는 별모양 방법이 정확하지만, 이 방법은 대부분의 경우 대역폭 정보의 정확성이 40% 이하에 머문다는 사실을 간과해서는 안 된다. 또한, 서플넷과 de Bruijn 그래프에서 임의의 두 노드 간 경로의 최대 홑 수는 각각 $(2k-1)$ 과 d 가 되므로, k 와 d 값을 일정한 값 이내로 제한하면 지연 시간 정보의 정확성을 향상시킬 수 있다. 예를 들어, 서플넷 방법에서 경계노드 수가 19개 이상 24개 이하인 경우 그래프 상에 나타난 값은 (2,3) 서플넷을 사용한 경우이다. 만일, (2,3) 서플넷의 지연 시간 정보가 필요로 하는 정확성을 가지지 못한다고 판단되면, k 를 2로 제한하여 (4,2) 서플넷을 대신 사용할 수 있다. (2,3) 서플넷을 사용할 때는 대역폭 정보의 정확성이 71.79%(경계노드가 24개일 때)에서 84.60%(경계노드 19개), 지연 시간 정보는 2.49(경계노드 24개)에서 1.91(경계노드 19개)의 값을 나타내던 것이 (4,2) 서플넷을 사용했을 때는 대역폭 정보가 92.54%에서 96.25%, 지연 시간 정보는 완전 그물망의 값에 1.42에서 1.26배 정도로 향상되었다. 물론, 이 경우 포함해야 하는 링크의 수는 좀 더 많아지지만, 완전 그물망과 비교해서는 훨씬 적다.

서플넷과 de Bruijn 그래프에서 각각 사용한 세 가지 알고리즘, 즉 대역폭 위주의 방법, 지연 시간 위주의 방법, 그리고 두 가지 모두를 고려한 방법을 서로 비교하면, 크게 차이가 나지는 않지만 경계노드 수가 10개 이상이 되면 두 가지 모두를 고려한 방법이 2-5% 정도 나은 성능을 보였다. 서플넷과 de Bruijn 그래프를 서로 비교했을 때는 서플넷이 좀 더 정확한 값을 보이는데, 이는 서플넷의 경우 두 노드 간의 여러 경로 중에 나은 것을 선택할 수 있는 반면 de Bruijn 그래프에서는 무조건 한 경로만 주어지기 때문이다. 그러나, 같은 이유로 계산 복잡도에 있어서는 de Bruijn 방법이 유리하다.

6. 결론

본 논문에서는 완전 그물망 집단체 방법의 비확장성과 별모양 방법의 부정확성, 그리고 Lee의 비대칭망 방법의 계산 복잡성을 해결하기 위해 서플넷 방법과 de Bruijn 방법을 제안하였다. 두 가지 방법은 $aN(a \ll N)$ 개의 링크 정보만 유지하면 되므로 $O(N^2)$ 의 링크 정보가 필요한 완전 그물망 보다 확장성이 있으며, 대역폭 정보의 정확성 면에서도 가장 널리 사용되는 별모양 방법보다 2배 이상 우수하고 완전 그물망 정보에 근접한다는 것을 실험을 통해 알 수 있었다. 지연 시간 정보의 경우에는 망 관리자의 선택에 따라 링크 정보의 양을 조금 더 늘

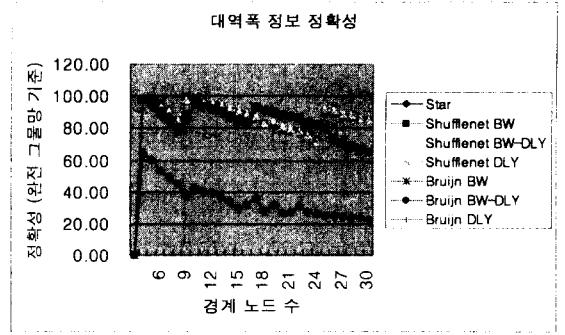


그림 2 대역폭 정보의 정확성 비교

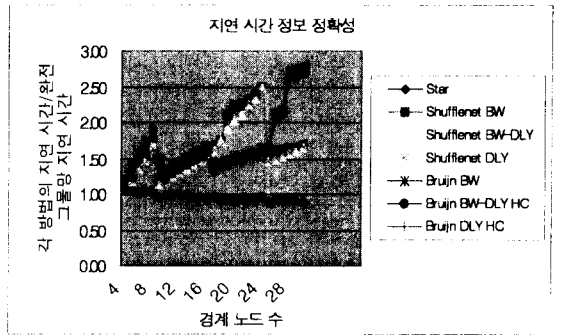


그림 3 지연 시간 정보의 정확성 비교

려서 완전 그물망 방법의 1.5배 이내로 제한할 수 있었다.

7. 참고 문헌

- [1] The ATM Forum, *Private Network-Network Interface Specification Version 1.0 (PNNI 1.0)*, 1996.
- [2] W. C. Lee, "Spanning Tree for Link-State Aggregation in Large Communication Networks", In *Proceedings of IEEE INFOCOM*, pages 297-302, 1995.
- [3] W. C. Lee, "Topology Aggregation for Hierarchical Routing in ATM Networks", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol 25, no. 2, pp. 82-92, Apr. 1995.
- [4] W. C. Lee, "Minimum Equivalent Subspanner Algorithms for Topology Aggregation in ATM Networks", In *Proceedings of the 2nd International Conference on ATM*, 1999, pp. 351-359.
- [5] Y. Yoo, S. Ahn, and C. S. Kim, "Link State Aggregation Using a Shufflenet in ATM PNNI Networks", Accepted for publication in *Proceedings of IEEE GLOBECOM*, November 2000.
- [6] B. Mukherjee, *Optical Communication Networks*, McGraw-Hill, 1997.
- [7] Y. Yoo, S. Ahn, and C. S. Kim, "A Topology Aggregation Scheme for Asymmetric Link Parameters in ATM Networks", Submitted to *Proceedings of IEEE INFOCOM*, 2001.