

## 리플렉티브 메모리 방식의 통신망으로 개발된 ERCNet의 구조와 실험을 통한 성능 검증

최재영, 백일주, 김형석, 권옥현  
서울대학교 전기공학부

이성우, 김석곤, 송성일  
한국 전력 연구원

### Architecture and Performance Evaluation of Reflective Memory based network, ERCNet

Jae Young Choi, Il Joo Baek, Hyung Seok Kim, Wook Hyun Kwon, Sung Woo Lee, Seok Gon Kim, Sung Il Song  
School of Electrical Engineering, Seoul National University      Korea Electric Power Research

**Abstract** - 본 논문에서는 리플렉티브 메모리 방식의 산업용 통신망으로 개발된 ERCNet(Ethernet based Real-time Control Network)에 대해서 설명한다. ERCNet은 기존의 리플렉티브 메모리 방식의 네트워크에 비교하여 속도가 빠르고 데이터 처리량이 많다. ERCNet은 갈수록 데이터 양이 증가하고 있는 산업 환경에 적합하도록 만들어졌다. 본 논문에서는 ERCNet의 전체적인 구조와 성능향상을 위해 고안된 기기들에 대해서 설명하고, ERCNet의 성능 척도에 대해 수학적 분석을 행한다. 마지막으로 ERCNet의 성능에 대한 수학적 분석 결과 수식에 대해 실험을 통해 정확성을 검증한다.

이 ERCNet(Ethernet based Real-time Control Network)이다. ERCNet은 산업 환경의 분산 제어 시스템(Distributed Control System)의 통신망으로 사용할 수 있도록 개발되었으며, 원자력 발전소용 분산 제어 시스템의 통신망으로 사용될 예정이다. ERCNet은 결정적인 동작성과 빠른 속도, 큰 처리 용량을 가진다. 본 논문에서는 자동 반사 공유 메모리 방식의 통신망인 ERCNet의 구조와 ERCNet이 빠른 속도를 위해서 사용한 기기에 대해서 설명하고, ERCNet의 동작에 대한 수학적 분석과 그 결과로 나온 수식이 합당함을 실험을 통해 보여준다.

### 1. 서 론

산업 환경에서 각각의 기기들이 서로 데이터를 전달하기 위해 쓰이는 기술로 분산 공유 메모리(Distributed Shared Memory) 방식이 있다. 분산 공유 메모리 방식의 특화된 기술로 리플렉티브 메모리(Reflective Memory) 방식의 시스템이 있는데 이는 전체 네트워크가 일정한 공유 메모리를 가지고 자신의 고유한 메모리 영역에 데이터를 쓰면 전체 네트워크가 이를 공유할 수 있는 방식의 네트워크 시스템이다.

분산형 공유 메모리(Distributed Shared Memory; DSM)방식의 통신망이란 공유 메모리 시스템처럼 동일한 주소 공간을 사용, 메모리를 여러 노드에 분산 배치해서 노드간 통신을 줄이고 시스템의 확장성을 증대시키는 통신망이다. DSM 방식의 통신망은 크게 하드웨어적 DSM 통신망과 소프트웨어적 DSM 통신망으로 나뉜다.

자동 반사 공유 메모리(Reflective Memory) 통신망은 하드웨어적 DSM 통신망의 한 종류로 한 노드에 새로운 데이터가 갱신되면 그 순간에 반사적으로 다른 노드들에게 데이터를 브로드캐스팅하는 통신망이다. 결과적으로 모든 노드들은 서로의 데이터를 공유하게 되어 통신망의 안정적인 운용과 제어를 보장하게 된다.

이러한 자동 반사 공유 메모리(Reflective Memory; RM) 통신망 방식은 분산된 노드 사이의 데이터 공유를 위한 시스템으로서 산업 환경에서 많이 이용되는 분산 제어 시스템(Distributed Control System)의 통신으로 적용될 수 있다. Systran사에서 개발된 SCRAMNet+는 하드웨어 기반의 자동 반사 공유 메모리 시스템으로서 실제로 분산 제어 시스템의 통신망으로 사용되고 있으며, 링 토폴로지를 사용하고 제한된 시간안에 네트워크 상의 모든 노드에 데이터를 복사한다.[1] 이외에도 RM 방식 통신망에는 많은 종류가 있으나 이러한 하드웨어 기반 자동 반사 공유 메모리 통신망들은 공유할 수 있는 메모리 크기가 작고, 전용의 하드웨어를 사용하기 때문에 값이 매우 비싸다는 단점이 있다.[1] 산업 환경에서 쓰이는 데이터의 양이 갈수록 많아져 가고 있는 추세이기 때문에 이러한 단점을 보완할 필요가 있다.

이러한 자동 반사 공유 메모리(Reflective Memory) 방식 통신망의 단점을 보완하여 속도가 빠르고 처리 용량이 크도록 개발한 자동 반사 공유 메모리 기반의 통신망

본 논문의 2장에서는 자동반사공유메모리 통신망에 대해 간략히 소개하고 ERCNet의 구조에 대해 설명한 다음 ERCNet의 성능에 대한 수학적 분석을 행하고 이를 실험치를 통해 검증한다. 그리고 3장 결론에서 논문을 요약하고 마치도록 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 자동 반사 공유 메모리(Reflective Memory) 통신망

RM 통신망은 하드웨어적 DSM 통신망의 한 종류로 공유 메모리 통신망과 분산형 공유 메모리 통신망의 장점을 모두 가지고 있다. DSM 통신망은 소프트웨어적 DSM 통신망과 하드웨어적 DSM 통신망으로 나누어지는데, 소프트웨어적 DSM 통신망은 각 노드별로 지역 메모리를 관리하고 전체적인 가상 메모리 주소 공간에 의거하며 메시지 교환을 통해 일관성을 유지하는 구조로 공유 메모리 시스템의 장점과 메시지 전송 시스템의 장점을 통합한 구조이다. 반면, 하드웨어적 DSM 통신망은 각각의 메모리가 노드에 분산되어 있지만 통신망 전체는 하드웨어적으로 동일한 주소 공간에 의거하여 일관성을 유지하여 프로그래머와 사용자에게 투명성을 제공한다.

RM 통신망의 경우 한 노드에서 다른 노드의 새로운 데이터를 요구할 때, 통신망에서 공유된 데이터는 모든 노드의 RM영역에 존재하기 때문에 요구 노드는 별도의 데이터 요구 메시지 전송 없이 필요한 데이터를 실시간으로 사용할 수 있다. 즉, 모든 노드들은 각각의 지역 메모리를 가지고 있지만 결과적으로 하나의 공유메모리에 연결된 형태로 통신을 하게 된다.[2] RM 통신망은 물리적으로 듀얼 포트 메모리를 사용하며 이 메모리를 논리적으로 전역 공유 어드레스에 맵핑하여 사용한다. 이 통신망에서 데이터의 갱신은 여러 다른 종류의 토폴로지를 통해 이루어 질 수 있으며 갱신 데이터의 크기 또한 가변적으로 정할 수 있다.

#### 2.2 ERCNet 아키텍처

ERCNet은 RM 방식의 통신망으로서 링형 토폴로지를 가지며 각 노드들은 자기만의 데이터 영역을 가짐과 동시에 다른 모든 노드에 대한 메모리 영역을 가지게 된다. ERCNet의 노드들은 자신의 데이터를 다른 모든 노드에게 브로드캐스팅하여 전체 노드가 전체 노드에 대한

데이터를 가지고 있도록 한다.

ERCNet은 원자력 발전소용 DCS 통신망으로 사용되며 결정적인(Deterministic) 동작을 하고 속도가 빠르며 큰 용량을 가져야 하고 가격이 낮게 구성되어야 한다. 이러한 특징을 위해 설계된 ERCNet의 아키텍처에 대해 설명한다.

### 2.2.1 패스트이더넷

ERCNet은 물리매체로 광 케이블(Optical Fiber)을 사용하고 물리계층으로 패스트 이더넷을 사용한다. 패스트 이더넷은 현재 가장 널리 쓰이고 있는 물리계층 프로토콜 중 하나로써 가격이 저렴하고 오랫동안 사용되어 왔기 때문에 안정성 면에서 검증이 되어있으며 유지보수성이 높다. 패스트 이더넷은 기본적으로 100Mbps의 속도를 지원하며 이러한 속도는 기존의 RM 통신망의 속도 중에서도 높은 것이다. ERCNet에서는 유지보수성을 높이기 위해 링형 토폴로지를 구현하게 되는데 이를 위해 전이중 방식(Full-duplex) 모드로 물리계층을 구성한다. 패스트 이더넷에서 쓰이는 CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access/Collision Detection) 방식에서는 충돌 감사를 하기 때문에 실제로 100Mbps의 대역폭이 나오지는 않는다. 하지만 전이중 방식에서는 CSMA/CD를 통한 충돌 감사가 필요없기 때문에 100Mbps의 대역폭을 모두 활용하게 된다.

### 2.2.2 토큰

ERCNet은 결정론적인 동작을 위해 FDDI나 IEEE 802.4와 같이 토큰 프로토콜을 사용한다. ERCNet에서는 전체 네트워크에서 매니저 스테이션이 네트워크 초기화 시 토큰을 생성하며 이를 다음 스테이션으로 전달하게 된다. 각 스테이션은 토큰을 받았을때만 전송권한을 가지게 되고 각 스테이션은 토큰을 받은 후에 자신이 보내고자 하는 데이터를 전체 스테이션에 브로드캐스팅하고 다음 스테이션으로 토큰을 전달하게 된다. 이때 토큰 프레임의 부가적인 전송으로 인해 생기는 오버헤드를 줄이기 위하여 마지막 프레임을 보낼 때 그림1과 같이 프레임 헤더의 Type/Length 필드에 토큰임을 표시해주도록 한다. Type/Length 필드는 패스트 이더넷 표준에 정의된 필드로서 프레임의 길이를 나타내거나 현재 통신망의 네트워크 계층에 어떤 프로토콜을 쓰는지 표시하는 필드인데 Type 필드에 대한 내용은 ERCNet에서는 사용하지 않으므로 이 필드의 첫번째 비트를 이용하여 토큰임을 표시하도록 한다.

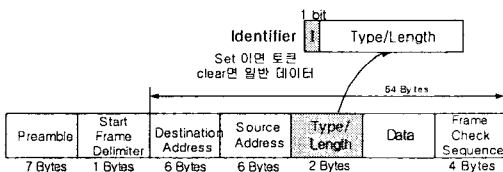


그림 1 ERCNet 프레임 구조

### 2.2.3 RED(Ring Enhancement Device)

RED(Ring Enhancement Device)는 링 토폴로지에서의 브로드캐스팅할 때 생기는 딜레이를 줄이기 위해 개발된 장치이다. 이 장치는 프레임을 수신할 때 패스트이더넷 수신 장치를 통해 수신된 프레임을 중앙처리장치(CPU)에 넘겨줄 때 패스트이더넷 송신장치로 전달해 줌으로써 브로드캐스팅할 때 각 스테이션을 지나갈 때 마다 생기는 시간 지연을 줄여주는 기능을 한다. RED의 블록 다이어그램은 그림2와 같이 컨트롤러와 아날로그 스위치로 구성되며 컨트롤러 신호는 노드가 수신 상태인지 송신 상태인지에 따라 주어지며 수신 상태일 때는 패스트 이더넷 수신장치로 들어온 프레임을 아날로그 상태에서

바로 송신 장치로 전달함과 동시에 노드의 수신 버퍼로 전달한다. 송신 상태일 때는 패스트이더넷 수신장치와 송신장치의 연결을 끊고 전송하고자 하는 데이터를 패스트 이더넷 송신 장치를 통해 전송하게 된다.

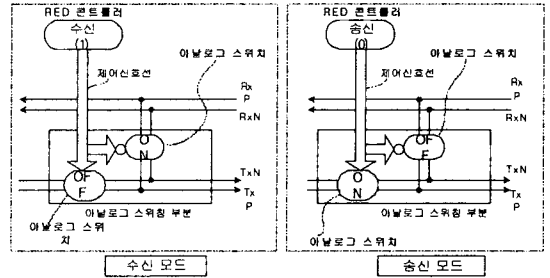


그림 2 RED 블록 다이어그램

### 2.3 ERCNet 성능 평가

ERCNet 통신망은 RM 방식의 통신망으로서 각 노드의 데이터를 주기적으로 업데이트하게 된다. 이러한 RM 방식의 통신망에서는 각 노드의 정보를 전체 노드에게 전달하여 공유할 수 있도록 하게 되는데 이러한 전체 노드에 대한 데이터 복사 시간이 중요한 성능 평가 척도가 된다. 본 논문에서는 ERCNet 통신망에서 전체 통신망 업데이트 주기에 대한 수학적 분석을 행하고 이를 실험치를 통해 검증한다. 이러한 분석을 위해 다음과 같은 파라미터를 정의한다.

- 노드 개수 :  $N$
- $i$  번째 노드의 짧은 주기 데이터 양 :  $P_i$
- $i$  번째 노드의 짧은 주기 데이터 양 :  $Q_i$
- 한 프레임의 데이터 크기 :  $F_d = 1024B$
- cell 크기 :  $M_c = 128B$
- 헤더 크기 :  $M_{header} = 16B$
- 한 프레임에 들어가는 cell의 수 :  $N_{cell} = F_d / M_c = 8$
- $i$  에서  $i+1$  노드간 길이 :  $L_i$
- 1 bit time :  $T_b$
- 광전 변환 시간 :  $T_{oe}$
- 전광 변환 시간 :  $T_{eo}$
- $i$  번째 노드와  $i+1$ 번째 노드 사이의 propagation delay:  $T_{prop} = \sum_{i=0}^N 5L_i$ , 100Base-FX의 경우 5ns/m

- interframe gap :  $T_g = 96T_b$
- $i$  번째 노드에서 전송할 짧은 주기 cell의 개수 :  $N_s = \lceil P_i / M_c \rceil$
- $i$  노드에서 전송할 긴 주기 cell의 개수 :  $N_l = \lceil Q_i / (5 \times M_c) \rceil$
- 짧은 주기 프레임 개수 :  $N_{F_s} = \lceil N_s / N_{cell} \rceil$
- 긴 주기 프레임 개수 :  $N_{F_l} = \lceil N_l / N_{cell} \rceil$
- 전체 노드에서의 업데이트 주기 :  $T_{up}$
- $i$  번째 노드가 토큰을 받아서 데이터를 전송하고 토큰을 다음 노드로 전달할 때 까지 걸리는 시간 :  $T_H$
- 노드의 토큰 인식 지연 시간 :  $T_{Ath}$
- 노드의 데이터 프레임 생성 시간 :  $T_{D_r}$
- 노드의 토큰 프레임 생성 시간 :  $T_{T_r}$
- 노드의 토큰 프레임 전송 지연 시간 :  $T_{D_t}$

이때 ERCNet에서는 기본적으로 1kB의 데이터를 실어서 프레임을 보내게 되며 짧은 주기 데이터 중에서 이러한 프레임 전송하는 데 걸리는 시간  $T_{f_i}$  는

$$T_{f_i} = (N_{F_i} - 1) \times \{ (F_d + M_{header} + M_{CRC}) T_b + D_g \}$$

이며, 마지막 프레임 보낼 때 걸리는 시간  $T_{r_i}$  는

$$T_{r_i} = \{ (N_i \bmod N_{cell}) \times M_c + M_{header} + M_{CRC} \} T_b$$

이다. 긴주기 데이터의 경우에도 마찬가지로 일반 프레임 보내는데 걸리는 시간  $T_{f_i}$  은

$$T_{f_i} = (N_{F_i} - 1) \times \{ (F_d + M_{header} + M_{CRC}) T_b + D_g \}$$

이며 마지막 프레임 보낼 때 걸리는 시간  $T_{r_i}$  은

$$T_{r_i} = \{ (N_i \bmod N_{cell}) \times M_c + M_{header} + M_{CRC} \} T_b$$

이 된다. 여기서 한 노드가 통신 프레임 전송하는 데 걸린 시간  $T_{D_{cell}}$  은

$$T_{D_{cell}} = T_{f_i} + T_{r_i} + T_{f_i} + T_{r_i} + T_{oe} + T_{eo} + T_{prop}$$

이 된다. 여기서  $T_{H_i}$  는

$$T_{H_i} = T_{Ath} + (N_{F_i} + N_{F_i}) T_{D_{cell}} + T_{D_{cell}} + T_{T_{cr}} + T_{D_i}$$

로 표시될 수 있으며 전체적인 업데이트 주기  $T_{up}$  는

$$T_{up} = \sum_{i=1}^N T_{H_i}$$

이다. 이 식을 이용하여 계산된 결과를 통해 정해진 데이터 양과 노드 수가 주어질 경우 ERCNet통신망의 업데이트 주기를 예측할 수 있다.

### 2.3.1 실험 환경 및 결과 비교

4개의 노드를 이용하여 위의 식을 테스트해 볼 수 있는 실험치를 얻어내었다. 실험 환경과 실험을 통해 나온 결과 값을 표로 나타내어 보면 아래와 같다.

이러한 실험치를 위의 식에 대입해보면,

$N$	4	$N_{F_i}$	2
$P_i$	1920	$T_{Ath}$	10us
$Q_i$	1152	$T_{D_{cell}}$	20.2us
$N_s$	15	$T_{T_{cr}}$	1.1us
$N_i$	9	$T_{D_i}$	34us
$N_{F_i}$	2	$T_{H_i}$	400us

표 1. ERCNet 실험 데이터

$$T_{f_i} = (1024+16+32)*8bit*10ns/bit = 85760ns = 85.76us$$

$$T_{r_i} = (7*128+16+32)*8bit*10ns/bit = 75520ns = 75.52us$$

$$T_{f_i} = (1024+16+32)*8bit*10ns/bit = 85760ns = 85.76us$$

$$T_{r_i} = (1*128+16+32)*8bit*10ns/bit = 14080ns = 14.08us$$

$$T_{D_{cell}} = 85.76us + 75.52us + 85.76us + 14.08us + 0.2us + 0.15us = 261.47 us$$

$$T_{H_i} = 10us + (2+2)(20.2us) + 261.47us + 1.1us + 34us = 387.37us$$

실험을 통해서 나온  $T_{H_i}$  값은 400us 이고, 수식을 통해 나온  $T_{H_i}$  값은 387.37 us 로서 거의 비슷함을 알 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 리플렉티브 메모리 방식의 DCS용 네트워크로 개발된 ERCNet의 구조를 설명하고 ERCNet의 성능의 지표 중 하나인 업데이트 주기에 대한 수학적 분석을 행한 후 실험을 통해 그 정확성을 입증하였다. 본 논문에서 제시된 통신망은 기존 RM방식의 통신망의 단점을 보완하여 토큰을 이용한 결정적 동작성과 패스트 이더넷을 이용한 빠른 속도와 큰 처리 용량을 가진다. 또한 ERCNet은 링형 토폴로지서 데이터를 브로드캐스팅할 때 걸리는 시간을 줄이기 위해 새로이 고안된 RED를 사용하였다. 본 논문에서 제시된 수식을 통해 ERCNet의 주요한 성능 지표인 업데이트 주기를 예측할 수 있다. 앞으로 ERCNet은 원전용 DCS의 통신망으로 사용될 예정이며, 이를 위해 이중화 등 안정성 면에서의 성능 개선이 필요하다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Chia Shen, Ichiro Mizunuma, "RT-CRM: Real-Time Channel-Based Reflective Memory". IEEE Transaction on Computers. vol 49, no 11, pp 1202-1214, November 2000
- [2] I. Lucci, S. Gertner, "Reflective-memory Multiprocessor". Proceedings of the Twenty-Eighth Hawaii International Conference on System Sciences. vol 1, pp 85-94, 1995