

## 원자력 플랜트용 대규모 통신망 네트워크 프로토콜 성능 시험

On the Network Protocol Performance Evaluation for  
Large Scale Communication System of Nuclear Plant

송 기상\* 이 태훈\* 김 홍래\*  
한국교원대학교

김 동훈\*\* 구 인수\*\*  
한국원자력연구소

### 요약

컴퓨터 기술이 비약적으로 발전함에 따라 원자력 플랜트들에 디지털 네트워크 기술을 도입하려는 움직임이 커지고 있다. 원자력 플랜트에서의 통신망 구조는 안전관련 원자로 제어, BOP, 하부 시스템과 플랜트 모니터링 기능을 조화시키며, 상호간의 연결과 사용자 인터페이스를 정의하여 플랜트 성능의 보장과 안전성 요건을 만족시키도록 하는 것을 규정하게 된다. 따라서, 진보된 원자력 플랜트에서의 제어 및 모니터링 목적에 디지털 네트워크를 도입하기 위하여서는 체계적인 설계 및 평가 절차가 필요하게 되는데, 그 이유는 원자력 플랜트의 경성실시간 및 고신뢰도 시스템 특징을 고려한 설계를 위한 것이다. 본 논문에서는 이와 같은 점을 고려하여 네트워크 지연과 링크 장애에 따른 경성 실시간 조건의 영향이라는 측면에서 다양한 산업용 네트워크 프로토콜을 원자력 플랜트의 전 트래픽을 대상으로 평가한다.

### Abstract

Computer technology has been dramatically advanced and it is now natural to apply digital network technology into nuclear plants. Communication architecture for nuclear plant defines the coordination of safety reactor control, balance of plant, subsystem utilities, and plant monitoring functions, and how they are connected and their user interface to guarantee plant performance and guarantee safety requirements. Therefore, to implement a digital network for control and monitoring systems of advanced nuclear plant needs systematic design and evaluation procedures because of responsive and hard real-time process characteristics of nuclear plant. In this paper, we evaluate several digital network protocols in terms of network delay, link failure effects to hard real-time requirements with full scale traffic.

### 1. 서론

컴퓨터 기술이 비약적으로 발전함에 따라 원자력 플랜트 및 원자력 발전소들에 디지털 네트워크 기술을 도입하려는 움직임이 커지고 있다[1, 2]. 원자력 발전소에 사용되는 디지털 네트워크 구조는 원자력 발전소의 특성상 안전 관련 요인 때문에 결정론적 통신 방식을 요구하고 있다[3, 4]. 이러한 결정론적 통신을 보장하는 프로토콜로는 IEEE 802.4 Token Bus, IEEE 802.5 Token Ring 과 FDDI 및 ARCnet이 있고, 이들은 상용 원자력 발전소에서 부분적으로 채택되어 사용되고 있다 [1]. 국내의 경우에 영광 3, 4호기나 울진 3, 4호기의 경우에는 주로 OSI 7 계층 중에서 데이터 링

크 계층에 해당하는 정도의 캐비넷 간 연결에 적용되고 있어서 암밀한 의미의 디지털 네트워크에 해당하기는 어렵다고 볼 수 있다. 그러나, 차세대 원자력 발전소에서는 보다 폭 넓은 디지털 네트워크의 적용이 연구되고 있다[2].

이러한 디지털화에는 분산처리(distributed processing)와 다중화(multiplexing)가 필수적으로 따르게 되는데, 기존의 데이터 링크 계층에서 이용되던 계통간의 일대일 접속에 의한 계통간 데이터 링크 대신에 공통 전송 매체를 통한 공유 방식의 통신이 이루어지게 된다. 또한, 다양한 벤더에서 공급되는 디지털 기기를 사용할 수 있게 하므로써 계통의 변경 또는 확장에 유연성을 제공하고, 시스템의 유지 보수를 효율적으로 할 수 있게 된다.

이러한 디지털 네트워크 기술을 원자력 플랜트에 적용하기 위하여서는, 먼저 적합한 통신망 구조의 설계와 적절한 네트워크 프로토콜의 선정이 필요하게 된다. 원자력 플랜트에서의 통신망 구조는 안전관련 원자로 제어, BOP, 하부시스템과 플랜트 모니터링 기능을 조화시키며, 상호간의 연결과 사용자 인터페이스를 정의하여 플랜트 성능의 보장과 안전성 요건을 만족시키도록 하는 것을 규정하게 된다. 따라서, 진보된 원자력 플랜트에서의 제어 및 모니터링 목적에 디지털 네트워크를 도입하기 위하여서는 체계적인 설계 및 평가 절차가 필요하게 되는데, 그 이유는 원자력 플랜트의 경성실시간 및 고신뢰도 시스템 특징을 고려한 설계를 위한 것이다.

일반적으로 실시간 및 고신뢰도 플랜트에 적용되는 네트워크 프로토콜로는 토큰 패싱 방식이 사용된다. 즉, 토큰을 주고 받는 방법으로 공통 전송 매체에 접근을 허용하게 되면, 각 노드에서의 매체 접근과 데이터 전송에 소요되는 시간을 예측할 수 있게 되므로, 실시간 시스템의 데이터 전송 마감시한(deadline)에 맞는 네트워크의 제어가 가능하게 되는 것이다. 이러한 토큰 방식의 프로토콜에는 토큰 링(IBM Token ring, IEEE 802.5)이나 토큰 버스(IEEE 802.4), 혹은 이러한 방식의 ARCnet 과 고속 FDDI 구조가 있다. 이들 가운데서, 본 논문에서는 토큰 링, 토큰 버스 및 FDDI 를 대상으로 하여 원자력 플랜트 SMART(Small Medium Advanced Reactor) 트래픽을 이용하여 네트워크 지연과 링크 장애에 따른 경성 실시간 조건의 영향이라는 측면에서 평가하여 원자력 플랜트에서의 이들 프로토콜의 적용에 따르는 문제를 분석하고자 한다.

## 2. 원자력 발전소에서의 경성 실시간 요구 조건

실시간 시스템은 제어 및 응답에 따라 발생하는 이벤트들이 시간적으로 분산되어 있으면서, 시한(timing) 제한이 따르거나 마감시한(deadline)이 설정되는 특징이 있다. 이러한 시간적인 마감시한을 갖는 실시간 시스템을 경성 실시간 시스템이라고 하는데, 마감시한 제한 조건을 맞추지 못 할 경우에는 전체 시스템에 중대한 영향을 미치게 된다. 만일 이러한 마감시한을 만족시키지 못하게 되면, 전송된 메시지는 손실된 곳으로 여겨지며 디지털 네트워크의 경우 토큰의 재생, 비콘 신호의 발생, 메시지 재전송 등의 복잡한부가 메커니즘이 동작하게 된다.

경성 실시간 시스템의 경우에 발생하는 메시지는 두 가지 범주로 구분하는 것이 가능한데 동기(synchronous) 메시지와 비동기(asynchronous) 메시지이다. 대부분의 분산 경성 실시간 시스템은 이들 모두를 포함한다. 동기 실시간 메시지들은 주기적으로 센서나 태스크간의 데이터 전송에 따라 발생한다. 만일 센서  $i$  에서 발생된 메시지가  $t$  라는 시각에 전송 노드에 도착하였고, 마감시한  $T_o^i$  에 다음 프로세서에 도착되어야 한다면, 이 메시지는 최소한  $t+T_o^i$  시각에 다음 프로세서에 정확하게 수신되어야 하는 것이다. 이 시간보다 늦게 도착된 메시지는 의미가 없게 되며, 수신측 노에서는 메시지가 손실된 것으로 보고, 네트워크는 필요한 조치를 취하게 된다.

또한, 센서  $i$  는 일정 주기로 이러한 메시지를 발생하는 주기성이 있다. 이러한 주기적이고 동기 실시간 메시지 스트림의 주기들이  $T^1, T^2, \dots, T^m$  이고 메시지의 길이가  $L^1, L^2, \dots, L^m$  이면, 이러한 동기 메시지들에 의한 전송 이용도(utilization)는  $U_s = \sum_{i=1}^m \frac{L^i}{T^i}$  으로 표현된다.

다음으로는 비동기 실시간 메시지들이 있는데, 주로 비 주기적인 특징을 갖고 있으며, 경고 정보

나 비 주기적인 태스크의 전송에 따라 발생한다. 때문에 이러한 메시지들은 통계적인 메시지 도착 시간들로 표현된다. 메시지들의 평균 도착율을  $\lambda$ 라고 하고, 그 메시지들의 평균적인 크기를  $L_A$ 라고 하면, 비동기 메시지들에 의한 네트워크의 이용도는  $U_A = \lambda \times L_A$ 가 된다. 따라서, 동기 및 비동기 실시간 시스템의 네트워크 이용도는  $U_S + U_A$ 가 되며, 네트워크 설계 시에 이들 요소를 고려하여 네트워크 자원을 배분해야 한다. 또한, 메시지의 전송 스케줄링 및 버퍼 관리 등의 요소를 통하여 경성 실시간 조건을 만족시켜야 한다.

센서에서 취득된 데이터들은 계층별로 집중화(concentration)되고 다중화 되어 전송이 이루어지기 때문에 단순히 하나의 센서로부터 MMIS 기기까지의 마감 시한을 설정하고 그 시간 준수를 제어하는 것은 매우 어렵다. 그러나, 만일 매 2초마다 센서의 데이터가 MMIS 기기에 전송되어 갱신이 되어야 한다면, 네트워크에서 소비될 마감 시한을 설정할 수 있게 되는데, 이 시간을 준수할 수 있도록 통신망을 설계해야 한다. 원자력 플랜트에서 잠정적으로 요구되는 트래픽의 시한 조건이 표 1에 제시되고 있다.

표 1. 원자력 플랜트의 마감 시한 요구조건 예

구분	기능	마감시한 요구조건
Safety	Control	20 ms
	Monitoring	20ms
Nonsafety	Control	100 ms
	Information processing	500 ms

이러한 시간 설정을 일반적인 산업용 네트워크와 같은 계층 구조로 통신망이 구성된 경우를 가정해 보면 필드 제어 기기와 연결된 센서로부터 MMIS 기기에의 갱신에까지 소요되는 시간을  $T_{sensor} + T_{node} + T_{network} + T_{MMIS}$ 로 표시할 수 있는데,  $T_{sensor}$ 는 센서에서 처리되는 시간,  $T_{node}$ 는 멀티플렉싱 전송 준비를 위한 시간이고,  $T_{network}$ 는 통신망에서 소요되는 시간이며,  $T_{MMIS}$ 는 MMIS에서 처리되는 시간이다.

분산 경성 실시간 시스템의 경우에는 네트워크에서 소요되는 시간은 일반적으로 응용계층에서 전송을 위한 준비가 된 후에 MAC 계층을 거쳐 전송되며, 수신되는데 소요되는 모든 시간을 포함한다. 따라서 정상적인 전송 시간에는

$$T_{network} = T_{prop} + T_{queue} + T_{trans} + T_{process} \quad (1)$$

이 포함되며, 여기서  $T_{prop}$ 는 전송 매체의 전파지연(propagation delay),  $T_{queue}$ 는 전송 서비스를 받기 위한 큐잉 지연,  $T_{trans}$ 는 메시지의 전송 시간(transmission) 지연이며  $T_{process}$ 는 MAC 계층의 송수신에서 지연되는 시간을 의미한다.

오류가 없으면, 이와 같은 시간들은 큐잉 지연을 제외하고는 고정된 값으로 볼 수 있으며, 특히 동기 메시지 경우에는 더욱 그러하다. 그러나, 링크나 수신기의 하드웨어, 리피터 등의 오류에 의한 메시지에 오류가 발생하면 이를 처리하기 위한 메커니즘에 따라 지연 시간이 늘어나게 되므로 경성 실시간 요구 조건을 만족시키기 위하여서는 각 프로토콜이 주어진 트래픽 조건과 링크 및 노드에서 발생할 수 있는 장애 확율을 고려한 평가를 거쳐서 적합한 프로토콜을 선택하고, 원자력 플랜트 경성 실시간 조건 및 신뢰도 조건을 만족시킬 수 있도록 조정하는 과정이 필요하게 된다.

### 3. 원자력 플랜트용 통신망 구성과 트래픽 예

본 논문에서 다루고자 하는 원자력 플랜트용 통신망 구성은 특정 플랜트를 대상으로 하지 않고, 가능한 모델을 기초로 설정한 것으로 그 예는 그림 1과 같다.

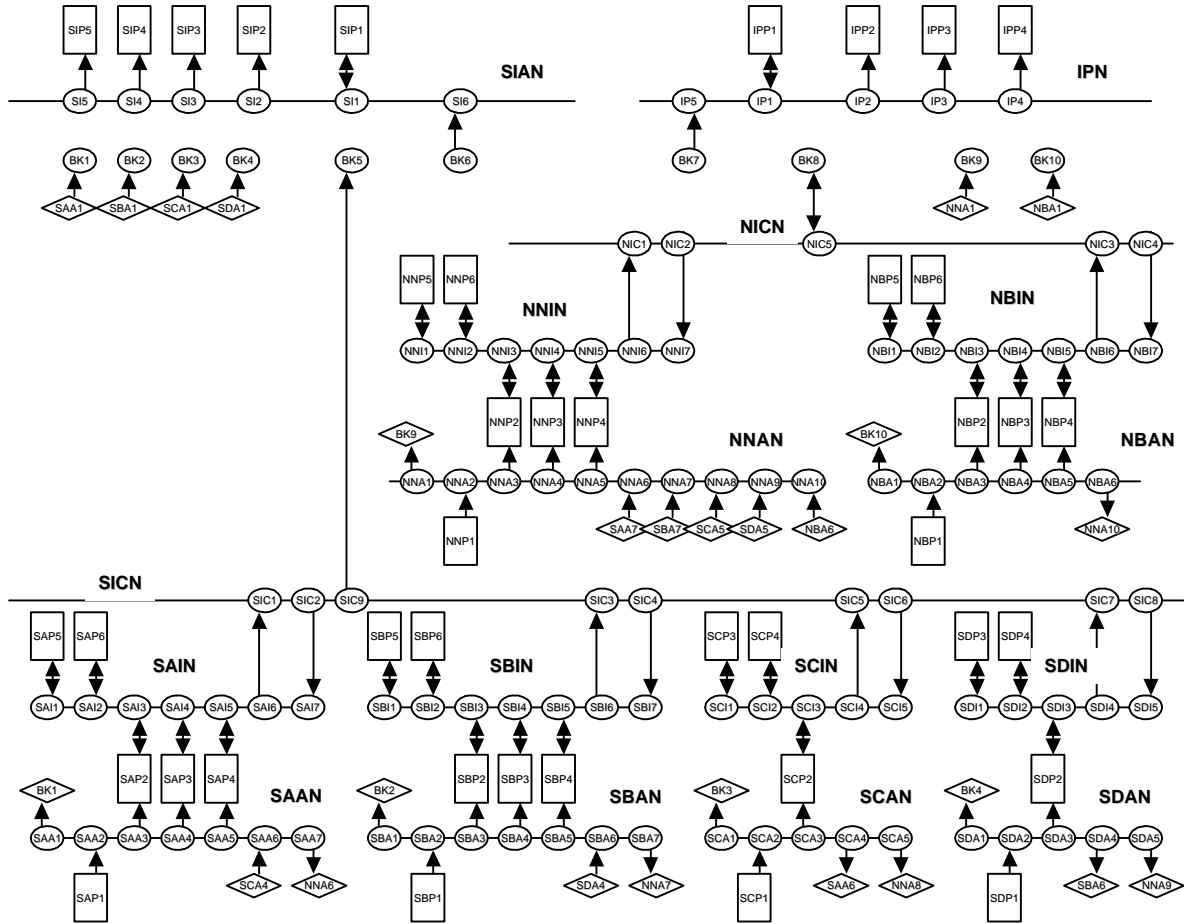


그림 1. 원자력 플랜트용 데이터 통신망 모델 예

그림 1의 SxAN은 필드 기기로부터의 데이터 취득용 네트워크에 해당하고, SxIN은 채널간 인터페이스 네트워크, SIxN은 인터채널 네트워크이며, IPN은 정보처리 네트워크에 해당하는 3단계 계층적 구조를 갖는 것으로 모델링 하였다. 비안전 계통의 경우에는 NxAN 및 NxIN등으로 구분하였으며, NUREG 권고안에 따라 비안전 계통의 신호가 안전계통으로 전파되지 못하도록 구분시켰으며, 이러한 데이터의 흐름은 화살표의 방향을 참조하면 된다. 이와 같은 원자력 플랜트의 통신망 모델링은 EPRI의 Browns Ferry Nuclear Plants 에서 사용된 프로세스 데이터 네트워크 구조를 참조하였다[5]. 이와 관련된 트래픽 예는 다음 표 2와 같다.

표 2. 원자력 플랜트 통신망의 트래픽 예

Source_net	Destination_net	전송량(bits)	전송주기(ms)
SCIN	IPN	28800	100
SCIN	IPN	3600	100
SCIN	IPN	5	100
SCIN	NNIN	9	100
SCIN	SAIN	50	20
SCIN	SCIN	450	20
SCIN	SCIN	13230	20
SCIN	SCIN	10944	20
SCIN	SCIN	13230	20
SCIN	SCIN	50	20
SCIN	SCIN	450	20

#### 4. 원자력 플랜트용 대규모 통신망 성능 평가

3절에서 보인 원자력 플랜트의 데이터 통신망은 약 216개의 네트워크 노드가 포함되는 플랜트의 대규모 통신망에 해당된다. 더우기, 원자력 플랜트의 경성 실시간 및 고신뢰도 요구 조건을 충족시키는 특성이 고려되어야 하므로 네트워크 지연과 링크 및 노드 장애에 따른 경성 실시간 조건의 영향이라는 측면에서 FDDI, 토큰 링 및 토큰 버스 프로토콜을 대상으로 평가하였다.

사용된 네트워크 시뮬레이터는 COMNET III[6] 라는 객체지향형 네트워크 시뮬레이터이다. 원자력 플랜트의 데이터 흐름은 데이터 취득에서부터 MMSI를 통하여 운전원의 디스플레이 기기까지 전송이 이루어지게 되므로, 데이터가 지역적인 네트워크에서만 머물지 않고, 전체 네트워크를 경유하는 특성을 갖고 있다. 따라서, 표 2의 경우에서와 같이 제시된 트래픽이 실제로는 다양한 경로를 거쳐 흐르게 되는데, 이러한 트래픽 흐름을 계층별로 묶어서 실제 통신망에서와 같은 통신 특성을 갖도록 구성하였다.

##### 4.1 통신망 시뮬레이션의 구성 예

COMNET으로 구성된 FDDI 프로토콜을 이용한 백본 네트워크의 구성은 그림 2와 같다. 여기서 수자로 표시된 부분은 각 프로세스에 해당하며, 그림 1의 통신망 구조에서 데이터를 송수신하는 프로세스를 의미한다. 각 프로세스는 트래픽 발생 주기와 전송 방향 등이 설계 요점과 함께 설정되면 시뮬레이션 동안에 그러한 규칙을 따라 주기적인 전송과 수신이 이루어지며, 이에 따른 네트워크의 지연과 이용도 정도를 파악할 수 있게 된다.

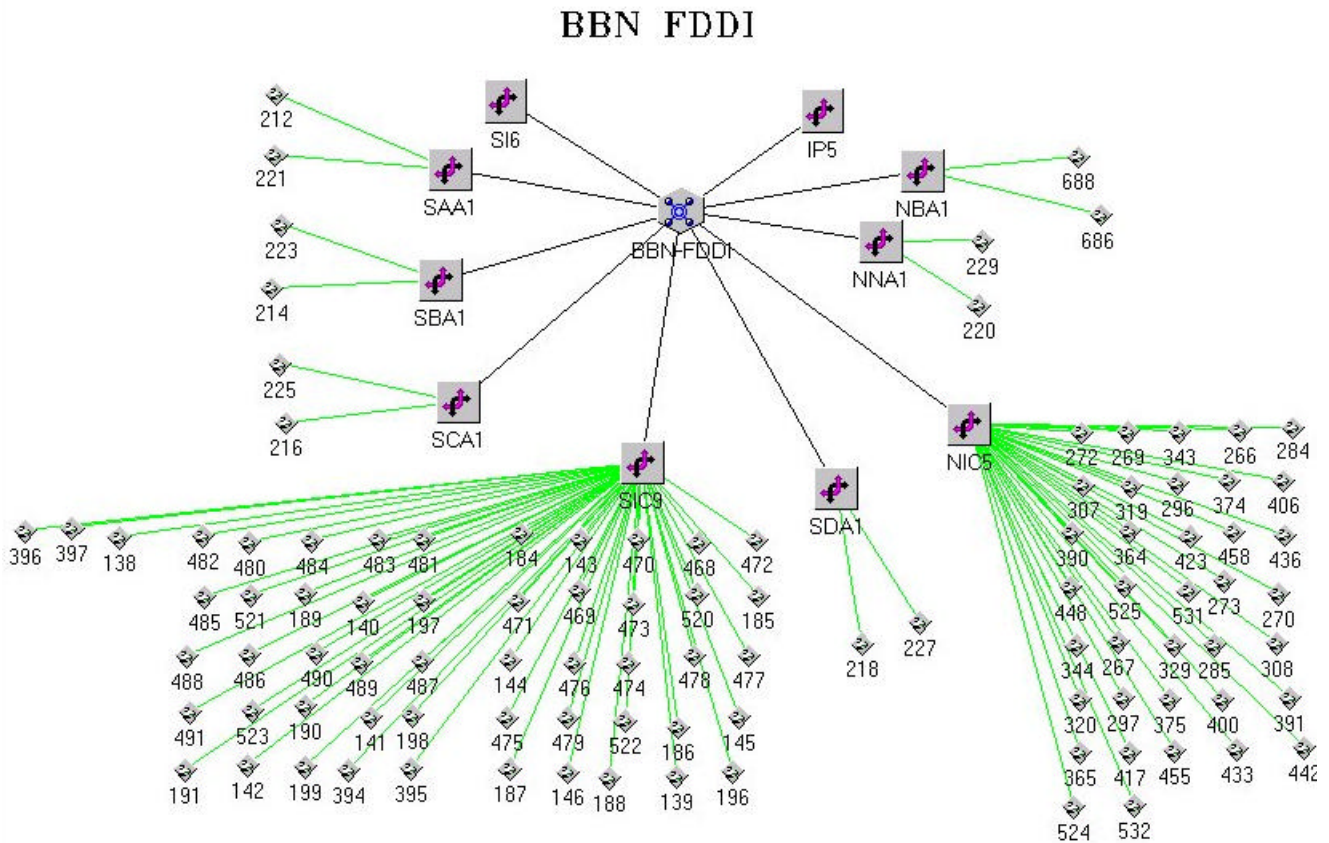


그림 2. FDDI를 이용한 백본 네트워크의 시뮬레이션 구성

이러한 네트워크는 그 크기가 매우 큰 네트워크에 해당되며 통신망의 특성을 정확히 예측하기

위하여서는 대규모 통신망 시뮬레이터를 사용하는 것이 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 각각의 네트워크에 100Mbps FDDI, 10Mbps 토큰 버스 및 4Mbps 토큰링을 적용하여 각 경우에 원자력 플랜트의 데이터 전송 요구조건과 이에 따른 통신망의 특성을 비교하였다.

#### 4.2 네트워크 이용률 비교

FDDI, 토큰링 및 토큰 버스를 각 네트워크에 사용한 경우의 네트워크 이용률(utilization)을 그림 3에 보이고 있다. FDDI의 경우에는 이용률이 거의 10% 이하로 나타나고 있지만, 10Mbps 토큰 버스의 경우에는 최대 58%정도의 링크 이용률을 보이고 있다. 토큰 링의 경우에는 4Mbps 링크를 가정하였는데, 최대 100%정도의 이용률을 보이고 있다. 설계 권고 사항으로는 링크 이용률은 40% 정도가 되게 하고, 200% 정도의 여유를 갖도록 권고하고 있으므로, 모델링된 원자력 플랜트의 경우에는 100Mbps FDDI나 16Mbps 토큰링 프로토콜을 사용하는 것이 바람직하다고 본다.

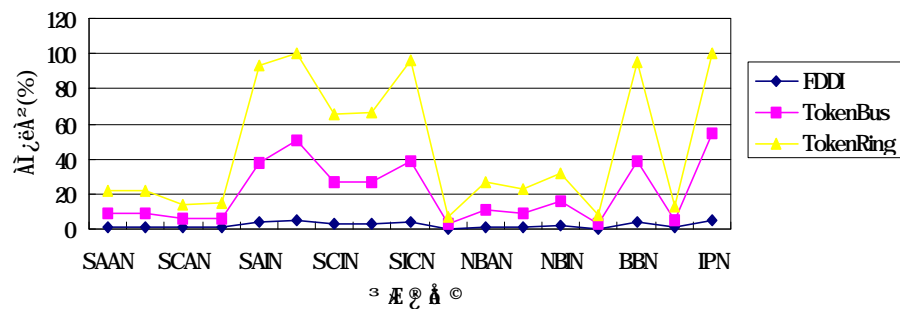


그림 3. 링크 이용률 비교

#### 4.3 최대 지연 시간의 비교

다음으로는 각 프로토콜을 사용한 경우의 최대 지연 시간을 측정하였다. 이 최대 지연 시간은 표 1과 표 2에서 제시되고 있는 원자력 플랜트의 데이터 발생 주기와 비교되어서, 만일 최대 지연 시간이 발생 주기 보다 큰 경우에는 정상적인 실시간 조건을 만족시키는 것이 어렵다는 알 수 있는 척도가 된다. 그림 4에서 보여 주고 있듯이, 10Mbps 토큰 버스의 경우에는 최대 51ms에서 20ms 까지의 전송 지연 시간을 보이고 있다. 표 1에서 보이고 있는 조건의 경우에, 안전 계통의 트래픽은 20ms 이하의 전송 지연이 필요하므로, 10Mbps 토큰 버스는 FDDI에 비하여 위험성이 있음을 알 수 있다. 토큰 링의 경우에는 4Mbps 전송 속도를 가정한 결과 이 보다 훨씬 큰 지연 시간을 나타내었는데, 16Mbps 토큰 링의 경우에는 훨씬 더 개선 된 결과를 보일 것으로 예측된다.

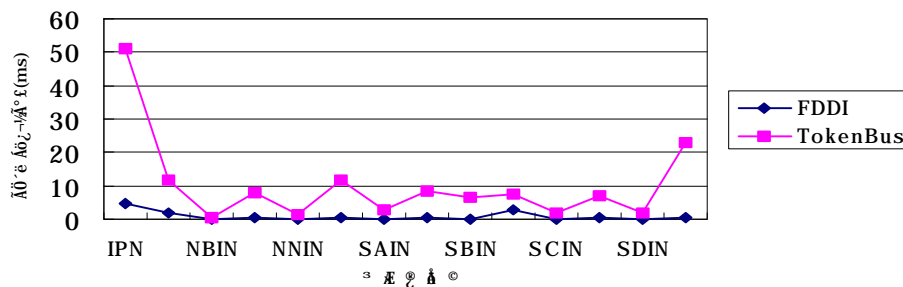
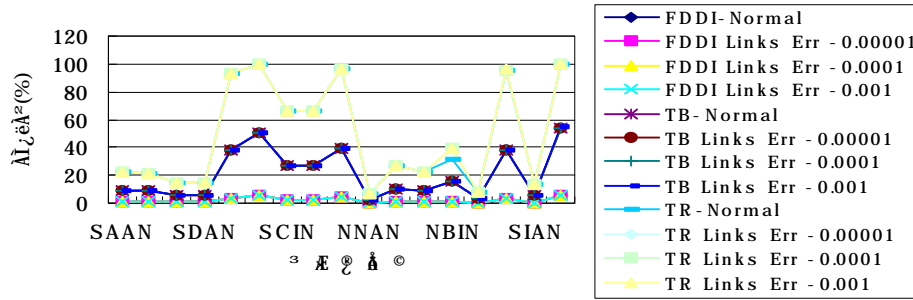


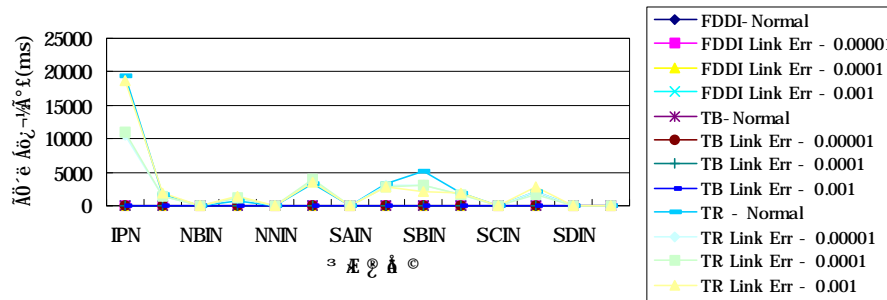
그림 4. 토큰 버스와 FDDI의 최대 지연 비교

### 4.3 링크 장애에 따른 각 프로토콜의 특성

다음으로는 링크 장애에 따른 네트워크의 특성을 측정하였다. 장애 조건은 링크의 장애를 고려하여, 그 발생확율을 각각 0.001, 0.0001, 및 0.00001인 경우로 가정하였다. 이 조건을 시간 단위로 환산해보면, 1년에 약 8.76시간, 0.876시간 및 0.00876시간에 해당되는 조건이다. 이러한 링크 장애율을 가정했을 때, 측정된 링크의 이용율과 최대 지연 시간은 그림 5 (a)와 (b)와 같다.



(a) 링크 장애에 따른 네트워크 이용율



(b) 링크 장애에 따른 최대 지연 시간

그림 5. 링크 장애에 따른 네트워크 특성 비교

여기서 TB는 토큰 버스를 의미하며, TR은 토큰 링을 의미한다. 그림 5와 그림 3과 4를 비교해보면, 링크의 장애가 발생한 경우에 네트워크 이용율은 큰 변화를 보이지 않고 있다. 이것은 측정 시간 동안에 발생하는 트래픽의 재 전송 양이 갑자기 늘어나지 않음을 의미한다. 이에 반하여 최대 지연 시간은 각 네트워크의 경우에 링크 에러 확율이 커짐에 따라 증가됨을 알 수 있는데, 이것은 충분히 예측할 수 있는 결과이다.

## 5. 결론

지금까지 살펴 본 네트워크 프로토콜의 특징을 고려해볼 때, FDDI와 같은 고속 네트워크를 이용하면, 어떤 경우의 조건도 만족될 수 있음을 알 수 있다. 그러나, 토큰 버스와 토큰 링의 경우에는 식 (1)에서 표시되고 있는 바와 같이 재 전송에 링크나 노드 장애에 의한 재 전송이 궁극적으로는 경성 실시간 조건을 만족시키지 못할 가능성을 갖고 있음을 그림 5에서 관찰할 수 있다. 특히, 원자력 플랜트의 경우에는 모든 트래픽이 주기적으로 발생하는 조건을 가정하였는데, 이러한 설계 조건은 일반 산업용 네트워크에서 볼 수 없는 매우 엄격한 조건이다. 따라서, 이러한 조건하에서 설계 요건을 만족시킬 수 있는 네트워크 프로토콜로는 고속 FDDI와 OSI 7계층에서 상위 계층을 배제하는 프로토콜이 필요하다고 볼 수 있다.

그런 의미에서 볼 때, 데이터 취득 레벨에서는 PLC와 이들을 보다 간단한 프로토콜을 이용하여 묶고, 이러한 작은 양의 네트워크를 계층별로 묶어서, 백본 네트워크와 연결시키는 것이 필요하다고 볼 수 있다. 이러한 계층 구조에, 네트워크의 다양성을 제공해야 하는 조건이라면, 백본 네트워

크에는 FDDI 네트워크와 하부 네트워크에는 토큰 버스를 채용하는 것이 적절한 설계 방향이라고 판단된다.

이러한, 네트워크들은 원에 데이터 통신이 목적이었으므로, 원자력 플랜트와 같은 고신뢰도, 경성 실시간 요건을 충족시키는 데는 한계가 있다. 이러한 문제는 산업용 네트워크 설계에서도 늘 문제가 되고 있는 부분이므로 원자력 플랜트에서는 특히 유의할 필요가 있다. 따라서, 이러한 프로토콜을 기초로 하여 보다 고장 허용적이고, 어떤 조건하에서도 실시간 조건을 보장하는 네트워크 프로토콜의 개발과 이의 검증이 필요하다고 볼 수 있다.

#### 참고 문헌

1. D. H. Kim et. al., *A State-of-the Art Report on Design Technology of Communication Network in Nuclear Power Plant*, KAERI/AR-443/96, Korea Atomic Energy Research Institute, 1996
2. 한국전력공사 전력연구원, *차세대 원자로 기술개발*, 중간보고서, 1997
3. NUREG/CR-6082-1993, "Data Communication"
4. NUREG-0800-1997, "Standard Review Plan", Sect 7.9: Data Communication
5. EPRI, "Process Data Network Architecture Plan for the Browns Ferry Nuclear Plants," ERRI TR-103445. December, 1993
6. CACI, COMNET III Manual
7. F. Halsall, *Data Communications, Computer Networks and Open Systems*, 4th ed., Addison-Wesley, 1994