

# 엄격한 실시간 요구조건을 만족하는 무선 확장 Profibus의 개발

이경창\*, 김도형(부산대 대학원 지능기계공학과), 이석(부산대 기계공학부)

## Development of Wireless Extended Profibus with Hard Real-time Requirement

K. C. Lee, D. H. Kim(Intelligent Mech. Eng. Dept., PNU), S. Lee(Mech. Eng. School, PNU)

### ABSTRACT

This paper focuses on a method to connect mobile devices such as mobile robot, Automated Guided Vehicle (AGV) to a fieldbus. In this paper, the IEEE 802.11 wireless LAN is used to extend a Profibus-DP network for the mobile devices. In order to integrate these two networks, a protocol converter is developed with two process (i.e., master process of Profibus-DP and virtual master process of IEEE 802.11) and an transmission buffer. Furthermore, a virtual polling algorithm is developed at the protocol converter in order to satisfy real-time requirements on data communication.

**Key Words** . Integrated network(통합 네트워크), IEEE 802.11 Wireless LAN(IEEE 802.11 무선랜), Profibus-DP, protocol converter(프로토콜 변환기), virtual polling algorithm(가상 폴링 알고리즘)

### 1 서론

최근, 사동화 시스템에는 이동성(mobility)을 가진 이동 로봇(mobile robot)이나 AGV(Automated Guided Vehicle), 크레인 등과 같은 이동 장비들(mobile devices)이 효율적으로 운영되기 위해서는, 이동 장비들과 고정 장비(제어 센터나 가공 기계 등)들간에 원활한 정보 교환이 이루어져야 한다. 예로 부인 AGV 시스템이 효율적으로 운영되기 위해서는 작업 할당이나 경로 설계, 충돌 회피 등과 같은 기능들이 필요하다. 이러한 기능들이 효율적으로 이루어지려면, AGV는 터미널 내에 분산되어 있는 위치 센서들로부터 각 AGV들의 위치 정보를 수집할 수 있어야 하며, 수집된 정보를 바탕으로 경로 설계가 이루어질 수 있어야 한다. 일반적으로 제어 센터, 센서 시스템 등과 같은 고정된 시스템들간의 정보 교환을 위해서는 산업용 네트워크가 사용되며, AGV와 같은 이동 장비들간의 정보 교환을 위해서는 무선 네트워크가 사용된다[1][2].

생산 시스템에서의 원활한 데이터 교환을 위하여, 다양한 표준기관으로부터 산업용 네트워크, 즉, 필드버스가 개발되었으며, 최근에는 IEC에 의해 Profibus, WorldFIP, Foundation Fieldbus 등을 포함하는 IEC 61158 필드버스가 국제표준으로 제정되었다[3][4].

그러나, IEC 61158 필드버스에는 아직까지 AGV와 같은 이동 장비들을 네트워크에 접속할 수 있는 기능을 가지고 있지 못하므로, 이동 장비들을 자동화 시스템에 원활하게 통합시키기에는 한계를 가지고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 무선을 전송매체로 사용하는 무선 필드버스나 무선 노드가 네트워크에 접속될 수 있는 유선 필드버스가 필요하다.

이러한 필요성에 의해, 현재, 여러 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구들 중 가장 대표적인 것으로는 ESPRIT(European Strategic Program for Research and Development in Information Technology) 프로그램의 지원을 받아 무선 필드버스로 제안된 OLCHFA[5]가 있으나, 아직 까지 실용적인 연구 결과들은 제안되지 않고 있다. Cavalieri[6]에 의해서는 무선 케이블이론을 이용하여 분리되어 있는 기기들의 필드버스를 연결하려는 연구가 제안된 바 있으나, 이 연구는 주로 두 개의 유선 네트워크를 무선 백본을 이용하여 연결하려는 문제에 초점을 맞추고 있다.

본 논문에서는 이러한 방법들 중의 하나로서, 엄격한 실시간 요구 조건이 요구되는 생산 시스템에서, 이동 장비들을 필드버스에 접속할 수 있는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 필드버스로서 Profibus-DP[7]를 사용하며, 이의 무선 확장을 위하여 IEEE 802.11 무선랜[8]을 도입한다. 또한, 두 네트워크의 통합을 위하여 응용계층에서 동작되는 가상 폴링 알고리즘을 제안한다.

### 2. 가상 폴링 알고리즘

#### 2.1 IEEE 802.11에서의 가상 폴링 알고리즘

메세지 접속 제어로서 경쟁 방식인 CSMA/CA를 채택한 IEEE 802.11 무선랜은 실시간 요구 조건의 만족을 필요로 하는 산업용 네트워크로는 적합하지 않다. 특히, 무선랜은 CSMA/CA의 특성으로 인하여 노드들간에 충돌이 일어나며, 이러한 충돌로 인하여 전송지연이 매우 크게 증가될 수 있다. 더구나, 네트워크 트래픽이 증가하게 되면 충돌 확률은 기하급수적으로 증가한다. 따라서, IEEE 802.11을 산업용 네트워크로 응용하기 위해서는, 네트워크의 불확실성을

출입 수 있는 알고리즘이 필요하다[9].

IEEE 802.11의 충돌을 줄이기 위한 방법으로 다음과 같은 세 가지 접근방법이 연구되어져 오고 있다 첫째, BRAM이나 MBRAM과 같은 MAC 계층을 수정하는 방식이었다 그러나, 이 방식은 네트워크에 연결된 모든 노드가 동일한 MAC 프로토콜을 사용해야 하므로, 표준 IEEE 802.11과 호환성이 없다는 단점이 있다 둘째, ST-II나 RSVP와 같은 네트워크 계층을 수정하는 방식이 있다 셋째로 RTP나 LAN-ICP와 같은 트랜스포트 계층을 수정이 방식이 있다 그러나, 두 방식은 IP나 TCP 계층을 수정해야 하므로 표준 TCP/IP와 호환성이 없다는 단점이 있다[10]

따라서, 본 논문에서는 네트워크의 확실성을 줄이기 위하여, 응용계층에서 구현되는 가상 폴링 알고리즘(virtual polling algorithm)을 제안한다 그림 1은 IEEE 802.11에서의 가상 폴링 알고리즘의 개념도를 나타내고 있다 그림에서, 통신에 참여하는 스테이션들은 가상 마스터 스테이션(virtual master station)과 가상 슬레이브 스테이션(virtual slave station)으로 구분할 수 있다 가상 마스터는 통신에 참여하는 다른 스테이션들의 전송을 관리하는 스테이션으로서, 효율적인 전송 관리를 위하여 가상 폴링 목록(Virtual Polling List, VPL)과 가상 폴링 주기(Virtual Polling Period, VPP)를 가지고 있다 여기에서, 가상 폴링 리스트에는 가상 마스터가 통신 요청을 해야 하는 가상 슬레이브들의 IP 주소가 기록되어 있으며, 가상 폴링 주기에는 폴링 사이클을 반복해야 하는 시간이 저장되어 있다. 그림에서, 가상 마스터는 가상 폴링 목록에 기록되어 있는 순서대로, 가상 슬레이브에게 요청(request) 프레임 전송하며, 가상 슬레이브는 요청 프레임을 수신한 후 응답(response) 프레임을 전송한다 가상 마스터는 이러한 절차에 따라 가상 폴링 목록 내의 모든 스테이션과 통신을 마치고 나서, 가상 폴링 주기가 만료될 때까지 전송을 기다리게 된다

이러한 알고리즘으로 인하여, 네트워크에 참여한 스테이션들은 가상 마스터가 전송권한을 부여한 경우, 즉, 가상 마스터가 요청 프레임을 자신에게 전송하는 경우에만 통신에 참여할 수 있다 따라서, 네트워크 내에서 두 대 이상의 스테이션이 전송하는 가능성을 방지할 수 있게 되어, IEEE 802.11 네트워크에서 발생할 수 있는 충돌을 방지할 수 있게 된다

그림 2은 가상 마스터 및 가상 슬레이브의 통신을 위한 상태도를 나타내고 있다 가상 마스터는 통신이 시작(start)되면 transmit\_request 상태로 진입하고, 가상 폴링 목록에 있는 가상 슬레이브에게 요청 프레임을 전송(send\_request 사건)한다 그리고 나서, 가상 마스터는 wait\_response 상태에서 가상 슬레이브로부터의 응답 프레임을 기다린다 여기에서, 응답 프레임을 받게 되면(receive\_response 사건) 다음 가상 슬레이브에게 응답 프레

임을 전송하기 위하여 transmit\_request 상태로 진입한다. 만약 가상 폴링 목록 내의 모든 스테이션에게 전송을 하였다면(end\_VPL 사건), 가상 마스터는 wait\_next\_VPP 상태로 진입하여 통신을 중단(end 사건)하거나, 다음 가상 폴링 주기가 올 때까지 기다린다 여기에서, 다음 가상 폴링 주기가 시작되게 되면(start\_next\_VPP 사건), 다음 통신을 위하여 transmit\_request 상태로 진입한다

가상 슬레이브의 경우, 통신이 시작되고 나면(start 사건), wait\_request 상태로 진입하여, 가상 마스터로부터 요청 프레임이 올 때까지 기다린다 만약, 요청 프레임이 수신되면(request\_receive 사건) transmit\_response 상태로 진입하여 응답 프레임을 가상 마스터에게 전송하고(send\_response 사건), wait\_request 상태로 진입한다

## 2.2 가상 폴링 알고리즘의 성능

본 절에서는 제안된 가상 폴링 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여, 가상 마스터와 다수의 가상 슬레이브로 구성된 무선랜 실험 모델을 구현하고, 성능 평가를 수행하였다 실험 모델에서, IEEE 802.11 무선랜 인터페이스 카드로는 8Mbps 전송속도를 지원하는 Lucent Technology사의 WaveLAN을 사용하였다[11]

그림 3은 IEEE 802.11 네트워크에서 가상 슬레이브의 수에 따른 가상 폴링 알고리즘의 반응시간(overall response time)을 나타내고 있다. 여기에서 반응시간은 가상 마스터가 폴링 리스트에 기록되어 있는 첫 번째 가상 슬레이브에게 요청 프레임을 송신하고 나서 부터, 마지막 가상 슬레이브로부터 응답 프레임을 수신하는 데 까지 걸린 시간으로 정의한다 또한, 가상 마스터의 가상 폴링 주기는 100msec로 가정하였으며, 요청 및 응답 프레임의 길이는 40byte로 가정하였다. 그림에서, 가상 슬레이브가 1대인 경우, 반응

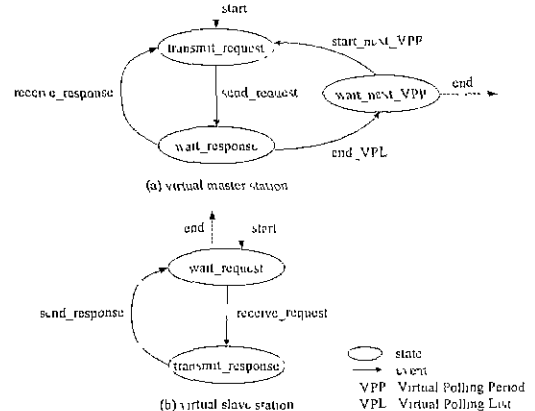


Fig 2 State diagram of virtual master and virtual slave

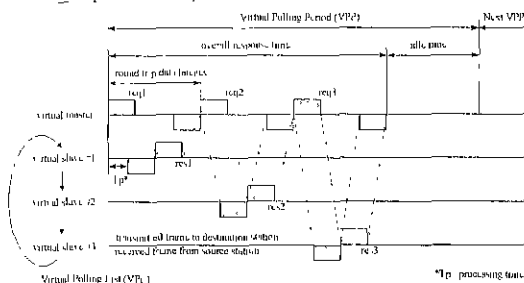


Fig 1 Schematic Diagram of virtual polling algorithm

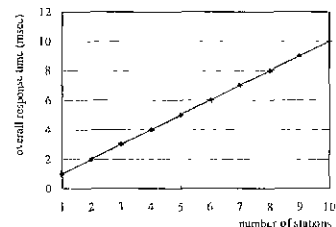


Fig 3 Overall response time of VPM algorithm

시간은 1msec가 걸렸으며, 스테이션 수가 증가함에 따라, 반응시간은 선형적으로 증가하는 현상을 확인하였다 즉, 하나의 스테이션에 걸린 시간은 스테이션의 수와 관계없이 일정함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과에 따라, IEEE 802.11 네트워크에서 발생할 수 있는 스테이션간의 충돌이 가상 폴링 알고리즘에 의하여 완전하게 제거되었다는 것을 알 수 있다

또한, 현 스테이션간의 데이터 교환에 소요되는 시간이 1msec이므로, 일반적으로 알려져 있는 데이터의 전송 지연이 10msec 이하여야 한다는 임격한 실시간 요구조건을 만족하고 있음을 알 수 있다 이러한 결과로 볼 때 가상 폴링 알고리즘은 임격한 실시간 요구조건의 만족이 필요한 산업용 네트워크로도 적합함을 알 수 있다

### 3. 무선 확장 Profibus의 구조

그림 4에는 Profibus-DP와 IEEE 802.11 무선랜이 통합된 네트워크 구조를 나타내고 있다 그림에서, Profibus-DP와 IEEE 802.11의 통합은 응용계층에서 이기종 프로토콜간의 데이터 변환이 가능한 프로토콜 변환기를 통하여 이루어진다. 즉, 통합 네트워크에 사용되는 프로토콜 변환기는 Profibus-DP의 마스터 스테이션로서의 역할을 수행하는 동시에, 무선랜의 가상 마스터 스테이션으로서의 역할을 수행한다. 뿐만 아니라, 프로토콜 변환기에는 Profibus-DP 통신 프로세스와 무선랜 통신 프로세스가 동시에 동작을 하고 있다

프로토콜 변환기는 Profibus-DP 슬레이브와 IEEE 802.11 가상 슬레이브간의 데이터 교환을 위하여 각 슬레이브에 할당되는 전송 버퍼를 가지고 있다. 즉, 슬레이브로부터 수신되는 데이터는 프로토콜 변환기를 거쳐 송신되어야 하는 주소에 따라 해당 전송 버퍼에 저장된다. 반대로, 가상 슬레이브로부터 슬레이브로 전송되어야 하는 데이터는 해당 슬레이브의 전송 버퍼에 저장된다

이러한 통합 네트워크의 동지 방식을 설명하면 다음과 같다 만약, Profibus-DP 슬레이브 1번으로부터 IEEE 802.11 가상 슬레이브 4번으로 데이터가 전송되는 경우, 프로토콜 변환기의 마스터 프로세스는 전송 버퍼 1번에 저장되어 있는 데이터를 슬레이브 1번으로 전송하고 나서 응답 프레임 을 기다린다 슬레이브 1번은 프로토콜 변환기로부터 요청 프레임이 수신되면, 가상 슬레이브 4번으로 전송해야 되는 데이터를 송신한다 또한, 가상 슬레이브 4번으로부터 응답 프레임 을 수신한 프로토콜 변환기는 수신된 데이터를 해당 되는 가상 슬레이브의 전송 버퍼 4번에 저장한다 마지막으로,

로, 가상 마스터 프로세스는 전송 버퍼 4번의 데이터를 읽어 가상 슬레이브 4번으로 폴링을 수행하며, 가상 슬레이브 4번으로부터 슬레이브 1번으로 전송해야 하는 데이터를 수신받아 전송 버퍼 1번에 저장한다

프로토콜 변환기에서 데이터가 큰 전송지연없이 전송되기 위해서는 Profibus-DP의 폴링 주기와 IEEE 802.11의 가상 폴링 주기가 적절하게 선정되어야 한다 즉, 폴링 주기와 가상 폴링 주기는 슬레이브와 가상 슬레이브간에 교환되어야 하는 메시지들의 생성 주기 중 가장 짧은 시간보다 작아야 한다 예로, 슬레이브 1번에서 가상 슬레이브 4번으로 전송되어야 하는 데이터가 10msec마다 생성되고, 가상 슬레이브 4번에서 슬레이브 1번으로 전송되어야 하는 데이터가 20msec마다 생성된다면 폴링 주기와 가상 폴링 주기는 10msec 이하로 선정되어야 한다 이렇게 함으로써, 생성된 메시지가 전송지연없이 전송될 수 있을 것이다

그림 5에는 통합 네트워크에서 전송되는 데이터들의 전송 순서와 전송 지연을 나타내었다 그림 5a는 프로토콜 변환기의 마스터 및 가상 마스터 프로세스와 Profibus-DP의 슬레이브, IEEE 802.11의 가상 슬레이브의 동기화가 완전하게 이루어졌다고 가정하는 경우, 즉, 최소의 전송지연을 가지는 경우의 전송 순서를 나타내고 있으며, 그림 5b는 동기화가 전혀 이루어지지 않았다고 가정하는 경우 즉, 최대의 전송지연을 가지는 경우의 전송 순서를 나타내고 있다

그림 5a에서, Profibus-DP 슬레이브에서 생성된 데이터는 프로토콜 변환기의 마스터 프로세스로부터 요청 프레임이 수신되면, 전송지연없이 즉시 응답 프레임을 프로토콜 변환기로 전송한다 프로토콜 변환기의 마스터 프로세스는 응답 프레임을 수신하고 나서 전송지연없이 즉시 가상 마스터 프로세스로 전송하며 가상 마스터 프로세스는 즉시 IEEE 802.11의 가상 슬레이브로 전송한다 이러한 절차에 따라, Profibus-DP 슬레이브에서 생성된 데이터가 IEEE 802.11 가상 슬레이브로 전송되는 데에는 전송메체에서의 전파지연( $T_{pp}$  및  $T_{wp}$ )과 각 프레임들의 전송시간( $T_{PQ}$ ,  $T_{PS}$  및  $T_{WQ}$ )의 합계에 해당되는 시간( $T_{PQ}+T_{PP}+T_{PS}+T_{WP}+T_{WQ}$ )만이 소요된다 일반적으로 이러한 전파지연과 프레임 전송 시간은 폴링 주기에 비해 매우 작기 때문에, Profibus-DP 슬레이브에서 생성된 데이터는 1 폴링 주기 이내에 전송된다고 볼 수 있다

그림 5b에서, Profibus-DP 슬레이브에서 생성된 데이터는 프로토콜 변환기의 요청 프레임이 수신되는 경우에만 전송될 수 있다 만약, 요청 프레임이 수신된 직후에 데이터가 생성되는 경우, 생성된 데이터는 거의 1 폴링 주기 동안( $T_{D1}$ )을 전송 큐에서 기다려야 전송이 가능하다 또한, 프로토콜 변환기 내의 마스터 프로세스는 Profibus-DP 슬레이브로부터 응답 프레임을 수신하고 나서 가상 마스터 프로세스에게 데이터를 전달하고, 가상 마스터 프로세스는 IEEE 802.11 가상 슬레이브로 데이터를 전송을 한다 만약, 가상 마스터 프로세스가 가상 슬레이브에게 요청 프레임 을 전송하고 난 직후, 슬레이브로부터 응답 프레임이 수신되었다면, 수신된 데이터는 거의 1 가상 폴링 주기 동안( $T_{D2}$ )을 전송 큐에서 기다려야 전송이 가능하다 이러한 절차에 따라, Profibus-DP 슬레이브에서 생성된 데이터가 IEEE 802.11 가상 슬레이브로 전송되기까지는 최대 2 폴링 주기를 조금 상회하는 전송지연( $T_{D1}+T_{PQ}+2T_{PP}+T_{PS}+T_{D2}-T_{WP}+T_{WQ}$ )만이 걸린다고 볼 수 있다

그러나, 이상과 같은 두 가지 경우는 모두 극단적인 경우로서, 실제로는 각 프로세스들이 어느 정도의 동기율이

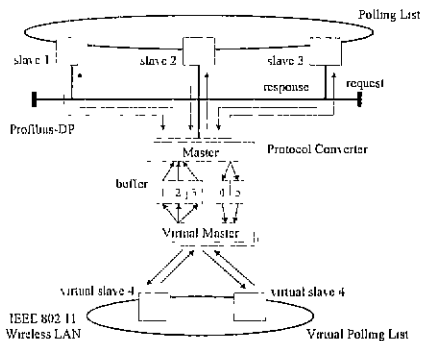


Fig 4 Integration of Profibus-DP and IEEE 802.11

분 상태에서, 동작할 것으로 추측할 수 있다 따라서, Profibus-DP 슬레이브에서 생성된 데이터가 IEEE 802.11 가상 슬레이브로 전송되기까지는 적어도 2 폴링 주기 이상은 걸리지 않음을 알 수 있다 특히, 그림 9b에서 마스터 프로세스와 슬레이브 스테이션, 마스터 프로세스와 가상 마스터 프로세스의 동기를 적절하게 조절할 수 있다면, 1 폴링 주기 내에도 충분히 전송이 가능하다 즉 마스터 프로세스와 슬레이브 스테이션의 동기가 1/2 이내이고, 가상 마스터 프로세스가 마스터 프로세스의 동기가 1/2 이내로 유지될 수 있다면 전송 지연은 1 폴링 주기 이내가 될 수 있을 것이다

### 5. 결론

본 논문에서는 이동 로봇, AGV 또는 크레인과 같은 이동 장비들을 Profibus-DP 네트워크에 통합할 수 있는 방법을 다루었다 이를 위하여 본 논문에서는 Profibus-DP 네트워크와 IEEE 802.11 무선랜 네트워크간의 통합 방법과 프로토콜 변환기의 구조와 전송 순서에 대하여 제안하였으나, 산업용 네트워크에서 요구되는 실시간 특성을 만족시킬 수 있는 가상 폴링 모드 알고리즘을 제안하였다.

또한, 본 논문에서는 Profibus-DP와 IEEE 802.11 통합 네트워크의 데이터 전송 순서를 분석하고, 통합 네트워크에서 발생할 수 있는 전송 지연 경도를 분석함으로써, 본 논문에서 제안된 통합 네트워크가 실시간이 요구되는 산업용 네트워크로 적합할 수 있음을 확인하였다

그러나, 본 논문에서는 제안된 통합 네트워크의 전송 지연에 대한 분석만을 수행하였기 때문에, 향후에는 시뮬레이션이나 실험 모델을 통하여 제안된 통합 네트워크의 성능을 검증하여야 할 것이다

### 참고문헌

1 S. H. Lee, J. W. Son, S. Lee, "Performance management of token bus networks for computer integrated

manufacturing" KSME Journal, vol 10, no 3, pp. 321-331, 1996

2 이경창, 김송, 이석, 이만형, "IEEE 802.11을 이용한 Profibus 네트워크의 무선 확장 및 성능 평가" 제어·자동화·시스템공학회 논문지 제7권, 제4호, pp 326-333, 2001

3 J. P. Thomesse, "Fieldbuses and interoperability," Control Engineering Practice vol 7, pp 81-94, 1999

4 IEC 61158-4, Digital data communications for measurement and control - Fieldbus for use in industrial control systems - Part 4. Data link protocol specification, 1999

5 D. A Roberts, "OLCHFA a distributed time-critical fieldbus," IEE Colloquium on Safety Critical Distributed Systems, pp 6/1-6/3, 1993

6 S Cavalieri, D Panno, "A novel solution to interconnect fieldbus systems using IEEE wireless LAN technology," Computer Standards & Interface, vol 20, pp 9-23, 1998

7 Profibus Specification - Normative Parts of Profibus-FMS, -DP, -PA according to the European Standard, EN 500 170. vol 2, 1998.

8 ISO/IEC 8802-11, Information technology - Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - Part 11 Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, 1999

9 F. L. Lian, J. R. Moyne, and D. M. Tilbury, "Performance Evaluation of Control Networks Ethernet, ControlNet and DeviceNet," IEEE Control Systems Magazine, Vol 21, No. 1, pp 66-83, 2001

10 J. H. Park and Y. C. Yoon, "An extended TCP/IP protocol for real-time local area network," Control Engineering Practice, Vol 6, pp 111-118, 1998

11 Quick installation guide. Lucent Tech, 1999

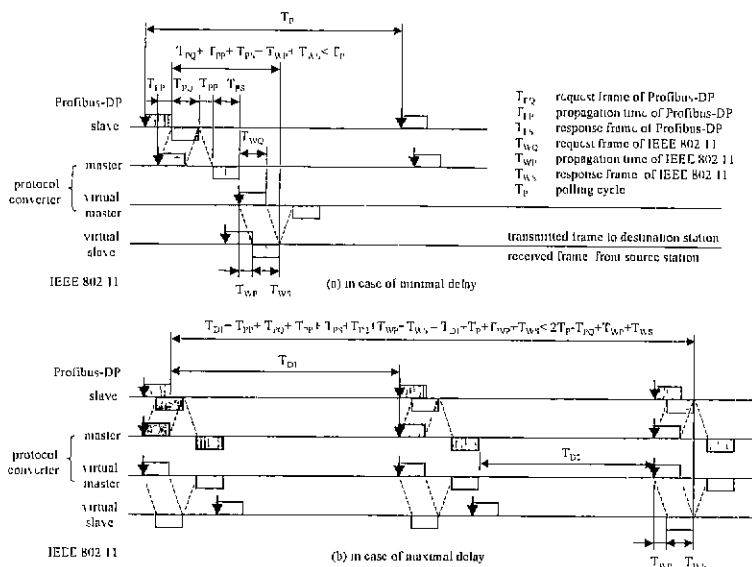


Fig. 5 Scheduling of frame in integrated network