IP 방송제작 기술 3
PTP(Precision Time Protocol) 개론

글. 조인준 KBS 기술연구소 차장

지난 연재에서 시스템 동기화의 기본적인 아이디어를 간단히 소개해드렸습니다. 이번 연재에서는 Ethernet 네트워크 디바이스 간의 동기화 기술인 PTP(Precision Time Protocol)에서 시스템 동기화가 이루어지는 과정을 구체적으로 설명하도록 하겠습니다. IP 방송제작 시스템에서 사용하는 동기화 표준인 PTP는 LAN과 같은 네트워크 내에서 고정밀 시간 동기화를 위한 표준이며, 시스템 내에서 백만분의 1초 미만의 동기화 오차를 유지할 수 있는 것으로 알려져 있습니다.

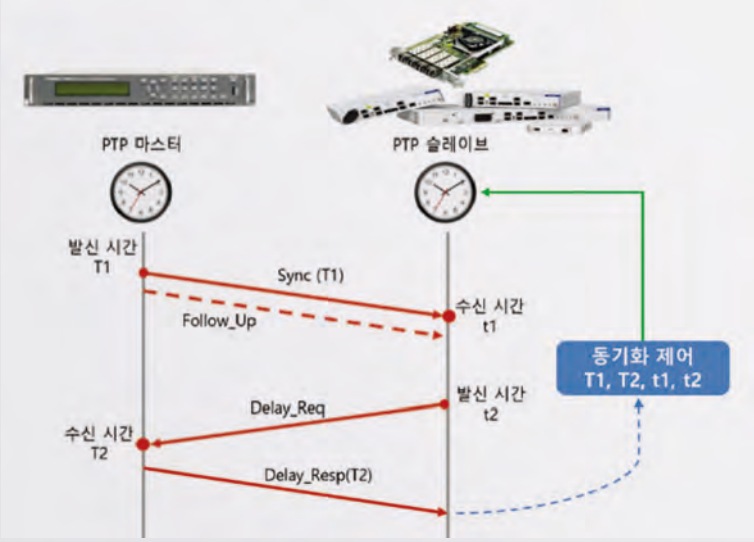

그림 1. PTP 동기화 제어 개념도

PTP를 이용한 시스템 동기화는 [그림 1]과 같이 PTP 마스터라고 불리는 Master clock의 시간을 기준으로 PTP 슬레이브라고 불리는 Slave clock의 시간을 통일시키는 작업입니다. PTP 동기화 신호를 발생시키는 전용의 장비가 주로 PTP 마스터로 동작하고, 방송제작에 쓰이는 각종 영상/음향 장비 및 I/O 보드가 PTP 슬레이브로 동작하게 됩니다. PTP 동기화는 PTP 마스터와 PTP 슬레이브 사이의 네트워크 통신(Sync, Follow_Up, Delay_Req, Delay_Resp 등의 메시지 교환)을 이용하여 수행되며, 당연히 하나의 PTP 마스터에 복수의 PTP 슬레이브가 연결되어 전체 시스템의 동기화를 이룰 수 있습니다. 서로 다른 두 개의 시계를 맞추는 것에 관해 지난 연재에서 소개한 방법이 기억나시죠? PTP의 동기화 방법도 이와 동일합니다. 그럼 지난 연재에서 소개한 내용을 다음 ①과 ②에 정리하고, ①과 ②에 따라 PTP 동기화를 설명하겠습니다.

① 시스템 내의 모든 시계의 속도를 정확히 맞춘다.

② 속도가 동일해진 시계들의 시간이 서로 다르면 가장 정확한 시계를 기준으로 이 시간의 차이를 보정한다.

우선 위 ①번 항목의 시스템 내 모든 시계의 속도를 맞추는 방법에 관해 [그림 2]를 통해 설명해 드리겠습니다. [그림 2]와 같이 PTP 마스터는 자신과 연결된 PTP 슬레이브 장치에 Sync 메시지를 계속 전송합니다. 이 Sync 메시지 안에는 Time Stamping을 통해 PTP 마스터가 Sync 메시지를 보낸 시간이 포함되어 있습니다. PTP 슬레이브는 수신된 Sync 메시지 내부 Time Stamp 정보를 통해 PTP 마스터가 Sync 메시지를 발신한 시간(PTP 마스터 내부 시계에 의한 시간)을 알 수 있고, 동시에 PTP 슬레이브 자신이 Sync 메시지를 수신한 시간(PTP 슬레이브 내부 시계에 의한 시간)을 알고 있으므로 Sync 메시지 전송에 따르는 네트워크 지연이 일정하다고 가정을 하면 발신 시간과 수신 시간의 차이를 통해서 [수식 1]과 같이 PTP 슬레이브 내부 시계 진동자의 진동수를 조절하여 시계의 속도를 PTP 마스터 시계의 속도와 같게 맞출 수 있습니다.

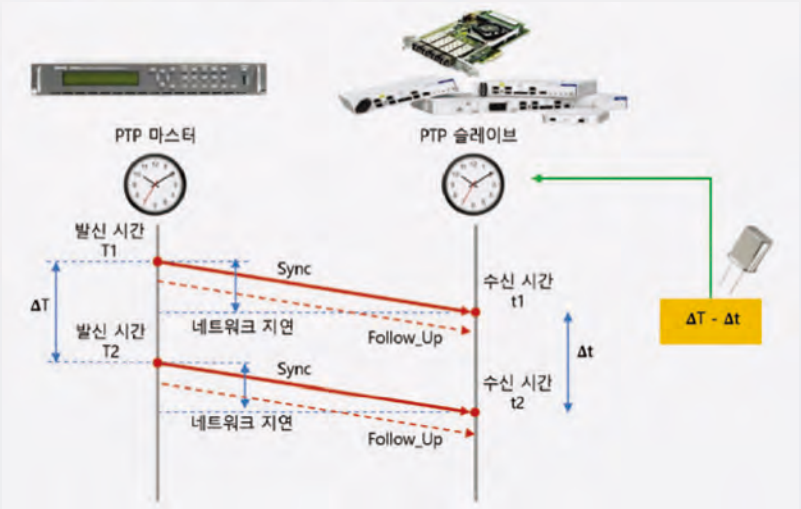

그림 2. PTP 마스터-슬레이브 진동수 제어

수식 1

$$\Delta T = T2 - T1$$

$$\Delta t = t2 - t1$$

시계의 속도가 같을 조건 : $\Delta T = \Delta t$

$\Delta T - \Delta t = 0$ 을 만족하도록 PTP 슬레이브 Clock 진동자의 진동수 보정

[그림 2]에서 한 가지 눈여겨볼 것은 Follow_Up 메시지가 점선으로 표시된 것입니다. 이는 예전 PTP 마스터 장비의 경우 Time Stamping을 한 메시지를 만들고, 이를 네트워크로 전송하기 위한 전기적 신호로 변환하는데 걸리는 시간이 PTP 동기화의 정밀도를 구현하기에는 충분히 빠르지 못해서 우선 Sync 메시지를 보내고, 이어서 Time Stamp 정보를 Follow_Up 메시지를 통해서 보냈지만, 현재의 PTP 마스터 장비들은 충분히 성능이 높아서 Sync 메시지 안에 Time Stamping을 해도 메시지 발송 처리속도에 문제가 없기에 Follow_Up 메시지를 사용하지 않기 때문입니다. 그러므로, 비교적 오래된 PTP 마스터 장비를 사용할 때에는 Follow_Up 메시지를 보내는 장비일 수도 있으니 PTP 슬레이브 측에서 이 부분에 유의하여 동기화를 처리해야 한다고 합니다.

[수식 1]을 통해서 PTP 마스터의 시계와 PTP 슬레이브의 시계 속도를 일치시키면, PTP 마스터와 PTP 슬레이브의 시계 사이에는 시간 차이만이 존재하게 됩니다. 이는 위 ②번 항목과 같이 PTP로 동기화되는 장비의 시계 간의 시간 차이만 보정하면, 시스템 내의 모든 시계가 일치하게 되는 단계에 올라선 것입니다. 이 시계 간의 시간 차이는 [그림 4]와 같이 Sync 메시지와 Delay_Req(Delay Request) 메시지를 통해서 [수식 2]와 같이 PTP 마스터와 PTP 슬레이브 간의 시간 차이를 구하고

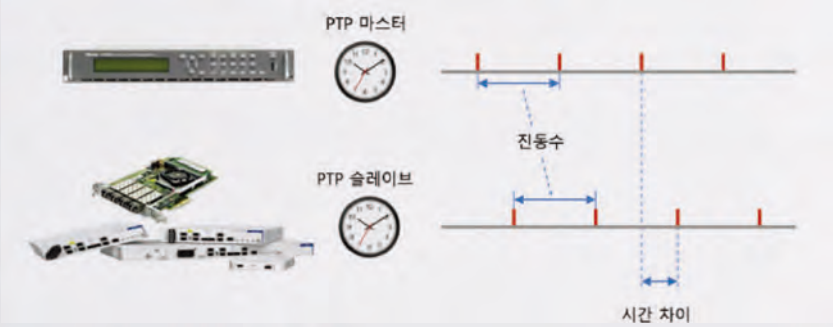

그림 3. PTP 마스터-슬레이브 시간 정보 제어

그 차이만큼 PTP 슬레이브의 시계를 보정하면 PTP 마스터와 PTP 슬레이브의 시간을 완벽히 일치시킬 수 있습니다. [그림 4]에서 T1은 Sync 메시지에 Time Stamp 되어 PTP 슬레이브에 전달이 되고, t1, t2는 PTP 슬레이브가 알고 있는 시간이므로 T2만 PTP 슬레이브가 알면 [수식 2]의 계산이 가능합니다. 이를 위해 Delay_Resp(Delay Response)라는 메시지가 존재하며, PTP 마스터가 PTP 슬레이브의 Delay_Req 메시지를 수신한 시간 T2에 대한 정보를 PTP 슬레이브에 전달합니다.

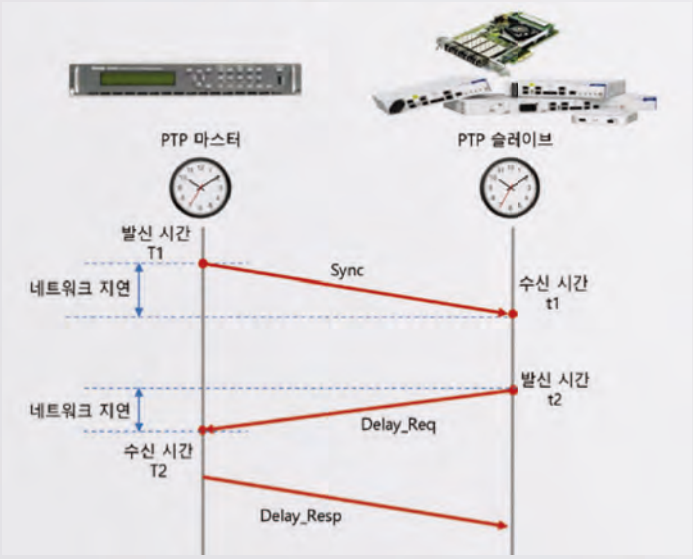

그림 4. PTP 마스터-슬레이브 위상차 제어

수식 2

$$t1 - T1 = \text{네트워크 지연} + \text{시간 차이(PTP 마스터와 PTP 슬레이브 간)}$$
$$T2 - t2 = \text{네트워크 지연} - \text{시간 차이(PTP 마스터와 PTP 슬레이브 간)}$$

$$t1 - T1 - (T2 - t2) = 2 \times \text{시간 차이(PTP 마스터와 PTP 슬레이브 간)}$$

$$\text{시간 차이(PTP 마스터와 PTP 슬레이브 간)} = \frac{t1 - T1 - (T2 - t2)}{2}$$

앞서 소개된 과정들을 통해서 PTP 마스터의 시계를 기준으로 시스템 내의 전체 PTP 슬레이브의 시계가 매우 높은 정밀도로 동기화될 수 있습니다. 그런데 독자 여러분! 여기서 한 가지 궁금한 점이 떠오르지 않으시나요? 예를 들면 "PTP 슬레이브의 시간은 PTP 마스터에 맞추는데, PTP 마스터의 시간은 어디에 맞추지?" 같은 질문 말입니다. 그런데 진짜 PTP 마스터의 시간은 어디에 맞출까요? C군이 들은 바로는 PTP 마스터의 시간은 GPS 시계에 맞춘다고 들었습니다.

GPS 시계는 지상의 GPS 관제센터의 세슘 원자시계가 기준이 되는 것으로 C군은 알고 있습니다. 그러므로 PTP 마스터의

시간을 GPS 시계에 맞춘다는 것은 GPS 관제센터의 세슘 원자시계에 맞추는 것과 같은 것이 되므로 PTP 마스터 내부 시계의 시간 정밀도는 매우 높은 신뢰도를 가진다고 할 수 있습니다. 그런데 많은 PTP 관련 문건을 보면 PTP에서 사용하는 시간은 TAI(Temps Atomique International, 국제원자시계)를 기반으로 한다고 되어있습니다. TAI는 전 세계 50개 국가 연구시설에서 보유한 400개 이상의 세슘 원자시계 시간의 가중 평균치라고 합니다. 앞서 PTP 마스터의 시계는 대부분 GPS 시간에 맞춘다고 하더니 지금은 또 PTP가 TAI 시간에 기반하고 있다고 소개하니 뭔가 헷갈립니다. 하지만, 엄밀한 지식이 없어도 어쩐지 두 개가 같은 이야기 같다는 생각도 듭니다. 위에서 GPS 시간은 GPS 관제센터의 세슘 원자시계를 기준으로 한다고 하였고, TAI는 전 세계 50개 국가 연구시설에서 보유한 400개 이상의 세슘 원자시계 시간의 가중 평균치라고 하였으니 사실상 GPS 시간과 TAI 시간 사이의 오차는 없다고 봐도 될 것 같기 때문입니다. 그리고 다른 자료를 찾아보더라도 TAI 시계로 19초에 GPS 시계가 시작되어서 TAI와 GPS의 시간 차이는 19초로 계속 유지되고 있다고 하니 19초의 시간 차이를 제외하면 GPS 시계가 흘러가는 속도나 TAI 시계가 흘러가는 속도는 동일하다는 결론이 나옵니다.

GPS, TAI 시간을 소개한 김에 UTC(Coordinated Universal Time, 협정 세계시)까지 소개하겠습니다. UTC는 1972년 1월 1일부터 시행된 국제 표준시이며 TAI와 윤초 보정을 기반으로 표준화되었다고 합니다. UTC의 가장 큰 특징은 지구의 불규칙한 자전에 의한 태양시(지구의 공전과 자전을 기준으로 시간을 측정)와 원자시계 사이의 오차를 보정하기 위해 1초를 추가하는 윤초(Leap second)의 사용에 있습니다. 윤초는 59초→60초→1초와 같은 일반적 시간의 흐름을 어쩌다 한 번 59초→60초→**0초**→1초로 하여 1초의 시간을 더하는 것 입니다. 즉, 윤초를 추가한다는 것은 지구의 자전이 느려져서 지구가 원자시계로 1초를 더 돌아야 태양시와 원자시계의 시간이 다시 일치한다는 것입니다. 1972년 시행된 이래로 현재까지 27차례의 윤초가 있었고, UTC와 TAI의 차이는 37초라고 합니다(TAI가 37초 빠름). 그런데 여기서 조금 이상하죠? 윤초는 27차례였는데 왜 UTC와 TAI의 차이는 37초일까요? 그 이유는 1972년 시행 당시 이미 10초의 차이를 가지고 있었기 때문이라고 합니다. 왜 초기에 10초의 차이를 두고 시작했는지에 관해서는 자료를 찾지 못했습니다. 다음에 자료를 찾게 되면 소개해드리도록 하겠습니다.

마지막으로 PTP에서 사용하는 시간에 대해서 설명해 드리겠습니다. PTP에서는 TAI를 기반으로 시간을 맞춘다고 하였지만, TAI를 기준으로 시계의 속도를 맞추는 것이고 시간의 표현은 1970년 1월 1일 0시 0분 0초를 시작으로 하여 현재까지 경과한 초(second)를 이용하여 시간을 표현합니다. 앞서 소개된 Sync 메시지의 Time Stamp를 예로 들면 아래와 같은 시간 정보가 PTP 동기화에 사용됩니다.

Time Stamp : second	1436270875
Time Stamp : nanosecond	856324950

위 Sync 메시지 내의 Time Stamp에 의하면 PTP 마스터 시계의 시간은 1970년 1월 1일 0시 0분 0초로부터 1436270875하고도 856324950나노초가 경과했음을 가리키고 있다는 의미입니다.

지금까지 PTP 동기화가 어떻게 이루어지는지에 관해 조금은 구체적인 설명을 드렸습니다. 다음 연재에서는 PTP 동기화를 위한 시스템의 구성에 관련된 내용을 다루어보겠습니다.