

IP 방송제작 기술 2

PTP(Precision Time Protocol) 개론

글. 조인준 KBS 기술연구소 차장

계절은 다시 봄입니다. 독자 여러분의 기분도 봄빛처럼 밝고 맑아지기를 바랍니다. 지난 달부터 IP 방송제작 기술 관련 연재를 새로 시작하며 IP 방송제작 장비 관련 기술과 표준에 관한 간단한 개요를 전해드렸습니다. 이번 연재부터는 지난번에 약속드린 바와 같이 IP 방송제작 장비 기술의 중요 요소인 PTP(Precision Time Protocol) 동기화 기술에 관해 소개하겠습니다.



그림 1. 과중시계 시계추의 진자운동

지금은 거의 사라진 물건이지만, 80년대를 거쳐 온 사람이라면 집마다 거실 한쪽에 놓여있던 [그림 1]과 같은 과중시계를 본 적이 있을 것입니다. 태엽을 감고 손으로 하단의 커다란 시계추를 밀어서 진자운동을 시키면 시계가 가기 시작했었습니다. 좌우로 무한 왕복하며 진자운동을 하던 커다란 시계추는 딱히 할 일이 없던 당시 어린아이들이 낫 놓고 바라보며 시간을 죽이던 무념무상의 수행 도구이기도 했습니다.

여기서 잠깐 과중시계의 작동원리에 관한 기술인 적호기심이 모락모락 피어오르지 않으시나요? 잠시 아주 간단하게 과중시계의 원리를 설명드리면 다음과 같습니다.

과중시계는 태엽의 동력으로 작동합니다. 그러나 태엽의 풀리는 속도는 일정하지가 않아서 이를 이용하여 시계를 만드는 것은 일견 불가능해 보입니다. 하지만, 기계가 아무 동력 없이 작동할 수는 없어서 태엽 같은 장치를 안 쓸 수도 없으므로 태엽의 풀리는 속도를 비교적 주기가 일정한 시계추의 진자운동으로 제어하는 방식을 고안하여 시계에 이용하게 된 것입니다. [그림 2]는 과중시계의 시계추가 어떻게 태엽의 풀리는 속도를 제어하는지 간략하게 보여줍니다. 우선 [그림 2]의 노란색 화살표 방향으로 돌아가는 톱니바퀴 A

는 태엽과 연결되어 돌고 있으며, 하늘색 화살표 방향으로 돌아가는 톱니바퀴 B는 톱니바퀴 A로부터 시침이나 분침으로 회전을 전달하는 역할을 합니다. 여기에 파란색 원형의 시계추가 톱니바퀴 A 위의 녹색 □ 모양 장치와 연결이 되어 있습니다. 이 □ 모양 장치는 [그림 2]의 시간 t 에서와같이 시계추가 오른쪽 상사점 근처에 있을 때 톱니바퀴 A를 멈추게 되고, 시간 $t+1$ 과 같이 시계추가 하사점 근처를 통과할 때 잠시 톱니바퀴 A가 자유롭게 돌게 놓아주며, 다시 시간 $t+2$ 처럼 시계추가 왼쪽 상사점에 근처에 도달할 때 톱니바퀴 A를 멈추게 합니다. 그리고 또다시 시계추가 하사점 근처를 통과할 때 잠시 톱니바퀴 A가 자유롭게 돌게 놓아주는 패턴을 반복합니다. □ 모양 장치와 톱니바퀴 A의 형태나 크기 등을 잘 설계하면 시간에 따라 태엽이 풀리는 속도에 어느 정도 편차가 있더라도 실제 톱니바퀴 A는 시계추의 운동에 따라 한 번에 한 톱니만큼 회전하고 멈추고, 다시 한 톱니만큼 회전하고 멈추게 만들 수 있을 것 같지 않은가요? 이렇게 비교적 주기가 일정한 시계추의 진자운동으로 태엽이 풀리는 속도를 제어해서 일정한 속도로 시침과 분침이 움직이게 한 것이 과중시계의 기본 원리입니다.

그러나 아무리 시계추의 진자운동이 비교적 일정하다고 해도 예를 들어 온도에 따라 미세하게 시계추의 길이가 늘어나거나 줄어들면 시계는 아주 조금이라도 느려지거나 빨라

지겠죠? 그리고 이 작은 오차가 매초 누적되면서 점점 시간의 오차가 커지게 되겠죠? 그래서 당시 과중시계에는 시계추의 길이를 조절할 수 있는 장치가 있어서, 시계가 느리게 가면 시계추의 길이를 줄이고, 시계가 빨리 가면 시계추의 길이를 늘일 수 있게 하였습니다. 시계추의 정확한 길이를 맞추는 것은 시행착오를 거쳐서 최적의 길이를 찾았을 것입니다. 이와 같이 태생적으로 완벽하지 않은 정확성 때문에 그 시절 각 가정에서는 더 정확하다고 생각되는 시계를 기준으로 과중시계들을 맞춰서 사용했습니다. 주로 9시 뉴스 시보나 전자시계 등을 기준으로 삼았습니다.

그런데 문득 “왜 C군은 PTP 동기화와 아무 상관없어 보이는 과중시계 이야기를 하였을까?” 하는 의문이 독자 여러분 마음속에 한가득 피어올랐을 것 같습니다. 그리고 이러한 독자 여러분 마음속 의문에 대한 대답은 언제나 C군이 묵묵히 그래왔듯이 PTP의 원리를 좀 더 친숙하게 독자 여러분께 알려드리기 위한 밑그림이라는 것입니다. 앞서 과중시계 이야기를 하며 시계추의 길이를 조절하여 진자운동의 주기를 바꿔 과중시계가 빠르게 가거나 느리게 가게 할 수 있고, 과중시계의 시간이 틀린 것 같으면 더 정확하다고 생각되는 시계의 시간에 과중시계의 시간을 다시 맞춰서 사용했다고 말씀드렸습니다. 여기에 시스템 동기화의 핵심이 모두 들어 있습니다.

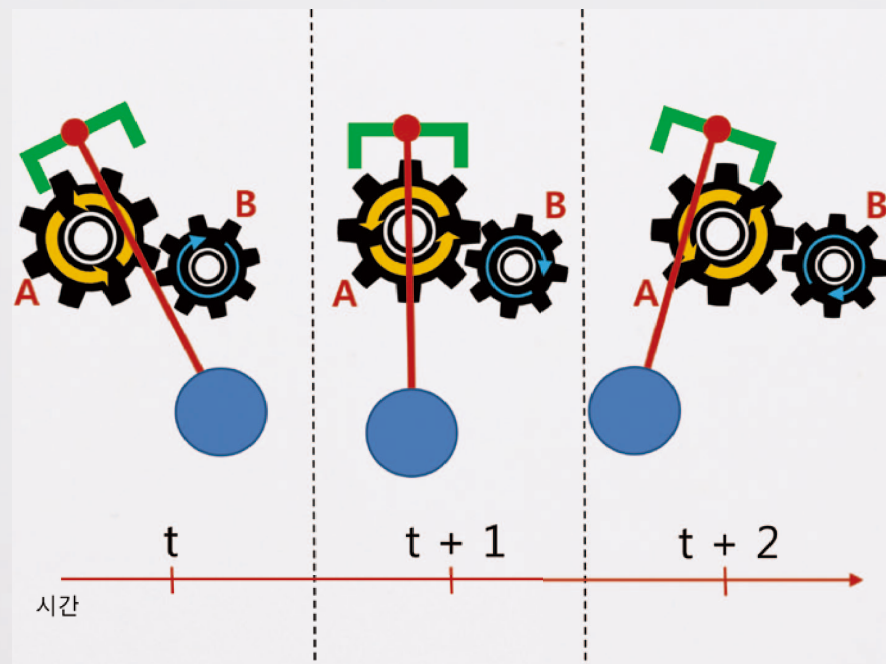


그림 2. 과중시계 시계추의 진자운동

어느 도시의 각 가정, 회사, 상점 등을 각각의 시스템이라고 가정하고, 해당 도시를 거대한 시스템들의 집합에 비유해보겠습니다. 이 도시의 가정, 회사, 상점들은 각각 저마다의 패종시계를 가지고 정해진 시간에 정해진 과제를 서로 수행하며 거대한 도시를 유기적으로 움직이게 합니다. 그런데 만약 이 도시의 가정, 회사, 상점들의 패종시계가 서로 틀어진다면 어떻게 될까요? 각 가정에서는 출근 시간과 등교 시간을 제대로 지키지 못할 것이고, 회사와 상점들은 문을 여는 시간이 제각각일 것이며, 회사와 회사, 상점과 상점 간의 거래가 서로 약속한 정확한 시간에 이루어지지 못해 꽤 혼란스러울 것입니다. 이를 방지하기 위해서는 주기적으로 각 가정, 회사, 상점 등에서 패종시계의 시간이 ① 점점 빨라지거나 느려지지 않는지 점검하고, ② 정확하고 권위 있는 각종 시보나 정밀도 높은 다른 시계를 기준으로 패종시계가 정확한 시간을 가리키는지 확인해야 할 것입니다. 이렇게 해서 각 가정, 회사, 상점 등의 패종시계가 매우 높은 수준으로 동기화가 되어있으면 앞서 예를 든 것과 같은 시간 오차로 인한 도시의 혼란은 생기지 않을 것이며, 많은 일이 도시에서 순조롭게 흘러갈 것입니다. 다른 말로 표현한다면 이 도시는 각 시스템 간에 높은 수준의 동기화를 달성한 도시이며, 이 높은 수준의 동기화가 전체 시스템이 안정되게 흐르게 하는 원동력이 되는 것입니다. 그럼 이제부터 패종시계로 시작한 동기화 원리를 조금 더 기술적인 표현으로 써 내려 가보겠습니다.

패종시계가 시계추의 진자운동 주기로부터 시계 톱니바퀴의 회전 속도를 조절하고, 이를 통해 시침과 분침이 가리키는 시간을 제어하듯이 현대의 시계는 전자 소자의 전기적 진동의 주기를 이용하여 시간을 측정합니다. 이런 전기적 진동이 가능한 전자 소자를 진동자(Oscillator)라고 부르며 진동자를 이용한 시계 구현의 기본 원리는 [그림 3]과 같습니다.



그림 3. 진동자와 카운터를 이용한 시간 측정

구성은 매우 간단합니다. 매우 정확하게 주기적인 전기 신호를 발생시키는 진동자의 진동수를 카운터를 통해서 세면 '시간 = 주기 × 진동 횟수'의 관계식으로부터 경과한 시간을

측정할 수 있습니다.

표 1. 다양한 진동자의 종류와 정확도

진동자 종류	1일 누적 오차	1개월(30일) 누적 오차
TCXO	$\pm 4.3\text{ms}$	$\pm 1100\text{ms}$
OCXO	$\pm 4.5\mu\text{s} \sim \pm 865\mu\text{s}$	$\pm 3.3\text{ms} \sim \pm 330\text{ms}$
Rb	$\pm 1.1\mu\text{s}$	$\pm 370\mu\text{s}$

[표 1]은 상용 진동자의 오차 정도를 정리한 표입니다. [표 1]의 TCXO는 온도 보상형 수정 진동자(Temperature Compensated X-tal Oscillator)의 약자이고, OCXO는 오븐 제어 수정 진동자(Oven Controlled X-tal Oscillator)의 약자이며, Rb는 루비듐(Rubidium)의 약자입니다. TCXO는 온도 변화에 민감한 진동자의 특성을 보상하기 위해 직렬로 연결된 부하 커패시턴스(Load Capacitance)의 값을 진동자의 온도에 따라 조절하여 일정한 주파수를 유지하는 방식으로 동작합니다. 평균적으로 하루에 $\pm 4.3\text{ms}$ 의 오차가 발생하며, 30일 정도가 지나면 $\pm 1100\text{ms}$ 의 오차가 발생하는 것으로 알려져 있습니다. OCXO는 아예 진동자에 오븐을 붙여서 진동자의 온도를 일정하게 유지하는 방식을 채택한 유형입니다. 아무래도 진동자의 온도를 측정하여 부하 커패시턴스를 조절하는 방식보다는 더 직접적이고 정밀한 온도 제어가 가능하여 평균적으로 하루에 $\pm 4.5\mu\text{s} \sim \pm 865\mu\text{s}$ 의 오차가 발생하고, 30일 이후에 $\pm 3.3\text{ms} \sim \pm 330\text{ms}$ 정도의 오차가 발생하는 것으로 알려져 있습니다. 오차 범위가 넓은 이유는 상용 OCXO의 경우 다양한 등급이 존재하고 등급에 따라 오차가 달라지기 때문이라고 합니다. Rb는 루비듐(Rubidium)의 원소기호입니다. 주로 원자시계를 만드는 데 이용되며 3000만 년에 1초 정도의 오차를 낸다는 세슘(Cesium) 원자시계에 비해 정확도는 떨어지지만 비교적 저렴하게 생산할 수 있어서 통신 기지국 등에 많이 사용된다고 합니다. 루비듐의 경우 보통의 상용 제품 오차가 30일 경과 후 $\pm 370\mu\text{s}$ 정도라고 하므로 매우 정확한 진동자 중의 하나입니다. 물론 진동자의 가격은 정확성이 높아질수록 비싸집니다.

이제 모든 이야기를 종합하여 시스템 동기화의 기본 원리를 정리해보겠습니다. [그림 4]는 정확도가 각기 다른 시계들을 각 시스템이 가지고 있는 경우입니다. 절대적인 시간을 기준으로 각 시스템 내부 시계의 1초가 서로 다르므로 어

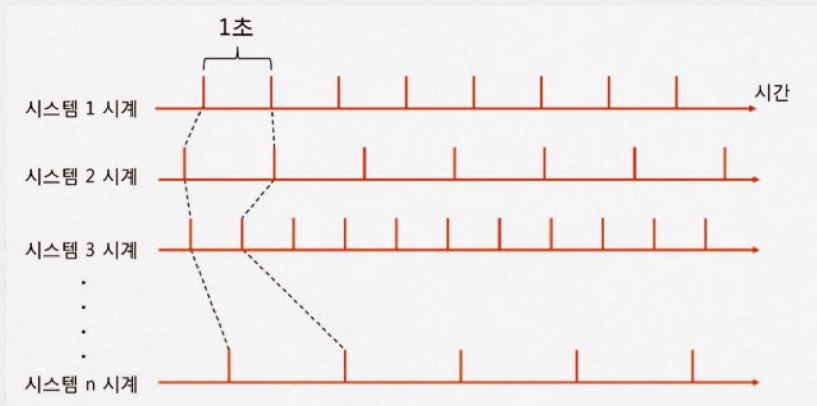


그림 4. 속도가 서로 다른 시스템의 시계들

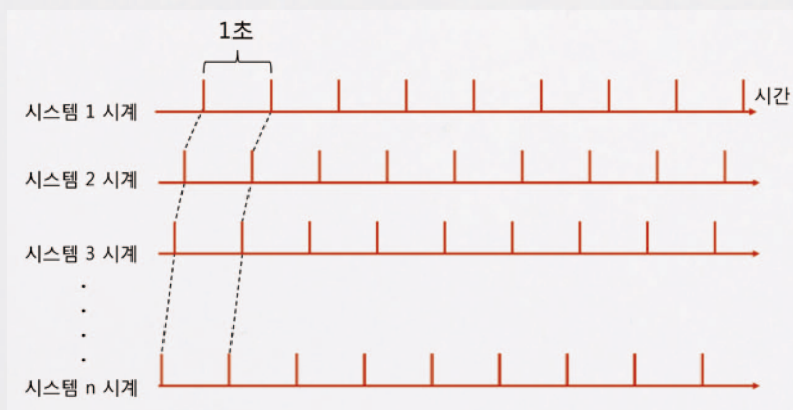


그림 5. 같은 속도로 작동하는 시스템의 시계들

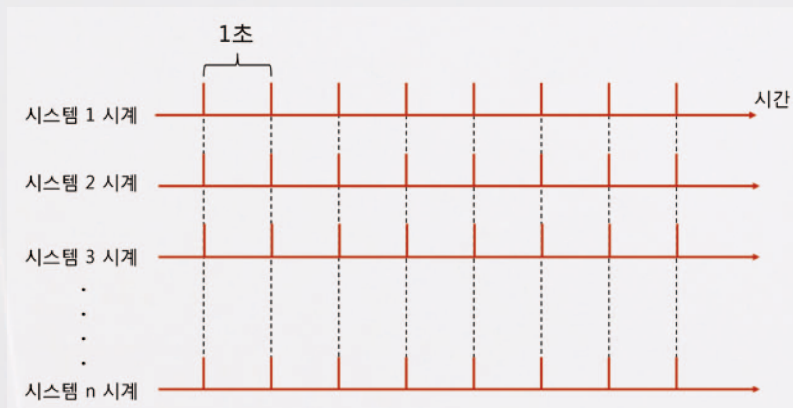


그림 6. 완벽히 동기화된 시스템 시계들

떤 시스템에서는 시계가 빠르게 가고, 어떤 시스템에서는 시계가 느리게 가서 시스템 간 서로 시간을 맞춰 상호작용을 할 수가 없습니다. 이를 해결하기 위해서는 우선 시계의 속도를 맞추는 것이 필요합니다. 이를 위해 [표 1]의 진동자 중 시스템 동기화 목적에 따라 적절한 정확도를 가진 진동자를 선택하여 각 단위 시스템들의 시계들에 장착하면 각 시계가 가는 속도는 시스템 운용의 실용적 수준에서 문제없을 정도로 매우 높은 정확도를 가지고 [그림 5]와 같이 일치할 것입니다. 이는 앞의 비유 ①에서 각 가정, 회사, 상점의 패종시계들의 시계추 길이가 잘 조절이 되어 모든 패종시계의 시침과 분침이 움직이는 속도가 절대적 시간과 일치하게 된 것과 같은 단계입니다. 정확도가 높은 진동자를 이용해서 동기화가 필요한 시스템 모두에 속도 오차가 거의 없는 시계들을 구현했다면, 다음 단계는 9시 시보나 매우 정확하다고 생각되는 시계를 기준으로 모든 가정, 회사, 상점의 시계들을 맞추는 앞의 비유 ②와 같이 세슘 원자시계 등과 같은 극도로 정밀한 시계를 기준으로 각 시스템의 시계를 맞추면 [그림 6]과 같이 모든 시스템의 시계가 같은 속도로 동작하며 정확히 같은 시각을 가리키는 시스템 동기화가 완료됩니다. 물론 상용 진동자의 경우 오차가 있으므로 주기적으로 [그림 4]와 [그림 5]처럼 속도와 시간을 맞추는 보정 작업이 필요합니다.

지금까지 시스템 동기화의 기본적 개념에 대해 설명해 드렸습니다. 생각보다 별거 없어서 실망하시지 않았을까 걱정이 되기도 하지만, 항상 초심을 간직하며 최선을 다해 독자 여러분을 찾아뵙고 있습니다.

다음 연재에서는 PTP가 어떻게 시스템 동기화를 이루는지 다루겠습니다. 📺