

# **TI DSP, MCU, Xilinx Zynq FPGA**

## **프로그래밍 전문가 과정**

### **eQEP Lab**

**2018.07.25**

**강사 – Innova Lee(이상훈)**  
gcccompil3r@gmail.com

**학생 – 안상재**  
sangjae2015@naver.com

## 1. eQEP 사용 목적

### eQEP (enhanced Quadrature Encoder Pulse) 모듈

=> eQEP의 모듈은 고성능의 움직임이나, 위치 제어 시스템의 회전하는 물체로부터 위치, 방향, 속도정보를 얻기 위해 선형 또는 회전식 증가형 엔코더와의 정확한 인터페이스를 위해 사용된다.

## 2. QEP encoder 란 무엇인가?

=> 로터리 엔코더는 회전방향의 기계적 변위량을 전기적 신호의 디지털량으로 변환하는 장치이다.

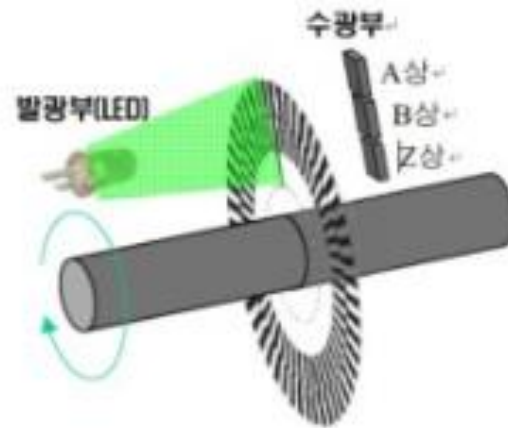
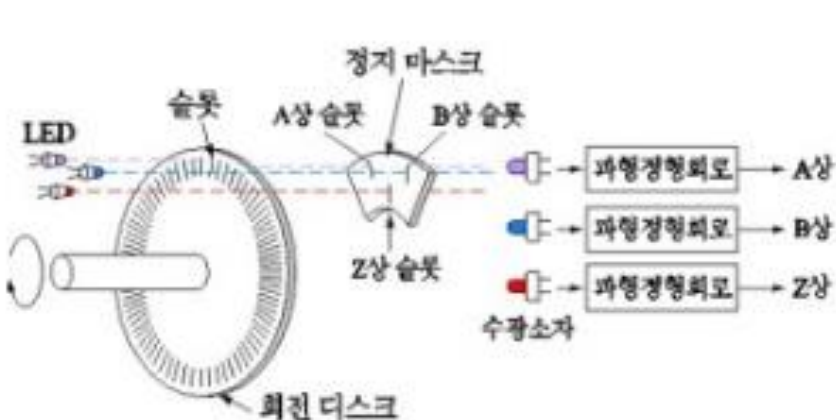
- 엔코더의 wheel 은 일반적으로 모터의 매 회전마다 한 바퀴씩 회전한다. (모터에 대해 맞게 설계된 회전 비가 존재함)
  - 엔코더의 wheel은 밝고 어두운 line이 교대로 존재하는 패턴이 있고, 밝고 어두운 line에 따라 QEPA(A상), QEPB(B상) 신호를 출력한다.
  - > QEPA, QEPB 신호는 90도의 위상 차이가 난다.
  - QEPA와 QEPB 출력의 디지털 신호의 주파수는 모터의 속력에 비례해서 다르다.
- (프로세서는 QEPA, QEPB 신호의 주파수를 측정해서 모터의 속도를 계산할 수 있다.)

\* 모터의 속도 <-> QEPA, QEPB 신호 주파수 계산

=> 5000rpm 속도로 회전하는 모터에 결합된 2000라인의 엔코더는 166.6KHZ 주파수의 QEPA, QEPB 신호를 출력한다.

=> 5000rpm : 초당 83.333번 회전

=> 엔코더는 한 바퀴에 2000라인이 존재하므로 QEPA, QEPB 신호는  $83.333 \times 2000 = 166.6\text{KHZ}$ 의 주파수를 갖는다.



< Rotary 엔코더 원리 개략도 >

- QEPA와 QEPB 신호 중에 어떤 신호가 앞서는지에 따라 모터 회전의 방향이 결정된다.
- 엔코더 내부의 디스크의 두 번째 트랙은 QEPI (index signal) 신호 생성을 위해 존재한다.
- > QEPI 신호는 모터가 1회전을 할 때마다 한번 펄스 신호를 발생시킨다.
- > QEPI 신호는 모터의 절대적인 위치(기준점 0점)를 나타내기 위해 사용된다. (단, 전원이 꺼지는 순간의 위치를 알 수는 없음)

EX)

QEPA : 1바퀴에 100개의 line이 있는 패턴의 디스크를 사용한다면, QEPA 펄스가 1번 발생하면 3.6도 증가

QEPB : QEPA와 90도의 위상차이를 가지는 펄스를 발생시켜 엔코더의 방향을 감지함

Figure 34-1. Optical Encoder Disk

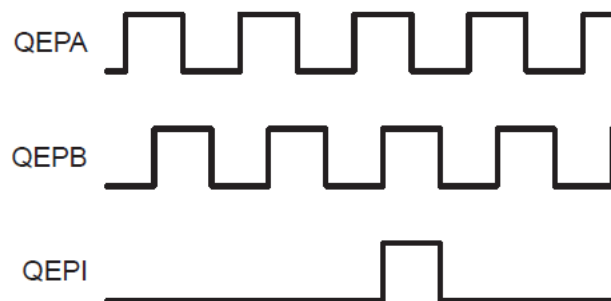
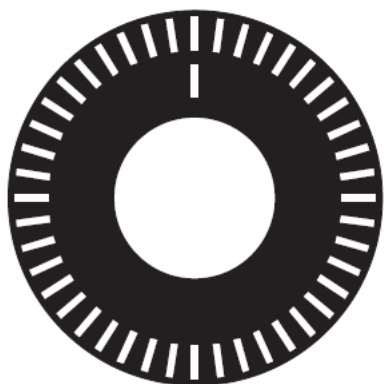
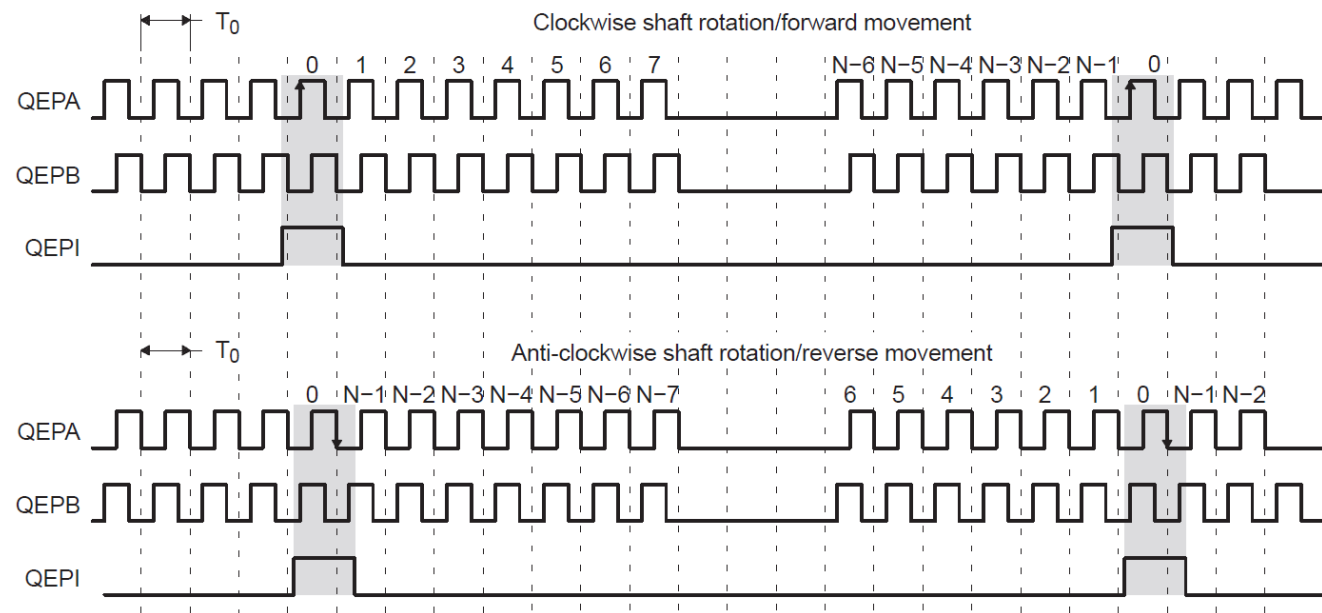


Figure 34-2. QEP Encoder Output Signal for Forward/Reverse Movement



Legend: N = lines per revolution

### 3. 모터의 회전 속도 구하기

**General Issues:** Estimating velocity from a digital position sensor is a cost-effective strategy in motor control. Two different first order approximations for velocity may be written as:

$$v(k) \approx \frac{x(k) - x(k-1)}{T} = \frac{\Delta X}{T}$$

(68) ← 고속

$$v(k) \approx \frac{X}{t(k) - t(k-1)} = \frac{X}{\Delta T}$$

(69) ← 저속

where

$v(k)$ : Velocity at time instant  $k$

$x(k)$ : Position at time instant  $k$

$x(k-1)$ : Position at time instant  $k-1$

$T$ : Fixed unit time or inverse of velocity calculation rate

$\Delta X$ : Incremental position movement in unit time

$t(k)$ : Time instant " $k$ "

$t(k-1)$ : Time instant " $k-1$ "

$X$ : Fixed unit position

$\Delta T$ : Incremental time elapsed for unit position movement.

- 식 (68)은 unit time event를 제공하기 위한 time base를 필요로 한다.
- encoder count(position)는 각각의 unit time event 동안에 한 번 읽는다.
- 현재 읽은 값  $x(k)$  에서 바로 이전에 읽은 값  $x(k-1)$  을 빼서  $1/T$  (time base의 역수)를 곱하면 속력을 계산할 수 있다.
- 식 (69)는 연속적인 구형 펄스의 엣지 사이의 경과된 시간을 측정함으로써 모터 속도를 계산할 수 있다. (고정된 펄스의 간격)
- 각각의 펄스의 너비는 주어진 센서의 분해능에서 모터 속도에 의해 정해진다.
- 상대적으로 높은 모터 속도와 높은 분해능을 가진 센서를 결합할 때는 time interval이 작아질 수 있다.
- > 고속 측정 시에는 상당한 에러를 발생시킨다.

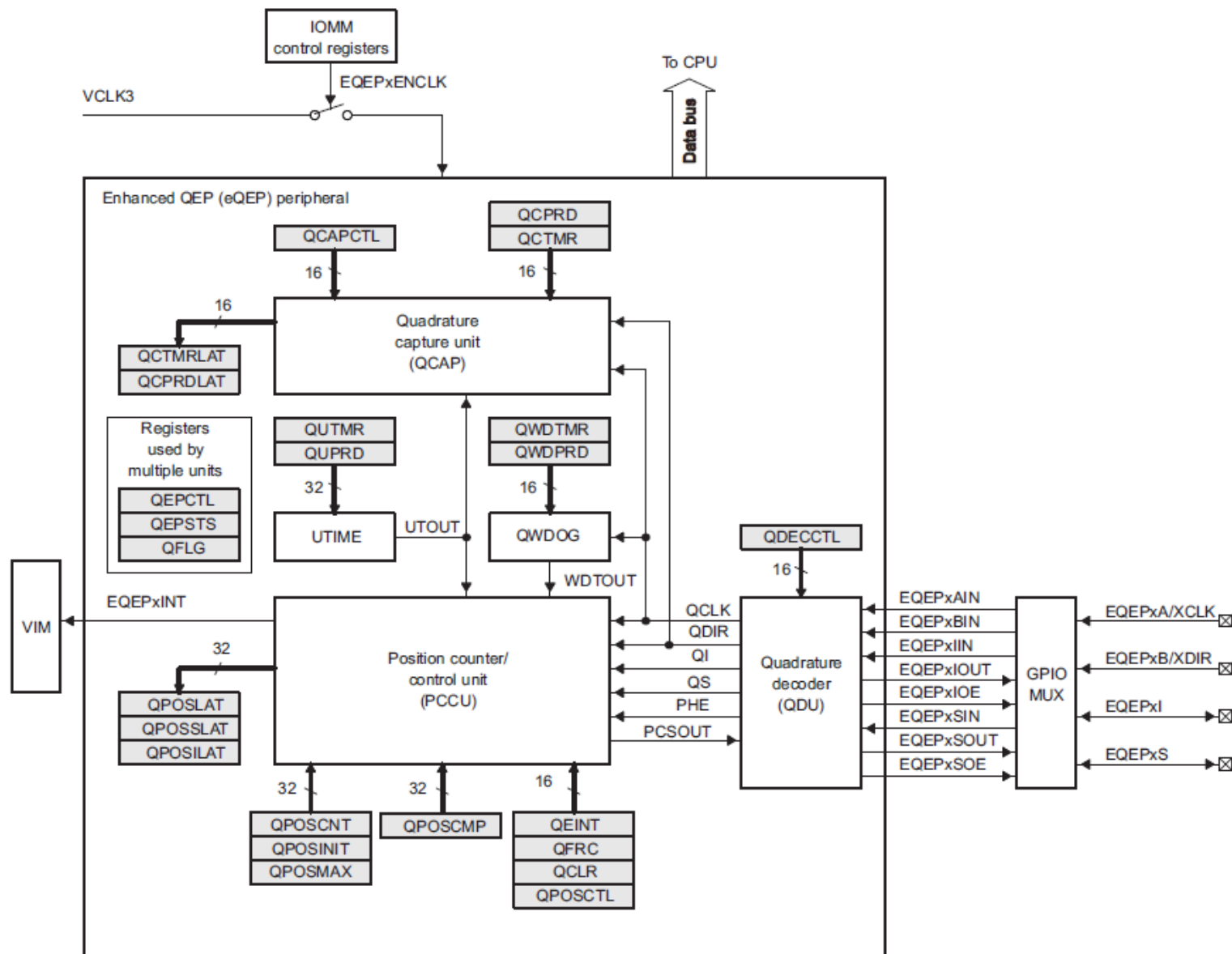
## 4. 기본 동작

### 4-1. eQEP Inputs

- QEPA/XCLK and QEPB/XDIR
  - 두 핀은 Quadrature-clock Mode 와 Direction-count Mode로 사용될 수 있다.
    - Quadrature-clock Mode
      - 90도의 위상 차이가 나는 2개의 구형파 신호를 이용해서, 입력 샤프트 축의 회전 방향을 알 수 있다.
      - index position(0 점) 기준으로 eQEP 펄스의 수를 세서 상대적인 위치 정보를 알 수 있다.
    - Direction-count Mode
      - QEPA 핀은 클럭 입력을 제공하고, QEPB 핀은 방향 입력을 제공한다.
- eQEPI : Index or Zero Marker
  - index signal은 절대적인 시작 위치를 나타낸다.
  - index pin은 매 회전마다 position counter의 값을 리셋시킨다.
- QEPS : Strobe Input
  - strobe pin에 어떤 event가 발생하면, strobe pin은 position counter의 값을 초기화 시키거나 래치할 수 있다
  - strobe pin은 센서 등에 연결되어, motor가 특정 위치에 도달되었다는 것을 알려주기 위해 사용된다.

## 4-2. Functional Description

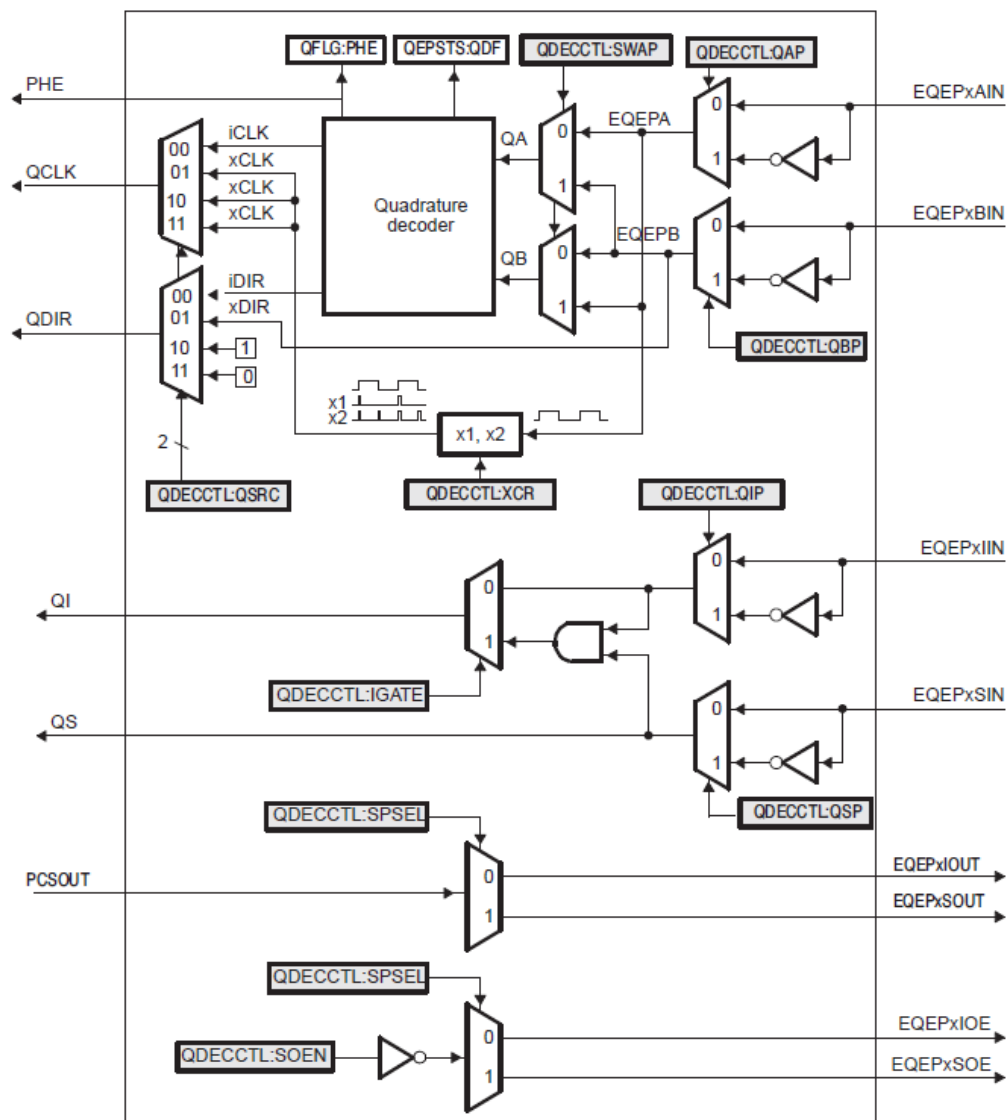
Figure 34-4. Functional Block Diagram of the eQEP Peripheral



## 4-2-1. Quadrature Decoder Unit (QDU)

Figure 34-5 shows a functional block diagram of the QDU.

Figure 34-5. Functional Block Diagram of Decoder Unit





## ***4-2-1-1. Position Counter Input Modes***

- Position Counter Input Modes는 아래 4가지로 나뉘어 진다.

- 1) Quadrature-count mode
- 2) Direction-count mode
- 3) UP-count mode
- 4) DOWN-count mode

## 4-2-1-1-1. *Quadrature-count Mode*

### \* *Quadrature-count Mode*

- eQEP 엔코더는 90도의 위상차이가 나는 2개의 구형파를 제공한다.
- 2개의 구형파의 위상 관계는 입력 축의 회전 방향을 결정한다.
- index position (0점 위치)으로부터의 eQEP 펄스의 갯수는 상대적인 위치 정보를 얻는 데 사용된다.
- 정방향 회전에서 QEPA 신호가 QEPB 신호를 앞서고, 역방향 회전에서는 반대이다.

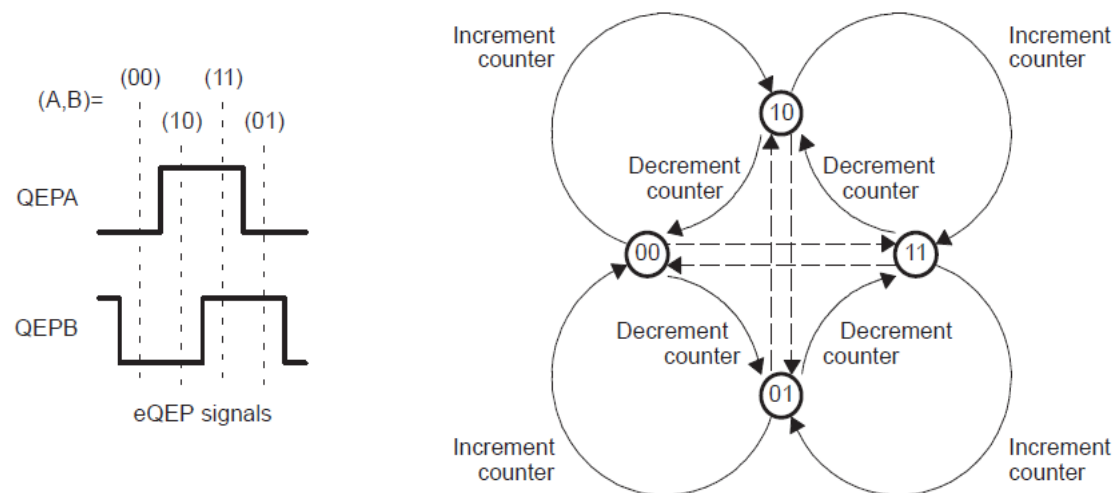
=> *quadrature decoder*는 *position counter*에 **방향과 클럭**을 제공한다.

- eQEP 모듈의 direction decoding logic은 QEPA, QEPB 중에 어느 것이 앞선 순서인지를 결정하고, QEPSTS bit에 방향 정보를 업데이트 한다.

Table 34-2. Quadrature Decoder Truth Table

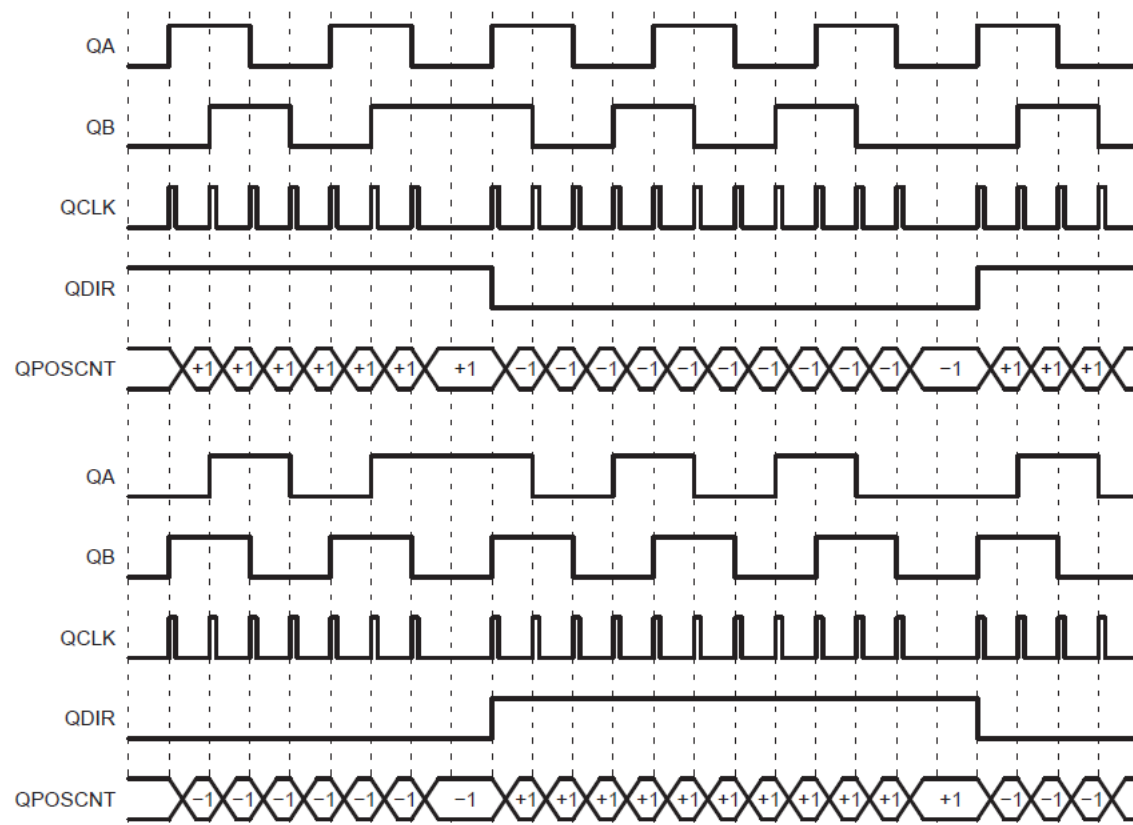
Previous Edge	Present Edge	QDIR	QPOSCNT
QA↑	QB↑	UP	Increment
	QB↓	DOWN	Decrement
	QA↓	TOGGLE	Increment or Decrement
QA↓	QB↓	UP	Increment
	QB↑	DOWN	Decrement
	QA↑	TOGGLE	Increment or Decrement
QB↑	QA↑	DOWN	Increment
	QA↓	UP	Decrement
	QB↓	TOGGLE	Increment or Decrement
QB↓	QA↓	DOWN	Increment
	QA↑	UP	Decrement
	QB↑	TOGGLE	Increment or Decrement

Figure 34-6. Quadrature Decoder State Machine



- QCLK는 QA, QB의 엣지마다 펄스를 발생시킨다.
- 정방향일 때는 QDIR 이 high 이고, QPOSCNT가 QCLK의 엣지마다 증가한다.
- 역방향일 때는 QDIR 이 low 이고, QPOSCNT가 QCLK의 엣지마다 감소한다.

Figure 34-7. Quadrature-clock and Direction Decoding



## 4-2-1-1-2. *Direction-count Mode*

### *\* Direction-count Mode*

- 방향과 클럭 신호가 외부로 부터 직접적으로 제공된다.
- QEPA 핀은 클럭 입력을 제공하고, QEPB 핀은 방향 입력을 제공한다.
- 방향 입력(QEPB)가 high 일 때, QEPA 입력의 rising edge 마다 position counter가 증가한다.
- 방향 입력(QEPB)가 low 일 때, QEPA 입력의 rising edge 마다 position counter가 감소한다.

## ***4-2-2. Position Counter and Control Unit (PCCU)***

- PCCU는 QEPCTL 과 QPOSCTL 2개의 레지스터를 통해 position counter operational modes 를 셋팅함.

### ***4-2-2-1. Position Counter Operating Modes***

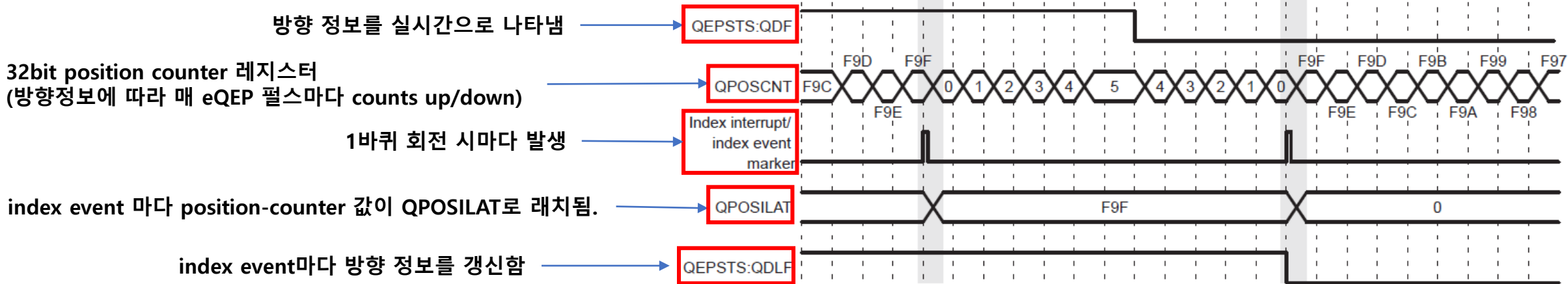
- Position Counter Reset on Index Event
- Position Counter Reset on Maximum Position
- Position Counter Reset on the first Index Event
- Position Counter Reset on Unit Time Out Event (Frequency Measurement)

## 4-2-2-1-1. Position Counter Reset on Index Event (QEPCTL[PCRM] = 00)

=> 1바퀴 회전하면, 리셋됨! (index event 발생)

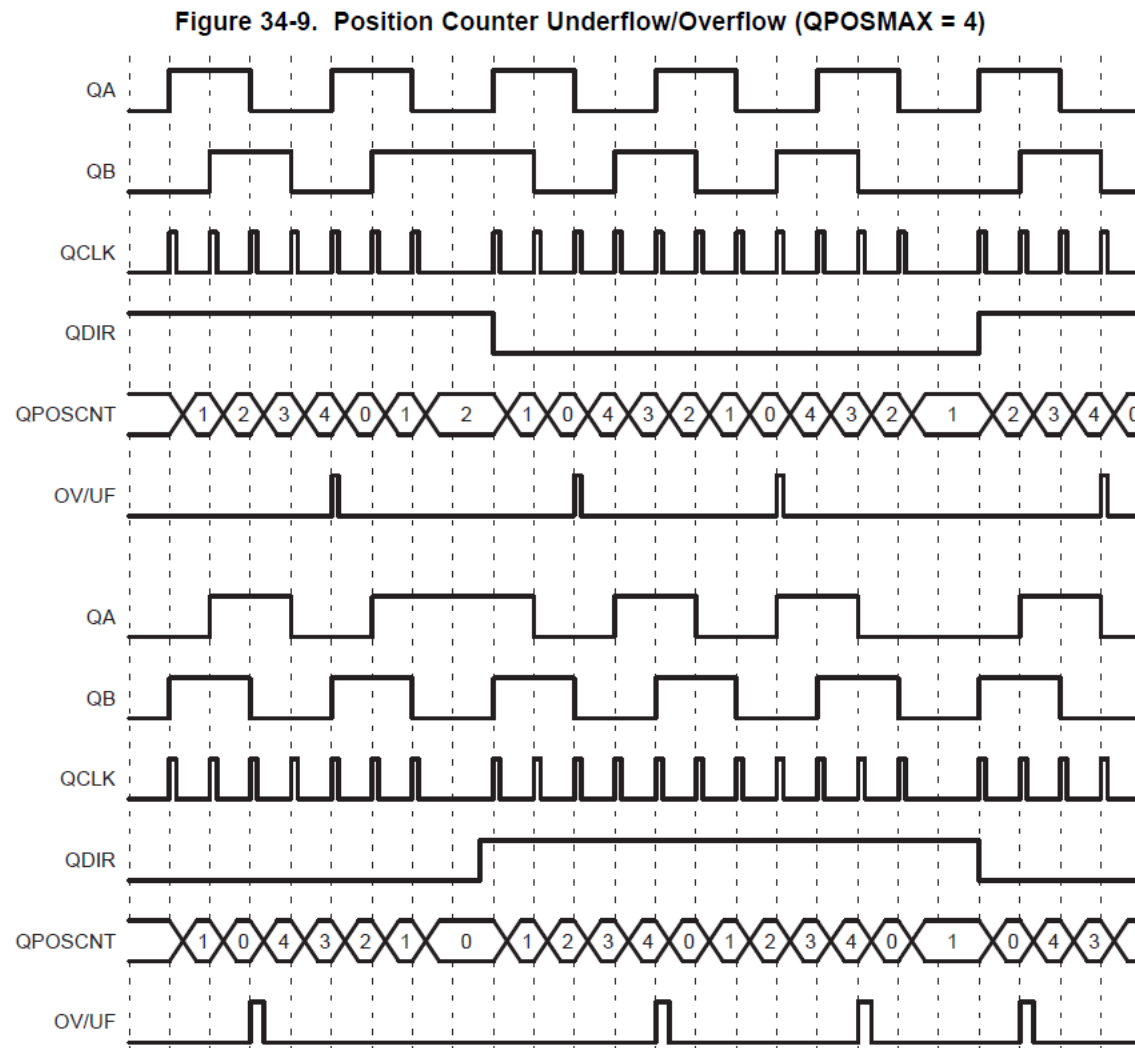
- 정방향 회전동안 index event가 발생하면(1바퀴 회전), position counter가 다음 eQEP clock에서 0으로 리셋됨.
- 역방향 회전동안 index event가 발생하면, position counter가 다음 eQEP clock에서 QPOS MAX 레지스터의 값으로 리셋됨.

Figure 34-8. Position Counter Reset by Index Pulse for 1000 Line Encoder (QPOS MAX = 3999 or F9Fh)



## 4-2-2-1-2. Position Counter Reset on Maximum Position (QEPCTL[PCRM] = 01)

- position counter (QPOSCNT) 값이 QPOSMAX값과 같아지면, 다음 eQEP 클럭에서 0으로 리셋됨. (정방향)
- position counter (QPOSCNT) 값이 0 이 되면, 다음 eQEP 클럭에서 QPOSMAX 값으로 리셋됨. (역방향)





### ***4-2-2-1-3. Position Counter Reset on the First Index Event (QEPCTL[PCRM] = 10)***

- 정방향 회전시 첫번째 index event 가 발생하면, position counter 는 다음 eQEP 클럭에서 0으로 리셋된다.
- 역방향 회전시 첫번째 index event 가 발생하면, position counter 는 다음 eQEP 클럭에서 QPOSMAX 레지스터의 값으로 리셋된다.
- 첫 번째 index event 이후에는, ***Position Counter Reset on Maximum Position*** 모드 처럼 동작한다.

### ***4-2-2-1-4. Position Counter Reset on Unit Time out Event (QEPCTL[PCRM] = 11)***

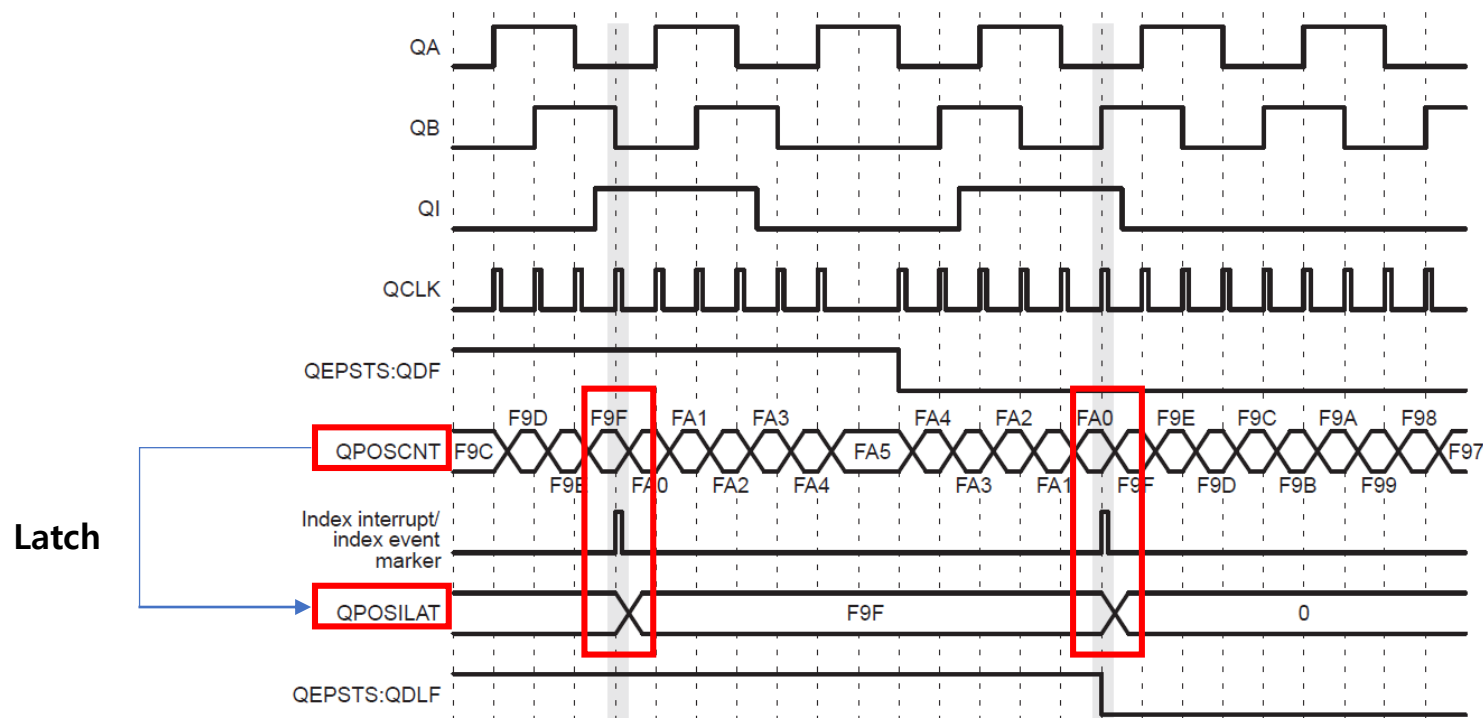
- unit-time event 가 발생하면, position counter(QPOSCNT) 값은 QPOSLAT 레지스터로 래치된다.
- QPOSCNT 값이 QPOSLAT 레지스터로 래치되면, QPOSCNT 값은 방향 정보에 따라 0 또는 QPOSMAX 값으로 리셋된다.

#### ***4-2-2-2. Position Counter Latch***

#### ***4-2-2-2-1. Index Event Latch***

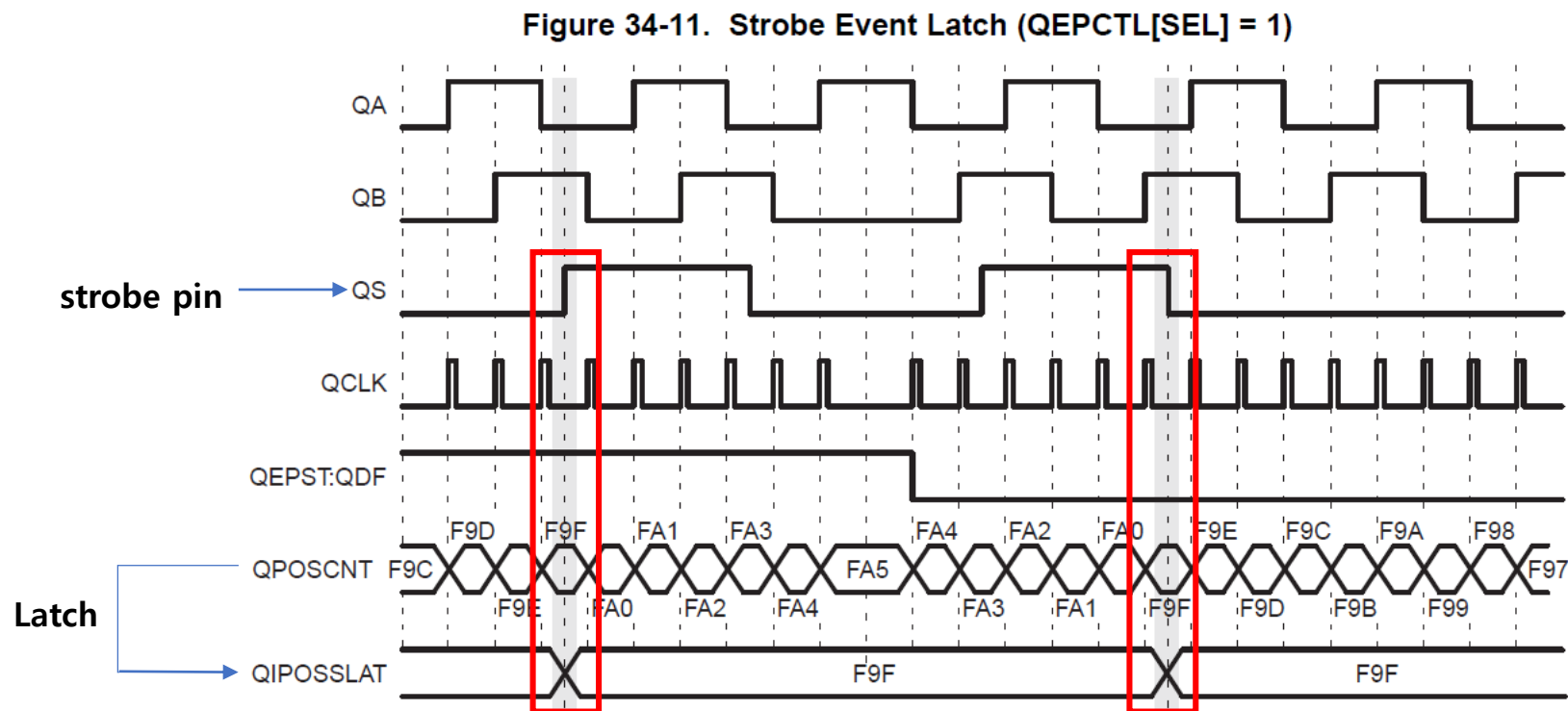
- index event가 발생할 때마다 무조건 position counter를 리셋 시키는 것이 좋지 않을 수 있음.
- position counter를 특정한 상황에서 래치할 수 있도록 설정할 수 있다.
- > **Latch on Rising edge (QEPCTL[IEL] = 01)**
- > **Latch on Falling edge (QEPCTL[IEL] = 10)**
- > **Latch on Index Event Marker (QEPCTL[IEL] = 11)**

**Figure 34-10. Software Index Marker for 1000-line Encoder (QEPTCL[IEL] = 1)**



## 4-2-2-2. Strobe Event Latch

- 정방향 또는 역방향에서 strobe input 의 엣지에서 position counter 값이 QPOSSLAT 레지스터로 래치된다.
- 자세한 설정은 QEPCTL[SEL] bit에서 설정할 수 있다.



## ※ position counter 가 초기화 되는 경우

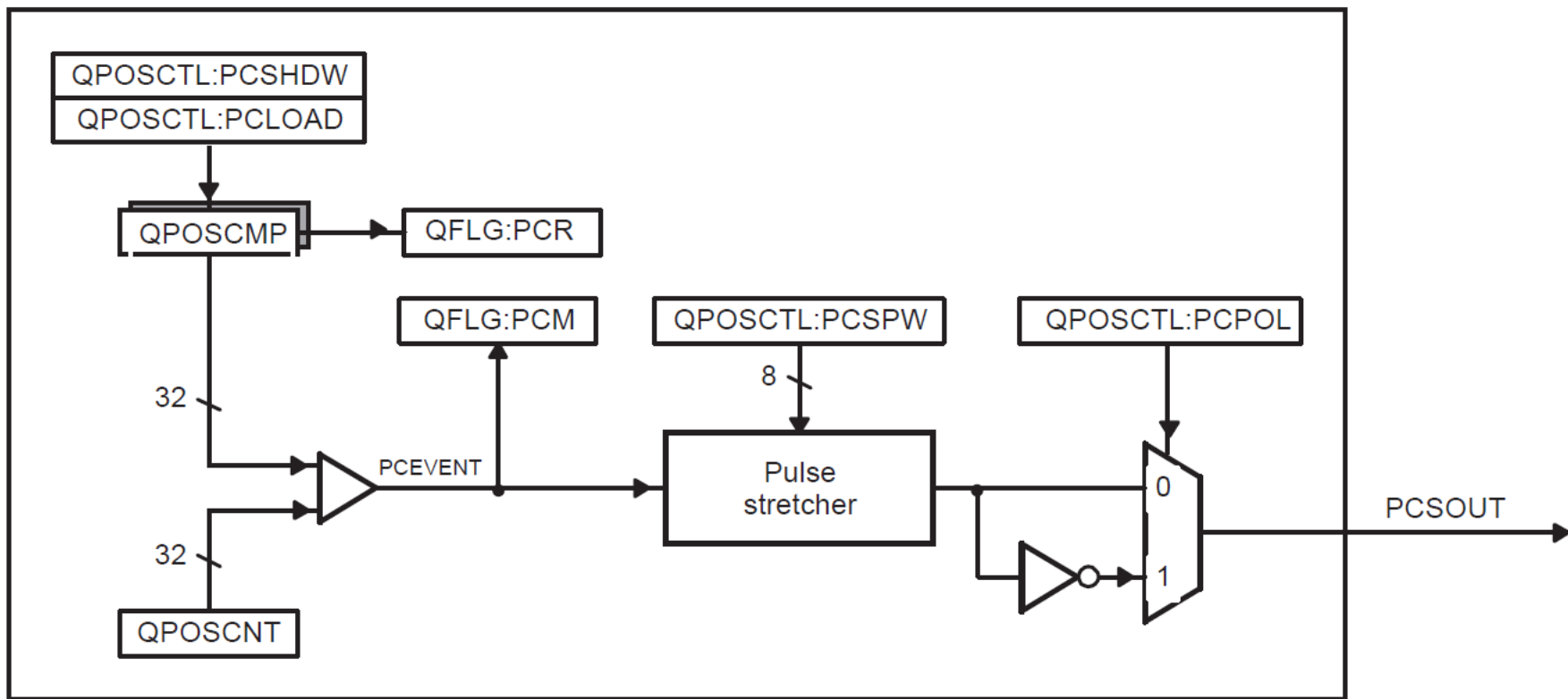
- 1) Index event 발생 시 (QEPCTL[IEI])
- 2) Strobe event 발생 시 (QEPCTL[SEI])
- 3) Software initialization (QEPCTL[SWI])

11-10	SEI		Strobe event initialization of position counter.
		0	Does nothing (action is disabled).
		1h	Does nothing (action is disabled).
		2h	Initializes the position counter on rising edge of the QEPS signal.
		3h	Clockwise Direction: Initializes the position counter on the rising edge of QEPS strobe. Counter Clockwise Direction: Initializes the position counter on the falling edge of QEPS strobe.
9-8	IEI		Index event initialization of position counter.
		0	Do nothing (action is disabled).
		1h	Do nothing (action is disabled).
		2h	Initializes the position counter on the rising edge of the QEPI signal (QPOSCNT = QPOSINIT).
		3h	Initializes the position counter on the falling edge of QEPI signal (QPOSCNT = QPOSINIT).
7	SWI		Software initialization of position counter.
		0	Do nothing (action is disabled).
		1	Initialize position counter (QPOSCNT=QPOSINIT). This bit is not cleared automatically.

### 4-2-2-3. eQEP Position-compare Unit

- eQEP 페리페럴의 position-compare unit 모듈은 position-compare match 에서 sync output 또는 인터럽트를 발생시킨다.
- > position-compare match는  $QPOSCNT(\text{position counter}) = QPOSCMP(\text{position-compare register})$  인 경우이다.
- QPOSCMP(position-compare register) 의 shadowed mode 는 enabled 또는 disabled 될 수 있다. (QPOSCTL[PSSHDW] bit에 의해 설정 가능)

Figure 34-12. eQEP Position-compare Unit



- QPOSCMP 의 shadowed mode 가 disabled 된 경우, CPU는 별 다른 조건 없이 QPOSCMP 레지스터에 직접 쓸 수 있다.

- QPOSCMP 의 shadowed mode 가 enabled 된 경우,

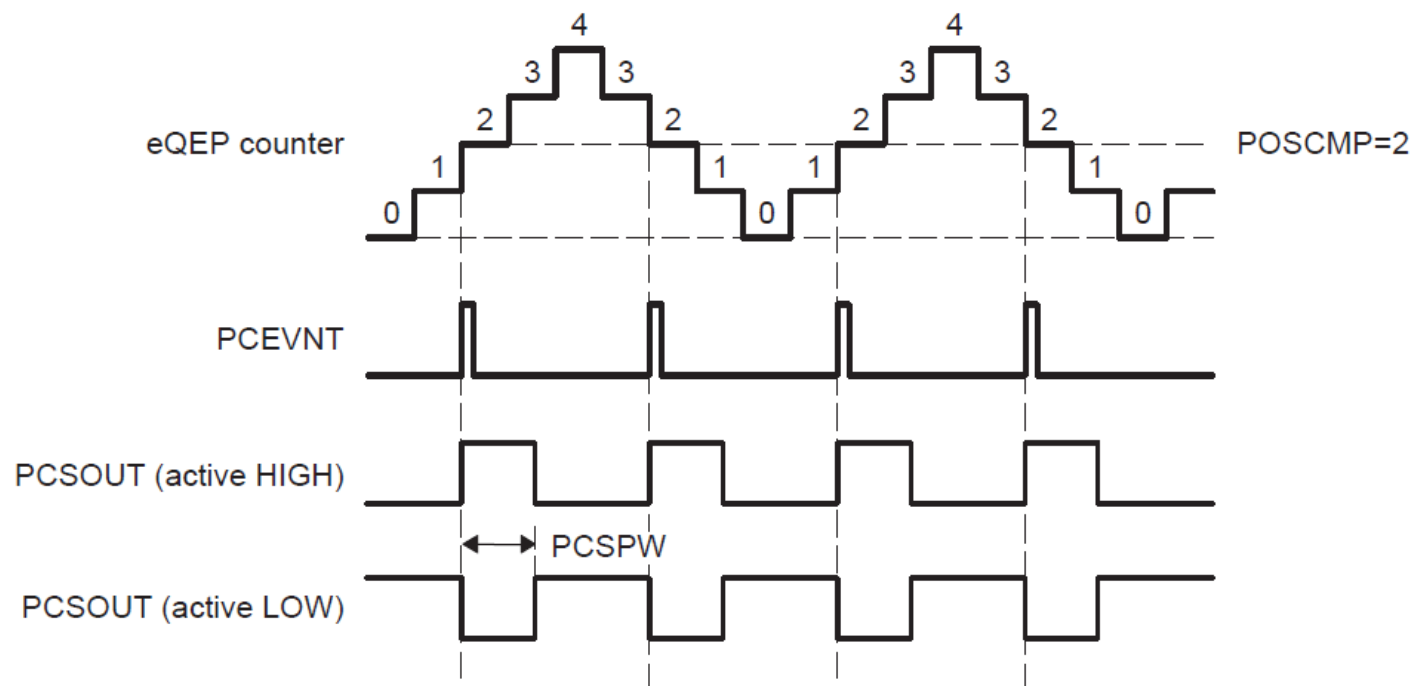
- > compare match

- > position-counter zero event

의 상황에서 shadow register 값을 QPOSCMP 레지스터에 load 할 수 있다.

- QPOSCMP 가 2로 설정이 되면, position-compare unit은 QPOSCNT가 1->2 로 변할 때(정방향)와 3->2로 변할 때(역방향) position-compare event 를 발생시킨다.

**Figure 34-13. eQEP Position-compare Event Generation Points**



- position-compare unit 내부의 pulse stretcher logic 모듈은 position-compare match 가 되면, PCEVNT가 발생하고 PCSOUT(programmable position-compare sync pulse output) 신호를 출력한다.
- shadowed mode에서는 compare match 에서 QPOSCMP를 변경할 수 있다.

**PSCOUT 펄스가 active인 상태에서  
새로운 position-compare match가 발생한 경우**

**compare match 에서  
QPOSCMP 값 변경**

Figure 34-12. eQEP Position-compare Unit

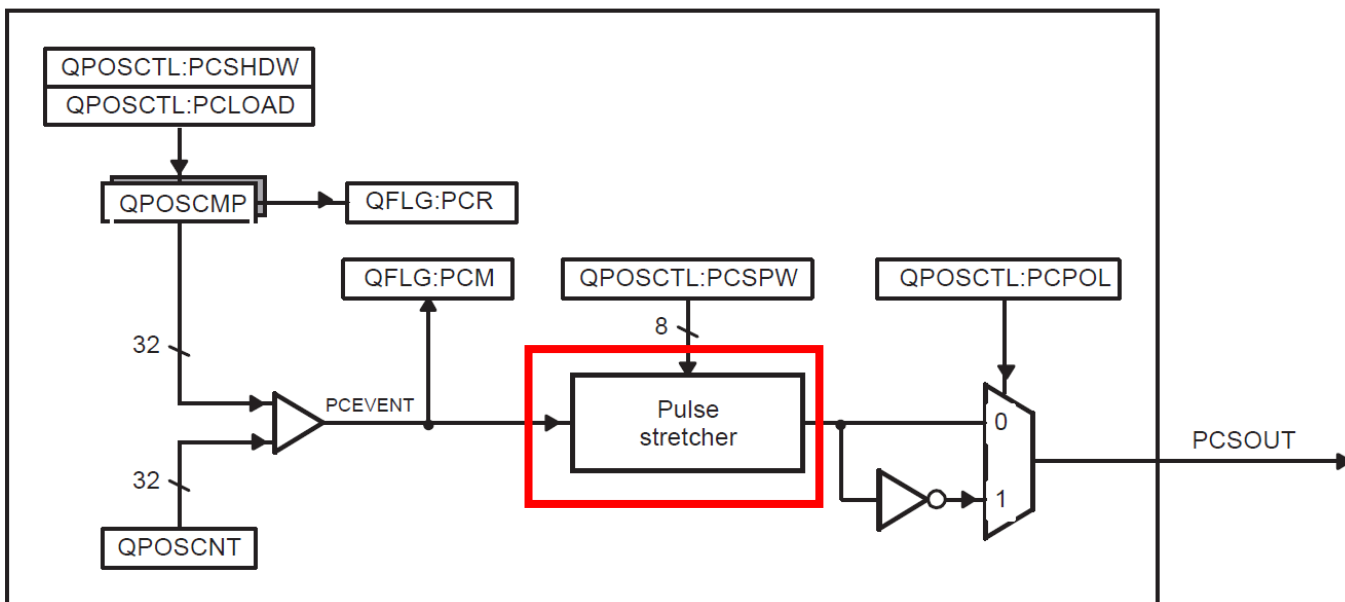
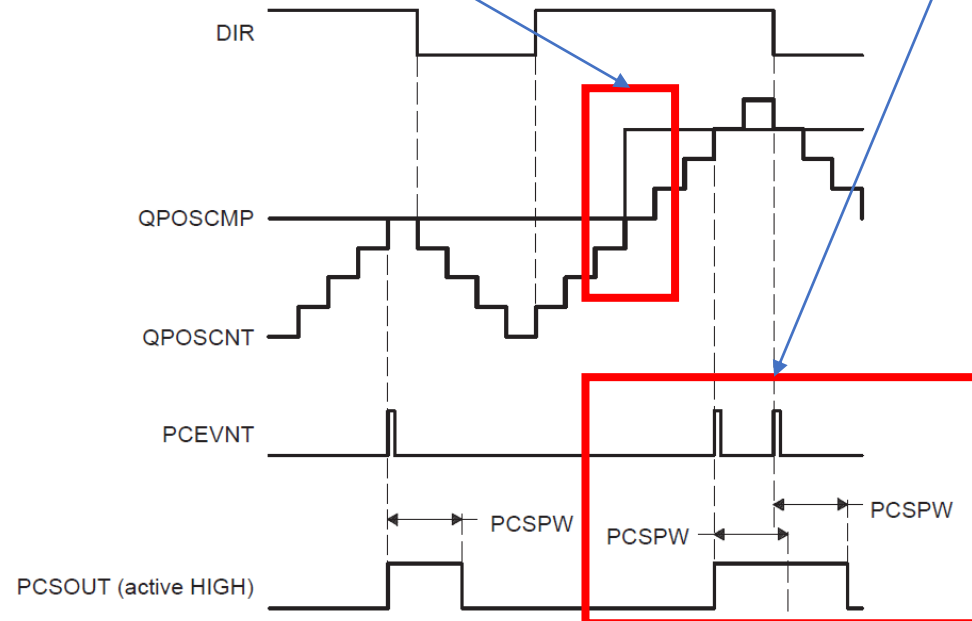


Figure 34-14. eQEP Position-compare Sync Output Pulse Stretcher





### 4-2-3. eQEP Edge Capture Unit

=> edge capture unit 은 unit position events 사이의 경과된 시간을 측정하는 모듈이다.

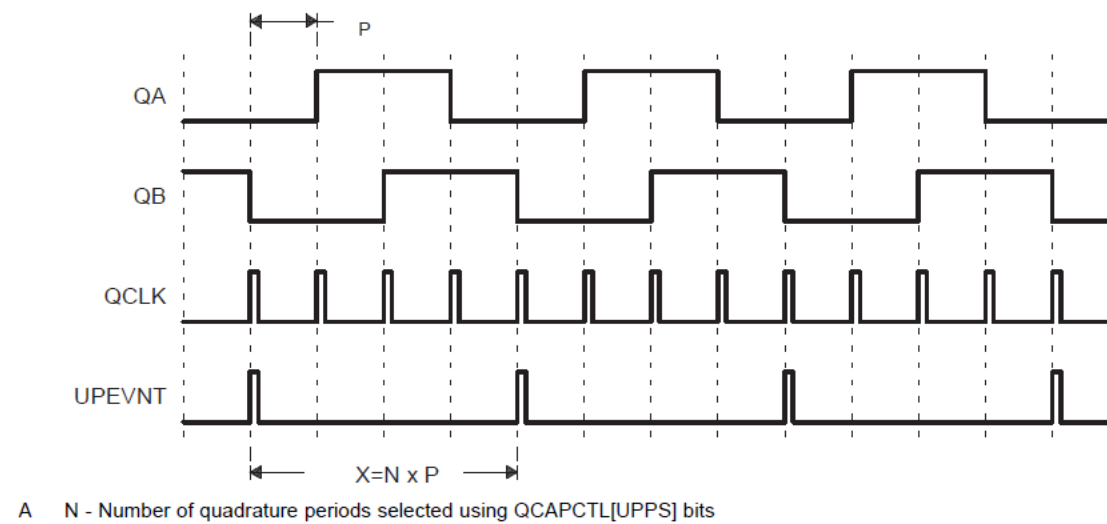
=> 아래 식을 사용하는 저속 측정을 위해 사용됨.

$$v(k) = \frac{X}{t(k) - t(k - 1)} = \frac{X}{\Delta T}$$

- 매 unit position event 마다 capture timer(QCTMR) 값은 capture period 레지스터(QCPRD) 로 래치된다.
- UPEVNT는 새로운 값이 QCPRD 레지스터로 래치됐다는 것을 나타낸다.

- unit position event 가 발생할 때마다 UPEVNT 펄스가 출력된다.

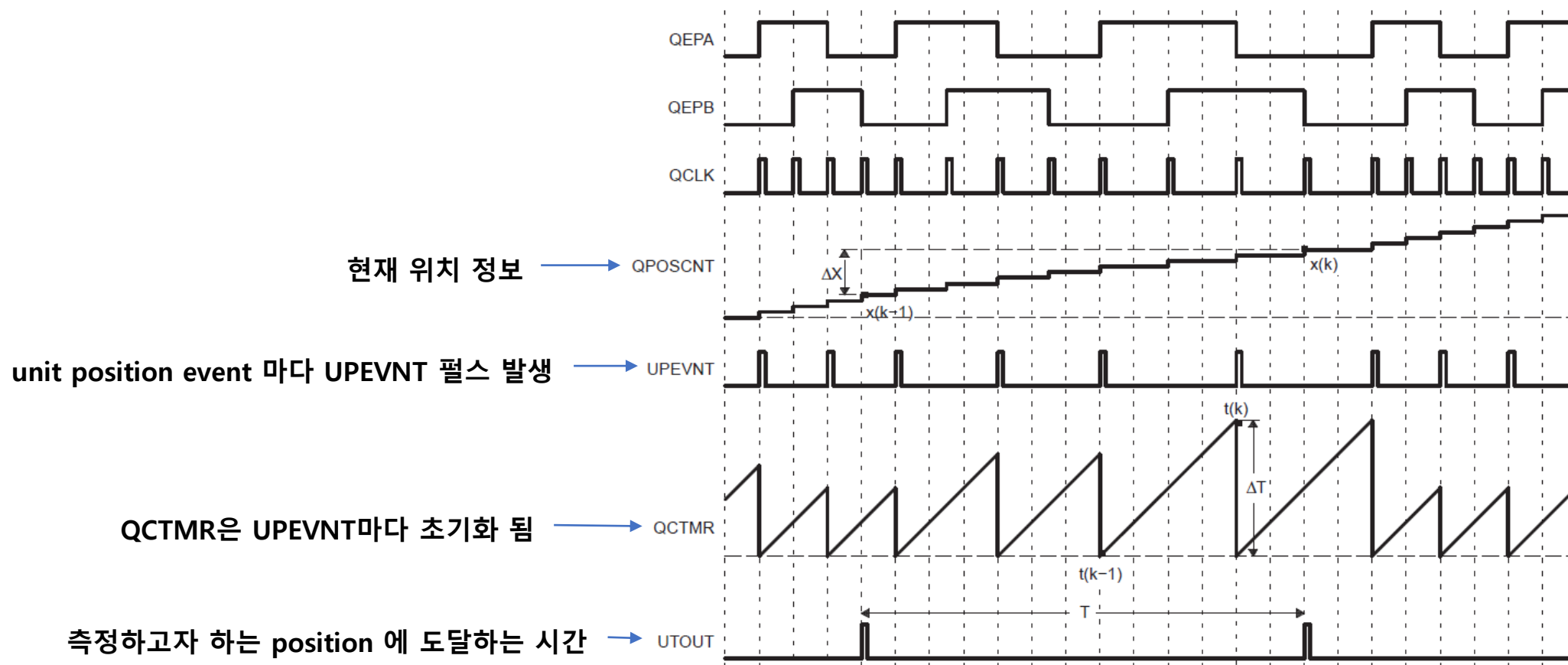
Figure 34-16. Unit Position Event for Low Speed Measurement (QCAPCTL[UPPS] = 0010)



unit position event의 타이밍 다이어그램

- edge capture unit의 타이밍 다이어그램.

Figure 34-17. eQEP Edge Capture Unit - Timing Details



Velocity Calculation Equations:

$$v(k) = \frac{x(k) - x(k-1)}{T} = \frac{\Delta X}{T} \quad (71)$$

where

$v(k)$ : Velocity at time instant  $k$

$x(k)$ : Position at time instant  $k$

$x(k-1)$ : Position at time instant  $k-1$

$T$ : Fixed unit time or inverse of velocity calculation rate

$\Delta X$ : Incremental position movement in unit time

$X$ : Fixed unit position

$\Delta T$ : Incremental time elapsed for unit position movement

$t(k)$ : Time instant " $k$ "

$t(k-1)$ : Time instant " $k-1$ "

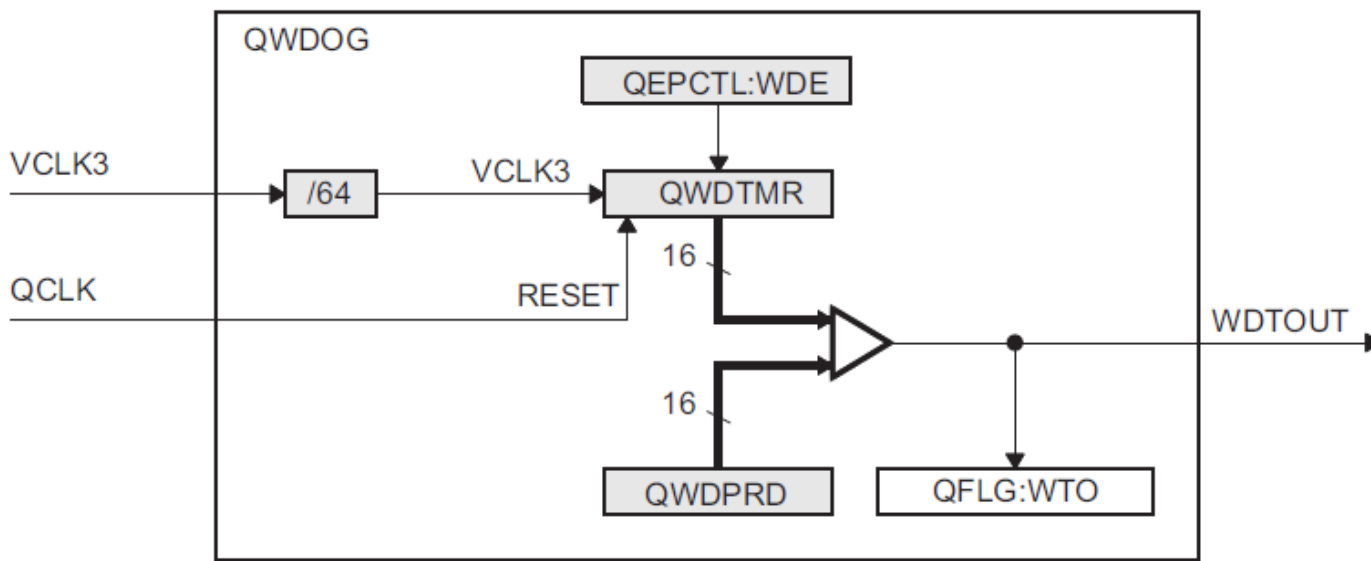
Unit time ( $T$ ) and unit period( $X$ ) are configured using the QUPRD and QCAPCTL[UPPS] registers.  
Incremental position output and incremental time output is available in the QPOSLAT and QCPRDLAT registers.

Parameter	Relevant Register to Configure or Read the Information
$T$	Unit Period Register (QUPRD)
$\Delta X$	Incremental Position = QPOSLAT( $k$ ) - QPOSLAT( $k-1$ )
$X$	Fixed unit position defined by sensor resolution and ZCAPCTL[UPPS] bits
$\Delta T$	Capture Period Latch (QCPRDLAT)

### 4-3. eQEP Watchdog

- 올바른 motion-control system을 나타내기 위해 quadrature-clock을 감시함.
- QWDTMR과 QWDPRD가 같아질 때까지, 어떠한 quadrature-clock event가 감지되지 않으면 워치독 타이머는 time out 됨.
- > watchdog interrupt flag 는 set됨. (QFLG)
- time-out 되는 값은 watchdog period register인 QWDPRD에 의해 프로그래밍 될 수 있음.

Figure 34-18. eQEP Watchdog Timer

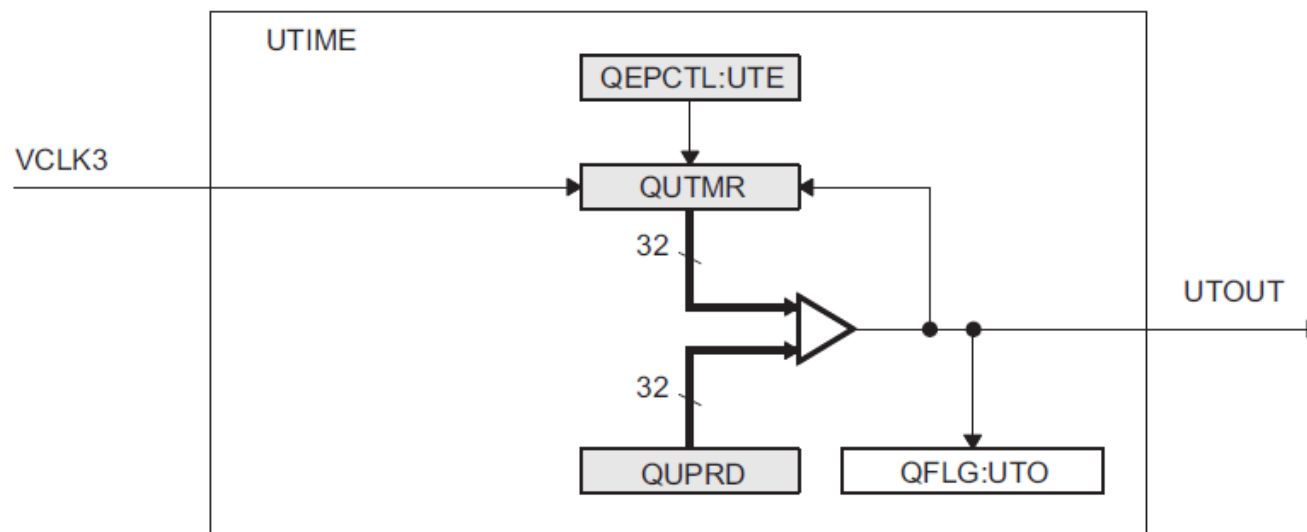


## 4-4. Unit Timer Base

=> 일정한 시간간격으로 속력 계산을 하기 위해서, 주기적인 인터럽트를 일으키기 위해 사용함.

- QUTMR 레지스터는 unit-time base이고, VCLK3 클럭의 엣지마다 1씩 증가한다.
- QUPRD 레지스터는 period count 값을 저장한다.
- QUTMR 과 QUPRD의 값이 같아지면, unit time out 인터럽트가 발생하고 그 때 속력 계산을 수행하게 된다.

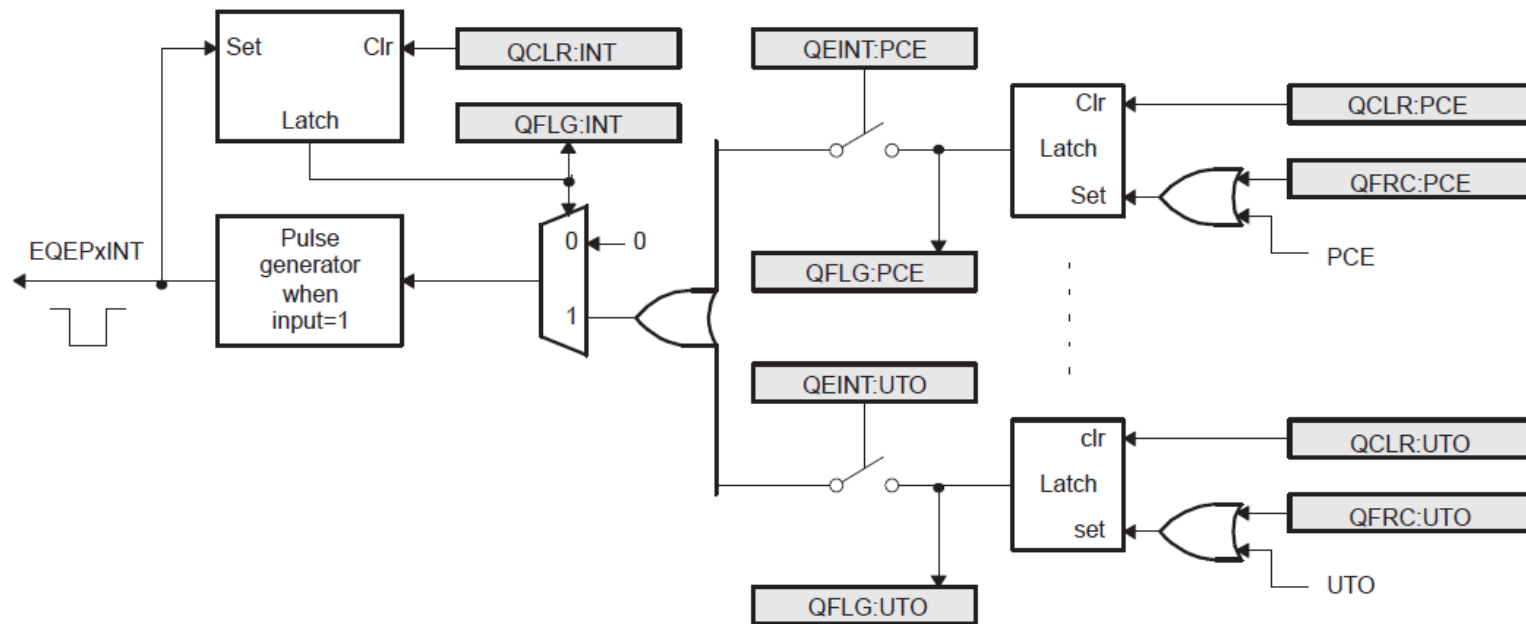
Figure 34-19. eQEP Unit Time Base



#### 4-5. eQEP Interrupt Structure

- QEINT 레지스터는 개별적인 인터럽트를 enable/disable 하기 위해 사용됨.
- QFLG 레지스터는 어떤 인터럽트 이벤트가 발생했는지 나타낸다.
- 인터럽트 서비스 루틴이 끝나도 global interrupt flag bit는 하드웨어적으로 자동으로 클리어 되지 않기 때문에, 인터럽트 서비스 루틴에서 QCLR 레지스터를 통해 소프트웨어적으로 클리어 시켜주어야 한다.
- QFRC 레지스터를 통해 개별적인 인터럽트 이벤트를 강제로 발생시킬 수 있다. (테스트에 유용하게 사용됨)

### Figure 34-20. EQEP Interrupt Generation



### **\* 문제점**

- 생소한 페리페럴에 대한 데이터 시트 이해가 쉽지 않고, 시간이 많이 소요됨.
- 일주일 동안 진도가 많이 안 나감.

### **\* 다음주 목표**

- 모터를 통한 eQEP 실습 및 이해
- GIO, I2C 학습 및 구현

=> 당분간 MCU에 집중 (I2C, ePWM, CAN, RTOS)