1. MOSFET에서 bulk charge effect를 고려한 drain saturation voltage 식을 유도해 보시오.

$Q_{inv}(x) = -C_{oxe}(V_{gs} - (V_t(V_{sb})))$

⇒ Body Effect를 고려한 전하.

이때 $V_t(V_{sb}) = V_{to} + \alpha V_{sb}$ 이다.

Drain 전압이 V_d 면 V_{gs} 는 $V_{gc}(x)$로 바뀔 수 있고 V_{sb} 는 $V_{cb}(x)$로 바뀔 수 있다. (V_s, V_d 가 $V_c(x)$ 의 함수이므로)

채널에 걸리는 전압이 $V_c(0) = V_s$, $V_c(L) = V_D$ 이므로

$V_{cs}(0) = V_s - V_s = 0$
$V_{cs}(L) = V_D - V_s = V_{ds}$ 이다.

$Q_{inv}(x) = -C_{oxe}\{V_{gc}(x) - V_t(V_{cb}(x))\}$

가 된다.

여기서 $V_{gc}(x) = V_{gs} - V_{cs}(x)$ 이므로

$V_t(V_{cb}(x)) = V_{to} + \alpha V_{cb}(x)$ 이다.

$Q_{inv}(x) = -C_{oxe}(V_{gs} - V_{cs}(x) - V_{to} - \alpha V_{cb}(x))$

그리고 $V_{cb}(x) = V_{sb} + V_{cs}(x)$ 이므로
$(V_s - V_b + V_c(x) - V_s)$

$Q_{inv}(x) = -C_{oxe}(V_{gs} - V_{cs}(x) - V_{to} + \alpha(V_{sb} + V_{cs}(x)))$
$= -C_{oxe}(V_{gs} - V_{cs}(x) - (V_{to} + \alpha V_{sb}) - \alpha V_{cs}(x))$

$Q_{inv}(x) = -C_{oxe}(V_{gs} - mV_{cs}(x) - V_t)$

이때 m 은 bulk charge factor로
$m = 1 + \alpha = 1 + \dfrac{C_{dep}}{C_{oxe}} = 1 + \dfrac{3 T_{oxe}}{W_{dmax}}$
≈ 1.2

$I_{ds} = -W Q_{inv}(x) v = W Q_{inv}(x) \mu_{ns}$ 은
$= W C_{oxe}(V_{gs} - m V_{cs} - V_t)\mu_{ns} \dfrac{dV_{cs}}{dy}$

$\int_0^L I_{ds} dx = W C_{oxe}\mu_{ns}\int_0^{V_{ds}}(V_{gs} - mV_{cs} - V_t) dV_{cs}$

$I_{ds}L = W C_{oxe}\mu_{ns}(V_{gs} - V_t - \dfrac{m}{2}V_{ds})V_{ds}$

$I_{ds} = \dfrac{W}{L}C_{oxe}\mu_{ns}(V_{gs} - V_t - \dfrac{m}{2}V_{ds})V_{ds}$

Saturation current는 $\dfrac{dI_{ds}}{dV_{ds}} = 0$ 인 곳에서
하므로 $\dfrac{dI_{ds}}{dV_{ds}} = \dfrac{W}{L}C_{oxe}\mu_{ns}(V_{gs} - V_t - mV_{ds}) = 0$

이때 $V_{ds} = V_{dsat}$ 이여 $V_{dsat} = \dfrac{V_{gs} - V_t}{m}$

2. 해당 Saturation 전압에서 도출되는 saturation current 레벨은 어떻게 되는지 유도해 수식화 해보시오.

$V_{dsat} = \dfrac{V_{gs} - V_t}{m}$ 를 $I_{ds} = \dfrac{W}{L}C_{ox}\mu_{ns}(V_{gs} - V_t - \dfrac{m V_{ds}}{2})$
에 대입한다.

$I_{dsat} = \dfrac{W}{L}C_{ox}\mu_{ns}(V_{gs} - V_t - \dfrac{m}{2}\cdot(\dfrac{V_{gs} - V_t}{m}))(\dfrac{V_{gs} - V_t}{m})$
$= \dfrac{W}{L}C_{ox}\mu_{ns}(V_{gs} - V_t - \dfrac{V_{gs}}{2} + \dfrac{V_t}{2})(\dfrac{V_{gs} - V_t}{m})$
$= \dfrac{W}{2mL}C_{ox}\mu_{ns}(2V_{gs} - 2V_t - V_{gs} + V_t)(V_{gs} - V_t)$
$= \dfrac{W}{2mL}C_{ox}\mu_{ns}(V_{gs} - V_t)(V_{gs} - V_t)$
$= \dfrac{W}{2mL}C_{ox}\mu_{ns}(V_{gs} - V_t)^2$

3. 해당 Saturation 전압 이상의 drain 전압
에선 drain 전압이 더 증가되어 Channel field
가 더 증가하더라도 drain current는 더
증가하지 않고 Saturation 된 형태가 되는이
물리적으로 설명해 보시오 (long channel case)

Channel pinch - off 이후에는 $V_{ds}(sat)$
이후 전압 ΔV는 ΔL에 걸리고
pinch- off 이전 $V_{ds} < V_{ds}(sat)$ 은
L_{eff} 에 걸린다.

즉, 채널이 무수히 길때. ΔL에 걸리는 전압
이 늘고, ΔL이 늘어나도 $\frac{\Delta L}{L} = 0$ 에 가까
울 것으로 $\Delta L \ll L$ 이다.

따라서 E-Field 소 변하지 않아서 $I_{ds}(sat)$
또한 변하지 않는다.

Energy band diagram 인장에서는 ΔL의
전압이 증가해도 Water fall analogy 처럼
높이만 더 길어져서 흐르는 electron은 동일하다.

4. 문제 3에서 short channel MOSFET.
에서는 Saturation 전압 이상에서의 drain
current는 어떻게 나타나겠는지 설명해 보시오.

Short channel 에서는 L 과 ΔL이
맞는 차이가 나지 않을 수 있다.
따라서 L_{eff}는 감소하게 되고, $V = Ed$
에서 d가 L이므로 E Field는 증가한다.
필드 증가는 I_{ds}의 증가로 이어진다.
이 현상을 Channel Length Modulation
이라 부른다.

-2-