

食品工學計算法

卜 裕 亮

<延世大 工大 食品工學科 教授>

4-2. 致死率의 개념

前回에서는 일정한 온도에서 미생물을 가열 살균할 때 사멸속도에 대해서 다루었다. 그러나 실제 통조림식품의 가열살균과정에서는 그림 4-3에 나타낸 것 처럼 식품의 온도가 가열 시간에 따라 변하므로 식품중의 미생물은 非常加熱處理를 받게 된다. 이와 같은 非常

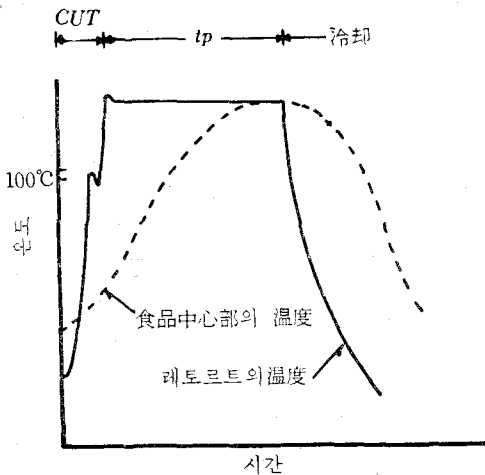


그림 4-3. 加熱殺菌處理중의 食品 中心部의 온도변화
CUT : come-up time t_p : 殺菌時間

加熱處理의 전과정에서 미생물의 내열성은 온도에 따라 변한다.

그러므로 살균공정의 가열살균효과는 비정상가열처리 동안에 미생물이 받은 치사효과와의 합이 기준온도에서 몇분 가열한 것과 맞먹는가로 평가하며, 이를 살균공정에서의 살균값, $(F_{ref})_{process}$ 이라 한다. 그러므로 $(F_{ref})_{process}$ 는 식(4-5)로 주어지는 $(F_{ref})_{required}$ 와 최소한도로 같거나 약간 크도록 살균처리를 하여야 한다. 즉 $F_{process} \geq F_{required}$ 각기 다른 온도에서 치사효과를 합하기 위해서는 임의온도 T 에서 가열시간이 기준온도에서의 몇분 가열한 것에 상당하는 가를 구할 수 있는 온도계수도형을 알아야 한다.

Bigelow model에 의하면,

$$\frac{F_{ref}}{F_T} = 10^{(T - T_{ref})/Z} \quad (4-15)$$

여기서 F_T 는 T_{ref} 에서 F_{ref} 분 살균한 것과 맞먹는 치사효과를 갖는 온도 T 에서의 살균시간이다.

기준온도에서의 F_{ref} 와 임의온도에서의 F_T 의 比, 즉

$$\frac{F_{ref}(\text{min at } T_{ref})}{F_T(\text{min at } T)} = \text{Lethal rate}(L) \quad (4-16)$$

라 한다.

식(4-16)에 의하면 致死率(Lethal rate) L 은 온도 T 에서 1분 살균한 致死효과는 T_{ref} 에서 몇분 살균한 것에 상당하는 가를 의미한다.

식(4-15)는 (4-16)에 의하여

$$L = 10^{(T - T_{ref})/Z} \quad (4-17)$$

致死率과 온도 T 에서의 살균시간 Δt 를 곱하면 기준온도에겐대, 121.1°C에서의 상당살균값(equivalent sterilizing value)이 된다.

$$L \left(\frac{\text{min at } 121.1^\circ\text{C}}{\text{min at } T} \right) \times \Delta t(\text{min at } T) = \text{min at } 121.1^\circ\text{C}$$

즉, 임의온도 T 에서 Δt 시간 살균한 致死효과는 기준온도(121.1°C)에서 몇분 살균한 것에 상당하는 가를 나타낸다. 보통 사용하기 편리

하게 표로 나타낸다. 실제 살균공정에서 살균전과정을 통한 기준온도에서 상당살균값($F_{process}$)은 식품의 온도가 가열시간에 따라 변하므로 각 온도에서의 아주 짧은 시간열처리를 받은 상당살균값을 전부 합한 것이다. 따라서 이를 식으로 나타내면

$$F_{process} = \int L dt = \int 10^{(T-T_{ref})/z} dt \quad (4-18)$$

F 값은 z 값과 T_{ref} 에 따라 달라지므로 $F_{process}$ 를 나타낼 때 계산의 근거가 된 T_{ref} 와 z 값을 나타내어야 한다. 기준온도(T_{ref})로는 加壓살균의 경우 121.1°C(250°F), 끓는 물로 살균할 경우 100°C(212°F)가 사용되고 또한 80~90°C의 더운 물중에서 살균하거나 과일쥬스 등과 같이 열교환기에 의하여 순간살균할 경우는 93.3°C(200°F)를 일반적으로 적용한다. z 값은 加壓살균의 경우 10°C(18°F), 끓는 물 또는 더운 물로 살균하는 경우 7.8°C(14°F)가 일반적으로 사용된다. 그러나 z 값은 살균대상 미생물 및 식품에 따라 변하므로 실제 측정할 필요가 있다.

加壓살균의 경우 전통적으로 기준온도를 $T_{ref}=121.1^\circ\text{C}(250^\circ\text{F})$, $z=10^\circ\text{C}$ 를 기준으로 하였으며, 이때의 살균값을 F_0 라 나타내어 각기 다른 가열살균처리의 살균효과를 평가하는 기준으로 매우 중요하게 이용되어 왔다. 그러나 최근 metric unit로 전환하기 위해서 온도를 120°C, z 는 10°C를 기준으로 하고 이를 기준으로 한 살균값을 F_c 로 나타낼 것을 제안하고 있다.

보기를 들어 일본위생법에서는 pH 5.5이상, 수분활성 0.94가 넘는 식품인 경우 120°C에서 4분 이상에 상당하는 가열살균처리를 할 것을 의무화하고 있다. 즉 이와 같은 식품의 가열살균은 $F_c(F_{120}^{10}) \geq 4.0\text{min}$ 이지 않으면 안 된다.

[예제 4-15] z 값이 10°C인 *Clostridium botulinum*을 115°C에서 1분간 가열처리하였다면 121.1°C 및 120°C를 기준으로한 致死率은 연

마인가?

[풀이] 식(4-17)에 의하여 $T_{ref}=121.1^\circ\text{C}$ 일 때

$$L = 10^{(115-121.1)/10} = 0.245$$

$T_{ref}=120^\circ\text{C}$ 일 때

$$L = 10^{(115-120)/10} = 0.316$$

즉 115°C에서 1분 살균한 치사효과는 120°C에서 0.316分 또는 121.1°C에서 0.245分간 살균한 것에 상당한다.

[예제 4-16] z 값이 10°C인 *Bacillus stearothermophilus*포자를 121.1°C에서 가열처리하여 그 농도를 10^{-4} 로 감소시키는데 16분이 소요되었다. 123°C에서 역시 10^{-4} 로 감소시킨다면 가열치사속도는 121.1°C에서 보다 얼마나 커지는가?

[풀이] $L = \frac{F_{ref}}{F_T} = 10^{(T-T_{ref})/z} = 10^{(123-121.1)/10} = 1.549$

따라서 121.1°C에서 보다 치사속도는 1.549배 빨라진다.

4-3. 가열살균시간의 계산

가열살균공정에서 살균값을 구하기 위해서는 (1) z 값과 (2)시간—온도자료를 반드시 알아야 한다. 식(4-18)의 적분은 온도 T 와 시간 t 의 2개의 변수를 가지므로 온도와 시간의 함수관계 [$T=f(t)$]를 알아야 한다. 그러나 대부분 식품의 경우 가열시간에 따른 식품의 온도변화를 간단한 數式으로 나타낼 수 없으므로 식(4-18)의 답을 圖式法으로 구한다. 다음에 몇가지 경우로 나누어 생각해 본다.

4-3-1 온도 T 가 일정한 경우

식품에 직접 수증기를 취입하는 순간살균법 등에서는 가열온도가 일정한 것으로 볼 수 있으므로 함수 $T=f(t)$ 에서 T 가 일정하다고 할 수 있다. 따라서 T 가 일정할 때 살균값은 다음과 식으로 구한다.

$$F_{process} = LAt \quad (4-19)$$

[예제 4-17] 토마토 쥬스를 판형 열교환기 (plate heat exchanger)를 사용하여 가열살균하는 경우 $F_0=0.7$ 및 $z=10^\circ\text{C}$ 의 내열특성을 가진 *B. coagulans*를 사멸시키는 것을 목적으로 하는 경우 130°C 에서의 가열시간을 계산하라.

[풀이] $T=130^\circ\text{C}$, $z=10^\circ\text{C}$ 에서 $L=10^{(130-121.1)/10}=7.742$ 이다. 살균의 목적을 달성하려면 $F_{process}=F_{required}(F_0)$ 이어야 한다. 따라서 식 (4-19)에 의하여

$$\Delta t = \frac{0.7}{7.742} = 0.09\text{min} (5.4\text{sec})$$

또는 식 (4-15)로 부터

$$\begin{aligned} F_{130} &= F_{ref} 10^{-(T-T_{ref})/z} \\ &= 0.7 \times 10^{-(130-121.1)/10} \\ &= 0.09\text{min} \end{aligned}$$

[예제 4-18] Ice cream mix를 5gal/min의 유속으로 무균적으로 통조립한다. Ice cream mix를 140.5°C (285°F)로 가열한 다음 이온도를 유지하면서 1in 스테인레스강관 30m를 통과시킨 후 냉각시켰다. 이 공정에서 PA 3679 ($D_{121.1}=1.83\text{min}$, $z=13.3^\circ\text{C}$)를 기준으로한 살균값 ($F_{121.1}^{13.3}$)을 구하라. 단, Ice cream mix가 관을 통과하는 열처리시간은 0.3091min이고 온도상승 및 냉각시간은 아주 빠르므로 무시한다.

[풀이] 식 (4-18)에 의하여 $T=140.5^\circ\text{C}$ 로 일정하므로 식 (4-19)에서

$$\begin{aligned} F_{process} &= L \Delta t = 0.3091 \times 10^{(140.5-121.1)/13.3} \\ &= 8.836\text{min} \end{aligned}$$

즉 이 공정에서 140.5°C 에서 0.3091min간 Ice cream mix를 살균한 것은 121.1°C 에서 8.836min간 살균한 것에 상당한다.

4-3-2. General Method

이 방법은 가열살균시간의 계산에 가장 오래 전부터 사용된 방법으로 식품의 가열살균 공정에서 식품의 온도는 그림 4-3과같이 변하므로 식 (4-18)의 답을 가열시간 t_i 에서 圖式積分法 (graphical integration method)으로 구

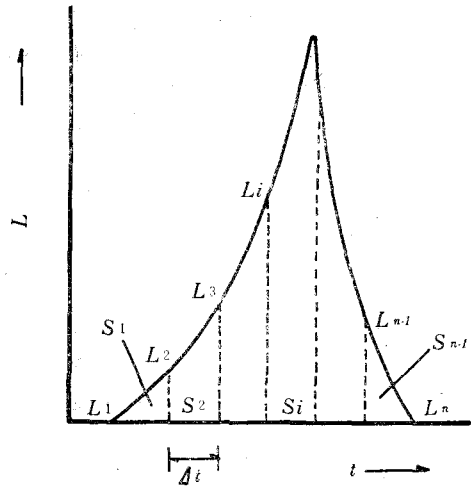


그림 4-4. 치사값곡선 (lethality curve)

하는 방법이다. 가열시간 t_i 에서 식품온도 T_i 를 실제 측정하여 구하고 T_i 에 대응하는致死率 L_i 를 계산하여 L_i 를 y축, t_i 를 x축에 그리면 그림 4-4와 같은 곡선이 얻어진다.

이 곡선을 치사율곡선 (lethality curve)이라 부르며 이 곡선 아래의 면적을 구하면 $F_{process}$ 가 된다.

곡선 아래의 면적은 면적계 (planimeter)로 구한다. 곡선 아래의 면적 cm^2 를 상당살균시간 分으로 바꾸기 위해 $F=1(10 \times 0.1)$ 에 상당하는 직사각형면적을 살균면적의 單位로 잡는다.

다음과 같은 계단적 數值積分을 이용하면 치사율곡선을 그리지 않고 살균값을 구할 수 있다. 그림 4-4의 곡선으로 둘러싸인 면적을 微少한 일정시간 Δt 로 나누고 이 나누어진 면적을 S_i 라 하면 S_i 는 사다리꼴공식에 의하여 다음과 같이 구한다.

$$\begin{aligned} S_1 &= \Delta t (L_1 + L_2) / 2 \\ S_2 &= \Delta t (L_2 + L_3) / 2 \\ &\vdots \\ S_i &= \Delta t (L_i + L_{i+1}) / 2 \\ &\vdots \\ S_{n-1} &= \Delta t (L_{n-1} + L_n) / 2 \end{aligned} \quad (4-20)$$

전체면적 S_{total} 는 다음과 같아진다.

$$S_{total} = \sum_{i=1}^{n-1} S_i = \Delta t \left(\sum_{i=1}^n L_i - (L_1 + L_n) / 2 \right) \quad (4-21)$$

L_1 과 L_n 값은 실제 거의 무시될 정도로 작으므로 식 (4-20)은 다음식이 된다.

$$S_{total} = \Delta t \sum_{i=1}^n L_i \quad (4-22)$$

[예제 4-19] 참치통조림을 레토르트에 넣고 114°C에서 85분간 살균하였다. 이때 냉점의 온도변화는 표4-3과 같다. 이 공정에서의 살균값 F_0 를 구하라.

[풀이] 표4-3의 실제 온도 data를 기초로 하여 가열처리중의 시간 t_i 에 대응하는 치사율 L_i 를 계산한다. 이때 F_0 를 구하므로 $T_{ref} = 121.1^\circ\text{C}$, $z = 10^\circ\text{C}$ 이므로 $L_i = 10^{(T_i - 121.1)/10}$ 이 된다. 계산결과를 표4-3에 함께 나타내었다. (치사율도표가 있으면 계산하지 않고 도

표 4-3. 참치통조림의 가열살균중 중심부의 온도 변화

조 작	시간(min)	온도 $T(^{\circ}\text{C})$	L
수증기 도입	(0)	23.2	0
시 작	6	27.8	0
	12	41.2	0
살균 온도 114°C에 도달	(15)		
	18	59.1	0
	24	75.2	0
	30	77.9	0
	36	96.1	0.003
	42	102.0	0.012
	48	105.6	0.028
	54	108.5	0.055
	60	109.8	0.074
	66	110.9	0.095
	72	112.0	0.123
	78	112.7	0.145
	84	113.0	0.155
	90	113.3	0.166
	96	113.5	0.174
수증기 정지	(100)		
냉각 개시	102	113.5	0.174
	108	101.0	0.010
	114	60.0	0
	120	50.0	0

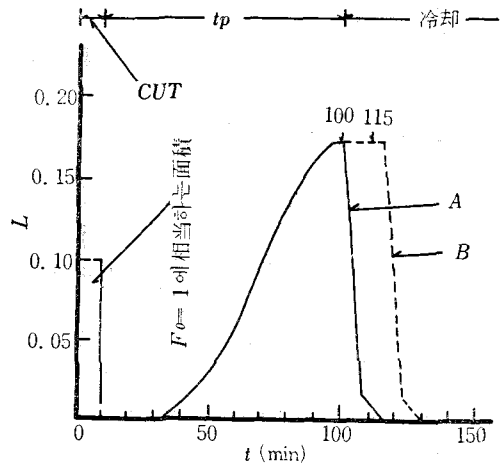


그림 4-5. 참치통조림의 치사율 곡선

표에서 바로 구함).

표 4-3의 t 와 L 의 관계를 그리면 그림 4-5와 같다. 살균값 F_0 를 구하기 위해 實線 A 아래의 면적을 구한다. 또는 근사값은 식(4-22)에 의하여 구한다. 표 4-3에서 $\sum L_i = 1.214$, 각 온도의 측정간격은 6min이므로 $\Delta t = 6\text{min}$. 따라서

$$F_0 = S_{total} = 6 \times 1.214 = 7.284\text{min}$$

[예제 4-20] 레토르트를 사용하여 참치통조림을 114°C에서 가열살균하는 경우 F_0 가 10분에 상당하는 살균효과를 얻기 위하여 필요한 살균시간을 구하라. 다른 조건은 예제 4-19와 같다.

[풀이] 예제 4-19의 풀이에 의하면 114°C에서 85min가열살균했을 때 F_0 는 7.3min이었다. 따라서 $F_0 = 10\text{min}$ 하는데는 아직 2.7min이 부족하다. 표 4-3에 의하면 85min가열했을 때 통조림중심부분의 온도는 113.5°C로 거의 일정한 온도에 도달하여 가열을 계속하여도 온도는 거의 상승하지 않았다. 따라서 그대로 가열시간을 연장하여도 113.5°C의 온도가 유지된다고 가정한다. 식품의 온도가 일정하게 유지될 경우 살균값은 식(4-19)가 적용되므로

$$\Delta t = \frac{F_{process}}{L_{113.5}}$$

부족한 $F_0=2.7$ 을 얻기 위해 필요한 가열시간은 윗식에 의하여

$$\Delta t = \frac{2.7}{0.174} = 15.5 \text{min}$$

$F_0=7.3$ min을 얻는데 114°C 에서 85 min의 가열처리가 필요하므로 $F_0=10$ min을 달성하기 위한 살균시간은 $85+15.5=100.5$ min이다.

[예제 4-21] 페트로트에서 어떤 통조림을 살균할 때 冷點의 온도를 측정 한 결과 그림 4-6과 같은 결과를 얻었다. 이 살균공정에서 요구되는 $F_0=2.8$ min이고 $z=10^\circ\text{C}$ 라면 이 가열처리가 적당한가?

[풀이] 그림 4-6에 나타낸 것 처럼 연속적인 온도상승곡선을 계단적인 온도상승으로 나누고 각 온도단계와 상 holding time을 표 4-4에 나타내었다. 각 온도단계에 대응하는 L 값을 구하여 역시 표 4-4에 나타내었으며, F_0 를 구하면

$$F_0 = \Delta t \sum L_i = 2.64 \text{min}$$

이다. 따라서 살균시간이 부족하다. 따라서 110°C 에서 더 살균을 계속하여야 할 것이다.

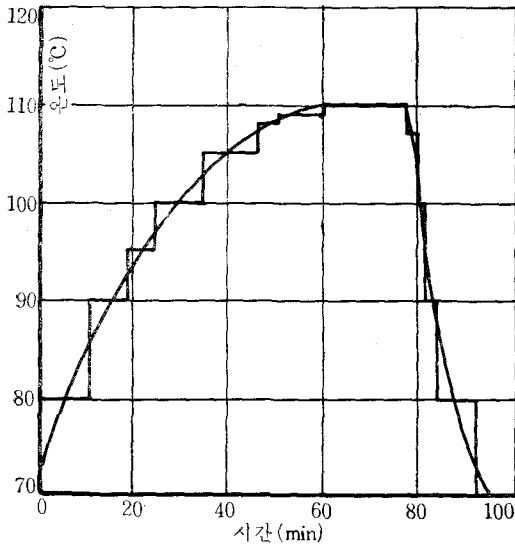


그림 4-6. 통조림살균중 시간-온도곡선

표 4-4.

온도 $T(^{\circ}\text{C})$	시간 $t(\text{min})$	$(121-T)$	$10^{-(121-T)/10}$	$t \times 10^{-(121-T)/10}$
80	11	41	7.9×10^{-5}	0.00087
90	8	31	7.9×10^{-4}	0.0063
95	6	26	2.5×10^{-3}	0.015
100	10	21	7.9×10^{-3}	0.079
105	12	16	2.5×10^{-2}	0.30
108	6	13	5.0×10^{-2}	0.30
109	8	12	6.3×10^{-2}	0.50
110	17	11	7.9×10^{-2}	1.34
107	2	14	4.0×10^{-2}	0.08
100	2	21	7.9×10^{-3}	0.016
90	2	31	7.9×10^{-4}	0.0016
80	8	41	7.9×10^{-5}	0.0006
70	6	51	7.9×10^{-6}	0.00005
합 계				2.64

[예제 4-20]에서의와 같은 방법으로 부족한 F_0 는 $2.8-2.64=0.16$ min이므로

$$\Delta t = \frac{0.16}{10^{(110-121)/10}} = 2 \text{min}$$

따라서 110°C 에서 2분간 더 살균하여야 한다.

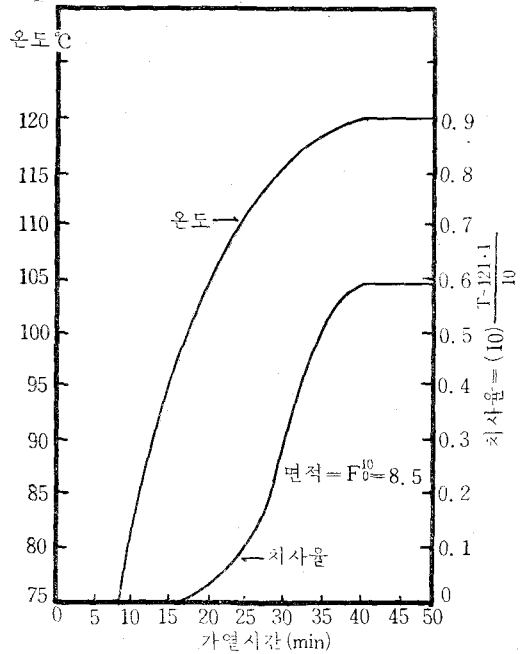


그림 4-7. 예제 4-22의 열침투곡선과 치사율곡선

[예제 4-22] 그림4-7과 같은 가열곡선을 나타낸 식품을 55min가열하였을 때 F_0 값을 구하라. 이 문제는 식(4-18)로 나타낸 치사율곡선의 면적에 기초하여 풀어라.

[풀이] 그림4-7의 온도곡선을 5분간격으로 나누고 각 온도에서 L 을 구하면 아래 표와 같다.

시간 L 의 곡선을 그림4-7에 나타내었으며 곡선 아래면적은 8.5이다. 이 면적은 $F=1$ 에 상당하는 단위면적의 8.5배와 같다. 그러므로 $F_0=8.5min$ 이다.

표 4-5

시 간	온도(°C)	$L[10^{(T-121.1)/10}]$
20	77.8	0.000046
25	93.3	0.0017
30	101.4	0.0214
35	111.1	0.1
40	115.5	0.275
45	118.3	0.525
50	118.8	0.589
55	118.8	0.589

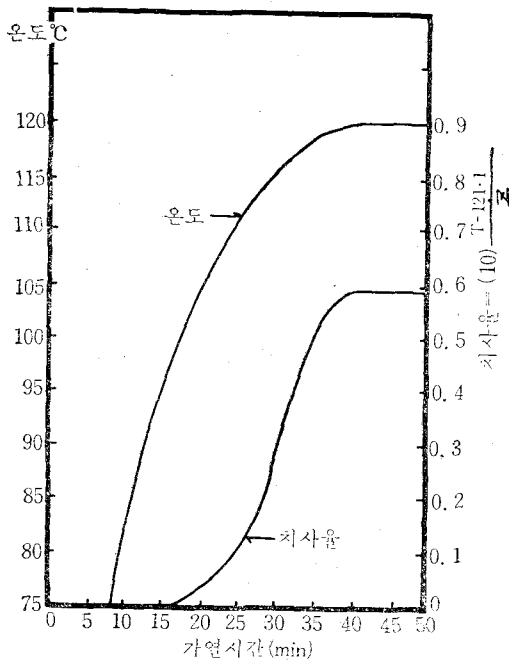


그림4-8 예제4-23의 열침투곡선과 치사율곡선

표 4-6

시 간 $t(\text{min})$	온 도 $T(^{\circ}\text{C})$	치 사 율 $L=10^{(T-121.1)/z}$
20	77.8	0.000046
25	93.3	0.0017
30	101.4	0.0214
35	111.1	0.1
40	115.5	0.275
45	118.3	0.525
50	118.8	0.589
55	118.8	0.589

[예제 4-23] 통조림을 용기에 넣어 가압살균할 때 시간에 따른 중심온도의 변화가 그림 4-8과 같이 나타났다.

살균하고자 하는 균의 $F=8.5min, z=10^{\circ}\text{C}$ 라고 가정한다면 이때 필요한 살균시간을 결정하라.

[풀이] 기준온도를 121.1°C 라 하고 그림 4-8에서 5분 간격으로 읽은 온도와 그때의 치사율을 표4-6에 나타내었다.

이 표에 나타낸 시간-치사율의 관계를 그림 4-8에 함께 나타내었다. 이 그림에서 치사율 곡선 아랫부분의 면적이 목표한 $F=8.5min$ 와 일치할 때의 시간이 필요한 살균시간이다. 그 시간을 구하면 55분이다.

하절기에 자주 발생하는

식중독을 미리예방 합시다