

〔醸工 第43巻, 第8号, p.541~546, 1965〕

連続加熱殺菌装置の設計について

宗沢 拓郎・北島 惇夫・紀谷 孝彦

(味の素株式会社中央研究所)

On the Design of a Continuous Heat Sterilizer

Takuro Munezawa, Atsuo Kitajima and Takahiko Kiya
(Ajinomato Co, Inc. Central Laboratory, Suzuki-cho, Kawasaki)

This paper deals with the design of a practical continuous heat sterilizer without perfect piston flow profile.

If the turbulent diffusion model is applied to the holding tube of a sterilizer and the rate equation of the first order reaction is assumed on the thermal death process of bacteria, bacterial concentration at the outlet of the sterilizer can be stated as follows, as a function of $P_e B$ and N_r .

$$C = \frac{N}{N_0} = \frac{4\beta \exp\left(\frac{P_e B}{2}\right)}{(1+\beta)^2 \exp\left(\beta \frac{P_e B}{2}\right) - (1-\beta)^2 \exp\left(-\beta \frac{P_e B}{2}\right)}$$

$$\beta = \sqrt{1 + \frac{4N_r}{P_e B}}$$

This equation has a great number of combinations of $P_e B$ and N_r , in other words, L/D and θ , and does not have any definite solution. But this can be solved by stating the minimum cost of the apparatus, which turns out to be the optimal design.

緒 論

加熱殺菌操作は醸造工業において非常に重要かつ不可欠なパートであると同時に比較的容易に連続化できる可能性を有するパートでもある、と云える。

培地の殺菌理論については、すでに Humphrey¹⁾によってよくまとめられている。しかしその連続装置化の問題に関しては十分ではない。そこで1次の連続化学反応装置設計の考え方を応用して、装置混合特性を考慮した連続殺菌装置滞留管の設計法について述べる。

設 計 理 論

連続加熱殺菌装置、滞留管に流れ方向の見掛の乱流拡散係数 E_z を有する乱流拡散モデルを仮定すると、Fig. 1 のように表わせる。

流れ方向について菌濃度に関する物質収支をとると、つぎの連続の式がえられる。

$$\frac{\partial N}{\partial \theta} = E_z \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} - \bar{u} \frac{\partial N}{\partial z} - \phi(N) \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\phi(N)$ は加熱殺菌による菌濃度の変化であり、菌の死滅速度式に相当する。定常状態を考えると、

$$\frac{\partial N}{\partial \theta} = 0 \dots\dots\dots(2)$$

となる。また菌の死滅速度式が1次反応式の形

$$\phi(N) = KN \dots\dots\dots(3)$$

で与えられるとすると、つぎの無次元化常微分方程式がえられる。

$$\frac{d^2C}{dZ^2} - P_e B \cdot \frac{dC}{dZ} - N_r \cdot P_e B \cdot C = 0 \dots\dots\dots(4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \frac{N}{N_0} \dots\dots\dots(5) \\ Z = \frac{z}{L} \dots\dots\dots(6) \\ N_r = K \frac{L}{\bar{u}} = k\theta \dots\dots\dots(7) \\ P_e B = \frac{\bar{u}L}{E_z} \dots\dots\dots(8) \end{array} \right.$$

ここで滞留管出入口での境界条件は、

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC}{dZ} = 0 \quad \text{at } Z=0 \dots\dots\dots(9) \\ C = C \quad \text{at } Z=1 \dots\dots\dots(10) \end{array} \right.$$

(4)式の解は矢木、宮内²⁾によってすでに与えられており、滞留管出口 (Z=1) での濃度は(11)式のように表わされる。

$$C = \frac{N_L}{N_0} = \frac{4\beta \exp\left(\frac{P_e B}{2}\right)}{(1+\beta)^2 \exp\left(\beta \frac{P_e B}{2}\right) - (1-\beta)^2 \exp\left(-\beta \frac{P_e B}{2}\right)} \dots\dots\dots(11)$$

$$\beta = \sqrt{1 + \frac{4N_r}{P_e B}} \dots\dots\dots(12)$$

殺菌前菌濃度 (N₀) および殺菌終了時の菌濃度 (N_L) が与えられれば、batch または完全 piston flow の場合は、

$$C = \frac{N_L}{N_0} = e^{-k\theta} \dots\dots\dots(13)$$

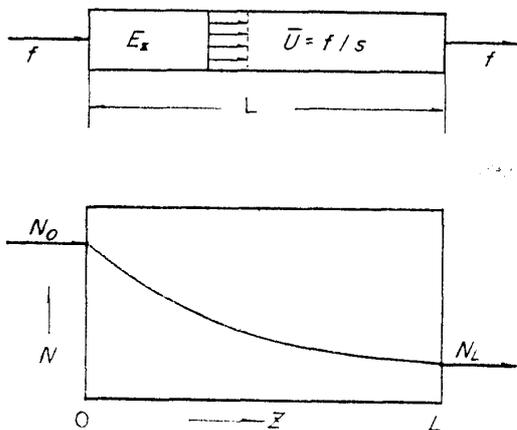


Fig. 1. Turbulent diffusion model.

で決る滞留時間に設計すればよい。しかし実際の装置では上述のように装置混合特性 $P_e B$ 、および無次元化反応速度 N_r の函数として(11)式のように与えられる。(11)式の解は $P_e B$ と N_r すなわち L/D と θ の無数の組合せとなり、不定である。そこでもう一つの条件として、装置費を最少にするという条件を入れてやると唯一の解が決まり、これが最適解となる。

設 計 例

設計例として筆者らが味の素(株)中央研究所において実施した醗酵液の殺菌装置について述べる。

菌の死滅速度を求めるため種々の加熱温度条件で殺菌して viable count 法で生存菌数を測定してえた結

果は, Fig.2 のようになり, 死滅速度は 1 次の反応速度と同じ形で表わされることがわかる. 死滅速度定数と加熱温度との間には Fig.3 のように Arrhenius の式が成立するからつぎの死滅速度式をうる.

$$\ln \frac{N_z}{N_0} = (10^{43.4}) \exp \left\{ -\frac{74(10^3)}{RT} \right\} \theta \dots \dots \dots (14)$$

この結果より殺菌温度 110°C, 能力 30KL/h の連続殺菌装置を設計するものとする.

(14)式または Fig.3 より $T=110+273=383^\circ\text{K}$ において,

$$K = 27 \frac{1}{\text{min}}$$

殺菌前菌濃度 $N_0 = 4(10^8)\text{cell/ml}$

殺菌後菌濃度 $N_z = 1(10^2)\text{cell/ml}$

を入ると, (11)式より

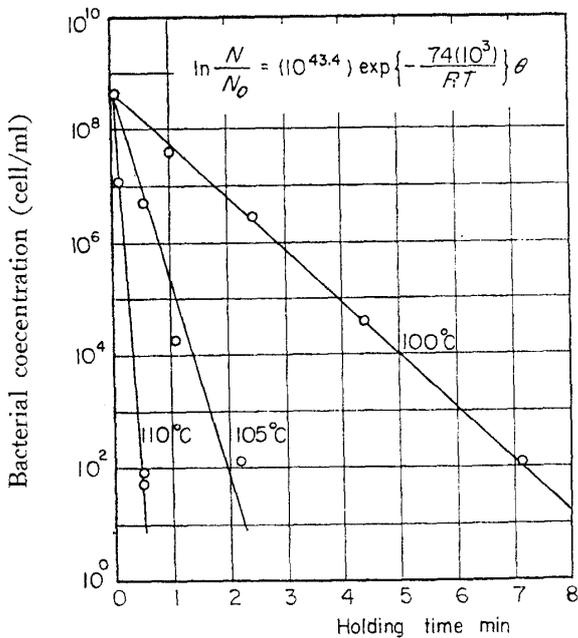


Fig. 2. The relation between sterilizing conditions and survival bacterial concentration.

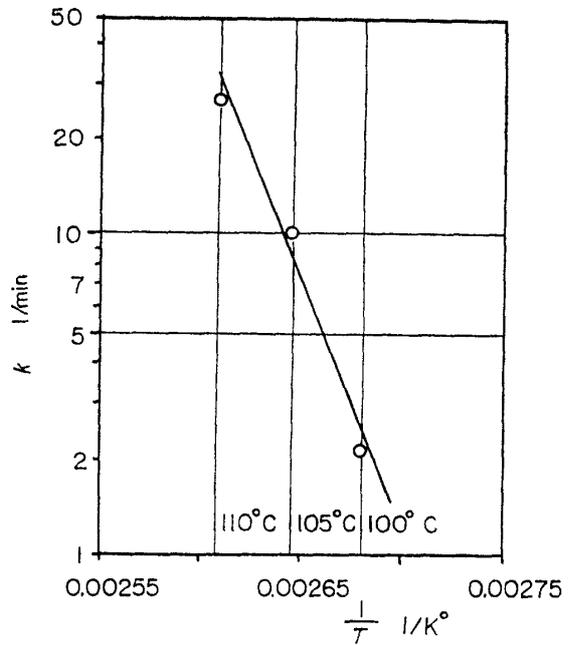


Fig. 3. Sterilizing temperature vs. death rate constant.

Table 1. The relation between $P_e B$ and dimension of apparatus.

$P_e B$	20	30	40	50	70	100
θ (min)	0.97	0.83	0.78	0.75	0.69	0.64
L (m)	2.7	3.4	4.0	4.6	5.6	6.9
D (m ϕ)	0.48	0.40	0.35	0.32	0.28	0.24
\bar{u} (m/sec)	0.047	0.068	0.087	0.10	0.14	0.18
V (kl)	0.47	0.42	0.40	0.37	0.34	0.32
Re	$5.6(10^4)$	$6.7(10^3)$	$7.7(10^3)$	$8.3(10^3)$	$9.5(10^3)$	$10.3(10^3)$
Plant cost (10^3 yen)	140	140	148	125	130	142

$$C = \frac{N_L}{N_0} = \frac{1(10^2)}{4(10^8)} = 2.5(10^{-7})$$

$$= \frac{4\beta \exp\left(\frac{P_e B}{2}\right)}{(1+\beta)^2 \exp\left(\beta \frac{P_e B}{2}\right) - (1-\beta)^2 \exp\left(-\beta \frac{P_e B}{2}\right)} \dots(15)$$

がえられる。これを満足させる $P_e B$ と β , すなわち $P_e B$ と θ の組合せとして Table 1 のように解が求まる。

たとえば, $P_e B=20$ の場合, (15)式より $\theta=0.97\text{min}$, 乱流域を仮定すれば Fig. 6 から $P_e=3.5$ となるから,

$$\therefore B = \frac{L}{D} = \frac{P_e B}{P_e} = \frac{20}{3.5} = 5.7$$

$$\therefore L = 5.7 D$$

$$\frac{\pi}{4} D^2 L = \frac{\pi}{4} D^2 (5.7 D) = f \cdot \theta = 30 KL/\text{hr} \left(\frac{0.97}{60}\right)$$

$$= 0.49 \pi L$$

$$\therefore D = 0.48 \text{ m}\phi$$

$$L = 2.7 \text{ m}$$

$$\bar{u} = 0.047 \text{ m/sec}$$

$$Re = \frac{D \bar{u} \rho}{\mu} = \frac{(0.48)(0.047)(1)(10^3)}{0.4(10^{-3})}$$

$$= 5.6(10^4) \dots\dots\dots \text{乱流}$$

以下同様にして各 $P_e B$ の値に対して Table 1 のように滞留時間 θ と装置 dimension L と D が決まる。これらの装置費を算出し, $P_e B$ に対して plot すると Fig. 4 のようになる。これより

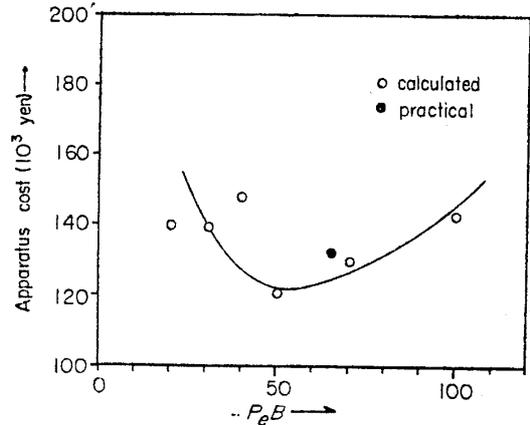


Fig. 4. Relation between $P_e B$ and cost of apparatus (SUS-33).

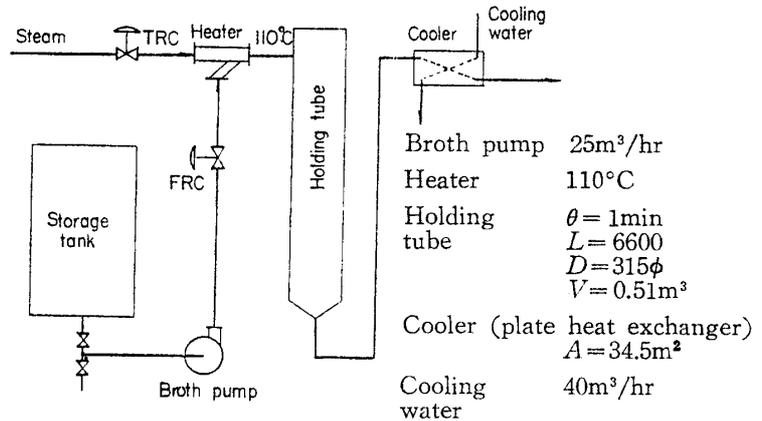


Fig. 5. The S.F.D. of the continuous heat sterilizer.

Table 2. A comparison between the optimal design and the practical one.

	Optimal design	Practical design
$P_e B$	50	65
θ (min)	0.75	1.0
L (m)	4.6	6.2
D (mφ)	0.32	0.32
\bar{u} (m/sec)	0.10	0.10
V (κl)	0.37	0.51
Re	$8.3(10^3)$	$8.3(10^3)$
Apparatus cost (10^3 yen)	125	131

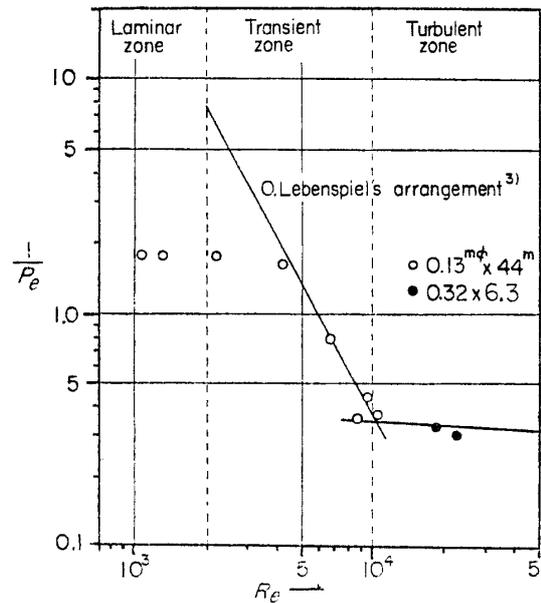


Fig. 6. Reynolds number vs. mixing characteristics.

$P_e B=50$ に設計した装置 (0.32 mφ×0.46 m) が最適設計であることがわかる。

実 装 置 例

本連続殺菌装置設計例の S.F.D は Fig. 5 のようである。

Table 2 に今求めた最適設計と実装置とを比較してある。実装置では最適設計に対し、滞留管出入口での乱れ、および殺菌不成功率を考慮して⁴⁾ 多少安全率をみて滞留時間を 1 分にとって設計した。この場合の $P_e B$ は 65 となり Fig. 4 からわかるようにほぼ最適設計に近い、また完全 piston flow ($P_e B=\infty$) の場合の滞留時間は(13)式から $\theta=0.56$ min となる。この場合装置費は非常に高くなることが Fig. 3 から予想される。Fig. 6 は実装置での混合特性を impulse response 法で測定した結果であって、従来の文献値³⁾ とよく一致した。

本報告の発表を許可された味の素株式会社中央研究所長、大枝春臣氏、ならびに川端弘氏、相良孝昭氏に深く感謝いたします。

Nomenclature

- C : nondimensional bacterial concentration = $\frac{N}{N_0}$
 D : diameter of the sterilizer
 E_z : turbulent diffusion coefficient
 f : feed rate of the sterilizer
 K : death rate constant of bacteria
 L : length of sterilizer
 N : bacterial concentration
 N_L : bacterial concentration after sterilization (sterility level)
 N_0 : initial bacterial concentration
 N_r : nondimensional reaction rate = $K\theta$
 $P_e B$: nondimensional mixing characteristics = $\frac{\bar{u}L}{E_z}$
 R : gas constant
 R_e : reynolds number
 T : sterilizing temperature
 \bar{u} : average velocity
 V : hold up of the sterilizer
 Z : distance from the inlet of the sterilizer
 u : nondimensional distance
 θ : holding time of the sterilizer

文 献

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1) Humphrey, A. E. (田口訳) : 本誌, 42 , 265(1964). | 4) 合葉, 戸田 : 昭和39年度日本醸酵工学会大会前刷, 135. |
| 2) 矢木, 宮内 : 化学工学, 19 , 507 (1955). | |
| 3) Lebenspie, I. O. : I. E. C. 50 , 343 (1958). | (昭 40. 6. 14. 受付) |

質 疑 応 答

- | | |
|---|----------------------------------|
| 合葉修一 (東京大学応用微生物研究所) | の効用? |
| 1. Vertical と Horizontal Type の特長, Vertical | 2. $P_e B=50$ あたりに最適設計を考えた後, 実験的 |

に $P_e B$ の check を行なうのですか。

宗 沢

1. Vertical

- ・設置床面積が少ない。
(特に L/D が小さい場合有利)
- ・異物の堆積がない。

Horizontal

- ・床面積が大きい。
- ・異物が堆積する。

・密度差による流速分布が
できにくい。

・流速分布ができやす
い。

・高さを必要とする。

・高さが低くてすむ。

以上総合して Vertical type の方が良い。

2. 乱流拡散モデルが成立していれば計算値と実際の $P_e B$ 値とはよく一致している。その確認は impulse response 法により容易に check できる。