フィルム包装食品の加熱殺菌におけるレトルト 温度上昇時間の補正について

山 野 善 正*・千 田 貢**

Coming-Up-Time Correction for Thermal Processing of Flexible Food Packages

YOSHIMASA YAMANO* and MITSUGI SENDA**

Heat conduction in infinite slab-type package when the medium temperature is raised linearly with the time up to the processing temperature has been analysed theoretically; coming-up-time correction has been analysed and the experimental j -values have been compared with the calculated ones by using simulated-food packages.

Ball's correction factor for coming-up-time has been found to depend on t_c/f , t_c being the coming-up-time and f the slope of heat penetration curve, but is in the range between 0.52 and 0.62 for practical conditions of t_c/f ; their average value 0.57 is in good agreement with the experimental value 0.58 which Ball had advocated on the basis of his experiments on canning processing.

The lag factor (j)-values obtained with infinite and finite slab-type packages of food-simulated material by using the correction factor 0.58 were in good agreement with the calculated j -value.

(Received Nov. 12, 1976)

フィルム包装食品の 100~120°C の蒸気-空気系加圧殺菌システムにおける伝熱パラメーターのうち、表面伝熱係数と直接関係を持ち、伝熱速度を規定するパラメーター f についての解析結果はすでに報告したり。いま一つのパラメーター j は lag factor と呼ばれ、レトルト温度上昇時間に関するものである。この j 値の算出に際し、レトルト温度上昇時間をゼロとした場合に対する補正について、BALL が缶詰に対して検討を行ない、経験的に、レトルト温度上昇時間に 0.58 を乗じたものを、加熱ゼロ時とすることを提唱し¹⁾、以後、この値が慣用されている。

フィルム包装食品の蒸気-空気系加熱殺菌においては、レトルトの温度上昇時間に対してほぼ直線的に起こるとみなされる。本報では、直線的にレトルト温度上昇がなされた場合のレトルト温度上昇時間の補正係数について理論的考察を行ない、モデル実験により検証した結果を報告する。

理 論

一定な厚さ ($2a$) を持ち、かつ無限にひろがる平行板に対する媒体温度が変化する 場合の 伝熱の一般解²⁾ から、媒体の温度が時間 t_c まで勾配 μ で直線的に上昇し、それ以後一定温度 μt_c をとるとしたとき (Fig. 1-a)、試料中心から x の距離にある点での時間 t における温度 T は次のように与えられる。

$$T = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha \mu h / k (1 - e^{-\alpha^2 \beta_n^2 t_c / a^2}) \cdot \cos(\beta_n x / a)}{\alpha \beta_n^2 / a^2 \{h/k + \alpha (\beta_n^2 / a^2 + h^2 / k^2)\} \cdot \cos \beta_n} \times e^{-\alpha^2 \beta_n^2 t / a^2} + \mu t_c \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(2h/k) \cos(\beta_n x / a)}{\{h/k + \alpha (\beta_n^2 / a^2 + h^2 / k^2)\} \cdot \cos \beta_n} \quad (1)$$

ただし、 β_n は $\cot \beta = k\beta/ha$ の n 番目の正根である。ここで、

α : 温度伝導度

h : 表面伝熱係数

* 香川大学農学部食品学科

** 京都大学農学部農芸化学科

Fig. 1. Coming-up-time correction model

- (1) Heat penetrating curve for CUT=0
 (2) Heat penetrating curve for CUT= t_c
 M: Temperature of heating medium
 P: Temperature of mid-point of package
 T₀: Initial temperature
 T₁: Processing temperature
 t_c: Coming-up-time
 t_r: Corrected coming-up-time
 A: Factor corresponding to the j-value for CUT=0
 B: Factor corresponding to the j-value for CUT= t_c
 u: Reduced temperature (Equation 2)

k: 熱伝導率

また、前報¹⁾でも述べたように、レトルト設定温度を $T_1 (= \mu t_c)$ 、試料初温を T_0 、時間 t における試料温度を T' とすれば、還元温度の実験式は次のようになる。(Fig. 1-b)。

$$u_{exp} = \frac{T_1 - T'}{T_1 - T_0} = j' e^{-2.303 t / f} \quad (2)$$

一方、充分大きな t に対して、(1)式の第1項近似から試料中心 ($x=0$) での u は次式で与えられる。

$$u = \frac{2h/k}{\{h/k + a(\beta_1^2/a^2 + h^2/k^2)\}} \times \frac{e^{\alpha \beta_1^2 t_c / a^2} - 1}{\alpha \beta_1^2 t_c / a^2} \times e^{-\alpha \beta_1^2 t / a^2} \quad (3)$$

温度測定を試料中心で行なえば、理論式(3)と実験式(2)がよく対応し、次の関係が得られる。

$$f = \frac{2.303 a^2}{\alpha \beta_1^2} \quad (4)$$

$$\ln j' = \ln A + \ln B \quad (5)$$

ここで、

$$A = \frac{2h/k}{\{h/k + a(\beta_1^2/a^2 + h^2/k^2)\}} \left(= \frac{2 \sin \beta_1}{\beta_1 + \sin \beta_1 \cos \beta_1} \right) \quad (6)$$

$$B = \frac{e^{\alpha \beta_1^2 t_c / a^2} - 1}{\alpha \beta_1^2 t_c / a^2} \quad (7)$$

ここで得られた f は前報¹⁾で示した $t_c=0$ の場合と一致し、 f が t_c に無関係に同じ値をとるということは、実

験的によく知られた事実であり、Fig. 1-b の両加熱曲線(1),(2)の勾配が同じであることを示している。

また、 $t_c \rightarrow 0$ のとき(7)式より、 $B \rightarrow 1$ となり、

$$\ln j = \ln A \quad (8)$$

が得られ、前報¹⁾で示した $t_c=0$ の場合と同じ関係式が得られたことになる。この場合の加熱曲線は、Fig. 1-b の(1)になる。一方、 t_c がゼロでない場合は、曲線(2)のようになる。BALL²⁾ が缶詰の加熱処理実験において、 $\ln A$ を求めて、Fig. 1-b に示した手順で $t_r = r t_c$ を決定し、 r が 0.58 であることを見出した。以下、この r を CUT 補正係数とする。以後この係数が一般に缶詰の加熱殺菌の $\ln A$ の算出に用いられている。ここで、 t_r は時間 t_r で媒体温度が瞬間的に T_1 になるとした場合の加熱開始時間を意味している。

Fig. 1-b の手順と(5)式から、補正係数 r は次のように与えられる。

$$r = \frac{t_r}{t_c} = \frac{1}{\alpha \beta_1^2 t_c / a^2} + \ln \frac{e^{\alpha \beta_1^2 t_c / a^2} - 1}{\alpha \beta_1^2 t_c / a^2} \quad (9)$$

試料および実験方法

前報¹⁾と同様に、ベントナイトの 40% 水混和物を正方偏平型の平板に成型し、その中心部に 0.2 ϕ 銅-コンスタンタン熱電対をそう入し、12 μ ポリエステル-3 μ アルミホイル-50 μ ポリエチレンラミネートフィルムで密封包装し、モデル試料とした。無限平板試料としては、一辺 9.0 cm の平板試料を密封包装後、周囲を同厚の木材板で囲って用いた。無限平板試料は、 $2a=208$ cm のものを、有限平板としては、 $2a=2.0 \sim 3.5$ cm、 $2l=5.5 \sim 18.0$ cm に変化させて実験を行なった。

レトルトは、高さ 660 mm、内径 500 mm の有効寸法をもつ立型レトルトで、処理温度は、110, 115, 120°C の3条件、蒸気比は実用的使用条件⁴⁾である 65~89% とした。

結果および考察

1. レトルト上昇時間補正係数の算出

(9)式を用いて求めた $t_c/f = \alpha \beta_1^2 t_c / a^2$ と t_c/t_r との関係を図 2 にプロットした。 t_c/t_r は t_c/f に対して増加関数であるが、0.5 以下の t_c/f での急激な増加を除けば、ゆるやかな増加率を示すことがわかる。

実用的条件を考慮すれば、 $t_c=10 \sim 30$ min、 $f=10 \sim 25$ min とみなせるから、この範囲を図 2 に示した。この範囲の $t_r/t_c=0.52 \sim 0.62=0.57 \pm 0.05$ となり、BALL が得た補正係数の値 0.58²⁾によく一致する。

Fig. 2. t_r/t_c curve v.s. t_c/f

R: Range for practical conditions

f: Heat penetration parameter

 α : Thermal diffusivity β : Calculating parameter (Equation 1) Fig. 3. Relation between j and a for various h/k h/k : A. 1.50, B. 3.50, C. 5.51, D. 7.53, E. 10.0, F. 20.0. h : Surface heat transfer coefficient k : Thermal conductivity

次に種々の h/k に対する $j = \ln A$ と a の関係を Fig. 3 に示した。また、前報で得た蒸気比 65~90% の処理の場合の $h = 1.13 \pm 0.05 \times 10^{-2} \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1} \text{ deg}^{-1}$ の値を用いて求めた種々の t_c に対する、 t_c/f と a の関係を Fig. 4 に示した。

これらの関係を用いれば、種々の a , t_c , f , h に対して、 t_r/t_c および j を直ちに求めることができる。

2. 無限平板における j 値の検討

$2a = 2.8 \text{ cm}$ の無限平板試料 ($h/k = 7.51$) について、種々の実用条件に対して、 t_c を 4, 7, 10, 15, 18 min と変えて直線的にレトルト温度上昇を行ない、 $t_r/t_c = 0.58$ を用いて得た $j = \ln A$ の実験値と、Fig. 3 から求めた j の計算値を Table 1 に示した。実験値の平均と

Fig. 4. Relation between t_c/f and a for various t_c Table 1. The j -value of infinite slab-type package

Processing conditions Temperature (°C)	Steam ratio (%)	j -value
110	65	1.36
	71	1.38
	79	1.33
115	66	1.29
	71	1.26
	81	1.33
120	74	1.37
	76	1.28
	83	1.30
Avreage		1.32 ± 0.6
Calculated value		1.260

 $2a = 2.28 \text{ cm}$, $t_c = 4-18 \text{ min}$ j : Lag factor, t_c : Coming-up-time $2a$: Sample thickness

計算値との差は約 6% であり、両値はよく一致していることがわかる。

3. 有限平板における f 値の検討

種々のディメンジョンに対する、すなわち、 $2l = 15.0, 18.0 \text{ cm}$, $2a = 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 \text{ cm}$ の各試料に対してレトルト温度上昇を直線的に行ない、 $t_r/t_c = 0.58$ を用いて求めた j の実験値と、理論値を Table 2 に、同様に、 $2a = 2.5, 3.0 \text{ cm}$, $2l = 5.5, 9.0, 12.0, 15.0, 18.0 \text{ cm}$ での結果を Table 3 に示した。 l/a の値が比

Table 2. The j -value of finite slab-type package with various dimensions I

2a (cm)	2l (cm)		Calculated j-value
	15.0	18.0	
2.0	1.30	1.24	1.257
2.5	1.28	1.22	1.263
3.0	1.20	1.28	1.266
3.5	1.26	1.25	1.268
Average	1.26	1.25	

Steam ratio=71-89%, $t_c=9-10.5$ min

2a: Sample thickness, 2l: side length of sample

Table 3. The j -value of finite slab-type package with various dimensions II

2l (cm)	2a (cm)	
	2.5	3.0
5.5	1.23	14.1
9.0	1.20	1.44
12.0	1.26	1.31
15.0	1.28	1.27
18.0	1.22	1.30
Average	1.24	1.35
Calculated value	1.262	1.266

Steam ratio=71-89%

 $t_c=9-11$ min

* Average of these values=1.29

較的小さい試料に対して、実験値がやや大きくなる傾向にある (Table 3) が、全体として理論値とよく一致して

いることがわかる。

以上の結果から、フィルム包装食品の蒸気-空気系加熱殺菌において、レトルト温度上昇が、ほぼ直線的であるとみなせば、実用的には lag factor, j の値の計算におけるレトルト温度上昇時間の補正係数として、BALL の 0.58 を用いてさしつかえないと考えられる。

要 約

(1) 直線近似のレトルト温度上昇に対して、無限平板型試料について解いたレトルト温度上昇時間の補正係数は、実用条件下で、0.52~0.62 となり、その平均値の 0.57 は BALL の缶詰による経験的な値 0.58 とほぼ一致した。

(2) $t_r/t_c - t_c/f$, $j-a$, $\alpha\beta t_c/a^2 - a$ などの関係を種々の条件に対してプロットして理論計算に供した。

(3) 無限平板および有限平板型のモデル食品に対して種々の条件下で行なった実験に $t_r/t_c=0.58$ を適用して求めた j の実験値と、 j の理論値はよく一致した。

なお、本論文の実験を手伝っていただいた研究室の米本善政、江尻健一、遠藤健の各氏に謝意を表します。

文 献

- 1) 山野善正・江尻健一・遠藤 健・千田 貢: 食品工誌, 22, (5), 199 (1975).
- 2) BALL, C.O.: Bull. Nat. Res. Council, 7, (37), 1 (1923).
- 3) CARSLAW, H.S. and JAEGER, J.C.: Conduction of Heat in Solids, 2nd ed, (Oxford Univ. Press), p. 127 (1959).
- 4) 山野善正・小松美博: 食品工誌, 16, (3), 113 (1969). (昭和51年11月12日受理)