

学位論文題名

Ohmic Heating for Advancement of Milk Pasteurization Technique

– Mechanisms of Nonthermal Injury of Microorganisms by
Electric Current and the Optimum Ohmic Conditions –

(通電加熱による牛乳殺菌技術の高度化

– 通電加熱における電流の殺菌効果のメカニズムの解明と
最適通電条件の確立 –)

学位論文内容の要旨

1. はじめに

最近では食の安全・安心を揺るがす事件が頻発し、とりわけ加工食品に対する消費者の関心が高くなっている。安全性確保に直結する技術として食品加工中の殺菌工程は非常に重要であるといえる。

現在、液体食品の殺菌にはプレート式と呼ばれる外部加熱殺菌方式が普及している。しかし外部加熱法は、食品表面から中心へ熱が伝わるまでの時間差があるため、表面が過剰加熱となり加熱むらや品質の劣化を招く恐れがある。そこで、外部加熱に代わる迅速かつ均一な食品の加熱技術が求められている。通電加熱法は食品に直接電流を流して発生するジュール熱によって食品自身を発熱させる内部加熱法である。通電加熱法は迅速均一な加熱が可能という特徴から食品業界では加熱調理のみならず殺菌法としても注目されている。通電加熱法で加熱殺菌を行った際、熱による殺菌効果に加えて電気の付与による非熱的殺菌効果が認められれば殺菌温度を下げることができ、安全性を保ちつつ品質劣化を抑えることが可能となると予想される。

そこで本研究では、牛乳を対象として通電加熱による殺菌効果及びそのメカニズムを明らかにすることを目的とした。さらに、最適通電条件を確立するため、通電加熱における各電気パラメータと殺菌効果との関係について検討した。

2. 牛乳の電気特性

従来の通電加熱の研究は、固定周波数の交流を用い、材料の抵抗に応じて電圧を変動させる条件を中心に進められている。しかし、交流を使用することから材料の電気特性に応じた周波数を利用することも検討されるべきであろう。そこで本実験では、周波数や温度上昇が牛乳の電気特性にどのような影響を与えるかを実験的に検討し、通電加熱法のメカニズムを明らかとするための基礎データを得ると共にその精度を明らかにすることを目的とした。その結果、周波数が増加するとキャパシタンスと実効抵抗と共に減少した。試料温度がキャパシタンスに及ぼす影響はほとんど認められないが、試料温度は上昇すると実効抵抗が小さくなる。RC回路には、インピーダンスと実効抵抗の大きさにはほとんど差がないため、キャパシタンスがインピ

一ダンスの大きさに与える影響は無視できるほど微量であるといえた。電気特性値は実験式によって十分な精度で予測できることが明らかになった。

3. 通電加熱法と外部加熱法の殺菌効果及び通電加熱による供試試料品質への影響

牛乳の殺菌については、品質保持の面からできるだけ低温度で殺菌を行うのが望ましいが、安全性の面から高温度で加熱殺菌を行わざるを得ないのが現状である。そこで本実験では、供試試料として牛乳を用い、通電加熱法と外部加熱法の殺菌効果の比較、加熱による牛乳の品質への影響について検討を行った。その結果、通電加熱法は外部加熱法より優れた殺菌効果を持ち、熱による殺菌効果とともに電気による殺菌効果を有することがわかった。行った条件の範囲では、外部加熱に比べ、通電加熱の場合には加熱による牛乳の品質への影響が大きくなかった。

4. 通電加熱における電流の殺菌効果

通電加熱法には食品の加熱による熱的殺菌効果に加え、通電単独による非熱的殺菌効果があるものと考えられた。しかし、通電による非熱的殺菌効果の有無については研究者によって見解が異なり、現在のところ明快な研究結果は得られていない。そこで、菌が熱殺菌されない程度の低い温度範囲で通電を行い、その殺菌効果について検証した。その結果、通電加熱法において、電流による直接の殺菌効果（非熱的殺菌効果）は認められなかったが、後続の加熱操作による殺菌効果が向上した。通電加熱法は、電流により菌の耐熱性を低下させるため、次の加熱による殺菌を効率的に行える加熱殺菌法であると推察された。

5. 通電加熱における電流の殺菌効果のメカニズムの解明

電気のみで微生物を直接殺せるのは、その細胞膜に大きな電圧をかけるか、あるいは放電によって膜に損傷を与える場合になるが、本研究で使用した装置ではそれが不可能である。また著者の周囲で可能な方法(SEMなど)では、微小な微生物の菌体に開いたさらに小さい穴や亀裂を確認することができなかった。間接的ではあるが、微生物細胞が健全で強いかを知るために、生命活性に係る酵素や代謝生成物に着目し、それらが菌体外に出てくれば、膜に何らかの穿孔、亀裂などが生じているか膜の透過性に変化が生じている可能性があるものと考え得る。それによって微生物の活性が下がり、外部環境の変化に対して脆弱になるとも考えられる。そこで、好氣的環境における呼吸代謝生成物であるアデノシン3リン酸(ATP)と嫌氣的解糖系の最終段階で作用する乳酸脱水素酵素(LDH)とを指標とし、それらの菌体外への漏出量を測定した。この時、外乱を避けるために牛乳にかえてリン酸緩衝液を用い測定した。

その結果、菌体外部のATPやLDH濃度が初期値やコントロールの外部処理の場合に比べ、通電処理した場合においてより高いことが分かった。すなわち、通電によって菌体外への漏出が増した、言い換えれば、菌体内部からATPやLDHが失われる傾向にあり、生命力が減じたとみることができる。よって、通電により細胞膜に何らかの変化が生じて活性指標物質が漏出したものと解された。

6. 通電加熱における最適通電条件の検討

食品加工において、殺菌効果を適切に推定、評価することは安全性の面だけでなく、食品の品質面とのバランスを図るためにも必要不可欠である。通電加熱の殺菌効果を予測するには、熱効果以外に電気効果も考慮しなくてはならない。しかし、通電加熱の電気効果に寄与する制御因子(電界、電流密度、電力量、周波数、波形)については十分に解明されていない。そこで、通電加熱の制御因子に着目し、それらが電気効果に及ぼす影響を検討した。その結果、通電加熱法を用いて殺菌を行う場合に周波数を高くすると殺菌効果が増加することを認めた。理由として周波数が高いほど、菌の誘電損失が大きくなり、牛乳の温度は同じであっても菌体自身の温度が高くなるため殺菌が進行したと考えられる。よって、高い周波数による効率的な加熱も期

待できる。正弦波と矩形波の殺菌効果に差が認められなかったが、矩形波が加熱には最も効率的であることが確認でき、また矩形波発振回路は構造が単純であるため、通電加熱殺菌には正弦波より矩形波の利用が適していることがわかった。さらに、通電加熱の電気効果は本研究の電気強度の範囲内では、電気強度には依存せず、電力量のみに依存することがわかった。

7. 総括

以上の研究結果から、通電加熱法で加熱殺菌を行った際、熱による殺菌効果に加えて通電単独による非熱的殺菌効果が認められ、それにより、後続の加熱処理における殺菌温度を下げることができ、安全性を保ちつつ品質劣化を抑えることが可能となると明らかになった。よって、本研究で検討した「通電加熱」と「外部加熱」との併用では、より小さな投入エネルギーで十分な殺菌効果が得られ、従来の通電加熱殺菌の欠点を克服できると判断された。今後の課題として、通電加熱が実際に食品業界で応用できるように各パラメータを考慮し有効かつ効率的な通電加熱モデルを作成することが必要であると考えられた。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 木 村 俊 範
副 査 教 授 松 田 従 三
副 査 准教授 川 村 周 三
副 査 ユニット長 植 村 邦 彦 (食品総合研究所)

学 位 論 文 題 名

Ohmic Heating for Advancement of Milk Pasteurization Technique

– Mechanisms of Nonthermal Injury of Microorganisms by
Electric Current and the Optimum Ohmic Conditions –

(通電加熱による牛乳殺菌技術の高度化

– 通電加熱における電流の殺菌効果のメカニズムの解明と
最適通電条件の確立 –)

本論文は7章からなり、図 56、表 21、引用文献 165 を含む、総頁数 166 の英文論文であり、別に 1 編の参考論文が添えられている。

最近では食の安全・安心を揺るがす事件が頻発し、とりわけ加工食品に対する消費者の関心が高くなっている。食の安全性確保に直結する技術として食品加工中の殺菌工程は非常に重要である。

牛乳やジュースなどの液体食品・飲料の殺菌にはプレート式と呼ばれる外部加熱殺菌方式が普及している。これは熱を食品に伝達して加熱殺菌するので、熱伝導性の良い液体を効率よく殺菌できるのが特長の方式である。しかし、熱伝導性に劣り、また粘性の高い液体ではプレートに接する液体表面部と内部との間に温度差ができ、内部側の処理が不十分になる。逆に、加熱効果を上げるために滞留時間を長くしたり、加熱メディアと被加熱物との温度勾配を大きくし過ぎると被加熱物である食品の熱変性（タンパク、脂質、ビタミンなど）を誘引してしまうことがある。

これらの欠点を克服できる殺菌技術の一つとして食品自体に通電してジュール熱を発生する通電加熱殺菌が注目され、飲料や練り製品への応用が試みられてきた。

本研究では、比較的通電能力の低い装置による牛乳の殺菌効果を調べるとともに、効果のメカニズム、および通電条件の最適化に資する制御パラメータの諸特性を検討し、低投入型の新規通電加熱技術の構築を目的とした。

1. 牛乳の電気特性

本実験では、周波数や温度上昇が牛乳の電気特性への影響を実験的に検討し、通電加熱法のメカニズムを明らかとするための基礎データを得ることを目的とした。その結果、周波数が増加するとキャパシタンスと実効抵抗共に減少した。試料温度がキャパシタンスに及ぼす影響はほとんど認められな

いが、試料温度は上昇すると実効抵抗が小さくなる。RC回路ではインピーダンスと実効抵抗の大きさにはほとんど差がないため、キャパシタンスがインピーダンスの大きさに与える影響は無視できるほど微量であるといえた。

2. 通電加熱法と外部加熱法の殺菌効果及び通電加熱による供試試料品質への影響

牛乳の殺菌では、品質保持のためできるだけ低温度で殺菌を行うのが望ましいが、安全性の面から高温で加熱殺菌を行わざるを得ないのが現状である。そこで、牛乳を用い、通電加熱法と外部加熱法の殺菌効果の比較、および加熱による品質への影響について検討した。その結果、通電加熱法は外部加熱法より優れた殺菌効果を持ち、熱による殺菌効果とともに電気による殺菌効果を有することがわかった。また、行った実験条件の範囲内では、外部加熱に比べ、通電加熱による牛乳品質への影響は大きくなかった。

3. 通電加熱における電流の殺菌効果

上記のように、通電加熱法には食品の加熱による熱的殺菌効果に加え、通電単独による非熱的殺菌効果があるものと考えられた。しかし、通電による非熱的殺菌効果の有無について確証は得られていない。そこで、菌が熱殺菌されない程度の低い温度範囲で通電を行い、その殺菌効果について検証した。その結果、通電加熱法において、電流による直接の殺菌効果（非熱的殺菌効果）は認められなかったが、後続の加熱操作による殺菌効果が向上した。通電加熱法は、電流により菌の耐熱性を低下させるため、後続の加熱殺菌を効率的に行える方法であると推察された。

4. 通電加熱における電流の殺菌効果のメカニズムの解明

電気のみで微生物を直接殺せるのは、その細胞膜に大きな電圧をかけるか放電によって膜に損傷を与える場合とされるが、本研究で使用した装置ではそれが不可能である。また微小な微生物の菌体に関いたさらに小さい穴や亀裂を確認できなかったが、微生物細胞が健全で強いかわるために、生命活性に係る酵素や代謝生成物に着目し、それらが菌体外に出てくれば、膜に何らかの穿孔、亀裂などが生じているか膜の透過性に変化が生じている可能性があり、微生物の活性が下って外部環境の変化に対して脆弱になるとも考えられる。そこで、好氣的環境における呼吸代謝生成物であるアデノシン3リン酸（ATP）と嫌氣的解糖系の最終段階で作用する乳酸脱水素酵素（LDH）とを指標に、菌体外部への漏出量を測定した。この時、外乱を避けるために牛乳にかえてリン酸緩衝液を用い測定した。

その結果、菌体外部のATPやLDH濃度が初期値やコントロールの外部処理の場合に比べ、通電処理した場合においてより高いことが分かった。すなわち、通電によって菌体外部への漏出が増した、言い換えれば、菌体内部からATPやLDHが失われる傾向にあり、生命力が減じたとみることができた。

5. 通電加熱における最適通電条件の検討

通電加熱の制御因子に着目し、因子を個別に設定できる実験系を構築した。またそれらが電気効果に及ぼす影響を検討した。その結果、通電加熱法を用いて殺菌を行う場合、周波数を高くすると殺菌効果が増大した。理由として周波数が高いほど、菌の誘電損失が大きくなり、牛乳の温度は同じであっても菌体自身の温度がより高くなるため殺菌が進行したと考えられる。また本研究の電気強度の範囲内では、通電加熱の電気効果は電力量のみに依存することがわかった。

以上の研究結果から、通電加熱法で加熱殺菌を行った際、熱による殺菌効果に加えて通電単独による非熱的殺菌効果が認められ、それにより、後続の加熱処理における殺菌温度を下げることができ、安全性を保ちつつ品質劣化を抑えることが可能となるとみられた。よって、本研究で検討した「通電加熱」と「外部加熱」との併用では、より小さな投入エネルギーで十分な殺菌効果が得られ、従来の通電加熱殺菌の欠点を克服できると判断された。今後の課題として、通電加熱が実際に食品業界で応用できるように各パラメータを考慮し有効かつ効率的な通電加熱モデルを作成することが必要であると考えられた。

本研究では、通電加熱殺菌法の優位性とそのメカニズムを明らかにして新規の知見を得、また通電

条件制御パラメータについて検討することにより装置製作、実用的操作に関する重要な知見を提供しているので、本研究成果は学術および実用の両観点から高く評価できる。

よって審査員一同は、孫 慧先が博士(農学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認めた。