伝熱面との間に間げきのある乱れ促進体による 強制対流熱伝達の促進に関する研究*

高野 清**, 棚沢 一郎**, 西尾 茂文**

Enhancement of Forced Convection Heat Transfer Using Turbulence Promoters with Clearance Between Heat Transfer Surface

Kiyoshi TAKANO, Ichiro TANASAWA, and Shigefumi NISHIO

This study is a part of a research program whose objective is to determine an optimum way of enhancing forced convection heat transfer using turbulence promoters. Effectiveness of turbulence promoters with clearance between the heat transfer surface is tested. Flow friction and heat transfer coefficients are measured at Reynolds numbers ranged from 1.5×10^4 to 9×10^4 . Inclination of the rib plate used as a promoter is also varied in addition to the variation of clearance. The result of performance evaluation suggests that a turbulence promoter with clearance and inclination shows a slight improvement of performance in the case where the clearance is small. A possible reason that such a type of turbulence promoter does not show much improvement in its performance characteristics may be the considerable reduction of the local heat transfer rate around the region where the separated flow reattaches.

Key Words: Thermal Engineering, Heat Transfer, Forced Convection Heat Transfer, Heat Transfer Enhancement, Turbulence Promoter

1. は じ め に

単相強制対流熱伝達の促進のために、伝熱面上に乱れ促進体(タービュレンス・プロモータ)を設置する方法は、効果的な手段の一つとして従来より数多くの研究成果が報告されており、また実用化も始まっている(紙面の関係で、これらの結果をここで紹介することは省略する)。しかし、この方法においては、熱伝達の促進が実現されると同時に、圧力損失の増大が避けられない。したがって、乱れ促進体付き伝熱面の実用価値を高めるためには、圧力損失による送風機動力の増大を上まわる伝熱促進が得られるような工夫が必要である。著者らは、前報⁽¹⁾⁽²⁾において数種類の乱れ促進体について実験を行い、その結果として促進体用平板の全面あるいは下部半面のみ小さな穴のあいた、多孔板あるいは半多孔板形乱れ促進体を用いることにより、これらの小孔を設けない無孔板より流動・伝熱特性の総合的向上が得られることを報告した。これらの乱れ促進体においては、促進体上部ではなく離れた流れの再付着と、促進体にあけられた小孔を通り抜ける流

れによって伝熱が促進され、一方、小孔の設置により乱れ促進体の形状抵抗の増加が抑えられるために、総合的性能の向上が実現されるものと考えられる。しかし、前報までの段階では、穴の形状・寸法・配置・開口比などを広範囲に変えた測定、あるいは最適ピッチ・高さ比などについての検討は質・量ともに不十分であった。そこで本報では、壁面近傍の穴の効果をさらに理想化した形で調べるため、促進体下部と伝熱面の間に間げきを有し、さらに促進体が流れに対し傾斜を持つ場合の流動特性および伝熱特性を実験的に明らかにするとともに、その性能評価を行った。

2. 実験装置および方法

2-1 実験装置 図1に実験装置の概略図を示す。実験装置は、前報⁽²⁾のものとはほぼ同じであるので、ここでは要点のみについて述べる。風洞は吸込み形で、流入した空気は750 mm(幅)×250 mm(高さ)の入口部長方形流路内の2枚の金網によって整流され、絞りを経て、300 mm(幅)×100 mm(高さ)×2 625 mm(長さ)の長方形テストセクションに導かれる。この長方形流路の側壁は厚さ10 mmの亚克力板、上下面は厚さ20 mmのベークライト板(外側を厚さ60 mmの発泡スチロールで断熱)で作成した。ベークライト製

* 昭和61年11月23日 関西支部第246回講演会において講演、原稿受付 昭和61年5月6日。

** 正員、東京大学生産技術研究所(〒106 東京都港区六本木7-22-1)。

の上下壁面内側には $x=0$ (長方形流路上流端) ~ 2 625 mm にわたり厚さ 30 μm のステンレス鋼はくを接着し、これに通電加熱して伝熱面とした。熱伝達測定部は流れと温度場の発達を考慮して $x=1 750 \text{ mm}$ ~ 2 450 mm の間とし、この間のステンレス鋼はく裏面に約 160 点の銅・コンスタンタン熱電対 (線径 80 μm) をはんだ付けし、伝熱面の温度を測定した。また、流路両側壁には圧力損失を測定するため、直径 1 mm の静圧孔を片面に 26 個ずつ計 52 個あけた。乱れ促進体は厚さ $t=1 \text{ mm}$ 、高さ $e=8 \text{ mm}$ の平板で、アクリル製の側壁面に設けたスリットから適当なピッチで挿入できるようになっている。乱れ促進体に関する実験パラメータは、乱れ促進体の実効高さ e 、乱れ促進体のピッチ p 、乱れ促進体と伝熱面との間げき c および、乱れ促進体の主流に対する傾斜角 θ である (図 2 参照)。

2.2 実験方法 表 1 に実験を行った乱れ促進体に関するパラメータ (θ , e , c) の範囲を示す。今回実験を行った促進体間のピッチは 80 mm と 160 mm で、これは垂直無孔板 ($\theta=90^\circ$, $c=0 \text{ mm}$) のピッチ・高さ比にして 10 と 20 に相当する。局所熱伝達率測定部は、ピッチ 80 mm の場合、上流から乱れ促進体 24 枚め ($x=1 940 \text{ mm}$) ~ 28 枚め ($x=2 260 \text{ mm}$) の 4 ピッチ、ピッチ 160 mm の場合は、上流から 13 枚め ($x=2 100 \text{ mm}$) ~ 14 枚め ($x=2 260 \text{ mm}$) の 1 ピッチである。熱伝達率 h は、この間の伝熱面の中心線上の壁温を測定し、ヒータへの供給電力から算出される熱流束と、空気の局所混合平均温度と壁温との温度差を用いて算出した。平滑流路の断面内を熱電対でトラバースして求めた混合平均温度と加熱量より求めた値との差は 1 % 以内であったので、流路壁から周囲への熱損失による誤差は小さいと考える。一方、平均熱伝達率は局所熱伝達率を算術平均して求めた。圧力損失は、静圧差をマイクロマノメータ (分解能 1/100 mmAq) を用いて測定した。また、乱れ分布・平均流速の分布は、

ピッチ 80 mm の場合 2 100 mm ~ 2 180 mm の区間で、流れ方向に 7.5 mm の間隔ごとに定温度形熱線流速計 (5 μm タングステン線 I 形プローブ) を用いて測定した。乱れ促進体を設置した実験に先立って、平滑流路での流速分布が十分発達しており、摩擦係数が Jones⁽³⁾ の提案による修正レイノルズ数 R^* を用いた Kármán-Nikuradse の式に、また平均ヌセルト数が Dittus-Boelter の式に一致すること、さらに流路内の大部分の領域で、流動・熱伝達がともに二次元的であることを確認した。さらに、 $\theta=90^\circ$, $c=0 \text{ mm}$ の場合の促進体についてその流動・熱伝特性を Webb ら⁽⁴⁾ および Han ら⁽⁵⁾ による相関式と比較し、ピッチ・高さ比が 10, 15, 20 のいずれの場合にもよい一致が見られることを確認した。

3. 実験結果

実験は、表 1 にあげた 10 種類の組合せについてピッチを 80 mm と 160 mm の 2 とおりに変えて行った。実験結果からは、伝熱特性はピッチの変化に対し

表 1 促進体の種類

θ°	$e \text{ mm}$	$c \text{ mm}$
90	8	0
		1
		2
		3
60	7.4	1.4
		2.2
		3.2
45	6.4	1.1
		2.1
		2.5

図 1 実験装置概略

図 2 促進体設置概略

て本質的な差を生じなかったもので、紙面の都合上、本報では性能の良好なピッチ 80 mm の結果を中心に報告する。

3.1 平均熱伝達率と摩擦係数 図 3(a)~(c) は、促進体傾斜角 $\theta=90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$ について、それぞれ促進体下の空げきをさまざまに変化させた場合の平均ヌセルト数、摩擦係数の測定結果である。また、図中の線群は、それぞれの測定値を直線で近似したものである。平均ヌセルト数のレイノルズ数に対する依存性は、レイノルズ数の約 0.7 乗であった。平均ヌセルト数は、本実験の範囲では、傾斜角、空げきによらず、空げきのない $\theta=90^\circ, c=0$ mm の場合とほぼ同一であった。摩擦係数は、いずれの傾斜角においても、空げき

の増加に伴い増大する傾向がみられた。これは、乱れ促進体が主流側に移動し、流路の実効的ブロッケージ比が増大したためと考えられる。また、傾斜角の減少に伴い摩擦係数が減少するのは、促進体の実効高さが減少したこと、さらに形状抵抗が減少したこと起因するものと思われる。

3.2 局所熱伝達率分布 図 4(a)~(c) は促進体間の局所熱伝達率分布を同一レイノルズ数の平滑流路の熱伝達率との比として示したものである。空げきによる局所熱伝達率の分布形状の変化は、どの傾斜角においても類似の傾向を示す。すなわち、 $\theta=90^\circ, c=0$ mm の場合は、従来報告されているように、プロモータ間中央 (高さの 6~7 倍) に再付着によるピークが

図 3 平均ヌセルト数と摩擦係数

図 4 局所熱伝達率分布

図5 性能評価

形成されるが、狭い空げきを有する場合には、プロモータ直後の加速流による高熱伝達領域と再付着による高熱伝達領域が形成される。そして、さらに空げきを増加させると、はく離流による再付着は弱められ、加速流の影響が後流にまで及ぶようになり、空げきが3 mm 程度の場合には、再付着による高熱伝達領域はほとんどみられない。

3・3 性能評価 促進体による熱伝達の増進と圧力損失の増加をあわせて評価するため、前報と同様に平滑流路と乱れ促進体付き流路の送風機動力を同一にした際の熱伝達率比により乱れ促進体の性能比較を行った。図5にその結果を示す。縦軸は平滑流路に対するヌセルト数の比、横軸は送風機動力に比例するパラメータ $\lambda^{1/3} \cdot Re$ である。 $\theta=90^\circ$ の場合には、空げきを有する促進体については $\theta=90^\circ$ 、 $c=0$ mm の場合の性能を上まわる結果は得られなかったが、 $\theta=60^\circ$ 、 $c=1.4$ mm および $\theta=45^\circ$ 、 $c=2.1$ mm の場合には $\lambda^{1/3} \cdot Re$ の大きな領域で、 $\theta=45^\circ$ 、 $c=1.1$ mm の場合については全領域で、 $\theta=90^\circ$ 、 $c=0$ mm の場合の性能を若干上まわった。これは、 $c=0$ mm の場合と比べ、小空げき傾斜板の熱伝達が顕著な低下を示さず、摩擦係数が30%程度減少することによるものである。

3・4 流動測定 性能比較の結果、最も性能が優れていた $\theta=45^\circ$ 、 $c=1.1$ mm の場合について、促進体間の流速分布および乱れ分布の測定を行った。その一例として、I形プローブを用いた乱れ分布の測定結果を図6に示す。図中には $\theta=90^\circ$ 、 $c=0$ mm の結果も

図6 乱れ分布

併記した。 $\theta=45^\circ$ 、 $c=1.1$ mm の場合、促進体直後 ($x=7.5$ mm) に促進体上方と下方にピークが発生しているが、下方のピークは壁の影響を強く受け、 $x=15$ mm ではほとんど消滅している。また、上方の乱れは、主流側、壁側へしだいに拡散し、主流側での乱れ強さは $\theta=90^\circ$ 、 $c=0$ mm の場合のほうが、壁近傍の乱れ強さには大きな差異はみられない。

4. 結 論

傾斜と空げきのある乱れ促進体付き伝熱面について、熱伝達と流動の測定を行い、以下の結論を得た。

(1) 平均熱伝達率は、本実験の範囲では促進体の傾斜角、空げきに大きくは影響されない。

(2) 摩擦係数は、空げきの増加に伴い増大するが、傾斜角の減少とともに低下し、 $\theta=45^\circ$ 、 $c=1.1$ mm では、 $\theta=90^\circ$ 、 $c=0$ mm の場合に比べ約30%低い値を示した。

(3) 傾斜と空げきのある促進体の伝熱性能は、空げきが狭い場合には、 $\theta=90^\circ$ 、 $c=0$ mm の場合の性能をわずかながら上まわるという結果を得た。本研究は文部省科学研究費（エネルギー特別研究）によるものであることを付記する。

文 献

- (1) 棚沢・ほか3名, 機論, 49-439, B (昭58), 676.
- (2) 棚沢・ほか3名, 機論, 50-451, B (昭59), 896.
- (3) Jones, O. C., Jr., *Trans. ASME, Ser. I*, 98-2 (1976), 173.
- (4) Webb, R. L., Eckert, E. R. G. and Goldstein, R. J., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 14-4 (1971), 601.
- (5) Han, J. C., Glicksman, L. R. and Rohsenow, W. M., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21-8 (1978), 1143.