관내 강제유동에서의 열전달 촉진과 압력강하

한국과학원 기계공학과 김 두 천

1. 서 론

최근 열전달을 촉진시키기 위한 많은 연구와 이에 따른 기술 개발이 이루어 지고 있다. 관내 난류 유동시의 강제대류 열전달의 향상대책으로는 여러가지 방법이 있겠지만, 기술적 문제나 경제성을 고려해 볼때 실제로 사용에 적용할 수 있는 것으로는 다음의 두 가지 방법을 들 수 있겠다. 하나는 나선홈이나 핀등에 의한 표면적의 증대에 의한 방법이며, 다른 하나는 관내에 코일이나 비틀림테이프 등을 삽입하므로써 발생되는 와류에 의한 방법이다. 이들은 모두 생산가가 저렴하고 생산공정이 비교적 간단하며 펌푸동력 이외의 추가동력이 불필요할 뿐만 아니라 그 성능면에서도 우수하지만 많은 연구 결과는 비틀림테이프에 의한 와류 방식이 가장 효과적인 방법이라고 밝히고 있다. 그러므로 여기에는 비틀림테이프에 의한 와류유동에서의 열전달과 압력강하에 대한 물리적특성을 규명하여 매끈한 직관에 대한 마찰계수와 열전달계수에 관한 실험식을 보정하여 와류에 대하여 일반적으로 적용할 수 있는 실험식을 도출함과 동시에 동일한 펌프동력에 대한 성능을 검토하고저 한다.

2. 본 론

1. 열전달 개수의 향상 인자

매끈한 직관의 열전달 계수의 증가는 열전도율과 관내경이 일정하다고 가정하면 유속의 증가와 밀도의 증가에 크게 의존하며 비열의 증가 및 점성계수의 감소에도 상당히 좌우된다.

비틀림테이프에 의한 와류에서의 열전달계수의 증가는 대체로 다음의 세가지 효과에 의한 것으로 예견된다.

(1) 테이프에 의한 운동 통로의 증가로, 인한 유속의 결과적인 증가와 이차흐름의 발생

(2) 가열하므로써 발생되는 큰 원심력에 의한 강제순환과 점성계수의 감소

(3) 테이프의 핀효과

이 예견은 Lopina and Bergles [1]의 실험결과로 충분히 입증되고 있다. 이 외에도 Smithberg and Landis [2], Gambill and Bundy [3]등도 이에 관하여 연구논문을 발표 하였다.

2. 압력강하

등은 직관에 대한 Fanning 마찰계수는 Moody [4]에 의하면 다음과 같다.

$$f_{a,\ iso}=0.046/Rei^{0.2} \qquad (1)$$

물에 대한 경우에 가열로 인한 점성계수를 보정하면 직관에서의 가열시의 마찰계수는 다음식으로 표시된다.

$$f_{a,\ dia}=f_{a,\ iso}\left\{\frac{\mu_w}{\mu_b}\right\}^{0.35} \qquad (2)$$

와류에 대한 등은 마찰계수의 Lopina and Bergles[1]의 실험식은 다음과 같으며 식(2)의 20% 이내의 편차를 나타내고 있다.

$$(f_s/f_a)_h=2.75\ y^{-0.496} \qquad (3)$$

여기서 y는 관의 내경에 대한 비틀림 테이프의 피치의 비이며 f_a는 식(3)에 주어져 있다.

비틀림비 y가 커질수록 와류효과는 감소하게 되어 $(f_s/f)h$는 감소함을 알 수 있다.

와류에서 등은시와 가열시의 마찰계수의 차이는 테이프를 삽입하지 않은 직관에서보다 훨씬 작을 것이다. 그 이유는 관의 유효면적을 고려하면 명백해질 것이다. 즉 와류의 경우에는 유로의 유효면적이 감소하는 반면에 전 주변전단응력은 증가하게 될 것이다. 만약에 가열효과에 의한 점성감소에 따른 전 전단응력의 감소를 점성보정으로 나타낸다면, 테이프 표면과 관벽에서의 열경계층의 두께가 같을 경우에는 테이프의 유무에 무관하게 식(2)로 보정될 것이다. 그러나 테이프로 부터의 열전달은 전체의 적은 부분에 불과하므로 테이프의 온도상승과 전단응력의 감소는 관벽보다 작을 것이다. 그렇기 때문에 와류에 대한 등은 보정지수는 더 적어지게 되며 식(2)의 지수0.35에 Di/Dh 배만큼 더 보정되며 가열시의 와류에 대한 마찰계수 (f_s)는 다음과 같이 표시된다.

$$f_{s,\ iso}=f_s(\mu_b/\mu_w)^{0.35(Dh/Di)} \qquad (4)$$

이 실험식은 확립된 난류구역에서의 모든 매끈한 직관에서의 등은 시와 가열시의 마찰계수의 상관 관계에 적용된다.

3. 열전달

와류에서의 열전달의 증가는 다음의 세가지 효과에 의한 것으로 추정되며 많은 실험결과도 이를 입증해주고 있다.

(1) 비틀림 테이프에 의한 나선형 유로에 의한 난류 유동의 증가.

이 효과는 테이프에 의해 발생되는 관벽면에서의 유속 증가와 나선형 유동통로를 고려하면 McAdams[5] 공식으로 부터 구할 수 있다.

(2) 가열함으로써 발생되는 원심력에 의한 자연대류효과.

이 효과는 큰 원심력의 결과로 관벽근처의 밀도가 낮은 더운 유체는 관 중앙으로 유동하고 관 중앙의 찬 유체는 벽면쪽으로 유동하므로 가열평판상면에 대한 자연대류와 유사하게 해석할 수 있겠다.

(3) 핀효과

이는 핀의 형상 테이프의 성질 및 유동특성에 의해 핀효율을 결정하므로써 구할 수 있다.

이들 세가지 효과들이 서로 독립적인 것이라고 간주하면 전 열전달은 다음 식으로 표시된다

$$q_{total}=q_{sc}+q_{cc}+q_f \qquad (5)$$

$$q_f=r\ q_{total}$$

$$q_{total}=F(q_{sc}+q_{cc}) \qquad (6)$$

여기서 F=1/1-r이며, 전 열전달 계수는 식(5)와 (6)을 결합하여 다음식으로 표시된다.

$$h_s=\frac{q_{total}}{(T_w-T_b)\pi D_i L_h}=\frac{F(q_{sc}+q_{cc})}{(T_w-T_b)\ \pi\ D_i L_h} \qquad (7)$$

마찬가지로 $h_s=F(h_{sc}+h_{cc})$ ····· (8)

라 정의한다.

먼저 위의 (1)항을 구하기 위하여 테이프삽입에 의한 증가된 축방향 질량속도를 구하면 다음식으로 표시할 수 있다.

$$G=\frac{w}{\pi D_i^2/4-\delta_f D_i} \qquad (9)$$

접선방향속도는 회전 스라그류의 해석으로 Smithberg와 Landis[2]는 다음식으로 유도했다.

$$t=V_a\frac{\pi}{2y}\quad\frac{r}{r_i} \qquad (10)$$

테이프에 의한 증가된 합 속도는 축방향속도와 접선방향속도의 벡타합에 의해 구할 수 있으며 qsc를 구하기 위해서는 관벽에서의 합속도를 구해야 하므로 식(9)에 r=ri를 대입하면 다음과 같이 축방향속도로 표시된다.

$$\alpha=\frac{V_s}{V_a}=\frac{1}{2y}(4y^2+\pi^2)^{0.5} \qquad (11)$$

직관에 대한 McAdams[5]식에 이 결과를 대입하여 정리하면 난류증가에 의한 보정된 열전달 계수는 다음식으로 표시된다.

$$h_{sc}=0.023\left(\frac{\alpha GD_h}{\mu}\right)^{0.8}Pr^{0.4}\frac{k}{Dh} \qquad (12)$$

여기서 $\sigma>1$ 이므로 직관에서 보다 증가된 열전달 계수를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

(2)항의 자유 대류에 대한 해석은 가열면이 위로 향한 수평 평판으로 간주하여 Lopina and Bergles[1]는 다음과 같이 그라스 호후수를 구했다.

$$Gr=\frac{4.64}{y^2}Re^2, h\frac{D_h}{Di}\ \beta\ \Delta T \qquad (13)$$

$$h_{cc}=\frac{k}{D_h}\ (0.114)\ [Gr\cdot Pr]^{\frac{1}{3}} \qquad (14)$$

(3)항의 핀 효과는 제형 핀으로 간주하여 근사적으로 구하며 식(8), (12), (14)을 조합하면 테이프에 의한 와류 유동시의 전 열전달 계수는 다음식으로 표시한다.

$$h_s=\frac{k}{D_h}F\left\{0.023\ (\alpha Reh)^{0.8}Pr^{0.4}+0.193\left(\left(\frac{Re_h}{y}\right)^2\left(\frac{D_h}{D_h}\right)\beta\ \Delta T\ Pr\right)^{\frac{1}{3}}\right\} \qquad (15)$$

와류 유동에 대한 열전달 계수는 윗식에서 보는 바와 같이 다음의 제방법에 의해 증가시킬 수 있다.

첫째 : y가 작을수록 열전달 계수는 증가된다. Lopina and Bergles[1] 의 실험식은 $hs/ha=2.26y^{-0.248}$ 로 주어지며 25%이내의 정밀도를 갖는다.

둘째 : 벽온도와 유체의 체적온도 차가 커질수록 열전달은 증가된다. 이것은 식(15)의 우변의 둘째항을 나타내며 자연대류는 온도차가 커질수록 또 레이놀드수가 커질수록 주요한 기구임을 시사한다. Lopina and Bergles[1]의 물에대한 ΔT의 효과는 y=2.5에 대해서 레이놀드수 3×10^4에서 전체 열전달에 대한 자연대류의 비는 1/12이나, 1×10^5에서는 1/7로 증가함을 실험으로 보여주고 있다.

셋째 : 레이놀드수와 프란틀수가 증가 할수록 열전달 계수는 증가한다.

넷째 : F의 크기는 핀의 형태와 가열 양식에 따라 다르지만 $Re<3\times10^4$에서 F=1.137 $Re>3\times10^4$에서 F=1.1 정도임이 실험으로 밝혀졌으며 레이놀드수가 증가할수록 감소함은 이론적으로도 매우 타당한 것이다.

다섯째 : 냉각시에는 식(15)의 자연대류 항은 고려하지 않으며 그렇기 때문에 보통 가열시가 냉각시보다 10%정도 큰 열전달 계수를 얻게된다. 그러나 대체로 적은 온도차에서는 가열시나 냉각시 모두 자연대류 효과는 무시할 정도로 적기 때문에 식(15)의 우측 제2항을 생략하고 공히 적용할 수가있다.

4. 비틀림테이프에 의한 열전달의 평가

열전달의 증가정도를 평가하는 기준은 개발비 · 설치비 운전비 및 정비 유지비등 많은 인자를 고려해야. 하므로 일율적으로 정하기는 매우 곤란하다. 그러나 운전비를 그 기준으로 하여 동일한 펌프동력에 대하여 매끈한 직관의 열전달 계수와 비틀림테이프에 의한 와류에 의한 그것과를 비교하는 것이 유익하며 보편적일 것이다. 일정 펌프동력은 다 한 식으로 표시할 수 있다.

$$(Q\Delta P)_s=(Q\Delta P)_a \qquad (16)$$

여기에 식(1)과 레이놀드수를 대입해서 정리하면 다음과 같이 레이놀드수와 마찰계수의 관계로 표시된다.

$$(Af_iRe_i^3)_s=(Af_iRe_i^3)_a \qquad (17)$$

매끈한 직관에 대한 증가도를 구하기 위해서는, Re a, i를 구해서 f_a, i를 읽으므로써 펌프동력을 결정하게 된다.

식(17)을 매끈한 관과 테이프를 삽입한 관과의 레이놀드수의 관계로 표시하면 다음과 같다.

$$Re_{i,a}=[21.7(A_s/A_a)\ (Re_{i,s})^3f_{i,s}]^{0.357} \qquad (18)$$

이 식에서 수력직경 대신에 내경을 기준으로 한것은 h_s와 h_a를 직접비교하기 위한 것이다.

식(15)를 이용한 계산 결과와 여러 연구 결과는 동일 펌프 동력을 비교 기준으로 한 경우, 비틀림 테이프를 관내에 삽입한 경우에 적어도 20%의 열전달의 증가를 얻을 수 있음을 알았다 그리고 동일한 흐름상태에서는 70%의 증가를 얻을 수 있었다.

3. 결 론

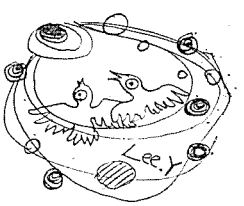
비틀림 테이프에 의한 관내 와류에 의한 열전달의 증가는 대체로 난류유동의 증진, 가열함으로써 발생되는 원심력에 의한 자연대류, 및 테이프의 핀 효과에 기인함을 알 수 있었다. 이 열전달 기구를 해석함으로써 종래의 매끈한 직관에 대한 실험식을 보정하여 모든 와류에 적용

할 수 있는 마찰계수와 열전달 계수의 실험식을 얻었다. 그리고 비틀림 테이프를 관내에 삽입하므로써 열전달의 증가를 얻은 반면에 압력강하도 증가하였으며 이들 양자를 고려한 비교의 표준으로 동일 펌프동력에 대한 열전달의 증가는 와류가 직관에서보다 20%의상의 증가를 그리고 다만 열전달 계수만을 증가시키고저 할 경우는 70%이상의 증가를 얻을 수 있음을 알았다.

주요기호표

1. 기호 〔 〕안은 단위〔—〕는 무사원을 표시한다.

A = 단면적 [ft^2]
Cp = 정압비열 [BtU/lb_m°F]
D = 직경 [ft]
Dh = 수력직경 [ft]
f = Fanning 마찰계수〔—〕
F = 핀효과계수〔—〕
G = 질량속도 [$lb_m/ft^2 \cdot hr$]
h = 열전달계수 [Btu/hr ft^2°F]
k = 열전도율 [Btu/hr ft°F]
L = 관의길이 [ft]
ΔP = 압력강하 [lb_f/ft^2]
Q = 제작유량 [ft^3/hr]
q = 열전달율 [Btu/hr]
r = 반경 [ft]
T = 온도 [°F]
ΔT = 벽온도와 유체온도의 차이 〔°F〕
Va = 평균축방향속도 [ft/hr]
Vs = 관벽에서의 와류속도 [ft/hr]
Vt = 접선방향속도 [ft/hr]
W = 질량유동율 [lbm/hr]
y = 테이프 비틈비〔—〕
= 피치/내경
α = 형상계수〔—〕
β = 열팽창계수 [1/°F]
r = 회효과매개변수〔—〕
δ_f = 테이프의 두께〔ft〕
μ = 점성계수 [lb_m/ft hr]
Pr = 프란틀 수〔—〕
Re = 레이놀드수〔—〕
Gr = 그라스호후수〔—〕

2. 첨자

a = 직관조건
b = 유체의 체적온도
cc = 원심력에 의한 대류
dia = 가열조건
h = 수력직경 기준
i = 내경기준
iso = 등온조건
s = 와류조건
sc = 나선형대류
w = 관벽조건