

Turbomolekularpumpe의 效率

獨. 아헨工大 流體力學研究所

研究員 錢 中 煥

1. 서 론

Turbomolekularpumpe^{*)}는 약 10^{-10} Torr 정도의 극 초진공을 만들어 낼 수 있는 진공펌프이다. 그 작동 기본원리로 보아 유체기계체에 속한다.

외형적인 구조는 Axialkompressor와 흡사하여 여러단계의 Leitschaufel과 Laufschaufel이 Rotor의 회전축 방향으로 순열되어 있으나 이 Leitschaufel과 Laufschaufel은 보통 Axialkompressor에서 사용되는 곡면으로 휘어진 Schaufelprofil과는 달리 똑바른 평면으로 형성되어 있다.

이렇게 Schaufel형상이 상이한 이유는 Turbomolekularpumpe속의 기체운동이 “자유분자” 기체운동(freie Molekülshöpfung)이므로 그 유체역학적인 펌프로서의 작동원리가 “연속체”(Kontinuum)로서의 유체운동의 원리에 따라 작동하는 Axialkompressor와는 서로 다른데에 있다.

Axialkompressor에서는 기체의 Schaufel에로의 진입각도와 배출각도가 상이하여 기체속도의 회전방향의 분속(Komponentn)이 진입쪽과 배출쪽이 달라 그 차이 ΔC_u 가 존재하며 회전속도 μ 로 회전하는 Schaufel은 운송되는 기체의 단위 질량당에 $\Delta C_u \cdot \mu$ 에 해당하는 일을 하여 주어 이 일의 일부 즉 효율에 해당하는 일이 압력증가의 형태로 나타난다. 유체기계체가 펌프로 일하기 위해서는 이 분속의 차 ΔC_u 가 클수록 이로우므로 Axialkompressor에서는 기체의 흐름이 Schaufel의 표면에서 떨어져 나가지 않는 한도내에서 Schaufel의 굽곡이 크도록 하는 것이 좋다.

반면에 Turbomolekularpumpe에서는 제작하기에 아주 간편한 휘어지지 않는 똑바른 Schaufel로서도 Axialkompressor에 있어서 보다 몇배의 압력비를 얻을 수 있다. 그 원인은 위에서 언급한 “자유분자” 기체운동에 의하여 분자들이

Schaufel의 벽에 충돌한후 다시 벽을 떠날때(완전한 Akkommodation을 가정하고) Schaufel의 원주속도에 해당하는 운동량의 증가를 받아 나가므로 벽과 충돌에 의한 분자의 운동량의 변화는 Axialkompressor에서 보다 몇배에 달할 수 있다. 따라서 큰 압축비를 얻을 수 있다.

연속체 기체운동에서 비연속체 기체운동(gas-kinetische Strömung)으로 바뀌어 가는 사이에서 작동하는 Kompressor에 관해서는 아직 거의 연구가 되어 있지 않다. [1]

Shapira, A.H.와 Kruger, C.H. [2]는 Monte Carlo Methode를 이용하여 처음으로 주어진 형태의 Schaufel이 한 주어진 회전속도 μ 로 움직일때 기체분자가 이 Schaufel kanal을 통과할 “관통확률”(Durchlanfwahrscheinlichkeit)를 계산하여 Turbomolekularpumpe의 압축비를 회전속도와 Schaufel의 기하적 형태의 함수로 표시할 수 있었다.

여기서 고찰코자 하는 것은 Turbomolekularpumpe의 효율이 압축비와 어떤 함수관계가 있는가를 규명하기 위한 것이다.

2. 효 율

효율고찰에 있어서 그 기본적인 사고과정을 보이기 위하여 여기서는 간단히 한 단계의 Low fschaufel만을 고려하기로 한다.

공간 ①에서 공간 ②로 Schaufel을 거쳐 단위 면적당 운송되는 단위시간당의 실제/질량은 Shapiro의 기호를 그대로 사용하여 $m \cdot (N_1 \cdot \Sigma_{12} - N_2 \cdot \Sigma_{21})$ 이다. 여기서 m 은 기체분자의 질량 N_1 은 공간 ①에서 Schaufelkanal의 단위 면적당에 진입하는 단위시간당의 기체분자수이며 Σ_{12} 는 기체분자가 Schaufelkanal을 거쳐 공간 ①에서 공간 ②로 통과할 “관통확률”이다. N_2 와 Σ_{21}

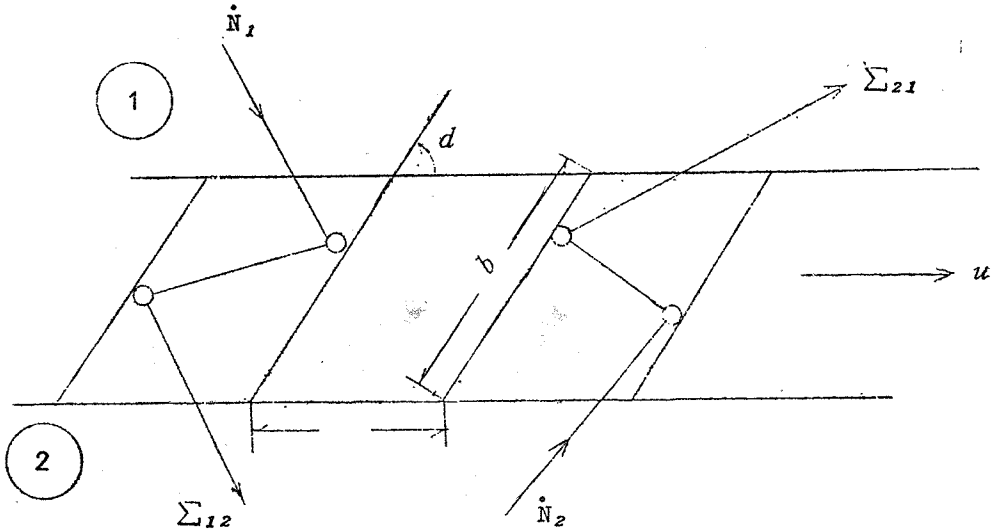


그림 1 기 호 설 명 도

은 공간 ①에 상대편 공간 ②에서 ①로 유동하는 기체에 대하여 위의 정의를 적용한 것이다. 그림 1의 p_1 과 p_2 는 각각 공간 ①과 ②의 압력을 뜻하며 펌프로서의 성격에 따라

$$m(\dot{N}_1 \Sigma_{12} - \dot{N}_2 \Sigma_{21}) \geq 0 \text{ 이며}$$

$$p_2 \geq p_1 \text{ 이다.}$$

여기에서 고찰하려는 효율 η 을 다음과 같이 정의한다.

시간당 질량 $m(\dot{N}_1 \Sigma_{12} \Sigma_{21})$ 을 압력 P_1 에서 P_2 로 증가시키기에 필요한 Leistung, LD $\eta = \dots$

Schaufel이 공간 ①과 ②에서 단위시간당 단위 면적의 Schaufelkanal로 진입하는 기체분자들에게 회전속도 u 로 운동하는 Schaufel이 행하여 주어야 하는 Leistung, LS

$$= \frac{LD}{LS} \dots \dots \dots (1)$$

이렇게 정의한 효율 η 계산에 필요한 LD와 LS를 압축비 p_2/p_1 의 함수로 표시하면 다음과 같다.

a) 압력 증가에 필요한 Leistung, LD는 수송 질량 $m(\dot{N}_1 \Sigma_{12} - \dot{N}_2 \Sigma_{21})$ 에 비례하며 등온상태 변화를 가정하는 경우 매질량당 $RT_1 \ln(p_1/p_2)$ 의 일이 필요하므로 구하는 Leistung은

$$LD = m \dot{N}_1 w \text{ RT}_1 \ln(p_2/p_1) \dots \dots \dots (2)$$

가 된다. 여기서 w 는 Ho-계수라 불리는 양으로 $w = (\dot{N}_1 \Sigma_{12} - \dot{N}_2 \Sigma_{21}) / \dot{N}_1$ 이다.

R는 특별기체 상수이고 T_1 은 공간 ①의 기체 온도이다. 위에서 가정한 등온상태변화는 여기서 고찰하는 Turbomolekularpumpe에서와 같이 수송질량이 적고 따라서 상대적으로 열용량이 크다고 간주될 수 있는 펌프의 금속부분 때문에 실제로 충분히 가까운 가정이라고 볼 수 있다.

b) Schaufel이 기체분자에 일하여 주는 능률 LS는 Schaufel이 기체 회전방향으로 주는 힘 T와 그 Schaufel의 속도 u 의 곱한 것과 같다. 즉

$$LS = T \cdot u \dots \dots \dots (3)$$

하 힘 T를 계산하기 위하여 위의 그림 2에서 보는 바와 같은 Kontrollfläche를 설정하고 이 Kontrollfläche를 통하여 변화하는 회전운동방향의 운동량의 시간당 변화 즉 $I_a - I_e$ 는 이 Kontrollfläche전체에 이 회전방향으로 미치는 힘의 합과 같으므로 구하는 T를 이 식에서 얻을 수 있다.

이 Kontrollfläche속에서 밖으로 나가는 운동량의 회전방향의 시간당 변화 I_a 는 다음과 같다.

$$I_a = m \dot{N}_2 \Sigma_{21} \cdot u + m \dot{N}_2 \Sigma_{21}^{\circ} \cdot 0 + m \dot{N}_1 (1 - \Sigma_{12}) \cdot 0$$

$$+ m \dot{N}_1 \Sigma_{12}^{\circ} u + m \dot{N}_1 \Sigma_{12}^{\circ} \cdot 0 + m \dot{N}_1 (1 - \Sigma_{21})$$

$$0 = m (\dot{N}_1 \Sigma_{12}^{\circ} + \dot{N}_2 \Sigma_{21}^{\circ}) \cdot u \dots \dots \dots (4)$$

여기서 Σ_{12} 와 Σ_{21} 은 각각 공간 ①에서 ② 또는 ②에서 ①로 통과하는 기체중 Schaufel의 벽에 한번도 부딪치지 않고 통과하는 확률이고

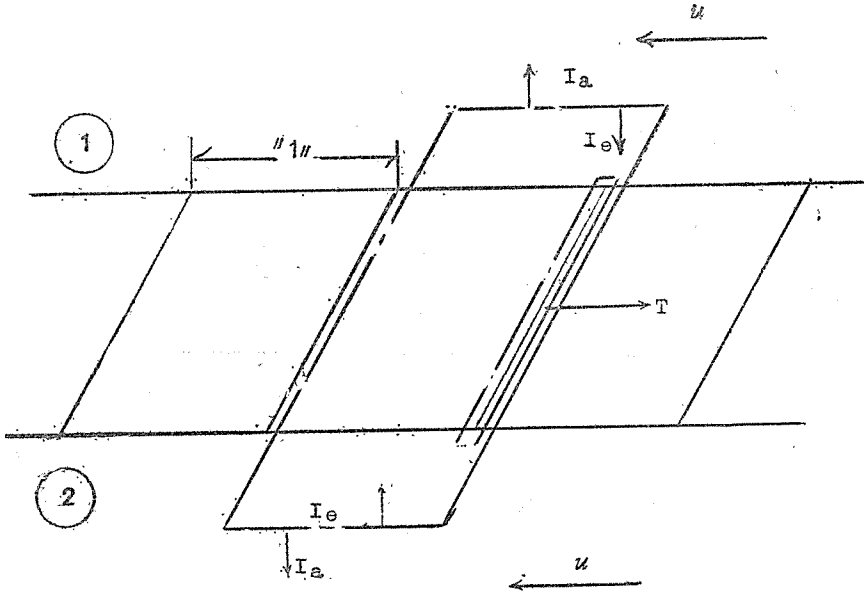


그림 3 Kontrollfläche 설정

Σ_{12}^w 와 Σ_{21}^w 는 Schaufel벽에 적어도 한번 부딪친 후에 통과할 확율을 의미한다.

그리고 kontrollfläche 밖에서 속으로 들어가는 운동량의 회전방향의 시간당 변화 I_e 는 :

$$I_e = m\dot{N}_1 \cdot u + m\dot{N}_2 \cdot u \dots\dots\dots(5) \text{이다.}$$

Kontrollfläche의 양면에서 회전방향으로 작용하는 압력은 서로 동일하며 반대방향이므로 상쇄되어 이 Kontrollfläche에 작용하는 유일한 힘 T 는 다음과 같다.

$$T = I_a - I_e = mI \cdot \dot{N}_1 (1 - \Sigma_{12}^o) + \dot{N}_2 (1 - \Sigma_{12}^o) J \cdot u \dots\dots\dots(6)$$

Σ_{12}^o 와 Σ_{21}^o 은 원칙적으로 어떤 한 주어진 Schaufel의 현상과 회전속도 μ 의 함수로서 예로서 Shapiro에서와 같이 Monte Carlo Methode를 사용하여 얻어질 수 있으나 실제 Turbomolekularpumpe에 흔히 사용되는 Schaufel의 현상과 회전속도의 범위 안에서는 이 벽충돌이 없는 관통 확율 Σ_{12}^o 와 Σ_{21}^o 은 1보다 대단히 적어 무시할 수 있다.

즉 $\Sigma_{12}^o \ll 1$, $\Sigma_{21}^o \ll 1$ 따라서 구하는 힘 T 는

$$T = m(\dot{N}_1 + \dot{N}_2) \mu \dots\dots\dots(7)$$

로 표현된다.

여기서 구하고자 하는 능을 LS 는

$$LS = T \cdot u = m(\dot{N}_1 + \dot{N}_2) u^2 \dots\dots\dots(8)$$

이다.

식 (7)와 식 (8)을 식 (1)에 대입하여 효율 η 는 다음과 같다.

$$\eta = \frac{LD}{LS} = \frac{w \cdot en(p_2/p_1)}{(1 + p_2/p_1) 2S^2} \dots\dots\dots(9)$$

여기서 속도비 S 는

$$S = u / \sqrt{2RT_1} \dots\dots\dots(10)$$

로 정의하였다.

압축비의 함수로 표시된 Ho-계수를 아래와 같이 표현하고

$$w = \Sigma_{21}[(p_2/p_1)_{\max} - (p_2/p_1)] \dots\dots\dots(11)$$

여기서 $(p_2/p_1)_{\max} = \Sigma_{12}/\Sigma_{21}$ 이면

식 (11)을 식 (9)에 대입하여 효율 η 는 결국 다음과 같다.

$$\eta = \frac{\Sigma_{21}[(p_2/p_1)_{\max} - (p_2/p_1)] \cdot \ln(p_2/p_1)}{(1 + p_2/p_1) 2S^2} \dots\dots\dots(12)$$

3. 효율에 관한 논의

효율 μ 을 관계식 (12)에 따라 S 를 매개변수로 하고 압축비 p_2/p_1 의 함수로 나타낸 것을 그림 3에서 볼 수 있다.

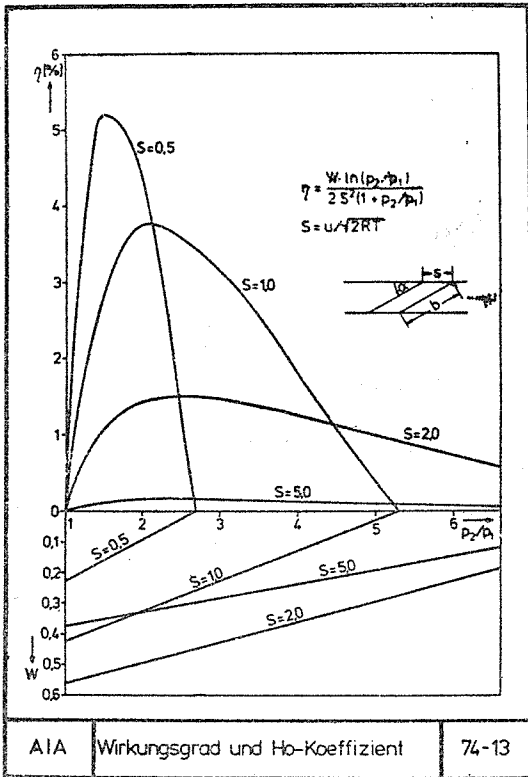


그림 3 효율과 계수

이 그림 아래부분에는 그 외에도 Ho-계수 W와 압축비의 관계를 볼 수 있다. Schaufel의 대표적인 현상의 하나로 여기에서는 Schaufel의 경사각 $\alpha=30^\circ$ 분배비 (Teilungsverhältnis) $\beta/b=0.5$ 를 선택하였으며 (그림 3안의 스케취 참고) 이에 상응하는 Σ_{21} 는 참고문헌 [2]에서 주어진다.

회전속도가 일정한 경우 즉 $S = \text{Conol}$ 에서 효율은 처음에 p_2/p_1 에서 영이다. 이것은 Schaufel에 기계적인 능률만 회전축에 제공되고 기체의 압력은 증가하지 않을 것을 의미한다. 압력비가 1에서부터 증가함에 따라 효율도 함께 증가하여 어떤 한 압력비 $(p_2/p_1)_{\eta_{\max}}$ 에서 효율이 최대치에 달하고 압력비가 이 값을 넘어 더욱 상승하면 효율은 다시 떨어지기 시작하여 최대 가능한 압력비 $(p_2/p_1)_{\max}$ 에서 새로이 영에 도달한다. 이 최고 압축비 $(p_2/p_1)_{\max}$ 에서 Ho-계수 w 가 영이 되어 실질적으로 운송되는 기체량이 영이 되기 때문에 유효효율 LD도 영이 되기 때문이다.

예로서 그림 3에서 $S=1.0$ 이면 $(p_2/p_1)_{\max}$ 는 약 5.3이며 최대효율

$\eta_{\max} \approx 3.7\%$ 는 $p_2/p_1 \approx 2.0$ 에서 얻어진다.

$1 < (p_2/p_1)_{\eta_{\max}}$ 의 압축비 범위에서 효율이 증가하는 이유는 $en(p_2/p_1)$ 의 증가율이 선형적으로 변하는 $[(p_2/p_1)_{\max} - (p_2/p_1)]$ 의 감소율 보다 크기 때문이며 $(p_2/p_1)_{\eta_{\max}} < (p_2/p_1)_{\max}$ 의 구간에서는 이와 반대로 되어서기 때문에 효율은 최대치를 도달한후에 감소한다.

효율의 최대치에 대한 속도비 S의 영향은 뚜렷하여 속도비 S가 적으면 적을수록 효율의 최대치는 높아진다.

그림 3에서 보듯이 높은 속도비 S는 같은 효율 η 를 전제로 했을때 큰 압력비를 가능하게 하므로 Turbomolekularpumpe에 설계에 있어서 적은 수의 Leitschaufel과 Laufschaufel의 단계 (염가제작!)로서 큰 전체 압력비를 얻을 수 있으므로 높은 속도비가 요망된다.

그러나 회전속도의 재료 역학적인 현재의 한계를 $400m/sec$ 로 보고 상온공기의 평균분자운동 속도 $\sqrt{2RT_1} = 410m/sec$ 이면 속도 sec 는 대강 1.0을 넘지 못한다. 물론 Freon같이 분자량이 큰 기체에서는 속도비가 1.0보다도 커질 수 있어 분자량이 크면 클수록 높은 압축비를 얻을 수 있다.

이 효율의 고찰에서 특히 눈에 띄는 것은 Turbonolekularpumpe의 효율의 절대치 ($< 5\%$)가 Axialkompressor의 효율 ($\approx 85\%$)에 비하여 대단히 적은 반면에 도달할 수 있는 압력비는 그 대신에 Turbomolekularpumpe에서 대단히 높다는 점이다. 이것은 서론에서도 언급한 바와 같이 Schaufel속의 기체운동으로 인하여 가능한 기계 Energie를 압력 Energie로 바꾸는 Mechanismus가 상이한데 기인한다. 그럼에도 불구하고 Axialkompressor와 Turbomolekularpumpe의 Energie전달을 상호 비교할을 가능케 하는 공통적인 척도를 다음에 서술한다.

4. 등가회절 (Äquivalente Umlenkung)

여기에서 정의하려는 공통적인 척도 “등가회절”이란 단위가 없는 양으로 Schaufel이 운송하

는 기체에 행하여 주는 단위 질량당의 일을 Schaufel의 회전속도 u 의 자속으로 나눈 크기이다. 따라서 Axialkompressor속에서 연속체 기체의 운동이 존재하는 경우 등가 회절은

$$\frac{\Delta Cu \cdot U}{U_2} = \left(\frac{\Delta Cu}{u} \right)_{kt} \dots\dots\dots (13)$$

이며 여기서 ΔCu 는 회전방향의 분속의 차이를 의미한다. Turbomolekularpumpe에 있어서의 자유분자 기체운동일 경우 이 등가회절은 식 (8)을 참조하여

$$\frac{\Delta Cu}{U} = \frac{LS/(m\dot{N}_1 w)}{u^2} \dots\dots\dots (14)$$

$$\left(\frac{\Delta Cu}{U} \right)_{fm} = \frac{1+p_1/p_2}{w} \dots\dots\dots (15)$$

가 된다.

이 자유분자 기체운동의 등가회절 $\left(\frac{\Delta Cu}{u} \right)_{fm}$ 의 일부는 압력증가를 위한 등가회절 $\left(\frac{\Delta CuD}{u} \right)_{fm}$ 이고, 그 나머지는 손실로 되는 등가회절 $\left(\frac{\Delta Cuv}{C} \right)_{fm}$ 이다.

이 압력증가의 등가회절 $\left(\frac{\Delta CuD}{U} \right)_{fm}$ 는 식 (2)와 식 (14)를 사용하여 $\left(\frac{\Delta CuD}{u} \right)_{fm} = \frac{en(p_2/p_1)}{2S^2} \dots\dots\dots (16)$

으로 표시되고 그림 4에 묘사되어 있다.

그리고 손실의 등가회절 $\left(\frac{\Delta Cuv}{u} \right)_{fm}$ 은

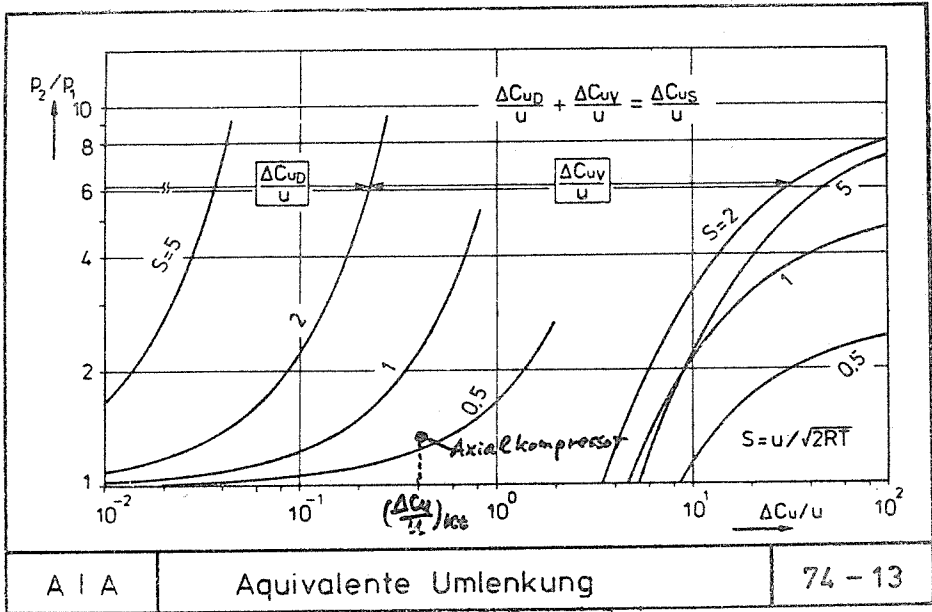


그림 4 등가회절과 압력비

$$\left(\frac{\Delta Cuv}{u} \right)_{fm} = \left(\frac{\Delta Cu}{u} \right)_{fm} - \left(\frac{\Delta CuD}{u} \right)_{fm}$$

$$\left(\frac{\Delta Cuv}{D} \right)_{fm} = \frac{1+(p_2/p_2)}{w} - \frac{\ln(p_2/p_1)}{2S^2} \dots\dots (17)$$

로 표시될 수 있고 역시 그림 4에서 볼 수 있다.

또 그림 4에는 Axialkompressor와 Turbomolekularpumpe의 등가회절을 상호 비교하기 위하여 한 대표적인 Axialkompressor의 최대 등가회절이 하나의 점으로 표시되어 있다. 즉:

$$\left(\frac{\Delta Cu}{u} \right)_{kt} \approx 0.4, \quad (p_2/p_1)_{max} \approx 1.7$$

그림 왼쪽의 곡선집단은 자유분자 기체운동의

경우에 압력증가에 유용한 등가회절 $\left(\frac{\Delta CuD}{u} \right)_{fm}$ 이며 오른쪽의 곡선집단은 손실등가회절 $\left(\frac{\Delta Cuv}{u} \right)_{fm}$ 을 합한 전체의 등가회절을 표시한다.

이 그림에서 볼 수 있듯이 자유분자 기체운동의 Schaufel이 행하는 일 전부에 해당하는 $\left(\frac{\Delta Cu}{u} \right)_{fm}$ 의 값은 최소 3.5정도 ($S=2.0$ 에서)여서, 연속체 기체운동(즉 Axialkompressor속에서의 기체운동) 경우의 $\left(\frac{\Delta Cu}{u} \right)_{kt}=0.4$ 에 비하여 월등히 크다.