

압축기 성능시험용 레이크의 사용 및 데이터 분석방법

강정식* · 안이기*

1. 서론

압축기 성능시험을 위해서는 압축기의 입구와 출구에서 유체의 속도를 고려한 전온도(total temperature)와 전압력(total pressure)을 측정해야 한다. 압축기 시험 코드인 ASME PTC-10⁽¹⁾에는 전압력은 유체의 속도에 의한 압력(velocity pressure)을 고려하여 측정하고, 전온도의 경우는 유체의 속도가 125 fps(약 38.1 m/s)를 넘을 경우에는 전온도 프로브(Total temperature probe)를 사용하여 전온도를 측정할 것을 명기하고 있다. 그런데 입구와 출구의 유로 면적에서는 반경방향으로 유동 속도가 일치하지 않고 분포를 이루고 있으므로 평균된 유동을 평가하기 위해서는 반경방향으로 여러 개의 측정을 해야 한다. 또한 원주방향으로도 유동이 불균일할 수 있으므로 동일한 측정을 원주방향으로도 측정해야 한다. 이렇게 많은 측정을 효과적으로 하기 위해서는 레이크(Rake)를 사용하는 것이 일반적이다. 레이크를 사용하면 측정 단면에서의 평균된 전온도 및 전압력을 측정할 수 있을 뿐 아니라 이를 바탕으로 유속 및 유동 각 등도 계산할 수 있다. 그런데 이러한 많은 장점에도 불구하고 레이크는 적용되는 기계의 형상에 맞추어서 특수하게 설계 및 제작이 되어야 하는 불편함이 있어서 국내에서는 아직은 많이 사용되고 있지는 않은 실정이다. 본 기사에서는 레이크의 사용과 측정된 데이터의 분석방법에 대하여 기술하였다.

2. 레이크의 종류 및 설치

레이크는 Fig. 1과 같이 압력 또는 온도를 측정하는 부분인 엘리먼트(element)와 여러 개의 엘리먼트들을 지지하는 지지부(support)와 레이크를 압축기 등 시험부에 고정하는 고정부로 나뉘어진다. 엘리먼트에는 압력

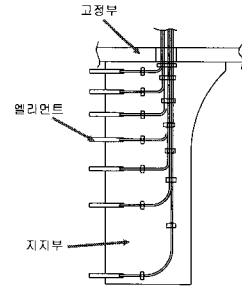


Fig. 1 An example of I-type rake with 7 elements

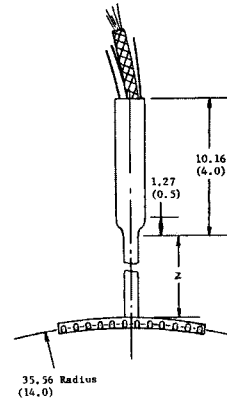


Fig. 2 An example of arc type rake with 12 elements (NASA)

을 측정하는 튜브의 헤드(head)와 온도를 측정하는 열전대(thermocouple)가 있으며 튜브와 열전대 선은 지지부의 내부로 연결되어 고정부를 통해 시험부의 외부와 연결된다. 레이크의 종류는 Fig. 1과 같이 형상에 따라 반경방향 또는 길이 방향으로 엘리먼트가 배열된 일자형 또는 I-형 레이크와 Fig. 2와 같이 동일한 반경에서 여러 개의 엘리먼트를 배열한 아크형(Arc type) 레이크가 있다.

레이크의 설치로 인하여 유동 면적이 줄어들게 되어

* 한국항공우주연구원 엔지니어
E-mail : jskang@kari.re.kr

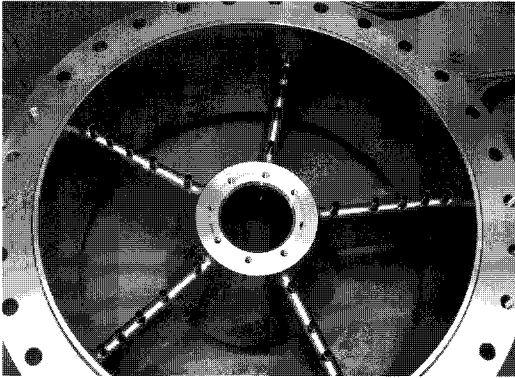


Fig. 3 An example of I-type rake installed in the inlet struts

압축기 내부의 유동이 실제와 다르게 되므로 이를 최소화하기 위해서는 레이크의 전면면적(frontal area)을 최소화해야 한다. 그래서 레이크가 설치되는 부분의 총 유로면적에 대한 전체 레이크가 차지하는 총 전면면적의 비율이 작을 수록 좋으며 통상 2% 내외가 되도록 설계한다. 이를 위하여 지지부의 형상은 작은 전면면적을 가진 긴 몸체의 형상으로 설계한다. 스월이 없는 압축기의 입구의 경우에는 압축기의 회전수와 유량변화에 의하여 입구유동각의 변화가 거의 없으므로 유동각의 변화에 따른 레이크의 전면면적의 변화가 거의 없다. 그래서 제작이 단순한 I-형 레이크가 주로 사용된다. 반면에 압축기 출구에서는 스월각이 존재할 뿐 아니라 회전수와 유량에 대하여 유동각도가 많이 변하므로 I-형 레이크는 Arc형 레이크에 비해 유동에 대한 레이크의 상대적인 전면면적의 변화가 심하다. 이런 이유로 출구에서는 Arc형 레이크가 선호된다. 압축기 입구에서는 허브와 쉬라우드를 연결하거나 지지하는 스트럿(Strut)이나 베인(vane)등 지지부가 존재하는 경우가 많으므로 이 경우에는 유동에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 이 지지부 속에 I-형 레이크가 설치되기도 한다. Fig 3에는 압축기 입구의 5개의 스트럿 속에 설치된 레이크의 예를 나타내었다.

엘리먼트는 전온도와 전압력을 측정하는 레이크의 핵심부분이다. 유동을 측정하는 단면에서 평균적인 대표값을 측정하기 위해서는 엘리먼트는 반경방향으로 많을수록 좋으나 설치되는 단면에서의 엘리먼트의 크기와 유로면적 대비 레이크의 총 전면면적에 의하여 수가 제한된다. 일반적으로는 반경방향으로 5개 이상의 엘리먼트가 많이 사용된다. 엘리먼트의 수가 정해지면 전체 유로면적은 동일한 원환면적(annulus area)을 가지도록

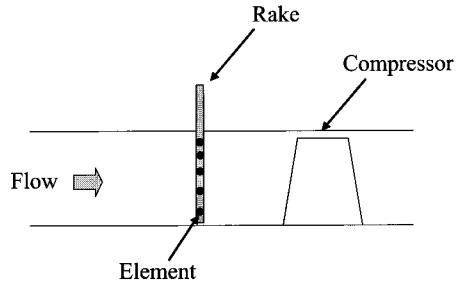


Fig. 4 Schematic diagram of compressor inlet flow without swirl

반경이 나뉘어지고 각 원환면적의 중심에 엘리먼트를 배치한다.

유동이 레이크의 엘리먼트에서 정체(stagnation)되는 성능은 레이크의 형상에 따라 다르다. 특히 레이크의 방향과 유동 방향이 다를 경우에는 유동이 정체되는 성능이 떨어진다. 그러므로 레이크를 사용하기 전에 유속과 유동각도에 따라 레이크의 정체성능을 교정하면 더욱 정밀한 데이터를 얻을 수 있다.

3 데이터 분석방법

3.1 스월이 없는 압축기 입구 유동

압축기의 입구 배관이나 입구 챔버(chamber)에서는 스월 성분의 유동이 없고 유속은 반경방향 분포만 존재한다. Fig. 4에는 압축기 입구에서 레이크를 설치한 개념도를 나타내었다.

전압력과 전온도는 유로의 반경에 따라 다를 수 있는 변수이므로 반경에 따라 여러 개의 값을 측정하는 것이 좋다. 통상적으로 5개 이상의 반경에서 측정을 한다. 유로는 반경에 따라 면적이 다르므로 동일한 가중치의 데이터를 측정하기 위해서는 동일한 면적으로 나누어서 면적의 중심이 되는 반경에서 측정을 한다. 같은 반경이라도 원주방향으로 동일하지 않고 분포가 있을 수 있다. 압축기 입구에 지지대나 베인 등이 있을 경우에 원주방향으로 데이터가 균일하지 않으므로 원주방향으로 여러 개의 데이터를 측정할 필요가 있다.

예를 들어 Fig. 4과 같이 반경방향으로 5개의 반경인 R1, R2, R3, R4, R5에서 전온도와 전압력을 측정하고, 원주방향으로 Table 1에 나타난 대로 각 반경에 대하여 6개씩의 측정을 할 경우에 대하여 계산을 하는 방법은 다음과 같다.

Table 1 측정 위치의 예

반경	압력 번호	온도 번호
R1	P1, P2, P3, P4, P5, P6	T1, T2, T3, T4, T5, T6
R2	P7, P8, P9, P10, P11, P12	T7, T8, T9, T10, T11, T12
R3	P13, P14, P15, P16, P17, P18	T13, T14, T15, T16, T17, T18
R4	P19, P20, P21, P22, P23, P24	T19, T20, T21, T22, T23, T24
R5	P25, P26, P27, P28, P29, P30	T25, T26, T27, T28, T29, T30

레이크는 설치하기 전에 교정이 되어야 한다. 교정은 마하수와 유동각에 대하여 교정을 수행한다. 레이크에서 데이터를 측정할 후 스윙(swirl)이 없어서 입구 유동각이 0°라고 가정하고, 마하수에 따라 레이크의 정체 특성이 미세하게 변하므로 교정 curve에서 적절한 초기의 마하수를 가정한다. 그리고 아래의 과정에 따라 측정값을 사용하여 계산을 수행한 후 최종적으로 Iteration을 통하여 교정 curve의 마하수와 최종 마하수가 수렴할 때까지 Iteration을 수행하고, 수렴이 된 최종 결과가 압축기 입구에서의 데이터가 된다.

3.1.1 입구 전압력 ($P_{o,i}$)

압축기 입구에서 속도를 측정하지 않는다면 압축기 입구에서의 전압력은 면적평균을 기준으로 한다.

$$P_{i,R1} = (P1 + P2 + P3 + P4 + P5 + P6)/6 \quad (1)$$

$$P_{i,R2} = (P7 + P8 + P9 + P10 + P11 + P12)/6 \quad (2)$$

$$P_{i,R3} = (P13 + P14 + P15 + P16 + P17 + P18)/6 \quad (3)$$

$$P_{i,R4} = (P19 + P20 + P21 + P22 + P23 + P24)/6 \quad (4)$$

$$P_{i,R5} = (P25 + P26 + P27 + P28 + P29 + P30)/6 \quad (5)$$

$$P_{o,i} = \frac{\int pdA}{\int dA} \quad (\text{area average}) \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \int pdA = & P_{i,R1} \left[\left(\frac{R1 + R2}{2} \right)^2 - R_{i,hub}^2 \right] \\ & + P_{i,R2} \left[\left(\frac{R2 + R3}{2} \right)^2 - \left(\frac{R1 + R2}{2} \right)^2 \right] \\ & + P_{i,R3} \left[\left(\frac{R3 + R4}{2} \right)^2 - \left(\frac{R2 + R3}{2} \right)^2 \right] \\ & + P_{i,R4} \left[\left(\frac{R4 + R5}{2} \right)^2 - \left(\frac{R3 + R4}{2} \right)^2 \right] \\ & + P_{i,R5} \left[R_{i,tip}^2 - \left(\frac{R4 + R5}{2} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Table 2 Parameter calculation procedure at the compressor inlet without swirl flow

번호	Calculation procedure	Output
1	Assume M (Mach number) \rightarrow	M
2	$P_o = P(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow$	P
3	$T_o = T(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2) \rightarrow$	T
4	$P = \rho RT \rightarrow$	ρ (density)
5	$\dot{m} = \rho AV \rightarrow$	V (averaged velocity)
6	$M_2 = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \rightarrow$	M_2 (New Mach number)
7	Compare M and $M_2 \rightarrow$	비교 및 반복

$$\int dA = R_{i,tip}^2 - R_{i,hub}^2 \quad (8)$$

where

$R_{i,tip}$: turbine inlet tip radius

$R_{i,hub}$: turbine inlet hub radius

$$R_{i,hub} < R1 < R2 < R3 < R4 < R5 < R_{i,tip}$$

만약 반경 R1, R2, R3, R4, R5 가 동일한 면적으로 나누어진 면적의 중심에 위치한다면

$$P_{o,i} = (P_{i,R1} + P_{i,R2} + P_{i,R3} + P_{i,R4} + P_{i,R5})/5 \quad (9)$$

가 된다.

3.1.2. 입구 전온도 ($T_{o,i}$)

압축기 입구에서 속도를 측정하지 않는다면 전온도는 면적평균을 기준으로 한다. 계산 과정은 앞의 입구 전압력과 동일하다.

$$T_{o,i} = \frac{\int TdA}{\int dA} \quad (\text{area average}) \quad (10)$$

3.1.3 다른 변수들

이미 알고 있는 변수는 아래의 4가지 변수이다.

- 입구 전압력($P_{o,i}$)
- 입구 전온도($T_{o,i}$)
- 질량 유량(\dot{m})
- 유동 면적(Area)

유동면적은 엄밀하게는 압축기 입구의 유동면적이지만 실제로는 측정을 수행한 위치에서의 유동면적을 사용한다.

첫 과정은 마하수(M)를 가정하는 것이다.

두 번째 과정에서 마하수를 입력하여 정압력을 계산한다.

세 번째 과정에서 마하수를 입력하여 정온도를 계산한다.

네 번째 과정에서 상태방정식을 사용하여 밀도를 계산한다.

다섯 번째 과정에서 연속방정식을 사용하여 자오면 방향의 평균속도를 계산한다.

여섯 번째 과정에서 마하수 정의식을 사용하여 새로운 마하수(M_2)를 도출한다.

일곱 번째 과정에서 초기의 마하수(M)와 새로운 마하수(M_2)를 비교하여 그 차이가 수렴 기준보다 작으면 변수들은 수렴된 것으로 생각하고, 만약 차이가 수렴 기준보다 크면 새로운 마하수를 사용하여 Table 2의 계산을 처음 과정부터 다시 반복 수행한다.

3.1.4 교정 커브 재지정 및 Iteration

위의 계산들을 수행하기 전에 초기에 교정커브에서 마하수를 선택하였었다. 그러므로 위 과정에서 계산된 마하수와 최종적인 마하수가 차이가 있을 수 있으므로 계산된 마하수를 사용하여 교정커브에서 새로운 마하수를 사용하여 위의 3.1.1부터 3.1.4까지의 전 과정을 반복수행하고, 수렴이 된 최종 결과가 압축기 입구에서의 데이터가 된다.

3.1.5 다른 반경에서의 독립적인 계산

앞의 3.1.1부터 3.1.4까지의 계산결과는 각 반경마다의 데이터를 평균하지 않고 각 반경마다 독립적으로 수행한 후 최종 결과를 사용하여 평균하는 방식을 사용할 수도 있다. 이 방법의 장점은 각 측정 반경에서 속도, 마하수, 밀도 등을 각각 계산 할 수 있으므로 반경에 대한 유동 분포를 계산 할 수 있고, 또한 속도를 알므로 데이터를 평균할 때에 속도를 고려한 질량 평균을 수행할 수 있는 장점이 있다.

3.2 스월이 있는 유동

압축기 입구에서 스월(swirl)이 있는 경우나 압축기 출구에서처럼 강한 스월 유동이 있는 경우에는 Fig. 5

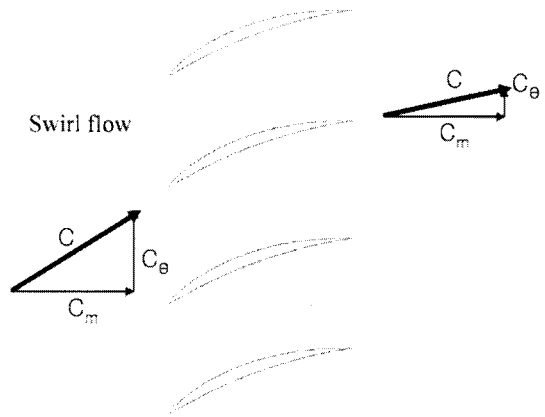


Fig. 5 Schematic diagram of compressor inlet flow with swirl

의 개념도와 같이 원주방향의 속도가 고려되어야 한다. 레이크는 설치하기 전에 마하수와 유동각에 대하여 교정을 수행한다. 레이크에서 측정한 데이터를 분석하기 위해서는 스월각 (α)을 초기값을 가정한 후 마하수에 따라 레이크의 정체 특성이 미세하게 변하므로 교정 curve에서 적절한 초기의 마하수(M)를 가정한다. 그리고 아래의 과정에 따라 측정값을 사용하여 계산을 수행한 후 최종적으로 Iteration을 통하여 교정 curve의 마하수와 최종 마하수가 수렴할 때까지 Iteration을 수행하고, 수렴이 된 최종 결과가 압축기 입구에서의 데이터가 된다.

입구 전압력과 전온도는 스월이 없는 앞의 경우와 같다. 측정 데이터가 Table 1과 같다면 데이터를 분석하는 과정은 다음과 같다.

3.2.1 정압력 ($P_{s,i}$)

스월이 있는 경우와 없는 경우에서 데이터를 분석하는 차이는 정압력의 측정 유무에 있다. 정압력은 압축기 입구의 허브와 쉬라우드에서 측정한다. 평균 정압력은 허브와 쉬라우드의 정압력을 산술평균한다.

$P_{s,hub}$: 허브에서의 정압력

$P_{s,shroud}$: 쉬라우드에서의 정압력

$$P_{s,i} = \frac{(P_{s,shroud} + P_{s,hub})}{2} : \text{평균 정압력}$$

3.2.2 다른 변수들

유동면적은 엄밀하게는 압축기 입구의 유동면적이

Table 3 Parameter calculation procedure at the compressor inlet with swirl flow

번호	Calculation procedure	Output
1	$P_o = P(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \rightarrow$	M'
2	M' 과 M 비교 \rightarrow	M
3	$T_o = T(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2) \rightarrow$	T
4	$P = \rho RT \rightarrow$	ρ (density)
5	$\dot{m}_s = \rho A C_m \rightarrow$	C_m (meridional velocity)
6	$M = \frac{C}{\sqrt{\gamma RT}} \rightarrow$	C (Velocity)
7	$C = \sqrt{C_m^2 + C_\theta^2} \rightarrow$	C_θ (tangential velocity)
8	$\alpha = \arctan(\frac{C_\theta}{C_m}) \rightarrow$	α (swirl angle)
9	초기의 유동각과 새로운 유동각(α)을 비교 \rightarrow	비교 및 반복

지만, 실제로는 측정을 수행한 위치에서의 유동면적(A)을 사용한다. Table 3의 계산 과정을 따라 계산을 수행한다.

첫번째 과정은 전압력과 정압력의 관계로부터 새로운 마하수(M)를 계산하는 것이다.

두번째 과정은 새로운 마하수(M')와 초기에 가정한 마하수를 비교하여 그 차이가 수렴 기준보다 작으면 변수들은 수렴된 것으로 생각하고, 만약 차이가 수렴 기준보다 크면 새로운 마하수를 사용하여 값이 수렴할 때까지 반복 계산한다.

세번째 과정에서 마하수를 입력하여 정온도를 계산한다.

네번째 과정에서 상태방정식을 사용하여 밀도를 계산한다.

다섯 번째 과정에서 연속방정식을 사용하여 자오면 방향의 평균속도를 계산한다.

여섯 번째 과정에서 마하수 정의식을 사용하여 속도(C)를 도출한다.

일곱 번째 과정에서 속도 삼각형을 이용하여 원주 방향의 속도(C_θ)를 계산한다.

여덟 번째 과정은 유동각을 계산하는 것이다.

아홉 번째 과정은 초기의 유동각과 새로운 유동각(α)을 비교하는 것이다. 비교 후 그 차이가 수렴 기준보다 작으면 변수들은 수렴된 것으로 생각하고, 만약 차이가 수렴 기준보다 크면 새로운 유동각(α)을 사용하여 Table 3의 계산을 처음 과정부터 다시 반복 수행한다.

위의 계산들을 수행하기 전에 초기에 교정커브에서 마하수와 유동각을 가정하였었다. 그런데 앞의 9번까지의 계산을 수행하면 Table 3에서 보듯이 계산 과정은 두 번의 iteration이 중복된 계산방식이다. 이 두 번의 계산이 수렴되어야지만 스월이 있는 압축기 입구에 대한 파라미터들을 모두 결정할 수 있다.

그리고 위 계산은 스월 없는 입구유동의 경우와 같이 레이크의 엘리먼트 별로 계산을 수행하면 각 측정 반경에서 속도, 마하수, 밀도 등을 각각 계산 할 수 있으므로 반경에 대한 유동 분포를 계산 할 수 있고, 또한 속도를 알므로 데이터를 평균할 때에 속도를 고려한 질량 평균을 수행할 수 있는 장점이 있다. 이 경우에는 각 반경에서의 정압력은 허브와 팁에서 측정된 정압력을 내삽(interpolation)하여 사용한다.

참고로 소형 원심압축기의 출구와 같이 레이크를 설치하기 어려울 정도로 물리적인 공간이 좁은 경우에는 강정식 등⁽³⁾의 방법을 사용하여 압축기 출구에서의 파라미터들을 평가할 수 있다.

그리고 본 논문의 방법은 비단 압축기에만 국한된 것이 아니라 터빈이나 배관 유동에서도 동일하게 사용될 수 있다.

4. 결론

압축기의 성능시험에 사용되는 레이크의 설계와 데이터 분석방법에 대하여 기술하였다. 데이터를 분석하는 과정은 스월이 있는 유동과 스월이 없는 유동으로 나누어 기술하였으며, 각각에 따른 자세한 해석과정을 설명하였다. 교정된 레이크를 사용할 경우에는 측정 단면에서의 평균된 전압력, 정압력 뿐 아니라 속도, 유동각, 마하수, 온도, 압력, 밀도 등의 파라미터도 계산할 수 있다.

참고문헌

- (1) ASME PTC-10, 1965, "Compressors and Exhausters"
- (2) Timco, L. P., "Energy Efficient Engine - High Pressure Turbine Component Test Performance Report," NASA CR-168289.
- (3) 강정식, 강신형, 2002, "배인없는 디퓨저에서의 스톨 임계유동각에 관한 연구," 제2회 한국유체공학 학술대회 논문집, 8월, pp. 611~614.