



공 학 석 사 학 위 논 문

관로의 형상과 특성을 고려한 송풍량 추정에 관한 연구



부경대학교대학원

제어기계공학과

한 상 헌

공 학 석 사 학 위 논 문

관로의 형상과 특성을 고려한 송풍량 추정에 관한 연구



부경대학교대학원

제어기계공학과

한 상 헌

한상헌의 공학석사 학위논문을 인준함

2014년 8월



Abstract	1
제 1 장 서 론	5
제 2 장 시뮬레이션 모델	8
NATIONAL UN	
제 3 장 시뮬레이션 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	14
3.1 시뮬레이션 모델의 파라미터 정의	14
3.2 시뮬레이션 모델의 결과 및 고찰	16
3.3 간략식과의 설계 비교	34
제 4 장 결 론	41
참고문헌	44

Estimation of the Flow Rate Considering Shape and Characteristics of an Air Duct

Sang-Hun Han

Department of Control & Mechanical Engineering The Graduate School Pukyong National University

Abstract

An air duct is an essential component for transferring to the air in the blowing or compressor system. In most of the industrial site, a diameter of pipe and supply pressure of the air duct designed by simplified equation. However, simplified equations not consider resistance of the air duct that temperature of outside air and surface roughness of an air duct. Recently several attempts on energy cost reducing process in compressor systems, an example, advanced performance of compressor or driving processing change of compressor. However design of pipeline net does not improve an air duct or pipe.

In this study, this problems solve using a detailed model. Therefore, Using the simulation model, since the air duct specifications of parameter. In the investigation through simulations, the effects of numerous design parameters such as length of pipeline net, diameter of the pipe, supplied

- 1 -

pressure and demand flow rate have been studied. From the simulation results, it was determined that the mean length of pipeline net, diameter of the pipe and supplied pressure. This parameter satisfied the conditions for demand flow rate. Therefore, this study make suggest a way of energy cost reducing.



- 2 -

Nomenclature

C1 : 배관의 입구부 또는 출구부의 유량제어밸브와 피팅의 합성 소닉 컨덕턴스 [1/(s·bar)] C₂ : 배관의 입구부 또는 출구부 피팅의 소닉 컨덕턴스 [l/(s·bar)] G: 각 검사면을 통과하는 공기의 유량 [kg/s] u : 각 검사면을 통과하는 공기의 유속 [m/s] P: 각 검사체적내부 공기 압력 [Pa] W: 각 검사체적내부 공기 질량 [kg] ρ: 각 검사체적내부 공기 밀도 [kg/m³] T: 각 검사체적내부 공기 온도 [K] NILE L : 배관 길이 [m] δz : 각 검사체적 길이 [m] *R* : 공기의 기체상수 [J/kgK] V: 검사체적별 체적 [m³] A_c: 배관의 단면적 [m²] b : 임계압력비 κ : 공기의 비열비(1.4) ot u R_e : 레이놀즈수 d : 배관 직경 [m] μ: 점성계수 *E*_{*i*-1} : 검사체적으로 유입하는 공기가 가지고 들어오는 에너지 [W] E_i: 검사체적으로부터 유출되는 공기가 가지고 나가는 에너지 [W] L_{i-1}: 검사체적으로 유입하는 공기가 검사체적에 가한 일 [W]

- 3 -

 L_i: 검사체적으로부터 유출되는 공기가 검사체적 외부로 가한 일 [W]

 Q: 검사체적 외부와의 열전달에 의하여 출입하는 에너지[W]

 N_u : 누셀트수

P_r : 프란틀수(0.71)

k : 공기의 열전도율



- 4 -

제1장서 론

공압 시스템은 압축공기가 에너지 전달매체로 이용되고, 제어밸브를 통과하여 액추에이터로 전달된다. 공압 에너지는 공기를 압축하여 동력 을 공급할 수 있는 대표적인 유체 에너지로서 다양한 산업 기계의 주요 동력원으로 사용되고 있다. 이러한 공압 에너지는 생산 비용이 적고, 기 술의 발달로 인해 중앙 제어 방식으로 운전이 가능해졌고, 보조 윤활유 없이도 운전이 가능한 무급유식 압축기가 개발됨에 따라 더 다양한 분야 에서 많은 기능을 수행할 수 있게 되었다.

현재 공압 에너지를 이용함에 있어서 공압 에너지 절감에 관한 많은 연구와 여러 가지 대안들이 도입되고 있다. 공압 시스템에서의 에너지 절감 방법으로는 대개 공압 시스템의 개선, 압축기 운전 방법의 개선, 그 리고 공압 에너지 이송 방법의 개선 등이 거론된다.^{(1)~(3)}

근래에 공압 시스템의 개선이나 압축기 운전 방식의 개발로 에너지 절 감을 시도하는 사례는 점점 늘고 있으나 공압 에너지를 이송하는 관로의 개선에 관한 연구는 매우 드문 편이다. 따라서 본 논문에서는 관로의 형 상과 특성을 고려한 송풍량을 추정하고, 그에 따른 관의 직경을 결정하 는 과정과 다양한 물리인자들의 영향을 고찰하고, 널리 쓰이는 간략식과 비교를 통하여 에너지 절감에 대한 효과를 고찰하였다.

공압 구동회로의 구성요소는 공압 에너지 발생장치인 공기압축기, 공 압 제어 밸브, 공압 구동기기 그리고 공압 보조기기로 이루어진다. 이 중 에서도 공압 보조기기 중 하나인 배관은 공압 에너지를 이송하기 위한 필수 요소로서, 적절하지 않은 배관을 사용하면 압력강하나 유량부족의

- 5 -

원인이 되고, 드레인이 고여 공기압 장치의 작동 불량을 야기하거나 수 명을 단축시키게 된다. 또한 과잉 혹은 과소 공급의 영향으로 막대한 에 너지 손실을 야기하게 된다. 또한 실제 공기조화 설계에서 사용하는 간 략식은 유동 공기의 마찰력이나 열전달 효과 등을 전혀 고려하고 있지 않기 때문에 이러한 물리 인자를 고려할 경우 상당한 차이를 보일 것으 로 예상된다.

본 논문에서 고려하는 물리인자들은 관로 저항에 영향을 주는 관로의 직경과 이송 거리, 관로 내벽의 표면 거칠기 등의 다양한 관 요소와 함 께 관 외부와의 열전달 효과 등이 있다. 이러한 물리인자들은 송풍량의 변화에 영향을 미치므로 송풍 관로 설계 시에 관의 정밀 모델을 통한 송 풍량의 예측이 요구되고 있다.

물리인자를 고려하지 않는 간략식 또는 경험식에 의해 설계된 시스템 의 경우 과잉 설계에 따른 풍량 감소 및 습도 증가, 고압의 압축 공기 공급이 필요함으로써 에너지 낭비에 대한 문제가 지적되고 있다. 또한 고압의 압축공기를 공급·소모하는 방식은 생산비용의 증가를 초래하고 적정 공급량을 초과하여 사용함으로써 전체 압축공기 공급망의 압력 저 하를 초래하고 작업 능률을 떨어뜨리는 원인이 되고 있다.

특히 조선소 등과 같은 산업현장에서는 배관에 대한 설비가 용이하지 않으며, 선박용 에어자켓이나 도장과 같은 타 작업과 함께 공통 배관망 을 이용하기 때문에 에너지를 소비하는 효율성 측면에서 에너지 낭비와 비용 손실의 문제가 발생하고 있다.

본 논문에서는 요구 송풍량을 만족하는 관로의 최적 직경설계를 위해 압축공기 관로 시뮬레이션 모델을 이용하여 송풍량 추정 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 나타내었다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 관로 길이

- 6 -

별 최적 직경과 최적 압력을 결정하고 그에 따른 관로 길이의 한계를 결 정하였으며, 이러한 시뮬레이션 결과를 간략식 또는 경험식과 비교하였 다. 이러한 분석을 통하여 기존 산업 현장의 압축공기 에너지비용 절감 에 기여할 수 있으리라 사료된다.



- 7 -

제 2 장 시뮬레이션 모델

배관의 압력 및 유량전달 특성을 계산하는 방법은 여러 가지가 있다. 유체역학적 모델의 경우 에너지방정식을 미분하여 얻는데, 이 모델의 경우 유속의 변화가 매우 작은 경우, 입구측과 출구측의 유속이 같다는 가정하에 분석이 가능하다.

시간영역 모델의 경우 대표적으로 특성곡성법을 이용하여 계산하는 방법이 종종 사용되지만 질량, 에너지 등의 손실로 오차가 발생하고 배관 양단의 압력차가 미소한 경우에 적용이 가능하다.^{(4)~(6)}

본 장에서는 관로 정밀 모델인 가상체적분할 계산 모델^{(7)~(9)}에 대한 계산식을 기술한다. Fig 2.1은 가상체적분할 계산 모델을 나타낸 것으로, 가상의 체적으로 분할하여 계산하는 방법이다.



Fig 2.1 The model of virtual volume division for air duct

- 8 -

계산을 간단하게 하기 위한 간략식이나 경험식에서는 관의 압력 및 유 량전달 특성을 무시하고 배관을 단순한 오리피스로 가정하여 계산을 수 행하지만 정밀한 결과를 보기 위하여 배관의 특성을 고려해야한다.

따라서 본 논문에서는 배관의 해석모델을 Fig 2.1과 같이 배관을 가상 의 체적으로 분할하여 계산하는 방법을 적용하기로 한다.

압축공기가 이송되는 관로는 그 특성상 차폐되어 있으므로, 관 표면을 통해 외부 공기와의 열교환 효과를 고려하고, 표면에서의 점성 및 마찰 을 고려하여야 한다. 이러한 관로의 특징을 고려한 특성 해석을 위한 계 산식은 다음과 같이 표현된다.



(2) 유량 방정식

- 9 -

$$G_{0}: \quad P_{1}/P_{s} \leq b \stackrel{\text{def}}{=} \quad \text{if},$$

$$\rho_{0} \cdot C_{1} \cdot P_{s} \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{T_{0}}{T_{1}}} \qquad (2.4)$$

$$P_1/P_s > b$$
일 때,

$$\rho_0 \cdot C_1 \cdot P_s \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{P_1}{P_s} - b\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_1}}$$
(2.5)

$$G_1 \sim G_{n-1}$$
: $G_i = \rho_{i+1} u_i A_c, \quad i = 1 \sim n-1$ (2.6)

$$G_{n}: \quad P_{n+1}/P_{n} \leq b 일 \quad 때,$$

$$\rho_{0} \cdot C_{2} \cdot P_{n} \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{\frac{T_{0}}{T_{n+1}}}$$

$$(2.7)$$

$$P_{n+1}/P_n > b$$
일 때,

$$\rho_0 \cdot C_2 \cdot P_n \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\frac{P_{n+1}}{P_n} - b}{1 - b}\right)^2} \cdot \sqrt{\frac{T_0}{T_{n+1}}}$$
(2.8)

TIONA

식 (2.4)~(2.8)에서 A_c 는 배관의 단면적 $[m^2]$ 을 나타낸다.

(3) 가상의 검사면을 통과하는 공기의 유속

$$u_{0}: P_{1}/P_{s} \leq b 일 때,$$

$$\sqrt{\frac{2\kappa RT_{s}}{\kappa+1}}$$

$$P_{1}/P_{s} > b 일 때,$$
(2.9)

- 10 -

$$\sqrt{\frac{2\kappa}{\kappa-1}} \frac{P_s}{\rho_s} \left(1 - \left(\frac{P_1}{P_s}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \right)$$
(2.10)

$$u_{1} \sim u_{n-1}; \quad i = 1 \sim n-1$$

$$\frac{du_{i}}{dt} = -u_{i}\frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\delta z} + \frac{2A_{c}}{W_{i} + W_{i+1}}(P_{i} - P_{i+1}) - \frac{\lambda}{2d}u_{i}^{2}$$

$$R_{e} < 2.5 \cdot 10^{3}, \lambda = 64/R_{e}$$

$$2.5 \cdot 10^{3} \leq R_{e} < 1.0 \cdot 10^{5}, \lambda = 0.3164R_{e}^{-0.25}$$

$$1.0 \cdot 10^{5} \leq R_{e}, \lambda = 0.0032 + 0.221R_{e}^{-0.237},$$

$$R_{e} = \frac{\rho_{i}|u_{i}|d}{\mu_{i}}, \quad \mu_{i} = 18.34 \cdot 10^{-6}\frac{273 + 111}{T_{i} + 111} \left(\frac{T_{i}}{273}\right)^{3/2} \quad (2.11)$$



(4) 배관 내부의 온도변화

$$C_{v}G_{i}T_{i} + C_{v}W_{i}\frac{dT_{i}}{dt} + \frac{1}{2}G_{i} \cdot u_{i}^{2} + W_{i} \cdot u_{i}$$

$$= E_{i-1} - E_{i} + L_{i-1} - L_{i} + Q_{i}$$
(2.14)

- 11 -

식 (2.14)에서 사용된 기호는 다음과 같다.

E_{i-1}: 검사체적으로 유입하는 공기가 가지고 들어오는 에너지 [W], *E_i*: 검사체적으로부터 유출되는 공기가 가지고 나가는 에너지 [W], *L_{i-1}*: 검사체적으로 유입하는 공기가 검사체적에 가한 일 [W], *L_i*: 검사체적으로 부터 유출되는 공기가 검사체적 외부로 가한 일 [W], *Q*: 검사체적 외부 와의 열전달에 의하여 출입하는 에너지[W]

식 (2.14)에서 나타낸 E_{i-1} , E_i , L_{i-1} , L_i , Q_i 는 다음과 같이 구할 수 있다.



식 (2.19)에서 Nu는 누셀트수, Pr은 프란틀수(0.71), k는 공기의 열전도

- 12 -

율을 나타낸다.



- 13 -

제 3 장 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 모델의 파라미터 정의

본 연구의 대상이 되는 관로는 재질이 타폴린으로서, 그 두께는 0.35±0.02 mm 이다. 산업현장에서 상대습도를 낮추고, 안정적인 업무 수 행을 위한 기준치인 목표 송풍량으로 최소 10,000 m³/h을 만족하도록 하며, 별도의 언급이 없는 한 토출유량은 표준상태(293 K, 1.013 bar)를 기준으로 환산한 체적유량을 의미한다.

Table 1 Parameters of air duct			
Parameter	Spec.	Unit	Remark
material of air duct	Tarpulin		
thickness of air duct	0.35±0.02	mm	Л
length of air duct	20 ~ 100	m	changed to 20 m
supplied pressure	1~2	bar	changed to 1 bar
diameter of air duct	100 ~ 200	mm	changed to 25 mm
roughness of air duct	1~2	mm	changed to 1 mm
temperature of supplied air	298	K	
relative humidity of supplied air	40	%	
temperature around air duct	302	K	

목표 송풍량에 대한 시뮬레이션에 이용한 관로와 주위 온도에 대한 파

- 14 -

라미터를 Table 1에 나타낸다. 기타 고려해야할 조건으로 관로의 굽힘 형상에 대해 100 m를 기준으로 45° 굽힘 이음 10개 및 90° 굽힘 이음 4 개를 고려하고, 그에 따른 관로의 직경 축소효과는 45° 굽힘이음을 고려 할 경우 직경 10% 축소, 90° 굽힘이음을 고려할 경우 직경 20% 축소로 가정하였다.

상기와 같은 파라미터 정의와 조건을 바탕으로 총 4단계 과정의 시뮬 레이션을 수행하였으며, 그 과정은 다음 Table 2에 나타내었다.

Step	Step Contents	
Stap 1 Roughness, length of air duct and thermal dynamics effect in		
	simulation	
Step 2	Flow rate about supplied pressure and changing diameter	
Stop 3	Flow rate about supplied pressure and changing	1
Step 5	diameter(considering bending duct)	
Stop 1	Changing flow rate to changing length for duct(considering	
Step 4	bending duct)	-
		ASIT

Table 2 Steps of simulation for air duct

3.2 시뮬레이션 모델의 결과 및 고찰

산업 현장에서의 에너지 절감과 현장 업무 기준치를 충족하기 위한 목 적으로 목표치는 앞서 설정한 것처럼 송풍량 10,000 m³/h를 기준으로 각 종 물리인자에 따른 유량변화를 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다. 4단 계에 걸친 실험에 사용된 물리 인자들은 각각의 표로 나타내었으며, 이 를 토대로 고찰하였다.

3.2.1 직관의 표면조도, 관로 길이 및 관 벽면 열전달 효과 고려

관로를 설계함에 있어서 제일 첫 단계는 관로의 재질 선정이다. 관로 는 여러 가지 재료가 사용되며, 앞서 선정한 타폴린 재질의 표면조도를 그 변수로 하여 파라미터를 정한다. 또한 해당 재질의 관로의 길이 및 열전달 효과에 따라서도 토출 유량이 변하므로 해당 물리 인자를 고려하 여야 한다. 이 단계의 시뮬레이션에서는 공급압 2 bar, 관로 직경 200 mm를 기준으로 시뮬레이션을 수행하였다.

	Parameter	Spec.	Unit	Remark
case 1	roughness	1	mm	constant length for duct(20 m)
case 2	roughness	2	mm	constant length for duct(20 m)
case 3	length for duct	20	m	constant roughness(1 mm)
case 4	length for duct	60	m	constant roughness(1 mm)
case 5	length for duct	100	m	constant roughness(1 mm)
0000 G	surface temperature for	202	ĸ	adiabatic change
case 0	duct	295 K		constant length for duct(20 m)
case 7	surface temperature for	200	V	proytropic change,
	duct	300	ĸ	constant length for duct(20 m)

Table 3 Each case for parameter in first step simulation

- 16 -



Fig 3.2 Flow rate about length of duct

- 17 -



Fig 3.3 Flow rate about surface temperature of duct

Fig 3.1은 표면조도의 변화에 따른 토출 유량을 시뮬레이션한 결과 (SimulationX S/W 사용)로 동일한 조건 하에 표면 조도를 1 mm와 2 mm의 경우로 나누어 시뮬레이션을 수행한 후 비교한 것이다. Fig 3.1의 결과로부터 표면 조도가 1 mm에서 2 mm로 증가하게 되면, 약 3,147 [m³/h]의 유량 변화(7.6%)가 발생함을 확인할 수 있다.

Fig 3.2는 관로 길이의 변화에 따른 토출 유량을 시뮬레이션한 결과로 동일한 조건 하에 관로 길이를 20 m, 60 m, 100 m로 각각 가정하여 시 뮬레이션을 수행한 후 비교한 것이다. Fig 3.2의 결과로부터 관길이가 증 가할 경우 토출유량이 급격하게 적어짐을 확인할 수 있다.

Fig 3.3은 관로 내부 공기와 관로 벽면에서의 열교환효과에 따른 손실 이 유량변화에 주는 영향을 확인하기 위하여 동일한 조건 하에 관벽면의

- 18 -

온도를 293 K(단열변화)와 300 K(폴리트로픽 변화)로 각각 가정하여 시 뮬레이션을 수행한 후 비교한 것이다. Fig 3.3의 결과로부터 관 벽면 온 도가 293 K에서 300 K로 변화하더라도 유량은 의미있는 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있다.

3.2.2 공급압력과 직경 변화에 대한 직관의 유량 변화

배관망을 설계함에 있어서 대부분의 설계는 직관과 이음을 조합하여 이루어진다. 배관망 내의 관로가 굽어있게 되면 관로 내를 통과하는 압 축공기는 압력 강하, 유속 저하 등의 영향을 받게 되며, 이는 토출유량의 감소로 이어진다. 따라서 이 단계에서는 관의 굽힘과 직경 축소효과를 고려하지 않고 길이 20 m의 직관으로 간주하고, 공급압력과 직경을 변 화시키고, 관로의 직경은 100 mm, 125 mm, 150 mm, 175 mm, 200 m로 변화시켜 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig 3.4는 공급압력 1 bar의 조건 하에 직경에 따른 토출유량을 확인한 결과이다. 그 결과로부터 직경 150 mm 이상인 경우 목표로 한 송풍량(10,000 m³/h)을 만족함을 확인할 수 있다.

Fig 3.5는 공급압력 2 bar의 조건 하에 직경에 따른 토출유량을 확인 한 결과이다. 그 결과로부터 직경 125 mm 이상인 경우 목표로 한 송풍 량을 만족함을 확인할 수 있다.

시뮬레이션 결과로부터 공급압력이 높을수록 필요로 하는 관로의 직경 이 작아짐을 확인할 수 있고, 시뮬레이션 파라미터 내에서 목표로하는 송풍량을 모두 만족하고 상회하는 직경은 150 mm 이상인 경우임을 확 인할 수 있다.

- 19 -



Fig 3.5 Flow rate about diameter of duct(P = 2 bar)

- 20 -

3.2.3 공급 압력과 직경 변화(굽힘 고려)에 대한 유량 변화

본 연구의 기준이 되는 산업 현장의 사용 조건을 고려하면 다수의 굽 힘 이음과 그에 따른 직경 축소효과를 고려해야한다. 현장에서는 이동식 제습공기 공급장치를 통하여, 다양한 장소에 제습공기를 공급하는 것이 목적이며, 이때 배관은 굽힘을 고려하여야 한다.

이 단계의 시뮬레이션에서는 최적의 직경과 최적의 압력을 선정하기 위해 설계 파라미터 중에서도 가장 가혹한 조건을 적용하여 시뮬레이션 을 수행하였다. Table 4에서 이 단계에서 실시하는 시뮬레이션의 물리 인자들을 기술했다.

Table 4 Talaneter of third step simulation				
Parameter	Spec.	Unit	Remark	
length of duct	100	m		
minimum supplied pressure	1	bar		
maximum supplied pressure	2	bar		
minimum diameter of duct	200	mm	10	
maximum diameter of duct	300	mm		
	100 C			

Table 4 Parameter of third step simulation

공급 압력은 면밀한 분석을 위해 0.25 단위로 세분화하여 시뮬레이션 을 수행하였다. 또한, 관로 직경도 마찬가지로 25 mm 단위로 세분화하 여 시뮬레이션을 수행하였다. 관로의 굽힘 효과에 대한 고려는 100 m 기준으로 45° 굽힘 10개 및 90° 굽힘 4개를 고려하고, 그에 따른 관로 의 직경 축소효과는 45° 굽힘을 고려할 경우 직경 10% 축소, 90° 굽힘을 고려할 경우 직경 20% 축소로 가정하였다.

- 21 -



Fig 3.7 Flow rate about supplied pressure(d = 225 mm)

- 22 -



Fig 3.9 Flow rate about supplied pressure(d = 275 mm)

- 23 -



Fig 3.10 Flow rate about supplied pressure(d = 300 mm)

Fig 3.6 ~ Fig 3.10의 결과로부터 공급 압력을 증가시키면 동일 조건 하에서는 토출유량은 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 조건 으로 설정된 모든 공급압력의 범위에서 목표 송풍량(10,000 m³/h)을 만 족하는 관로의 최소 직경은 200 mm 임을 확인할 수 있으며, 통상적인 송풍시스템의 공급압력 한계(약 1.2 bar)를 고려하면 목표 송풍량을 만족 하는 저압 압축공기 이송관로의 최저 직경은 200 mm로 판단된다.

추가적으로 공급 압력과 직경의 증가에 따른 토출 온도에 관해 시뮬레 이션을 수행하였다. 압축 공기는 온도에 따라 밀도가 변하고, 이용하는 측면에서 압축 공기를 소비하는 기계의 안전성과 직결되기에 온도 변화 에 관한 현상을 시뮬레이션 할 필요가 있다.

- 24 -



Fig 3.11 Discharging temperature about supplied pressure(d = 200 mm)



Fig 3.12 Discharging temperature about supplied pressure(d = 225 mm)

- 25 -



Fig 3.13 Discharging temperature about supplied pressure(d = 250 mm)



Fig 3.14 Discharging temperature about supplied pressure(d = 275 mm)

- 26 -



Fig 3.15 Discharging temperature about supplied pressure(d = 300 mm)

Fig 3.11 ~ Fig 3.15의 결과로부터 공급 압력과 직경이 증가할 경우 토 출 온도는 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 특히, 출구 온도에 관해 관 내를 채우는 과정, 유량이 증가하는 과도상태 초기에는 관내의 공기가 압축되어 일시적으로 온도가 상승하지만 유량이 정상상태에 도달하게 되 면 토출온도가 감소하는 현상을 보인다. 모든 관로 직경 조건에서 최종 온도는 관 벽면 온도(29℃) 이하로 유지됨을 확인할 수 있다.

1

51

3.2.4 관로 길이 변화(굽힘 고려)에 대한 유량 변화

압축 공기를 이송하는 관로는 산업 현장의 상황에 따라 그 이송거리가 다양하다. 짧게는 수 m에서 길게는 수백 m에 이르는 관로는 공급 지점 에서의 토출유량이 다르기 때문에 관로 길이의 변화에 따른 토출 유량에

- 27 -

따라 물리 인자들을 고려하여야 한다.

이 단계의 시뮬레이션에서는 앞서 관로 직경과 공급 압력을 결정한 것을 토대로 관로 길이의 변화에 따른 토출 유량을 확인하고, 더 나아가 토출 온도, 토출 공기의 상대습도를 고찰하였다.



Fig 3.16 Discharging temperature about supplied pressure(d = 200 mm, P = 1 bar)

Fig 3.16의 결과로부터 관로의 이송 거리가 감소할수록 토출유량이 증 가하는 것을 확인할 수 있다. 추가적으로 관로의 이송거리에 따른 온도 변화에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 Fig 3.17에 나타내었 다. 관의 이송길이가 감소할수록 토출온도가 감소하는 경향을 확인할 수 있으며, 이는 최종적으로 토출 유량이 증가하였기 때문으로 해석할 수 있다.

- 28 -



Fig 3.17 Discharge Temperature about length changing(d = 200 mm, P = 1 bar)

또한, Fig 3.17의 결과를 토대로 관로의 이송 거리에 따른 상대습도에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 관의 길이가 감소할수록 상대습도가 높 아지는 경향이 확인되며, 이는 관로의 이송 거리가 감소함에 따라 유량 이 증가하게 되고, 토출 공기의 출구온도 역시 감소하기 때문으로 판단 된다. 특히, 관 길이가 60, 80, 100 m 인 경우 토출 공기의 상대습도가 공급공기의 상대습도에 비해 증가된 것을 확인할 수 있으며, 이는 이송 관로의 벽면과의 열교환으로 인해 토출공기의 온도가 증가된 것에 기인 한 현상으로 판단된다. 그러나 압축공기의 상대습도는 포화온도 및 포화 압력에 의해 결정되므로 관로 내부에서 드레인 현상이 발생하지 않는다 면 상대습도가 변화하더라도 압축공기 내 수증기의 절대량이 변하는 것 은 아니므로 유의해야할 것으로 판단된다.

- 29 -



Fig 3.18 Relative humidity in air about length changing (d = 200 mm, P = 1 bar)

추가적으로 관로의 이송 거리 변화에 따른 유체 동력의 손실을 평가하 여 에너지 절감에 대한 효과를 평가하였다. Fig 3.19에 관로의 이송거리 에 따른 유체동력손실 시뮬레이션 수행결과를 나타내었으며, 입구측 유 체동력과 출구측 유체동력간의 차이를 입구측 유체동력으로 나누어 정규 화한 결과를 나타낸다. 그 결과로부터 이송 거리가 감소할수록 유체동력 의 손실은 증가하는 경향을 보이고 있으나 이는 이송 거리의 증가에 기 인한 손실보다 토출유량의 증가에 의해 발생되는 손실이 유체동력손실에 보다 큰 영향을 주고 있는 것으로 판단된다. 따라서, 이송거리에 따른 유 체동력의 손실을 정확히 평가하기 위해서는 동일유량에서의 손실을 비교 할 필요가 있다.

- 30 -



Fig 3.19 Fluid power loss about length changing (d = 200 mm, P = 1 bar)

Fig 3.20에 나타낸 바와 같이 입구압을 동적으로 제어하면 Fig 3.21처 럼 관로의 이송 거리와는 무관하게 토출유량이 10,000[m³/h]로 일정하게 나타나게 된다. 이러한 조건을 통하여 이송 거리의 변화에 따른 유체동 력 손실을 계산하여 그 결과를 Fig 3.22에 나타내었다. Fig 3.22의 결과 로부터 토출 유량이 동일한 조건일 경우 이송 거리가 증가하면 유체동력 손실 또한 증가하는 것을 확인할 수 있다.

- 31 -



Fig 3.21 Same level flow rate control by length(d = 200 mm)

- 32 -



Fig 3.22 Fluid power loss at same level flow rate(d = 200 mm)



- 33 -

3.3 간략식과의 설계 비교

앞서 수행한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 송풍기를 포함한 제습공기 공급 회로를 공기조화 시스템 설계시 사용하는 간략식 혹은 경험식으로 설계하여 비교하였다. 간략식의 경우 표면조도, 이송 관로의 유동 마찰손 실, 열전달 효과 등이 포함되지 않으므로 안전율을 고려하여 계산하는 것이 일반적이며, 압축 공기를 생산하는 송풍기의 축동력과 전동기 동력 을 고려하여 계산을 한다. 시뮬레이션에서는 송풍기의 축효율과 전동기 효율은 상수로 가정하였으나 송풍기 운전점(풍량 및 풍압)에 따라 송풍 기 전효율은 크게 변화하게 되므로 유의하여야 한다.

간략식 혹은 경험식을 활용할 경우 시간에 대해서 고려하지 않으며, 그에 따른 설계 방식은 약간의 차이를 보이게 된다. 따라서, 앞서 수행한 시뮬레이션의 물리 인자를 바탕으로 재구성하여 시뮬레이션을 수행하게 된다.

간략식은 평균 유속 u를 계산하고, 이송관의 형상에 대한 저항계수 ζ 를 도입하여 요구 공급 압력 p_s 를 계산한다. 이를 바탕으로 유체 동력 L_a 를 계산하여 축동력 L_s 과 전동기 동력 L_m 을 산출한다.

대학교

평균 유속 : $u = \frac{q_n}{A} = q_n \frac{4}{\pi d^2}$

- 요구 공급 압력 : $p_s = \zeta \frac{\rho u^2}{2}$
- 유체 동력 : $L_{\!a} \,{=}\, p_s \,{\times}\, q_n$
- 축동력 : $L_s = \frac{l_a}{\eta_s}$, 전동기 동력 : $L_m = \frac{L_s}{\eta_m}$

비교 시뮬레이션을 수행할 조건은 관로 직경 *d*=200 mm, 관로 이송거 리 *L*=100 m로 계산을 하되, 관로 이송거리에 따라 그 변화를 고찰하는 방식으로 시뮬레이션을 수행하게 된다.

이송관의 형상에 대한 저항계수 ζ는 각각 다음과 같은 식으로 계산된 다.

직관의 저항계수 : 0.02×
$$\frac{L}{d}$$
 = 0.02× $\frac{100}{0.2}$ = 10
90° 굽힘이음 4 EA : 0.87×4=3.48
45° 굽힘이음 10 EA : $\frac{0.87}{2}$ ×10=4.2
이송관 내에서의 평균 유속 u (m/s)은 다음과 같이 계산된다.
 $u = \frac{q_n}{A} = \frac{q_n \times 4}{\pi \times d^2} = \frac{2.778 \times 4}{\pi \times 0.2^2} \approx 88.419$ (m/s)
송풍기에서 공급하여야 하는 송풍압은 다음과 같이 계산된다.
 $p_s = \zeta \frac{\rho u^2}{2} = 17.68 \times \frac{1.2 \times 88.419^2}{2} = 82,932$ (Pa)
상기 계산을 바탕으로 시뮬레이션 결과를 참조하여 압축공기 공급압력
은 안전율을 고려한 100,000 (Pa) = 1 (bar)로 결정하였다.
유체(공기) 동력은 다음과 같이 계산된다.
 $L_a = p_s \times q_n = 100,000 \times 2.778 = 277,800$ (W) ≈ 278 (kW)
축동력(축효율 $\eta = 0.85$ 가정)은 다음과 같이 계산된다.
 $L_s = \frac{L_a}{\eta_s} = \frac{278}{0.85} \approx 327$ (kW)

전동기 동력(전동기 효율 $\eta_m = 0.9$ 가정)은 다음과 같이 계산된다.

- 35 -

$$L_m = \frac{L_s}{\eta_m} = \frac{327}{0.9} \simeq 363 \ (\text{kW})$$

간략 계산 결과를 바탕으로 이송 거리에 따른 토출 유량 및 공기 동력 시뮬레이션을 수행하였다. 또한 공급 압력 및 공기 동력에 대한 시뮬레 이션도 함께 수행하였다. 각각의 시뮬레이션에서 사용된 물리 인자는 Tabel 5와 Table 6에 나타내었다.

Paramater	Spec.	Unit	Remark	
Diameter of duct	200	mm		
Supplied pressure	0.5	bar		
Length of duct	20~100	m	In	
2º				

Table 5 Simulation parameter for flow rate and fluid power

Table 6 Simulation parameter for supplied pressure and fluid power				
Parameter	Spec.	Unit	Remark	
Diameter of duct	200	mm		
Flow rate	10,000	m ³ /h		
Length of duct	20 ~ 100	m	~/	
"a ch ot m				

Fig 3.23과 Fig 3.24에 이송 거리에 따른 토출 유량 및 공기 동력 시뮬 레이션 결과를 나타내었다. 또한 Fig 3.25에서는 간략 계산을 통한 이송 거리에 따른 토출 유량 및 공기 동력 시뮬레이션 결과를 나타내었다. Fig 3.23의 결과에서 이송 거리가 길어질수록 정상 상태에 도달한 경

- 36 -

우 토출 유량은 감소함을 확인할 수 있다. 결과로부터 관로 이송 거리가 40m 이하이면 목표 토출유량을 이송할 수 있는 것으로 확인된다.

또한 Fig 3.24의 결과로부터 이송 거리가 감소할수록 유량이 증가하여 공기 동력 역시 증가함을 확인할 수 있다. 관은 공기압 구성 요소 중에 서도 저항요소에 속하므로 공급압력이 동일하다면 유량이 증가할수록 유 체동력 역시 증가한다.

간략 계산을 통한 시뮬레이션 결과를 Fig 3.25에 나타내었다. 앞서 언 급했듯이 간략 계산 방법은 시간에 대해 고려하고 있지 않기 때문에 이 송 거리에 따른 최종 결과값(토출 유량 및 유체동력)을 나타내었다.

Fig 3.23과 Fig 3.25의 결과를 이송 거리에 따른 토출유량으로 변환하 여 비교한 결과를 Fig 3.27에 나타내었다. 간략 계산을 통해 설계를 할 경우 요구 토출 유량을 만족하지 못하는 경우가 발생함을 알 수 있다. 또한, 공기 동력이 과대평가되어 설계됨으로써 실제 작업에 소요되는 동 력의 부족, 요구 송풍량 부족 등의 악영향을 미칠 수 있다.





Fig 3.24 Fluid power about length of duct

- 38 -



Fig 3.25 Flow rate and fluid power about length duct using simply equations



Fig 3.26 supplied pressure and supplied fluid power using simply equation

- 39 -



Fig 3.27 Comparing Flow rate between simplified equation and detailed model

또한 동일 토출유량을 위한 공급 압력을 결정할 경우, 간략 계산 방법 의 공급 압력 계산 결과가 가상체적분할 모델의 계산 결과와 비교하였을 때 매우 낮음을 확인할 수 있다. 이는 공급 공기 동력에도 영향을 미치 고 있다고 판단된다.

- 40 -

제 4 장 결론

에너지 절감을 하는 방법에는 다양한 방법이 있으며, 주로 압축공기를 생산하는 압축기의 성능 개선이나 운전 방법 등의 개선이 그 주를 이룬 다. 압축공기를 공급하는 관 요소에 관해서는 대략적인 설계만 할 뿐, 직 접적인 에너지 절감 방법에 대해서 매우 한정적인 시도만이 있을 뿐이 다. 따라서 설계의 시작 단계에서부터 최대한 정확하고 적합한 설계를 실시하는 것이 공압에너지를 이용함에 있어서 그 비용과 에너지 절감을 위한 가장 효과적인 방법이라고 하겠다.

압축공기를 이송하는 관 요소는 저항요소에 속한다. 관 요소는 다양한 물리 인자들에 의해 그 사양이 결정되며, 관로망을 구성하는데 있어서 중요한 부분을 차지한다. 따라서 관 요소의 사양을 결정하는 방법은 관 로망 설계나 에너지 절감 등 산업 현장이 가지는 중요한 화두인 에너지 절감 문제에 영향을 미칠 것으로 사료된다.

본 논문에서는 시뮬레이션 수행 결과를 통하여 관 요소의 물리 인자들 이 토출 유량과 공기 유체 동력, 그리고 공급 압력 등에 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. 또한 간략 계산 방법과의 비교를 통하여 같은 조 건에서 어느 정도의 차이를 보이는지 확인하였다.

관로 사양을 결정하는데 있어서 관 요소가 가지는 물리 인자들이 미치 는 영향을 상세히 조사하였으며, 시뮬레이션은 특정 목표치를 두어 단계 별로 진행하는 방식으로 조사하였다. 이러한 과정은 관로 사양의 타당한 결정을 위한 기초적 기술 자료를 제공할 목적으로 수행하였다. 관로의 사양을 결정함에 있어서 주요 파라미터 및 운전 조건들인

- 41 -

- (1) 관로의 표면 조도
- (2) 관로의 이송 길이
- (3) 관로의 직경
- (4) 입구측 공급압력
- 이 관로망에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과 다음과 같이 결론지을 수 있었다.
 - 1) 관로 물리인자들의 영향

앞서 시뮬레이션을 수행한 결과 토출유량에 영향을 미치는 관로 물리 인자들을 정의할 수 있었다. 특히, 관로 재질에 따른 표면 조도에 대한 영향을 확인할 수 있었으며, 이송 거리가 짧을수록 예상되는 토출유량이 큰 차이가 있음을 확인하였다. 또한 이러한 경우, 토출 유량 및 유체 동 력이 보다 높게 평가됨을 알 수 있었다. 이는 실제 현장에 공급되는 유 량, 압력, 동력 등이 차이를 보이는 결과를 가져올 수 있다고 판단된다. 또한, 실제 운전 압력보다 고압으로 운전하게 되는 결과를 발생시켜 비 용 및 안전에 문제를 야기하게 될 것으로 판단된다.

2) 관로 사양의 타당한 결정을 위한 기초적 기술 자료 제공 간략 계산식을 통한 설계에서는 관로 내의 표면조도의 영향과 외부와
의 열교환 효과, 유량에 따른 유체동력 손실 등을 고려하지 않고 있기
때문에, 이러한 영향들을 고려함으로써, 에너지 손실을 줄이고, 비용을
절감할 수 있는 관로 사양의 결정을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

3) 압축공기 생산비용 절감 및 공급망의 압력저하 방지

- 42 -

생산비용이 높은 고압(7 bar)의 압축공기를 본 논문의 시뮬레이션 결 과를 토대로 저압(2 bar)의 공기를 사용함으로써 생산비용을 낮추고, 압 축공기 공급망 전체에 작용하는 압력저하를 방지함으로써 타 작업의 능 률향상을 도모할 수 있을 것으로 판단된다.

현재 설계에 반영되는 간략 계산 방법은 가상체적분할 모델과는 많은 차이를 보이고 있으며, 이는 축소모형 시험을 통해 그 결과에 대한 정밀 검증 및 보완이 필요하다고 판단된다. 이 연구의 향후 과제는 필터 및 제습장치, 송풍기를 포함한 공기압 공급장치의 전체 시스템에 대한 추가 연구를 통하여, 이송관로 모델과의 통합 시뮬레이션 및 축소 모형 시험 을 통해 전체 시스템에 대한 특성을 정밀 분석하여 이 연구에서 얻어진 결론들을 검증하는 과정이다. 성공적인 실험을 위해서 여러 종류의 관을 이용하여 각 관의 표면조도, 열전달 계수를 측정 및 파악하고, 시뮬레이 선과 동일한 조건하에서의 토출유량을 계측하는 것이 필요한 과제들이 다.

- 43 -

참고 문헌

(1) 장지성, 지상원, 2011, "공기압 구동장치의 에너지효율 평가", 한국동력기 계공학회지 제 15권 제6호, pp. 95~100

(2) 최진석, 정진관, 유정호, 정창희, 박태영, 2013, "인버터를 활용한 공기압축
 기 에너지 절감", 대한전기학회 제44회 학술대회, pp. 1500 ~ 1501

(3) 배성우, 김동수, 김명섭, 2007, "에너지 절약 시스템 공압 서보 액추에이터 개발", 대한기계학회 2007년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, 2019 ~ 2023

(4) 장지성, 이광국, 최명수, 2003, "긴 전달관로를 갖는 공압제어계의 압력 제
 어", 대한기계학회논문집 A권, 제27권 제 4호, pp. 567 ~ 576

(5) 나홍섭, 고대권, 조규학, 장세호, 안수길, 2003, "유한차분법과 특성곡선법 을 이용한 파이프-오리피스계의 가스 유동 예측", 한국동력기계공학학회지, 제 7권 제2호, pp. 11 ~ 16

(6) Peter Beater, 2007, "Pneumatic Drives", SpringerVerlag, pp. 55 ~ 79

(7) 장지성, 이봉영, 지상원, 2008, "공압기술 이론 및 실무", 보문당, pp. 218
~ 224

(8) T. Kagawa, 1992, "壓縮性流體の管路容量における 非正常流ねに關する研究", 計測自動制御學會論文集, Vol. 28, No. 6, pp. 655 ~ 663

- 44 -

(9) T. Kagawa, I.Y. Lee, A. Kitagawa, T. Takenaka, 1983, High Speed and Accurate Computing Method of Frequency–Dependent Friction in Laminar Pipe Flow for Characteristics Method. Transactions of the JSME, Series B, Vol. 49, No. 447



- 45 -

감사의 글

어느덧 부경대학교라는 공간과 함께한 10 년이라는 시간을 매듭짓고, 더 넓은 공간으로 나가야할 때가 왔습니다. 지난 2 년의 흐름 속에서 무 엇을 배우고, 무엇을 느꼈으며, 무엇을 경험하였는가에 대해 많은 생각이 들었습니다. 그 어떤 때보다도 소중하고 값진 시간을 선사해주시고 많은 도움을 주신 모든 분들에게 짧은 글로나마 감사의 마음을 전하고자 합니 다.

대학원에 재학하는 동안 많은 것이 부족했던 저에게 나아갈 방향을 제 시해주시고, 깊은 관심과 지도를 쏟아주신 장지성 교수님께 무한한 존경 과 감사를 드립니다.

바쁘신 와중에도 많은 관심으로 이 논문을 심사해주신 고대권 교수님, 김영복 교수님께도 깊은 감사를 드립니다. 또한 이 논문이 완성되기까지 각별한 관심과 조언, 많은 배려를 해주신 지상원 선배님께도 깊은 감사 를 드립니다. 또한, 학부 및 대학원 재학동안 많은 관심과 애정으로 지도 해주신 강인필 교수님, 이일영 교수님, 이연원 교수님, 정석호 교수님께 도 깊은 감사를 드립니다.

학문적 소양을 넓힐 수 있도록 기회를 마련해주신 에스피앤지(주)의 이정림 대표이사님과 저에게 편의와 기회를 보장해주신 하태준 부장님께 도 깊은 감사의 인사를 드립니다.

2 년의 시간 속에서 알지 못했던 새로운 것들을 배울수 있어서 행복했 고, 즐거웠습니다. 고민많은 부족한 후배였던 저를 언제나 다독여주신 김 현호 선배님과 김상진 선배님의 도움이 많은 힘이 되었습니다. 또한 매 학기마다 함께 공부할 수 있었던 김희중 군에게 감사의 인사를 드립니 다. 그리고 언제나 학문적 고민을 같이 해준 착한 후배 김성용 군과 박

- 46 -

세훈 군에게도 감사의 인사를 드립니다. 또한 함께 동고동락하였던 동갑 내기 친구 강동기 군과 공유압시스템 실험실의 여러 후배님들, 그리고 언제나 즐겁고 유쾌한 박태정, 김경재, 신호철, 양은규, 양태형, 안성기, 박상석 후배님들에게도 고마웠노라 인사를 드립니다.

마지막으로, 대학원 진학에 있어서 한결같은 지지와 성원을 보내주시 고, 못난 큰 아들의 뒷바라지를 하시느라 어느새 세월의 흔적을 간직하 게 되신 아버지와 어머니, 그리고 형의 공백을 메우느라 절치부심 고생 하는 나의 자랑스런 동생 정헌이에게 무한한 감사를 드립니다.



- 47 -