

에어 드라이어 제습성능 최적화 프로그램 개발

박 원 기¹⁾ · 이 희 관¹⁾ · 양 균 의¹⁾ · 문 상 돈²⁾

전북대학교 대학원¹⁾ · 전북대학교 기계설계공학부²⁾

A Study on Optimizing Drying Performance of Air Dryer

Won Ki Park¹⁾ · Hi Koan Lee¹⁾ · Gyun Eui Yang¹⁾ · Sang Don Mun²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

²⁾Department of Mechanical Design Engineering, Chonbuk National University, Jeonbuk 561-756, Korea

(Received 23 November 2009 / Accepted 17 May 2010)

Abstract : Compressed air represents an energy source and an force-transmission medium for brake systems on medium-heavy and heavy-duty commercial vehicles. However, one disadvantage is the tendency of air to absorb moisture in the form of water vapor. This water vapor condenses once the air, which is heated during compression, cools back to ambient temperature upon emerging from the air compressor. The resulting condensation assumes the form of moisture in pneumatic lines, air tanks, cylinders and valve assemblies and can have negative consequences for the brake system and vehicle safety. The pneumatic systems on today's vehicles are equipped with air dryers, in which the supplied air is dried according to the adsorption principle. In the systems, the compressed air flows through a granular desiccant with molecular sieves which captures the water molecules.

Key words : Air compressor(에어 컴프레서), Air dryer(에어 드라이어), Duty cycle(듀티사이클), Regeneration ratio(재생률), On-load time(작동 시간), Off-load time(비작동 시간), Operating range(작동 범위)

1. 서 론

오늘날 상용차에서 브레이크 시스템을 위한 동력 장치로써 압축된 공기를 사용하고 있다. 그러나 대기의 수증기에는 수분이 함유되어 있고 이 수증기가 에어 컴프레서를 통해 고온 압축되어 전달된 공기가 대기온도까지 떨어지면 에어라인, 에어 탱크, 실린더, 그리고 각종 밸브에서 수분이 응축되어 브레이크 시스템에 이상 작동을 일으켜 안전측면에 악영향을 준다.^{1,2)} 공압 시스템을 적용하는 상용차에는 일반적으로 제습을 위한 에어 드라이어가 장착되어 있고 최적의 제습 성능을 발휘하기 위해서는 컷오프 압력과 작동 범위 압력을 결정하는 에어 드라이어의 단품 사양 및 차량 시스템을 구성하고 있는 에어 컴

프레서 용량, 에어 탱크 용량, 차량 에어 소모량 등의 많은 인자에 대한 고려가 필요하다. 이런 많은 인자를 고려하여 제습성능의 최적화를 위해 계산하는 프로그램을 개발하여 실차와 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 차량 시스템 구조

공압 시스템을 적용하는 차량에는 압축 공급된 공기가 과립의 건조제를 통해 흘러 들어가면서 흡착원리에 의해 제습되는 에어 드라이어가 장착되어 있다. 에어 드라이어는 건조제가 들어 있는 카트리지, 작동압력(컷오프, 컷인, 작동 범위 등)과 재생을 제어하는 밸브 본체로 크게 구성되어 있다. Fig. 1은 에어 드라이어의 구조를 보여준다.

*Corresponding author, E-mail: msd@jbnu.ac.kr

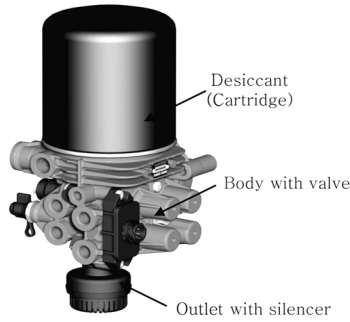


Fig. 1 Air dryer

2.2 재생률과 듀티사이클

차량 시스템에서 에어 컴프레서 용량, 에어 탱크 용량은 컷오프 압력, 작동 범위 압력, 재생 용량 등을 고려하여 설계해야 한다. 여기서 대략적으로 차량의 평균 공기 소모량을 알면 이론적으로 에어 컴프레서 재생률과 듀티사이클을 계산할 수 있으며 이는 또한 설계 요구 조건을 만족해야 한다.³⁻⁷⁾

2.2.1 비작동 시간(Off-load time)

에어 컴프레서가 작동하여 에어 컴프레서에서 토출되는 공기가 에어 탱크에 충전하는 구간을 작동 (on-load) 구간이라 하고 공기를 충전하는 시간을 작동 시간(on-load time)이라고 표현하며 컷인(cut-in)에서 컷오프(cut-off) 시간을 말한다. 컷오프 압력에 도달하면 정해진 재생량 만큼 재생을 하게 되는 시간을 재생 시간이라 하고 비작동(off-load) 구간에 포함된다. 또한 충전된 에어 탱크 용량으로 각 시스템에서 필요한 공기를 사용하게 되고 그렇게 되면 탱크내의 압력이 점점 떨어져 컷인 압력에 도달하면 에어 컴프레서가 다시 가동되어 충전된다. 이 구간을 비작동구간이라 하고, 이 구간의 시간을 비작동 시간이라고 한다. 컷인에서 컷오프까지의 압력 구간을 작동 범위(operating range)라고 한다. Fig. 2는 에어 컴프레서 1 사이클을 보여준다. 에어 컴프레서가 작동하는 한 사이클중 비작동 시간을 예측하고 에어 드라이어의 제습능을 복원하기 위해서는 재생 시간(regeneration time)은 20~30초 정도 필요하다. 일반적으로 비작동 시간이 재생 시간 20~30초보다 길게 시스템이 구성되어야 하며 그 계산식은 다음과 같이 정의된다.

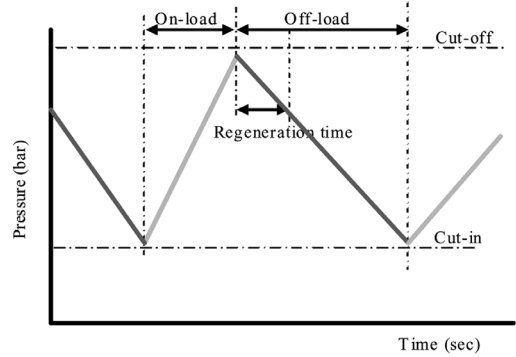


Fig. 2 Air compressor 1 cycle(off-load and on-load)

$$t_{off-load}(\text{sec}) = t_{reg} + \frac{60\Delta p \cdot V_{res} - t_{reg} \cdot (Q_{cons} + Q_{reg})}{Q_{cons}} \quad (1)$$

$t_{reg}(\text{sec})$: 세팅(setting)된 재생 시간(= 20)

$V_{res}(\ell)$: 총 탱크 용량

$\Delta p(\text{bar})$: 에어 드라이어 스위칭 범위

$Q_{con}(\ell/\text{min})$: 차량 에어 소모량

$Q_{reg}(\ell/\text{min})$: 재생시 분당 공기 배출량

그러나 만약 비작동 시간이 20초보다 적거나 같은 경우의 계산식은 다음과 같이 정의된다.

$$t_{off-load}(\text{sec}) = t_{reg}(\text{sec}) = \frac{60 \cdot \Delta p \cdot V_{res}}{Q_{cons} + Q_{reg}} \quad (2)$$

2.2.2 재생률(Regeneration ratio)

에어 드라이어는 에어 컴프레서가 작동하면 대기의 습공기가 건조제를 통과하면서 수분과 이물질 제거하고 에어 탱크에는 순수한 건공기만 충전될 수 있도록 한다. 그러나 에어 드라이어의 지속적인 제습을 위해서는 건조제에 함유된 수분과 이물질을 충분히 대기로 방출할 수 있는 재생 시스템이 필요하며 얼마나 많은 양이 필요한지를 결정해야 한다. 재생률은 재생에 필요한 양(V_{reg})을 에어 컴프레서가 작동하는 동안 전달되는 에어 공급량($V_{delcycle}$)으로 나눈 비율을 말하여 계산식은 다음과 같다.

$$R_{ratio}(\%) = \frac{V_{reg}}{V_{delcycle} - V_{sl}} \cdot 100 \quad (3)$$

또한 다음과 같이 정의된다.

$$R_{ratio}(\%) = \frac{300 \cdot V_{setreg} \cdot t_{reg}}{Q_{del} \cdot 60 \cdot (\Delta p \cdot V_{res} + V_{slvol} \cdot P_{cutoff}) - V_{slvol} \cdot P_{cutoff}} \quad (4)$$

$V_{setreg}(\ell)$: 초기 재생용량
 $V_{slvol}(\ell)$: 스위칭 손실 용량(대기압 기준)

2.2.3 듀티사이클(Duty cycle)

에어 컴프레서의 듀티사이클(duty cycle)은 에어 드라이어의 성능 및 내구에 미치는 영향이 크며 차량에 필요한 에어 컴프레서의 사양을 결정하는 수단으로써 인용된다.^{8,9)} 일반적으로 듀티사이클은 에어 컴프레서가 작동한 시간을 차량 전체의 시간(작동시간+ 비작동시간)으로 나눈 비율을 말하며

$$Duty\ cycle(\%) = \frac{t_{on-load}}{t_{on-load} + t_{off-load}} \quad (5)$$

$t_{on-load}(\text{sec})$: 작동 시간
 $t_{off-load}(\text{sec})$: 비작동 시간

또한 다음과 같이 정의된다.

$$Duty_Cycle(\%) = \frac{100}{1 + \frac{t_{offload} \cdot (Q_{del} - Q_{cons})}{(\Delta p \cdot V_{res} + V_{slvol} \cdot P_{cutoff}) \cdot 60}} \quad (6)$$

$Q_{del}(\ell/\text{min})$: 에어 컴프레서 성능
 $Q_{con}(\ell/\text{min})$: 차량 에어 소모량
 $V_{slvol}(\ell)$: 스위칭 손실 용량

2.3 검증 프로그램 구현

에어 드라이어의 제습 성능 최적화를 위한 프로그램은 크게 입력부, 계산부 그리고 출력부로 나뉘고 입력부에서는 시스템 제원인 에어 탱크 용량, 평균 공기 소모량, 파이프 루트, 에어 컴프레서 용량 그리고 에어 드라이어의 제원인 컷오프 압력, 재생량, 작동 범위 등의 데이터를 입력한다. 2.2장의 이론식을 이용하여 에어 컴프레서 작동 시간, 비작동 시간 그리고 에어 컴프레서에서 충전된 공기량 등을 계산하여 최종적으로 출력부에서는 듀티사이클, 재생률 등을 산출할 수 있도록 간략하게 Fig. 3과 같

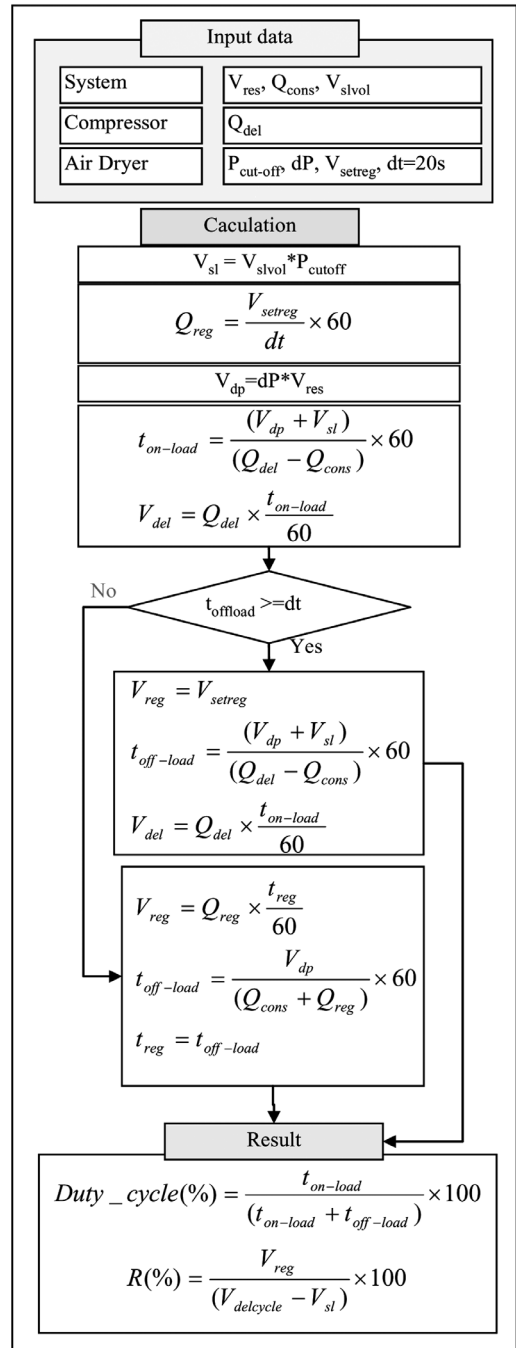


Fig. 3 Procedure of calculation program

이 표현하였다. Fig. 4는 프로그램을 구동하기 위해 필요한 입력 값을 비주얼 베이직(visual basic) 템플릿으로 구성한 것이다. 각 입력값에 대해 데이터베

Fig. 4 Input data of program

이므로 관리도 할 수 있고 또한 직접 입력하여 출력 값 영향도를 바로 비교 분석할 수 있어 초기 예측 검토 및 검증 모두 유용하게 활용할 수 있는 장점이 있다. 관련된 입력 값에는 에어 컴프레서의 토출 성능, 기어비, 에어 컴프레서 효율, 시스템에서 중요한 인자 중의 하나인 에어 탱크 용량, 그리고 마지막으로 에어 드라이어의 부품 사양과 연관성이 있는 컷오프 압력, 작동 범위, 재생량 등이 있고 이들을 설정하도록 윈도 화면을 구성하였다.

시스템에 대한 사양이 정해지면, Fig. 4와 같이 프로그램의 입력창에 입력 데이터를 넣고 계산을 수행하면 평균 공기 소모량에 대한 듀티사이클의 경향을 Fig. 5와 같이 출력할 수 있다.

출력된 그래프는 평균 공기 소모량이 커질수록 듀티사이클은 커지고 작동 범위가 클수록 듀티사이클은 작아짐을 보여주고 있다. 듀티사이클이 커지면 에어 컴프레서에서 오일 상승에 의한 오염이 많아지고 오일 오염이 많아지면 에어 컴프레서 효율도 떨어질 뿐만 아니라 에어 컴프레서와 에어 드라이어의 내구 성능에도 악영향을 줄 수 있다.

또한 사양이 정해진 임의의 시스템에 대한 평균 공기 소모량에 대한 재생률의 경향은 Fig. 6과 같이 출력된다. 출력된 그래프에서 평균 공기 소모량이 커질수록 재생률은 작아지고 작동 범위가 클수록 재생률이 작아짐을 보여준다. 재생률이 작으면 카트리지의 습공기를 충분히 대기로 배출하지 못하여 차기 제습 성능에 불리하다.

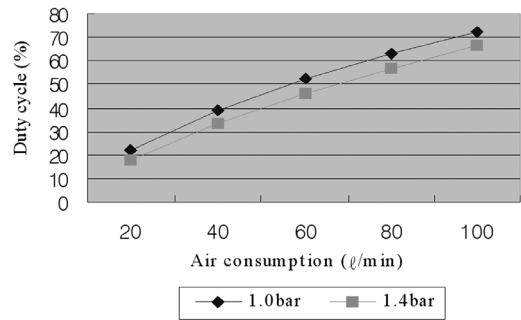


Fig. 5 Regeneration ratio predicted by program

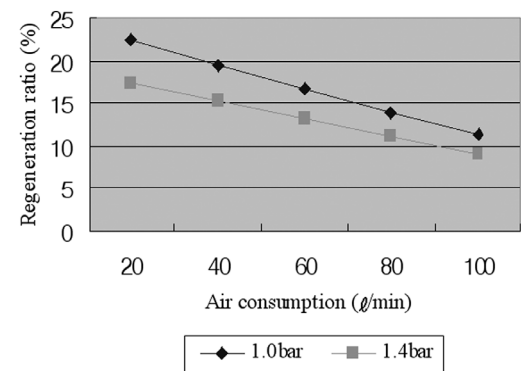


Fig. 6 Duty cycle predicted by program

2.4 실차 시험

2.4.1 실차 측정

A차종을 대상으로 필드 실 운행구간을 주행하면서 실시간으로 측정하여 이론과 실차의 상관 관계를 검증하고자 하였다. Table 1은 에어 드라이어의 사양을 보여주고 Fig. 7은 실시간에 대한 압력 및 온도 변화를 측정된 데이터를 보여준다.

2.4.2 실차 측정치 분석

Table 2는 실측치와 이론치의 비교 데이터를 보여주고 있다. 듀티사이클은 4.3%, 비작동 시간 3.7%, 그리고 재생 볼륨 13%로 전체적으로 단품 허용 공

Table 1 Vehicle specification

Items	Specification
Cut off (bar)	9.3
Operating range (bar)	0.8~1.2
Regeneration volume (ℓ)	40±10%
Air tank volume (ℓ)	115

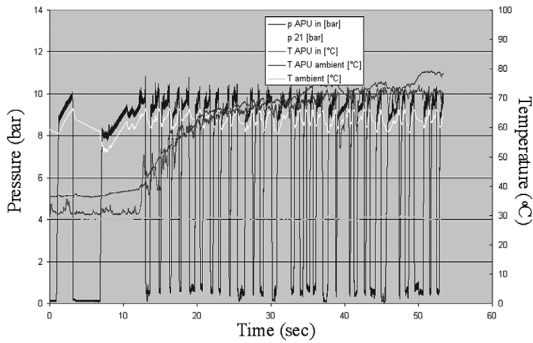


Fig. 7 Actual measurement value (pressure vs. temperature vs. time)

Table 2 Measurement vs. prediction

Items	Measurement	Calculation	Error (%)
Cut off (bar)	9.3	9.3	-
Operating range (bar)	1.15	0.8~1.2	-
Vehicle rotation (rpm)	1,022	1,100	-
Air consumption (ℓ/min)	91	90	-
Regeneration time (sec)	24	20	-
Regeneration volume (ℓ)	50	44	13
Duty cycle (%)	73	70	4.3
Off-load time (sec)	26	27	3.7

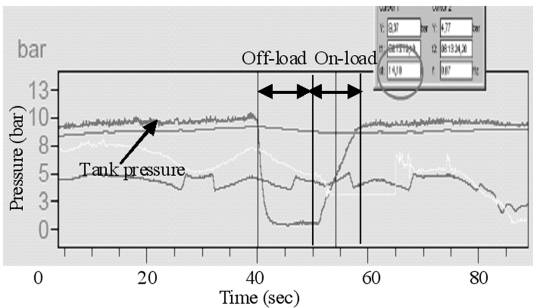


Fig. 8 Pressure vs. off-load time

차 10% 이내로 프로그램에 의해 계산된 이론치가 적정성이 있는 것으로 판단된다. 그러나 비작동 시간이 이론치 27초, 실측치 26초로 충분한 재생을 위한 시간 30초에 미치지 못하는 것으로 분석된다.

Fig. 8은 A차종을 대상으로 필드 실 운행 구간을 주행하면서 측정된 에어 탱크 압력(적색 실선) 데이터(Fig. 7)를 1사이클만 확대한 것이다. 에어 컴프레서 작동 시간과 비작동 시간을 구분할 수 있다. 그래프에서 비작동 시간은 짧다. 그 원인은 에어 탱크 용

Table 3 Before vs. after (off-load time)

Items	Before	After
Cut off (bar)	9.3	9.3
Operating range (bar)	0.8~1.2	1.0~1.4
Regeneration volume (ℓ)	40±10%	45±10%
Duty cycle (%)	70	67
Off-load time (sec)	27	43

량은 적으나 공기 소모량이 많기 때문이다. 그러므로 이러한 현상은 충분한 재생 시간을 갖지 못해서 발생하는 현상으로 이와 같은 현상이 잦아지면 에어 드라이어의 제습 역할이 제대로 수행되지 못해 에어 탱크에 수분이 생성되고 시스템에 악영향을 미친다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 프로그램을 이용하여 작동 범위와 재생량 등을 변경하여 이론값을 계산하였다.

Table 3은 에어 드라이어의 압력 변화에 대한 시스템 영향도를 나타내고 있다. 듀티사이클은 4.5% 향상되고 비작동 시간은 37% 개선되었다.

3. 결론

에어 드라이어 제습 성능 최적화 프로그램을 개발하여 에어 컴프레서 용량, 에어 탱크 적정용량, 작동 범위, 컷오프 등 차량 시스템과 관련된 영향 인자를 결정하고 이 입력 데이터를 기반으로 듀티 사이클과 재생량을 계산하여 최적화를 구현할 수 있었다.

- 1) 에어 드라이어가 제습을 계속적으로 잘 수행하는데 필요한 건공기 양을 예측할 수 있는 것은 에어 드라이어 성능 개선에 영향을 미치는 중요한 인자의 하나이다. 그리고 제습에 사용되는 건공기 소모 양에 대응하는 적절한 재생량을 결정함으로써, 향후 에어 컴프레서의 소모 동력을 줄이는 효과가 있어 연료 절감 측면에서 고려될 수 있다.
- 2) 비작동 시간을 예측함으로써 충분한 재생시간의 여유를 갖도록 시스템을 설계할 수 있었다.
- 3) 듀티사이클은 에어 컴프레서의 성능 및 효율에 관련된 인자이고 이런 듀티사이클에 관련된 시스템 인자는 에어 컴프레서 용량 뿐만 아니라 컷오프 압력, 작동 범위 압력, 탱크 용량이었다. 그

리고 레이아웃(layout)이 결정된 상황에서 작동 범위를 변경하여 개선 효과를 얻을 수 있었다.

References

- 1) R. Limpert, Analysis and Design of Automotive Brake Systems, US Army Material Development and Readiness Command Engineering Design Handbook, DARCOM-p-706-358, 1976.
- 2) R. Conklin and B. Hudgins, "Electronic Compressor and Air Dryer Control," SAE 1999-01-3771, 1999.
- 3) W. E. Knovel, Smithsonian Physical Tables, 9th Revised Edn, Forsythe, New York, 2003.
- 4) B. D. Yoon, K. H. Kim and J. S. Jang, "A Study on the Integral Condenser-Receiver Dryer in Automotive Air-Conditioning System," Spring Conference Proceedings, KSAE, pp.1247-1253, 2003.
- 5) K. H. Kim, J. S. Jang and J. I. Park, "Development on the Sub-Cooled Hybrid Condenser in Automotive Air-Conditioning System," Transactions of KSAE, Vol.11, No.5, pp.70-76, 2003.
- 6) Y. H. Song, K. H. Kim and Y. G. Song, "Optimum Design Scheme of Receiver Dryer in an Automotive Air-Conditioning System using HFC-134a Refrigerant," Transactions of KSAE, Vol.4, No.6, pp.187-195, 1996.
- 7) Y. H. Song, W. W. Jang, Y. K. Song and K. H. Kim, "A Study of Receiver Dryer for Automotive Air-Conditioning System," Spring Conference Proceedings, KSME, pp.581-587, 1995.
- 8) W. P. Fornof, "Compressor Oil Carryover and Its Effect on the Pneumatic System," SAE 1999-01-3768, 1999.
- 9) W. P. Fornof, "A Method for Determining the Efficiency of a Coalescing Filter," SAE 2004-01-2733, 2004.