냉매분배기 분배성능에 미치는 내부 형상인자의 영향

김동휘¹ · 사용철¹ · 정백영¹ · 박병덕^{2†}

¹LG전자 AE연구소, ²경북대학교 자동차공학부

Effects of the Internal Structure on the Distribution Performance of a Refrigerant Distributor

DONG-HWI KIM¹, YONG-CHEOL SA¹, BAIKYOUNG CHUNG¹, BYUNG-DUCK PARK^{2†}

¹Air-Conditioning & Energy Solution R&D Laboratory, LG Electronics, 327-23, Gasan-dong, Geumcheon-gu, Seoul, 153-802, Korea

²School of Automotive Engineering, Kyungpook National Univ(Sangju), 2559, Gyeongsang-daero, Sangju-shi, Gyeongbuk, 742-711, Korea

Abstract >> The distribution performance of refrigerant distributors in air conditioner evaporators was examined numerically and experimentally. Internal flow analysis of the distributor by CFD found that the distance from the socket to the cone, the angle of the cone and the base area of the cone were the most important factors affecting refrigerant distribution ability and vortex creation. To enhance distribution performance, two distributors with improved internal structures were designed. To test these new structures, distribution performance was also analyzed by CFD and an empirical experiment was carried out using the water-nitrogen. Experimental results on the distribution fraction of each distributor hole showed a good agreement with the results of the CFD analysis. Thus, the new design of the distributors enhanced distribution performance of the refrigerant distributors.

Key words : Air conditioner(공조기), Heat exchanger(열교환기), Evaporation performance(증발성능), Distributor(분배기), Distribution performance(분배성능)

Nomenclature

m : mass, kg

Q : volume, m³

x : quality

Greek symbols

α : volume fraction

ρ : density, kg/m³

Subscripts

g : gas phase

l : liquid phase

n : nitrogen

r : refrigerant

tot : total

vol : volume

w : water

[†]Corresponding author : bdpark@knu.ac.kr

[접수일 : 2013.9.8 수정일 : 2013.10.9 게재확정일 : 2013.10.31]

Copyright © 2013 KHNES

1. 서 론

지구 온난화로 인해 전세계적으로 에너지의 절약과 이산화탄소 배출의 감소가 요구되고 있다. 공조기 분야에서도 에너지 효율이 높은 제품의 개발이 지속적으로 요구되고 있고 에너지 효율이 높은 제품을 개발하기 위해서는 압축기, 열교환기, 팬 등 요소기기의 효율이 개선되어야 한다. 열교환기 분야에서는 튜브 및 현의 고성능화도 중요하지만 고성능화된 열교환기의 성능을 최대한 발휘할 수 있도록 하는 것이 중요하다. 특히 열교환기가 증발기로 사용될 경우, 각 패스로 냉매가 불균일하게 분배되면 증발성능이 감소하여 공조기의 성능과 효율이 저하한다. Hwang¹⁾은 공조기 설계의 관점에서 불균일한 냉매에 의해 발생하는 문제점을 나타내고 분배기의 중요성, 종류 및 특징에 대하여 설명하였다.

냉매분배와 관련해서는 많은 연구자들이 여러 종류의 냉매와 여러 형태의 열교환기에서 불균일한 냉매분포에 따른 증발기의 성능저하와 분기관에 관한 연구들을 진행하였다²⁻⁸⁾. 이러한 연구는 주로 T형 분기관에서 2상유동의 분배특성과 불균일한 냉매분포가 열교환기에 미치는 영향을 주로 파악하였다.

Hwang¹⁾이 서술한 것과 같이 공조기에서 주로 사용되는 환-관형 열교환기에서는 원통형의 분배기가 널리 사용되고 있다. 하지만 원통형 분배기에서 냉매를 균일하게 분배하는 내부구조에 대한 연구는 거의 수행되지 않았다. 본 연구에서는 CFD 해석에 의하여 원통형 분배기의 내부구조에서 분배특성에 미치는 인자를 특정하였다. 또한 실험을 통하여 해석에 의한 분배특성에 미치는 이들 내부인자가 타당함을 확인하였다. 이를 통하여 분배기의 분배성능을 개선시키고 또한 사용하는 재료를 절감시켜 친환경성에 기여하였다.

2. CFD 해석

불균일한 분배가 이루어지는 기존 분배기의 성능 개선을 위해서 분배기 내부유동을 CFD 해석으로 관찰하였다. CFD 해석은 Cradle사의 상용 프로그램인 SC-Tetra를 사용하였다. 해석에는 Navier-Stokes 방정식과 $k-\epsilon$ 난류모델을 사용하였다. 메쉬 수 300,000~500,000개, 계산은 비정상조건, 200스텝으로 수행하였다. CFD 해석을 위한 해석조건은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 분배기가 연결 배관에 연결되어 조합된 전체적인 형태와 기존 분배기의 내부 형상을 나타낸다. 분배기와 연결되는 배관은 12.7mm 동관을 사용하였다. 분배기에서 배관 굽힘부의 영향을 최소화하기 위해 굽힘 이후의 수직 배관 길이를 분배기 연결 배관 내경의 20배 이상으로 제작하였다.

Fig. 2에 분배기의 각 분기홀 번호를 나타낸다.

Fig. 3은 기존 분배기의 내부유동을 CFD로 해석한 결과이다. 관으로부터 유입된 유체는 기상과 액상 냉매를 혼합하기 위한 소켓을 통과한다. 소켓을 통과한 냉매는 균일한 분배를 위한 원뿔에 의해 퍼지게 되고 각 분기홀 입구부로 이동하게 된다. 하지만 원뿔 기저부(Base area) 형상의 영향으로 분기홀로 유입되지 못한 유체는 입구부 벽면에 충돌한 후 상대

Table 1 Condition for CFD analysis of current distributor

	Water	Nitrogen
Inlet Velocity, m/s	0.7	5.56
Volume Ratio, -	99.1	0.9
Temperature, °C	25	25

Fig. 1 Assembly and internal structure of distributor

Fig. 2 Hole number of distributor

Fig. 3 CFD result of the current distributor

적으로 저압인 양쪽 모서리 부분으로 이동하게 된다. 이 유체는 소켓을 통해 유입되는 냉매의 힘에 의해 다시 분기홀 입구부로 유입된다. 이러한 현상에 의해 분배기 내부 양쪽 모서리에서는 해석결과와 같은 와류(Wake)가 발생된다. 이 와류는 소켓을 통해 각 분기홀로 유입되는 유체의 이동을 방해하여 냉매분배의 불균일을 초래함은 물론 압력손실의 원인이 된다. 또한 이 압력손실도 냉매의 건도를 증가시켜 냉매분배 불균일의 원인이 될 수 있다.

CFD 해석결과를 통해서 분배기 내부구조에 의한 냉매분배의 불균일성 문제를 해결하기 위해서는 와류의 최소화, 소켓과 원뿔의 거리 조정 및 원뿔 기저부의 크기 변경에 의한 원뿔 각도의 조정으로 냉매 퍼짐성의 개선 등이 필요하다. 이러한 요소들을 토대로 분배기 내부형상을 개선하여 냉매가 균일하게 분배될 수 있도록 설계를 하였다.

Fig. 4는 기존 분배기와 신규로 설계된 분배기 2종 (Mod. #1, Mod. #2)의 내부구조를 나타낸 것이다. 첫

Fig. 4 Internal structure of the current and two new distributors

번째 개선 분배기 Mod. #1은 소켓과 원뿔의 거리를 기존 분배기보다 가깝게 하고 원뿔 아래의 기저부를 제거한 것이 특징이다. 이를 통하여 소켓을 통과한 냉매가 사방으로 퍼지는 효과의 증대로 분배성능의 증가를 꾀하였고 원뿔 기저부를 제거함으로써 냉매가 기저부 각도에 의해 분기홀로의 유입이 어려운 것을 방지하였다. 두 번째 개선 분배기 Mod. #2는 소켓과 원뿔의 거리를 Mod. #1 보다 더 가깝게 하였고 Mod. #1처럼 원뿔의 기저부를 제거한 것이 특징이다. 이는 Mod. #1과 같은 효과 외에 양쪽 모서리의 공동부를 최소화함으로써 와류 발생영역을 최대한 억제하기 위한 것이다.

Fig. 5의 (a), (b), (c)는 CFD 해석결과로 기존 분배기와 신규 분배기에서 각 분기홀로 분배되는 기체와 액체의 분배비율이다. Fig. 5의 각 분기홀로 분배되는 액체와 기체의 분배율에서 알 수 있는 것과 같이 신규 분배기 Mod. #2의 분배가 가장 균일하여 성능이 우수한 것을 예상할 수 있다.

Fig. 6은 각 분배기의 분배성능을 비교하기 위해 Fig. 5의 각 분기홀의 물과 공기의 분배량을 표준편차로 나타내었다. Fig. 6에 나타나는 것과 같이 Mod. #2의 표준편차가 가장 작아 분배성능이 상당히 개선되는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 CFD results of the distribution performance

Fig. 6 Standard deviation comparison of each distributor

3. 분배 실험

기존 분배기와 개선 분배기 2종에 대하여 분배 성능 실험을 실시하였다. 실험을 위해 제작된 기존 분배기와 개선 분배기 2종의 형상과 크기를 Table 2에 나타내었다. 개선 분배기의 높이와 폭은 기존 분배기의 높이와 폭과 비교하여 나타내었다. 분배기의 성능 시험은 Yoshioka et al.²⁾가 제시한 방법 중 하나인 물-질소를 작동유체로 사용하여 실시하였다.

Fig. 7은 분배기의 성능시험을 위한 실험장치를 나타낸 것이다. 실험장치는 분배기(1), 물이 담기는 용기(2) 14개, 분배기로 가는 물의 유로 개폐를 위한 볼 밸브(3), 물을 바이패스 시키기 위한 볼 밸브(4), 질소 개폐를 위한 볼 밸브(5), 물의 유량을 측정하기 위한 유량계(6)(Dwyer사 0.06~0.42m³/hr, 정도 ±3%),

Table 2 Current and two new distributors

Distributors	Current	Mod #1	Mod #2
Figure
Height, mm	H	0.74H	0.61H
Diameter, mm	D	0.85D	0.88D
Volume, %	100	58	52

1. Distributor 2. PET bottle 3. 4. 5. Ball valve 6. Water flow meter 7. Air flow meter 8. Water pump 9. Nitrogen gas tank 10. Water bath

Fig. 7 Distributor performance test apparatus

질소의 유량을 측정하기 위한 공기유량계(7)(Dwyer사 0.0036 ~6m³/hr, 정도 ±5%), 물 공급을 위한 기어펌프(8)(Scott사, 최대 2400rpm, 0.25kW), 질소탱크(9), 수조(10) 으로 구성되었다.

실험은 다음과 같은 방법으로 진행하였다. 먼저 3번 볼 밸브는 닫고, 4번 볼 밸브를 열고, 기어펌프를 작동시켜 물을 수조로 전부 바이패스 시킨 후 유량

계를 실험조건의 유량으로 조절을 한다. 계속하여 질소탱크를 열고, 5번 볼 밸브를 열어 질소를 흘리며 공기유량계를 이용하여 실험조건의 유량으로 조절을 한다. 유량계로 물과 질소의 필요 유량이 조절되고 나면 동시에 4번 볼 밸브를 닫고, 3번 볼 밸브를 연다. 그러면 물-질소의 2상류가 분배기를 통해 분배가 되고, 분배기 각 분지관에 연결된 용기에 물이 담기게 된다. 1분이 지난 후, 각 용기에 담긴 물의 양을 저울(CAS사, 최대측정 2kg, 최소측정 1g, 정밀도 0.0005)로 측정하여 분배기의 분배성능을 평가하였다. 물의 양은 실험 전에 비어있는 용기의 질량을 측정하고, 실험 후 물이 담긴 용기의 질량을 측정함으로써 분배된 물만의 질량을 계산할 수 있었다.

분배기의 분배성능 시험에서 작동유체로 물-질소를 사용할 때 질소의 밀도가 실제 공조기에서 사용되는 압력조건에서 R410A의 기상 냉매의 밀도 보다 30배 이상 작음으로 2상 냉매의 유동패턴이 달라진다. 따라서 유동패턴을 최대한 유사하게 가져가기 위해서 물-질소의 체적비 α 를 R410A의 입구 건도를 0.2로 가정했을 때의 체적비와 일치시켰다. 체적비는 다음의 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = Q_{r,vol,g} / (Q_{r,vol,g} + Q_{r,vol,l}) \quad (1)$$

$$Q_{r,vol,g} = m_{r,g} / \rho_{r,g} \quad (2)$$

$$m_{r,g} = m_{r,tot} \cdot x \quad (3)$$

$$Q_{r,vol,l} = m_{r,l} / \rho_{r,l} \quad (4)$$

$$m_{r,l} = m_{r,tot} (1 - x) \quad (5)$$

$$m_{r,tot} = m_{r,g} + m_{r,l} \quad (6)$$

위의 식에서 α 는 체적비, $Q_{r,vol,g}$ 는 기상 냉매의 체적, $Q_{r,vol,l}$ 는 액상 냉매의 체적, $m_{r,g}$ 는 기상 냉매의 질량, $m_{r,l}$ 는 액상 냉매의 질량, $m_{r,tot}$ 은 냉매의 총질량, $\rho_{r,g}$ 는 기상 냉매의 밀도, $\rho_{r,l}$ 는 액상 냉매의 밀도, x 는 건도를 나타낸다.

물과 액상 R410A의 밀도차는 질소와 기상 R410A의 밀도차에 비해 극히 적음으로 물의 질량유량이 액상 R410A의 질량유량과 같다고 가정하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_w = m_{r,l} \quad (7)$$

Fig. 8 Experimental results of the distribution performance

$$m_n = Q_{n,vol} \rho_n \quad (8)$$

$$Q_{n,vol} = Q_{w,vol} \cdot \alpha / (1 - \alpha) \quad (9)$$

$$Q_{w,vol} = m_w / \rho_w \quad (10)$$

위의 식에서 m_w 는 물의 질량, m_n 는 질소의 질량, $Q_{n,vol}$ 는 질소의 체적, $Q_{w,vol}$ 는 물의 체적, ρ_n 는 질소의 밀도, ρ_w 는 물의 밀도를 나타낸다.

Fig. 8의 (a), (b), (c)는 240, 330, 420kg/hr의 유량 조건에서 측정된 기존 분배기와 개선 분배기 각 분기홀에서 물의 질량을 나타낸 것이다. 기존 분배기인 (a)는 분기홀 7, 8, 9번의 분배량이 많은 것을 알 수 있다. 이는 굽힘부에 의한 물의 쓸림을 최소화 하기 위해 수직 연결배관의 길이를 연결배관 내경의 20배 이상으로 하였지만, 물의 쓸림에 의한 영향이 어느 정도 작용한 것으로 생각된다. 개선 분배기 Mod. #1은 기존 분배기 (a)보다 분배성능이 개선된 것을 알 수가 있으나 분기홀 6, 7, 8번의 분배량이 많은 것을 알 수가 있다. 개선 분배기 Mod. #2는 Mod. #1보다 균일한 분배성능을 보이는 것을 알 수가 있다. 이는 Fig. 4에서 나타내는 바와 같이 분배기 내부의 원뿔이 소켓으로부터 들어오는 유체 입구부와 많이 붙어있으며 각도 또한 완만하여 유체를 사방으로 고루 퍼지게 하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 9는 기존 분배기 및 개선 분배기 Mod. #1과 Mod. #2의 분배성능 실험결과의 표준편차이다. 개선 분배기 Mod. #2가 각 유량조건에서 가장 표준편차가 작은 것을 알 수가 있고 우수한 성능의 분배기인 것을 알 수 있다. 또한 Mod. #2의 경우 냉매유량이 증가하는 경우 표준편차가 더욱 감소하는 경향을 나타낸다.

Fig. 9 Standard deviation comparison of each distributor

4. 결 론

공조기용 증발 열교환기의 성능을 좌우하는 요소 기기인 냉매 분배기의 분배성능 개선을 위한 연구를 수행하였다.

CFD 해석에 의한 분배기 내부유동의 특성해석을 통하여 분배기 입구의 소켓에서 원뿔까지의 거리, 원뿔의 각도, 원뿔의 기저부가 각 분기홀로의 냉매분배에 중요한 인자임을 알 수 있었다.

내부유동 해석결과를 적용하여 내부의 형태가 개선된 개선 분배기와 기존 분배기의 물-질소 분배성능 실험을 통하여 개선 분배기의 분배성능이 기존 분배기의 분배성능보다 우수한 것을 알 수가 있었다. 이를 통하여 도출된 분배기의 분배성능에 영향을 미치는 인자가 바람직함을 알 수 있었다.

후 기

이 논문의 일부는 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음.

References

1. Y. Hwang, "The Optimum Design of Heat Pump with Refrigerant Distributor", Proceedings of the SAREK, 2000, pp. 93-99.

2. S. Yoshioka, H. Kim, and K. Kasai, "Performance Evaluation and Optimization of a Refrigerant Distributor for Air Conditioner", J. of Thermal Science and Technology, Vol. 3, 2008, pp. 68-77.
3. A. Jiao and S. Baek, "Effects of Distributor Configuration on Flow Maldistribution in Plate-Fin Heat Exchangers", Heat Transfer Engineering, Vol. 26, 2005, pp. 19-25.
4. J. K. Lee and S. Y. Lee, "Distribution of Two-Phase Annular Flow at Header-Channel Junctions", Experimental Thermal Fluid Science, Vol. 28, 2004, pp. 217-222.
5. G. Li, S. Frankel, J. E. Braun and E. A. Groll, "Application of CFD Models to Two-Phase Flow in Refrigeration Distributors", HVAC&R Res., Vol. 11, No. 1, 2005, pp. 45-62.
6. S. Vist and J. Pettersen, "Two-Phase Flow Distribution in Compact Heat Exchanger Manifolds", Experimental Thermal Fluid Science, Vol. 28, 2004, pp. 209-215.
7. C. D. Kim, L. W. Nam and J. Lee, "Effect on Refrigerant Distribution Characteristics T-type Distributor on the Superheat Evaporator", Proceedings of the SAREK winter annual conference, 2003, pp. 336-342.
8. S. J. Tae and K. Cho, "Effect of Parameters on the Two-Phase Flow Distribution Characteristics of Refrigerants in a Horizontal T-Junction", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 1, 2006, pp. 31-37.