

자동차 냉/난방 성능 향상을 위한 공기조화 덕트의 기류해석

주재우[†], 이기돈, 허만웅, 김광용*,
박준규**, 윤정환**, 김홍빈***

인하대학교 기계공학과, *인하대학교 기계공학부, **현대자동차, ***현대엔지니어링

Aerodynamic Analysis of Automotive HVAC Duct for Enhancement of Cooling/Heating Performance

Jae-Woo Ju[†], Ki-Don Lee, Man-Woong Heo, Kwang-Yong Kim*,
June-Kyu Park**, Jung-Hwan Yun**, Hong-Bin Kim***

Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Inha University, 253 Yonghyun-dong Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

*School of Mechanical Engineering, Inha University, 253 Yonghyun-dong Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

**Hyundai-Kia Corporate Research and Development Division, 772-1 Jangduk-dong, Hwaseong-Si, Gyeonggi-Do 445-706, Korea

***Hyundai-NGV, 314 dong, Seoul National University, Kwanak-ro, Kwanak-gu, Seoul 151-742, Korea

(Received September 21, 2011; revision received November 17, 2011)

ABSTRACT: In the present work, numerical analyses of air flow in HVAC duct have been carried out for enhancement of cooling/heating performance. For the analyses, three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes equations have been solved with the shear stress transport turbulence model. The numerical results were validated in comparison with the experimental data. Based on the numerical results, the HVAC duct was designed to reduce the pressure loss. The modified duct geometry shows largely reduced pressure drop in comparison with the reference geometry. And, through modified duct shape, the performance of air conditioning has been enhanced.

Key words: HVAC duct(공기조화 덕트), RANS analysis(RANS 해석), Vortex(와류), CFD(전산유체역학), Pressure drop(압력손실)

기 호 설 명

A : 덕트 단면
D : 덕트 입구 수력직경 [m]
LC : 좌측 중간 덕트
LH : 좌측 덕트
RC : 우측 중간 덕트

RH : 우측 덕트
LH : 좌측 덕트
X, Y, Z : 좌표 축

1. 서 론

최근 자동차산업에서 차량의 상품성은 주행성능과 더불어 인간의 감성을 위한 쾌적성에 의해서도 평가되고 있는 상황이다. 따라서 최근 생산되는 자동차들에서는 자동차 실내 공기조화를 위한 HVAC (Heating Ventilating Air Conditioning) 시스템의

[†] Corresponding author

Tel.: +82-32-860-7317; fax: +82-32-868-1716

E-mail address: jjw529@naver.com

역할이 점차 증가하고 있고, 설계 단계부터 공기조화 시스템의 성능을 향상시키기 위한 연구가 수행되어지고 있다.

자동차 공기조화 장치의 유동특성 분석을 통한 실내 환경의 쾌적성 향상을 위한 연구들이 그간 진행되어 왔으나 공기조화 덕트에 관한 연구는 주변 장치들에 의한 공간적 제약 때문에 제한된 연구만이 수행되었다. Lee and Yoo⁽¹⁾은 수치해석에 의한 차량용 HVAC 시스템의 성능 분석을 통하여 반일체형(semi-center type) 공조 시스템에 대한 성능최적화를 수행하였고, Lyu et al.⁽²⁾은 디젤엔진의 공기청정기 내의 공기흡입 저항을 최소화하기 위한 유동 분석을 통하여 내부 형상 구조를 변경하여 기준형상 대비 압력손실을 약 40% 감소시켰다. 또한, Lee et al.⁽³⁾은 차량 실내 환경에 관한 수치해석적 연구를 수행하여 냉방 공기량과 출구크기에 따른 차량실내 모사를 통한 기류분포 및 온도분포를 나타내어 차량 실내 공조환경의 수치해석 방법을 정리하고 그에 따른 예측 기법을 제시하였다. Kim et al.⁽⁴⁾은 승객의 쾌적성을 평가하기 위하여 내기 모드에서의 자동차 내부 유동특성 연구를 통한 유동장 내 각 단면에 대한 속도를 정량적으로 가시화 하였다. Han⁽⁵⁾은 수치해석적 기법을 사용하여 차량 제상 덕트 및 공조 덕트의 성능을 평가하여 덕트 내에서 발생하는 와류의 강도가 풍량 배분율을 결정하는 데 중요한 인자로 작용하고 있음을 확인하였다. Jeong et al.⁽⁶⁾은 HVAC 덕트 내의 3차원 난류유동에 관한 수치해석적 연구를 통하여 덕트 내의 속도, 압력분포, 유출유량 및 재순환 영역 등을 해석하여 A/C 덕트 내를 흐르는 유동특성을 연구하였고 A/C 덕트 설계에 도움을 줄 수 있는 기초설계 데이터를 획득하였다. Lee and Park⁽⁷⁾은 에어벤트 풍향 설계인자 영향도 분석을 수행하여 덕트 내부 형상이 풍향성에 가장 큰 영향을 미치는 인자인 것을 밝혀내었다.

본 연구에서는 차량용 공기조화 덕트 내부 유동장에 대하여 삼차원 수치해석을 수행하였고 이를 통해 덕트 성능에 영향을 미치는 요인을 분석하여, 개선된 덕트의 형상을 설계하였으며, 실험을 통해 개선된 덕트가 자동차 실내 냉방성능에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 수치해석

Fig. 1은 이번 연구에서 고려한 자동차 내부에 설

치된 공기조화 시스템을 보여준다. 송풍기를 통과한 공기가 차량 실내로 유입되기 이전까지의 영역에 대해, 공기조화 덕트 내부의 유동 현상을 분석하였다. 본 연구에서는 H사의 자동차에 설치된 공기조화 시스템을 해석 대상으로 하였다. Fig. 2는 공기조화 덕트 중 일부인 왼쪽 덕트에 대한 계산영역을 보여준다. 그림과 같이 출구에는 풍향을 조절하는 날개(Guide Vane)가 있고 덕트는 B-pillar쪽으로 공기를 유입시키는 출구를 포함하고 있다.

Fig. 3은 계산 영역을 위해 ICEM CFD로 구성된 격자계를 보여준다. 주 영역은 비정렬사면체 격자계로 구성하였으며, 계산의 정확성을 위해 벽면 근처에는 육면체 격자를 조밀하게 구성하였다. 수치해석을 위해 삼차원 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 기반으로 한 상용코드인 ANSYS CFX 11.0⁽⁸⁾을 사용하였다.

작동유체는 공기이며, 계산을 위한 경계조건으로는 입구에는 질량유량 조건을 적용하고 출구에는 대기압 조건을 부여하였다. 모든 벽면에는 점착조건

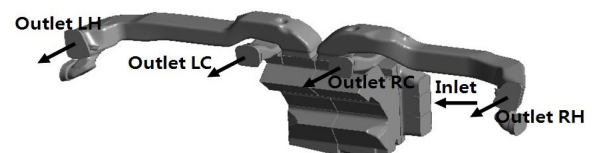


Fig. 1 Geometry of HVAC system.

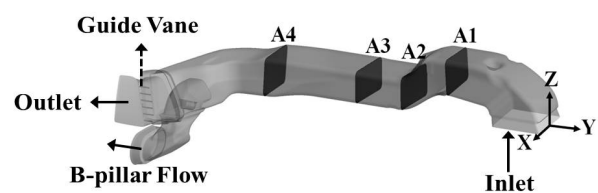


Fig. 2 Computation domain in left duct.

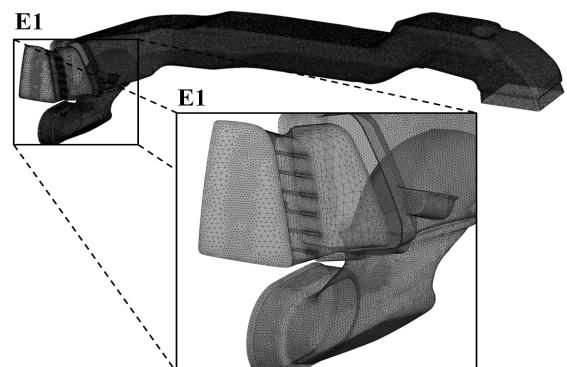


Fig. 3 Grid system of the computation domain.

을 적용하였다. 난류해석을 위해서 SST(Shear Stress Transport) $k-\omega$ 난류모델을 사용하였다. 일반적으로 SST $k-\omega$ 난류모델은 역압력 구배로 인한 유동박리의 예측에 매우 효과적이고, 난류열전달 해석에서도 그 정확성이 뛰어나다고 알려져 있다.⁽⁹⁾ SST 모델은 $k-\omega$ 모델과 $k-\epsilon$ 모델의 장점만을 취한 모델로서 벽 근처 영역에는 $k-\omega$ 모델을 사용하고, $k-\epsilon$ 모델은 벽근처를 제외한 영역에서 사용된다. 한편 해석을위해 Intel Xeon CPU E5420(8CPUs)를 사용하여 약 10시간이 소요 되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 4는 공기조화 덕트를 대상으로 격자에 대한 의존성을 배제시키기 위한 격자의존성 시험결과를 보여준다. 격자의존성 시험은 격자수 240,000개부터 1,240,000개 사이에서 수행하였으며, 그림에 나타낸 바와 같은 결과로부터 약 780,000개의 격자점들로 구성된 격자계를 최적의 격자계로 결정하였다.

수치해석 결과의 타당성을 입증하기 위해 각 덕트로 유입되는 유량에 대한 계산결과를 실험값과 비교하여 Table 1에 나타내었다. 실험결과는 덕트로

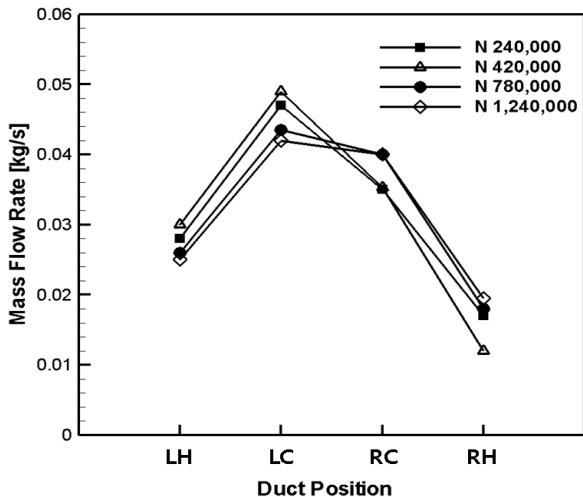


Fig. 4 Grid dependency test.

Table 1 Comparison between predicted and measured mass flow rates at outlet of each ducts[kg/s]

	LH	LC	RC	RH
Experimental data	0.030	0.032	0.034	0.031
Numerical results	0.028	0.035	0.033	0.031

유입되는 유량이 양쪽보다 중앙에 놓인 덕트들로 더 많이 유입되는 경향을 보였으며, 수치해석 결과는 실험치와 비교적 잘 일치하는 유량 배분을 보여주었다.

본 연구에서는 자동차 내부 공조성능의 개선을 위한 공조 덕트의 설계를 위한 수치적 연구를 수행하였다. 수치해석을 통해 기존 덕트 내에서 압력손실을 발생시키는 영역들을 구명하였고, 이러한 결과를 토대로 개선된 덕트를 설계하였으며, 실험을 통해 개선된 덕트의 성능을 검증하였다.

Fig. 5는 기준형상에 대한 덕트 내부 유동장을 보여주며, Fig. 5(a)~Fig. 5(e)는 덕트 내부에서 와류가 발생하는 각 부분을 확대하여 나타낸 그림들이

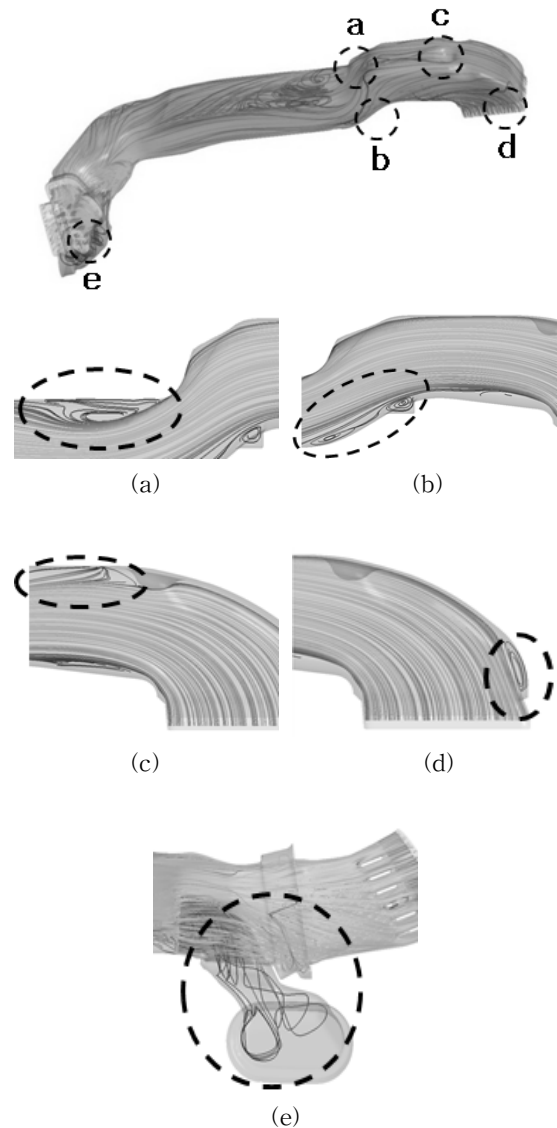


Fig. 5 Streamlines in each part of the reference duct.

다. 일반적으로 덕트 내부 유동장에서 발생하는 와류는 압력손실을 증가시켜 냉난방 성능을 감소시키는 요인으로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 자동차 내부 냉난방 성능의 향상을 위해, 이러한 와류 발생을 억제하여 압력손실을 줄일 수 있는 차량용 공기조화 덕트를 설계하기 위한 연구를 수행하였다.

Fig. 6에서는 덕트의 기준형상과 개선형상을 비교하여 나타내었다. 개선된 덕트는 기준형상에서 나타난(Fig. 5) 와류의 발생을 최대한 억제시킬 수 있도록 설계하였다. 또한, 차량용 공기조화 덕트는 그 장착에 있어 클러스터, 에어백 및 그 밖의 여러 부품들의 장착범위를 고려해야한다. 따라서 개선 덕트는 주변부품들을 고려하여 최대한 굴곡을 줄일 수 있게 설계하였으며, B-Pillar로 향하는 공조 덕트를 제거하도록 하였다. B-Pillar 공조 덕트는 차량 측면 프레임 내부에서 냉/난방을 위해 차량실내로 공기를 주입시킬 수 있는 장치이지만, 차량실내온도 제어에 대한 영향이 크지 않고 덕트 압력손실을 매우 증가시킨다. 수치해석을 통해, B-Pillar로 향하는 공조 덕트를 제거함으로써 약 51% 만큼 압력손실 값을 줄일 수 있었다.

Fig. 7~Fig. 10은 Fig. 2에 표시된 각 단면들(A1~A4)에서 기준 덕트와 개선된 덕트의 유동장을 비교해 준다. 각 단면들(A1, A2, A3 그리고 A4)은 좌표축을 기준으로 $-Y/D$ 가 각각 2, 3, 4 그리고 6의 위치에 놓인다. 여기서 D 는 덕트 입구의 수력직경을 나타낸다. Fig. 7는 A1의 단면에서의 유동장을

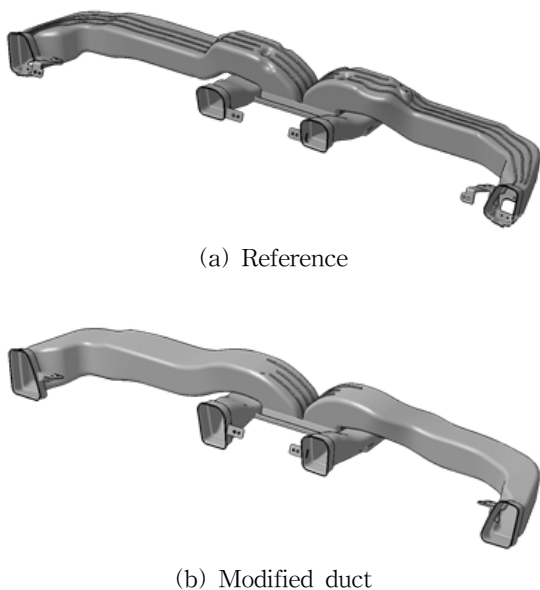


Fig. 6 Reference and modified duct shapes.

보여준다. 기준 덕트의 경우 점선으로 표시된 영역에 유동을 방해하는 와류가 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 개선된 덕트에서는 이것이 현저히 줄어든 것을 확인할 수 있었다. A2 단면에서 보이는 유동장은 Fig. 8에 나타내었다. 기준 덕트의 경우 그림에서 보는 것과 같이 왼쪽 아래 영역에 와류가 발생하였으며, 개선된 덕트에서는 와류발생이 억제된 것을 확인할 수 있었다. Fig. 9는 A3 단면에서의 유동장을 보여준다. A3 단면의 경우, 기준덕트에서는 전체적으로 매우 복잡한 유동장이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 굴곡진 덕트의 형상에 의해 발생하는 것으로, 개선 덕트는 굴곡을 최대한 완화시키도록 설계하여 와류 발생을 줄일 수 있게 하였다. 그러나 아랫부분에 새로운 와류가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. A4 단면에서의 유동장을 Fig. 10에 비교하여 나타내었다. 이 단면에서는 눈에 띄는 와류가 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 개선형상의 경우는 전체적으로 기준형상보다 큰 단면적을 갖도록 하고 덕트 주변부품들의 위치

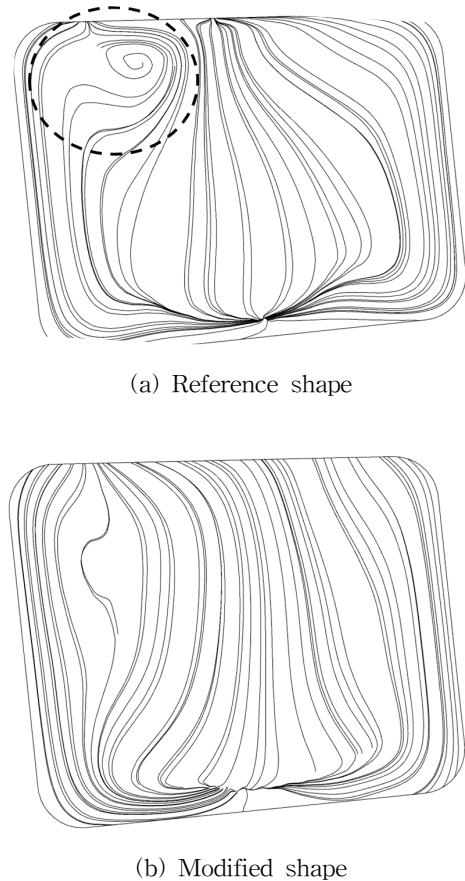
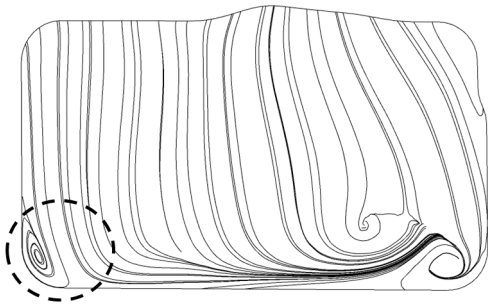
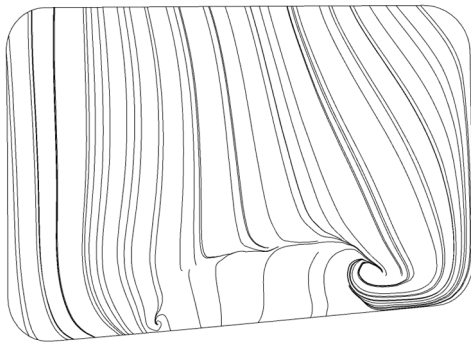


Fig. 7 Streamlines in reference and modified ducts on A1 plane($-Y/D = 2$).

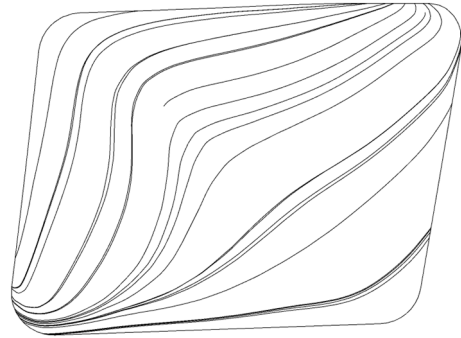


(a) Reference shape

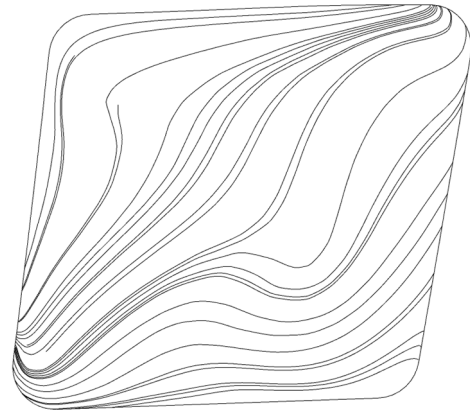


(b) Modified shape

Fig. 8 Streamlines in reference and modified ducts on A2 plane(-Y/D = 3).

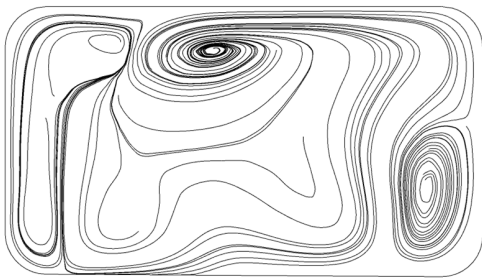


(a) Reference shape

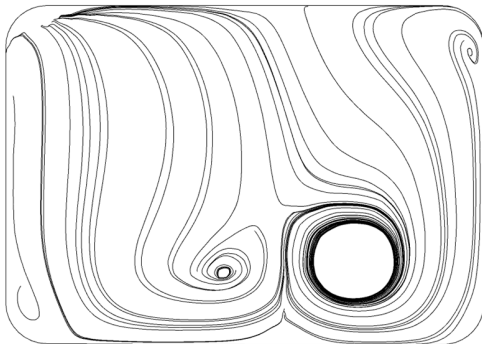


(b) Modified shape

Fig. 10 Streamlines in reference and modified ducts on A4 plane(-Y/D = 6).



(a) Reference shape



(b) Modified shape

Fig. 9 Streamlines in reference and modified ducts on A3 plane(-Y/D = 4).

를 고려하여 설계하도록 하였다.

본 연구를 통해 설계된 개선형상은 기준형상과 비교하여 수치계산치 상에서 69.9% 만큼 압력손실을 줄일 수 있었다. 이는 기준형상이 갖는 큰 굴곡을 완화시키고 단면적 변화를 통해 와류 발생을 억제시킬 수 있었기 때문으로 사료된다.

기준 덕트와 개선 덕트를 설치한 실차 시험을 수행하여 차량 실내 온도 변화를 측정하였다. Table 2는 기준 덕트와 개선 덕트를 설치하였을 경우 차량 실내 내기 순환 환경에서 실내 온도를 60℃에서 목표 도달 온도인 22℃까지 냉방하는데 소요되는 시간을 비교하였다. 기준 덕트를 설치하였을 경우는 목표온도까지 도달하는데 60분이 소요되었으며, 개선 덕트를 설치할 경우는 목표온도까지 도달하는데 52분이 소요되었다. 결과적으로 기준 덕트를 설치할 경우와 비교하여 8분을 단축시킬 수 있었다.

Fig. 11은 시간 변화에 따른 차량 실내 평균온도 변화를 보여준다. 개선 덕트는 기준 덕트에 비해 차량 실내 온도를 빠르게 제어할 수 있다는 것을 확

Table 2 Driving time to reach the target temperature

Interior averaged temperature	Driving time(min.)	
	Reference shape	Modified shape
25	36	32
23	50	44
22	60	52

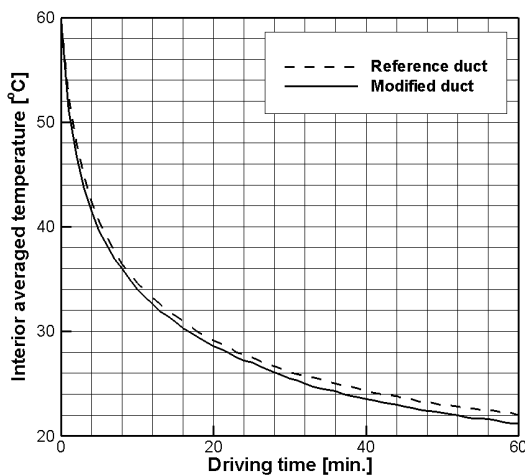


Fig. 11 Variation of interior averaged temperature of a car.

인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 차량용 공기조화 덕트 내부의 유동장을 수치해석하여, 냉난방 성능 향상을 위해 덕트 형상을 개선하였으며, 실차 시험을 통해 개선된 덕트의 성능을 기존 덕트와 비교해 검증하였다. 덕트 내부의 유동장을 삼차원 Reynolds averaged Navier-Stokes 방정식을 통해 해석하였으며, 실험값과의 비교를 통하여 수치해석결과의 타당성을 입증하였다. 공기조화 덕트 내부에서 발생하는 와류를 억제시키기 위해 덕트 형상의 설계 변경을 수행하였으며, 성능향상을 위해 변경된 새로운 덕트 형상을 통해 기존 형상에 비해 압력손실을 69.9% 만큼 줄일 수 있었다. 개선된 공기조화 덕트는 차량 실내의 온도를 60°C에서 목표온도인 22°C까지 도달하는

데 소요되는 시간을 기존 공기조화 덕트 형상과 비교해 8분 단축시킬 수 있었다.

후 기

본 연구는 현대자동차 차량개발 2센터 의장설계 2팀과 현대엔지니어링의 과제지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, D. W. and Yoo, S. Y., 2004, A numerical study for performance of automotive HVAC system, SAREK, Vol. 16, No. 11, pp. 1084-1091.
2. Lyu, M. S., Ku, Y. G., Kim, K. H., and Maeng, J. S., 1997, Study of pressure and flow in the air-cleaner of commercial vehicle, SAE 97370048.
3. Lee, K. B., Jean, H. H., and Ko, S. B., 2006, A Numerical Study on Automobile Interior Environment, SAREK summer conference, pp. 325-330.
4. Kim, Y. K., Yang, J. S., Kim, K. C., and Ji, H. S., 2010, A study on flow characteristic inside passenger's compartment under recirculation cool vent mode using CFX, The Korean Society of Visualization, Vol. 8, No. 1, pp. 25-30.
5. Han, D. G., 2002, Performance validation of automotive defroster and ventilation duct by CFD Analysis, SAE symposium.
6. Jeong, S. J., Ryu, S. Y., and Kim, T. H., 2006, Numerical analysis of three dimensional turbulent flow in a HVAC duct, SAE Paper summer conference, pp. 325-330.
7. Lee, H. D. and Park, J. H., 2009, Sensitivity analysis of design parameter for air vent airflow, SAE conference, pp. 2172-2178.
8. ANSYS CFX-11.0, 2006, ANSYS CFX-Solver Theory Guide, ANSYS Inc.
9. Bardina J. E., Huang P. G., and Coakley T., 1997, Turbulence modeling validation, AIAA Journal, pp. 1997-2121.