

수치모델을 이용한 자동차 헤드램프 내부의 습기발생 현상 해석 연구

논 문
59-5-8

The Study of Analysis on Water Vapor Condensation on Automobile Headlamp Using the Numerical Model

정 영 국* · 이 주 한** · 오 상 준** · 서 태 범†
(Young-Guk Jung · Ju-Han Lee · Sang-June Oh · Tae-Beom Seo)

Abstract - Increasing styling features for automotive headlamps speed up the focus of understanding condensation at inner surfaces. Water vapor condensation on the inside surface of the headlamp lens is an essential factor that affects secure front view and headlamp life. One of the headlamps of automobile which is one of the most popular in Korea was chosen for the present analysis. In the basis of the experimental data of automobile given by a manufacturer, boundary conditions were defined and free convection of the air inside the headlamp and radiation from the bulb to the other surfaces are considered. As a result, temperature distribution of the inside surface of the headlamp lens are approximately the same as the experimental result.

Key Words : Automobile headlamp, Condensation, Free convection, Radiation, CFD

1. 서 론

최근 자동차의 디자인이 발전함에 따라 야간 주행 시 전방의 시야를 확보하기 위한 헤드램프는 그 기능뿐 아니라 자동차 전면부 이미지를 좌우할 수 있는 디자인 또한 중요한 개발요소로서 대두되고 있다. 이러한 소비자의 디자인 욕구를 충족시키기 위해 낮아진 차체와 곡선이 강조된 부드러운 형상이 강조되면서 헤드램프의 형상 또한 복잡한 내부 구조를 가지게 되었고, 이에 따라 기능적인 측면에서 신뢰성 있는 성능을 만족시키기가 어려워졌다. 특히 반사기 손상이나 배광성능 저하 등을 초래하는 헤드램프 내부의 습기발생 현상은 자동차의 주요부품인 헤드램프를 설계하는 과정에서 고질적인 문제로 끊임없이 제기되고 있다.[1]

Semi-sealed type 헤드램프는 내부에서 발생하는 열로 인한 플라스틱 재질의 열 변형을 방지해주는 vent-hole이 설치되어 있다.[2] 이러한 vent-hole을 통해 대기 중의 수증기 유입이 발생하고, 우천(눈) 주행 시 비(눈)로 인해 헤드램프 렌즈 내면이 급속히 냉각되는 등의 이유로 렌즈 안팎의 온도 차에 의해 렌즈 내면에 습기가 발생한다.

Preihs[3]는 temperature map을 기반으로 헤드램프 내부의 이슬점에 대한 분석을 수행했다. 헤드램프 내부의 온도 분포, 상대습도, 이슬점을 수치해석 한 결과와 헤드램프 내

외부의 온도를 측정 한 결과를 비교, 분석하여 이슬 발생 영역을 기하학적으로 나타냈다. Langebach[4]는 헤드램프 렌즈 외부의 온도분포와 압력변화를 측정하는 실험을 통해, 대류·복사가 결합된 열전달에 영향을 받는 렌즈 외부에서의 hot spot의 온도와 위치에 대해 분석했다. 헤드램프 반사판의 방사계수가 렌즈에서의 방사성 열유속 밀도에 미치는 영향과 hot spot의 온도와 위치와의 상관관계를 밝혔다. Sousa[5]는 laser-Doppler 속도계와 열전대를 사용해서 헤드램프 내부의 벽 온도분포와 유체의 유동속도를 측정하는 실험을 수행했다. 그로 인해 헤드램프 캐비티 내부의 온도 계층을 파악하고, 헤드램프 상단부의 온도 집중을 해석했다. 또한 high-beam과 low-beam에서의 유속을 분석하여 두 개의 수직적인 vortex 유동의 형성을 설명했다.

이와 같은 선행연구들의 대부분이 정상 상태의 내부 열전달 분석에 머물러 있다. 그러나 실제 헤드램프 내부의 불안정한 외기조건들의 영향들을 고려해 볼 때, 기존 해석 결과는 습기 발생 문제에 대해 제한된 정보를 제공한다.

따라서 본 연구에서는 다양한 외기조건 및 운전조건에 따른 헤드램프 내부에서의 온도분포 가시화를 통해 습기 발생 과정에서의 열·유동 해석을 수행했고, 수치해석을 검증할 수 있는 실험 조건으로서 헤드램프 단품에 대한 챔버 실험 조건을 사용했다.

또한 습기 발생 현상을 명확히 규명하기 위해서는 2상 유동해석이 이루어져야 한다. 따라서 헤드램프의 열원, 유동, 형상에 대한 제한된 조건에서의 1차적인 열·유동 해석 연구를 통해 향후 수행될 2상 유동 해석의 기반을 마련하고자 한다.

* 준 회원 : 인하대 공대 기계공학과 석사과정

** 비 회원 : 인하대 공대 기계공학과 박사과정

† 교신저자, 비회원 : 인하대 기계공학과 정교수

E-mail : seotb@inha.ac.kr

접수일자 : 2009년 6월 4일

최종완료 : 2010년 4월 2일

2. 수치해석 방법

2.1 해석 모델

해석하고자 하는 헤드램프는 CATIA Version 5R 16 Tool을 이용하여 모델링 했다. 이 때 실제 형상을 최대한 사용하여 시뮬레이션 시 도출된 결과가 충분한 신뢰성을 가지도록 했고, 효율적인 격자 생성과 계산의 정확성을 높이기 위하여 해석에 불필요한 부분(브라켓, 벤트호스, 전원인가소켓)은 제거한 형상을 그림 1(a)에 나타냈다. 또한 그림 1(b)의 원으로 표시된 공기의 유입부는 헤드램프에서 유일하게 내부와 외부의 공기순환을 연결해주는 부분으로 전체적인 해석에 있어 중요한 부분이 된다.

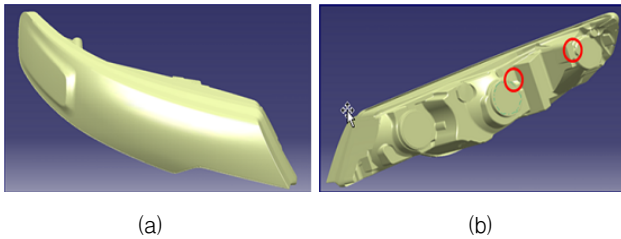


그림 1 헤드램프의 전면부와 후면부
Fig. 1 Front and back side of headlamp

2.2 격자 생성 및 최적화

모델링의 다음 단계로서, 시뮬레이션을 위한 전 단계인 격자 생성을 수행했다. 그림 2(a)를 보면 알 수 있듯이, 본 연구에서 사용한 격자는 Polyhedral mesh로서 Tetrahedral mesh와 Hexahedral mesh의 장점을 가져 계산의 신뢰성을 높이고 해의 빠른 수렴성과 복잡한 형상을 가능하도록 했다.

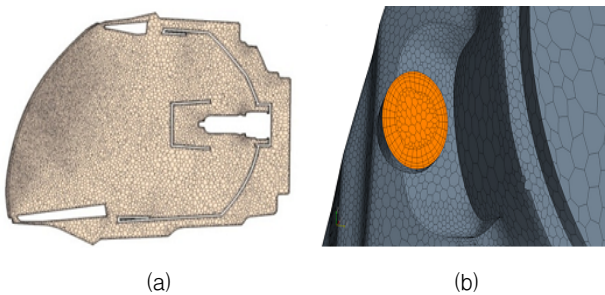


그림 2 향상된 격자 분포와 vent-hole 처리
Fig. 2 Polyhedral mesh and Vent hole Prism Layer

또한 헤드램프의 특성상 벽면 및 유체, 고체의 경계면에 서 일어나는 물리적 특성이 헤드램프 전체의 온도분포 및 유동에 큰 영향을 받음을 고려하여 Interface 및 벽면에 Prism Layer를 형성시켜 해석결과에 높은 신뢰도를 갖추었다.[6]

더불어 헤드램프 해석에서 중요한 부분인 vent-hole 부분의 격자수 증가와 layer형성을 통해 그림 2(b)와 같은 Vent-hole Prism Layer 처리를 수행했다.

2.3 경계 조건 및 지배 방정식

수치해석은 상용코드인 STAR-CCM+ 3.02에서 수행했으며 유한체적법 기반의 질량, 운동량, 에너지 보존 방정식에 기반을 둔 솔루션 알고리즘을 사용했다. 정상 층류 유동의 계산에는 Simple method를, 대류항 근사에는 1차 upwind differencing scheme를 사용했다.

본 연구에서 수행된 수치해석에 대한 boundary Condition은 표 1과 같다.

표 1 경계 조건

Table 1 Boundary condition

Inlet	Velocity, Temperature
Outlet	Pressure
Shear stress	No slip
Heat transfer coefficient	Engine room temperature, Ambient temperature
Wall temperature	Bulb surface temperature, Housing and lens surface temperature, Thermal conductivity of materials
Emissivity	Bulb
Reflectivity	Reflector, Bezel
Transmissivity	Lens

헤드램프 내부의 열유동 해석은 Simultaneous solution에 기반을 두며, 화학적 작용은 수치해석 시 고려하지 않았다. 본 연구에서 이용된 질량, 운동량, 에너지 방정식은 다음과 같다.

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = s_m$$

Momentum equation

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial t} + s_i$$

Energy Equation

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho H u_i + F_{h,i} - u_i \tau_{ij}) = \frac{\partial p}{\partial t} + s_i + s_h$$

헤드램프의 입구속도가 정차 시 0.01~0.02 m/s, 주행 시 0.5~1.5 m/s 정도로 평균적으로 봤을 때 내부유동에 대한 강제유동의 영향은 미약하다. 즉, 헤드램프 내의 한정된 공

간 안에서 Bulb의 열원은 자연대류를 유발하게 된다. Bulb 부근의 유체 온도가 상승하면서 밀도가 감소하고 이로 인한 부력의 작용으로 발생하는 자연대류의 영향이 헤드램프 내부유동에 지배적이기 때문에, 아래와 같은 부력에 관한 항이 고려되어야 한다.[7]

Buoyant force

$$s_i = g_i(\rho - \rho_o)$$

2.4 복합 열전달

복합 열전달 해석은 고체·유체의 경계에서 연속성을 유지하기 위해 고체·유체간의 열전달 해석을 하기 위한 것이다.[8] 헤드램프의 경우 상용코드를 이용하여 헤드램프 렌즈 내면과 헤드램프 내부 공기와의 경계면을 형성하고 이곳에서 발생하는 열전달 현상을 해석하기 위해 복합 열전달 (Conjugate Heat Transfer : CHT) Method를 사용하였다.

그림 3은 헤드램프 내부에서 복합 열전달이 발생하는 개략적인 형상을 보여주고 있다.

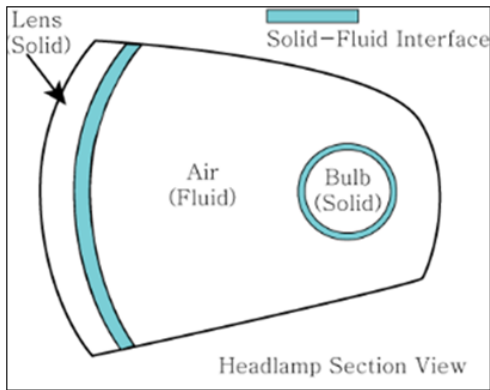


그림 3 고체와 유체 사이의 경계 형상
Fig. 3 Shape of a boundary between solid and fluid

2.5 복사 열전달

헤드램프 내의 bulb에서 발생하는 전기에너지는 대부분 복사 열전달의 형태로 방사된다. 특히 고온의 온도조건을 갖춘 bulb 같은 경우, 복사에 의한 열전달 특성 및 이에 따른 유체유동의 영향은 전체 시스템의 온도분포에 결정적인 역할을 하게 된다.[9] 본 연구에서는 복사 열전달의 해석을 위해 상용코드로 구현된 DTRM(Discrete Transfer Method)을 사용했다.[10]

DTRM은 복사 열전달 해석 영역 내의 한 표면에서 다른 표면까지의 대표적인 광선을 추적하면서 계산을 수행하고, 이를 통해 복사 열전달량을 계산할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 유속 측정

실차 실험에서는 헤드램프 vent-hole에서의 유속을 측정하고, 헤드램프 주요부분의 온도 측정을 수행하였다. 또한 챔버 내의 정차 상황과 트랙에서의 주행 상황을 재현한 조건을 사용하여 실험을 통해 수치해석 결과와 비교할 수 있도록 했다.

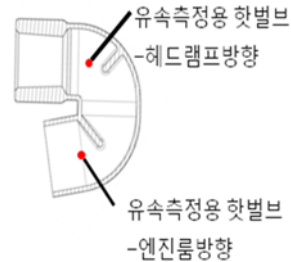


그림 4 Vent-hole 구조
Fig. 4 Vent-hole structure

그림 4는 vent-hole의 유속 측정 위치를 방향에 따라 두 부분으로 나타냈다. 측정 장치는 디지털 풍속계(Digital Anemometer)를 사용했다.

3.2 온도 측정

챔버 내에서의 헤드램프 외기 조건과 simulation 상에서의 외기조건을 일치시킨 후 헤드램프 내부의 온도를 측정하였다.

그림 5와 같이 각각의 Normal Beam, High Beam, Turn Signal Beam에서의 대표적인 온도 지점을 정하고, 열 유동이 활발하게 일어나지 못하는 헤드램프의 모서리 부분을 포함한 온도를 18개의 지점으로 나누어 K-type 열전대를 사용하여 측정했다. 열전대는 2.5%의 오차율을 가진다.

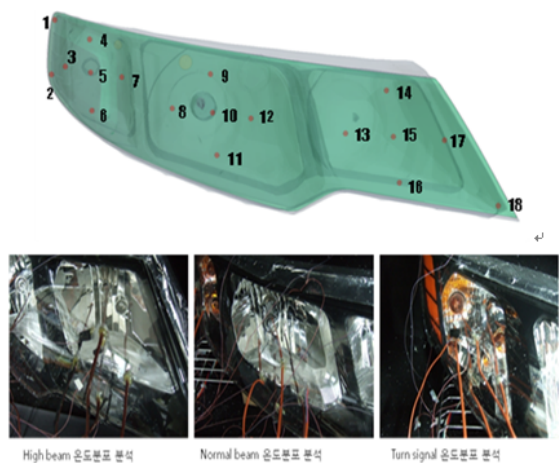


그림 5 열전대 위치
Fig. 5 Position of thermocouple4. 결과 및 고찰

4.1 연구 결과

Vent-hole에서의 유량은 정차 시 0.01 m/s 정도이다. 이러한 유입부에서 헤드램프 내의 유동은 강제대류의 영향보다는 자연대류의 영향을 주로 받는다. 그림 6(a)에서 전체적인 유동의 흐름을 보면 Bulb 주위에서 가열된 공기가 반사판을 따라 상승하면서 렌즈부분을 따라 아래방향으로 자연대류에 따른 순환흐름이 형성된다. 이러한 순환흐름은 그림 6(b)에서와 같이 상단부와 하단부의 온도 차이를 발생시키는 원인이 된다.[11] 전체적인 흐름을 보면 하단 모서리 부분은 유동이 활발하지 않아, 높은 습기 발생이 예상된다.

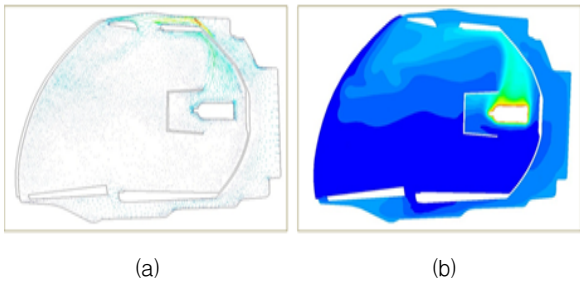


그림 6 단면부의 속도와 온도 분포
Fig. 6 Velocity and temperature distribution of a section

앞서 수행한 기본적인 열 유동, 온도 분포 해석을 바탕으로 변화하는 외기조건 및 점등조건을 그림 7에서와 같이 3 step으로 나누어 Transient 해석을 수행했다. 이 해석에는 Implicit unsteady 방법이 사용되었다. 이 방법은 헤드램프

내부의 대류, 복사 문제 및 시간에 따라 변화하는 경계조건 문제에 적합하다.

1 step에서는 모든 램프가 점등되어 전체적으로 높은 온도분포를 나타낸다. 특히 오른쪽의 High Beam 부분은 다른 부분에 비해 120°C 정도의 높은 온도를 보였다. 하지만 기본적으로 이전 section에서 분석했던 바와 같이 순환류에 따라 발생하는 윗부분과 아랫부분의 온도 차이의 경향성은 전체적으로 동일하게 나타났다.

2 step에서는 비가 내리는 외기조건을 조성하고, Normal Beam과 Turn Signal Beam만 점등하였다. 20°C의 물이 계속적으로 살수됨으로써, 전체적인 온도는 하강하게 되고, 특히 하단부와 유동이 활발하지 않은 모서리 부분은 이슬점 이하로 온도가 내려가 습기가 발생함을 예측할 수 있다.

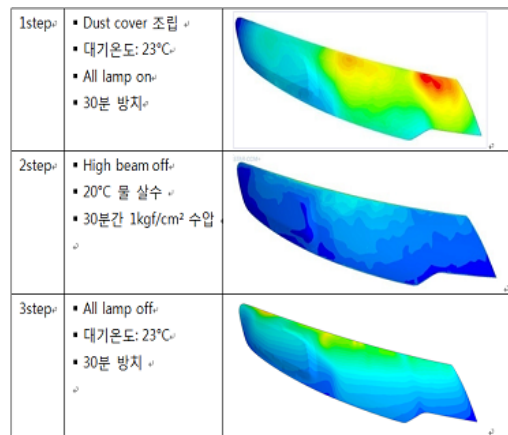


그림 7 단계별 온도 변화
Fig. 7 Transient analysis with 3 step

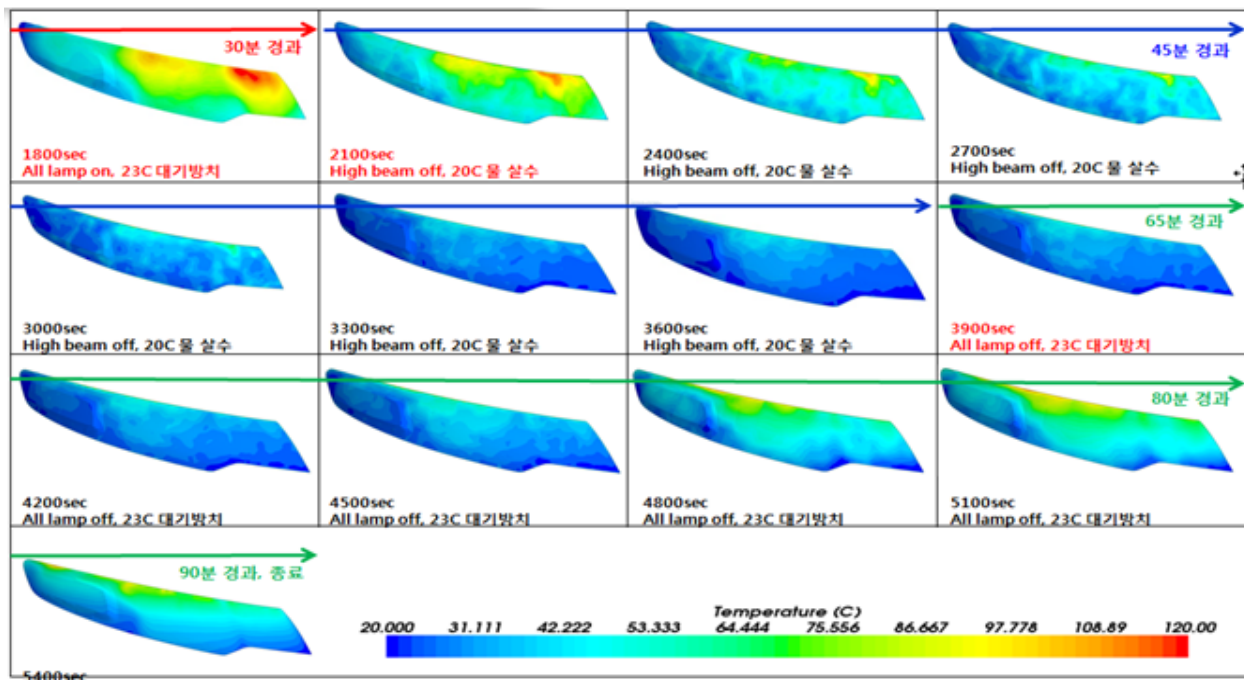


그림 8 시간에 따른 온도 변화
Fig. 8 Transient analysis with the passage of time

마지막으로 3 step 에서는 모든 램프를 소등하고 1 step 에서와 같은 온도로 다시 30분간 방치한다. Simulation 결과를 보면, 모든 램프를 점등한 1 step의 온도 정도는 아니지만, 온도가 상승하여 2 step에서 생성된 습기가 제거됨을 예측할 수 있다.

그림 8은 각 step 별로 시간에 따라 변화하는 헤드램프의 외기조건 및 점등조건을 적용하여, 헤드램프 렌즈의 온도 분포의 수치해석 결과를 나타냈다. 각 단계별 time step은 300 sec로 설정했다.

그림 9는 엔진룸 측과 헤드램프 측의 vent-hole 유속을 측정된 결과를 나타냈다.

유속 측정 결과, 정차 시에는 헤드램프 방향 유속이 엔진룸 방향보다 크게 나타났다. 이는 램프 점등 후 헤드램프 내의 온도 상승에 따른 압력 상승이 유속을 발생시킨 것으로 보인다. 반면 주행 시에는 엔진룸 방향 유속이 헤드램프 방향 유속보다 크게 나타났다. 이는 운전 조건에서 엔진룸 내부의 유동이 vent-hole을 통해 헤드램프 내부로 유입된 것으로 보인다.

4.2 수치해석 결과와 실험 결과와의 비교

그림 10에서는 챔버에서 수행한 헤드램프에서의 실제 습기 발생 현상과 수치해석을 통한 습기 발생 예상 구역을 비교했다. 우천 상황을 재현한 그림 10(a) 상황은 그림 7의 2 step 상태를 재현한 것으로서 오차가 2.67%로 나타났다. 또한 그림 10(b)는 물 살수 후 대기 상태를 표현한 3 step 상태를 재현한 것으로서 오차가 3.84%로 나타났다. 참고로 습기발생이 전혀 일어나지 않는 1 step 상태는 고려하지 않았다.

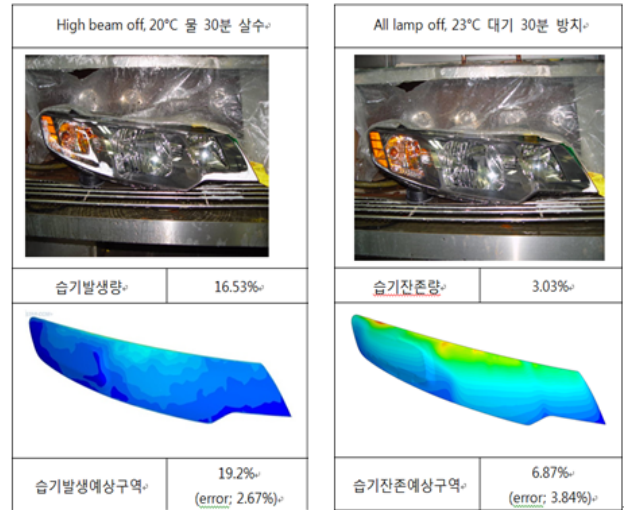


그림 10 Vent-hole 유속 측정
Fig. 10 Vent-hole flow velocity measurement

표 2는 헤드램프 내에 18개의 대표 지점에 해당하는 온도 분포를 실험값과 수치해석 값으로 분류하여 나타냈다. 측정 지점은 그림 5에서 나타낸 18개의 대표지점이 이용됐고, 128만 개의 격자수를 이용한 해석방법을 채택했다. 격자수가 증가함에 따라 오차가 줄어들지만, 그에 따라 해석 시간이 늘어나므로 이를 절충할 수 있는 100만 개 정도의 격자수를 사용하는 것이 효과적이다.

평균 오차가 2.19%로 신뢰할 만한 결과를 보여준다.

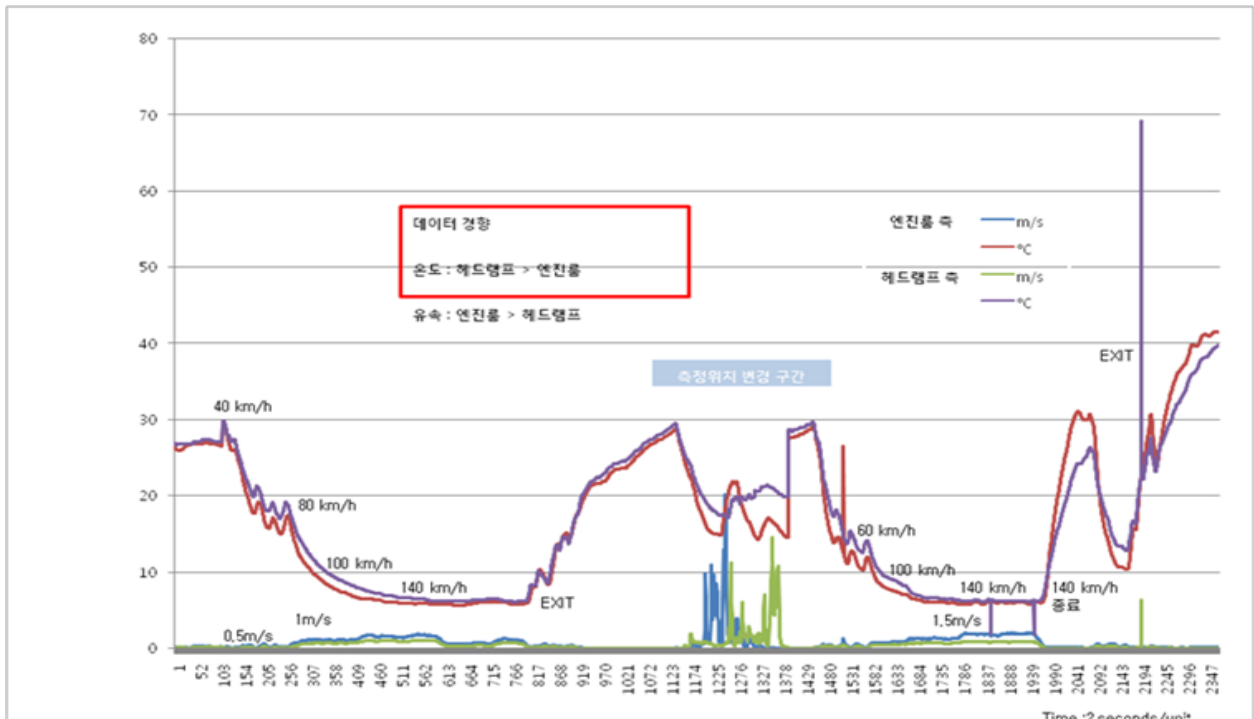


그림 9 Vent-hole 유속 측정
Fig. 9 Vent-hole flow velocity measurement

표 2 온도 측정 결과

Table 2 Result of temperature measurement

	실험 Data	Simulation	Error
1	40.3	38.2	5.21
2	43.8	40.9	6.62
3	64.2	62.5	2.64
4	64.9	63.0	2.92
5	63.2	62.8	0.63
6	71.1	69.5	2.25
7	69.5	68.0	2.15
8	93.2	92.0	1.28
9	110.0	105.8	3.81
10	101.8	100.1	1.66
11	88.9	87.5	1.57
12	103.6	102.8	0.77
13	134.8	131.2	2.67
14	138.2	138.0	0.14
15	135.5	134.9	0.44
16	128.4	127.6	0.62
17	142.8	141.5	0.91
18	60.8	58.9	3.12
Average error (%)			2.19

이와 같은 결과를 바탕으로 본 연구에서 수행한 수치해석 결과와 실험 결과에 대한 비교·분석이 신뢰성을 가지고 이루어졌다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 자연대류 열전달, 복사 열전달, 복합 열전달 해석 등의 이론 정립을 통해 헤드램프 내부에서 발생하는 습기의 발생 조건 및 매커니즘에 대한 해석이 이루어졌다. 또한 챔버 실험 결과와 수치해석 결과를 비교하여 신뢰성을 판정함으로써 습기 발생 해석모드 검증에 수행했다. 습기 발생 현상에 대한 명확한 해석을 위해서는 2상 유동해석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 2상 유동해석을 위한 선행 단계로서 여러 가지 작동 조건 및 외기 조건 변화에 대한 헤드램프의 열·유동 해석과 외기 조건의 변화에 따른 Transient 해석을 수행했다. 다음은 본 연구에 대한 결론이다.

- (1) 헤드램프 내부의 유체 속도와 온도 분포의 경로를 통해 자연대류 열전달의 영향을 확인했다.
- (2) 헤드램프에서 복합 열전달을 고려하여 고체와 유체 사이의 경계면 해석을 실시했다.
- (3) Transient 해석을 통해 시간에 따른 외기 조건의 변화에 따라 습기의 발생 정도 조건을 파악할 수 있다.
- (4) 챔버 실험을 통해 얻어진 헤드램프 내부의 실제 습기

구역과 수치해석을 통한 헤드램프 내부 측면의 온도 분포가 유사한 경향을 보였다.

향후 본 연구의 결과를 기반으로 습기 발생 재현을 위한 헤드램프 내부에서의 2상 유동을 해석할 예정이다. 2상 유동 연구의 궁극적인 목표는 2상 유체의 유동에 따른 압력의 강하, 열 및 물질의 전달을 예측하고 제어할 수 있도록 하는 것이며, 이를 위하여 주어진 지배변수 또는 조건들에 따른 속도, 온도, 압력 등을 구체적으로 구하는 것이다.

참 고 문 헌

- [1] S. Senin, Thermal analysis in automotive components, in : International Symposium on Automotive Lighting - ISAL, Vol. 6, pp. 450-459, 2005.
- [2] Donghan Ryu, Analysis of Condensation Phenomenon Inside Headlamps, KSAE, Vol. 8, 2008.
- [3] E. Preihs, Automotive Headlamp - Analytic Solution and Measurements of Condensation inside a Headlamp, COMSOL Conference, 2006.
- [4] J. Langebach, Experimental study of convection and radiation interaction in a headlight model using pressure variation, Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 32, pp. 521-528, 2007.
- [5] J.M.M. Sousa, An experimental investigation of fluid flow and wall temperature distributions in an automotive headlight, HEAT AND FLUID FLOW, Vol. 26, pp. 709-721, 2005.
- [6] S.M. ElSherbiny, K.G.T. Hollands, G.D. Raithby, Effect of thermal boundary conditions and natural convection in vertical and inclined air layers, Journal of Heat Transfer Vol. 104, pp. 515-520, 1982.
- [7] Frank P. Incropera., David P. De Witt., Introduction to Heat Transfer., 4th Edition., Wiley, pp.673-677, 2002.
- [8] K.T. Yang, Numerical modeling of natural convection - radiation interactions in enclosures, in: Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference, No. 1, pp. 131-140, 1986.
- [9] H.S. Lee, Thermal analysis inside a small chamber including radiation, SAREK, Vol. 6, No. 31, pp. 194-199, 2006.
- [10] F.C. Lockwood, A new radiation solution method for incorporation in general combustion prediction procedures, Proceedings of the 18th International Symposium on Combustion, pp. 1405-1413, 1981
- [11] Okada, Y., Nouzawa, T., Nakamura, T., CFD analysis of the flow in an automotive headlamp. JSAE Review, Vol. 23, No. 1, pp. 98-100, 2002.

저 자 소 개



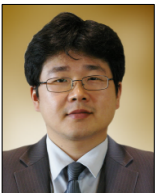
정 영 국 (鄭 泳 國)

2009년 인하대학교 기계공학과 공학사
현재 인하대학교 기계공학과 석사과정
연구원



이 주 한 (李 周 翰)

2006년 인하대학교 기계공학과 공학사
2008년 인하대학교 기계공학과 공학석사
현재 인하대학교 기계공학과 박사과정
연구원



오 상 준 (吳 尙 俊)

2007년 인하대학교 기계공학과 공학사
2009년 인하대학교 기계공학과 공학석사
현재 인하대학교 기계공학과 박사과정
연구원



서 태 범 (徐 泰 範)

1982년 인하대학교 기계공학과 공학사
1985년 한국과학기술원 기계공학과 공학
석사
1994년 Rensselaer Polytechnic Institute
기계공학과 공학박사
현재 인하대학교 기계공학과 교수