

자동차 헤드램프 반사경의 광학 설계

사 종 엽¹⁾ · 박 정 향²⁾

영남대학교 기계공학부¹⁾ · 삼립산업²⁾

Optical Design of Reflector of Automotive Headlamp

Jong-Youb Sah¹⁾ · Jung-Hyang Park²⁾

¹⁾Dept. of Mechanical Eng., Yeungnam University, 214-1 Dae-dong, Kyoungsan city, Gyeongsangbuk-do 712-749, Korea

²⁾Samlip Industrial Co., Ltd., 1208-6 Sinsang-li, Jillyang-eup, Kyoungsan city, Gyeongsangbuk-do 712-838, Korea

(Received 9 January 2004 / Accepted 25 February 2004)

Abstract : ACR(All Clear Reflector), also widely referred to as FFR(Free Form Reflector), were designed in general and intelligent ways using a NURBS surface for the mathematical modelling of the reflector shape and artificial intelligence as the optimum design algorithm. An ACR, which consists of a continuous surface reflector and clear outer lens, offers styling advantages and provides a high quality light performance. The clear outer lens of an ACR remains efficient even with a highly inclined shape, as in the design of a sports car, as well as the complete clearness of the reflector surface eliminates the nuisance of stray light caused by the steps between adjacent segments of multi-faced reflectors. The application of an ACR to low beam lamp was so successful to obtain the sharp cut-off with the lens-free single-surfaced-smooth reflector. The design technique of ACR was tested with all types of lamps, including low beams, high beams, and fog lamps.

Key words : Headlamp(전조등), Reflector(반사경), Low beam(주행빔), High beam(변환빔)

Nomenclature

- B : control point
- N : basic function of NURBS
- P : NURBS curve
- Q : NURBS surface
- h : homogeneous coordinate of NURBS
- t : parameter of NURBS curve
- u, w : parameter of NURBS surface

1. 서론

자동차 헤드램프의 설계 기술은 최근 10년 사이에 크게 발전하였다. 이전에는 포물경이나 구면경, 혹은 2차원 곡면들이 반사경 형상 설계를 위하여 사용되었으나, 최근에는 B-spline 곡면을 사용한 반사경에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. Nakata^{1,2)}는 2차 B-spline 곡면을 이용하여 포물면을 표현함으로써, 다수의 포물면으로 이루어진 다중 반사경을 최적 설계하였다. 인공지능을 이용하여 다중 곡면의 각 위치와 자세를 제어함으로써 렌즈 없이 원하는 조도 분포를 얻을 수 있었다. 렌즈를 제거하면, 렌즈 상의 프리즘들의 경계 상에서의 광손실이나 조도분포 왜곡을 막을 수 있어, 보다 우수한 조도 분포를 얻을 수 있다. 그러나 선명한 컷오프(cut-off)를 얻는데 다소 문제가 있었다. 다양한 반사

*To whom correspondence should be addressed.
jysah@yu.ac.kr

경 곡면을 표현하는데 있어서 곡면 표현의 자유도를 향상시키기 위하여 2차 B-spline의 포물면 대신 자유곡면을 이용한 반사경이 연구되었다. 이러한 자유곡면 반사경을 FFR(Free Form Reflector)이라 부른다. Hogrefe와 Neumann³⁾은 다중 반사경에 대하여 각 곡면을 FFR으로 표현함으로써 렌즈없이 ECE 주행빔의 조도분포에서 수평 분산과 선명한 컷오프(cut-off)를 얻을 수 있다는 것을 보였으며, 이것을 HNS(Homogeneous Numerically Calculated Surfaces)라 하였다. FFR이 ECE 주행빔에 대하여 광차단 실효 없이도 비교적 선명한 컷오프(cut-off)를 얻을 수 있다는 것이 알려지면서, Branburg⁴⁾도 기존의 포물경을 다중 반사경의 FFR로 대체할 수 있었다.

Wang과 Kreysar, Jiao⁵⁾는 HID (High Intensity Discharge) 광원에 대하여 HNS 타입의 FFR을 적용하였다. HID 광원은 과도한 눈부심으로 인하여 ECE 주행빔의 조도분포에서 선명한 컷오프(cut-off)를 얻기 어려우므로, 웨이브 형태를 FFR에 결합하였다. Kagiya와 Nino⁶⁾도 웨이브 형태의 FFR을 도입하여 선명한 컷오프(cut-off)를 얻었다. 그러나 이러한 방식도 다중 반사경의 일례에 지나지 않으며, 하나의 자유곡면으로는 선명한 컷오프(cut-off)를 얻는데 어려움이 있었다.

선행 연구¹⁻⁶⁾들은 무단차 단일연속곡면을 사용한 반사경으로는 선명한 컷오프(cut-off)를 얻는데 어려움이 있었다. 선명한 컷오프(cut-off)를 얻기 위하여 다중 반사경을 사용하여 만족할 만한 결과를 얻었으나, 다중 반사경을 사용함으로써 곡면들 사이의 불연속 경계의 단차에서 광원손실과 조도분포 왜곡이 생기는 문제점을 갖고 있다.

본 연구에서는 렌즈의 역할없이 하나의 반사경 곡면으로 선명한 컷오프(cut-off)를 갖는 무렌즈 무단차 단일자유곡면 반사경을 개발하였다. ECE 주행빔의 경우, 도로 상에서의 원하는 노면조도분포(소위 bird-eye view)로부터 조도 분포를 반자동으로 계산하여 이를 목표 조도 분포로 취한다. 계산 조도 분포와 목표 조도 분포와의 차이를 최소화시키는 방향으로 최적화를 진행시켜 반사경 곡면의 최적 형상을 반복적으로 탐색한다. 반사경 곡면은 NURBS 곡면⁷⁾을 이용하여 반경방향과 원주방향으

로 각각 open unit knot vector와 periodic uniform knot vector를 사용하였으므로, 모든 방향으로 동일한 연속성을 갖는 무단차 단일 곡면이 된다.

무렌즈 무단차 단일곡면 반사경은 단차가 없는 단일 곡면이므로 금형 제작 가격이 저렴할 뿐만 아니라, 단차에서 발생하는 광의 손실을 방지할 수 있기 때문에 우수한 조도 분포를 얻을 수 있다. 이러한 무단차 단일곡면 반사경은 ECE 주행빔 헤드램프이나 변환빔 헤드램프, 안개등, 혹은 기타 외부 표시등에 모두 적용할 수 있다.

2. 반사경 곡면 모델링

반사경 곡면을 수학적으로 표현하기 위하여 NURBS(Non-Uniform Rational B-Spline) 곡면을 사용하였다. NURBS는 컴퓨터 그래픽이나 디자인 등에서 사용 가능한 모든 종류의 곡선과 곡면을 표현하는 것이 가능하다. 일반적으로 NURBS 곡면을 다음과 같이 표현한다.

$$Q(u, w) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j}^h N_{i,k}(u) M_{j,l}(w)}{\sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} B_{i,j}^h N_{i,k}(u) M_{j,l}(w)} \quad (1)$$

여기서, $B_{i,j}^h$ 는 조절점들의 4차원 동차좌표계를, $N_{i,k}(u)$ 와 $M_{j,l}(w)$ 는 비유리(non-rational) B-spline 기저함수를 나타낸다.

NURBS 곡면은 조절점의 좌표 혹은 동차좌표, knot vector를 조절하면 원하는 임의의 곡면을 제어할 수 있다. Fig. 1은 조절점의 좌표 변화에 따른 NURBS 곡선의 제어 능력을 보여준다. NURBS 곡선은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P(t) = \frac{\sum_{i=1}^{n+1} B_i^h N_{i,k}(t)}{\sum_{i=1}^{n+1} h_i N_{i,k}(t)} = \sum_{i=1}^{n+1} B_i^h N_{i,k}(t) \quad (2)$$

여기서, B_i^h 는 조절점들의 4차원 좌표계(x,y,z,h)를, $N_{i,k}(t)$ 는 비유리(non-rational) B-spline 기저함수를 나타낸다. h_i 는 조절점의 동차좌표이다. Fig. 1의 예에서는 8개의 조절점을 가지고 있는 3차($k=4$) NURBS 곡선에 대하여 조절점의 위치 변화에 따른 영향을 보여준다. 조절점 B5를 B5', B5''으로 이동함에 따라서 곡선의 형상이 변화하는데, B5 주변의 곡

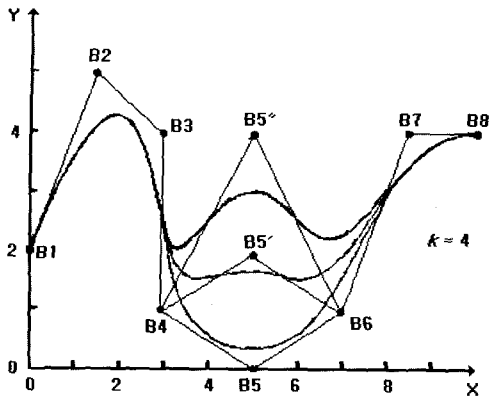


Fig. 1 Local control of NURBS curve

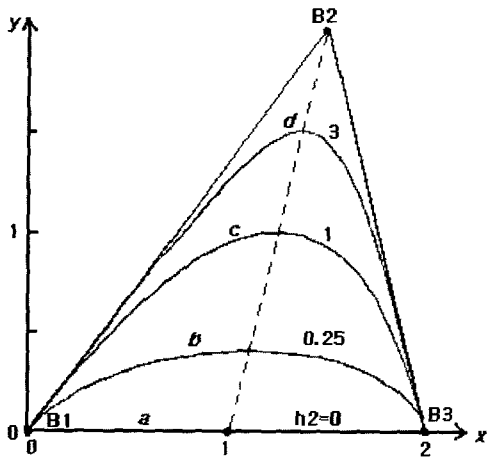
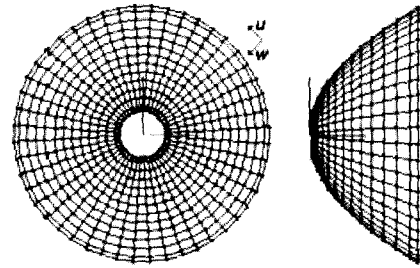


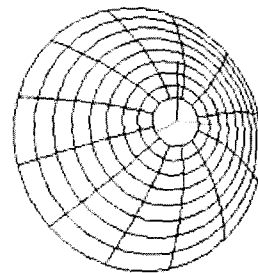
Fig. 2 Effect of homogeneous coordinate on NURBS curve

부적인 영역에서만 영향을 받는 것을 알 수 있다. 일반적으로 $\pm k/2$ 의 조절점 간격에 해당하는 곡선 영역에서 영향을 받는다. 유리 B-Spline 함수는 곡선의 국부 조절에 있어서 탁월한 능력을 갖고 있음을 알 수 있다.

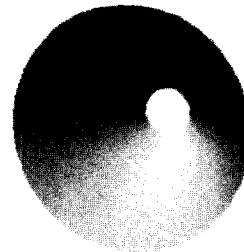
Fig. 2는 3개의 조절점을 갖고 있는 2차 NURBS 곡선에 대하여 동차좌표의 값을 변화시키는데 대한 곡선의 형상의 변화를 보여준다. 동차 좌표의 값이 증가함에 따라 곡선이 조절점에 더욱 가까워짐을 알 수 있다. Fig. 3은 포물면으로 구성된 반사경의 형상을 NURBS 곡면으로 표현하였다. NURBS 곡면은 평면이나 2차곡면을 포함한 모든 종류의 자유곡면



(a) control points of NURBS surface



(b) isoparametric view of NURBS surface



(c) shading of NURBS surface

Fig. 3 Parabolic reflector by NURBS surface

을 동일한 형식으로 표현할 수 있기 때문에 반사경의 형상 설계에 사용하기에 가장 적합한 곡면 표현 방식이다.

3. 반사경 곡면 설계

3.1 목표 광 패턴

무렌즈 무단차 단일곡면 반사경을 설계하고자 할 때, 노면이 무한 평면일 경우의 노면 조도 분포

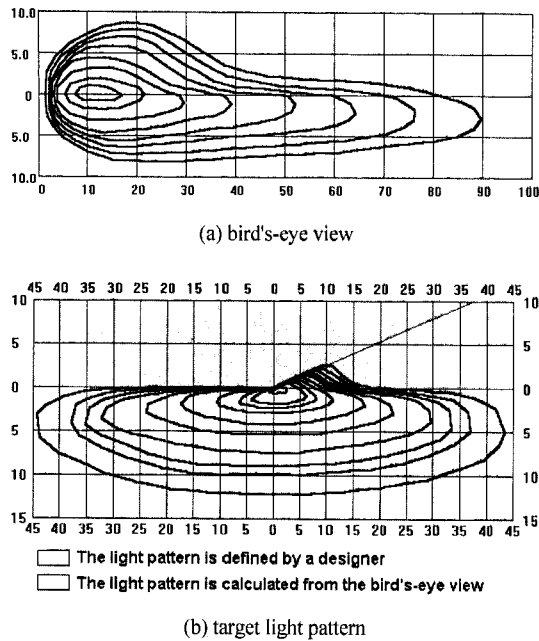


Fig. 4 ECE low beam headlamp

(bird's-eye view)가 주어진다. 이와같은 노면조도분포를 갖기 위하여 헤드램프 전면으로의 조도분포를 구할 수 있다(Fig. 4 참조). 전면 조도분포 중에서 아래쪽으로 향하는 부분은 노면 조도 분포로부터 자동으로 구할 수 있으며, 위쪽으로 향하는 부분은 관련 법규에 적합하도록 설계자가 결정한다.

3.2 반사경 곡면 설계

무렌즈 무단차 단일곡면 반사경이 주어진 목표 광속 분포를 만족하도록 최적 설계를 수행하였다. 목표함수는 현재 단일곡면 반사경으로부터 계산된 전면 조도분포와 설계 시 주어진 목표 조도분포 사이의 오차를 제공하여 적분한 값으로 하였다. 목표함수 값을 최소화하도록 반사경을 구성하는 NURBS 곡면의 조절점의 x, y, z 좌표와 동차좌표, h , 값들을 설계인자로 하여 최적화를 수행하였다.

무렌즈 무단차 단일곡면 반사경을 설계하는 과정은 다음과 같다.

1) 입력 데이터 정의:

헤드램프가 차지할 공간 크기(폭, 높이, 깊이), 사용할 광원의 종류와 특성

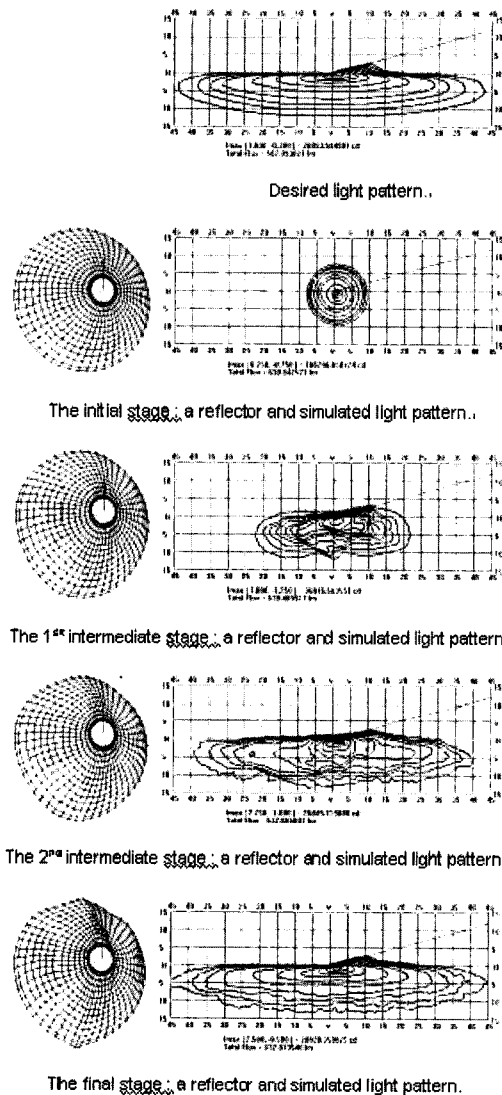


Fig. 5 Design process for ECE low beam headlamp

2) 목표 등조도 분포의 설정:

목표 노면조도 분포(bird-eye view) 설정 및 그에 따른 목표 조도분포 계산

3) 반사경 초기형상 설정:

구면경, 포물경 등의 단순한 반사경 혹은 데이터베이스로부터 얻어진 반사경 선정

4) 최적 설계 계획 수립:

ECE 주행빔의 컷오프를 중요시할 것인지, 안개등의 수평분산을 중요시 할 것인지 결정.

5) 반사경 곡면 형상의 수정:

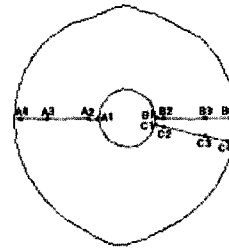
조절점의 위치좌표를 변경하거나,
 조절점의 동차좌표를 변경하거나,
 조절점을 삽입 또는 제거하거나,
 knot vector를 변경하거나,
 곡면의 차수를 변경.

- 6) 등조도분포 시뮬레이션 :
 빠르고 정확한 광학 시뮬레이션
- 7) 계산 조도 분포와 목표 조도 분포 비교 :
 계산치가 목표치와 비교하여 만족스러우면,
 8 단계로 진행,
 만족스럽지 않으면 4-7 단계 반복.
- 8) 시제작 및 측정 :
 시작품을 제작하여 조도 분포 측정,
 만족스러우면 개발 완료.
 불만족스러우면 오차 분석 후 2-8 단계 반복

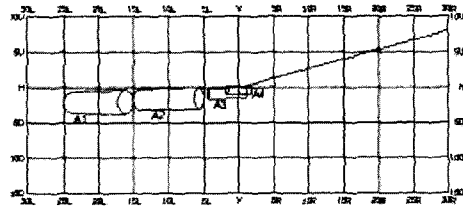
Fig. 5는 포물경을 초기 형상으로 하여 Fig. 5(a)와 같은 목표 조도분포에 대하여 최적화 설계를 수행하는 과정을 보여준다. 최종 단계에서는 목표 조도 분포와 오차가 최소화된 최적의 전면 조도분포를 설계할 수 있었다. 최적 설계된 반사경은 전면 조도 분포에 있어서 선명한 컷오프(cut-off)를 보여줄 뿐만 아니라 좌우로 넓은 수평분산이 가능함을 알 수 있다. 최적 설계를 통하여 얻어진 반사경 형상에 대하여 Fig. 6(a)에서의 지점에서 반사되는 광이 전면 조도 분포에서 갖는 이미지를 조사하였다. 반사경 외곽지점에 반사된 이미지는 작은 이미지가 되어 강한 밝기로 컷오프 주변에 밀집되어 선명하고 강한 컷오프를 만들고 있음을 알 수 있을 뿐만 아니라, 반사경 가운데 부분에 반사된 이미지는 큰 이미지로 인하여 밝기는 떨어지지만 컷오프에서 떨어져 분포되어 선명한 컷오프를 가질 수 있도록 할 뿐만 아니라 전반적으로 수평방향으로 누워있어 수평 분산에 유리하게 작용함을 알 수 있다. 따라서, 최적 설계에 의하여 얻어진 반사경 곡면은 목표 조도 분포를 만족하는 최적의 상태로 설계되어 있음을 알 수 있다.

3.3 반사경 최적화 적용 사례

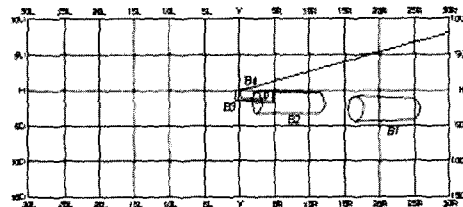
무렌즈 무단차 단일곡면 반사경의 최적 설계를



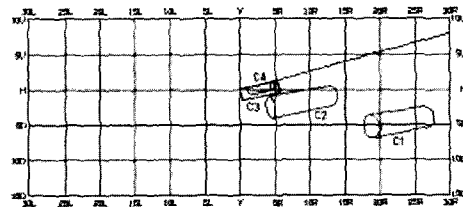
(a) marked positions of reflector surface.



(b) A1 - A4 Filament Images.



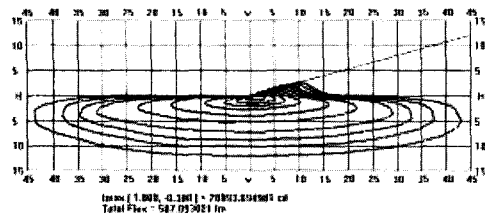
(c) B1 - B4 Filament Images.



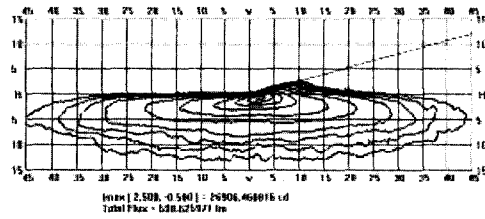
(d) C1 - C4 Filament Images.

Fig. 6 Bulb image distribution

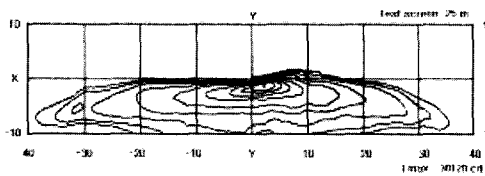
주행빔 헤드램프, 변환빔 헤드램프, 안개등에 적용하여 실제 가공한 반사곡면에 대한 실험을 수행하여 수치모사 결과와 비교하였다. Fig. 7은 ECE 주행빔 헤드램프에 대하여 목표 조도 분포와 계산 조도 분포, 측정 조도 분포를 비교하여 보여준다. 선명한 컷오프와 넓은 수평분산이 중요한데 이러한 ECE 주행빔의 품질 요구사항을 잘 만족하는 결과를 보여주었다. 최적 설계된 주행빔 헤드램프의 반사경 곡면과 이를 실제로 제작한 곡면의 형상을 Fig. 7(d)



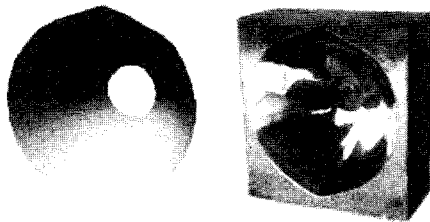
(a) Desired light pattern..



(b) Simulated light pattern..



(c) Measured light pattern..

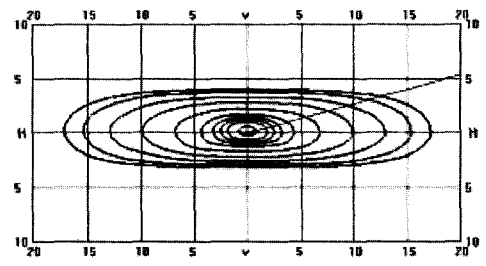


(d) Prototype model (size Ø119~127, H7)

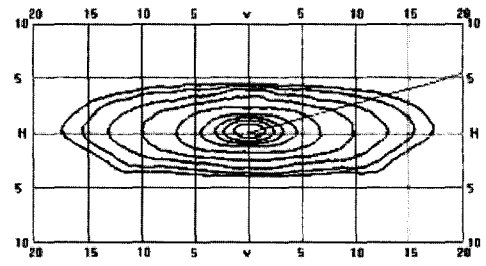
Fig. 7 Lens-free smooth surface for ECE low beam reflector

에서 볼 수 있다.

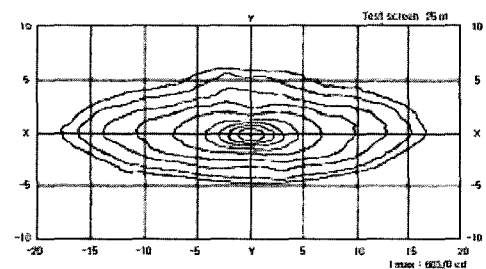
Fig. 8은 변환빔 헤드램프에 대하여 목표 조도 분포와 계산 조도 분포, 측정 조도 분포를 비교하여 보여주고 있다. 변환빔에서는 Fig. 8(a)에서 보는 바와 같이 원거리까지 조명이 미칠 수 있도록 조도 분포가 중앙에 집중되어 있어야 함을 알 수 있다. 최적 설계 곡면과 이를 가공한 곡면의 형상이 Fig. 8(d)에 나타나 있으며, 측정된 곡면을 사용하여 조도분포를 측정된 결과 변환빔의 품질 요구 사양을 충분히 충족시킬 수 있었다.



(a) Desired light pattern..



(b) Simulated light pattern..



(c) Measured light pattern..

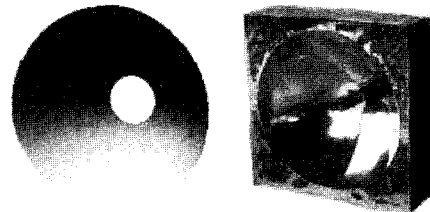
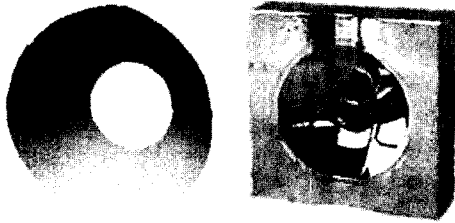
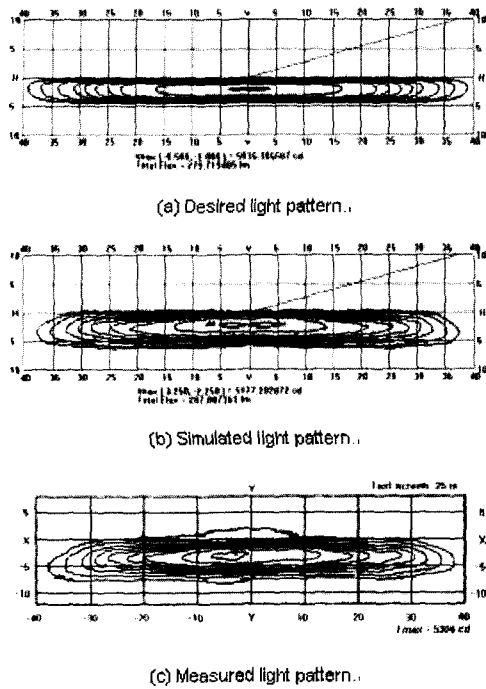


Fig. 8 Lens-free smooth reflector for high beam headlamp

Fig. 9는 안개등에 최적 설계를 적용한 예를 보여준다. 안개등은 Fig. 9(a)의 목표 조도분포에서 알 수 있는 바와 같이 극단적으로 광을 좌우로 펼칠 수 있어야 한다. 이에 대한 계산 조도 분포가 Fig. 9(b)에



(d) Prototype model (size Ø70, H3)

Fig. 9 Lens-free smooth reflector for fog lamp

나타나 있고, 실제 곡면을 제작하여 측정된 조도분포가 Fig. 9(c)에 나타나 있다. Fig. 9(d)는 최적 설계 곡면과 실제 제작된 가공 곡면의 형상을 보여준다.

4. 결론

무렌즈 무단차 단일자유곡면 반사경을 설계하기 위하여 NURBS 곡면의 조절점의 좌표를 설계인자로 인하여 목표 조도분포를 만족하도록 최적 설계를 수행하였다. 무렌즈 무단차 단일곡면 반사경은 렌즈의 도움없이도 선명한 컷오프(cut-off)를 갖는 우수한 조도 분포를 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 단

차나 렌즈 경계면에서의 광의 산란과 흡수를 원천적으로 방지할 수 있으므로 광의 효율과 조도 분포의 품질이 우수한 장점이 있는 반면, 목표 조도 분포를 만족하는 반사경 곡면의 조절이 어려운 단점이 있다. 최적설계를 이용하여 목표 조도분포를 만족하는 반사경의 곡면 형상을 자동으로 찾을 수 있도록 하였다. ECE 주행빔 헤드램프나 변환빔 헤드램프, 안개등, 기타 외부 표시등에 대하여 각각의 경우에 대한 목표 조도 분포를 만족하는 최적 설계를 수행하여 최적 형상의 반사경을 설계하고 가공면에 대하여 조도 분포를 실제로 측정하였다. 다양한 램프에 대하여 최적 형상의 무렌즈 무단차 단일곡면 반사경을 설계할 수 있었다. 이러한 연구는 무렌즈 다중반사경이나 기존의 일반 반사경에도 적용이 가능하다.

References

- 1) Y. Nakata, "Multi B-Spline Surface Reflector Optimized with Neural Network," SAE 940638, 1994.
- 2) Y. Nakata, "Dual-Filament Replaceable Bulb Headlamp Using a Multi-Reflector Optimized with a Neural Network," SAE 950599, 1995.
- 3) H. Hogrefe, R. Neumann, "Application of Free Form Reflectors in Modern Headlamp Systems," SAE 950593, 1995.
- 4) W. Branburg, "The Replacement of Parabolic Reflectors by Free Form Reflectors," SAE 960926, 1996.
- 5) B. Wang, D. Kreysar, J. Jiao, "Design Strategy for Free-Form Reflector Head Lamp Using High Intensity Discharge Light Source," SAE 2000-01-0428, 2000.
- 6) S. Kagiya, N. Nino, "Application of Free Formed Surface Reflectors," SAE 2000-01-0428, 2000.
- 7) D. F. Rogers, J. A. Adams, *Mathematical Elements for Computer Graphics*, McGraw-Hill, New York, 1989.