

실내공간의 빛 환경 분석을 위한 HDRI Builder의 평가

(An Evaluation of HDRI Builder for the Analysis of Indoor Lighting Environment)

신은주* · 홍승대**

(Eun-Ju Shin · Sung-De Hong)

Abstract

The purpose of this study is to evaluate the accuracy of luminance maps generated from five types of HDRI builder(High Dynamic Ranging Image builder) which include Photosphere, Bracket, Picturonaut, Luminance HDR and Photoshop. To accomplish this goal a set of experiments was conducted. In order to assess the luminance values of the HDR image from HDR image builder, the values had to be compared to the ones obtained from imaging photometer. After comparing measured luminance data using imaging photometer with those retrieved from the HDR images, Photosphere error rate estimated at 3% below.

Key Words : HDR, HDR builder, Lighting Design, Luminance Map

1. 서 론

1.1 연구의 배경

실내공간의 휘도 분포를 파악하기 위해서는 휘도계를 이용하여 물리량을 측정하고 각 측정지점의 휘도를 공간적으로 파악할 수 있도록 표시해야 한다. 현재까지 사용되는 휘도계는 포인트 휘도계와 대면휘도계(Imaging

Photometer)로 구분되며, 포인트 휘도계는 특정지점의 휘도를 측정하기 때문에 빛의 공간적인 분포를 전체적으로 파악하기 곤란하다는 한계점을 갖고 있다.

반면 대면휘도계는 휘도의 공간적 분포를 파악하기 위해 개발된 측정기기로 공간의 휘도분포를 파악하는데 적합하다. 그러나 대면휘도계는 측정 장비의 가격대가 현재까지 고가이며, 이 때문에 일반인의 접근이 어려우며, 기계적인 측정 장치 외에 촬영된 영상을 해석하는 프로그램을 별도로 구비해야하는 부담이 있다. 이에 이미지 프로세싱(Image processing) 원리를 기반으로 해서 일반적으로 사용되는 디지털카메라를 이용해서 촬영한 이미지 파일을 HDR(High Dynamic Range) 영상으로 제작하여 이를 분석하여 휘도를 분석하는 기술이 활발하게 적용되고 있다.

조명분야에서는 HDR 영상을 분석하여 실제 공간의 휘도 분포를 파악하는 다수의 이론적 연구가 진행되었

* 주저자 : 동서울대학교 실내디자인과 조교수
** 주저자 : 신안산대학교 실내디자인과 부교수
* Main author : Professor, Department of Interior Design, Dong Seoul University
** Corresponding author : Professor, Department of Interior Design, Shin Ansan University
Tel : 031-490-8933, Fax : 031-490-8900
E-mail : sungde@paran.com
접수일자 : 2014년 4월 17일
1차심사 : 2014년 4월 22일
심사완료 : 2014년 5월 19일

고(Beltran, Inanici, Moeck 등)[1-3], 이와는 별도로 디지털 이미지프로세싱 분야에서는 다양한 HDRI 빌더(High Dynamic Ranging Image Builder, HDR 영상 제작 도구)가 개발되고 이를 활용한 HDR 영상들이 소개되고 있다. 이와 같이 영상미의 추구를 위하여 HDRI 빌더를 사용하는 사진 분야와는 달리 조명 분야에서는 이들 HDRI 빌더를 통해서 만들어진 HDR 영상 파일에 기록된 휘도값에 주목한다. 영상 파일에 기록된 값이 얼마나 실제 공간의 휘도값을 충실하고 정확하게 기록하고 있는지가 중요하기 때문이다. 그러나 빛의 양을 기록하여 HDR 영상을 제작하는 HDRI 빌더에 대한 평가와 검증은 충실하게 이루어지지 않았다.

1.2 연구의 목적 및 방법

HDRI 빌더를 활발하게 사용하고 있는 사진 분야에서는 사진의 예술적인 완성도와 세부적인 요소 등을 확인하는 용도로 주로 사용되기 때문에 정량적인 특성을 주로 확인하는 조명분야의 활용 목적과는 거리가 있다. 따라서 공간을 대상으로 조명을 계획하는 전문가들이나 휘도의 분포를 평가하는 업무를 수행하는 이들에게 현재 통용되고 있는 다양한 HDRI 빌더에 대한 객관적 평가를 시행하여 신뢰할 수 있는 도구의 목록을 제공하는 것은 중요한 의미를 갖는 것이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 다양한 HDRI 빌더의 평가를 위하여 HDR 영상에 관한 전문연구서인 HDR Handbook을 참고하고, 여기서 소개된 여러 HDR 영상제작도구 중에서 도구의 전문성을 고려하여 다음과 같은 5종의 HDRI 빌더를 선정하였다[4].

표 1. 평가 대상 HDRI builder
Table 1. HDRI builders used in the experiment

No	HDRI builder	URL
1	Photosphere	www.anywhere.com
2	Bracket	www.ceng.metu.edu.tr/~akyuz/bracket/bracket.html
3	Picturenaut	www.hdrilabs.com/picturenaut
4	Luminance HDR	qtpfsgui.sourceforge.net
5	Photoshop	www.photoshop.com

선정된 HDRI 빌더의 평가와 작성된 영상의 분석, 분석의 결과를 검증하기 위한 방법은 다음과 같다.

- (1) HDR영상의 제작을 위한 기본이 되는 LDR(Low Dynamic Range)의 촬영 시간은 외부에서 유입되는 주광의 영향을 피하기 위하여 일몰 후 시간대로 설정하였으며, 측정대상 공간은 소규모 사무공간으로 선정하였다. 또한 선정된 디지털 카메라를 이용해서 실내공간을 다중노출복수영상으로 촬영하였다.
- (2) 평가의 기준을 설정하기 위해 동일한 측정대상 공간을 물리적 휘도 측정기기(대면 휘도계)를 사용하여 측정하였다.
- (3) 선정된 5종의 HDRI 빌더를 이용하여 디지털 카메라를 이용해서 촬영된 LDR 영상(7~10매)을 각각의 HDR 영상으로 제작하였다.
- (4) 5종의 HDRI 빌더를 이용하여 만들어진 각 HDR 영상의 휘도값을 휘도분석 도구를 이용하여 분석하였다. HDR 영상의 분석도구는 영상의 휘도 분석에서 가장 활용도와 신뢰도가 높은 도구인 Radiance Falsecolor와 Ximage 프로그램을 사용하였다.
- (5) 휘도측정기기(대면휘도계)를 통하여 측정된 장면의 최대 휘도값을 평가대상 5종의 빌더에서 제작된 각 HDR 영상 파일에서 분석된 휘도값과의 비교를 수행하였다.
- (6) 물리적 측정값과 평가대상 빌더의 분석값과의 차이를 비교하여 실내공간의 빛환경 분석을 위한 최적의 HDRI 빌더를 선정하였다.

2. HDR 영상 및 HDRI 빌더

HDR영상은 카메라 또는 스캐너 등과 같은 일반적인 입력장치가 하나의 외부 노출(Exposure)에 대하여 갖는 제한된 동적영역을 확장시킨 영상이라고 할 수 있다[5].

HDR영상을 제작하는 방법은 HDR카메라를 이용하는 방법과 일반 디지털 카메라를 이용하는 방법으로 대별된다. HDR카메라를 사용하는 방법은 일반적으로 사용되는 디지털카메라에 비교하여 상대적으로 입력할 수 있는 동적영역을 확장시킨 카메라를 사용하

여 HDR영상을 제작하는 것이다. 이와는 달리 일반 디지털 카메라를 이용하여 HDR영상을 제작하는 방법은 일반적인 디지털카메라가 하나의 외부 노출(Exposure)에 대하여 갖는 제한된 동적영역을 후처리 과정을 통하여 확장시키는 것이라고 할 수 있다.

HDR영상의 획득은 LDR(Low dynamic range) 이미지의 촬영으로 부터 시작되며, 동일 장면을 서로 다른 노출값(EV, Exposure value)으로 연속해서 촬영하는 브라켓(Bracket) 촬영을 한다. 이때 촬영된 각각의 영상은 장면 전체의 동적영역의 일부분이라고 할 수 있고, 이 영상들을 디지털적으로 결합하면 실제 장면의 동적영역에 근접하는 HDR 영상을 획득하게 된다[6].

HDRI빌더는 LDR영상을 디지털적으로 결합하여 1개의 영상에 다수의 노출값을 갖는 HDR영상을 제작하는 도구이다. 일반적으로 HDRI빌더는 자체적으로 디지털카메라의 특성인 카메라응답함수(camera response curve)를 생성하는 알고리즘을 포함하고 있다. 또한 다중노출복수촬영 과정에서 발생하는 렌즈 플래어 현상이나 정렬이 되지 않은 이미지, 그리고 이미지의 고스트(Ghost)는 HDR 영상 생성과정에서 수정할 수 있는 기능을 포함하고 있다.

본 연구에서 평가 대상으로 선정한 5개의 HDRI 빌더는 이러한 기능적인 조건이 포함되어있는 것으로 하였으며 일반적인 HDR 영상 기록 규격인 OpenEXR 이나, radiance HDR등으로 기록이 가능한 것으로 선정하였다.

(1) Photosphere

Photosphere 프로그램은 RADIANCE의 개발자인 Greg Ward Larson이 개발한 HDR 영상 제작 도구이다. S/W 구동환경은 OSX이며 JPEG, TIFF, OpenEXR과 Radiance-RGBE등과 같은 대부분의 HDR영상 규격의 읽기와 쓰기가 가능하다.

(2) Bracket

Bracket은 Ahmet Oğuz Akyüz가 개발한 것으로서, Windows, OSX, Linux 등과 같은 여러 운영체제에서 구동되는 프로그램으로서 HDR 영상을 생성하고, 편

집할 수 있는 기능을 포함한다. 일반적으로 사용되는 RGBE, OpenEXR, LogLuv와 같은 HDR 영상 포맷을 읽고 쓸 수 있다. Photosphere 프로그램처럼 HDR 영상의 생성 직전 단계에서 LDR 파일로부터 카메라응답함수를 복원하고 이를 HDR 영상 제작에 적용한다.

(3) Picturenaut

Picturenaut는 Marc Mehl이 개발한 비교적 단순한 HDR 영상 제작도구로서, 이미지의 화질을 가장 우선시 하는 것으로 개발되었다. HDR 영상의 Resizing에 필요한 고성능의 Resampling 알고리즘을 제공하며, 카메라응답함수의 완전한 조정이 가능한 최고수준의 기술을 기반으로 하고 있다[1].

(4) Luminance HDR

Luminance HDR은 HDR 이미지를 읽고, 기록하고, 편집하는 전문 프로그램인 pfstools 패키지의 GUI 버전으로 제작된 것이다. 본래 pfstools 패키지를 구성하는 내부 프로그램은 UNIX 운영체제를 기반으로 하는 command line program으로서 Window 운영체제를 위해 개발되었다. pfstools 패키지의 주요 프로그램은 톤매핑(tone-mapping)을 처리하는 pfstmo와 카메라응답함수를 복원하고 다수의 LDR 영상을 결합하여 HDR 이미지로 제작하는 pfs calibration으로 구성된다.

(5) Photoshop

이미지프로세싱 분야의 대표적인 프로그램인 Photoshop은 고유한 카메라 응답함수를 생성하는 기능을 포함하고 있다. Photoshop은 HDR 영상을 제작하는 목적으로만 사용되지 않으며 다른 HDRI 빌더와 비교해서 HDR 영상 제작을 위한 다양한 기능이 제공되지 않는다.

3. HDRI 빌더의 평가

3.1 평가 실험의 설정

HDRI 빌더의 평가를 위해서는 우선적으로 선정된 디지털카메라를 이용하여 동일한 조명 조건하에서 동

일한 장면을 촬영하여 기록된 다수의 LDR영상을 평가대상 HDRI 빌더에 각각 입력해야한다.

본 연구에서는 동일한 조건의 LDR 영상이 촬영될 수 있도록 대상공간의 촬영시간대는 자연광의 영향을 피할 수 있는 일몰 후 2시간 경과(21:00~23:00) 시간으로 설정하였다. LDR 영상 촬영을 위한 디지털카메라의 규격과 촬영을 위한 설정은 표 2, 표 3과 같다.

표 2. 디지털카메라의 규격
Table 2. Specification of Digital Camera

구분	설정
디지털 카메라 모델	Canon EOS 6D
최대해상도	5,472 x 3,648
이미지 센서	full frame CMOS
렌즈	24-105mm

표 3. LDR 촬영을 위한 설정
Table 3. LDR Capture Settings

구분	설정
Image Size	3,648×2,432
capture mode	Manual
ISO	100
Metering	Evaluative
White Balance	3,000K
Aperture Value	f/11

3.2 실험 케이스

본 연구의 휘도 측정 대상공간은 조광(Dimming)이 가능한 스포트라이트(LED 20W, 3,000K) 4개가 설치된 사무공간의 회의실을 대상으로 하였다. 대상공간의 규모는 6.1m×2.55m×2.3m이며, 벽면의 재료는 백색 수성페인트이고 천장은 백색 텍스, 바닥은 회색 PVC 타일로 구성되어 있다.

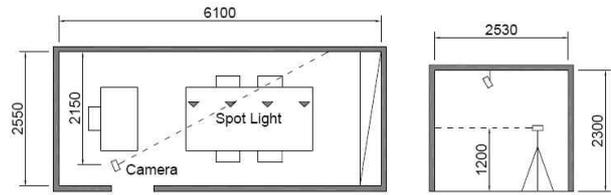


그림 1. 측정대상공간 평면도 및 단면도
Fig. 1. Floor plan and section profile

실험의 첫 번째 케이스(case_1)는 4개의 스포트라이트를 조광하지 않은 상태로 휘도를 측정하였으며, 두 번째 케이스(case_2)는 50% 조광을 하여 밝기를 줄인 상태로 휘도를 측정하였다.



그림 2. 조광을 하지 않은 경우(case_1)
Fig. 2. 0% dimmed case(case_1)



그림 3. 조광(50%)을 설정한 경우(case_2)
Fig. 3. 50% dimmed case(case_2)

각 실험케이스(case_1, case_2)에서 촬영된 LDR 영상의 세트와 셔터스피드(Tv)는 표 5와 같다.

3.3 HDR영상의 휘도 분석

조광을 하지 않은 실험 케이스(case_1)와 50% 조광

실내공간의 빛 환경 분석을 위한 HDRI Builder의 평가

을 적용한 실험 케이스(case_2)의 각 LDRI 세트(7매)를 평가 대상인 5개의 HDR 빌더에 각각 입력하여 HDR 영상을 작성하였다. 각 빌더에서 작성된 HDR 영상은 Radiance Falsecolor와 Ximage를 이용하여 휘도분포도와 휘도값(최대)을 구하였다(표 4, 표 7).

표 4. Radiance Falsecolor 프로그램
Table 4. Radiance Falsecolor Program

```
$ falsecolor -ip photo.hdr -log 3 > photo.pic
$ ra_tiff -z photo.pic photo_map.tif
```

표 5. 실험 케이스의 LDRI 세트
Table 5. LDRI set used in the experiment

No	LDR(case_1)	Tv	LDR(case_2)	Tv
1		1/30		1/8
2		1/15		1/4
3		1/8		1/2
4		1/4		1
5		1/2		2
6		1		4
7		2		8

3.4 휘도의 측정

평가대상인 5개의 빌더에서 제작된 각각의 HDR 영상 파일의 휘도값과 물리적 휘도측정결과와의 비교를 위하여 휘도측정기기를 선정하였다. 본 연구를 위해서 사용한 휘도계는 대면휘도계로서 Minolta사의 CA-2000을 선정하였다. Minolta사의 CA-2000 시스템은 CCD를 이용하는 휘도측정방식을 적용하고 있으며, 인간의 시각도와 최적으로 일치시킨 XYZ 필터와 ND(Neutral density) 필터를 모터로 회전시키면서 빛을 투과시키고, 투과된 각각의 광 성분을 흑백의 CCD 상에 투영시켜, 그 출력을 휘도값(L)과 색도값(xy) 등을 2차원 분포로 연산하여 표시한다.



그림 4. Minolta사의 CA-2000
Fig. 4. CA-2000, Minolta

CA-2000을 이용한 측정의 결과는, 조광(Dimming)을 하지 않은 실험케이스의(case_1) 측정값은 1007.59cd/m²(최대값)이며, 50% 조광(Dimming)을 하여 측정된 실험케이스(case_2)의 측정값은 446.06cd/m²(최대값)로 나타났다(표 6).

표 6. CA-2000을 이용한 측정결과
Table 6. Measurement Results using CA-2000

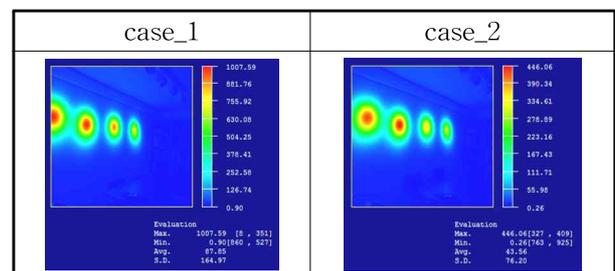
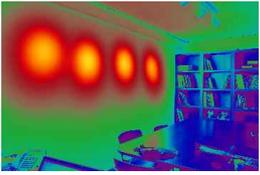
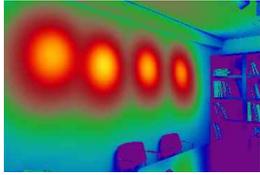
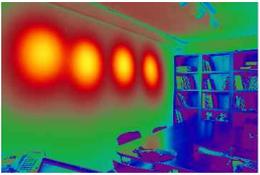
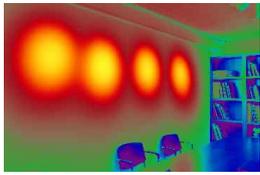
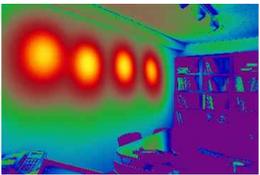
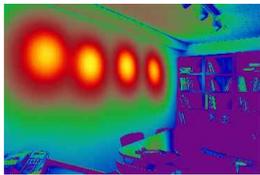
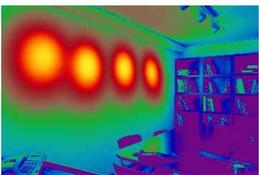
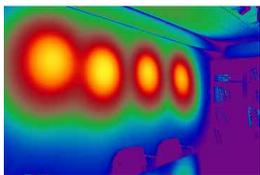
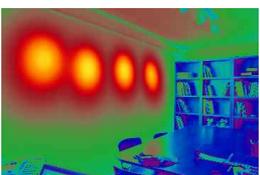
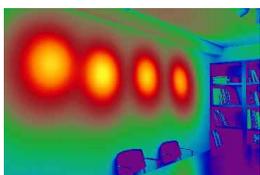


표 7. Radiance를 이용한 휘도분석결과
Table 7. Results of Luminance Analysis

빌더	휘도분포/최대값(cd/m ²)	
	case_1	case_2
B1	 1021.7	 430.6
B2	 492.9	 662.2
B3	 525.4	 1000.9
B4	 257.9	 88.2
B5	 1363.4	 535.6

Photosphere(B1), Picturenaut(B2), Photoshop(B3), Luminance HDR(B4), Bracket(B5)

4. HDR 영상과 휘도측정값의 비교

본 연구의 평가 대상인 각 빌더를 통해 제작된

HDR 영상의 최대휘도값(L_{HDR})과 CA-2000을 통한 물리적 휘도측정값($L_{measured}$)을 비교한 결과는 표 8, 표 9와 같으며 상대오차는 다음 식으로 구하였다.

$$Error(\%) = |(L_{HDR} - L_{measured}) / L_{measured}| \times 100$$

조광을 하지 않은 실험케이스(case_1)의 경우, Luminance HDR의 오차가 가장 크게 나타났고, 조광을 실시한 실험케이스(case_2)의 경우는 Photoshop의 오차가 가장 큰 것으로 확인되었다.

반면, Photosphere의 평균 오차는 2%로서 평가대상 빌더중에서 가장 낮은 오차율을 나타냈으며, Photoshop의 평균 오차는 86%로서 평가 대상 중에 가장 높은 것으로 확인되었다. Bracket의 평균 오차는 28%로서 Photosphere 다음으로 오차율이 낮은 것으로 확인되었다. 오차율이 상대적으로 낮게 나타난 이들 2개 빌더의 공통점은 프로그램 내부적으로 카메라 응답곡선을 생성한다는 것이다. Bracket은 HDR 이미지를 생성하기 전단계에서 LDR을 촬영한 카메라의 모델과 카메라응답함수를 자동으로 작성하는 것으로 확인되었다.

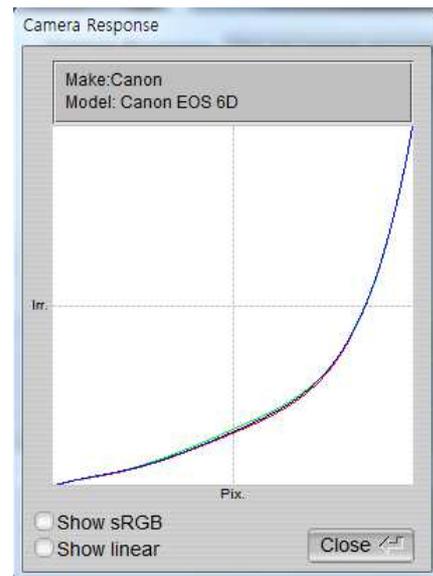


그림 5. Bracket의 카메라응답함수 복원
Fig. 5. Bracket's recovery operation of camera response function

실내공간의 빛 환경 분석을 위한 HDRI Builder의 평가

Luminance HDR의 경우, case_1(74%)과 case_2(80%)에서의 오차가 큰 차이가 없는 반면에 Photoshop의 오차는 2개의 실험케이스에서 각각의 오차가 48%와 124%로서 매우 큰 차이를 나타내었다.

표 8. case_1(CA2000 : 1007.59cd/m²)
Table 8. case_1(CA2000 : 1007.59cd/m²)

구분	L _{HDR} (cd/m ²)	ΔL	Error(%)
Bracket	1363.4	355.81	35%
Luminance HDR	257.9	749.69	74%
Photoshop	525.4	482.19	48%
Photosphere	1021.7	14.11	1%
Picturenaut	492.9	514.69	51%

표 9. case_2(CA2000 : 446.06cd/m²)
Table 9. case_2(CA2000 : 446.06cd/m²)

구분	L _{HDR} (cd/m ²)	ΔL	Error(%)
Bracket	535.6	89.54	20%
Luminance HDR	88.2	357.86	80%
Photoshop	1000.9	554.84	124%
Photosphere	430.6	15.46	3%
Picturenaut	662.2	216.14	48%

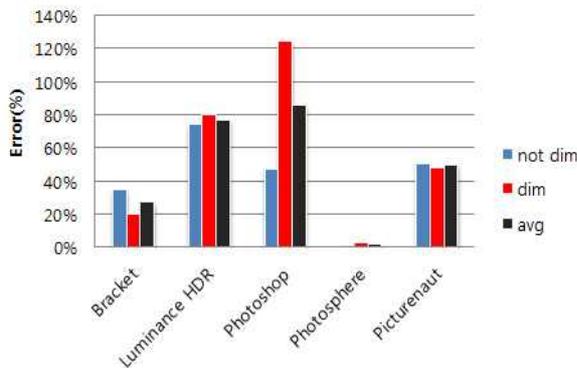


그림 6. 실험대상 HDRI 빌더의 평균 오차율(%)
Fig. 6. Mean Error(%) of HDRI builder used in Experiment

동일한 LDR 이미지 세트를 이용하여 각각의 HDRI 빌더에서 HDR 영상으로 작성 결과는, 시각적으로는 유사하게 인식되지만 HDR 영상의 각 화소에 기록된 휘도값은 차이가 있다는 것을 분석을 통하여 확인할 수 있었다. 이는 각 HDRI 빌더가 채택하고 있는 고유의 카메라응답함수 생성 모델의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

빛환경의 평가에서 HDR 영상을 이용한 방법은 오래전부터 연구되어 왔으며 다양한 분야에서 이에 대한 활용이 활발하게 이루어지고 있다. HDR 영상을 이용한 빛환경의 평가 방법은 기존의 물리적 휘도계를 사용하는 방법에 비하여 비용적으로 저렴하고 매우 정확한 데이터를 제공하는 반면, 그 촬영 절차가 번거롭다는 불리한 점이 제기되어 왔다.

본 연구는 다양한 HDRI 빌더들 중에서 빛환경의 평가에 활용할 수 있는 신뢰도가 높은 도구의 목록을 제안하는 목적으로 시작되었다. 본 연구의 평가 결과 Photosphere를 이용하여 HDR영상을 작성하였을 때 물리적 휘도 측정값과의 오차가 가장 낮다는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구의 대상인 5개의 HDRI 빌더 중에서 Photosphere를 제외한 나머지 4개의 빌더는 실제 빛환경의 평가에서 사용하기에는 다소 무리가 있다는 결론을 얻게 되었다. 이들 4개의 빌더는 우수한 톤매핑(tone-mapping) 알고리즘을 통하여 사진 영상 분야에서는 탁월한 영상미를 만들어내지만, 작성된 파일(.hdr)에 기록된 휘도값이 실제 장면이 갖고 있는 물리적 휘도값을 충실하게 기록하지는 못하는 것으로 판명되었다. 또한 평가 대상 중 일부 빌더의 경우, 파일에 기록되는 값이 실제 측정값에 비교하여 매우 과장되게 기록하는 것으로 확인되어 빛환경의 평가에는 부적합한 것으로 확인되었다.

본 연구는 제한된 실내공간을 대상으로 한정된 실험케이스를 설정하여 연구가 이루어졌기 때문에 본 연구의 결과를 일반화하기에는 다소 무리가 있음을 밝혀둔다. 향후에는 현재 이슈가 되고 있는 다양한 빛공

해 발생원을 대상으로 한 HDRI 빌더의 평가가 이루어
져야 할 것이다.

이 논문은 2013년도 동서울대학교 산학협력단 부설 연구
지원센터의 지원에 의하여 연구되었음.

References

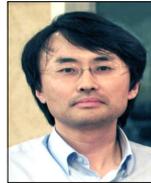
- [1] Liliانا O. Beltrán, Betina M. Mogo, Assessment of luminance distribution using hdr photography. Proceedings of the 2005 ISES Solar World Congress, 2005.
- [2] MN Inanici, Evaluation of high dynamic range photography as a luminance data acquisition system, Lighting Res. Technol. 38,2, 2006.
- [3] Martin Moeck, Accuracy of Luminance Maps Obtained from High Dynamic Range Images, LEUKOS VOL 4 NO 2 OCTOBER 2007.
- [4] Christian Bloch, HDRI handbook: High Dynamic Range Imaging for Photographers and CG Artists, Rocky Nook, 2007.
- [5] Yeong-Ho Ha, Dae-Geun Park, Kee-Hyon Park, Acquisition of HDR image using estimation of scenic dynamic range in images with various exposures, Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol.45-SP, NO.2, 2008.
- [6] Sung-De Hong, An EV Range in HDR Acquisition as a Luminance Map Creation, Journal of KIIEE, Vol.24, No.10, 2010.

◇ 저자소개 ◇



신은주 (辛恩宙)

1970년 9월 24일생. 2005년 한양대학교
실내환경디자인학과 박사수료. 현재 동
서울대학교 실내디자인과 조교수.



홍승대 (洪昇大)

1969년 1월 27일생. 2008년 서울대학교
건축학과 박사수료. 현재 신안산대학교
실내디자인과 부교수.