

# 시각 인지의 극대화를 위한 VR 연구

-빛의 반사와 굴절 표현을 중심으로-

A Study on VR for Maximizing Visual Recognition  
-Based on Reflection and Refraction Expression of Light-



오혁근 (Oh, hyouk keun)

한양대학교 응용미술학과

## 논문요약

### Abstract

#### I. 서론

1. 연구 목적
2. 연구 방법

#### II. 빛의 성질

1. 일반적인 빛의 현상
2. 반사와 굴절의 원리
3. 커스틱 현상

#### III. 3차원 컴퓨터 그래픽스의 표현방법

1. 사실적 표현을 위한 조건
2. 몬테카를로 방식
3. 광선추적기법
4. 레디오서티
5. 포톤맵

#### IV. 비교실험

1. 실험
2. 변인 추출

#### V. 결론

### 참고문헌

#### (keyword)

Caustics, Photon, Reflection

## 논문요약

점차 현실세계와 구분이 모호해지는 3차원 가상공간에서 광원이 차지하는 중요성은, 마치 현실세계의 빛이 지나는 중요성과도 비교될 만큼 결과물에 대한 기여도가 월등하다. 광선추적기법이 발표된 1980년 이후, 실제의 현상과 흡사한 원리로 빛의 성질을 표현하려는 3차원 컴퓨터 그래픽스의 연구는, 광자(光子)에 의한 빛의 난반사 현상을 구현할 만큼 눈부신 발전을 이루어내었다. 이러한 발전은, 인간의 시각으로 인지되는 모든 현상을 3차원 가상공간에서 구현할 수 있는 가능성을 제시하는 것이다. 이는 빛에 의한 수많은 자연현상을 동일한 원리로 표현하는 것이 가능해짐을 의미하며, 빛의 반사, 굴절, 산란, 회절 등의 복합적 현상에 의해 나타나는 커스틱 효과의 가상 구현을 그 대표적인 예로 들 수 있다.

본 연구에서는 빛의 일반적인 물리적 현상과 이를 표현하는 3차원 컴퓨터 그래픽스의 원리를 기반으로 비교실험을 실시하여, 가상공간에서 빛의 현상을 구현하는데 있어서 나타날 수 있는 변인(變因)들을 도출하였으며, 이러한 변인들은 다양한 환경에 의하여 미세하게 변화할 수 있으며, 두 변인 간의 상호작용에 의한 2차 변인이 발생되기도 한다는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 자연현상에는 아직도 예측 불가능한 다양한 변인들이 존재하기 때문에, 이를 보다 정확히 표현하기 위한 가상공간연구의 정량적 평가가 지속적으로 이루어져야할 것이다.

### Abstract

Importance of light source in 3 dimensional virtual space where its division from real world becomes gradually vague contributes outstandingly to the results as much as compared to the importance of light in real world. Since the light tracking technique was announced in 1980, the study on 3 dimensional computer graphics to express property of light in a similar principle to actual phenomenon has realized gorgeous development as much as realizing the diffused reflection phenomenon of light by photon. Such development presents a possibility of realizing all the phenomena recognized by human's vision in 3 dimensional

virtual space. This means that it becomes possible to express a lot of natural phenomena by light in the same principle, and its representative example is realization of caustic effects generated by a complicated phenomenon of reflection, refraction, scattering, diffraction, etc. of light.

This study has deduced variables appearing in realizing light phenomenon at virtual space by performing comparison experiments on the basis of general physical phenomenon of light and principle of 3 dimensional computer graphics to express this, and has obtained a result that such variables can be minutely changed by various environments and secondary variables due to interaction between two variables can happen. However, natural phenomenon contains diverse variables that are still unpredictable, so quantitative evaluation of virtual space research for expressing this more exactly should be realized continuously.

## I. 서론

### 1. 연구 목적

태초부터 인간의 눈에 보이는 모든 사물, 현상들은 태양 광에 의하여 그 형태나 색상이 규정되어 졌으며, 이후 수많은 인공조명들이 개발되면서, 인간이 인지할 수 있는 가시광선의 한계 내에서 조명효과에 의한 다양한 장면들을 연출할 수 있게 되었다. 이러한 자연광 또는 인공광에 의한 현상은, 사실적 이미지 창출을 목적으로 하는 19C 사실주의 화가들이나, 현대의 사진작가들에게 있어서 가장 중요하게 다루어져야 할 요소가 된다.

최근 들어 급속하게 발전하고 있는 3차원 컴퓨터 그래픽스(3D CG)에서의 사실적 표현도 이와 같은 맥락에서 본다면, 광원과 관련된 계산을 보다 복잡하고 정확하게 수행하는 알고리즘을 지닌 소프트웨어가 각광을 받는 것이 당연할 것이다. 실제로 최근 개발된 렌더러(renderer)들은 빛의 원리를 이용하여 사실과 흡사한 광원 효과를 나타내기 위한 알고리즘을 지니고 있다.

이에 본 연구에서는, 실제 광원의 다양한 현상들을 최대한 정확하게 표현할 수 있는 방법적 연구를 통하여, CG에서 사용되는 광원들의 효율적 활용 방법을 제시하고자 한다.

### 2. 연구 방법

3차원 디지털 이미지의 사실적 표현에는 다양한 원리나 기술적 요소들이 관여하지만, 최종 결과물의 품질에 있어서 조명이 차지하는 역할이 무엇보다 중요하다는 것은 이미 잘 알려진 사실이다. 지속적으로 발전되어온 각종 렌더러들의 특징은 이러한 조명효과, 즉 빛의 표현을 수행하는 알고리즘 개발에 중점을 두고 있으며, 사실상 거의 자연현상의 빛과 흡사한 구조 원리로 정확한 효과를 구현해내고 있다. 이는 빛에 의해 발생하는 현상의 기본이라 할 수 있는 반사와 굴절의 원리를 가상공간에 그대로 적용할 수 있다는 것이다.

본 연구에서는, 반사와 굴절에서 파생되는 다양한 자연현상의 원리와 빛의 현상을 구현하기 위하여 사용되는 컴퓨터 계산 기법을 조사, 분석하였으며, 빛의 성질과 관련된 CG의 다양한 파라미터들의 비교 실험을 통하여 보다 효과적인 표현방법을 위한 실험 데이터를 추출하였다.

## II. 빛의 성질

넓은 의미로 가시광선, 적외선, 자외선, X선 등의 전자기파가 모두 빛의 영역에 포함되지만, 인간의 시지각으로 인지되는 빛(가시광선)의 일반적 성질은 반사, 굴절, 산란, 흡수, 회절, 분산 등으로 구분된다.

### 1. 일반적인 빛의 현상

1) 반사(反射) : 파동이 한 매질(媒質)에서 다른 매질로 전파(傳播)해 갈 때, 경계면에서 일부 파동이 진행방향을 바꾸어 원래의 매질 안으로 되돌아오는 현상이다.

빛의 경우, 회절을 무시하면 프레넬(A. J. Fresnel)의 법칙<sup>1)</sup>에 따르며, 빛이 거울에서 반사되는 것과 같은 경우를 거울반사 또는 정반사(正反射), 같은 유리에서처럼 반사파가 사방으로 흩어지는 반사를 난반사(亂反射) 또는 확산반사라고 한다.

일반적으로 거울반사는 반듯한 면에서 발생하고, 난반사는 미세하게 불규칙한 면에서 나타나지만, 면과 반사의 상태는 파장에 따라 좌우된다. 예를 들어 빛과 같이 파장이 짧은 파동을 난반사하는 면이라도 파장이 긴 전파 등에서는 거울반사를 하는 경우가 있다. 또 빛이 투명한 제2매질로 향해 전진할 때에는 보통 빛의 일부만 반사되지만, 특별한 조건하에서는 제2매질로 전혀 들어가지 않고 전부 반사하기도 한다. 이런 반사를 전반사(全反射)라 한다.

2) 굴절(屈折) : 비스듬하게 입사된 빛이 기존의 매질로부터 새로운 물질로 진행할 때, 매질의 밀도 차이에 의해 빛 좌우의 속도 차이가 생겨서 빛이 꺾이는 현상으로, 하나의 매질로부터 다른 매질로 진입하는 빛이 그 경계면에서 나가는 방향을 바꾸는 현상이다. 굴절은 빛이나 소리 등 파동 일반에서 볼 수 있는 현상으로 아지랑이나 별의 반짝임, 신기루 등의 자연현상에서 수많은 예를 관찰할 수 있다.

3) 산란(散亂) : 이론적으로는 원자나 분자에 속박되어 있는 전자가 입사광선의 전자기파(電磁氣波)에 의하여 강제진동을 일으켜 2차적 빛을 내는 현상이며, 단파장의 빛

일수록 강하게 산란된다. 파장 보다 작은 미립자인 산광의 세기는 파장의 4제곱에 반비례하고, 청색 빛은 대기 중의 분자나 미립자에 의하여 태양광선이 산란된 것이다.(Rayleigh, 1871)

마찬가지로 태양이나 달이 뜨거나 질 때 붉은빛을 띠는 것은 태양빛이나 달빛의 단파장 부분이 두꺼운 공기층을 통과하면서 크게 산란되고, 장파장 부분의 빛은 투과되기 때문이다.

4) 흡수(吸收) : 물체에 들어온 빛이 그 진행에 따라서 차차 그 에너지를 잃어버리는 현상으로, 매질이 전파된 빛의 일부분을 흡수하기 때문에 일어난다.

기체나 입자선, 파동 등의 에너지를 강하게 흡수하는 물체를 각각에 대한 흡수체라 하며, 반대로 복사선 등을 흡수하지 않고 그대로 통과시키는 물질을 그 복사선에 대하여 투명하다고 한다. 유리는 가시광선에 투명하나, 자외선에 대해서는 흡수체로서 작용하므로, 자외선을 투과시키려면 이것에 대해서 투명한 석영유리와 같은 특수한 유리를 사용해야 한다.

5) 회절(回折) : 광원은 일반적으로 어떤 넓이를 가지고 있어서 그림자의 테두리가 희미해져 있으므로 회절효과를 분명히 알 수가 없다. 그러나 바늘 끝으로 뚫은 작은 구멍이나 면도칼 끝 등에 수직으로 빛을 조사(照射)하면 그림자가 되는 부분에 빛이 들어가 그것이 동심원이거나 평행한 명암 무늬로 되는 것을 볼 수 있다. 이것은 구멍이나 칼날 끝에서 회절된 빛이 서로 광행로차(光行路差)가 생겨, 그 길이가 빛의 파장과 같은 정도로 되기 때문에 일어나는 간섭현상의 일종으로서, 일반적으로 이것을 장애물에 의한 빛의 회절상이라 한다.

6) 분산(分散) : 자연광이나 인공광이 여러 가지 단색광으로 나누어지는 현상으로, 빛의 합성과 반대되는 과정이다. 우리가 무지개를 볼 수 있는 이유는 바로 빛의 분산 때문이다. 이는 비가 온 뒤에 햇빛이 공기 중의 작은 물방울을 통과할 때 빛이 분산되어 여러 가지 색으로 나뉘어 보이게 되는 것과 같은 원리이다. 빛의 색을 결정하는 것은 빛의 파장이며, 빛이 프리즘을 통과할 때도 여러 단색광으로 분산되는데, 이는 빛의 색에 따라 그 굴절 정도가 다르기 때문이다.<sup>2)</sup>

위와 같은 빛의 현상은 단독적으로 발생하기보다는 복합적으로 동시에 발생하기 때문에, 빛에 대한 자연현상을 설명할 때에는 위의 모든 현상이 적용된 상태라고 보아야 한다. 본 연구에서는, 이중 반사와 굴절에 의해 파생되

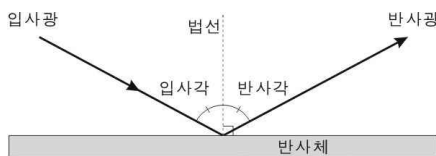
1) 네이버 백과사전 <http://100.naver.com/100.nhn?docid=171609>  
2차파는 구면파이지만 방향에 따라 세기가 다르고 광원을 포함한 임의의 곡면상의 각 점에서의 2차파가 관측점에서 겹쳐지게 된다. 그 점의 광도를 정하며 임의의 시각에 등위상면(等位相面)에서 출발한 2차파에 대해서 본다면 그 파면을 이었을 때 포락면 위의 점에서는 빛의 세기가 극대값을 취하게 된다. 즉, 프레넬은 2차파가 간섭한 결과라고 하는 생각을 보충하여 호이겐스의 원리를 완전하게 하였다. 따라서 이것을 '프레넬-호이겐스의 원리'라고도 한다.

2) 네이버 백과사전 <http://100.naver.com>

는 다양한 현상을 세부적으로 분석하고자 한다.

**2. 반사와 굴절의 원리**

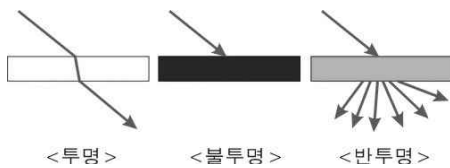
1) 반사 : 앞에서 언급한 바와 같이, 정반사(거울반사)와 난반사(확산반사)로 구분되는 반사는, 모두 반사의 법칙에 따른다. 반사의 법칙<sup>3)</sup>은 ①입사파와 반사파는 반사면에 수직인 동일 평면 위에 있으며, ②반사면에 수직으로 세운 법선(法線)에 대해 서로 반대쪽에 있고, ③반사각과 입사각은 같다는 입사파와 반사파의 방향에 관한 법칙이다. <그림1>



<그림 1> 반사의 법칙

이 법칙은 정반사의 경우뿐만 아니라 난반사의 경우에도 유효불통한 낱날의 미세한 면에서 성립한다. 또 반사면이 2차 곡면으로 되어 있는 거울 등에서는 거울 축에 평행으로 입사한 빛은 2차 곡선인 반사면의 기하학적 초점에 모인다.

2) 굴절 : 유리와 같은 투과성 물질에 빛이 입사되면, 그 성질에 따라 일부는 반사하고 일부는 흡수되며 나머지는 투과하게 된다. 반사와 흡수를 무시할 경우, 투명한 물체에 입사되는 빛은 모두 투과되고, 불투명한 물체에서는 투과하지 않으며, 반투명하거나 거친 표면의 유리재에서는 난반사와 같은 현상을 일으킨다. <그림2> 그러므로 3D CG에 있어서, 반투명이나 거친 표면의 유리표현에 복잡한 알고리즘이 필요하게 된다.



<그림 2> 물체의 투명도에 따른 굴절

물질이 투명하다면, 투과되는 빛의 진행방향은 물질의 종류와 입사각에 따라 굴절하게 되는데, 이때, ①입사광선과 굴절광선은 입사점에서 세운 법선과 같은 평면 위에 있고, 두 광선은 법선 양쪽에 있으며, ②매질1( $v_1$ )을 통과하는 입사각( $i$ )과 매질2( $v_2$ )에 들어가는 굴절각( $r$ )의 사인(sine)값의 비는 일정하다는 굴절의 법칙을 따른다.

$$n = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{v_1}{v_2}$$

여기서  $n$  을 매질1에 대한 매질2의 굴절률이라 하고 이 굴절의 법칙을 스넬의 법칙이라 한다.<sup>4)</sup> 스넬의 법칙은 두 매질의 굴절률의 비에만 의존하고 각각의 굴절률과는 무관하다는 것을 말해주고 있다.

각 물질의 절대 굴절률은, 이미 정의되어진 IOR(Index of refract) 수치<표1>를 이용하여 3D CG 상의 물체에 적용할 수 있다.

Material	IOR Value	Material	IOR Value
Air	1.0002926	Glycerine	1.473
Alcohol	1.329	Gold	0.47
Aluminum	1.44	Ice	1.309
Asphalt	1.635	Iron	1.51
Bronze	1.18	Mercury(liq)	1.62
Carbon Dioxide(gas)	1.000449	Nylon	1.53
Chrome Green	2.40	Opal	1.45
Chrome Red	2.42	Pearl	1.53
Chrome Yellow	2.31	Plastic	1.46
Cobalt Blue	1.74	Rock salt	1.544
Copper	1.10	Ruby	1.76
Coral	1.486	Silicon	4.24
Crystal	2.00	Silver	0.18
Diamond	2.417	Steel	2.50
Dolomite	1.503	Topaz	1.620
Emerald	1.576	Vacuum	1.00
Eye lens	1.35	Water 100°C	1.31819
Fluorite	1.434	Water 20°C	1.33335
Glass	1.51714	Water 35°C	1.33157

<표 1> IOR value

<출처:<a href="http://www.robinwood.com/Catalog/Technical/Gen3Duts/Gen3DPages/RefractionIndexList.html">http://www.robinwood.com/Catalog/Technical/Gen3Duts/Gen3DPages/RefractionIndexList.html</a>

**3. 커스틱(Caustics) 현상**

일반적으로 투명한 물체 주위에 생기는 불규칙한 반사광을 커스틱 현상이라고 하지만, 정반사성 빛의 전달(specular light transmission)에 의해 발생하는 현상의 일종으로, 빛의 성질을 종합한 현상이라 할 수 있다.

우리는 자연현상에서 다양한 커스틱 현상을 볼 수 있다.

- 렌즈나 프리즘에 의해 굴절된 빛
- 거울에 의해 반사된 빛
- 해변가나 수영장 바닥에 생기는 반짝이는 빛

4) 이순영, 3D Computer Animation에서 빛과 재질에 따른 Caustics 효과 연구, 홍익대 산업대학원 석사학위논문, 2003, p13.

3) 네이버 백과사전 <a href="http://100.naver.com/100.nhn?docid=805798">http://100.naver.com/100.nhn?docid=805798</a>

-유리병 같은 투명한 물체 주위에 생기는 불규칙한 빛  
 -코팅된 유리(자동차, 빌딩의 창문)에 의해 반사된 빛  
 -반사경이 내장된 전조등이나 손전등에서 발산된 빛  
 위와 같은 커스틱 현상을 3D CG에서 표현하기 위한 계산방법으로 포토맵(photon map)이 사용되어지는데, 보다 자연스러운 사실적 결과물을 생성하기 위해 중요하게 다루어져야 할 부분이다.

### III. 3차원 컴퓨터 그래픽스의 표현방법

#### 1. 사실적 표현을 위한 조건

가상의 공간을 더욱 실제처럼 표현하기 위한 기능들은 각 소프트웨어들이 지닌 장점으로 작용하게 된다. 가상공간의 사실적 표현을 위한 요소들을 정리하면 다음과 같다.<sup>5)</sup>

- 1) 정밀한 표면(detailed faces) : 사물(object)에 면(face)의 수가 많을수록 좋은 결과가 나오겠지만, 파일의 크기나 렌더링 속도를 감안하여 필요에 따라 적당한 수치를 정하는 것도 중요한 작업 중 하나이다.
- 2) 둥근 모서리(rounded edges) : 실제의 사물에서는 완벽하게 날카로운 모서리는 존재하지 않으며, 물체의 모서리에 하이라이트가 맺히는 현상은 3D CG에서 제공하는 기본 형태의 모서리에서는 찾아볼 수 없다. 그러므로 세밀함이 요구되는 모델링의 경우, 작은 부분이라도 모서리에 곡률값을 주어야 한다.
- 3) 조명, 그림자(lightning, shadows) : 광원은 물체의 형태, 크기, 분위기 등에 의해 위치, 개수, 조도, 색상 등을 설정하여야 한다. 더불어, 광원에 의하여 표현되는 그림자의 속성은 맵과 같은 개념이기 때문에 그림자의 색상, 밝기, 형태, 해상도 등의 조작도 신경써야 한다.
- 4) 재질, 맵(surface material, texture map) : 물체가 지니는 고유의 색상이나 무늬 등은 물론이고 빛의 반사정도를 적당히 지정하는 것도 사실적인 표현의 중요요소가 된다. 물체의 색상이나 반사정도는 광원에 의해 결정되어지는 부분이나, 3D CG에서는 재질과 맵이라는 방법으로 이러한 현상을 표현하고 있다.
- 5) 카메라, 투시(camera, perspective) : 모델링한 피사체의 크기에 따라 카메라의 렌즈 값을 적절히 설정해야 한다.

5) 오혁근, Design Process를 위한 Computer Graphics의 활용에 대한 연구, 한국디자인포럼 vol9, 한국비주얼디자인학회, 2004, pp342-343.

6) 반사, 굴절(reflection, refraction) : 사물의 색상이나 광택 정도는 빛의 반사에 의해 결정되어진다. 그러므로 CG에 있어서 보다 현실감 있는 반사 재질의 표현이 결과물의 사실적 표현에 중요한 요소로 작용된다. 단순히 주위의 사물들을 반사하는 기능뿐만 아니라, 광원의 진행방향을 역추적하여 사물의 표면에 반사 형상을 만들어내는 광선추적방식이나, 보다 본질적으로 빛의 반사와 굴절 자체를 표현하는 레디오서티(radiosity) 등의 기능을 이용하여 사실적인 이미지를 연출할 수 있다.

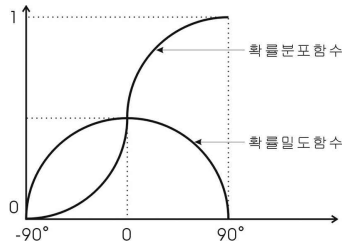
7) 렌더링 기법(rendering method) : 결과 화면에 사용되는 렌더 방식으로, 일반적인 스캔라인(scan-line) 렌더러의 효과를 보완하는 브이레이(v-ray), 파이널렌더(final render) 등의 렌더러들이 소개되어지고 있다. 이들이 제공하는 레디오서티, GI(global illumination) 등의 기능은 보다 현실감 있는 결과물을 제공한다.

#### 2. 몬테카를로 방식(Monte Carlo Method)

몬테카를로 방식은 도박의 승률계산과 같은 확률변수에 의거한 방법이다. 그러한 이유로, 몬테카를로라는 명칭도 모나코의 유명한 도박의 도시 이름을 차용하였다. 이 방법은 우연 현상에 대한 통계 이용법으로 난수(亂數, random number) 실험을 통하여 수학적인 문제의 근사치를 얻는 방법이다. 이 방법의 장점은, 다른 수학적 방법에 비해 계산 알고리즘이 간단하며,  $\sqrt{D/N}$  ( $D$ : 상수,  $N$ : 시도 횟수)의 비율로 계산의 오차범위를 구할 수 있다는 것이다.(Metropolis, Ulam, 1949) 하지만 아주 정확한 값을 얻을 수 없기 때문에, 5~10% 정도의 오차를 허용하는 공학적 문제들을 해결하는데 사용된다.

1) 반사 계산 : 광도의 크기에 따른 난수발생확률을 조절하기 위해 광도의 분포를 확률밀도함수로 변환시켜야 한다. 반사각도별 광도의 크기는 단위세기의 빛의 출현 회수로 생각할 수 있기 때문에 확률밀도함수로 변환시킬 수 있다. 확률밀도함수의 적분값의 함수인 확률분포함수를 구하고 이 함수의 역함수를 구하여 균일한 확률분포를 가지는 난수를 발생시켜 확률분포함수의 역함수에 대입시키면 확산반사에 의한 빛의 반사분포와 같은 확률적 난수를 발생시킬 수 있다. 발생된 난수를 이용하여 빛이 반사되는 각도를 결정할 수 있게 된다.

완전 확산면의 경우, 확률밀도함수는 입사각이 0°에서 90°인 구간에서 코사인(cosine)함수와 일치하며, 확률분포함수는 코사인함수의 적분값인 사인함수로 나타낼 수 있다. 또한, 역함수는 아크사인(arcsine)함수로 나타낼 수 있다.<sup>6)</sup> <그림3>



<그림 3> 확산면에 대한 빛의 반사를 확률적으로 고려한 난수발생

2) 굴절 계산 : 반사와 굴절의 원리에서 언급한 바와 같이, 빛은 투과물질에 따라 반사, 흡수, 투과하는 성질을 지닌다. 빛이 투과재료에 흡수되는 것은, 재료의 투과율에 의해 결정할 수 있지만, 투과와 반사는 다음의 수식과 같이 입사되는 빛의 각도에 의해서 결정된다. 이를 이용하여 유리재의 투과율을 입사각에 의해 구할 수 있다.(Rivero, 1958)<sup>7)</sup>

$$T_{\theta} = 1.018 T_0 (\cos\theta + \sin^3\theta \cos\theta)$$

( $T_{\theta}$  : 빛의 입사각이  $\theta$ 인 경우의 투과율,

$T_0$  : 빛이 수직으로 입사하는 경우의 투과율)

반투명이나 거친 표면의 유리를 투과한 빛의 진행방향을 3D CG에서 표현할 때, 위와 같은 난수 발생방법이 적용된 복잡한 알고리즘이 필요하게 된다.

### 3. 광선추적기법(Ray-Tracing Technique)

3D CG에서는, 광선의 굴절, 반사 등을 계산해서 광선이 시작되었던 조명에 이를 때까지의 경로를 역추적해 나가는 과정을 통해서 각 픽셀의 색상을 결정하는 렌더링 방법이라 정의한다. 하지만 광선추적기법은 어떤 입자의 움직임에 따른 운동방향과 크기를 벡터화 시켜 공간 내에서 입자의 운동경로를 수학적으로 예측할 수 있는 방법이며, 공간상에서 직선과 평면과의 기하학적 관계를 이해해야 한다. 이러한 공학적인 의미에서, 광선추적기법에 의해 표현되는 물체의 색상은 다음과 같은 공식<sup>8)</sup>에 의해서 정해진다.

$$I = I_{local} + Kr \times R + Kt \times T$$

(I : 렌더링된 최종 이미지의 색상,

$I_{local}$  : 직접조명이 비추는 시간,

R : 반사된 광원으로 부터의 광도,

T : 투과된 광선으로 부터의 광도,

6) 유기형, 몬테카를로 방법과 광선추적기법에 의한 아트리움의 자연채광 성능에측에 관한 연구, 한양대 대학원 석사학위논문, 1997, p13.

7) 유기형, 전계논문, p14.

8) 김종서, 3D 데이터의 사실적 렌더링을 위한 포토폴 기법에 관한 비교연구, 전북대 대학원, 석사학위논문, 2003, p11.

Kr, Kt : 반사계수, 투과계수)

컴퓨터의 하드웨어와 소프트웨어가 발전하면서 광선추적 기법도 다음과 같은 방식들로 지속적으로 개발되어 왔다.

1) Recursive Ray-tracing : 1980년 터너 휘티드(Turner Whitted)의 논문 「An Improved Illumination Model for Shaded Display」에서 처음 발표된 초기의 광선추적기법으로, 역추적에 의한 정반사(거울반사)의 특성만 지닌다. 그러므로 반사재질이나 투명재질이 아닌 물체는 일반 렌더러의 결과물과 차이가 없다. 이는 반사나 굴절이 설정되어있지 않은 일반 물체에 다르거나, 정해진 반복횟수에 이르면 광선추적을 중지하기 때문이다.

2) Distributed Ray-tracing : 단일광선을 주사하는 방식이 아니라 여러 개의 광선을 흩뿌리는(distribute) 방식으로 빛을 표현하기 때문에, 그림자의 외곽을 부드럽게 표현할 수 있고, 카메라 렌즈를 이용한 심도(depth of field) 조절이 가능하다.

3) Two-pass Ray-tracing : 이 방식의 가장 큰 특징은 빛의 성질에서 언급한 커스틱 현상을 표현할 수 있다는 것이다. 즉, 초기 광선추적기법의 단점인, 반사나 굴절이 전혀 없는 일반 물체에서도 추적을 멈추지 않고 빛의 진행이 계속 이루어지기 때문에, 보다 실제에 가까운 이미지를 얻을 수 있게 된다.

### 4. 레디오서티(Radiosity)

광선추적기법으로는 난반사된 광선이 다른 표면에 영향을 미치는 diffuse inter-reflection 현상을 구현할 수 없으며, 이와 같은 현상을 재현하기 위해 난반사의 계산에 있어서 주위의 다른 물체들과의 관계를 포괄적(global)으로 고려하는 방법이 레디오서티 기법이다.

레디오서티에서는 먼저 장면을 이루는 모든 면(surface)들을 패치(patch)라고 불리는 조각으로 나누고 광원에서 특정 패치들 간에 전달되는 광량을 계산한다. 패치간의 반사, 흡수는 두 패치간의 기하학적 관계(위치, 방향)에 의해 결정되며, 이때 광원에서 나오는 빛 에너지는 밀폐된 장면의 내부에서만 진행하다 평형을 이룬다. 그렇기 때문에 빛 에너지의 외부유출로 인한 손실이 적은 실내 공간의 재현에 주로 사용된다. 또한 레디오서티는 시점과는 관계없이 조명의 입사각만이 결과에 영향을 미치는 난반사 고유의 특성으로 인하여 시점 독립적<sup>9)</sup>(view independent)인 특성을 갖게 된다. 이는 광선추적기법과

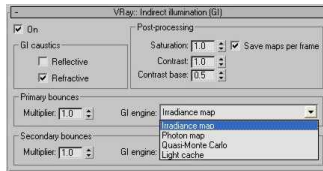
9) 한번 계산이 끝나면 물체를 움직이지 않는 한, 시점을 바꿔도 다시 계산을 수행하지 않고 렌더링을 진행하는 것을 의미한다. 공간개념으로 광량이 계산되어 지기 때문에 가능하다.

는 반대로 정반사는 고려하지 않고 전체 장면의 난반사만을 고려하기 때문에 가능하다. 즉, 실제와 같은 조명 설정으로 실제 상황과 거의 근접한 물리학적 방법으로 결과물을 얻을 수 있지만, 정반사와 굴절을 표현할 수 없기 때문에 대부분 광선추적기법을 함께 사용하는 하이브리드 형태의 렌더러로 제공된다.<sup>10)</sup>

### 5. 포톤맵(Photon map)

포톤맵은 Two-pass Ray-tracing의 일종으로, 광원으로 부터 광자(光子 : photon)들을 방출하여 반사와 굴절을 통한 포톤맵을 생성한 후, 이를 이용하여 최종 결과물을 추출하는 방식이다.(Henrik Wann Jensen, 1995) 광선추적방식의 일종 임에도 diffuse inter-reflection을 구현하기 때문에 색상출혈<sup>11)</sup>(color bleeding)과 같은 난반사를 표현할 수 있다.

브이레이의 Indirect illumination은, 몬테카를로 방식(Quasi-Monte Carlo)을 비롯하여 포톤맵, 일레디언스 맵(irradiance map)과 같은 GI 엔진을 제공한다. <그림4>



<그림 4> V-ray의 GI engine 항목

## IV. 비교 실험

가장 최근의 렌더링 기법이라 할 수 있는 포톤맵을 이용한 광선추적기법의 비교 실험을 위하여, 3D Studio Max 8.0과 V-ray 1.50을 이용한 시뮬레이션을 진행하였다. 그 외의 실험환경은 [표2]와 같다.

System	P-Dual 2.80GHz, 1G RAM, GeForce 6600 LE
OS	Windows XP sp2
Objects	Mesh object, Sphere, Box : Face수 28000
Lights	Spot light
Image size	800×600(pixel)

<표 2> 실험 환경

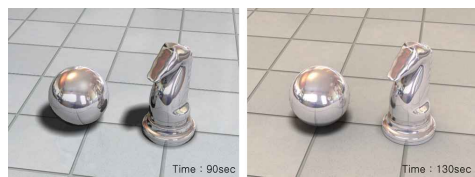
### 1. 실험

10) [http://www.3dsmax.net/m\\_artc.htm](http://www.3dsmax.net/m_artc.htm)

11) 난반사된 광선이 반사나 굴절을 하지 않는 서로 다른 물체에 상호 영향을 주는 현상으로, 황색 바닥 위에 놓여있는 흰색 물체의 아랫부분에 약한 황색 번짐 현상이 일어나게 한다.

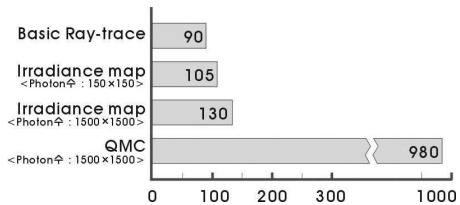
### 1) 반사 효과 실험

<그림5>는 일반 광선추적방식에 의한 렌더링(좌측그림)과 브이레이의 일레디언스맵을 적용한 광선추적방식의 렌더링(우측그림)을 비교한 결과물이다. 품질에 큰 차이는 없지만 일반 광선추적방식 결과물은 조명에 그림자(area shadow)를 설정한 상태인 반면, 브이레이 결과물의 어두운 부분은 빛 입자들이 상대적으로 많이 들어가지 못하는 구석진 부분(구와 바닥이 만나는 부분)에 생기는 음영이다. 참고로 물체의 표면에 생기는 반사상은 광원에 의한 표현이 아니라, HDR<sup>12)</sup>(High Dynamic Range)이라는 형식의 이미지를 맵으로 사용한 재질 반사 표현이다.



<그림 5> 반사재질의 비교

품질의 차이가 거의 없는 상황에서 중요한 것은 렌더링 속도인데, <그림6>에서 보는바와 같이 포톤의 개수와 렌더링 시간은 비례하며, 포톤의 수가 많을수록 몬테카를로 방식에서 상당한 처리시간을 요구하는 것을 알 수 있다.

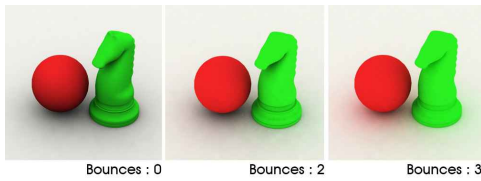


<그림 6> 반사재질의 렌더링 시간 (단위 : sec)

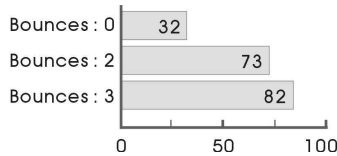
고무나 섬유와 같이 반사체가 아닌 물체에도 다양한 환경적 요소(근접한 조명, 색상 차)에 의해 주변의 색상이 묻어나는 실제현상을 볼 수 있다. 이를 CG에서는 색상출혈이라는 방법으로 표현하게 되는데, <그림7>에서 보는 바와 같이 색상출혈은 포톤의 반사회수(bounces)가 커질수록 강해지는 것을 알 수 있다.

12) 일반 디지털이미지의 256색상보다 더 많은 색상정보를 가지고 있는 이미지이다. 각 픽셀의 색상은 빛의 양에 비례하기 때문에, 단순히 색상 정보만 지니는 것이 아니라 광도의 정보를 지닌 이미지이다.





<그림 7> 반사회수에 의한 색상출현 비교



<그림 8> 반사회수에 의한 렌더링 시간(sec)

포톤맵을 사용하는 경우, 광원에서 분출되는 광자(포톤)의 수(diffuse subdivs)가 클수록 보다 미세한 입자로 명암을 표현한다. <그림9>



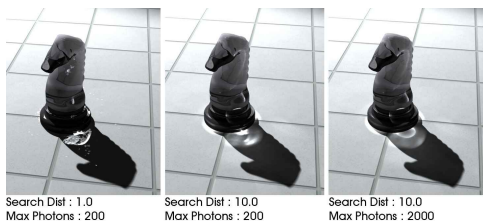
<그림 9> 포톤 수의 변화

2) 커스틱 효과 실험

커스틱 효과를 표현하려면 물체에 투명도가 설정되어야 하고 조명에 감쇄효과(inverse square)가 있어야 한다. 또한 search distance가 높을수록 정확한 커스틱이 생기고, max photons가 높을수록 부드러운 커스틱이 생긴다. <그림11>

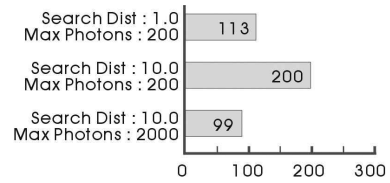


<그림 10> Caustics parameter



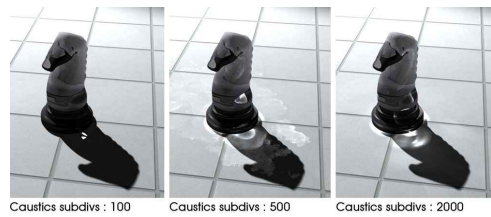
<그림 11> Search Dist와 Max Photons의 비교

실험결과에 의하면, 렌더링시간은 search distance가 증가할수록, max photons가 감소할수록 오래 걸리는 것으로 나타났다. <그림12>

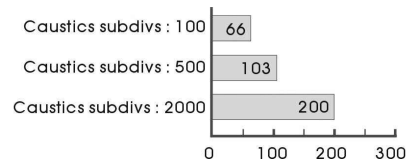


<그림 12> 커스틱 옵션에 의한 렌더링 시간(sec)

조명과 각 물체에 부여된 커스틱 강도(caustics multiplier)에 의해서 커스틱의 밝기가 조절되며, 조명에 부여된 속성 중, 커스틱에 사용될 포톤의 분할회수(caustics subdivs)를 높이면 보다 정밀한 커스틱이 생성된다. <그림13>

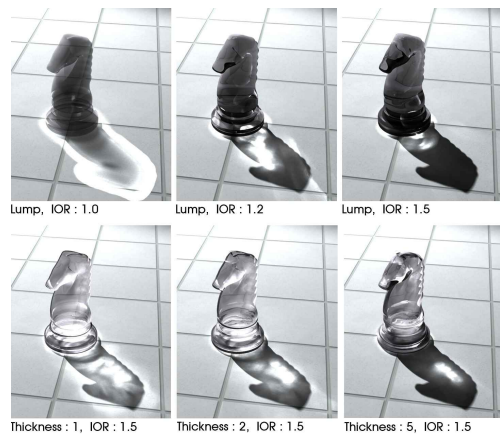


<그림 13> Caustics Subdivs의 비교



<그림 14> Caustics Subdivs에 의한 렌더링 시간(sec)

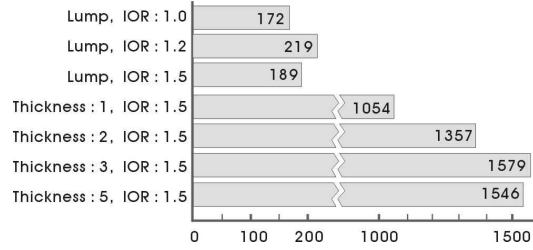
빛의 굴절과 밀접한 관계가 있는 커스틱은 굴절률과 물체의 두께에 따라 [그림15]와 같은 변화가 일어난다.



<그림 15> 물체의 두께와 굴절률에 따른 비교

물체에 두께가 지정되었을 경우, 얇을수록 렌더링 시간이 다소 단축되는 경향을 보였으나, 절대적이라기보다는 다른 변인들과의 상호작용이 더 큰 영향을 미치는 것으로

보인다. 마찬가지로 굴절률과 렌더링 시간은 무관한 것으로 나타났다. <그림16>



<그림 16> 두께(mm)와 굴절률에 의한 렌더링 시간(sec)

## 2. 변인 추출

실제 현상에서도 그러하듯, 빛에 의해 표현되는 3D CG의 다양한 장면들은 반사, 굴절, 산란, 회절 등의 복합적인 작용에 의한 결과이기 때문에 변화요인을 정확히 규정하는 것은 불가능해 보인다. 다만, 기능들의 파라미터를 조절하는 것과 다양한 환경적 요소들이 결과에 어떠한 영향을 미치는지, 비교실험을 통하여 상대적 데이터를 추출하고자 한다.

실험결과, 커스틱의 강도나 형상에 가장 큰 영향을 주는 요인은, 포톤의 개수와 관련된 다양한 파라미터 외에도 물체의 두께, 굴절률, 투명도 등으로 나타났다. 이러한 변인들은 단독적으로 결과물에 작용하거나, 렌더링 시간에 영향을 주기도 하지만, 2개 이상의 요인이 복합적으로 결과에 관여하기도 한다. 다음은 비교실험에 의해 도출된, 빛의 현상에 대한 변화요인들이다.

- 반사, 굴절현상은 포톤의 개수에 영향을 받는다.
- Indirect Illumination이 지정되면, 반사재질이 아닌 물체에서도 포톤의 반사가 이루어지며, 구석진 부분과 같이 빛의 침투가 적은 곳은 포톤의 반사회수도 적어, 그림자 없이도 어둡게 표현된다.
- 색상출현은 포톤의 반사회수가 커질수록 강해진다.
- 커스틱의 형상은 물체의 형태, 광원의 입사각, 그림자의 유무 등에 영향을 받는다.
- 조명에 감쇄현상이 있어야 커스틱이 생성된다.
- 커스틱은 투명도가 지정된 물체에만 생성되며, 투명도가 높을수록 강한 커스틱이 생성된다.
- 물체의 두께가 얇을수록 강한 커스틱이 생성된다.
- 굴절률의 미세한 변화에도 커스틱의 형상은 현저히 변화한다.
- 조명의 종류에 의해서도 커스틱의 결과가 다르게 나타날 수 있다. 본 실험에서는 spot light를 사용하였으나, 동일한 조건에서 v-ray light를 사용하면 보다 부드러운 커스틱이 생성된다.

-광원에서 분출하는 포톤의 수가 많을수록 정밀한 커스틱이 만들어진다.

-포톤의 개수, 크기, 형상은 search dist, max photons, diffuse subdivs, caustics subdivs 등의 영향을 받는다.

-조명이나 각 물체에 부여된 커스틱 강도(caustics multiplier)에 의해서 기본적으로 커스틱의 밝기가 조절되나, 광원의 밝기가 상대적으로 어두워야 커스틱 효과가 강하게 나타난다.

## V. 결론

실제 환경에 존재하는 광원은 크게 자연채광과 인공조명으로 구분할 수 있다. 인공조명의 성질은 대부분 자연광과 동일하지만, 발광을 위한 사용 재료에 따라 그 색상이나 광도 등을 다양하게 표현할 수 있는 특징을 지닌다. 태양의 스펙트럼 현상으로 설명되는 자연광은 일반적으로 반사, 굴절, 산란, 흡수, 회절, 분산의 성질을 지니게 되는데, 광선추적방식이 개발된 1980년 이후부터 3D CG에서도 실제 현상과 흡사한 원리로 빛의 표현이 시도되고 있다.

일반적인 스캔라인 렌더에서 표현되는 반사와 굴절 현상만으로는 보다 복잡한 빛의 성질을 제대로 구현하는데 한계가 있는데, 이는 산란, 분산 등과 같은 빛의 난반사와 관계된 성질의 표현이 불가능하기 때문이다. 또한 반사와 굴절이 혼합되어 나타나는 커스틱 현상도 일반 렌더러나 초기의 광선추적방식으로는 구현할 수 없기 때문에, 브이레이, 파이널렌더, 멘탈레이(mental ray) 등과 같은 외부렌더러의 활용이 불가피하다.

본 연구에서는 반사와 굴절로 대표되는 빛의 원리를 바탕으로 비교실험 분석을 실시하였으며, 3D CG에서 복잡한 빛의 현상을 구현하는데 작용하는 다양한 변인들을 추출하였다.

그 결과, 이러한 변인들은 다양한 환경에 의하여 미세하게 변화할 수 있으며, 두 변인 간의 상호작용에 의한 2차 변인이 발생되기도 한다는 것을 알 수 있었다. 단, 본 연구는 단일 광원, 단일 물체에 국한된 실험이기 때문에, 다양한 종류의 조명과 물체들의 복합적 반응에 의해서 나타날 수 있는 보다 복잡한 현상은 다루지 못하였다. 그러므로 빛과 관계되는 다양한 환경적, 물리적 현상의 폭넓은 이해와, 새로운 변인들에 관한 지속적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

## 참고문헌

- 1)김민성, 3면형 아트륨에서 자연채광에 의한 공간 조도분포 해석, 한양대 대학원 석사학위논문, 1998.
- 2)김종서, 3D 데이터의 사실적 렌더링을 위한 포톤 맵 기법에 대한 비교연구, 전북대 대학원 석사학위논문, 2003.
- 3)송규동, 모형실험과 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 실내 조명계획에 관한 연구, 한양대 대학원 석사학위논문, 1985.
- 4)오혁근, Design Process를 위한 Computer Graphics의 활용에 대한 연구, 한국디자인포럼 vol9, 한국비주얼디자인 학회, 2004.
- 5)유기형, 몬테카를로 방법과 광선추적기법에 의한 아트륨의 자연채광 성능예측에 관한 연구, 한양대 대학원 석사학위논문, 1997.
- 6)이순영, 3D Computer Animation에서 빛과 재질에 따른 Caustics 효과 연구, 홍익대 산업대학원 석사학위논문, 2003.
- 7)주우석, 3차원 컴퓨터 그래픽스, 그린, 1999.
- 8)네이버 백과사전 <http://100.naver.com>
- 9)[http://www.3dsmax.net/m\\_artc.htm](http://www.3dsmax.net/m_artc.htm)
- 10) <http://www.robinwood.com/Catalog/Technical/Gen3DTuts/Gen3DPages/RefractionIndexList.html>

