

# HDR이미지 톤 매핑 알고리즘의 성능 평가

이용환<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup>원광대학교 디지털콘텐츠공학과

## Performance Estimation of Tone Mapping for HDR Images

Yong-Hwan Lee<sup>\*†</sup>

<sup>\*†</sup>Dept. of Digital Contents, Wonkwang University

### ABSTRACT

Tone mapping operator is designed to reproduce visibility of real-world scenes such as HDR images on limited dynamic range display devices. This paper presents and implements compare and to estimate some tone mapping algorithms commonly used. The evaluation is performed by applying tone mapping operators on 7 HDR images, and by presenting the results with subjective estimation. Reinhard tone mapping algorithm is the best in the visual experimental results. The goal of this work is to discuss what is visible of high dynamic range on a normal display device and to determine to which better algorithm is. This work motivates us to make more progress through the new proposal of tone mapping operator on future work.

**Key Words** : High Dynamic Range Image, Low Dynamic Range Image, Tone Mapping Operation, Performance Estimation

### 1. Introduction

최근 HDR(High Dynamic Range) 이미지에 대한 수요는 현실 세계에서 이미지 촬영 필요성과 HDR 이미지를 쉽게 처리할 수 있는 발전된 컴퓨팅 성능의 가용성으로 인해, 다양한 산업에서 HDR 이미지의 활용이 늘어나고 있다. HDR 이미지는 다양한 노출(under, normal과 over)에서 다수의 LDR(Low Dynamic Range) 이미지를 가져와, 이미지 세부 정보를 유지하기 위해 결합하여 생성한다. 낮은 노출은 이미지를 덜 밝게 만들기 위해 실제 장면의 밝은 영역에 사용되며, 높은 노출은 이미지의 어두운 영역을 렌더링하는데 사용된다[13]. 일반적으로 높은 동적 범위 콘텐츠를 00005에서 100cd/m<sup>2</sup> 사이의 휘도 범위를 갖는 디스플레이에서 등급이 매겨진다[12]. 다수의 서로 다른 노출된 LDR 이미지를 결합하는 방법은 여러 방법들이 존재하며, 전역(Global) 처리 방법과 지역(Local) 처리 방법으로 분류된다[14]. 전역 결합 방법은 이미지의 공간 정보를 고려하

지 않고, 전체 이미지에 페널티를 부여하는 전역 정규화 인자를 계산하는 반면에, 지역 결합 방법은 이미지에 국소 유사 영역의 그룹을 계산하여 처리한다[1]. Fig. 1은 HDR을 설정하여 아이폰으로 촬영한 LDR 및 HDR 이미지의 예시 사진을 보여준다.



(a) LDR image (b) HDR image  
**Fig. 1.** Example of Photos captured by iPhone at Outdoor of Night.

<sup>†</sup>E-mail: hwany1458@empas.com

기존의 이미지 촬영 장비는 일반적으로 장면의 제한된 범위 강도를 처리한다. 즉, 일반 카메라와 디스플레이 장비는 1필셀당 24비트 깊이를 가지며, 256개의 개별 강도 레벨을 가질 수 있다[15-16]. 이 깊이는 실제적인 동적 범위를 나타낼 수가 없으며, 이미지의 일부는 어둡게 표시되고, 반대의 일부 영역은 밝게 표시가 된다[8]. LCD 및 CRT 모니터와 같은 디스플레이 장비에서는 동적 범위가 제한되어, 자연 영상 장면에 존재하는 전체 범위의 광도를 재현하기에는 부적합할 수 있다. 톤 매핑(Tone Mapping)은 원본 장면 콘텐츠를 감상하는데 중요한 이미지의 세부 정보와 색상, 모양을 유지하면서 실제 장면의 광도에서 표시 가능한 범위까지의 강한 대비 감소 문제를 해결한다. 이러한 제약적 문제는 높은 동적 범위를 낮은 동적 범위로 변환하여 해결할 수 있다. 이는 이미지 무결성을 유지하면서, 보다 제한된 동적 범위를 갖는 높은 동적 범위 이미지의 모양을 근사하기 위해, 하나의 색상 집합을 다른 색상의 집합에 매핑하는 기술을 반영한다.

본 논문에서는 톤 매핑 방법 중 대표적인 알고리즘을 검토하고 해당 알고리즘에 대한 실험 평가를 제시하여, 일반 디스플레이 장비에서 HDR 이미지를 표시하는 방법에 대해 논의한다. 또한 효율적인 톤 매핑 방법을 개발하기 전, 어느 알고리즘이 보다 나은지를 결정하기 위해 다수의 톤 매핑 알고리즘을 비교 분석하여, 효과적인 연구 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 톤 매핑 알고리즘 분석

톤 매핑 기술은 이미지 무결성을 유지하면서 LCD 모니터 또는 프로젝터와 같은 기존에 많이 활용되는 디스플레이 장치에서 HDR 이미지를 표시할 수 있도록 HDR 이미지를 LDR 이미지로 변환하는 프로세스이다. 본 절에서는 잘 알려진 대표적인 톤 매핑 연산자들을 소개하고 성능적 비교 평가를 수행한다.

Drago는 적응형 대수 매핑 연산자(Adaptive Logarithmic Mapping Operator)를 사용하여 밝기 값의 동적 범위가 제한된 장치에 고 대비 이미지를 표시하는 로그 함수를 제안하였다[3]. 해당 알고리즘은 빛에 대한 인간의 반응을 모방하는 휘도 값의 대수 압축을 기반으로 한다. 제안된 기능은 수식 (1)을 사용하여 HDR 이미지의 휘도 구성요소를 압축한다.

$$L_d = \frac{L_{dmax} \times 0.01}{\log_{10}(L_{wmax} + 1)} \times \frac{\log(L_w + 1)}{\log\left(2 + \left(\frac{L_w}{L_{wmax}}\right)^{\frac{\log(b)}{\log 0.5}} \times 2^3\right)} \quad (1)$$

여기서  $L_{dmax}$ 는 디스플레이의 최대 휘도 값으로, 디스플레이에 출력을 적용하기 위한 스케일 팩터이다.

Banterle은 휘도 매핑을 위해 대수 함수 대신에, 톤 감소 함수(Exponential Tone Reducing Function)를 제안하였다[2]. 지수 이득은 수식 (2)를 통해 계산되며, 식에서  $L_{av}$ 는 평균 휘도이다. 압축 이득을 계산한 다음, 수식 (3)을 사용하여 감마 보정(Gamma Correction)을 수행한다.

$$L_d = 1 - \exp\left(\frac{L_{HDR}}{L_{av}}\right) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} I_{HDR} \cdot R \\ I_{HDR} \cdot G \\ I_{HDR} \cdot B \end{bmatrix} = L_d \times \begin{bmatrix} (I_{HDR} \cdot R)/L_{HDR} \\ (I_{HDR} \cdot G)/L_{HDR} \\ (I_{HDR} \cdot B)/L_{HDR} \end{bmatrix}^s \quad (3)$$

Reinhard 저 휘도 키와 고 휘도 키를 사용하여 제어 가능한 방식으로, 휘도를 압축하는 지수 연산자의 수정 버전을 제안하였다[8,10]. 휘도가 높은 영역은 수식 (4)를 통해 높은 키 값으로 압축하고, 휘도가 낮은 영역은 수식 (5)를 통해 낮은 키 값으로 매핑한다. 수식에서,  $L_m$ 는 초기 휘도 스케일인  $L_m = \frac{a}{L_{av}} \cdot L_m(x, y)$ 를 의미하며,  $L_{white}$ 는 흰색으로 매칭될 최소 휘도 값을 나타낸다.

$$L_d(x, y) = \frac{L_m(x, y)}{1 + L_m(x, y)} \quad (4)$$

$$L_d(x, y) = \frac{L_m(x, y) \times \left(1 + \frac{L_m(x, y)}{L_{white}^2}\right)}{1 + L_m(x, y)} \quad (5)$$

Table 1은 잘 알려진 톤 매핑 알고리즘을 계산하기 위한 몇가지 방법과 추정 결과를 요약한 것이다. Fig 2는 7개의 대표적인 샘플 HDR 이미지(forest path, 2개 mpi atrium, 3개 nancy church와 seymour park)에 대해, 각 알고리즘을 적용하여 실행한 실험 결과를 보여준다.

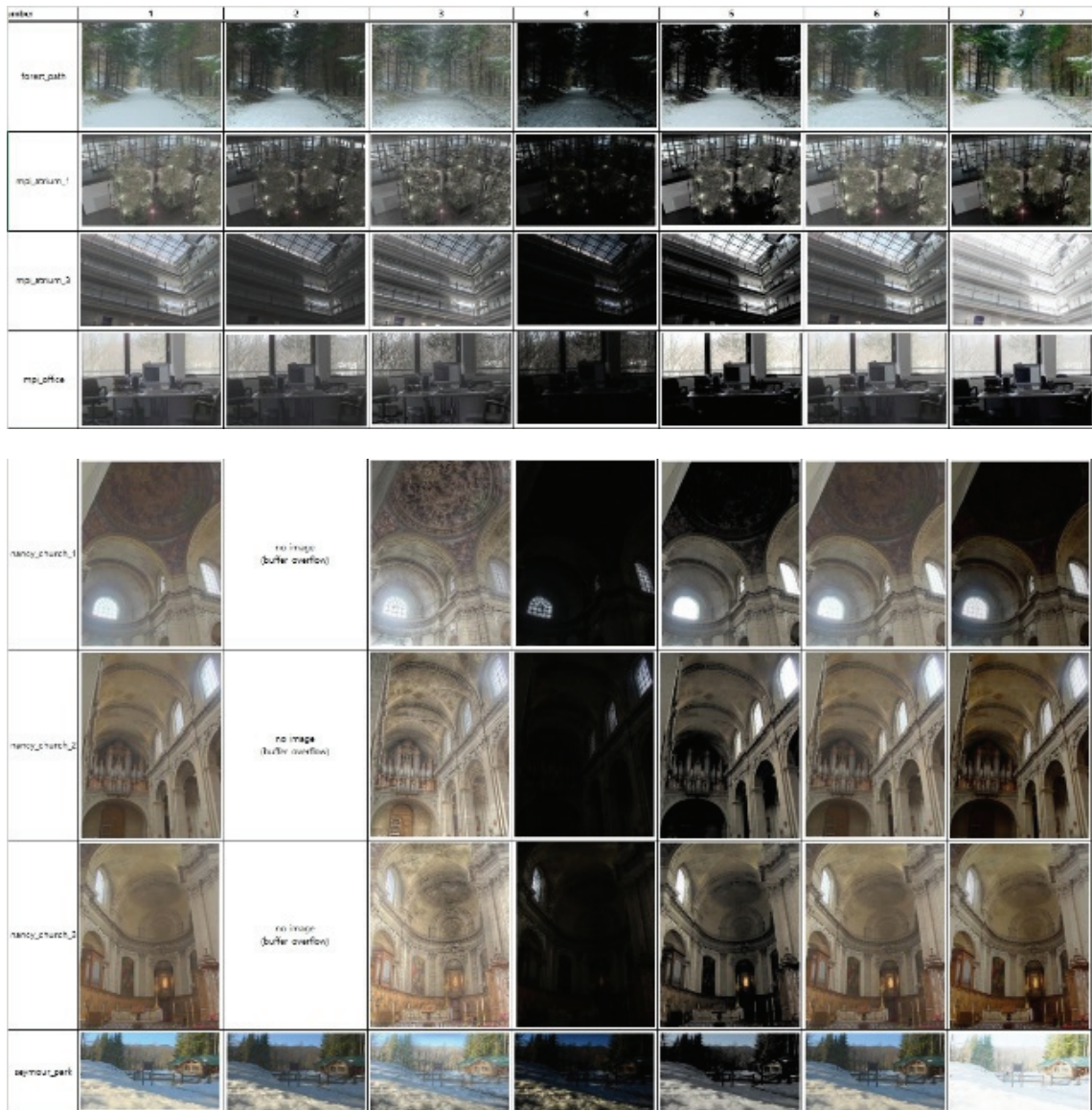


Fig. 2. Final Results of Tone Mapping Operation with Several Algorithms: (a-g) Tone Mapped Images by the References.

**Table 1.** Summary of Some Tone Mapping Procedures

Methods	Main Functions	Estimation Results
Drago TMT [3]	- Logarithmic compression of luminance values - 빛에 대한 인간의 반응 모방	- Details과 Contrast 보존에 우수 - 어두운 영역의 Contrast를 개선하기 위한 Gamma correction 절차가 우수
Durand TMO [4]	- 2개 스케일로 분해 - Base layer는 Bilateral filter와 Edge-preserving filter 사용 - Piecewise-linear approximation과 서브샘플링을 위한 Bilateral filtering 가속화	- Edge preserving filtering에 따른 속도 저하 - 상대적으로 Contrast 감소
Fattal TMO [5]	- 큰 Gradient magnitude를 감소시키는 휘도 이미지에 대해 Gradient field조작 - 낮은 동적 범위 이미지에 존재하는 Poisson equation 변환을 통해 Gradient field 변형 문제를 해결	- Halos, Gradient reversal, Local contrast 손실과 같은 Common artifact 현상을 방지함 - 동적 범위 압축
Mantiuk TMO [6]	- Spatial frequency의 전체 이미지 범위에서 대비의 전체 집합을 제한하는 프레임워크를 갖는 Gradient domain 적용 - Custom transducer function을 사용하여 Contrast magnitude를 선형화시킴	- 심각한 이미지 수정에도 불구하고 Contrast polarity을 변형시키지 않음
Pattanaik TMO [7]	- Scene intensity 프레임의 스트림을 혼용하여 Color display 이미지의 스트림을 생성하여 톤 재생	- Illumination과 Contrast의 동적 변화를 실제 세계 장면과 유사하게 재생 가능
Reinhard02 TMO [11]	- 검증된 사진 재생 기술 적용 - Tone reproduction operator 적용	- Image artifact가 반영되지 않음
Reinhard05 TMO [9]	- 일반적인 조명 수준에서 Receptor automatic adjustment 가능 - Photoreceptor adaptation 모델 활용	- Intensity, Contrast 및 Chromatic adaptation 수준을 제어 - 실용적이고 알고리즘 처리 속도가 빠름

#### 4. Conclusion and Future Work

본 논문에서는 일반 디스플레이 장치에서 HDR 이미지를 LDR 이미지로 변환하는 톤 매핑 방법을 살펴보고, 잘 알려진 대표적인 톤 매핑 알고리즘을 비교 평가하였다. 평가는 7개 대표 HDR 이미지를 기초하여, 톤 매핑 연산자를 적용하여 그 결과를 주관적인 평가로 수행되었다. 결과적으로, Reinhard 톤 매핑 알고리즘이 시각적 실험 결과에서 가장 우수하게 나타났다. 본 연구의 주요 내용은 일반 디스플레이 장치에서 HDR 이미지가 표시되는 변환 방법에 대해 논의하고 어떤 알고리즘이 보다 나은지를 결정할 수 있었다.

향후 작업으로, 톤 매핑 연산자의 새로운 제안을 통해 더 많은 발전과 연구에 기여하고자 한다.

#### 감사의 글

본 논문은 2021학년도 원광대학교의 교비 지원에 의해 수행됨.

#### 참고문헌

1. Y. Bandoh, G. Qiu, M. Okuda, S. Daly, T. Ach, and O.C. Au, "Recent Advance in High Dynamic Range Imaging Technology", IEEE International Conference on Image Processing, pp.3125-3128, 2010.
2. F. Banterle, P. Ledda, K. Debattista, A. Chalmers, and M. Bloj, "A Framework for Inverse Tone Mapping", The Visual Computer, vol.23, no.7, pp.467-478, 2007.
3. F. Drago, K. Myszkowski, T. Annen, and N. Chiba, "Adaptive Logarithmic Mapping for Displaying High Contrast Scenes", EuroGraphic, vol.22, no.3, 2003.

4. Fredo Durand and Julie Dorsey, "Fast Bilateral Filtering for the Display of High Dynamic Range Images", SIGGRAPH, 2002.
5. Raanan Fattal, Dani Lischinski, and Michael Werman, "Gradient Domain High Dynamic Range Compression", Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.249-256, 2002.
6. Rafal Mantiuk, Karol Myszkowski, and Hans-Peter Seidel, "A Perceptual Framework for Contrast Processing of High Dynamic Range Images", ACM Transactions on Applied Perception, Vol.3, Issue.3, pp.286-308, 2006.
7. Sumanta N. Pattanaik, Jack Tumblin, Hector Yee, and Donald P. Greenberg, "Time-Dependent Visual Adaptation for Realistic Image Display", Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.47-54, 2000.
8. E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec, "High Dynamic Range Imaging Acquisition, Display and Image-based Lighting", Morgan Kaufmann Publisher, An imprint of Elsevier, 2005.
9. Erik Reinhard and Kate Devlin, "Dynamic Range Reduction Inspired by Photoreceptor Physiology", IEEE Transaction on Visualization and Computer Graphics, vol.11, no.1, pp.13-24, 2005.
10. Erik Reinhard, Michael Stark, Peter Shirley, and James Ferwerda, "Photographic Tone Reproduction for Digital Images", Proceedings of the Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, pp.267-276, 2002.
11. A. Vavilin, K. Deb, and K.H. Jo, "Fast HDR Image Generation Technique based on Exposure Blending", Trends in Applied Intelligent Systems, pp.379-388, 2010.
12. Y.H. Lee, H.J. Kim, "Improved Algorithm of Sectional Tone Mapping for HDR Images", Journal of the Semiconductor & Display Technology, vol.20, no.2, 2021.
13. Y.H. Lee, Y.S. Kim, "Analysis of False Color Visualization for HDR", Journal of the Semiconductor & Display Technology, vol.16, no.3, 2017.
14. Yafei Ou, Prasoon Ambalathankandy, Masayuki Ikebe, Shinya Takamaeda, Masato Motomura, Tetsuya Asai, "Real-time Tone Mapping: A State of the Art Report", Image and Video Processing (EESS.IV), 2020.
15. Jianyu Lin, Wei Zhang, "Correcting the Detects of the Default Tone Mapping Operators Implemented in the JPEGXT HDR Image Compression Standard", IEEE Access, vol.9, 2021.
16. Hiroyuki Kobayashi, Hitoshi Kiya, "Performance Evaluation of Two-layer Lossless HDR Coding using Histogram Packing Technique under Various Tone-mapping Operators", IEEE Global Conference on Consumer Electronics, 2019.

---

접수일: 2021년 12월 11일, 심사일: 2021년 12월 15일,  
 게재확정일: 2021년 12월 18일