



# 최적화된 전달량 함수를 이용한 저조도 영상 복원

## LOW-LIGHT IMAGE RESTORATION USING OPTIMIZED TRANSMISSION MAP

2016년 12월 6일

중앙대학교 첨단영상대학원 고승용

# Contents



- **Part I**

- I. 연구 실적
- II. 수강 과목

- **Part II**

- I. 연구 목표 및 중요성
- II. 연구 배경
- III. 제안하는 방법
- IV. 실험 결과
- V. 결론



---

# PART 1

---

- I. 연구 실적
- II. 수강 과목



# I. 연구 실적



## • 국제 저널

- B. Moon, S. Yu, **S. Ko**, S. Park, and J. Paik, "Continuous Digital Zooming Using Local Self-Similarity-Based Super-Resolution For Asymmetric Dual Camera System," *Journal of the Optical Society of America A*, **submitted for publication**, November 2016. (SCI)
- **S. Ko**, S. Yu, W. Kang, C. Park, S. Lee, and J. Paik, "Artifact-free Low-light Video Enhancement Using Temporal Similarity and Guide Map," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, **revision for publication**, November 2016. (SCI, IF 6.38)
- **S. Ko**, S. Yu, B. Moon, S. Park, and J. Paik, "Inverse Dark Channel Prior-based Low-light Video Enhancement and Its Application to Object Tracking," *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, **submitted for publication**, October 2016. (SCI, IF 1.06)
- S. Park, B. Moon, **S. Ko**, S. Yu, and J. Paik, "Low-light Image Restoration Using Bright Channel Prior-Based Variational Retinex Model," *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, submitted for publication, October 2016. (SCI)
- S. Yu, W. Kang, **S. Ko**, and J. Paik, "Single Image Super-Resolution Using Locally Adaptive Multiple Linear Regression," *Journal of the Optical Society America-A: Optics, Image Science and Vision*, vol. 32, no. 12, pp. 2264-2275, December 2015. (SCI)
- W. Kang, S. Yu, **S. Ko**, and J. Paik, "Multisensor Super Resolution Using Directionally Adaptive Regularization for UAV Images," *Sensors*, vol. 15, no. 5, pp. 12053-12079, May 2015. (SCI-E)

## • 국제 학회

- **S. Ko**, S. Yu, B. Moon, S. Park and J. Paik, "Variational Optimization based Simultaneous Destriping and Denosing for Multispectral Imaging System," *Proc. IEIE Int. Conf. Electronics, Information and Communication*, to appear, January 2017.
- S. Park, B. Moon, **S. Ko**, S. Yu, and J. Paik, "Low-light Image Enhancement Using Variational Optimization-based Retinex Model," *Proc. IEEE Int. Conf. Consumer Electronics*, to appear, January 2017.
- V. Maik, S. Yu, **S. Ko**, and J. Paik, "Color Reproduction Using Intensity Compensation Function for Dual Camera Systems," *Proc. IEEE/IEIE Int. Conf. Consumer Electronics - Asia 2016*, pp. 258-259, October 2016.
- S. Park, B. Moon, S. Park, **S. Ko**, S. Yu, and J. Paik, "Brightness and Color Correction for Dual Camera Image Registration," *Proc. IEEE/IEIE Int. Conf. Consumer Electronics - Asia 2016*, pp. 492-493, October 2016
- B. Moon, S. Yu, **S. Ko**, S. Park, and J. Paik, "Local Self Similarity-Based Super-Resolution for Asymmetric Dual-Camera," *Proc. IEEE 2016 Int. Conf. Consumer Electronics-Berlin*, accepted for publication, March 2016.
- **S. Ko**, S. Yu, W. Kang, and J. Paik, "Flicker-free Low-light Video Enhancement Using Patch-Similarity and Adaptive Accumulation," *Proc. IEEE 2016 Int. Conf. Consumer Electronics*, pp. 235-236, January 2016.
- S. Yu, **S. Ko**, W. Kang, and J. Paik, "Low-light Image Enhancement Using Fast Adaptive Binning for Mobile Phone Cameras," *Proc. IEEE 2015 Int. Conf. Consumer Electronics-Berlin*, pp. 170-171, September 2015.
- **S. Ko**, S. Yu, W. Kang, and J. Paik, "Example-based Low-light Image Enhancement Using Neural Network for Driver Assistance Systems," *Proc. International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications*, pp. 138-139, June 2015.

# I. 연구 실적



- 프로젝트

- LG전자 (프로젝트기간: 2014.06-2015.12)
  - CMOS 카메라용 저조도 컬러 영상 개선 기술 연구
- SK텔레콤 종합기술원 (프로젝트기간: 2016.03-2016.08)
  - Vivid Scene Creation 개발
- 항공우주연구원 (프로젝트 기간: 2016.07-2016.02)
  - K7 고해상도 광학영상 처리 속도 향상 및 검보정 관련 기술 선행개발

- 첨단영상제

- 고승용, “영화속으로,” 2015년 제 16회 중앙대학교 첨단영상대학원 첨단영상제



## II. 수강 과목



Subjects	Grades
디지털비디오시스템	A+
첨단영상세미나	A+
영상공학수학	B+
계산적영상처리1	A
최적영상처리론1	A+
모바일영상처리1	A
감성공학	A+
특수효과제작프로젝트	A+
디지털영상처리	A
현대미술론	A+



---

## PART 2

---

- I. 연구 목표 및 중요성
- II. 배경이론
- III. 제안하는 방법
- IV. 실험결과
- V. 결론 및 추후연구





# I. 연구 목표 및 중요성



- 연구의 중요성

- 저조도 환경에서는 빛의 신호가 약하기 때문에 낮은 SNR(Signal-to-Noise Ratio)의 영상을 획득함.



(a) Low-light image



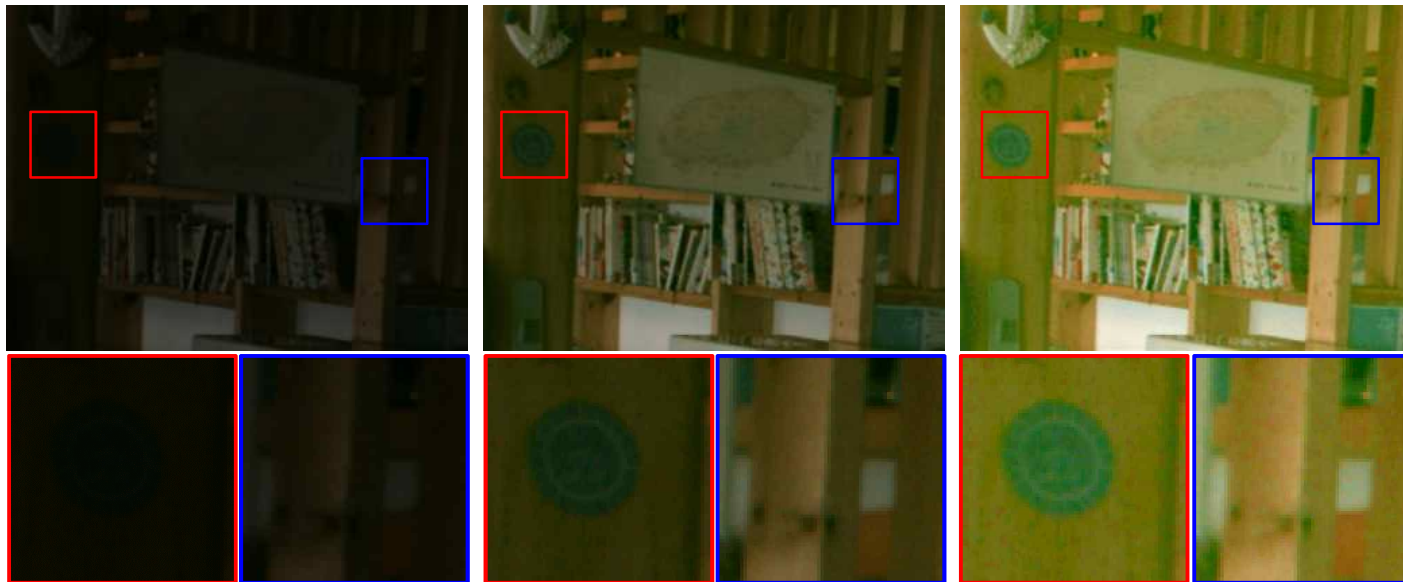


# I. 연구 목표 및 중요성



## • 연구의 중요성

- 저조도 환경에서는 빛의 신호가 약하기 때문에 낮은 SNR(Signal-to-Noise Ratio)의 영상을 획득함.
- 영상의 밝기 신호 개선 시, 잡음 성분이 함께 증폭되는 문제가 발생함.
- 높은 SNR을 갖는 고품질의 영상으로 복원하기 위한 효율적인 방법이 필요함.



(a) Low-light image

(b) Jiang' s method [7]

(c) Ma' s method [6]

# I. 연구 목표 및 중요성



## • 연구의 중요성

- 저조도 환경에서는 빛의 신호가 약하기 때문에 낮은 SNR(Signal-to-Noise Ratio)의 영상을 획득함.
- 영상의 밝기 신호 개선 시, 잡음 성분이 함께 증폭되는 문제가 발생함.
- 높은 SNR을 갖는 고품질의 영상으로 복원하기 위한 효율적인 방법이 필요함.

## • 연구 목표

- 저조도 환경에서 대비 개선과 잡음제거를 동시에 수행하는 새로운 에너지함수 제안
- 새로운 변분법 기반의 저조도 영상 복원 방법 제안



(a) Low-light image

(b) Jiang' s method [7]

(c) Ma' s method [6]

(d) Proposed method

## II. 배경이론



- Dark channel prior-based Haze removal

- Dark channel prior-based haze removal method

Degradation model

$$g_{haze} = \underbrace{f}_{\text{Unknown original image}} e^{-kd} + \underbrace{A(1 - e^{-kd})}_{\text{Atmospheric light}}$$

Observed haze image      Transmission map

Haze removed image

$$f = \frac{g_{haze} - A}{e^{-kd}} + A$$

## II. 배경이론



### • Dark channel prior-based Haze removal

#### ▪ Dark channel prior-based haze removal method

##### Degradation model

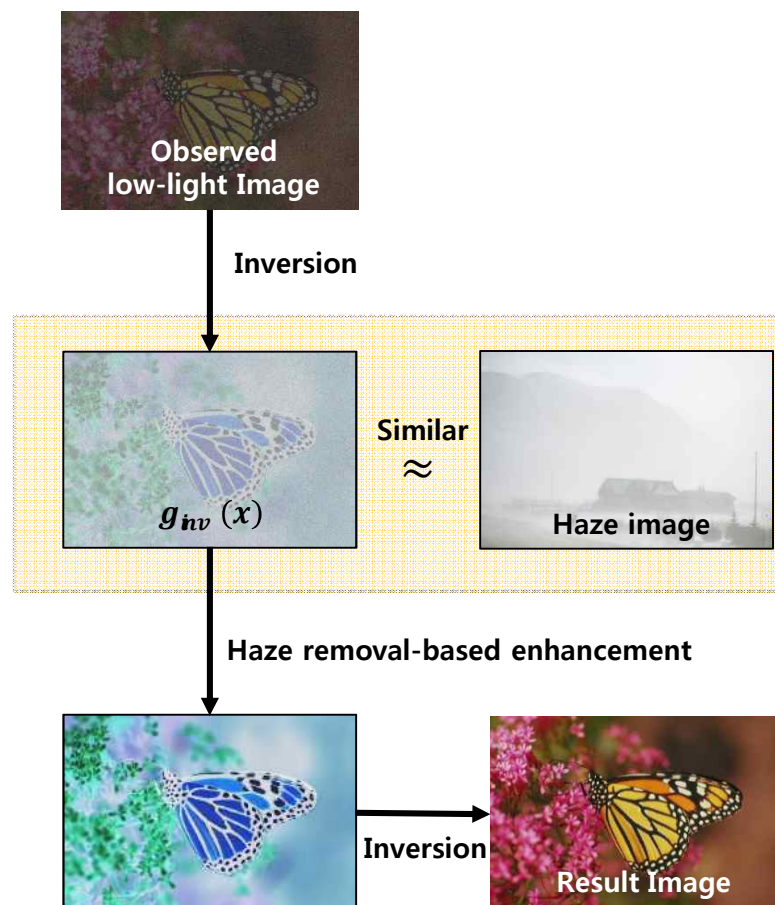
$$g_{haze} = \underbrace{f}_{\text{Unknown original image}} e^{-kd} + \underbrace{A(1 - e^{-kd})}_{\text{Transmission map Atmospheric light}}$$

Observed haze image

##### Haze removed image

$$f = \frac{g_{haze} - A}{e^{-kd}} + A$$

#### ▪ Haze removal-based low-light image enhancement process



### III. 제안하는 방법



- Combined Low-light Image Restoration Model

$$\underset{\text{observed inversed image}}{\underbrace{g_{inv}^c}} = \underset{\text{restored inversed image}}{f_{inv}^c} e^{-kd} + A(1 - e^{-kd}) + \underset{\text{Additive Gaussian noise}}{\eta}$$



### III. 제안하는 방법



- Combined Low-light Image Restoration Model

restored inversed image      Additive Gaussian noise

$$g_{inv}^c = f_{inv}^c e^{-kd} + A(1 - e^{-kd}) + \eta$$

observed inversed image       $T = 1 - e^{-kd}$

$$g_{inv}^c = f_{inv}^c (1 - T) + AT + \eta$$

$$g_{inv}^c = f_{inv}^c \times T + A \times (1 - T) + \eta$$

### III. 제안하는 방법



- Combined Low-light Image Restoration Model

$$\underset{f_{inv}, T}{\operatorname{argmin}} \{E(?)\}$$





### III. 제안하는 방법



- Combined Low-light Image Restoration Model

$$\underset{f_{inv}, T}{\operatorname{argmin}} \underbrace{\{\|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2\}}_{\text{data-fidelity term}}$$

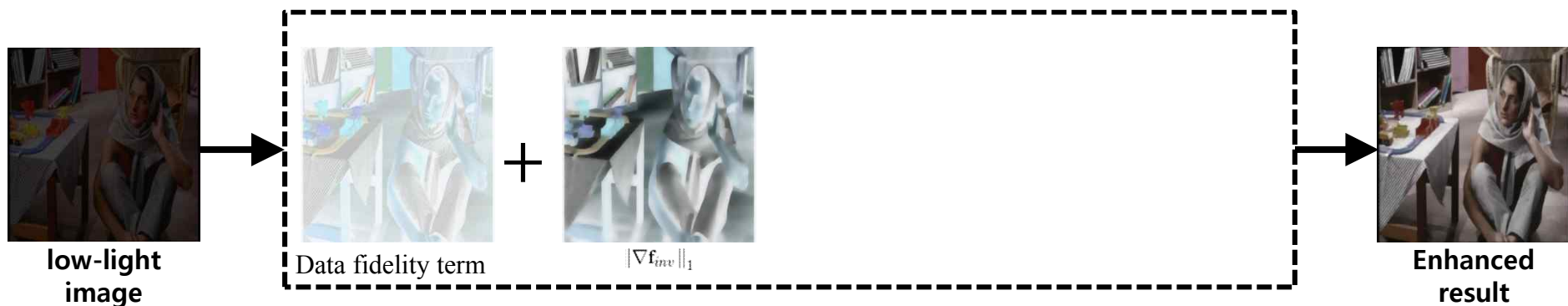


### III. 제안하는 방법



- Combined Low-light Image Restoration Model

$$\underset{f_{inv}, T}{\operatorname{argmin}} \left\{ \underbrace{\|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2}_{\text{data-fidelity term}} + \underbrace{\lambda_1 \|\nabla f_{inv}\|_1}_{\text{TV term}} \right\}$$

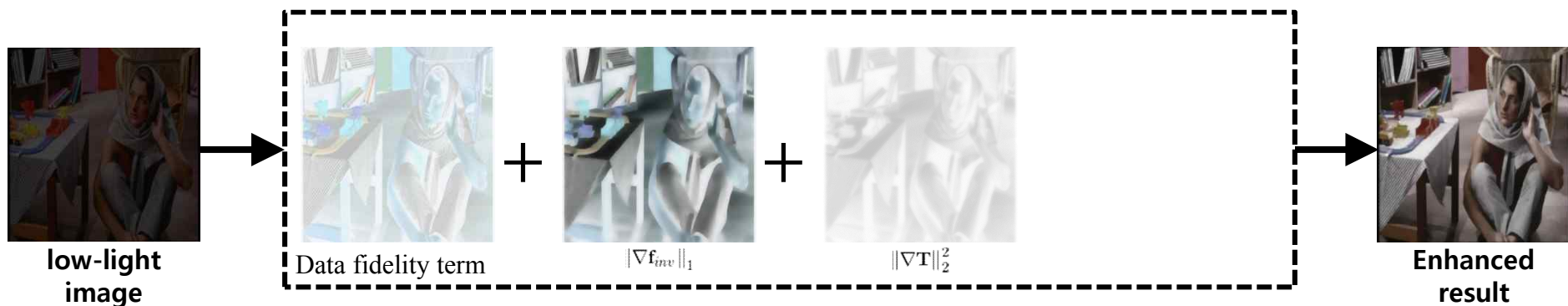


### III. 제안하는 방법



#### • Combined Low-light Image Restoration Model

$$\underset{f_{inv}, T}{\operatorname{argmin}} \left\{ \underbrace{\|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2}_{\text{data-fidelity term}} + \underbrace{\lambda_1 \|\nabla f_{inv}\|_1}_{\text{TV term}} + \underbrace{\lambda_2 \|\nabla T\|_2^2}_{\text{Smoothness term}} \right\}$$

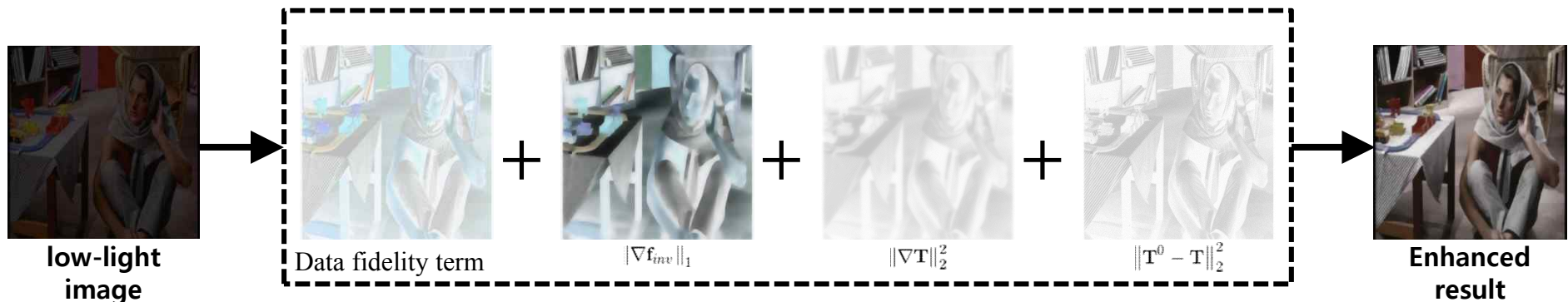


### III. 제안하는 방법



#### • Combined Low-light Image Restoration Model

$$\underset{f_{inv}, T}{\operatorname{argmin}} \left\{ \underbrace{\|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2}_{\text{data-fidelity term}} + \underbrace{\lambda_1 \|\nabla f_{inv}\|_1}_{\text{TV term}} + \underbrace{\lambda_2 \|\nabla T\|_2^2}_{\text{Smoothness term}} + \underbrace{\lambda_3 \|T^0 - T\|_2^2}_{\text{Transmission map-fidelity term}} \right\}$$

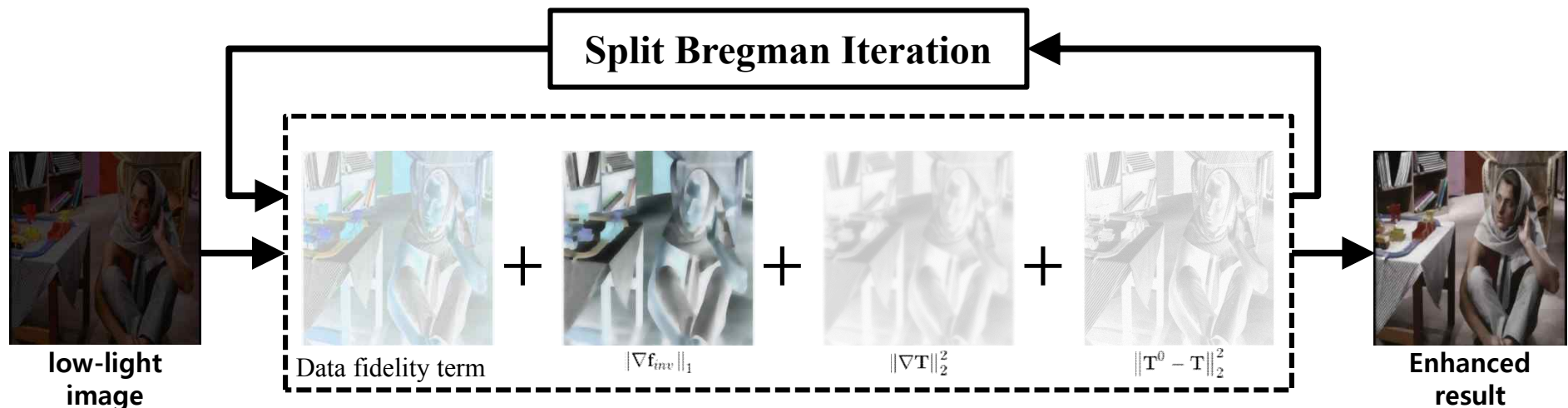


### III. 제안하는 방법



#### • Combined Low-light Image Restoration Model

$$\underset{f_{inv}, T}{\operatorname{argmin}} \left\{ \underbrace{\|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2}_{\text{data-fidelity term}} + \underbrace{\lambda_1 \|\nabla f_{inv}\|_1}_{\text{TV term}} + \underbrace{\lambda_2 \|\nabla T\|_2^2}_{\text{Smoothness term}} + \underbrace{\lambda_3 \|T^0 - T\|_2^2}_{\text{Transmission map-fidelity term}} \right\}$$



★부록 A. 제안하는 에너지 함수의 최적해 전개  
내용 추가 (pp. 46-48)

### III. 제안하는 방법



- Optimization Using Split Bregman Iteration

$$\underset{f_{inv}, T}{\operatorname{argmin}} \left\{ \|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2 + \lambda_1 \|\nabla f_{inv}\|_1 + \lambda_2 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_3 \|T^0 - T\|_2^2 \right\}$$



**Splitting method**

$$\underset{f_{inv}, T, d, b}{\operatorname{argmin}} \|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2 + \lambda_1 \|d\|_1 + \lambda_2 \|d - \nabla f_{inv} - b\|_2^2 + \lambda_3 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_4 \|T^0 - T\|_2^2$$



### III. 제안하는 방법



- Optimization Using Split Bregman Iteration

$$\underset{f_{inv}, T}{\operatorname{argmin}} \left\{ \|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2 + \lambda_1 \|\nabla f_{inv}\|_1 + \lambda_2 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_3 \|T^0 - T\|_2^2 \right\}$$



Splitting method

$$\underset{f_{inv}, T, d, b}{\operatorname{argmin}} \|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2 + \lambda_1 \|d\|_1 + \lambda_2 \|d - \nabla f_{inv} - b\|_2^2 + \lambda_3 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_4 \|T^0 - T\|_2^2$$

Bregman method

- **$T$ -related sub-problem** with  $f_{inv}$  fixed
- **$f_{inv}$ -related sub-problem** with  $T$  fixed
- **$d$ - and  $b$ -related sub-problem**



### III. 제안하는 방법



- Optimization Using Split Bregman Iteration

$$\arg \min_{f_{inv}, T, d, b} \|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2 + \lambda_1 \|d\|_1 + \lambda_2 \|d - \nabla f_{inv} - b\|_2^2 + \lambda_3 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_4 \|T^0 - T\|_2^2$$

- $T$ -related sub-problem with  $f_{inv}$  fixed

$$\arg \min_T \left\| T - \frac{g_{inv} - f_{inv}}{A - f_{inv}} \right\|_2^2 + \lambda_3 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_4 \|T^0 - T\|_2^2$$

↓ Euler-Lagrange Equation  $\frac{\partial E}{\partial T} = 0$

$$(I + \lambda_3 \Delta + \lambda_4 I) T^{k+1} = \left( \frac{g_{inv} - f_{inv}^k}{A - f_{inv}^k} \right) + \lambda_4 T^0$$

Conjugate gradient or Fast Fourier Transform

### III. 제안하는 방법



- Optimization Using Split Bregman Iteration

$$\arg \min_{f_{inv}, T, d, b} \|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2 + \lambda_1 \|d\|_1 + \lambda_2 \|d - \nabla f_{inv} - b\|_2^2 + \lambda_3 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_4 \|T^0 - T\|_2^2$$

- $f_{inv}$ -related sub-problem with  $T$  fixed

$$\arg \min_{f_{inv}} \left\| f_{inv} - \frac{g_{inv} - AT}{1 - T} \right\|_2^2 + \lambda_2 \|d - \nabla f_{inv} - b\|_2^2$$



Euler-Lagrange Equation  $\frac{\partial E}{\partial f_{inv}} = 0$

$$(I + \lambda_2 \Delta) f_{inv}^{k+1} = \left( \frac{g_{inv} - AT^k}{1 - T^k} \right) + \lambda_2 \nabla^T (d^k - b^k)$$

Conjugate gradient or Fast Fourier Transform

### III. 제안하는 방법



- Optimization Using Split Bregman Iteration

$$\arg \min_{f_{inv}, T, d, b} \|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2 + \lambda_1 \|d\|_1 + \lambda_2 \|d - \nabla f_{inv} - b\|_2^2 + \lambda_3 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_4 \|T^0 - T\|_2^2$$

- $d$ - and  $b$ -related sub-problem with  $T$  fixed

★부록 B. 제안하는 에너지 함수의 최적해 전개  
내용 추가 (pp. 49-55)

$$\underset{d, b}{\operatorname{argmin}} \lambda_1 \|d\|_1 + \lambda_2 \|d - \nabla f_{inv} - b\|_2^2$$



$$d^{k+1} = \operatorname{shrink} \left( \nabla f_{inv}^{k+1} + b, \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right) \quad \text{Soft Shrinkage method}$$

$$\text{where } \operatorname{shrink}(\gamma, \varepsilon) = \frac{r}{|r|} * \max(r - \varepsilon, 0)$$

$$b^{k+1} = b^{k+1} + (\nabla f_{inv}^{k+1} - d^{k+1}) \quad \text{Bregman variable update}$$

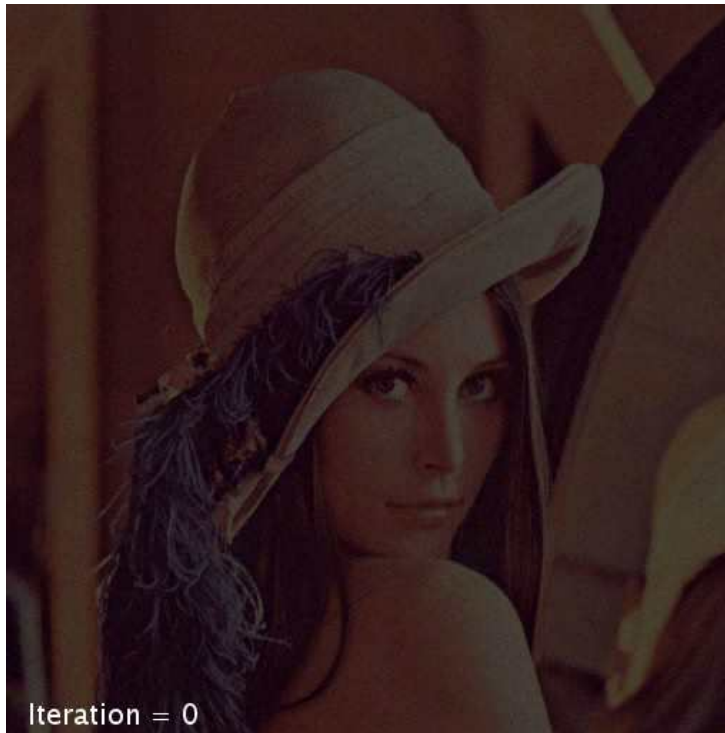
### III. 제안하는 방법



- Optimization Using Split Bregman Iteration

$$\arg \min_{f_{inv}, T, d, b} \|g_{inv} - [f_{inv} (1 - T) + AT]\|_2^2 + \lambda_1 \|d\|_1 + \lambda_2 \|d - \nabla f_{inv} - b\|_2^2 + \lambda_3 \|\nabla T\|_2^2 + \lambda_4 \|T^0 - T\|_2^2$$

- Iteration Process



Iteration = 0

$f_{inv}$  - 추정 결과



$T$  - 추정 결과

## IV. 실험결과



입력 저조도 영상



제안하는 방법의 결과 영상

그림 1. 실제 저조도 동영상을 이용한 제안하는 방법의 결과.



## IV. 실험결과



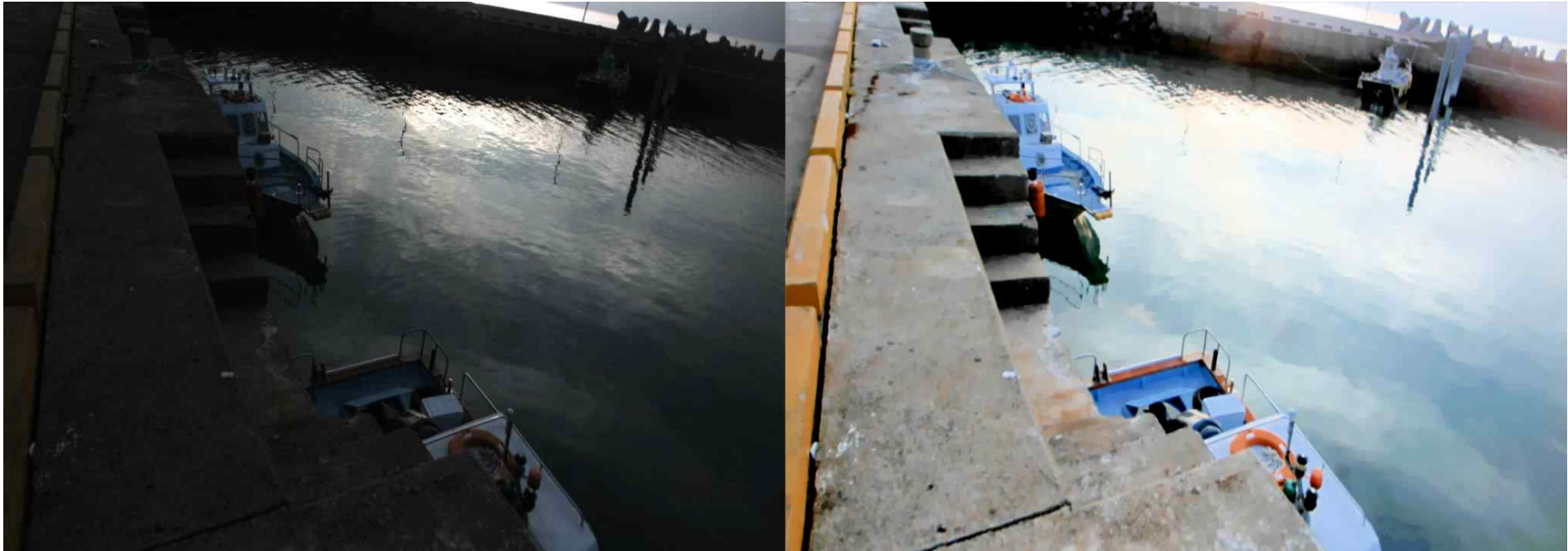
입력 저조도 영상



제안하는 방법의 결과 영상

그림 2. 실제 저조도 동영상을 이용한 제안하는 방법의 결과.

## IV. 실험결과



입력 저조도 영상

제안하는 방법의 결과 영상

그림 3. 실제 저조도 동영상을 이용한 제안하는 방법의 결과.



## IV. 실험결과



- 정칙화 항에 대한 실험결과 및 분석

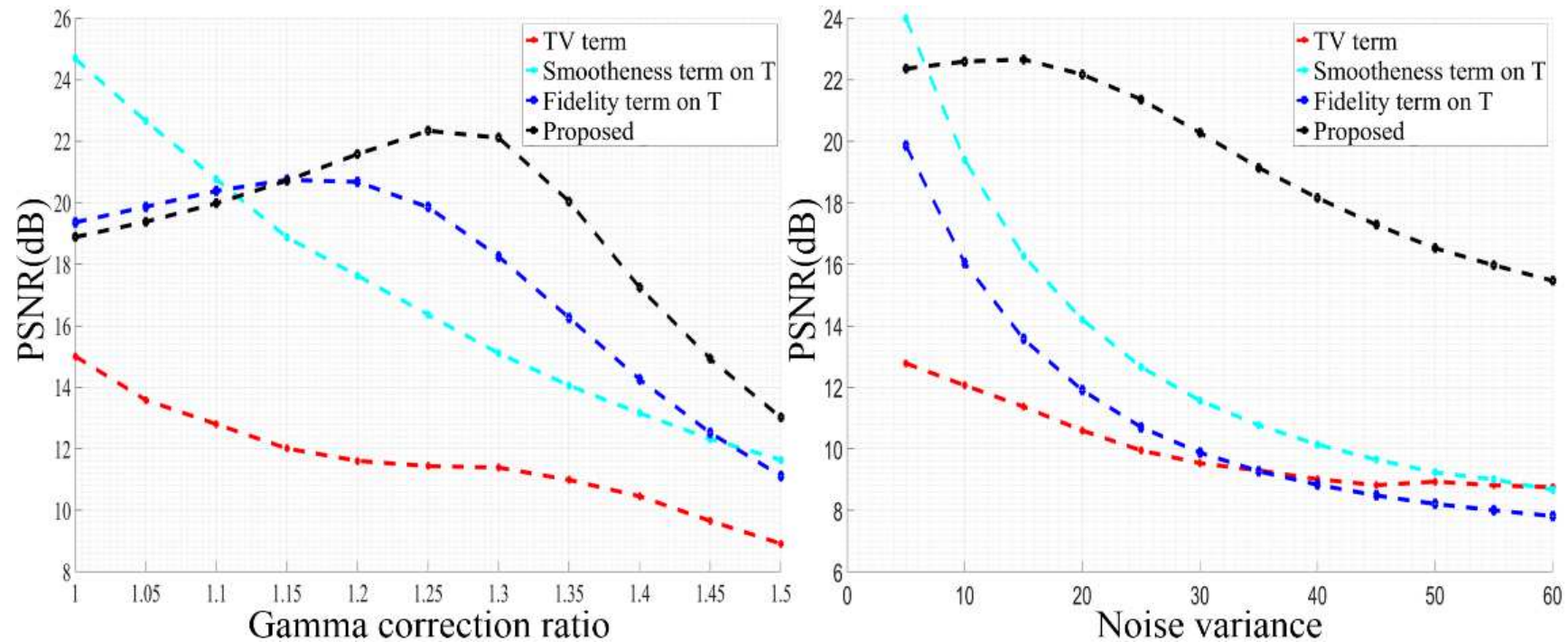


그림 4. 제안하는 에너지 함수의 정칙화 파라미터에 대한 PSNR 값 변화 그래프.

좌: 감마 보정 비율 변화에 대한 그래프,

우: 가우시안 잡음의 표준 편차 변화에 대한 그래프.

## IV. 실험결과



- 정칙화 항에 대한 실험결과 및 분석

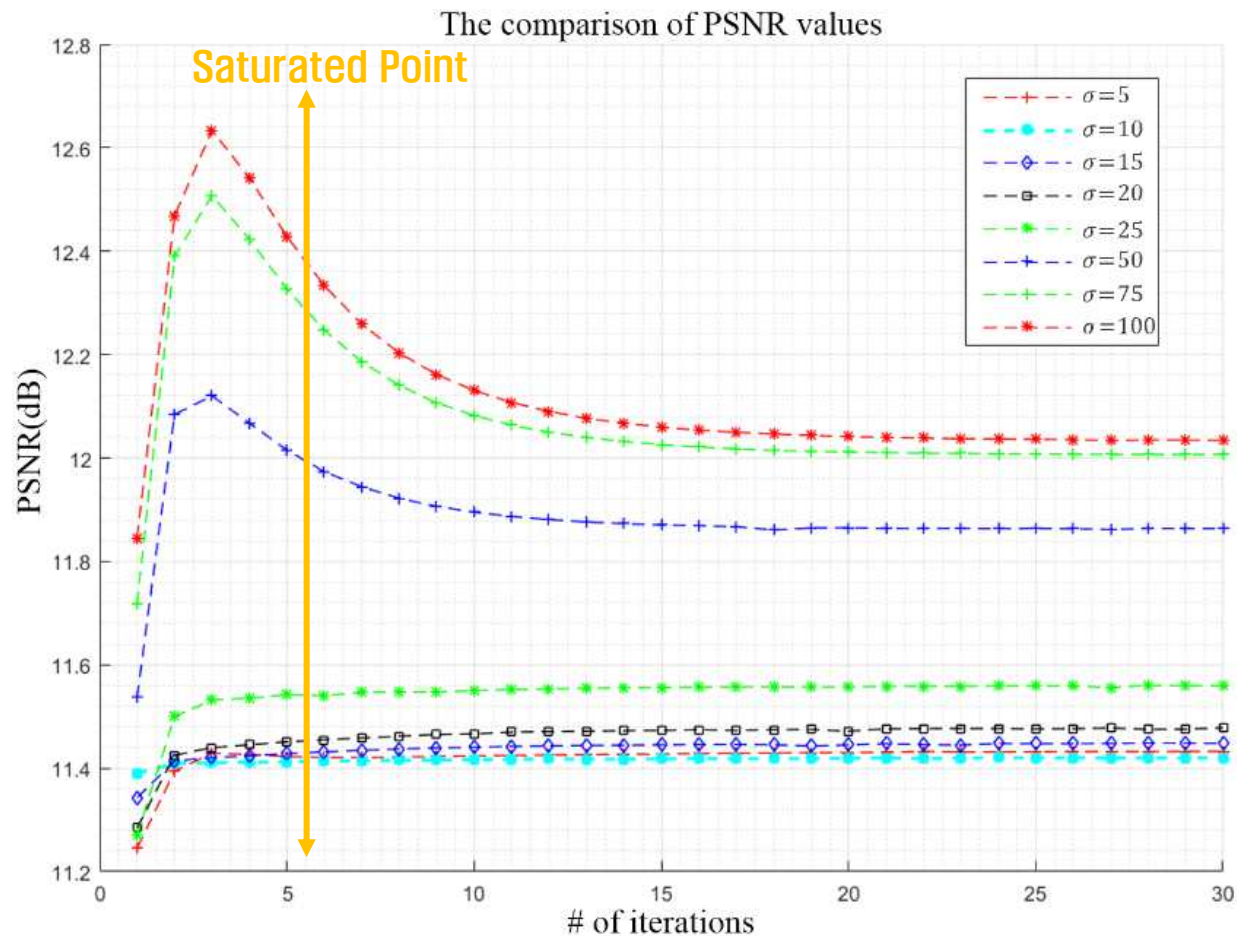


그림 5. 가우시안 잡음 변화와 제안하는 방법의 반복 (iteration) 횟수에 대한 PSNR 비교.



## IV. 실험결과



- 정칙화 항에 대한 실험결과 및 분석



그림 6. 정칙화 파라미터 변화에 대한 영상 변화: (a) 원본 영상, 열화 영상, 기본 값으로 복원된 영상 ( $\lambda_1 = 10, \lambda_2 = 10, \lambda_3 = 1, \lambda_4 = 50$ ), (b)  $\lambda_1$  파라미터 변화에 대한 결과 영상, (c)  $\lambda_2$  파라미터 변화에 대한 결과 영상, (d)  $\lambda_3$  파라미터 변화에 대한 전달량 함수 결과, 그리고 (e)  $\lambda_4$  파라미터 변화에 대한 전달량 함수 결과.



## IV. 실험결과



- 정칙화 항에 대한 실험결과 및 분석

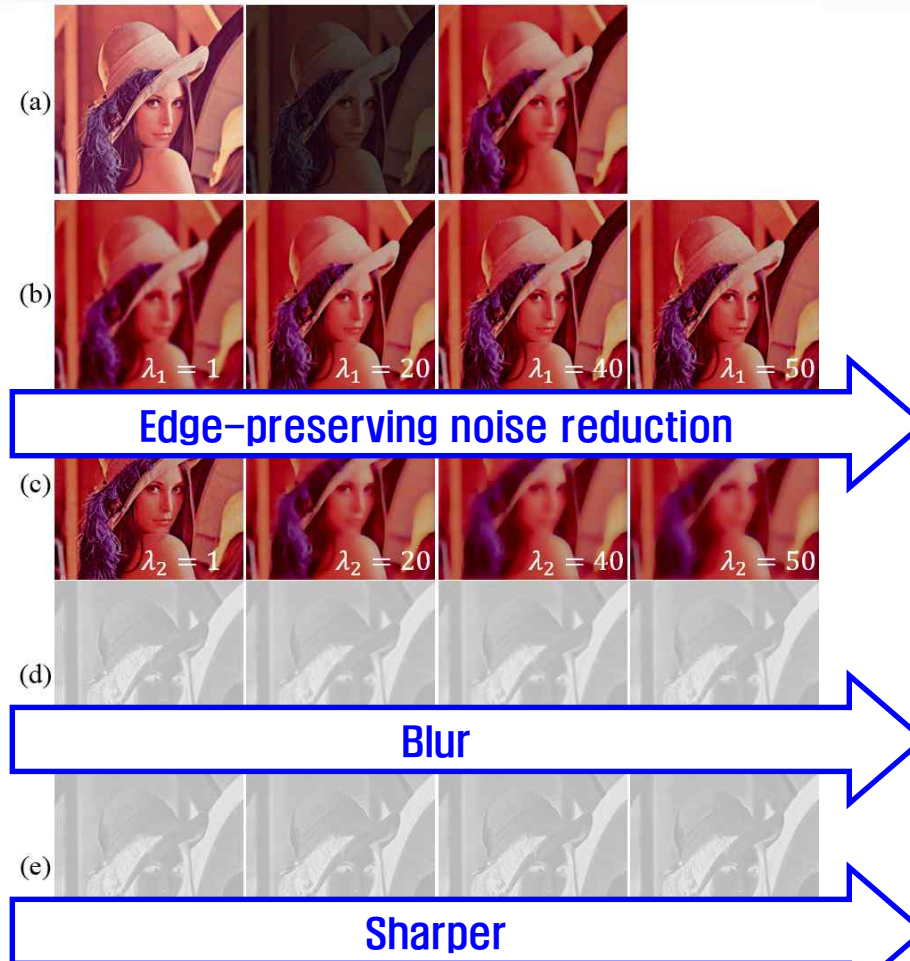


그림 6. 정칙화 파라미터 변화에 대한 영상 변화: (a) 원본 영상, 열화 영상, 기본 값으로 복원된 영상 ( $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 1$ ,  $\lambda_4 = 50$ ), (b)  $\lambda_1$  파라미터 변화에 대한 결과 영상, (c)  $\lambda_2$  파라미터 변화에 대한 결과 영상, (d)  $\lambda_3$  파라미터 변화에 대한 전달량 함수 결과, 그리고 (e)  $\lambda_4$  파라미터 변화에 대한 전달량 함수 결과.

## IV. 실험결과



### • 시뮬레이션 저조도 영상을 이용한 정량적 평가

- Noise variance  $\sigma = 5$ , gamma correction with  $\sigma = 1.35$

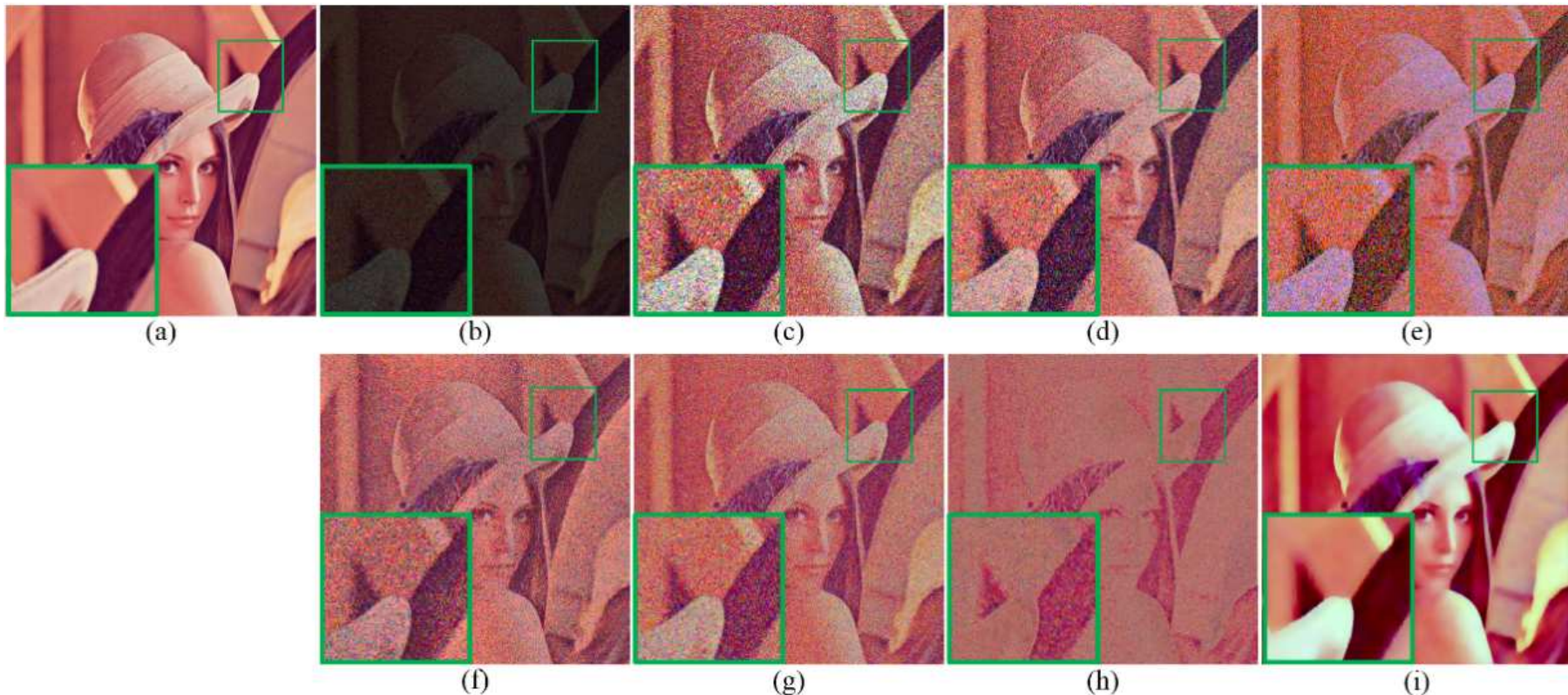


그림 7. 시뮬레이션 저조도 영상 개선 결과: (a) 원본 영상, (b) 시뮬레이션 영상 [ $\gamma = 1.35$ ,  $\sigma = 5$ ], (c) Chen의 방법 [1], (d) Kim의 방법 [2], (e) Jobson의 방법 [4], (f) Ma의 방법 [6], (g) Jiang의 방법 [7], (h) Yoo의 방법 [11], 그리고 (i) 제안하는 방법 [ $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 1$ ,  $\lambda_4 = 50$ ].



## IV. 실험결과



### • 시뮬레이션 저조도 영상을 이용한 정량적 평가

- Noise variance  $\sigma = 5$ , gamma correction with  $\sigma = 1.35$

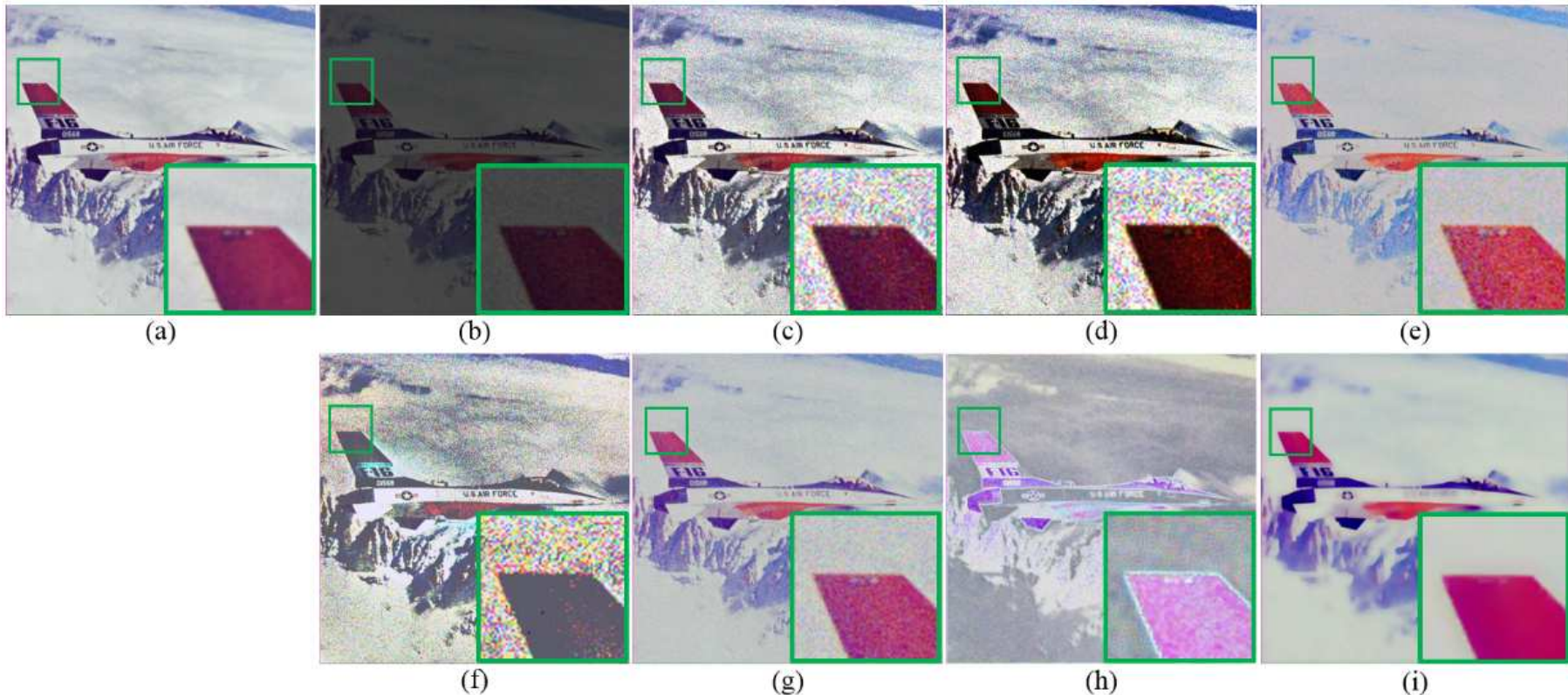


그림 8. 시뮬레이션 저조도 영상 개선 결과: (a) 원본 영상, (b) 시뮬레이션 영상 [ $\gamma = 1.35$ ,  $\sigma = 5$ ], (c) Chen의 방법 [1], (d) Kim의 방법 [2], (e) Jobson의 방법 [4], (f) Ma의 방법 [6], (g) Jiang의 방법 [7], (h) Yoo의 방법 [11], 그리고 (i) 제안하는 방법 [ $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 1$ ,  $\lambda_4 = 50$ ].



## IV. 실험결과



### • 시뮬레이션 저조도 영상을 이용한 정량적 평가

- Noise variance  $\sigma = 15$ , gamma correction with  $\sigma = 1.35$

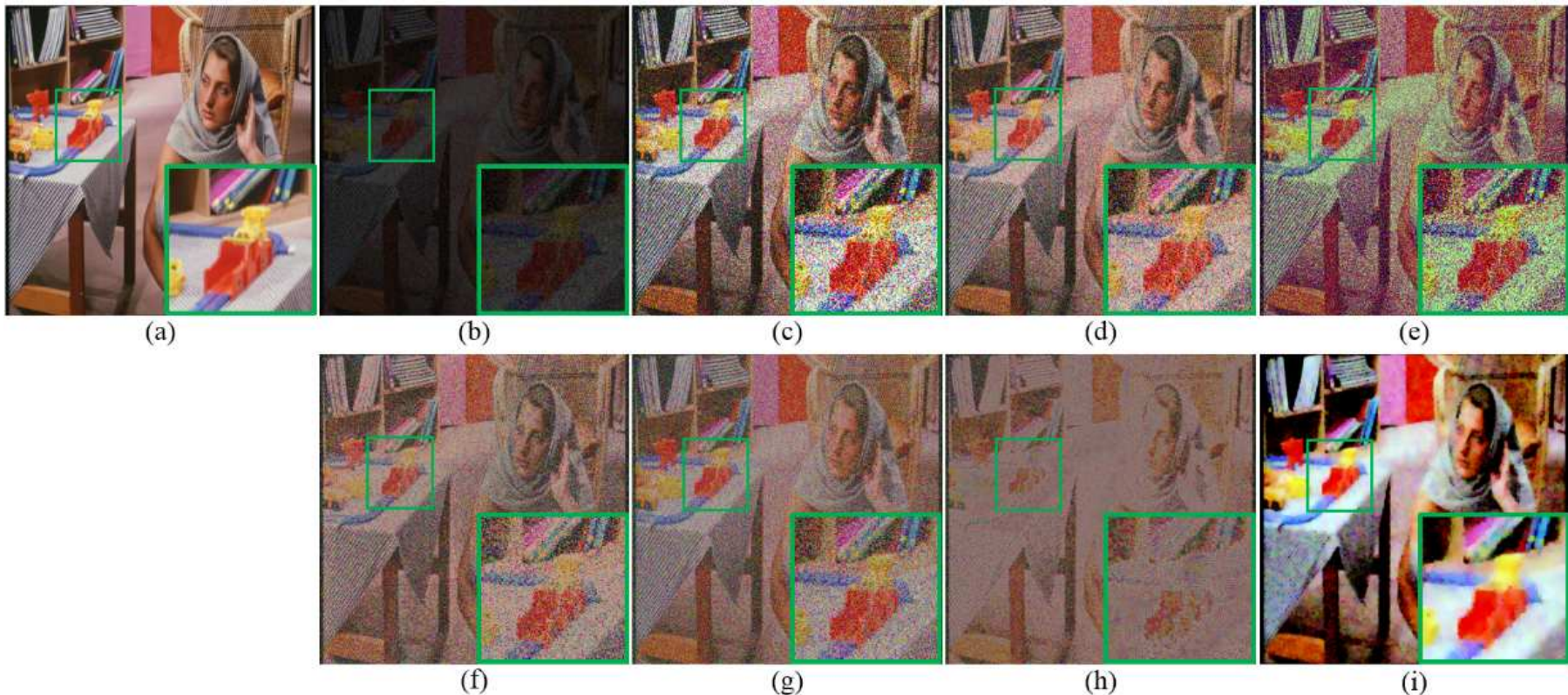


그림 9. 시뮬레이션 저조도 영상 개선 결과: (a) 원본 영상, (b) 시뮬레이션 영상 [ $\gamma = 1.35$ ,  $\sigma = 5$ ], (c) Chen의 방법 [1], (d) Kim의 방법 [2], (e) Jobson의 방법 [4], (f) Ma의 방법 [6], (g) Jiang의 방법 [7], (h) Yoo의 방법 [11], 그리고 (i) 제안하는 방법 [ $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 1$ ,  $\lambda_4 = 50$ ].



## IV. 실험결과



### • 시뮬레이션 저조도 영상을 이용한 정량적 평가

- Noise variance  $\sigma = 15$ , gamma correction with  $\sigma = 1.35$

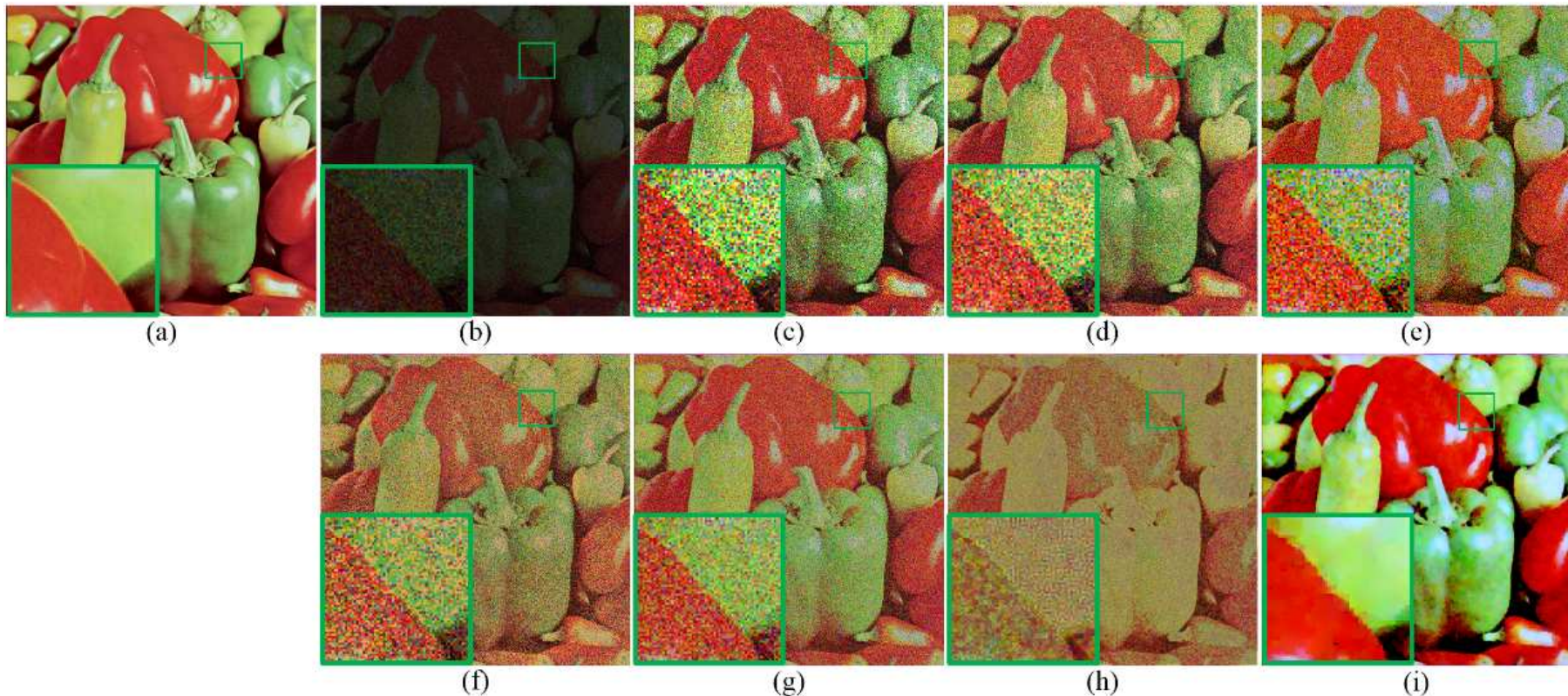


그림 10. 시뮬레이션 저조도 영상 개선 결과: (a) 원본 영상, (b) 시뮬레이션 영상 [ $\gamma = 1.35$ ,  $\sigma = 5$ ], (c) Chen의 방법 [1], (d) Kim의 방법 [2], (e) Jobson의 방법 [4], (f) Ma의 방법 [6], (g) Jiang의 방법 [7], (h) Yoo의 방법 [11], 그리고 (i) 제안하는 방법 [ $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 1$ ,  $\lambda_4 = 50$ ].

## IV. 실험결과



**Table 1. Comparison of the Objective Assessments using the PSNR and SSIM for the Low-light Image Enhancement Performance of the Proposed and Existing Methods with  $\sigma = 5$ . Each Test Image is Degraded by the Different Gamma Correction Ratio.**  
From the First to Fourth Row,  $\gamma$  is Set to 1.05, 1.15, 1.25, and 1.35.

	Chen [1]		Kim [2]		Jobson [4]		Ma [6]		Jiang [7]		Yoo [11]		Proposed	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
	<b>26.66</b>	0.724	19.35	0.640	18.28	0.557	22.10	<b>0.767</b>	19.96	0.661	14.05	0.549	19.44	0.695
	<b>21.28</b>	0.528	18.81	0.506	17.86	0.477	21.02	0.633	18.80	0.463	13.62	0.479	20.81	<b>0.720</b>
	17.69	0.371	17.92	0.381	17.16	0.380	19.98	0.495	20.28	0.418	13.69	0.398	<b>22.36</b>	<b>0.754</b>
	15.43	0.259	16.89	0.284	16.15	0.285	18.94	0.372	18.65	0.378	13.63	0.311	<b>19.90</b>	<b>0.727</b>
	<b>28.96</b>	<b>0.812</b>	24.56	0.791	18.81	0.621	20.46	0.733	18.56	0.688	14.99	0.531	18.81	0.614
	22.96	0.670	<b>23.39</b>	<b>0.683</b>	18.53	0.576	19.52	0.626	19.27	0.593	14.77	0.511	19.91	0.645
	19.10	0.531	<b>21.80</b>	0.574	18.06	0.512	18.66	0.519	18.43	0.512	14.55	0.447	20.00	<b>0.648</b>
	16.48	0.416	<b>20.02</b>	0.471	17.40	0.439	17.82	0.422	17.92	0.407	14.37	0.374	17.70	<b>0.613</b>
	<b>24.50</b>	0.569	13.57	0.340	15.88	0.478	24.63	<b>0.737</b>	20.38	0.650	12.60	0.365	21.18	0.733
	18.14	0.343	13.25	0.245	14.99	0.340	22.82	0.573	18.83	0.481	12.08	0.240	<b>21.92</b>	<b>0.748</b>
	15.31	0.246	12.98	0.195	13.92	0.239	21.12	0.422	18.63	0.369	11.98	0.149	<b>22.98</b>	<b>0.767</b>
	13.26	0.183	12.64	0.160	12.92	0.178	19.55	0.303	17.84	0.268	12.22	0.103	<b>23.93</b>	<b>0.791</b>
	<b>25.92</b>	0.696	20.48	0.671	17.73	0.531	23.52	0.761	20.27	0.703	14.22	0.545	21.41	<b>0.765</b>
	21.28	0.521	19.68	0.526	17.37	0.452	22.71	0.630	20.49	0.592	13.86	0.488	<b>22.33</b>	<b>0.763</b>
	18.27	0.386	18.68	0.400	16.74	0.367	20.83	0.495	19.39	0.461	13.73	0.411	<b>21.44</b>	<b>0.728</b>
	16.30	0.288	17.71	0.307	15.99	0.294	<b>19.55</b>	0.377	19.50	0.364	13.49	0.329	18.29	<b>0.627</b>



## IV. 실험결과



**Table 2. Comparison of the Objective Assessments using the PSNR and SSIM for the Low-light Image Enhancement Performance of the Proposed and Existing Methods with  $\sigma = 15$ . Each Test Image is Degraded by the Different Gamma Correction Ratio.**  
From the First to Fourth Row,  $\gamma$  is Set to 1.05, 1.15, 1.25, and 1.35.

	Chen [1]		Kim [2]		Jobson [4]		Ma [6]		Jiang [7]		Yoo [11]		Proposed	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
	<b>20.95</b>	0.349	17.21	0.314	16.72	0.323	19.86	0.384	17.40	0.275	14.66	0.431	19.77	<b>0.702</b>
	16.87	0.205	15.65	0.200	15.16	0.203	17.75	0.235	14.81	0.154	14.63	0.291	<b>21.58</b>	<b>0.728</b>
	13.45	0.124	14.09	0.133	13.86	0.132	15.74	0.143	12.60	0.097	14.89	0.205	<b>22.82</b>	<b>0.722</b>
	11.37	0.078	12.81	0.092	12.87	0.091	13.89	0.090	10.85	0.068	14.95	0.153	<b>18.89</b>	<b>0.590</b>
	<b>21.90</b>	0.506	20.61	0.502	17.65	0.450	18.88	0.450	16.69	0.418	15.16	0.428	19.21	<b>0.623</b>
	17.50	0.350	17.89	0.360	16.38	0.336	17.10	0.316	15.90	0.302	15.38	0.360	<b>20.32</b>	<b>0.649</b>
	14.10	0.228	15.52	0.252	14.93	0.235	15.35	0.218	12.92	0.190	15.02	0.270	<b>20.00</b>	<b>0.635</b>
	11.82	0.148	13.71	0.177	13.69	0.168	13.72	0.151	12.09	0.140	14.99	0.220	<b>16.88</b>	<b>0.536</b>
	19.89	0.293	12.83	0.180	13.60	0.213	<b>20.85</b>	0.333	18.45	0.283	13.66	0.241	20.64	<b>0.715</b>
	15.16	0.170	12.18	0.135	12.29	0.140	18.00	0.199	16.33	0.167	13.86	0.145	<b>21.41</b>	<b>0.730</b>
	12.58	0.111	11.38	0.099	11.44	0.095	15.47	0.122	12.34	0.094	14.08	0.105	<b>22.73</b>	<b>0.748</b>
	10.74	0.076	10.64	0.073	10.90	0.069	13.33	0.079	11.84	0.069	13.89	0.081	<b>22.97</b>	<b>0.725</b>
	21.00	0.341	18.19	0.318	16.32	0.311	20.57	0.380	18.50	0.336	14.67	0.427	<b>21.59</b>	<b>0.770</b>
	17.15	0.211	16.42	0.210	15.07	0.212	18.21	0.236	16.28	0.194	14.81	0.309	<b>22.60</b>	<b>0.762</b>
	14.25	0.136	14.72	0.143	13.91	0.140	16.08	0.149	14.81	0.127	14.69	0.219	<b>21.59</b>	<b>0.706</b>
	12.21	0.089	13.31	0.101	12.95	0.098	14.20	0.098	11.61	0.076	14.57	0.163	<b>17.85</b>	<b>0.534</b>





## IV. 실험결과



### • 실제 저조도 영상을 이용한 정성적 평가

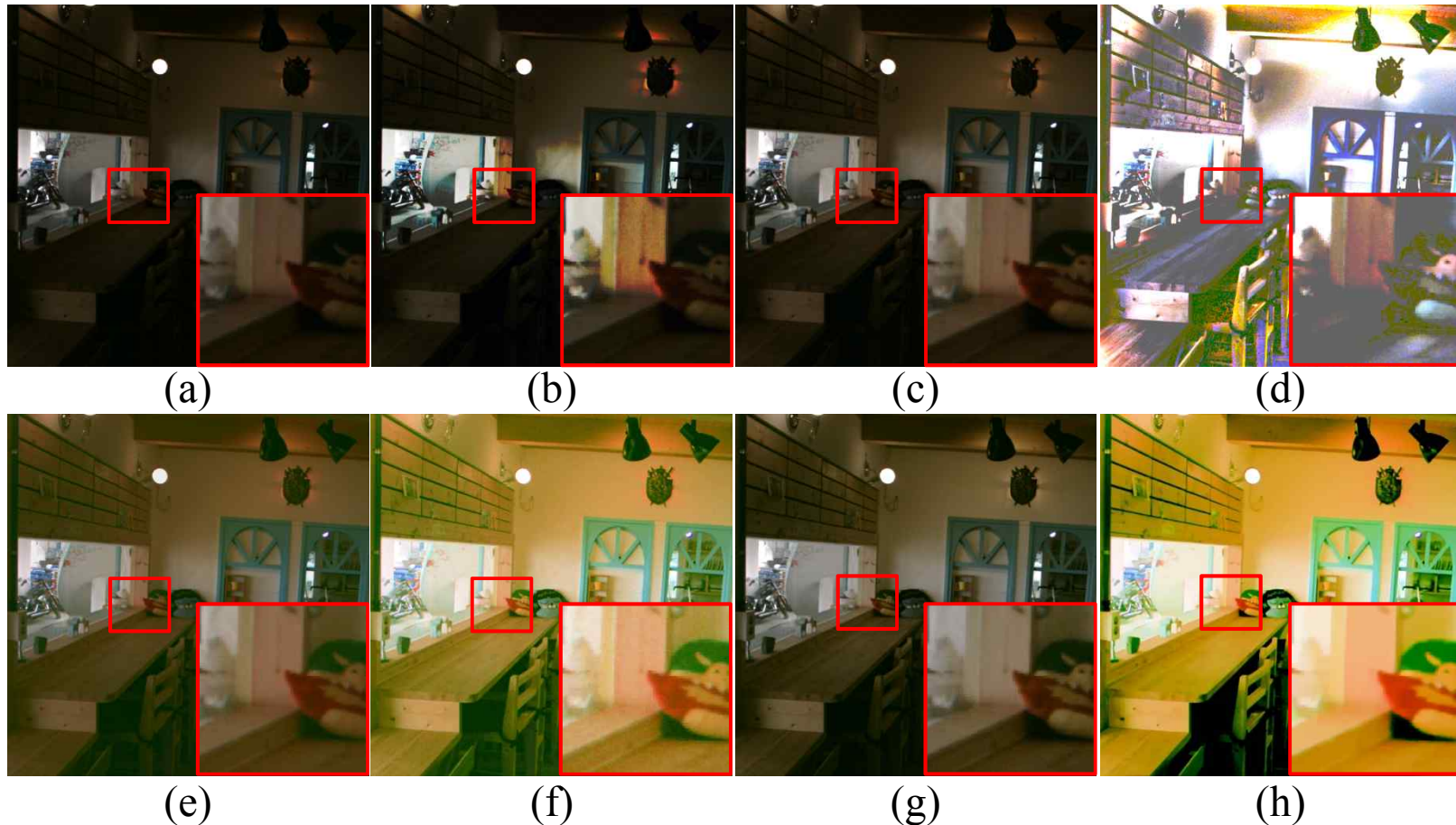


그림 11. 실제 저조도 영상 개선 결과: (a) 실제 저조도 영상, (b) Chen의 방법 [1], (c) Kim의 방법 [2], (d) Jobson의 방법 [4], (e) Ma의 방법 [6], (f) Jiang의 방법 [7], (g) Yoo의 방법 [11], 그리고 (h) 제안하는 방법 [ $\lambda_1 = 5$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 10$ ,  $\lambda_4 = 20$ ].

## IV. 실험결과



- 실제 저조도 영상을 이용한 정성적 평가

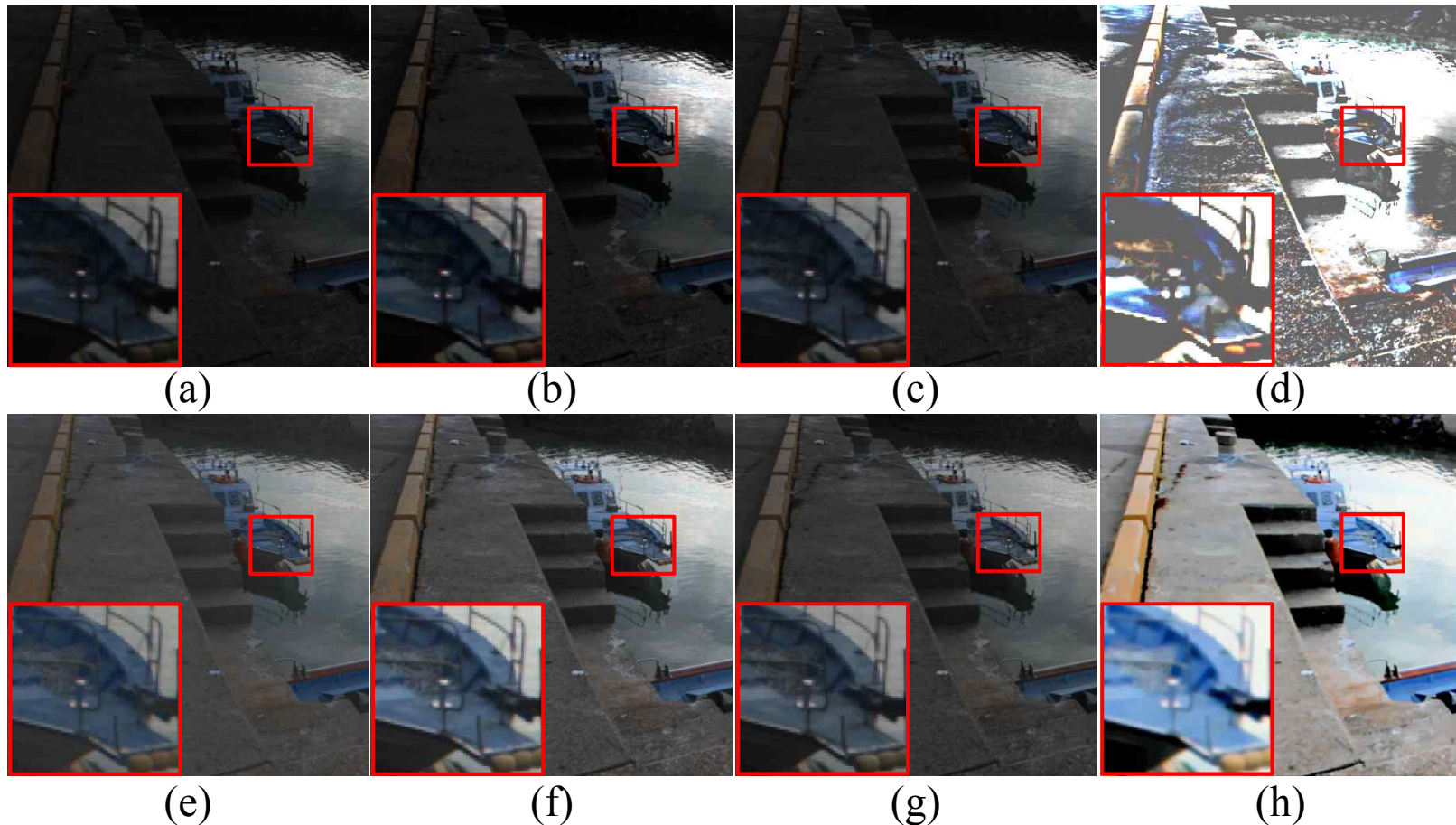


그림 12. 실제 저조도 영상 개선 결과: (a) 실제 저조도 영상, (b) Chen의 방법 [1], (c) Kim의 방법 [2], (d) Jobson의 방법 [4], (e) Ma의 방법 [6], (f) Jiang의 방법 [7], (g) Yoo의 방법 [11], 그리고 (h) 제안하는 방법 ( $\lambda_1 = 5$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 10$ ,  $\lambda_4 = 20$ ).



## IV. 실험결과



### • 실제 저조도 영상을 이용한 정성적 평가

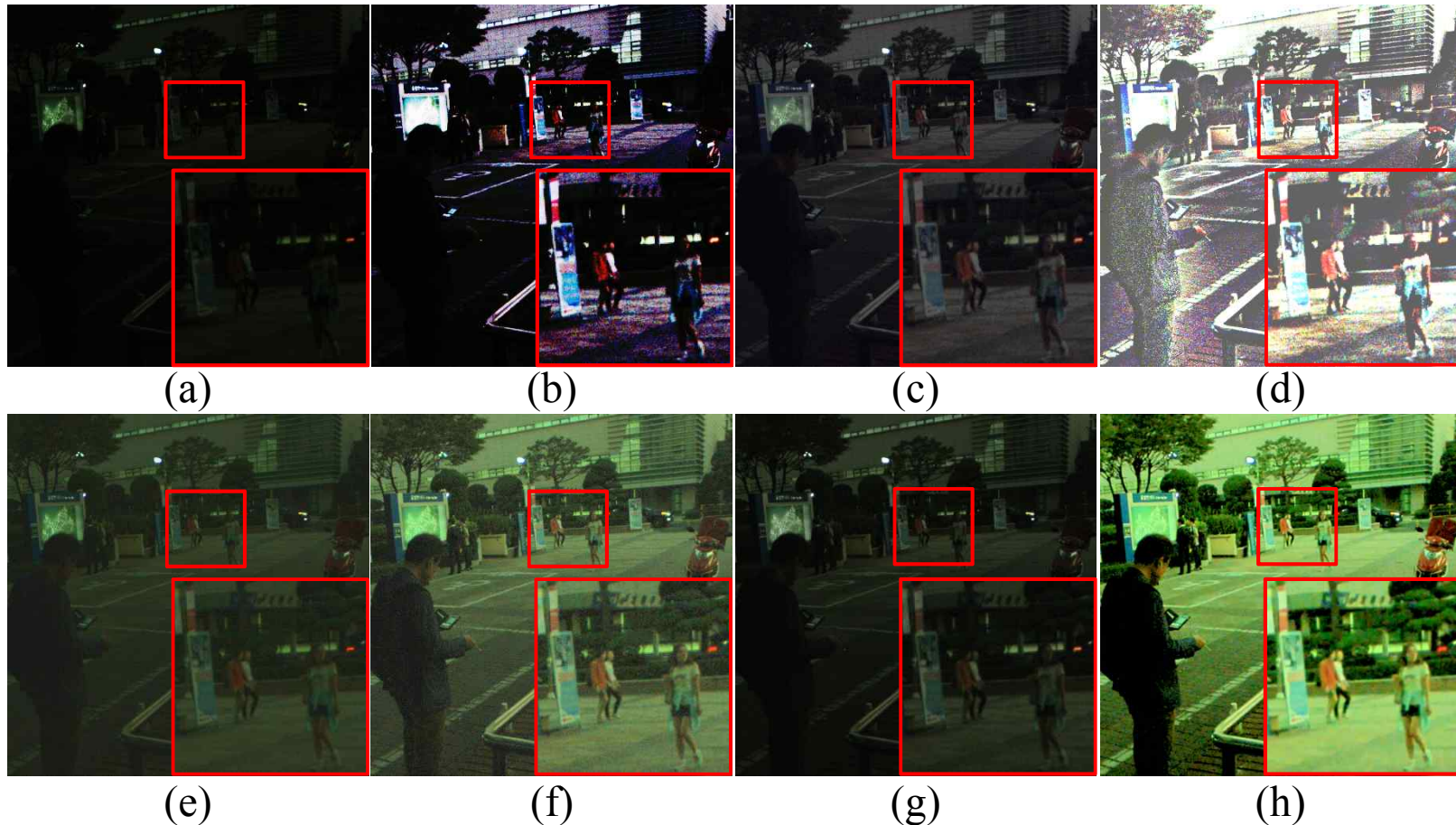


그림 13. 실제 저조도 영상 개선 결과: (a) 실제 저조도 영상, (b) Chen의 방법 [1], (c) Kim의 방법 [2], (d) Jobson의 방법 [4], (e) Ma의 방법 [6], (f) Jiang의 방법 [7], (g) Yoo의 방법 [11], 그리고 (h) 제안하는 방법 ( $\lambda_1 = 5$ ,  $\lambda_2 = 20$ ,  $\lambda_3 = 20$ ,  $\lambda_4 = 20$ ).

## IV. 실험결과



- 제안하는 방법을 이용한 안개제거 성능 비교



(a) Original image (b) He's method [9] (c) Ancuti's method [12] (d) Proposed method

그림 14. 제안하는 방법을 이용한 안개제거 성능 비교.



## IV. 실험결과



- 제안하는 방법을 이용한 위성영상의 대비 개선

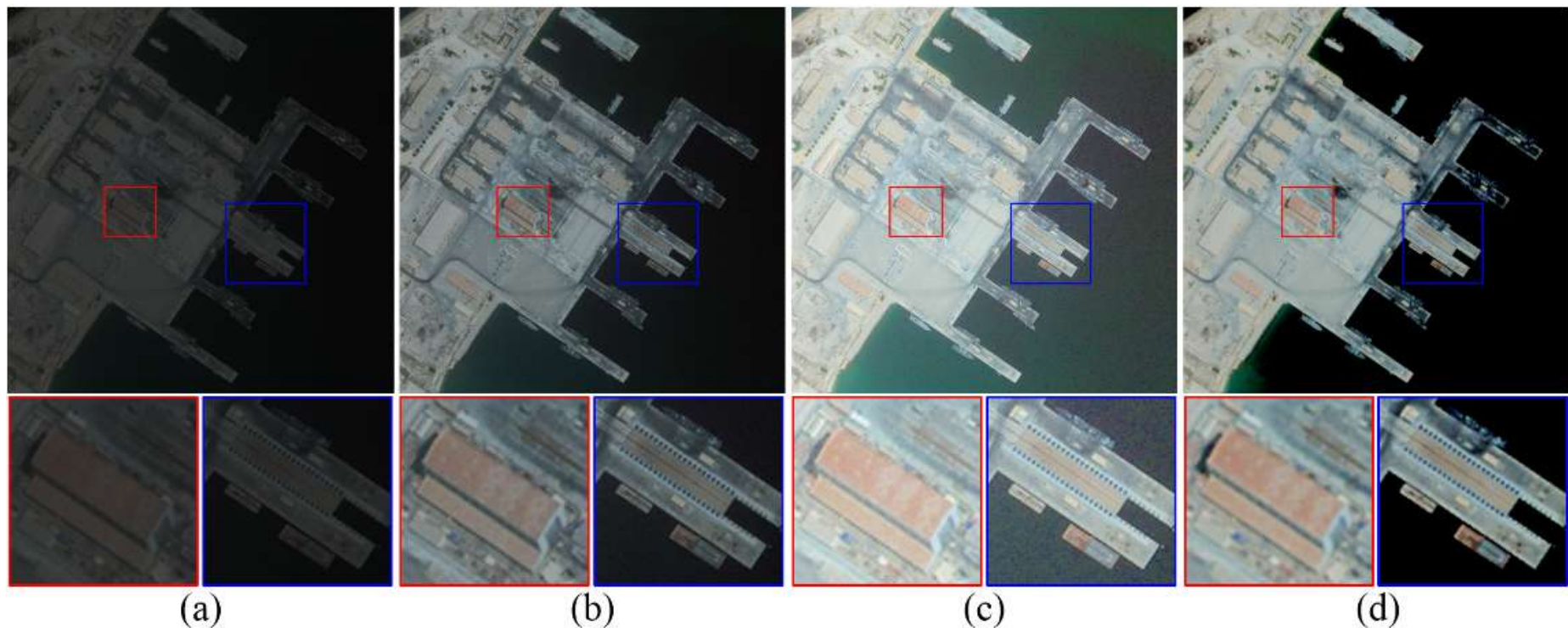


그림 16. 제안하는 방법과 기존 방법을 이용한 위성 영상 활용 결과: (a) 위성 영상, (b) Kim의 방법 [2], (c) Ma의 방법 [6], 그리고 (d) 제안하는 방법 [ $\lambda_1 = 5$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 10$ ,  $\lambda_4 = 20$ ].

## IV. 실험결과



- 제안하는 방법을 이용한 위성영상의 대비 개선

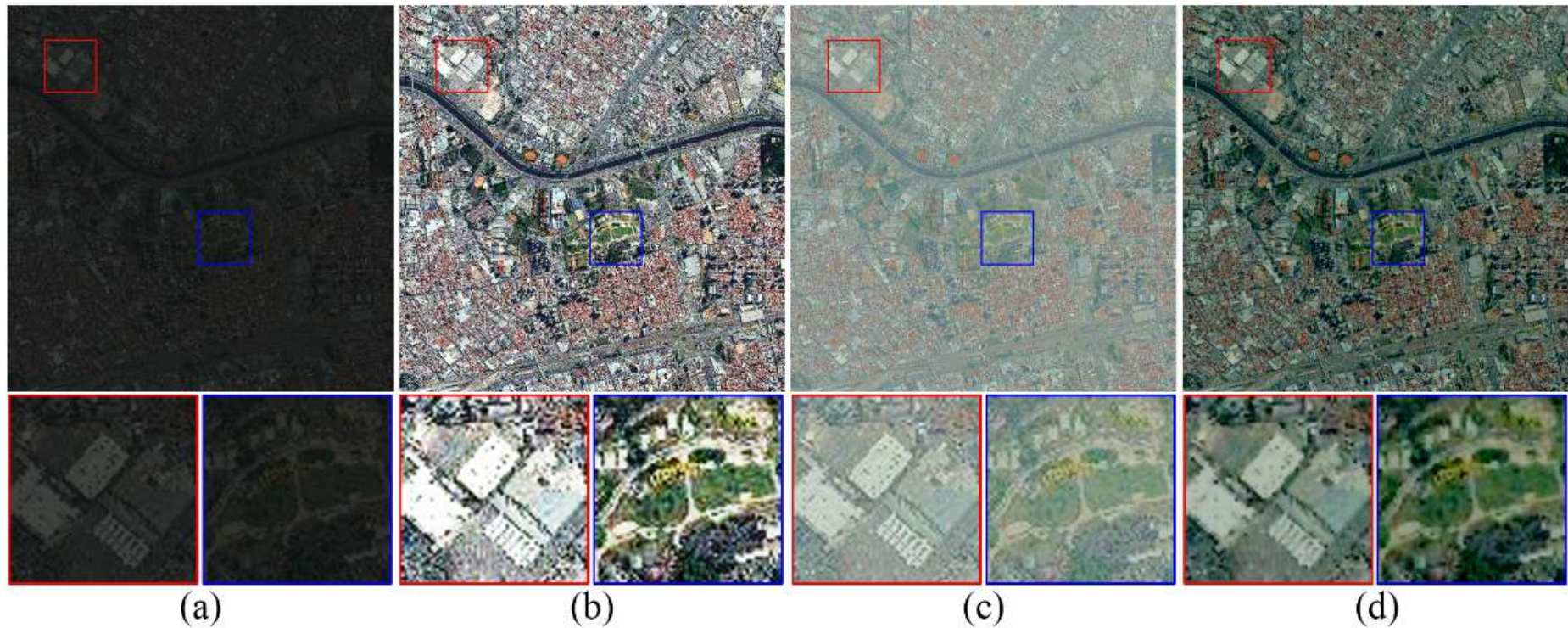


그림 17. 제안하는 방법과 기존 방법을 이용한 위성 영상 활용 결과: (a) 위성 영상, (b) Kim의 방법 [2], (c) Ma의 방법 [6], 그리고 (d) 제안하는 방법 ( $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 1$ ,  $\lambda_4 = 50$ ).



## IV. 실험결과



- 제안하는 방법을 이용한 위성영상의 대비 개선

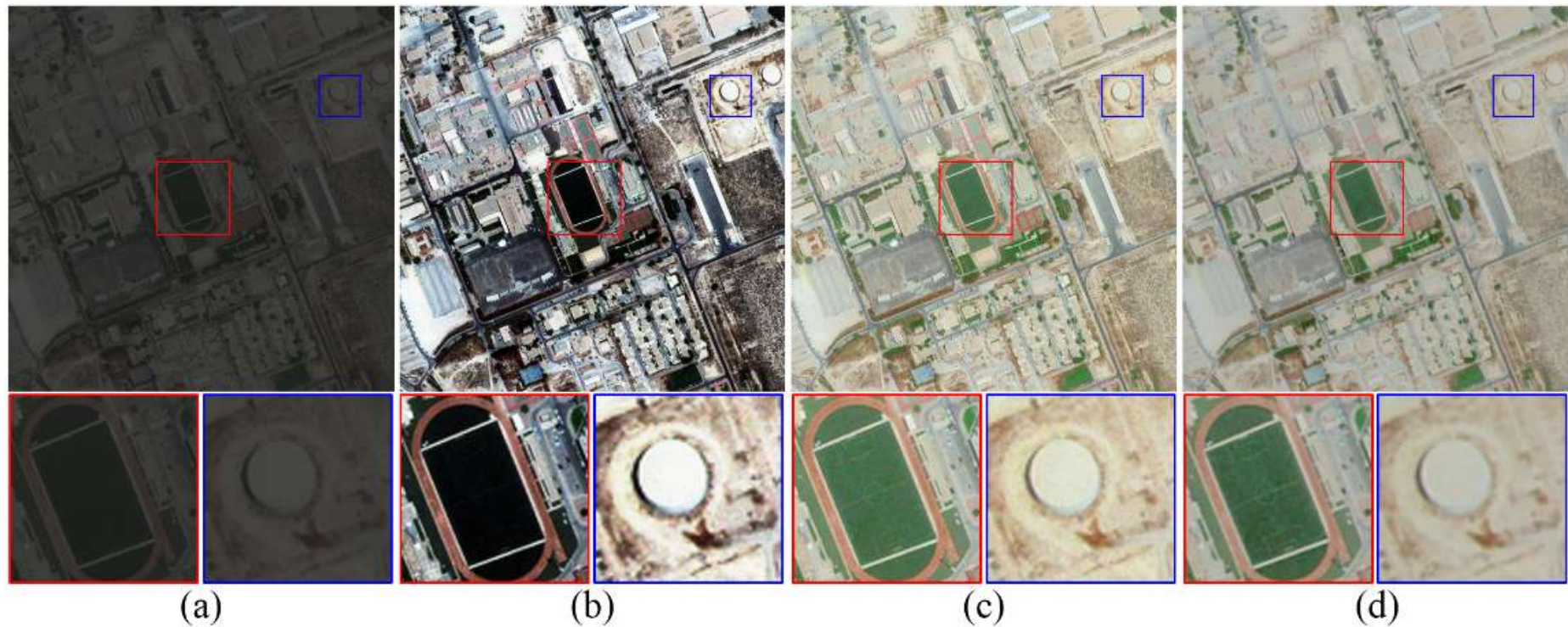


그림 18. 제안하는 방법과 기존 방법을 이용한 위성 영상 활용 결과: (a) 위성 영상, (b) Kim의 방법 [11], (c) Ma의 방법 [21], 그리고 (d) 제안하는 방법 [ $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 1$ ,  $\lambda_4 = 50$ ].



## IV. 실험결과



- 제안하는 방법을 이용한 위성영상의 대비 개선

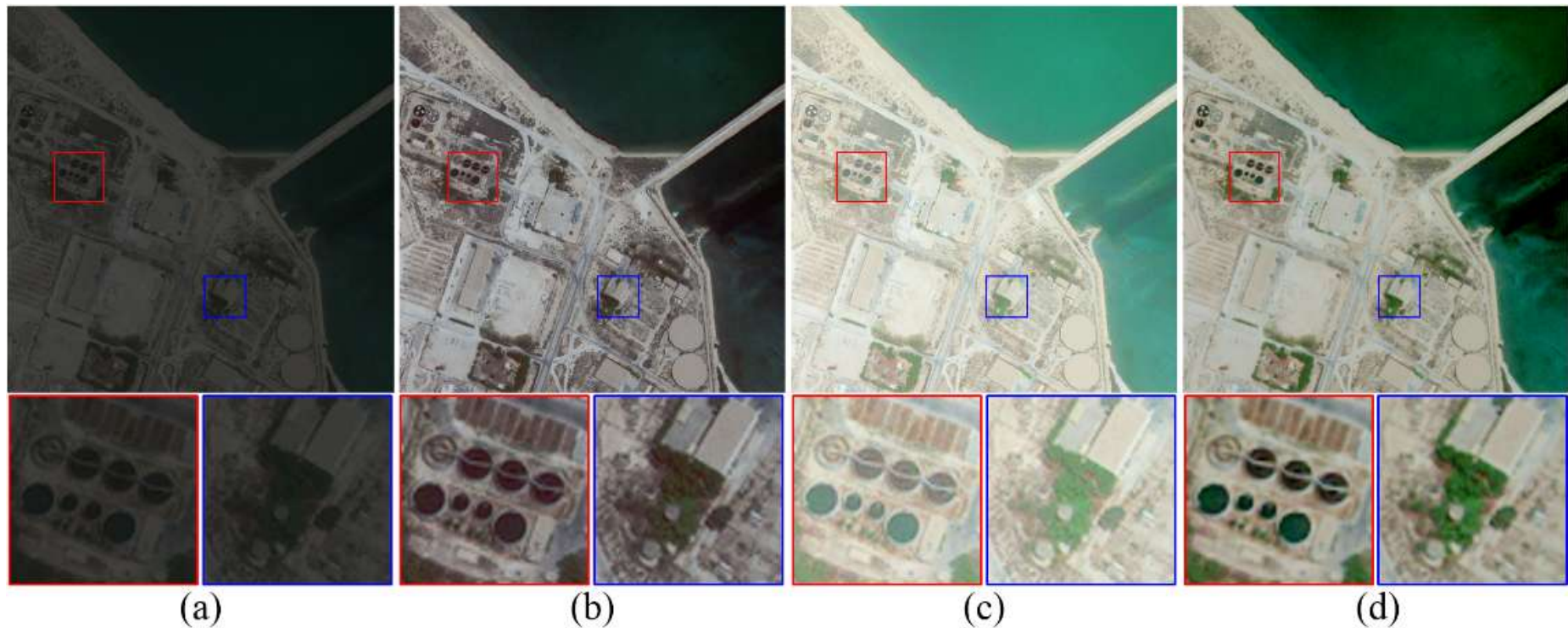


그림 19. 제안하는 방법과 기존 방법을 이용한 위성 영상 활용 결과: (a) 위성 영상, (b) Kim의 방법 [11], (c) Ma의 방법 [21], 그리고 (d) 제안하는 방법 [ $\lambda_1 = 10$ ,  $\lambda_2 = 10$ ,  $\lambda_3 = 1$ ,  $\lambda_4 = 50$ ].

## V. 결론



### • 결 론

- 변분법 기반의 최적화 방법을 이용해 저조도 영상 복원.
- **밝기 개선**과 **잡음제거**를 동시에 수행하기 위한 **새로운 에너지 함수**를 제안함.
- TV term을 적용하여, 엣지 성분을 보존하며 잡음 성분을 최소화함.
- 기존 방법에 비해 잡음 증폭 없이 높은 SNR을 갖는 영상 제공 가능.
- 안개제거, 위성영상 등 다양한 분야에 적용 가능함.

### • 추후 연구

- 저조도 환경에서 발생하는 Non-uniform 블러링 현상을 최소화하기 위한 연구
- 밝기 개선, 잡음제거, 디블러를 결합한 복합적 열화모델 및 에너지함수 제안을 위한 연구



# Reference



- [1] S.-D. Chen and A. R. Ramli, "Contrast enhancement using recursive mean-separate histogram equalization for scalable brightness preservation," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 49, no. 4, pp. 1301–1309, 2003.
- [2] T. Kim and J. Paik, "Adaptive contrast enhancement using gain controllable clipped histogram equalization," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 54, no. 4, pp. 1803–1810, 2008.
- [3] D. J. Jobson, Z.-u. Rahman, and G. A. Woodell, "Properties and performance of a center/surround retinex," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 6, no. 3, pp. 451–462, 1997.
- [4] D. J. Jobson, Z.-u. Rahman, and G. A. Woodell, "A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 6, no. 7, pp. 965–976, 1997.
- [5] R. Kimmel, M. Elad, D. Shaked, R. Keshet, and I. Sobel, "A variational framework for retinex," *Int. J. Comput. Vis.*, vol. 52, no. 1, pp. 7–23, 2003.
- [6] W. Ma, J.-M. Morel, S. Osher, and A. Chien, "An l1-based variational model for retinex theory and its application to medical images," in *Proc. IEEE Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit.*, 2011, pp. 153–160.
- [7] X. Jiang, H. Yao, S. Zhang, X. Lu, and W. Zeng, "Night video enhancement using improved dark channel prior," in *Proc. IEEE Conf. Image Process.*, 2013, pp. 553–557.
- [8] T. Goldstein and S. Osher, "The split bregman method for l1-regularized problems," *SIAM J. Imaging Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 323–343, 2009.
- [9] K. He, J. Sun, and X. Tang, "Single image haze removal using dark channel prior," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 33, no. 12, pp. 2341–2353, 2011.
- [10] L. I. Rudin, S. Osher, and E. Fatemi, "Nonlinear total variation based noise removal algorithms," *Physica D.*, vol. 60, no. 1, pp. 259–268, 1992.
- [11] Y. Yoo, J. Im, and J. Paik, "Low-light image enhancement using adaptive digital pixel binning," *Sensors*, vol. 15, no. 7, pp. 14 917–14 931, 2015.
- [12] C. O. Ancuti and C. Ancuti, "Single image dehazing by multi-scale fusion," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 22, no. 8, pp. 3271–3282, 2013.





