

# 디스플레이 기반 통신(DFC)에서의 새로운 데이터 할당기법 연구

김 유 정\*, 정 성 윤<sup>o</sup>

## A New Data Allocation Scheme in Display Field Communication

Yu-Jeong Kim\*, Sung-Yoon Jung<sup>o</sup>

요 약

본 논문은 디스플레이가 송신기이고 카메라가 수신기인 기존의 Display Field Communication(DFC)의 성능개선에 관한 연구이다. 특히 영상영역의 합수를 주파수영역으로 변환하는 기법 중 Discrete Cosine Transform(DCT)를 사용하였고 데이터를 영상에 심을 때 계산의 복잡도를 줄이기 위해 가산 할당기(addition allocator)와 차감 데이터 복원기(subtraction data retrieval)를 활용하였다. 또한 파워 할당으로 데이터의 크기를 적절히 조절해줌으로써 기존 addition allocator가 가지고 있는 한계를 극복하고 모의실험 성능을 전반적으로 향상시켰다.

**키워드** : 화면기반 통신, 광카메라 통신, 데이터 할당, 파워 할당, 주파수 변환

**Key Words** : Display Field Communication, Optical Camera Communication, Data Allocation, Power Allocation, Spectral Transformation

ABSTRACT

In this paper, we propose a new scheme to improve the performance of the existing Display Field Communication (DFC) in which a display and a camera are operating as a transmitter and a receiver, respectively. In the proposed scheme, we adopt the Discrete Cosine Transform (DCT) to transform an image into a spectral domain. In addition, Addition allocator and Subtraction data retrieval techniques are used to reduce the computational complexity when embedding data into an image. By appropriately adjusting the power of the embedded data through power allocation scheme, we prove that we can improve the overall performance of the proposed scheme based on numerical simulations.

### I. 서 론

최근 디스플레이 기술은 사람들의 디지털 콘텐츠 수요와 함께 많은 관심을 받고 있다. 특히 디스플레이의 픽셀 변화에 따라 카메라로 정보를 주고받는

Display to Camera(D2C) 통신기술을 이용한 여러 연구가 현재 진행되고 있다<sup>1-13)</sup>. D2C는 라이트 센서인 디스플레이가 송신기이고 이미지 센서로써 카메라가 수신기 역할을 한다. 본 기술의 핵심은 3퍼센트 이내로 디스플레이의 픽셀 값이 변하면 사람 눈에 인지되

※ 본 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원(P0008473, 2021년 산업혁신인재성장지원사업)을 받아 수행되었습니다.

• First Author : Yeungnam University Department of Electronic engineering, zowha989@yu.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Yeungnam University Department of Electronic engineering, syjung@ynu.ac.kr 종신회원

논문번호 : 202103-066-A-RN, Received March 22, 2021; Revised May 17, 2021; Accepted May 18, 2021

는 특별한 왜곡없이 카메라로 데이터가 전송될 수 있다는 것이다<sup>11</sup>.

상용화된 D2C 연구 중 현재 가장 만연하게 사용되는 기술은 바로 데이터가 2차원의 바코드로 인코딩되는 2D-barcode이다<sup>14-21</sup>. 2D-barcode는 QR 코드를 이용한 D2C 응용 기술이며 QR 코드는 광 채널을 통해 간단한 데이터를 인쇄된 매체의 디지털 코드에서 카메라로 전달한다. 하지만 QR 코드는 인코딩할 수 있는 데이터의 양을 제한하기 때문에 대용량 데이터를 전달하기에는 한계가 존재한다. 또한 QR 코드의 마크는 기본 디스플레이의 콘텐츠를 방해하지 않아야 하므로 마크의 크기와 위치는 제한성을 지닌다.

한편 다양하게 혼합된 콘텐츠 및 매체에 대한 수요가 증가함에 따라 유비쿼터스정보기술(ubiquitous computing environments)의 상호작용식 응용 소프트웨어는 많은 양의 데이터 전송을 필요로 한다.

D2C 연구의 또 다른 예로<sup>12-31</sup>의 논문은 각각 1차원, 2차원 기반의 DFC 기술을 제안하였다. 특히 DFC를 진행하는 과정에서 송신기는 영상 프레임의 주파수 계수가 가지는 특성을 이용해 데이터를 삽입한다. 그런 다음 데이터 복원과 디코딩을 위해 데이터가 삽입된 영상은 참조 영상 프레임과 함께 한 쌍의 영상 프레임으로 같이 전송된다<sup>34</sup>. 디스플레이에 많은 양의 데이터를 심을 수 있어서 기존의 QR 코드의 단점을 보완할 수 있게 되었다. 그리고 사용자에게 눈에 띄는 심각한 왜곡을 보여주지 않기 때문에 일반 디스플레이의 역할을 그대로함과 동시에 D2C 통신에서의 데이터 송/수신 또한 가능하게 한다.

기존 DFC에서는 이산 푸리에 변환인 DFT(Discrete Fourier Transform) 기법을 사용하였는데 컴퓨터는 원론적으로 연속함수를 다룰 수 없으므로 신호를 컴퓨터상에서 구현하기 위해서는 신호의 이산화가 필수적이다. 본 논문에서 채택한 이산 코사인 변환 DCT(Discrete Cosine Transform)는 JPEG, MPEG과 같이 영상을 압축 시 신호를 쉽게 처리할 수 있어 기존에 많이 사용되는 주파수 변환 기법 중 하나이다. 또한 DFT는 하모닉한 특성을 가지는 복소수 시그널을 사용하지만 DCT는 실수 값인 코사인 시그널 부분만을 사용하기 때문에 제안된 알고리즘의 연산과정을 줄일 수 있다는 큰 장점을 가진다.

따라서 본 논문에서는 기존의 DFC 기술을 기반으로 1)주파수영역 변환 기법 중 DCT를 사용하고 2)가산 할당기(addition allocator)과 차감 데이터 복원기(subtraction data retrieval)를 통한 데이터 삽입과 검출 및 3)파워 할당(power allocation)을 통해 할당되는

데이터의 파워를 결정하는 세 가지 방식을 적용하여 최종적으로 Symbol Error Rate(SER) 성능을 개선시키는 방법을 제안하였다.

## II. 1차원 DFC 기반의 D2C 시스템

### 2.1 제안된 알고리즘 개요

본격적인 설명에 앞서 그림 1은 송/수신부의 알고리즘을 블록도로 간단하게 나타낸 것이다.

우선 본 논문에서 제안한 DFC방식의 송신부에서는 입력 영상을 DCT를 통해 주파수영역으로 변환하는 것으로부터 시작된다. 기존의 논문<sup>21</sup>은 DFT를 사용했지만, 서론에서 설명한 근거를 통해 본 논문에서의 모든 결과는 DCT를 사용하여 나타낸 것이다.

다음으로 입력 데이터는 addition allocator를 통해 주파수영역으로 변환된 영상에 삽입된다. 이후 데이터가 삽입된 영상은 영상영역으로 역 변환되고 영상 프레임이 디스플레이 화면에 표시된다. 이때 데이터의 복원을 위해 참조 영상 프레임과 데이터가 삽입된 영상 프레임이 서로 반복적으로 화면에 나타난다.

수신부에서는 카메라를 통해 영상 프레임들을 계속해서 받게 되는데 왜곡된 영상이 수신될 수 있으므로 이를 보정하는 과정이 필요하다. 이때 예를 들어 컴퓨터 비전의 딥러닝 객체 검출을 활용한다면 왜곡이 보정된 영상을 얻을 수 있다. 이렇게 획득된 영상은 다시 DCT를 통해 주파수영역으로 변환한다.

그 후 subtraction data retrieval를 이용해 데이터를 추출하고 마지막으로 데이터를 demodulation하면 최종적인 데이터를 검출해낼 수 있다.

본 연구에서는 RGB 컬러 영상을 사용한 기법을 제시하며, 각각 R, G, B 채널에서는 제안된 방식이 동일하게 수행되므로 하기의 영상은 R 영상 채널을 대표적인 예시로 하여 작성하였다.

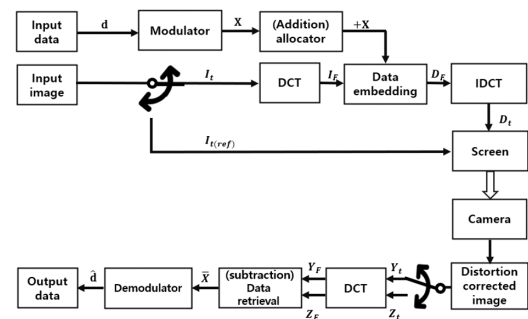


그림 1. 제안된 모델 블록도  
Fig. 1. System model of the proposed DFC scheme

2.1.1 데이터 임베딩

주파수영역에 데이터를 심기 위해서는 왜곡이 보정된 영상영역의 영상이 주파수영역으로 변환되어야 한다. 따라서 주파수영역의 영상( $I_F$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_F = [i_{F_1}, i_{F_2}, \dots, i_{F_Q}] \\ = [C \cdot i_{t_1}, C \cdot i_{t_2}, \dots, C \cdot i_{t_Q}] = C \cdot I_t \quad (1)$$

$I_t$ 는  $P \times Q$  행렬의 영상영역의 영상이고  $i_{F_q}$ 와  $i_{t_q}$  ( $q=1, 2, \dots, Q$ )는  $I_F$ 와  $I_t$  각각의 열벡터를 의미한다.

$C$ 는 DCT 행렬이며 자세한 설명을 위해 예를 들어 보도록 한다. 만약 영상영역의 열벡터  $x[n]$  ( $n=0, 1, \dots, N-1$ )을 DCT 하면 주파수영역의 열벡터  $X[k]$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$X[k] = \sum_{n=-\frac{N}{2}+1}^{\frac{N}{2}} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} = \langle x[n], c_k[n] \rangle \quad (2) \\ (\text{for } k=0, 1, \dots, N-1)$$

또한 식(2)는 아래 행렬의 형태로 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X[0] \\ X[1] \\ \vdots \\ X[N-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_0[-\frac{N}{2}+1] & c_0[-\frac{N}{2}+2] & \dots & c_0[\frac{N}{2}] \\ c_1[-\frac{N}{2}+1] & c_1[-\frac{N}{2}+2] & \dots & c_1[\frac{N}{2}] \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{N-1}[-\frac{N}{2}+1] & c_{N-1}[-\frac{N}{2}+2] & \dots & c_{N-1}[\frac{N}{2}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x[-\frac{N}{2}+1] \\ x[-\frac{N}{2}+2] \\ \vdots \\ x[\frac{N}{2}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

따라서 복잡한 DCT 행렬을 간단하게  $C$ 로 나타낼 수 있고 주파수영역의 영상은 DCT 행렬과 영상영역의 영상과의 곱으로 표현 가능하다.

다음으로  $X = [x_1, x_2, \dots, x_Q]$ 가 한 프레임 영상에 삽어지는  $P \times Q$  데이터 행렬이라 하였을 때,  $q$ 번째 행 벡터( $X_q$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$X_q = \left[ \frac{1}{1 \times s} \quad \frac{(d_q)^T}{L} \quad \frac{1}{1 \times (P-s-L)} \right]^T \quad (4)$$

$s$ 는 데이터 심볼의 시작 픽셀이며  $L$ 은 행 당 심어지는 데이터의 수이다. 영상에 DCT 변환에 대한 결과는 항상 실수로만 나오기 때문에 데이터 열에 기존의 DFT기반 DFC<sup>[2]</sup>에 사용되는 데이터 임베딩 방식의

특징인 conjugate symmetric 특성을 반영할 필요가 없다.

그림 2는 주파수영역 영상에 삽입된 데이터의 위치를 보여준다. 특정 영상에서 저주파 성분이 많다는 것은 영상 픽셀의 밝기 값 변화가 드물다는 것이고 반대로 고주파 성분이 많다는 것은 영상에서 픽셀의 밝기 값 변화가 빈번하다는 것을 의미한다. 보통 일반적인 영상에서는 고주파 성분보다 저주파 성분이 차지하는 비율이 더 많기 때문에 저주파 영역에 데이터를 많이 심으면 수신부에서의 데이터 복원이 좋다는 장점을 가진다. 영상에서 통상적으로 Peak Signal-To-Noise Ratio (PSNR)이 30dB 이상인 경우 원영상과 수신된 영상의 왜곡 차이가 크지 않다고 간주되며 만약 영상에서 큰 비율을 차지하는 저주파 성분에 데이터를 많이 심으면 PSNR이 30dB 밑으로 떨어져 영상 화질이 왜곡될 수 있다. 그러므로 데이터 복원 성능과 화질 유지 두 가지 모두 적절히 고려해 데이터를 임베딩 해야 한다.

다음으로 addition allocator를 사용해서 주파수영역 영상( $I_F$ )에 데이터를 삽입해주고 이렇게 데이터가 심어진 주파수영역의 영상 행렬을  $D_F$ 라 하면 다음과 같이 표현 가능하다.

$$D_F = I_F + X \quad (5)$$

그 다음 영상 프레임이 디스플레이 화면에 표시되기 위해서는  $D_F$ 를 다시 영상영역으로 Inverse Discrete Cosine Transform(IDCT) 해주어야 한다. 따라서 변환된  $D_t$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$D_t = C^H \cdot D_F \quad (6)$$

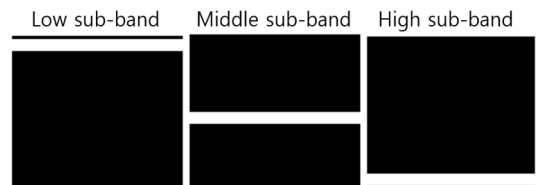


그림 2. 데이터가 삽입된 주파수영역  
Fig. 2. Frequency domain range where Data were inserted

2.1.2 파워 할당

이때까지 DCT와 addition allocator를 사용하여 어떻게 주파수영역에 데이터를 심는지를 설명하였다. DCT와 addition allocator를 사용하면 알고리즘의 구

현 용이성과 계산과정의 복잡도를 낮춘다는 장점들이 있다. 하지만 addition allocator로 데이터를 심으면 데이터가 할당된 주파수영역 부분에 따라 픽셀 값과 데이터 값의 구분이 어렵기 때문에 수신부에서의 데이터 복원이 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 데이터가 영상의 특정 주파수영역에 심어질 때 그 주파수영역 성분의 평균 전력에 비례하여 데이터의 크기 값을 설정하는 파워 할당 개념을 새롭게 제안함으로써 위의 단점을 해결하고 성능을 개선하고자 한다.

주파수영역의 영상을  $I_B$  데이터가 할당되는  $I_F$ 영역 부분의 평균 파워를  $P_{AVG}$ 라 둔다면 데이터  $X$ 의 크기 ( $X_{amplitude}$ )는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$X_{amplitude} = \sqrt{P_{AVG}} * \alpha \tag{7}$$

여기서  $\alpha(0 < \alpha < 1)$ 는 비례 상수를 나타내며, 영상의 PSNR 값이 30dB 아래로 떨어지지 않으면서 SER을 최소화할 수 있도록 할당되어야 한다.

따라서 식(4)의  $d_q$ 는 파워 할당을 고려하면 아래와 같은 관계식을 가지며  $q$ 번째 데이터( $s_q$ )는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_q = X_{amplitude} * d_q \tag{8}$$

따라서 식(4)의  $q$ 번째 행 벡터( $X_q$ )는 다음과 같이 바뀌어 표현 가능하다.

$$X_q = \left[ \frac{1}{1 \times s} \quad \frac{(s_q)^T}{L} \quad \frac{1}{1 \times (P^2 - s - L)} \right]^T \tag{9}$$

### 2.1.3 데이터 검출

D2C 통신을 하는 과정에서 빛이 초점을 맞춰 카메라로 정확히 들어오지 않으면 노이즈를 발생시킨다. 연속되는 두장의 영상 프레임에 더해지는 각각의 노이즈는 실제로는 약간의 차이가 날 수 있지만 계산의 편의를 위해 같다고 하고 이 노이즈를 Additive White Gaussian Noise(AWGN)로 가정한다. 이렇게 수신된 영상은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} Z_t &= I_{t(ref)} + N_t \\ Y_t &= D_t + N_t = C^H \cdot D_F + N_t \end{aligned} \tag{10}$$

$Z_t$ 는 수신된 참조 영상이고  $Y_t$ 는 수신된 데이터가 심어진 영상이며  $N_t$ 는 AWGN 행렬을 나타낸다.

그 후 데이터를 얻기 위해서 수신된 영상들은 DCT 변환을 거쳐 주파수영역으로 변환된다.

$$\begin{aligned} Z_F &= C \cdot I_{t(ref)} + C \cdot N_t = I_{F(ref)} + N_F \\ Y_F &= C \cdot D_t + C \cdot N_t = D_F + N_F = I_F + X + N_F \end{aligned} \tag{11}$$

다음으로 수신된 데이터의 복원은 아래 식과 같이 데이터가 심어진 영상에서 데이터가 없는 참조 영상을 제외하는 subtraction data retrieval을 통해 수행된다.

$$\hat{X} = \hat{Y}_F - \hat{Z}_F \tag{12}$$

식(12)에서 볼 수 있듯이 subtraction data retrieval 과정을 거쳐 데이터가 심어진 영상에서 참조 영상을 빼면 특정 노이즈의 영향 없이 데이터를 수신할 수 있다. 이때  $\hat{X} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \dots, \hat{x}_Q]$  이기 때문에 최종적으로 복원된  $q$ 번째 행의 데이터( $\hat{s}_q$ )는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_q &= \hat{X}_q(s+l, q) \\ &(\text{for } l = 1, 2, \dots, L) \end{aligned} \tag{13}$$

따라서 한 프레임에서 추정된 데이터 행렬( $\hat{s}$ )는 다음과 같이 간단하게 표현될 수 있다.

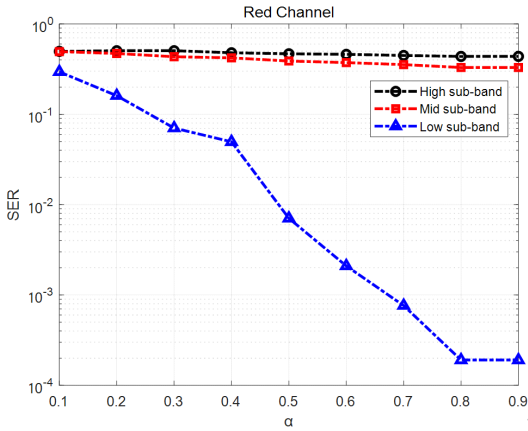
$$\hat{s} = [\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_q] \tag{14}$$

## 2.2 모의실험

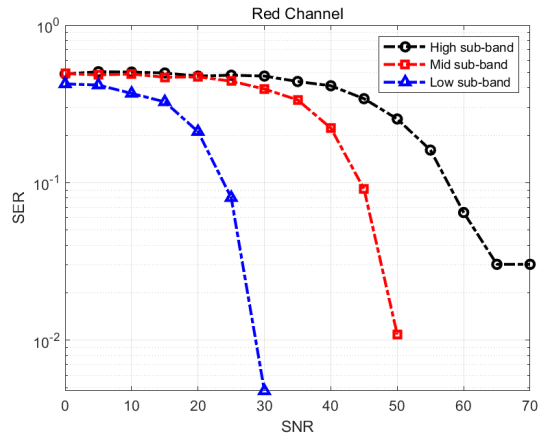
기본적으로 본 논문에서 제시하는 전체적인 결과는 249×262 크기의 lena영상을 사용해 나타낸 것이며 다양한 표준 영상에 대한 결과를 보기 위해 tulips, tango 영상을 사용하였다.<sup>[22-23]</sup> 또한 데이터 변조 방식으로는 Binary Phase-Shift Keying(BPSK) 방식을 이용하였다.

### 2.2.1 $\alpha$ 의 변화에 따른 결과

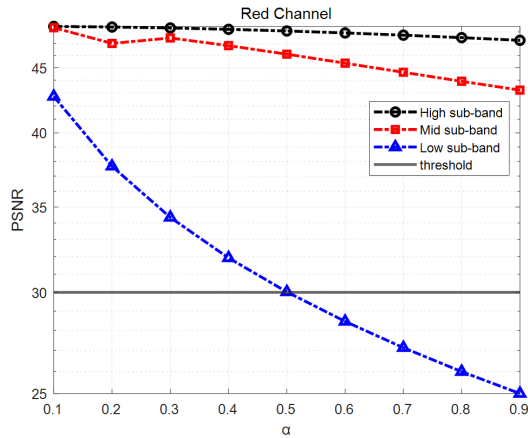
그림 3은  $\alpha$ 가 0.1부터 0.9까지 증가함에 따라 각각의 서브 밴드에서의 PSNR 및 SER을 보여주는 그래프이다. 또한 그래프들은 세 개의 채널 중 Red 채널을 대표로 살펴본 것이며 SER값은 Signal-to-Noise Ratio (SNR) 값이 30dB일 때를 기준으로 측정한 것이다.



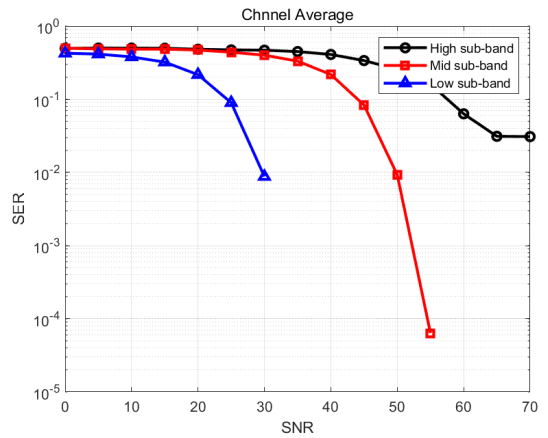
(가) SER graph according to  $\alpha$



(가) SER graph in Red Channel



(나) PSNR graph according to  $\alpha$



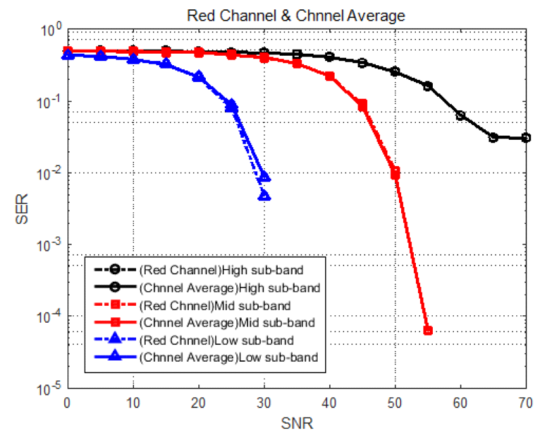
(나) SER graph in R,G,B Average Channel

그림 3.  $\alpha$ 의 변화에 따른 SER 및 PSNR 결과  
Fig. 3. SER & PSNR results according to  $\alpha$

우선 그림 3의 (가)에서  $\alpha$ 가 증가할수록 SER이 점점 낮아지며 Low sub-band일 때의 SER 성능이 제일 좋게 나온다는 것을 확인하였다.

앞서 언급한 바와 같이 PSNR이 30dB 아래로 떨어지는 순간 영상 화질이 심하게 왜곡되므로 PSNR이 최소 30dB을 넘되 SER 수치는 가장 적을 때를 찾아야 한다. 따라서 그림3의 (나)를 보면  $\alpha$ 가 증가함에 따라 Low sub-band의 PSNR 값이 점점 낮아지고  $\alpha$ 가 0.5일 때가 threshold 값과 비슷해지는 지점인 것을 알 수 있다.

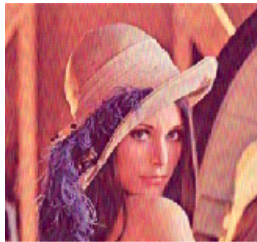
결론적으로 모의실험을 통해  $\alpha$ 가 0.5인 Low sub-band에서의 SER 성능이 제일 좋음을 확인할 수 있었다.



(다) SER graph in Red Channel & R,G,B Average Channel  
그림 4. 레드 채널과 채널 평균에 대한 SER 그래프 ( $\alpha = 0.5$ )  
Fig. 4. SER graph in Red Channel and R,G,B Average Channel ( $\alpha = 0.5$ )



(가) High sub-band (나) Middle sub-band



(다) Low sub-band

그림 5. 각각의 Sub-band에 데이터가 포함된 영상  
Fig. 5. Sub-band Images embedding data

그림 4의 (가)는  $\alpha$ 가 0.5일 때 Red Channel에 대한 SER 그래프를 보여주며 (나)는 세 채널에 대한 평균적인 SER 그래프를 나타낸다. 마지막으로 (다)는 (가)와(나)를 동시에 비교하기 위해 같은 축 상에 함께 나타낸 SER 그래프이다. 그림 5는  $\alpha$ 가 0.5일 때 각각의 서브 밴드에 데이터가 포함된 영상이다.

2.2.2 다양한 표준 영상에 대한 적절한  $\alpha$  값

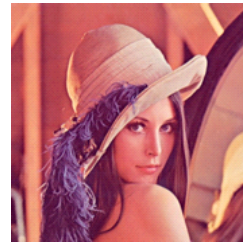
그림 6은 모의실험에서 사용된 다양한 표준 영상들이고 표 1은 lena 영상 외에 다양한 표준 영상을 사용했을 때 최적의  $\alpha$ 에 대한 SER 및 PSNR 값이다. 표를 보았을 때 PSNR이 30dB 아래로 떨어지지 않는  $\alpha$ 구간이 대체적으로 0.25~0.5 사이임을 확인할 수 있다.

표 1. 표준 영상들에 대한 모의실험 결과  
Table. 1. Simulation results for standard images

	lena	tulips	tango
$\alpha$	0.5	0.25	0.4
SER	5.534e-3	1.302e-4	1.137e-2
PSNR(dB)	30.0237	30.1524	30.7507

2.2.3 기존 DFC(2) 기법과 제안된 방식의 비교

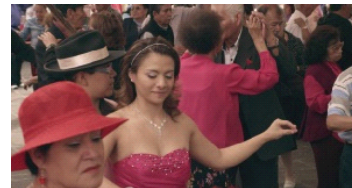
그림 7은 기존 DFC에 사용된 DFT 및 데이터 할당 방법<sup>[2]</sup>과 본 논문에 사용된 DCT 및 제안된 power allocation 기반 데이터 할당방법을 비교한 그래프이다. 둘 다 Low sub-band이고 동일한 PSNR을 가질



(가) lena image



(나) tulips image



(다) tango image

그림 6. 모의실험에서 사용된 표준 영상  
Fig. 6. Standard images used in simulation

때의 성능을 비교하였으며 기존의 기법에 비해서 제안된 방식은 Addition allocator와 이를 보완하기 위한 파워 할당을 사용함으로써 SER 성능이 확연하게 향상된 것을 알 수 있다.

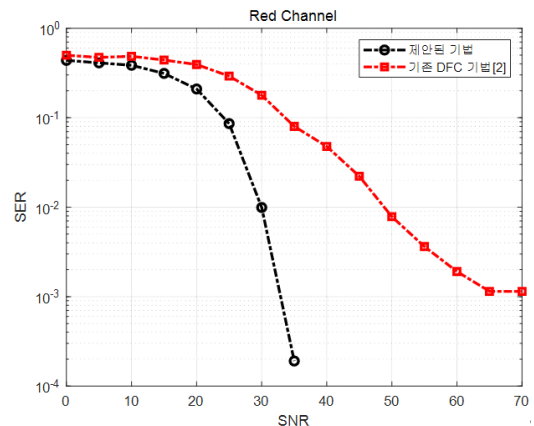


그림 7. DFT와 DCT의 성능 비교 그래프  
Fig. 7. Performance comparison graph of DFT and DCT

### III. 결 론

본 논문에선 주파수 변환기법으로 DCT를 사용하고 power allocation을 활용한 데이터 할당 방법을 제시하였다. 이를 기반으로 결과 영상의 PSNR이 30dB 밑으로 떨어지지 않으면서 SER 성능은 가장 좋은  $\alpha$ 를 찾는 것이 주요 목표였다. 그림3의 결과를 통해서 같은 SNR에 대비해 SER이 가장 낮은 Low sub-band에서의 성능이 가장 좋음을 확인하였고 표준 영상의 종류에 따라 최적의 성능을 만족하는  $\alpha$ 값이 0.25~0.5의 범위에 있음을 확인할 수 있었다.

### References

- [1] M. Guri, D. Bykhovsky, and Y. Elovici, "BRIGHTNESS: Leaking sensitive data from air-gapped workstations via screen brightness," *2019 12th CMI Conf. Cybersecurity and Privacy*, Feb. 2020.
- [2] B. W. Kim, H.-C. Kim, and S.-Y. Jung, "Display field communication: Fundamental design and performance analysis," *J. Lightw. Technol.*, vol. 33, no. 24, pp. 5269-5277, 2015.
- [3] S.-Y. Jung, H.-C. Kim, and B. W. Kim, "Implementation of two-dimensional display field communications for enhancing the achievable data rate in smart-contents transmission," *Displays*, vol. 55, pp. 31-37, 2018.
- [4] P. Singh, B. W. Kim, and S.-Y. Jung, "Performance analysis of display field communication with advanced receivers," *Wirel. Commun. Mobile Comput.*, vol. 2020, no. 3657309, Apr. 2020.
- [5] P. Singh and S.-Y. Jung, "Data decoding based on iterative spectral image reconstruction for display field communications," *ICT Express*, Apr. 2020.
- [6] S.-A. Kim and S.-Y. Jung, "Screen communication scheme based on display," *J. KICS*, vol. 44, no. 04, pp. 670-673, 2019.
- [7] C. Chen, W. Huang, L. Zhang, and W. H. Mow, "Robust and unobtrusive display-to-camera communications via blue channel embedding," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 28, no. 1, pp. 156-169, 2018.
- [8] M. Rubaiyat, H. Mondal, and J. Armstrong, "Analysis of the effect of vignetting on MIMO optical wireless systems using spatial OFDM," *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 5, pp. 922-929, Mar. 2014.
- [9] R. Carvalho, C.-H. Chu, and L.-J. Chen, "IVC: Imperceptible video communication," *ACM HotMobile 2014*, Santa Barbara, CA, USA, Feb. 2014.
- [10] A. Wang, C. Peng, O. Zhang, G. Shen, and B. Zeng, "InFrame: Multiflexing full-frame visible communication channel for humans and devices," in *Proc. HotNets*, p. 23, Los Angeles, CA, USA, Nov. 2014.
- [11] W. Yuan, K. Dana, A. Ashok, M. Gruteser, and N. Mandayam, "Dynamic and invisible messaging for visual MIMO," in *Proc. IEEE Workshop Appl. Comput. Vision*, pp. 345-352, Breckenridge, CO, USA, Jan. 2012.
- [12] X. Zhang, J. Liu, Z. Ba, Y. Tao, and X. Cheng, "Mobiscan: An enhanced invisible screen-camera communication system for IoT applications," *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, Dec. 2020, <https://doi.org/10.1002/ett.4151>.
- [13] K. Jo, M. Gupta, and S. K. Nayar, "Disco: Display-camera communication using rolling shutter sensors," *ACM Trans. Graph.*, vol. 35, no. 5, pp. 1-13, 2016.
- [14] S.-Y. Jung, J.-H. Lee, W. Nam, and B. W. Kim, "Complementary color barcode-based optical camera communications," *Wirel. Commun. Mobile Comput.*, vol. 2020, no. 3898427, 2020.
- [15] T. Marktscheffel, W. Gottschlich, W. Popp, et al., "QR code based mutual authentication protocol for internet of things," in *Proc. 2016 IEEE 17th Int. Symp. WoWMoM*, pp. 1-6, Coimbra, Portugal, Jun. 2016.
- [16] D. Wave, "Information technology-automatic identification and data capture techniques-QR code bar code symbology specification," in *International Organization for Standardization*,

vol. 18004, ISO/IEC, 2015.

- [17] K. Kamijo, N. Kamijo, and Z. Gang, "Invisible barcode with optimized error correction," in *2008 15th IEEE Int. Conf. Image Process.*, pp. 2036-2039, San Diego, CA, USA, Oct. 2008.
- [18] A. Mohan, G. Woo, S. Hiura, Q. Smithwick, and R. Raskar, "Bokode: Imperceptible visual tags for camera based interaction from a distance," *ACM Trans. Graphics*, vol. 28, no. 3, p. 98, 2009.
- [19] T. Hao, R. Zhou, and G. Xing, "COBRA: color barcode streaming for smartphone systems," in *Proc. MobiSys '12*, pp. 85-98, New York, NY, USA, Jun. 2012.
- [20] W. Hu, H. Gu, and Q. Pu, "LightSync: unsynchronized visual communication over screen-camera links," in *Proc. MobiCom '13*, pp. 15-26, New York, NY, USA, Sep. 2013.
- [21] A. Wang, S. Ma, C. Hu, J. Huai, C. Peng, and G. Shen, "Enhancing reliability to boost the throughput over screencamera links," in *Proc. MobiCom '14*, pp. 41-52, New York, NY, USA, Sep. 2014.
- [22] 'lenacolor.png', 'tulips.png' Standard Image usage from <https://homepages.cae.wisc.edu/~ec/e533/images/>
- [23] 'tango.jpg' test sequences usage from <https://mpeg.chiariglione.org/standards/exploration/future-video-coding/n16512-work-plan-assessment-test-material>

**김 유 정 (Yu-Jeong Kim)**



2020년 2월 : 영남대학교 전자공학과 졸업  
2021년~현재 : 영남대학교 전자공학과 석사과정  
<관심분야> 디지털 신호처리, 이동통신, 영상처리 등  
[ORCID:0000-0002-3132-9816]

**정 성 윤 (Sung-Yoon Jung)**



2000년 : 고려대학교 전기전자전파 공학부 졸업  
2000년~2002년 : 한국과학기술원 전자 전산학과 석사학위 취득  
2002년~2006년 : 한국과학기술원 전자 전산학과 박사학위 취득

2006년~2009년 : 삼성전자 통신연구소 책임연구원  
2009년~2014년 : LED-IT 융합산업화 연구센터 부센터장(2012) 및 분과장  
2009년~현재 : 영남대학교 전자공학과 교수  
<관심분야> ICT융합통신, 에너지 전달형 무선 광통신, 카메라통신, 디스플레이 통신(DFC), 나노통신 및 분자통신  
[ORCID:0000-0002-1775-7144]