

논문 2016-53-11-2

# 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 저밀도 ON 픽셀 2차원 4-레벨 4/6 균형 변조부호

( A Sparse-ON Pixel Two-Dimensional 4-Level 4/6  
Balanced-Modulation Code in Holographic Data Storage Systems )

박 근 환\*, 이 재 진\*\*

( Keunhwan Park and Jaejin Lee<sup>©</sup> )

## 요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치 (HDSS)는 한 픽셀에 1비트 이상의 데이터를 저장 가능하며 전송 속도 및 저장 용량을 증가시키는 장점이 있다. 하지만 2차원적으로 생기는 인접 심볼 간의 간섭 (ISI) 및 페이지 간의 간섭 (IPI)이 발생한다. 본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부호율이 1.33 bit/pixel이면서 코드워드의 밀도가 균일한 부호를 제안하였다. 제안된 저밀도 ON 픽셀 4/6 2차원 균형 변조부호는 기존의 2/3, 6/9 변조부호와 비교하여 비슷한 성능을 보이지만, 한 페이지에 기록되는 ON 픽셀의 비율을 낮춤으로써 체적 내에 페이지 수를 늘려 저장 용량을 증가시킬 뿐만 아니라 코드워드의 밀도가 균일하여 인접 페이지 간의 간섭을 줄일 수 있다.

## Abstract

In the holographic data storage system, the data can be stored more than one bit per pixel and the storage capacity and transmission rate can be increased. In this paper, we proposed a sparse-ON pixel 4/6 balanced-modulation code that the code rate is 1.33 (bit/pixel) with uniform page density. Even though the performance of the proposed sparse-ON pixel 4/6 balanced-code is similar to 2/3 and 6/9 modulation codes, it can increase the storage capacity more than these modulation codes and also store more pages in a volume by reducing the rate of ON pixels to mitigate IPI (inter-page interference).

**Keywords** : Balanced-Modulation Code, Multi-level, Inter-page interference, Sparse-ON pixel code

## I. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장장치 (Holographic Data Storage System, HDSS)는 체적에 페이지 단위로 데이터를 저장 및 재생하는 광 저장장치이다. 홀로그래픽 데이터 저장장치의 기록 원리는 정보를 가지고 있는 데이터 페

이지를 SLM (Spatial Light Modulator)을 이용하여 신호빔으로 표현하고, 참조빔(Reference Beam)으로 간섭을 발생시켜 간섭무늬를 매질에 기록하고 반대로 재생 시에는 참조빔 만을 조사하여 페이지 신호를 추출한다.<sup>[1-3]</sup> 기존의 저장 시스템과 달리 페이지로 데이터를 기록하기 때문에 저장 용량 능력, 처리 속도 및 전송률이 뛰어나다. 또한 멀티레벨 (Multi Level)로 데이터를 저장하면 더 많은 저장 용량 및 속도 향상을 할 수 있다.<sup>[4-7]</sup> 하지만 페이지 단위로 데이터를 저장하기 때문에 인접 페이지 간 간섭 (Inter-Page Interference, IPI)이 발생하며 기존 저장 장치와 달리 2차원으로 데이터를 저장하므로 2차원으로 인접한 심볼 간의 간섭

\* 학생회원, \*\* 정회원, 송실대학교 전자정보공학부 (School of Electronics Engineering, Soongsil University)  
© Corresponding Author (E-mail : zlee@ssu.ac.kr)  
※ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2059077).

Received ; August 27, 2016      Revised ; September 13, 2016

Accepted ; October 7, 2016

(Inter-Symbol Interference, ISI)가 발생한다. 이러한 문제점들을 극복하기 위해 페이지 간의 밀도를 균일하게 분포하여 IPI를 완화하거나, 고립된 픽셀을 제거하여 2차원 ISI를 완화할 수 있다.<sup>[8~9]</sup>

한편, 홀로그래픽 저장 장치는 체적 내에 기록되는 페이지 수가 많아지면 많아질수록 픽셀의 회절 효율은 감소하며 데이터 저장과 복구가 가능한 저장 페이지 수에 한계가 생긴다. 이러한 이유로 페이지 내에 ON 픽셀의 수가 적거나 픽셀의 밀도가 낮을수록 픽셀의 회절 효율은 증가한다. King과 Neifeld는 저밀도(Sparse-ON Pixel) 변조부호와 고밀도(Dense-ON Pixel) 변조부호의 성능을 비교하였다. 한 페이지에 ON픽셀의 비율이 약 25% (Sparse-ON Pixel 변조부호인 경우) 정도일 때, 저장 용량을 16% 정도 증가시킬 수 있다고 보고하였다.<sup>[6]</sup> 하지만 25%의 ON 픽셀의 밀도를 유지하려면 부호율의 손실을 감안해야한다.<sup>[10~11]</sup>

본 논문에서는 부호율이 4/6인 2차원 균형 변조부호를 제안하였다. 제안된 4/6 균형 변조부호는 ON 픽셀의 밀도 비율이 33%가 되도록 하였으며, 또한 각 변조부호는 균일한 밀도를 가져 IPI를 완화할 수 있고 각 코드워드 간의 최소거리가 2 이상이므로 ISI 완화 효과를 가진다.

**II. 저밀도 ON 픽셀 4/6 2차원 균형 변조부호**

4-레벨은 이진 부호와 달리 ON 픽셀들의 밀도율이 다르다. 표 1은 이진부호와 4-레벨 픽셀 별 밀도율 테이블이다. 이진부호는 비트 1만이 100%의 밀도를 갖는다면 4-레벨에서는 0 심볼을 제외한 1, 2, 3 심볼이 ON 픽셀로 각각 표 1과 같은 밀도율을 갖는다. 멀티레벨에서는 저밀도 ON 픽셀의 비율을 줄이기 위해 ON 픽셀의 적절한 조합 및 사용이 필요하다. 그림 1은 페이지 크기가 50×50에서의 제안된 4/6 균형 변조부호 데이터와 랜덤 시퀀스 데이터의 비교 그림이다. 제안된 4/6 변조부호 데이터는 랜덤 시퀀스 데이터보다 상대적으로 많은 OFF 픽셀을 유지하고 있다. 또한 제안된 4/6 변조부호는 페이지들의 밀도를 균일하게 하여 각 페이지가 가지는 밀도를 균일하게 분포한다. 이는 IPI를 완화하는 하나의 방법이 될 수 있다.

제안된 4/6 균형 변조부호는 4-레벨 4개의 입력 심볼 데이터를 6개의 출력 심볼 데이터로 변조한다. 4-레벨에서는 하나의 심볼이 두 비트(ex: 00, 01, 10, 11)를 저장한다. 그림 2는 4/6 균형 변조부호의 구조이다. 4개의

입력 심볼은 3×2배열로 변조되며 부호율은 1.33 (bit/pixel)이다. 제안된 저밀도 ON 픽셀 4/6 균형 변조부호의 각 코드워드의 레벨의 합으로 정의된 무게는 6이다. 4-레벨 6픽셀에서 무게가 6인 코드워드는 6픽셀 이진부호에서 두 개의 비트가 ON 상태와 같기 때문에 ON 픽셀의 밀도 비율은 약 33%(2pixel/6pixel)를 갖는다. 만약 무게를 더 낮춘다면 ON 픽셀 밀도율을 더 낮출 수 있지만 0.33 (bit/pixel)의 부호율 손실이 생긴다. 변조된 모든 코드워드들은 6의 무게를 가지므로 저장된 모든 페이지의 무게 또한 같다. 이는 각 페이지의 밀도가 균일하다 볼 수 있으며 따라서 IPI를 완화할 수 있다. 또한 각 코드워드 간의 최소거리는 2 이상으로 각 심볼 간의 간섭 발생 비율을 줄일 수 있다.

제안된 저밀도 ON 픽셀 4/6 균형 변조부호의 생성 방법은 다음과 같다. 첫째, 가능한 모든 패턴의 6픽셀 코드워드를 생성하고 무게가 6인 코드워드를 추출한다. 둘째, 첫 번째 발생한 코드워드를 기준으로 모든 코드워드를 비교하여 최소거리가 2 이상일 때 체크 비트를 발생하여 1로 표기한다. 셋째, 체크 비트가 1인 인덱스를 가진 코드워드를 기준으로 나머지 코드워드들을 비교하여 최소거리가 2 미만인 코드워드들의 체크 비트를 0으로 만든다. 마지막으로 체크 비트가 1인 남아있는

표 1. 이진부호와 4-레벨 ON 픽셀 비교 테이블  
Table1. ON Pixel comparison table according to level.

이진부호	Pixel	Bit	밀도율 (%)
	OFF	0	0
ON	1	1	100

4-레벨	Pixel	Symbol	밀도율 (%)
	OFF	0	0
	ON	1	33.3
		2	66.6
3		100	

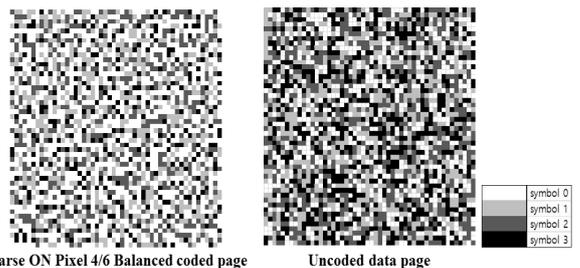


그림 1. 제안된 균형 변조부호와 랜덤 데이터 비교  
Fig. 1. Comparison of the proposed balanced coded data and the uncoded data (page size is 50×50).

코드워드들을 추출하여 하나의 집합을 만든다. 제안된 조건을 만족하는 코드워드들의 개수는 336개이며 만족하는 코드워드들 중 OFF 픽셀의 비율이 높은 코드워드 256개를 선택하였다. 그림 3은 제안된 256개의 코드워드들이다. 입력 심볼 {0, 0, 0, 0}은 출력 {0, 0, 0, 0, 3, 3}으로 변조된다.

복조 방식으로 ML(Maximum Likelihood) 검출기를 사용하였다. ML 검출기는 채널 통과 한 코드워드 심볼들의 유클리디안 거리를 얻기 위해 다음과 같이 계산된다.

$$d(C_i^*, C_i) = \sum_{j=0}^5 (C_{ij}^* - C_{ij})^2 \quad (1)$$

여기서  $C_i^*$ 는 i 번째 채널 통과한 코드워드,  $C_i$ 는 i 번째 변조된 코드워드,  $C_{ij}^*$ 는 i 번째 채널 통과한 코드워드에서 j 번째 심볼,  $C_{ij}$ 는 i 번째 변조된 코드워드에서 j 번째 심볼을 의미한다. ML검출기를 통해 얻은 데이터를 이용하여 최소 거리를 갖는 코드워드로 복조한다.

### III. 실험

#### 1. HDSS 채널 모델

입력 데이터는 CCD(charge-coupled detector) 배열을 통해 출력 데이터를 만든다. 입력 페이지에서 (x, y) 위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 다음과 같다.<sup>[12~13]</sup>

$$h(x, y) = \frac{1}{\sigma^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x}{\sigma}, \frac{y}{\sigma}\right) \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ 는 분산된 신호의 퍼짐 정도를 나타내는 블러(Blur)를 의미하며, 블러(Blur)가 커지면 2차원 인접 심볼간의 간섭이 증가한다.

$$\text{sinc}(x, y) = \left( \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, \frac{\sin(\pi y)}{\pi y} \right) \quad (3)$$

#### Input Symbol

S <sub>0</sub>	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>
----------------	----------------	----------------	----------------



#### Output Codeword

C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>
C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>
C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>

그림 2. 제안된 저밀도 ON 픽셀 4/6 균형 변조부호 구조  
Fig. 2. Structure of the proposed sparse-ON pixel 4/6 balanced code.

CCD 배열을 통해 출력된 데이터가 제대로 된 위치에 있지 못하게 된 상태를 어긋남이라 한다. x축의 어긋남을  $m_x$ 라하고 y축의 어긋남  $m_y$ 로 정의한 연속적인 PSF는 다음과 같다.<sup>[7~8]</sup>

$$h(x, y) = \frac{1}{\sigma^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x + m_x}{\sigma}, \frac{y + m_y}{\sigma}\right) \quad (4)$$

실험은 한 페이지당 1024×1024의 크기로 1000 페이지를 하였다. 신호대 잡음비(SNR)는 다음과 같이 정의 하였다.

$$\text{SNR} = 10 \log\left(\frac{1}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

또한 성능을 향상시키기 위하여 PRML (partial response maximum likelihood) 시스템을 HDSS에 적용하였다. 등화기는 유한 임펄스 응답에 의한 5×5 계수와 PR 타겟은 (131)을 사용하였다. 홀로그래프 채널 통과 후 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN)이 추가되며, 잡음이 섞인 데이터는 등화기와 비터비 검출기를 지나 복조된다. 마지막으로 복조된 4-레벨 심볼들은 이진 데이터로 복조된다.

#### 2. 실험 결과

제안된 저밀도 ON 픽셀 4/6 균형 변조부호의 코드율이 1.33 bit/pixel 이므로 부호율이 같은 기존에 제안된 2/3 변조부호와 6/9 변조부호와 비교하였다. 랜덤 변조부호를 생성하였다.<sup>[12~13]</sup>

표 2. 저밀도 ON 픽셀 4/6 균형 변조부호 매핑 테이블  
Table2. Symbol mapping table of sparse-ON pixel 4/6 balanced modulation code.

Input	Codeword	Input	Codeword	Input	Codeword	Input	Codeword
128	102102	192	200310	0	000033	64	021030
129	102111	193	201003	1	000123	65	021102
130	102120	194	201012	2	000132	66	021111
131	102201	195	201021	3	000213	67	021120
132	102210	196	201030	4	000222	68	021201
133	102300	197	201102	5	000231	69	021210
134	103002	198	201201	6	000303	70	021300
135	103011	199	201210	7	000312	71	022002
136	103020	200	201300	8	000321	72	022011
137	103101	201	202002	9	000330	73	022020
138	103110	202	202011	10	001023	74	022101
139	103200	203	202200	11	001032	75	022110
140	110013	204	203001	12	001203	76	022200
141	110022	205	203010	13	001230	77	023001
142	110031	206	203100	14	001302	78	023010
143	110103	207	210003	15	001320	79	023100
144	110130	208	210012	16	002013	80	030003
145	110202	209	210021	17	002022	81	030012
146	110220	210	210030	18	002031	82	030021
147	110301	211	210102	19	002103	83	030030
148	110310	212	210120	20	002130	84	030102
149	111003	213	210201	21	002202	85	030111
150	111030	214	210210	22	002220	86	030120
151	112200	215	210300	23	002301	87	030201
152	113001	216	211002	24	002310	88	030210
153	113010	217	211020	25	003003	89	030300
154	113100	218	211200	26	003012	90	031002
155	120003	219	212001	27	003021	91	031011
156	120012	220	212010	28	003030	92	031020
157	120021	221	212100	29	003102	93	031101
158	120030	222	213000	30	003120	94	031110
159	120102	223	220002	31	003201	95	031200
160	120120	224	220020	32	003210	96	032001
161	120201	225	220200	33	003300	97	032010
162	120210	226	222000	34	010023	98	032100
163	120300	227	230001	35	010032	99	033000
164	121002	228	230010	36	010203	100	100023
165	121020	229	230100	37	010230	101	100032
166	121200	230	231000	38	010302	102	100113
167	122001	231	300003	39	010320	103	100122
168	122010	232	300012	40	012003	104	100131
169	122100	233	300021	41	012030	105	100203
170	123000	234	300030	42	012300	106	100212
171	130002	235	300102	43	013002	107	100221
172	130011	236	300120	44	013011	108	100230
173	130020	237	300201	45	013020	109	100302
174	130101	238	300210	46	013101	110	100311
175	130110	239	300300	47	013110	111	100320
176	130200	240	301002	48	013200	112	101013
177	131001	241	301020	49	020013	113	101022
178	131010	242	301200	50	020022	114	101031
179	131100	243	302001	51	020031	115	101103
180	132000	244	302010	52	020103	116	101112
181	200013	245	302100	53	020112	117	101121
182	200022	246	303000	54	020121	118	101130
183	200031	247	310002	55	020130	119	101202
184	200103	248	310020	56	020202	120	101211
185	200112	249	310200	57	020211	121	101220
186	200121	250	312000	58	020220	122	101301
187	200130	251	320001	59	020301	123	101310
188	200202	252	320010	60	020310	124	102003
189	200211	253	320100	61	021003	125	102012
190	200220	254	321000	62	021012	126	102021
191	200301	255	330000	63	021021	127	102030

그림 3은 제안된 4/6 균형 변조부호와 랜덤 데이터, 2/3 변조부호 및 6/9 변조부호의 SNR 대비 BER(Bit Error Rate) 성능 결과이다. 제안된 4/6 균형 변조부호는 SNR 12dB 이후 랜덤 데이터보다 높은 성능을 보이며 SNR 13dB일 때는 2dB 정도의 성능 향상을 보였다. 또한 SNR 13dB 이후 2/3 변조부호보다 약간의 성능 향상을 보였고 6/9 변조부호와 비슷한 성능을 보인다.

그림 4는 SNR 14 dB에서 블러의 변화에 의한 BER 성능을 나타내는 그래프이다. 제안된 4/6 균형 변조부호는 블러가 1.2 까지 랜덤 데이터보다 좋은 성능을 보였다. 또한 블러 1.2 후에는 2/3, 6/9 변조부호와 비슷한 성능을 보였다.

그림 5는 페이지의 어긋남이 존재할 때 성능 비교 그래프이다. SNR 13 dB에서 제안된 4/6 균형 변조부호는 랜덤 시퀀스보다 약 2 dB정도의 좋은 성능을 보인다. 또한 SNR 13 dB 이후 제안된 4/6 균형 변조부호의 성능은 6/9 변조부호의 성능보다 약간 떨어진 성능을 보이지만 2/3 변조부호보다는 2dB 이상의 차이를 보였다. 제안된 4/6 균형 변조부호는 어긋남 정도가 높을수록 랜덤 시퀀스 및 2/3 변조부호보다 높은 성능을 보인다. 또한 6/9 변조부호와는 어긋남 (10%, 10%) 에서의 성능에서 약간의 떨어짐을 보이지만 어긋남 (20%, 20%) 에서 제안된 4/6 균형 변조부호는 SNR 16dB 이후 에러가 발생하지 않지만 6/9 변조부호는 17dB까지 에러가 발생한다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부호율이 1.33 bit/pixel인 저밀도 ON 픽셀 4/6 균형 변조부호를 제안하였다. 제안된 균형 변조부호는 코드워드 간의 최소거리가 2 이상으로 2차원 ISI를 완화하고, 제안된 부호의 모든 코드워드는 무게가 6인 균형 변조부호로써 페이지간의 밀도를 일정하게 하여 IPI를 완화할 수 있다. 또한 페이지의 밝기에 따라 페이지 간 간섭을 받아 체적에 저장 할 수 있는 페이지 수를 줄어든게 하는 단점을 완화하기 위해, 한 페이지에 기록되는 ON 픽셀의 비율을 낮춰 저장할 수 있는 페이지 수를 증가시킬 수 있다. 제안된 4/6 균형 변조부호는 부호율이 같은 2/3 변조부호 및 6/9 변조부호와 비슷하거나 더 좋은 성능을 보였다. 따라서 제안된 4/6 균형 변조부호를 사용할 경우 성능의 저하 없이 홀로그래픽 저장 장치의 저장 용량을 늘릴 수 있는 장점이 있다.

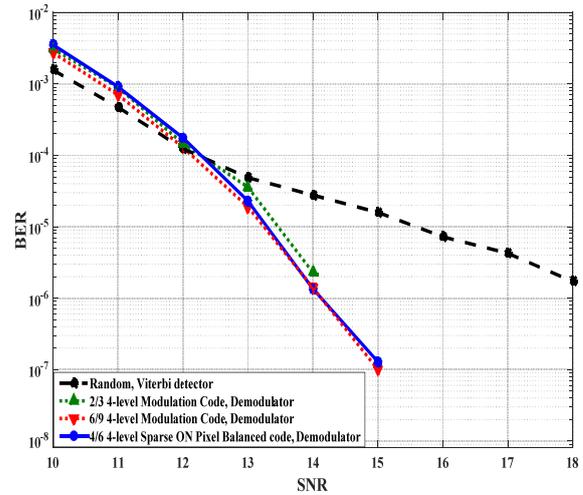


그림 3. Blur = 1.0 일 때 BER 비교 그래프  
Fig. 3. BER comparison according to SNR at Blur = 1.0.

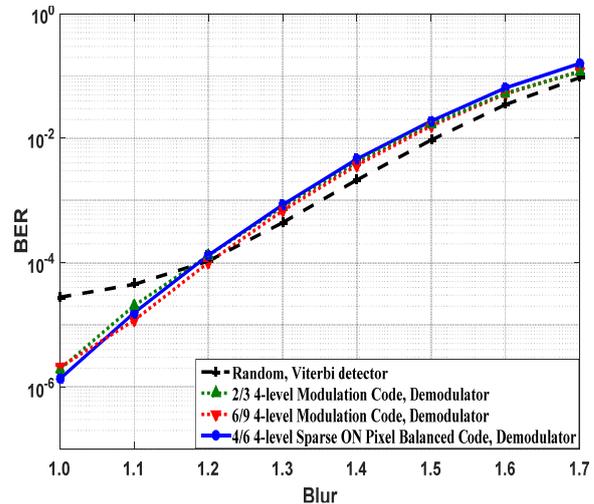


그림 4. SNR=14dB 일 때 BER 대비 블러 비교 그래프  
Fig. 4. BER comparison according to blur at SNR=14dB.

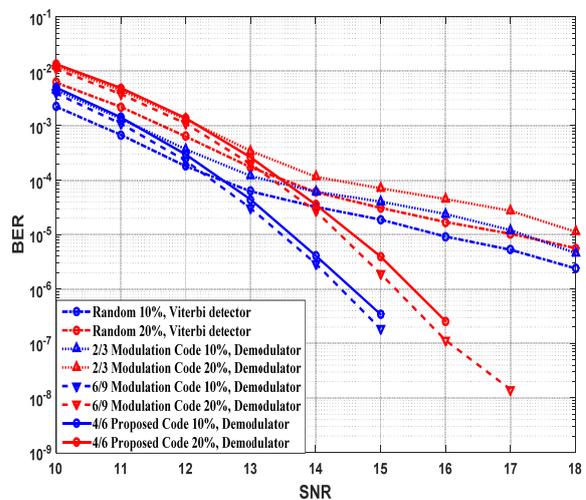


그림 5. Blur = 1.0 일 때 BER 대비 어긋남 비교 그래프  
Fig. 5. Comparison of the bit error rate in terms of misalignment at blur = 1.0.

## REFERENCES

- [1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," Proc. IEEE, Vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, August. 2004.
- [2] N. Kim and J. Lee, "Two-dimensional codes for holographic data storage systems," J. KICS, Vol. 31, no. 11, pp. 1037-1043, November. 2006.
- [3] K. Yang, J. Kim and J. Lee, "Mis-alignment Channel Performance of Error Correcting 4/6 Modulation Codes for Holographic Data Storage," J. KICS, Vol. 35, no. 12 pp. 971-976, December. 2010.
- [4] S. Jeong and J. Lee, "Multilevel Modulation Codes for Holographic Data Storage," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 52, no. 6, pp. 1581-1586, September. 2015.
- [5] G. Burr, G. Barking, H. Coufal, J. Hoffnagle, C. Jefferson, and M. Neifeld, "Gray-scale data pages for digital holographic data storage," Opt. Lett, Vol. 23, no. 15, pp. 1218, August. 1998.
- [6] B. King, G. Burr, and M. Neifeld, "Experimental demonstration of gray-scale sparse modulation codes in volume holographic storage," Appl. Opt., Vol. 42, no. 14, pp. 2546-2559, May. 2003.
- [7] S. Jeong and J. Lee, "4-level 3/4 Modulation Code for Holographic Data Storage," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 52, no. 9, pp. 8-12, September. 2015.
- [8] B. Kim and J. Lee, "2-D Non-Isolated Pixel 6/8 Modulation Code," IEEE, Trans. Magn., Vol. 50, no. 7, pp. 3501404, Jul. 2014.
- [9] D. Park and J. Lee, "Modeling of the inter-page interference on the holographic data storage systems," J. KICS, Vol. 35, no. 7, pp. 581-586, Jul. 2010.
- [10] B. M. King and M. A. Neifeld, "Sparse modulation coding for increased capacity in volume holographic storage," Applied Optics, vol.39, no 35, pp. 6681-6688, Dec. 2000.
- [11] D. Park, M. Yoo, and J. Lee, "Tone-controllable for holographic data storage system," Japanese J. Applied Physics, Vol. 49, no 8, pp. 08KB05, Aug. 2010.
- [12] S. Kim and J. Lee, "A Simple 2/3 Modulation Code for Multi-Level Holographic Data Storage," Jpn. J. Appl Phys, Vol. 52, no. 9 pp. 09LE04, April. 2013.
- [13] K. Park, B. Kim and J. Lee, "A 6/9 Four-Ary Modulation Code for Four-Level Holographic Data Storage," Jpn. J. Appl Phys, Vol. 52, no. 9 pp. 09LE05, April. 2013.

## 저 자 소 개



박 근 환(학생회원)  
2013년 2월 숭실대학교 정보통신전  
자공학부 학사  
2014년 9월~현재 숭실대학교 정보  
통신공학과 석사과정  
<주관심분야: ECC, 변조코드,  
Distributed Storage system>



이 재 진(정회원)  
1983년 2월 연세대학교 전자공학과  
학사  
1984년 12월 U. of Michigan, Dept.  
of EECS 석사  
1994년 12월 Georgia Tech. Sch.  
of ECE 박사  
1995년 1월~1995년 12월 Georgia Tech. 연구원  
1996년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신연구소 책  
임 연구원  
1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과  
부교수  
2005년 9월~현재 숭실대학교 전자정보공학부 교수  
<주관심분야: 통신이론, 채널코딩, 기록저장시스템>