

---

# 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 위한 웨이블릿 기반의 전자적인 워터마킹 알고리즘

최현준\* · 서영호\*\* · 위성민\* · 유지상\* · 김동욱\*

Wavelet-based Electronic Watermarking Algorithm for Digital Holography Interference Patterns

Hyun-Jun Choi\* · Young-Ho Seo\*\* · Sung-Min Wi\* · Ji-Sang Yoo\* · Dong-Wook Kim\*

---

본 논문은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한  
최우수실험실지원사업의 연구결과입니다.

---

## 요 약

디지털 홀로그래피 간섭패턴은 상당히 많은 자원들(고가의 광학장비 혹은 복잡한 컴퓨터 연산)을 소모함으로써 얻을 수 있는 디지털 콘텐츠이다. 본 논문에서는 이런 고가의 콘텐츠인 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 소유권을 보호하기 위해 홀로그램영역과 주파수영역에서의 디지털 워터마킹 기법들을 제안하였다. 홀로그램영역에서의 워터마킹 기법은 주파수영역에서 제안한 2차원 이산 웨이블릿 변환(2-dimensional discrete wavelet transform, 2DDWT)을 기반으로 하는 기법과의 비교를 위한 것이다. 제안한 두 가지 기법 모두 데이터의 압축 및 전송과정에서 생길 수 있는 공격들에 대해 비교적 강인한 특성을 보였다. 특히, 2DDWT 기반의 워터마킹 기법은 공격 후 추출한 워터마크가 3%이하의 낮은 에러율을 보였다. 이는 기존의 광학 기반의 워터마킹 알고리즘들에 비해 매우 향상된 결과이다.

## ABSTRACT

Digital holography interference pattern generated by a computer calculation (CGH) is one of the most expensive contents and its usage is being expanded. Thus, it is highly necessary to protect the ownership of digital hologram. In this paper a hologram-domain and a frequency-domain electronic watermarking schemes were proposed. The hologram-domain scheme was only to compare the results to the ones from frequency-domain scheme and the frequency-domain scheme used 2-dimensional against the attack. Especially the MDWT-domain scheme was very high robustness such that the error ratio at the worst case was only 3%. Thus, we expect that it is used as a good watermarking scheme of digital hologram with high performance.

## 키워드

Digital Holography, Interference Pattern, Watermarking, Wavelet Transform, Contents Security

---

\* 광운대학교 3D Media Research Lab.

접수일자 2008. 05. 23

\*\* 광운대학교 교양학부

## I. 서 론

디지털 홀로그래피는 아날로그 필름에 기록했던 간섭패턴을 CCD(charge coupled device) 카메라를 이용하여 디지털 데이터로 기록하여 전송하거나 실제로 존재하지 않는 가상의 객체를 컴퓨터 그래픽(computer graphic, CG)으로 제작한 후 이를 컴퓨터 생성 홀로그램(computer generated hologram, CGH) 기법<sup>[1]</sup>으로 생성한 간섭패턴을 수신단의 공간 광변조기(spatial light modulator, SLM)에 디스플레이한 후 레이저광을 조사함으로써 공간상에서 3차원 영상을 재생하는 기법이다<sup>[2]</sup>. 하지만 이런 광학 장비들은 고가이고 영상의 획득이나 디스플레이를 위한 취급에도 상당한 노력이 필요하며, CGH 역시 복잡한 연산을 통해서만 디지털 홀로그래피 간섭패턴(digital holography interference pattern, DHIP)을 얻을 수 있다. 따라서 이런 고급 콘텐츠인 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 저작권을 보호할 필요성이 대두되고 있다.<sup>[3,4]</sup> 하지만 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 저작권 보호를 위한 연구는 미국, 유럽, 그리고 한국의 소수의 연구팀들에 의해서만 진행되고 있는 실정이다.

최근 광학 신호처리 분야의 선두 연구그룹으로 평가 받고 있는 미국의 Javidi 교수팀은 위상이동(phase-shift) 디지털 홀로그래피 방식을 이용하여 3D 객체와 워터마크로 사용될 3D 객체의 간섭패턴을 CCD 카메라로 획득한 후 워터마크 3D 객체의 간섭패턴을 이중 위상 부호화하여 3D 객체의 간섭패턴에 삽입하는 방식을 제안하였다<sup>[5]</sup>. [6]에서는 워터마크를 PC(personal computer)에서 이중-랜덤 위상 부호화(double-random phase encoding)하여 3D 객체의 간섭패턴에 삽입하는 방식을 제안하였다. 하지만 이런 기술들은 고가의 광학장비가 필요하고 실험을 수행하기 위해서는 복잡하고 여러 가지 환경변수들을 맞춰야만 한다는 어려움이 있다.

본 논문에서는 고가의 광학장비나 복잡한 연산을 통해서만 획득할 수 있는 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 저작권 보호를 위해 광학적인 방법이 아닌 “전자적인 방법”의 워터마킹 기법을 제안한다. 본 연구팀은 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 홀로그램영역(hologram-domain)과 주파수영역(frequency-domain)에서 특성을 분석하고, 이를 기반으로 각각의 영역에서 가장 효율적인 워터마킹 기법들을 제안한다. 주파수영역에서의 분석을 위해 정지영상 압축표준인 JPEG2000에서 주 변환기법으로 사

용되고 있는 2차원 이산 웨이블릿 변환<sup>[7]</sup>을 이용하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 효율적인 워터마킹 삽입위치를 찾기 위해 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 홀로그램영역과 주파수영역에서 분석한다. 3장에서는 2장의 분석결과를 기반으로 워터마킹 기법들을 제안하고, 4장에서 실험결과를 보인다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## II. 디지털 홀로그래피 간섭패턴

디지털 홀로그래피 간섭패턴은 CCD 카메라를 이용하여 실제로 존재하는 객체에서 획득하는 방법과 가상의 객체를 CG로 제작하여 PC상에서 수학적 계산을 통해(컴퓨터 생성 홀로그램, CGH) 획득하는 방법이 있다. 본 논문에서는 CGH 기법을 이용해 획득한 디지털 홀로그래피 간섭패턴만을 대상으로 기술한다.

### 2.1. 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 생성

3차원 객체로부터 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 취득하는 수식적인 과정은 다음과 같다. 먼저, 객체로부터 반사되어 입사되는 객체파(object-wave)와 기준파(reference-wave)의 복소진폭(complex-amplitude)은 식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다. 여기서  $\alpha$ 와  $\phi$ 는 각각 실수진폭(real-amplitude)과 위상(phase)을 나타낸다.

$$E_0(x, y) = a_0(x, y) \exp(i\varphi_0(x, y)) \quad (1)$$

$$E_R(x, y) = a_R(x, y) \exp(i\varphi_R(x, y)) \quad (2)$$

식 (1)과 (2)의 두 파에 의한 간섭패턴이 매질의 표면에 기록되는데, 그 크기(intensity)는 식 (3)으로 나타내고, 이를 디지털 홀로그래피 간섭패턴(혹은 디지털 홀로그램)이라 한다.

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |E_0(x, y) + E_R(x, y)|^2 \\ &= (E_0(x, y) + E_R(x, y))(E_0^*(x, y) + E_R^*(x, y)) \\ &= E_0(x, y)E_0^*(x, y) + E_0(x, y)E_R^*(x, y) + E_R(x, y)E_0^*(x, y) + E_R(x, y)E_R^*(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

매질의 표면에 기록되는 양  $n(x, y)$ 은 매질의 특성에 따라서 달라질 수 있고,  $I(x, y)$ 의 크기에 비례한다.

$$h(x, y) = h_0 + \beta t(x, y) \tag{4}$$

여기서 상수  $\beta$ 는 감광물질의 노출특성에 따른 과의 진폭 전송률을 나타내고,  $t$ 과  $h_0$ 는 노출 시간과 노출되지 않은 부분이 진폭전송을 각각 나타낸다. CCD 카메라를 이용해 획득한 디지털 홀로그래피 간섭패턴에서는  $h_0$ 의 영향이 무시된다. 간섭패턴의 재생은 기준파를 기록된 홀로그램에 동일한 크기와 각도로 적용하여 얻으며, 이것은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_R(x, y)h(x, y) = [h_0 + \beta t(a_R^2 + a_O^2)]E_R(x, y) + \beta t a_R^2 E_O(x, y) + \beta t E_R^2(x, y)E_O^*(x, y) \tag{5}$$

식 (5)의 첫 번째 항은 스케일링(*scaling*)된 기준파를 나타내고, 두 번째 항은 재생된 객체파를 나타낸다. 두 번째 항의  $\beta t a_R^2$ 은 단지 밝기에 영향을 미치는 양이다. Off-axis 홀로그램에서는 가상객체, 실제객체, 그리고 회절파 등이 공간적으로 분리된다. 실제 객체영상이 왜곡되는 이유는 공간적으로 복소성분인  $E_R^2$ 가 변화하기 때문인데,  $E_R^2$ 는 객체파의 공액복소인  $E_O^2$ 를 형성하는 영상을 변조한다. 따라서 왜곡되지 않은 객체를 재생하기 위해서 식 (6)과 같이  $E_R^*$ 을 사용한다.

$$E_R^*(x, y)h(x, y) = [h_0 + \beta t(a_R^2 + a_O^2)]E_R^*(x, y) + \beta t a_R^2 E_O^*(x, y) + \beta t E_R^{*2}(x, y)E_O(x, y) \tag{6}$$

이런 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 광학 시스템을 이용하지 않고 위와 같은 원리에 따라 컴퓨터상에서 기록하고 재생하는 것이 CGH이다. CGH는 가상의 객체를 자유롭게 제작하여 홀로그래피 간섭패턴을 생성할 수 있다는 장점을 갖지만, 많은 연산을 필요로 하기 때문에 홀로그래피 간섭패턴을 생성하는데 오랜 시간이 소요된다는 단점도 갖고 있다.

2.2. 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 분석

본 절에서는 효율적인 워터마크 삽입 위치를 선정하기 위해 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 홀로그램영역과 주파수영역에서 분석하였다. 홀로그램영역에서는 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 비트평면(*bit-plane*)들로 나눈

후 각 비트평면의 에너지를 측정하였고 독립적으로 복원하여 각 비트평면이 복원에 미치는 특성을 분석하였다. 주파수영역에서는 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 6-레벨 2DDWT하여 각 부대역별 특성을 분석하였다.

그림 1-(a)는 컴퓨터 그래픽으로 제작한 영상(200×200 화소, 회색조), 1-(b)는 이를 PC에서 CGH 기법을 통해 생성한 디지털 홀로그래피 간섭패턴(1,024×1,024 화소, 회색조), 1-(c)는 PC에서 복원한 시뮬레이션 영상, 그리고 1-(d)는 광학 시스템을 이용하여 실제 공간상에서 복원한 3차원 영상이다.

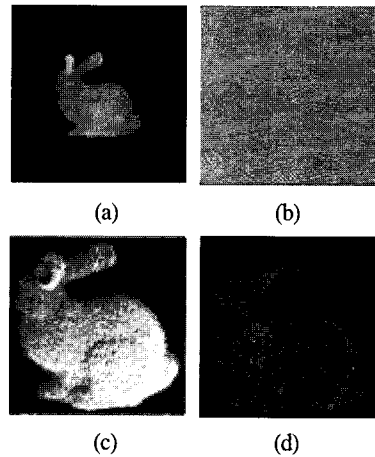


그림 1. 실험 영상; (a) 원본 객체 영상, (b) (a)의 간섭패턴, (c) (b)를 PC에서 복원한 영상, (d) (b)를 광학 시스템에서 복원한 영상.  
Fig. 1. Experimental image; (a) Original object image, (b) DHIP of (a), (c) reconstruction image of PC simulation (d) reconstruction image of optical system.

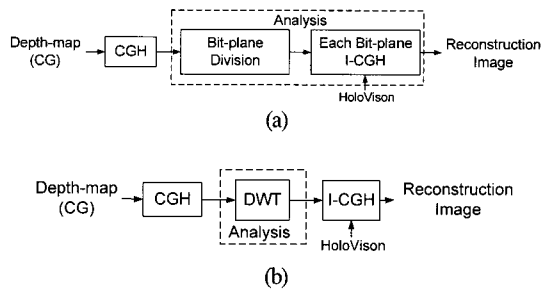


그림 2. 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 분석 절차; (a) 홀로그램영역, (b) 주파수영역.  
Fig. 2. Analysis procedure of digital holography interference pattern; (a) hologram-domain, (b) frequency-domain.

그림 2에서는 홀로그램영역과 주파수영역에서 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 분석하기 위한 절차를 보이고 있다. 홀로그램영역에서의 분석을 위해 컴퓨터 생성 홀로그램 기법으로 생성한 디지털 홀로그래피 간섭 패턴을 비트평면으로 분할하여 에너지를 측정하고, 이들을 독립적으로 복원한다. 3차원 영상복원을 위해서는 PC상에서 시뮬레이션을 통해 실제 광학 시스템과 같은 복원결과를 얻을 수 있는 HoloVision<sup>[9]</sup>을 이용하였다. 주파수영역에서의 분석을 위해서 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 6-레벨 2DDWT를 수행하여 각 부대역(subband)별 에너지를 측정하였다.

2.2.1. 홀로그램영역에서의 분석

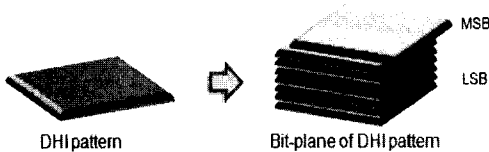


그림 3. 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 비트평면.  
Fig. 3. Bit-plane of digital holography interference pattern.

홀로그램영역에서 디지털 홀로그래피 간섭패턴이 갖는 특성, 즉 홀로그램영역에서의 에너지 집중도(혹은 중요도)를 분석하기 위해 그림 3과 같이 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 비트평면으로 나누고 이들 각각을 독립적으로 재생하여 각각의 비트평면에 집중되어 있는 에너지를 시각적인 방법으로 분석하였다. 분석을 위해 컴퓨터 그래픽으로 제작한 100개의 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 비트평면으로 나누고 이를 HoloVision에서 복원한 결과 8번째 비트평면(bit-plane 7, BP7: most significant bit-plane, MSBP)과 7번째 비트평면(BP6) 만이 시각적으로 관찰 가능한 3차원 영상을 재생하였다. 또한, 수치적으로 에너지 집중도를 분석하기 위해 식 (7)과 같은 수식을 이용하였다. 특정 데이터 S의 에너지 E는,

$$E_{Stotal} = \sum_{i=1}^N C_i^2 \tag{7}$$

여기서 N은 계수의 수, C<sub>i</sub>는 i-번째 계수의 값을 나타낸다.

표 1에서는 각 비트평면이 보유하고 있는 에너지 값을 측정된 결과를 보이고 있다. 앞서 시각적인 특성을 알아보기 위해 수행하였던 실험과 유사하게 상위 2개의 비트평면에 대부분의 에너지(약 93%)가 집중되어 있음을 수치적으로 확인할 수 있다.

표 1. 홀로그램영역에서 각 비트평면의 에너지 분포.  
Table 1. Energy distribution of each bit-plane in hologram-domain.

Bit-plane	Energy value	Ratio [%]
BP <sub>7</sub> (MSB)	8,058,896,384	72.892
BP <sub>6</sub>	2,275,168,256	20.579
BP <sub>5</sub>	543,156,224	4.913
BP <sub>4</sub>	134,101,760	1.213
BP <sub>3</sub>	33,558,656	0.304
BP <sub>2</sub>	8,375,632	0.076
BP <sub>1</sub>	2,097,324	0.019
BP <sub>0</sub> (LSB)	524,630	0.004

2.2.2. 주파수영역에서의 분석

DWT는 다해상도(multi-resolution)의 부대역 단위로 주파수 성분과 특성을 나타내는 주파수 변환 기법이다. 또한 DWT는 기저함수의 특성상 주파수영역에서 공간영역(spatial-domain)의 정보도 가진다. 본 절에서는 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 DWT를 이용하여 주파수영역으로 변환한 후 그 특성을 분석한다.

본 절에서는 DWT 변환기법 중에서 JPEG2000등에서 사용되는 MDWT(Mallat-tree DWT)를 이용하여 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 주파수영역으로 변환하고 그 특성을 살펴본다. MDWT는 일반적으로 신호의 부호화를 위해 사용되는 필터링(filtering) 기법으로 다해상도로 저주파 성분을 분해하여 최저 주파수 대역으로 에너지를 집중시킨다.

그림 4에서 6-레벨 MDWT된 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 보이고 있다. 표 2를 보면 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 대상으로 식 (7)을 이용해 수행한 에너지 측정 결과에서도 대부분의 에너지(72.677%)가 최저 주파수 대역(LL6)으로 집중되는 것을 볼 수 있다. 또한 하위 부대역 중에서 특정 부대역(10, 12, 13, 15, 16, 18)으로 고주파수 성분들이 집중(27.191%)됨을 확인할 수 있다.

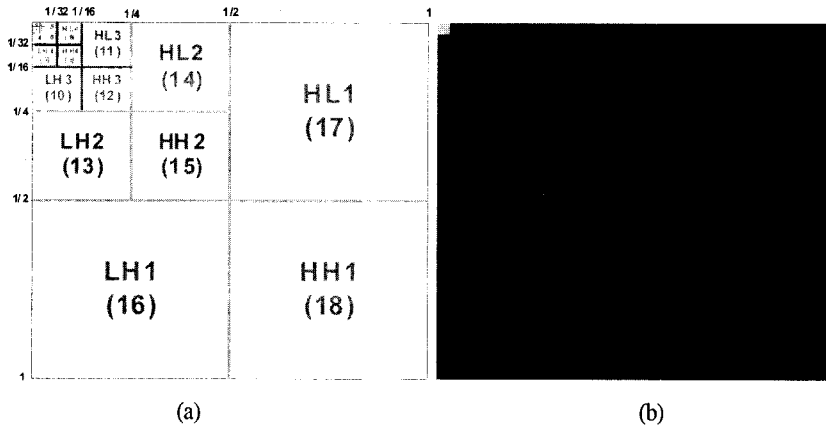


그림 4. 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 6-레벨 MDWT; (a) 부대역 순서, (b) 변환된 예.  
 Fig. 4. 6-level MDWT of digital holography interference pattern; (a) subband numbers, (b) transformed example.

### III. 디지털 홀로그래피 간섭 패턴을 위한 워터마킹 기법

본 장에서는 2장에서 분석한 디지털 홀로그래피 간섭 패턴의 홀로그램영역과 주파수영역에서의 특성을 이용하여 전자적인 워터마킹 기법을 제안한다. 워터마킹에 사용된 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 크기는 1,024×1,024 화소의 회색조 영상, 워터마크는 32×32 화소의 이진영상이다.

#### 3.1. 홀로그램영역에서의 워터마킹<sup>[10]</sup>

2장에서 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 최상위 비트평면(MSBP)과 비트평면 6이 복원할 때 가장 중요한 데이터임을 확인하였다. 본 논문에서는 워터마킹의 기본 조건인 비가시성과 강인성을 만족하기 위해서 이 두 비트평면을 제외한 가장 상위 비트평면(BP5)을 워터마크 삽입을 위한 기본영역으로 선정하였다.

그림 1 (b)에서 확인할 수 있듯이 디지털 홀로그래피 간섭패턴은 잡음영상(noise image)과 매우 유사한 특성을 보인다. 이런 특성 때문에 일반적인 2차원 영상의 공간영역에서 제안되었던 워터마킹 기법들을 적용하기는 힘들다. 따라서 본 연구팀은 BP5상의 2차원 좌표(1,048,576개)들 중에서 무작위로 특정 좌표(1,024개)를 선정하여 이진 워터마크와 치환(permutation)하는 기법을 제안한다.

무작위 좌표선정을 위해 식 (8)과 같은 32-bit LFSR (Linear Feedback Shift Register)을 이용하였다.

$$P(x) = x^{32} + x^{22} + x^2 + 1 \quad (8)$$

그림 5에서는 제안한 홀로그램영역에서의 워터마킹 기법을 보이고 있다. 워터마크 삽입을 위해 상위 3번째 비트평면(BP5)에서 LFSR을 이용하여 1,024개의 무작위 좌표를 선정하여 이진 워터마크와 비트치환을 하였다. 워터마크의 추출과정은 삽입과정의 역순으로 진행된다. 워터마크 삽입 시 좌표 선정에 사용되었던 LFSR의 초기 값(initial key)을 이용하여 워터마크가 삽입되었던 좌표를 찾아내고 각 좌표의 이진 값들을 추출하면 된다.

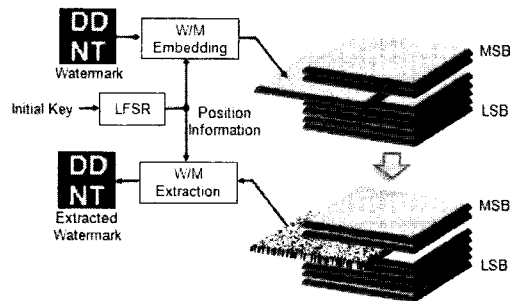


그림 5. 제안한 홀로그램영역에서의 워터마킹 기법.  
 Fig. 5. Proposed watermarking method in hologram domain.

3.2. 주파수영역에서의 워터마킹

표 2에서 대부분의 에너지가 최상위 부대역(LL6)으로 집중되는 것을 확인하였다. 본 연구팀은 선행 실험을 통해 역 DWT(Inver DWT)를 수행하였을 경우 복원된 영상에 영향을 미치지 않으면서 강인성을 만족하는 워터마크 삽입 위치가 LL6 부대역의 하위 3번째 비트평면임을 확인하였다[11].

표 2. 6-레벨 2차원 MDWT 후 에너지 분포.  
Table 2. Average energy distribution after 6-level 2D MDWT.

Subband	Average energy	Ratio	Subband	Average energy	Ratio
0	16199.634	72.677	10	2.208	0.010
1	0.006	0.000	11	0.883	0.004
2	0.022	0.000	12	12.514	0.056
3	0.077	0.000	13	224.675	1.008
4	0.051	0.000	14	6.705	0.030
5	0.024	0.000	15	567.815	2.547
6	0.104	0.000	16	2185.485	9.805
7	0.214	0.001	17	19.361	0.087
8	0.283	0.001	18	3068.226	13.765
9	1.559	0.007	Total	22289.845	100.000

앞 절에서 설명한 홀로그램영역에서의 워터마킹 기법은 1,024×1,024 크기의 영역에서 32×32 비트(1,024개)의 좌표를 무작위로 선택하여 비트치환 하였지만, MDWT-영역에서의 워터마킹 기법은 1,024×1,024 화소의 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 6-레벨 MDWT하여 최상위 부대역(LL6, 32×32 화소)의 하위 3번째 비트평면과 워터마크를 평면 비트치환 하였다. 이 기법은 강인성과 비 가시성을 만족할 뿐만 아니라 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 특정 위치에서 외부의 악의적인 공격이 있었을 경우 추출한 워터마크로부터 공격당한 위치를 찾아낼 수 있다는 장점을 가지고 있다.

그림 6에서 제안한 워터마킹 기법을 보이고 있다. 6-레벨 DWT된 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 최상위 부대역을 그림과 같이 비트평면으로 변환한 후 하위 3번째 비트평면을 워터마크와 비트평면 치환하는 기법으로 워터마크를 삽입한다.

워터마크의 추출과정은 삽입과정의 역순으로 진행된다. 그림 6에서 (X, Y)와 (U, V)는 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 공간좌표와 주파수영역의 좌표들을 의미한다.

제안한 워터마킹 기법들의 실험을 위해 100개의 디지털

홀로그래피 간섭패턴을 대상으로 워터마크를 삽입한 후 공격(attack)하여 결과를 확인하였다.

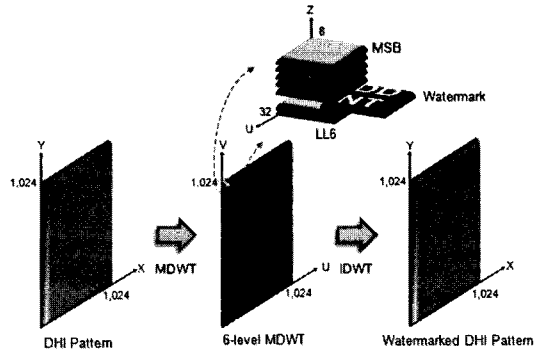


그림 6. 제안한 MDWT-영역에서의 워터마킹 기법.  
Fig. 6. Proposed watermarking method in MDWT-domain.

IV. 실험 및 고찰

실험환경은 표 3과 같다. 표 3에서 영상 크기(Image size)는 실험에 사용한 간섭패턴과 워터마크의 크기를 의미하고, 홀로그램(Hologram)은 3차원 영상의 복원에 사용된 광학 시스템의 환경변수들이다. 제안한 워터마킹 기법들의 비가시성과 강인성을 검증하기 위해 워터마크가 삽입된 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 대상으로 JPEG 압축, 가우시안 잡음 첨가(Gaussian noise addition), 흐림효과(blurring), 그리고 선명효과(sharpening)등의 4 가지 공격을 수행하였다. 절단(cropping), 회전(rotation) 등의 기하학적인 공격(geometrical attack)은 홀로그램의 특성상 의미가 없기에 수행하지 않았다.

그림 7에서는 그림 1에서 보였던 rabbit 영상의 디지털 홀로그래피 간섭패턴을 대상으로 적용한 워터마킹 기법들의 삽입결과(그림 7 (a)~(c))와 3차원 영상으로 복원한 결과(그림 7 (d)~(i))를 보이고 있다. 제안한 두 가지 기법 모두 워터마크 삽입 유무를 시각적으로 확인할 수 없어야 한다는 비가시성을 충분히 만족하였다.

표 4에서는 4가지 공격을 수행한 후 추출한 워터마크와 원본 워터마크를 비교하여 에러율과 시각적인 측정을 위해 회색조 영상으로 복원한 결과들을 보이고 있다. 4가지 공격은 모두 Photoshop 8.0에서 수행하였다. JPEG 압축은 품질(quality) 6부터 0까지, 최근 정지영상 압축

표준으로 제정된 JPEG2000(JP2K)은 10:1~100:1까지 압축하였다. 또한, 가우시안 잡음은 최대 10%까지 첨가하였고, 흐림효과와 선명효과는 1번씩 수행하였다. 홀로그램영역에서는 전체적으로 높은 워터마크 복원율을 보이지만, 높은 압축율과 가우시안 잡음 첨가 공격에 대해 낮은 복원율을 보이고 있다. MDWT-영역에서의 워터마킹 기법은 가우시안 잡음 첨가 공격에 대해 가장 높은 에러율을 보였지만 다른 공격에 대해서는 워터마크가 100% 복원되었다. 결과적으로 모든 공격에 대해 MDWT-영역에서 수행한 기법이 홀로그램영역에서 수행한 기법보다 좋은 결과들을 보이고 있다. 또한, 에러율이 12.5%로 복원된 워터마크 영상의 경우 시각적으로 판단함에 전혀 문제가 없다.

표 3. 실험환경.  
Table 3. Experimental Environment.

	Items	Description
Image size	DHI	1,024×1,024(gray)
	Watermark	32×32(binary)
Optical setup	Wavelength	532nm
	Pixel pitch	10.4 $\mu$ m×10.4 $\mu$ m
	Reconstruction distance	1,000mm

표 4. 홀로그램영역과 MDWT 영역에서의 워터마킹 결과.

Table 4. Experimental results by watermarking in hologram-domain and MDWT-domain.

Attack		Error rates (%)	
		Hologram	2DDWT
JPEG quality	6	0	0
	4	0.2	0
	2	14.1	0
	0	19.4	0
JP2K compression ratio	10	1.3	0
	50	7.6	0.3
	100	14.4	0.3
Gaussian noise addition (%)	5	1.5	0
	10	12.5	3.4
	15	19.5	20.6
Cropping (25%)		5.7	12.7
Sharpening		0	0
Blurring		0.4	0

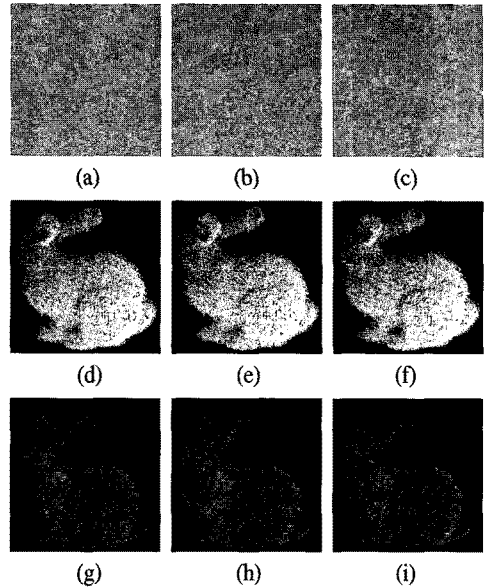


그림 7. rabbit 영상에 워터마킹한 예; 홀로그래피 간섭패턴 (a) 원본, (b) 홀로그램영역에서의 워터마킹 결과, (c) MDWT 영역에서의 워터마킹 결과; 복원영상 (d) 원본, (e) 홀로그램영역에서의 워터마킹, (f) MDWT 영역에서의 워터마킹; 광학 시스템에서의 복원영상 (g) 원본, (h) 홀로그램영역에서의 워터마킹, (i) MDWT 영역에서의 워터마킹.

Fig. 7. Watermarking example for rabbit image: holography interference pattern of (a) before, (b) after watermarking in hologram domain, (c) after watermarking in MDWT domain; reconstruction image of (d) before, (e) after watermarking in hologram domain, (f) after watermarking in MDWT domain; reconstruction image with optical system (g)before, (h)after watermarking in hologram domain, (i) after watermarking in MDWT domain.

## V. 결론

본 논문에서는 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 홀로그램영역과 주파수영역에서의 전자적인 워터마킹 기법들을 제안하였다. 홀로그램영역에서는 3차원 영상 복원에 영향을 미치지 않는 상위 3번째 비트평면에서 좌표를 무작위로 선택하여 워터마크를 비트치환 하였다. 주파수영역에서는 6-레벨 MDWT를 수행하여 강인성과 비가시성을 만족하는 LL6 부대역의 하위 3번째 비트평면을 워터마크와 비트평면 치환하는 기법으로 워터마킹을 수행하였다. 특히, MDWT-영역에서의 워터마킹 기

법은 가우시안 잡음 첨가 10% 이외의 공격들에 대해 100%의 복원율을 보여 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 저작권 보호를 위한 훌륭한 보안 솔루션이 될 수 있음을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 디지털 홀로그래피 간섭패턴의 워터마킹 기법과 분석결과들은 추후 이 분야를 연구하는 연구팀들에게 좋은 지표가 될 것으로 생각된다.

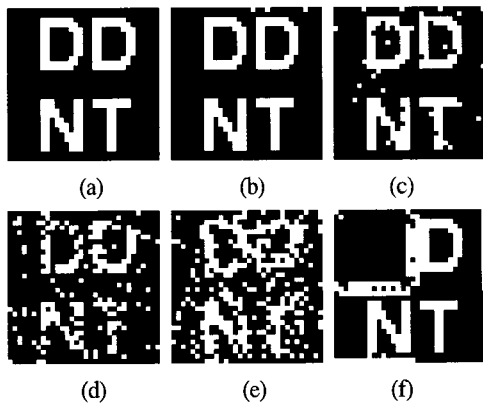


그림 8. 추출한 워터마크; 에러율 (a) 0, (b) 0.3, (c) 3.4, (d) 12.5, (e) 19.5, (f) cropping(25%).

Fig. 8. Extracted watermarks: error ratio (a) 0, (b) 0.3, (c) 3.4, (d) 12.5, (e) 19.5, (f) cropping(25%).

### 참고문헌

[1] B. R. Brown and A. W. Lohmann, "Computer-generated Binary Holograms," IBM Journal of research and Development, Vol. 13, No. 2, pp. 160-168, March 1969.

[2] B. Javidi and F. Okano, Three Dimensional Television, Video, and Display Technologies, Springer Verlag Berlin. March 2002.

[3] P. Hariharan, Basics of Holography, Cambridge University Press, 2002.

[4] H. Yosikawa, "Digital holographic signal processing," Proc. TAO First International Symposium on Three Dimensional Image Communication Technologies, 1993.

[5] S. Kishk and B. Javidi, "3D object watermarking by a 3D hidden object," Optics Express, Vol. 11, No. 8, pp. 874-888, April 2003.

[6] H. Kim and Y. H. Lee, "Optimal watermarking of digital hologram of 3-D object," Optics Express, Vol. 13, No. 8, pp. 2881-2886, April 2005.

[7] R. M. Rao, A. S. Bopardikar, and T. Boros, Wavelet transforms, introduction to theory and application, Prentice Hall PTR, 1st edition, Sept. 1998.

[8] 손정영, 홀로그래피의 원리와 응용, 봉명, 2004.

[9] S. Stein and L. T. Vegard, "HoloVision," <http://www2.edge.no/projects/index.php?expn=2&target=hologvision/about.php>, Norwegian University of Science and Technology, 2002.

[10] 최현준, 서영호, 유지상, 김동욱, "전역 2차원 DCT를 이용한 디지털 홀로그래피의 분석 및 워터마킹 기법", 한국해양정보통신학회논문지, Vol. 11, No. 7, pp. 1267-1274, July 2007.

[11] 서영호, 최현준, 김동욱, "Fringe 영상의 주파수 특성 분석", 한국통신학회논문지, Vol. 31, No. 11C, pp. 1053-1059, Nov. 2005.

### 저자소개

최현준(Hyun-Jun Choi)

한국 해양정보통신학회 논문지 제11권 제7호 참조

서영호(Young-Ho Seo)

한국 해양정보통신학회 논문지 제11권 제7호 참조

위성민(Sung-Min Wi)

한국 해양정보통신학회 논문지 제11권 제7호 참조

유지상(Ji-Sang Yoo)

한국 해양정보통신학회 논문지 제11권 제7호 참조

김동욱(Dong-Wook Kim)

한국 해양정보통신학회 논문지 제11권 제7호 참조