

# 수면하 수중익 주위 유동장 및 쇄파의 실험적 해석에 관한 연구

최 경 신/선박검사기술협회 기술심사부

수중익선과 같은 고속선의 경우 수중익이 수면근처에 접근하면 여러형태의 파를 유기하게 되며 그에 의한 압력의 변화를 유발시킨다. 이에따라 양력이 감소하고 조파저항이 증가하다가 한계 Froude 수에 이르게 되면 파가 더이상 자신의 형태를 유지하지 못하고 부서지는 쇄파가 발생하면서 조파저항은 감소하고 그대신 쇄파저항이 급격히 증가하게 된다. 이에대한 연구의 한 방법으로 수면하에서 경속으로 움직이는 수중익에 의하여 생성되는 정상파 및 쇄파현상에 대한 연구를 회류수조에서 수행하였다.

## 1. 서 언

### 1.1 연구배경

물위나 물 속을 움직이는 물체가 받는 저항은 기본적으로 점성에 의한 마찰저항, 물체가 움직이면서 생성되는 파에 의한 조파저항, 파가 깨지면서 생성되는 쇄파저항 그리고 이 이외에도 여러가지의 저항성분이 있을 것이다. 선박의 관점에서 마찰저항과 조파저항의 성분에 대한 연구는 과거 오랜 시간에 걸쳐 연구가 되어왔다. 그러다보니 이제는 거의 한계에 가까운 수준에 이르게 되어 다른 저항성분에 관심을 두게 되었는데, 바로 그 새로운 관심의 대상이 쇄파저항(Wave Breaking Resistance)

이였다.

특히 수중익선과 같은 고속선의 경우 수중익이 수면근처에 접근하면 여러 형태의 파를 유기하게 되며 그에 의한 압력의 변화를 유발시킨다. 이에따라 양력이 감소하고 조파저항이 증가하다가 한계 Froude 수에 이르게 되면 파가 더 이상 자신의 형태를 유지하지 못하고 부서지는 쇄파가 발생하면서 조파저항은 감소하고 쇄파저항이 급격히 증가하게 된다. 이러한 강제쇄파는 파랑에너지가 난류에너지로 변환되어 소멸되는 메커니즘을 가지고 있으며 쇄파 발생시 중력파의 파정 부근에 와도가 강한 영역, 즉 회전자가 생긴다고 알려져 있다. 근래에 들어 이 쇄파현상에 대한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.

## 1.2 과거 연구내용 고찰

물체의 저항성분 중 쇄파저항에 대한 관심을 표명하기 시작한 사람은 Baba(1969년)[1]이다. Baba는 쇄파의 영향은 쇄파발생이 전수두 손실의 증가, 즉 Reynolds 수에 지배되는 점성저항의 증가를 유발한다는 내용의 논문을 발표하므로써 쇄파저항에 대한 관심을 불러 일으켰다.

그 이후 쇄파현상에 대한 본격적인 연구는 1981년에 Duncan[2][3]에 의하여 이루어졌는데, Duncan은 일정 영각을 갖고 일정속도로 움직이는 충분히 깊이 잠긴 2차원 날개 뒤에서의 파형의 높이, 수직 속도분포, 전수두손실을 계측한 값들이 다음의 2가지 형태의 Drag로 날개에 작용한다는 것을 밝혔다. 하나는 때때로 날개 뒤에서 발생하는 파의 첫번째 파정의 앞에 생성되는 Turbulent Breaking 영역의 형태로, 하나는 Non-Breaking Wavetrain의 형태로 작용한다는 것이다. 그리고 초기쇄파(Breaking Inception) 때에는 초기상태에 따라서 파정 부근에서 Breaking과 Non-Breaking 현상이 나타남을 밝혔다. 쇄파가 일어나는 한계 Froude 수와 물수체의 물수심간의 관계를 도출하였고, 쇄파에 의한 운동량 결손(즉, 저항증가)은 쇄파영역의 크기와 파경사각에 비례함을 밝혔으며, 파경사각이  $17^\circ$  이나 그 이상이 되면 정상쇄파(Steady Breaking)가 발생한다는 것과 Wake 계측결과를 통해 Breaking이 발생하면 이론적으로 Non-Breaking 때 얻을 수 있는 Drag보다 3배나 더 크다는 것과 Breaking으로 이루어진 Drag는 Breaking 영역에서의 Weight의 감소성분에 비례되는 것을 발견하였다.

Duncan이 실험적인 연구를 행하였다면 Shin & Mori[4][5]는 수치해법의 방법으로 쇄파현상을 이해하려 했다. 그들은 파형과 난류 강도를 포함하는 속도의 측정을 통하여 Steady Breaker의 물수체 뒤에서의 유동 특성을 밝히는 연구를 행하였다. 그들의 연구결과로는 초기

상태에서의 Steady Breaker는 Overturning 이 아닌 강력한 Fluctuating을 한다는 것과 자유표면 난류유동의 임계상황은 비점성에 기초하고 있다는 것이다. 그리고 수치해석 기법을 통한 자유표면 유동의 Simulation을 MAC 방법에 기초하여 개발하였다. 그리고 Sub-Breaking Wave의 수치해석을 위하여 쇄파의 발생조건을 간단한 안정성이론으로 해석한 바 있다.

1994년에는 Raymond & Marshall[6]에 의하여 Duncan의 실험적 연구와 연결한 Steady Breaker에 대한 이론적인 연구가 수행되었다. 그들은 Foil을 뒤따르는 파형의 첫번째 파형의 앞쪽면 위에 가만히 올라타고 있는 정체 와류(Stagnant Eddy)로 구성되어진 Breaker의 물리적인 모형을 만들어 연구하였다. 이 와류는 와류와 하부유동(Underlying Flow)으로 분리되는 Shear Zone 난류응력에 의해 떠받쳐 지는데, 이 응력은 자유표면 바로 밑을 따르는 난류 Wake에 의해 생성된다는 것을 밝혔다. 또한 Breaker Eddy는 Breaking이 발생할 때 기포를 포함하게 되는데, 여기서 공기포함 정도는 Breaker의 해석에 중요한 변수로 작용한다는 것을 알아내었다.

그리고 Eddy-Breaker 모형은 Shear Zone에서 난류 전단응력의 독립적인 계측을 이용하여 구할 수 있으며, 또한 이 모형은 와류 아래의 경계유선(Dividing Streamline) 위에서의 정수압력의 작용이 Breaking이 사라진 상태에서 존재하는 크게 상쇄된 Trailing Wave를 생성한다는 것을 보여주었다. 그러므로 Hydrofoil의 저항은 명백히 잉여추사파(Residual Trailing Wave)의 Momentum Flux와 Breaker Wake속에서의 Momentum Flux(Breaker의 저항)의 합이 되는 것을 알아내었다.

그리고 Breaking의 존재하는 상태에서의 일정한 속도로 움직이는 Hydrofoil에 대한 전제 Momentum Flux, 또는 저항은 추사파경사(Trailing Wave Steepness)의 특정 값과 최소상응함을 보여준다는 내용의 연구 결과를 발표

하였다.

우리 나라에서는 1995년 이승준[7]이 수면파의 쇄파모형에 관한 연구 결과를 발표하였다. 그는 발표 논문에서 물수체 주위에서 발생하는 쇄파는 수중익의 뒤쪽에 생성되는 분출형 쇄파(Spilling Breaker)가 가장 일반적인 형태이며, 이는 천수파 영역에서 수심이 감소하면서 발생하는 쇄파와 현상학적으로 매우 유사한 양상을 보인다고 지적하였다. 천수역에서 발생하는 분출형 쇄파란 파의 파정에서는 수포의 분출이 발생하지만 파동의 여타 다른 부분에서는 큰 변화가 없는 형태의 쇄파로서 해저면의 기울기가 매우 작을 때 발생한다고 알려져 있다. 쇄파가 발생하면 물체는 쇄파에 기인하는 저항을 추가로 받게 되므로 운동량결손과 에너지손실이 주요한 관심의 대상이 된다. 즉, 물체가 수면 가까이 위치해 있을 때는 물체에 의한 수면부근의 유동장 교란이 과도하여 극한적인 형태의 파형으로서도 물체에 의해 주어지는 운동에너지를 감당할 수 없으므로, 쇄파에 의해 그 에너지의 일부를 난류에너지로 방출하게 된다는 내용의 논문을 발표하였다.

1997년에는 쇄파현상의 연구에 새로운 접근 방법으로 Sheridan[8]에 의하여 유동가시화 기법(PIV : Particle Image Velocimetry)이 사용되어졌다. Sheridan은 그의 논문에서 PIV 기법을 이용한 2차원 유동장에서의 순간속도와 와도 측정결과를 통한 자유표면과 와도 및 난류 응력간의 관계를 규명하기 위한 연구 결과를 발표하였다.

이상의 과거 연구결과들을 요약해 보면 Baba에 의하여 쇄파저항에 중요성이 제기 되었고, Duncan에 의해서 실험적인 연구가, Shin & Mori에 의해서는 이론적 연구가 이루어졌다. 그리고 Raymond & Marshall은 Duncan의 연구와 연계된 이론적인 연구를 수행하였으며, 이승준은 수면파의 쇄파모형에 관한 연구결과를 발표하였다. 최근에는 Sheridan이 PIV 기법을 이용하여 쇄파현상을 이해하려 했다.

## 2. 모형, 실험장치 및 실험조건

### 2.1. 모형

본 논문에서 사용한 좌표계 및 실험전경은 Fig. 1과 같다.

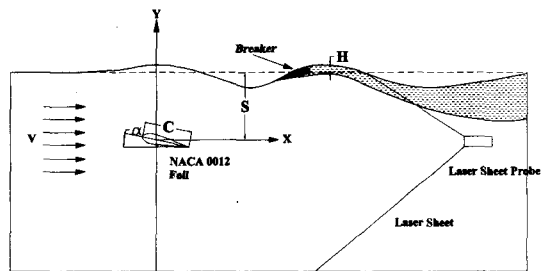


Fig. 1 Coordinate & Schematics of Experiment

본 논문에서 속도등 각종 물리량을 측정하기 위하여 사용된 모형은 기존 수중익 관련 연구에 널리 사용되고 있는 NACA0012 단면을 사용하였다. 코오드(c)와 스패인 각각 10cm, 1m인 수중익은 알미늄으로 N/C 제작하여 표면을 Anodizing 처리하였다. 수중익의 몰수깊이와 받음각(Angle of Attack)은 별도로 제작된 2차원 이송장치를 이용하여 조절할 수 있도록 하였다.

### 2.2. 실험장치

본 논문의 실험은 한국해양대학교 해양과학기술대학 회류수조 실험실에 설치되어 있는 회류수조(Circulating Water Channel)에서 수행하였다. 회류수조에서 유속의 발생은 2 Impeller Vertical Type(OV2 - 60B)을 이용하며, 수조의 전체 크기는 길이 12.5m, 폭 2.2m, 높이 5.2m이며, 본 실험이 행해진 관측부의 크기는 길이 5.0m, 폭 1.8m, 높이 1.2m이다. 수조의 가동시 사용되는 물의 용량은 60ton이며 수조의 발생유속은 0.1m/sec ~ 2.0m/sec까지 이다. 그리고 수조의 구동은

AC 22kw×2set Impeller Motor로 구동된다.

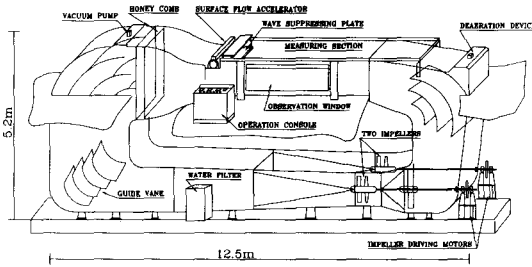


Fig. 2 Circulating Water Channel

수면에서 Wave Profile를 계측하기 위하여 회류수조의 관측창에 간격 5mm의 격자가 그려진 OHP Films를 사용하여 유속과 물수심의 변화에 따른 Wave의 파장, 파저, 정수면과 만나는 점 등의 좌표를 계측하여 Wave Profile을 계측하였다. 수중의 후류에서의 전수두손실 (Total Head Loss) 및 유속계측을 위하여 6mm, 6Holes의 Pitot Tube를 사용하였다. 전수두손실의 계측은 수조의 유동에 교란을 발생시킬 수 있는 모든 장비를 제거한 후에 설정유속에서의 전수두를 계측한 값과 수중익을 설치한 후에 수중의 후류에서 계측된 전수두 값의 차이로부터 구하였다.

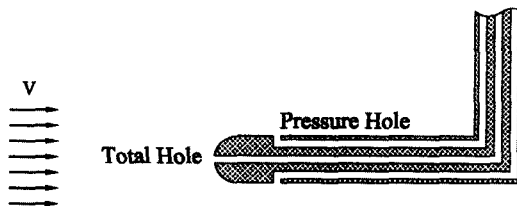


Fig. 3 Pitot Tube

수중의 주위의 순간유동장 계측을 위하여 PIV System을 채택하였다. 유동가시화 장치는 6W Ar-Ion LASER, Fiber Optic Cable 및 Cylindrical Lens가 부착된 Probe를 사용하였는데 최적의 LASER Sheet를 형성하기 위해서는 수면 상부에서 조사하는 것이 좋으나

Breaking이 발생하면 Breaker에 의한 자유표면의 교란에 의해 LASER의 산란으로 그림자가 생성되어 LASER Sheet를 형성하는데 문제가 발생하여 조사용 Probe를 수밀 아크릴 통에 삽입하여 수중에 직접 설치하였다. LASER Probe를 물 속에 고정하기 위하여 Fig. 6과 같은 Traverse를 제작 물 속에 설치하였다. 두께 5mm 정도로 생성된 LASER Sheet는 수중의 후방의 30cm×30cm 정도를 조사하도록 조절하였다. 산란입자로는 비중이 1.1인 Vinyl Chloride Polymer를 사용하였는데 균일 유동 중에서의 실험결과 유동을 잘 추적함을 확인할 수 있었다. 조사된 2차원 영상은 CCD Camera (SONY SSC - M370)로 640×480 Pixel 해상도로 촬영과 동시에 Video Cassette Recorder(Panasonic AG - 7350)에 녹화한 후 Image Grabber(DT 3155)를 사용하여 1/30초 동안의 순간 이미지를 P/C로 받아들여 단일조명/이중프레임 상호상관법 (Cross correlation method)으로 속도벡터와 와도분포를 구하였다. 또한, 수중의 주위와 자유수면 근처의 유동장을 보다 자세히 계측하기 위하여 원래의 PIV System에 AOM(Acoustic Optic Modulator)을 추가하여 계측하였다. 그리고 본 논문에서 PIV해석을 통한 속도 벡터 검출을 위해서는 'Thinkers'를 사용하였으며, 와도분포 계산을 위해서는 'Exponential Cubic Spline Program'을 사용하여 계산하였다.

### 2.3. 실험조건

Wave Profile, 전수두손실, 속도분포는  $Fr = 0.567$ , 1.0에 대하여 물수심(S)을 수중의 Chord(c)로 무차원화된  $s/c = 0.5 \sim 2.0$  사이에서, 수중의 후류방향으로  $x/c = 2.1, 3.0$ 에서, 받음각은  $5^\circ \sim 20^\circ$ , 물수깊이에 따른 파형 관찰은 수중의 후방  $x/c \approx 6.0$ 지점까지 하였다.

PIV계측은 유속은  $Fr=0.567$ 에 대하여  $s/c = 0.25 \sim 2.0$  사이에서, 받음각은  $5^\circ \sim 20^\circ$ , 계측영역은 7cm~30cm 사이에 대하여 수행하였다.

### 3. PIV를 이용한 유동해석

#### 3.1. PIV의 원리

속도계측을 위한 정량적 가시화 기법 (Quantitative Visualization Technique)의 한 종류로 유동장에서 유체입자의 속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간간격에서 ( $\Delta T$ )의 추적입자가 이동한 거리 ( $\Delta S$ )를 계측하여 입자의 이동속도를 구하는 방법으로, 단 여기서 추적입자는 미소시간동안 직선운동을 한다는 가정이 전제되어야 한다.

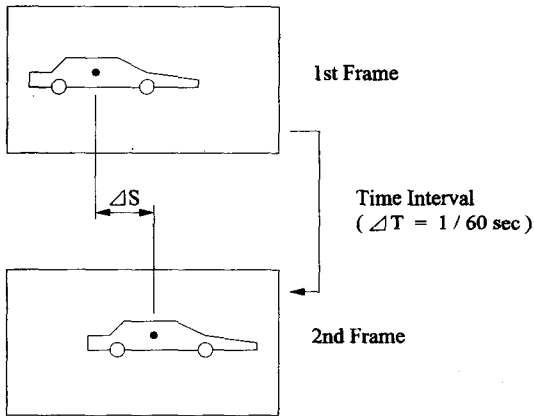


Fig. 4 PIV Principle

PIV를 LDV(Laser Doppler Velocimetry)와의 장·단점 비교를 하면, PIV의 장점은 비정상 유동장의 다차원 동시다점 계측이 가능하고, 원리적으로 CFD에 대응할 수 있는 유일한 계측기법이며, 유동장 영상의 기록, 보존 및 재생이 가능하며 시스템 구성이 용이하다. 반면, 단점으로는 시공간 해상도가 비교적 낮으며, 최적조명 및 입자선별의 제약이 있다.

LDV의 장점은 계측점의 시간해상도가 높으며, 정도 높은 시간 평균속도 값이 제공된다. 단점은 동시다점 계측이 원리적으로 어렵고, 비정상 계측이 불가능하며, 시스템 구성이 비교적 복잡하다.

#### 3.2. PIV 해석방법

##### 3.2.1. 유동장 구성

PIV는 재현성을 갖춘 유동장의 확보가 필요하며, 투명한 아크릴 또는 유리관 등으로 굴절률을 고려하여 구성된 유동장에 작동유체 및 계측속도 범위에 따른 입자를 선정하여 추적입자를 주입하면 된다.

추적입자 선택은 저속액체의 경우에는 주변의 온도변화에 따른 입자의 미소한 밀도차이가 추종성에 큰 영향을 미친다는 것과 입자 주입에 따른 이상(二相)유동특성 또는 초기 교란상태를 억제하여야 한다는 것을 주의하면 된다.

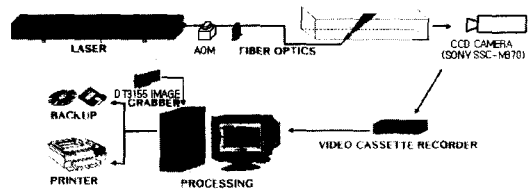


Fig. 5 PIV System

보편적으로 사용되는 추적입자로는 기체의 경우 10미크론 전후의 광산란성이 우수한 미소입자(액적, 기체, 분말)를 사용하여야 하며 액체의 경우는 나이론 12, 폴리스티렌 구형입자(직경 10~100미크론 전후) 또는 알루미늄분말을 사용하면 된다.

##### 3.2.2. 계측부 조명설치

PIV에 사용되는 조명은 2차원의 경우에는 두께 1~2mm 전후의 Sheet Light가 필요하며, 이 때 사용되는 광원으로서는 가시광선 Laser(Ar-Ion Laser, Green, 300mW~10W, Fiber Optical Cable, Cylindrical Lens)가 가장 효과적이다. Laser 대신에 백색광원도 유효하나 발생열에 의한 유동장의 변동이 발생할 수 있으며 특히 저속액체의 경우 광원용 조명열에 의한 자연대류가 발생할 수 있으니 조심하여야 한다. 광원의 강도로는, 저속액체의 경우에는

1.0m/sec 이하이며 유동장의 크기가 150mm × 150mm에서는 500mW 전후, 그리고 고속 기체의 경우는 10~40m/sec 범위이며 유동장의 크기가 150mm × 150mm에서는 5W 전후의 출력이 필요하다.

고속유동계측의 경우에는 미소시간 간격을 확보하기 위하여 조명의 펄스제어가 필요하며, 1 Frame Auto-Correlation 방식의 Pulse Laser 조명을 사용하면 400m/sec의 고속기류까지 계측이 가능하다.

### 3.2.3. 영상촬영

유동장 촬영장비로는 CCD Camera, HI-8mm Cam Coder, High Speed Camera 등이 있으며 유동장의 속도에 따라 좌우된다. 촬영된 유동장의 영상은 언제든지 반복처리가 가능하며, 영상입력 신호는 일반적으로 NTSC(National Television System Committee) Composite 방식을 사용한다.

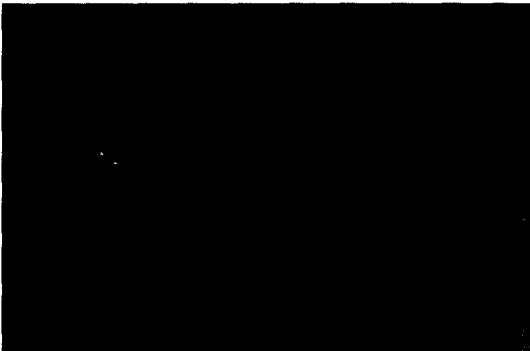


Fig. 6 Raw Image

### 3.2.4. 영상획득

카메라 또는 영상저장 장치로부터 공급된 유동장의 Analog 입력신호를 2차원의 디지털 영상정보로 바꾸어주는 영상획득장치(Image Grabber)가 필요하다.

Image grabber마다 해상도의 차이가 있는데 본 실험에 사용한 Image Grabber(DT3155)는 640 × 480 Pixel의 해상도로 녹

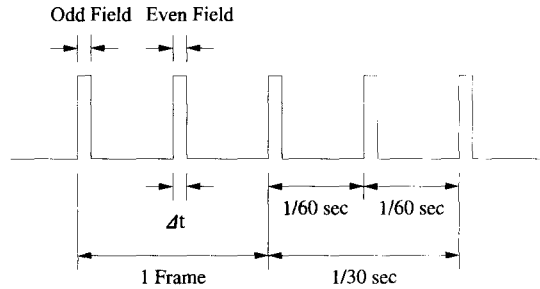


Fig. 7 NTSC Image Signal

화된 영상을 디지털화 한다. Image Grabber가 녹화된 영상을 디지털화 하여 저장하는 곳이 컴퓨터내의 메모리인데 하나는 디바이스메모리와 호스트메모리이다. 디바이스메모리는 일반적으로 RAM이며 호스트메모리는 하드드라이브를 말한다. 디바이스메모리에 저장되어야 실시간(1/30초)이 되는데 일반적으로 Image grabber가 사용할 수 있는 디바이스메모리는 RAM의 1/3정도이다. 이렇게 디바이스메모리나 호스트메모리에 저장된 영상을 이미지파일로 변환하여 하드드라이브에 저장을 하게된다. 디지털화된 영상은 이미지파일로 포맷이 되면서 순수한 영상외에 이미지파일이란 정보를 갖는 Header를 갖게 되는데 영상을 해석하기 전에 이러한 Header는 제거를 해야한다. 일반적으로 Bitmap형식(\*.bmp) 이미지파일은 Header가 파일상단에 존재하고 영상의 정보는 하단에서부터 저장이 되므로 다루기가 쉽지 않다. 그와 반면에 tif파일은 Header가 파일상단에 존재하고 바로 뒤에 영상의 정보가 저장이 되므로 상대적으로 다루기가 쉽다. Header를 제거하려면 Header의 크기를 알아야 한다. 이미지파일 크기에서 순수한 영상의 크기를 빼면 Header의 크기를 알 수 있다. 그다음 프로그램을 코딩하여 Header 크기만큼의 byte를 제거한 다음 순수한 영상을 NTSC주사방식인 Odd와 Even Field로 나눈후 각각의 Odd와 Even Field를 보간하여 각각 하나의 Odd와 Even Frame영상을 만든다.

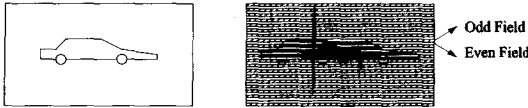


Fig. 8 NTSC 방식으로 촬영/저장된 영상



Fig. 9 Odd Field로 구성된 영상 및 격자보간 후의 영상



Fig. 10 Even Field로 구성된 영상 및 격자보간 후의 영상

이때 얻어진 영상정보는 바둑판 모양의 2차원 Pixel의 수평 및 수직공간배치(좌측 최하단은(1, 1), 우측 최상단은(640, 480)의 좌표값을 갖는다. 이때 각 위치에서의 밝기정보는 조명에 의해 추적입자가 존재하는 Pixel은 밝기의 강도(흑백은 8Bit의 크기이며 이것은  $2^8=256$  단계의 계조치)로 구분되며, '0'은 가장 어두운 부분이며 '255'는 가장 밝은 경우의 값이다. 영상획득을 칼라로 하였을 경우에는 RGB의 세 가지 색상으로 구분되며 각각 256단계의 계조치로 구분될 수 있다.

영상획득장치의 중요한 규격은 입력신호의 종류(NTSC Composite 등), 공간해상도(640×480 Pixel), 1/30sec 간격의 Real Time 입력여부, 자체메모리 또는 확장 PC의 메모리의 용량 등으로 구분된다. 영상장치로부터 획득된 영상은 영상처리(Image Processing)단계를 거쳐야 한다. 이때 처리하여야 하는 영상처리 과정으로는 히스토그램 균일화, 국소적 영상개선, 영상평활화, 영상에리화 등이 있다.

### 3.2.5. AOM를 이용한 영상획득

본 논문에서 미세영역에 관한 PIV계측을 하기 위하여 AOM을 사용하였다. 촬영하고자 하는 영역이 작고 유속 또한 빠르다면 미소시간동안 입자의 이동거리는 커지고 동일입자가 미소시간 후 촬영영역을 벗어날 수 있다. 그러면 PIV의 계측이 어렵고 신뢰할수 없는 결과를 얻게 된다. 그래서 카메라의 셔터를 완전노출을 시키고 AOM을 이용하여 LASER의 빛을 일정시간 간격을 두고 조사(照射)하는 방법을 사용한다. AOM은 1초에 1,000,000개의 pulse를 발생시키는데 사용하고자 하는 주파수의 pulse만을 선별하여 빛을 조사(照射) 시킨다.

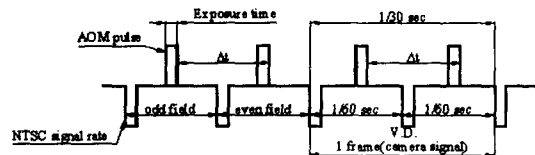


Fig. 11 AOM의 원리

위 그림은 AOM의 원리를 나타낸 것이다. 일반적으로 1초간의 영상은 30장으로 구성되어지기 때문에 AOM관점에서 1장의 영상은 33333 pulse 동안의 영상이다. 또한 NTSC방식의 영상은 1장의 영상이 1/60초의 간격으로 odd와 even field로 구성되기 때문에 odd와 even field의 분기점은 16666 pulse이다. 이 분기점을 중심으로 odd field와 even field에서 미소시간동안 빛을 조사(照射)하며 카메라로부터 들어오는 동기신호에 의해 정확히 1/30초 후에 똑같이 미소시간동안 빛을 조사(照射)하게 된다. 그러면 추적입자는 AOM을 통해 빛이 조사(照射)되는 시간동안만 빛을 반사하게 되고 카메라는 추적입자가 빛을 반사하는 시간동안만의 영상정보를 저장하게 되는 것이다.

또한 AOM은 노출시간(Exposure time)과 Field 저장간격시간( $\Delta t$ )을 둘다 조절 가능하다. 만일 노출시간이 1ms(1000 pulse에 해

당),  $\Delta t$ 가 4ms이라면 16666을 중심으로 하여 전후로 4000 pulse 차이가 나도록 시작점과 끝점을 지정해주면 된다. 이때 주의할 점은 시작점의 값에서 노출시간을 더한 값이 16666보다 작아야 한다는 것이다. AOM의 노출시간 설정방법은 입자가 이동하는 거리인  $\Delta t$ 보다는 반드시 짧아야 계측이 의미를 갖게 되며 한 Field상에서 입자가 가능한 한 Discrete하게 보이는 것이 가장 좋으므로 노출시간은 짧을수록 이론적으로 유리하나 빛의 광량(Light Intensity)은 노출시간에 비례하므로 노출시간이 너무 짧으면 광량 부족으로 화면이 어두워 질 수 있다. 그리고 노출시간이 짧아질수록 한 Field내에 나타나는 입자의 수가 너무 적어져서 상호상관법을 적용할 때 문제가 생길수 있다. 따라서 노출시간 설정에는 PIV 실험에 대한 다소간의 경험이 필요하다.

AOM의  $\Delta t$ 설정방법은 한 화면에 해당하는 실제유동장의 촬영영역이 크기중 가로길이와 상호상관법을 적용할 때의 최대허용 입자이동 픽셀(Pixel)수와 유속간의 상관식에 의해 결정된다. 일반적으로 최대허용 픽셀수가 크면  $\Delta t$ 를 크게 설정해도 되지만 최대허용 픽셀수가 커지면 계산시간도 길어지고 Error도 많아지기 때문에 20픽셀보다 작은 값을 설정하며 통상 7~10픽셀 정도로 설정한다.

$$\Delta t = 1.5625 \frac{wp}{V} \text{ (msec)}$$

위의 식은 AOM의  $\Delta t$ 설정식으로  $\Delta t$  : 2 field간의 시간간격(msec),  $w$  : 1화면에 해당하는 실제유동장의 촬영영역 크기중 가로길이(m),  $p$  : 최대허용 입자이동 픽셀수,  $V$  : 유속(m/sec)이다.

### 3.2.6. 동일입자 추적

본 논문에서는 동일입자 추적방법으로 계조치 상호상관법을 사용하였다. 계조치 상호상관법과는 다른 입자추적법은 개별적으로 분포된 입자들의 도심좌표를 추적하는 방법으로 입자 크기 및 농도분포의 영향을 받는 반면에 계조치

상호상관법은 입자 개개의 도심좌표를 구하는 대신 계조치의 특성분포를 비교하여 가장 유사한 형태의 계조치 분포를 찾아내어 벡터의 종점으로 하는 방법이다.

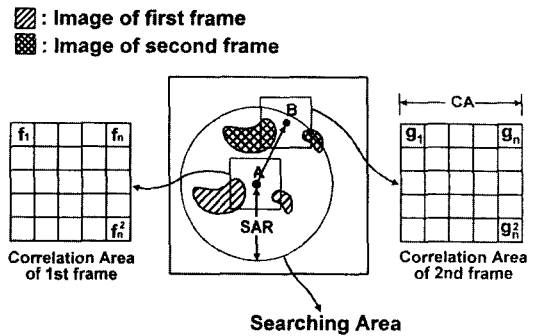


Fig. 12 Grey Level Cross-Correlation Method

2 Frame의 영상데이터를 이용한 계조치 상호상관법은 미소시간 동안 유동장의 입자영상의 계조패턴은 크게 변하지 않는다고 가정하여 1 Frame에서의 상관영역내의 계조치 분포와 미소시간 후의 제 2 Frame에서의 계조치 분포는 유사한 특성을 나타낸다. 따라서 제 1 Frame의 임의의 위치를 중심으로 하여 제 2 Frame 상의 같은 크기를 갖는 영역과의 계조치에 대하여 상호상관계수값을 구하여 비교하면 그 중 가장 큰 값을 동일입자의 위치로 간주할 수 있게 된다는 원리를 이용한다. 여기에 사용되는 최대의 계조치 상호상관계수를 찾는 공식은 다음과 같다.

$$C = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (f_i g_{kl})$$

위의 공식으로 1 Frame에서의 임의의 위치에 대응하는 2 Frame에서의 최대의 계조치가 상호상관영역을 찾으면, 두 Frame에서의 상관영역 중심간의 거리차이를 바로 유체입자의 이동거리로 볼 수 있게된다.

### 3.2.6. 유체입자 이동속도계산

계조치 상호상관법으로 유동장에서의 유체입자의 이동 시점과 종점을 구하였다. 그 때 시점과 종점사이의 거리( $\Delta S$ )를 1 Frame과 2 Frame



과의 시간차( $\Delta T$ )이인 1/60sec로 나누면 속도 ( $v = \frac{\Delta u}{\Delta T}$ )를 구할 수 있다.

최종적으로 얻어진 속도벡터에는 알고리즘 또는 원시영상의 화질열화 등의 원인에 의해 이상치가 포함되어 있다. 이를 유동장의 특성에 부합시켜 정확히 제거하는 이상치의 제거과정이 필요하다.

### 3.2.7. 와도계산

유동장 각각의 위치에서 구해진 속도벡터를 이용하여 각각의 위치에서의 와도( $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ )를 계산할 수 있다. 본 논문에서는 Exponential Cubic Spline Method를 이용하여 각각의 위치에서의  $\frac{\partial v}{\partial x}$ ,  $\frac{\partial u}{\partial y}$ 를 계산한 후 구하였다.

### 〈참 고 문 헌〉

[1] Baba, E., "A new component of viscous resistance", J. Soc. Naval Archi. Japan, Vol.125, 1969.  
 [2] Duncan, J. H., "An experimental investigation of breaking waves produced by a towed hydrofoil", Proc. R. Soc. Lond A377, 331-348, 1981.  
 [3] Duncan, J. H., "The breaking and non-breaking wave resistance of a two-dimensional hydrofoil", J. Fluid Mech., Vol. 126, pp. 507-520, 1983.  
 [4] Shin, M.S. & Mori, K.H., "On turbulent characteristics and numerical simulation of 2-dimensional sub-breaking waves", J. Soc. Naval Archi. of Japan (SNAJ), Vol. 165, pp. 1-7, 1989.  
 [5] 신명수 등, "비대선수 주위의 sub-breaking wave 탐지기법", 대한조선학회 논문집, Vol.29, No.3, 1992.  
 [6] Raymond Cointe, Marshall P. Tulin, "A Theory of Steady Breakers", J. Fluid

Mech., Vol. 276, pp. 1-20, 1994.  
 [7] 이승준, "수면파의 쇄파모형에 관한 Review", 충남대학교 산업기술연구소 논문집 제10권 제1호, 1995.6  
 [8] Sheridan, J, J. C. Lin and D. Rockwell, "Flow Past a Cylinder Close to a Free Surface", J. Fluid Mech., Vol. 330, pp. 1-30, 1997.  
 [9] J. C. Lin and D. Rockwell, "Evolution of a quasi-steady breaking wave", J. Fluid Mech., Vol. 302, pp. 29-44, 1995  
 [10] White, F.M., "Viscous Fluid Flow", 2nd ed., McGraw Hill, 1991.  
 [11] 이영호, 최장운, "An Introduction to PIV(Principle & Application)", Flow Information Lab. Korea Maritime Univ. & Image Information Technology Co, 1998. 2.  
 [12] 현범수, 신용현, "몰수실린더의 수심변화에 따른 파형변화 및 쇄파발생에 관한 연구 (I)", '96 추계조선학회 학술대회 논문집, 서울대학교, 1996. 11.  
 [13] Hyun, B.S. and Shin, Y.H. (1997), "On Some Characteristics of Breaking Waves Generated by a submerged Circular Cylinder", Proc. of the 7th Int'l Symp. on Offshore & Polar Eng. ISOPE, Honolulu, Hawaii, USA, May 25-30, 1997  
 [14] Hyun, B.S., Y.H. Shin & K.S. Choi (1998), "Visualization of Vortical Flow Around Breaking Waves Generated by Submerged Cylinder Using PIV", Proc. of 3rd ICHD, Lotte Hotel, Seoul, Oct 12-15, 1998  
 [15] 도덕희, 현범수, 홍성대, 최성환, 백태실, "파노라마 - PIV계측기법의 개발", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(B), 한국과학기술교육대학, 1999. 4, pp 26-30  
 <다음호에 계속>