Research of 3D Motion Measurement method for SPAR using PTV method

Yoo Young-mok

Department of MARINE SYSTEM Graduate School, KOREA MARITIME University

Abstract

The 3D Particle Tracking Velocimetry(PTV) offers a flexible technique for the determination of structural motion. In the past decade the research work determinate the structure motion by contact type measurement system. But contact type measurement system contains a basic error by contact equipment. In this paper, we measured motion of circular cylinder type structure using PTV measurement system against the traditional measurement system. And we decided that PTV method is suitable for detection of structural motion through the comparison.

And the results show that each experimental value are good agreement. But theoretical value are bad agreement with experimental value except heave motion. This disagreement was caused by coupled motion of pitch and surge motion.

Nomenclature

| A_w | 부체의 수선 면적 | | |
|-----------------------------------|--------------------------|--|--|
| C_{ij} | 정수압에 의한 복원력 계수 | | |
| σ | 소오스의 강도 | | |
| ϵ | 미소 파라메터 | | |
| F_k | 파 강제력 | | |
| F_{kj} | radiation 유체력 | | |
| F_k | 파 강제력 | | |
| G | 그린함수 | | |
| g | 중력가속도 | | |
| H_F | 파강제력의 전달함수 | | |
| $h_F(au)$ | 파 강제력의 임펄스 응답함수 | | |
| k_k | <i>k</i> 성분 입사파의 파수 | | |
| μ_{kj} | ;방향의 운동에 의한 ∦방향에의 부가 질량 | | |
| $\{n\}$ | 물체 표면상의 단위 법선 벡터 | | |
| $ u_{kj}$ | ;방향의 운동에 의한 ∦방향에의 감쇠계수 | | |
| M_{ij} | 부체의 관성력 계수 | | |
| O-XYZ | 공간 고정 좌표계 | | |
| $\hat{O} - \hat{X}\hat{Y}\hat{Z}$ | 물체와 함께 운동하는 물체 고정 좌표계 | | |
| O' - X' Y'Z' | 공간 고정 좌표계와 평행한 물체 고정 좌표계 | | |
| $\{\Omega\}$ | 회전 변위벡터 | | |
| $\{\dot{\Omega}\}$ | 회전 속도벡터 | | |

| ω_k | ┢성분 입사파의 1차수면변화의 주파수 |
|----------------------------------|----------------------------|
| Р | 순간 침수 표면 <i>S</i> #에 대한 압력 |
| Φ | 속도 포텐셜 |
| Φ_I | 입사파에 대한 속도 포텐셜 |
| Φ_D | 회절에 의한 속도 포텐셜 |
| $arPsi_R$ | 방사에 의한 속도 포텐셜 |
| ρ | 유체의 밀도 |
| S_H | 물체의 순간 침수표면 |
| S_m | 평균위치에서의 침수표면 S_m |
| V | 평균침수체적 |
| V_n | 물체표면에서의 물체의 법선 방향 속도 |
| $\{V\}$ | 물체의 속도 벡터 |
| $\{\Xi\}$ | 병진 변위벡터 |
| $\{\dot{\Xi}\}$ | 병진 속도벡터 |
| Ζ | 자유표면 방정식 |
| $\zeta(X,Y,t)$ | 자유표면의 수면변위 |
| | |
| $(X_{1,} Y_{1}), (X_{2,} Y_{2})$ |) LED의 변화된 위치 |
| $(x_{1,}y_{1}), (x_{2,}y_{2})$ |) LED의 기준 위치 |
| | |
| $c,c_{x,}c_{y}$ | 장방비의 차이를 고려한 초점거리 |

| dis | 절대좌표계로부터 카메라 중심까지의 거리 |
|-----|-----------------------|
| F | x 방향의 관측 방정식 |
| G | y 방향의 관측 방정식 |

| $k_1, \ k_2$ | 렌즈 상수 | | | |
|---|-------------------|--|--|--|
| $m_{x,}m_{y}$ | 입자의 이동량 | | | |
| x, y, z | 촬영 영상좌표계 | | | |
| X, Y, Z | 절대좌표계 | | | |
| $X_{0,} \;\; Y_{0,} \;\; Z_{0}$ | 카메라 중심 | | | |
| $\overline{x}, \overline{y}$ | 입자의 중심위치 | | | |
| $x_{0,}$ y_{0} | 영상중심으로부터 입자의 이동거리 | | | |
| $x_{i,} y_{i}$ | 입자의 사진 좌표값 | | | |
| $X_{i,} \hspace{0.2cm} Y_{i,} \hspace{0.2cm} Z_{i}$ | 입자의 절대 좌표값 | | | |
| $X_{m,}$ $Y_{m,}$ Z_{m} | 회전된 절대 좌표계 | | | |
| $lpha, \omega$ | X축의 시계방향 회전각도 | | | |
| $eta, \ \psi$ | Y축의 시계방향 회전각도 | | | |
| χ | Z축의 시계방향 회전각도 | | | |

Contents

| Abstract I |
|------------------------------|
| Nomenclatures ······ II |
| List of Figures ······ VI |
| List of Tables ······ IX |
| |
| 1. 서론 ····· 1 |
| 1.1 연구의 필요성 ······ 1 |
| 1.2 기존의 연구 ····· 3 |
| 1.3 연구의 내용 ······ 4 |
| |
| 2. 이론 ····· 5 |
| 2.1 수치적 방법 ······ 5 |
| 2.1.1 주파수영역 응답해석 |
| 2.1.1.1 경계치 문제와 유체력 ····· 9 |
| 2.1.1.2 파강제력 ····· 14 |
| 2.1.1.3 운동방정식 16 |
| 2.2 기존 계측법의 원리 ····· 19 |
| 2.3 PTV 계측법의 원리 ····· 20 |
| 2.3.1 표정요소의 정의 및 계산 ····· 20 |
| 2.3.2 위치 결정의 원리 ····· 22 |
| 2.3.3 영상변환 ····· 27 |
| |
| 3. 실험방법 및 모형 ······ 31 |
| 3.1 실험 조건 ······ 31 |
| 3.2 모형 ······ 31 |

| 3.3 실험 방법 ······ 3 | 3 |
|--------------------------------------|---|
| 3.3.1 기존계측법에 의한 실험 ····· 3 | 3 |
| 3.3.1.1 기존계측법의 Calibration ····· 3 | 4 |
| 3.3.1.2 감광장치(PSD) ······ 3 | 5 |
| 3.3.2 PTV 계측법에 의한 실험 ····· 3 | 7 |
| 3.3.2.1 PTV 계측법의 Calibration ····· 3 | 7 |
| 3.3.2.2 PTV용 카메라 ······ 4 | 0 |
| | |

| 4. 결과 및 고찰 ······ 42 |
|----------------------------------|
| 4.1 이론 계산에 의한 결과 ····· 42 |
| 4.1.1 SPAR 모델 ····· 42 |
| 4.1.2 특이점 분포법에 의한 파강제력과 운동응답 42 |
| 4.2 기존 계측법에 의한 운동응답 45 |
| 4.3 PTV 계측법에 의한 운동응답 ····· 44 |
| 4.4 각 계측법에 의한 운동응답의 비교 ······ 55 |
| |
| 5. 결언 ····· 58 |
| |
| 6.참고문헌 ····· 55 |

List of Figures

| Fig. | 2.1 Coordinate Systems |
|------|--|
| Fig. | 2.2 Relationship between S and S_m $\cdots \cdots \cdots 16$ |
| Fig. | 2.3 The coordinate system of conventional method 19 |
| Fig. | 2.4 Rotation by X, Y and Z axis 25 |
| Fig. | 2.5 Relations between absolute and camera's coordinate system. |
| | |
| Fig. | 2.6 Definition of 3-D particle position |
| Fig. | 2.7 Images of each camera for a regular square 29 |
| Fig. | 2.8 Transformation between pixel and real coordinate planes $\cdots 30$ |
| Fig. | 3.1 2 dimensional ocean engineering basin 31 |
| Fig. | 3.2 Configuration of Model Installation (Longitudinal section) \cdots 33 |
| Fig. | 3.3 Configuration of Model Installation (Transverse section) \cdots 33 |
| Fig. | 3.4 Calibration procedure of traditional detecting method 34 |
| Fig. | 3.5 Calibration procedure of LED moving 34 |
| Fig. | 3.6 Semiconductor position sensitive detector 35 |
| Fig. | 3.7 The real Image of LED and SPAR 36 |
| Fig. | 3.8 The real image of conventional method 36 |
| Fig. | 3.9 Configuration of Model Installation 37 |
| Fig. | 3.10 Picture of Calibrator |
| Fig. | 3.11 Virtual image for camera calibration 38 |
| Fig. | 3.12 Process transformation between pixel and real coordinate |
| | calibrator · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |
| Fig. | 3.13 High Speed camera and image board 40 |
| Fig. | 3.14 The real image of PTV Particle 41 |
| Fig. | 3.15 The real image of PTV method 41 |

| Fig. 4.1 Wave Excition Force and Moment 4 |
|--|
| Fig. 4.2 Wave Exciting Force and Moment from Haskind Relation \cdots 4 |
| Fig. 4.3 Predicted Surge Response of SPAR 4 |
| Fig. 4.4 Predicted Heave Response of SPAR 4 |
| Fig. 4.5 Predicted Pitch Response of SPAR 4 |
| Fig. 4.6 Detecting data of LED motion ······ 4 |
| Fig. 4.7 Analyzed data of LED motion ······ 4 |
| Fig. 4.8 Surge Response of SPAR · · · · · · · · · · · · · · · · · · · |
| Fig. 4.9 Heave Response of SPAR ····· 4 |
| Fig. 4.10 Pitch Response of SPAR ······ 4 |
| Fig. 4.11 The Image of Camera 1 at Time 1 4 |
| Fig. 4.12 The Image of Camera 2 at Time 1 4 |
| Fig. 4.13 The Image of Camera 1 at Time 2 5 |
| Fig. 4.14 The Image of Camera 2 at Time 2 5 |
| Fig. 4.15 Numbering of Points 5 |
| Fig. 4.16 Detecting motion of X direction 5 |
| Fig. 4.17 Detecting motion of Y direction 5 |
| Fig. 4.18 Detecting motion of Z direction 5 |
| Fig. 4.19 Surge response of SPAR 5 |
| Fig. 4.20 Heave Response of SPAR 5 |
| Fig. 4.21 Pitch Response of SPAR ····· 5 |
| Fig. 4.22 Comparison between Measured and Calculated (Surge motion |
| |
| Fig. 4.23 Comparison between Measured and Calculated (Heave motion |
| |
| Fig. 4.24 Comparison between Measured and Calculated (Pitch motion |
| |

List of Tables

| Table | 3.1 | Principal Dimensions & Particulars of Models | 32 |
|-------|-----|--|----|
| Table | 3.2 | Specification of PSD | 35 |
| Table | 3.3 | Specification of Camera 1&2 ····· | 40 |

1. 서론

1.1 연구의 필요성

해양개발을 위한 기술은 해양유전 개발과 더불어 급속히 발전하였다. 가까운 미래에는 해양공간 및 자원의 개발은 대수심역으로 확대될 것이며 그에 맞는 다 양한 개념의 구조물들이 건조될 것이다. 현재 해양자원 개발을 위한 대표적 구조 물로서 FPSO(Floating, Production, Storage & Offloading), Semi-submersible, TLP(Tension Leg Platform), SPAR등이 있으며, 특히 SPAR는 운동 성능의 우수성과 제작의 간편함 등의 장점이 있어 심해석유자원 개발용 구조물로 각광을 받고 있다.

SPAR는 시추 또는 생산을 위한 시설물을 지지하기 위한 깊은 흘수를 가진 실 린더형 부유체로 되어 있으며, 동적 안정성의 확보를 위해 실린더 하부에 적절한 밸러스트를 통하여 부심위치 보다는 무게중심을 아래로 두고 있다. 위치유지를 위한 계류계는 초기인장을 가한 방사형 카테나리 계류를 하고 있으며 Mooring line의 부착을 위한 페어리더(Fairlead)는 Mooring line에 미치는 동적 효과를 최소화하기 위하여 무게중심의 근방에 두는 것이 일반적이다.

해양구조물의 조종성과 안전성 해석을 위해서는 구조물의 운동에 대한 해석이 필요하다. 이를 위한 방안으로서는 수치적 해석방법과 실험 계측에 의한 해석방 안을 들 수 있다.

구조물의 운동을 해석하기 위한 가장 최신의 실험적 방법에는 비접촉식 6자유 도 운동 측정시스템(일본조선연구협회, 1984)이 있다. 비접촉식 6자유도 운동측 정시스템은 2대 이상의 CCD카메라에 투영된 구조물의 영상을 이용하여 삼각측 량법에 의하여 구조물의 3차원 위치를 측정하는 것이다. 기존의 비접촉식 6자유 도 운동측정시스템은 삼각측량법에 의거한 것이므로 카메라 렌즈의 왜곡효과 등 을 무시하고 있는 관계로 공간정밀도가 높은 측정에는 무리가 있었다. 이를 보완 하여 상용화 된 것이 벨기에 KRYPTON사의 6자유도 운동측정시스템이다. 그러 나, 시스템의 가격이 매우 고가인 것이 단점이다.

본 연구에서는 2대의 카메라 영상을 이용하여 구조물의 3차원 운동을 측정할 수 있는 시스템을 구현하였다.

충분한 정확도와 신뢰도를 가진 다양한 난류계측에서 열선유속계와 LDV (Laser Doppler Velocimetry)가 계측에 널리 적용되어져 왔다. 그러나 이러한 계측법은 기본적으로 측정대상공간에 대하여 한 점에 대한 정보밖에 얻을 수 없다. 그러한 이유로 동시 다점계측이라는 장점을 가진 PIV(Particle Image Velocimetry) 계측기법에 의해 얻어내는 연구 성과들이 계속 증가 추세에 있으며, 특히 난류에 대한 많은 정보를 얻기 위해서는 3방향의 (*u*, *v*, *w*)속도 성분을 동시에 계측하는 것이 요구되어지고, 이러한 3차원 계측이 활발히 진행되어지고 있다.

유동장의 유체와 동일한 비중의 미소 추적 입자를 투입하여 광원과 카메라로 가시화 한 후 디지털 화상처리를 이용하여 이들 입자들의 운동을 정량적으로 추 적하는 방법을 PTV(Particle Tracking Velocimetry)라 한다.

1.2 기존의 연구

Chang과 Tatterson(1983)과 Chang et al.(1984)들은 다중사진기법으로 실용 적인 속도계를 처음으로 고안하여 3차원성이 강한 유동의 난류 유동계측에 성공 하였으나, 카메라의 작은 시선각으로부터 얻어진 3차원 좌표에서 깊이방향의 정 확도가 떨어진다는 단점을 보였다.

Yamakawa와 Iwashige(1986), Racca와 Dewey(1988), Adamczyk와 Rimai(1988) 그리고 Kobayashi et al.(1989)등은 직각방향에서 유동장을 관찰 함으로써 단점을 극복하였으나 이들 기법들 또한 단순유동장의 계측에만 적용되 었다. 이러한 기법들은 속도가 상대적으로 빠르거나 조사영역이 작은 경우의 속 도분포를 계측하는데 어려운 점이 있다.

Kobayashi et al.(1991)등은 이러한 단점을 극복하기 위해 AOM(Acousto Optical Modulator)이라 불리우는 광학장치를 이용하여 4-Frame PTV 계측법 을 구축하였으나, 결과가 2차원 계측에 한정되었고, 계측결과도 Baek과 Lee(1996)의 2-Frame PTV알고리즘 보다 상대적으로 낮았다. 또한, Multi-frame PTV방법은 여러장의 연속적인 이미지를 사용하여 동일입자를 추 적하는 알고리즘을 채택하고 있기 때문에 상대적으로 속도가 빠르거나 3차원성 이 강한 복잡한 유동장에 적용하는 것은 거의 불가능하다.

Ohyama et al.(1993)은 모든 입자의 이동거리가 최소가 되도록 접합도를 정 의한 유전 알고리즘을 이용하여 2차원 속도 계측을 하였고, 이러한 유전 알고리 즘을 3차원에 확장하여 적용하였다(1995).

유전알고리즘을 PTV 계측방법에 적용한 Yamada et al.(1995)은 두 프레임간 의 패턴의 매칭을 이용하여 속도를 계측하는 알고리즘을 개발 하였다.

속도가 빠르거나 3차원성이 강한 복잡한 유동장에 대한 해석을 위해서 Doh et al.(1999)의 연구에서는 1-Frame 3-D PTV 알고리즘을 개발하였다.

1.3 연구의 내용

본 연구에서는 기존의 실험방법인 발광다이오드(LED)와 감광장치(PSD: semiconductor position sensitive detector)를 사용하여 구조물의 운동을 계측 하는 방법과 유전알고리즘을 적용한 PTV 계측방법을 사용하여 각 계측치를 비 교하고, 해양구조물 운동에 대한 PTV의 적용 가능성을 검토하고자 한다.

제 2 장에서는 포텐셜 이론을 이용한 SPAR 구조물운동의 이론적 해법, 기존 의 실험방법과 PTV계측방법의 원리를 소개하고 제 3 장에서는 실제 실험을 통 한 데이터의 계측방법을 설명하며, 제 4 장에서는 두 가지 실험으로부터 얻어진 실험 데이터의 비교를 통하여 대표적 해양구조물의 형태인 원통형 실린더에 대 한 PTV의 적용 가능성을 검토하고, 원통형 실린더 형상의 대표적 구조물인 SPAR의 운동 특성을 파악한다.

2. 이론

2.1 수치적 방법

부유식 해양구조물의 파에 대한 동적 응답 해석을 위해서는 환경하중의 정확 한 추정과 구조물의 동적 거동특성에 대한 신뢰성 있는 물리적 모델링이 필수적 이다. 일반적으로 수치적인 부유식 구조물의 파 응답 해석은 아래의 절차로서 수 행된다.

첫째, 해양파를 수많은 주기의 성분파가 중첩되어 있는 것으로 취급하는 선 형중첩원리(linear superposition principle)를 적용하여 물리적 모델링을 수행한 다. 이는 주로 파 진폭 에너지 스펙트럼(Wave amplitude energy spectrum)을 이용하여 수행한다.

둘째, 파가 부유구조물에 입사하여 산란됨으로써 발생하는 유체력과 부유체 운동에 의해 만들어지는 방사파에 의해 유기되는 유체력을 추정하는 물리적 모 델링을 적용한다. 이는 주로 특이점 분포법이나 경계요소법으로서 추정할 수 있 다.

셋째, 부유구조물의 동역학적 운동방정식 모델을 통하여 구조물의 파중 동적 응답 특성을 구해서, 각 성분파별로 응답을 추정하는 주파수 영역 모델 또는 불 규칙파중의 시간 영역에서의 거동을 직접 시뮬레이션하는 시간영역 해석모델을 사용한다.

부유식 구조물에 작용하는 파력은 크게 입사파의 주기와 동일한 선형 파강 제력과 성분파 주파수의 차이나 합으로 나타나는 비선형 파강제력으로 분류할 수 있다. 선형 파강제력은 구조물에 작용하여 변형과 운동을 유발하므로 운동응 답 및 구조해석에 있어 중요한 외력이다. 반면, 비선형 파강제력은 힘의 크기는 선형 파강제력에 비해 매우 작으나 계류식 부유구조물의 공진을 유발하는 장주 기 표류력, 합주파수 기진력(sum- frequency excitation)등으로 작용하므로 부 유식 해양구조물의 설계에 있어 반드시 고려되어야 하는 외력이다.

이와 같은 파강제력을 추정하는 방법으로 대표적인 것이 포텐셜 이론으로 선체 운동 분야에서 시작한 2차원 포텐셜 이론(Strip theory)을 비롯하여 3차원 포텐셜 이론이 사용되고 있다. 복잡한 기하학적 형상을 가지는 해양구조물은 컴 퓨터의 발달과 더불어서 현재에는 주로 3차원 포텐셜 이론이 사용되고 있다. 이 러한 포텐셜 이론을 적용한 대표적인 수치해법으로는 경계요소법, 유한요소법 등 이 있다. 포텐셜 이론은 파 하중 및 응답 추정에 있어서 가장 널리 쓰이는 이론 으로 유체의 성질은 비점성, 비압축성, 유동을 비회전성으로 가정한다.

이러한 가정 하에서 속도 포텐셜을 도입하고 이때 유체입자의 속도는 속도 포 텐셜의 공간좌표에 대한 미분치 로부터 구한다. 지배방정식은 연속방정식으로 식 (2.1)의 속도 포텐셜의 Laplace 방정식으로부터 구해진다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \tag{2.1}$$

전체 유동장에서의 유동은 유동장의 각 경계면에서의 조건을 만족시키는 경 계치문제를 정립하고 이의 해를 구함으로써 해석된다. 유동장에서의 경계치 문제 는 적미분방정식의 형태로 얻어지며 Green의 제2등식으로 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$C\Phi(\vec{x}) = \int \int_{s} \left\{ \frac{\partial \Phi(\vec{\xi})}{\partial n} G(\vec{x}, \vec{\xi}) - \Phi(\vec{\xi}) \frac{\partial G(\vec{x}, \vec{\xi})}{\partial n} \right\} dS$$
(2.2)

여기서, C는 solid angle로 field point (\dot{x}) 의 위치에 따라 (-4π) 의 값을 갖는다.

G(x, š)는 Green 함수로 Laplace 방정식을 만족하는 함수이다. 현재 설계 및 해석의 목적으로 널리 쓰이고 있는 것이 섭동법(perturbation method)에 근거한 선형 포텐셜 이론으로 입사파의 파장에 비해 파 진폭이 매우 작고, 유기 되는 유동변화 및 부유체의 운동진폭 또한 미소하다고 가정한다. 그러므로 전체

속도 포텐셜을 입사파, 산란, 방사 포텐셜의 선형합으로 표시할 수 있다. 또한, 조화운동을 가정하여 시간에 대해 분리하여 다음과 같이 표시한다.

$$\Phi = \phi_I + \phi_D + \phi_R \tag{2.3}$$

diffraction 포텐셜 ϕ_D 과 radiation 포텐셜 ϕ_j 은 각각 diffraction 문제 및 radiation 문제라 부르며, 파랑에 의한 힘(파 강제력) 또는 부체의 운동에 의해 부 체가 주변의 유체로부터 받는 반력(유체력)을 구하는 문제는 경계치 문제를 푸는 것으로 귀착된다. diffraction 문제와 radiation 문제를 비교해 보면 알 수 있듯이, 물체 표면에 있어서의 경계조건이 다를 뿐이므로, 해법의 과정은 거의 동일하다. 또 한 두 문제는 서로 밀접히 관련해 있고, 예를 들면 파 강제력은 Haskind의 식이라 는 관계식을 이용하는 것에 의해 radiation 포텐셜로부터 구해진다.

이와 같은 선형중첩에 의해 경계치문제를 산란문제(diffraction problem)와 방사문제(radiation problem)로 나누어 구하고, 선형 베르누이 방정식에 각 속도 포텐셜을 대입하여 압력을 구하여 침수표면적에 대해 적분함으로써 파기진력, 동 유체력 계수 등을 얻는다.

2.1.1 주파수영역 응답해석

불규칙파 중에서 SPAR구조물을 강체로 가정하여 SPAR에 작용하는 선형 및 비선형 파 강제력을 추정하기 위해 포텐셜 이론을 적용한다. 섭동법에 의한 전개 식을 2차항까지 취하여 경계치 문제의 해를 구하는 것으로써 입사파의 주기와 동일한 선형 파 강제력(1차 파 강제력)과 성분파 주파수의 차이나 합으로 나타나 는 비선형 파 강제력(2차 파 강제력)을 추정한다.

먼저 이론의 정식화를 위하여 Fig.2.1과 같이 정수면상에 원점 O를 가지고, Z축의 양의 방향이 상방으로 향하는 공간고정 좌표계 O-XYZ, 물체와 함 께 운동하는 물체고정 좌표계 $\hat{O}-\hat{X}\hat{YZ}$ 및 공간고정 좌표계와 평행한 물체고 정 좌표계 O' - X' Y' Z'를 사용한다. 섭동법을 적용하기 위하여 유속, 파고, 압력, 유체력, 물체의 운동 등을 미소 파라메타 ε 에 대해 전개할 수 있는 것으로 가정하면, O - X Y Z 좌표계로 표현되는 정수면상의 원점 O에서 평가된 부체 의 병진 변위벡터 $\{\Xi\} = \{\Xi_1 \Xi_2 \Xi_3\}^T$ 와 회전 변위벡터 $\{\Omega\} = \{\Omega_1 \Omega_2 \Omega_3\}^T$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\Xi\} = \{\Xi_{1} \quad \Xi_{2} \quad \Xi_{3}\}^{T}$$

$$= \epsilon \{\Xi_{1}^{(1)} \Xi_{2}^{(1)} \Xi_{3}^{(1)}\}^{T} + \epsilon^{2} \{\Xi_{1}^{(2)} \Xi_{2}^{(2)} \Xi_{3}^{(2)}\}^{T} + O(\epsilon^{3})$$

$$= \epsilon \{\Xi^{(1)}\} + \epsilon^{2} \{\Xi^{(2)}\} + O(\epsilon^{3})$$

$$\{\Omega\} = \{\Omega_{1} \quad \Omega_{2} \quad \Omega_{3}\}^{T}$$

$$= \epsilon \{\Omega_{1}^{(1)} \Omega_{2}^{(1)} \Omega_{3}^{(1)}\}^{T} + \epsilon^{2} \{\Omega_{1}^{(2)} \Omega_{2}^{(2)} \Omega_{3}^{(2)}\}^{T} + O(\epsilon^{3})$$

$$(2.4)$$

$$= \epsilon \left\{ \Omega^{(1)} \right\} + \epsilon^2 \left\{ \Omega^{(2)} \right\} + O(\epsilon^3)$$
(2.5)

여기서, $\{\Xi^{(1)}\}$ 와 $\{\Omega^{(1)}\}$ 는 각각 부체의 1차 병진 운동벡터와 회전 운동벡 터이고, $\{\Xi^{(2)}\}$ 와 $\{\Omega^{(2)}\}$ 는 각각 부체의 2차 병진 운동벡터와 회전 운동벡터이 다. 또, Φ 가 선형 편미분 방정식인 Laplace 방정식을 만족하므로, 각각 $\Phi^{(1)}$, $\Phi^{(2)}$ 등도 Laplace 방정식을 만족한다. 즉,

$$\nabla^{2} \Phi = 0$$

$$\nabla^{2} (\epsilon \Phi^{(1)} + \epsilon^{2} \Phi^{(2)} + \cdots) = 0$$

$$\nabla^{2} \Phi^{(1)} = 0 , \quad \nabla^{2} \Phi^{(2)} = 0 , \quad \cdots$$
(2.6)

하지만, 이 논문에서는 선형영역만을 고려하므로, 2차성분인 비선형 항은 고려 하지 않는다.



Fig. 2.1 Coordinate Systems

2.1.1.1 경계치 문제와 유체력

자유표면 경계조건과 물체표면 경계조건 이외에 해저 경계조건 및 무한원방 경계조건을 만족하도록 지배방정식인 Laplace 방정식의 해를 구하는 것에 의해 속도 포텐셜을 구할 수 있으며, 경계치 문제로 분리할 수 있다. 경계치문제는 3 차원 특이점 분포법을 이용함으로써 부유식 해양구조물에 대해 신뢰성 있는 해 가 구해지고 있다.

앞 절에서 기술한 바와 같이, 지배방정식은 연속방정식으로 식(2.1)의 속도 포텐셜의 Laplace 방정식으로 표현된다.

$$\nabla^2 \Phi = 0 \tag{2.1}$$

Laplace 방정식의 해를 구하기 위해서는 전체 유동장에서의 유동은 유동장 의 각 경계면에서의 조건을 만족시키는 경계치문제를 정립하고 이의 해를 구함 으로써 해석된다.

(radiation 경계치 문제)

$$\nabla^2 \phi_{jk} = 0 \qquad \qquad \text{in } \Omega \tag{2.7}$$

$$-\omega_k^2 \phi_{jk} + g(\phi_{jk})_Z = 0 \qquad \text{on } Z = 0 \tag{2.8}$$

$$(\phi_{jk})_n = \hat{n}_j$$
 on S_m (2.9)

$$(\phi_{jk})_n = (\phi_{jk})_Z = 0$$
 on S_B (2.10)

$$\lim_{R \to \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi_{jk}}{\partial R} - i \, k \, \phi_{jk} \right) = 0 \qquad \text{on } S_R \tag{2.11}$$

(diffraction 경계치 문제)

$$\nabla^2 \phi_{Dk} = 0 \qquad \qquad \text{in } \Omega \tag{2.12}$$

$$-\omega_k^2 \phi_{Dk} + g(\phi_{Dk})_Z = 0 \qquad \text{on } Z = 0 \qquad (2.13)$$

$$(\phi_{Dk})_n = -(\phi_{Ik})_n \qquad \text{on } S_m \qquad (2.14)$$

$$(\phi_{Dk})_n = (\phi_{Dk})_Z = 0$$
 on S_B (2.15)

$$\lim_{R \to \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi_{Dk}}{\partial R} - i \, k \, \phi_{Dk} \right) = 0 \qquad \text{on } S_R \tag{2.16}$$

3차원 특이점 분포법을 이용하여 임의 형상의 물체에 작용하는 유체력을 산정 하고, 이 유체력을 적용하여 운동 응답을 계산하는 방법을 이용한다.

대상으로 하는 유체영역에서는 이상유체로 비점성, 비회전이라고 하면 속도 포 텐셜을 정의할 수 있고, 이러한 유장에서의 속도는 스칼라함수인 속도 포텐셜의 그래디언트로 표현된다.

$$\vec{v} = \nabla \Phi$$

$$\nabla = \frac{\partial}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial}{\partial z}\vec{k}$$
(2.17)

속도벡터 $\overrightarrow{v} = (v_x, v_y, v_z)$ 의 성분은 각각 다음과 같이 된다.

$$v_x = \frac{\partial \phi}{\partial x}$$
, $v_y = \frac{\partial \phi}{\partial y}$, $v_z = \frac{\partial \phi}{\partial z}$ (2.18)

스칼라함수인 속도 포텐셜이 위치와 시간의 함수로서

$$\Phi = \Phi(x, y, z, t)$$

이고, 조화함수을 가정하여 시간항을 분리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = \phi e^{-i\omega t}$$

지배방정식인 Laplace 방정식은 선형 편미분방정식으로 포텐셜의 선형 중첩 이 가능하여, 전체 속도 포텐셜을 입사파, 산란, 방사 포텐셜의 합으로 표시할 수 있다.

$$\phi = i\omega\zeta_a(\phi_0 + \phi_d) - i\omega\sum_{j=1}^6 \phi_j X_j$$
(2.19)

 ϕ_0 와 ϕ_d 는 입사파의 단위 진폭에 대한 입사파 와 산란 포텐셜(diffraction potential), ϕ_j 는 6개 모드 단위 운동에 대한 방사 포텐셜(radiation potential)을 나타내고, ζ_a 는 입사파의 진폭, X_i 는 각 모드별 운동의 진폭을 나타낸다.

입사각이 θ 이고, 원주파수가 ω 인 규칙파의 수면 변위는

$$\eta = \zeta_a e^{i k (x \cos \theta + y \sin \theta) - i \omega t}$$
(2.20)

로 된다. 입사파의 경우도 아래 자유표면 조건을 만족하여

$$\eta = \frac{1}{g} \left. \frac{\partial \Phi_0}{\partial t} \right|_{z=0} \tag{2.21}$$

입사파의 속도 포텐셜은 다음과 같이 된다.

$$\Phi_0 = -i \frac{g \zeta_a}{\omega} e^{k z} e^{i k (x \cos \theta + y \sin \theta) - i \omega t}$$
(2.22)

주어진 유장에 있어서 Laplace 방정식을 만족하는 속도 포텐셜은 경계치 문제 를 푸는 것으로부터 얻어진다. 산란파 포텐셜은 diffraction 경계치문제, 그리고 방 사파 포텐셜은 radiation 경계치문제를 적용한다. 파랑에 의한 힘(파 강제력)과 부 체의 운동에 의해 부체가 주변의 유장변화로부터 받는 반력(유체력)을 구하는 문제 가 바로 경계치 문제를 푸는 것으로 귀착된다. diffraction 문제와 radiation 문제의 차이점은 물체 표면에 있어서의 경계조건이 다르다. radiation 문제에서 물체의 운 동을 병진운동과 회전운동으로 나누어 생각한다.

변위와 속도를

$$X_{j} = Re \left[X_{j} e^{-i\omega t} \right]$$

$$v_{j} = \frac{dX_{j}}{dt} = Re \left[-i\omega X_{j} e^{-i\omega t} \right]$$
(2.23)
(2.24)

와 같이 정의하면, 물체표면 경계조건은

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{n} \cdot \vec{v}$$

$$=v_x\frac{\partial x}{\partial n}+v_y\frac{\partial y}{\partial n}+v_z\frac{\partial z}{\partial n}$$
(2.25)

와 같이 주어진다. 이것을 각 운동 모드별로 나타내면 다음과 같이 된다.

1) 병진운동

$$j = 1 \qquad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -i\omega X_1 \frac{\partial x}{\partial n}$$

$$j = 2 \qquad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -i\omega X_2 \frac{\partial y}{\partial n}$$

$$j = 3 \qquad \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -i\omega X_3 \frac{\partial z}{\partial n}$$
(2.26)

2) 회전운동

$$|\vec{v}| = r \frac{dX_j}{dt}$$

 $j=4 v_x = 0$ $v_y = -|\vec{v}|\frac{z}{r} = -i\omega X_4 e^{-i\omega t} (-z)$ $v_z = |\vec{v}|\frac{y}{r} = -i\omega X_4 e^{-i\omega t} (y)$ $\frac{\partial \Phi}{\partial n} = -i\omega X_4 (-z\frac{\partial y}{\partial n} + y\frac{\partial z}{\partial n})$ $j=5 \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -i\omega X_5 (-x\frac{\partial z}{\partial n} + z\frac{\partial x}{\partial n})$ $j=6 \frac{\partial \Phi}{\partial n} = -i\omega X_6 (-y\frac{\partial x}{\partial n} + x\frac{\partial y}{\partial n})$ (2.27)

이상의 경계조건을 이용하여 경계치문제를 풀기 위해서, 물체표면에 source를 분 포하였을 때 유체영역 임의 점에서의 속도 포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi_i(p) = \frac{1}{4\pi} \iint_s \sigma_j(Q) G(P, Q) ds \qquad j = 1, 2, \ \cdots \ 6, d \tag{2.28}$$

여기서, G(P,Q)은 임의점 Q(x',y',z')에 단위 source특이점을 두었을 때, 점P(x,y,z)에서의 속도 포텐셜을 나타내는 Green 함수로, Rayleigh의 가상마찰 계수 μ 을 도입하여 다음과 같이 주어진다.

$$G(P,Q) = \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{g}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{0}^{+\infty} \frac{K e^{K(z+z') - iK(q-q')}}{(\frac{\mu}{2} + i\omega)^2 + gK} dK$$
(2.29)

단,
$$R_1 = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}$$

 $R_2 = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z + z')^2}$
 $q = x \cos \theta + y \sin \theta$
 $q = x' \cos \theta + y' \sin \theta$

2.1.1.2 파강제력

SPAR 구조물에 작용하는 파강제력과 모멘트는 섭동전개에 의해 얻어지는 1차 항을 취하여 1차 파강제력과 모멘트를 구할 수 있다.

포텐셜이 구해지면, 파강제력과 radiation 유체력이 구해진다. 우선 유장에서의 압력은 베르누이식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{P}{\rho} = -\frac{\partial\Phi}{\partial t} - \frac{1}{2}|\nabla\Phi|^2 - gz \tag{2.30}$$

여기서, 세 번째 항은 정수압이고, 두 번째 항은 입사파가 미소진폭이라는 가 정하에 비선형 항으로 무시하면 선형 동압을 나타내는 것은 다음과 같이 주어진 다.

$$P = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = i\omega\Phi \tag{2.31}$$

상기 선형 베르누이 방정식에 각 속도 포텐셜을 대입하여 압력을 구하여 Fig.2.3에 표시된 바와 같이, 침수표면에 대해 적분함으로써 파기진력, 동유체력 계수 등을 얻는다.

물체가 움직이지 않을 때의 유장은 입사파와 산란파로 형성되어 이들 포텐셜 의 합을 베르누이식에 대입하면 산란장에서의 압력을 얻는다.

$$P = i\omega\rho(\Phi_0 + \Phi_d) \tag{2.32}$$

위의 압력을 물체의 침수표면에 걸쳐 적분을 하면 파강제력, 즉 부유체를 운동 시키기 위한 기진력을 얻게 된다.

$$F_k = \int_s \int i\omega \rho(\phi_0 + \phi_d) n_j dS$$
(2.33)

radiation 유체력은 radiation 포텐셜로부터 다음과 같이 주어진다.

$$F_{kj} = -\int P_k n_j dS$$

= $-w\omega\rho \int_s \int_s \int \Phi_k n_j dS$
= $-i\omega\rho X_k e^{-i\omega t} \int_s \int \phi_k n_j dS$
= $-iw\rho X_k e^{-i\omega t} f_{kjc} + w\rho X_k e^{-i\omega t} f_{kjs}$
= $\rho f_{kjc} \frac{d}{dt} (X_k e^{-i\omega t}) - \frac{\rho}{w} f_{kjs} \frac{d^2}{dt^2} (X_k e^{-i\omega t})$ (2.34)

이것을 가속도에 비례하는 부가질량계수와 속도에 비례하는 조파감쇠계수로 나누어 표현하면

$$m_{kj} = -\frac{\rho}{\omega} Im \left\{ \iint_{S} \phi_{i} n_{j} dS \right\}$$

$$b_{kj} = \rho Re \left\{ \iint_{S} \phi_{i} n_{j} dS \right\}$$

$$(2.35)$$

$$(2.36)$$

와 같이 된다.



Fig. 2.2 Relationship between S and S_m

2.1.1.3 운동방정식

부체의 운동이 입사파의 주파수와 조화인 것으로 가정하고 있으므로, 어떤 임의의 운동 기준점의 좌표 (x_m, y_m, z_m) 주위의 운동 방정식은 다음과 같이 표 시된다.

$$\sum_{l=1}^{6} \left[-\omega^2 (M_{kl} + \mu_{kl}) - i \,\omega \,\nu_{kl} + (C_{kl} + C_{kl}') \right] U_l = F_k, \ \left(k = 1 \sim 6\right)$$
(2.37)

여기서, M_{kl} 은 부체의 관성력 계수, C_{kl} 은 정수압에 의한 복원력 계수, C_{kl} '은 계류계에 의한 복원력 계수이다. 부체의 관성력 계수를 구체적으로 표 시하면 다음과 같다.

$$M_{kk} = \ m \quad (k=1\sim3)$$

$$M_{15} = \ - \ m(Z_m - \ Z_G) \ , \ M_{16} = \ m(\ Y_m - \ Y_G)$$

$$\begin{split} &M_{24} = m(Z_m - Z_G) \quad , \ M_{26} = -m(X_m - X_G) \\ &M_{34} = -m(Y_m - Y_G) \; , \ M_{35} = m(X_m - X_G) \\ &M_{42} = M_{24} \quad , \ M_{43} = M_{34} \\ &M_{44} = I_{XX} + m(Y_m - Y_G)^2 + m(Z_m - Z_G)^2 \\ &M_{45} = -I_{XY} - m(X_m - X_G) \; (Y_m - Y_G) \\ &M_{46} = -I_{XZ} - m(X_m - X_G) \; (Z_m - Z_G) \\ &M_{51} = M_{15} \quad , \ M_{53} = M_{35} \quad , \ M_{54} = M_{45} \\ &M_{55} = I_{YY} + m(X_m - X_G)^2 + m(Z_m - Z_G)^2 \\ &M_{56} = -I_{YZ} - m(Y_m - Y_G) \; (Z_m - Z_G) \\ &M_{61} = M_{16} \quad , \ M_{62} = M_{26} \quad , \ M_{64} = M_{46} \quad , \ M_{65} = M_{56} \\ &M_{66} = I_{ZZ} + m(X_m - X_G)^2 + m(Y_m - Y_G)^2 \end{aligned} \tag{2.38}$$

여기서, (X_G, Y_G, Z_G) 는 부체의 무게중심, m은 부체의 질량이고, I는 관 성모멘트이다. 또, 정수압에 의한 복원력 계수는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{split} C_{33} &= \rho g \int_{A_W} dA \\ C_{34} &= \rho g \int_{A_W} (Y - Y_G) dA - \rho g (Y_m - Y_G) \int_{A_W} dA \\ C_{35} &= -\rho g \int_{A_W} (X - X_G) dA + \rho g (X_m - X_G) \int_{A_W} dA \end{split}$$

$$\begin{split} C_{44} &= \rho g V(Z_B - Z_G) + \rho g \int_{A_W} (Y - Y_G)^2 dA \\ &- 2\rho g (Y_m - Y_G) \int_{A_W} (Y - Y_G) dA + \rho g (Y_m - Y_G)^2 \int_{A_W} dA \\ C_{45} &= -\rho g \int_{A_W} (X - X_G) (Y - Y_G) dA + \rho g (X_m - X_G) \int_{A_W} (Y - Y_G) dA \\ &+ \rho g (Y_m - Y_G) \int_{A_W} (X - X_G) dA - \rho g (X_m - X_G) (Y_m - Y_G) \int_{A_W} dA \\ C_{46} &= -\rho g V(X_B - X_G) \\ C_{43} &= C_{34} \quad , \quad C_{53} &= C_{35} \quad , \quad C_{54} &= C_{45} \\ C_{55} &= \rho g V(Z_B - Z_G) + \rho g \int_{A_W} (X - X_G)^2 dA \\ &- 2\rho g (X_m - X_G) \int_{A_W} (X - X_G) dA + \rho g (X_m - X_G)^2 \int_{A_W} dA \\ C_{56} &= -\rho g V(Y_B - Y_G) \end{split}$$

$$(2.39)$$

상기 이외의 성분은 $C_{kl} = 0$ 이다.

여기서, $_V$ 는 배수용적, (X_B, Y_B, Z_B) 는 부체의 부력중심, $\int_{A_W} dA$ 는 수

선면적이다.

2.2 기존 계측법의 원리

구조물의 응답을 계측하기 위하여 구조물의 상단부 수직선상에 위치하는 계측 점 두 곳에 적외선 발광 다이오드(LED) 타겟을 부착하고 수광(light-receiving) 요소로써 반도체 위치 감광장치(PSD: semiconductor position sensitive detector)를 사용하는 광정위치계측장치(light spot position detector)를 이용해 X,Y방향의 위치 정보를 얻는다. 이렇게 계측된 데이터는 Fig.2.2에 보인바와 같 이 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) 과 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) 와의 관계로부터 무개중심의 위치 (GX, GY)를 구하여 각 모드별 운동응답을 구할 수 있다.

$$PITCH: \quad \theta = \tan^{-1} \frac{Y_2 - y_1}{X_2 - x_1}$$
(2.40)

$$SURGE: \quad x = X_1 - (Y_1 \times \sin \theta)$$
(2.41)

$$HEAVE: \quad y = Y_1 - (Y_1 \times \cos \theta) \tag{2.42}$$





2.3 PTV 계측법의 원리

입자의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간간격동안 이 동한 미소 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉 질점역학에서와 마찬가지 로 임의의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터변위의 관계로부터 구할 수 있다. 기본원리는 간단하나 Δx / Δt를 실제의 유동속도에 근사시키려면 이동변위가 충분히 작아야 한다. 다시 말하면 입자가 그리는 궤적은 직선성과 등간격성이 보 장되어야 한다.

유동장에 추종성(traceability)이 우수한 입자를 분포시키고 이들 입자의 순시 적인 위치를 미소 시간간격을 두고 기록한 다음 각각의 입자의 변위를 계산하면 되나 수동의 인위적인 방법으로서는 정도 및 처리능력 등의 문제가 발생한다. 이 와 같은 문제점을 해결하기 위하여 대용량의 고속처리능력을 갖는 컴퓨터를 활 용하면 된다.

2.3.1 표정요소의 정의 및 계산

카메라를 이용하여 3차원 공간을 정량적으로 인식하기 위해서는 먼저 2대 이 상의 카메라와 각각의 카메라에 대한 정보가 필요하다. 이러한 카메라 정보와 카 메라로부터 얻은 영상은 카메라 중심점에 대한 투영의 관계가 된다. 이러한 원리 로부터 Kobayasi et al.(1989,1990,1991)과 Dho et al.(1991,1995,1997, 1998, 1999)등은 외부요소($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \psi, \chi$)와 내부요소(c, x_0, y_0, k_1, k_2)등 11개 요소를 가지는 관측방정식을 사용했다.

그러나, 이러한 표정요소는 카메라 정보를 구할 때 복잡한 여러 가지 과정을 거쳐야 했다. 또한, Multi-frame PTV 방법처럼 2차원 속도 벡터를 찾고, 동일 입자에 대한 3차원 공간을 계산하는 방식이나, 1-Frame 3-D PTV 방법처럼 먼 저 3차원 좌표를 결정한 다음 3차원 속도 벡터를 결정하는 방식에는 적합하지 만, 본 연구에서 사용하는 유전알고리즘은 시간과 공간을 동시에 찾는 방법이므 로 그대로 적용하기가 곤란하였다. 따라서 본 연구에서의 외부요소 $(dis, \alpha, \beta, \chi, m_{x_1}, m_y)$ 와 내부요소 $(c_{x_1}, c_{y_1}, k_1, k_2)$ 등 10개의 요소를 정의하였다.

Fig.2.4는 절대 좌표계(*X*, *Y*, *Z*)에 대한 사진좌표계(*x*, *y*, *z*)의 관계를 보여 주고 있다. 먼저 *dis*는 절대좌표계 *O*(0,0,0)점으로부터 카메라 중심까지의 거 리를 의미한다. 즉 *O*점으로부터 카메라중심까지의 거리를 말한다. 사진좌표계와 절대좌표계를 일치시키기 위해 *X*, *Y*, *Z*축에 대한 회전각을 각각 α, β, χ로 정의 하면, 축에 대한 회전행렬은 *M_M*= *M_ZM_YM_X*가 된다. 즉 *X*, *Y*(α, β)축 회전에 의해 사진좌표계의 *z*축과, 절대좌표계의 *Z*축이 평행하게 되며, 다시 *Z*(*χ*)축 회전에 의해 사진좌표계의 *x*, *y*축과, 절대좌표계의 *X*, *Y*축이 서로 평 행하게 된다. 이렇게 회전된 절대 좌표값을 (*X_m*, *Y_m*, *Z_m*)으로 표시한다.

여기서 사진좌표계의 *z*축과 절대좌표계 *Z*측을 일치시키기 위한 이동량을 $m_{x_{x}}m_{y}$ 로 표시한다. 이러한 과정을 거치면, Fig.2.5와 같은 사진좌표계의 *xy*평 면과 절대좌표계의 *X*, *Y*, *Z*사이의 투영관계가 성립된다. 즉 절대좌표계의 대상 정과 사진좌표계의 투영점이 일직선상에 있다는 공선조건으로부터 식 (2.43),(2.44)과 같은 관측방정식을 얻을 수 있다.

$$x = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} + \Delta x$$
(2.43)

$$y = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} + \Delta y$$
(2.44)

단, $c_{x,} c_{y}$: 이미지그래버에 따른 장방비의 차이를 고려한 초점거리 $\Delta x, \Delta y$: 이미지 중심으로부터의 거리에 따른 렌즈에 의한 굴절량

$$(\Delta x = \frac{x}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), \Delta y = \frac{y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4), r = \sqrt{x^2 + y^2})$$

각 카메라의 표정요소를 구하기 위해 이미 알고 있는 절대좌표값 (X_{i}, Y_{i}, Z_{i}) 과 사진좌표값 (x_{i}, y_{i})에 대해 관측방정식 F, G는 식 (2.45),(2.46)과 같이 표 시된다.

$$F = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (x - \Delta x) = 0$$
(2.45)

$$G = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (y - \Delta y) = 0$$
(2.46)

이러한 관측방정식 F, G는 비선형 연립방정식이므로 이를 풀기 위하여 초기 에 표정요소의 미지값을 가정하고 테일러 급수전개에 의한 최소자승법으로 보정 량을 구하여 수렴 할 때까지 근사치를 보정하는 수정 Gauss-Newton법을 사용 하였다.

2.3.2 위치 결정의 원리

카메라의 표정요소가 구해지면 사진좌표(*x*, *y*)와 절대좌표 (*X*, *Y*, *Z*)간에 식(2.47),(2.48)로부터 다음과 같은 관계식이 성립된다.

$$F \Rightarrow c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (x - \Delta x) = 0$$

$$\Rightarrow X_m = \frac{(x - \Delta x)}{c_x} (d - Z_m) + m_x$$
(2.47)

$$G \Rightarrow c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2 - Z_m}} - (y - \Delta y) = 0$$
(2.48)

$$\Rightarrow \quad Y_m = \ \frac{(y - \Delta y)}{c_y} (\ d - Z_m) + \ m_y$$

단,
$$d = \sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2}$$

여기서
$$d - Z_m = t$$
라 두면

$$X_{m} = \frac{x - \Delta x}{c_{x}} t + m_{x}$$

$$Y_{m} = \frac{y - \Delta y}{c_{y}} t + m_{y}$$

$$Z_{m} = d - t$$

$$(2.49)$$

이 된다. 회전변환행렬을 M_M 이라 두고, 역행렬을 B라 두면

$$\begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = M_M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_M^{-1} \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{bmatrix}$$
(2.50)

이므로 X, Y, Z에 관해 정리하면,

$$X = B_{11} X_m + B_{12} Y_m + B_{13} Z_m$$

$$\left(B_{11} \frac{s_x}{c_x} + B_{12} \frac{s_y}{c_y} - B_{13} \right) t + (B_{11} m_x + B_{12} m_y + B_{13} d)$$

$$Y = B_{21} X_m + B_{22} Y_m + B_{23} Z_m$$

$$\left(B_{21} \frac{s_x}{c_x} + B_{22} \frac{s_y}{c_y} - B_{23} \right) t + (B_{21} m_x + B_{22} m_y + B_{23} d)$$

$$Z = B_{31} X_m + B_{32} Y_m + B_{33} Z_m$$

$$(2.53)$$

$$\left(B_{31} \frac{s_x}{c_x} + B_{32} \frac{s_y}{c_y} - B_{33}\right)t + (B_{31} m_x + B_{32} m_y + B_{33}d)$$

단, $x_x = x - \Delta x, s_y = y - \Delta y$ 가 되며, 카메라의 위치 ($X_{0, Y_{0, Z_0}}$)는 다음과 같다.

$$X_{0} = B_{11} mx + B_{12} my + B_{33} d$$

$$Y_{0} = B_{21} mx + B_{22} my + B_{33} d$$

$$Z_{0} = B_{31} mx + B_{32} my + B_{33} d$$
(2.54)

이로부터 각 카메라에 대한 카메라중심(X_0, Y_0, Z_0)과 입자의 중심을 지나는 하나의 직선의 방정식을 구할 수 있으며, 하나의 입자에 대한 두 대 이상의 카메 라로부터 구해진 직선 방정식을 공선의 조건을 이용하여 구하게 된다.

즉 Fig.2.6에서와 같이 공간상의 입자 P점에 대해 각각의 카메라는

$$P(X, Y, Z) = P(a_1t + X_{0,} a_2t + Y_{0,} a_3t + Z_0)$$
(2.55)

와 같은 직선의 방정식을 가진다. 즉 두 대의 카메라로부터의 직선방정식은

$$A(X, Y, Z) = A(a_{11}t + b_{11}, a_{12}t + b_{12}, a_{13}t + b_{13})$$

$$B(X, Y, Z) = B(a_{21}t + b_{21}, a_{22}t + b_{22}, a_{23}t + b_{23})$$
(2.56)

와 같다. 이 두 직선에 대한 최단거리를 가지는 t, s는 다음과 같다.

$$s = \frac{\chi - \alpha \beta}{1 - \alpha^2}, \ t = \frac{\chi \alpha - \beta}{1 - \alpha^2}$$
(2.57)

E,
$$\alpha = a_{11}a_{21} + a_{12}a_{22} + a_{13}a_{23}$$

 $\beta = a_{11}(b_{11} - b_{21}) + a_{12}(b_{12} - b_{22}) - a_{13}(b_{13} - b_{23})$
 $\chi = a_{21}(b_{11} - b_{21}) + a_{22}(b_{12} - b_{22}) - a_{23}(b_{13} - b_{23})$

식(2.57)을 이용하여 t, s 가 구해지면 A(X, Y, Z), B(X, Y, Z)가 결정 되어 진다. 여기서 입자의 위치, P(X, Y, Z)는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X_P \\ Y_P \\ Z_P \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{bmatrix} X_A \\ Y_A \\ Z_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_B \\ Y_B \\ Z_B \end{bmatrix} \right\}$$
(2.58)

각 입자에 대해 위와 같은 과정을 거치면 대응하는 카메라간의 입자와 하나의 3차원 위치를 결정할 수 있게 된다.



Fig.2.4 Rotation by X, Y and Z axis



Fig.2.5 Relations between absolute and camera's coordinate system.



Fig.2.6 Definition of 3-D particle position

2.3.3 영상변환

카메라간의 사이각을 어느 정도 주어진다면, 정사각형의 대상물의 영상은 Fig.2.7과 같이 정사각형의 영상이 아니라 사다리꼴의 일그러진 영상을 얻게 된 다. 두 대의 카메라는 물체를 다른 각도에서 관찰하고 있는 것이므로 항상 동일 점을 나타내고 있는 것은 아니다. 따라서 기하학적 변환인 왜곡변환(Warping)을 이용하여 영상의 변환을 실시하였다.

기하학적인 변환은 영상 안에 있는 픽셀(Pixel)들의 위치를 바꾸는 역할을 수 행한다. 수학적 변환을 사용하여, 픽셀들은 입력 영상 안에 있는 공간좌표 (x_b, y_b) 로부터 출력 영상 안의 새로운 좌표값 (x_b, y_b) 으로 재배치된다. 컴퓨터 그래픽에서 쓰이는 동차 좌표 개념을 이용하면 모든 선형 변환을 행렬로 이용하 여 쓸 수 있다. 2차원 좌표 $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$ 를 $\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$ 로 표시하는 것이다. 왜곡변환을 설명하기 앞서 기본적인 2차원 영상변환의 평형이동, 회전, 신축을 나타내면,

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & T_y \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \qquad : \ 0 \ \mathsf{F}$$
 (2.59)

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} \quad : \ \vec{a} \notee$$
 (2.60)

 $\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_x & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} \qquad : 신축 \qquad (2.61)$

여기서 $T_{x,}$ T_{y} 은 이동값이고, heta값은 픽셀 위치(0,0)에 대하여 영상의 시계방 향의 회전각이며, $S_{x,}$ S_{y} 은 신축량이다. $(x_{b,}, y_{b})$ 는 입력 영상 좌표값 $(x_{a,}, y_{a})$ 는 출력 영상 좌표값이다. 그러나 이동, 회전, 신축 변환을 결합하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$x_{a} = (x \cos \theta + y \sin \theta) S_{x} + T_{x}$$

$$= (S_{x} \cos \theta) x + (S_{x} \sin \theta) y + T_{x}$$
(2.62)

$$y_a = (-x\cos\theta + y\sin\theta) S_{y+} T_y$$

$$= (-S_y\sin\theta) x + (S_y\cos\theta) y + T_y$$
(2,63)

더욱 일반화된 형태로는,

$$x_{a} = a_{2} x_{b+} a_{1} y_{b+} a_{0}$$

$$(2.64)$$

$$y_{a} = b_{a} x_{b+} b_{a} y_{b+} b_{a}$$

$$y_a = b_2 x_b + b_1 y_b + b_0$$

위의 방정식을 사용한 선형변환이며, 왜곡변환을 할 때는 x^2 , x^3 , y^2 , y^3 등과 같은 더 높은 차수 항을 첨가한 식이 된다. 그러나, 본 영상변환부분에서는 PTV 특성상 Z축으로 좁은 영역의 유동장을 계측하므로 1차 왜곡만을 고려한 이동, 회전, 신축을 고려한 변환을 하였다.

더 복잡한 기하학적 왜곡을 고려한다면 높은 차수의 왜곡을 수행해야 하므로 이 부분은 생략하기로 했다. 계측하고자 하는 Z=Omm 지점의 영상을 기준으로 다음의 식을 이용하여 2차원 영상변환을 행하였다.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix}$$
(2,65)

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix}$$
(2.67)

$$x_a = \frac{x^*}{z^*} = \frac{a_{11} x_b + a_{12} y_{b} + a_{13}}{a_{31} x_b + a_{32} y_b + 1}$$
(2.68)

$$y_a = \frac{y^*}{z^*} = \frac{a_{21} x_b + a_{22} y_b + a_{23}}{a_{31} x_b + a_{32} y_b + 1}$$
(2.69)

단, x_b , y_b : 변환전의 영상의 좌표 값 x_a , y_a : 변환후의 영상의 좌표 값

2차원 변환 행렬식(A)과 실제(Real)와 픽셀(Pixel)좌표의 행렬식을 나타낸 것이다.

8개의 미지수(변환 행렬 A)는 최소자승법으로 구하였다. 그리고 영상에 기하학 적 변환을 적용할 때 변환된 좌표가 정수 좌표로 직접 대응되지 못하는 경우가 있어서 본 연구에서는 대상 픽셀이 위치할 곳의 주변의 네 개의 픽셀들의 밝기 의 평균값을 넣는 방법인 쌍일차 보간법(Bilinear Interpolation)을 취하였다.

Fig.2.8 은 카메라의 표정요소를 이용하여 각각 Camera#1 과 Camera#2로 받아들인 영상을 이동, 회전, 신축 등의 과정을 거처 영상변환 되어지는 전체적 인 개략도이다.



Fig.2.7 Images of each camera for a regular square



Fig.2.8 Transformation between pixel and real coordinate planes

3. 실험방법 및 모형

3.1 실험 조건

실험에서 사용된 수조는 Fig.3.1에 나타낸 바와 같이 1×1.3×25m (B×D×L) 의 조파수조로 조파기는 피스톤 형식으로 파고 20cm까지 발생 가능하며, 양방향 조류발생장치도 겸비하고 있지만 금번 실험에서는 조류중의 실험은 제외하였다. 파고의 측정은 서보식 파고계를 이용하여 계측한다.

소파장치는 반사파의 영향을 최소화하기 위하여 하부에는 스폰지를 두고 상부 에는 그물형 소파재를 사용하였다. 그리고 발광다이오드로부터 나오는 빛을 감지 하는 감광센서는 각종 주변에서 발생하는 반사빛에 민감하므로 수조의 반대 벽 면에 흡광을 위한 종이재를 부착하여 반사빛을 최소화하였다.



Fig. 3.1 2 dimensional ocean engineering basin

3.2 모형

구조물의 운동 측정을 위해서는 타겟의 부착을 위하여 모형을 제작하였으며, Table 3.1은 SPAR 모형에 대한 각각의 제원을 나타내었다.

계류라인의 부착 지점은 무게중심점 주위로 결정하였고, 이에 대한 설치개념

도를 Fig.3.2에 나타내었다. 단 본 실험에 사용한 계류라인은 선형 스프링상수를 가지는 스프링을 사용하였으며 스프링상수는 0.60929 Kgf/mm이며, 초기 장력은 0.9913 kgf이다.

| Designa | tion | Unit | Model (classic spar) |
|------------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| Length overall L | | т | 0.11450 |
| Breadth B | | т | 0.11450 |
| Draft | Т | т | 0.53368 |
| Displaceme | ent 🛆 | m^3 | 0.00550 |
| Center of | VCG | т | 0.28500 |
| Gravity | L <i>CG</i> | т | 0.28500 |
| Center of | VCB | т | 0.26700 |
| Buoyancy | L <i>C</i> B | т | 0.26700 |
| Metercentric | $GM_{\rm L}$ | т | 0.01940 |
| height | GM _T | т | 0.01940 |
| | I _{XX} | $Kg \cdot m^2$ | 0.01999 |
| Mass moment of | I _{YY} | $\mathrm{Kg} \cdot m^2$ | 0.01999 |
| mertia | I _{ZZ} | $\mathrm{Kg} \cdot m^2$ | 0.00074 |
| | C 33 | | 10.29680 |
| Coefficient of | C 44 | | 0.10650 |
| Restoring Force | C_{55} | | 0.10650 |

Table 3.1 Principal Dimensions & Particulars of Models

3.3 실험 방법

3.3.1 기존계측법에 의한 실험

각종 계측기기들은 Fig.3.2, 3.3에 나타낸 바와 같이 배치하였고, 정도 높은 실 험 데이터의 계측을 위해 반사파의 영향을 최소화하고 선형적인 입사파의 구현 이 가능한 해양공학 수조의 중앙부에 모형을 설치하여 제반 실험을 수행하였다.



Fig. 3.2 Configuration of Model Installation (Longitudinal section)



Fig. 3.3 Configuration of Model Installation (Transverse section)

3.3.1.1 기존계측법의 Calibration

실험을 위한 교정과정은 Fig.3.4와 3.5에 나타낸 바와 같이, LED를 좌우, 상하 로 각각 2cm씩 이동시키며 감광장치에서 발생하는 전압을 측정하여 단위 길이 당의 전압을 측정하였다.

교정과정에서 이용되는 LED와 감광장치 사이의 거리는 실제 실험에서 사용되는 거리와 같아야 한다.



Fig.3.4 Calibration procedure of traditional detecting method



Fig.3.5 Calibration procedure of LED moving

3.3.1.2 감광장치(PSD)

기존 계측법에 의한 구조물 운동계측장비(PSD)의 사양은 Table 3.2, Fig3.6과 같고, LED와 감광장치 사이의 거리는 교정 실험 시 사용된 거리와 같아야 한다. Fig.3.7과 3.8은 실제로 설치된 감광장치와 구조물에 부착된 LED를 보여주고 있다.

| Specification | |
|--|---|
| Sensor | Semiconductor position sensitive detector(PSD) |
| Effective Photocathode size | 10mm x 10mm |
| Sampling frequency internal mode | 300Hz (Standard) |
| Recommended measurement light volume Level of light volume(Σ) | 4 ~ 8 |

Table 3.2 Specification of PSD



Fig.3.6 Semiconductor position sensitive detector



Fig.3.7 The real Image of LED and SPAR



Fig. 3.8 The real image of conventional method

3.3.2 PTV 계측법에 의한 실험

각종 계측기기들은 Fig.3.9에 나타낸 바와 같이 배치하였고, 나머지 제반요건 은 기존계측법에 의한 실험과 같다.





3.3.2.1 PTV 계측법의 Calibration

Fig.3.10에 보이는 교정기(가로, 세로 각각 300mm)를 사용하여 가상 및 실제 에 대한 교정작업을 수행하였다. 정확한 3차원 정보를 얻기 위해 Fig.3.11처럼 교정기를 수직(Z축 방향)으로 20mm 간격으로 이동하면서 계측하였다. 얻어진 영상으로부터 표정요소를 가지는 관측방정식을 이용하여 카메라 정보를 구하였 다.

Fig.3.12의 최상단 그림은 Camera 1&2로 부터의 영상으로부터 얻어진 image(Fig.3.12의 하단)를 두 카메라 사이의 각을 이용하여 2차원 평면상으로 mapping한 이미지를 보여주고 있다.



Fig.3.10 Picture of Calibrator



Fig.3.11 Virtual image for camera calibration



Fig.3.12 Process transformation between pixel and real coordinate calibrator

3.3.2.2 PTV용 카메라

PTV 계측법에 의한 구조물 운동계측장비(Camera 1 &2) 사양은 Table 3.3, Fig3.11과 같다.

Fig.3.12와 3.13은 실제로 설치된 Camera 1&2와 구조물에 부착된 Particle을 보여주고 있다.

| Specification | |
|---------------|--|
| Model | FASTCAM-X 1280PCI |
| CCD | 1280 x 1024 mega-pixel sesolution up to 500 fps |
| Shutter speed | Electronic shutter to $7.8 \mu s$ |
| Records speed | Up to 16,000 fps |

Table 3.3 Specification of Camera 1&2



Fig.3.13 High Speed camera and image board



Fig.3.14 The real image of PTV Particle



Fig.3.15 The real image of PTV method

4. 결과 및 고찰

4.1 이론 계산에 의한 결과

4.1.1 SPAR 모델

이론계산은 특이점분포법을 적용하여 Diffraction Theory로 계산을 수행하였 다. 특이점분포법 계산을 위한 대상 모형은 145개의 요소와 151개의 절점 개수 로 모델링 되었다. 대상 모형은 직경 0.1145m, 흘수 0.54m의 특성을 가지고 있 다.

각 주파수에서의 계산된 파강제력에 대하여 무차원화 한 결과는 Fig.4.2와 Fig.4.3에 나타내었고, 수치적 방법에 의한 SPAR 구조물의 운동은 각주파수가 0.25부터 18까지 0.25의 간격으로 계산하였다.

4.1.2 특이점 분포법에 의한 파강제력과 운동응답



Fig.4.1 Wave Exciting Force and Moment



Fig.4.2 Wave Exciting Force and Moment from Haskind Relation

Fig4.1은 단위 진폭을 가지고 있는 입사파에 대한 포텐셜을 구해 파력을 구한 것이고, Fig4.2는 하스킨드(haskind) 관계에 의해 파력을 계산한 값이다.

Fig4.1, Fig4.2를 비교해 보면 특이점분포법을 적용하여 계산한 해는 잘 맞다 고 볼 수 있다. Fig.4.3~ Fig.4.5에서는 SPAR의 규칙과 중 운동응답에 대한 이 론 계산값을 나타내었다. 여기서 이론 계산값은 특이점분포법을 이용하여 계산된 유체력을 적용한 운동방정식의 해로부터 얻어진 값이다.







Fig.4.4 Predicted Heave Response of SPAR



Fig.4.5 Predicted Pitch Response of SPAR

4.2 기존 계측법에 의한 운동응답

적외선 발광 다이오드(LED)와 수과요소를 이용하는 기존계측법에 의한 SPAR 의 운동응답은 Fig.4.6 ~ Fig.4.10 에 나타내었고, 운동응답의 측정은 각 주파 수를 1.5부터 7.0까지 0.5 간격으로 총 4회에 걸쳐 계측하였다.

그래프에서 보여 지듯이 정성적으로 같은 경향을 보이고 있으나, 정량적으로는 다소 상이한 결과를 보이고 있다. 이러한 결과는 시계열로 계측된 운동응답의 평 균값을 도출하는 과정 중에 발생하는 휴먼에러와 각 실험시마다 발생할 수 있는 수조환경의 변화에 기인한다고 생각할 수 있다.



Fig.4.6 Detecting data of LED motion



Fig.4.7 Analyzed data of LED motion







Fig.4.9 Heave Response of SPAR



Fig.4.10 Pitch Response of SPAR

4.3 PTV 계측법에 의한 운동응답

카메라 CCD에 기록되는 질점의 추적을 통하여 구조물의 거동을 계측해낼 수 있는 PTV 계측법에 의한 SPAR의 운동응답은 Fig.4.15에 보여 진 각 Particle 의 순번에 따라서 Fig.4.16 ~ Fig.4.18에 나타내었고, 운동응답의 측정은 각 주 파수를 1.5부터 9.0까지 0.5 간격으로 계측하였다. Fig.4.11 ~ Fig.4.14는 각주 파수 3.5에서의 촬영된 두 카메라 CCD에 기록된 절점의 영상을 나타내었다.



Fig.4.11 The Image of Camera 1 at Time 1



Fig.4.12 The Image of Camera 2 at Time 1



Fig.4.13 The Image of Camera 1 at Time $\mathbf{2}$



Fig.4.14 The Image of Camera 2 at Time 2



Fig.4.15 Numbering of Points



Fig.4.16 Detecting motion of X direction



Fig.4.17 Detecting motion of Y direction



Fig.4.18 Detecting motion of Z direction

Fig.4.19 ~ Fig.4.21는 각 규칙파에서 계측된 구조물 운동의 평균진폭을 이용 하여 각주파수에 따른 각 운동(Surge, Heave, Pitch)의 RAO를 나타내었다.

PTV계측의 경우 하드웨어의 사양에 따라 기록시간이 결정되는 단점을 가지고 있어, 그 계측에 있어서 한계를 드러낸다.

운동응답의 계측 시 파랑이 충분히 발달한 후 SPAR의 운동이 일정한 운동을 시작하였을 때 계측해야 하므로, 수차례에 걸친 실험이 필요하다.



Fig.4.19 Surge response of SPAR









4.4 각 계측법에 의한 운동응답의 비교

Fig.4.22 ~ Fig.4.24에서는 SPAR의 규칙과 중 운동응답에 대한 이론계산과 각 실험값(기존계측법, PTV 계측법)을 비교하여 나타내었다. 여기서 이론 계산 값은 특이점분포법을 이용하여 계산된 유체력을 적용한 운동방정식의 해로부터 얻어진 값이다. Fig.4.22, Fig.4.24에서 보여주는 바와 같이 이론계산과 실험값은 많은 차이를 보이고 있다.



Fig. 4.22 Comparison between Measured and Calculated(Surge motion)



Fig. 4.23 Comparison between Measured and Calculated(Heave motion)



Fig. 4.24 Comparison between Measured and Calculated(Pitch motion)

Fig.4.22 ~ Fig.4.24에서 보여주는 바와 같이 기존계측법의 계측치와 PTV 계 측법에 의한 계측치는 대동소이한 결과를 보이나 이론계산과 실험값은 많은 차 이를 보이고 있다.

이는 이론계산에서 점성에 기인한 유체력과 Surge와 Pitch의 연성운동에 기인 하는 것으로 판단된다. 즉, Pitch의 복원모멘트는 부심과 무게중심, 거리에 관계 되는데 주어진 모형은 그 거리가 아주 적어 약간의 오차에 의해서도 복원모멘트 의 변화폭이 크게 되어 공진점이 이동하게 된다. 장대형 원통인 SPAR의 경우 그 차이가 더욱 크게 나타난다. 따라서 점성에 기인한 감쇠력과 부가관성모멘트 를 적절하게 고려함으로써 이론 계산값의 수정이 가능하리라 판단된다.

5. 결언

원통형 실린더 형상의 대표적인 구조물인 SPAR 거동의 측정방법에 대한 결과 를 정리하면 다음과 같다.

- 기존계측법과 PTV 계측법에 의한 구조물 운동의 계측치는 잘 맞고 있음을 알 수 있다.
- 해양구조물 운동 측정에 있어서 PTV 계측법은 기존의 계측방법을 대체할 수 있다고 판단된다.
- 기존계측법이 구조물에 계측장비를 설치하는 접촉식인데 반해 PTV 계측법
 은 비접촉식이므로, 좀 더 정확한 구조물 운동의 계측이 가능하다.
- 4. 비대칭 형상을 갖는 구조물의 운동측정에 있어서 3차원 PTV 계측법을 이용하면, 본 논문에서 보인 운동(Surge, Heave, Pitch)이외의 운동(Sway, Roll, Yaw) 계측에 있어서 매우 효율적인 계측법이 되리라 판단된다.
- 5. 원통형 구조물 운동의 예측에 있어서 이론계산과 실험치와 많은 차이를 보이는 것은 이론 계산이 점성에 기인하는 유체력과 Surge와 Pitch의 연성 운동에 의한 오차를 내포하고 있다.
- 6. 따라서 점성에 기인하는 감쇠력과 부가관성모멘트의 적절한 고려를 통하여 이론 계산값의 수정이 가능하리라 판단된다.

6. 참 고 문 헌

- [1] S. K. Chakrabarti.(1986). "Hydrodynamics of offshore struct ures"
- [2] 이 창 호.(1988). "不規則波中의 引張繫留拭 海洋構造物의 非線型 應答 解析"
- [3] 오 태 원.(2003). "Spar의 동적 거동에 대한 실험적 연구"
- [4] 小山健夫, 勝野正隆 and 前田久明 共著, "선체와 해양 구조물의 운동학", 연경 출판사, Chapter 3, 1990.
- [5] 성재용, 도덕희(2004) "PIV 속도장 추출 알고리즘에서의 오차 해석" Workshop on PIV Techniques and Standards
- [6] GYEONG-RAE CHO(2004) Improvement of Stereoscopic PIV and its application on the two types of impeller of multi-blade fan.
- [7] Fisher, F.H., Spiess, F.N.,1963. Flip floating instrument platform. Journal of the Acoustical Society of America 35(10), 1633 1644.
- [8] Halkyard, J.E.,1996. Status of spar platforms for deepwater production system Proceeding of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference 1, 262 272
- [9] Ran, Z., Kim, M.H., 1996. Non-linear coupled response of a tethered spar platform in waves. Proceeding of the Sixth international Offshore and Polar Engineering Conference 1
- [10] Jha, A.K., de Jong, P.R., Winsterstein, S.R., 1997. Motion of spar buoy in random seas: comparing predictions and model test results.

Proceedings of the Behavior of Offshore Structures. pp.333 347

- [11] Cao. P.,Zhang, J., 1996. Slow motion response of compliant offshore structures. Proceedings of the Sixth International Offshore and Polar Engineering Conference 1, 296 303
- [12] Fischer, F.J., Gopalkrishnan, R., 1998. Some observations on the heave behaviour of spar platforms. 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (OMAE98), pp.1 6
- [13] Ran, Z., Kim, M.H., Zhang, W.,1998. Coupled dynamic analysis of a moored spar in random waves and currents (time-domain vs. frequency-domain analysis). 17th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, (OMAE98)
- [14] M.J. Downie, J.M.R. Graham, C. Hall, A. Incecik, I.Nygaard, 2000. An experimental investigation of motion control devices for truss spars, Marine Structure 13(2000)75 90