

3차원 VOF법에 의한 주상구조물에 작용하는 파력과 파랑변형 해석

이상기* · 김창훈* · 김도삼** · 신동훈*

*한국해양대학교 대학원 토목환경공학과

**한국해양대학교 건설환경공학부 교수

Analysis of Wave Forces Acting on Vertical Cylinder and Wave Transformations by 3-Dimensional VOF Method

SANG-KI LEE*, CHANG-HOON KIM*, DO-SAM KIM** AND DONG-HOON SIN*

*Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate school, Korea Maritime University, Busan, Korea

**Division of Construction and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

KEY WORDS: Wave force 파력, Wave transformation 파랑변형, Navier-Stokes equation Navier-Stokes방정식, VOF method VOF법

ABSTRACT: Recently, as economy grow and population increase we need to develop our coastal area and make good use of it for various purposes. That's why large structures are being installed on the sea. Some samples are petroleum storage tanks, pier of sea bridges. These are large structures which have been installed at coastal area. When we design such vertical cylinder, we should avoid too much construction expense caused by excessive designing or by lack of sufficient design. In order to prevent excessive expenditure, it is important to correctly calculate the force of waves acting on structures and predict the wave transformation. In this study, apply to VOF method based on Navier-Stokes equation and then discussed that nonlinear wave force and wave transformation. A comparison between the numerical model and existing experimental results showed nice agreement among them.

1. 서 론

연안역을 중심으로한 경제성장과 인구증가에 따라 다양한 목적에 의한 연안공간의 개발 및 활용이 요구되고 있으며, 이로 인해 최근들어 대형해상구조물이 많이 설치되고 있는 추세에 있다. 연안역에 설치되는 대형구조물에는 원유저장탱크와 해상교량의 교각 등을 들 수 있으며, 이러한 대형주상구조물의 설계시 과대설계에 의한 건설비의 낭비와 과소설계에 따른 피해를 방지하기 위해서는 구조물에 작용하는 파력의 정확한 산정과 구조물에 의한 파랑변형의 예측은 매우 중요한 문제이다.

대구경의 단일원주구조물에 의한 선형파의 회절이론에 대한 해석하는 MacCamy and Fuchs(1954)에 의해 유도되었고, 임의형상의 단면을 갖는 복수연직주상구조물의 경우에 대한 많은 수치해법(예로, Isaacson(1978))이 제안되었다.

비선형파력에 관한 연구로서는 Radiation Potential과 Haskind법을 적용하여 2차오더의 파력을 계산하는 Molin(1979)을 위시한 연구와, 임의형상의 복수구조물에 작용하는 파력을 산정하는 연구가 많이 수행 되었으나, 2차오더의 회절산란포텐셜을 유도할 수 없기 때문에 비선형파랑변형을 구할 수 없는 단점이 있다. 2차오더의 회절산란포텐셜을 유도하고 있는 연구로서는 Green함수를 이용한 Kriebel(1990), Carrison(1979)

등의 연구가 수행되었으나 임의형상의 복수연직주상구조물로의 적용은 한계가 있다.

김도삼 등(1999)은 Hankel함수를 Green함수로 사용하는 경계적분법과 섭동전개법을 병용하는 수법을 확장·적용하여 임의형상의 복수연직주상구조물에 의한 비선형파랑변형과 비선형파력의 해석을 수행하였다.

그러나 이와 같이 포텐셜이론에 근거한 해석방법은 주상구조물간의 간섭에 의한 강비선형의 파랑뿐만 아니라 쇄파에 의한 구조물에 작용하는 파력의 산정에는 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 쇄파뿐만 아니라 구조물간 강비선형의 간섭효과 등을 보다 정도 높게 산정할 수 있는 Navier-Stokes방정식에 근거한 3차원 VOF법을 적용하여 구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형을 구조물의 상대 이격거리와 관련하여 논의한다.

2. 해석이론

2.1 기초방정식

유체를 비압축성의 점성유체로 가정하면, 본 연구의 기초방정식은 조파소스를 포함하는 연속방정식(1)과 Navier-Stokes운동방정식(2), (3), (4), 그리고 자유수면을 모의하기 위한 VOF함수의 이류방정식(5)로 구성된다.

이상기: 부산시 영도구 동삼동 한국해양대학교 해양과학기술대학관 239호 051-410-4941 007dltkdrl@naver.com

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = q^* \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \frac{\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial y} \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) - g - \beta w + \frac{\nu}{3} \frac{\partial q^*}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(Fu)}{\partial x} + \frac{\partial(Fv)}{\partial y} + \frac{\partial(Fw)}{\partial z} = Fq^* \quad (5)$$

여기서, $q^* = q(y, z, t) / \Delta x_s$ 로 조파위치 $x = x_s$ 에서의 유량밀도이며, $x \neq x_s$ 위치에서는 0으로 주어진다. 그리고 Δx_s 는 조파위치에서 x 축 방향의 격자폭이다. u, v, w 는 x, y, z 방향의 속도성분, t 는 시간, ρ 는 유체의 밀도, p 는 압력, ν 는 유체의 동점성계수, g 는 중력가속도, β 는 부가감쇠영역에서의 감쇠계수, F 는 $0 \leq F \leq 1$ 의 값을 갖는 VOF함수를 각각 나타낸다.

2.2 수치해석방법

본 연구에서는 연속방정식(1)과 운동방정식(2), (3), (4)를 엇갈린 격자(staggered mesh)를 이용하여 유한차분법으로 차분근사하여 수치계산을 수행하였다. 그리고 자유수면에서의 압력산정을 위한 수법으로 Two-step projection(Chorin, 1969)을 적용하였다. 이 방법은 SOLA-VOF(Hur, 2000; Kawasaki, 1998)와는 달리 자유수면에서의 압력경계조건 및 압력보간을 행하지 않으므로, 자유수면에서의 압력을 직접적으로 구할 수 있을 뿐만 아니라 해의 수렴성 및 계산시간의 단축에 매우 뛰어난 수법으로 알려져 있다(Lee, 2006). 그리고 계산과정에 나타나는 압력방정식(Poisson pressure equation)의 행렬 해법으로 ICCG법(Incomplete Cholesky Conjugate Gradient))을 적용했다. Two-step projection에 대한 보다 상세한 내용은 Lee(2006)를 참조하기 바란다.

3. 수치해석 결과

3.1 수치해석결과의 검증

3차원 파동장에 설치된 주상구조물과 파랑과의 비선형상호간섭에 대해 입사파고 $H = 3\text{cm}$, 입사주기 $T = 1.0\text{sec}$ 에 대한 Sanada(1998)의 실험치 및 수치해석결과를 사용하여 본

연구의 타당성을 검증한다. Fig. 1은 비교에 사용된 3차원 수치파동수로 및 주상구조물의 제원을 각각 나타낸다.

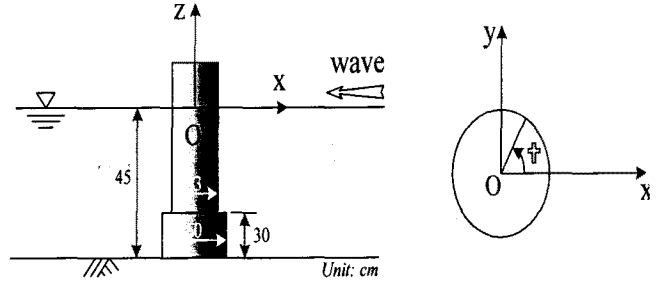
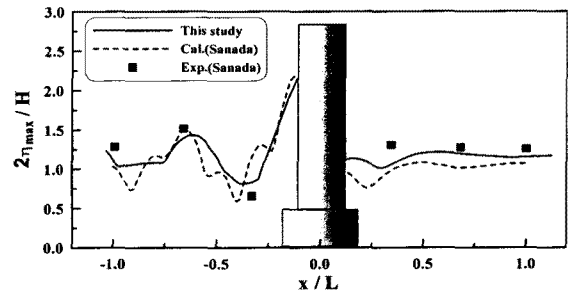
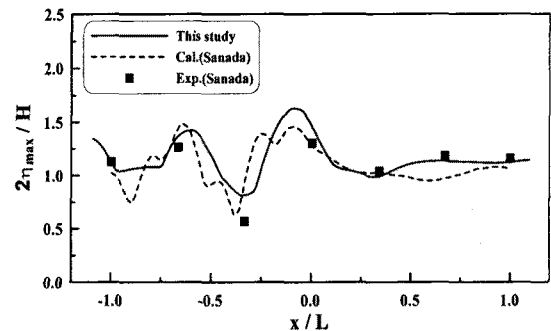


Fig. 1 Shape of a vertical cylinder.

Fig. 2는 Fig. 1(b)에 제시된 좌표계를 기준으로 x 축을 따른 $y = 0\text{cm}$, $y = 25\text{cm}$ 위치에서 계산된 최대수위값 η_{\max} 를 입사파의 파고 H 로 무차원화하여 나타낸 그림이다. 그리고 Fig. 3은 원주구조물 둘레에서의 무차원최대수위변화를 Sanada(1998)의 실험치 및 수치해석결과와 본 연구의 수치해석결과를 비교한 것이다. 그림에서 L 은 1차오더의 파장이다. 결과에 따르면 본 해석의 결과가 실험치와 매우 잘 일치하며, 또한 Sanada(1998)의 수치해석결과보다 실험치에 근접하고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 해석기법의 타당성이 확인된다.



(a) $y = 0\text{cm}$



(b) $y = 25\text{cm}$

Fig. 2 Spatial distributions of non-dimensional maximum water level $2\eta_{\max}/H$ along x -axis.

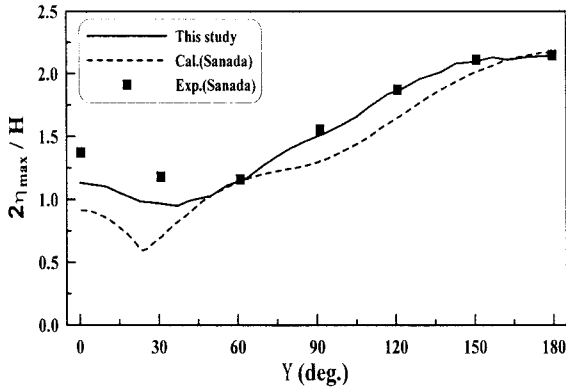


Fig. 3 Spatial distributions of non-dimensional maximum water level $2\eta_{\max}/H$ around a vertical cylinder.

3.2 파랑변형

(1) 단수연직주상구조물

Fig. 4는 $h/a = 1.0$ (h 는 수심, a 는 구조물의 반경), $H/a = 0.2$, $\alpha = 0^\circ$ (α 는 입사각도)인 경우에 있어서 구조물의 직경에 따른 단수연직주상구조물의 표면둘레에서 무차원최대수면상승고 ($2\eta_{\max}/H$)의 변화를 나타낸 결과이다. 구조물의 전면($\theta \approx 0^\circ$, 360°)에서 최대치오름고를 나타내고 있으며, 직경이 큰 구조물의 배후($\theta \approx 180^\circ$) 근처에서 회절파가 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 직경이 작은 구조물은 측면($\theta \approx 90^\circ$, 270°) 부근에서 회절파의 영향이 크게 나타나고 있다. 따라서 구조물의 직경에 의해 회절파의 영향이 상이하며, 그에 따른 치오름고의 변화에도 차이가 있음을 알 수 있다.

(2) 복수연직주상구조물

Fig. 5는 $h/a = 1.0$, $H/a = 0.2$, $\alpha = 0^\circ$ 인 경우 복수연직주상구조물에 대해 구조물 표면에서 무차원최대수면상승고 ($2\eta_{\max}/H$)를 나타낸 결과로 (a)는 $D/L = 0.278$ (D 는 구조물의 직경), (b)는 $D/L = 0.435$ 인 경우를 각각 나타낸다.

구조물 직경이 상대적으로 작은 (a)의 경우에 원주내측에서는 원주간의 거리가 가까울수록 최대치오름고가 크게 나타난다. 그리고 원주전면과 외측($\theta \approx 320^\circ \sim 140^\circ$)에서 구조물간 상대거리가 멀 때 최대치오름고가 크게 나타나며, 이는 원주간의 상대거리가 작은 경우 원주간의 상호간섭이 원주전면과 외측의 파랑변형에 영향을 준 결과로 판단된다.

구조물의 직경이 상대적으로 큰 (b)의 경우 원주의 외측에서는 원주간의 상대거리에 따른 최대치오름고 변화에 차이가 거의 없으며, 원주내측($\theta \approx 220^\circ \sim 360^\circ$)에서는 구조물간 상대거리가 먼 경우 최대치오름고가 크게 나타났다. 이는 앞서 언급한 원주간의 상대거리가 작은 경우 원주간의 상호간섭이 원주내측의 파랑변형에 영향을 준 결과로 판단되며, 또한 구조물의 상대거리가 먼 경우 원주간의 상호간섭의 감소로 회절산란파의 영향이 커져서 나타난 결과로 판단된다.

Fig. 5(a), (b)를 비교했을 때, 구조물의 직경이 큰 (b)의 경우가 원주에 의한 파의 회절영향이 탁월하여 원주표면에서 보다

복잡한 치오름 양상을 보이고 있다.

Fig. 6, 7은 $D/L = 0.278$, $D/L = 0.435$ 일 때 원주간의 무차원간격을 $e/D = 2.0$, $e/D = 4.0$ 으로 변화시킨 경우에 있어서 y 축을 따른 무차원파고분포를 나타낸 결과이다. 두 원주의 거리가 상대적으로 근접한 Fig. 6(a), 7(a)의 경우 원주내측의 파고가 원주외측의 파고보다 크게 나타난다. 이는 두 원주간의 간격이 가까울수록 원주간의 상호간섭이 커져 파랑변형에 영향을 준 결과이다.

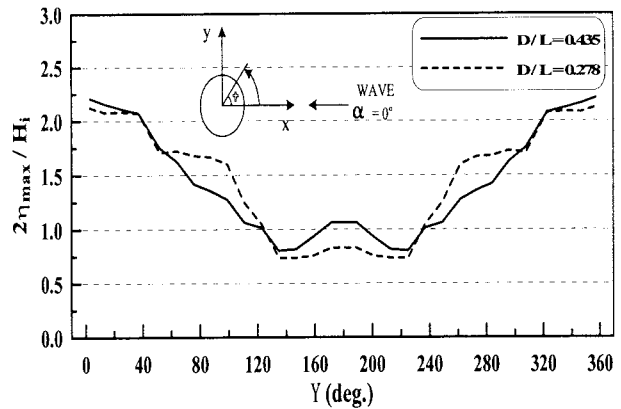
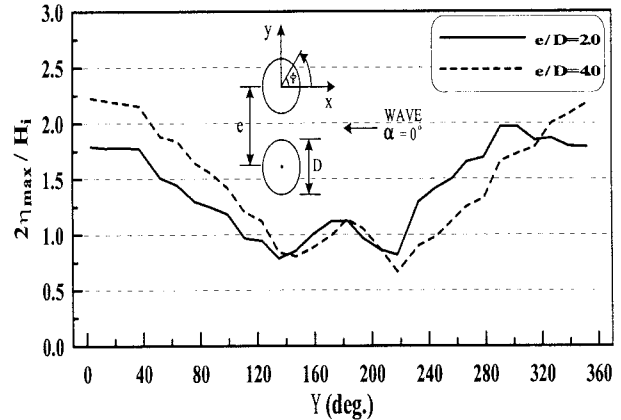
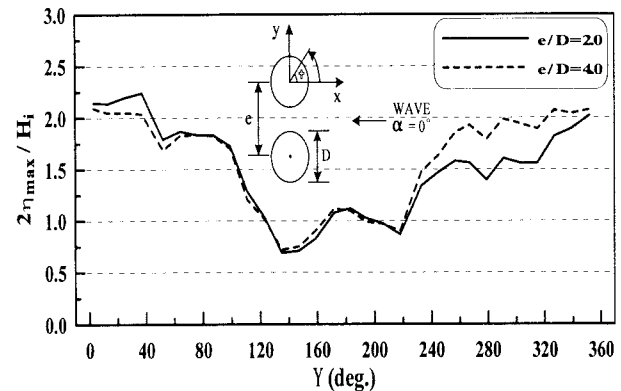


Fig. 4 Maximum wave runoff around a vertical cylinder.

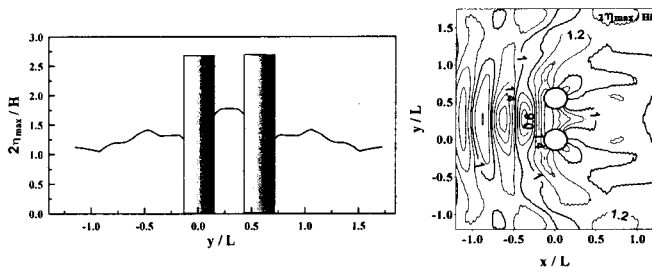


(a) $D/L = 0.278$

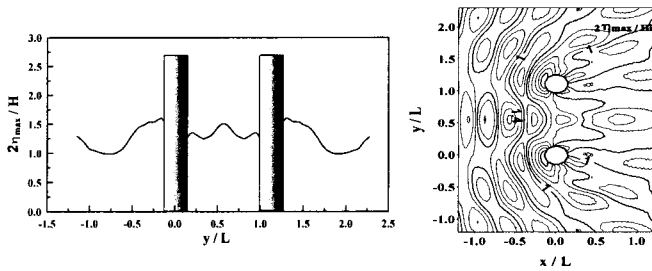


(b) $D/L = 0.435$

Fig. 5 Maximum wave runoff around a vertical cylinder.

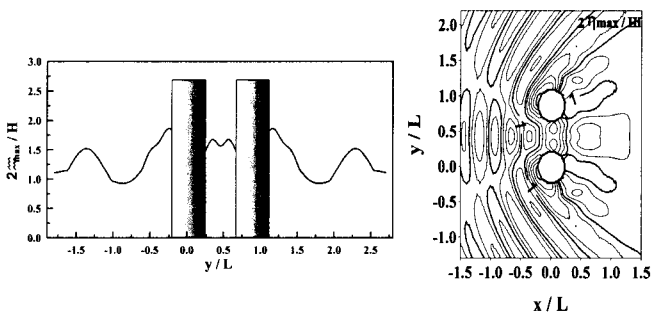


(a) $e/D = 2.0$

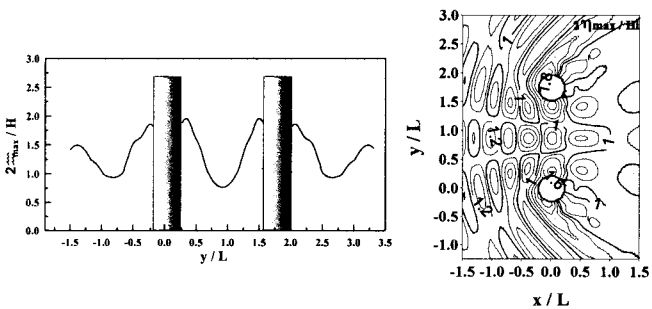


(b) $e/D = 4.0$

Fig. 6 Distribution of non-dimensional maximum water level and contours $2\eta_{\max}/H$ along y -axis. ($D/L = 0.278$, $y = 0$)



(a) $e/D = 2.0$



(b) $e/D = 4.0$

Fig. 7 Distribution of non-dimensional maximum water level and contours $2\eta_{\max}/H$ along y -axis. ($D/L = 0.435$, $y = 0$)

$D/L = 0.435$ 인 Fig. 7은 $D/L = 0.278$ 인 Fig. 6보다 원주에 의한 파의 회절영향이 보다 크게 나타나므로 원주주변에서 큰 파고분포를 나타내며, 또한 파고분포의 변화가 복잡하게 일어남을 알 수 있고, 또한 비선형 성분이 원주표면에서 가장 크게 나타나고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 VOF법을 적용하여 단수 및 복수연직주상구조물에서 비선형파랑변형의 특성을 검토하였다. 이로부터 얻어진 사항을 본 논문의 결론으로 하여 아래에 기술한다.

(1) 대형주상구조물에 의한 파랑변형과 작용파력해석에 3차원 VOF법을 처음으로 적용하였으며, 고정도의 해석결과를 얻을 수 있었다.

(2) 원주간의 상대거리에 따라 원주주위에서 최대처오름고는 원주간의 상호간섭과 회절산란파의 영향으로 위치에 따라 복잡한 양상을 나타낸다.

(3) 원주간의 간격이 가까울수록 원주내측의 파고가 외측보다 상대적으로 크게 나타난다. 이는 원주간의 상호간섭으로 인한 결과로 판단된다.

(4) 원주구조물의 규모가 클수록 회절산란파의 영향이 크게 나타나며, 이로 인해 구조물 주변에서 파의 비선형성이 크게 나타난다.

참 고 문 헌

김도삼, 신동훈 (1999), "임의형상단면의 복수연직주상구조물에 작용하는 비선형파력과 비선형파랑변형에 관한 연구", 대한토목학회논문집, 제19권, 제II-6호, pp 717-727.

Amsden, A.A. and Harlow, F.H. (1970). "A Simplified MAC Technique for Incompressible Fluid Flow Calculation", J. Comp. Phys., Elsevier, Vol. 6, pp 322-325.

Chorin, A.J. (1969). "On the convergence of discrete approximations of the Navier-Stokes equations", Math. Comp., Vol. 23, pp 341-353.

Garrison, C.J (1979). "Hydrodynamic Loading of Large Offshore Structure : Three Dimensional Source Distribution Methods", Numerical Method in Offshore Engineering., O. Zienkiewics, R.Lewis and K. Stagg eds., John Wiley Sons, pp 97-140.

Hur, D.S. (2000). "Breaking of multi-directional random waves over a submerged breakwater and wave forces on a structure on it", Doctoral thesis, Nagoya University, 177p.

Kawasaki, K. (1998). "Fundamental study on wave breaking and deformation process due to submerged structure", Doctoral thesis, Nagoya University, 186p.

Kriebel, D.L (1990). "Nonlinear Wave Interaction with Vertical Cylinder, part I : Diffraction Theory", Ocean Eng., Vol.

- 17, No. 4, pp345-377.
- Issacson, M.Q (1978). "Vertical Cylinders of Arbitrary Section in Wave", *Journal of Waterway, Coastal and Ocean Eng.*, Vol. 104, No. WW4, pp 309-322.
- Lee, K.H (2006). "A study on time domain analysis of nonlinear dynamic interaction among wave, currents and bed materials", Doctoral thesis, Nagoya University, 169p.
- MacCamy, R.C. and Fuchs, R.A (1954). "Wave Forces on Piles : a Diffraction", *Tech. Memo.*, No. 69, Beach Erosion Board, pp 1-17.
- Molin, B. (1979). "Second-Order Diffraction Loads upon Three-Dimensional Bodies", *Applied Ocean Res.*, Vol. 1, No. 4, pp 197-202.
- Sanada M. (1998). "A Study of Second-Approximation Analysis Results and Application for Nonlinear Diffraction Wave According to Large Coastal Structure", Doctoral thesis, Nagoya University, 223p.