
규칙파상에서 부유체의 움직임

Motion of Buoyant Objects on Regular Waves

조성현*, 방갑선**
홍익대학교 게임학부*, 홍익대학교 전자전산공학과**

Sung-Hyun Cho(scho@hongik.ac.kr)*, Kap-Sun Bang(bks6405@hotmail.com)**

요약

부유체가 등장하는 콘텐츠에서 부유체의 길이, 너비, 무게, 속도 등의 속성과 파도의 파장과 방향 등 파도 특성의 변화를 동적으로 표현할 수 있다면 콘텐츠 개발에 도움이 될 것이다. 따라서 본 논문에서는 조선해양공학에서 사용하는 부유체의 운동방정식을 이용하여 부유체의 상하운동이 부유체의 속성과 파도의 특성 변화에 따라서 어떻게 변화하는지 실험을 통하여 검증하였다.

본 논문의 연구 결과는 조선해양공학에 깊은 지식이 없더라도 콘텐츠 개발자가 부유체가 등장하는 콘텐츠를 개발하는데 도움이 될 것이다. 본 논문에서 부유체의 속도 및 파도의 파장과 방향이 동적으로 변할지라도 실시간으로 부유체의 움직임을 계산할 수 있음을 보여주었다. 향후에는 불규칙 파도에서 부유체가 어떻게 움직이는지 연구하고 이를 계산하는 부유체엔진을 개발하고자 한다.

■ 중심어 : | 부유체 | 규칙파 | 진동운동 | 상하운동 |

Abstract

When buoyant objects appear in contents, it is helpful in developing contents to express their attributes such as their length, width, weight, and velocity, and the magnitude and direction of regular waves dynamically. Therefore, we verify how the attributes of buoyant objects and the characteristics of waves cause the heaving motion of buoyant objects to change by using the equation of motion used in the naval architecture and ocean engineering.

Our research results may help contents developers to develop contents with buoyant objects even if they do not understand the naval architecture and ocean engineering well. We show that we can calculate the motion of buoyant objects dynamically even if the velocity of buoyant objects or the characteristics of waves change dynamically. In the future, we will study how buoyant objects move on the irregular waves, and develop engines for buoyant objects on the real sea.

■ keyword : | Buoyant Objects | Regular Waves | Oscillating Motion | Heaving |

1. 서론

현실적인 표현을 갈구하는 게이머들의 욕구에 의해

서 게임 기술은 급속히 발전하였으며, 질 높은 시각적 효과를 제공할 수 있는 그래픽 하드웨어 가속기의 발전으로 인하여 대부분의 가상세계는 현실적으로 표현할

* 본 논문은 홍익대학교 교수연구년기간(2003년 9월 ~ 2004년 8월)중 연구되었습니다.

접수번호 : #061229-005

접수일자 : 2006년 12월 29일

심사완료일 : 2007년 01월 26일

교신저자 : 조성현, e-mail : scho@hongik.ac.kr

수 있게 되었다. 그러나 콘텐츠에서 시각적 현실감은 중요한 요소이지만 시각적 현실감만으로는 현실 세계를 충분히 표현할 수 없으며, 물리적 현실감도 매우 중요한 요소이다[1].

물리적 현실감을 살리기 위해 물리기반 실시간 시뮬레이션 기술을 적용한 AGEIA사의 Novodex 물리엔진[2], Havok사의 Havok엔진[3] 등이 있지만, 이 엔진들은 바다에 떠 있는 부유체의 움직임을 표현하지 못하고 있다.

부유체의 움직임을 표현하려면 부유체의 운동특성을 이해하여야 한다. 그러나 콘텐츠 개발자가 부유체의 움직임을 이해한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 콘텐츠 개발자가 물리나 AI에 관한 깊은 지식이 없더라도 물리엔진이나 AI엔진을 이용하여 콘텐츠를 개발하는 것처럼 본 논문의 연구 결과는 부유체가 등장하는 콘텐츠 개발에 도움이 될 것이다[4-6]. 즉, 개발자가 직관적인 부유체의 길이, 너비, 무게와 파동의 파장과 파진폭의 정보만 제공하면 플레이어가 제어하는 부유체의 방향과 속도 정보를 이용하여 부유체의 움직임을 부유체엔진이 계산할 수 있게 된다.

부유체의 상하운동을 이해한다면 횡동요와 종동요도 이해할 수 있기 때문에, 본 논문에서는 부유체의 상하운동을 중심으로 연구한다. 규칙파에서 부유체의 상하운동을 계산하기 위하여 부유체의 운동방정식을 이용하여 부유체의 고유상하운동의 진폭을 찾아내고, 부유체의 상하운동은 파도와 고유상하운동의 차이로 표현된다. 본 논문에서는 부유체의 속성(길이, 너비, 무게, 속도) 및 파도 특성(파장, 파향)의 변화에 따라서 부유체의 상하운동이 어떻게 변화하는지 실험을 통하여 검증한다. 본 논문의 연구 결과는 부유체가 등장하는 콘텐츠를 개발하는데 있어 부유체의 외적인 요소를 설정하는데 도움을 줄 수 있을 것이며, 부유체의 속도 및 파도의 크기가 동적으로 변할 경우에도 부유체의 움직임을 부유체 엔진에서 동적으로 계산할 수 있음을 보여준다.

II. 부유체 운동의 종류 및 해석

파도에 의한 부유체의 운동은 병진운동과 회전운동

으로 나누어진다. [그림 1]에서 보는 바와 같이 병진운동에는 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 상하동요(Heave)가 있으며, 회전운동에는 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 선수동요(Yaw)가 있다[7]. 이들 중에 상하동요, 횡동요, 종동요만이 진동운동을 한다.

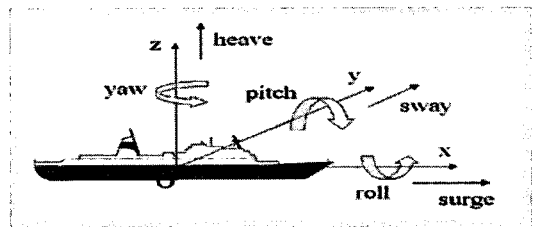


그림 1. 부유체 운동의 종류

부유체의 평형상태가 파도로 인하여 교란되었을 때, 상하동요, 횡동요, 종동요는 부유체의 평형상태가 복원되도록 움직이게 한다. 그래서 바다에 떠있는 부유체들은 파도에 의하여 평형을 잃게 되고, 평형상태를 유지하려는 복원력으로 인하여 거의 항상 진동운동을 한다.

그러나 전후동요, 좌우동요, 선수동요의 경우에는 기진력 또는 교란의 원인이 되는 모멘트가 반대방향으로부터 작용하지 않는 한 부유체는 원래 위치로 돌아가지 않는다. 이러한 운동은 게임 콘텐츠에서는 플레이어가 사용자 인터페이스를 통하여 조작하는 운동이기 때문에, 본 논문에서는 플레이어가 인터페이스를 통하여 조작할 수 없는 부유체의 진동운동에 초점을 맞추어 연구한다.

해상의 파도는 불규칙하지만, 불규칙파는 규칙파를 선형적으로 중첩하여 표시할 수 있으며, 이를 선형중첩의 원리(Principle of Linear Superposition)라고 한다. 해상에서 선박의 동요는 규칙파에서 운동특성을 해석하고, 그 결과들을 선형으로 중첩하여 표시할 수 있다. 선박의 동요는 다음의 절차에 따라 해석할 수 있다[7,8].

- (i) 선박의 선속과 모든 방향의 규칙파에 대한 선체의 운동전달함수를 구한다.
- (ii) 선속과 각 파향에 대한 운동전달함수와 파도 스펙트럼을 주파수별로 곱하여 운동응답 스펙트럼을 구한다.

III. 규칙파에서 부유체의 운동방정식

1. 부유체의 운동방정식

파도가 주기적으로 와서 부유체가 진동할 때, 일정 시간 동안 불규칙하게 운동하게 되는데 이를 과도운동(transient oscillation)이라고 한다. 그러나 감쇠현상 때문에 불규칙성은 곧 사라지고 규칙적인 진동을 하게 되는데, 이 운동을 강제감쇠진동(또는 강제진동)이라고 한다. 강제진동에서 4가지 힘은 관성력, 감쇠력, 복원력, 기진력이며, 이 힘들은 평형이 유지되어야 한다. 그래서 부유체의 강제진동 운동방정식은 다음과 같이 주어진다[7,8,9].

$$F_0 \cos w_e t - a\ddot{z} - b\dot{z} - cz = 0 \quad (1)$$

(i) 관성력 F_a 는

$$F_a = a\ddot{z} \quad (2)$$

여기서 a 는 겉보기 질량(선체 질량 + 부가 질량)이고, $\ddot{z} = \frac{d^2z}{dt^2}$ 은 가속도이다.

(ii) 감쇠력 F_b 는

$$F_b = b\dot{z} \quad (3)$$

여기서 b 는 감쇠계수이고, $\dot{z} = \frac{dz}{dt}$ 는 속도이다.

(iii) 복원력 F_c 는

$$F_c = cz \quad (4)$$

여기서 c 는 복원력 상수이고, z 는 부유체의 무게중심이다.

(iv) 기진력(exciting force) F 는

$$F = F_0 \cos w_e t \quad (5)$$

여기서 F_0 는 기진력의 진폭이고, w_e 는 기진력의 원진동수, t 는 시간이다.

2. 부유체의 상하운동

부유체의 상하운동을 계산하기 위해서는 파도의 곡선을 알아야 하며, 부유체의 고유상하운동(또는 고유운동)의 곡선을 계산하여 파도에 관한 부유체의 상대상하운동(또는 상하운동)을 다음과 같이 계산한다[7,8,9].

(i) 파도의 곡선은 다음과 같이 주어진다.

$$\zeta = \zeta_a \cos w_e t \quad (6)$$

(ii) 고유상하운동 곡선은 다음과 같이 주어진다.

$$Z = Z_a \cos(w_e t - \epsilon_2) \quad (7)$$

Z_a 는 규칙적인 진동운동을 하는 강제상하운동의 진폭이며, ϵ_2 는 기진력과 부유체의 고유상하운동의 위상차이다.

(iii) 부유체의 파도에 관한 상하운동의 진폭 S 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S &= \zeta - Z \\ &= \zeta_a [\cos w_e t - \frac{Z_a}{\zeta_a} \cos(w_e t - \epsilon_2)] \end{aligned} \quad (8)$$

3. 부유체의 횡동요와 종동요

부유체의 횡동요와 종동요는 부유체의 상하운동의 계산과정과 유사하기 때문에 본 논문에서는 상하동요 중심으로 기술한다.

IV. 실험 및 결과 분석

1. 입력데이터

본 논문의 실험을 위하여 조선해양공학에서 사용했던 자료를 참조하여 [표 1]과 같은 데이터를 사용하였다 [10]. 아래 표에서 부가질량의 비율과 물의 밀도는 콘텐츠를 개발할 때 상수로 처리할 수 있으며, 파도의 만남

1 고유상하운동은 고유진동운동의 하나로 일반적으로 진동체의 길이, 크기, 밀도 등의 속성이 주어지면 그 진동체에는 특정 진동수를 갖는 진동만이 허용된다. 이 진동을 고유진동이라 한다.

주기도 다른 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

표 1. 실험의 입력데이터

속 성	속 성 값
부유체의 길이 (L)	450 ft
부유체의 너비 (B)	70 ft
부가질량의 비율	0.80
부유체의 무게 (Δ)	12500 tons
파도의 만남주기 (ωe)	1.18 rad / sec
파장	150 ft
물의 밀도 (ρ)	1.99 lb*sec ² / ft ²
파진폭 (ζa)	10 ft

[그림 4]에서 Y축은 파도, 부유체의 고유운동, 부유체의 상하운동의 진폭이며, X축은 시간의 흐름이다. 파도의 곡선은 식(6)에 [표 1]에서의 파진폭과 파도의 만남 주기를 이용하여 계산한 결과이다.

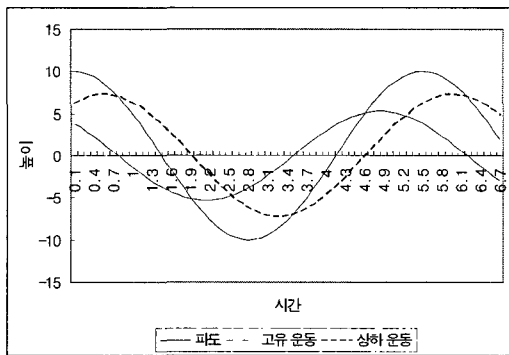


그림 4. 부유체의 상하운동 ([표 1]의 데이터)

부유체의 고유운동은 [표 1]의 속성값을 사용하여 계산하였으며, 부유체의 상하운동은 식(8)에 의하여 파도에서 부유체의 고유상하운동을 뺀 결과이다. 파도와 고유운동이 만나는 교점의 X좌표에서 부유체의 상하운동의 높이는 항상 0이 되고, 파도와 고유운동 사이에 위상차가 생기고 있음을 알 수 있다.

2. 실험 결과

2.1 파장의 영향

파장의 변화에 따른 부유체의 상하운동을 알아보기

위하여 [표 1]에서 파장 150ft를 450ft로 변화시켜 보았다. [그림 5]는 파장이 450ft일 때, 파도와 부유체의 고유운동과 상하운동을 표현한 그래프이다.

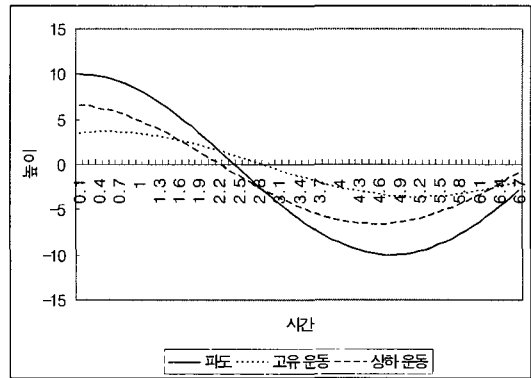


그림 5. 부유체의 상하운동 (파장=450ft)

부유체의 길이가 고정되어 있을 때, 파장이 길어짐에 따라 [그림 5]의 파도와 고유운동 사이의 위상차는 [그림 4]에서 보다 작아지고, 부유체의 상하운동은 파도의 움직임과 유사해진다는 것을 알 수 있다.

2.2 부유체 길이의 영향

부유체 길이 변화에 따른 부유체의 상하운동을 알아보기 위하여 [표 1]에서 부유체 길이를 450ft에서 300ft와 150ft로 변화시켜 부유체의 상하운동을 계산하였다.

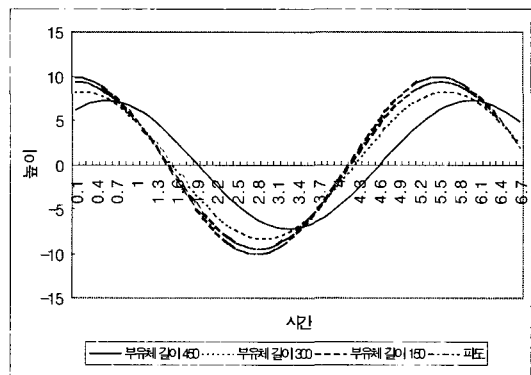


그림 6. 부유체의 길이에 따른 부유체의 상하운동

[그림 6]은 부유체의 길이 변화에 따른 부유체의 상하 운동과 파도의 곡선을 표현한 그래프이다. 부유체의 길이가 짧아질수록 부유체의 상하운동 그래프는 파도 그래프와 유사해진다. [그림 5]에서는 파장을 변화시켰으며, [그림 6]에서는 부유체의 길이를 변화시켰다. 두 가지 실험의 결과에서 파장의 길이가 부유체의 길이보다 길어질수록 부유체의 상하 운동은 파도의 움직임과 유사해짐을 알 수 있다.

2.3 부유체 너비의 영향

부유체의 너비의 변화에 따른 부유체의 상하운동을 알아보기 위하여 [표 1]에서 부유체의 너비를 70ft에서 140ft와 210ft로 변화시켜 부유체의 상하운동을 계산하였다.

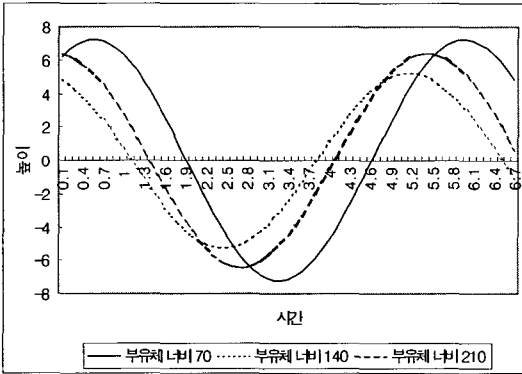


그림 7. 부유체의 너비에 따른 부유체의 상하운동

[그림 7]은 부유체의 너비 변화에 따른 부유체의 상하운동을 표현한 그래프이다. 일반적으로 부유체 너비(B)와 부유체 길이(L)의 비 B/L이 증가할수록 감쇠계수와 부유체의 방형계수²도 증가한다. 그러나 방형계수가 증가할수록 감쇠계수는 감소하는 현상 때문에, 부유체의 너비 변화에 따른 부유체의 상하운동은 예측하기가 쉽지 않다.

2.4 부유체 무게의 영향

부유체의 무게의 변화에 따른 부유체의 상하운동을 알아보기 위하여 [표 1]에서 부유체 무게를 12500ton에

서 8000ton과 4000ton으로 변화시켜 부유체의 상하운동을 계산하였다. [그림 8]은 부유체의 무게 변화에 따른 부유체의 상하운동을 표현한 그래프이다. 부유체의 무게가 부유체의 방형계수에 영향을 미치기 때문에 부유체의 무게 변화에 따른 부유체의 상하운동은 예측하기 힘들다.

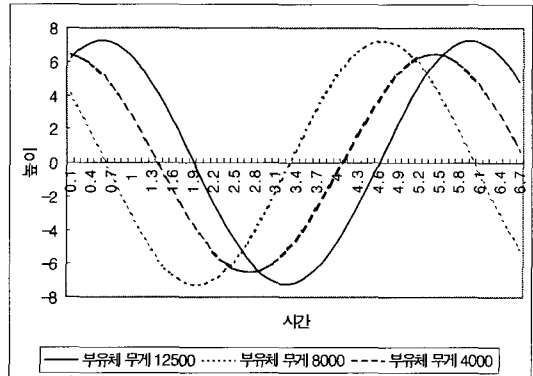


그림 8. 부유체의 무게에 따른 부유체의 상하운동

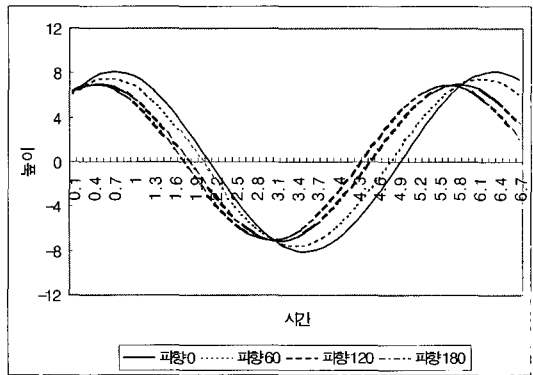


그림 9. 파향에 따른 부유체의 상하운동 (속도=1)

2.5 부유체 속도와 파향의 영향

부유체의 속도와 파향의 영향을 알아보기 위하여 [표 1]에서 파도의 만남주기를 변화시켰다. 파향이란 부유체의 진행방향을 기준으로 파도의 진행방향과의 각도를 의미한다. [그림 9]는 부유체의 속도가 1일 때, 파향의 변화에 따른 부유체의 상하운동 그래프이다. 속도가 2 방형계수는 임의의 수신까지의 배수용적과 길이, 폭, 흘수를 세 변으로 하는 직육면체 용적과의 비이다[6].

0이면 파향에 관계없이 동일한 결과가 나오기 때문에 본 실험에서는 최저속도를 1로 잡았다. 속도가 1인 경우 파도의 진행 방향과 부유체의 진행 방향의 각도, 즉 파향이 증가할수록 부유체의 상하운동의 주기가 점점 짧아지고 있다.

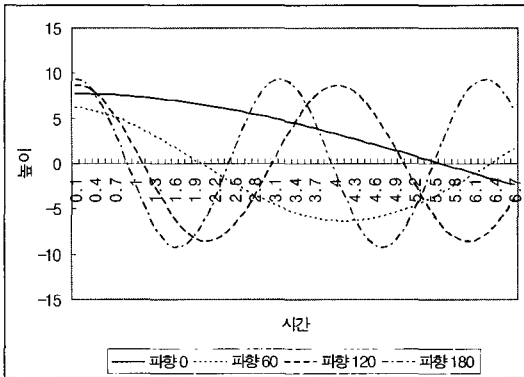


그림 10. 파향에 따른 부유체의 상하운동 (속도=20)

[그림 10]은 부유체의 속도가 20일 때, 파향의 변화에 따른 부유체의 상하운동 그래프이다. 파향에 따라 파도의 만남 주기가 변화하기 때문에 부유체의 고유운동이 바뀌게 되고, 이는 부유체의 상하운동도 바뀌게 됨을 의미한다. 파향의 값이 0°에서 180°로 증가할수록 부유체의 상하운동 그래프의 주기가 짧아지게 된다.

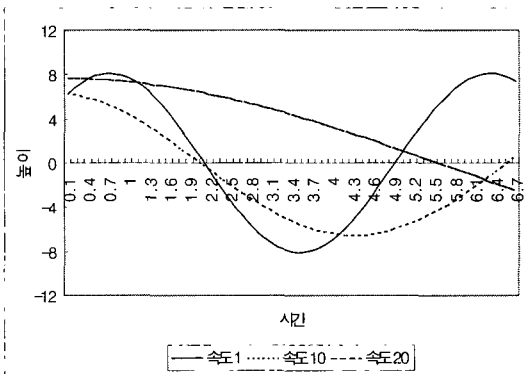


그림 11. 속도에 따른 부유체의 상하운동 (파향=0°)

[그림 11]은 파향이 0°일 때, 부유체의 속도 변화에 따른 부유체의 상하운동 그래프이다. 파도와 부유체의 진

행방향이 같기 때문에 부유체의 속도가 증가할수록 부유체의 상하운동 그래프의 주기는 길어지게 된다.

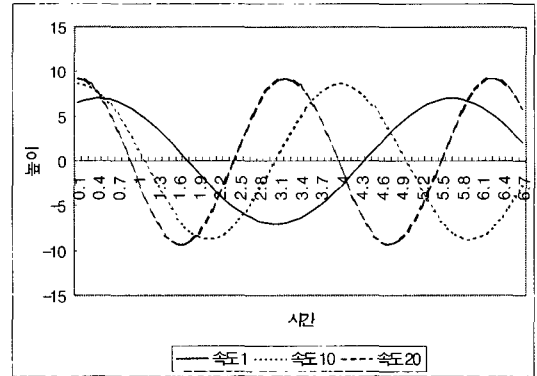


그림 12. 속도에 따른 부유체의 상하운동 (파향=180°)

[그림 12]는 파향이 180°일 때, 속도의 변화에 따른 부유체의 상하운동 그래프이다. 파도와 부유체의 진행 방향이 반대이기 때문에 부유체의 속도가 증가할수록 부유체의 상하운동 그래프의 주기는 짧아지며, 부유체의 상하운동의 진폭은 증가한다는 것을 알 수 있다.

3. 결과의 비교 분석

3.1 파장의 영향

[그림 4]와 [그림 5]에서 파도의 파장이 길어질수록 부유체의 상하운동의 주기가 길어짐을 알 수 있었다. 또한 파도와 부유체 길이의 변화에 따라 파도와 고유운동 사이의 위상차가 변하는 것을 확인하였다. 이는 부유체가 등장하는 콘텐츠를 개발할 때 파도의 크기가 동적으로 변할 경우 본 논문에서 보여준 바와 같이 부유체의 움직임을 실시간으로 계산할 수 있음을 보여준다.

3.2 부유체의 길이, 너비, 무게의 영향

[그림 6]에서 [그림 8]까지 부유체의 길이와 너비 그리고 무게에 따른 부유체의 상하운동을 살펴보았다. 부유체의 길이, 너비, 무게는 부유체의 운동방정식을 계산하는데 서로 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 이는 콘텐츠를 개발하는데 있어 부유체의 외적인 요소를 설정하는데 참고할 수 있음을 의미한다.

3.3 부유체 속도와 파향의 영향

[그림 9]와 [그림 10]에서 속도가 일정할 때에서 파향에 따라 부유체의 상하운동이 어떠한 특성을 가지고 있는지 살펴보았다. 파향이 0°에서 180°까지 증가할수록 부유체 상하운동의 주기는 짧아지게 되지만, 180°를 초과하면 부유체의 운동주기는 다시 길어진다.

[그림 11]과 [그림 12]는 부유체의 진행방향과 파도의 진행방향 사이의 각도가 일정할 때, 속도의 변화에 따른 부유체의 상하운동을 살펴보았다. [그림 11]에서 부유체의 속도가 증가할수록 부유체의 상하운동 주기도 증가한다. 이는 부유체의 진행방향과 파도의 진행방향이 서로 같기 때문이다. 그러나 [그림 12]에서는 부유체의 속도가 증가하면 오히려 부유체의 상하운동 주기는 감소한다. 부유체의 진행방향과 파도의 진행방향이 서로 반대방향이므로 만남주기가 짧아지게 되기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 조선해양공학에서 사용하는 부유체 운동의 특성을 이용하여 바다에 떠있는 부유체 상하운동의 계산에 관한 연구를 하였다. 이를 위해 규칙적인 파도에서 부유체 속성 및 파도 특성의 변화가 부유체 운동특성에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 통해 알아 보았다. 부유체의 속도와 파장파 파향의 변화에 따른 부유체의 운동을 연구하였으며, 이 결과는 부유체를 표현하는 콘텐츠를 개발할 때 부유체의 속도, 파장과 파향이 동적으로 변할 경우에도 부유체의 움직임을 계산할 수 있음을 의미한다. 또한 부유체의 길이, 너비, 무게를 변화시켜 부유체의 상하운동 특성을 살펴보았으며, 이 결과는 콘텐츠를 개발할 때 부유체의 외적인 요소를 설정하는데 도움을 줄 수 있을 것이다.

콘텐츠 개발자가 부유체의 움직임을 이해한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 그러나 콘텐츠 개발자가 물리나 AI에 관한 깊은 지식이 없더라도 물리엔진이나 AI엔진을 이용하여 콘텐츠를 개발하는 것처럼 본 논문의 연구 결과는 부유체가 등장하는 콘텐츠 개발에 도움이 될 것이다. 즉, 개발자가 부유체의 길이, 너비, 무게와 파장과

파진폭 등 직관적인 정보만 제공하면 플레이어가 제어하는 부유체의 방향과 속도 정보를 이용하여 부유체엔진이 부유체의 움직임을 계산할 수 있다. 본 논문의 연구 결과는 부유체 엔진 개발에 초석이 될 것이며, 향후에는 불규칙파도에서 부유체의 운동 특성이 어떻게 나타나는지 연구하고 이를 계산하는 부유체 엔진을 개발하고자 한다.

참고 문헌

- [1] D. H. Eberly, *Game Physics*, SciTech, 2004.
- [2] <http://www.ageia.com>
- [3] <http://www.havok.com>
- [4] 김동호, 오경수 역, *게임프로그래머를 위한 물리 모델링*, 사이텍미디어, 2005.
- [5] 황혁기 역, *생생한 게임 개발에 필요한 기본 물리*, 한빛미디어, 2002.
- [6] B. Schwab, *AI Game Engine Programming*, Charles River Media, 2004.
- [7] 임상전 역, *기본조선학*, 대한교과서주식회사, 1985.
- [8] 대한조선학회, *선박계산*, 동명사, 2001.
- [9] 이승건, *선박운동·조정론*, 부산대학교출판부, 2004.
- [10] <http://oceaneng.pknu.ac.kr/~gsoyon/ocu/20903.html>

저자 소개

조 성 현(Sung-Hyun Cho)

정희원



- 1978년 2월 : 서울대학교 계산통계학과 (이학사)
- 1980년 2월 : 서울대학교 계산통계학과 (이학석사)
- 1995년 8월 : UCLA 컴퓨터과학과 (이학박사)

• 1996년 ~ 현재 : 홍익대학교 게임소프트웨어학과 교수

<관심분야> : 게임프로그래밍, 게임그래픽스, 게임물리, 분산시스템

방 갑 선(Kap-Sun Bang)

준회원



- 2004년 2월 : 홍익대학교 컴퓨터
정보통신학과 졸업(공학사)
- 2007년 2월 : 홍익대학교 게임소
프트웨어학과 졸업(공학석사)

<관심분야> : 게임물리, 셰이더, 그래픽스