

# TMA 모델을 이용한 해양파 시뮬레이션 방법

이 남 경<sup>†</sup> · 백 낙 훈<sup>\*\*</sup> · 김 구 진<sup>\*\*\*</sup> · 유 관 우<sup>\*\*\*\*</sup>

## 요 약

컴퓨터 그래픽스 분야에서는 해양파(ocean waves)를 표현하기 위한 여러가지 방법들이 있지만, 완전한 해결책은 아직까지 제시되지 못하고 있다. 해양파는 여러가지 원인에 의해 생성되지만, 가장 지배적인 요소는 바람과 중력에 의한 표면 중력파(surface gravity waves)이다. 본 논문에서는 해양학 분야의 정밀한 해양파 모델에 기초하여, 실시간에 표면 중력파를 시뮬레이션하는 방법을 제시한다. 기존 연구들은 수심이 무한대라고 가정하는 Pierson-Moskowitz(PM) 모델[1]을 사용하여, 얇은 바다를시뮬레이션하기에는 무리가 따랐다. 본 논문에서는 좀더 정밀한 Texel-Marsen-Arsloe(TMA) 모델[2]을 사용하여 더욱 사실적인 해양파를 표현할 수 있다. TMA 모델을 분석한 후, 3차원 컴퓨터 그래픽스 프로그램들에서 사용할 수 있는 실제적인 구현 모델(implementation model)을 정립하였고, 이를 구현한 프로토타입 시스템은 펜티엄-4 1.6GHz PC들에서 초당 30프레임 이상을 표시할 수 있음을 보였다. 본 논문에서 제안하는 방법은 기존 연구들에 비해, (1) 사용자가 제어할 수 있는 매개변수들이 더욱 다양해짐으로써, 사용자 요구에 적합한 파형(wave shape)들을 다양하게 생성할 수 있고, (2) 정밀한 해양파 모델을 사용하여, 얇은 바다에서도 더욱 사실적인 파도를 표현할 수 있다.

**키워드 :** 컴퓨터 그래픽스 시뮬레이션, 해양파, TMA 모델, 실시간 시뮬레이션

## An Ocean Wave Simulation Method Using TMA Model

Nam-Kyung Lee<sup>†</sup> · Nakhoon Baek<sup>\*\*</sup> · Ku Jin Kim<sup>\*\*\*</sup> · Kwan Woo Ryu<sup>\*\*\*\*</sup>

## ABSTRACT

In the field of computer graphics, we have several research results to display the ocean waves on the screen, while we still not have a complete solution yet. Though ocean waves are constructed from a variety of sources, the dominant one is the surface gravity wave, which is generated by the gravity and the wind. In this paper, we present a real-time surface gravity wave simulation method, derived from a precise ocean wave model in the oceanography. There are research results based on the Pierson-Moskowitz(PM) model[1], which assumes infinite depth of water and thus shows some mismatches in the case of shallow seas. In this paper, we started from the Texel, Marsen and Arsloe(TMA) model[2], which is a more precise wave model and thus can be used to display more realistic ocean waves. We derived its implementation model for the graphics applications and our prototype implementation shows about 30 frames per second on the Intel Pentium 4 1.6GHz-based personal computer. Our major contributions to the computer graphics area will be (1) providing more user-controllable parameters to finally generate various wave shapes and (2) the improvement on the expression power of waves even in the shallow seas.

**Key Words :** Computer Graphics Simulation, Ocean Wave, TMA Model, Real-time Simulation

## 1. 서 론

자연 현상을 사실적으로 표현하는 것은 컴퓨터 게임, 컴퓨터 애니메이션 등 다양한 그래픽스 응용 분야들에서 사실성을 높여주는 중요한 요소들 중의 하나이다. 예를 들어, 3D 컴퓨터 게임의 경우, 게임 속 환경이 현실 세계의 현상들과 매우 유사하다면 사용자는 더욱 사실감을 느끼게 되고 게임

에 몰입하게 될 것이다. 본 연구는 이러한 자연 현상들 중에서도 해양파(ocean wave)를 다루고자 한다. 이 분야는 그래픽스 분야에서 기존의 연구 결과들이 나와 있지만, 아직까지는 완전한 해결책이 제시되지 못하고 있다.

해수면에서의 파도(wave)를 만들어 내는 요인들은 중력, 바람, 달의 인력, 지진, 파도의 반사, 배나 요트와 같은 인공물 등으로 다양하지만, 해수면의 형태를 결정하는 가장 큰 파형은 중력(gravity)과 해수면 부근의 바람(wind)이 만들어 내는 표면 중력파(surface gravity waves)이다. 표면 중력파는 해양학(oceanography)의 중요한 연구 과제들 중의 하나로, 다양한 수학적 모델들이 제시되어 있다. 이론적으로는 간단한 사인 파(sinusoidal wave)나 트로코이드 파(trochoidal

※ 이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (R04-2004-000-10099-0, R05-2004-000-12641-0)

<sup>†</sup> 준 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 박사과정

<sup>\*\*</sup> 정 회 원 : 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 조교수(교신저자)

<sup>\*\*\*</sup> 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 조교수

<sup>\*\*\*\*</sup> 정 회 원 : 경북대학교 컴퓨터공학과 교수

논문접수 : 2005년 4월 9일, 심사완료 : 2005년 6월 3일

wave)들을 합성하여 실제의 파열(wave train)을 모델링할 수 있지만, 해양학 분야의 표면 중력과 모델은 좀더 정확한 모델링이 가능하도록 여러 번의 수정을 거쳐왔다.

컴퓨터 그래픽스 분야에서의 해양파에 대한 연구들은 크게 유체 공학에 기초한 방법들[3~7]과 실제 해양파의 스펙트럼 모델에 기초한 방법들[8~11]이 있다. 최근에는 두 가지 방법을 절충한 하이브리드 방법들[12, 13]도 제시되고 있다. 이들은 경우에 따라서는 매우 사실적인 영상을 만들어 내기도 하지만, 아직까지는 계산량이 너무 많거나, 제한된 형태의 해수면만 표현할 수 있거나, 조절할 수 있는 매개변수가 다양하지 못하거나 하는 등의 문제점들을 가지고 있다.

본 논문에서는 해양학 분야에서 제시되었지만, 컴퓨터 그래픽스 분야에서는 아직 사용되지 않은 새로운 표면 중력과 모델을 사용하여, 기존에 제시되었던 하이브리드 접근 방법들에서의 문제점을 개선한 해양파 표현 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 특히 다음과 같은 특성을 가진다.

#### • 실시간 처리 가능

해수면을 표현하려는 응용 프로그램들은 대부분 넓은 면적의 바다를 표현하려고 하고, 일부 구역에서는 순항하는 배, 추락하는 비행기 등의 특별한 효과를 추가하고자 하는 경우가 많다. 제안하는 방법은 실시간에 표면 중력과 관련한 해수면을 표현할 수 있으므로, 이러한 요구들을 충족시킬 수 있다.

#### • 다양한 매개변수들

기존 방법들보다 더 많은 매개변수를 제공하여, 더 다양한 형태의 해수면을 표현할 수 있다. 바다의 깊이, 취송 거리(fetch length), 바람의 세기 등의 다양한 매개변수들이 제공되므로, 기존 방법들에서는 표현하기 힘들었던 차이를 표현하기에 적합하다. 예를 들어, 같은 풍속에 대해서도 깊은 바다와 얕은 바다가 다르게 표현된다.

#### • 다른 효과들과 혼용 가능

컴퓨터 그래픽스에서 폭넓게 사용되는 메쉬 형태의 자료 구조로 해수면을 계산하므로, 일부분에만 특별한 효과를 주거나, 다른 해수면표현 방법들과 함께 사용하기가 비교적 용이하다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2절에서는 해수면 표현에 대한 그래픽스 분야의 기존 연구들을 살펴보고, 3절과 4절에서는 각각 해양학에서 제시된 해양파 모델들과, 이에 기초한 해양파 구현 모델(implementation model)을 제시한다. 제시된 모델의 프로토타입은 PC에서 구현되었고, 5절에서 그 결과들을 보여준다. 마지막으로 결론과 향후 과제를 제시한다.

## 2. 기존 연구

컴퓨터 그래픽스에서 해양파에 대한 모델링 연구는 크게 두 가지 범주로 나눌 수 있다. 첫번째 범주는 유체 공학에서 사용하는 물리학 수식들을 적용하는 방법들이고, 대부분 Navier-Stokes 방정식을 사용하여 사실적으로 해양파를 표

현할 수 있다[3~7]. 반면에, 많은 계산량으로 인해 넓은 바다를 실시간에 나타내기에는 적합하지 않다. 또한 최초에 초기 조건들이 정해진 후에는 변화를 가하기 곤란하기 때문에, 사용자의 의도를 정확하게 나타내기에는 어려운 편이다.

두번째 범주의 연구자들은 해양학에서의 연구 결과들을 이용하여 해수면을 모델링한다. 이 범주의 연구들은 다시 세 가지 형태로 나눌 수 있다. Fournier[8]는 원 또는 타원형의 웨드를 가지는 Gerstner 파도(swell) 모델을 사용하여, 매개변수에 따라 다양한 파도 모양을 생성할 수 있음을 보였다. 해저 지형에 따른 파도의 굴절과 해변에 부딪히는 파도의 변화에 대해서도 고려했지만, 깊은 바다에서 생성되는 파도나 넓은 구역의 바다를 표현하기에는 한계를 가진다. Gonzato[9]는 더 많은 매개변수를 가지는 수식을 제안했다. 이 모델은 파도의 진행을 나타내기에는 적합하지만, 넓은 구역의 바다를 표현하기 위해서는 계산량이 급격히 증가하는 문제점을 가진다.

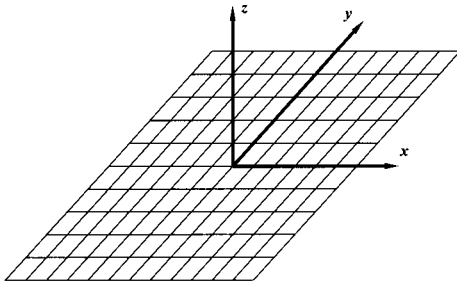
해양학의 연구 결과들을 사용하는 두번째 형태는 실제 바다에서 관측한 자료들을 정리하여 수학적으로 모델링한 해양파 스펙트럼 모델을 이용하는 것이다. Mastin[10]은 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)과 높이 필드(height field)를 이용하여 빠르고도 간단한 모델링을 제안하였다. 랜덤값으로 높이 필드를 초기화한 후, FFT 처리를 통해 주파수 영역으로 변환한다. 여기에 해양파 스펙트럼 모델을 적용한 후 역 FFT를 수행하여 높이 필드로 다시 복원한다. 최종적으로 높이 필드는 실제 해수면과 유사한 형태를 가진다. Tessendorf[11]는 주파수 영역에서 파도의 전파 과정을 처리하는 방법을 제안하였고, 최종 결과인 높이 필드가 여전히 트로코이드 파형을 생성함을 보였다. FFT 기법을 사용하는 이들 방법들은 비교적 단순한 방법으로 해양파를 생성할 수 있지만, 사용자가 세부적으로 파도의 모양을 제어하기가 곤란하다. 특히, 해양파에 추가로 다른 효과를 줄 경우에는 사용하기에 적합하지 않다.

해양학 연구 결과를 사용하는 마지막 형태는 이전의 두 가지 방법을 함께 적용하는 하이브리드 접근 방법으로 해양파를 생성한다. 즉, 절차적 방법으로 트로코이드 파를 생성한 후, 이렇게 생성된 파도를 제어하는 과정에서 스펙트럼 기법을 사용한다. Hinsiger[12]는 적응적인 방법(adaptive scheme)을 사용하여 실시간에 해수면을 모델링하였다. 그는 절차적 방법을 사용하여 관찰자(viewer)가 애니메이션이 수행되고 있는 해수면의 바로 위에서 날고 있는 것처럼 카메라(view point)를 이동시키는 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 이러한 하이브리드 방법들 중의 하나를 제안하고자 한다. 기존의 하이브리드 방법들에서는 비교적 단순한 해양파 스펙트럼 모델들을 사용하였지만, 좀더 정밀한 해양파 스펙트럼 모델을 사용함으로써, 하이브리드 방법의 장점을 유지하면서도 더 좋은 품질의 영상을 생성할 수 있다. 다음 절에서는 해양파 모델들을 세부적으로 설명한 후, 그래픽스프로그램에서 사용하기 위한 수식으로 변환하는 과정을 보여준다.

### 3. 해양파 모델

본 논문에서는 해양파에 의한 해수면을 표현하고자 하므로, 이를 위한 자료 구조로 높이 필드를 사용한다. 높이 필드는 (그림 1)에서와 같이, 해수면의 각 좌표  $(x, y)$ 에 대한 높이  $z$ 를 저장해 둔 2차원 배열이다. 계산의 편의를 위해, 각각의 좌표는 2차원 격자의 교차점들에 위치한다고 가정한다. 중력 해양파의 모델링에서는 하나의 좌표에서 높이값 하나만이 필요하기 때문에, 이 자료 구조가 효과적이고, 이 구조를 그대로 메쉬 구조로 바꾸면, 뒤어오른 파도와 같은 경우도 처리가 가능하다.



(그림 1) 해양파를 처리하기 위한 메쉬 구조

$$x = x_0 + r \sin(\omega t - kx_0) \tag{1}$$

$$z = z_0 + r \cos(\omega t - kz_0) \tag{2}$$

여기서  $(x, z)$ 는 기준점  $(x_0, z_0)$ 에 있던 물 입자의 시간  $t$ 에서의 위치이다.  $\omega$ 와  $k$ 는 각각 파형 주파수  $f$ 에 대한 맥동값(pulsation)과 파장  $\lambda$ 에 대한 파수(wave number)를 나타내고, 다음과 같이 계산된다.

$$\omega = 2\pi f \tag{3}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \tag{4}$$

수식 (1), (2)는 해양파가  $x$ 축 방향으로 진행한다고 가정했을 때, 파형의 단면을 표현한 2차원 수식이다. 해수면은 실제로 이러한 파형들의 유한합으로 구성되고, 결과적으로  $(x, y)$  위치에서의 해수면의 높이  $z$ 는 시간  $t$ 에 대해서 다음과 같이 계산된다.

$$z(x, y, t) = \sum_{i=1}^n A_i \cos(k_i(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \omega_i t + \varphi_i). \tag{5}$$

여기서  $n$ 은 파열의 개수이고,  $A_i$ 는 진폭(amplitude),  $k_i$ 는 맥동값,  $\theta_i$ 는  $xy$  평면 상에서의 진행 방향,  $\varphi_i$ 는 위상(phase)을 의미한다. 해양파를 실제 화면에 표현하기 위해서는 이들 매개변수들의 적절한 값을 찾아야 한다.

Hinsinger[12]는 반복적인 실험을 통하여 수작업으로 원하는 형태의 파도를 위한 적절한 매개변수 값들을 찾았다. 이들과 다른 환경에서 파도를 만들거나, 다른 형태의 파도를 만들고자 하는 경우에는 사용자가 이러한 수작업을 반복적으로 수행하여야 하고, 이는 이들 방법의 약점으로 지적된다.

Thon[13]의 경우는 해양학에서 사용되는 스펙트럼 모델(spectrum model)을 사용하면 적절한 매개변수 값들을 수학적으로 찾을 수 있음을 보였다. 그들이 사용한 스펙트럼 모델은 Pierson-Moskowitz(PM) 모델로, 해양파의 스펙트럼을 다음과 같은 식으로 표현한다.

$$E_{PM}(f) = \frac{0.0081 g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-\frac{5}{4}(\frac{f_p}{f})^4}$$

여기서  $E_{PM}(f)$ 는 파형 주파수  $f$ 에 대한 스펙트럼을 의미하고,  $g$ 는 중력 상수이다.  $f_p$ 는 최대 파형 주파수(peak frequency)를 의미하고, 해수면 상공 10m에서의 풍속  $U_{10}$ 에 대한 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$f_p = \frac{0.13 g}{U_{10}} \tag{6}$$

Thon은 PM 스펙트럼 모델을 사용하여 좋은 결과를 얻었지만, PM 스펙트럼 모델은 수심이 무한대인 경우, 즉 바닥면에서의 간섭이 무시될 수 있는 매우 깊은 바다를 가정하고 있기 때문에, 얕은 바다에서는 적용할 수 없다는 한계가 있다. 해양학분야에서는 이러한 PM 모델의 단점을 해결하기 위해서, JONSWAP 모델[14]과 TMA 모델[2]이 개발되었다.

JONSWAP(Joint North Sea Wave Project) 스펙트럼 모델은 북해와 같이 제한적인 취송 거리(fetch length)를 가진 바다에서 생기는 파도를 나타낸 모델이다. 취송 거리는 일정한 풍향과 풍속을 가지는 풍역의 길이를 의미하고, 해양학 분야에서 특정 해역을 표현하는 매개변수들 중의 하나로 사용된다. JONSWAP 모델에서의 스펙트럼은 다음과 같이 표현된다.

$$E_{JONSWAP}(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} e^{-\frac{5}{4}(\frac{f_p}{f})^4} \cdot \gamma e^{-\frac{f/f_p - 1}{2\sigma^2}}$$

여기서  $\alpha$ ,  $\gamma$ 는 스케일링 팩터와 최대 증감 팩터로 각각 해역에 따라 다른 상수값으로 설정된다.  $\sigma$ 는 주파수  $f$ 가  $f_p$ 보다 적으면 0.07로, 크면 0.09로 설정된다. 최대 주파수  $f_p$ 는 취송 거리  $F$ 에 대해서 다음과 같은 수식으로 계산된다.

$$f_p = 3.5 \left( \frac{g^2 F}{U_{10}^3} \right)^{-0.33}$$

TMA(Texel, Marson and Arsole)모델은 수심을 반영하

도록 JONSWAP 모델을 확장한 것으로, 수심  $h$ 에 대해서 다음과 같이 계산된다.

$$E_{TMA}(f) = E_{JONSWAP}(f) \cdot \Phi(f^*, h)$$

이때,  $\Phi(f^*, h)$ 는 Kitaigorodskii 스케일링 팩터로, 다음과 같이 계산된다.

$$\Phi(f^*, h) = \frac{1}{w(f^*)} \left( 1 + \frac{K}{\sinh K} \right)$$

여기서  $f^* = f\sqrt{h/g}$  이고,  $K = 2(f^*)^2 w(f^*)$  이다. 함수  $w(f^*)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$w(f^*) = \tanh^{-1}[(2\pi f^*)^2]$$

TMA 스펙트럼 모델은 해양학 분야에서 이미 깊은 바다는 물론이고 수심 6m의 바다나 담수호도 잘 표현할 수 있음이 밝혀졌다. 따라서, 이 모델은 바다뿐만 아니라 호수나 깊은 연못에서 생기는 파도의 모습도 표현 가능하다. 또한 JONSWAP 모델을 내포하고 있으므로, 취송 거리 F를 설정하여 해역에 따른 특성을 반영하는 것도 가능하다. TMA 모델은 그래픽스 분야의 기존 연구들이 사용했던 PM 모델에 비해서 표현력이 대폭 증대되었으므로, 본 연구에서는 다양한 해수면들을 더욱 사실적으로 표현하기 위해, TMA 모델을 사용한다.

#### 4. 해수면의 표현을 위한 구현 모델

TMA 모델이 해수면을 표현할 수는 있지만, 모델 자체는 파도의 진행 방향에 대한 2차원 파형이므로, 3차원 컴퓨터 그래픽스 분야에서 그대로 사용할 수는 없다. 또, 스펙트럼에 대한 수식을 그대로 사용하면, 푸리에 변환과 그 역변환을 위해서 과도한 계산량이 필요한 문제점도 있다. 본 절에서는 이러한 문제점들을 개선하여 그래픽스 분야에서 직접 사용할 수 있는 구현 모델을 보이겠다.

TMA 스펙트럼은 해수면에서의 풍향에 따라, 풍향을 표시하는 각도  $\delta$ 를 포함하는 다음과 같은 3차원 모델로 확장할 수 있다[14].

$$E(f, \delta) = E_{TMA}(f) \cdot D(f, \delta) \tag{7}$$

여기서  $D(f, \delta)$ 는 풍향 각도  $\delta$ 에 대한 방향 분산 팩터(directional spreading factor)이고, 바람의 방향으로 더 많은 가중치를 부여하도록 다음과 같은 수식으로 설정된다.

$$D(f, \delta) = N_p^{-1} \cos^2 p \left( \frac{\delta}{2} \right)$$

이때,  $p = 9.77(f/f_p)^\mu$  이고,  $\mu$ 와  $N_p$ 는 각각 다음과 같이 설정된다.

$$\mu = \begin{cases} 4.06, & \text{if } f < f_p \\ -2.34, & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$N_p = \frac{2^{1-2p} \pi \cdot \Gamma(2p+1)}{\Gamma^2(p+1)}$$

여기서  $\Gamma$ 는 Euler의 Gamma 함수이다.

이제 이 수식들을 이용하면, 격자점에서의 높이를 계산하기 위한 (식 5)의 각 매개변수들인 주파수, 진폭, 파의 진행 방향, 파수, 맥동값 등을 계산할 수 있다. 우선 최대 주파수  $f_p$ 는 (식 6)에 의해 계산되고, 각 파열에 대한 주파수는 해양 파의 불규칙성을 반영하기 위해 최대 주파수  $f_p$ 에서 랜덤 오프셋 값들을 적용하여 설정한다. 주파수가 계산되면, 맥동값과 파수는 그 정의에 따라, (식 3, 4)에 따라 즉각 계산된다. 파의 진행 방향은 사용자가 해당 해역에서의 풍향과 풍속을 설정하면 자연스럽게 계산된다.

남은 매개변수인 진폭을 계산하기 위해서는 무작위 선형파 이론(random linear wave theory)[15~17]에서의 계산식을 사용할 수 있다. (식 7)의 방향파에 대한 스펙트럼(directional wave spectrum)  $E(f, \delta)$ 는 파수에 대한 스펙트럼  $\Psi$ 에 대하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E(f, \delta) = \Psi(k(f), \delta) \cdot k(f) \frac{dk(f)}{df} \tag{8}$$

여기서  $k(f) = 4\pi^2 f^2 / g$ 이다. 난수 선형파이론에 따르면, (식 8)의 우변에서 둘째 및 셋째 항은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$k(f) \frac{dk(f)}{df} = \frac{32\pi^2 f^3}{g^2} \tag{9}$$

(식 9)를 (식 8)에 대입하면, 다음과 같은 식을 구할 수 있다[16].

$$E(f, \delta) = \Psi(k(f), \delta) \cdot \frac{32\pi^2 f^3}{g^2}$$

또, 파수에 대한 스펙트럼  $\Psi(k(f), \delta)$ 는 상수값  $\beta$ 를 사용하여 다음과 같이 근사할 수 있다[18].

$$\Psi(k(f), \delta) = \frac{\beta}{4\pi^2} A(f)^2$$

최종적으로 파열 내의 파형들에 대한 진폭  $A(f)$ 는 각 파형의 주파수  $f$ 에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$A(f) = \sqrt{\frac{E(f, \delta) \cdot g^2}{8f^3 \beta}} = \sqrt{\frac{E_{TMA}(f) \cdot D(f, \delta) \cdot g^2}{8f^3 \beta}}$$

이제까지의 수식 전개 과정을 이용하면, (식 5)에서 필요한 매개변수들을 설정할 수 있다. 전체 화면 출력을 위해서는 시간의 변화에 따라 각 격자점  $(x, y)$ 에서의 높이값을 각

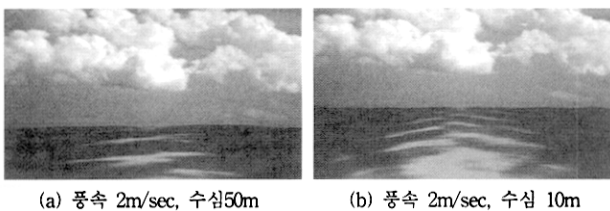
각 계산하여 (그림 1)과 같은 높이 필드의 높이 값들을 결정하여 최종 해양파를 화면에 출력할 수 있다.

### 5. 실험 결과

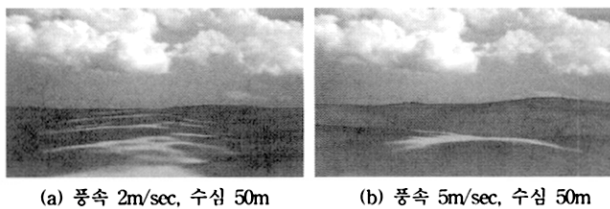
본 논문에서는 앞 절들에서 설명한 TMA 스펙트럼 모델과 이에 기초한 구현 모델을 이용하여 해양파를 생성하는 프로토타입 시스템을 구현하였다. 이 프로토타입 시스템은 모델의 안정성과 표현력을 검증하기 위한 초기 구현으로, 계산 과정이나 렌더링 시에 하드웨어를 이용한 가속기법이나 소프트웨어적인 가속기법을 배제하고, 그래픽스 출력을 위한 OpenGL 라이브러리만을 사용하였다. 실제 수행 시에는 인텔 펜티엄 4 1.6 GHz 프로세서와 GeForce 4 그래픽카드를 장착한 개인용 컴퓨터에서 평균 초당 30 프레임 이상의 렌더링 속도를 보였다. 향후에 하드웨어를 이용한 가속기법을 도입하고, 전체 계산 과정에 최적화 기법들을 적용하면, 더 빠른 실행 속도를 보일 것으로 기대된다.

(그림 2, 3, 4)는 구현한 프로토타입 시스템에서 생성한 해양파를 렌더링한 결과이다. (그림 2)는 동일한 풍속과 취송 거리를 갖는 경우에도 수심에 따라 서로 다른 해양파가 생성됨을 보여준다. (그림 2) (a)와 (그림 2) (b)는 각각 수심 50m와 수심 10m에서의 해수면이다. 기존의 PM 모델을 사용하는 해양파 시뮬레이션에서는 두 경우를 구별할 수 없었던 데에 비하여, 본 논문에서 제안하는 방법은 그림에서 보는 바와 같이, 같은 풍속에 대해서도 얇은 바다에서는 낮은 높이의 파도가 더 빈번하게 보이고, 깊은 바다에서는 높은 파도가 보이게 되는 차이점을 보였다.

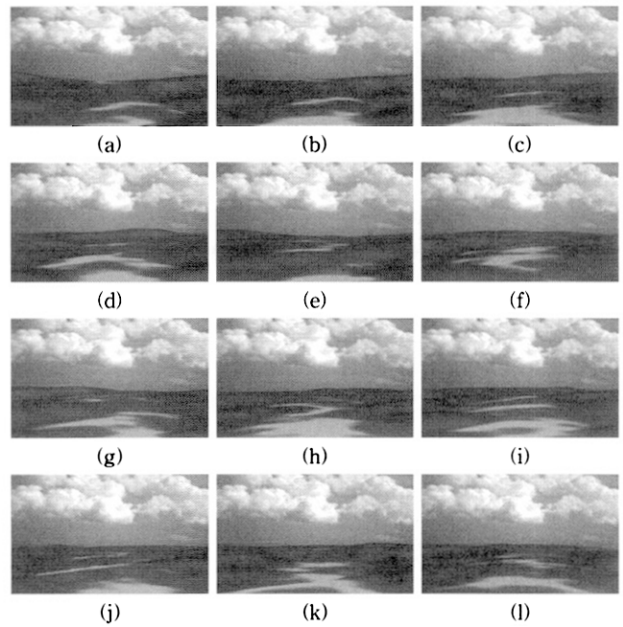
(그림 3)은 바람의 세기에 따른 효과를 나타낸 것으로, 자연 상태에서와 같이, 더 강한 바람에 의해 생성된 해양파는 더 많이 출렁거림을 보여 준다. (그림 4)는 해양파의 실시간 애니메이션에서 따온 연속적 이미지들이다. 본 논문에서 시뮬레이션한 모든 결과물의 높이 필드는 200×200의 해상도를 가지도록 설정하였다.



(그림 2) 수심 차이에 따른 해양파의 생성: 같은 풍속에 대해서도 수심이 다른 경우에는 다른 형태의 해양파가 생성된다.



(그림 3) 풍속 차이에 따른 해양파의 생성: 같은 수심에서도 풍속이 커질수록 높은 파도가 생성된다.



(그림 4) 해양파의 애니메이션에서 캡처한 장면들

### 6. 결론

본 논문에서는 그래픽스 분야에서 아직 사용되지 않았던, 해양학의 연구 결과들을 이용하여, 실시간으로 해양파를 시뮬레이션하는 방법을 제시하였다. 우리는 이전 연구에 비해 더 많은 매개변수를 제공하는 TMA 스펙트럼 모델을 이용하였고, 그 계산 과정을 빠르게 처리하기 위한 구현 모델을 제시하였다. 구현된 프로토타입 시스템은 이러한 방법에 따라 다양한 환경 설정에서의 해양파들을 생성할 수 있음을 검증하였다.

본 논문이 제안하는 방법은 기존의 해양파 생성 시스템들에 비해, 크게 다음과 같은 두 가지 면에서 장점을 보인다.

- 강화된 표현력

이전 연구 결과들에서는 실시간에 생성하기 힘들었던, 얇은 바다에서의 해양파들을 비교적 사실적으로 재현하였다.

- 사용자 제어의 강화

제안하는 방법은 풍속, 취송 거리, 수심 등의 다양한 매개변수를 사용자가 직접 제어할 수 있고, 해수면의 초기 상태도 높이 필드에서 직접 제어할 수 있으므로, 기존의 연구 결과들에 비해, 사용자가 원하는 화면을 얻기 위한 다양한 조건들을 설정할 수 있다.

제안하는 방법은 프로토타입 시스템으로 구현되었고, 다양한 형태의 해양파를 실시간 애니메이션할 수 있음을 보였다. 개발된 프로토타입 시스템은 최적화와 하드웨어 가속기법들을 도입하여, 최종적으로는 실시간 게임이나 항해 훈련 시뮬레이션 등의 응용 프로그램에 적용할 예정이다. 본 연구에서는 단순한 메쉬 구조를 사용하였으므로, 다른 연구들에서 제안된, 표면 중력파에 대한 변형 기법들도 적용 가

능하다. 최종적으로는 이러한 기법들의 통합을 통하여, 더욱 사실적인 해양파를 생성할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고 문헌

- [1] W. J. Pierson and L. Moskowitz, "A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kilaigorodskii.," *J. Geophysical Research*, pp.5181-5190, 1964.
- [2] E. Bouws, H. Gunther, W. Rorenthel, and C.L. Vimcent, "Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water, part I: Spectral form," *J. Geophysical Research*, Vol.90, No.C1, pp.975-986, 1984.
- [3] D. Enright, S. Marschner, and R. Fedkiw, "Animation and rendering of complex water surfaces," *SIGGRAPH'02*, pp.736-744, 2002.
- [4] N. Foster and R. Fedkiw, "Practical animation of liquids," *SIGGRAPH'01*, pp.23-30, 2001.
- [5] N. Foster and D. Metaxas, "Realistic animation of liquids," *Graph. Models Image Process*, Vol.58, No.5, pp.471-483, 1996.
- [6] N. Foster and D. Metaxas, "Controlling fluid animation," *CGI'97*, pp.178-188, 1997.
- [7] J. Stam, "Stable fluids," *SIGGRAPH'99*, pp.121-128, 1999.
- [8] A. Fournier and W. T. Reeves, "A simple model of ocean waves," *SIGGRAPH'86*, pp.75-84, 1986.
- [9] J. C. Gonzato and B. L. Saec, "On modelling and rendering ocean scenes," *J. Vis. Comp. Anim.*, Vol.11, No.1, pp.27-37, 2000.
- [10] G. A. Mastin, P. A. Watterberg, and J. F. Mareda, "Fourier synthesis of ocean scenes," *IEEE Comput. Graph. Appl.*, Vol.7, No.3, pp.16-23, 1987.
- [11] J. Tessendorf, "Simulating ocean water," *SIGGRAPH Course Notes*, 1999.
- [12] D. Hinsinger, F. Neyret, and M. P. Cani, "Interactive animation of ocean waves," *Proc. of ACM SIGGRAPH/ Eurographics symp. on Computer Animation*, pp.161-166, 2002.
- [13] S. Thon, J. M. Dischler, and D. Ghazanfarpour, "Ocean waves synthesis using a spectrum-based turbulence function," *CGI'00*, 2000.
- [14] D. E. Hasselmann, M. Dunckel, and J. A. Ewing, "Directional wave spectra observed during JONSWAP 1973," *J. Phys. Oceanogr.*, Vol.10, pp.1264-1280, 1980.
- [15] F. Crawford Jr., *Waves*, McGraw-Hill, 1977.
- [16] H. E. Krogstad and Ø. A. Arntsen, "Linear wave theory," <http://www.bygg.ntnu.no/~oivarn/hercules.ntnu/LWTcourse/>.
- [17] H. Seyringer, "Nature Wizard," <http://www.naturewizard.com/>.
- [18] M. J. Tucker, *Waves in Ocean Engineering: Measurement, Analysis, and Interpretation*, Ellise Horwood, 1991.



### 이 남 경

e-mail : leenk@korea.com

1998년 경북대학교 공과대학 컴퓨터공학과 (학사)

2000년 경북대학교 컴퓨터공학과(공학석사)

2000년~현재 경북대학교 컴퓨터공학과 박사과정

관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 알고리즘



### 백 낙 훈

e-mail : nbaek@knu.ac.kr

1990년 한국과학기술원 전산학과(학사)

1992년 한국과학기술원 전산학과(공학석사)

1997년 한국과학기술원 전산학과(공학박사)

2004년~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터 학부 조교수

관심분야: 컴퓨터 그래픽스



### 김 구 진

e-mail : kujinkim@knu.ac.kr

1990년 이화여자대학교 전자계산학과(학사)

1992년 한국과학기술원 전자계산학과(석사)

1998년 포항공과대학교 컴퓨터공학과(박사)

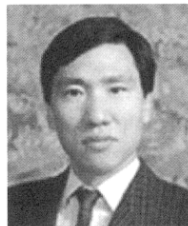
1998년~2000년 Dept. of Computer Sciences, Purdue University, PostDoc

2000년~2002년 아주대학교 정보및컴퓨터공학부 BK21 조교수

2002년~2003년 Dept. of Mathematics and Computer Science, University of Missouri-St. Louis, Visiting Assistant Professor

2004년~현재 경북대학교 컴퓨터공학과 조교수

관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 컴퓨터 애니메이션, 곡면 및 기하모델링 등



### 유 관 우

e-mail : kwryu@knu.ac.kr

1980년 경북대학교 전자공학과(학사)

1982년 한국과학기술원 전산학과(공학석사)

1990년 메릴랜드대학교 전산공학(공학박사)

1982년~현재 경북대학교 컴퓨터공학과 교수

관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 계산기하학, 계산 이론