

# 스펙트럼을 이용한 해양파 구현

\*이남경<sup>o</sup> \*\*김은주 \*유관우  
\*경북대학교 컴퓨터공학과  
\*\*동명정보대학교 정보통신공학과  
\*lnk337@dreamwiz.com<sup>o</sup> \*\*ejkim@tit.ac.kr \*kwryu@yahoo.co.kr

## Ocean wave generation using spectrum

\*Namkyung Lee<sup>o</sup> \*\*Eunju Kim \*Kwanwoo Ryu  
\*Dept. of Computer Engineering, Kyungpook National University  
\*\*Dept. of Information & Communication Engineering, Tongmyong University of Information Technology

### 요 약

컴퓨터 그래픽스 분야에서 자연현상을 표현하기 위한 노력은 계속되어 오고 있다. 몇몇 자연현상들에 대해서는 만족할 만한 결과가 나와 있지만, 해양파(ocean wave)를 표현하기 위한 적절한 모델이 제시되어 있지 않다. 본 논문에서는 해양학의 연구 결과를 바탕으로 하여 사실적이면서도 실시간에 재생가능한 해양파를 구현하였다.

## 1. 서 론

바다를 관찰해보면 해양파(ocean wave)는 단순히 사인함수의 형태가 아닌란 걸 알 수 있다. 해양파는 다양한 주기와 파장의 파들로 구성되어 있다. 이런 해양파를 어떻게 표현할 수 있을까?

불규칙하게 변동하는 해양파의 정량적인 기술을 위해 유의파(signification wave)의 개념을 도입하고 풍속, 취송시간, 취송거리, 수심 등과의 관계를 나타내는 SMB법과 불규칙성을 직접 고려한 해양파 스펙트럼을 토대로 해양파를 추산하는 방법인 PNJ법이 있다[1].

이러한 해양학의 연구를 바탕으로 컴퓨터 그래픽스에서는 해양파를 나타내기 위해 많은 연구들이 있어 왔다.

컴퓨터 그래픽스 분야에서 해양파에 대해서 처음으로 모델을 제시한 사람은 Fournier와 Reeves이다[2]. [2]에서 해변가로 밀려오는 파도를 나타내기 위해 Gestner waves를 사용하여, 고정된 점 주위를 움직이는 물입자의 움직임으로 파도를 표현하였다.

같은 주제로 Peachey는 해저면의 깊이를 고려하여 사인함수들 중첩을 파도를 나타내었다[3].

이렇게 만들어진 파도를 애니메이션하기 위해서는 시간의 변화에 따라 페이즈(phase)를 변화시킨다. 하지만 해양파를 만들기 위해서 많은 함수들이 필요하며, 사용자가 일일이 함수들을 정해줘야 한다는 단점이 있다.

Perlin은 비행기와 같이 높은 곳에서 바라본 해면을 나타내기 위해서 범핑맵 기법을 사용하였다. 비록 범핑맵의 단점으로 인해 자세한 해양파의 모습을 나타낼 수 없지만, 빠르고 쉽게 해면을 계산하였다[4].

경험적인 방법으로 사실적인 해양파를 구하는 어려움을 극복하기위해서 유체 역학을 이용한 모델들이 있다. 이 모델들은 아주 사실적으로 해양파를 나타내지만, 계산량이 너무 많다[5][6].

또한 사용자가 초기 조건들로만 모델을 조절해야 하기 때문에 사용자의 의도를 정확히 나타내기에 많은 어려운 점들이 있다.

또 다른 물리학적인 방법으로 스펙트럼을 이용하는 방법이 있다. Mastin은 실제 바다에서 관측한 자료로 만든 해양파 스펙트럼을 이용한 모델을 제시했다[7]. 먼저 가우스 분포를 따르는 화이트 노이즈 이미지를 FFT하여 주파수 영역으로 변환시킨다. 주파수 영역에서 Pierson-Moskowitz 필터를 적용시켜 해양파의 특성을 이미지에 부여한뒤 다시 IFFT를 하여 공간 영역으로 변환시킨 후 그 이미지를 해수면을 타나내는데 사용하였다. 이 경우 해수면의 해상도가 이미지의 해상도에 의해 결정되는 단점이 있다.

Jerry는 기존의 다양한 해양파 모델들을 기술하면서, 주기성을 가진 높이맵을 연결하여 큰 해면(ocean surface)를 만드는 방법을 제시했다[8].

본 논문에서는 경험적인 방법과 스펙트럼을 사용하는 물리학적인 방법을 절충하여 FFT를 사용하지 않는 해양파 모델을 제시한다. 기존의 FFT를 이용하는 방법의 단점인 해상도 문제를 해결하는 방법을 제시 한다. 또한 사용자의 요구에 따라 다양하면서도 사실적인 해양파를 실시간에 생성하는 방법을 제시 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 해양파 모델

본 논문에서는 PNJ법의 대표적인 JONSWAP 스펙트럼을 사용하여 해양파를 구현하였다. 해양파를 컴퓨터 그래픽 상에서 나타내는 방법은 한 위치에서 파도의 높이를 복수개를 허용하느냐 아니냐에 따라서 달라진다. 본 논문에서는 한 위치에서 하나의 파도 높이만 가지는 높이맵(height map)을 사용하여 해양파를 구현하였다. 따라서 Mesh 상의 각 점들의 높이를 계산하는 식이 필요하다.

해양학에서의 연구 결과를 바탕으로 해양파는 다양한 진폭과 주기를 가지는 정현파의 합으로 표현할 수 있다.

$$h(x, y, t) = A \cdot \sin(k(x\cos\theta + y\sin\theta) + w \Delta t + \phi) \quad \text{식 1}$$

식 1에서 하나의 정현파를 나타낸다. 식 1에서  $A$ 는 진폭(amplitude),  $w$ 는 각주파수(angular frequency)를 나타낸다. ( $w = 2\pi f$ ,  $f$ 는 주파수이다) 또  $k$ 는 파수(wave number)로  $k = 2\pi/\lambda$ 이며( $\lambda$ 는 파장이다),  $\theta$ 는 파의 진행방향을 나타낸다. 본 논문에서는 이런 정현파들을  $n$ 개 선택하여 각 점( $x, y$ )의 높이를 정한다.

$$h(x, y, t) = \sum_i^n A_i \cdot \sin(k_i(x\cos\theta_i + y\sin\theta_i) + w_i \Delta t + \phi_i) \quad \text{식 2}$$

따라서 식 2에 있는 각 파라미터들을 구해야 한다.

### 2.2 파라미터 구하기

본 논문에서는 해양학에서의 연구 결과를 바탕으로 파라미터들을 결정한다. 각 점들의 위치를 FFT를 이용하여 구하는 대신 수식을 이용하여 구한다. 이를 위해 먼저 주파수  $f$ 는 실제 해양에서 관측된 가장 낮은 주파수와 가장 높은 주파수 사이의 임의의 주파수를 선택한다. 주파수  $f$ 에 해양파의 성질을 부여하기 위해서 필터를 사용한다.

일정 풍속(wind strength)과 지속시간(wind duration) 그리고 풍역대(fetch)가 갖추어 졌을 때 이론적으로 발달할 수 있는 최대 풍랑을 다 자란 파도(fully developed sea)이라 한다.

PM 스펙트럼은 북태평양에서 관측한 해양파의 데이터 중에서 다 자란 풍랑에 해당되는 데이터를 풍속별로 분류하여 구한 해양파 스펙트럼이다. PM 스펙트럼의 특징은 취송 거리에 무관하다는 것이다. 따라서 대양에서의 파랑 스펙트럼에 대한 표준형으로 자주 사용되고 있다[9].

$$PM(f) = \frac{\alpha g^2}{2\pi^4 f^5} \exp\left[-\beta\left(\frac{f_0}{f}\right)^4\right]$$

$$\alpha = 8.1 \times 10^{-3}, \quad \beta = 0.74, \quad f_0 = \frac{g}{2\pi U_{19.5}} \quad \text{식 3}$$

JONSWAP 스펙트럼은 Hasselmann 등이 북해에서 행한 국제공동관측(Joint North Sea Wave Project)에서 얻어진 파랑 데이터를 해석하여 구한 파랑 스펙트럼으로서 취송거리가 유한한 경우의 대표적인 파랑 스펙트럼 형상이다 [10].

$$JS(f) = G(f) \frac{\alpha g^2}{2\pi^4 f^5} \exp\left[-\frac{5}{4} \left(\frac{f}{f_p}\right)^{-4}\right]$$

$$G(f) = \gamma \exp\left[-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right] \quad \text{식 4}$$

$$\alpha = 0.076 \left(\frac{gF}{U_{10}^2}\right)^{-0.22}, \quad F - \text{fetch length}$$

PM 스펙트럼은 일정한 바람이 계속 불고, 취송거리가 한정되어 있는 단순한 조건에서만 사용가능하다. 따라서 본 논문에서는 JONSWAP 스펙트럼을 사용하여 사용자가 취송거리와 바람의 세기와 방향을 조절함에 따라서 다양한 해양파를 구한다.

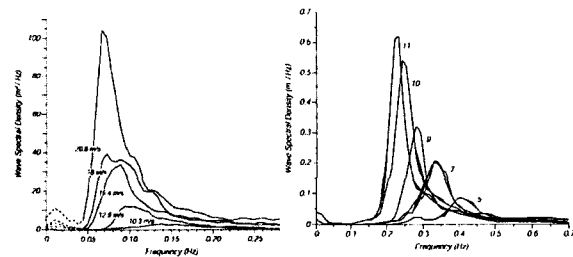


그림 1.a PM spectrum    그림 1.b JONSWAP spectrum  
그림 1 해양파 스펙트럼

그림 1은 PM 스펙트럼과 JONSWAP 스펙트럼을 나타낸다. 이 스펙트럼 필터로 사용하여 필터링된 주파수가 식 1의 주파수가 된다. 주파수가 결정되면 이를 이용하여 파수를 구한다. 파의 진행 방향  $\theta$ 와 페이즈  $\phi$ 는 해양파의 불규칙성을 고려하여 임의로 선택한다.

마지막으로 진폭  $A$ 를 계산한다. 진폭  $A$ 인 해양파의 단위 면적당 평균 포텐셜 에너지는 다음과 같다[1].

$$\frac{dE}{da} = \frac{\rho g A^2}{4} \quad \text{식 5}$$

식 5에서 좌변을  $JS(f)$  로 치환하고  $A$ 에 대해 다시 정리하여  $A = \sqrt{\frac{4JS(f)}{\rho g}}$  를 구한다.

모든 파라미터들이 결정되면 각 점  $(x, y)$ 의 높이를 식 2를 이용하여 구한다.

### 2.3 결과

해양파의 움직임은 식 2에 시간항인  $t$ 를 증가시키면 된다. 256Mbyte의 RAM을 가진 Pentium IV 1.7GHz 기준에서 Visual C++ 컴파일러와 DirectX를 사용하여 실험하였다. 메쉬의 크기는 128 X 128 이며, 16개의 정현파를 사용하였다. 실험 결과 초당 17-25 프레임 정도의 렌더링 시간이 걸린다.

그림 2,3,4에서의 예처럼 JONSWAP 스펙트럼을 사용하여 취송거리와 바람에 따라 다양한 해양파를 나타낼 수 있었다.



그림 2 취송거리 1km, 8 m/s 해양파



그림 3 취송거리 1km, 5 m/s 해양파



그림 4 취송거리 2km, 5 m/s 해양파

### 3.결 론

본 논문에서는 해양학에서 연구된 해양파 스펙트럼을 사용하여 사실적인 해양파를 실시간에 구현하였다.

또한 사용자의 의도에 따라 바람의 세기와 방향, 취송거리를 변경할 수 있게 하여 다양한 모양의 해양파를 구현할 수 있었다.

향후 연구 과제로는 동일한 위치에서 한 개의 높이값만 가질 수 있는 높이맵의 한계점을 개선한 다양한 모양의 해양파의 구현과, 연안에서 발생하는 연안파와의 통합 모델 개발 등이 있다.

### 참고 문헌

- [1] Tucker, M.J. Waves in Ocean Engineering: Measurement, Analysis, and Interpretation. Ellis Horwood, LTD, 1991.
- [2] Peachey DR. Modeling waves and surf. Computer Graphics (Siggraph 86) 1986:20(4):65-74.
- [3] Perlin K. An image synthesizer. Computer Graphics (Siggraph 85) 1985:19(3):287-296.
- [4] Fournier A, Reeves WT. A simple model of ocean waves. Computer Graphics (Siggraph 86) 1986:20(4):75-84.
- [5] Foster N, Metaxas D. Realistic animation of liquids. Proceedings of Graphics Interface 96, 1996. p. 204-212.
- [6] Foster, N. and Fedkiw, R., "Practical Animation of Liquids", SIGGRAPH 2001, p.15-22.
- [7] Mastin GA, Watterberg PA, Mareda JF. Fourier synthesis of ocean scenes. IEEE Computer Graphics and Applications 1987;7(3):16-23.
- [8] J. Tessendorf. Simulating ocean water. In SIGGRAPH 99 Course Notes, Aug. 1999
- [9] Pierson WJ, Moskowitz L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. Kitaigorodskii. Journal of Geophysical Research 1964:5181-90.
- [10] K. T. Hasselman. Measurements of wind-wave growth swell decay during the Joint North Sea wave project (JONSWAP). Ergänzungsheft zur Deutch. Hydrogr. Zeit., 1973.