

不規則波에 대한 近海有意波高, 最大波高및 限界水深의 算定

趙元喆 (延世大學校 土木工學科·助教授·工博)

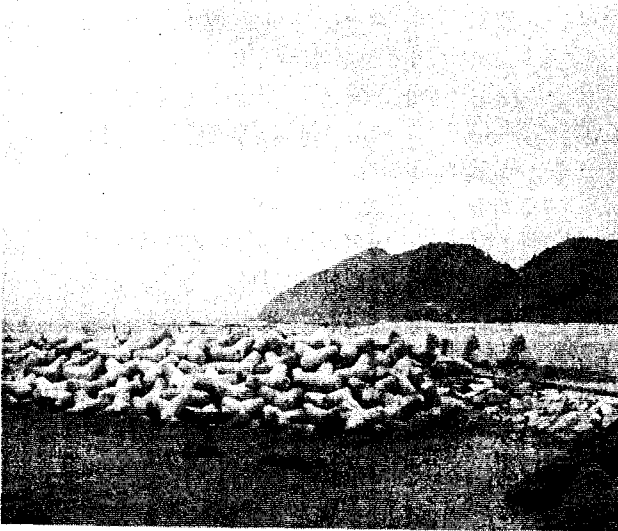
I. 서론

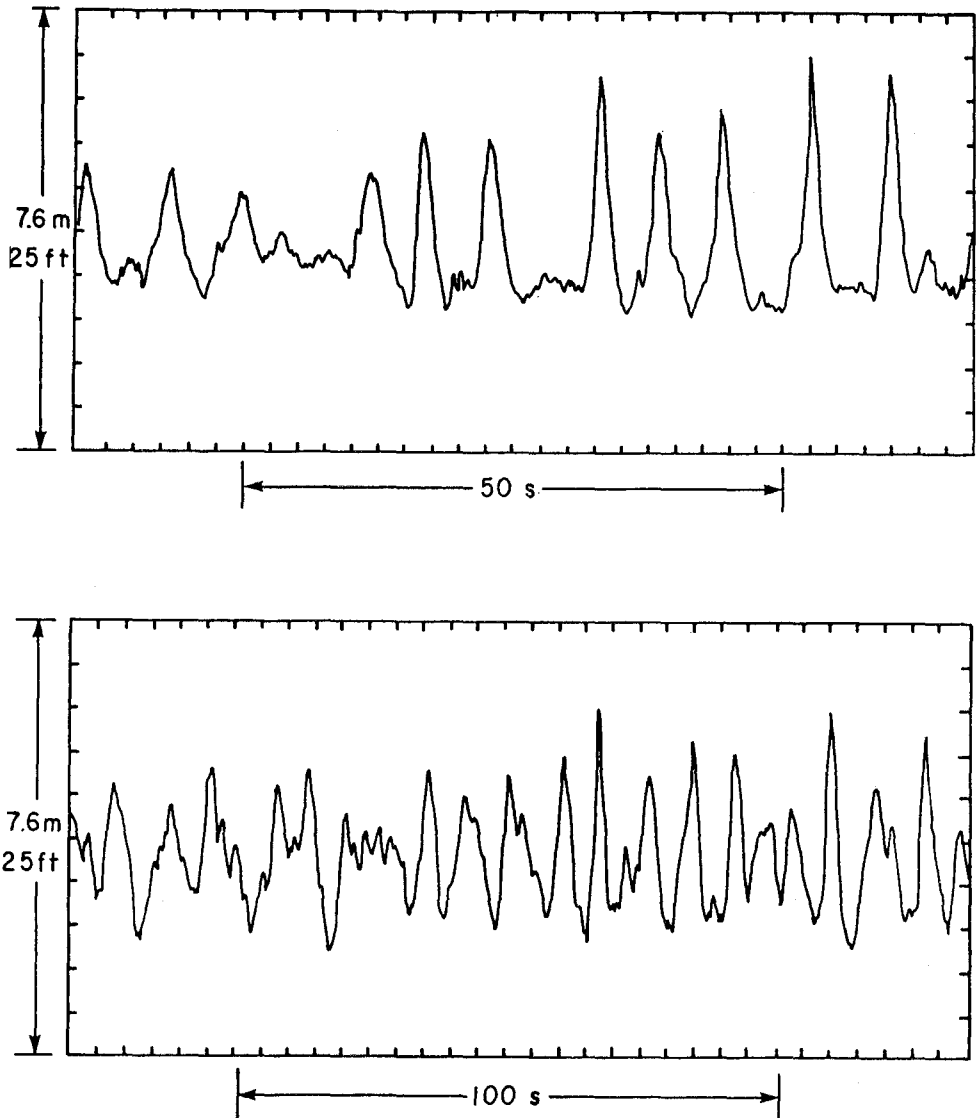
근해지역의 불규칙파의 거동은 파의 수심이 얕아짐(Shoaling), 쇄파(Breaking)와 처올림(Setup)의 상호작용과, 쇄파된 파의 재형성, 파의 때림(Surf Beat)과 다른 운동기구를 포함하기 때문에 매우 복잡하다. SPM [1]에서 제안하고 있는 설계파고 산정방법은 단순파이론(Monochromatic wave theory)에 기초하고 있다. 파가 일정한 파고와 주기를 가진다는 단순파이론의 가정은 나블(Swell), 즉 대상위치로부터 먼 위치에서 발생하여 전파되어 온 파에는 적절히 적용된다. 그러나, 풍파와 인근 태풍에 의해 발생한 파는 대개가 불규칙파이다. 즉 파고와 주기가 변하는 것으로, 도처에서 관측된 자료에 의해서 증명되고 있다. (그림 1참조)

본고는 이미 알고 있는 심해파 상태와 근해 해상경사를 이용하는 Goda방법 [2, 3]에 기초하여 불규칙파의 영향을 포함하는 근해지역 유의파고의 예측을 위한 설계곡선도를 제안하는 것이다. 그러나, 본고에서는 파의 굴절, 회절 혹은 파에너지의 손실을 발생하는 비쇄파 형태와 같은 요소들은 포함되지 않는다. 불규칙파의 굴절을 포함하는 방법은 Seelig와 Ahrens의 연구 [4]를 참고할 것을 제안한다.

Goda의 해석적인 방법은 다음과 같은 가정을 필요로 한다.

(a) 심해에서 굴절되지 않은 유의파고 H_0' 과 주기





〈그림 1〉 近海에서 기록된 不規則 波高

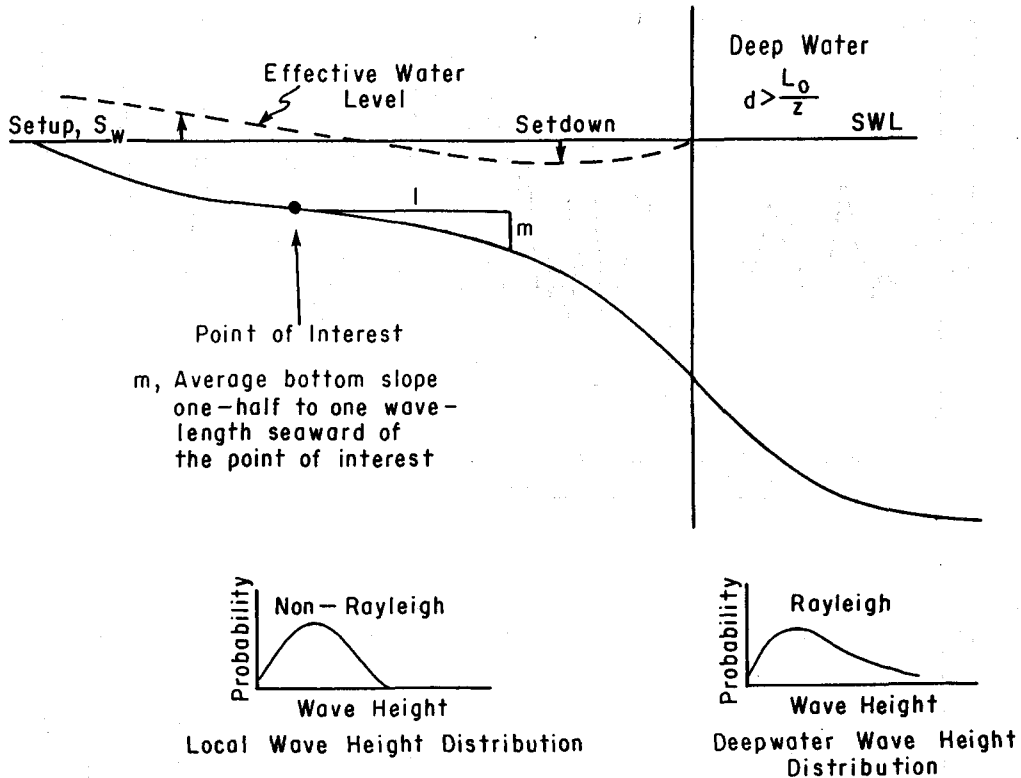
T가 알려져 있어야 한다.

- (b)바닥깊이는 심해로부터 해안으로 가면서 연속적으로 감소한다.
- (c)심해파고는 Rayleigh분포이다.
- (d)파의 때림, 파의 쳐올림(Wave setup), 및 쇄파조건은 경험공식들에 의해 구해진다.
- (e)파의 수심이 알아지는 과정(Shoaling)은 비선형 현상이다.

(f)쇄파된 파는 보다 낮은 파고로 재형성된다.

이러한 가정에 기초해서 근해파고를 예측하기 위한 수치적 방법이 개발되었다[4]. 현장관측과 실험 자료를 가지고 Goda모형에 대한 제한된 실험을 한 결과 Goda모형은 근해파고 산정에 유용함이 밝혀졌다.

큰 파는 심해에서 쇄파되어 재형성된다고 가정되기 때문에, 근해파는 Rayleigh분포를 따르지 않는



〈그림 2〉 近海에서의 波狀態

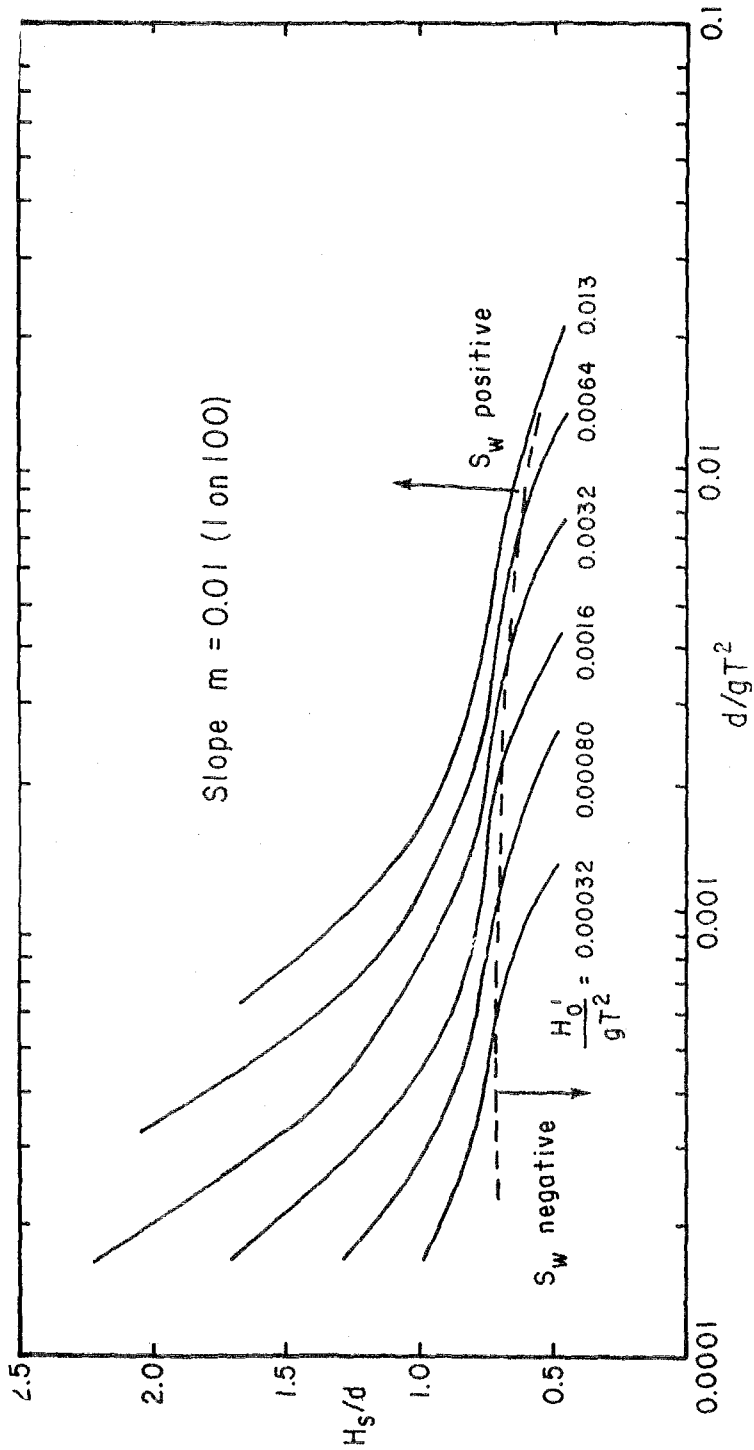
다. 이러한 근해지역의 유의파고는 평균파고와 같은 또 다른 근해파고 매개변수를 결정하는 데는 이용될 수 없다. 왜냐하면 파고분포가 Rayleigh분포가 아니기 때문이다. 그림 2는 근해에서 발생된다고 가정되는 몇가지 상태를 표시한 것이다. 국지적인 유의파고(H_s 로 표시하며 파고분포중 큰 쪽으로 1/3만큼의 산술평균으로 정의한다)는 설계자에게 가장 중요한 매개변수 중의 하나이다. 따라서 본고에서는 설계곡선도를 이용하는 불규칙파에 대한 근해유의파고 산정법과, 근해최대파고 및 한계수심을 산정하는 방법을 기술하고자 한다.

II. 설계곡선도를 이용한 근해유의파고의 산정

설계곡선도(그림 3 ~ 그림 6)는 국지유의파고를

정수면수심으로 나눈 값, H_s/d , 과 d/gT^2 을 두축으로 해서 표시되어 있다. 또 이 곡선도는 심해파의 여러가지 파경사, H_o'/gT^2 에 대해서 구해져 있다. 해상경사 m 은 대상지점에서 대양쪽으로 반파장에서 한파장 길이에 해당하는 평균경사이다. 파의 처올림과 처내림사이의 천이위치가 각 그림에 나타나 있다(여기서 S_w 는 양에서 음으로 변한다). 파의 처올림에 기인하여 유효수심이 정수면수심보다 클 수도 있기 때문에 H_s/d 는 커질 수도 있다. 즉 파의 처올림이 양의 값인 경우에는 유효수심이 정수면수심보다 커진다.

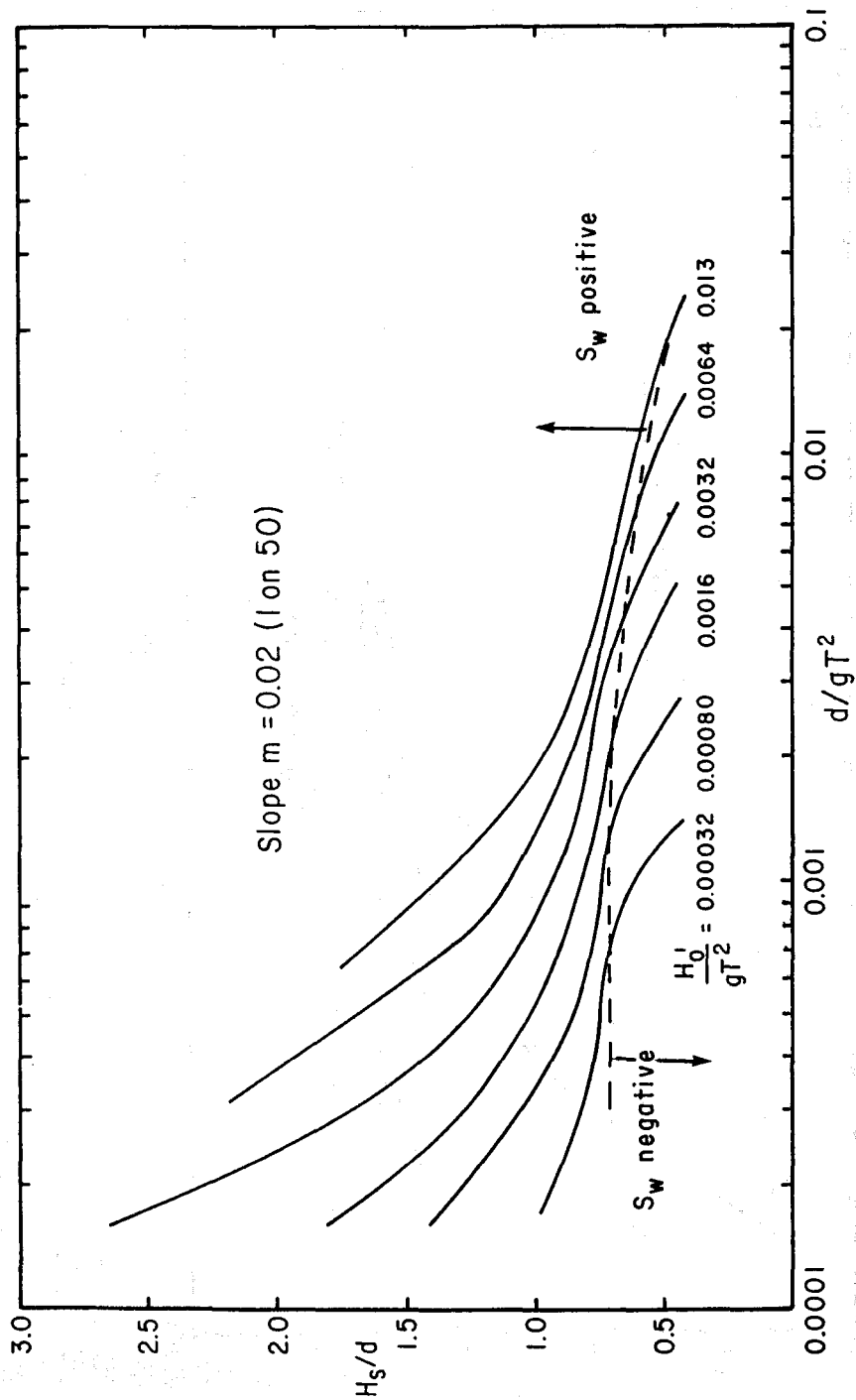
이러한 자료를 해석하는 방법은 적절히 잘 선택되어야 하는데, 이는 근해지역의 파고가 심해파상태로부터 예측될 수도 있으며(방법 1), 다른 한편으로는 일정한 수심에서 관측된 자료를 이용하여 다른 얕은 수심에서의 파고를 산정할 수 있기 때문이다. (방법 2) 곡선사이의 값에 대해서는 선형내삽



〈그림 3〉 海床경사 1/100에 대한 近海有意波高 Diagram

(Linear interpolation)을 이용하면 된다. 해상경사가 1/100보다 편평할 때는 그림 3을 이용한다. 경우

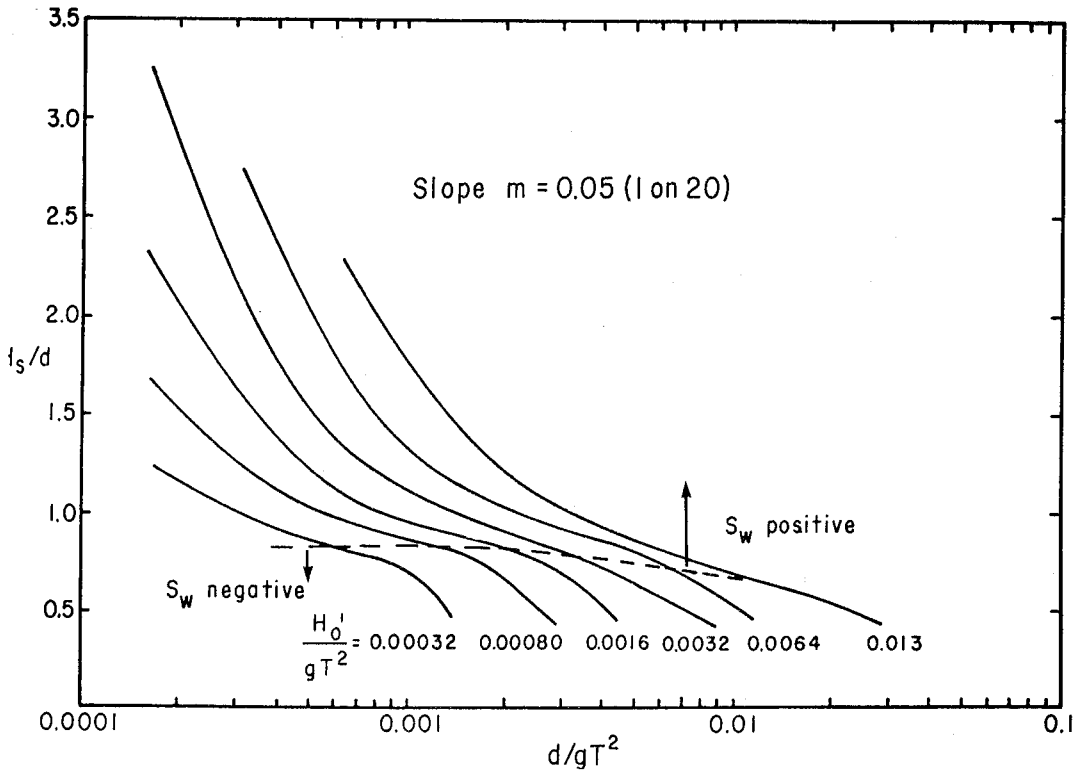
에 따라서는 보다 상세한 계산 또는 파고분포에 대한 검토가 필요하다. 파고분포를 예측하기 위해서



(그림 4) 海床경사 1/500에 대한 近海有意波高 Diagram

는 프로그램 GODAS(720X1R1CB0)을 이용할 수 있다. 이 컴퓨터 프로그램은 심해파고는 Rayleigh

분포를 따른다고 가정한다. 설계시에 심해파가 Rayleigh분포가 아닌 경우, 즉 정점이 여러개인



〈그림 5〉 海床경사 1/20에 대한 近海有意波高 Diagram

Spectra가 일어나는 경우에는 컴퓨터프로그램에서 심해파고 분포는 가정된 분포함수로 바뀌어지고, 직접 예측값을 구하는 과정을 거치게 된다.

이러한 해석적인 모형은 수심이 해안에 가까와지면서 연속적으로 감소한다고 가정하며, 근해파고에 대한 수중 모래톱의 영향은 고려되지 않는다. 연안에 발달한 수중 모래톱이 있는 경우에는 해안지역에서의 근사식으로써, 모래톱을 중심으로 해안방향의 파고는 모래톱의 마루위치에서 예측된 파고와 같이 잡는다(4). 모래톱의 해안쪽부분, 즉 수심이 모래톱 마루부의 수심보다 얇은 곳에서는, 위의 방법이 파고를 예측하는데 사용된다.

방법 1

만일 심해파 상태인 H_0' 와 주기 T , 그리고 해상경사 m 이 가지값이면 근해유의파고를 예측하기 위해 다음의 과정을 이용한다.

a. H_0'/gT^2 과 d/gT^2 을 결정한다. 여기에서 d 는 관심 지점의 정수면수심이다.

b. 해상경사 m 에 해당하는 적당한 그래프를, 세로축을 d/gT^2 값으로 하여 그려서 d/gT^2 과 H_0'/gT^2 이 교차하는 점을 결정하고 가로축에서 H_s/d 의 값을 읽는다.

c. 끝으로, $H_s=d(H_s/d)$ 의 관계를 이용하여 H_s 를 구한다.

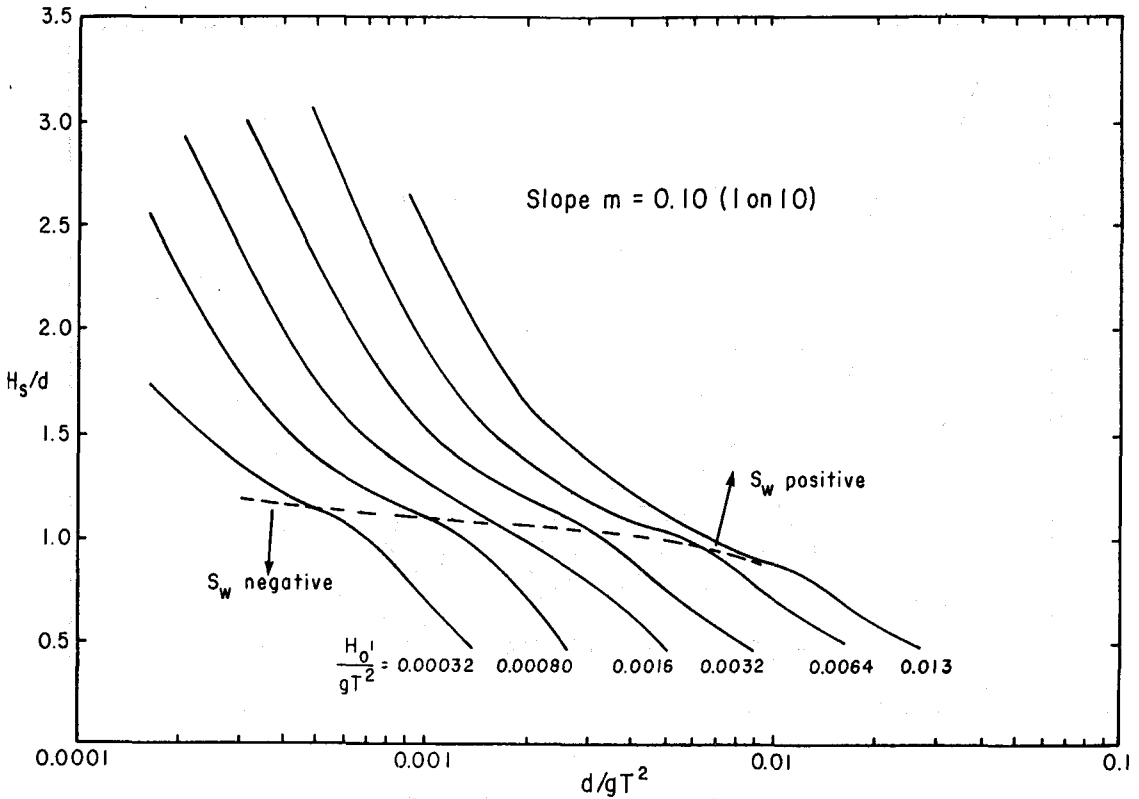
방법 2

한 지점의 국지파 상태들, 즉 $(H_s)_1$, d_1 , m , T 가 가지값일 때, 더 얇은 수심 d_2 에서의 유의파고 $(H_s)_2$ 를 결정할 수 있다.

a. $(H_s)_1/d_1$ 과 d_1/gT^2 을 계산하고 이를 각각 가로축과 세로축에 표시하여 이들이 교차하는 점을 결정한다.

b. 교차하는 점에서의 H_0'/gT^2 을 결정한다. 따라서 H_0' 는 직접 결정될 수 있으며, $(H_s/d)_2$ 와 $(H_s)_2$ 는 방법 1에서와 같이 구할 수 있다.

사용예



〈그림 6〉 海床경사 1/10에 대한 近海有意波高 Diagram

예제 1

파의 상태가, 해상경사 $m=0.02(=1/50)$, 주기 $T=9$ 초, $H_o'=2.5\text{m}(8.2\text{ft})$ 일 때, $d=2.0\text{m}(=6.56\text{ft})$ 인 지점에서의 유의파고를 결정하라.

[풀 이]

방법 1을 이용하면

$$H_o'/gT^2 = \frac{8.2}{32.2(9)^2} = 0.0031,$$

$$\text{그리고 } d/gT^2 = \frac{6.56}{32.2(9)^2} = 0.0025$$

따라서 그림 4로부터, $(H_s/d)=0.75$ 이므로 $H_s=d(H_s/d)=6.56 \times 0.75=4.9\text{ft}=1.5\text{m}$ 이다. 이 예측된 근해유의파고는 단순파일 경우의 값보다 더 낮다. 만일 SPM의 설계방파제 높이 산정방법(단순파에 대한)을 본 예제에 적용하면 예측된 방파제 높이 H_s 는 $1.9\text{m}(=6.23\text{ft})$ 가 된다.

예제 2

해상경사 $m=0.05(=1/20)$, 수심 $d_1=4.0\text{m}(=13.1\text{ft})$ 인 지점에서 주기 $T=16$ 초, $(H_s)_1=2.0\text{m}(=6.56\text{ft})$ 가 파의 조건으로 측정되었다. $d_2=1.0\text{m}(3.28\text{ft})$ 인 지점에서의 유의파고를 결정하라.

[풀 이]

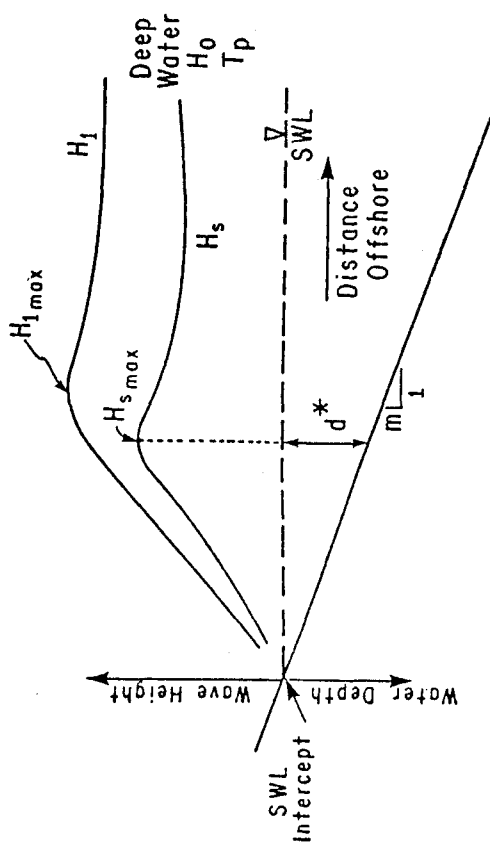
방법 2를 이용하면,

$$(a) \quad (H_s)_1/d_1 = \frac{6.56}{13.1} = 0.5,$$

$$\text{그리고, } d_1/gT^2 = \frac{13.1}{32.2(16)^2} = 0.0016$$

(b) (a)에서의 가로축 값과 세로축 값은 그림 5에서의 $H_o'/gT^2=0.00048$ 인 점에서 교차한다.

(c) (b)에서의 교차점에서



(그림 7) Goda의 모형을 사용한 근해파고 산정 (예측)

($H_{s\ max}$)를 가진다(그림 7). 이 점에서 유의파고는 최대값이 되기 때문에 위치에 구조물을 축조하거나 파고에 민감한 다른 활동을 하기에는 가장 불리한 장소가 된다.

그림에 표시된 H_1 은 파중에서 상위 1%파고의 평균값으로 정의되며, 이는 초과확률이 약 1/260이 되는 파고이다.

그림 8은 심해파 경사와 해상경사의 함수인 $H_{s\ max}$ 와 $H_{1\ max}$ 산정을 위한 설계곡선이다. 이 곡선들은 파경사가 급해질수록, 그리고 해상경사가 완만해질수록 첨두파고는 감소함을 보여주고 있다. 첨두 유의파고가 일어나는 무차원 수심은 최대 급경사파를 제외하고는 해상경사와 파경사가 증가함에 따라 감소한다(그림 9).

사용예

$H_0=2.0m(6.56ft)$, $T_p=10초$, 해상경사 $m= 1/100$ 일 때 Surf 지역에서 첨두 유의파고와 최대파고 및 그들의 위치를 구하라.

[풀 이]

$$\text{이 예제에서 } \frac{H_0}{gT^2} = \frac{2.0}{9.8 \times 10^2} = 0.002$$

$$\text{그림 8에서 } \frac{H_{s\ max}}{H_0} = 1.18$$

$$\text{또는 } H_{s\ max} = 2.36m(7.74ft)$$

$$\text{그리고 } \frac{H_{1\ max}}{H_0} = 1.81$$

$$\text{또는 } H_{1\ max} = 3.62m(11.87ft)$$

$$\text{그림 9에서 } \frac{d^*}{H_0} = 2.36$$

$$\text{또는 } d^* = 4.72m(15.48ft)$$

이는 해저경사가 1/100인 곳에서는 정수면(SWL) 교차점으로부터 외해쪽으로 472m(1,550ft)되는 위치이다. 단순파이론은 쇄파고 H_b 가 첨두유의파고와 상위 1%파고 사이에 있음을 예측한다. (표 참조)

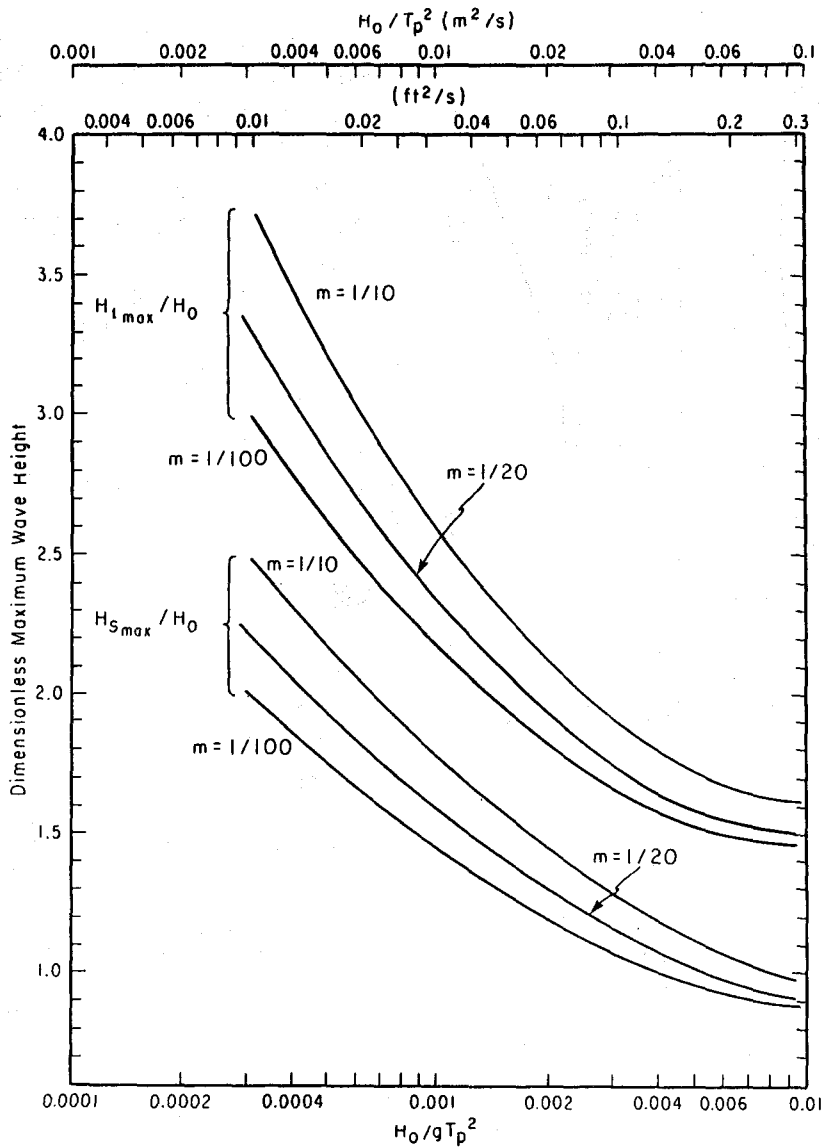
$$d_2/gT^2 = \frac{3.28}{32.2(16)^2} = 0.0004 \text{ 이다.}$$

(d) $d_2/gT^2 = 0.0004$ 이고, $H_0'/gT^2 = 0.00048$ 인 점에서, $(H_s/d)_2 = 0.83$ 이다.

(e) 따라서, 예측된 유의파고는 $(H_s)_2 = d_2(H_s/d) = 3.28 \times 0.83 = 2.7ft = 0.83m$ 이다.

III. 설계곡선도를 이용한 근해최대파고와 한계수심의 산정

Goda의 모형을 사용하여 근해파의 조건들을 계산한 결과는 파고 매개변수가 어느 한 점에서 최대 또는 첨두치를 가짐을 보여주고 있다. 예로써, 심해 유의파고, H_0' 와 최대 에너지밀도주기, T_p 를 가지는 불규칙파는 수심 d^* 에서 유의파고의 첨두값



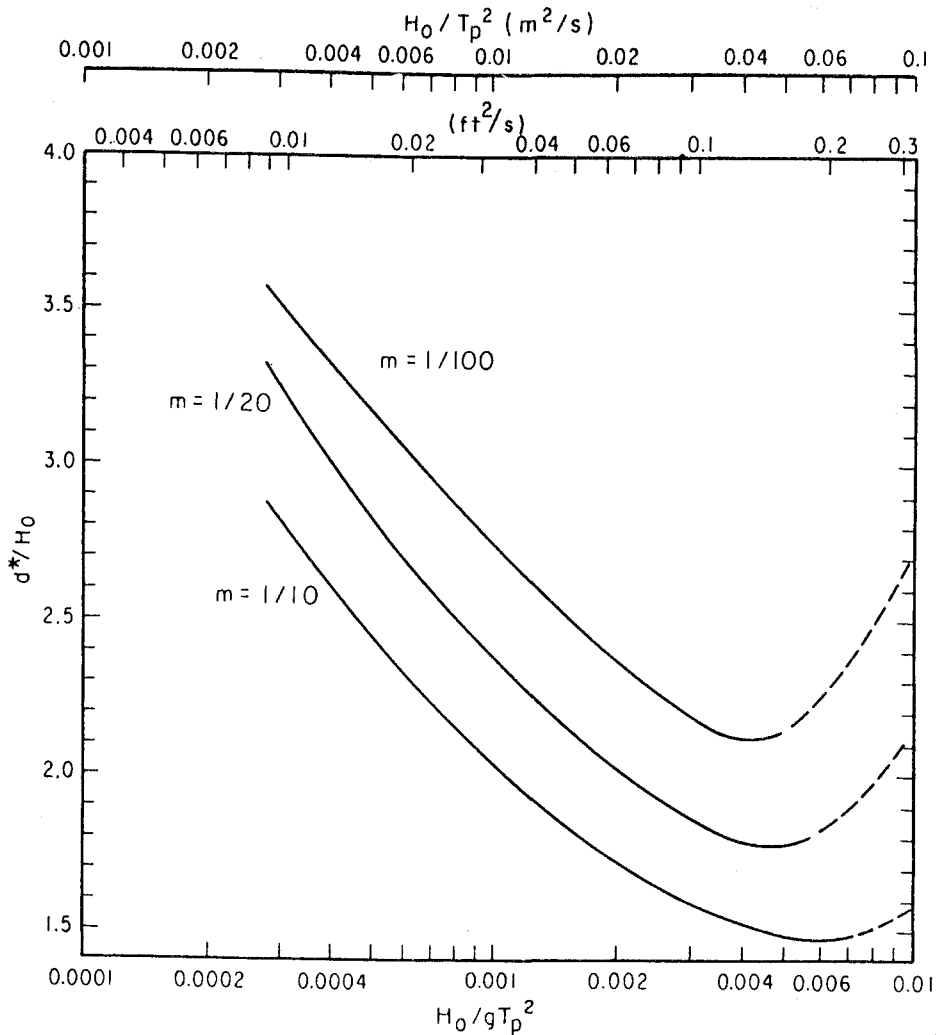
(그림 8) 근해파고의 첨두값

<표> 불규파이론과 단순파이론을 사용한 예측 첨두파고
($T=10$ 초, $m=1/20$)

H_0		$H_{S_{max}}$		H_b		$H_{1_{max}}$	
m	ft	m	ft	m	ft	m	ft
1.0	3.28	1.6	5.25	1.8	5.9	2.3	7.54
2.0	6.56	2.6	8.53	3.1	10.2	3.8	12.5
4.0	13.1	4.2	13.8	5.1	16.7	6.5	21.3
6.0	19.7	5.8	19.0	7.0	23.0	9.2	30.2

IV. 요약

Goda의 해석적인 모형을 이용하여 불규칙파에 대한 근해유의파고를 산정하는 설계곡선도와 그 사용예제를 함께 기술하였다. 단순파이론에 근거한 SPM의 통상적인 이용 결과는 본고에서 구한 결과보다 크게 나타남을 알 수 있다.



〈그림 9〉 침두유의 파고에 대한水深

Surf지역에서 불규칙파의 파고예측을 위한 Goda 모형은 침두유의 파고와 최대파고 및 침두파고가 일어나는 위치결정에 이용된다.

참고문헌

1. U. S. ARMY, CORPS OF ENGINEERS, COASTAL ENGINEERING RESEARCH CENTER, Shore Protection Manual, 4th ed, Vols. I and II, U. S.-G. P. O., Washington, D. C., 1984.
2. GODA, Y., "A Synthesis of Breaker Indices", Transac. of the Japanese Society of Civil Engineers, Vol. 2, part2, 1970.
3. GODA, Y., "Irregular Wave Deformation in the Surf Zone", Coastal Engineering in Japan, Vol. 18, 1975, pp.13~26.
4. SEELIG, W., and AHRENS, J., "Estimating Nearshore Conditions for Irregular Waves", U. S. ARMY, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Va., U. S. A., 1980.