

# 추계학적 호안 구조물 설계기법

## - 피복석을 중심으로 -

조용준 (서울시립대학교 토목공학과 교수)

### 서론

최근 방파제 설계의 기본개념은 일본에 의해 주도되어 왔고 상대적으로 일천한 연안개발 경험을 갖고 있는 우리나라는 Ito와 Godda의 경험식을 근간으로 연안개발이 진행되어 온 것으로 보여진다. 후덥지근한 기후와 지질학적 특성으로 인해 고강도의 암석이 상대적으로 희귀한 일본의 경우 경사제는 바지선을 이용한 작업이 불가능한 천해역에만 제한적으로 채택되었으며 대부분의 경우 직립제 형태가 채택되어 왔다. 쇄파로 인한 충격압이 미미한 경우 직립제를 선호하던 서구의 경우와는 달리 작지 않은 해안경사 등으로 인해 쇄파의 가능성을 배제할 수 없어 일본의 직립제는 충격 쇄파압에 대해 설계되어 왔다. 직립형태의 방파제를 연약 지반에 설치할 경우 예상되는 침하 문제를 최소화하기 위해 Rubble Mound 기초가 선행되게 된다. 충격 쇄파압의 발생 여부를 판별하여 쇄파가 예상되는 경우 경사제를 채택하거나 공간상의 제약 혹은 월파가 허용되지 않을 경우 직립제를 에너지 소산용 콘크리트 Block으로 보호하는 것이 일반적이다. 파랑에너지가 협대역에 분포하는 경우 비교적 큰 파랑이 연속해서 발생하는 파군현상이 발달하게 되며 파군현상을 측정하기 위해 파고가 임계치보다 큰 파랑이 연속해서 일어나는 수 즉 활주길이 [run length]가 사용되며 최대파력은 파군을 구성하는 두 번째 파랑이 구조물의 소단에 접근하면서 발생된다.

기존 호안 구조물의 에너지 소산용 콘크리트

Block 혹은 피복석은 대부분 Hudson식(SPM 1984)에 의존한 결정론적 기법에 의해 설계되어 왔다. 이러한 절대적 선호도는 무엇보다 Hudson식 갖는 편이성에 기초한 것으로 보여진다. 그러나 이러한 상당한 호응에도 불구하고 Hudson식은 그 유도과정을 살펴보면 적용 범위에 상당한 제약이 따른다는 사실을 쉽게 확인할 수 있다. 이러한 한계는 Hudson식이 단색 파, 소규모의 실험에서 축적된 자료로부터 제시되었다는 점, 내습하는 파랑의 주기 혹은 폭풍 지속시간이 미치는 영향이 간과되었다는 점, 월파와 구조물의 투수특성이 고려되지 못한 점, 호안 구조물의 사면경사가 갖는 영향을 설명하기에는  $\cot \alpha$ 로는 역부족이라는 사실 등에 기초한다. 참고로 피복석 중량  $W_{50}$ 정을 위한 Hudson 방정식을 나열하면 다음과 같다.

$$W_{50} = \frac{\rho_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \alpha} \quad (1)$$

여기서  $H$ ,  $\alpha$ ,  $\rho_{rock}$ 은 각각 설계파고, 사면 경사각도, 피복석의 밀도를 나타낸다. 1973년 판 연안보호교본은 피복석 중 최대 5%까지 변위가 허용되는 경우 호안 구조물 몸체에 대해 안정 계수  $K_D$ 의 값을 다음과 같이 권하고 있다.

$$K_D = 3.5 \quad \text{쇄파가 발생하는 경우} \quad (2)$$

$$K_D = 4.0 \quad \text{쇄파가 발생하지 않는 경우} \quad (3)$$

무작위 파열에 대해 수행된 실험 자료는 없으나 설계 파괴  $H$ 로 유의 파괴  $H_S$ 를 취할 것을 권하고 있다. 그러나 1984년에 이르러 연안보호교본(SPM 1984)은 파괴를 유의 파괴  $H_S$ 에서  $H_{10}$ 로 상향조정하였고 안정 계수  $K_D$ 는 감소시키는 등 더욱 보수적인 입장을 취한 바 있다. 이러한 파괴와 안정계수의 조정은 피복 석의 자중을 최대 3.5배까지 증가시킬 수 있는 상당한 규모이며 그 동안 피복석이 과소하게 평가되었다는 사실을 시사한다.

$$K_D = 2.0 \text{ 쇄파가 발생하는 경우} \quad (4)$$

$$K_D = 4.0 \text{ 쇄파가 발생하지 않는 경우} \quad (5)$$

1988년에 Van der Meer는 다양한 파랑 조건과 장갑 층/중심부 투수 특성을 대상으로 수행된 실험 자료를 토대로 피복석으로 사용되는 암의 직경에 대한 설계기준을 제시하였다. 이러한 장점에도 불구하고 Van der Meer 식은 파랑의 수로 상징되는 폭풍 지속시간, 파랑 경사의 장갑층 경사에 대한 비율, 투수 계수를 포함하는 다소 복잡한 형태로 인해 많이 활용되지 못하고 있는 것으로 판단된다.

따라서 본고에서는 Hudson 식에 비해 자연계에서 조우하는 파동계에 보다 근접한 실험 자료를 토대로 제안된 Van der Meer 식을 중심으로 기존의 결정론적 설계기법에서 보다 진일보한 형태인 추계학적 설계 기법을 소개하고자 한다.

### Van der Meer 식

Van der Meer (1988)는 Thompson과 Shuttler (1975)의 초기 작업을 기초로 일련의 수리모형 실험을 Delft Hydraulics (1988)에서 수행한 바 있다. 이 실험은 다양한 파랑 조건과 장갑 층/중심부 투수 특성을 대상으로 하여 이제까지 수행된 실험 중 가장 종합적인 것으로 보여진다. 수행과정에서 축적된 자료를 토대로 Van der Meer는 심해역의 경우 권파와 쇄기파를

대상으로 다음과 같은 경험식을 제안한 바 있다.

권파의 경우

$$Hs/\Delta D_{n50} = 6.2P^{0.18}(S_d/\sqrt{N})^{0.2}\xi_m^{0.5} \quad (6)$$

쇄기파의 경우

$$Hs/\Delta D_{n50} = 1.0P^{0.13}(S_d/\sqrt{N})^{0.2}\cot\alpha\xi_m^p \quad (7)$$

여기서  $\Delta$ 는  $\rho_{rock}/\rho_{water}$  -1로 정의되는 상대밀도,  $N$ 은 폭풍시 내습하는 파랑의 수,  $P$ 는 투수계수,  $S_d$ 는 평균 해수위 인근의 침식면적을 명목 직경으로 나눈 침식계수,  $\xi_m$ 는 Iribarren 수로 알려진 쇄파역 자기상사 변량으로 다음과 같이 정의된다.

$$s = \frac{2\pi}{g} \frac{H}{T^2} \quad (8)$$

$$\xi_m = \frac{\tan\alpha}{s} \quad (9)$$

$D_{n50}$ 는 장갑석으로 사용되는 암의 특성을 나타내는 대표변량으로 명목직경이라 하며 암의 평균질량으로부터 다음과 같이 유도된다

$$D_{n50} = (W_{50} / \rho_{rock})^{1/3} \quad (10)$$

여기서  $W_{50}$ 는 중량 누가 분포함수에서 50%에 해당하는 암석의 무게를 나타낸다.

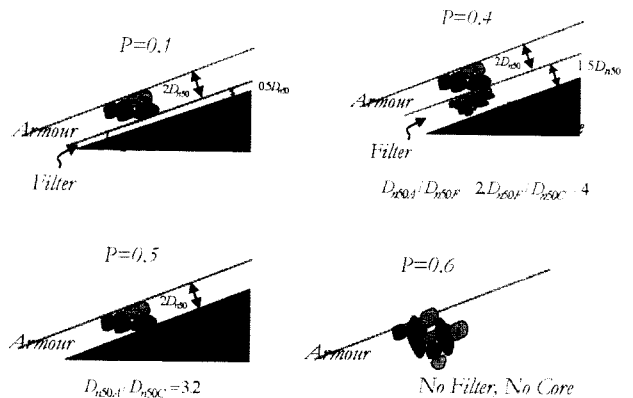


그림 1. 호안 구조물 축조방식에 따른 투수 계수의 변화

권파에서 쇄기파로의 천이는 임계치  $\xi_{mc}$ 를 활용하여 추정할 수 있으며  $\xi_{mc}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\xi_{mc} = (6.2P^{0.31} \tan \alpha)^{1/(P+0.5)} \quad (11)$$

$\cot \alpha \geq 4$ 인 경우 권파에서 쇄기파로의 천이는 발생하지 않으며 이러한 사면경사에 대해서는 식 (6)만이 사용되어야 한다.

심해 역의 경우 대표 파고로 유의 파고  $H_s$ 가 사용되나 천해 역에서는 쇄파 등으로 인해 파고는 Rayleigh 분포로부터 이탈된다. 1:30의 사면경사를 대상으로 한 실험자료와 파의 성장이 수심에 의해 제한되는 경우에 대한 분석을 통해 Van der Meer (1988)는 천해역의 경우 장갑석의 안정성은 유의파고보다는  $H_{2\%}$ 에 의해 보다 정확히 기술된다고 보고하였다. 이러한 Van der Meer(1988)의 시각과 Rayleigh 분포에 따를 경우  $H_{2\%}$ 의 유의파고에 대한 비율은 1.4라는 사실에 준거하여 식 (6), (7)을  $H_{2\%}$ 의 향으로 나타내면 다음과 같다.

권파의 경우

$$H_{2\%}/\Delta D_{n50} = 8.7P^{0.18} (S_d/\sqrt{N})^{0.2} \xi^{0.5} \quad (12)$$

쇄기파의 경우

$$H_{2\%}/\Delta D_{n50} = 1.4P^{-0.13} (S_d/\sqrt{N})^{0.2} \cot \alpha \xi_m^0 \quad (13)$$

식 (12), (13)은 파의 성장이 수심에 의해 제한되는 영향을 반영한 것이나 유의파고를 이용하여 식 (6), (7)으로 산출하는 것이 보다 안정적이라 할 수 있다. 이러한 결과는 쇄파로 인해 파고는 절삭되거나 이러한 부분들이 감안되지 않기 때문에 기인된다. 파고가 Rayleigh 분포를 취하면 식 (12), (13)은 식 (6), (7)과 동일한 결과를 보이나 파의 성장이 수심에 의해 제한되는 경우  $H_{2\%}$ 의 유의파고에 대한 비율은 1.4 보다는 작은 값을 취하게 되며 따라서 파의 성장이 수심에 의해 제한되는 경우  $H_{2\%}/H_s$  비율은 실측 자료를 토대로 추정되어야 한다.

### 호안 구조물의 설계의 기본이론

호안 구조물의 설계는 크게 정적 안정 설계 개념과 동적 안정 설계개념으로 대별 할 수 있다. 설계파고의 명목직경에 대한 비율이 구조물의 안정성을 결정하며 이러한 논지에서  $H/\Delta D$ 로 정의되는 안정계수  $N$ 라는 개념이 도입된다. 이 안정계수 외에 쇄파 변량도 상당한 영향을 미친다. 각 방법론의 인식상의 차이는 다음과 같다.

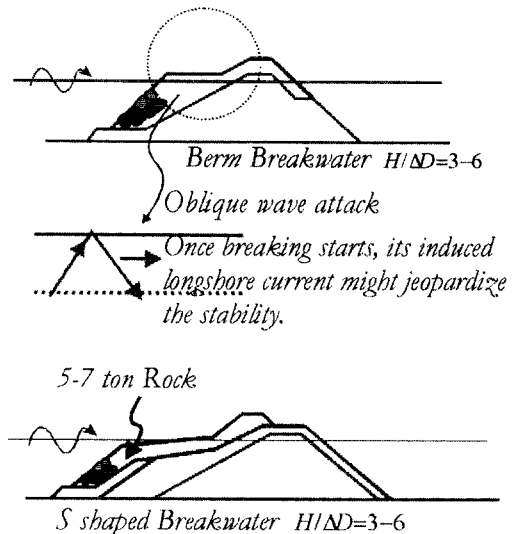
#### 정적 안정 설계 개념(Statically Stable) :

설계 파랑의 내습 시 변위가 허용되지 않으며  $N=H/\Delta D$ 으로 정의되는 안정계수가 1-4사이에 분포한다.

#### 동적 안정 설계개념(Dynamically Stable):

설계 파랑의 내습 시 변위가 허용되며 파력에 의해 새로운 평형상태를 찾아가도록 하는 개념으로 안정계수가 6 이상이다.  $N_s$ 가 6이상인 경우 최종적인 사면형은 주기 파고 등에 영향을 받으며 안정계수는 다음과 같이 수정된다.  $N_{st} = N_s \cdot T_m \sqrt{g/D}$

Van der Meer 식의 물리적 의미를 확연히 드러



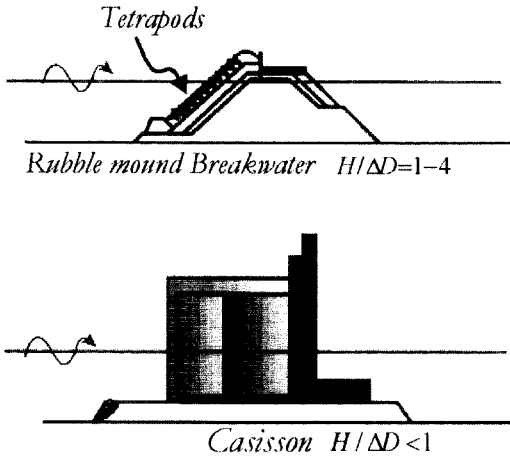


그림 2. 안전계수로 구분한 호안 구조물

내기 위해 각 항을 세분하여 나타내면 다음과 같다.

$$1 = \frac{6.2P^{0.18}S_d^{0.2}\left(\frac{2\pi}{g}\right)^{0.25}(\cot \alpha)^{0.5}\Delta D(=s)}{H^{0.75}N^{0.1}T^{0.5}(=F)} \quad (14)$$

따라서 장갑 층의 강도  $S$ 가 부하 되는 파력  $F$ 보다 작은 경우 장갑 층은 불안정하며 반대의 경우 안정적이라 할 수 있다.

### 추계학적 호안 구조물 설계기법

추계학적 방법은 기존의 결정론적 설계기법에서 보다 진일보한 형태로 적절한 안전율을 체계적으로 산정 할 수 있다. 이러한 장점은 방파제 강도와 파력에 영향을 미치는 인자에 내재한 불확실성을 통계적으로 기술함으로써 가능하다. 추계학적 설계방법에서는 잉여 안전율은 구조물의 강도와 파력에 내재한 모든 불확실성을 고려함으로써 산정 할 수 있다.

또한 적절한 파괴 확률을 수용함으로써 잉여 안전율을 보다 합리적으로 조정할 수 있다. 추계학적 해석방법을 지지하는 가장 큰 이유는 기존의 결정론적 설계기법에서 불필요하게 보수적으로 운영될 수 있는 부분들을 찾아낼 수 있다는 경험적 인식으로 보여지며 이 경우 추계학적 방법은 비용절감으로 이어질 수 있다. 이와 더불어 추계학적 방법에서는 강도와 파력에 내재한 불확실성을 보다 확연하게 인지함으

로써 구조물의 내구 연한 동안 발생할 수 있는 침식을 보다 정확하게 평가할 수 있다.

추계학적 설계방법은 크게 4단계로 구분 할 수 있다.

- Level III : 피복 석 강도와 파력의 확률밀도함수를 해석적으로 구하여 활용하는 방안
- Level II : 피복 석 강도와 파력의 확률밀도함수를 근사적으로 구하여 활용하는 방안
- Level I : 유사 추계학적 방법으로 피복 석 강도와 파력에 영향을 미치는 무작위 과정별로 안전율을 고려하는 방안
- Level 0 : 특성 강도와 파력에 대해 하나의 안전율을 적용하는 결정론적 방법

기존의 Hudson식에 의존한 결정론적 기법을 추계학적 방법으로 확장하는 경우 특정한 설계치 대신 장갑 층의 강도  $S$ 와 부하 되는 파력  $F$ 의 결합 확률밀도함수  $f_{SF}(s,f)$ 가 주요한 역할을 하게된다.  $f_{SF}(s,f)$ 을 통해 강도  $S$ 와 파력  $F$ 의 여러 가지 조합에 대해 침식될 확률을 각각 산정 할 수 있다.

Van der Meer 식에 기초하여 장갑 층의 강도  $S$ 와 부하 되는 파력  $F$ 의 차로 신뢰함수  $Z$ 를 정의하면 구조물의 신뢰도는 다음과 같이 분류되며 식(15)에서 드러나듯 신뢰도의 적절한 산정을 위해서는  $f_{SF}(s,f)$ 에 대한 정보는 반드시 필요하다.

$$\begin{aligned} Z(X_i) &= S - F \\ &= 6.2P^{0.18}S_d^{0.2}\left(\frac{2\pi}{g}\right)^{0.25}(\cot \alpha)^{0.5}\Delta D - H^{0.75}N^{0.1}T^{0.5} \\ X_i &= P, S_d, \cot \alpha, \Delta, D, H, N, T \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{cases} Z > 0 \text{ 안정} \\ Z = 0 \text{ 파괴} \\ Z < 0 \text{ 불안정} \end{cases}$$

장갑 층의 강도  $S$ 와 부하 되는 파력  $F$ 은 상호 독립적인 추계과정으로 보이며 이 사실에 기초하면  $f_{SF}(s,f)$ 는 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$f_{SF}(s,f) = f_{SF}(s)f_F(f) \quad (16)$$

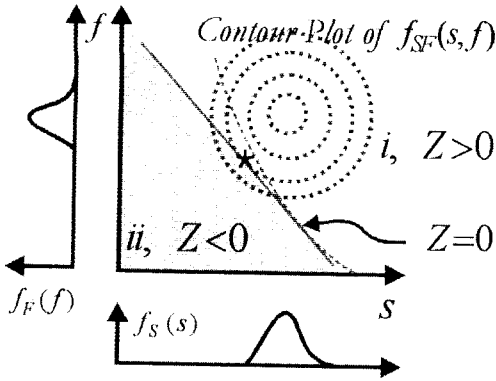


그림 3. 결합확률밀도함수의 등고선도와 침식영역

엄밀히 말해 신뢰함수는 Van der Meer 식에 준거하면  $P, S_d, \cot \alpha, \Delta, D, H, N, T$ 라는 상호 독립적인 8개의 무작위 과정에 종속하나 편의상 강도  $S$ 와 파력  $F$ 에 종속하는 것으로 가정하면  $S$ 와  $F$ 로 구성되는 표본공간에서 신뢰함수의 거동은 다음과 같이 도식화 할 수 있다.

피복석이 파괴될 확률은 신뢰함수의 확률밀도함수  $f_Z(z)$ 의 영역  $ii$ 에 대한 적분으로 정의되며 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P(Z < 0) &= \int_{Z < 0} f_Z(z) dz \\
 &= \int \int f_S(s) f_F(f) dsdf \\
 &= \int \int \int \dots \int_{Z < 0} f_{X_1}(x_1) f_{X_2}(x_2) \dots \\
 &\quad f_{X_n}(x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

피복 석의 경우처럼 신뢰 함수는 상당히 복잡하며 식 (13)에 명기된 계산과정을 수행하기가 대개의 경우 쉽지 않다. 이와 더불어 영향을 미치는 무작위 과정의 통계적 특성  $f_{X_1}(x_1), f_{X_2}(x_2), f_{X_n}(x_n)$ 이 명확히 밝혀지지 않은 경우도 상당하다. 전술한 어려움으로 인해 Level II의 간략화 기법이 제시되었다. Level II 방법은 주로 Level III의 적용과정에서 직면하게 되는 어려움을 해결하기 위해 사용된 간략화 기법에 따

라 FMA(first order mean value approach), FDA(first order design point approach), AFDA(approximate full distribution approach) 등으로 구분할 수 있으며 신뢰함수  $Z$ 의 선형화는 Level II 방법의 공통된 특징이라 할 수 있다. Level II 방법은 Level III에 비해 사용하기가 용이하다는 점, 신뢰성에 영향을 미치는 무작위 과정들의 상이한 통계적 특성을 고려할 수 있다는 점등으로 인해 최근 적용빈도가 확대되는 추세로 보여진다.

### FMA(first order mean value approach)

FMA 방법은 신뢰함수  $Z$ 의 영향을 미치는 상호 독립적인 8개의 무작위 과정  $P, S_d, \cot \alpha, \Delta, D, H, N, T$ 의 평균값에 대한 선형화로 구성된다. 선형화는 다음과 같이 고차 항을 무시한 Taylor 급수로 수행된다.

$$Z(X_1, X_2, \dots, X_n) \cong Z(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) +
 \tag{18}$$

$$(X_1 - \mu_{x_1}) \frac{\partial Z}{\partial X_1} + \dots + (X_n - \mu_{x_n}) \frac{\partial Z}{\partial X_n}$$

$$\mu_Z = Z(\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n})
 \tag{19}$$

$$\sigma_Z^2 \cong \sigma_{x_1}^2 \left( \frac{\partial Z}{\partial x_1} \right)^2 + \dots + \sigma_{x_n}^2 \left( \frac{\partial Z}{\partial x_n} \right)^2
 \tag{20}$$

$$\cong \sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2 \left( \frac{\partial Z}{\partial x_i} \right)^2$$

$$\frac{\partial Z}{\partial S_d} = \frac{0.2S}{S_d}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial D} = \frac{S}{D}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial H} = -\frac{0.75F}{H}$$

$$\frac{\partial Z}{\partial T} = -\frac{0.5F}{T}$$

(19), (20)에 기술한 신뢰함수의 근사적인 평균치와 표준오차로부터 신뢰인자  $\beta$ 는 다음과 같이 정의된다.

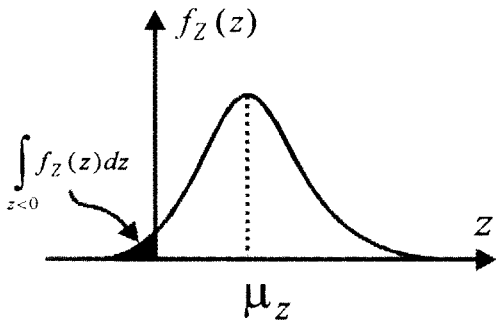


그림 4. 정규화된 Gaussian 분포

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \quad (21)$$

여기서 신뢰인자  $\beta$ 는  $Z=0$ 에서 평균치 사이의 상대적 거리를 나타내므로 호안 구조물이 파괴될 확률을 제공할 수 있다. 참고로 표 4.에는  $\beta$ 에 따른 호안 구조물의 파괴 확률을 수록하였다.

8개의 무작위 과정  $P, S_d, \cot \alpha, \Delta, D, H, N, T$ 이 정규분포를 따른다는 가정을 수행하면 선형화 된  $Z$ 는 정규분포를 취하며 평균치와 표준편차는 다음과 같이 주어진다.

FDA (first order design point approach)

FDA 방법은 선형화 FMA 방법과 동일하나 선형화 과정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 Taylor 급수가 평균값 대신 설계 치에 대해 전개되는 점이 상이하다. 설계치는 무작위 독립 인자로 구성되는 표본 공간에서  $Z=0$ 라는 사건이 그리는 궤적 중 결합 확률밀도함수  $f_{X_1}(x_1)f_{X_2}(x_2) \dots f_{X_n}(x_n)$ 가 최대인 점으로 정의된다. 이 방법은 신뢰함수가 비 선형인 경우 연산이 반복적으로 수행되어야 하며 따라서 수치 작업은 불가피 하다.

표 1. FMA 방법에 의한 계산 예

인자	평균 $\mu_z$	표준 편차 $\sigma_z$	영향 인자 $\alpha^2_{x_i}$	기여도 $\alpha^2_{x_i}/\sum \alpha^2_{x_i}$
$S_d$	10	2	1	3%
$H$	3	0.5	1.9	7%
$T$	6	1	0.9	3%
$D$	1	0.2	24.7	87%
$\cot \alpha$	4	0	0	0
$\Delta$	1.6	0	0	0
$P$	0.5	0	0	0
$N$	1000	0	0	0

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2 = 28.5 \quad \beta = 13.7/5.3 = 2.57 \quad P(Z < 0) = 0.51 \times 10^{-2}$$

AFDA(approximate full distribution approach)

AFDA 방법은 Taylor 급수가 설계 치에 대해 전개된다는 점에서 선형화 FDA 방법과 동일하나 영향을 미치는 개개 무작위 독립 인자들의 확률밀도함수가 추가적으로 고려되어 선형화 과정의 오차를 줄인

표 2. FDA 방법에 의한 계산 예

인자	평균 $\mu_z$	표준 편차 $\sigma_z$	설계 치 $X^*$	영향 인자 $\alpha^2_{x_i}$	기여도 $\alpha^2_{x_i}/\sum \alpha^2_{x_i}$
$S_d$	10	2	9.9891	0.2058	0.74%
$H$	3	0.5	3.061	1.9264	6.96%
$T$	6	1	6.0203	0.8854	3.2%
$D$	1	0.2	0.4564	24.6512	89.09%
$\cot \alpha$	4	0	4	0	0
$\Delta$	1.6	0	1.6	0	0
$P$	0.5	0	0.5	0	0
$N$	1000	0	1000	0	0

$$\sum_{i=1}^n \sigma_{x_i}^2 = 27.6688$$

표 3. 구조물의 강도와 파력에 영향을 미치는 무작위 과정의 확률 분포 및 통계특성

무작위 과정	확률분포 형	평균치	표준편차
Dn50	정규분포	1.0	0.03
$\Delta$	정규분포	1.6	0.05
$\cot \alpha$	정규분포	3.0	0.15
$P$	정규분포	0.5	0.05
$N$	정규분포	3000	1500
$H$	Weibull분포*	$B = 0.3$	$C = 2.5$
$F$	정규분포	0	0.25
$Sm$	정규분포	0.04	0.01

$$* P\{X \leq x\} = 1 - e^{-\left(\frac{x-A}{B}\right)^C}$$

점이 특징이며 각 무작위 과정의 대표적인 확률밀도 함수는 다음과 같다.

**결론**

호안 구조물은 그 특성상 무작위한 파력에 노출되며 이러한 파력을 기술하기에는 Hudson식은 역부족인 것으로 보여진다. 이러한 태생적 한계는 일찍부터 인지되어왔으나 Hudson식은 그 편이성으로 인해 우리나라 호안 구조물 설계에 예외없이 적용되어왔다. 이에 반해 Van der Meer 식은 자연계에서 조우할 수 있는 파동계에 보다 근접한 실험 자료를 토대로 제시되었다. Van der Meer 식은 Hudson식에서 간과된 폭풍 시 내습하는 파랑의 수, 파랑 경사의 장갑층 경사에 대한 비율, 투수계수 등을 포함하고 있다. 평형상태에 도달한 해안의 사면형태가 내습하는 파랑의 주기에 민감하게 반응한다는 점에서 Van der Meer 식은 상당한 설득력을 지니고 있는 것으로 판단된다. 또한 최근의 친수성 혹은 환경 친화적 연안 구조물을 요구하는 추이를 감안하면 향후 대형 에너지 소산용 콘크리트 Block을 이용한 정적 안정구조물 보다는 동적 안정 개념의 자연석을 이용한 S자 형태의 방파제 혹은 단 방파제 등이 활발히 도입될 것으로 예상된다.

본고는 이러한 인식을 토대로 Van der Meer 식에 나타나는 제 변량을 무작위 과정으로 해석하여 호안 구조물의 침식될 수 있는 확률을 산정하였다. 이렇게 산정된 침식 확률은 동적 안정 개념의 자연석을 이용한 S자 형태의 방파제 혹은 단 방파제에 차용되는 피복석의 최적설계에 중요한 역할을 하게된다. 장갑층의 강도와 부하 되는 파력 의 차로 정의되는 신

표 4. 표준 정규분포 표

$\beta$	$P(Z < 0)$	$\beta$	$P(Z < 0)$
0	0.5	3.1	$0.97 \cdot 10^{-3}$
0.1	0.46	3.2	$0.69 \cdot 10^{-3}$
0.2	0.42	3.3	$0.48 \cdot 10^{-3}$
0.3	0.38	3.4	$0.34 \cdot 10^{-3}$
0.4	0.34	3.5	$0.23 \cdot 10^{-3}$
0.5	0.31	3.6	$0.16 \cdot 10^{-3}$
0.6	0.27	3.7	$0.11 \cdot 10^{-3}$
0.7	0.24	3.8	$0.72 \cdot 10^{-4}$
0.8	0.21	3.9	$0.48 \cdot 10^{-4}$
0.9	0.18	4.0	$0.32 \cdot 10^{-4}$
1.0	0.16	4.1	$0.21 \cdot 10^{-4}$
1.1	0.14	4.2	$0.13 \cdot 10^{-4}$
1.2	0.12	4.3	$0.85 \cdot 10^{-5}$
1.3	0.10	4.4	$0.54 \cdot 10^{-5}$
1.4	0.081	4.5	$0.34 \cdot 10^{-5}$
1.5	0.067	4.6	$0.21 \cdot 10^{-5}$
1.6	0.055	4.7	$0.13 \cdot 10^{-5}$
1.7	0.045	4.8	$0.79 \cdot 10^{-6}$
1.8	0.036	4.9	$0.48 \cdot 10^{-6}$
1.9	0.029	5.0	$0.29 \cdot 10^{-6}$
2.0	0.023	5.1	$0.17 \cdot 10^{-6}$
2.1	0.018	5.2	$0.10 \cdot 10^{-6}$
2.2	0.014	5.3	$0.58 \cdot 10^{-7}$
2.3	0.011	5.4	$0.33 \cdot 10^{-7}$
2.4	0.0082	5.5	$0.19 \cdot 10^{-7}$
2.5	0.0062	5.6	$0.11 \cdot 10^{-7}$
2.6	0.0047	5.7	$0.6 \cdot 10^{-8}$
2.7	0.0035	5.8	$0.33 \cdot 10^{-8}$
2.8	0.0029	5.9	$0.18 \cdot 10^{-8}$
2.9	0.0019	6.0	$0.99 \cdot 10^{-9}$
3.0	0.0013		

뢰함수  $Z$ 의 정확한 확률밀도함수는 폭풍 시 내습하는 파랑의 수, 파랑 경사의 장갑층 경사에 대한 비율, 투수계수 등과 같은 무작위 과정의 통계특성의 파악이 선행되면 구할 수 있으나, 본고에서는 계산이 보다 용이한 FDA 기법을 활용하였다. ●

---

### 〈참 고 문 헌〉

1. Delft Hydraulics. (1988). Rock slopes, static stability of rock slopes under waves attack, Report M1983, Part 1.
2. Meer, J. W. van der, (1988). Deterministic and probabilistic design of break water armour layers, Proc. Am. Soc. Civ. Eng. Jnl Waterways Ports, Coastal and Ocean Eng., Div., 114, NO.1.
3. SPM, (1984). Shore Protection Manual, 4th edition, US Army Corps of Eng., Coastal Eng. Res. Center, US Government Printing Office, Washington, DC.
4. Thompson, D. M. and Shuttler, R. M., (1975). Riprap design for wind-wave attack—a laboratory study in random waves, Report EX 707 Hydraulics Research, Wallingford.