

경사식 방파제의 피복재 중량 산정식 비교

고 광 오 (현대건설(주) 토목설계실 대리)
이 종 인 (한국건설기술연구원 선임연구원)

1. 방파제 설계기준

해안구조물 건설 시 파랑의 내습에 의한 피해를 막기 위해 설치되는 대표적인 구조물로는 방파제를 들 수 있으며, 방파제는 태풍이나 해일 등과 같은 해양 외력을 견딜 수 있도록 설계하고 건설되어야 한다. 방파제 설계기준은 각 나라마다 서로 다른 기준을 정하고 있으나, 그 근간을 이루는 기준은 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 첫번째는 주로 미국 등지에서 사용하고 있는 "Shore Protection Manual(SPM, 1984)"이고, 두번째는 유럽을 중심으로 사용되고 있는 "Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering(CIRIA/CUR SP 83, 1991)"이며, 세번째는 일본의 "항만의 시설의 기술상의 기준·동해설(1999)"을 들 수 있다.

SPM은 미 육군 공병단 해안공학 연구센터(U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center)에서 수 십년 동안의 수리모형실험 및 연구를 통해 Hudson 공식을 근간으로 하여 만든 설계기준서이며, SPM을 개선한 "Coastal Engineering Manual"이 2001년도에 출간될 예정이다. CIRIA/CUR은 영국과 네덜란드의 공동연구로 탄생된 설계기준서로서 Delft 수리연구소와 HR Wallingford에서 수행한 수리모형실험 결과들을 바탕으로 각 분야의 전문가들이 SPM에서 제시한 설계기준을 개선한 것이다. CIRIA/CUR은 현재까지 발표된 설계기준서 중에서 가장 개선된 것으로 평가받고 있으며, Van der Meer의 사석중량 결정식을 근

간으로 하고 있다. Delft 수리연구소에서 개발한 BREAKWAT 프로그램이 이를 바탕으로 한 방파제 설계 프로그램이다.

현재 우리나라의 "항만 및 어항 설계기준(1999)"은 일본 운수성 산하 항만연구소의 실험결과에 기초한 "항만의 시설의 기술상의 기준·동해설(1999)"을 기준으로 국내 실정에 맞추어 개정하여 사용하고 있다. "항만시설물 설계기준(1993)"과 비교해볼 때 경사식 방파제 설계에서 가장 두드러진 개선 사항은 방파제 체두부에서의 사석 중량을 체간부의 1.5배를 쓰도록 규정한 것과 사석중량 결정식으로 Van der Meer 공식이 추가되어 Hudson 공식과 함께 사용하도록 되어 있는 것이다.

위의 각 설계기준들을 적용하여 경사식 방파제를 설계할 경우에 SPM, CIRIA/ CUR과 항만 및 어항 설계기준의 피복재 중량 결정식이 다르기 때문에 형태는 비슷하지만 각기 다른 방파제 단면이 얻어지게 된다.

이러한 설계기법들이 완벽한 것은 아니며 각기 장단점을 가지고 있기 때문에 기초 수리모형실험 연구결과가 거의 없는 우리나라에서는 기존 연구결과와 어느 정도의 기초실험자료를 바탕으로 장점은 취하고 단점은 보완하여 개선된 방파제 설계기법의 개발이 필요하다 할 수 있다.

2. 경사식 방파제의 특징과 설계외력

경사식 방파제는 사면을 사석이나 콘크리트 블록

으로 피복하여 내습하는 파랑에 견딜 수 있도록 만든 구조물로서 주로 사면에서의 소파작용을 통해 파 에너지를 소산시켜 파랑의 반사 및 전달을 저감시키는 형태이다.

파랑에 의해 사면에 작용하는 힘은 사면에 수직하게 충격력으로 작용하는 파압과 파의 처오름 및 처내림 유속으로 인한 전단력으로 구분될 수 있다. 경사제의 사면에서는 이러한 충격력과 전단력의 연속적인 작용으로 인해 사석이나 콘크리트 블록의 유실이 발생되며, 이와 같은 사면 보호공의 유실은 특히 정수면 주위에서 가장 잘 일어난다. 경사식 방파제는 사석이나 콘크리트 블록이 유실되기 시작하면 파압이 유실된 부분에 집중되므로 피해가 급속히 확산되는 경향이 있으며, 이것은 사면 위에서 발생하는 쇄파의 형태 및 크기와 밀접한 관련이 있다.

쇄파는 파형경사, 해저경사, 수심, 사면의 형태 및 피복공 등의 종류에 따라 다르게 결정되며, 사면에서 발생하는 쇄파의 형태는 경사제의 안정문제에 있어서 매우 중요하다. 쇄파는 그림 1.에서 보는 바와 같이 붕괴파(spilling breaker), 권파(plunging breaker) 및 쇄기파(surging breaker)의 세 가지 형태로 구분될 수 있는데, 이는 Iribarren수라는 무차원 쇄파계수(surf similarity, ξ_m)로 특성화될 수 있다.

$$\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{s} = \tan \alpha / \sqrt{2\pi H_s / (gT_m^2)} \quad (1)$$

여기서, α 는 구조물의 경사각, s 는 파형경사, H_s 는 유의파고, T_m 은 평균파고 주기이다.

현재의 방파제 설계법은 파고, 보호공의 단위중량, 사면의 경사와 안정계수 - SPM과 항만 및 어항 설계기준에서 사용하는 Hudson 공식에서는 K_D 값 - 만으로 경사제 사면에 작용하는 파랑의 영향을 대변하기 때문에 파의 주기, 제체의 투수성, 파랑의 불규칙성, 사면에서의 쇄파형태, 충격력 및 전단력 등의 영향을 고려할 수 없다.

Ryu(1999)의 연구에 따르면 설계파고보다 낮은 파고에서도 사면에 피해가 발생할 수 있으며, 이러한

현상은 주로 사면에서의 쇄파와 구조물 하단에서의 세굴에 의한 것으로 보고되고 있다. 네덜란드 Delft 수리연구소에서의 실험결과를 바탕으로 한 Van der Meer 공식에서는 파의 주기, 피해정도, 투수성, 사면에서의 쇄파형태, 파랑의 지속시간 등의 영향을 고려할 수 있으나, 적용 가능한 투수계수의 범위가 매우 한정되어 있고 방파제 전면에서의 수심효과, 충격력 및 전단력의 영향 등이 고려되지 않는 단점이 있다.

파랑과 구조물의 상호작용에 의한 경사제의 파괴 과정을 정확히 밝히는 것은 매우 어렵지만 여러 연구에서 밝히고 있는 사면에서의 쇄파에 대한 영향은 방파제 설계시 반드시 포함되어야 할 것으로 생각되며, 이런 관점에서 보면 쇄파의 형상 및 크기에 따라 다른 사석 중량을 제시하는 Van der Meer 공식이 Hudson 공식보다는 더 우위에 있다고 볼 수 있다.

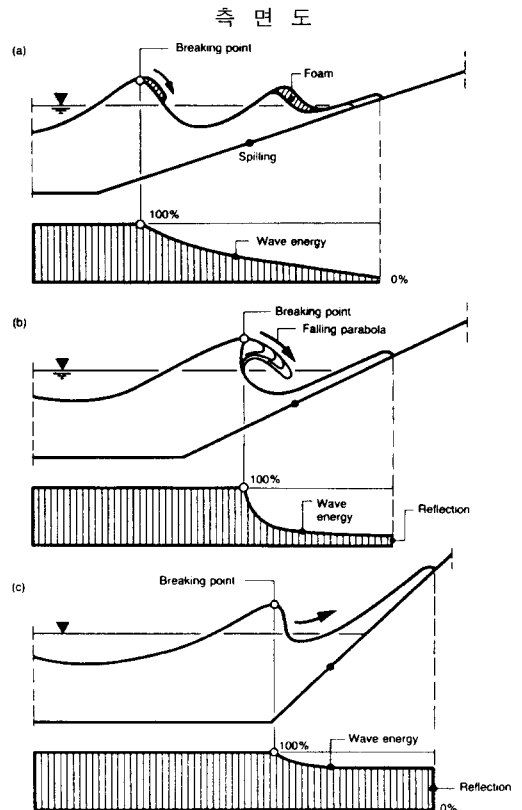


그림 1. 경사면에서의 쇄파 형태 ;

(a) 붕괴파, (b) 권파, (c) 쇄기파

그리고 방파제 설계를 위해서는 수리학적 요소, 구조역학적 요소, 환경적 요소 및 토질역학적 요소의 고려가 필요하다.

환경적 요소로는 파고 및 파고분포, 파의 주기, 파의 입사각, 해안의 기하학적 형태, 수심, 수면상승과 조석, 연안류 등을 들 수 있다. 수리학적 요소는 쇄파, 파의 처오름 및 처내림, 월파, 전달파, 반사, 굴절, 회절, 천수와 세굴 등의 파랑운동을 포함한다. 구조역학적 요소로는 구조물의 경사도, 사석의 질량 및 밀도, 사석의 형상, 표면조도, 점착력, 다공성 및 투수성, 단면의 치수 및 형태 등이 있다. 이외에도 지반의 침하, 액상화, 원호활동 파괴, 직선활동 파괴 등의 토질역학적 요소들이 방파제의 안정성에 영향을 끼칠 수 있으며, 이런 요소들을 포괄적으로 고려한 연구들이 현재 여러 연구자들에 의해 활발하게 진행중이다.

3. 각 설계기준에 따른 피복재 중량 산정식

3.1 SPM(1984)의 방법

Iribarren(1938)의 연구를 기초로 폭 넓은 소축척 모형 실험과 대축척 모형 실험을 통하여 Hudson (1953, 1959, 1961)은 아래와 같은 사석안정공식을 발표했다.

$$W = \frac{w_r H^3}{K_D (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (2)$$

여기서, w_r : 피복재의 단위중량

표 1. 피복석 중량 결정을 위한 안정계수(SPM, 1984)

| 피복재 | 층수 | 거치방법 | 제한부, KD | | 제두부, KD | | 사면경사 cot α |
|--------------------------|----|------|----------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | | 쇄파 | 비쇄파 | 쇄파 | 비쇄파 | |
| 사석 매끈하고 등근 것 | 2 | 난적 | 1.2 | 2.4 | 1.1 | 1.9 | 1.5~3.0 |
| | >3 | 난적 | 1.6 | 3.2 | 1.4 | 2.3 | 1.5~3.0 |
| | 1 | 난적 | | 2.9 | | 2.3 | 1.5~3.0 |
| 거칠고 모가난 것 | 2 | 난적 | 2.0 | 4.0 | 1.9 1.6 1.3 | 3.2 2.8 2.3 | 1.5 2.0 3.0 |
| | >3 | 난적 | 2.2 | 4.5 | 2.1 | 4.2 | 1.5~3.0 |
| | 2 | 특별 | 5.8 | 7.0 | 5.3 | 6.4 | 1.5~3.0 |
| 평행육면체 돌 | 2 | 특별 | 7.0~20.0 | 8.5~24.0 | - | - | - |
| Tetrapod 또는 Quadripod | 2 | 난적 | 7.0 | 8.0 | 5.0 | 6.0 | 1.5 |
| | | | | | 4.5 | 5.5 | 2.0 |
| | | | | | 3.5 | 4.0 | 3.0 |
| Tribar | 2 | 난적 | 9.0 | 10.0 | 8.3 | 9.0 | 1.5 |
| | | | | | 7.8 | 8.5 | 2.0 |
| | | | | | 6.0 | 6.5 | 3.0 |
| Dolos | 2 | 난적 | 15.8 | 31.8 | 8.0 | 16.0 | 2.0 |
| | | | | | 7.0 | 14.0 | 3.0 |
| Modified cube | 2 | 난적 | 6.5 | 7.5 | - | 5.0 | 1.5~3.0 |
| Hexapod | 2 | 난적 | 8.0 | 9.5 | 5.0 | 7.0 | 1.5~3.0 |
| Toskane | 2 | 난적 | 11.0 | 22.0 | - | - | 1.5~3.0 |
| Tribar | 1 | 정적 | 12.0 | 15.0 | 7.5 | 9.5 | 1.5~3.0 |

H : 설계파고

S_r : 피복재의 비중

θ : 사면의 경사각

K_D : 안정계수

Hudson 공식은 사면의 경사가 1:1.5에서 1:5까지의 구조물에 적용이 가능하며, 계수 K_D 는 보호사석의 형상과 끝의 예리함, 거치에 의해 얻어지는 엇물림 효과 등 여러 요소들에 따라 변하고, 제두부와 제한부, 쇄파 여부 및 보호재의 종류에 따라 각각 다르게 적용된다.

안정계수 K_D 는 5%의 보호재가 치환될 수도 있는 무순상 상태에 일치하는 설계의 제안치이며, 더 높은

손상에 대한 값들은 무손상 상태에 대한 손상 상태의 파괴의 비로 정의된다. K_D 의 적용을 위한 쇄파의 정의는 권파와 쇄기파의 차이를 말하며, 식(2)에는 $H_{5\%}$ 에서 $H_s(=H_{1/3})$ 까지 쓰는 것이 제안되었으나 SPM에서는 $H_{1/10}$ 이 항만구조물 설계에 있어 가장 선호되는 값이라고 밝히고 있다.

Hudson 공식은 규칙파 실험결과에 의한 것이며, Rogan(1969)과 Oullet(1972)은 불규칙 파군의 유의파고가 규칙파의 파고와 같으면 사석경사제에 작용하는 불규칙파의 작용을 규칙파로 모델링하는 것이 가능함을 보였다. 이러한 이유로 방파제 설계시 Hudson 공식에 유의파고 H_s 를 쓰는 것이 일반화되어 있다.

Hudson 공식은 형태가 매우 단순하고, 폭 넓은 범위의 보호재에 적용이 되며, 안정계수 K_D 로 파와 구조물 상호간의 물리적 현상을 대변하기 때문에 매우 쉽게 적용할 수 있다(표 1. 참조). 그러나 대부분의 실험에서 수행된 작은 축척 때문에 잠재적인 축척의 영향이 발생하고, 규칙파에만 사용해야 하며, 파의 주기나 지속시간이 공식에서 언급되지 않았다. 또한 피해정도에 대한 파 개수의 영향이 고려되지 않았으며, 비월파 조건과 투수성 코아 구조물에만 사용이 가능하다.

미육군공병단의 해안공학연구센터(CERC)에서는 방파제 설계를 위해 ACES (Automated Coastal Engineering System, 1992)라는 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램에서는 Hudson 공식을 근간으로 하여 파랑의 추정(확률분포를 이용한 빈도 추정), 각 파랑 이론에 따른 매개변수들의 계산, 파랑의 굴절 및 회절현상에 의한 파의 변형, 경사제의 사석중량 및 하단 설계, 직립벽에 작용하는 파압계산, 파의 처오름 높이, 전달파고 및 월파량, 연안 이송량 등을 다룰 수 있다.

3.2 CIRIA/CUR(1991)의 방법

Thomson과 Shuttler(1975)의 연구를 바탕으로 Delft 수리연구소에서는 다양한 파랑조건과 코어 및 하부층의 투수성을 고려한 수리모형실험이 Van der

Meer(1988)에 의해 수행되었다. Van der Meer는 기존의 연구결과와 실험결과를 이용하여 권파와 쇄기파에 대해 구분해서 적용하고 투수성을 종합적으로 고려하는 안정공식을 발표하였다.

심해조건에서 사면에 발생하는 쇄파의 형태가 권파일 경우에 안정공식은 다음과 같다.

$$H_s/4D_{n50} = 6.2P^{0.18}(S_d/\sqrt{N})^{0.2}\xi_m^{-0.5} \quad (3)$$

여기서, P : 공칭투수계수

S_d : 피해 정도

N : 파의 수

쇄기파의 경우는 다음의 안정공식을 사용하여 보호재의 공칭직경을 구한다.

$$H_s/4D_{n50} = 1.0P^{-0.13}(S_d/\sqrt{N})^{0.2}\sqrt{\cot\alpha}\xi_m^* \quad (4)$$

권파에서 쇄기파로의 천이시 사용하는 쇄파계수의 한계치는 다음과 같이 구한다.

$$\xi_{mc} = [6.2P^{0.31}\sqrt{\tan\alpha}]^{1/(P+0.5)} \quad (5)$$

식(4)와 식(5)에서 계수 1.0과 6.2는 사석의 형상에 따른 계수이다. 사면의 경사가 $\cot\alpha \geq 4.0$ 이면, 권파에서 쇄기파로의 천이는 발생하지 않으므로 식(3)을 적용할 수 있으며, 투수계수 P의 범위는 0.1~0.6이다.

또한 Van der Meer는 1:30 경사의 천해에서 폭 넓은 조건에 대한 수리모형실험으로 유의파(H_s)보다는 $H_{2\%}$ 가 설계조건에 더 부합됨을 보였고, 파고분포는 Rayleigh 분포를 이용하여 식(3)과 식(4)를 재정리하였다.

권파와 쇄기파에 대한 안정공식은 각각 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$H_{2\%}/4D_{n50} = 8.7P^{0.18}(S_d/\sqrt{N})^{0.2}\xi_m^{-0.5} \quad (6)$$

$$H_{2\%}/\Delta D_{n50} = 1.4P^{-0.13}(S_d/\sqrt{N})^{0.2}\sqrt{\tan\alpha}\xi_m^P \quad (7)$$

식(6)과 식(7)은 수심이 제한된 상태의 효과를 고려할 수 있지만, CIRIA/CUR에서는 설계를 위한 안전한 접근법으로 식(3)과 식(4)의 적용을 추천하고 있다. 그러나 식(3)과 식(4)의 적용시에는 쇄파로 인해 파고의 증가분은 고려되지 않으며, 실제 파고분포가 $H_{2\%}/H_s = 1.4$ 로 표현되는 Rayleigh 분포일 경우에 식(3)과 식(4)는 식(6) 및 식(7)과 같은 형태로 표현된다. 수심이 제한된 상태에서 $H_{2\%}/H_s$ 는 작아질 것이고, 실제 설계를 위해서는 설계 해역의 정확한 파고분포를 알아야 한다.

무차원 손상레벨 S_d 는 식(8)과 같이 정의되며, 그림 2.에서와 같이 정수면 위로는 퇴적이 일어나고 정수면 부근에서는 침식이 발생한다.

$$S_d = A_e/D_{n50}^2 \quad (8)$$

여기서, A_e 는 수면 주위의 침식된 면적(m^2)이다.

S_d 의 물리적 표현은 침식된 면적을 $1D_{n50}$ 의 길이와 $1D_{n50}$ 의 폭을 가진 면적으로 나눈 숫자이며, 또 다른 표현은 종방향으로 D_{n50} 의 넓은 띠에서 D_{n50} 의 길이를 가진 입면체가 침식된 숫자이다. S_d 의 허용한계는 주로 경사각에 좌우되고 사면에 따른 허용한계는 표 2.에 제시되어 있다. 초기피해는 Hudson 공식에서 0~5%의 손상을 받는 경우와 같으며, 붕괴는

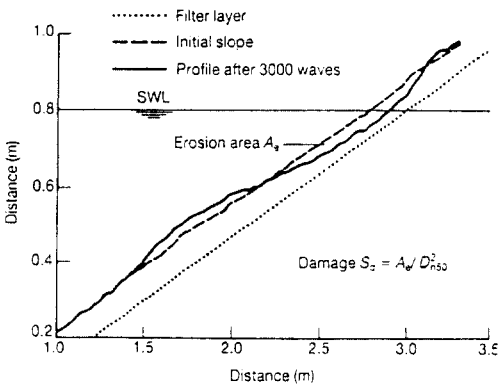


그림 2. 정수면 주위에서의 손상의 정의

필터층의 노출로 정의된다.

콘크리트 보호층의 피해는 상대피해수(Nod)로 정의되는데, 이것은 공칭직경 $1D_{n50}$ 의 종방향폭에 대한 실제 치환되는 블록 수이다. N_{or} 은 층 내에서 흔들리는 블록의 수이고, N_{omov} 는 파파 가능한 블록의 수를 나타낸다.

$$N_{omov} = N_{od} + N_{or} \quad (9)$$

식(3)과 식(4)는 Hudson 공식보다 훨씬 복잡하지만 파의 주기, 지속시간, 투수성과 명백히 정의된 손상의 효과를 포함하며, 사면에서의 공진현상을 쇄파계수를 이용하여 피할 수 있는 이점을 가지고 있다.

콘크리트 블록에서의 공칭직경 D_n 은 표 3과 같이 정의된다.

Van der Meer(1988)는 사석보호공의 안정성에 관해 발견된 지배 매개변수들에 기초하여 콘크리트 보호재에 대한 실험을 수행하였다. 그러나 각 보호재에 대해서 한가지 단면에 대해서만 수행하였기 때문에 경사각과 쇄파계수는 안정공식에는 언급되지 않았고, 투수계수 P 는 0.4를 사용하였다. 일반적으로 입방체(cube)와 T.T.P.는 1:1.5의 경사로 시공되며, Accropode는 1:1.33의 경사로 건설된다.

콘크리트 사석의 안정성에 대한 공식은 피해의 정도 N_{od} , 파의 수 N , 파의 경사 s_m 의 매개변수로 표현

표 2. 사석방파제의 경사에 따른 손상의 정의

| Slope | Initial Damage | Intermediate Damage | Failure |
|---------|----------------|---------------------|---------|
| 1 : 1.5 | 2 | 3 - 5 | 8 |
| 1 : 2.0 | 2 | 4 - 6 | 8 |
| 1 : 3.0 | 2 | 6 - 9 | 12 |
| 1 : 4.0 | 3 | 8 - 12 | 17 |
| 1 : 6.0 | 3 | 8 - 12 | 17 |

표 3. 콘크리트 블록에서 공칭직경의 정의

| | |
|-----------|-----------------------------------|
| Cube | D_n 입면체의 측면 |
| Tetrapod | $D_n = 0.65D$ (D 는 T.T.P.의 높이) |
| Accropode | $D_n = 0.7D$ |

되며 다음과 같다.

$$H_s/\Delta D_n = (6.7 N_{od}^{0.4} / N^{0.3} + 1.0) s_m^{0.1} \text{ for cube (10)}$$

$$H_s/\Delta D_n = (3.75 N_{od}^{0.4} / N^{0.25} + 0.85) s_m^{0.2} \text{ for T.T.P. (11)}$$

피해가 없는 경우, 즉 치환된 갯수 N_{od} 가 없는 경우는 다음의 공식을 사용한다.

$$H_s/\Delta D_n = 1.0 s_m^{0.1} \text{ for cube (12)}$$

$$H_s/\Delta D_n = 0.85 s_m^{0.2} \text{ for T.T.P. (13)}$$

Accropode에서는 공극이 매우 커서 내습파의 에너지를 많이 분산시키므로 파의 갯수와 파의 주기는 안정성에 크게 영향을 미치지 못하고, 1개 층만을 거치하므로 손상이 없을 때와 파괴가 일어날 때의 기준은 거의 비슷하여 안정성은 다음 두 개의 단순한 공식으로 표현된다.

$$H_s/\Delta D_n = 3.7 \text{ (초기손상 } N_{od} = 0) \text{ (14)}$$

$$H_s/\Delta D_n = 4.1 \text{ (파괴 } N_{od} > 0.5) \text{ (15)}$$

각 보호재에 대한 손상의 정의는 표 4.에 나타나 있다.

Delft 수리연구소에서는 Van der Meer의 연구를 근간으로 방파제 설계 프로그램인 BREAKWAT (1992)을 개발하였으며, 이 프로그램은 파랑의 처오름, 사석중량, 주어진 입사파 조건에서 사면의 피해 정도 및 피해형상, 소단의 안정성, 파의 전달, 압초 방파제, 정적 안정 저천단 방파제, 수중 방파제 및 등

표 4. 콘크리트 보호재에 대한 손상의 정의

| 보호재의 종류 | 손상의 시작 | 파괴 |
|-----------|--------------|----------------|
| Cube | $N_{od} = 0$ | $N_{od} = 2.0$ |
| Tetrapod | $N_{od} = 0$ | $N_{od} = 1.5$ |
| Accropode | $N_{od} = 0$ | $N_{od} > 0.5$ |

적 안정 소단 방파제의 안정성 및 입사파 조건에서 사면의 변화형상 등을 해석할 수 있다.

3.3 항만 및 어항 설계기준(1999)의 방법

파력을 받는 경사면의 표면에 피복하는 사석 또는 인공블록의 안정질량은 적절한 수리모형실험 또는 다음 식으로 산정한다.

$$M = \frac{\rho_r H^3}{N_s^3 (S_r - 1)^3} \text{ (16)}$$

여기서, M : 사석 또는 블록의 안정에 필요한 최소 질량(ton)

ρ_r : 사석 또는 블록의 밀도(ton/m³)

N_s : 피복재의 형상, 경사 또는 피해율 등에 의해 결정되는 계수

안정계수 N_s 는 Hudson 공식과 Van der Meer 공식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

(a) Hudson 공식

$$N_s^3 = K_D \cot \alpha \text{ (17)}$$

항만 및 어항 설계기준에서 제시하는 Hudson 공식에서의 안정계수 K_D 는 SPM과 비교하면 제두부의 K_D 값은 제시되지 않고, 제간부 중량의 1.5배 이상을 사용하도록 규정하고 있다. 또한 일본 테트라포드사의 실험 결과를 바탕으로 T.T.P.의 K_D 값이 쇄파 조건에서 7이었던 것을 8.3으로, 비쇄파 조건에서 8이었던 것을 10.3으로 조정하였다. 변경된 K_D 값은 표 5.에 제시되어 있다.

표 5. 피복석 중량 결정을 위한 안정계수

| 피복재 | 층수 | 거치방법 | 제간부의 KD | | 사면경사 $\cot \alpha$ |
|-----------------------|----|------|---------|------|--------------------|
| | | | 쇄파 | 비쇄파 | |
| Tetrapod 또는 Quadripod | 2 | 난적 | 8.3 | 10.3 | 1.5 |
| | | | | | 2.0 |
| | | | | | 3.0 |

(b) Van der Meer 공식

$$N_s = \max(N_{spl}, N_{ssr}) \quad (18)$$

$$N_{spl} = 6.2 C_H P^{0.18} (S^{0.2}/N^{0.1}) I_r^{-0.5} \quad (19)$$

$$N_{ssr} = CHP^{-0.13} (S^{0.2}/N^{0.1}) (\cot \alpha)^{0.5} I_r^2 \quad (20)$$

여기서, N_{spl} : 권파에 대한 안정 계수

N_{ssr} : 쇄기파에 대한 안정 계수

I : Iribarren수(= $\tan \alpha/S$)^{0.5}

Som : 파형구배(= $H_{1/3}/L_0$)

L_0 : 심해파장($L_0 = gT_{1/3}^2/2\pi$,
 $g = 9.81m/sec^2$)

$T_{1/3}$: 유의파 주기

C_H : 쇄파효과계수
(= $1.4/(H_{1/20}/H_{1/3})$),
비쇄파 영역에서는 1.0

$H_{1/3}$: 유의파고

$H_{1/20}$: 1/20 최대파고

D_{n50} : 피복석의 50% 질량에 상당하는
입경(= $(M_{50}/\rho_s)^{1/3}$)

M_{50} : 피복석의 질량누적곡선에서 50%에
해당하는 질량

S : 변형정도($S = A/D_{n50}^2$)

A : 침식부의 면적

4. 피복재 중량 산정식에 대한 고찰

Hudson 공식은 파의 주기성 및 체체의 투수성을 고려하지 않은 공식으로 파형경사의 증감에 대한 변화가 매우 둔감하고, 어떤 경우에 있어서는 사석의 중량을 과대평가 또는 과소평가 할 수 있으며, 사면 위에서의 쇄파발생 여부를 평가하기가 어렵다. 전반적으로 Van der Meer 공식에 의해 산정된 사석중량과 비교할 때 파형경사가 급하고 사면이 완만할 때는 더 작은 사석을 필요로 하나, 파형경사가 완만하고 사면이 완만할 때는 더 큰 사석을 필요로 한다. 그리

고 사면이 1:1~1:3 정도의 경사인 경우는 전반적으로 Hudson 공식으로 구한 사석의 중량이 더 크게 나타난다. 물론 이것은 Van der Meer 공식의 적용시 파의 개수를 어떻게 정하느냐에 따라 사석의 중량은 크게 차이가 날 수 있으며, 전반적인 비교를 위해서 는 수많은 경우에 대한 비교가 필요하다.

Van der Meer 공식은 확실히 Hudson 공식에 비해서 진일보된 사석중량 결정식 임에는 틀림이 없으나, 크게 두 가지의 문제점을 가지고 있는 것으로 판단된다. 첫번째는 모든 계산에 적용되는 파형경사 결정시에 파고는 사면 전면부의 파고를 사용하고, 파장은 심해파의 파장을 사용하는 불일치가 문제이다. 파장을 심해파장을 사용하기 때문에 수심의 변화에 대한 고려가 없다. 물론 Van der Meer의 친해에서의 적용공식을 사용할 수 있으나, 이 공식의 적용에 있어서도 파형경사의 적용 문제는 여전히 남는다. 두 번째는 투수성의 고려에 있어서 적용할 수 있는 경우가 네 가지밖에 없기 때문에 실제 구조물 설계에 있어서 정확한 투수성의 고려가 어렵다는 것이다.

개선 방안으로는 파형경사의 적용에 있어 심해파의 파장이 아닌 방파제 설치위치에서의 파장을 이용한 공식의 유도를 통해 Van der Meer의 실험성적을 충분히 이용하면서 개선된 사석 중량 결정식의 유도를 들 수 있다. 이 경우에는 수심의 변화가 자동적으로 고려될 수 있다. 그리고 대부분의 사석경사체의 단면 형태는 SPM의 제안 형상(즉, 필터층의 중량은 사석층의 1/10 등)을 따르므로, 이에 대한 실험(이것은 시공 및 설계에서는 보편화된 사항이다)과 다양한 단면의 기하학적 형상에 대한 투수성의 평가를 통해 적용범위를 확장할 필요가 있다.

항만 및 어항 설계기준(1999)에 나와 있는 수정 Van der Meer 공식은 친해에서 이 공식을 적용하는 경우에 원래의 Van der Meer 공식은 $H_{2\%}$ 를 사용하게 되어 있는 반면에 수정 Van der Meer 식은 $H_{1/20}$ 을 쓰도록 되어있다. 그리고 Van der Meer 공식은 사석의 중량을 결정하기 위해 만들어진 식이므로 사석의 중량 산정에만 적용하여야 하고, T.T.P., Accropode와 같은 콘크리트 블록의 경우

에는 BREAKWAT Manual에서 제시하고 있는 식을 사용하여야 한다.

극심한 해양환경조건에서 안정하고 경제적이며 친

수성을 가진 방파제 및 호안의 설계기법을 재정립하고 개발하는 것은 21세기 해양한국을 꿈꾸는 우리나라로서는 가장 선행되어야 할 연구과제이다. ●

〈참고 문헌〉

- 해양수산부 (1999) 항만 및 어항 설계기준.
 해운항만청 (1993) 항만시설물 설계기준서.
 CERC (1984) Shore Protection Manual, US Army Corps of Engineers, Vol.2, Ch.7, pp.7-1~7-245.
 CERC (1992) Automated Coastal Engineering System
 CIRIA/CUR SP 81 (1991) Manual on the Use of Rock in Coastal and Shoreline Engineering, Vol.2, pp.235~300.
 Delft Hydraulics (1992) BREAKWAT Design Tool for Rubble Mound Structures, Part B. Technical Manual.
 Hudson, R.Y. (1953) Wave Forces on Breakwaters, Transactions of the American Society of Civil Engineering, ASCE, Vol.118, p.653.
 Hudson, R.Y. (1959) Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters, Proc. of the American Society of Civil Engineering, ASCE, Waterways and Harbors Division, Vol.85, No.WW3, Paper No.2171.
 Hudson, R.Y. (1961) Laboratory Investigation of Rubble-Mound Breakwaters, Transactions of the American Society of Civil Engineering, ASCE, Vol.126, Part IV.
 Iribarren Cavanilles, R. (1938) A Formula for the Calculation of Rock-Fill Dikes, Revissta de Obras Publicas (Translation in The Bulletin of the Beach Erosion Board, Vol.3, No.1. 1949).
 Ouellet, Y. (1972) Effect of Irregular Wave Trains on Rubble-Mound Breakwaters, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.98, No.WW I . Paper 8693, pp.1~14.
 Rogan, A.J. (1969) Destruction Criteria for Rubble-Mound Breakwaters, Proc. of 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, London, pp.761~778.
 Ryu, C.R. (1999) Destruction Mechanism of Rubble Mound Structures under the Directional Irregular Waves: Review and New Works, Progress in Coastal Engineering and Oceanography, Seoul, Korea, pp.251~264.
 Thomson, D.M. and Shuttler, R.M. (1975) Riprap Design for Wind Wave Attack, A Laboratory Study in Random Waves, HRS, Wallingford, Report EX 707.
 Van der Meer, J.W. (1988) Determination and Probabilistic Design of Breakwater Armour Layers, ASCE, Journal of WPC and OE, Vol.114, No.1.
 日本港灣協會 (1999) 港灣の施設の技術上の基準・同解説.