오탁방지막의 기능 및 방파제 설계의 개선

유동훈교수(아주대학교)

I. 서 론

1. 연구배경

3면이 바다로 둘러 쌓여있는 우리 나라에서 연안을 적절히 개발하여 이용하는 것은 국가 경제 번영의 기틀이 된다. 국내 시공사의 해양구조물 축조 기술발전과 경험축적은 상당히 진척되어 왔으나 이로 인한환경영향검토와보전에대하여는소홀했던것이 주지의 사실이다. 특히 준설 및 성토공사시 오탁수의확산으로인한해양오염에대하여는검증과대책이 시대적 요구에 부응하지 못하고 1980년대에 이르러서야약간의관심을갖게되었다. 간척사업이나 항만 축조등의 연안개발사업을 시행하자면 해역에토석을투하하게되는데이때발생되는토립자와 부유물질을 함유한 오탁수가 해안 인근에 확산되므로 이로 인하여 현재는 물론 향후에도 중요한 환경문제로대두될것으로판단된다. 이러한문제점들을 해결할수있는방안으로해역에서의오탁수확산을 물리적인 방법으로 방지하는 오탁방지막 공법이 1983년에외국으로부터국내에들어왔으며해상토목공사에 간헐적으로 이용되다가 환경법의 강화로 요즈음은 거의 대부분의 해상공사에서 의무적으로 도입하고있는실정이다. 오탁방지막은이러한오탁수의 유출확산을 저지하여 자연환경의 보전과 해양자원을보호하는데그목적이있다.

오탁방지막의 적용범위는 공사중 발생하는 토사, 그 중 특히 세립토의 확산방지로서 하상정비 등에 의한 하천수 오탁 방지와 항로준설, 호안, 방파제, 항만 공사시 인근해역의 해수 오탁 방지등이다. 오탁방지막은 해역에서의 간석지 매립 및 준설공사시 오탁수 유출확산을 일정 수역으로 제한시켜 주변수역의 수산자원과 자연환경을 보존하기 위해서 설치한다. 또한 매립 혹은 준설공사시 해수중에 발생하는토석, 실트질의확산방지와방조제, 호안, 항만공사시 인근 해역의 오탁방지, 그리고 항로준설, 해상정비 등에 의한 해수오염 방지, 또는 해상공사장 주변의양식장, 청정수역, 해수욕장등에수질오염피해방지를목적으로사용된다.

설치된오탁방지막은특히파랑변화에취약한구조를가지고있다. 조석및파랑변이에대한구조적안정성을증진시킬필요가있다. 예상되는폭풍파에대비하여철거및재설치를시행할경우상당한경비손실이 예상되며, 공사도 상당기간 지연시킬 가능성을 배제할수 없다. 따라서설치 및 철거를용이하게 시행할 수 있고 상당한 크기의 풍파에는 견딜 수 있는 구조를가져야한다. 이러한측면에서의기능개선필요성은시공자간오랫동안절실히요구되어왔다.

본 연구에서는 주로 오탁방지막의 기능개선에 주안점을두었으나추가로방파제설계의개선책을강구하였다. 방파제 설계에 있어 가장 중요한 항목은 안전성과 경제성이다. 본 연구에서는 방파제의 효과적인설계를위해서사석중량산정, 도파고산정, 월파량 산정등을 다루었다. 사석 중량 산정에서는 기존에주로사용되어왔던 Iribarren식, Hudson식, van der Meer식등의특징을살펴보고실무에적용하였을 때, 과소 산정되는 경향을 분석하여 그 개선책을제시하였다. 도파고산정에있어서는Saville의 실험자료와 네덜란드 실험식을 비교 분석하고 Saville의 가상구배법을 양해적으로 해석하는 방법을개발하였다. 또한 도표로 되어있는 Goda의 단위시간당 기대 월파량 산정도표도 근사식을 개발하여 양해적해석이가능토록조치하였다.

2. 연구목표

본연구의목표는다음과같다.

- 오탁방지막의구조적내구성향상
- 오탁방지막설치및철거의간편성과견실성개선
- 오탁방지및확산저감기능의향상과부착물제거율증진
- 방파제사석중량산정식개발
- 도파고, 월파량산정을위한양해식개발

Ⅱ. 오탁방지막

1. 오탁방지막의개요

오탁방지막은 파도에 의해 한쪽으로 휩쓸리지 않고부력을유지하고복원력이우수한원통형으로제작되어야 하며, 파손을 방지하기 위한 Float Cover를 포함한 구조이어야 한다. 막체(Canvas)는 이음부분에 보강 벨트를 2겹으로 파손되지 않도록 견실하게 봉제 가공하여야 한다. 하단부는 Steel Chain을 부착하여 방지막 전체에 주름이나 굴곡을 제거할 수 있는 구조이어야 한다. 또한 성능기준은 해수및일광에노출된상태에서도내구성이강하고 여과성이 양호하며, 해수의 혼탁 및 확산을 방지할 수 있는 재료이어야 한다. 오탁방지막의 막체(Canvas) 성능시험은 '국립 공업 시험원' 또는 '한국원사직물시험검사소'에의뢰하여야하며그성능표 및 견본을 납품 전에제출하여 승인을 득한 후 제품을반입하여야한다.

오탁방지막의 유동을 방지하기 위하여 해저면에 설치하는 Anchor는 콘크리트 블록으로 제작하고, 주기능과 보조기능이 충분히 발휘되며, 조류, 파랑변화에대처할수있는규격이어야한다. Anchor 블록과 오탁방지막을 연결시키는 Wire Rope는 조류, 조위, 파랑에견딜수있는충분한재질및규격이어야 하며, Clip Shackle도 동일 규격이어야 한다. 설치후바람, 유수, 풍랑등에의하여유동하지않도록

하여야하며, 투수성이 좋도록해충, 해초류, 부유물 질제거등항상유지관리를철저히하여야한다.

2. 오탁방지막의설계

가. 부표설계

1) 풍항력

부체의 일부가 해면상에 있는 구조물에서는 바람에의한힘이작용한다. 이힘을풍항력이라칭하며, 압력항력과 마찰항력이 있다. 부체 규모가 비교적 작을때에는압력항력이지배적인데, 이는풍속의2승에비례하는힘으로나타낸다.

2) 유항력

조류 등 흐름이 있는 경우 부체의 수몰 부분에는 흐름에의한힘이작용한다. 이힘을유압력또는유항력한다.

3) 파랑강제력

파랑강제력은부체가수중에고정되어있다고생각할때, 입사파에의한부체에작용하는힘이다. 이힘은입사파의파고에비례하는선형적인힘과파고의2승에비례하는비선형적인힘으로구성된다.

4) 파랑표류력

부체에파가작용하면운동의중심위치가서서히파의 진행방향으로 이동한다. 그 원인이 되는 힘을 파랑표류력이라한다.

5) 조파저항력

조파저항력은부체가정수중을운동할때유체에 작용하는 힘의 반작용으로서 유체로부터 부체가 받는힘이다.

6) 복원력

정적복원력은부체가정수중을운동할때부체를 원위치에 돌려보내려는 힘이며, 히빙, 롤링 및 피칭의경우에발생한다.

7) 계류력

계류력은 부체의 운동을 구속하기 때문에 생기는 힘(구속력)이며, 그 크기는 계류계의 변위 복원 특성등에따라크게다르다.

8) 파랑강제력과 조파저항력의 속도 포텐셜에 의한 해법

파랑강제력 및 조파저항력은 유체 운동을 나타내는 속도포텐셜을 얻고, 그 속도 포텐셜로 부터 계산하는 방법을 채택한다. 그리고 조파저항력 및 파랑강제력을 얻기 위한 속도포텐셜의 해석법은 조파저항력및파랑강제력의어느것이나경계조건이다를뿐이고나머지수리특성은동일하다.

나. 막체의설계

1) 유수저항(수력) : 막체에작용하는유속저항

2) 파력저항 : 오탁방지막에작용하는파력은수평방향의물입자의평균속도를사용해서계산한다.

3) 막체의 응력

방지막에 가해지는 외력은 플로트부에 작용하는 풍력, 방지막에 작용하는 조류력 및 파력으로 구분할수있다. 방지막에외력이작용할때방지막은포물선형태로되어방

지막이받는장력은 cable의 일반정리를이용하여 구할수있다.

4) 플로트부의 막면장력(바람에 의하여 생기는장력)

5) 막체부의 막면장력(수저항 및파력 저항으로 생기는장력)

6) 전체 막장력(플로트 및 막면장력에 의한 전체장력)

전체 막에 작용하는 장력은 플로트와 막면장력에 의한장력을합하면된다.

다. 앵커의설계

앵커의 중량과 설치방법은 계류체인의 설계에 의한 최대인장력이 작용할 때, 앵커가 충분히 안정하도록정한다.

1) 앵커의 저항력으로부터 보통 다음과 같은 사항들을고려한다.

A. 콘크리트블록

①점성토인경우

수평저항력: 저면 및 측면의 점착력, 수동토압과 주동토압의차

수직저항력: 수중중량, 수중흙덮개의중량

②사질토인경우

수평저항력: 저면마찰력, 수동토압과주동토압의차

수직저항력: 수중중량, 수중흙덮개의중량

그러나 저면마찰력의 계산에 쓰는 수직력은 블록의수중중량과블록에작용하는체인의인장력의수직분력의차로한다.

B. 강제앵커

강제앵커의 수평저항력인 앵커력은 지반의 종류에따라아래의[표1]에제시된바와같다.

[표1] 강제앵커의앵커력]

연약한점토	단단한점토	모 래	평 암
$T_A = 8w_A^{2/3}$	$T_A = 5w_A^{2/3}$	$T_A = 3w_A$	$T_A = 0.4w_A$

* T_A : 앵커력(kN), w_A : 앵커의수중중량(kN)

2) 안전율은1.2 이상으로한다.

3) 앵커로서콘크리트블록을쓸경우는해저중에묻어두는것이바람직하다.

4) 콘크리트블록의중량은150 700kN 정도의것이많으며필요에따라콘크리트 블록에철근을사용하는경우도있다.

5) 계류앵커는통상콘크리트블록을쓰는것이많으나 강제계류앵커는 통상 사질토반에 쓰여지는 것이 많다. 강제계류앵커는KS에규정된항만용계류앵커를 사용하나 Single Fluke Stock Anchor를쓰는것이많다.

3. 오탁방지막의설치효과

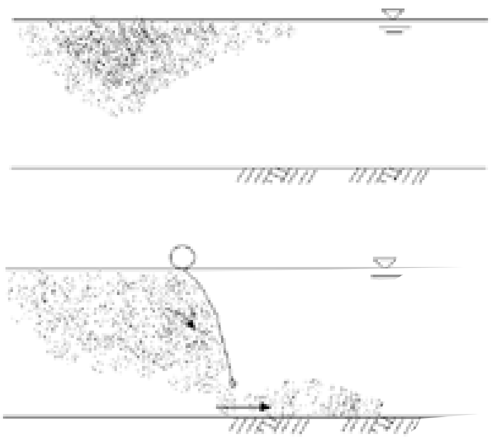
가. 차단효과

해상공사시 발생되는 오탁수의 토립자는 입경이 작기때문에침강속도가대단히느려수중의유속에 따라 광범위하게 확산되어 문제가 된다. 예를 들어 입경 5㎛의 오탁수 입자는 1시간에 10cm밖에 침강

하지 않으므로 방지막으로 차단하여 오탁수의 확산을 억제할 필요가 생기는데 흐름의 상황에 따라 흐름이없는경우와흐름이있는경우2가지로구분할수있다.

1) 흐름이없는경우차단효과

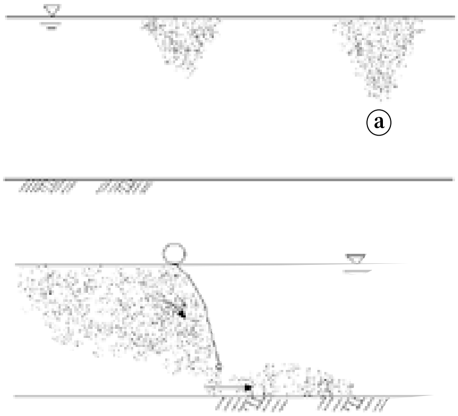
조류 등 특히 흐름이 없는 경우의 해양에서 확산현상은난류확산에의해지배되므로, 수평방향이수직방향에 비하여 우세하고 난류확산 정수도 2배 크기이기 때문에 환산속도도 2배가 된다. [그림 1]에서 오탁수가 임의점에서 발생되면 방지막을 설치하지 않는 경우 수평방향으로 급속히 확산되고, 방지막을설치할경우처음에는천천히수직방향으로수직확산 정수 만큼 확산되고, 그 후에는 방지막 외측으로빨리수평확산정수만큼환산된다. 최종적으로 방지막 외측으로 확산하는데 장시간 소요되고 오탁수는 충분히 희석되어 농도감소가 예상된다. 반면 방지막 내측에는 농도가 높고, 오탁수 입자 응집비율이 높아진다. 따라서, 내측에서 지체 시간도 길어 침강촉진은물론외측으로확산을억제시킨다.



[그림1] 전산해석에의한균열지수

2) 흐름이있는경우차단효과

조류등의흐름이있는경우오탁수는유속에의하여하류방향으로빠르게먼거리까지희석되지않고확산되어문제가되고있다(그림2의ⓐ점)



[그림2] 흐름이있는경우

일반적으로유속은수면에서크기때문에특히수면에서 문제가 된다. 방지막을 설치하지 않을 경우 수면부근에서오탁수발생T초후 V·T(m)하류의 ⓐ점에서최대농도가된다. V가크고T가작아도먼거리까지 확산되고 충분한 희석이 되지만 최종적으로단시간에고농도의오탁영역이멀리형성되어끝나게된다. 여기서, 유속이큰수면부근에방지막을 설치하면 오탁수의 휴속과 수직 방향의 확산정도가 작아, 먼거리 까지 확산하는데 장시간 필요하므로 결과적으로 오탁수는 충분히 희석되고 저농도 해양 상황을유지시켜문제점을해소시킬수있다.

나. 침강촉진효과

부유토사는 수류의 난류운동에 의하여 상승력을 받음과 동시에 중력에 의하여 낙하력을 받는다. 따

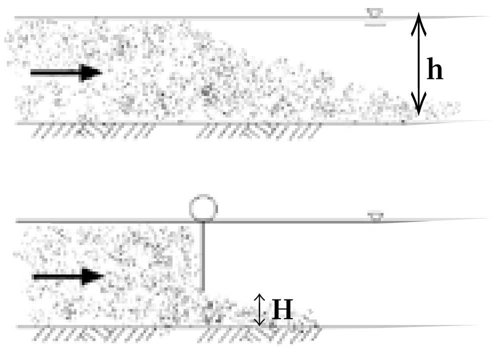
라서 부유토사의 농도분포는 주로 입자의 낙하속도에 따라 결정된다. 낙하물체는 중력과 부력이 작용함과 동시에 항력을 받는데, 낙하 초기에는 중력가속도를 받아 점차 속도가 증가하다가 어느 조건에 이르면 부력과 항력의 합이 중력과 평형을 이루어 속도가 더 이상 증가하지 않고 일정 속도에 도달하게 된다. 이러한 일정속도를 종말속도(terminal velocity)라 칭하며, 종말속도에 이르기 전에낙하속도는 점차 가속중에 있는 침강속도(settlling velocity)로 침강한다. 낙하물체의 시간별 낙하속도 및 낙하이동거리의 산정은 낙하하는 물체의 침강속도와 최종침강속도인 종말속도가 주된 영향을 미치므로 이의 정확한 산정이 중요하다. 유수중 부유토사의침강속도를산정하는것은매우어려운일이나 정수중의 종말속도로서 부유토사의 침강특성을 대변할수있다.

종말속도산정식은 Watson(1962)자신이 실험수조에서 관측한 결과 Rubey식이 관측치보다 약간 작게 산정하는 것으로 판단하여 Rubey식을 수정하여 새로운 경험식을 개발하였다. 또한 Gibbs. et al.(1972)은입경과관련된수치를조정하여그들의 관측자료와 일치하는 산정식을 개발하였는데, Gibbs식도 Rubey식에 기초하여 개발된 것이다. 상기 두 식에 무차원수를 도입하여 차원을 일치시킬 수 있고 일반성을 확보할 수 있는 수식을 제시하였다. 한편 Yoo(1996) 지수함수형태의식을개발하였다(표2 참조).

오탁수내의 입경 크기에 따라 언젠가는 침강하겠지만조립경은급속히침강하여먼거리까지확산되지 않지만 미립경은 장시간 경과후 침강한다. 따라서, 침강시간을짧게하고확산범위를줄이기위해서 오탁방지막을설치하면[그림3]에서와같이방지막 외측으로확산은Δh = (h - H)만큼의침강을종결시켜먼거리까지확산을억제할수있을것이다.

[표2] 지수함수형태의종말후루드수의관련상수

경계조건식	α	β	γ	δ
N〈4.38	24	-1.0	0.055	1.0
4.38〈N〈20.2	24	-0.8	0.09	0.667
20.2〈N〈256.9	11	-0.5	0.245	0.333
256.9〈N	1.0	-0.1	1.163	0.053



[그림3] 오탁수의확산

4. 문제점및개선사항

가. 문제점

오탁방지막은 조속 변화가 심하면 간조시 햇빛에 노출되어막체의손상을가져온다. (2년이상사용불가). 초연약지반에서 앵커의 침하문제가 존재하며 조류속이 강하면 막체가 견디지 못한다(1.0m/s 1.5m/s 정도면막체가찢어짐). 부유물이투과가잘되지 않으면항력을 더 받기 때문에 부유물이 잘 제거될수있는막체를개발할필요가있다.

Float부가 가장 심한 영향을 받는 조건은 파도이다. 만조로부터 조위가 낮아짐에 따라 Float가 해측으로쏠리게되는데지반에막체가닿을정도에서는 float위로해수의월류현상이발생하며, 또한조류속 2.0m/s이상일때에도float부위로오탁수가월류하는현상이발생한다.

[사진1] 간조시오탁방지막의모습

나. 개선사항

상기와같은문제점을해결하기위하여여러가지 방안이 강구될 수 있으나 부산아카데미산업에서 제안한 방법(무폐쇄 정수오탁방지막에 관한 기술혁신개발: 1999. 9)을 소개하면 다음과같다. 오탁방지막의구성을수면상의플로트가부력을유지하고수면하는 실트매쉬, 부러쉬네트가 2중, 3중으로 구성되어유체중의저항체전후에발생한와류현상에의해연속적으로유입된입자를정면으로끌어들여포촉되며입자의자중에의하여제거시키며방지막하단에 원통형 추를 매달아 조류속에 저항할 수 있도록 구성하여 앵커를 사용하지 않는 방식이다. 침전되지 않는 미립자를 와류현상을 응용하여 정체면으로 끌어당겨 간접침강, 공침, 접속등의 프로세스로 침강시켜 제거함으로써 오수의 부유물 제거효율을 기할 수 있다. 유입된 탁수가 고농도일지라도 눈막힘이 없으며 오탁수의 농도 저하에 큰효과를 볼 것으로예상된다.

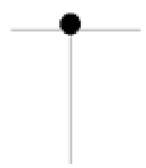
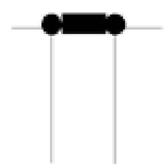
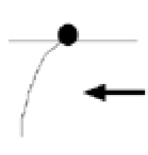
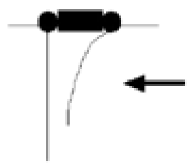
이 오탁방지막은 실험을 통하여 정수장등 유속이 느린곳에서는효과를보였으나앵커를사용하지않으므로 조류속이 강한 해상작업에서는 효과가 미미

[사진2] 3겹오탁방지막

할것으로판단되었다.

수심의 깊이에 관계없이 오탁방지막을 2중 또는 사다리꼴 형태의 설치로 고속유하의 이물질입자와 부유물의침입유출을방지하는데좋은효율을기대할 수 있다. [표3]은 단일막과 이중막에 대하여 유속이빠를때효과를비교한것이다.

[표3] 단일막과이중막과의비교

구 분	단일막	이중막
단 면 도		
빠른 유속시의 변형		

III. 방파제설계

1. 사석중량산정

본 절에서는 경사형 방파제를 설계시 최소 중량으로 외부 조건에 충분히 견딜 수 있는 사석 크기를 결정하는 방법을 제시한다. 기존의 방파제 설계에 있어 사석 중량 산정에 이용된 Iribarren, Hudson, Van der Meer식 등은 단지 차원 해석에 의하여 파력이 중력과 파고의 곱에 비례하는 관계를 이용하였는데, 이번 연구에서는 파력이 파입자의 수표면 최대 속도와 밀접한 관계가 있음을 이용하였다. 또한 파고의 결정이 사석 중량 산정에 중요 요소인 것은 여러 논문을 통해서도 알 수 있는데, 이번 연구에서는 선형파 이론에 의한 종확산관계를 이용하여 새로운 매개 변수로를 추출하였다. 이렇게 구한 경험식을 Van der Meer 관측자료와 비교검토하였다.

가. 사석크기산정을위한기존산정식

1) Iribarren 식

Iribarren(1948)은 파가 사면에서 부서질 때 그 수괴가 사면에 낙하하며, 사석의 틈새에 부압이 발생하고 사석은 그 부력 때문에 실질적인 무게가 줄어 사면 위에서 움직이기 쉬어진다고 생각했다. Iribarren 공식은 파고, 사면구배, 단괴의 비중, 밀도, 마찰계수 등을 고려하여 안정성을 확보하기 위한 최소 중량을 구하는 것이며 이론적인 해석에 기초하여 개발된 산정식이다. 식 (1)은 [그림 4]에서와 같이 파가 사면에 따라 상향으로 작용할 때보다 하향으로작용할때가사면에미치는파력이크다는 것을착용하여 Iribarren이 제안한식이다.

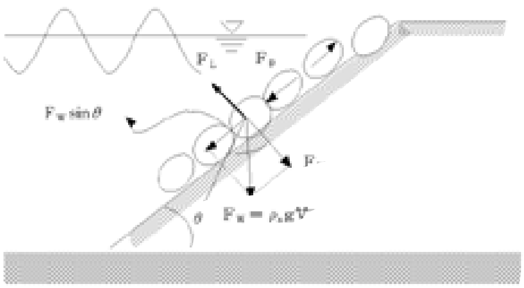
$$F_D < F_f - F_g \tag{1}$$

여기서 F_D 는파력의사면방향성분, $F_f(=\mu F_N)$ 는 사석이 사면과 이루는 마찰력, $F_g(=F_W \sin\theta)$ 는 사석 수중중량의 사면방향성분이다. 파력은 다음과 같다.

$$F_f = \mu \cos\theta (s-1) \rho g \xi_V \phi^3 \tag{2}$$

$$F_g = \sin\theta (s-1) \rho g \xi_V \phi^3 \tag{3}$$

$$F_D = \rho C_D \xi_A u_s^2 \phi^2 \tag{4}$$



[그림4] 간조시오탁방지막의모습

여기서 μ는 마찰계수, θ는 사면 경사각, $s=\rho_s/\rho_w$, ρ_s 는사석밀도, ρ 는물의밀도, g는 중력가속도, ξ_V 는 체적 형상계수, ξ_A 는 면적 형상계수, ϕ 는 사석 대표입경, C_D는 항력 계수, u_s 는 파입자속도이다. Iribarren은 u_s 를 차원해석에 의해 파고 H인 경우 $\sqrt{gH}$ 와 같다고 가정하였으며 식 (2), (3), (4)를식 (1)에 적용하여 다음식을 유도하였다.

$$\delta = \frac{W}{\rho_s g H^3} = \frac{K_1}{(s-1)^3(\cos\theta - \mu^{-1}\sin\theta)^3} \qquad (5)$$

여기서 $K_1 = \frac{C^3}{\mu^3 \xi_v}$ 이고,

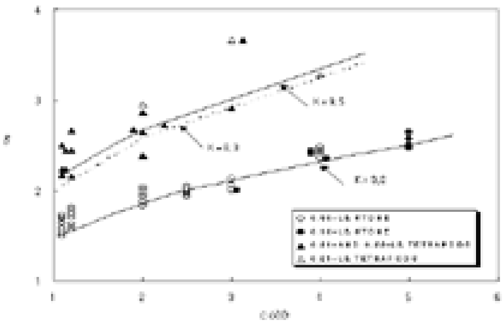
ϕ_n은 $W = \rho_s g \phi_n^3 = \rho_s g \xi_v \phi^3$ 로 정의된 사석 표준입경이다.

2) Hudson 식

Hudson(1953)은 u_s는 파봉에서의 파입자속도와 같다고 제안하였으나, 천해에서 수심(h)는 파고(H)와 같다고 생각하여, u_s를 $\sqrt{gh}$ 와 같다고 제안하였다. 이는 Iribarren 관계식과 유사하나, Iribarren이 제안한 매개 변수 K_I, μ는 그 값을 결정하는데 어려움이 있다. 따라서 Hudson은 파형경사, 수심비, 파고비, 사면의 투수성 등을 종합적으로 고려하는 하나의 매개변수 K_D를 제안하였으며 Hudson 경험식은 다음과 같다.

$$\delta = \frac{H}{(s-1)\phi_n} = K_D^{1/3} R^{1/3} \qquad (6)$$

여기서, $R = \cot\theta$ 이다. [그림 5]는 quarry-stone과 TTP의 안정성을 δ와 $R(=\cot\theta)$의 관계로 도시하였다.



[그림5] δ와 cotθ의 관계

Hudson은 [그림 5]에서처럼 cot θ는 Iribarren이 제안한 식 (5)에서 사면 경사각함수 $(\cos\theta - \mu^{-1}\sin\theta)$ 는 $\cot\theta^{1/3}$ 과 비례하다고 분석하여 그 관계를 식 (6)에 제시하였다. 또한 식 (5)와 식 (6)은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\delta = \frac{1}{(s-1)\,\eta^{1/3}} \qquad (7)$$

3) Van der Meer 식

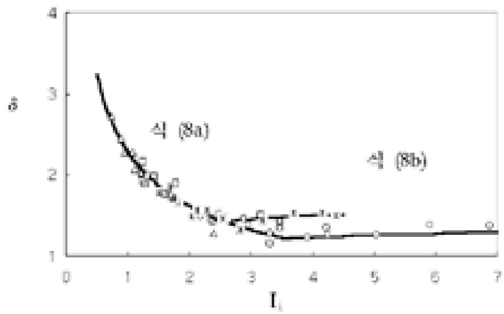
Van der Meer(1988)는 관측을 통해 투수성, 파의 불규칙성, 쇄파 조건, 피해 정도 등을 고려한 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\delta = \begin{cases} 6.2P^{0.18}(D/\sqrt{N})^{0.2}/\sqrt{I_i} & (0.4 < I_i < 2.5) \quad (8a) \\ 1.0P^{-0.13}(D/\sqrt{N})^{0.2} I_i \sqrt{R} & (2.5 < I_i) \quad (8b) \end{cases}$$

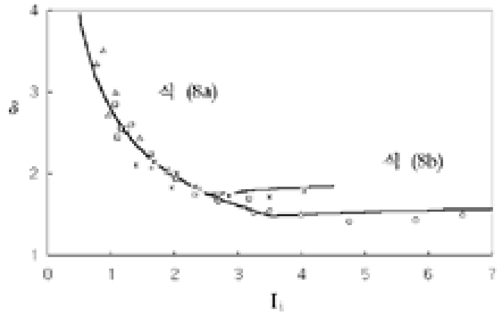
여기서 P는 투수 계수, D는 피해정도, N은 파수, I_i는 내해 Iribarren수로써 쇄파계수를 나타낸다.

$$I_i = \frac{S}{\sqrt{M_S}} \qquad (9)$$

식 (9)에서 $M_S(=H_S/L_p = 2\pi H_S/gT_m^2)$ 는 파형경사이고, $S = \tan\theta$ 이다. [그림 6]은 I_i에 8의 변형이 I_i수가 2.5정도에서 나뉘어지것을 사면 경사각의 분포로써 보인것이다.



(a) D = 3



(b) D = 8

[그림6] δ에대한불투수층(N = 3000, P = 0.1)

나. 새로운경험식

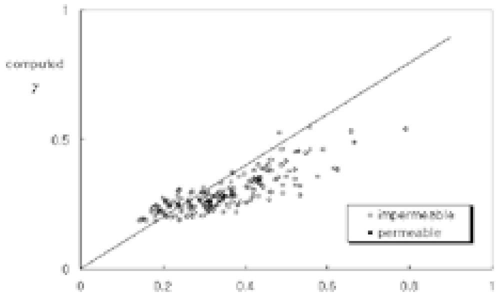
파입자 속도 u_s 를 계산하기위해 Airy의 선형파 이론을채택하여 u_s 를계산하였다.

$$u_s = \frac{kga}{\sigma} \quad (10)$$

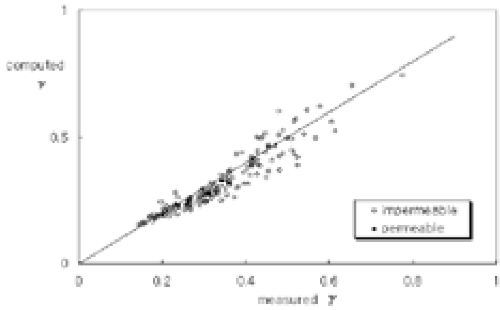
여기서 k는 파수, a는 진폭 그리고 σ는 각 주파수다. 식(10)을 식 (4)에대입하면다음과같다.

$$\gamma = \frac{\xi_Y}{K_r (s-1) R^{1/3}} \quad (11)$$

식 (11)에서 $\gamma = \delta^{1/3} = \frac{1}{(s-1)^{\beta}}$ 이며, $\xi_Y = \frac{KH}{4\tanh kh}$ $\sigma^2 = gK\tanh kh$ 이고 h는 수심, H는 파고이다. Van der Meer 관측자료를 이용하여 K_r 를 ξ_Y 의 선형식과지수식의형태로만들었다.



(a) 선형식



(b) 지수식

[그림7] K_r 산정식으로계산된 γ와측정치 γ의비교

P = 0.1인 불투수층에서 선형식과 지수식은 다음과같다.

$$K_r = 2.22(D/\sqrt{N})^{0.2}\xi_Y \quad \text{(선형식)} \quad (12)$$

$$K_r = 5.63(D/\sqrt{N})^{0.2}\xi_Y^{0.5} \quad \text{(지수식)} \quad (13)$$

P = 0.4인 투수층에서 선형식과 지수식은 다음과 같다.

$$K_r = 2.72(D/\sqrt{N})^{0.2}\xi_T \quad \text{(선형식)} \quad (14)$$

$$K_r = 6.00(D/\sqrt{N})^{0.2}\xi_T^{0.7} \quad \text{(지수식)} \quad (15)$$

식 (12)와 (13)을 식 (11)과 같은 형태로 변형하면다음과같다.

$$\gamma = (0.48 - 0.28P)(s-1)^{-1}(\sqrt{N}/D)^{0.2}S^{1/5} \quad (16)$$

또한 식 (14)와 (15)를 위 식처럼 변형하면 다음과같다.

$$\gamma = (0.18 - 0.04P)(s-1)^{-1}(\sqrt{N}/D)^{0.2}\xi_T^{x}S^{1/7} \quad (17)$$

여기서, x = 0.23P-0.37이며, 투수 계수(P)의 범위가 0.1 0.4일 때, -0.35에서 -0.28의 범위를 갖는다. 이 값은 -1/3과 유사하므로 편의상, x=-1/3의가정하면

$$\gamma = (0.29 - 0.06P)(s-1)^{-1}(\sqrt{N}/D)^{0.2}S_T^{1/6} \quad (18)$$

여기서 $S_T = F_H^2 S$ $F_H = C/\sqrt{gH}$ 그리고 C는 σ/k 로주어지는파속이다.

2. 도파고산정

파도가 해안구조물에 충돌하여 뛰어 오르거나 기어오르는 현상을 도파(run up)라 하고 뛰어오르는 파도의정상까지의수직거리를도파고(h_R)라한다. 도파고는 계산상 파고(H)의 1.0H 이하일 때 모두 1.0H로 하고 1.3H 2.5H일 때는 제방 외측사면에 소단을설치하던가완경사혹은구조를변경시켜도 파고를 억제하거나 또는 둑마루와 외측사면 피복공을 강화하여야 한다. 도파고 산정에 있어 구조물 사면의 조건은 크게 단일사면과 복합사면으로 구분한다. 다음은 각 사면 조건에서의 도파고 추정 방법을 기술하였다. 단일사면에서는파랑의쇄파유무에따라 도파고를 추정하였으며, 복합사면에서는 Saville의가상구배법을적용하여도파고를추정하는방법을제시하였다.

가. 단일사면의도파고

1) 사면전면에서파랑이쇄파되지않은경우

●Takada

$$\frac{h_R}{H} = \left[\sqrt{\frac{\pi}{2\delta}} + \left(\frac{\eta_0}{H} - 1\right)\right]\xi_R \quad (19)$$

$$\xi_R = \begin{cases} 1 & (R \le R_c) \\ \left(\dfrac{R_c}{R}\right)^{3/4} & (R > R_c) \end{cases}$$

여기서 H는 방파제 전면에서의 파고이고 $R = \cot\theta$, $R_c = \cot\theta_c$ 이며 θ_c 는임계경사각이다. $\frac{\eta_0}{H}$ 의 값은 아래와 같이 Sainflou 또는Miche에 의해서개발된관계식을써서계산할수가있다.

● Sainflou

$$\frac{\eta_0}{H} = 1 + \frac{KH}{2}\coth Kh \quad (20)$$

● Miche

$$\frac{\eta_0}{H} = 1 + \frac{KH}{2}\coth Kh\left(1 + \frac{3}{4\sinh^2 Kh} - \frac{1}{4\cosh^2 Kh}\right) \quad (21)$$

식 (21)을 식 (19)에 대입하고 $\xi_V = \frac{KH}{4\tanh Kh}$ 를 도입하면 비쇄파조건에서 도파고는 다음과 같이 산정된다.

$$\frac{h_R}{H} = \left(\sqrt{\frac{\pi}{2\theta}} + 2\xi_M \xi_V\right)\xi_s \qquad (22)$$

식 (22)에서사용된 ξ_M 은다음과같이표현된다.

$$\xi_M = 1 + \frac{3}{4\sinh^3 Kh} - \frac{1}{4\cosh^3 Kh} \qquad (23)$$

Takada는 식 (19)에 사용된 임계각 θ_c 를 다음과같이제안하였다.

$$\sqrt{\frac{2\theta_c}{\pi}}\,\frac{\sin^2\theta_c}{\pi} = \frac{H_0}{L_0} = M_{SO} \qquad (24)$$

M_{SO}는 심해파의 파형경사이다. 식 (25)로 구한 θ_c 와 M_{SO}값은 [표 4]에 제시되어 있으며, 임계각 θ_c 와 파형경사(M_{SO})와의 관계를 이용하여 R_C와 M_{SO}와의관계를구하였다.

[표4] 파형경사(M_{SO}) 와 θ 와의관계

θ	M_{SO}
π/ 16	0.003
π/ 8	0.016
π/ 4	0.08
π/ 2	0.225

$$\theta_c = 2.2\,M_{SO}^{\,[illegible]} \qquad (25)$$

$$R_c = 0.09\,M_{SO}^{-0.78} \qquad (26)$$

2) 사면전면에서파랑이쇄파되는경우

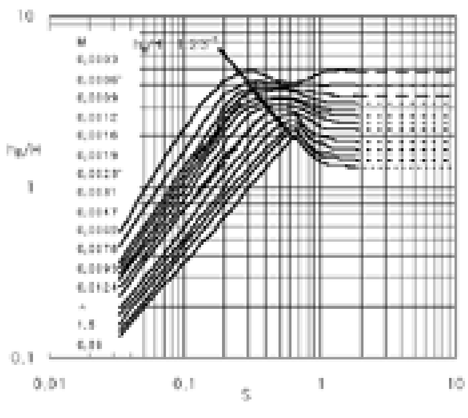
$$\frac{h_R}{H_{1/3}} = 8\lambda S \cos^{\beta} \qquad (27)$$

여기서 $H_{1/3}$는 유의 파고, λ는 사면 조도계수, β는 제체의수직선과파향이이루는각이며적용범위는 $0.125 < S < 0.33$ $(3 < R < 8)$, $0.03 < M_s < 0.07$이다. 사면의 상태와 형태에 따른 사면 조도계수(λ)의 대표값을 [표 5]에제시하였다.

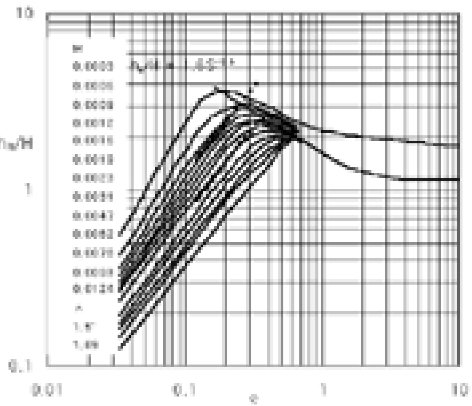
[표5] 사면조도계수

사면조도내용	λ(조도계수)
원활한사면	1.1 ~ 1.5
잘정돈해서깔은돌붙임	1.0
블록모양 소단계 0.14 ×0.48 cm	0.9
블록모양 대단계 0.35 ×1.2 m	0.89

식 (27)를 Saville 도해도에 적용하면 [그림 8]과 같다. 그러나 Delft 실험식은 조도조건을 고려하였으나보다중요한요인으로판단되는파형경사를고려치않았으며그림에제시된바와같이적용범위가 제한되어 있다. 또한 Delft 공식은 파형경사가 고려되어있지않아중복파인경우극심하게과대산정할 가능성이높다.



(a) 1<h / H<3



(b) 3 ≤ h / H

[그림8] Saville 실험관측과Delft 실험식비교
(실선:Saville, 점선:Delft)]

나. 복합단면의도파고

복합단면의 도파고 산정 방법으로는 네덜란드 Delft 수리시험소에서개발한것과Saville의 가상법이있다.

네덜란드Delft 수리시험소에서개발한공식은다음과같다.

$$\frac{h_R}{H_{50}} = 8.2S\cos\theta\left(1 - \frac{B}{L}\right) \qquad (28)$$

식 (28)의 적용 범위는 $\frac{1}{8} < S < \frac{1}{3}$ $(3 < R < 8)$ 이며, [그림 9]에 도시된 바와 같이 B는 소단폭이며 L은 파장이다.

Saville(1958) 실험 관측으로부터 사면경사(R)와파형경사(M_s)의함수로도파고비 h_R/H 를구하는[그림 8]에제시하였다. h_R/H 의 R에대한상관관계로부터 두 개의 구간으로 나뉘어지는데 $h_R/H < \alpha R^{\beta'}$ 인 경우 거의 역비례 관계가 성립하나 $h_R/H < \alpha R^{\beta'}$ 인 경우에는 도파고비 (h_R/H)가 일정한수치를 보이고있다. 비례상수 α는 1 < h / H < 3 인조건에서 약 1.2이며 3 ≤ h / H 인 조건에서 약 1.6이다.

여기서는 도파고를 구하기 위해서 이 그래프 값을 읽어야 하는 불편함을 없애기 위해 양해법 산정식을개발하였다.

$$\frac{h_R}{H} = \alpha' R^{\beta'} \fallingdotseq \alpha R^{-1} \qquad (29)$$

식 (29)는 [그림 8]에 기초하여 양해적 해를 구하기위한식이다. Saville 방식은[그림8]을이용하여 가상구배를 가정해서 도파고를 산정한 후, 그 산정한 도파고 값이 일치할 때까지 반복해서 구해야 한다. 그러나 식 (29)는 반복할 필요없이 구하고자 하는도파고를바로계산할수있다.

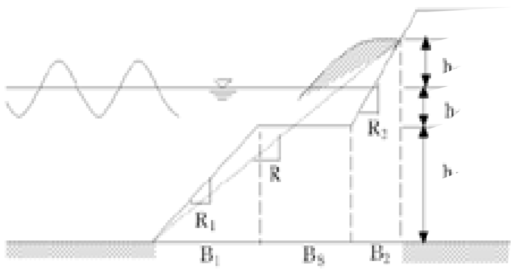
[표 6]은 $\frac{h_R}{H} < 1.2R$ 이고 $1 < \frac{h}{H} < 3$ 인 조건에서의 Saville 결과를 지수형으로 산정하였을 때 파형경사(M)와 사면경사(R)에 따른 α'과 β'의 값을 제시하였다. 또한 β'의 값이 전체적으로 - 1에 근접하므로 β= - 1 로 고정하여 회귀분석으로 비례상수 α를 구하였으며 그 수치가 마지막 열에 제시되어 있다. 상기식 (11)은 $\frac{h_R}{H} < 1.2R$ 보다 작은 조건에서 성립한다. 따라서 이 조건은 $1.2R > \frac{\alpha}{R}$ 또는 $R > \sqrt{\frac{\alpha}{1.2}}$ 이 된다.

가상경사 R은 다음과 같이 산정된다.

$$R = \frac{R_1 h_1 + B_R + R_2(h_2 + h_R)}{h_R + h_1 + h_2} \qquad (30)$$

[표6] 도파고산정식 $(R)>\sqrt{\alpha}/1.2,\ 1<h/H<3)$

$\frac{H}{T^2}$	$\frac{H}{gT^2}(=M)$	α'	β'	$\alpha(\beta=-1)$
0.0029	0.0003	45.05	-1.29	21
0.0058	0.0006	27.55	-1.23	16
0.0088	0.0009	20.61	-1.19	13.5
0.0117	0.0012	17.06	-1.16	11.5
0.0157	0.0016	14.49	-1.14	10.5
0.0186	0.0019	12.86	-1.12	9.9
0.0226	0.0023	11.12	-1.11	8.8
0.0304	0.0031	8.18	-1.05	7.3
0.0461	0.0047	6.31	-1.03	6.1
0.0608	0.0062	5.28	-1.01	5.2
0.0765	0.0078	4.19	-0.96	4.56
0.0912	0.0093	3.67	-0.95	4.1
0.1216	0.0124	2.98	-0.91	3.3



[그림9] 복합단면의가상경사

식 (30)에서 우변의 h_R은 사면경사 R의 함수이기 때문에 반복해서 해를 구하여야 한다. 다음 아래에는 지수형 산정식을 도입하여 양해적으로 도파고를 산정하는방법에대해상세히설명하였다.

먼저 구간 $h_R/H < \alpha R'$ 인 경우에 대해서는 $h_R/H < \alpha R'$ 로가정한다. 여기서 β는 [표6]에제시된바와같이거의 -1로가정한다. 이를식(30)에대입한다.

[표7] 도파고산정식 $(R)>\sqrt{\alpha}/1.2,\ 1<h/H<3)$

$\frac{H}{T^2}$	$\frac{H}{gT^2}(=M)$	α'	β'	$\alpha(\beta=0)$
0.0029	0.0003	4.65	-0.01	4.8
0.0058	0.0006	4	0.01	4.2
0.0088	0.0009	3.55	0.09	3.8
0.0117	0.0012	3.24	0.15	3.7
0.0157	0.0016	3	0.16	3.4
0.0186	0.0019	2.84	0.19	3.3
0.0226	0.0023	2.63	0.21	3.1
0.0304	0.0031	2.4	0.21	2.9
0.0461	0.0047	2.13	0.37	2.7
0.0608	0.0062	1.9	0.32	2.45
0.0765	0.0078	1.78	0.4	2.25
0.0912	0.0093	1.66	0.33	2.15
0.1216	0.00124	1.52	0.34	1.9

$$R = \frac{R_1h_1 + B_S + R_2(h_2 + \alpha HR^{-1})}{\alpha HR^{-1} + h_1 + h_2} = \frac{(R_1h_1 + B_S + R_2h_2)R + \alpha HR_2}{\alpha H + (h_1 + h_2)R} \quad (31)$$

식 (31)을 R의 함수로 표기하면 다음과 같은 이차방정식이 된다.

$$(h_1 + h_2)R^2 + (\alpha H - R_1h_1 - B_S - R_2h_2)R - \alpha HR_2 = 0 \quad (32)$$

근의공식을이용하여식(32)를 풀면다음과같다.

$$R = \frac{H\left[(\eta - \alpha) \pm \sqrt{(\alpha - \eta)^2 + 4\alpha R_2\frac{(h_1 + h_2)}{H}}\right]}{2(h_1 + h_2)} \quad (33)$$

여기서 $\eta = (R_1h_1 + B_S + R_2h_2)/H$ 이다.

구간 $h_R/H < \alpha R'$ 인경우에대해서는 $h_R/H = -$ 로 가정한다. 여기서 β는 [표 7]에제시된바와같이

$\beta = 0$ 으로 놓을 수 있다. 따라서 $h_R/H = \frac{\alpha}{R}$ 로 가정하고 이를 식 (30)에 대입하면 가상경사(R)을 구할수있다.

$$R = \frac{R_1 h_1 + B_2 + R_2(h_2 + \alpha H)}{\alpha H + h_1 + h_2} \quad (34)$$

식 (29)의 비례상수 α는 구간 1 〈 h / H 〈 3에서 Table 3에 제시된바와 같이 M의 지수형으로 구할 수있다.

$$\alpha = 0.42M^{-0.5} \quad (35)$$

식 (35)를 조건식 $R > \sqrt{\alpha/1.2}$ 에 대입하면 $R > 0.59M^{-0.25}$ 의 조건이 된다. 즉 식 (29)는아래의 경우를만족할경우에사용한다.

$$\frac{h_R}{H} = 0.42M^{-0.5}R^{-1} \quad (R > 0.59M^{-0.25}) \quad (36)$$

$R < \sqrt{\frac{\alpha}{1.2}}$ 경우[표 7]에제시된바와같이가상구배(S)와 무관한 경향을 보이기 때문에 α와 M의 관계는다음과같다.

[표8] 조건별도파고산정식

h_R/H	R 조건	h_R/H	가상경사(R)
$1 < \frac{h}{H} < 3$	$R > 0.59M^{-0.25}$	$0.42M^{-0.5}R^{-1}$	식 (33)
	$R < 0.59M^{-0.25}$	$0.7M^{-0.28}$	식 (34)
$3 < \frac{h}{H}$	$R > 0.37M^{-0.24}$	$0.38M^{-0.5}R^{-1}$	식 (33)
	$R < 0.37M^{-0.24}$	$0.99M^{-0.26}$	식 (34)

$R = \cot\theta$, $M = H/gT^2$, H : 입사파고, h : 수심

$$\frac{h_R}{H} = \alpha = 0.7M^{-0.28} \quad (R < 0.59M^{-0.25}) \quad (37)$$

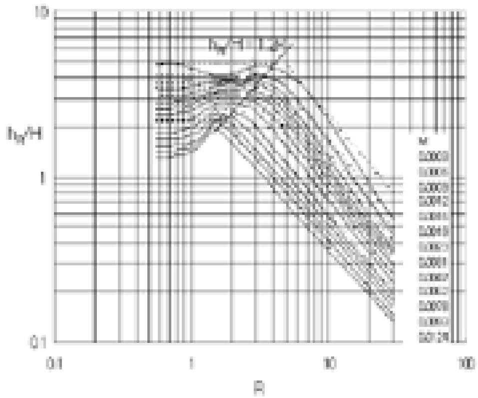
[그림 1]의구간h / H ≥3인경우도1〈h / H〈3 처럼h_R / H를지수형으로산정하면다음과같다.

$$\frac{h_R}{H} = \frac{\alpha}{R} = 0.38M^{-0.5}R^{-1} \quad (R > 0.37M^{-0.24}) \quad (38)$$

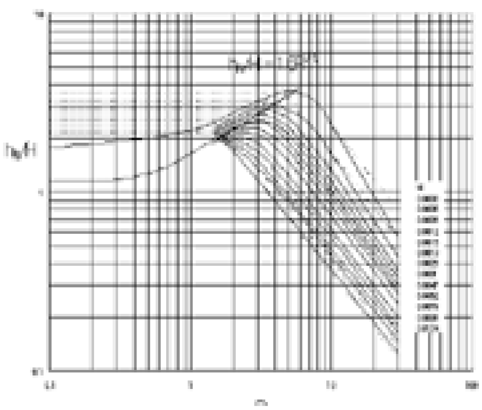
$$= 0.99M^{-0.26} \quad (R < 0.37M^{-0.24}) \quad (39)$$

복합단면에서의 도파고 산정을 위한 이상의 결과를정리하여[표 8]에제시하였다.

[표 8]에제시된사면경사(R)에따른양해적산정식을Saville 도해도에나타내면[그림10(a)]와 [그림 10(b)]와 같다. 구간 R 〈 $0.59M^{-0.25}$과 R 〈



(a) 1 ≤h / H ≤3



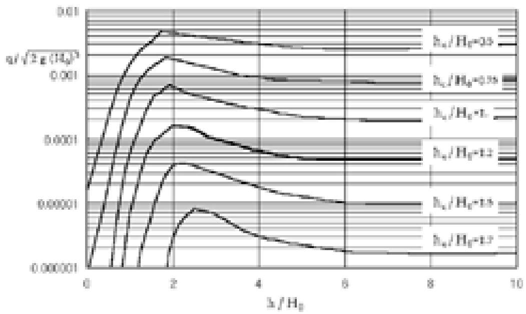
(b) 3 ≤h / H

[그림10] 가상구배법에적용한Yoo 산정식]
점선: Yoo 산정식, 직선: Saville 실험식

$0.3 M^{-0.34}$인 경우에는 도파고 산정을 크게 잡았다. 이는 사면의 경사가 완만할 경우에는 사면에 따라 파는 포말 상승하면서 파에너지가 감소되는데 반하여 사면의 경사가 급할 수록 파에너지는 직접 제체에전달되어도파가상승하기때문이다.

3. 월파량산정

월파량은 안벽 및 호안 설계시 가장 중요한 설계 인자 중의 하나이다. 따라서 월파량을 예측하는 것은방파제를효율적으로설계하기위한중요수단이다. 월파량을 측정하기 위한 실험은 불규칙파의 파군을대상으로200 300파를 연속적으로 작용시켜 파랑이월류하는모형구조물상부와하류측저수통사이에 설치된 도수로를 통하여 저수통에 도달하는 물의 총량을 펌핑하여 회수된 물의 총 무게를 계측한다. 월파량의단위는단위시간당단위길이당의무게로 환산한다(해양수산부,1997). 최근에는 항내 정온도를 향상시키고 월파량을 저감시키기 위해서는 구조물 내에 공극을 두어 파의 에너지를 감쇠 시키는 방법이 널리 행해지고 있다. 소파 구조물 종류에는 슬릿케이슨, 이글루블록 및 중공블록 등이 있다. 설계파 조건에서는 이들의 월파량의 저감 효과는 크게 차이가 없으나 여러 실험을 통해서 가장 효율이좋은것을택하여사용하는것이좋다.



[그림11] 소파공이있는경우의단위시간당의기대월파량

[그림 11]은 사석 마운드의 표면에 Tetrapod를 2층으로쌓고, 천단부분은하층을2개의병렬로충적한 조건에서 해저 경사가 1/30인 경우의 월파유량 추정도로서, 불규칙파에의한월파량의측정을실시하여얻은결과다. 그림에서H_0는구조물전면의유의파고, h는전면수심, h_c는마루높이, g는중력가속도(9.8m/sec^2), q는 단위시간 단위길이당의 월파량(m^3/m·sec)이다. 항만시설물 설계기준서(해운항만청, 1993)에서도[그림11]을이용하여월파량을추정하도록 하고 있다. 하지만 월파량을 산정하기 위해서는 [그림 11]을 읽어야하는 불편함이 있다. 이에 $q/\sqrt{2g(H_0)^3}$ 와h / H_0의관계를이용하여, 월파량을산정하는양해적산정식을개발하였다.

$$\Phi = \alpha (h/H_0)^{\beta} \tag{40}$$

식 (40)에서 $\Phi = q/\sqrt{2g(H_0)^3}$ 이며, α와 β는구간별로[표9]에제시하였다.

[표9] 월파량산정

h_c/H_0	α	β	범위
0.5	0.14×10^{-2}	2.22	$h \le 1.7H_0$
	0.0049	-0.31	$h \ge 1.7H_0$
0.75	0.3×10^{-2}	2.2	$h \le 1.8H_0$
	0.0021	-0.51	$h \ge 1.8H_0$
1.0	0.3×10^{-4}	5.36	$h \le 1.9H_0$
	0.001	-0.78	$h \ge 1.9H_0$
1.25	0.6×10^{-5}	5.77	$h \le 2H_0$
	0.0003	-0.8	$h \ge 2H_0$
1.5	0.4×10^{-6}	6.01	$h < 2.3H_0$
	0.00007	-0.98	$h \ge 2.3H_0$
1.75	0.2×10^{-7}	6.85	$h \le 2.5H_0$
	0.0002	-1.21	$h \ge 2.5H_0$

Ⅳ. 결론

본 연구에서는 오탁방지막의 기능개선과 방파제 설계의 개선책으로 사석 크기, 도파고 및 월파량 산정등을개선하고간편근사식을개발하였다.

오탁방지막의 설계이론의 정립차원에서 설계에 사용되는 모든 식의 이론적, 물리적인 개념에 근거하여수식을유도하였다. 경험적으로사용되는여러 계수들에 대하여 개발된 양해법 산정식을 제시하였다. 항력계수 C_D산정을 위하여 지수함수 형태의 산정식을 제시하였으며 파수 K를 산정하는 1차, 2차 근사식을개발하였다. 또한오탁방지막의구성에따라 부체, 막체, 앵커로 구분하여 설계방법을 제시하였다.

오탁방지막의 설치효과에서 침강부분에 있어 침강속도와 종말속도의 개념을 도입하였다. 낙하하는 물체가 더 이상 가속되지 않고 항력과 부력의 합이 중력과 평형을 이룰 때 일정한 속도로 낙하하게 되는데 이를 종말속도 또는 최종 침강속도라 칭한다. 한편, 종말속도에이르기전나타나는물체의낙하속도를침강속도라하여종말속도와구별한다. 침강속도는물체의전체낙하구간에서물체가낙하하기시작하는초기에존재하는속도로주로종말속도로대체하여 사용하였다. 이에 따라 종말속도의 여러 산정식들을 소개하고 양해법식과 지수함수 형태의 식을 제시하여 종말속도 산정에 있어 보다 정확성과 편리성을제공하였다.

방파제 설계부분에서 본 연구에서는 사석 중량 산정, 도파고 산정, 월파량 산정 등을 주안점으로 다루었다. 사석 중량 산정에서 기존의 여러 산정식인 Iribarren식, Hudson식, Van der Meer식 등의 수식 전개에 있어 관계식의 주요 인자가 적절치 못하여 파형경사, 파주기, 사면의 투수성, 종확산 영향등이 제대로 반영되지 않았다. 기존식을 사용할 경우사석 중량산정시 과대또는 과소산정하는 경향이 있다. 특히 실무에 주로 사용되는 Hudson식은 사석 산정함에 있어 고려해야할 수심, 파주기, 파형경사등을무차원수K_D로단일화하여수심이나 파주기의 변화에 따른 사석 크기가 일정하여 설계에 있어 효율성이 떨어진다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 관계식의 주요 인자를 파입자의 최대유속을 취하여 사면의 투수성, 파주기, 파형경사와 종확산 영향을 고려할 수 있는 관계식을 유도하였다. Hudson식이 사석 종류만의 함수인데 반하여, 본 연구에서 개발한 산정식의 두 변수 K_Y와 S_Y는 사석 종류, 파주기, 수심, 파고등 설계시 고려되어야 할 인자들의 함수로써 사석 크기 결정함에 있어 보다 정확하고 안정된 설계치를 제시하고 있다. 또한보다 손쉬운사석 중량산정을 위해무차원 비례상수인 α, β를제안하였으며기존의산정식에도 위와 같은 비례상수를 적용하여 이들 관계식을 함께제시하였다.

도파고 산정에서는 Saville 실험자료와 Delft 공식을 비교 검토하여 두 실험 자료를 보완하는 단일식을 개발하였다. Saville 실험자료는 사면 조도를 α 고려하지 않고 파형경사의 함수로 이루어졌고 Delft 실험자료는 파형경사를 고려하지 않고 사면 조도 함수로 이루어져 있다. 또한 복합단면의 도파고산정에관하여도중점연구하였다. 수심비(h/H) 조건에 따라 Saville의 관측자료를 이용하여 보다

손쉬운 도파고 산정을 위해 양해적 산정식을 개발하였다. 이 식을 이용하면 파고, 주기, 사면 경사만을 알면 복합단면에 미치는 도파고를 바로 산정할 수있다. 그리고양해적산정식은Saville 실험자료보다 크게 산정하였는데 이는 사면의 경사가 급할수록 중복파가 일어나 도파고가 커지는 경향을 고려하여 도출된 결과이기 때문이다. 월파량 산정은 Goda가 관측한사면경사 1/30인 소파공인 경우의 기대 월파량 그래프를 이용하여 양해적 산정식을 개발하였다.