

van der Meer의 피복블록 산정식에 관한 고찰



오재택
(주)다산건설턴트 항만부
전무이사, 항만 및 해안기술사
ohjitt@hanmail.net



윤호권
국토해양부 동해지방해양항만청
항만공사과장
hg56@korea.kr

1. 개요

파랑·해일·월파 등을 1차적으로 억지하는 제체 피복재에 대한 적정의 형식과 규모 선정은 우리 연안·항만 기술자와 연구자의 주요 과제중 하나이다. 특히 자연재해의 대형화·다발화와 시설해역의 고파랑·대심도화 추세에 따라 피복재가 대형화·다양화 되고 있는 오늘날, 설계경제성에 대한 요구도와 신뢰성 검증에 대한 중요성은 날로 커지고 있으며 이에 따른 우리의 책임과 고뇌는 더욱 깊어지고 있다.

피복재의 중량 산정식에 대해 살펴보면, 1950년대에 발표된 이래 현재까지 널리 통용되고 있는 Hudson식에 이어 1980년대부터 van der Meer는 Hudson식의 한계를 극복하기 위한 고도의 실험과 연구를 통해 보다 진전된 실험식을 발표하였다. Meer식은 피복석(Rock Layers)과 피복블록(Concrete Armour Layers)에 관한 산식으로 구분되며, 이 가운데 피복블록에 관

한 Meer식은 파랑역학적 논리에 근거하여 For Design으로 제안되었음에도 불구하고 과도한 간략성과 실현상 대응력의 미흡으로 말미암아 국내의 항만설계기준서와 송태관의 논문 등에 참고자료로 소개·인용되는 수준에 머물러 있다.

이러한 까닭에 피복블록의 중량산정 기준은 아직까지도 Hudson식이 유일한 실정으로서, 임의의 실현상 조건에 합리적 대응이 가능하고 실무적용이 용이한 제 2의 비교산식 정립이 절실히 요망되고 있다.

이에 부응하여, Meer식이 갖는 특징점의 활용과 문제점의 개선을 위한 설계 보완방안을 고찰하고자 한다.

2. Meer식의 설계적용 방안 고찰

- 본 장에서는 피복블록에 관한 Meer식의 전개특성을 소개하고, 설계 적용상의 문제점이 무엇인지

또, 이에 따른 파랑역학적, 설계기술적(안전성/경제성) 측면에서의 보완방안은 무엇인지 검토·제시하고,

- 보완방안의 설계적용 결과에 대한 실현상 근접성과 조건 대응성 등의 평가와 검증을 통해, Meer식의 설계 활용을 위한 Design Guidance (Interim)로서의 설계적용 방안(보정산식)을 제안토록 한다.

2.1 피복블록에 관한 Meer식의 이해

1) Meer식의 개괄

- 피복블록의 안정계수에 관한 Meer식이 Breakwaters Conference에 초기 발표(1988c)된 이래, 세계적으로 보급된 상용블록(TTP, Accropode, CoreLoc, Cube)에 대한 설계 실무용(For Design)으로 Coastal Structures에 후속 발표(1999) 되었으며, 후자에서 제안된 식의 함수구조는 다음과 같다.

$$N_s^{(1)} = H_s / \Delta D_n = f(s_m, N, N_{od})_{Block} \text{ (이하 전개식)식(2.1)}$$

$$= C_{Block} \text{ (이하 간편식)식(2.2)}$$

- 한편, 피복석에 관한 Meer식(1988a)과 피복석 및 블록에 공용되는 Hudson식을 참고로 정리해 보면 다음과 같다.

$$N_s = f(\xi_m, N, P, S, \cot\alpha)_{Rock} \text{ 식(2.3)}$$

$$N_s = f(K_D, \cot\alpha)_{Rock \& Block} \text{ 식(2.4)}$$

- Meer의 피복블록 전개식(2.1)은 피복석 산정식(2.3)에 비해 체체의 투수율과 사면구배에 관한 단일조건을 적용함으로써 상당부분 간략화된 점이 있다. 한편 Hudson식과 비교해 볼 때, Meer의 전개식(2.1)은 파형경사, 피해율, 파랑 작용

수(내습시간)를 감안할 수 있는 반면, 간편식(2.2)은 비쇄파대 조건과 사면구배 변화에 대응할 수 없는 한계점이 있다. 이에 대해서는 후술의 설계적용상의 문제점에서 상세 고찰하겠다.

2) Meer의 피복블록 산정식

- Meer의 피복블록 산정식은 TTP/Cubes, Accropode, CoreLoc에 대한 실험식으로서 블록 종류별 고유 사면구배($\cot\alpha$), 해저경사(l)=1/30, 투수율(P)=0.4를 실험조건으로 적용하였다.

- 한편, Meer 전개식은 심해파의 파형경사를 기준토록 되어 있으며, 간편식은 쇄파대 조건에 한정하여 피해율과 안전율의 연관관계 즉, Start of Damage($N_{od}=0$) 및 Failure($N_{od}>0.5$) 수준에 해당하는 일정값의 안정계수를 제안하고 있다. 이에 관한 블록별 각 산식(안정계수)과 안전율을 다음의 <표 1, 2>로 요약 정리하였다.

<표 1> Meer의 안정계수(전개식)

구분	N_{od}	N_s	비고
TTP (2Layer)	≥ 0	$[3.75*(N_{od}/N^{0.5})^{0.5}+0.85]*S_{om}^{-0.2}$	Surging
		$[8.6*(N_{od}/N^{0.5})^{0.5}+3.94]*S_{om}^{-0.2}$	Plunging
Cube (2Layer)	≥ 0	$[6.7*(N_{od}^{0.4}/N^{0.3})+1.0]*S_{om}^{-0.1}$	Surging

<표 2> Meer의 안정계수(간편식)와 안전율

구분	N_{od}	N_s	S_l	비고
Accropode(1Layer)	0	2.5	1.50	쇄파대 조건
	0.5		1.64	
CoreLoc(1Layer)	0	2.78	≥ 1.50	
Cube(1Layer)*	0	2.2	1.36	
	0.5		1.70	

주*) 무월파조건에 제한적으로 적용

2.2 Meer식의 설계적용상의 문제점

- 전항에서 소개한 Meer식의 개괄적 이해에 따

1) 산식기호 설명은 생략함 (후술 참조)

라, 설계적용상의 문제점에 대해 그 원인 특성별로 항목 구분해 보면 다음과 같이 정리할 수 있겠다.

- ▶ 먼저, 설계기준상의 문제점으로서
 - 첫째, 비쇄파대(수심/주기 변화)에 대한 적용 기준의 불분명
 - 둘째, 사면구배 변화에 따른 실현상 대응의 불가
 - 셋째, 기타 통제변수(피해율, 파랑작용수, 안전율 등)에 관한 적용기준의 불분명
- ▶ 또한, 이에 수반되는 실무상의 애로점으로서,
 - 첫째, 산식의 전개과정에 대한 몰이해와 간편성에 대한 과신 즉, 파랑특성과 단면조건을 모두 아우르는 통합형 산정식으로 오인함으로써 타 산식값을 일방적으로 기각하거나 비교검증을 생략하는 등의 설계오류 유발
 - 둘째, 통상적인 설계기법 즉, 각 산정식별 결과값을 비교한 후 임의의 최대값(안전측)을 취함으로써 과다중량 산정에 따른 설계경제성 결여
 - 셋째, 상기와 같은 오류배제를 위해서라도 Hudson식에 버금가는 비교산식이 요긴(대형 Project일수록) 함에도 수리실험 이외의 실무대안 부재 등을 들 수 있다.
- 본 절에서는, 상기의 문제 항목별 설계적용 사례를 제시하고, 이에 바탕한 Meer-Hudson식간의 정성적, 정량적 편차도를 비교·평가함과 아울러 문제점별 발생기전과 그 개선방향을 분석·제시토록 한다.

1) Meer식의 설계사례 검토

- Meer식의 적용사례 검토는, Meer식과 Hudson식에 의한 각 중량산정 결과를 제시하고 아래와

같은 Meer-Hudson 상관식의 등치개념에 따라 결과 분석토록 하며, 비교의 기준은 Hudson값을 기준하였다.

$$N_s = H_s / \Delta D_n = (K_D \cdot \cot\alpha)^{1/3} \quad \text{식(2.5)}$$

- 전개식의 쇄파형태는 최대파력 조건의 Surging Breaker를 기준하였으며, 파랑조건은 지면 관계상 1개 Case로 하고 사면구배는 Meer의 실험조건과 같은 블록종류별 표준구배를 적용하였다.
- 한편, Hudson식의 블록별 K_D 값은 항만 및 어항 설계기준, Sogreah의 Application Brochure, WES(USACE)의 Technical Guideline의 특성값을 적용하되 필요시 외삽하였으며, 단위는 CGS 단위계를 사용하였다.
- 이상에 따른 사례검토의 적용 제원은 다음의 <표 3>과 같다.

<표 3> 설계사례 적용제원

구 분		Meer식		Hudson식	
		쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파
안정계수 (N_s/K_D)	TTP(2층)	2.2	-	7	8
	Accropode(1층)	2.5	-	12	14
	CoreLoc(1층)	2.8	-	16	19
피해수준		$N_{od}=0.5(S=2)$		Dr=5%	
파랑 작용수		N=1,000파			
사면구배 ($\cot\alpha$)	TTP(2층)	1.5		1.33*, 1.5, 2.0	
	Accropode(1층)	1.33			
	CoreLoc(1층)	1.33			
파랑제원	파고(Hs)	9.0m			
	주기(T)	11.0sec			
	수심(h)	15m(쇄파)			
블록제원	단위중량	2.45 t/m ³			
	상대비중	1.38			
비 고		1) Surging Breaker기준 2) 산정중량(ton)은 Net중량			

주) *Italic*체는 TTP의 쇄파/비쇄파 특성비율에 따른 쇄파기준의 외삽값
주) *는 사례 검토용으로서 TTP의 적용기준은 1.5이상(항만·어항 설계기준)

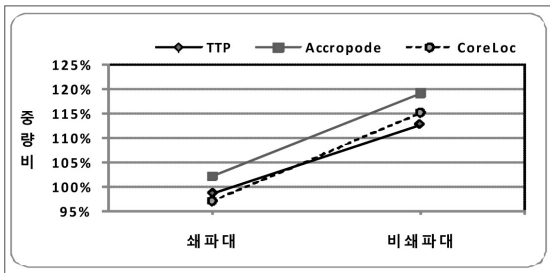
i) 쇠파대에 관한 사례 검토

- 피복블록에 관한 Meer 전개식의 장점중 하나는 전항의 식(2.1)에서 보듯, 파형경사(S_m)를 감안할 수 있다는 점이다. 그러나 이는 심해파의 파형경사(S_{om})를 적용토록 함으로써 설계 주대상인 천해역에서의 실현상(쇄파/비쇄파) 대응이 불가하며, 간편식에서는 파형경사항(S_m)마저 생략됨으로써 애석하게도 기존의 Hudson식 수준으로 Downgrading 되어 있다.
- 이에 따른 설계사례 검토를 위해, 상기의 제원에 대해 쇠파대 조건에서의 Meer식과 Hudson식의 중량을 산정하고 다음의 <표 4>와 <그림 1>에 비교·제시하였으며, 참고를 위해 Meer 전개식에 의한 산정결과(TTP)도 제시하였다.

<표 4> 쇠파대 설계사례 비교

구분	중량비(M/H)		Meer식		Hudson식	
	쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파
TTP	99%	113%	64.0	64.0	64.9	56.8
Accropode	102%	119%	43.6	43.6	42.7	36.6
CoreLoc	97%	115%	31.1	31.1	32.0	27.0
TTP(전개식)	73%	84%	47.6	47.6	64.9	56.8

주) *Italic*체는 쇠파대 중량을 비쇄파대에 동일하게 적용한 경우(참고용)



<그림 1> 쇠파대 설계사례(중량비) 비교

- 상기의 산정결과를 분석해 볼 때, 쇠파대의 경우 간편식에서 Hudson 대비 Meer 중량비는

블록별로 $\pm 3\%$ 수준에서 거의 일치함으로써 쇠파대의 설계적용성이 우수함을 알 수 있다. 그러나, 전개식(TTP)에서는 -27%의 과도한 차인을 나타내어 산식간 결과상충(Safety Factor 불감안시)을 보인다.

이는 전개식에서의 심해파의 파형경사 적용(수심변화 대응불가)에 따른 차인으로서 Meer 간편식의 도입과정에 대한 불명확성과 설계 적용성의 결여로 귀결된다.

- 한편, 비쇄파대²⁾의 간편식에서는 중량비(M/H) 113%~119%로서 최소 10% 이상의 과중량으로 산정되어, Hudson식과의 상충은 물론 대심도(비쇄파대) 해역일수록 경제성 결여로 나타난다.
- 따라서, Meer식의 설계적용을 위해서는 수심-주기-파고에 관한 천해파 특성에 대응할 수 있는 쇠파/비쇄파대 평가기준의 보완이 요망되며, Hudson식의 검증에 위한 비교산식의 필요성 측면에서도 Meer식의 활용방안이 절실하다 하겠다.

ii) 사면구배에 관한 사례 검토

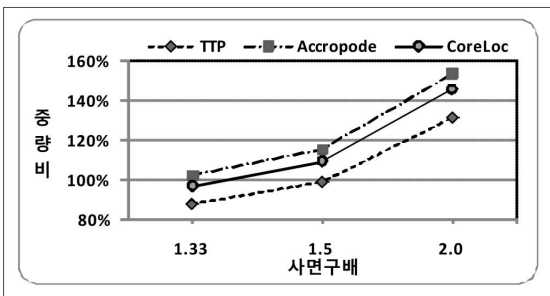
- Meer식은 블록별 표준구배에 한정된 실험식이므로 Hudson식과 달리 사면구배 변화에 따른 대응이 불가하다. 경우에 따라서는 Meer식의 안전을 범위내에서 임의 사면구배에 대응가능한 만능식으로 오인할 수도 있어 이에 유의할 필요가 있다.
- 블록종류별, 사면구배별 설계적용 사례를 다음의 <표 5>와 <그림 2>에 비교·제시하였다.

2) 논리상 산정 불가하여 분석의 의미가 없겠으나, 쇠파~비쇄파대를 아우르는 만능식으로의 오인(설계오류)에 대비한 참고 검토임

〈표 5〉 사면구배 적용사례 비교

구분	Meer식	Hudson식		
	기준구배	1.33	1.5	2.0
TTP	64.0	73.2	64.9	48.7
Accropode	43.6	42.7	37.9	28.4
CoreLoc	31.1	32.0	28.4	21.3

구분	중량비(M/H)			
	기준구배	1.33	1.5	2.0
TTP	99%	87%	99%	131%
Accropode	102%	102%	115%	154%
CoreLoc	97%	97%	109%	146%



〈그림 2〉 사면구배 적용사례(중량비) 비교

- 상기의 결과를 분석해 볼 때, 기준구배에서는 중량비 ±3% 수준에서 Hudson식과 거의 일치하나 급구배에서는 -13%, 완구배에서는 +31~54%로서 구배변화에 따른 과도한 편차도를 확인할 수 있다.
- 따라서, 기검증된 Hudson식과의 차인이 과다 발생하는 한, Meer식의 설계적용을 위해서는 사면구배 변화에 대응할 수 있는 적용기준의 보완이 요망된다 하겠다.

iii) 기타 통제변수에 관한 사례 검토

- Hudson식에 대한 Meer식의 특징점으로서 전향의 파형경사 도입 외에도 기타 통제변수 즉

피해도와 파랑 작용수 및 이에 연계된 설계안 전율의 제시를 들 수 있겠으나, 이 또한 다음과 같은 설계적용상의 주요 문제점을 안고 있다.

- 먼저, 피해도(Number of Damage, N_{od})에 대해 살펴보면,
 - Meer 전개식에서 피해도(N_{od})는 사면길이(L_s)와 피해율(D_r)의 함수 즉, $N_{od}=D_r(\%) \times L_s(m)$ 로 정의함으로써, 아래와 같이 동일한 피해율에서도 사면길이(수심)가 클수록 피해도가 커지는(블록중량이 작아지는) 문제점이 있으며, 이는 S.P.M에 인용(Jackson, 1968a) 제시된 수면부의 일정구간에 피해가 집중하는 실현상의 피해특성과도 상충되고 있다.

피해도(N_{od}) 산정예시($D_r=5\%$ 기준시)
 : $H=7.0m, T=6.0sec, cot\alpha=1.5$
 $L_s=10m$ 일때 ==> $N_{od} = 0.05 \times 10 = 0.5$ ($W=39.8ton$, TTP)
 $L_s=20m$ 일때 ==> $N_{od} = 0.05 \times 20 = 1.0$ ($W=26.3ton$, TTP)

- 한편, 간편식의 경우 For Design으로 비교 제시된 〈표 6〉에서 보듯, 피해수준별 피해도 즉, Start of Damage($N_{od}=0$) 및 Failure($N_{od}>0.5$)

〈표 6〉 블록종류별 피해도와 안전율

구분	N_{od}	N_s	S_f	비고
TTP/Cube (2Layer)	0	2.2	1.50	
	0.5		1.64	
Accropode (1Layer)	0	2.5	1.50	
	0.5		1.64	
CoreLoc (1Layer)	0	2.78	1.55*	
	0.5		1.70*	
Cube (1Layer)	0	2.2	1.36	무월파조건에 한해 제한적용
	0.5		1.70	

주) *는 Accropode에 비해 안정도가 높다는 Meer의 실험결과에 따른 필자보정

에 해당하는 설계안전율을 제시함으로써 일정 값의 피해율(5%, $H/H_{D=0}=1.0$)에 국한된 Hudson식의 수준을 증가하는 측면이 있다.

- 그러나 이 또한 전개식(소요중량)과 간편식(안전율)간의 연계성 미흡 및 Hudson식과의 결과상충 등으로 인해 설계 적용상의 논란과 혼선이 비등한 실정으로서, 피해도(N_{od})-안전율의 연계도입을 위한 합리적인 개념일원화와 기준 정립이 요긴하다 하겠다.

- 이에 관한 사례제시는 지면상 생략토록 하고 후술의 보완방안 검토에서 상세 고찰하겠다.

■ 다음은, 파랑수(Number of Waves, N)의 문제이다.

- 동일한 내습시간(t) 일지라도 입사파의 주기(T)가 다를 경우, 작용 파랑수 및 누적 에너지량이 상이하게 되므로 파주기에 따라 안정계수(또는 피해율)도 달라져야 할 것이다. 이에 관한 Meer의 파랑수(N) 도입은 기존 Hudson식의 한계를 증가하는 파랑역학적, 설계기술적(특히 설계경제성 측면) 도약이라 할 수 있다.

- 그러나 Meer에 의하면 '전개식의 적용은 최소 700파 이상에서 유효하다'고 제시할 뿐 파랑수, 피해율(누적) 등과 관련한 상대기준이 모호하고 주기특성에 관한 설계 대응방안이 없다. 더욱 아쉽게도 간편식에서는 파랑수에 관한 통제항 자체가 생략됨으로써 Hudson식 이상의 설계정도를 기대하기 어렵게 되었다.

따라서, Meer 전개식에 내재된 주기(파랑수)의 통제기능을 설계적용하기 위해서는 안정계수(N_s)-기준파수(N_r)-내습시간(t)에 관한 상대평가기준으로서의 개념 일원화와 아울러 주기(T)-파랑수(N)에 관한 적용기준의 보완이 요망된다 하겠다.

- 이에 관한 사례제시는 지면상 생략토록 하고

후술의 보완방안 검토에서 상세 고찰하겠다.

iv) 기타 실험조건에 관한 검토

■ Meer 전개식의 통제변수는 아니나, 중량산정의 영향인자로 볼 수 있는 실험조건으로서 제체 투수율(P)과 해저구배(i)를 들 수 있으며, 이에 관한 사례검토는 생략토록 하고 후술의 보완방안 고찰에서 상세 언급하겠다.

2) Meer식의 문제점 검토 결과

- 전항의 적용사례와 Hudson식과의 비교·평가에서 제시한 Meer식의 문제점과 개선방향에 관한 검토결과를 아래와 같이 요약하였다

i) 쇄파대에 대해

쇄파대 조건에 한정된 산식으로서, 설계 주대상인 천해역에서의 파형특성(쇄파/비쇄파) 평가에 한계가 있어 수심-주기-파고의 변화에 대응할 수 있는 비쇄파대 보정방안이 요망된다.

ii) 사면구배에 대해

블록별 표준구배에 한정된 산식으로서, 사면구배의 변화에 따른 실현상 대응이 불가하여 Hudson식의 구배적용 개념에 상응하는 사면구배 보정방안이 요망된다.

iii) 피해도에 대해

사면길이에 비례하는 피해도 개념은 수면부의 일정 사면에 피해가 집중되는 실현상 특성과 상충되고 피해도-안전율의 도입기준이 불명확한 문제점이 있어, 피해도에 관한 합리적인 개념 일원화와 통합 기준 설정이 선결되어야 한다.

iv) 파랑 작용수에 대해

안정중량에 관한 파랑수의 도입은 설계기술의 비

약적 성취이나, 파랑수의 변화에 대응할 수 있는 실무 적용기준이 없어 파랑수-주기-내습시간에 관한 통합기준 설정과 파랑수(주기) 보정방안이 요망된다.

v) 기타 실험조건에 대해 (사례검토 생략)

2.3 Meer식의 설계 보완방안 검토

- 앞 절에서 제시한 항목별 문제점에 대해, 파랑역학적, 설계기술적 측면에서의 합리적인 보완이 될 수 있는 보완원칙을 설정하고 실현상 대응성과 실무 적용성에 손색이 없는 Meer 간편식의 설계적용 보완방안을 검토·제시토록 한다.

1) 보완의 원칙과 방법

- Meer식과 Hudson식은 모두 실현상에 바탕한 실험식이므로 검토조건별 산정결과는 상호 일치해야 한다는 원칙에 입각하여, 보완후의 결과 편차가 최소화되도록 검토한다.

또한, 보완 방법의 논리성과 결과 검증성이 확보될 수 있도록, 아래와 같이 보완 항목별로 비교기준을 적용토록 하고, 그 우선순위는 1)실험검증 2)통용기준 3)신규제안의 순으로 설정하였다.

▶ 비쇄파대의 보완

Hudson식의 비쇄파대 안정계수(K_D)는 기검증된 경험계수로서 Hudson식에 준수한다

▶ 사면구배의 보완

Hudson식의 사면구배별 중량산식은 기검증된 경험식으로서 Hudson식에 준수한다.

▶ 피해도의 보완

Hudson식의 피해율($D_r=5\%$)은 통상적인 설계기준($H/H_{D=0}=1.0$)이며 Meer식의 초기 피해율($S=2, D_r=5\%$)과도 부합하므로, 사면길이와 무관한 Hudson개념(단일 피해율)에 준수한다.

▶ 파랑수(주기)의 보완

Meer에 의해 도입된 통제개념으로서, Hudson식에는 없으므로 Meer 전개식과 파랑역학적 논리에 규준한다.

▶ 기타 실험조건외의 보완

Meer식에 적용된 실험조건으로서, 블록중량과는 직접적 함수관계가 아니므로 통상의 설계조건과 허용범위에 규준한다.

- 보완방법으로는, 앞 절의 문제점 검토에서 제시한 바와 같이, '적용기준 보정'과 '개념 일원화'로 구분하였으며,

▶ 먼저 '개념 일원화'는 산정식별 전개과정과 실험조건에 관한 충돌배제와 일관성 유지를 위한 개념보완으로서, 피해도, 기준주기, 파랑 내습시간 등에 관한 통합기준 설정이며,

▶ '적용기준 보정'은 산정식별 안정계수와 안전율의 범위내에서 실현상 변화에 대응할 수 있는 산식보완으로서, 비쇄파대, 사면구배 및 파랑수에 관한 보정계수 산정이다.

2) 설계적용 보완방안

- Meer식의 합리적인 설계적용을 위해, 전항에서 제시한 보완의 원칙과 항목별 비교기준에 따라 파랑역학적 논리와 블록중류별 해당문헌상의 수리특성에 부합함은 물론 검토조건별 실현상 대응이 가능하고 실무적용이 용이하도록 보완방안을 검토하였다.

i) 비쇄파대 보완 [보정계수 산정]

■ Meer 간편식은 쇄파과고를 기준한 안정계수 산식으로서, 비쇄파대의 안정계수 보완방안을 아래와 같이 산정토록 한다.

- 심해파형(S_{om})을 적용하는 Meer 전개식(TTP)의 논리에 근거하되, 설계 주대상인 천해역에서의 쇄파/비쇄파간의 파형 특성차

를 역산정하고 이를 비쇄파 보정계수(f_n)로 정의하여 기정의 안정계수(쇄파대)에 할증 적용한다.

- 보정계수(f_n) 산정에서,
 - 쇄파형태는 최대파력 조건의 Surging Breaker³⁾를 적용하고, Surging과 Plunging의 경계는 쇄파상사지수(I_r)=1.5를 기준으로 구분하였다.
 - 한편, 쇄파대의 파형경사에 대해서는 Y. Goda의 쇄파이론에 따라 쇄파대에서의 파장변화율(Ψ_L)을 다음과 같이 적용토록 한다. 파장 변화율의 범위는 13~25%로서 $I_r=1.5$ (Surging의 구분기준과 동일)일 때 기준증대량 13%를 적용하여 쇄파상사지수(I_r), 즉 파형경사(S_p)에 대응되도록 하였다.

$$\text{파장변화율}(\Psi_L)^4 = I_r / 1.5 \times 13\% = 0.867 I_r = 0.0867 / 1.5 S_p^{0.5} = 0.0578 / S_p^{0.5} \quad \text{식(2.6)}$$

⇒ 전개식(TTP)의 표준구배는 1:1.5

$$I_r = \tan\alpha / S_p^{0.5} = 1 / 1.5 S_p^{0.5} \quad \text{식(2.7)}$$

여기서, S_p (천해파 파형경사)= H_s/L , L: 천해파장

- 이상의 비쇄파대 보안을 위한, 안정계수(N_{sn}) 및 보정계수(f_n)의 산정방안은 다음과 같다.

$$N_{sn} = N_s \times f_n \quad \text{식(2.8)}$$

여기서, N_s : 블록종류별 안정계수(쇄파대)
 ※ 상기의 보정식은 심해역에도 적용 가능함

◎ 비쇄파대 보정계수(f_n) 산정

$$f_n = (S_p / S_p')^{0.2} = (L' / L)^{0.2} \quad \text{식(2.9)}$$

$$L' \text{ (보정파장)} = \max. \{ L \times (1 + \Psi_L), L_o \} \quad \text{식(2.10)}$$

여기서, S_p (보정 파형경사)= H_s/L'

- L : 천해파장
- L' : 보정파장
- L_o : 심해파장
- Ψ_L : 파장변화율

- 한편 Meer식의 비쇄파대 적용과 관련하여, 개념혼돈에 의한 실무상의 오류를 야기할 수도 있는 접근방식(파고분리 개념)에 대해 검토하였으며, 다음의 해석에 유념할 필요가 있겠다.

※ 비쇄파대 적용에 관한 유의사항

◎ Meer 간편식의 비쇄파대 적용에 관한 오해사례(파고분리 개념)로서,

- Hudson식과의 상관관계인 $W = H_{SM}^3 / N_s^3 = H_{s3} / K_D \cdot \cot\alpha$ 에 따라, 아래와 같이 Meer의 설계파고(H_{SM})를 쇄파/비쇄파대로 분리적용하여 Meer의 안정계수(쇄파대)에 의한 쇄파/비쇄파대 증량을 산출해 볼 경우,
 - ▷ 쇄파대 : 쇄파대내의 유의파고(H_{ss}) 적용
 - ▷ 비쇄파대 : 비쇄파대의 진행파고(H_s) 적용
 - ⇒ 예시($h/H_o' = 1.5$, $H_o' / L_o = 0.03$, $i = 1/30$)
 : 쇄파/비쇄파 파고비=1.05==> Hudson K_D 비 =1.16, ==> Meer N_s 비=1.05가 되어,
- 그 산정결과는 Hudson식 및 본 고찰의 보정식에 의한 산정값과 거의 일치하게 되며, 쇄파대에서의 중심, 파형경사 등의 천해특성에 대응할 수 있어 Meer식의 고유취지에 부합하는 것으로 보여질 수도 있음
- ◎ 그러나, 상기와 같은 접근방식은 그 결과의 일치도 또는 적용상의 장단점을 떠나 아래의 해석에 주목해 볼 때 **적용오류**임을 알 수 있다
- 본 고찰의 설계적용 사례에서 보듯, 동일한 파고(H_s)에서 Meer/Hudson의 쇄파대 증량비는 거의 100% 일치하므로, Meer의 설계파고(H_{SM})와 Hudson의 진행파고(H_s)는 동일한 값, 즉 $H_{SM} = H_s$ 의 단일 파고가 되어야 함. 따라서 상기의 파고분리에 의한 산정결과가 일치한다면 역설적으로 Meer식은 Hudson식과 상충됨을 의미함
- Meer 간편식의 이해에 있어, '**쇄파고 조건**'==> 쇄파대 안정계수'로 인해, '**비쇄파고 조건**'==> 비쇄파대

3) Plunging Breaker의 경우 쇄파=비쇄파가 되므로 산정결과에 대차 없음

4) 쇄파대내 파장 증대량(13~25%)에 대해, 하한제한(13%)을 하여야 하나 $I_r < 1.5$ 의 경우는 Plunging Breaker가 되므로 산정결과에 대차 없으며, 상한제한(25%)을 하여야 하나 천이역(장주기 파)에 대한 확장대응이 가능하도록 각 제한을 불적용함

안정계수'로 확대해석하지 않도록 **유의요망**되며, 쇄파고 조건을 쇄파과고(H_{ss})가 아닌 쇄파대에서의 진행과고(H_s)로 이해하여야 할 것임

ii) 사면구배 보완 [보정계수 산정]

■ 블록종류별 임의 사면구배에 대응할 수 있는 안정계수 보완방안은 다음과 같다.

- Meer식과 Hudson식의 아래 등치개념에 따라, 안정계수와 사면구배간의 상관 변화율을 구배 보정계수(f_α)로 정의하고 이를 기정의 안정계수(표준구배)에 할증 적용한다.

$$N_s = (K_D \times \cot\alpha)^3 \text{ 식(2.5)}$$

■ 보정계수(f_α) 산정에서,

- Hudson식의 사면구배 대응개념에 근거하여, 블록종류별 표준구배($\cot\alpha_r$)에 대한 검토구배($\cot\alpha$)의 비율인 상대구배율(Ψ_α)을 아래의 식(2.11)과 같이 산정토록 하며, CoreLoc에 대한 산정결과를 <표 7>에 예시 하였다.

$$\text{상대구배율}(\Psi_\alpha) = \cot\alpha / \cot\alpha_r \text{ 식(2.11)}$$

<표 7> 상대구배율 산정예(CoreLoc)

검토구배	표준구배	Ψ_α
2.0	1.33	1.504
1.5		1.128
1.33		1.0

■ 상기의 사면구배 보완을 위한, 안정계수($N_{s\alpha}$) 및 보정계수(f_α)의 산정방안은 다음과 같이 적용한다.

$$N_{s\alpha} = N_s \times f_\alpha \text{ 식(2.12)}$$

◎ 사면구배 보정계수(f_α) 산정

$$f_\alpha = \Psi_\alpha^{1/3} \text{ 식(2.13)}$$

여기서, Ψ_α : 상대구배율

iii) 피해도의 보완 [통합기준 설정]

■ Meer 전개식의 피해도-피해율 관계는, Hudson식의 단일 피해율(5%)에 의한 절대개념이 아닌 사면길이를 변수로 하는 상대개념으로 제시하고 있으므로, 각 산정식간의 결과 합치라는 필연성에 입각하여 우선 개념 일원화가 선행될 필요가 있다.

■ 앞 절의 문제점 검토에서 언급한 바와 같이, Meer는 피해도 수준을 Start of Damage ($N_{od}=0$)와 Failure($N_{od}=0.5$) 단계로 구분하고 이에 상응하는 블록별 각 안전율을 적시하면서, 설계 경제성추진에서의 Design Guideline으로 Failure단계($S=2\sim3$, $D_r=5\%$)의 피해도, $N_{od}=0.5$ 의 채택을 권고하고 있다.

■ 한편, 전항의 <표 6>에서 보듯 피해도 0~0.5의 범위에서 블록종류별 설계안전율은 대동소이한 수준에 있으며, 상기의 Meer의 권고 또한 Hudson식의 단일 피해율 적용과 일맥상통하는 개념으로 이해할 수 있겠다. 따라서 Meer식 피해도-안전율의 설계적용과 관련하여 아래와 같이 개념 일원화하고 통합기준으로 설정토록 제안한다.

◎ 피해도(N_{od}) 적용기준

$$N_{od} = 0.5 \text{ (Failure)}$$

안전율(S_r)=1.5, 피해율(D_r)=5%

■ 다만, 여건에 따라 피해도(누적)를 변경해야 할 필요가 있을 경우에는 별도의 수리실험결과에 의하거나 안전율의 범위에서 안정계수(N_s)의 조정 적용을 권고한다.

iv) 파랑수(주기)의 보완 [통합기준 설정 및 보정계수 산정]

- Meer식의 파랑수(N) 개념은 파랑 내습시간중의 파고계급별 누적 피해도에 대한 평가항으로 도입되었으며, 이에 따른 2가지 요건 즉, 안정계수(N_s)에 대한 기준파수(N_r , 최소 파랑수)의 설정 및 쇄파이론과 Meer 전개식과 에 근거한 파주기(T)별 특성값 산정을 위해 다음과 같이 검토·제안한다.
- 우선, 기준파수(N_r)에 대해 검토해 보면,
 - 파주기별 내습시간에 따른 작용파랑수(N)는 다를 수밖에 없으므로, 블록종류별 안정계수(N_s)에 대한 기준파수(N_r)가 대응되어야 하며, 이를 위해서는 일정 기준의 파랑 내습시간(t)을 설정할 필요가 있다. 설계파 내습시간을 심해파의 발생~소멸까지를 통틀어 평균계급의 통과시간으로 정의해 볼 때, 우리나라의 경우 통계상 최대 2.5~3.0hr (50년 빈도)으로 보아 내습시간(t)을 3.0hr으로 설정토록 한다.
 - 한편, 심해파 주기(50년 빈도)를 10~11sec(안전측)로 하면 내습시간중의 파랑수는 982~1,080파(=3.0hr × 3,600sec/10sec)가 되며, Meer의 실험조건상 최소파수인 700파를 상회한다. 따라서 Meer식의 안정계수에 대응하는 기준 파랑수(N_r)를 1,000파⁵⁾로 일원화하도록 한다.
- 다음으로, 파랑수(N)에 대해 검토해 보면,
 - 파랑수(N), 즉 주기(T) 변화에 따른 상대 특성치로서, 우선 안정계수(N_s)에 대응하는 파고계급별 표준주기(T_s)를 설정토록 한다. 이때 고

파랑 천해역에서의 유한진폭파⁶⁾ 특성이 반영될 수 있도록 표준주기에 대한 주기변화율(Ψ_T)을 산출·보정하여 이를 기준주기(T_r)로 정의한다.

- 전항에서 제안한 파랑 내습시간중의 기준 파랑수(1,000파)와 전개식에 근거하여, 검토주기(T)에 대한 기준주기(T_r)의 특성차⁷⁾를 파랑수 보정계수(f_N)로 하고 이를 기정의 안정계수(기준주기)에 할증 적용한다.

- 보정계수(f_N) 산정에서,
 - 표준주기(T_s)는 항만 및 어항 설계기준에 제시된 풍역에서의 파고-주기에 관한 경험식에 근거하여 아래와 같이 파고계급별 유의파 주기를 산정·적용토록 한다.

$$\text{표준주기}(T_s, \text{유의파주기}) = 3.86 \times H_s^{0.5} \text{ 식}(2.14)$$

- 주기변화율(Ψ_T)은 심해~천해역에서의 수심과 파고의 변화에 따른 대응수단으로서, 미소진폭파의 파랑분산식에 근거하여 아래와 같이 천해파속(C)에 대한 심해파속(C_0)의 상대비로 정의한다.

$$\begin{aligned} \text{주기변화율}(\Psi_T) &= (C/C_0)^{-1} \\ &= [\tanh(k^*h) / \tanh\{(k^*(h+z))\}]^{0.5} \text{ 식}(2.15) \end{aligned}$$

여기서, k(파수) = $2\pi/L$, z(진폭) = $H_s/2$
h: 전면수심, L: 천해파장

- 상기의 파랑수(N) 보원을 위한 안정계수(N_{SN}) 및 보정계수(f_N)의 산정방안은 다음과 같이 적용한다.

$N_{SN} = N_s \times f_N$	식(2.16)
---------------------------	---------

5) 파랑수가 20% 증가할 경우, 전개식의 블록중량은 6% 증가하고 간편식의 파랑수 보정량은 1% 미만(후술의 파수 보정계수 참조)이 되므로, 기준 파랑수(N_r) 변화에 의한 실제적인 중량 상관도는 미미함
6) 심해역의 경우 상대수심, 파형경사 등에 따라 주기변화율은 1로 수렴함
7) 파랑 내습시간이 일정(3.0hr)하므로 파랑수(N)는 주기(T)의 역함수임

◎ 파랑수(주기) 보정계수(f_N) 산정

$$f_N = \{ 0.47 \times (T_r/T)^{-0.25} + 0.85 \} / 1.32 \quad \text{식(2.17)}$$

$$T_r (\text{기준주기}) = T_s \times \Psi_T \quad \text{식(2.18)}$$

여기서, T_r : 기준주기

T : 검토주기

T_s : 유의파 주기

Ψ_T : 주기변화율

- 한편, 파랑수(N) 보정에 관한 본 고찰결과에 의거하여, Meer식에 의한 보정전후의 중량 증감율을 Hudson식의 산정결과에 (역)적용하게 되면 주기변화에 대응할 수 있는 Hudson식이 됨으로써 Meer식에 대한 비교산식으로 활용할 수도 있을 것으로 사료된다. 다만 이의 공용화를 위해서는 파랑수(주기)별 수리실험을 통한 체계적인 검증과 아울러 실용성있는 Data Base의 구축이 전제될 필요가 있겠다.

iv) 기타 조건(투수율, 해저구배)의 검토 [통합기준 설정]

- Meer의 안정계수 실험에서 제체의 투수율(P)은 0.4로 한정되어 있으며 이는 피복석 중량산식 연구에서 유래된 것이다.
 - 투수율(P)의 선정에 관한 설계 실무상의 주안점은 제체~피복재까지의 단면구성에 관한 재료특성으로서, 이는 국내외를 불문하고 매우 Typical하며 그 투수율(P) 또한 대동소이하다고 볼 수 있겠다. 따라서 통상적이며 평균적인 제체 투수율인 P=0.4로 일원화하여 설계 적용토록 한다.
 - 다만, 특이여건이나 피복층 투수성의 정밀 검토를 요할 경우에는 별도의 수리실험 또는 관련문헌 등에 의한 산정식의 조정 적용을 권고한다.

- Meer의 실험식은 해저구배(i)가 1/30로 조건되어 있으므로 지형변화에 따른 설계적용상의 보완이 요구될 수도 있다.

- 그러나, 실 해저지형이 실험조건상의 구배와 크게 다르지 않는 한, 블록의 소요중량(안정계수)은 해저구배보다도 수심급변에 지배되는 점에 입각해 볼 때, 실험구배인 $i=1/30$ 로 일원화하여 설계 적용하여도 무리 없을 것으로 사료된다.
- 다만, 천해역에서의 수심변동이나 특이지형에 따른 충격쇄파압 등의 우려가 있을 경우에는 별도의 문헌지침이나 수리실험에 의할 것을 권고한다.

2.4 Meer식의 설계 보완결과 검토

- 설계적용 항목별로 Meer 간편식의 보정사례를 제시하고 Hudson식과의 비교·분석을 통한 보정결과의 검증 및 보정효과에 대해 검토한다.

1) 설계적용 보완사례 검토

- 보완방안 적용사례 검토에서는 전항에서 고찰한 피해도(N_{od})와 기준 파랑수(N_r)에 관한 통합기준을 우선 적용하였다.
- 파고계급별 쇄파/비쇄파대, 파형(수심, 주기, 파고) 및 사면구배의 제 변화조건에 임의 대응할 수 있는 검토제원을 설정하고, 결과 비교를 위한 Hudson식의 K_p 값 등은 앞 절의 문제점 검토와 동일하게 적용하였으며, 지면 관계상 보완항목을 가급적 동시적용하고 검토 case를 최소화하였다.
- 이상에 따른 사례적용 제원은 <표 8>과 같다

〈표 8〉 보완사례 적용제원

구 분		Meer식		Hudson식	
		쇄파대	비쇄파	쇄파대	비쇄파
안정 계수 (N_s/K_D)	TTP(2층)	2.2	$N_s * f_n$	7	8
	Accropode(1층)	2.5		12	14
	CoreLoc(1층)	2.8		16	19
피 해 수 준		$N_{od}=0.5(S=2)$			
파랑 작용수		$(N_s)*f_n$ $N_T=1,000$ 파(3hr)		Dr=5%	
사면 구배 (cot α)	TTP(2층)	$(N_s)*f_n$ 1.33, 1.5, 2.0		1.33*, 1.5, 2.0	
	Accropode(1층)				
	CoreLoc(1층)				
파랑 제원	파고(H_s)	11.0m, 9.0m, 6.0m			
	주기(T_s)	6.0~14.0sec			
	수심(h)	11~18m(쇄파), 15~24m(비쇄파)			
블록 제원		전향과 동일			
비 고		1) Surging Breaker기준 2) 산정중량(ton)은 Net중량			

주) *는 사례 검토용으로서 TTP의 적용기준은 1.5이상(항만·어항 설계기준)

i) 비쇄파대 보정사례 (기준구배 적용시)

- 파고, 주기 및 수심 변화에 따른 쇄파/비쇄파대 조건에서의 보정사례를 검토하고 각 Case 별 산정결과를 다음의 〈표 9, 10〉과 〈그림 3〉에 비교하였으며, 〈그림 3〉에서는 비쇄파대의 비보정(TTP) 결과도 같이 제시하였다.

▶ Case NA

: H=9.0m, T=11sec, h=15m(쇄파대),
h=22m(비쇄파대)

〈표 9〉 비쇄파대 보정사례 비교(Case NA)

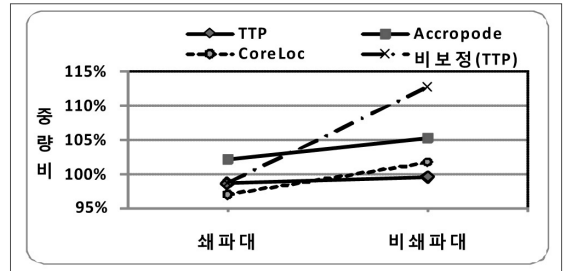
구 분	중량비(M/H)		Meer식		Hudson식	
	쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파
TTP	99%	100%	64.0	56.6	64.9	56.8
Accropode	102%	105%	43.6	38.5	42.7	36.6
CoreLoc	97%	102%	31.1	27.4	32.0	27.0

파장변화율 = 23%

L = 141.7m

비쇄파 보정계수 = 1.042

L' = 174.2m



〈그림 3〉 비쇄파대 보정사례(중량비) 비교(Case NA)

▶ Case NB

: H=6.0m, T=8sec, h=11m(쇄파대), h=15m(비쇄파대)

파장변화율 = 20%

L = 73.4m

비쇄파 보정계수 = 1.038

L' = 88.3m

〈표 10〉 비쇄파대 보정사례 비교(Case NB)

구 분	중량비(M/H)		Meer식		Hudson식	
	쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파
TTP	99%	100%	19.0	16.9	19.2	16.8
Accropode	102%	106%	12.9	11.5	12.7	10.8
CoreLoc	97%	103%	9.2	8.2	9.5	8.0

- 이상의 비쇄파대 보정사례를 분석해 볼 때, 블록종류별 Meer의 보정중량은 Hudson식 대비 최대차인 +6%로서 Hudson 중량과 거의 일치하고 있다. 특히 앞 절의 설계사례에서 검토한 〈표 4〉의 비보정시 최대차인 +19%(Accropode)에 비해 현저한 보정효과를 보임으로써 본 고의 비쇄파대 보완방안에 따른 실현상 근접도 즉, 설계정도가 크게 향상됨을 확인할 수 있다.
- 또한, 동일한 파고계급에서의 주기변화에 따른 비쇄파대 보정사례(TTP)에 대해, 다음의 Case NC의 〈표 11〉을 분석해 보면, Meer의 전개식과 같이 주기가 짧을수록(파형경사가 클수록) 비쇄파 중량은 증가하게 된다. 이는 간편식의

쇄파대(안정계수)를 기준으로 역해석하여 비쇄파 보정율을 적용한 결과로서 실현상의 쇄파대에서 주기가 길수록(파형경사가 작을수록) 파고(소요중량)가 증가하는 쇄파이론과 잘 부합하고 있음을 반증하고 있다 하겠다.

▶ Case NC (TTP)

: H=9.0m, T=8~14sec(기준주기=11sec),
h=22m(비쇄파대)

〈표 11〉 비쇄파대(주기별) 보정사례(Case NC)

구분	Meer식					Hudson식
	8s	10s	11.0s	12s	14s	
비쇄파 보정계수	1,019	1,040	1,042	1,044	1,048	-
중량	60.5	56.9	56.5	56.2	55.6	56.8
중량비(M/H)	106%	100%	99%	99%	98%	

- 나아가, 이러한 Meer 간편식(보정)에 의한 파형특성 반영은 기존의 Hudson식으로는 대응할 수 없었던 피복블록 설계기술의 도약으로서 실무에 요긴하게 활용될 것으로 기대된다. 한편 주기변화에 관한 쇄파/비쇄파대의 구체적인 사례적용과 특성비교는 후술의 파랑수 보정사례에서 고찰토록 하겠다.

ii) 사면구배 보정사례

- Meer식의 임의 사면구배 적용에 관한 쇄파대 조건의 보정사례를 검토하였다. Hudson식을 기준한 블록종류별 구배 보정계수 및 중량산정 결과는 다음의 〈표 12~14〉, 〈그림 4〉와 같으며, 보정 전후의 비교를 위해 〈그림 4〉에 미보정시의 산정결과(TTP)도 제시하였다.

▶ Case S

: H=9.0m, T=11sec, h=15m(쇄파대)

- 사면구배 보정사례인 〈표 12~14〉와 〈그림 4〉를 분석해 볼 때, 블록종류별 보정 중량비

〈표 12〉 블록종류별 상대구배율과 구배 보정계수

구분	표준구배	상대구배율			구배 보정계수		
		1.33	1.5	2.0	1.33	1.5	2.0
TTP	1.5	0.887	1.0	1.333	0.961	1.0	1.101
Accropode	1.33	1.0	1.128	1.504	1.0	1.041	1.146
CoreLoc	1.33	1.0	1.128	1.504	1.0	1.041	1.146

주) Bold체는 블록별 표준구배에 해당함

〈표 13〉 사면구배 보정사례(중량) 비교

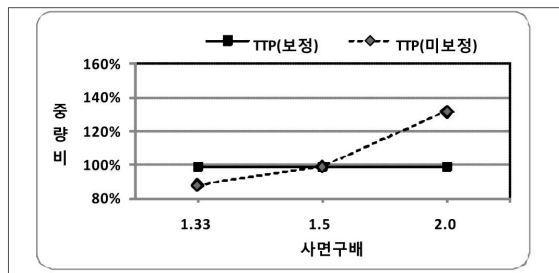
구분	Meer식			Hudson식		
	1.33	1.5	2.0	1.33	1.5	2.0
TTP	72.2	64.0	48.0	73.2	64.9	48.7
Accropode	43.6	38.7	29.0	42.7	37.9	28.4
CoreLoc	31.1	27.5	20.6	32.0	28.4	21.3

주) Bold체는 블록별 표준구배에 해당함(보정전 중량과 동일)

〈표 14〉 사면구배 보정사례(중량비) 비교

구분	중량비(M/M)	중량비(M/H)		
		1.33	1.5	2.0
TTP	99%	99%	99%	99%
Accropode	102%	102%	102%	102%
CoreLoc	97%	97%	97%	97%

주) Bold체는 블록별 표준구배에 해당함



〈그림 4〉 사면구배 보정사례(보정/미보정) 비교

(M/H)는 미보정시의 중량비(M/H)와 일치하고 있으며, 기준구배와 Hudson값에 대한 Meer값의 중량비인 M/M과 M/H가 서로 동일하고 블록별/구배별 각 중량비(M/H)가 일정하게 나타

난다. 이는 Meer식에 대한 사면구배 보완방안이 Hudson식의 구배적용 개념 및 산정결과에 대해 수치해석적으로 정확하게 논리 부합함을 뜻한다.

- 따라서 Meer식의 사면구배 보정산식은 실현상의 구배변화에 합리적으로 대응함은 물론 설계 지침으로서 주요함을 확인할 수 있다.

iii) 파랑수(주기)의 보정사례 (기준구배 적용시)

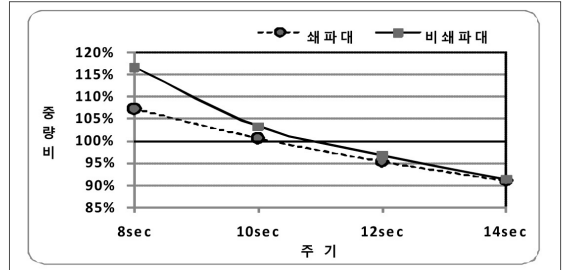
- 일정한 파랑 내습시간과 파고계급별 표준주기에서의 기준파수에 대한 파랑 작용수의 변화에 따라 쇄파/비쇄파대 조건에서의 보정사례(TTP)를 검토하였다. 이 경우 비쇄파대 조건에서는 전 항의 비쇄파 보정계수를 적용하였으며 각 Case별 산정결과는 다음의 <표 15, 16> 및 <그림 5>와 같다.

▶ Case TA

: H=9.0m, T=8~14sec, h=15m(쇄 파 대), h=22m(비쇄파대)
 표준주기 = 11.6s (H=9.0m 적용시)
 쇄파대 : 주기변화율 = 0.924,
 기준주기 = 10.7s
 비쇄파대 : 주기변화율 = 0.953,
 기준주기 = 11.0s

<표 15> 파랑수 보정사례 비교(Case TA)

구분	주기(T)	Meer식					Hudson식
		8s	10s	10.7s	12s	14s	
쇄파대	파수보정계수	0.973	0.994	1.0	1.011	1.027	-
	중량	69.6	65.3	64.0	61.9	59.1	64.9
	중량비(M/H)	107%	101%	99%	95%	91%	
비쇄파대	주기(T)	8s	10s	11.0s	12s	14s	-
	파수보정계수	0.970	0.991	1.0	1.008	1.023	-
	비쇄파보정계수	1.019	1.040	1.042	1.044	1.048	-
	중량	66.2	58.6	56.5	54.9	51.9	56.8
	중량비(M/H)	117%	103%	99%	97%	91%	



<그림 5> 파랑수 보정사례 비교(Case TA)

▶ Case TB

: H=6.0m, T=6~12sec, h=11m(쇄파대), h=15m(비쇄파대)
 표준주기 = 9.5s (H=6.0m 적용시)
 쇄파대 : 주기변화율 = 0.932,
 기준주기 = 8.8s
 비쇄파대 : 주기변화율 = 0.955,
 기준주기 = 9.0s

<표 16> 파랑수 보정사례 비교(Case TB)

구분	주기(T)	Meer식					Hudson식
		6s	8s	8.8s	10s	12s	
쇄파대	파수보정계수	0.964	0.991	1.0	1.012	1.031	-
	중량	21.2	19.5	19.0	18.3	17.3	19.2
	중량비(M/H)	110%	101%	99%	95%	90%	
비쇄파대	주기(T)	6s	8s	9.0s	10s	12s	-
	파수보정계수	0.963	0.989	1.0	1.010	1.028	-
	비쇄파보정계수	1.011	1.039	1.042	1.045	1.050	-
	중량	20.5	17.5	16.7	16.1	15.1	16.8
	중량비(M/H)	122%	104%	99%	96%	90%	

- 파랑수 보정사례인 상기의 표와 그림에서 보듯, 일정한 파고계급에서도 입사주기에 따라 -10%~+10%(쇄파대), -10%~+20%(비쇄파대)의 중량편차를 나타냄으로써, 동일한 내습시간에서도 총 파랑 작용수(누적피해량)에 의한 안정계수(소요중량)의 변화도를 확인할 수 있으며, 쇄파/비쇄파대 조건 또는 그 편차크기에 불문하고 주기변화에 대응할 수 있는 Meer 전개식

(보정)의 활용 필요성을 반증하고 있다.

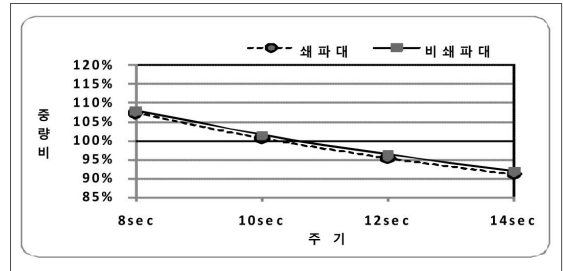
- 특히, 파랑수에 의한 중량보정은 기존의 Hudson식이나 통상의 수리실험⁸⁾으로는 평가 불가능한 통제수단으로서, 주기별 소요중량의 감소/증가 즉, 설계 경제성/안전성에 직결되는 만큼 설계지침으로 요긴하게 활용할 수 있을 것으로 사료된다.
- 한편, 주기별 편차도에 있어 기준주기를 전후하여 누적 편차도는 점중(특히 단주기측)하는 경향을 나타내므로 설계주기/기준주기의 차가 클수록 보정의 필요성은 더욱 커진다 하겠다. 또한 비쇄파대의 경우는 과도한 편차를 보이거나 이는 앞에서 언급한 바와 같이 쇄파/비쇄파간의 파형 특성차(비쇄파 보정계수 반영)에 의한 상대적 결과로서 그 절대량은 쇄파대와 유사하게 됨을 알 수 있으며, 이에 관한 필터링(비쇄파대 보정량 제외시) 결과를 다음 Case T_F의 <표 17>과 <그림 6>에 참고용으로 제시하였다.

- ▶ Case TF (Case NA의 Filtering : 비쇄파대 보정량 제외)
: H=9.0m, T=8~14sec, h=15m(쇄파대),
h=22m(비쇄파대)
주기변화율 및 기준주기는 Case NA와 동일

<표 17> 파랑수 보정(Filtering) 사례(Case T_F)

구 분	Meer 중량비(M/M)				
	8sec	10sec	T _r	12sec	14sec
쇄파대	109%	102%	100%	97%	92%
비쇄파대	110%	103%	100%	98%	93%

8) 수리실험은 피복재의 형상/중량과 한계 안정과고에 대한 정성적 평가수단이므로, 주기변화/지속시간에 따른 피해를 또는 설계안 전술에 관한 정량적인 평가에는 한계가 있음.



<그림 6> 파랑수 보정(Filtering) 사례(Case TF)

iv) 통합보정 사례

- 이상의 설계적용 항목별 보완사례를 전체적으로 살펴볼 수 있는 통합보정 사례(Accropode)에 대해 검토하고 쇄파/비쇄파대 조건에서의 보정 전후의 산정결과를 아래의 <표 18>과 <그림 7>에 비교·제시하였다.

- ▶ Case O (Accropode, N_s=2.5, 사면구배 =1:1.5)
: H=11.0m, T=13sec, h=18m(쇄파대), h=24m(비쇄파대)
① 비쇄파 보정계수(f_n)=1.043 파장변화율 = 24%
② 사면구배 보정계수(f_α)=1.041 상대구배율 = 1.128
③ 파랑수 보정계수(f_N)=1.009 [쇄파대]
=1.007 [비쇄파대]
표준주기 = 12.8s
주기변화율 = 0.915 기준주기 = 11.7s [쇄파대]
주기변화율 = 0.944 기준주기 = 12.1s [비쇄파대]

◎ 통합(보정) 안정계수 산정

$$N_{sc} = N_s \times f_n \times f_\alpha \times f_N \text{ 식(2.19)}$$

$$N_{sc}(\text{쇄파대}) = 2.5 \times 1.0 \times 1.041 \times 1.009 = 2.627$$

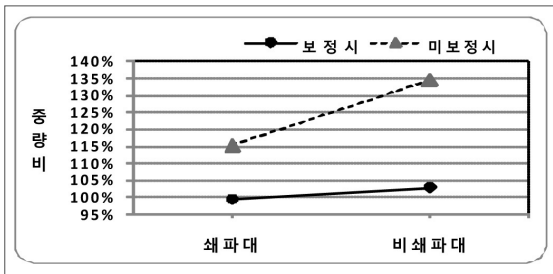
$$N_{sc}(\text{비쇄파대}) = 2.5 \times 1.043 \times 1.041 \times 1.007 = 2.733$$

- 전항의 보완 항목별 보정결과와 같이, Meer의 통합보정 결과 또한 쇄파/비쇄파대에 불문하고 ±3%의 수준에서 Hudson값과 정확하게 일치함으로써 비쇄파대 특성과 사면구배 변화에

〈표 18〉 통합 보정사례 비교(Case O)

구 분	중량비(M/H)		Meer식		Hudson식	
	쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파	쇄파	비쇄파
안정계수 (미보정)	-	-	2,627 (2.5)	2,733 -	12	14
보정 시	99%	103%	68.7	61.0	69.1	59.3
미보정시	115%	134%	79.6	68.3		

주) *Italic*체는 쇄파대 중량을 비쇄파대에 동일하게 적용(참조용)



〈그림 7〉 통합 보정사례(보정/미보정) 비교(Case O)

관한 탁월한 보정효과와 현상대응의 적정성을 확인할 수 있다. 또한 미보정시의 중량(쇄파대)에 비해 -15%의 차인을 보임으로서 Meer 간편식에 대한 보정 필요성을 반증하고 있다.

- 한편, 본 사례의 경우에는 큰 파고계급에 따른 표준/검토 주기가 거의 동일하여 파랑수 보정량(0.9%)과 그 효과가 미미하였으나, 앞서 강조한 바와 같이 파랑수(주기) 변화에 대한 Meer식의 보정(또는 Hudson식의 역보정) 필요성은 변함없다 하겠다.

2) 보완사례 적용 결과

- Meer식의 설계보완을 위한 검토 항목별 사례 적용의 결과와 이에 관한 검증 및 제언 등을 아래와 같이 요약하였다.

i) 비쇄파대 보정에 대해

- Meer의 비쇄파대 보정중량은 Hudson중량과 거의 일치하며 미보정시에 비해 상당한 보정효과를 나타낸다. 또한 주기(T) 변화에 대응할 수 있는 본 보완방안은 천해역의 쇄파이론에 잘 부합하는 보정산식으로 검증되었으며 심해역에도 확장 적용할 수 있다.
- Meer 간편식(보정)에 의한 파형특성 반영은 기존 Hudson식으로는 적용 불가능한 사안으로서, 블록중량 산정에 관한 Design Guidance(Interim)로 제안한다.

ii) 사면구배 보정에 대해

- Meer의 보정중량은 사면구배 변화에 불문하고 미보정시의 Hudson식 대비 중량비와 동일하고 블록종류별, 구배별 중량비가 기준구배시와 정확하게 일치하여, Hudson식과 수치해석적으로 동일한 보정개념임을 확인하였다.
- Meer 간편식(보정)에 의한 구배특성 반영은 Hudson식과 같이 실현상에 대응 가능한 보정산식으로서, 블록중량 산정에 관한 Design Guidance(Interim)로 제안한다.

iii) 파랑수 보정에 대해

- 일정한 파고계급과 동일한 내습시간에 있어서, 주기변화-총 파랑 작용수(누적 피해량)와 소요 중량(안정계수)간의 상대 변화도를 정량적으로 확인하였다.
- 이는 기존의 Hudson식이나 통상의 수리실험으로는 평가 불가하여 Meer 전개식에 내재된 통계수단의 활용 필요성을 반증한다 하겠다. 따라서 Meer 간편식(보정)에 의한 주기특성 반영은 실현상 대응이 가능한 보정산식(또한 Hudson식의 역보정시의 비교산식)으로서, 블록중량 산정에 관한 Design Guidance(Interim)

로 제안한다.

iv) 개념일원화에 대해

- 항목별 보정방안의 선결 요건으로서 피해도와 내습시간, 기준파수에 관한 설계적용 일원화를 위해, 통상의 규준과 허용율의 범위내에서 아래와 같이 Design Guidance(Interim)로 제안코자 한다.

- ▶ 피해도(N_{od}) = 0.5, 안전율(Sf) = 1.5 조건
- ▶ 기준파수(N_r) = 1,000파(표준주기), 내습시간(t)= 3.0hr 조건

- 이상에 따른 Meer 간편식의 보완적용은 본 고의 대상블록인 TTP, Accropode, CoreLoc 및 Cube와 해당 블록별 표준Layer에 대해 준용함을 원칙으로 하며, 주요 검토조건의 변경이나 타 블록의 적용시에는 별도의 수리실험 또는 파랑역학적 논리 등에 근거한 조정·적용을 권고한다.

- ▶ 사면길이에 비례하는 피해도 개념은 실현상 특성과 상충되며, 피해도-안전율의 도입기준이 불명확하여 합리적인 개념 일원화와 통합 기준 설정이 요망된다.
- ▶ 파랑수의 변화에 대응할 수 있는 실무 적용 기준이 없어, 파랑수-주기-내습시간에 관한 개념 일원화와 파랑수(주기) 보정방안이 요망된다.

• 이러한 Meer식의 문제점을 극복하고 Hudson식에 상응하는 비교산식으로서의 활용을 위해, 설계적용 보완방안과 이에 따른 사례분석 및 적용성에 대해 고찰하고 다음과 같이 결과 요약하였다.

1) 비쇄파대 보완방안

아래 산식에 의한 ‘비쇄파대 보정계수’를 산정하여 기정의 안정계수(쇄파대)에 보정 적용하며, 이는 심해역에 대해서도 확장적용 가능하다.

3. 결과 및 제언

3.1 고찰의 결과

- 피복블록의 중량산정(안정계수)에 관한 van der Meer의 간편식이 갖는 설계 적용상의 문제점과 이의 개선방향에 대해 검토하고 다음과 같이 결과 요약하였다.
- ▶ 쇄파대 조건에 한정된 산정식으로서, 천해역에서의 수심-주기-파고의 변화에 따른 파형 특성(쇄파/비쇄파) 대응이 불가하여 비쇄파대 보정방안이 요망된다.
- ▶ 블록종류별 표준구배에 한정된 산정식으로서, 사면구배의 변화에 따른 실현상 대응이 불가하여, Hudson식의 구배적용 개념에 상응하는 사면구배 보정방안이 요망된다.

◎ 비쇄파대 보정계수(f_n)

$$f_n = (S_p/S_p')^{0.2} = (L'/L)^{0.2} \quad \text{식(2.9)}$$

$$L' \text{ (보정파장)} = \max. \{L \times (1 + \Psi_L), L_0\} \quad \text{식(2.10)}$$

◎ 파장변화율(Ψ_L) 산정

$$\Psi_L = 0.0578/S_p^{0.5} \quad \text{식(2.6)}$$

$$N_{sm} = N_s \times f_n$$

2) 사면구배 보완방안

아래의 블록종류별 상대구배율과 산식에 의한 ‘사면구배 보정계수’를 산정하여 기정의 안정계수(표준구배)에 보정 적용하며, 이는 쇄파대~비쇄파대에 적용 가능하다.

◎ 사면구배 보정계수(f_{α})

$$f_{\alpha} = \Psi_{\alpha}^{1/3} \text{ 식(2.13)}$$

◎ 블록종류별 상대구배율(Ψ_{α})과 구배 보정계수(f_{α})

구 분	기준 구배	상대구배율			구배 보정계수		
		1.33	1.5	2.0	1.33	1.5	2.0
TTP/Cube	1.5	0.887	1.0	1.333	0.961	1.0	1.101
Accropode	1.33	1.0	1.128	1.504	1.0	1.041	1.146
CoreLoc	1.33	1.0	1.128	1.504	1.0	1.041	1.146

$$N_{s\alpha} = N_s \times f_{\alpha}$$

3) 파랑수(주기) 보완방안

아래 산식에 의한 표준주기와 주기변화율 및 '파랑수(주기) 보정계수'를 산정하여 기정의 안정계수(기준주기)에 보정 적용하며, 이는 쇄파대~비쇄파대에 적용 가능하다.

◎ 파랑수(주기) 보정계수(f_N)

$$f_N = \{0.47 \times (T_r/T)^{-0.25} + 0.85\} / 1.32 \quad \text{식(2.17)}$$

$$T_r(\text{기준주기}) = T_s \times \Psi_T \quad \text{식(2.18)}$$

◎ 표준주기(T_s)와 주기변화율(Ψ_T) 산정

$$T_s = 3.86 \times H_s^{0.5} \quad \text{식(2.14)}$$

$$\Psi_T = [\tanh(k \cdot h) / \tanh\{k \cdot (h+z)\}]^{0.5} \quad \text{식(2.15)}$$

$$N_{SN} = N_s \times f_N$$

4) 기타 보완 검토

기타의 통제변수와 실험조건에 대한 설계적용 보완방안으로서, 아래와 같이 개념 일원화하고 통합 기준으로 설정하여 보정계수 산정에 우선 적용토록 제안한다.

◎ 피해도(Nod) 적용기준

$$N_{od} = 0.5 \text{ (Failure, } D_r=5\%)$$

안전율(Sf)=1.5 조건에서

◎ 기준파랑수(N_r) 적용기준

$$N_r = 1,000\text{파}$$

파랑내습시간(t)=3.0hr 조건에서

◎ 제체 투수율(P) 적용기준

$$P = 0.4$$

◎ 해저구배(i) 적용기준

$$i = 1/30$$

5) 통합보정 안정계수 산정

이상에 의한 Meer 간편식의 설계적용에, 해당 항목별 각 보정계수의 통합 적용방법은 아래와 같으며, 미해당 항목에 대한 적용값은 1.0으로 한다.

◎ 통합(보정) 안정계수(N_{sc})

$$N_{sc} = N_s \times f_n \times f_{\alpha} \times f_N \text{ 식(2.19)}$$

• 한편, 향후의 연구과제로서,

본 고에서 검토·제안한 보완 항목별 보정계수와 특성율의 적용기준 등과 관련하여, 현장자료의 수집과 수리/수치 실험에 바탕한 실증적 조사·검증(특히 파랑수 보정)이 후속될 필요가 있다.

또한, 피복블록에 관한 설계기준과 시방의 보완·개정에 있어,

▶ 파랑수(주기) 변화에 따른 누적 피해도와 안전율에 대한 설계목표의 정립

▶ 블록의 대형화/다양화에 따른 구조성능

(Fractural failure)과 경제성(Placing Density/Layer)에 관한 시방기준의 강화와 대안도입의 활성화 등

을 위한 조사·연구가 진전되어야 할 것으로 사료된다.

3.2 제언

자연재해가 대형화·다발화되고 시설해역이 고파랑·대심도화 되는 오늘날에 있어, 제체 피복재의 설계 경제성과 검증에 대한 우리 연안·항만 관계자의 책임과 고뇌는 더욱 심화되고 있다.

이에 우리 필자들은 ‘피복블록 산정식의 설계 보완방안’이라는 소고를 빌어 그 책임과 고뇌에 동참코자 하며, 다음의 건의와 제안으로 본 고를 맺고자 한다.

- 기술투자과 지원
피복블록에 관한 Engineering과 R&D의 역량 강화, 국제 학술교류 선도 및 International Design Guidance 확립 등을 위한 정부차원의 체계적이며 지속적인 투자·지원을 건의한다.
- 전문 협업체계 운용
피복블록의 설계·시공·유지보수에 관한 설계목표(안전성/경제성)와 국가기준의 개정 및 설계·시공 기술의 실용화와 진전된 논의 등을 위한 산학연의 협업체계 강화 및 전문가 그룹의 운용을 제안한다.

참고문헌

국토해양부(2005), 항만 및 어항 설계기준 상권, pp.65~pp.66
 국토해양부(2005), 항만 및 어항 설계기준 상권, pp.135
 국토해양부(2005), 항만 및 어항 설계기준 상권, pp.138
 송태관(1995), 방조제 단면설계시 유의사항에 관한 고찰, 농어촌연구원, 농공기술 49, pp.58~64
 J.W. Meer(1999), Design of concrete armour layers, Coastal Structures '99

J.W. Meer(1988), Rock slopes and gravel beaches under wave attack, Delft Hydraulics no. 396
 J.W. Meer(1988), Stability of Cubes, Tetrapods and Accropode, Breakwaters '88 Conference
 Sogreah(1996), Information brochure for Accropode
 USACE(1984), Shore Protection Manual vol. II, pp.7-211
 USACE(1997), Technical guidelines for Core-Loc
 Y. Goda, 이희윤역(2000), 海岸·港湾, 지양사, pp.15~16

저자 약력 오재택

- 1975 ~ 1982 : 부산대학교 공과대학(토목공학) 학사
- 1996 ~ 1998 : 부산대학교 산업대학원(토목공학) 석사
- 1982 ~ 1994 : 동아건설산업(주)
- 1994 ~ 2003 : (주)한국항만기술단
- 2003 ~ 2008 : (주)랜드마크월드와이드
- 2008 ~ 2011 : (주)유신(항만부)
- 2011 ~ 현재 : (주)다산건설턴트(항만부)

저자 약력 윤호권

- 1991 ~ 1994 : 부산공업대학교(토목공학과) 학사
- 2000 ~ 2005 : 부경대학교 산업대학원(해양개발학과) 석사
- 2001 ~ 2004 : 해양수산부(항만국 항만건설과) 시설사무관
- 2004 ~ 2006 : 해양수산부(포항지방해양수산청) 항만공사과장
- 2006 ~ 2009 : 국토해양부(마산지방해양항만청) 항만공사과장
- 2009 ~ 2010 : 국토해양부(울산지방해양항만청) 항만공사과장
- 2010 ~ 현재 : 국토해양부(동해지방해양항만청) 항만공사과장