

항만설계와 해안수리 해석의 최신경향 (上)

유 동 훈 / 아주대학교 교수

1. 글머리에

근해 어로용 선박이 폭풍 해일시에도 안전하게 피항할 수 있는 어항시설의 부족현상은 나날히 심각해지고 있어 기존 어항의 확장이나 신설 어항의 규모 증대는 절실히 요구되는 바이다. 특히 어선의 배수톤수가 클 때 어항의 정박시설은 깊은 수심을 찾아 점차 외해로 멀리 위치하게 되고 기상악화에 따른 폭풍의 영향을 직접적으로 받게 되므로 항만시설과 계류선박의 안전을 보장하기 위하여는 배전의 각별한 설계검토와 철저한 시공이 요구된다.

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있는데, 서해, 남해, 동해의 기상 특성과 해안

수리환경 특성이 판이하게 다르므로 각 항만의 위치에 따라 검토해야 될 중점사항이라고 설계시 사용될 설계기법이나 설계용 수치모형의 종류도 올바르게 취사 선택하여야 될 것이다. 이러한 관점에서 본고는 어항을 포함한 일반 항만설계의 기초 타당성 조사를 위하여 고려해야 될 일반 사항과 해안수리 해석을 위한 최신의 기법들을 소개하고자 한다. 본고에 제시된 수치모형이나 설계기법은 일반적인 사항만을 다루었다.

방파제의 구조 및 기능설계에 있어서나 경제적인 측면에 있어 가장 중요한 요인은 제방고의 결정이며, 이는 천체 조석운동에 의한 조위와, 풍하중, 기압차 등에 의하거나

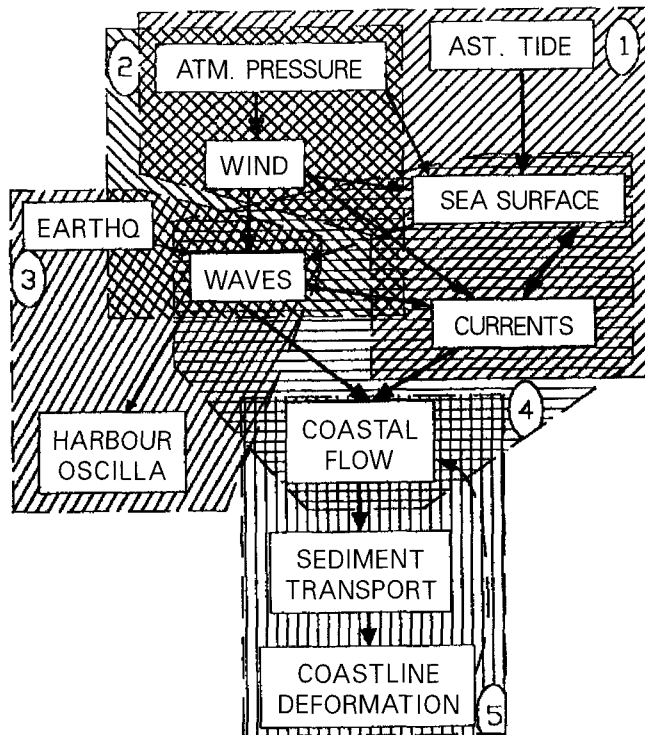
그밖의 불분명한 요인으로부터 작용하는 이상고저차와, 천해파의 쇄파로 발생하는 연안류에 의한 평균해수면의 상승 등의 결합으로 나타난다. 또한 동해 연안에서는 해일에 의한 해수면 상승도 최근에 수회 발생한 기록이 있어 무시할 수 없는 요인이다.

바람 또는 지각의 변동으로서 생성되는 파운동은 어느 해안지역에서나 나타날 수 있으므로 필히 주목해야 할 해양물리인자이다(이상 그림 1 참조). 방파제 단면의 크기 및 사용할 쇄석 또는 콘크리트 블록의 크기를 선정하기 위하여는 방파제 전면에 도달하는 파의 최대치를 산정하여야 한다. 또한 방파제 전면에 도달한 파는 경사면을 따라

포말상승한다 (run-up). 방파제 높이가 낮으면 월류하게 되어(wave over-topping) 방파제 배후면에 매우 강한 파압이 작용할 수 있으므로 월류에 대한 대책도 면밀히 검토하여야 된다. 또한 방파제 전면부의 경사가 크고 표면이 불투수성이며 매끄러우면 상당량의 파에너지가 반사하게 되는데, 이때 반사파는 입사파와 중첩하여 파에너지가 배증하게 된다. 파도는 자체 에너지로서 뿐만아니라 쇄파될 때 발생하는 연안류로서도 연안수리환경에 많은 변화를 가져다 준다. 특히 해안선의 변형은 주로 연안류의 생성 발달과 직접적인 함수관계가 있으므로 이에 대한 이해 및 해석능력 또한 연안수리 환경변화 예측에 없어서는 아니될 필수요건이다. 이상과 같이 방파제 축조에 직접적으로 관련된 주요 1차 수리요인으로는 조석, 바람과 파도이며 2차 수리요인으로는 조석 운동에 의하여 생성되는 조류, 바람에 의한 풍송류, 풍파에 의한 연안류 등이다. 본고는 각각의 수리현상에 대하여 좀더 상세히 기술하며, 이들을 해석 재현 예측하기 위한 기법들을 소개하여 장단점을 살펴보고자 한다.

〈그림 1〉 海岸水理와 數值模型

SCHMATIC DIAGRAM OF COASTAL HYDRAULICS



COMPUTER MODELS

1. TIDE & SURGE MODEL
2. WIND-WAVE FORCASTING MODEL
3. SHALLOW WATER WAVE MODEL
4. WAVE-INDUCED CIRCULATION MODEL
5. SEDIMENT TRANSPORT MODEL

2. 平均 海水位, 潮流 및 風送流

수심은 거의 모든 해양구조

물에서와 같이 방파제 단면의 형상, 종류, 크기 등을 선정하는데 가장 중요한 고려사항일 뿐만아니라 다른 해안수리

조건을 결정하는 데에도 중요한 요인이 된다. 수심을 산정한 후 방파제를 월류하는 월류량 또는 월류발생확률을 산정하며, 이에 따라 방파제 頂部の 높이를 결정한다. 정조위(still water level)와 해저면과의 차를 보통 평균수심으로 취하는데 여기서 정조위라는 것은 평균해수위로서 고주파의 수위승강(high frequency oscillation of surface waves)을 제거하기 위하여 보통 1분 이상의 간격으로 평균한 해수위로 정의한다. 평균해수위의 승강에는 천체의 만류인력에 의한 조석운동(astronomical tides), 태풍시의 이상고저(storm surges), 해저지각 변동에 의하여 발생하는 장주기파 쓰나미(tsunamis) 등이 주요 요인으로 작용하며, 이밖에 파의 잉여응력차에 의한 수위상승(wave set-up)도 무시할 수 없다.

천체운동에 의한 해수위의 조석변화는 1년 이상의 관측자료가 확보된 경우 아주 정확하게 예측 가능하며 자료가 미비하거나 부족한 경우 수치모형실험 또는 수조모형실험을 현장관측과 겸하여 수행하므로써 상당히 정확한 예측이 가능하다. 평균해수위 또는

해류를 재현하기 위한 2차원 수치모형실험의 기본식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} U_i d = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + g \frac{\partial \xi}{\partial x_i} + f_{ij} U_j - \frac{1}{\rho d} \tau_i + \frac{1}{\rho d} \frac{S_{ij}}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho d} Cu |U| U_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \gamma \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \quad (2)$$

여기서 ξ 는 평균해수위, U_i 는 평균해류 유속벡터, 첨자 $i, j = 1, 2$ 또는 x, y , ρ 는 해수의 밀도, g 는 중력가속도, f_{ij} 는 Coriolis 계수, d 는 총수심, Cu 는 유속 U 에 관한 해저면 마찰계수, τ_i 는 바람에 의한 해수면 전단력, ν 는 난류확산계수, S_{ij} 는 파의 잉여응력(radiation stresses)의 각 성분이다. 필요에 따라 몇 개 항들은 포함치 않고 모형을 운용할 수 있는데 조석운동에 의한 조류양상만 파악하고자 하면 해수면 전단력항과 파의 잉여응력항을 제거하여 운용한다. 또한 난류확산은 연안류의 생성 발달에만 큰 영향을 미치며, 조류 또는 풍송류의 분포에는 영향도가 낮으므로 무시할 수 있다.

천해역에서 해저면과의 마찰운동은 조류패턴에 직접적으로 영향을 미치는 가장 중

요한 요인들중의 하나이다. 수치모형실험에서 연구 대상 천해역의 해저면상태를 알면 마찰력에 의한 에너지손실을 이차원수식으로 정확하게 예측할 수 있으나, 일반적으로 해저면 조사는 미비하다. 그러나 마찰손실계수(friction coefficient) Cu 또는 유효조도고(Nikuradse effective roughness height)로서 일정한 범위의 값을 천해역에 똑같이 취하여 상당히 타당성 있는 조류패턴을 재현하여 왔다. 이때 대상 해역내의 한 두지점에서의 단기 관측자료가 있으면 충분한 검증을 확보할 수 있다. 조위와 조류의 계산결과를 관측자료와의 비교에 있어 크기는 동시에 일치시킬 수 있으나 대부분의 경우 약간의 위상차를 갖게 되는데 이는 각 격자의 대표로 취한 수심에서의 파속이 실제 파속의 평균값과 차이를 보임으로써 나타나는 결과이므로 격자 크기를 충분히 작게 하지 않는한 완전히 제거할 수는 없으리라 본다. 반면에 수조모형실험은 축척의 왜곡이 있어 실제의 마찰손실과 많은 차이를 갖는다. 수직축척이 수평축척보다 큰 경우 수조에서의 粗度는 실제의 조도보다 훨씬 커야되는데 이의

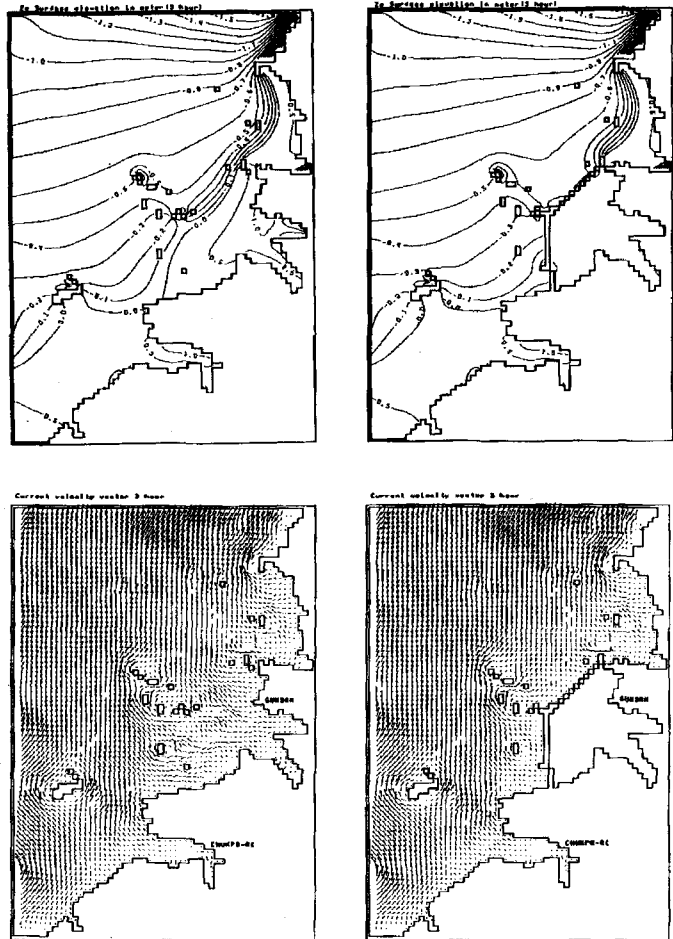
판정은 여러 지점에서의 조위 관측자료와의 비교로서 결정하며 가능하면 조류의 크기도 동시에 일치시키도록 수치조정이 필요하다.

지배방정식 (1)과 (2)의 해를 구하는 수치해석방법은 유한요소법(finite element method)과 유한차분법(finite difference method)이 있는데, 유한요소법은 이형격자 사용의 이점이 있으나 과도한 저장용량과 계산시간을 요구하기 때문에 일반적으로 유한차분법이 많이 사용되고 있다. 유한차분법에도 양해법(explicit method)과 음해법(implicit method) 두 종류의 방법이 있으며, 두 방법은 서로 상반되는 장단점이 있어 지역 여건에 따라 이점을 달리 하나 대개는 어느 방법을 취하여도 큰 문제점이 조석수리를 해석할 수 있으리라 본다. 양해법에 의한 조석수리 해석은 국내 서해안의 많은 지역에 적용된 바 있으며 특히 격자 크기가 다른 여러 개의 격자군을 조합하여 계산효율을 증진시키고자 하는 노력이 경주되어 왔다. 그러나 격자군간의 경계면에서 수위와 유속을 산정함에 있어 질량보존의 법칙을 충분히 만족시키기 어렵기때문에 천해

역 적용이 곤란하였다. 최근 왜곡된 질량을 분산계수(dispersion coefficient)의 도입으로 확산시킴과 동시에 경계면에서의 변수산정에 조간대의 침수와 노출조건을 충분히 반영함으로써 천해역 적용을 실현한 바 있다. 음해법을 사용하는 방법에 있어서는

각 방향 비례적으로 축소 확대되는 격자망을 구성하여 계산효율을 증진시키고 있으며 이러한 방법도 국내에 많이 적용되어 왔다. 양해법중 ADE법으로 국내 새만금해역에서 방조제 구축 전후의 조류양상을 재현한 계산예가 그림 2에 예시되어 있다.

(그림 2) 조석 및 조류 해석 계산예 (새만금해역의 경우)



이상고저는 대개 대규모의 대기압강하와 이에 따른 강풍과 밀접한 관계가 있으며 파도에 의한 수위상승이 이차적인 기여를 한다. 수조 상에 바람과 대기압조건의 재현이 어려워서 이차원 평면 수조에서 이의 재현은 거의 불가능하며 수치모형실험만이 재현 가능한 수단으로 인식되고 있다. 적절한 경계조건, 바람과 대기압 자료를 이차원 수치모형에 입력하여 상당히 정확하게 수위상승을 예측할 수 있으며 삼차원 수치모형을 이용하면 해류의 수직분포까지 예측 가능하다. 해수위의 장주기 변화는 이밖에 온도변화에 따른 해수 체적의 증감, 대기압의 장주기 변화, 지각의 승강, 대기온도의 상승에 따른 빙하의 해빙 등에 의하여 나타날 수 있는데 전세계적으로 1930년부터 1980년까지 년평균 2.3mm 정도 해수위가 높아지고 있다고 발표된 바 있다. 해수위의 상승률은 근년에 더욱 촉진되고 있으며 미국의 서해안, 영국의 동해안 등에서 이의 피해가 뚜렷이 나타나고 있는데 국내에도 이에 대한 연구가 절실히 요구된다.

최고수위의 예측은 통계학적인 관점에서 고려할 수 있

으며 여러가지 다른 자료분석 방법이 있다. 우선 조위까지를 포함한 연최고수위를 극치분포로 가정하여 정해진 설계재현기간에 해당하는 최고수위를 예측하는 방법이 있다. 이러한 극치분포는 지역 특성에 따른 경향을 뚜렷이 보이지는 않기 때문에 멀리 떨어진 해역에 대하여 예측한 값으로부터 추산하여 최고수위치를 결정하기는 곤란하다. 관측된 수위에서 예측한 조석수위를 뺀 잔여치(surge residuals)만을 통계자료로 처리하여 최고수위를 추정할 수도 있는데, 주의할 점은 조석차가 클 때는 큰 잔여치가 만조시에 나타나는 경우가 드물다는 점이다. 따라서 보다 정확한 값을 추정하기 위하여는 조석수위와 잔여치와의 상관분포도(joint probability)를 구하여 단순가감에서 나오기 쉬운 오차를 줄일 수 있다.

3. 深海 設計波의 推定

해안의 파랑을 예측하기 위해서는 연안 지상에서 관측된 풍속자료와 기압자료로부터 설계해상의 조건을 추정하는 방식을 취한다. 1980년대 이후 항만청, 농림수산부 등에

서 수행한 연구의 결과는 우리나라의 서, 남해에서 연안 지상측후소의 바람관측자료 및 태풍시의 천기도 기압기록으로부터 해역별로 설계 심해파랑을 결정하는 체계가 결정되었다. 국내 해안의 설계파랑은 주로 계절풍의 지배를 받으며 연안 지상풍속을 해상풍속으로 변환하고 지역별로 결정된 취송역을 심해파랑 예측모델에 적용함으로써 재현기간별 설계파랑을 결정한다.

풍파예측경험식은 최근에 개발되어 널리 이용되고 있는 수치모형에 비하여 정밀도가 훨씬 떨어지나 미래에 발생가능한 바람 및 기타 해양조건에 대한 예측이 매우 불확실하기 때문에 여러 해양 및 해안구조물의 설계에는 보다 정밀한 풍파예측 수치모형을 이용해야만 할 필요성을 느끼지 못하고 있다. 따라서 앞으로 상당 기간 미래에도 거의 모든 나라에서 설계파의 추정에는 주로 풍파예측경험식을 이용할 것이다.

해상풍에 의한 파랑의 발달을 다룬 모델은 1940년대 이후 실측파랑및 기상자료로부터 이론에 기초한 경험식이 제시되었다. 이러한 경험식들은 실제의 불규칙한 해면상태를 유의파로 대표하여 유의파

의 파고 및 주기를 풍속, 취송 거리 및 취송시간의 함수로 나타낸 것이다. 널리 쓰이고 있는 심해에서의 모델은 SMB법과 Wilson법이 있으며 일정한 바람이 연속적으로 불어오는 안정된 정상상태에서는 SMB법이, 그리고 풍역이 시간적 공간적으로 변화가 큰 경우에는 Wilson법이 적용되고 있다.

설계파로 고려되는 풍파는 중력파로 구분되는 것들이기 때문에 풍속 U 와 중력 g 로 결정되는 다음과 같은 무차원 수로서 풍파에측경험식을 도출하여 왔다. 즉,

$$W = \frac{gH}{U^2}; S = \frac{gT}{U};$$

$$L = \frac{gF}{U^2}; M = \frac{gt}{U}$$

여기서 H 는 유의파고, T 는 유의파의 주기, F 는 취송 거리, t 는 취송시간이다. 무차원수 W, S, L 및 M 은 각각 유의파고수, 유의파 주기수, 취송거리수 및 취송시간 수라 칭한다.

SMB법은 1947년 최초 Svedrup과 Munk가 파랑의 에너지 방정식을 기초로 제안한 이론식을 Bretschneider, Wilson 등이 1970년까지 실측자료에 맞게 수차에 걸쳐

수정 보완하여 경험식을 발표하였다. 초기 SMB법 산정식은 각 관계식을 단순한 지수 함수적 선형관계식으로 도출하였으며 다음과 같다.

$$W = 0.0016L^{1/2} \quad (3)$$

$$S = 0.286L^{1/3} \quad (4)$$

$$M = 68.8L^{2/3} \quad (5)$$

여기서 S 는 유의파의 주기를 이용한 무차원수가 아니며 대신 파랑의 첨두스펙트럼에 해당하는 주기를 이용한 무차원수이다. 또한 각 무차원수에 도입된 풍속은 조정된 해상풍속이다.

우리나라 서해안의 파랑에측을 위하여 식 (3)과 (4)를 관측자료에 적용하여 수치조정을 취하였는데, 이때 식 (3)에 적용된 수치는 고정된 후 이에 적합한 취송거리를 도출하고 동일한 취송거리를 적용하여 식 (4)의 비례상수를 0.238로 조정하여 제시하였다. 그러나 상기 선형적 지수함수식은 그림 3에 도시된 바와 같이 취송거리수 L 이 클 때 (10,000 이상), 몹시 과대 산정하고 있으며, 천해조건을 전혀 고려하지 않았기 때문에 이중으로 과대 산정의 우려가 있다. 따라서 상기 식 (3)으로 결정한 취송거리를 이용하

여 식 (4)의 조정된 비례상수 0.238은 신뢰하기 어려운 수치로 여겨진다.

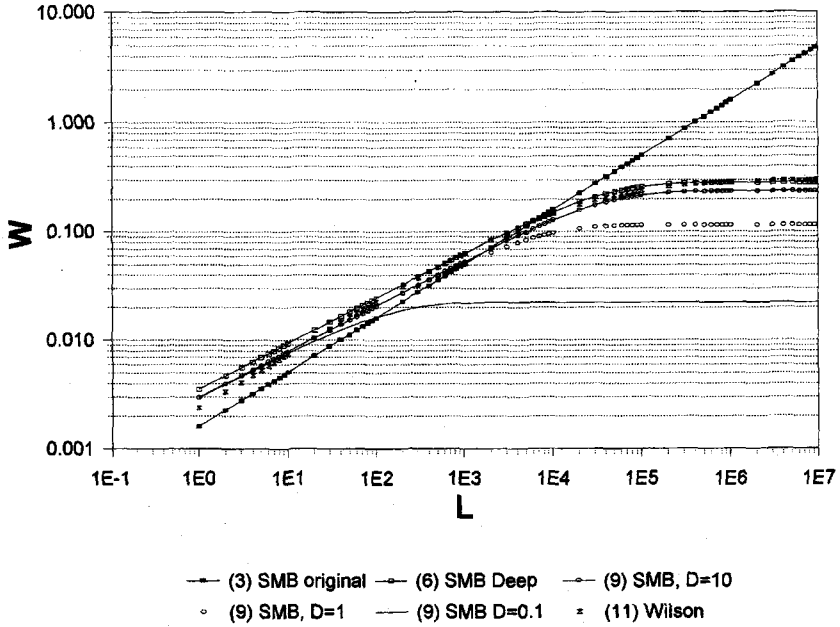
취송역은 다음과 같은 과정을 거쳐 계산을 실시하였다. 처음 F 를 가정하고 파랑 관측 시간 전의 10-20시간의 풍속 중 가장 큰 풍속을 취한다. 풍속은 한시간의 평균풍속이므로 통상 설계풍속으로 택하는 최대 10분 풍속으로 환산하기 위하여 $U_{10/60}$ 의 비 1.057를 곱한 후 이 값에 해당하는 UW/UL 의 값을 구하여 곱함으로써 해상풍속 U_{WM} 을 구한다. 가정한 취송거리 F 와 U_{WM} 의 조정풍속 U_{AM} 을 위의 식에 대입하여 취송시간 t 을 구한다. 다음 취송시간 동안의 평균풍속 U_t 를 구하고 UW/UL 을 곱하여 해상 풍속으로 한다. 이 U_t 의 조정풍속 U_A 와 가정한 F 값으로부터 식 (3)을 적용한다. 계산된 H 가 실측치와 같아질 때까지 F 를 재가정하여 계산을 반복하고 두 값이 같아졌을 때 F 와 U_A 으로 식 (3)과 (4)를 이용하여 T 를 계산한다.

이후 관계식의 상수항은 많은 관측자료에 의하여 조정되어 왔다. 다음은 Shore Protection Manual (U.S Army)에 제시된 식이다.

〈그림 3〉 취송거리수 L 에 대한 유의파고수 W 와 유의파주기수 S 의 변이

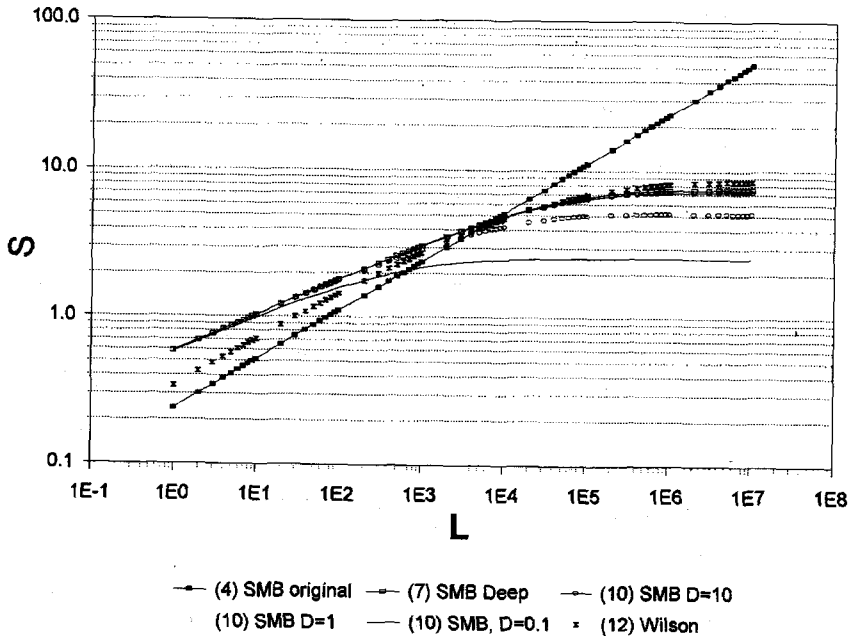
(가) W 의 변이

L 에 따른 W 의 변화



(나) S 의 변이

L 에 따른 S 의 변화



가. 심해파의 경우

$$W = 0.283 \tanh(0.0125L^{0.42}) \quad (6)$$

$$S = 7.54 \tanh(0.077L^{0.25}) \quad (7)$$

$$M = 6.59 \exp\left\{[(0.016 \ln L)^2 - 0.37 \ln L + 2.2]^{1/2} + 0.88 \ln L\right\} \quad (8)$$

나. 천해파의 경우

일반적으로 천해에서의 파랑발생은 해저면의 영향을 많이 받게된다. 해상의 파랑운동이 해저면까지 영향을 미치게되어 해저마찰에 의한 파랑에너지의 감소와 해저지형의 변화에 따른 굴절 및 천수효과가 나타나므로 심해파의 경우보다 훨씬 복잡한 양상을 띠게 된다. 천해 풍파예측을 위하여는 평균수심 d를 도입한 무차원수

$$D = \frac{gd}{U^2}$$

을 이용하였는데 파고와 주기를 예측하는 산정식은 각각 다음과 같이 수정된다.

$$W = 0.283 X \tanh(0.0125L^{0.42} X^{-1}) \quad (9)$$

$$S = 7.54 \tanh(0.077L^{0.25} Y^{-1}) \quad (10)$$

여기서

$$X = \tanh(0.53D^{0.75})$$

$$; Y = \tanh(0.833D^{0.375})$$

태풍등이 빠른 속도로 접근하는 경우, 풍역 자체가 이동할 뿐 아니라 동일풍역내에서도 시간과 장소에 따라 풍속 및 풍향의 변화가 심하기 때문에 일정한 풍역을 대상으로 하는 SMB법을 이용한 파랑의 추정은 부정확하다. Wilson은 파랑이 발달하면서 진행되는 과정을 추적하여 파고와 주기의 변화를 구하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 일정한 풍속 U에 의한 취송거리 F에 대하여 유의파고 H 및 파속 C 또는 유의파의 주기 T에 관한 경험식으로 다음과 같이 표현된다.

$$W = 0.3[1 - (1 + 0.004L^{1/2})^{-2}] \quad (11)$$

$$S = 8.6[1 - (1 + 0.008L^{1/3})^{-5}] \quad (12)$$

이상의 경험식들은 형식이 상당히 달리 표현되지만 실제로 산정된 결과는 유사한 경향을 보이고 있다. 그림 3에는 각 산정식으로 구한 결과

가 서로 비교되어 있다. 비교된 바와 같이 취송거리수 L이 클 때 식 (3)과 (4)는 과대 산정하는 경향을 뚜렷하게 보이고 있다. 반면에 수정된 SMB식이나 Wilson식은 거의 유사한 경향을 보이고 있는데 L이 계속적으로 커져도 증가율이 점차 감소하여 어느 일정치로 수렴하는 경향을 보이고 있다. 이는 취송거리가 길고 취송시간이 무한정 커지더라도 백 파현상(white capping) 등에 의한 에너지 손실이 바람에 의한 에너지인입과 평형조건(saturation)에 이르기 때문인 것으로 파악된다. 또한 Wilson법은 파랑이 발달하면서 진행되는 경우에 적용하는 것으로 알려져 있으나 실제로 L이 클 때는 Wilson식의 산정결과나 SMB식 산정결과가 거의 유사하다. 즉, L이 큰 경우에는 파랑이 이미 충분히 발달한 상태이기 때문에 일치하는 결과가 도출된 것으로 보인다. 단지 L이 작을 때 두 산정식은 상당한 차이점을 보이고 있는데, 이러한 차이가 발달과정의 파랑조건과 충분히 발달한 상태의 파랑조건에 차이로 판단할 수 있을 것이다. ◻

<다음호에 계속>