Green함수법을 이용한 불규칙파 해석

Analysis of Irregular Waves Using Green-Function Method

○ 채지덕*, 곽문수**, 편종근***

1. 서론

매년 증가하는 경제규모와 그로인한 화물의 운송량이 늘어남에 따라 항만시설의 신축, 증설사업이 활발해지고 있으며 또한, 인구의 증가와 더불어 국토를 확장하고 그 효율을 높이기 위하여 해안을 매립하거나 방조제를 축조하여 간척지를 조성하는 사업이 추진되고 있다. 이러한 사업추진에 필요한 해안 및 해상구조물의 설계에 있어서 무엇보다 중요한 것은 설계파를 결정하고 그 특성을 정확하게 파악하는 것이다. 지금까지 해안구조물의 설계에 사용해 온 유의파는 규칙파의 성질을 가지는 것으로 간주하여 미소진폭파의 이론을 적용해 왔다. 그렇지만 실제 바다에서 발생하는 파랑은 파고, 주기, 파장이 서로 다른 여러개의 성분파로 이루어져 있는 불규칙파이다. 규칙파와 불규칙파는 파고와 주기가 같다 하더라도 이들 파가 구조물에 작용할 때 나타나는 파력이나 천해역에서의 파랑변형은 전혀 다르게 나타나는 경우가 많다. 그러나, 지금까지의 항만구조물 주변에 대한 파랑장 해석은 주로 규칙파를 대상으로 하여 실시해 왔으며 그로인해 실제의 자연현상보다는 약간 과대하게 평가되는 경향이 있다.

따라서, 본 연구에서는 관심 대상지역에 입사하는 대표주기와 대표파향을 주파수 스펙트럼의 면적을 등분할하는 조건하에 에너지 비율에 따라 여러개의 성분파로 분리하고, 개개의 성분파에 대해서 규칙파 계산을 수행한 후 각 계산결과를 에너지 중첩하는 방법으로 불규칙파의 특성을 고려한 파랑장해석을 하여 근사적인 방법이지만 실제 파랑현상에 보다 근접한 결과를 얻고자 시도해 보았다. 계산에 사용된 모형은 계산의 경제성을 고려하여 Green함수법을 사용하였으며, 실제의 항만을 대상으로 하여 대표주기와 대표파향에 대한 단일 규칙파계산과 주파수 및 방향분할에 의한 성분파 계산을 실시하고 양자의 계산결과를 토대로 물리적 특징을 고찰해 보았다.

2. 주파수 및 방향별 에너지의 성분파 분포법

실제 바다의 불규칙한 파랑은 무수히 많은 주파수와 파향의 성분파가 중첩되어 있으며, 이러한 성분파의 에너지 분포를 주파수와 방향에 대하여 표시한 것을 파 스펙트럼(wave spectrum)이라 부른다. 보다 엄밀히 말하자면 방향별로 에너지의 분포를 고려하지 않고 주파수에 대한 분포만을

---

* 명지대학교 토목공학과 석사과정
** 명지전문대학 토목과 조교수
*** 명지대학교 SOC공학부 교수

구한 것을 주파수 스펙트럼(frequency spectrum)이라 하고, 방향과 주파수 둘 다 고려한 것을 식 (1)과 같이 표시한 방향 스펙트럼(directional wave spectrum)이라 부르며 이것은 파의 에너지가 주파수만이 아니고 방향에 대하여도 어떻게 분포하고 있는가를 나타낸다.

$$S(f,\ \theta) = S(f)\ D(f,\ \theta) \tag{1}$$

$S(f)$ = 주파수 스펙트럼

$D(f,\ \theta)$ = 방향분포함수

방향별 에너지의 분포상태를 나타내는 방향분포함수는 주파수마다 다른 것이 보통이므로 주파수 변수 f를 포함하고 있다. 이러한 방향별 에너지 분포는 현지관측에 어려움이 많아 불충분한 정보밖에 얻을 수 없어서 주파수 스펙트럼과 대조적으로 방향별 스펙트럼에 대한 표준함수형을 정하는 것은 아직 곤란하다. 현재 가장 많이 이용되는 것은 Mitsuyasu등이 여러 기존자료와 현지관측결과를 근거로 제안한 방향함수식이다. Mitsuyasu등의 방향함수는 방향별 에너지의 집중도를 나타내는 변수 s를 사용하는데 특징이 있으며 주파수 스펙트럼의 극대인 부근에서 s가 최대이고, 그 점에서 멀어짐에 따라 s가 감소하는 형태을 가지고 있다.

파의 주파수 스펙트럼은 관심 대상해역의 현지관측 및 분석을 통하여 주파수 스펙트럼 밀도함수로 표시하여 주파수별 에너지 분포를 나타내고 있다. 주파수 스펙트럼에 대해서는 세계 각지에서 많은 파랑기록이 분석되어 여러 가지의 표준형이 제안되어 있다. 이들 중 풍파의 스펙트럼은 근사적으로

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \exp[-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}] \tag{2}$$

와 같이 표시될 수 있으며, 이 식은 Bretschneider의 제안식을 Mitsuyasu가 계수를 수정하여 제시한 식이다. 본 연구에서는 주파수 스펙트럼으로 식 (2)를 이용하였으며, 주파수의 범위를 각 주파수 간격 속에서 파 에너지가 동일하도록 분할하고 각 구간의 면적을 2등분하는 주파수로 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$f_i = \frac{1}{0.9\,T_{1/3}} \left[\frac{0.675}{\ln\{2M/(2i-1)\}} \right]^{1/4} = \frac{1.007}{T_{1/3}} \left[\ln\{2M/(2i-1)\} \right]^{-\frac{1}{4}} \tag{3}$$

$T_{1/3}$ = 유의파 주기

M = 주파수 성분의 총수

i = 주파수 성분의 순번

이와 같은 경우에 파 에너지의 방향분포가 주파수에 따라 다르지 않다고 가정하면 주파수 및 방향별 각 성분파의 에너지 비율은 다음과 같이 근사적으로 표시할 수 있다.

$$(\triangle E)_{ij} = \frac{1}{M} D_j \tag{4}$$

$(\triangle E)_{ij}$ = 각 성분파의 에너지 비율

D_j = 방향별 에너지 비율

j = 방향 성분의 순번

이때 방향별 에너지비 D_j 값은 방향을 16방위나 8방위로 표시하는 경우에 표 1의 값을 사용한다. 대상지점의 지형적 조건 때문에 성분파의 방향범위가 $\pm 90°$ 보다 작다면, D_j 값은 방향의 범위내에서 전체의 합이 1이 되도록 선형적으로 증가되어야 한다.

파고가 Rayleigh 분포에 따른다면 대표파고와 파형의 자승평균평방근 η_{rms} 사이에는 다음과 같이 일정한 통계적 관계가 성립한다.

$$H_s \fallingdotseq 4.0\,\eta_{rms} \fallingdotseq 4.0\sqrt{m_0} \fallingdotseq 4.0\sqrt{E} \tag{5}$$

$$m_0 = \int_0^{\infty} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} S(f,\ \theta)\ d\theta\, df$$

주파수 및 방향별로 분할된 각 성분파의 계산이 종료되면 임의의 위치에서의 파고는 에너지중첩을 하여 다음과 같이 유의파고 H_s를 계산한다.

$$H_s^2 = 2\Sigma H_{ij}^2 \tag{6}$$

따라서 계산에 필요한 각 성분파의 입사파고 H_{ij}는 식(5)의 관계를 이용하면, $\Sigma S(f)\ df = E = H_S^2/16$ 이므로

$$H_{ij} = 2a_{ij} = \sqrt{8S(f)D(\theta)\triangle f \triangle \theta} \tag{7}$$

$$H_{ij} = \sqrt{8 \times \frac{Hs^2}{16} D(\theta) \triangle \theta} = \sqrt{\frac{Hs^2}{2} \cdot D(\theta) \triangle \theta} \tag{8}$$

H_{ij} = 각 성분파의 입사파고

H_s = 유의파고

임을 알 수 있다. 그러므로 주파수 및 방향별 에너지 비율을 고려하면 입사파고는

$$H_{ij} = \sqrt{\frac{H_s^2}{2} \times (\triangle E)_{ij}} \tag{9}$$

로 주어진다.

표 1 성분파의 방향별 에너지 비

성분파의 방향	16 방위분할 S_{max}			8 방위분할 S_{max}		
	10	25	75	10	25	75
67.5 °	0.05	0.02	0	-	-	-
45.0 °	0.11	0.06	0.02	0.26	0.17	0.06
22.5 °	0.21	0.23	0.18	-	-	-
0 °	0.26	0.38	0.60	0.48	0.66	0.88
-22.5 °	0.21	0.23	0.18	-	-	-
-45.0 °	0.11	0.06	0.02	0.26	0.17	0.06
-67.5 °	0.05	0.02	0	-	-	-
계	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

3. 수치실험

수치실험의 대상지역은 울산광역시에 위치한 온산 신항만 해역이며(그림 1), 항내의 수심변화가 완만하고 계산영역이 방대한 점을 감안하여 계산시간이 경제적이고 구조물에 의한 회절과 다중반사의 해석에 탁월한 Green함수모형을 사용하였다. 반무한 영역의 Green함수해를 사용하는 수치모형의 특성상 계산영역을 다수의 凸영역으로 구분하였으며, 각 주변경계를 $L/2$ 정도의 작은 요소로 분할하고 요소의 중앙점에 파원을 배치하였다. 구조물의 반사특성을 계산에 적절히 반영하기 위해서 직립벽의 경우 0.9, 소파블럭은 0.5, 자연해안은 0.2의 반사율을 적용하였다. 계산 Case는 현재상태의 온산항 (Case 1)과 신항만 건설시 (Case 2)의 두가지 경우이다. 계산에 사용된 심해파의 파랑제원은 파고 4.8m, 주기 8.0초, 파향 E방향이며, 불규칙 파랑장 해석을 위하여 주파수는 식 (3)을 이용하여 3성분으로 분할하였고, 방향은 0° 및 ±22.5° 의 3성분으로 분할하여 총 3×3=9개의 성분파를 구성하였다. 9개의 성분파에 대하여 수치계산이 완료되면 임의의 위치에서의 유의파는 식 (6)을 사용하여 에너지 중첩에 의해서 구하여진다. 단일 규칙파 계산과 9개의 성분파의 합성에 의한 불규칙파의 계산결과는 등파고선도로 표시하여 그림 3~6에 나타내었으며, 양자를 비교검토하기 위하여 항내를 그림 2와 같이 구역 구분하였다.

4. 결론

온산항의 현재상태를 나타내는 Case 1의 계산결과를 검토해보면 규칙파 계산의 경우는 단일방향에 에너지가 집중되므로 항입구로부터 노출되어 있는 D, E구역의 파고가 높게 나타나며 양측 방파제의 차폐영역에 해당하는 A, B, G, F구역은 낮게 나타난다. 이에 반하여 주파수 및 방향분할에 의한 계산결과를 검토해보면 단일 규칙파의 결과보다 D, E구역에서는 낮은 파고분포를 보이며 방파제 후면의 A, B, G, F의 구역에는 높게 나타난다. 이러한 결과는 다방향으로 에너지가 분산된 결과로 결국 항내파고의 평활화를 가져온다. 신항만 건설시의 Case 2의 결과는 외해측에 축조된 방파제의 영향으로 항입구가 차폐되어 D, E구역에서는 양자의 결과에 뚜렷한 차이를 보이지 않으나 A, G구역에서의 파고는 방향별 에너지분산에 의하여 성분파의 계산결과가 크게 나타나고 있다. 이러한 결과를 종합하여 보면 에너지비에 의하여 주파수 및 방향분할된 각 성분파의 중첩에 의해서도 실제해역에서 볼 수 있는 다방향 불규칙파의 특성을 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

참고문헌

Barailler, L. and P. Gaillard (1967). "Évolution récente des modèles mathématoques d'agitation due à la houle : Calcul de la diffraction en profondeur nonuniforme", La Houille Blanche., Vol. 22, No. 8, pp.861-869.

Goda, Y. (1985). "Random Seas and Design of Maritime Structures", University of Tokyo press

곽문수, 편종근 (1999). "GREEN함수법에 의한 회절파해석", 대한토목학회 논문집, 제 19권 제 II-4호, pp.493-499.

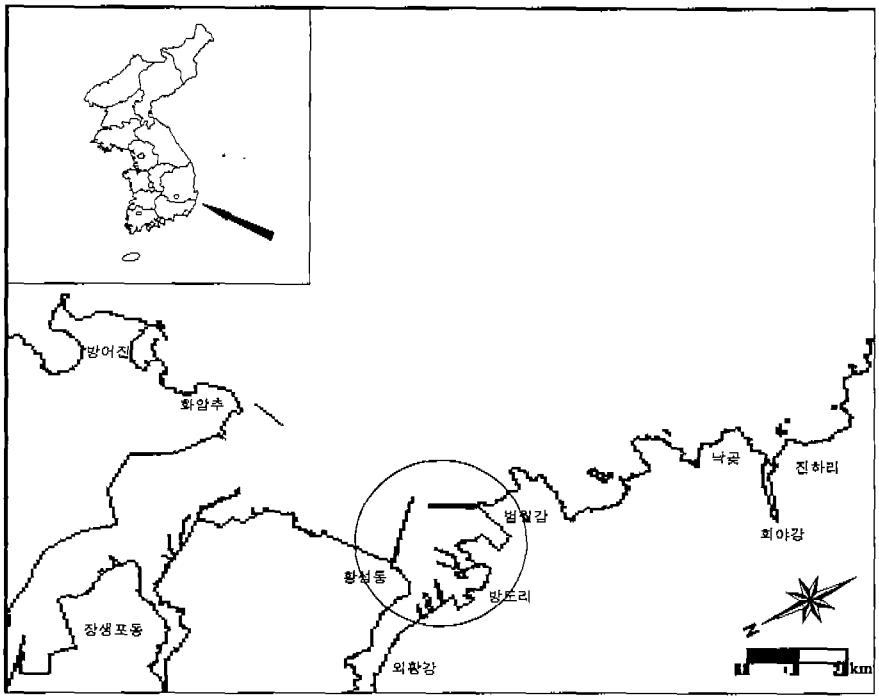

그림 1 온산항의 위치 및 주변해역

그림 2 항내 파고산정 구역도

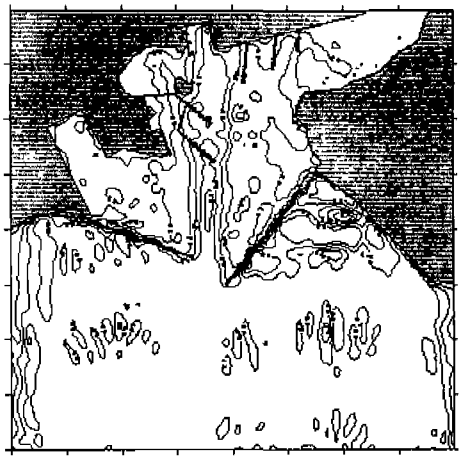

그림 3 CASE 1의 규칙파 계산결과

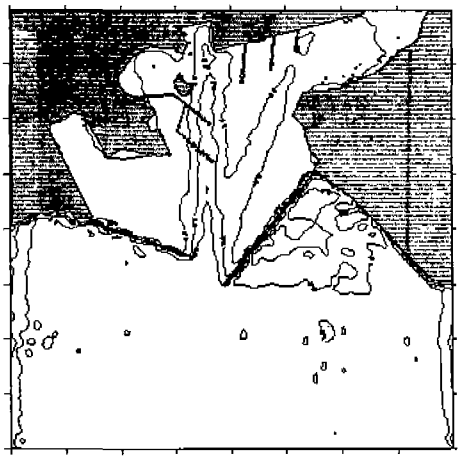

그림 4 CASE 1의 불규칙파 계산결과

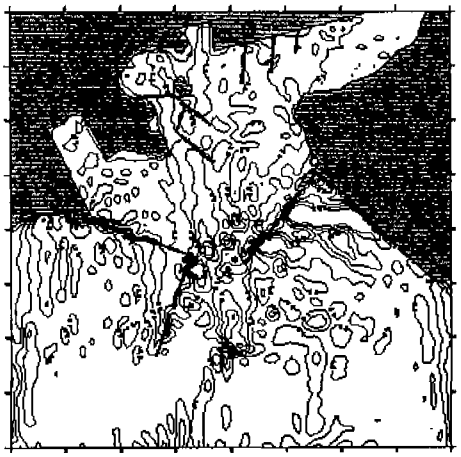

그림 5 CASE 2의 규칙파 계산결과

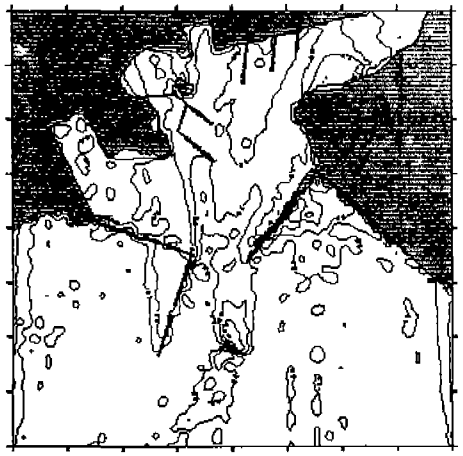

그림 6 CASE 2의 불규칙파 계산결과

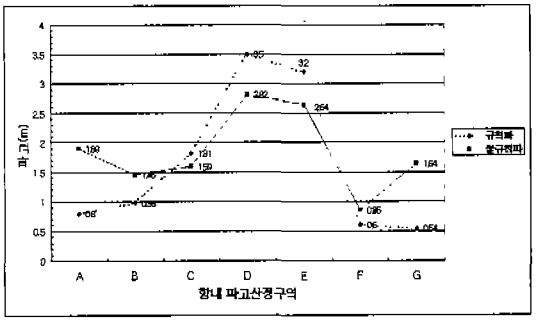

그림 7 CASE 1의 구역별 파고분포

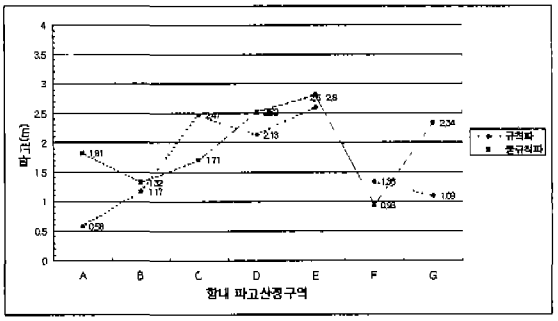

그림 8 CASE 2의 구역별 파고분포