



多様하고 複雑한

# 바다의 물결

崔 榮 博 <高麗大教授 工·博>

## ▷ 파랑의 종류와 생성

육지와 바다의 경계인 해안은 선적인 것으로서 파악하기 보다는 면 혹은 공간적으로 취급해야 한다고 본다.

인류 탄생이후 약 5억년간에 육상을 생활의 터전으로 한 우리선인들은 이 해안을 매개로 해서 바다와 밀접한 관계를 유지하여 왔다. 이것은 낭만적인 시와 같은 우아함을 가진 반면

에 냉혹한 자연의 맹위를 떨치며 우리들에게 위협감을 품게 하는 터전이기도 하다.

우리나라 남한국토총면적 99,000km<sup>2</sup>에는 총연장 13,200km(육지부 5,700km, 도서부 7,500km)에 미치는 해안선이 있으며 해마다 높은 파랑, 고조(高潮)해일의 내습을 받는 위협에 내 맡긴 채 이어왔다.

이와같은 입지조건에서 연안의 토지이용을 고도화하고 연안 각종 항만등의 각 시설 축

조에 의해 그 부가가치를 높이고 해안의 보전 및 방재가 더욱 중요한 과제로 되고 있는 것은 당연하다.

우리들은 해안에 서서 망망한 해면을 바라보면 수초(sec)의 주기를 가지고 파랑이 끊임없이 밀려오는 것을 볼 수 있다. 사실 파랑은 해면에 연해져 이동하는 기복(起伏)이다.

수시간 경과해서 다시 해안에서 보면 물가선(汀線)의 평균적인 위치가 앞에서 본 것에 비해 후퇴 또는 전진해가고 있는 것을 깨닫는다. 이는 평균해면이 상승·하강한 까닭에 생긴 것이며 이는 주로 조석에 기인한 것이다. 그외에 해면이 여러 각종 요인에 의해 생긴 파랑이 존재하고 있는 것도 알게 된다.

해안에서 우리들이 보는 파랑은 밀려 왔다가는 빠지고 끌어 들이다가는 밀려오는 운동을 반복하고 있다. 또한 우리들이 바다의 물결(波濤)이라고 말할 때 회상하는 것은 아래·위 방향으로 올라가다 내려가는 해수의 운동이 아닐 것인가?

해수는 매우 복잡한 운동을 하고 있는데 그중에서 반복운동 또는 이것에 가까운 것은 보통 물결 즉, 파랑(앞으로 파라하면 이의 약자임)이라고 부른다. 평상시, 해안으로 밀려오는 파랑은 바람이 그 원인으로 일어나고 있는 풍파이다. 풍파는 가장 많이 알려진 것이나 동시에 가장 변화가 많다.

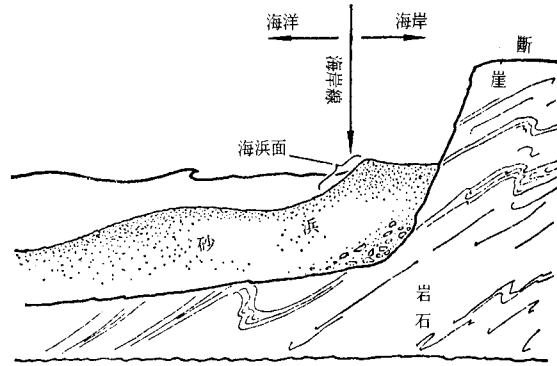


그림-1 海岸·海岸線·海浜

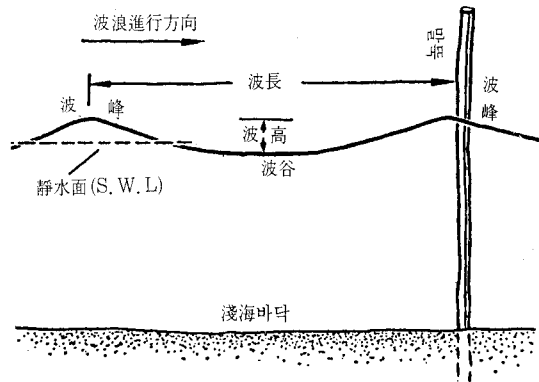


그림-2 波長과 波高

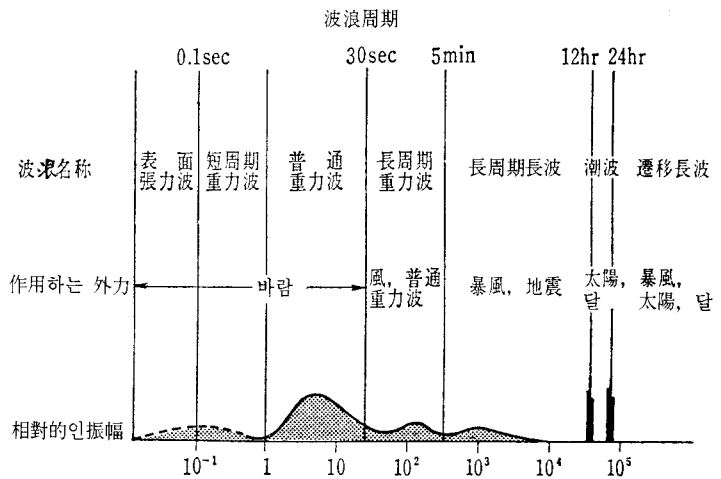


그림-3 周期에 의한 海岸波의 分類 [W.H.Munk, 1950]

잔잔한 波에서 갈쭉갈쭉  
波를 지나 風波로

充分히 發達한 波로 놓치는 나뭇로 移行

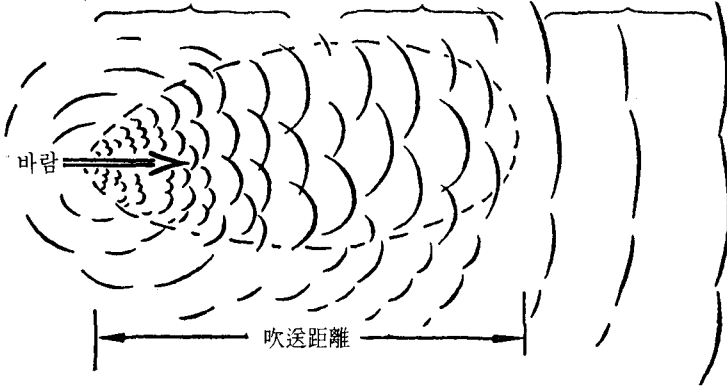


그림-4 波의 發達(概念) 圖(概念圖). 吹送距離(fetch)는 波가 바람을 받아서 發達한 區域, 結局 風域을 말함

풍파외에도 해양에는 다종다양한 파랑이 있다. 해저화산의 분화나 절벽붕괴나 함몰로 해면에 충격이 주어질 때나 또는 지진, 해저 땅사태 등에 의해 해저에 변위가 주어질 때 발생하는 쓰나미도 있다.

조석의 간만 즉, 썰물과 밀물은 파랑으로 봐서 조석파라고도 한다. 또한 반복운동을 하지 않고 한 파형만 전파해가는 파랑을 고립파라고도 한다. 해면의 상하운동을 수반하지 않는 육붕파도 있다. 이들 각종 파랑은 각각 바다속에서 중요한 역할을 하는데 여기서는 우리들에 친근한 풍파에 대해서 설명하기로 한다.

우리나라에 있어서 풍파, 풍랑의 구별은 없고 다만 풍랑을 매우 발달한 파도로서 주기가 5~12sec이면 풍랑, 1~4sec이면 풍파라고 구미에서는 말

하고 있다.

바람이 불면 물결이 일어나는 것은 우리가 작은 연못을 바라보고 있으면 바로 알 수 있다. 그런데 연못의 파랑은 매우 세찬바람이 불어도 바다의 파랑만큼 크게 되지 않는다.

이는 바람에 의해 파랑이 일어나는 기구(Mechanism)는 매우 복잡하고 이해하기가 어려운 것이나 쉽게 설명하면 지금 바람 진행방향을 전방이라고 생각하면 바람은 파랑을 후면에서 밀어나가면서 파속을 증가시키고 이와 동시에 파랑전면의 대기의 압력은 후면보다 약하므로 수면이 끌어들여 뒷쪽으로 올라가서 파고가 증가한다.

이 파랑의 생성과정이 수행되는 사이에 최초의 파랑은 바람의 진행방향과 같은 방향으로 진행해가며 다음파랑이 앞과

마찬가지로 형성된다.

이때 만약 연못과 같은 작은 장소이면 파랑이 충분히 크게 되기전에 대안(對岸)에 도착하여 부서지고 마는 까닭에 작은 연못에서는 작은 파랑만 생기게 된다. 요컨대 바람이 불어가는 거리 즉, 취송거리가 길면 길수록 파고는 높아지고 파장도 길게 된다. 물론 풍속도 커야 한 것은 두말할 것도 없지만 또한 매우 취송거리가 길어도 바람이 짧은 시간만 불어온다면 파랑이 충분히 발달하지 않으므로 불기 시작할 때부터의 계속 시간도 풍파의 성질을 결정하는데 있어서 큰 요인이 된다.

그래서 취송거리가 무한히 길고 바람이 계속 한 방향으로 쭉 불면 파고는 매우 크게 될 수 있다. 남극대륙 주위에는 바람이 언제나 한 방향으로 불어 돌아가는 해역이 있어서 여기서는 거의 이와같은 조건을 충족하고 있다.

사실 이 해역에서는 거대한 파랑을 관측하였는데, 하지만 여기서도 파고는 한정돼 있었다. 결국 파랑이 점점 커지고 파장이 길어지고 파장이 증가해가면 파속과 풍속이 같게 되어 그 이상은 바람이 파랑을 밀어가기에 불가능해지고 만다. 이래서, 풍속에 한계가 있는 이상, 파랑을 한없이 크게 하는 것은 불가능하다.

과거에 관측된 최대 풍파는 1933년 2월 6일 미국해군의 탱크「라포마」호가 관측한 파고

표-1 충분히 발달한 풍파의 특성

풍 속 (m/sec)	취송거리 (km)	취송시간 (Hr)	평균 파고 (m)	평균 파장 (m)
5.0	16	2.4	0.3	25
7.5	55	6.0	0.8	56
10.0	121	10.0	1.5	100
12.5	257	16.0	2.7	156
15.0	451	23.0	4.3	225
20.0	1,142	42.0	8.5	400
25.0	2,285	69.0	14.6	624

예컨대 1sec당 10m의 풍속이면 바람이 121km의 거리를 10hr 계속불어서 파고가 평균 1.5m가 되었다고 예상되는 것이다.

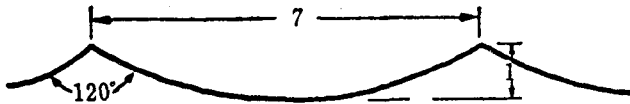


그림-5 波의 極限波形傾斜(波高/波長)는 7分の 1임

37m의 것이 있다.

위의 표-1은 충분히 발달한 풍파의 파고와 취송시간, 계속시간 및 풍속의 표준을 나타낸다.

파랑은 파봉(波峯)과 파곡(波谷)을 가지게 되는데 연속되는 한 파봉과 다음 파봉과의 거리인 파장에 따라 그 파속(波速, Celerity, 즉, 파장을 주기로 나기한 값)은 다르다. 이와같이 파장과 파속의 한쪽만 결정되면 다른 한쪽은 자동적으로 구할 수 있게된다.

이 까닭에 풍파의 경우는 파

장이 길어질수록 파속이 크게 된다. 예컨대 어느 해역에 여러가지 파장을 가진 파랑이 발생할 때 파장이 긴 쪽은 앞으로 먼저 진행해 가고 짧은 쪽은 뒤지게 되어 분산되고 만다. 이어서 이 파장과 파속의 관계를 「파랑의 분산관계」라고 말한다. 단, 여기서 말하고 있는 것은 파장이 약 1.7cm보다 긴 파장에 적용되는 것이고 이것보다 짧은 파랑에서는 물의 표면장력이 중요하게 되어 역으로 파장이 짧은 쪽이 파속이

크게된다.

파고와 파장의 비를 파형경사(Steepness)라 하는데 실험결과를 보면 파형경사가 급하게 됨에 따라 파속도 약간이나마 증가되며 극한파형경사의 1/7에 대해서는 파속은 이론값보다 10% 정도 빠르게 되며 이것이 최고라 한다. 파봉의 각도는 그 극한인 120°보다 좁게 되며 파랑은 불안정하게 된다.

### ▷ 심해파와 천해파

파장이 길어질수록 파랑이 빠르게 진행한다고 해서 현실면의 바다에서는 한도가 있다. 바다의 수심(깊이)도 파속에 관계되므로 파장이 수심보다 상당히 크게 되면 파속은 파장과 파의 관계가 없게되어 수심의 평방근에 비례하게 된다.

이와같은 파랑을 천해파(淺海波, Shallow water wave)라 하고 반대로 파장이 수심에 비해 작은 파를 심해파(深海波, Deep water wave)라고 부른다.

여기서 주의가 필요한 것은 천해와 심해라 부르는 것은 상대적인 것으로서 예컨대 해저까지 같은 수심의 경우의 파랑이라도 파장에 따라서 천해파도 되고 심해파로도 된다. 또한 같은 파랑이 난바다 즉, 외해(沖, 해저까지의 수심이 깊은 곳)부터 해변 가까운 곳(얕은 곳)으로 진행해 오며 따라서 심해파에서 천해파로 변화하는 것도 있다. 풍파는 거의 모든경우 심

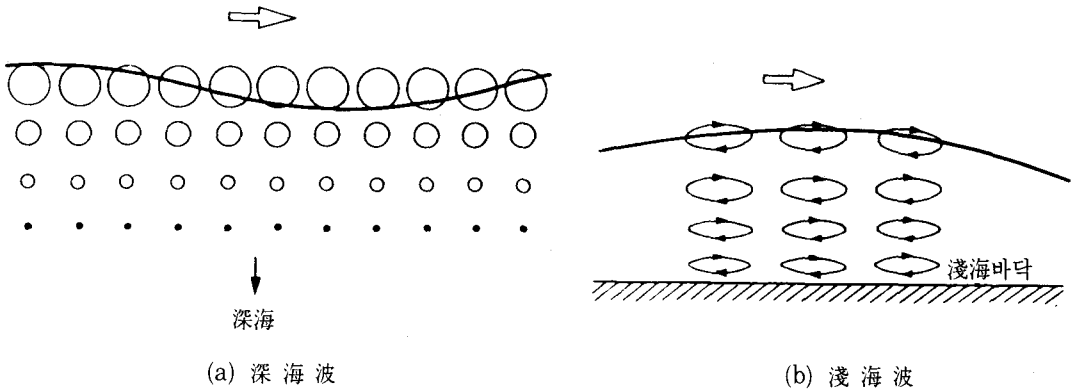


그림-6 (a) 深海波와 (b) 淺海波의 粒子運動

해파로 생각할 수 있고 쓰나미 (Tsunami, 津波)는 천해파의 대표적인 예가 된다.

천해파와 심해파의 큰 상이점은 천해파는 그 파속이 파장에 의존하지 않는 비분산성의 파랑인데 대해 심해파는 분산성의 파랑인 점이다. 또한 그 외에 양자의 큰 다른 점은 파랑중의 물입자의 운동양상이다. 천해파에서는 물입자가 표면층에서 깊은 층까지 운동하고 있는데 대해 심해파에서는 이 운동이 어느 정도의 깊이까지만 도달된다. (그림-5참조)

그러므로 폭풍우때 매우 해면이 거칠어지고 있어도 잠수함은 고요한 해중을 항행가능하다.

그림-5에서 보는 바와 같이 물입자는 같은 장소에서 왔다 갔다 할 뿐이며 파랑과 함께 진행하지 않는 것에 주목해야 한다. 가까운 예로서 연못에 떠 있는 낙엽은 파랑과 함께

물가쪽으로 밀려오지 않고 같은 장소에서 올라갔다 내려갔다 할 뿐으로 이것은 물입자를 낙엽으로 바꾸어 놓은 것과 마찬가지로 생각하면 된다.

풍파 중 이것을 생성하고 있는 바람의 영향 하에 있는 것을 풍랑이라 하고 생성풍역에서 빠져나온 파랑을 나불 또는 여파 (余波, Swell, 또는 Liner)라고 하여 구별하는 것도 있다.

풍랑은 매우 불규칙한 것이 큰 특징이다. 실제의 바다에서는 풍향이나 풍속도 시시각각 변동함으로 파랑도 줄곧 변화하는 물언덕을 한데 모은 것과 같으며 개개의 파랑경계도 확실하지 않다. 따라서 풍랑을 기술할 때는 통계적 모델기법이 필요하다.

이에 비해 나불(余波)은 직접 바람의 영향을 받은 것이 아니므로 매우 규칙적이다. 특히 생성된 풍역에서 멀리 떨어지면 단파는 마찰에 의해 감쇠

한다. 따라서 장파만이 비교적 변형함이 없이 전파해 간다.

예컨대 해안에서 멀리 떨어진 해상에 있는 태풍에 의해 만들어진 파랑(예컨대 여름철의 태평양해안의 土用波)은 나불이 되어 해안에 도달하는 일이 많다. 남위 40°에서 50°의 바다는 특히 겨울철(북반구 여름철)에는 폭풍권으로 되는데 북반구까지 나불이 도달된다.

끝으로 미국의 W.Bascom에 의하면 그의 저서 「해면과 해안의 역학」에서 「파랑」이란 특히 주기 약 20sec보다 짧은 수면파로서 풍랑과 나불의 총칭이라고 하고 있다. 하지만 원저에서는 모두 wave를 사용하여 파랑보다 긴 주기의 수파(水波), 예컨대 쓰나미, 밀물·썰물의 조석을 포함한 총칭으로 사용되는 것으로 되어 있다.

한편 미국의 Munk교수에 의하면 파는 그 주기가 1sec이하

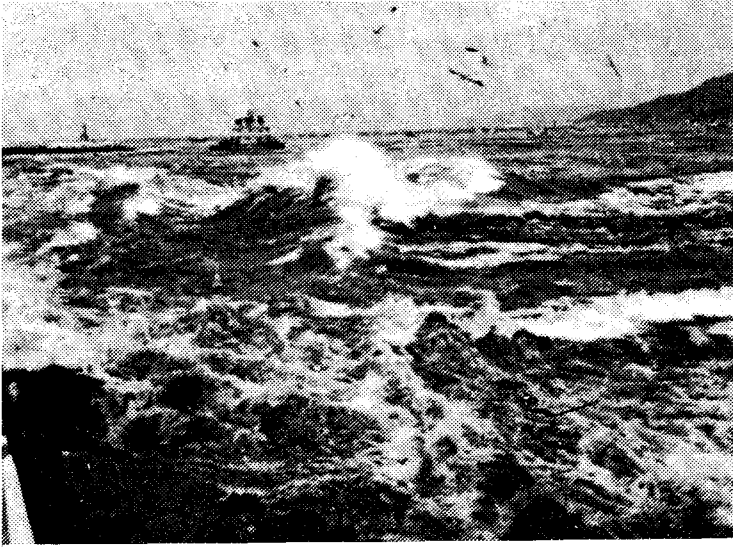


사진-1 십이나 海岸으로 밀려드는 쓰나미

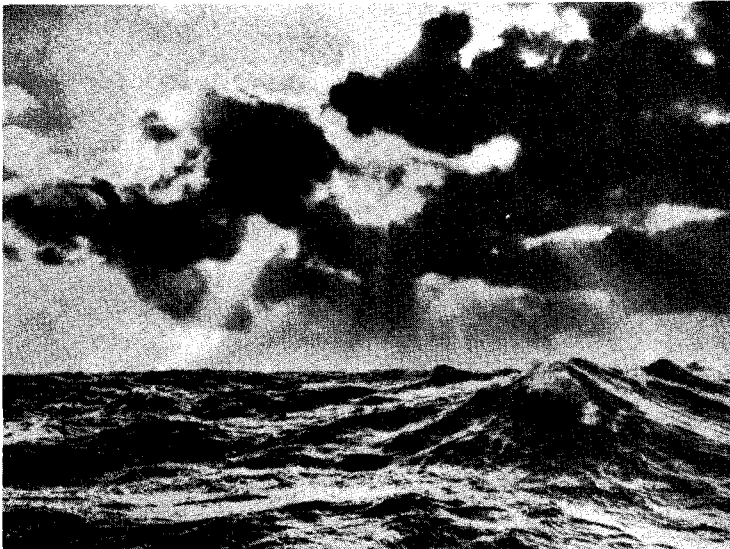


사진-2 해면형은 복잡하여 파고·파장·주기가 결정되기 어렵다

부터 1만sec이상 것까지로 분류되어 매우 복잡하다. 주기 1sec이하의 잔잔한 세파, 1sec부터 4sec까지의 짧은 풍파(갈쭉갈쭉한 파), 5sec에서 12sec까지의 충분히 발달한 풍랑, 6sec에서

16sec까지의 나불, 1min에서 3min까지의 surf·beat, 10min에서 20min의 쓰나미, 12hr이나 24hr의 조석 등이다. 이와같이 파의 종류는 많고 이들이 모두 각각으로 특정의 기구로

서 생성되고 발달한다. 해면에는 종류나 크기도 매우 다른 많은 파랑이 동시에 존재하고 각각 모두 여러 방향으로 진행해서 날마다 매우 복잡한 변동을 하는 까닭에 여러 파랑의 전체진로를 아는 것은 쉬운 일이 아니다.

이와같이 바다의 파랑은 절망적으로 복잡한 까닭에 수천년 사이에서 관측결과로 창출된 것은 단순하게 「바다의 물결은 어떤 기구에서 바람에 의해 일어나는 것이다」라는 설명뿐이다. 바람이 강하면 강할수록 당연히 파랑은 크게 된다는 것이다.

해면은 전과 다름없이 오늘날도 옛시인의 묘사의 영역에서 탈출되지 못하고 있다.

「..... 흐트러지고, 떠돌고 동요한다. 산들바람의 사랑스러운 어루만짐 아래서는 잔잔한 물결에 목을 적시고 폭풍의 고문 앞에서는 갑자기 거대한 파도로 나타나 미쳐 날뛰는 해변의 파랑이 되어 안벽에 깨여 부서진다. 그 아래에서 잠자던 거인에게 靈氣를 불어넣어 만든 조석으로서 부풀어 오른다.....」라고 시인은 해면을 조망하고 있다.

하지만 최근 30년간의 집중적인 해양과학연구는 100년 이상에 걸친 과학적 연구의 결과로 오늘날 파랑의 주된 특징의 대부분과 그 원인은 수식으로 만족스럽게 설명이 될 수 있고 실험적으로도 재현할 수 있게 되었다. ㉔