

매우 복잡한 해파

(海 波)

최 영 박 / 수원과학대학장 · 고려대명예교수

▶ 수면의 파랑이란

우리들을 에워싸고 있는 공간은 그 성질과 행동이 각각 다른 여러 형의 파랑으로 가득 차 있다. 그 중 수면의 파랑(물결)·음파·광파·지진파 등은 눈이나 귀 등 우리 몸으로 감각할 수 있는 파랑이며 전파는 기계에 의지하지 않고서는 감각하기 불가능한 파랑이다.

음파와 지진파는 탄성파, 광파와 전파는 전자파라고 부른다. 바다수면의 파랑은 탄성파도 아니고 전자파도 아닌 다른 형의 파랑이다. 일반적으로 '파랑 공간 한 점에 있어서 상태의 변화가 어느 유한한 속력으로 그 점주위로 전달해가는 현상'이라고 정의된다.

파를 주위로 전달시키는 성질을 가진 공간물질을 그 파의 매질(媒質)이라고 한다.

상태의 변화라는 것은 어떤 원인에서 생긴 매질의 평형상태로 부터의 벗갈림으로써 이것이 주기적으로 변화하고 반복하는 것이다.

해수면의 파를 생각할 경우 평형상태란 정지수면일 때이다. 이는 가는 곳마다 모두 중력에 수직인 면이다. 또한 최소의 표면적을 가지며 따라서 표면장력이 최소상태의 면이다.

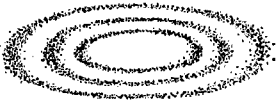
그런데 파가 생기는데는 먼저 평형상태를 어지럽게하는 어떤 힘이 작용해야 한다. 다음에 이와같이 해서 생긴 평형상태를 어지럽게하는 어떤 힘이 작용하지 않으면 안된다. 다음에 이와같이 해서 생긴 평형상태로부터의 벗갈림을 원 평형상태로 되돌리고자하는 힘의 존재가 필요하다.

이와같이 파가 존재하는데는

평형상태와 요란력(擾亂力)·복원력(復原力)이 세가지가 필요하다. <그림-1>에서 보는 바와 같이 정지된 평형상태의 수면에 작은 돌을 던져보면 평형상태가 흐트러지고 돌이 떨어진 점에서는 충격력으로 수면이 들어가는 동시에 그 압력으로 인접 부분에서 바로 수면이 불룩해진다.

수면에 움푹한 곳이 생기면 그 수면은 중력에 수직하지 않으므로 중력성분이 작용하기 시작해서 이 움푹한 곳을 때리면서 고치기가 시작된다. 동시에 움푹한 곳은 표면적을 증가시키므로 표면장력이 작용하기 시작해서 이것을 평탄하게 하고자한다.

이들의 복원력에 의해 물입자의 상향운동이 시작하고 만약 복원력이 작용하지 않으면 요란력에 의해 변위된 물입자



〈그림-1〉 수면에 투석할 경우에 발생하는 파군(波群)과 복원력(復原力)

는 그 위치에 멈추게 되므로 파라는 진동은 결코 일어나지 않는다. 그런데 중력만이 작용하고 있는 단진동의 운동을 생각하면 알 수 있는 바와 같이 물입자는 관성을 가지고 있으므로 움푹한 곳이 없어져도 그 운동은 멈추지 않고 수면은 다시 상향운동을 계속한다. 그래서 처음 움푹한 수면은 반대로 부풀어 오른다.

이와같이 되면 이것을 누르기 위해 또다시 중력과 표면장력이 역방향으로 작용하기 시작하므로 곧 수면의 상승은 어느 높이에서 멈추게 된다. 이 순간이 지나면 내리기 시작한다. 가해진 충격력이 물입자의 위치에너지와 운동에너지로

바뀌어지고 평형상태 주위 수면의 진동이 반복된다. 돌의 낙하점에서 진동은 점성의 작용으로 인접하는 물입자의 진동을 유발하고 시간적으로 조금씩 늦게 계속해서 그 주위로 전달돼 간다.

이것이 수면파이다. 이와같은 수면의 파랑운동에는 요란력·중력·표면장력·관성·점성 등의 여러 힘이나 성질이 연관되고 있다. 그런데 ‘파’라는 운동에 의해 전달되는 것은 수면의 진동과 이것에 수반되는 에너지만으로 물입자는 아니다. 물입자는 평형위치 주위의 소규모인 커도운동을 하는데 먼 곳까지 운반되지 않는다. 따라서 파는 에너지를 어느 장소에서 다른 장소까지 수송하는 것과 같은 중요한 역할을 하고 있다.

파랑이 전해가는 방향의 어느 순간의 연직단면내에서 수면의 정지수면부터의 엇갈림을 표시한 곡선을 파형이라고 한다. 파형은 수면의 가장 높은 부분을 파봉, 가장 낮은 부분을 파곡이라 한다. 서로 인접하는 파봉과 파곡의 수면 고도차를 파고라고 말한다.

이어지는 파봉사이의 수평거리를 파장이라고 한다. 또한 해수면의 어느 한 점을 파봉 또는 파곡이 이어져서 지나가

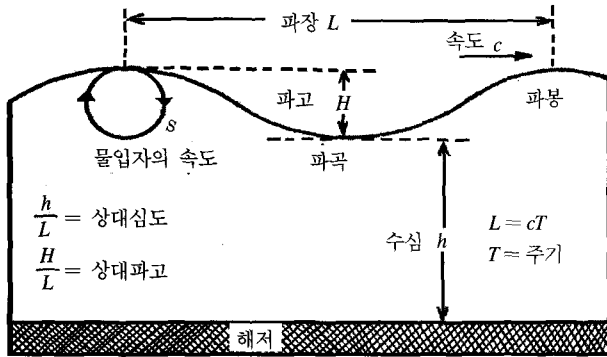
는데 요하는 시간을 주기라고 하며 해면상에서 파봉은 하나의 곡선을 형성한다. 이것을 파봉선이라고 한다. 파봉선의 길이를 봉폭이라 하고 장·단이 있다.

파는 이 파봉선에 수직한 방향으로 진행하는데 그 속력을 파속이라고 한다. 파고·파장·주기·파속은 파의 중요한 요소이다.

▶ 해파의 분류

우리들이 해안에서 보는 물결, 즉 바다의 파랑인 파도가 밀려오다가 되돌아가고 뒤돌아갔다가 또 밀려오는 운동을 반복하고 있다. 우리들이 해파라고 생각하는 것은 상하방향으로 오름과 내림을 하는 해수 운동이라고도 볼 수 있는 해수의 운동이라고 할 수 있다.

사실 바다의 해수운동은 매우 복잡한데 그 중에서 ‘반복운동’ 또는 이에 가까운 것을 보통 파도라고 부르고 있다. 평소 해안으로 밀려오는 파도는 바람이 원인이 되어 발생하는 파도를 풍파 또는 풍랑이라 한다. 풍파외에도 바다에는 다양하게 여러 파가 있다. 지진, 화산폭발에 의해 발생하는 쓰나미(진파, tsunami)도 있고 조석의 간만 파로 봐서 조석파라고 말한다.



〈그림-2〉 파의 요소

파랑의 성질과 행동은 이것을 일으키는 요란력과 복원력 외에 바다의 깊이와 넓이, 해안선의 형태 등에 관계된다. 따라서 해파의 본질을 이해하는 것이 매우 중요하다. 앞으로 파랑을 어느 특별한 이름으로 부를 때는 그 파랑에 대해 특별한 견해를 가지고 있다는 것으로 이들을 자유롭게 잘 다루는 것이 필요하다. 앞에서 기술한 바 풍랑은 요란력 중에 가장 중요한 것으로 해면상에 불고 있는 바람에 의해 직접 일어난 것이다. 다음에 조석파로서 달과 태양과의 인력에 기인하는 기조력에 의해 일어난 것이다. 다음에 지진, 화산의 폭발과 땅사태 등의 지각변동에 의한 요란력이 원인이 되어 일어난 파가 쓰나미인 것이다.

조석파와 외해에서의 쓰나미는 파장·주기가 풍랑에 비해 매우 긴 까닭에 눈으로 보서는

파로 보이지 않는다.

요란력은 순간적으로 작용하는 충격력으로서, 일어난 파가 힘이 작용한 점을 중심으로 해서 모든 방향으로 자유롭게 전달되어 넓어져 간다.

이와 같은 파랑을 자유파라고 한다.

자유파의 주기는 바다의 넓이와 마찰의 크기로서 결정되고 요란력의 종류에는 관계가 없다. 예컨대 지각변동에 기인하는 짧은 시간의 충격력에서 생긴 쓰나미나 풍랑은 바람이 약한 해면상으로 나와 약해지면서 전달하는 놀은 자유파이다. 그런데 요란력이 주기적으로 변화하는 경우, 생긴 파는 독립으로 자유롭게 운동하지 못한다.

이와 같은 파를 강제파라 말한다. 강제파의 주기는 언제나 요란력의 주기와 일치하고 바다의 크기나 마찰에 관계하지

않는다. 예컨대 기조력의 크기는 약 12시간에서 24시간의 주기로 변화하는데 이것에 의해 발생하는 조석파의 주기는 이것과 일치한다.

이들의 요란력과는 다르게 대부분 파의 원인이 되고 있는 바람은 바뀌어지기 쉬운 것이 특징이다.

바람에 의한 요란력과 충격인 동시에 불규칙적인 점도 있으나 주기적이므로 풍랑은 자유파와 강제파의 중간적인 성질을 가지고 있다.

다음으로, 수면의 요철을 바로잡고 수평으로 하고자하는 표면장력, 중력, 코리올리의 힘이라 하는 복원력은 어떤 형의 파에 대해서도 같은 정도의 중요도로서 작용하는 것이 아니다. 평탄한 해면위를 풍속이 약 1m/sec이하의 미풍으로 불기 시작하면 해면은 곧 파장 약 2cm이하의 매우 작은 파로서 덮인다.

이와 같은 작은 파의 경우 수면의 곡률이 크고 표면적이 증가하므로 표면장력이 주된 복원력으로 작용한다. 이와 같은 파를 표면장력파라고 말한다. 보통, 잔물결 또는 세파라고 하며 이와 같은 소파도 풍속이 69.5cm/sec 이상이 되지 않으면 생기지 않는다고 이론적으로 표현되고 있다. 이 세

파 파영의 특징은 등근 봉과 V자형의 곡으로 이루어지고 규칙적으로 배열되고 있다. 세파에 의한 해면의 미소한 요철은 해면이 바람에서 받는 에너지를 효과적으로 받는데 도움이 된다.

받아온 에너지는 파의 성장과 풍파의 방향으로 흐름을 일으키는데 사용된다. 풍속이 약 1m/sec를 넘으면 파장은 약 2cm를 넘고 해면의 곡률이 작게되므로 표면장력의 역할이 감소되고 중력이 복원력으로 된다.

이와같은 파를 중력파라고 말한다. 중력파의 파형은 뾰족한 파봉과 평탄한 파곡을 가지는 것이 특징이다. 세파는 바람이 멈추면 바로 사라지는데 중력파는 바람이 멈추어도 파동을 계속하여 생명이 길다. 이는 에너지를 훨씬 많이 가지는 것을 말한다. 우리들이 보는 해파는 대부분이 중력파이다. 코리올리의 힘이 해면을 평탄하게 하고자 작용하는 것은 양이 상당한 물의 흐름을 수반한 파장과 주기의 매우 긴 조석파와 쓰나미의 경우이다.

셋째로, 파의 성질과 행동은 물의 용기 깊이와 파장에 밀접한 관계가 있다.

우리 눈으로 볼 수 있는 파는 수면의 상승 하강운동이나

이것은 눈에 보이지 않는 물입자의 귀도(鬼道)운동에 의해 일어나는 것이다. 물입자의 운동은 점성의 작용으로 수면부터 깊은 곳으로 감에 따라 급속하게 쇠퇴한다. 따라서 물이 충분히 깊어지면 물입자의 운동은 해저까지 도달하지 않는다. 결국 해저의 영향을 받지 못한다. 하지만 물이 얇으면 물입자의 운동이 해저까지 도달하고 따라서 그 영향을 받는다. 이것을 '파가 해저를 느낀다'라고 말하기도 한다. 파가 해저를 느끼는지는 수심 h 만이 아니고 그 파의 파장 L 에도 관계하고 있다.

<그림-2>에서 보는 바와같이 h/L 을 상대수심이라 하고 이에 대해 h 를 절대수심이라고 부른다. 상대수심은 파가 해저를 느끼는가 어떤가의 기준이 되는 중요한 양이다.

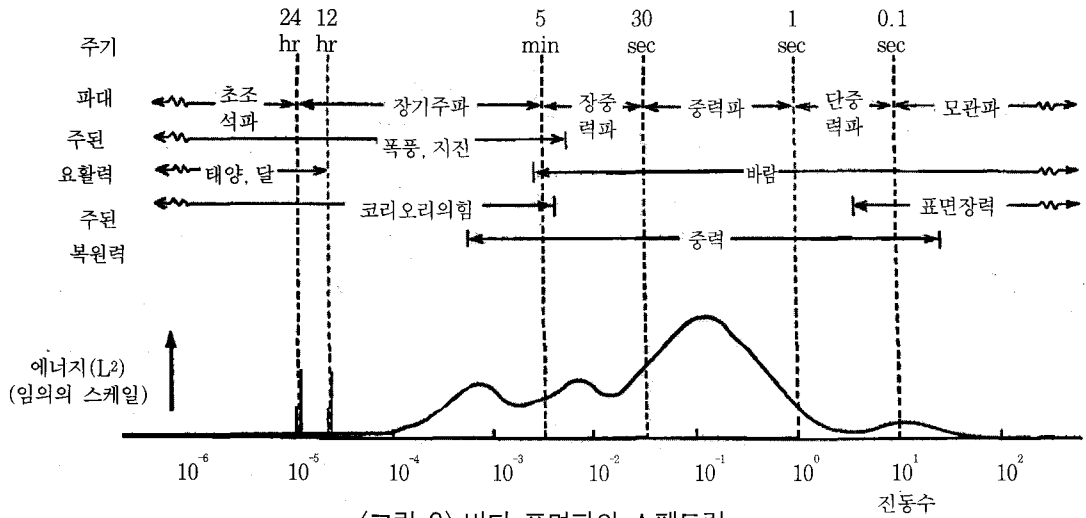
관측에 의하면 상대수심이 1/2보다도 커지면 파는 해저를 느끼지 못한다. 이와같은 파를 심해파라 하고 파에 관한 한 이와 같은 수역을 심해역이라고 부른다. 이에 대해 상대심도가 1/20보다 작으면 파는 해저를 느낀다. 이와 같은 수역을 천해역이라고 한다. 이 정의에 의하면 파장이 수 천km나 되는 조석파나 쓰나미는 세계에서 가장 심해(마리아나 해

구) 위를 진행한다 해도 천해파이고 파장 1cm의 세파가 깊이 30cm의 수면을 진행해도 심해파가 된다는 것이 된다. 상대수심이 1/20과 1/2사이 에 있는 수역은 심해와 천해사이의 전이대로써 그 위를 진행하는 파를 중간파라고 한다. 외해에서 해안을 향해 진행하는 파는 심해파에서 중간파를 지나 천해파로 변화한다. 실제로 심해파와 천해파의 구별은 합리적이고 동시에 중요하다. 천해중에서도 매우 얇은 바다의 파를 극천해파 또는 장파라고 한다.

그리고 1/2 < 1/25사이 에 있는 파를 천해표면파라고 한다.

넷째로, 파의 성질이나 행동은 물의 용기 가장자리의 형이나 넓이에 관계된다. 넓은 수면의 파는 파형이 수면에 대해서 한 방향으로 진행해간다. 이와같은 파를 진행파라 한다. 그런데 파형이 진행하지 않은 기묘한 파가 있다. 낭떠러지 안벽에 가까운 파나 목욕탕 수면의 파가 이것이다. 이와 같은 파를 정상파라 한다. 호소나 거의 해류의 소통이 거의 없는 바다에서도 정상파가 생긴다. 정상파나 진행파는 그 성질과 행동이 크게 다르다.

다섯째로, 파의 여러 요소중 주기는 그 측정이 가장 쉽다.



〈그림-3〉 바다 표면파의 스펙트럼

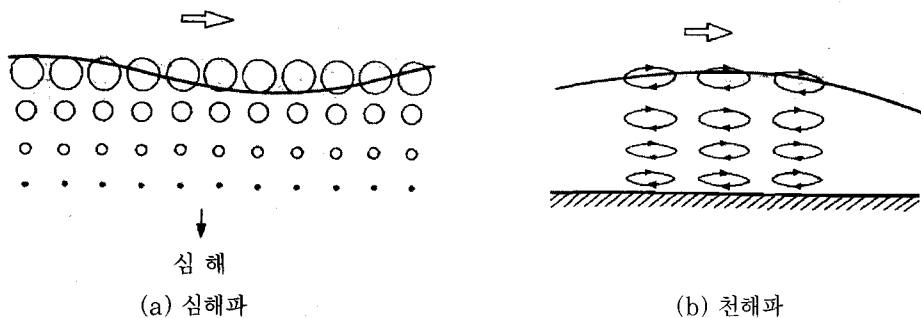
그리고 그 정확도도 높아서 파를 그 주기 혹은 역수의 진동수로서 분류하는 것이 합리적이다.

〈그림-3〉은 전자파 스펙트럼에 대응하는 해파의 스펙트럼을 모식적으로 표시한 것이며 각각의 주기의 파에 포함되는 에너지의 상대량이 눈금으로 표시되어 있다.

우리들이 바다에서 보는 대

부분의 파는 주기가 1~30sec의 보통 중력파이며 이것은 대형선의 우항의 문제에 관련되는 파이다. 이것보다 주기가 긴 장주기 중력파는 해안에서의 해저침적물의 수송문제에 연관되는 파이다. 또한 주기 0.1sec이하의 표면장력파는 레이더의 해면반사의 문제에 연관되는 파이다. 진행파가 물체에 맞는 경우 역방향으로 진

행하는 파가 발생한다. 이 파를 반사파라 한다. 또한 주기, 파고가 모두 같고 같은 진행방향인 서로 역이 되는 2종의 진행파가 중첩되면 진행하지 않는 큰 파가 일반적으로 생긴다. 이것을 중첩파 또는 정상파라 한다. 수직벽을 가진 방파제 전면에서는 밀려오는 파가 반사된 파와 겹쳐서 중첩파를 발생케 한다. ㉠



〈그림-4〉 심해파와 천해파의 물입자운동

연안해역의 환경문제

.....

근년 해양 레크리에이션 시설에 대한 수요가 더욱 많아짐에 따라, 시민에게 가장 친근한 썬파대 내 또는 그 부근의 수질에 주의가 쏠리게 되어 시민에게 건전한 레크리에이션의 장을 제공하기 위해서라도 수질 환경에 한층 주의를 기울일 필요가 있다.

김 남 형 / 제주대학교 교수

연안해역의 오염의 경과

일본에서 환경 문제가 격화 된 배경에 대해서, 「환경 백서」(1972년판)는 다음과 같이 말하고 있다. 그 원인은 (1)일본 경제 사회의 과밀의 한계가 드러났다. (2)산업 구조면에 있어서 자원 다소비형 산업의 생산신장이 현저해졌다. (3)국민의 소비 패턴이 변화됐다는 등이다.

갖가지 형태로 나타난 환경 문제의 하나로 수질오염을 들 수가 있다. 1955년도 이후의 현저한 산업 발전 및 도시로의 인구 집중에 따라 각지에서 수질 오염이 진행되어 주민의 건강을 해치고, 상수도나 어업 등에 직접적인 피해

를 미치며, 또 해양 레크리에이션 활동의 장으로서의 해안의 가치를 저하시키거나 또는 실질적으로 사용 불능이 되게 하였다.

이와 같은 수질 오염은 먼 저 하천, 특히 도시 하천에 나타나고, 이윽고 Tokyo만, Ise만, Osaka만, Seto내해 등의 폐쇄성 내만에 미쳤으며, 이어서 외해에 면한 대도시 근교의 연안 해역으로 파 급됐다.

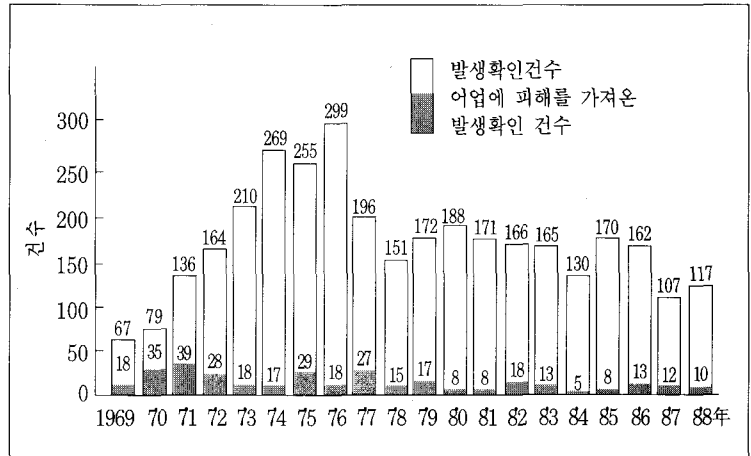
해수 오염의 정도를 간단히 알기 위해서는 투명도판에 의해 해수의 투명도를 구하거나 또는 비색법(color-imetric determination)에 의해서 조사하면 된다. 또 이것을 화학적인 관점에서 검토하려면,

pH, COD 및 시안, 알킬 수 은, 총수은(總水銀), 유기 인, 카드뮴, 납, 비소 등 유해 물질의 함유량을 구한다.

먼저 항만에 주목해 보자. 항만에서의 해수 오염은 육상에서 배출되는 폐수에 기인하는 일이 많고, 특히 해수의 순환이 나쁜 해역에서는 현저해진다. 일반적으로는 도시 하수, 공장 폐수 등이 다량으로 유입되는 도시 하천의 하구 주변이나 후미진 곳에서 오염이 진행되는 경향이 있고, 예전부터 항만 내의 수질은 우려할 만한 상황에 있었다.

Tokyo만 등의 내만은 어느 것이나 폐쇄적이기 때문에 수 많은 오염원으로부터 배출된 오염 물질이 만 안에 정체하여, 마침내 오염 구역이 만 전역에 미쳤다. 그 당시 심각한 문제가 되어 있었던 것으로 Seto내해의 적조가 있었다.

적조 발생 이유는 아직 충분히 해명되어 있지않으나, 질소나 인 등의 영양염이 하천수, 공장 폐수, 대소변, 도시 하수 등으로부터 지속적으로 보급되고, 플랑크톤의 번식에 충분한 일조량이 있으며, 또한 해수가 정체하고 있다는 등의 기초적인 요인에 몇 가지 유발적인 원인이 더해져서 부영양화가 급속히 진행하여, 폭발적인 적조가 발생한다고 생각되고 있다. 이에 따라 양식 또는 천



〈그림-1〉 Seto 내해에 있어서 적조의 발생확인 건수(일본 수산청 조사) (환경백서 1989년판)

연의 어패류가 폐사하여 큰 어업 피해가 발생했다.

Seto내해에서의 적조의 발생 확인 건수는 〈그림-1〉에 나타난 것과 같이 한 시기에 비해서 발생 건수는 감소했다고는 하나, 어업 피해는 여전히 발생하고 있다.

다음에 연안 해역으로 눈을 돌려 보자. 일본 해상 보안청이 구체적으로 확인한 일본 연안 해역 오염의 발생 확인 건수는 1971년은 1970년의 약 3.3배나 되는데, 그 중에서도 기름에 의한 오염이 압도적으로 많아, 전체수 1,621건의 약 80%를 차지한다.

이렇게 해서 해양 오염은 세계적으로 관심의 초점이 되어, 특히 선박의 기름에 의한 오염 방지를 위하여 강한 규제가 실시되는 동기가 되었다.

〈표-1〉은 근년(1984~89)의 통계 자료이다. 1971년 당시에 비해서 건수는 감소했다고는 하나 여전히 상당한 건수에 이르러 많은 과제를 안고 있다고 하지 않을 수 없다.

근년 더욱 해양 레크리에이션 시설에 대한 수요가 많아짐에 따라 시민에게 가장 친근한 쇄파대 내 또는 그 부근의 수질에 주의가 쏠리게 되어 COD, 대장균군수(大腸菌群數)의 실태 조사가 행해지고 있다.

1988년 일본 환경청이 해수욕장 425지점에서 수질 조사를 한 결과 대장균군수가 기준을 넘어 개선을 위한 대책이 필요한 곳이 3개소 있었다. 시민에게 건전한 레크리에이션의 장을 제공하기 위해서라도 수질 환경에 한층 주의를 기울일 필요가 있다.

〈표-1〉 해안 오염의 지역별 발생 상황

오염 방지책

년	해역 종별	홋카이도	혼슈	도쿄	이세	오사카	세도내해	혼슈	큐슈	동해	남해	합계
		연안	연안	연안	연안	연안	연안	연안	연안	연안	연안	연안
1984	기름	7	68	89	24	34	205	83	75	44	65	704
	기름이외	2	4	1	15	12	107	11	14	24	9	199
	적조	0	0	2	15	2	22	7	18	12	0	78
	계	9	72	92	54	48	334	101	107	80	74	981
1985	기름	47	55	61	25	27	186	59	79	54	35	628
	기름이외	4	4	2	10	1	85	29	7	17	9	168
	적조	5	3	5	28	1	17	5	9	2	0	75
	계	56	62	68	63	29	288	93	95	73	44	871
1986	기름	22	72	80	16	36	149	53	49	58	34	569
	기름이외	3	3	4	4	14	106	29	37	32	11	243
	적조	0	2	2	19	2	21	7	5	7	0	65
	계	25	77	86	39	52	276	89	91	97	45	877
1987	기름	37	70	73	27	46	104	68	75	74	53	627
	기름이외	6	6	13	5	10	121	53	36	48	2	300
	적조	0	1	2	10	4	16	7	4	4	0	48
	계	43	77	88	42	60	241	128	115	126	55	975
1988	기름	27	62	77	31	30	116	68	68	63	51	593
	기름이외	3	33	3	5	13	122	30	31	25	22	287
	적조	1	1	1	15	7	9	3	7	2	1	47
	계	31	96	81	51	50	247	101	106	90	74	927
1989	기름	46	68	74	27	35	107	86	76	48	38	605
	기름이외	5	16	5	6	6	111	27	56	24	16	272
	적조	1	3	3	21	1	8	12	5	3	0	57
	계	52	87	82	54	42	226	125	137	75	54	934

앞의 항에서 극히 표면적으로 일본 연안 해역에서의 오염 실정을 개관했다. 이같은 실태가 조사에 의해서 밝혀짐으로써 차츰 사회적으로 큰 문제가 되었다. 이같은 상황을 반영해서 1972년 6월 25일부터 해양 오염 방지법이 전면적으로 시행되어, 이에 의하여 선박으로부터의 기름 배출은 엄중하게 규제되고, 또 폐기물의 배출은 원칙적으로 금지되었다.

그러나 〈표-1〉에서 본 바와 같이 해양오염의 발생 확인 건수는 900건 이상이나 되고 있다. 또 대도시에서 배출되는 일반 폐기물이나 공장으로부터 배출되는 산업 폐기물을 어떻게 처리하느냐는 현재의 큰 과제이고, 그 처리장으로서의 연안의 매립지에도 한계가 보이기 시작한 모양이다.

화력·원자력 발전소나 제철소 등은 대량의 냉각수를 필요로 하기 때문에 연안에 입지하며, 해수를 취수하여 온도가 높아진 배수를 해안에 방류하고 있다. 처음에는 냉각수의 열효율이라는 관점에서 배수에 따르는 주변의 해수 온도 분포가 조사 연구의 대상이었으나, 이윽고 열오염(thermal pollution)이라는 관점에서 검토가 행해지게 되었다.

예를 들면 적외선 항공 사진

에 의해서 온배수의 확산 상황 등이 조사되고 있고, 나아가 온배수에 의한 수온의 상승이 수산 자원에 어떤 영향을 미치고 있는지가 검토되고 있으나, 그 자료는 현재도 아직 불충분하다.

연안 해역에서의 희석 확산

구미의 여러 나라에서는 해저에 부설한 관과 먼 바다의 해저에 설치한 방류관을 통해서 처리 하수를 배수하는 일이 많으며, 따라서 배수 농도의 확산 과정에 대하여 많은 조사나 연구가 이루어지고 있다. 일본에서는 처음에 온배수의 문제가 거론되어, 방수구로부터의 배수가 어떤 혼합, 확산 과정을 거쳐 그 온도를 저하하여 가느냐가 검토되었다.

또 Seto내해 연안으로부터 배출된 오염 물질이 조류의 작용을 받아서 확산하는 과정을 검토하여, 각지의 오염 물질 농도를 계산에 의하여 구하는 일도 시도되었다. 이들의 자세한 내용에 대해서는 여기서 깊이 파고들지 않기로 하고, 아래에 쇄파대 내에서의 혼합과정에 대하여 설명한다.

지금 쇄파대 내의 한 점에 색소를 투입하면, 이 색소는 연안류에 의한 이류(移流)와 혼합·확산에 의해서 점차 쇄파대 폭 전면으로 퍼져 가지

만, 쉽게 쇄파대 밖으로는 나가지 않는다. 색소는 이안류에 의하여 쇄파대 밖으로 조금 유출하여 주변의 해수와 혼합된다. 이와 같은 사실에서 판단하면, 쇄파대 내에 유입한 오염 물질은 쉽사리 쇄파대 밖으로 나가지 않고, 쇄파대 내에 갇혀 있는 것으로 생각할 수 있다.

Inamni는 기본 방정식으로서,

$$\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial x} (Nu) - \frac{\partial}{\partial x} (Nv) + R \quad (1)$$

을 이용했다. 여기서, N은 농도, ϵ_x , ϵ_y 는 x 및 y축 방향의 계수, u, v는 속도 벡터의 성분, R은 유원(source)나 유입(sink)에 의한 농도의 국소적인 시간 변화이다. 지금 R = 0로 하고 정선으로부터 먼 바다를 향하여 x축, 정선 방향으로 y축을 잡고 원점 x=0, y=0에 전량 A_0 의 트레이서를 투입했다고 하면, N에 관한 2차원의 해로서 다음 식을 얻는다.

$$N(x, y, t) = \frac{A_0}{4\pi t(\epsilon_x \epsilon_y)^{1/2}}$$

$$\exp \left(-\frac{x^2}{4\epsilon_x t} - \frac{y^2}{4\epsilon_y t} \right) \quad (2)$$

다음에 쇄파대 전쪽에 거친 선원(線源)으로서 트레이서를 투입한 경우에는 N에 관한 1차원의 해로서,

$$N(y, t) = \frac{A_0}{(4\pi \epsilon_y t)^{1/2}} \exp \left(-\frac{y^2}{4\epsilon_y t} \right) \quad (3)$$

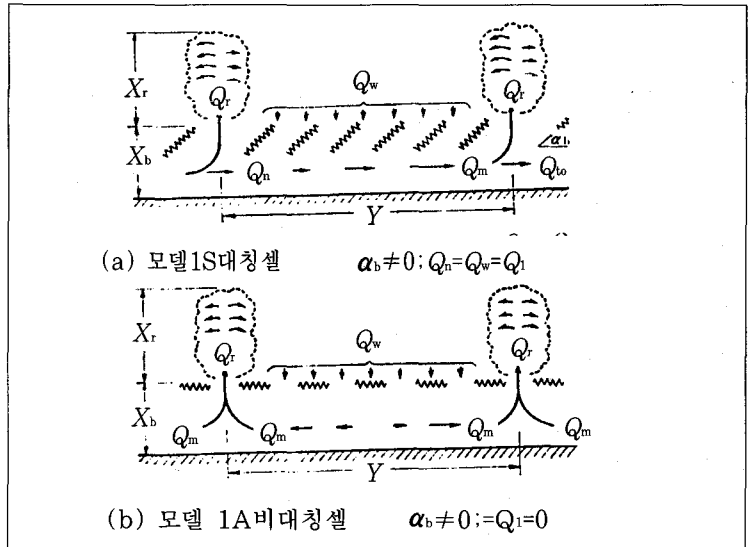
을 얻는다. 그런데 현실적으로는 $t_0 = X_0^2/4\epsilon_x$ (여기서 X_0 는 쇄파대 반폭)의 시간이 경과하면, 트레이서는 2차원적인 확산에서 1차원적인 확산으로 이행한다고 생각해도 좋다. 이와같은 관점에서 x에 대하여 검토를 가한 결과, 경험으로서 다음의 관계가 발견되어 있다.

$$\epsilon_x \doteq \frac{(H_{rms})_b X_b}{T} \quad (4)$$

여기서, $(H_{rms})_b$ 는 쇄파 파고의 rms(제곱 평균의 평방근), X_b 는 쇄파대의 폭, T는 파의 에너지 스펙트럼의 탁월주기이다.

Inman 등은 정선에 직각 방향의 확산 모델을 생각하여, 식(4)가 성립하는 이유를 설명하고 있다. 또 정선 방향의 혼합 모델도 생각하고 있다. 해변의 흐름으로서는 연안류와 이안류가 있다. 등심선이 정선

에 평행인 직선 모양의 해안에 파가 입사하는 경우를 대상으로 하여, 쇄파대 근방의 혼합 셀의 모델을 <그림-2>와 같이 생각한다. 그림 중 (a)는 셀에서 셀로 정선 방향에 유체의 수송이 있는 경우이고, (b)는 순환계가 대칭이고, 정선 방향에 유체의 수송이 없는 경우이다. 그러면 여기서 비대칭 셀의 모델 1A에 대하여 생각한다. 그림속의 기호를 써서 설명하면 유량의 조건에서,



<그림-2> 해변 부근의 혼합셀 모델 (D.L.Inman, R.J.Tait and C.E. Nordstrom, 1971)

$$Q_{l1} = Q_{l0} = Q_l \neq 0 \quad (5)$$

이고, 또,

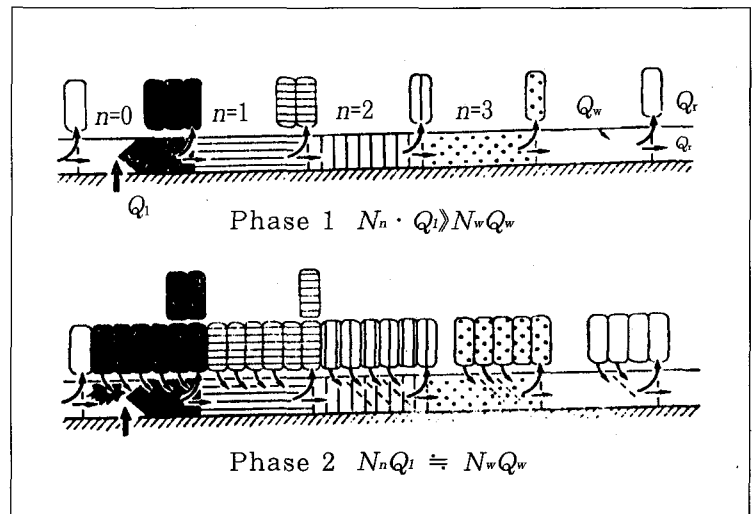
$$Q_m = Q_l + Q_w = Q_l + Q_r \quad (6)$$

이다. 따라서,

$$Q_w = Q_r \quad (7)$$

로 된다. 그래서 쇄파대에 트레이서가 투입되었다고 하면, 정선 방향으로의 확산은 Q_l 에 비례하고, 먼 바다 방향으로의 확산은 Q_r 에 비례한다. <그림-3>은 농도의 장소적인 변화를 두 위상에 대하여 나타낸 것이다.

Phase 1은 먼 바다로부터 트레이서가 재순환하고 있지 않는 때이며, 트레이서를 연속적으로 주입한 경우인 초기



<그림-3> 모델 1A에 대한 트레이서 농도 분포 (D.L.Inman, R. J. Tait and C.E. Nordstrom, 1971)

의 단계나 먼 바다에서의 해안류가 강하고, 2차적인 혼합수역의 수질이 먼 바다물의 수질과 같다고 볼 수 있는 경

우이다. Phase 2는 먼 바닷물이 상당량의 트레이서를 쇄파대 내로 되돌려, 재순환하고 있는 경우에 해당한다. \square