

## 〈研究動向〉

## 碎波帶內的 水理 現象

金 京 鎬 \*

Kim, Kyoung Ho

## 1. 序 論

碎波帶를 포함한 海岸線 近傍의 波는 아주 複雜한 樣相을 띠고 있다. 淺海域에 入射한 波는 汀線을 向해서 進行해 감에 따라서 여러가지 要因에 의해서 變形한다. 예를들면 屈折, 反射, 回折 및 에너지 損失등의 過程을 거쳐서 水深이 더욱 淺아지면 淺水湧果로 因해서 波峯의 前面이 거의 鉛直狀態인 極히 不安定 하고, 非對稱性을 띄는 波로 되어, 결국 空氣를 混入해 가면서 부서지게 되는데, 이러한 現象을 碎波라 한다. 碎波는 波가 부서지는 形態에 따라서 崩壞波(spilling breaker), 卷波(plunging breaker) 및 碎寄波(surgng breaker)등으로 分類 된다. 一般의 碎波 型式은 주로 海底傾斜나 波形傾斜에 의해 支配 되는데, 崩壞波는 波形傾斜가 크거나 海底傾斜가 작을 경우, 卷波는 海底傾斜가 비교적 큰 경우, 그리고 碎寄波는 波形傾斜가 아주 작은 경우에 發生 한다는 것이 實驗的으로 確認 되었다.

碎波現象은 碎波라고 하는 激烈한 流體運動으로 因해서 複雜한 亂流過程을 隨伴한다. 亂流의 發生은 波動에너지의 損失을 誘發하며, 이것은 結局 쇄파후의 波의 減衰現象으로서 나타난다. 碎波帶內的 波의 減衰現象은 라디에이션 應力의 傾斜變化를 誘發 시키고 이로 인해 平均水位가 上昇하게 된다. 또 碎波帶內에서는 여러가지 흐름이 相互 干涉하면서 作用하기 때문에 極히 複雜한 흐름장이 形成 된다. 波의 進行에 隨伴해서 發生하는 質量輸送流, 라디에이션 應力의 傾

斜變化와 波의 減衰現象으로 因한 沿岸流, 平均水位 上昇이나 Edge波 혹은 地形變化로 因해서 發生하는 離岸流 그밖에 海底面 返流(undertow) 등 많은 흐름이 存在한다. 이 밖에도 쇄파대내에서 볼 수 있는 水理 現象으로서는 長週期를 갖는 波의 水面變動, swash zone에서의 波의 遡上등을 들 수 있다. 上記한 쇄파대내에서의 諸般 水理現象이 월과량의 算定, 海岸 構造物 및 海岸堤防의 安全設計 그리고 海岸 變形過程을 取扱하는데 있어서 重要한 影響 因子로 作用하는 점을 勘案 할 때, 그 現象들은 工學的으로 매우 重要한 意味를 갖는다. 그러나 碎波現象이 워낙 複雜하고, 또한 지금 現在로서는 碎波後의 波動現象을 적절히 表現할 수 있는 波動理論이 存在하지 않기 때문에, 쇄파대내의 水理現象에 대해서는 아직도 未 解決의 場으로 남아 있는 부분이 많다.

本稿에서는 碎波帶內的 水理現象중, 碎波後의 亂流와 그것에 의한 波의 減衰現象 및 平均水位變動, 쇄파대내의 흐름 및 低周波數帶의 波에 대해서 간략히 紹介해 보기로 한다.

## 2. 碎波 變形

## 2.1 碎波後의 亂流와 波의 減衰現象

碎波라고 하는 激烈한 流體運動에 隨伴해서 發生하는 亂流는 쇄파대내의 諸 現象에 影響을 준다. 쇄파후 發生한 亂流는 波의 에너지 損失을 誘發 시켜서 쇄파후 波의 減衰現象에 支配의 인 影響을 준다. 쇄파대내의 底質 浮遊에 대해

\* 忠北大學校 工科大學 土木工學科 副教授

서도 碎波에 의한 亂流가 重要한 역할을 하는 것은 말할 것도 없다. 碎波帶 附近에서 發生하는 沿岸流에 대한 支配 方程式은 波에 起因하는 外力과 底面 摩擦力 및 水平擴散項이 力學的으로 平衡을 이루고 있다. 이 3항중 水平擴散項을 變化 시킴으로서 解의 適合性的 向上이 圖謀되기 때문에 沿岸流의 流速分布를 適確히 算定하기 爲해서는 역시 水平擴散項을 正確하게 評價할 必要가 있다. 水平擴散項의 物理的인 意味 즉, 水平擴散項이 亂流에 의한 運動量의 交換을 나타내는 것을 감안하면 쇄파후의 亂流를 究明하는 것은 重要하다고 생각된다. 또 沿岸域의 溫排水 및 汚染原의 擴散등의 問題에 관해서도 쇄파대의 亂流가 重要하다고 생각되어 沿岸流의 理論에서와 同一한 方法으로 水平擴散을 다루고 있다. 1970년대 後半에 접어들면서 室內實驗과 現地觀測에서 使用되는 流體 計測技術, 특히 流速測定等の 進歩에 따라 쇄파대내의 亂流의 構造가 어느 정도 밝혀지기는 하였으나, 쇄파에 의한 亂流의 不規則性 및 不安定性 때문에 아직도 解決되지 않은 部分이 상당히 많다.

쇄파후의 波浪變形에 관한 研究의 初期段階에 있어서는 거의가 絶보기의 碎波現象 그 自體에 관한 것 들이었다. 즉 波가 부서지는 形態(碎波形式), 碎波水深에 대한 碎波波高比( $H_b/h_b$ ) 및 碎波時의 波形傾斜( $H_b/L_b$ )의 限界등, 主로 碎波의 限界에 대한 研究 였다. 쇄파후의 波의 變形을 究明하기 위해서는 碎波限界등에 관한 研究도 물론 重要하지만 碎波의 內部機構의 究明이 必要하게 된다. 碎波의 內部機構에 관한 研究는 에너지 平衡式을 利用하여, 碎波帶內의 波를 解析하는 에너지 平衡式法과 非線形 波動方程式 으로부터 解를 구해 解析하는 方法으로 大別된다. 에너지 平衡式에 의한 方法은 波動의 에너지 損失項 D의 評價 方法에 의해서 다시 渦動粘性 모델, 그리고 碎波를 段波와 類似시켜 생각한 단파모델 및 亂流理論을 適用한 亂流모델 등으로 分類된다.

波浪變形의 內部機構 究明에 있어서 무엇보다 重要한 것은 亂流로 인해서 發生되는 波動에너지 減衰에 대한 評價라 하겠다. 波의 內部機構를 究明함에 있어서 亂流의 影響을 처음으로 考慮한 研究가 Horikawa & Kuo(1966)이다. 그들은 孤立波 理論을 適用하여 쇄파대내의 亂流를 等方性 亂流로 假定하고, 碎波後의 亂流에 의한 波高減衰를 求하고 있다. 그러나 많은 研究에 의해 碎波帶內의 亂流가 과연 等方性일 것인가에 대해 疑問點이 提示 되고 있다. 또한 그들의 研究에 있어서 平均 水位 變動에 대해서는 전혀 考慮하고 있지 않다. 岩田(1976)는 波動의 基本方程式에 Prandtl의 混合距離의 概念을 利用해서, Reynolds應力項을 表現하고 數值計算을 行했다. 그러나 平面床(horizontal bed)에서의 實驗에 局限되어 있고, 數值計算에 있어서 初期計算值를 孤立波(實驗波)를 使用하고 있는데, 週期波에 대한 適用與否도 不分明한 問題點을 안고 있다. 한편, Johns(1980), Johns & Jefferson(1980)은 連續 方程式과 運動 方程式에 亂流에너지 方程式까지를 考慮해서, 쇄파대내의 波를 다루고 亂流에너지의 鉛直分布와 波形의 變化를 구하고 있다. 1970년대의 後半에 접어들면서, 精度 높은 計測器의 發達에 힘입어 微視的인 眼目으로 쇄파대내의 亂流를 評價하려고 試圖 하게된다. 이러한 研究의 傾向은 쇄파대내의 流速을 精密히 測定하여, 位相平均法, 移動平均法 및 數值filter法등에 의해 亂流成分을 抽出하여, 碎波後의 亂流의 特性을 究明하고자 하는 것이다. 이러한 研究에 의해서 亂流의 強度分布나 統計特性등, 定性的인 性質에 대해서는 어느 정도 밝혀 졌지만, 波高 分布나 平均 水位 變動등 碎波帶內의 水理量의 定量的인 評價에까지는 이르지 못하고 있다.

## 2.2 라디에이션 應力과 平均水位 變動

平均水位變動, 沿岸流 및 離岸流등 쇄파대내에서 흔히 볼 수 있는 現象들은 Longuet-Higgins

& Stewart(1962,1964)가 提案 한 라디에이션 應力の 理論에 의해서 잘 說明되고 있다. Longuet-Higgins & Stewart는 이 理論을 適用해서 平均水位 變動 즉, 平均水位 下降 (wave setback) 및 平均水位 上昇(wave setup)에 대해 다루고 있다. Longuet-Higgins & Stewart에 의한 理論 展開는 다소 길고, 모호한 概念이 包含되어 있는데, 좀더 體系의인 概念定立은 Phillips(1966)에 의해서 이루어 졌다. 波가 汀線에 接近함에 따라 波動에 의한 運動量 플럭스의 變動量과 平均水位의 變化 사이에는 均衡을 이루게 된다. 쇄파대 밖에서는 淺水效果에 의해서 平均水位가 서서히 下降하여 쇄파점 近傍에서 平均水位 下降이 最大로 되었다가, 碎波後에 平均水位가 上昇하여 汀線 近傍에서는 水位 上昇량이 거의 波高의 크기를 갖게 된다.

碎波帶內에서 水位 上昇량의 傾斜는 近似的으로 海底傾斜에 比例하며, 入射波의 과정경사에는 약한 依存性을 보이고 있다. 이것은 쇄파대내에서의 波高가 主로 海底 水深에 의해 決定되기 때문이다. 碎波帶內에서 平均水深은 靜水深과 水位 上昇량의 合으로 表示 되는데, 水位 上昇량이 未知量이므로 結局 平均水深도 未知量이 된다. 따라서 碎波帶內의 水粒子 流速, 波速 및 波長등 波의 제원이 水深의 函數로 表示되므로, 波動場을 究明 하는데에는 平均水位 上昇량의 決定이 우선 되어야 한다. 그러나 平均水位 變動을 算定하는데는 크게 두가지 問題點을 들 수 있다.

첫째로 라디에이션 應력이 波高에 의해서 表現되므로 波高의 分布를 미리 알아 두어야 한다는 點이다. 從來 研究에 있어서는 波高-水深比가 一定 하다고 假定하는 條件式을 導入함으로써 平均水位를 算定했다(Bowen & Inman(1968)). 그러나 이 假定은 汀線附近에서 平均水位 上昇량이 거의 波高의 order를 가지므로 成立되지 않는다. 이밖에 Van Don(1976), Guza & Thornton(1981), Dolata & Rosental(1984)등의

研究도 Bowen & Inman의 研究와 거의 같은 패턴을 취하고 있다.

두번째 問題點으로서는 汀線에 垂直 方向으로의 라디에이션 應力( $S_{xx}$ )의 評價 方法上的 問題이다. Stive(1982)는 線形 波動理論 및 몇개의 非線形 波動理論을 利用하여 라디에이션 應力を 評價 하고 實驗値와 計算値를 比較한 바 있는데, 그 結果에 依하면 어느 波動理論을 適用해도 쇄파대내의 라디에이션 應力を 精確히 表現 할 수 없고 특히 線形理論을 適用하면 쇄파대내에서 라디에이션 應力이 過大 評價 된다. 이러한 問題點을 避하기 위해 日野, 柏柳(1981), 磯邊(1981)등은 Dean(1965)의 흐름함수 理論을 適用하여 라디에이션 應力を 表現하고, 이로써 wave setup을 求하고 있다. 그들의 研究에 있어서는 實驗値와 計算値가 比較的 좋은 一致를 보이고 있지만, 흐름함수를 使用할 경우에는 반드시 波形的 時間 및 空間的 分布가 주어져야 한다. 그러나 쇄파대내의 時空間的 波形을 充分한 程度로 推定possible한 波動理論이 現在로서는 提案되어 있지 않으므로 條件이 바뀌면 每번 實驗을 다시해서 波形을 求해 두어야 하는 問題點이 역시 남아 있다.

### 3. 碎波帶內의 흐름

沿岸 附近에는 海流, 潮流, 波浪流등 여러가지 흐름이 存在한다. 이중 波浪流는 波가 直接的인 要因이 되어 發生하는 흐름으로서, 특히 沿岸流, 離岸流 및 海底面 返流(undertow)는 碎波와 密接한 關係를 갖고 있으며, 碎波帶 附近에서 顯著하게 나타난다.

沿岸流는 碎波에 隨伴해서 생기는 에너지 損失과 깊은 關係를 갖고 있으며, 離岸流는 碎波帶內의 平均 水位 變化나 edge波, 또는 地形變化에 起因하는 水位의 變化에 의해서 發生한다. 또 底面 返流(undertow)는 2차원 海岸을 생각할 때, 碎波에 의해서 輸送되는 海水의 質量을 補

償하는 흐름인데 離岸流와 마찬가지로汀線에서 外海의 方向으로 흐른다.

### 3.1 沿岸流 (Longshore current)

汀線에 대해서 一定한 傾斜角을 갖는 波가 入射하여 碎波하게 되면, 그 結果로 沿岸 方向으로 過剩 運動量 플럭스(excess momentum flux)가 誘發되며, 이것은汀線에 平行한 方向으로 沿岸流를 誘發시키는 要因이 된다. 沿岸流는 그 最大値가 碎波點과汀線사이에 位置하며, 그 典型的인 크기는 1 m/sec 이하의 값을 갖는데 주로 碎波帶內에 局限되어 分布한다. 沿岸流는 沿岸 漂砂의 主 因子로 作用하여 沿岸 方向으로 많은 양의 모래를 運搬하는데, 一般적으로 自然 海岸에서는 沿岸流에 의해서 유송되는 모래의 量과 河川 土砂에 의한 量이 平衡을 이루게 된다.

그러나 海岸에 人工 構造物이 築造되면 이 平衡은 깨지게 되어, 海岸을 따라 局部的인 侵食과 堆積이 加速化된다. 이러한 現象은 結局 海岸 侵食, 港灣 및 河口 閉塞의 結課를 招來한다. 또한, 最近 沿岸 汚染에 의한 養殖場의 被害, 沿岸 工業團地에서 排出하는 각종 産業 廢水 및 溫排水 排出 問題등이 자주 擧論되면서 沿岸地域의 環境汚染原의 擴散 問題에도 關心을 갖게 되었다. 沿岸流에 대해서는 Putnam, Munk and Taylor(1948)가 그 豫測式을 提案한 以來 수많은 實驗的, 理論的 研究가 行해지고 있다. 沿岸流에 대한 研究의 흐름은 크게 2개의 段階로 大別할 수 있다. 그 하나는 주로 沿岸流의 平均流速에 注目해서 研究하는 것과 Longuet-Higgins(1964)의 radiation stress概念의 導入에 의한 沿岸流의 流速分布까지도 다루게된 1960년대 後半以後의 研究段階가 그것이다. 1960년대 以前의 研究에 있어서 흐름의 測定은 주로 浮漂 또는 染料를 利用한 Lagrange의 方法 이었고, 그 理論的인 解析에 있어서도 여러가지 問題點

을 가지고 있었다. 이러한 平均流速의 觀點에서 본 研究는 (1) 連續方程式法, (2) 에너지 flux法, (3) 運動量 flux法, (4) 經驗에 의한 方法 등 4개의 model로 分類할 수 있다. 上記한 (1)의 方法은 碎波帶內에서 入射波에 의해서 發生하게되는 質量 flux가 沿岸流의 空間的인 傾斜에 對應한다고 하는 基礎概念으로부터 始作된다.

그러나 이 方法에 있어서는 流體運動에 대한 dynamics는 完全히 無視되고 있다. (2)의 에너지 flux法에서는 에너지 保存法則만을 利用해서 平均沿岸流速에 대한 方程式을 誘導한 것이다. 즉, 波에 의해 운반되는 에너지의 一部가 沿岸流를 發生시키는 에너지로 寄與하는 것이라고 생각하고 있다. 이 方法에서의 問題點은 底部剪斷應力係數를 어떻게 처리할 것인가 하는 點과 沿岸流速이 寄與하는 波動에너지의 比率를 알 수 없는 한 適用하기 어렵다고 하는 問題點이 Galvin에 의해 指摘되고 있다. (3)의 運動量 flux法은汀線에 대해서 平行한 碎波線에 傾斜角을 가지고 入射하는 運動量 flux의 變化가 底部摩擦應力과 平衡을 이루고 있다고 하는 概念으로부터 出發하고 있다. (4)의 經驗的 方法은 既往의 data를 蒐集해서 回歸分析등의 方法에 의해 沿岸流速에 대한 最適値를 求하고자 하는 方法으로서 最適値를 推定하기 위해서는 data가 充分하지 않다고 하는 問題點이 있다. 以上の 4가지 形態의 全般的인 問題點으로서 그 理論的인 解析이 單純하고, 碎波全域에 걸쳐 단 하나의 平均流速 밖에 推定할 수 없다고 하는 것이다. 沿岸流에 대한 理論的 研究는 Longuet-Higgins and Stewart(1964)가 波動理論에 radiation stress의 概念을 導入 하면서부터 活氣를 띠게 된다. 1970년대 이후의 研究에 있어서는 從來 沿岸流의 平均流速만을 對象으로 하던 것과는 달리汀線에 垂直한 方向으로의 유속 분포형상을 구하고 있다. Longuet-Higgins(1970)는 入射角이 작다고 하는 假定下에 정상상태에

서 라디에이션 應力の 傾斜 變化에 起因하는 沿岸流의 誘發力, 底部剪斷力 및 水平混合項이 平衡을 이룬다고 생각하고 沿岸流에 대한 해석해를 求하고 있다. 그뒤 이와 類似한 研究들은 수 없이 많이 행해져 왔으며, 정도 높은 流速 測定 計器를 利用한 實驗的 研究 및 現場觀測도 행해져 왔다. 또 最近에는 從來의 研究에서 다루어 오던 一定傾斜 海底面 대신에 曲面形狀 海底面을 設定하고 沿岸流에 대한 해석해를 구하는 研究도 나타나고 있다.

### 3.2 離岸流 (Rip currents)

離岸流 (rip currents)란 深海 方向으로 흐르는 比較的 강한 흐름으로서, 앞서 提及한 바와 같이 波가 垂直으로 入射했을때 發生하는 흐름으로서 沿岸流와는 달리, 碎波帶內는 물론 碎波帶밖 상당한 거리까지 顯著하게 나타나는 흐름이다. 離岸流의 發生 要因에 대해서는 여러가지 學說이 存在하는데, 佐佐木(1978)에 의하면, 그 發生要因을 크게 둘로 나눌 수 있다. 그 하나는 波動場이 무엇인가의 原因에 의해서 沿岸 方向으로 不均一성을 보이고, 이것에 의해 라디에이션 應力の 傾斜가 생김으로써 離岸流가 發生한다고 하는 外部要因에 의한 說과 또 流體力學的 不安定 現像이 離岸流를 發生시킨다고 하는 內部要因에 의한 說이 그것이다.

外部 要因에 의한 說은 入射波와 edge波가 干涉하여 沿岸 方向으로 波高의 變化가 생긴다고 하는 edge波說, 본래의 入射波가 다른 方向으로부터 入射하는 波와 重疊되어 생긴다고 하는 cross wave說, 또 海底 地形등의 影響에 의한다고 생각하는 海底 地形說, 構造物에 의한 回折波 및 入射波와의 중첩에 의해 發生한다고 생각되는 回折波說등이 있다. 한편, 內部 要因에 의한 說로는 非定常 現像으로서 取扱하여, 攪亂波의 不安定 增幅에 의해서 離岸流가 생긴다고 하는 不安定說 및 定常 現像으로 取扱하고 離岸流

의 發生間隔을 求하는 固有值說등이 있다. 離岸流를 最初로 다룬것은 Shepard, Emery and Fond (1941)인데 이들은 미국 캘리포니아 沿岸에서 離岸流에 대한 現場觀測을 하고, 離岸流에 대해 現像學的인 特性을 說明하고 있다. 그들에 의하면 離岸流는 1m/sec 以上이고, 汀線에서 약 500 m의 거리에 걸쳐서 存在하는 것을 밝혀냈다. 離岸流는 一般的으로 沿岸 方向으로 흐르는 沿岸流와 同伴하는 흐름으로써, 한 離岸流 cell에서 다른 離岸流 cell까지의 間隔은 수십 meter에서 수백 meter의 間隔을 갖는다. 沿岸流와 마찬가지로 離岸流의 理論에도 라디에이션 應力の 概念이 導入되면서 理論的인 取扱이 크게 發展을 본다. Bowen(1969)은 等水深線과 汀線이 平行을 이루는 直線海岸에 대해서 波高가 週期的으로 變化한다고 假定했다. 波高가 클수록 라디에이션 應力은 크고 波高가 작을수록 라디에이션 應力이 작게되는데, 이는 沿岸 方向으로 라디에이션 應力の 傾斜 變化가 생기는 것을 意味하며, 이것은 平均 水位의 變動을 誘發시킨다. 즉, 平均 水位가 높은곳에서 낮은곳으로 흐름이 생기는 循環流 패턴이 形成된다고 생각했다. 한편, 野田(1974)는 沿岸 海岸의 波高 變化를 海底地形의 變化에 의한 波의 屈折變化에 의한 것으로 보고, 波狀汀線, 波狀 等深線을 나타내는 海底地形에 대해서 다루고 있다.

### 3.3 底面 返流(Undertow)

底面返流(Undertow or cross-shore current)라고 하는 흐름은 波가 汀線에 垂直하게 入射하는 경우의 鉛直2차원 海濱의 경우, 碎波에 의해서 隣伴되는 海水의 質量을 補償하는 흐름으로서, 해저부 近傍에서 外海方向으로 흐르는 定常流를 말한다.

Undertow는 碎波帶內에서 鉛直方向으로의 運動量의 不均衡, 특히 波谷과 波峯 사이의 過剩의 運動量 플럭스로 인해서, 水深方向의 平均 라디

에이션 應力과 平均水位 上昇量의 傾斜에 있어서 不均衡이 誘發되고, 그 結果로 發生하는 2차 흐름(secondary flow)의 性格을 띤 흐름이다. 碎波帶內에 있어서 運動量 플럭스의 局部的인 不均衡의 역할을 처음으로 指摘한 것은 Dyhr-Nielsen and Sorensen(1970)이다. 그들은 水深方向으로 積分된 運動量 플럭스와 平均水位 上昇에 起因하는 一定壓力 사이에 不均衡이 存在하고, 이 不均衡이 碎波帶內에서 강하게 發達하여 쇄파대내에서 鉛直循環에 대한 誘發力(driving force)으로 作用한다고 생각 하였다. 運動量 플럭스의 局部的인 不均衡에 대한 要因 중의 하나는 잘 알려진 바와 같이 水平 水粒子 流速과 水面變動 사이에 位相差가 있으므로 波谷 보다 위 부분에 非回轉 波動運動으로 인한 運動量 플럭스가 存在하기 때문이다. 두 번째 原因은 準 定常 狀態인 段波形 碎波에 水平渦(horizontal roller)가 存在하기 때문이다. 海濱 變形過程에 있어서 底面返流(undertow)의 存在는 오래전 부터 確認 되어 왔다. 특히 폭풍시 多量의 모래가 移動되어 形成되는 소위 'break bar' 現象도 이 흐름에 起因 된다고 報告 되고 있다. Johnson(1919)은 이 흐름을 沿岸流에 對比하여, Shore-normal current라고 定義 하고 있다. 底面返流에 대한 現地觀測을 처음 試圖한 것은 Inman and Quin(1952)이고, 그후 Bird(1968), Sallenger(1983)등의 研究가 있다. Undertow에 관한 實驗的 研究는 Bagnold(1940)를 필두로, Raman 들(1974), Wang들(1982)이 있고 最近 Longuet-Higgins(1983), Hausen and Svendsen(1984)등의 研究가 있다. 앞서 提及한 바와 같이 1970년 Dyhr-Nielsen and Sorensen에 의해서 底面返流의 發生기구에 대한 定性的인 解析이 행해지고, Dally(1980)에 의해서 처음으로 理論적으로 다루어 졌다. 그 밖에 Dally and Dean(1984)은 線型 波動 理論을 適用하여 undertow를 다루고 있으며, Svendsen(1984)은 碎波後의 波의 形狀을 水平渦(horizontal roller)를

包含하는 準 定常狀態의 段波로 假定 하고, 水平渦의 下部에서는 一定流速  $u_0$ 를 갖고, 그 上部에서는 波速  $C$ 를 갖는 流速分布로 假定하여 底面返流를 取扱하고 있다.

#### 4. 低周波數帶의 波

沿岸域에는 수심초에서 수분이나 되는 長周期의 波, 즉 低周波數帶의 波가 存在한다고 알려졌는데, Munk(1949)는 이 現象을 'surf beat'라고 이름을 붙였다. surf beat는 一般的으로 30초에서 5분사이의 週期를 갖는다. 沿岸域 水理에 있어서 低周波數帶의 波의 舉動은 海濱 變形過程에 있어서 風波에 비해 상당히 規模가 큰 bar를 形成 시킨다고 하는데, 그 重要性이 있다고 보겠다.

이들 重要性은 計測된 水位變動이나 水粒子 速度의 스펙트럼 解析을 통해 直接的으로 나타난다. 이들 結果를 分析해 보면 高 周波數帶의 入射波의 舉動보다는 低周波數帶의 波의 舉動이 큰 意味를 갖고, 훨씬 탁월하게 寄與하고 있는 것을 보이고 있다. 이러한 탁월성은 淺海에서 더욱 크게 나타나고 入射波高가 클 수록 그것도 또한 增加한다. 低周波數帶의 波의 스펙트럼에 대해서 研究를 하게된 重要한 동기중 하나는 沿岸域 漂砂와 海岸變形の 發達過程에 있어서 低周波數帶의 波의 역할에 대한 理解를 돕기 위해서 였다. Bowen & Inman(1971)은 눈섭모양의 bar의 形成에 대해서는 重複 edge波에 의해서 說明이 可能하고, 線形 bar는 進行性 edge波에 의해 形成된다고 報告하고 있다. 典型的인 海岸에서 入射波가 碎波하게되면, 汀線을 향해서 波의 振幅은 減少되는데 반해, 低周波數帶의 波는 碎波되지 않고, 오히려 汀線을 향하여 增加하는 傾向이 있기 때문에 上記한 傾向들이 나타나는 것이다. 쇄파대내에서 入射波에 의해 誘發되는 低周波數帶의 波의 舉動에 대해서는 定常運動에 비해서 모델화 하기도 어렵고, 豫測하기도 어렵

다. 沿岸域에 存在 가능한 多様な 形態의 低周波數帶의 波의 擧動에 對한 理論的인 모델화가 상당히 進展을 보이고 있음에도 불구하고, 아직 주어진 海底地形과 入射波에 對해 실제 低周波數帶의 波의 擧動에 對한 推定을 만족하게 할 만한 모델은 아직 없다. 이 低周波數帶의 代表的인 波로서는 edge波를 들 수 있는데, edge波는 傾斜海岸上을 傳播하는 表面 重力波로서 그 에너지가 屈折에 의해 沿岸域에 制限된 波를 말한다. 運動 方程式에 對한 edge波의 解는 海底 形狀에 對해 다소 制限된 것들이 있는데, 이 중 가장 普遍的으로 利用되는 것은 一定傾斜 海底를 갖는 海岸에 對해서 구한 Eckart(1951)의 解이다. 低周波數帶의 波에 對한 理論的인 研究는 2계열로 大別 될 수 있다. 初期 理論에서는 沿岸方向으로서의 週期성을 排除한 2차원적인 強制波를 다루었다. 이 波는 波가 碎波 될때, 外海로 향해 傳播되는 波로 變한다. 그리고 海岸方向과 外海 方向으로 傳播하는 成分이 합해지면 波의 패턴은 重複波 成分을 갖게 된다. 上記한 理論은 波의 沿岸 方向의 週期성을 說明하지 못한다. 뒤에 入射波의 波動場에 있어서 沿岸方向의 週期성 까지도 考慮한 3차원적인 解釋이 Gallagher(1971)에 의해서 처음으로 試圖 되었고, 그 뒤 Bowen & Guza(1978)에 의해서 이 理論은 더욱 考察 되었는데, 그들은 實驗結果를 利用해서 Gallagher의 理論에 對한 重要性을 認定하고, 또한 'surf beat'는 本質的으로 edge波 現象일 수 있다고 結論을 내렸다.

## 5. 結 言

碎波現象이 海岸工學上 極히 重要하다고 하는 점에 對해서는 누구도 認識을 같이 하리라 본다. 이러한 면에서 碎波는 오래전 부터 海岸 工學者의 研究의 對象이 되어 理論的 및 實驗的 研究가 끊임없이 행해져 왔지만, 碎波後의 波를 적절히 表現할 수 있는 波動理論이 存在하지 않

는다고 하는 점 때문에 取扱에 問題點이 많다. 특히 大部分의 海岸 構造物이 碎波帶內에 築造되는 경우가 많으므로 碎波帶內의 諸般 水理現象은 適確히 豫測되고 究明되어야 하겠다. 碎波帶內의 諸般 水理現象을 理解하기 위해서는 보다 細密한 考察과 理論的인 說明이 必要하겠지만, 本稿에서는 紙面 關係上 極히 一般的이고, 概論的인 記述에만 局限 하였다. 보다 總論的인 說明은 다음機會로 미룬다.

## 참고문헌

- 1) Bagnold, R.A., (1940) Beach Formation by Waves; Some Model Experiments in a Wave Tank. J. Inst. Civ. Eng., 15:27-52.
- 2) Bird, E.C.F., (1969) Coasts. M.I.T. Press, Cambridge, Mass., xiv + 246 pp.
- 3) Bowen, A.J., (1969) "The Generation of Longshore Currents on a Plane Beach", Jour of Mar. Res, Vol.27, 1969, pp.206-215.
- 4) Bowen, A.J., and R.T. Guza, Edge Waves and Surf Beat. J. Geophys. Res, 83, (1978), 1978.)
- 5) Bowen, A.J., and D.L. Inman, Edge Waves and Crescentic Bars, J. Geophys. Res., 76, 8662-8671, 1971.
- 6) Bowen, A.J., Inman, D.L., and Simons, V.P., "Wave 'Set-Down' and 'Set-up'", J. Geophys. Res., Vol.73, No.8, 1968, pp.2569-2577.
- 7) Dally, W.R., 1980. A Numerical Model for Beach Profile Evolution. Master's Thesis, Univ. of Delaware, Dep. Civ. Eng.
- 8) Dally, W.R. and Dean, R.G., 1984. Suspended Sediment Transport and Beach Profile Evolution. J. Waterway, Port, Coastal Ocean Eng., ASCE, 110(1):pp.

- 15-33
- 9) Dean, R.G., "Stream Function Representation of Nonlinear Ocean Waves," *J.Geophys.Res.*, Vol.70, 1965, pp.4561-4572.
- 10) Dolata, L.F., and Rosenthal, W., "Wave Set-Up and Wave Induced Currents in Coastal Zones", *J.Geophys.Res.*, Vol.80, No.C2, 1984, pp.1973-1982.
- 11) Dyhr-Nielson, M. and Sorensen, T., 1970. Sand Transport Phenomena on Coasts with Bars. Proc. 12th Coastal Eng. Conf., Washington, D.C., Chap. 54, pp.855-866.
- 12) Eckart, C., Surface Waves on Water of Variable Depth, Wave Rep. 100. Scripps Inst. of Oceanogr., Univ. of Calif., La Jolla, 1951.
- 13) Gallagher, B., Generation of Surf Beat by Non-linear Wave Interaction, *J. Fluid Mech.*, 49, 1-20, 1971.
- 14) Guza, R.T., and Thornton, E.B., "Wave Set-Up on A Natural Beach", *J. Geophys. Res.*, Vol. 86, No. C5, 1981, pp. 4133-4137.
- 15) Hansen, J.B. and Svendsen, I.A., 1984. A Theoretical and Experimental Study of Undertow. Proc. 19th Conf. Coastal Eng., Houston, pp. 2246-2262.
- 16) 日野幹雄, 栢柳正之, "Wave set-down, set-up および 水粒子 軌道速度の推定における Dean の流関数法の適用性," 第25回海岸工学講演會論文集, 1987, pp. 18-22.
- 17) Horikawa, K., and Kuo, T., "A Study on Wave Transformation inside Surf Zone", Proc. of 10th Conf. on Coastal Eng., ASCE, Vol. 1, 1966, pp. 217-233.
- 18) Inman, D.L. and Quinn, W.H., 1952. Currents in the Surf Zone. Proc. 2nd Conf. Coastal Eng., Council on Wave Research, Berkeley, Calif., pp. 24-36.
- 19) 磁部雅彦, 福田直利, 堀川清司, "碎波帯における流速場に関する二次元実験", 第26回海岸工学講演會論文集, 1979, pp. 41-45.
- 20) 岩田好一郎, 淺海波の變形機構と波浪制御に関する基礎的研究, 大板大學博士學位論文, 1976
- 21) Johns, B., "The Modeling of the Approach of Bores to a Shoreline," *Coastal Eng.*, 3, 1980, pp. 207-219.
- 22) Johns, B., and Jefferson, R.T., "The Numerical Modeling of Surface Wave Propagation in the surf Zone," *J of Phys. Oceanogr.*, Vol. 10, July, 1980, pp. 1061-1069.
- 23) Johnson, D.W., 1919. Shore Processes and Shore Line Development. Facsimile Reproduction 1972. Hafner publishing Company, New York.
- 24) Longuet-Higgins, M.S., and R.W. Stewart, 1962: Radiation Stress and Mass Transport in Gravity Waves, with Application, to "Surf Beat", *J. Fluid Mech.*, Vol. 13, pp. 481-504.
- 25) Longuet-Higgins, M.S. and Stewart R.W., "Radiation Stress in Water Waves: A Physical Discussion, with Applications", *Deep Sea Research*, Vol. 11, 1964, pp. 529-562.
- 26) Longuet-Higgins, M.S., "Longshore Current Generated by Obliquely Incident Sea Waves 1 and 2", *J. Geophys. Res.*, Vol. 75, No. 33, 1970, pp. 6778-6801.
- 27) Longuet-Higgins, M.S., 1983. Peristaltic Pumping in Water. *J. Fluid Mech.*, 137: 393-409.
- 28) Munk, W.H., Surf Beats, "Eos Trans. AGU,



30. 849-854, 1949.
- 29) Noda, E.K.: Wave Induced Nearshore Circulation, Jour. Geophys. Res., Vol. 79, No. 27, 1974. pp. 4097-4106.
- 30) Phillips, O.M., The Dynamics of the Upper Oceans, Cambridge University Press, 1966, pp. 261.
- 31) Putnam, J.A., Munk, W.H., Trayler, M.A., "The Prediction of Longshore Currents," Trans. of A.G.U, Vol.30.No 3, 1949, pp. 337-345.
- 32) Raman, H., Sethuraman, V. and Muralikrishna, I.V., 1974. Velocity Measurement in Waves Using Strain Gage Technique, Int. Symp. on Ocean Wave Meas. and Analysis, ASCE, New York, Vol. 1, pp.817-835.
- 33) Sallenger, A.H., Howard, P.C., Fletcher, C.H. and Howard, P.A., 1983. A System for Measuring Bottom Profile, Waves and Currents in the High-energy Nearshore Environment, Mar. Geol., 51:63-76.
- 34) 佐佐木民雄, 1978: 海濱流の数値予測, 第25回海岸工学講演會, 海濱變形予測に関するシンポジウム, pp.1-9.
- 35) Shepard, F.P., K.O. Emery, and E.C. LaFond, 1941: Rip Currents: A Process of Geological Importance, J. Geol., Vol. 49, No. 4, pp. 337-369.
- 36) Stive, M.J.F. and Wind, H.G., "A Study of Radiation Stress and Set-up in the Nearshore Region," Coastal Eng., Vol. 6, 1982, pp. 1-25
- 37) Svendsen, I.A. 1984. Mass Flux and Undertow in a Surf Zone, Coastal Eng., 8:347-365.
- 38) Van Dorn, G.W.G., "Set-up and in Shoaling Breakers," Proc. of 15th Conf. on Coastal Eng., ASCE, 1976, pp. 738-751.
- 39) Wang, H., Sunamura, T. and Hwang, P.A., 1982. Drift Velocity at the Wave Breaking Point, Coastal Eng., 6:121-150.