

模型解析의 理論과 應用(第 I 報)

— 基本概念과 物理的 模型 —

朴 承 禹*

模型(model)이란 外部로 부터의 자극·조절·처리 등에 따른 實體 또는 實物 등 所謂 原型(proto-type)의 反應·結果·性能 등을 定性的·定量的으로 分析·評價할 目的으로 構成된 目的物·行爲·數式 또는 그밖의 情報手段을 稱한다. 河川과 水理構造物 등의 水理模型(이를 縮尺模型이라 부른다)은 對象物이 여러 條件에 따라 어떻게 作動하는 가를 究明할 目的으로 設置한 物理的 目的物이다. 軍의 機動訓練은 實戰 模擬實驗의 한 方法으로 전술상황에 대한 行爲를 재현하는 例이다. 流域의 降雨—流出關係의 分析에서는 數式 또는 數值解析法 등을 利用하는 數學的 模型 등이 活用되고 있다. 이와같이 模型은 여러가지의 形態와 相異한 特性을 再現하는 道具로서 광범위하게 利用되고 있다.

模型의 目的은 무엇인가? 그 첫째는 原型을 計劃에 따라 實現시키거나, 實物 크기로 設計·製作 하였을 때 發生될 수 있는 問題點이나 事故 등과 같은 위험을 줄이는 일이다. 軍의 機動訓練을 위하여 實戰을 試圖할 수는 없는 것이다. 或은 企業의 效率化를 위한 適正規模의 人員決定과 같은 問題를 생각해 보자. 2,000명의 社員을 갖는 會社에서 그 規模를 1,200명으로 減한다음 다시 200명의 社員이 不足된다는 結論을 얻는 등의 試行錯誤를 해서는 안될 것이다. 後者の 경우는 적절한 數學的 模型을 適用하므로써 會社라는 原型의 特徵을 分析할 수 있는 것이다.

模型解析의 또다른 目的은 實物을 直接 製作하는 經費를 節約하는 데 있겠다. 港口施設의 하나인 防波堤의 形式과 位置의 決定에 關하여 생각하여 보자. 防波堤는 外海로 부터 接近하는 波에너지를 흡수하므로써 港口內的 波를 줄이고 그 公평형상등으

로 선박이 받게 되는 物理的 環境의 改善을 目的으로 設置되어야 한다. 잘 計劃된 水理模型實驗은 이와같은 目的을 達成할 수 있는 防波堤의 位置나 規模를 決定하므로써 단순한 경험에 의존하는 方法으로 인하여 그릇된 位置나 規模 등의 試行錯誤가 빚을 지도 모를 工事費의 浪費를 억제할 수 있는 것이다.

以上에서 살펴본 바와 같이 模型은 여러가지의 形態가 可能할 뿐만아니라 相異한 目的에 適用할 수 있다. 즉 模型은 原型과 그 外觀의 形態가 類似한 경우, 特徵이 類似한 경우, 그밖에도 理論的 數學的으로 該當 模型의 動作原理를 再現할 수도 있다.

본 講座에서는 模型의 種類와 그 分類, 模型의 特徵, 模型의 應用과 制限 등에 關하여 紹介하도록 한다. 講座는 總 4회로 計劃하고 있으며 第1報에서는 物理的 模型에 關하여 다룬다. 第2報는 決定論的 接近方法을 利用한 數學的 模型을, 第3報에서는 推計論的 模型을, 그리고 第4報는 數式을 利用하지 않은 模型 등에 關하여 整理할 豫定이다.

I. 模型의 分類

模型化(modeling)은 原型의 特徵을 分析할 目的으로 原型을 概略化하는 過程이다(Chow, 1972). 原型은 항상 模型보다 複雜하며 이를 模型化하여 表示하거나 製作할 수 있도록 하려면 어떤 假定을 하지 않으면 안된다. 이러한 假定에 따라 模型의 分類가 可能하다.

模型은 크게 두가지로 區分된다. 그 하나는 模型이 그 對象이 되는 原型의 物理的 特徵을 어느 程度 갖추고 있는 것, 즉 物理的 模型(physical models)이다. 物理的 模型에는 縮尺模型(scale model), 아날로그 模型(analogue model), 그리고 模擬模型(simulation model) 등이 해당된다.

縮尺模型은 原型과 外觀의 物理的 近似的 形態를 갖

*서울대학교 農科大學

는 모델로 가장 간단한形式이 된다. 水理試驗場 등에서 活用되는 河川·河口 또는 構造物 등의 水理模型이 그 例이다.

아나로그 모델은 原型의 特性和 類似한 關係를 가지며 測定이나 透視가 용이한 量(또는 物質)을 利用하므로써 原型의 特性을 再現하는 模型이다. 잘 알려진 Hele-Shaw 模型은 바로 아나로그 模型이며, 두 平行版 사이에 粘性液體의 움직임으로서 2次元 斷面의 침윤흐름을 보여주는 것이다. 많은 電子 아나로그 模型 등이 地表水와 地下水의 흐름 특성을 分析하는 데 活用되고 있는데 이들은 電子와 물의 흐름 사이의 同質性을 利用하는 것이다.

模擬模型은 原型과 같은 實相을 갖는 代身에 그 本質의인 特性을 保存하는 模型이다. 實際의 現象을 物理的으로 再現할 수 없으며 原型의 作動特性을 再現할 수 있는 內容으로 電算機를 利用한 模擬發生技法을 意味한다.

두번째 種類의 模型은 理論的 模型(theoretical models) 또는 數學的 模型(mathematical models) 등으로 分類되는 概括的 模型(abstract models)이다. 概括的 模型은 數值 또는 數式 등을 利用하여 理論的으로 原型의 特徵을 表示하는 模型이다. 이 模型 등은 原型과 그 物理的 特徵이 서로 닮거나 비슷한 것이 아니며 단지 그 시스템의 特性을 數式 등으로 表示하여 概括的으로 表示한다. 蒸發散量의 推定公式인 Penman式은 이러한 例가 되겠다. 한편 概括的 模型은 다시 決定論的 模型(deterministic models)와 非決定論的 模型(indeterministic models)으로 區分된다. 이들 模型 등에 관한 詳細한 內容 등은 第 2, 3報 등에서 紹介된다.

그림. 1은 以上の 模型의 分類를 要約하여 준다.



그림. 1. 模型의 分類

II. 縮尺模型

앞서 考察한 物理的 模型 중 農業土木分野의 實務와 關聯하여 가장 빈번히 活用되는 技法의 하나는 縮尺模型이 되겠다. 縮尺模型은 흔히 水理模型으로 알려져 왔으나 더 精確히는 物理的 水理模型이 된다. 水理模型은 數值解法을 이용하는 소위 計算動水力學(computational hydrodynamics) 分野도 포

함하기 때문이다. 以下에서는 縮尺水理模型을 단순히 水理模型이라 稱하기로 한다.

水理模型은 水理構造物이나 河川의 制水工 등의 設計에 活用된다. 水理模型은 該當 水理構造物의 設計를 검토하거나 變更을 시도하기 전 그 機能과 水理的 特徵을 分析할 目的으로 實施되는 試驗의 하나로 거의 日常的인 內容으로 定着되어 가는 추세에 있다. 특히 水理構造物은 그 水理的 特性이 잘 알려진 극히 단순한 경우를 제외하면 흐름의 특성이 3次元이다. 곧 一般公式을 利用한 水理解析이 不可能하게 된다. 따라서, 2次元 水路를 제외한 거의 모든 水理構造物의 設計에서는 水理模型試驗의 可能性을 檢討하지 않으면 안될 것이다.

水理模型은 原型과 模型의 幾何的 比 즉 縮尺과 模型의 材料에 따라서 다음 4가지로 구분된다. 즉 ① 非歪曲 固定床 模型(undistorted rigid boundary model), ② 歪曲 固定床 模型(distorted fixed boundary model), ③ 非歪曲 可動床 模型(undistorted movable bed model), 그리고 ④ 歪曲 可動床 模型(distorted movable bed model)이 그것이다. 歪曲模型은 水平과 垂直縮尺 등의 幾何的 縮尺이 서로 相異한 경우이다. 固定床 模型은 河川이나 水路의 河床材料를 콘크리트 등으로 축조한 模型으로 흐름에 따른 境界의 變化를 考慮하지 않는 경우이다.

水理模型의 歷史와 基本理論, 그리고 그 應用 등을 整理하면 다음과 같다.

가. 歷史

水理模型에 관한 記錄은 16세기의 레오날드 다빈치에 의한 웨어 등의 流量觀測에 관한 試驗이 최초로 인 것으로 알려져 있다(Shen, 1979). 다만 그가 실제로 水理模型을 최초로 利用한 것인지는 疑問이나 이미 觀測의 必要性 등을 強調한 事實이 있다. 19世紀의 水理學者로서 Dubat(1816)과 Weisbach(1855) 등도 水理解析에서 實驗의 方法 등을 저술하였다. 最初의 大規模 河川模型은 西獨 Dresden 河川水理實驗所에서 1913년에 建設되었다. 以後 오늘날까지 수많은 水理模型이 건설되어 온 것이다.

우리나라의 水理模型試驗所은 1954년에 內務部 土木試驗所에서 부터 비롯되었다. 한편, 農業土木分野의 水理試驗場의 역사는 1958년 ICA技術원조 사업의 일환으로 來韓한 水利諮問團의 建議에 따라 設置된 水理實驗場으로 출발하여 최근 UNDP의 지원에 依한 農業土木試驗研究所 水理試驗場으로 그

施設이나 裝備등이 확장되기에 이르렀다. 이러한 條件의 完備는 과거 어느때보다 水理模型의 應用이 손쉬워진 것으로 評목할 만한 發展이 아닐 수 없다.

나. 相似法則

水理模型의 主要機能은 原型과 相似의인 水理現象을 模型에서 再現하는 것이다. 模型의 水理現象을 觀測하므로써 그 結果를 原型의 상황에 利用하고자 하는 것이다. 이를 위하여는 原型自體가 模型과 서로 相似의 關係를 갖지 않으면 안된다.

模型과 原型의 相似關係를 相似法則이라고 한다. 模型의 相似性은 다음의 세가지로 구성된다.

- ① 幾何的 相似性(geometric similarity)
 - ② 動的 相似性(kinematic similarity)
 - ③ 力學的 相似性(dynamic similarity)이 그것이다
- 幾何的 相似性은 模型의 모든 幾何的 特性이 該當 原型의 그것과 相似關係를 만족하는 것이다. 즉 모형과 원형의 길이의 비가 일정하도록 하는 것이다. 動的 相似性은 原型과 模型의 速度·加速度등과 같은 動的 物理量이 相互 相似法則을 만족함을 의미하며, 力學的 相似性은 力學的 物理量, 즉 힘과 質量등에 관한 條件을 의미한다.

模型의 相似性은 模型의 크기결정등의 設計에는 물론 實驗과 그 結果의 應用에 직접적인 영향을 미친다. 模型과 原型에서의 흐름특성이 相似의이 되도록 하는 것이 必要하며 相似法則의 基準으로부터 決定된다.

相似法則의 基準은 2가지 方法으로 부터 결정된다. 그하나를 實驗對象의 水理現象에 직접적으로 영향을 미치는 物理的 因子를 檢討하므로써 定義되며, 다른 方法은 흐름의 基本方程式으로 부터 決定된다. 前者를 物理的 推論(physical reasoning), 後者를 檢査分析法(inspectional analysis)라고 부를 수 있겠다. 檢査分析法은 動水力學的 應用에 적합하며, 物理的 推論은 流砂移動과 相關한 實驗에 利用될 수 있겠다.

다. 模型縮尺

模型의 相似法則이 決定되면 다음 문제는 模型의 크기, 즉 模型과 原型과의 縮尺比를 決定하는 것이다. 여기서 縮尺은 模型과 原型사이의 길이, 시간, 속도, 유량, 힘등의 比率를 말한다. 이러한 縮尺은 相似法則에 따라 서로 종속적 關係를 갖기 때문에 이중 어느하나가 選擇되어지면 其他變數등은 自動

表-1. 水理模型의 縮尺決定

Parameter	Dimension	Scale Ratios		
		Reynolds	Froude	Weber
Volume	L ³	L ³	L ³	L ³
Area	L ²	L ²	L ²	L ²
Length	L	L	L	L
Discharge	L ³ /T	$L\mu/\rho$	$L^{3/2}(\frac{\gamma}{\rho})^{1/2}$	$L^{3/2}(\frac{\sigma}{\rho})^{1/2}$
Acceleration	L/T ²	μ^2/ρ^2L^3	γ/ρ	$\sigma/L^2\rho$
Velocity	L/T	$\mu/L\rho$	$(L\gamma/\rho)^{1/2}$	$(\sigma/L\rho)^{1/2}$
Time	T	$\rho L^2/\mu$	$(L\rho/\gamma)^{1/2}$	$(L^3\rho/\sigma)^{1/2}$
Power	$\frac{ML^2}{T^3}$ =FL/T	$\mu^3/L\rho^3$	$\frac{L^{1/2}\gamma^{3/2}}{\rho^{1/2}}$	$\sigma^{3/2}(L/\rho)^{1/2}$
Energy and work	$\frac{ML^2}{T^2}$ =FL	$L\mu^2/\rho$	$L^4\gamma$	$L^2\sigma$
Impulse and momentum	ML/T	$L^3\mu$	$L^{1/2}(\rho\gamma)^{1/2}$	$L^{5/2}(\rho\sigma)^{1/2}$
Pressure	$\frac{M}{LT^2}$ =F/L ²	$\mu^2/L^2\rho$	$L\gamma$	σ/L
Specific weight	$\frac{M}{L^3T^2}$ =F/L ³	$\mu^2/L^3\rho$	γ	σ/L^2
Density	M/L ³	ρ	ρ	ρ
Force	ML/T ² =F	μ^2/ρ	$L^3\gamma$	$L\sigma$
Mass	M	$L^3\rho$	$L^3\rho$	$L^3\rho$

的으로 決定되어진다.

表 1은 여러가치의 相似法則에 따른 固定床 水理模型의 縮尺을 보여준다. 여기서, Reynolds數, Froude數, 그리고 Weber數등을 相似法則으로 하였을 때 길이, 면적, 체적, 유량등 15개의 變數에 관한 縮尺의 종속關係를 보여준다. 하나의 變數, 例로서 길이의 비가 決定되었을 경우 其他의 物理量 등은 表 1의 結果로서 推定됨을 意味한다.

라. 歪曲縮尺

模型의 縮尺의 決定時 水平距離縮尺을 크게한 경우 表-1과 같이 同一 縮尺에 의하면 垂直縮尺이 커지게 되어 水深등의 變數가 너무 작게되는 수가 있겠다. 이경우는 垂直縮尺을 水平縮尺과 다른값(주로 작은 값을 취하게 된다)을 使用하므로써 縮尺이 相異한 模型으로 決定하게 되는 데 이를 앞서 言及한 바와 같이 歪曲模型이라 한다. 歪曲模型의 例는 1984년에 設置된 바 있는 錦江河口둑 細部水理模型(그림 2 參照)로서 同模型의 水平縮尺은 1/250, 直縮尺은 1/75로 하였다(農業振興公社 1984).

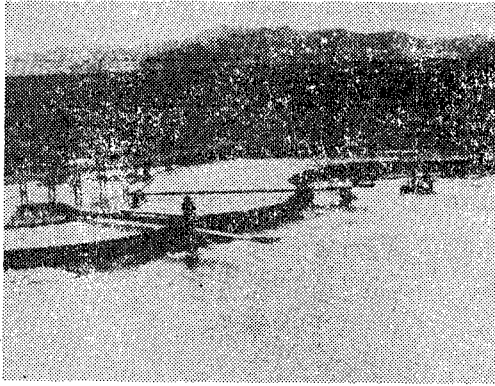


그림. 2. 錦江河口 細部 水理模型 部分圖
(본 모델은 農業振興公社 水理試驗場이
設置되어 있다)

마. 模型의 檢證

水理模型은 그 크기가 原型보다 縮少되는 例가 많다. 크기의 差異로 因하여 原型의 水理의 特性을 相似率에 따라 再現하는데 어려움이 있을 수 있다. 그 한 例는 表面의 粗度狀態이다. 河川의 表面 粗度狀態를 길이 縮尺과 同一하게 再現한다는 것은 만약 不可能한 것이 아니라도 극히 어려운 일이 아닐 수 없다. 이와 같은 非相似的인 因子로 因하여 模型의 水理現象은 原型의 그것과 相似性을 적절히 比較하여야 한다. 필요하다면 相似法則을 充足시킬 수 있도록 模型을 調節하지 않으면 안된다.

模型의 水理現象과 原型의 그것과를 比較 調節하는 과정을 模型의 檢證이라고 한다. 模型의 檢證은 일정한 規則에 따라 實施하도록 한다. 그것은 다음의 內容을 포함하는 것이 된다.

첫째, 模型의 檢證에서는 理論의 縮尺과 實驗結果와를 比較하도록 한다. 만약, 理論과 實測值가 相異하다면 그 理由를 分明히 함은 물론 必要한 補正을 實施한다. 여기서, 補正은 物理的 手段을 통한 模型設備의 補完하는 것은 물론이요 必要하다면 補正係數의 活用도 바람직하겠다. 그러나, 무분별한 補正值의 適用은 비단 水理模型에서 뿐만아니라 餘他의 模型에서도 그 妥當性을 충분히 검토하여야 할 것이다.

둘째, 模型의 檢證은 서로다른 몇개의 水理의 條件에 대하여 實施되어야 한다. 不特定한 現象에 대하여 模型과 原型의 比較檢討가 實施되었다 하더라도 다른 條件에 대하여도 成立하는가를 비교한다. 例로서, 河川水理模型의 檢證에서는 洪水位·平水

位, 그리고 갈수위등의 조건에 대하여 檢證하는 것이 된다.

模型의 檢證은 많은 努力이 要求된다. 무엇보다도 原型의 水理現象에 관한 正確한 資料가 要求되며 이들 相似率에 따라 환산하여야 한다. 河川模型과 같이 일정 區間을 模擬하기 위하여는 그 上下流의 條件, 즉 境界條件의 時間的 變化를 再現하여야 할 것이다. 따라서, 模型의 檢證은 數個月, 數年이 걸리는 것이 常例이다. 그러나, 模型은 檢證되지 않은 狀態에서 그 結果를 適用하는 것은 위험이 뒤따르게 됨을 잊어서는 안될 것이다. 그러던 模型檢證의 努力이 과연 妥當할 것인가. 모형의 제작과 검증, 그리고 실험을 통한 수리구조물의 설계 및 시공은 그 타당성이 매우 높은 것으로 검토된 바 있다. 안다는 것의 가치는 모르기 때문에 浪費하거나 혹은 위험한 것에 따른 損失을 고려하면 大略 投資의 約 20배에 該當하는 것으로 評價되기 때문이다 (Solomon, 1976).

水理模型의 實用性은 그 模型의 目的과 模型理論의 理解程度등에 左右된다. 경우에 따라서는 試驗目的과 부합하지 않은 模型을 設置한 例를 보게되는데 이러한 模型의 結果는 實用化가 어려운 것은 自明하다. 마찬가지로 試驗目的이 分明하다고 하여도 模型理論을 無視한 結果는 無意味한 浪費가 아닐 수 없겠다.

본 講座를 整理하면서 筆者의 所見으로서 매우 위험하다고 생각되는 模型에 관한 두가지의 물이해를 지적해 두고자 한다. 그 하나는 模型의 必要性을 認定하지 않는 경우로서 이등은 模型實驗 無用論을 믿고 있거나, 或은 現實의인 理由를 들어 模型의 活用을 기피하는 것이다. 그러나, 模型實驗 없이는 水理現象에 관한 正確한 解析이 不可能한 點을 생각한다면 이와같은 態度는 엄청난 浪費를 許容하는 것이 아닐 수 없겠다.

模型에 관한 두번째의 물이해는 模型을 완벽한 것으로 믿는 것이다. 그 結果, 模型의 目的을 無視하고 지나친 투자를 하게 될 것이며 結果적으로 必要以上の 費用의 支出이 있기 마련이다.

따라서, 筆者는 模型의 理論과 應用性등에 관한 보다 的確한 理解가 절실히 必要하다고 提議하고자 한다. 특히, 우리들은 점차 模型의 時代로 한발자욱씩 가고 있음에야!

参 考 文 獻

1. Chow, V.T. 1972. Hydrologic modeling. The 7th J.R. Freeman memorial lecture, Proc. BSCE.
2. Einstein, H.A. and N. Chien, 1956. Similarity of distorted river models with movable beds. Trans. ASCE. Vol.121, pp.440-457.
3. Law, A.M. and W.D. Kelton, 1982. Simulation modeling and analysis. McGraw-Hill Book Co., N.Y., 400p.
4. Novak, P. and J. Cabelka, 1981. Models in hydraulic engineering. Physical principles and design applications. Pitman Advanced Publishing Program, Boston, 459p.
5. Shen, H.W., 1979. Principles of physical modeling. In. H.W. Shen (ed.), Modeling of Rivers, Chap. 6, John Wiley & Sons, Inc., N.Y. 29p.
6. Solomon, S.I., 1976. Worth of data. In H. W. Shen(ed.), Stochastic approaches to water resources. Chap. 13, H.W. Shen, Fort Collins.
7. 農業振興公社, 1984. 錦江河口導 設置로 因한 河川形態變化 研究(Ⅱ): 假締切工程에 따른 水理特性變化, 서울大 農大附屬 農業開發研究所, 水原 pp.307-422.