

이동상 하천모형이론의 수립 및 적용

Study of Similarity Theory of River Models with Movable Beds and Its Application

서 일 원* / 정 태 성** / 김 영 한***

Seo, Il Won / Cheong, Tae Sung / Kim, Young Han

Abstract

A relaxed similarity theory which can be applied to river models with movable beds is established by modifying existing theory by Einstein and Chien(1954). Experimental data collected from river models with movable beds were used to evaluate the applicability of the proposed theory. Effects of similarity of flow, ΔF_{AM} , and similarity of sediment movement, ΔF_s , were examined by analyzing the behaviour of total river-bed change. The results show that the smaller ΔF_{AM} or ΔF_s is, respectively, the larger total sedimentation is. The modified similarity theory established in this study would be useful and practical whenever it is impossible or very difficult to satisfy strict theoretical requirements concerning the river model experiments with movable beds.

Keywords: river model, similarity of flow, similarity of sediment movement, sediment transport, river-bed change

요 지

본 연구에서는 Einstein과 Chien(1954)의 이론을 토대로 하여 하천의 모형연구에 적합한 이동상 모형이론을 수립하였다. 수립된 모형이론에 근거하여 제작된 하천모형으로부터 수집된 실험자료를 이용하여 모형이론의 적용성을 검토하였다. 흐름의 상사(ΔF_{AM})와 유사이동의 상사(ΔF_s)의 변화에 따른 총 하상변동량의 거동을 비교함으로써 적용성을 검토하였다. 그 결과 ΔF_{AM} 의 값 또는 ΔF_s 의 값이 작을 수록 총 하상변동량은 크게 발생하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 수립된 모형이론은 각 모형이론의 제한조건을 완화한 것으로서 실험장소 또는 모형사의 제한으로 모형이론을 이상적으로 만족시킬 수 없는 경우에 유용하게 적용할 수 있을 것이다.

핵심어 : 하천모형, 흐름의 상사, 유사이동의 상사, 유사이동, 하상변동

* 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea

** 서울대학교 공과대학 토목공학과 박사수료

Doctoral Candidate, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea

*** 서울대학교 공학연구소 연구원

Researcher, Research Inst. of Engrg. and Science, Seoul National Univ., Seoul 151-742, Korea

1. 서 론

이동상 하천모형은 물의 흐름, 유사이동, 유사량, 그리고 하상변동의 상사법칙이 모두 만족되도록 제작되어야 한다. Einstein과 Chien(1954)의 이론 등 기존 모형이론의 경우, 현실적으로 적용하기가 어렵거나, 적용한다 하더라도 모형사의 입경과 비중을 독립적으로 선정할 수 없는 등의 문제점이 있으므로 모형이론을 정확히 만족시킨 상태로 모형실험을 수행하는 것은 매우 어렵다. 이러한 문제점을 보완하고 실제 하천에서의 흐름을 재현하는 하천모형을 제작하기 위하여 지금까지 경험적 방법을 이용한 모형이론 연구가 많이 이루어져 왔다.

Einstein과 Chien(1954)은 이동상 하천모형에 대한 일반적인 모형이론을 수립하였다. 이들의 이론은 흐름, 유사이동, 그리고 하상변동의 물리적 과정을 모두 포함하는 것으로서 흐름의 상사조건으로 Manning공식 및 Froude상사를 채택하고 있으며, 유사이동의 상사에는 전단강도, 소류사 이송강도, 그리고 난류경계층의 상사를 포함시키고 있다. 또한 하상변동의 상사조건으로서 총유사량, 유사시간 등을 포함하고 있다. 따라서 현실적으로 이러한 상사항목들을 모두 만족시키기는 매우 힘든 일이다. Henderson(1966)은 Einstein과 Chien(1954) 이론 중 가장 핵심적인 요소만을 고려한 단순화된 형태의 이동상 하천모형이론을 제시하였다. Novak과 Čábelka(1981)는 Einstein과 Chien(1954)의 이론을 기초로 하여 경험적 연구를 통해서 입자 Reynolds수의 상사조건을 완화하는 등 기존의 경험적 연구 성과들을 반영하여 보다 완화된 이동상 하천모형이론을 수립하였다.

건설부 국립건설시험소(1983)는 흐름의 저항, 유사량, 그리고 유사이동의 상사성을 만족시키기 위하여 한계소류력, 침강속도, 그리고 유사시간 등을 원형과 모형에서 일치하도록 하는 이동상 모형이론을 적용하여 한강하류부에 대한 이동상 하천모형실험을 수행하였다. 서울특별시(1990)는 임의로 선정된 모형을 적용하여 유사량과 마찰속도가 원형과 하천모형에서 일치하도록 하는 이동상 모형이론을 적용하여 한강하류부의 이동상 하천모형실험을 수행하였다. 현대엔지니어링(주)(1993)는 Henderson(1966)이 제안한 모형이론을 적용하여 네펠에 위치한 모디콜라강의 침사지 이동상 모형을 제작하여 모형실험을 수행하였다. 건설부 국립건설시험소(1997)는 기존 모형이론 연구들에 대한 분석을 통하여

흐름의 상사와 유사이동의 상사를 이용하여 모형축척 및 모형사의 입경과 비중을 선정하고 유사량과 유사시간의 상사를 이용하여 하상변동의 상사를 이룰 수 있도록 하는 모형이론을 수립하고 이를 남한강 수리 모형실험에 적용하였다.

본 연구에서는 Einstein과 Chien(1954) 그리고 Novak과 Čábelka(1981)의 이론을 기초로 대 하천의 모형제작에 적용할 수 있도록 보다 완화된 이동상 모형이론을 수립하였다. 본 연구에서 수립한 모형이론은 Froude상사법칙과 Manning의 상사법칙을 만족하도록 하는 흐름의 상사, 입자 Reynolds수의 제한조건 내에서 Shields의 유입함수비를 원형과 모형에서 일치하도록 하는 유사이동의 상사, 유사량의 상사와 유사량 연속방정식으로 부터 구한 유사시간이 원형과 모형에서 만족되도록 하는 하상변동의 상사이다. 남한강 하류부 구간의 왜곡 이동상 하천모형 실험결과에 적용하여 본 연구에서 수립한 이동상 모형이론의 적용성을 평가하였다.

2. 이동상 모형이론의 개발

2.1 흐름의 상사

하천모형실험에서는 중력이 가장 중요한 힘으로 작용하므로 관성력과 중력의 비인 Froude수의 상사를 만족하여야 하나 현실적으로 정확하게 Froude수의 상사를 만족시키지 못할 경우가 있다. Henderson(1966)은 수심이 큰 경우, 즉, Froude수가 작은 경우에 대해서 원형에서의 Froude수와 모형에서의 Froude수를 다른 값으로 채택함으로써 모형 축척 결정에서 자유도를 확보시킬 수 있다고 제안하였다. 그는 하천모형의 Froude수가 1보다 상당히 작아서 Froude상사가 그다지 중요하지 않다고 판단될 때 Froude수의 상사를 다음과 같이 완화할 수 있다고 제안하였다.

$$\Delta F = U_r H_r^{-1/2} \quad (1)$$

여기서 F 는 Froude수, U_r 은 유속비, H_r 은 수직 길이비, 그리고 첨자 r 은 원형(첨자 p)과 모형(첨자 m)의 비로서 이후의 모든 첨자 r 은 원형의 양을 모형의 양으로 나눈 것으로 나타내기로 한다. 이 식에서 ΔF 가 1이면 모형과 원형간에 정확한 Froude상사가 이루어진 것을 의미한다. 따라서 원형의 Froude수가 작은 경우, ΔF 를 1이 아닌 값을 채택함으로써

Froude상사를 완화시킬 수 있다.

이동상 하천모형에서는 중력 이외에도 점성력의 영향을 고려하여야만 한다. 점성력의 상사를 위해서는 Reynolds수의 상사를 만족하면 되지만 Froude수의 상사와 동시에 이를 만족시키는 것은 실제적으로 불가능하다. 원형과 모형의 유체를 다르게 하여 이 문제를 해결할 수 있으나 대규모 모형의 경우 이것은 비현실적이다. 전체항력 중 형상항력(form drag)이 중요한 경우, 원형과 모형에서의 흐름이 난류로 유지되면 항력 계수가 같아진다고 볼 수 있으므로 단지 모형에서 난류를 유지하는 것으로서 점성력의 상사가 이루어 졌다고 할 수 있다. 그러나 세장한 하천에서와 같이 마찰항력(friction drag)이 중요한 경우, 원형과 모형 모두에서 Manning의 평균유속 공식이 적용된다는 조건을 사용하여 조도를 결정함으로써 점성력의 상사가 만족되는 것으로 가정할 수 있다. 이때 모형에서 흐름을 난류로 유지하여야 하는데, Allen(1947)은 이 조건으로서 Reynolds수가 1,400 이상이 될 것을 제시하고 있다.

Manning의 평균 유속공식의 비로부터 다음과 같은 점성력의 상사를 만족하는 식을 유도할 수 있다.

$$\Delta M = U_r^{-1} n_r^{-1} R_r^{2/3} S_r^{1/2} \quad (2)$$

여기서 S_r 은 경사축척으로서 H_r/L_r 와 같으며, R_r 은 동수반경비, L_r 은 수평길이버, 그리고 n_r 은 Manning공식의 조도계수비로서 Strickler가 제안한 다음 식을 사용할 수 있다.

$$n_r = D_r^{1/6} \quad (3)$$

여기서 D_r 은 모형사 입경비이다. 식 (2)에서 ΔM 이 1이면 모형과 원형간에 정확한 점성력의 상사가 성립한 것을 의미하며, ΔM 의 값을 1 이외의 값으로 채택함으로써 점성력의 상사를 완화시킬 수 있다. Novak과 Čábelka(1981)는 Manning의 평균유속공식과 Strickler의 공식이 특정 조도 범위에서 정확하다고 보고한 바 있는데, 이는 ΔM 의 값이 1인 점성력의 상사 조건을 완화할 수 있음을 의미한다.

흐름의 상사를 만족하기 위해서는 Froude수의 상사와 Manning의 평균 유속공식의 비 상사가 동시에 이루어져야 하는데, 수심에 비해 하폭이 상당히 큰 하천인 경우에는 H_r 은 R_r 과 같게 되고 식 (1)~(3)을 결합하면 다음과 같은 흐름의 상사조건식을 유도할 수

있다.

$$\Delta F \Delta M = H_r^{2/3} D_r^{-1/6} L_r^{-1/2} \quad (4)$$

여기서 $\Delta F \Delta M$ 이 1이면 정확한 흐름의 상사를 의미하나, 상술한 바와 같이 $\Delta F \Delta M$ 의 값이 1 이외의 값을 채택하는 완화된 상사조건을 채택함으로써 모형사의 축척 결정에 있어서 자유도를 증가시킬 수 있다.

2.2 유사이동의 상사

하상변동을 야기시키는 유사입자의 운동과 하상형상은 Shields곡선 상의 위치에 의해 결정되는 것으로 알려져 있으므로 유사이동의 상사를 만족하기 위해서는 식 (5)와 (6)으로 표현되는 Shields의 유입합수와 입자 Reynolds수가 원형과 모형에서 동일하게 유지되도록 조정하면 된다.

$$F_s = \frac{1}{\Psi} = \frac{\tau_o}{\gamma(S_s - 1)D} = \frac{u^*{}^2}{g(S_s - 1)D} \quad (5)$$

$$R_s^* = \frac{u^*D}{\nu} = \frac{\sqrt{\tau_o/\rho}D}{\nu} \quad (6)$$

여기서 F_s 는 Shields의 유입합수로서 일종의 Froude수로 볼 수 있으므로 입자 Froude수로 정의하기도 하며, Ψ 는 전단강도, τ_o 는 마찰응력으로서 γRS 와 같으며, S_s 는 입자의 비중, R_s^* 는 입자 Reynolds수, u^* 는 전단속도, 그리고 ν 는 물의 동점성계수이다.

Bogardi(1959)는 Shields의 곡선에서 R_s^* 가 100보다 크면 입자 주위에서의 흐름이 완전히 난류가 되기 때문에 원형과 모형간의 입자 Reynolds수의 상사가 만족되어야 한다는 조건이 불필요함을 제시했다. Komura(1962)도 입진이 0.6mm이상인 경우 입자 Reynolds수의 상사조건이 불필요하다고 제안했으며, Chauvin(1962)은 R_s^* 가 60보다 크면 입자 Reynolds수의 상사조건이 불필요하다고 주장함으로써 조건을 보다 완화할 수 있음을 밝혔다. Novak과 Čábelka(1981)는 경험식을 이용해서 R_s^* 가 3.5 이상이 되면 입자에 작용하는 힘이 주로 형상마찰에 의한 것으로서 점성력의 영향은 무시할 수 있음을 밝혔다. 그러나 이 경우 하상형태는 원형과 모형이 다를 수 있으므로 유사운동 시작의 상사만이 근사하게 유지된다고

판단된다. 따라서 입자 Reynolds수 상사조건을 무시하는 경우에 원형과 모형간의 유사이동에 대한 상사성을 확보하기 위해서는 다음 식과 같이 Shields의 유입함수 상사조건만을 만족하면 된다.

$$\Delta F_s = (S_s - 1)_r^{-1} D_r^{-1} H_r^2 L_r^{-1} \quad (7)$$

2.3 하상변동의 상사

이동상 하천모형에서는 유사이동의 상사와 더불어 하상변동의 상사를 만족시켜야 한다. 특히 유사이동의 상사를 만족시킬 수 없는 경우에는 모형에서의 유사량과 통수시간을 조정하는 하상변동의 상사를 만족시키는 방향으로 모형실험을 수행하는 것이 더욱 현실적일 수 있다. 하상변동에 관한 식은 비정상 개수로 흐름에서의 연속방정식과 유사하며, 이는 다음과 같이 나타낼 수 있다(Henderson, 1966).

$$\frac{\partial z}{\partial t} \pm \frac{1}{(1-\lambda)} \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0 \quad (8)$$

여기서 z 은 하상고, λ 는 공극률, 그리고 q_s 는 단위 폭당 유사량으로서 공극을 제외한 순수한 입자의 부피를 나타낸다. 원형과 모형의 기하학적 상사를 만족하기 위해서는 z_r 은 H_r 이 되어야 하며, 이 경우 유사시간의 상사식은 식 (8)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$T_{2r} = q_{sr}^{-1} (1-\lambda)_r L_r H_r \quad (9)$$

여기서 T_2 는 유사시간으로서 총 유사량(q_s)으로 일정한 체적을 채우는데 소요되는 시간으로 정의된다. 유사시간비는 식 (10)으로 주어지는 고정상 모형의 수리시간비와 구별되며, 원형의 홍수수분곡선을 모형에서 재현할 때의 시간비로 사용하여야 한다.

$$T_{1r} = L_r U_r^{-1} = L_r H_r^{-1/2} \quad (10)$$

유사량 공식으로는 매우 다양한 연구자에 의해 많은 공식이 제안되어 있으나, 본 연구에서는 다음 식과 같은 Brown공식을 채택하였다.

$$\frac{q_s}{u^* D} = 10 F_s^2 \quad (11)$$

건설부 국립건설시험소(1983)와 서울특별시(1990)는 기초실험을 통해서 유사량 공식으로서 Brown 공식이

한강의 실측치와 근사하다고 보고한 바 있다. 하천에서의 유사량 거동이 식 (11)을 따른다면, 유사량의 상사식은 다음과 같다.

$$q_{sr} = (S_s - 1)_r^{-2} D_r^{-1} L_r^{-5/2} H_r^5 \quad (12)$$

2.4 요약 및 비교

본 연구에서 수립한 모형이론을 Einstein과 Chien(1954)의 이론 및 Henderson(1966)의 이론과 비교하여 표 1에 요약하였다. 본 연구에서 개발한 모형이론의 경우, 2개의 상사식(식 (4)와 (7))에서 ΔF_{AM} 와 ΔF_s 의 값이 1이 되도록 L_r, H_r, D_r , 그리고 S_{sr} 을 조정하여야 한다. 여기서 결정하여야 할 변수는 4개인 반면에 만족되어야 할 식은 2개뿐이므로 자유도는 2가 된다. Einstein과 Chien(1954) 또는 Novak과 Čábelka(1981)의 이론에서와 같이 유사량, 유사시간, 그리고 침강속도 등 다른 여러 조건을 추가하더라도 모형이론 식과 더불어 미지수도 따라서 추가되므로 자유도에는 변화가 없다.

본 연구에서 수립된 모형이론과 비교할 때, Henderson(1966)의 이론은 ΔF_{AM} , ΔF_s , 그리고 입자 Reynolds수의 상사가 1이 되도록 하천과 하천모형에서 L_r, H_r, D_r , 그리고 S_{sr} 을 조정해야만 하는데, 이 경우 식 3개에 변수 4개로 단지 1개의 변수만을 자유로이 선택할 수 있으므로 Henderson이론은 모형상의 입경과 비중은 물론 수평축척과 연직축척을 독립적으로 선정할 수 없는 등의 문제점이 있어서 실질적으로 거의 만족시키기 어렵다. 또한 Henderson 이론은 원형과 모형에서 하상재료의 비중이 같지 않으면 정상모형에 적용하는 것이 불가능한 것으로 드러나는 등의 문제점도 있다.

실제 이동상 하천모형을 제작하는 경우, 실험실 공간 등 제한조건 때문에 모형의 길이축척(L_r, H_r)들을 먼저 결정하여야 하는 경우가 많다. 이러한 경우, 2개의 상사식에서 2개의 변수(D_r, S_{sr})가 자동적으로 결정되기 때문에 자유도가 전혀 확보되지 않는다. 따라서 기존의 이론 및 경험을 근거로 하여 ΔF_{AM} 의 값이 1에서 벗어나도록 함으로써 하상변동의 상사에 중점을 두고 일정한 한도 내에서 자유도를 확보할 수 있다. 즉, 하천 수리모형실험의 일반적인 절차대로 모형의 축척에 관련된 변수들 L_r 과 H_r 이 먼저 결정된 경우라면, 완화된 흐름의 상사($\Delta F_{AM} \neq 1$)와 정확한 유사

표 1. 이동상 하천모형이론의 비교

모형이론	Einstein and Chien(1954)	Henderson(1966)	본 연구
호름			
Manning 공식	$SM = U_r^2 S_r^{-1} H_r^{-1-2m} D_r^{2m} C_r^{-2}$	$SM = U_r^{-1} D_r^{-1/6} S_r^{1/2} H_r^{2/3}$	$\Delta M = U_r^{-1} D_r^{-1/6} S_r^{1/2} H_r^{2/3}$
Froude수	$SF = U_r H_r^{-1/2}$	$SF = U_r H_r^{-1/2}$	$\Delta F = U_r H_r^{-1/2}$
진단강도	$S\Psi = (\rho_s - \rho_f)_r D_r \eta_r^{-1} H_r^{-1} S_r^{-1}$		
소류사 이송강도	$S\Phi = a_{sr} (\rho_s - \rho_f)_r^{-3/2} D_r^{3/2}$		
경계층	$S\delta = D_r \eta_r S_r^{1/2} H_r^{1/2}$		
Shields의 유입합수		$SF_s = (S_s - 1)_r^{-1} D_r^{-1} H_r^2 L_r^{-1}$	$\Delta F_s = (S_s - 1)_r^{-1} D_r^{-1} H_r^2 L_r^{-1}$
입자 Reynolds수		$SR_s^* = H_r D_r L_r^{-1/2} \nu_r^{-1}$	
유사량	$SQ_s = a_{sr} (\rho_s - \rho_f)_r^{-3/2} D_r^{3/2}$	$SQ_s = a_{sr} (S_s - 1)_r^2 D_r L_r^{5/2} H_r^{-5}$	$a_{sr} = (S_s - 1)_r^{-2} D_r^{-1} L_r^{-5/2} H_r^5$
유사운동 시작	$ST_{1r} = T_{1r} U_r L_r^{-1}$	$ST_{1r} = T_{1r} U_r L_r^{-1}$	$T_{1r} = U_r^{-1} L_r$
유사량으로 일정한 체적을 채우는데 소요되는 시간	$ST_{2r} = T_{2r} a_{sr} (\rho_s - \rho_f)_r^{-1} L_r^{-1} H_r^{-1}$	$ST_{2r} = T_{2r} a_{sr} (1 - \lambda)_r^{-1} L_r^{-1} H_r^{-1}$	$T_{2r} = a_{sr}^{-1} (1 - \lambda)_r L_r H_r$
기운기	$SN = S_r L_r H_r^{-1}$	$SN = S_r L_r H_r^{-1}$	$S_r = L_r^{-1} H_r$
예곡도		$SD_s = D_{sr} L_r^{-1} H_r$	$D_{sr} = L_r H_r^{-1}$
유량	$SQ = Q_r L_r^{-1} H_r^{-1} U_r^{-1}$	$SQ = Q_r L_r^{-1} H_r^{-1} U_r^{-1}$	$Q_r = L_r H_r U_r$

주) $\frac{U}{\sqrt{R_s Sg}} = C \left(\frac{R_t}{K_s} \right)^m$, R_t = 동수반경, K_s = 입자조건으로부터 구한 모형사의 임경, a_{sr} = 총유사량, $S_s = \frac{\rho_s}{\rho_f}$, $\eta = \frac{R_b}{R_t}$, $R_t = R_b + R_w + \frac{R_w P_w}{P_b}$, R_b = 하상재료와 관련된 동수반경, R_w = 하상형상과 관련된 동수반경, P_b = 하상과 관련된 운반 P_w = 하안과 관련된 운반

이동의 상사($\Delta F_s = 1$)를 이용하여 모형사에 관련된 변수들 D_r 과 S_{sr} 을 결정하고 유사량 및 유사시간의 상사를 이용하여 모형에서의 q_s 와 T_2 를 결정할 수 있다. 물론 이 경우 모형에서의 흐름이 난류가 되고 입자 Reynolds수가 3.5 이상이 되도록 유의하여야 한다.

3. 모형실험

3.1 실험모형

본 연구에서 수립한 모형이론을 남한강 수리모형실험(건설부 국립건설시험소, 1997)에 적용하여 적용성을 검토하였다. 남한강 수리모형실험 연구에서는 그림 1에 도시한 바와 같이 남한강(팔당댐~섬강합류점; L = 69 km) 구간에 대한 고정상 및 이동상실험을 수행하였다. 본 연구에서는 남한강 수리모형실험 결과 중 주요 구간에 대한 실험결과를 5개의 모형으로 분류한 후 이들

을 사용하여 모형이론의 적용성을 검토하였다. 모형 I은 남한강 구간의 전구간에 대한 모형이며, 모형 II는 양촌리섬 구간(용담천 합류점~신래천합류점 상류; L = 8.0 km), 모형 III은 도리섬 구간(남한강교 하류~청미천합류점; L = 6.0 km), 그리고 모형 IV와 V는 여주 구간(소양천합류점~여주 상수도 취수장; L = 2.8 km)이다. 모형 II~IV는 모형 I에 포함된 구간 중 국부 구간만을 선정하여 축척을 변화시켜 제작한 국부모형이다. 모형 IV와 V는 여주 구간에 대한 국부모형실험에서 모형사를 변화시켜 실험을 수행한 것이다. 본 모형실험의 대상 하천인 남한강 구간은 하천 길이가 매우 긴데 반해 실험공간은 한정되어 있어서 모형 IV와 V를 제외하고는 모두 왜곡모형을 사용하였다. 모형 IV와 V구간은 여주수중보가 다른 수중보에 비해서 중요하며 수중보 부근에서 수직방향 흐름성분이 존재하기 때문에 이러한 흐름의 상사성을 확보하기 위하여 정상

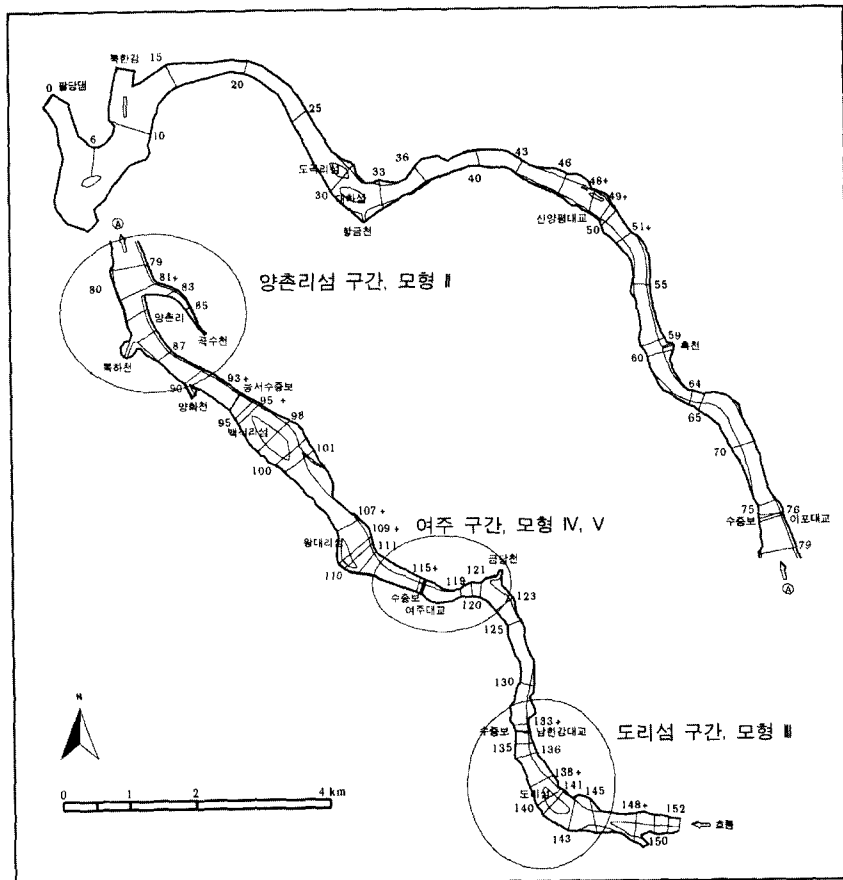


그림 1. 수리모형실험 대상구간

모형을 사용하였다. 본 모형실험의 왜곡모형에 대해서는 과도한 왜곡도를 방지하기 위하여 왜곡도의 값이 5를 넘지 않도록 하였다.

이동상 하천모형에서의 통수시간은 하상재료의 비중과 입경에 따라 결정되는데, 통수시간이 각 측정별로 같아야 하므로 한 종류의 모형사를 사용할 경우, 하상재료도 하나의 특정한 입경으로 대표하는 것이 바람직하다. 남한강 수리모형실험(건설부 국립건설시험소, 1997)에서는 한강종합개발사업 타당성 조사 및 기본계획 보고서(경기도, 1995)와 한강수계 치수기본계획 보고서(건설부, 1992)의 결과로부터 남한강 구간의 각 지점별 하상재료의 중앙입경 자료를 수집하여 모형에 포함되는 각 측정에서의 입경을 구간별로 산술평균하여 각 모형 구간에서의 대표입경으로 결정하였다. 그런 다음 현실적으로 사용가능한 모형사가 상사조건을 만족시키는지의 여부를 검토하여 각 모형에 최적인 모형사를 선정하였다. 각 모형별 선정된 수평축척, 수직축척, 그

리고 모형사의 입경 및 비중을 표 2에 요약하여 수록하였다.

3.2 실험조건

이동상 모형실험에서 하상변동의 상사를 만족하기 위해서는 모형실험에서 재현하고자 하는 대상 유역의 수문곡선의 통수시간을 유사시비 (T_{2r})로 나누어 축소된 값을 모형실험에 적용하는 유사시간의 상사가 하천과 모형간에 이루어져야 한다. 따라서 모형에서의 통수시간을 결정하기 위해서는 대상 유역에서의 홍수 시유출 수문곡선과 유사시간비가 결정되어야 한다. 남한강 수리모형실험(건설부 국립건설시험소, 1997)에서는 계획홍수량 규모의 대홍수상상에 대한 하천의 수리 및 유사현상을 규명하고자 하였기 때문에 1995년 홍수 시여주 수위표지점의 실측 홍수수문곡선(그림 2)을 사용하였다. 모형실험에서 유량의 연속적인 증감을 재현하는 것은 현실적으로 불가능하므로 실제 홍수수문곡선을

표 2. 각 모형의 축척 및 모형사

모 형		축 척		모 형 사		
		L_r	H_r	종류	S_{sm}	D_m (mm)
Case 1	모형 I	220	80	해사	2.59	0.35
	모형 II	100	50	해사	2.59	0.40
Case 2	모형 I	220	80	해사	2.59	0.35
	모형 III	100	50	해사	2.59	0.40
Case 3	모형 I	220	80	해사	2.59	0.35
	모형 IV	100	100	안트라사이트	1.47	0.07
	모형 V	100	100	규조토	2.00	0.26

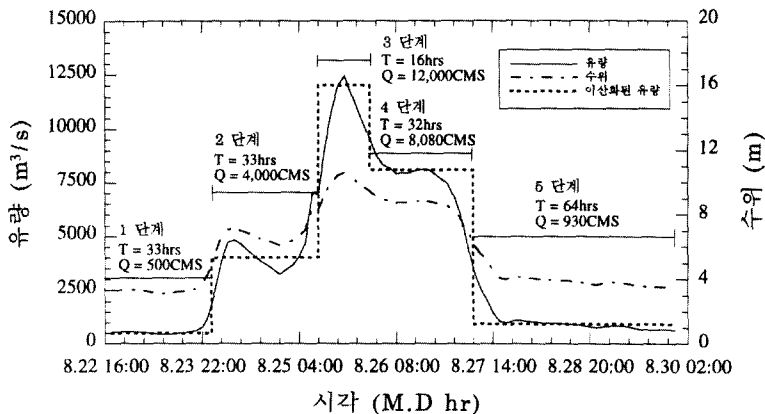


그림 2. 여주지점의 1995년 8월 홍수수문곡선

참조하여 5 단계의 이산화된 유량으로 대표되는 수문곡선을 도출하였으며 이를 그림 2에 점선으로 도시하였다.

모형실험에서 각 단계별 유량은 여주지점의 침두유량과 각 모형 상류단에서의 실험유량 비율대로 환산하여 결정하였으며, 각 단계별 유하시간은 그림 2의 지속시간을 식 (9)로부터 구한 유사시간비로 나누어 결정하였다. 모형실험 수행 시 지천유량(건설부 국립건설시험소 등, 1997)의 유입은 지천별 수문곡선을 무시하고 정상류로 유입하는 것으로 가정하여 실험하였다. 1995년 홍수 시 북한강의 홍수수문곡선은 남한강의 경우와 다르나 북한강의 유입 수문곡선이 남한강 상류의 유사이동에 크게 영향을 미치지 않는다고 판단하여 남한강과 같은 형태의 수문곡선을 갖는다고 가정하였다. 1995년 홍수 시 북한강의 청평댐 방류량을 계획홍수량 규모로 환산하면 19,300 m³/s이다.

4. 실험결과 분석

4.1 실험조건

수평 및 수직축척이 먼저 결정된 경우, ΔF_{AM} 와 ΔF_s 의 상사로부터 모형사의 입경과 비중을 결정하여야 한다. 그러나 전 절에서 서술한 바와 같이 2개의 상사식에서 2개의 변수가 자동적으로 결정되기 때문에 모형사의 결정에 있어서 자유도가 전혀 확보되지 않는다. 이러한 조건은 남한강 수리모형실험과 같은 대하천 모형에 있어서 현실적으로 적용하기 어렵다. 특히 국내의 경우, 대하천에 적용할 수 있는 모형사가 다양하지 못하고 경제적인 이유 때문에 최적 모형사를 선정하는 것이 어려운 실정임을 감안하여 볼 때 이러한 조건을 완화하여 모형사 선정의 자유도를 확보할 필요가 있다.

이 경우, 이론 및 경험을 통하여 ΔF_{AM} 의 상사조건을 완화하는 것이 더욱 바람직한 것으로 밝혀져 있다. Henderson(1966)은 수심이 큰 경우 또는 Froude수가 작은 경우, 모형과 원형에서의 Froude수를 다르게 사용함으로써 자유도를 증가시킬 수 있다고 제안한 바 있으며, 이동상실험에서 유사이동이 주요 관심사라는 점에서 본 실험에서는 ΔF_{AM} 의 상사를 완화하고 ΔF_s 의 값이 1에 근접하는 모형사의 입경 및 비중을 선정하여 이들을 이용하여 모형에서의 유사량, 유사시간 등의 수리량을 결정하였다. 각 모형별 상사조건을 비교하여 표 3에 수록하였다. 표 3에서 볼 수 있듯이 각 모형별 ΔF_{AM} 의 값이 0.74~1.57로 변화하고 있고 ΔF_s 의 값 또한 1.16~8.91로 매우 큰 변화를 보이고 있다. 이는 ΔF_{AM} 의 상사조건과 ΔF_s 의 상사조건 모두 정확하게 만족되지 않고 있음을 나타낸다. 이에 대한 이유는 표 2에 수록한 모형사의 특성에서 알 수 있듯이 남한강 수리모형실험을 위해 사용할 수 있는 모형사가 다양하지 않았기 때문이다. 결국 남한강 수리모형실험의 경우, 흐름의 상사 및 유사이동의 상사를 모두 완전하게 만족시키지 못한 상태에서 실험이 수행되었으며, 이는 실험결과를 정성적으로 해석하여야 함을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 ΔF_{AM} 와 ΔF_s 의 상사율의 변화에 따른 하상변동량의 거동을 비교함으로써 모형이론의 적용성을 검토하였다.

그림 3은 원형과 모형에서 각 축선에서의 무차원 소류력과 입자 Reynolds수를 도시한 것이다. 이 그림에서 축선별 수심은 HEC-2의 수치모의 결과를 이용하였고 이를 이용하여 무차원 소류력과 입자 Reynolds수를 구하였다. 그림 3에서 모형 IV를 제외하고는 입자 Reynolds수가 3.5이상의 조건을 만족하는 것으로

표 3. 각 모형의 상사조건 비교

모형		D_p (mm)	D_r	$(S_s - 1)_r$	ΔF_{AM}	ΔF_s
Case 1	모형 I	8.3	23.7	1.038	0.74	1.18
	모형 II	8.3	20.8	1.038	0.82	1.16
Case 2	모형 I	6.2	17.7	1.038	0.78	1.58
	모형 III	6.2	15.5	1.038	0.86	1.55
Case 3	모형 I	1.7	4.86	1.038	0.96	5.77
	모형 IV	1.7	24.3	3.510	1.27	1.17
	모형 V	1.7	6.54	1.650	1.57	8.91

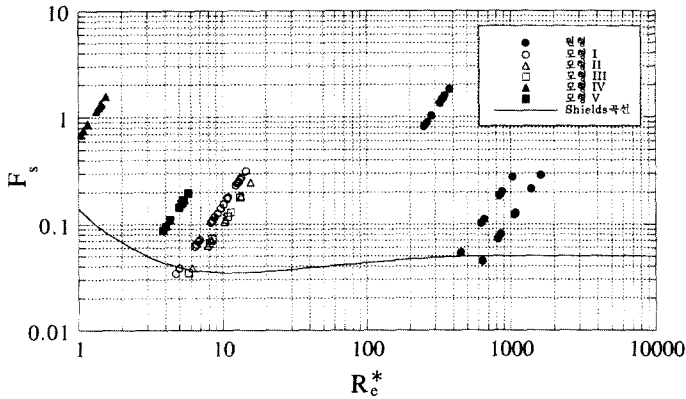


그림 3. 상사조건별 유사운동 양상

나타났으며, 대부분 Shields의 한계곡선상이나 한계곡선보다 위에 존재하는 것으로 나타나 모든 모형에서 유사운동이 일어나고 있는 것으로 밝혀졌다.

4.2 하상변동량

본 모형실험은 1995년 홍수사상에 대하여 수행되었으므로 당시 홍수사상에 따른 남한강에서의 하상변동자료와 모형실험결과를 비교하여 모형이론의 적용성을 검토하여야 하나 현장 실측자료가 존재하지 않기 때문에 이를 수행하는 것은 불가능하였다. 나아가서 전술한 바와 같이 모형실험 또한 정확한 상사이론(흐름의 상사 및 유사이동의 상사)을 만족시키지 못한 상태로 수행되었기 때문에 현장자료와 실험자료의 비교에 의한 모형이론의 검증은 더욱 어렵다고 판단된다. 따라서 본 실험의 경우, 동일한 구간에 대해서 축척이 다른 두개의 모형을 제작하여 실험하였고, 또한 모형을 다르게 선정하여 수행되었으므로 모형별로 ΔF_{AM} 와 ΔF_s 의 값에 차이가 있으므로 이에 따른 모형간 하상변동량의 비교를 통해서 본 연구에서 개발한 모형이론의 적용성을 정성적으로 검토할 수 있다고 판단된다. 그림 4는 모형 I의 팔당댐으로부터 거리 60,331 m 상류에 위치한 축선(No. 136)에서의 하상변동량의 횡분포를 도시한 것인데, 여기서 양의 값은 퇴적을 의미하며, 음의 값은 세굴을 의미한다. 본 연구에서 축선별 총 하상변동량은 종방향 단위 길이당 퇴적 및 세굴의 부피를 각각 구하고 세굴량의 경우에는 절댓값을 취하여 퇴적량과 합한 것으로 정의하였다. 본 연구에 이용된 퇴적량 및 세굴량의 값은 모두 원형에서의 값으로 환산된 것을 사용

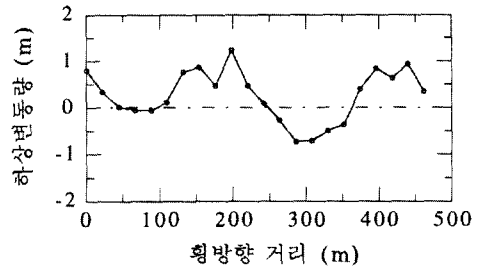


그림 4. 모형 I의 하상변동 횡분포(No. 136)

하였다.

본 연구에서는 실험유량이 Froude상사법칙을 만족하도록 조절되었기 때문에 ΔF 의 값은 1이 된다. 따라서 ΔF_{AM} 의 값이 1이 되도록 모형을 선정한 경우는 Manning 공식의 조도계수비 관계를 만족시키는 조도가 모형에서 재현되었다는 것을 의미한다. ΔF_{AM} 의 값이 1보다 작으면, 모형에서의 조도가 점성력의 상사를 만족시키는 값에 비해 작다고 할 수 있다. 조도와 입경의 관계가 Strickler 공식을 따른다고 가정할 때 ΔF_{AM} 의 값이 1보다 작은 경우, 모형의 입경이 원형에 비해 작아 지게 되고 이로 인해 모형에서의 유사이동이 활발해져 총 하상변동량이 원형에 비해 커지게 된다. ΔF_s 는 무차원 소류력비로서 이 값이 1인 경우, 원형과 모형에서 유사의 운동을 일으키는 소류력이 같다고 할 수 있다. ΔF_s 의 값이 1보다 작은 경우에는 모형에서의 무차원 소류력이 커지게 되고 이로 인해 모형에서의 유사이동이 원형에 비해 활발해져서 총 하상변동량이 원형에 비해 커지게 된다. ΔF_s

는 D_r^{-1} 의 함수로서 모형사의 입경에 민감한 반면, ΔF_{AM} 은 식 (4)에서 알 수 있듯이 $D_r^{-1/6}$ 의 함수로서 입경변화에 상대적으로 둔감하게 변화한다. 즉, ΔF_{AM} 의 값이 1에서 조금만 벗어나도 모형사의 선정이 상당히 왜곡될 수 있으며 이로 인해 모형에서의 총 하상변동량은 원형과 큰 차이가 발생할 수 있으므로 보다 주의를 요한다.

본 연구에서와 같이 하천모형의 길이축척이 미리 결정된 경우, 모형사 입경의 선정이 상사성 만족에 중요한 역할을 하게 되므로 ΔF_{AM} 와 ΔF_s 의 상사가 중요하게 된다. 따라서 ΔF_{AM} 와 ΔF_s 의 값의 변화에 따른 총 하상변동량의 거동을 비교하기 위하여 거리에 따른 총 하상변동량을 각 모형별로 비교하여 그림 5에 도시하였다. 그림 5(a)와 5(b)는 모형간 ΔF_s 의 값의 차이가 ΔF_{AM} 의 값의 차이에 비해 적은 경우로서 ΔF_s 의 민감도를 분석하였으며, 그림 5(c)는 모형간 ΔF_{AM} 의 값의 차이가 ΔF_s 의 값의 차이에 비해 적은 경우로서 ΔF_s 의 민감도를 분석하였다. 그림 5(a)와 5(b)는 표 3의 Case 1과 2에 해당되는 것으로서 모형 II, III에 비해서 의 값이 작은 모형 I에서 총 하상변동량이 큰 것으로 나타났다. 따라서 ΔF_{AM} 의 값이 작을 수록 모형에서의 총 하상변동량은 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 각 모형간 ΔF_{AM} 및 ΔF_s 의 변화에 따른 하상변동량의 상대적인 증감을 표 4에 수록하였다. Case 1의 결과는 Case 2에 비교하여 볼 때, ΔF_{AM} 의 상대적인 감소량은 -9.8%와 -9.3%로서 대체로 비슷한 반면 하상변동량의 상대적인 증가분은 4.1~953%로서 Case 2의 -9.3~331%보다는 다소 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다. 그림 5(c)는 표 3의 Case 3에 해당되는 것으로서 ΔF_s 의 값이 작을 수록 총 하상변동량이 커지는 것으로 나타났다. 그림 5(c)에서 ΔF_s 의 값이 타 모형에 비해서 월등히 작은 모형 IV의 하상변동량이 상대적으로 적게 증가하는 것으로 나타났는데, 이에 대한 물리적인 이유는 모형사인 안트라사이트가 입경이 매우 작고 점착성을 갖는 성질로 인해서 전체적으로 유사이동이 활발하지 못하였기 때문으로 판단된다. 이러한 실험결과는 상술한 모형이론의 이론적 해석과 부합하는 것으로서 본 연구에서 개발한 모형이론의 적용성을 정성적으로 입증하는 것으로 판단된다.

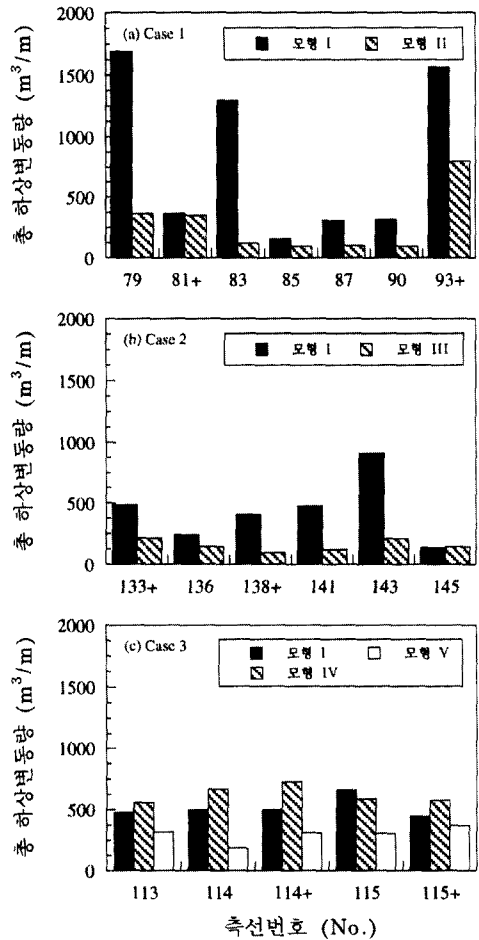


그림 5. 모형별 총 하상변동량 비교

4. 결 론

본 연구에서는 Einstein과 Chien(1954)의 이론을 토대로 하천 모형실험에 적합한 완화된 이동상 모형을 수립하였다. 수립된 모형이론을 남한강 수리모형 실험 결과를 이용하여 검증하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 하천모형 실험 시 ΔF_{AM} 와 ΔF_s 의 값이 1에 가능한 한 가깝게 되도록 모형사를 선정하여야 하며, 특히 ΔF_{AM} 의 값은 모형사의 변화에 둔감하게 변화하므로 ΔF_{AM} 값의 작은 차이가 하상변동량의 큰 변화를 야기시키므로 이에 주의를 요한다. 실험 결과 ΔF_{AM} 의 값이 작을 수록 총 하상변동량은 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 ΔF_s 의 값이 작을 수록 총 하상변동량은 크게 발생하는 것으로

표 4. 각 모형간 하상변동률 비교

Case	모형간 변동률 식	모형간 ΔF_{AM} 의 차이	모형간 ΔF_s 의 차이	측선번호	모형간 하상변동률
1	$\frac{\text{모형 I} - \text{모형 II}}{\text{모형 II}} \times 100(\%)$	-9.8	1.7	79	360
				81+	4.1
				83	953
				85	61.5
				87	205
				90	227
				93+	96.3
2	$\frac{\text{모형 I} - \text{모형 III}}{\text{모형 III}} \times 100(\%)$	-9.3	1.9	133+	124
				136	67.7
				138+	331
				141	295
				143	326
3	$\frac{\text{모형 I} - \text{모형 IV}}{\text{모형 IV}} \times 100(\%)$	-24.4	393	113	-14.5
				114	-26.0
				114+	-31.9
				115	12.5
				115+	-23.0
	$\frac{\text{모형 IV} - \text{모형 V}}{\text{모형 V}} \times 100(\%)$	-19.1	-86.9	113	75.5
				114	259
				114+	134
				115	92.2
				115+	55.4

로 나타났다.

본 연구에서 수립된 모형이론은 실험장소 또는 모형사의 제한으로 모형이론을 이상적으로 만족시킬 수 없는 경우에 각 모형이론의 제한조건을 완화하는 것이 필요한데, 이런 경우에 유용하다고 할 수 있다. 단, 본 논문에서 적용한 수리모형실험이 모형이론의 검증을 위하여 계획된 것이 아니었기 때문에 유사량 공식의 선정이 모형이론에 미치는 영향 등을 검증치 못하였으며, 원형과 모형간의 직접적인 유사이동의 비교가 이루어지지 못하였는데 앞으로 이에 대한 연구가 더 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구의 모형실험은 건설부 국립건설시험소에서 이루어졌으며, 적극적인 지원에 감사를 드립니다.

참고 문헌

건설부 (1992). 한강수계 치수기본계획.

- 건설부 국립건설시험소 (1983). 한강하류부 이동상 수리모형실험 보고서. (연구책임자 : 이원환 등).
- 건설부 국립건설시험소 (1997). 남한강 수리모형실험 보고서. (연구책임자: 서일원 등).
- 경기도 (1995). 한강(남한강)종합개발사업 타당성조사 및 기본계획 보고서.
- 서울특별시 (1990). 한강하류부 수리모형실험보고서 - 한강분류 및 중랑천. (연구책임자: 안수한 등).
- 현대엔지니어링(주) (1993). 네팔모디강 수력발전소 건설 실시계획 사업 수리모형실험 보고서. (연구책임자 : 선우중호).
- Allen, J. (1947). *Scale models in hydraulic engineering*. Longmans, Green & Co., London, U.K.
- Bogardi, J. (1959). "Hydraulic similarity of river models with movable bed." *Acta Tech Acad Sci. Hung.*, Vol. 24, p. 417.
- Chauvin, J.L. (1962). "Similitude in movable-bed

- river models." *Bull. Centre Rech. Essais*, Chatou, No. 1, p. 64.
- Einstein, H.A., and Chien, N. (1954). "Simiarity of distorted river models with movable beds." *Trans. Am. Soc. Civil Engrs.*, Vol. 121, pp. 440-462.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan Publishing Co., Inc., N.Y.
- Komura, S. (1962). "Similarity and design methods of river models with movable bed." *Trans. Japan. Soc. Civil Engrs.*, No. 80.
- Novak, P., and Čábelka, J. (1981). *Models in hydraulic engineering (Physical principles and design applications)*. Pitman Publishing Inc.
- (논문번호:98-018/접수:1998.04.04/심사완료:1998.08.31)