ACI 318-02의 개정이 설계에 미치는 영향

국내에서 콘크리트 구조물의 설계시 기준이 되는 콘크리트 구조설계기준은 ACI 318 code에 많은 부분을 의존하고 있다. 2002년도에 ACI 318-02가 출간되었으나, 그 사이에 국내 설계기준의 개정이 이루어지지 않은 관계로 큰 관심을 끌지 못하고 있는 실정이다. 2002년도 개정판은 ACI 318에 있어서 1971년도 이후로 가장 큰 변화를 가져온 것으로 여겨지고 있다. 참고로 1971년도에는 ACI 318 본문에 강도설계법의 개념이 최초로 도입된 해이다. 2002년도 개정판에서는 구조물의 해석과 설계에 커다란 영향을 주는 하중계수와 강도감소계수의 개정이 본격적으로 이루어졌다.

하중계수와 하중조합

ACI 318-02에서는 318-99에 비해 전반적으로 하중계수가 감소되었으며, 몇몇 하중에 대해서는 그 취급방법에 있어서도 변화를 보이고 있다. 다음은 ACI 318-02에서 제시하고 있는 7가지의 하중조합이다.

$U=1.4(D+F)$ (1)

$U=1.2(D+F+T)+1.6(L+H)+0.5(Lr \text{ or } S \text{ or } R)$ (2)

$U=1.2D+1.6(Lr \text{ or } S \text{ or } R)+(1.0L \text{ or } 0.8W)$ (3)

$U=1.2D+1.0L+0.5(Lr \text{ or } S \text{ or } R)$ (4)

$U=1.2D+1.0E+1.0L+0.2S$ (5)

$U=0.9D+1.6W+1.6H$ (6)

$U=0.9D+1.0H+1.6H$ (7)

여기서, D=고정하중, F=수압, T=온도, 크리프 및 건조수축, 부등침하에 의한 영향, L=활하중, Lr=지붕 활하중(roof live load), S=설(雪)하중(snow load), R=우(雨)하중(rain load), W=풍하중, E=지진하중, H=토압

ACI 318-02에서는 그 전까지 볼 수 없었던 지붕 활하중(Lr), 설하중(S), 우하중(R)이 새롭게 등장하고 있다. 이는 건축물 설계시 또 다른 기준이 되는 'Uniform Building Code'와의 호환성을 고려한 것이다. 한편, 318-99에서는 하중의 특성에 따라 하중조합을 분리하였으나, 318-02에서는 상기 식과 같이 조합 가능한 하중을 모두 모아서 하중조합을 하는 방식을 취하고 있다. 이와 같은 하중계수와 하중조합 방법의 변화에서 설계자들이 눈여겨봐야 할 부분은 다음과 같다.

(1) 고정하중(D)과 온도, 크리프 및 건조수축, 부등침하에 의한 영향(T), 수압(F)은 상대적으로 정확히 계산할 수 있고, 변동성이 적기 때문에 하중계수를 1.4에서 1.2로 줄였다. 단, 고정하중(D)과 수압(F)만의 하중조합에서는 하중계수가 1.4이다.(D와 T, F가 동시에 고려될 경우에는 1.2)

(2) 활하중(L)과 토압(H)은 하중계수가 1.7에서 1.6으로 줄었다. 하지만, 지붕 활하중(Lr), 설하중(S), 우하중(R) 등이 부분 재하되는 경우 ($0.5Lr+1.6L$), ($1.6Lr+1.0L$) 등도 사용할 수 있다.

(3) 이전에는 풍하중(W)을 받는 부재에 대해서 하중계수 1.7을 적용하고 여기에 0.75를 곱

한 값을 적용하며, 고정하중과 풍하중이 방향이 서로 다른 경우에는 (0.9*D*+1.3*W*)을 적용하도록 하였다. 그러나, 318-02에서는 풍하중을 활하중과 동일한 1.6의 하중계수를 적용하고 있으며, 풍하중이 포함된 하중조합에 대해서는 (0.9*D*+1.6*W*)와 같이 상기에 나열된 식으로 검토하도록 하고 있다.

(4) 이전에는 지진하중(*E*)은 풍하중에 대한 하중조합에 1.1*E*를 대입하면 되었다. 하지만, 318-02에서는 지진하중을 포함한 두 가지의 특수한 하중조합이 규정되었으나, 이전의 것과 직접적인 비교가 힘들다. 굳이 비교하자면, 고정하중과 지진하중의 조합을 예로 들 경우 318-99에서는 (0.9*D*+1.43*E*)이었던 것이 318-02에서는 (0.9*D*+1.4*E*)로 변경되었다.

표1에서 볼 수 있는 바와 같이 318-02로 개정되면서 전반적으로 하중계수가 감소하였음을 알 수 있다. 간단한 예로 고정하중과 활하중의 조합에서 *D*=*L*=100 인 경우, 1.2*D*+1.6*L*=280, 1.4*D*+1.7*L*=300이 되어 280/310=0.903으로 318-99에 비해 9.7%의 하중감소가 이루어지게 된다. 단, 고정하중이 지배하중인 경우에는 개정 전후 1.4*D*로 동일하다.

한편, 풍하중이 지배적인 경우에는 오히려 풍하중에 대한 하중계수가 증가하였음을 볼 수 있다. 예로, *D*=*W*=100인 경우, 0.9*D*+1.3*W*=220, 0.9*D*+1.6*W*=250이 되어 250/220=1.136으로 318-99에 비해 13.6%의 하중증가가 이루어진 셈이다.

표1. 주요 하중에 대한 하중계수의 변화

하중	하중 조합	
	ACI 318-99	ACI 318-02
고정하중(D) 활하중(L)	U = 1.4D + 1.7	U = 1.4D U = 1.2D + 1.6L
고정하중(D) 활하중(L) 풍하중(W)	U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.7W) = 1.05D + 1.275L + 1.275W U = 1.2D + 1.0L + 1.6W	U = 1.2D + 1.6L + 0.8W U = 0.9D + 1.3W U = 0.9D + 1.6W
고정하중(D) 활하중(L) 지진하중(E)	U = 0.75(1.4D + 1.7L + 1.87E) = 1.05D + 1.275L + 1.403E U = 0.9D + 1.43E	U = 1.2D + 1.0L + 1.0E U = 0.9D + 1.0E

강도감소계수

2002년도 개정에서 가장 두드러진 특징이 하중조합에 따른 하중계수의 감소와 이의 보완을 위한 강도감소계수의 감소인데, 강도감소계수의 경우 기존과는 다른 개념의 접근을 시도하고 있다. 1999년까지는 하중의 종류에 따라 축력, 휨, 또는 축력+휨과 같이 단면력 종류에 따라 강도감소계수를 규정하였으나, 이번 개정에서는 단면 공칭강도에서의 단면의 변형율 조건에 따라 강도감소계수를 결정하도록 하고 있다. 즉, 압축지배단면에 대해서는 인장지배단면에 비해 더 작은 강도감소계수를 적용하고 있는데, 이는 압축지배단면의 경우 연성이 더 작고, 콘크리트 강도의 변동성면에서 더욱 민감하며, 일반적으로 인장지배단면에 비해 더 큰 하중을 지지

하기 때문이다.

ACI 318-02에서는 최연단 인장철근의 변형율이 중요한 기준이 된다. 즉, 이 값이 0.005 이상이면 인장지배 상태가 되고, 이보다 작으면 압축지배 상태가 되며, 이들 사이에 전이구간(transition region)이 존재한다.

(1) 보(인장지배) : 휨과 축력을 동시에 받는 부재에 대하여 인장측 최연단 철근의 변형율이 0.005이상이 될 정도로 철근량이 충분한 경우(인장지배부재) ϕ=0.9이다.

(2) 기둥과 보-기둥(압축지배) : 휨과 축력을 동시에 받는 부재에 대하여 모든 철근이 압축 상태이거나, 또는 인장을 받는 철근이 있더라도 그 변형율이 항복에 이르지 않을 정도의 철근량을 가진 경우(압축지배부재)에는 기존의 ϕ=0.7에서 ϕ=0.65(나선철근 : ϕ=0.75 → ϕ=0.7)로 바뀌었다.

(3) 보와 보-기둥(전이구간에서) : 휨과 축력을 동시에 받는 부재에 대하여 인장철근이 항복하였으나 0.005보다 변형율이 적은 경우에는 강도감소계수를 0.65(나선철근=0.7)에서 0.9 사이에서 선형보간을 할 수 있다. 이전에는 매우 적은 압축력을 받는 부재($P_u<0.1f_{ck}A_g$ or ϕP_b)에 대해서만 선형보간이 허용되었다.

(4) 전단 : ϕ=0.85에서 ϕ=0.75로 감소

(5) 지압 : ϕ=0.7에서 ϕ=0.65로 감소

(6) strut-and-tie model 적용시 강도감소계수 0.75를 새롭게 도입

표2에 개정 전후의 강도감소계수의 변화를 정리하였다. 여기서, 휨부재(인장지배단면)를 제외하고는 대부분 강도감소계수가 감소하였음을 알 수 있다.

설계에 미치는 영향

(1) 휨이 설계를 지배하는 경우

일반적인 휨부재는 고정하중과 활하중이 지배적이므로, 개정 전후의 하중조합과 강도감소계수를 고려하면 하중조합의

표2. 개정 전후 강도감소계수의 변화

분류 (ACI 318-99 기준)	강도감소계수(ϕ)		분류 (ACI 318-02 기준)
	ACI 318-99	ACI 318-02	
휨 (축력=0)	0.90	0.90	인장재배단면
축방향 인장력, 휨+축방향 인장력	0.90		
압축력,휨+축방향 압축력			압축지배단면
- 나선철근 구속	0.75	0.70	- 나선철근 구속
- 기타 철근 구속	0.70	0.65	- 기타 철근 구속
전단과 비틀림	0.85	0.75	전단과 비틀림
콘크리트 지압(포스트텐션 정착부 제외)	0.70	0.65	콘크리트 지압 (정착부 제외)
포스트텐션 정착부	0.85	0.85	포스트텐션 정착부
-	-	0.75	strut-and-tie models

결과는 증가하고 강도감소계수는 동일하므로 결과적으로 부재의 성능을 더 크게 보는 방향으로 개정되었음을 알 수 있다. 예를 들어 고정하중(D)과 활하중(L)의 크기가 같은 경우(D=L=100), ACI 318-99 : U_{99}=1.4D+1.7L=310, ACI 318-02 : U_{02}=1.2D+1.6L=280 이므로 U_{99}/U_{02}= 1.107이 되어 동일한 설계단면에 대하여 318-02 적용시 10.7%의 하중을 더 받는 결과가 나타나게 되며, 이는 고정하중의 비율이 증가할수록 그 경향이 심화되게 된다.

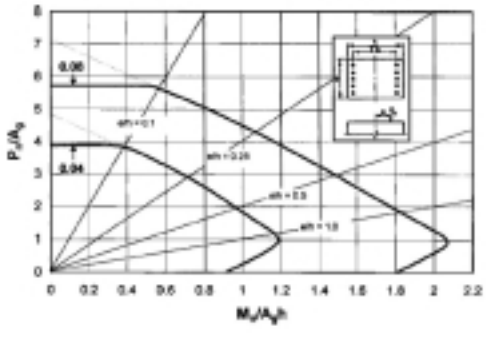
(2) 전단, 지압, 압축력이 설계를 지배하는 경우

전단에 대한 강도감소계수의 변화는 ϕ_{99}/ϕ_{02}=0.85/0.75=1.133이고, 주요하중이 D=L=100인 경우의 개정 전후의 전단력을 비교하면, 1.107/1.113=0.995로 설계 결과에 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 하지만, 풍하중이 지배적이고 전단만 유발하는 경우를 가정하면, 즉 D=W=100, L=0인 경우에는 ACI 318-99 : U_{99}=0.75(1.4D+1.7L+1.7W)=232.5, ACI 318-02 : U_{02}=1.2D+1.0L+1.6W=280이 되어 U_{99}/U_{02} = 0.830이 된다. 여기에 강도감소계수가 줄어든 점을 고려하면, 0.830/1.133=0.732가 되어, 결과적으로 동일한 설계단면에 대하여 개정 후의 규정 적용시 27% 정도의 하중을 덜 받게 되는 셈이다. 즉, 동일한 하중에 대하여 기존 단면을 27% 이상 증가시켜야 하는 결과가 도출된다.

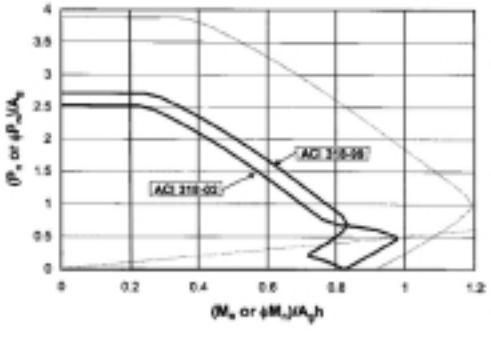
지압에 대해서는 0.7/0.65=1.077(띠철근기둥도 동일), 나선철근기둥에 대해서는 0.75/0.7=1.070로 강도감소계수의 감소에 따른 설계단면의 증가 효과가 있으나, 하중조합에 따라서 그 결과가 달라지게 된다.

(3) P-M 상관도

휨과 축력을 동시에 받는 부재에 대하여 그림1의 (a)와 같은 모델에 대하여 ACI 318-99와 318-02를 각각 적용하여 (b)와 같은 P-M 상관도를 얻었다. 318-99에서의 강도감소계수는 ϕP_n=0인 경우 ϕ=0.9이고, $\phi P_n \geq 0.1 f_{ck} A_g$ 에 대하여 ϕ=0.7(띠철근)이었으며, $0 < \phi P_n \geq 0.1 f_{ck} A_g$ 의 구간에 대해서는 ϕ가 0.9에서 0.7로 선형적으로 변화하게 된다. 하지만, 318-02에서는 ϕ가 인장철근의 최대변형율에 따라 달라지는데, 항복 전에는 0.65(띠철근), 인장변형율이 0.005 이상이면 0.9가 되고, 이 사이에서는 선형적으로 변화하게 된다. 편심이 작은 구간에서는 318-02대 318-99의 값이 0.65/0.7=0.929가 되고, 편심이 증가함에 따라 이 비율이 1.0이 되는 부분에서 두 곡선이 만나게 된다. 편심이 더욱 커지면, 이 비율이 증가하여 최대 0.9/0.7=1.286까지 증가하게 된다.「그림2의 (b) 참조」 만약 하중조합의 변화에 따라 부재가 부담할 수 있는 하중이 10% 정도 증가하였다면, 이 구간에서는 318-02의 적용으로 인하여 동일 단면에 대해 약 40% 정도의 추가 하중을 부담할 수 있게 된다. 즉, 동일 하중에 대해 318-99에 비해 약 40% 정도의 단면을 축소시킬 수 있다. 하지만, 이는 극단적인 경우를 가정한 것이고, 일반적인 압축부재에 있어서는 하중조합과 강도감소계수의 변화를 동시에 적용하면 그 결과에 큰 차이가 없으며, 단지



(a) 비교 모델 (ACI SP-17A E3-60.75)



(b) P-M 상관도 비교 (철근량=4%)

그림1. ACI 318-99와 318-02에 대한 P-M 상관도의 비교

편심이 매우 큰 하중을 받는 경우에 대해서 부재의 효율이 크게 증가하는 결과를 도출하게 된다.

맺음말

설계의 기본적인 부분에 대하여 개정이 이루어진 ACI 318-02의 주요 내용을 살펴본 결과 하중조합에 있어서는 예측 가능한 하중에 대해서는 하중계수를 감소시키고, 풍하중은 오히려 하중계수를 증가시켰다. 또한, 강도감소계수의 경우 그 개념적인 변화가 있었으며, 그 크기도 인장지배단면에 대해서는 큰 변화가 없었으나, 압축지배단면과 전단, 지압 등에 있어서는 그 계수를 감소시킴으로써 하중조합의 개정으로 인하여 낮아진 안전율을 보완하고 있었다. 이러한 개정 내용이 설계에 미치는 영향을 비교한 결과, 휨부재에 대해서는 기존에 비해 약 10% 정도의 부재성능 향상 효과가 있으나, 전단 및 압축부재에 대해서는 큰 영향이 없음을 알 수 있었다. 다만, 풍하중 및 편심이 큰 압축부재에 있어서는 개정 전후의 단면력에 있어서 큰 차이를 보이고 있었다.

국내 콘크리트구조설계기준의 내용이 ACI 318 규정에 크게 의존하고 있는 점을 감안할 때, 2002년도 개정에서 변화한 하중조합과 강도감소계수 등의 개념에 대한 배경과 이의 국내 설계기준으로의 적용 여부를 신중하게 검토할 필요가 있을 것으로 보인다. ♧

■ 자료
1. ACI 318-99, ' Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary ', 1999, American Concrete Institute
2. ACI 318-02, ' Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary ', 2002, American Concrete Institute
3. Howard Epstein, ' How Does the Change from ACI 318-99 to 318-02 Influence Capacity? ', 2003. 11, Journal of Practice Periodical on Structural Design and Construction, ASCE, pp.180-185

■ 자료제공 : 박성용(구조연구부 선임연구원)
■ sypark@kict.re.kr

교량세굴 유지관리 시스템 개발

세굴로 인한 교량파괴는 전 세계적으로 공통되는 중요한 문제이며 여름철 강우가 집중되는 우리나라의 경우에도 최근의 이상기후 현상과 더불어 그 피해가 점점 커지고 있다. 미국의 경우 1970년 이후 파괴된 1000개 이상의 교량 중 60%가 세굴에 의한 파괴인 반면, 지진에 의한 파괴는 2%에 불과하였다. 국내의 교량 중 세굴에 의한 피해사례는 1981년 이후 조사에 의하면 연평균 100여건에 육박하며, 1987년에는 7월 중순의 태풍 셀마와 연이은 중부지역 집중호우 및 8월의 집중호우로 인해 255개의 교량기초가 세굴에 의한 피해를 입었다. 국내 하천에서 세굴에 의한 교량피해는 대하천 보다 중·소규모의 하천에 집중된다는 것이 특징이었다. 그러나 2002년과 2003년 집중호우 및 태풍 루사와 같은 이상 호우를 동반한 기상재해의 발생이 잦아짐에 따라 그 피해도 커져 갈수기

그림1. Schoharie creek의 교량파괴

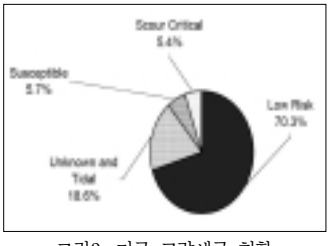


그림2. 미국 교량세굴 현황

에 흐름이 거의 없는 교량은 물론이고 국도상의 대규모 교량도 세굴로 인해 붕괴되는 사례가 늘게 되었다. 따라서, 면밀한 분석에 따른 정확한 세굴 평가뿐만 아니라 국내 실정과 조건에 맞는 교량세굴 유지관리 체계를 마련하는 것이 꼭 필요하다.

■ 국외 동향

미국의 경우 교량세굴에 대한 연구는 1950년대 이후 꾸준히 진행되어 왔으며, 1980년대 후반 뉴욕 주의 Schoharie Creek의 교량유실 사고(그림1) 이후 적극적 연구와 평가 프로그램의 추진 결과 교량세굴, 하천안정, 그 대책에 대하여 각각 HEC(Hydraulic Engineering Circular)-18, HEC-20, HEC-23의 기술 매뉴얼을 마련하였고 1988년 교량세굴 평가 프로그램을 확립하였다. 2002년 현재 주 교통국(State DOT)에 의해서 총 480,000여개의 교량 중 390,000여 교량의 세굴 안정성에 대해 평가가 완료되었으며(그림2), 각 주 교통국에서는 자체적으로 개발한 교량세굴

표1. 미국 교량세굴 유지관리 시스템 현황

교량세굴 유지관리 시스템	해당 주
교량세굴 데이터베이스 시스템	루이지애나
GIS-Based Bridge Scour Prioritization	뉴잉글랜드
CAESAR(An Expert System for Cataloging and Expert Evaluation of Scour Risk at Bridge Sites)	워싱턴, 알칸사, 일리노이, 메릴랜드, 노스캐롤라이나

유지관리 시스템을 통해 교량을 관리하고 있다.「표1」

미 루이지애나주 교통국과 교통연구소에서는 세굴 위험성을 가진 교량의 복구를 결정하기 위한 수단으로써 교량세굴 데이터베이스를 개발하여 현재 운용 중에 있다. 이는 교량세굴 자료의 저장, 검색이 가능하며, 교량정보, 교각자료, 하천단면, 주변 지도, 지질 주상도 등을 표나 그림으로 시각화하고, 또한 교량 단면과 주기적인 세굴 측정 자료를 도시하여 보수를 위한 현장 상황 및 지반조건을 평가하는데 사용되고 있다.(Farrag 와 Morvant, 2002)

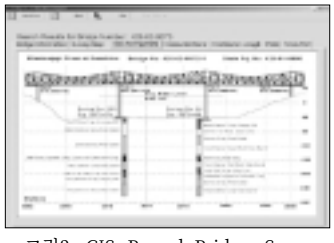


그림3. GIS-Based Bridge Scour Prioritization

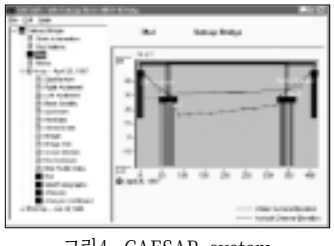


그림4. CAESAR system

뉴잉글랜드 주에서는 교량의 보수, 보강을 위한 자원의 할당을 위해 GIS 해석의 장점을 이용하여 교량세굴 우선순위 시스템을 개발하였다.「그림3」 시스템의 예비 평가를 통해 재현기간에 따른 수문자료와 세굴자료를 볼 수 있으며 이들은 우선순위를 평가하기 위한 인자들로 이용된다. 특히 이 GIS 시스템은 해석 결과뿐만 아니라 관측자료와 세굴자료에 대한 공간적 표현이 가능하여 사용자 편의성을 높인 것이 장점이다.(Ho 등, 2002)

워싱턴 주립대학에서는

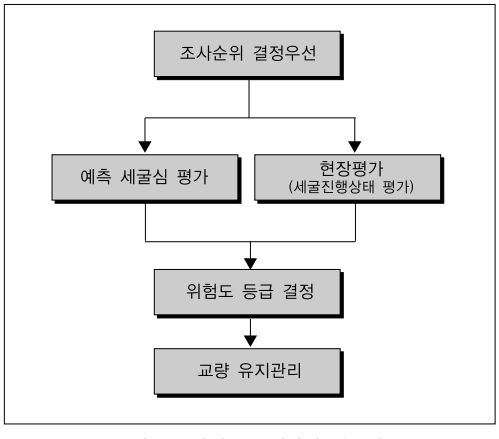


그림5. 교량세굴 유지관리 시스템

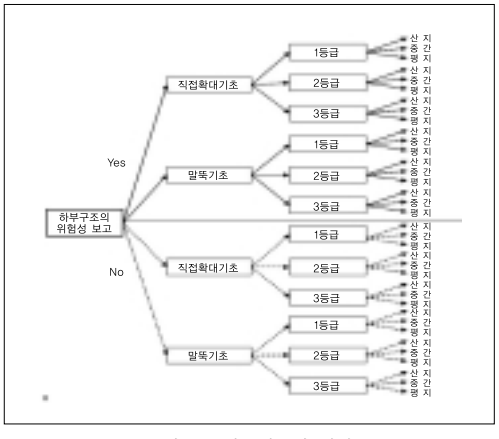


그림6. 조사우선순위 결정

Bayesian 모듈을 이용하여 교량의 세굴 위험성과 하천 안정성을 평가할 수 있는 전문가 시스템을 개발하여(그림4) 현재 워싱턴주 뿐만 아니라 알칸사주, 일리노이주 등 여러 주에서 교량세굴 평가에 사용 중에 있다.(Palmer 와 Turkiyyah, 1997)

■ 국내동향

현재 국내의 교량세굴에 대한 합리적인 조사, 평가 및 설계 그리고 대책에 대한 연구 및 기술 수준은 선진국에 비해 뒤쳐져 있는 실정이며, 특히 유지관리 시스템에 대한 연구는 전무한 실정이다. 이에 당 연구원에서는 연구원 기본연구사업의 하나로서 Bridge 200 사업을 통해 부족한 교량세굴 관련 요소기술 개발을 위한 연구를 진행하고 있으며 이를 바탕으로 건설교통부의 건설기반기술혁신사업을 통해 위험도에 따른 체계적인 교량세굴 관리가 가능하도록 교량세굴 유지관리 시스템을 개발 중에 있다.「그림5」 본 시스템은 수리, 수문, 지반, 구조적 영향 인자와 그 가중치에 대한 데이터베이스를 시스템화 하고 중요한 몇몇 인자들로써 조사 우선순위를 결정한다.「그림6」 이러한 조사 우선순위 결과는 현장 조사를 진행하는 데 기준이 될 수 있으며, 내업과 현장 조사 결과를 바탕으로 교량세굴 위험도 분석이 이루어진다.

개발된 시스템은 교량세굴 위험도를 등급화함으로써 수중조사 및 기초 보수, 보강시 효율적인 예산집행이 가능하며, 홍수시 전국 교량의 피해를 최소화하는데 이바지할 것이다.

■ 자료

한국건설기술연구원, Bridge 200-교량기초 장수명화 기술 개발 연구보고서(2003)

Farrag, K. and Morvant, M. (2002), 'Database Program for Highway Bridge-Scour Data', Proceedings of the First International Conference on Scour of Foundations, Vol.1, ISSMGE, College Station, Texas, pp.272-282.

Ho, C. L., Di Stasi, J. M. and Rees, P. (2002), 'GIS-Based Bridge Scour Prioritization', Proceedings of the First International Conference on Scour of Foundations, Vol.2, ISSMGE, College Station, Texas, pp.516-527.

Palmer, R. and Turkiyyah, G. (1997), 'CAESAR : An Expert System for Cataloging and Expert Evaluation of Scour Risk at Bridge Sites', Res. Report, Dept. of Civil Eng., University of Washington, Seattle, Washington, USA.

■ 자료 제공 : 박재현(지반 연구부 연구원)

■ Jaehyeon@kict.re.kr

Micro-modeling 그 활용성에 대하여

모형실험은 자연을 해석하기 위해 흔히 사용되는 방법이다. 원하는 상황을 조성하기 어렵고 가시적으로 쉽게 파악되지 않는 원형에 대하여 해석하기 위해 모형을 통하여 상황을 재현하고 그 영향을 파악하는 것이다. 그러나 모형실험에 필요한 긴 제작기간, 넓은 실험공간, 제작비용 등의 문제로 인해 필요성에도 불구하고 일부 기피하는 현상도 있다. 마이크로 모델은 기술적인 검증이 이루어진다면 대규모 모형의 문제점들을 해소할 수 있다. 더욱이 최근 많은 하천사업들에 있어 여러 분야 전문가의 참여, 주민과의 협의 및 홍보가 중요한 문제로 부각되고 있어 마이크로 모형의 활용도는 더욱 클 것으로 기대된다.

마이크로모형을 통한 문제해결과정.마이크로 모델은 미공병단의 응용하천공학센터(Applied River Engineering Center, AREC)에서 개발한 수

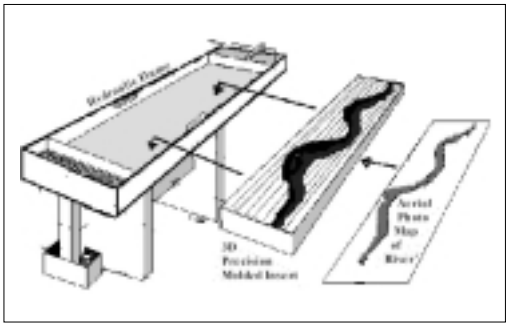
마이크로모형을 통한 문제해결과정

마이크로 모델과 계측 기기 시스템

리모형시스템이다. 현재에도 하천 유사이송문제를 해결하기 위해 전통적인 대축척모형을 사용하고 있으나, 극소축척 기법의 개발로 복잡한 유사문제를 빠르고 비용-효율적으로 해결할 수 있는 가능성을 열었다. St. Louis Missouri의 AREC에서는 1994년 이래 다양한 마이크로 모형 연구가 수행되고 있다.

일본의 경우 1999년경에 소개되어 하천계획수립 등의 목적보다는 정밀도가 낮은 교육 및 전시용도로 설치된 사례가 있으며, AREC(Applied River Engineering Center)의 지속적인 자문을 통하여 연구하고 있다.

마이크로 모델과 계측 기기 시스템마이크로 모델의 전형적인 축척은 수평 1:15,000 ~ 1:600, 수직 1:1,200 ~ 1:100이고, 종횡 왜곡은 5 ~ 13의 범위로서, 1m×2m정도의 모형 규모로 설치 가능한 정도 이다. 대개 하상 재료는 비중 1.2 정도의 플라스틱이 이용되며 하단에 설치된 순환용 펌프에 의해 하상재료도 순환되는 시스템을 갖추고 있다. 또, 모형 규모가 작으므로 실험시 하상 형상 계측 역시 레이저 센서를 이용한 정밀 계측 시스템이 설치되게 된다. 실제 하도의 하상 형상을 정확하게 재현 하기위해 사전에 매우 높은 정밀도의 검정과정이 필요하다. 또한 하도의 현상을 지배하고 있는 요인의 파악정도가 마이크로 모델의 재현성에 크게 영향을 미치기 때문에, 현지조사, 항공사진, 강바닥 평면 종횡단도의 변화, 지질도 등의 분석 · 검토를 충분히 실시하는 것이 중요하다. 마이크로 모델은, 외적 요인인 평면 지형에 대해 대상하도를 정확하게 축소화한 모형을 이용해 강바닥 구배, 강바닥 재료, 유량, 통수 시간 등의 내적 요인을 현지 제원이나 상사법칙에 얽매이지 않고 현지하도에 일치하도록 조정하여, 원형의 하도에 발생하는 하상변동 현상을 적절히 재현 한 극소 모형이라고 말할 수가 있다. 이러한 의미에서 모형의 제작, 조건 설정에는 고도의 하천 기술자로서의 판단이 요구되는 모형이다. AREC는 기본적인



모형 형상을 제작한 후 검정 과정에만 약 4개월이 필요하다고 하고 있다.

모형화 과정은 우선 하천을 축소한 모형제작에서 시작한다. 기존의 하천 경계면은 고정밀도의 상세지형도를 따라 합성수지로 제작된다. 대상 하천형상을 나타낸 이 하천모형은 테이블 크기의 수로에 장착된다.

하천에서 유사이송을 형성하는 실트, 모래, 자갈과 조약돌의 실제흐름을 표현하기 위해 플라스틱으로 크기별로 제작된 유사입자가 사용된다. 실제하천에서 자연적인 구조물과 인위적인 구조물에 의해 생성되는 힘을 모의하기 위해 철망과 유성점토가 이용된다. 하천개수구조물, 정박시설, 섬, 자연적인 암반돌출 등과 같은 이들 구조물들은 모형에서 각각 축척에 맞추어 설치된다.

자동화된 마이크로 모형 시스템 개요도용도에 따라 제작되는 수로는 마이크로 모형화 과정에서 각 단계를 종합하는 부분이다. 이 수로는 모형의 경사조절을 위한 회전잭, 펌프와 유사 챔버를 포함하는 수조, 그리고 전기로 조절되는 밸브를 포함한 몇몇 중요 특성장치가 장착된다. 또한 이동이 가능하고 필요에 따라 전시의 목적으로 장거리를 이동할 수도 있다.

이 기법의 열쇠는 고정밀 계측장비를 이용한 자동제어이다. 일련의 조절밸브들, 내구성

자동화된 마이크로 모형 시스템 개요도

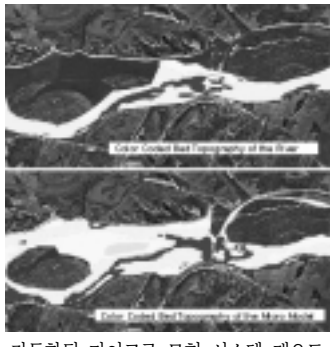
을 갖춘 원심펌프와 주문제작된 컴퓨터 및 소프트웨어를 종합적으로 장착하여 하천의 수리학적 프로세스들을 모의한다. 이 장치들은 모형에서 물과 유사의 흐름을 자동적으로 조절할 수 있게 해준다. 이를 통해 마이크로모형에서 유사와 물의 움직임에 관한 복잡한 자연의 수리학적 프로세스를 재현하고 실체하천의 하상형성을 모의할 수 있게 된다.

마이크로모형의 운영상 중요한 문제는 물과 유사의 입 · 출력에 있어서의 균형과 재현성이다. 컴퓨터 소프트웨어는 모형에서 저수흐름으로부터 고수흐름까지 진폭과 지속기간을 조절함으로써 하천의 연간 흐름주기를 모의한다. 모형에서 유사이송에 따라 하단부로 온 유사는 펌프로 즉각 상류단끝으로 다시 유입시키는 과정을 통해 유사흐름의 균형을 보장한다.

3차원 레이저 스캐너와 디지타이저를 이용하여 마이크로모델로부터 극도로 고해상도의 하상지형자료가 수집된다. 각 모형의 검정 후에 설계자가 모형에서 플라스틱제 유사로 구성된 하상으로부터 스캐너와 디지타이저를 이용하여 수만개소에서 자료를 수집할 수 있다. 수집된 자료들은 후처리과정을 통하여 실제좌표로 변환되어 하상지형도로 만들어진다. 이 지형도들은 모형이 실제와 유사하게 반응하는가를 검정하기 위해 실제하천에서 측량된 지도와 비교된다.

일단 이 상사성이 얻어지면, 마이크로 모형은 하천에 시도되는 정비관련 설계기법에 따라 모형경사, 유량, 유입유사, 하안선 등을 포함하는 많은 인자들에 대해 조절과정을 통해 모형에서의 흐름과 하상형성이 실제 하천에서처럼 거동하도록 만들 수 있다. 모형에서는 이들 두 물리적 특성을 이용하여 하천의 특성을 정확하게 재현하도록 하여, 하천에서 장래에 발생할 것으로 기대되는 정성적인 변화들을 예측하는데 이용된다. 모형에서 관찰된 하상토와 흐름양상의 변화들은 소위 흐름가시화(flow visualization)로 불리는 촬영과정과 레이저스캐너를 통한 출력물을 이용하여 습득된다.

이 기법이 개발된 미국에서는 Mississippi 강 측수로의 환경적 복원, Mississippi와 Missouri강의 흐름 및 유사조건 개선, 그리고 소하천을 가로지르는 고속도로 교량사업 등 많은 건설사업들이 마이크로모형 기법을 이용한 결과로 수행되어 왔다.



자동화된 마이크로 모형 시스템 개요도

마이크로 모델은 하도내에서 발생하는 현상을 전체를 일관하는 가시적 표현이 가능하고, 조건의 재현 정확성에 따라 하도특성을 비교적 상세히 재현할 수 있다.

이러한 마이크로 모델의 특성을 고려한다면, 모형의 정밀도와 검정단계의 정확성등급에 따라 기초적인 교육용이나 홍보용으로부터 상세검정을 거쳐 사업의 정량적분석까지 실시하여 계획안을 검토하는 용도에 이르기까지 다양한 이용이 가능할 것으로 보인다. ♧

■ 자료 : http://www.jice.or.jp/micro/
■ 자료제공 : 여홍구(수자원연구부 선임연구원)
■ yeo917@kict.re.kr

CSO저감을 위한 차집오염량 조절 시스템

합류식 하수관거는 우수와 하수를 동시에 운반하기 위하여 설계된 시스템이다. 평상시에는 발생되는 하수를 모두 차집하므로 분류식과 동일하게 운영되지만, 강우시에는 우수토실에서 차집관로 용량(일반적으로 시간최대 하수량의 3배 정도)이 허용하는 만큼의 하수만 차집하고, 그 이상의 하수는 하천으로 방류한다. 이것을 합류식 하수도 월류수(CSOs, Combined Sewer Overflows)라고 하는데, 선진 외국에서는 하천수질 개선을 위한 핵심사업으로 합류식 하수도 월류수 제어시설을 설치하고 있다. 본 고에서는 국내외 우수토실 개량 사례와 차집오염부하 최대화 시스템의 효과와 적용 분야에 대해 소개하였다.

1. 국내 우수토실의 문제점

① 제외지 설치

국내 대부분의 토구가 제외지에 설치되어 있다. 이는 강우시 하천의 수위가 상승할 경우, 하천수가 차집관거로 유입되어 하수처리장 유입수질을 떨어뜨려 운영효율을 저하시키고 동력비 낭비의 원인을 제공하고 있다.

② 오리피스 구조 모순

국내 우수토실은 대부분 횡월류식으로 스크린이 연결관에 설치되어 있어 고형물이나 비닐 등이 걸려 폐색되는 경우가 많이 발생한다. 이로 인해 평상시에도 월류 사고가 빈번하게 발생하여 하천수질 오염 및 미관을 해치고 있다.

③ 평상시 저유속

평상시 유량이 적고 유속이 느려 고형물이 쉽게 퇴적되며, 강우가 발생하게 되면, 유속이 빨라져 퇴적된 고형물이 일시에 방류수역으로 유출된다. 고형물 퇴적이 많으면, 많을수록 초기세척현상이 강하게 나타난다고 볼 수 있다.

④ 과대한 웨어높이로 인한 불합리한 차집

평상시 고형물 퇴적으로 인한 월류사고를 방지하기 위하여 웨어를 과대하게 높여 시

공한 경우가 많다. 이로 이해 강우시 차집관로 상류의 우수토실은 계획보다 많이 차집되어 하류부 우수토실은 강우초기부터 월류하는 일이 빈번하다.

2. 국내 및 선진외국의 사례

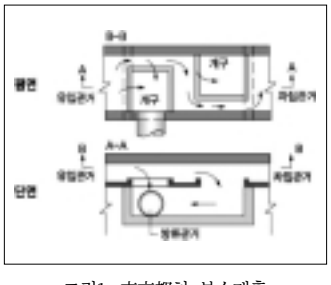


그림1. 東京都형 분수맨홀

(1) 분수맨홀

방류관거 주변에 격벽을 설치하여 일정 차집량만을 유지하는 시설로서, 강우시 우수토실에서 유하량이 급격히 증가할 경우, 월류웨어에 의한 충분한 월류가 어려우며, 하천수 역류시 계획차집량을 초과하는 유량이 처리장으로 유입되어 문제가 발생한다.

(2) 부표식 자동차단 설비

부표를 이용하여 차집관거

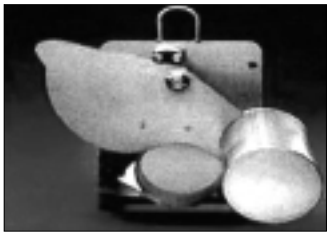


그림2. 부표식 자동차단 설비

유입관의 수문 개도를 조작하여 차집유량을 제어하는 시설로서, 차집관로 유입량을 우수토실내 수위에 따라 조절이 가능하다. 또한 하천수 역류시 수위가 상승할 경우, 자동차단이 가능하나, 고장이 잦고 강우 초기 고농도 하수를 월류시킬 우려가 있다.

(3) 차집오염부하 최대화 시스템

① 개 요

하수량을 감지하기 위한 유량계 또는 수위센서와 오염도를 검출하기 위한 전기전도도 또는 SS 등과 같은 수질검출기(측정센서)가 설치된다. 이를 이용하여 우수토실로 유입되는 하수의 양과 오염도를 검출하고 연결관에 자동수문을 설치하여 개별 우수토실의 차집하수량을 조절할 수 있다. 또한, 제어시스템이 설치되지 않은 지점의 수질, 유량 및 수위 등을 예측할 수 있는 유출모의 시스템을 이용하여, 차집오염부하를 극대화시키는 시스템이다.

② 효 과

합류식 하수도 우수토실에서는 불합리한 차집패턴으로 인해 차집관거의 용량이 부족하여 고농도의 하수가 월류되었다. 따라서, 전체 차집오염부하량은 매우 낮을 수밖에 없었다. 그러나, 차집오염부하 최대화 시스템을 기존 합류식 하수관거에 적용하게 되면, 각 우수토실에서 수문의 개도를 조절하여 하수의 차집량을 제어할 수 있어 모든 우수토실에서 계획 하수량을 차집헐 수 있다.

그림2을 살펴보면, 기존 합류식 하수관거 시스템하에서 차집되는 총차집유량을 ΣQi, 총차집오염부하량을 $\Sigma(Qi \times Ci)$라 하고 차집오염부하 최대화 시스템이 적용된 경우에 총차집유량을 ΣQj, 총차집오염부하량을 $\Sigma(Qj \times Cj)$라 한다면,

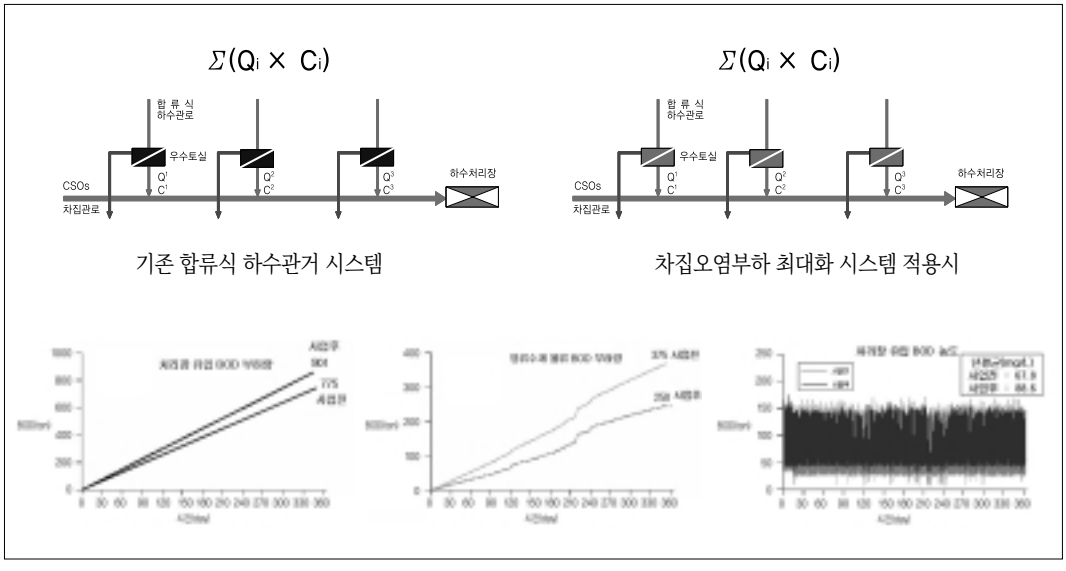


그림2. 차집오염부하 최대화 시스템 적용 전·후의 하수처리장 유입수질 모의(SWMM) 결과

표1. 차집오염부하 최대화 시스템 적용 전·후의 하수처리장 유입수질 모의(SWMM) 결과

구 분		개선 사업전	개선 사업후	비 고
하수처리장 (년간)	평균 BOD 유입 농도 (mg/L)	67.8	88.6	사업전 대비 30.7%증가
	누적 BOD 유입 부하량 (ton)	775	901	사업전 대비 16.3% 증가
년간 BOD 월류 부하량(ton)		375	252	사업전 대비 33.3% 감소

ΣQi 와 ΣQj가 같을 경우, 그림3의 처리장 유입수질 모의 결과에서와 같이 Σ(Qi×Ci)보다 Σ(Qj×Cj)가 크게 된다. 따라서 하수처리장의 유입수질농도를 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라, 월류부하량을 감소시킬 수 있다. 아래 표1에 G하수처리장을 대상으로 한 모의 결과를 나타냈다.

■ 자료
1. 하수도 시설개축 및 기능개선 전략연구. 국립환경연구원, 1997.
2. 하수관거 현대화를 위한 핵심 정비 공법 개발 중간보고서, 한구건설기술연구원 2003.
■ 자료 제공 : 송호면(건설환경연구부 수석연구원)
■ hmsong@kict.re.kr