

교각주위내 국부세굴공식의 적정 적용성에 관한 연구

최계운*, 서병하**, 김동욱***

1. 서론

1900년대 중반에 들어오면서 국부세굴에 대한 관심이 증가되었고 여러학자들에 의하여 전반적인 국부세굴 현상에 대한 실험위주의 연구가 진행되었다. Ishihara(1945), Laursen & Toch(1953), Tanaka & Yano(1967)의 국부세굴 연구에 이어서 Shen등(1969)은 지금까지의 세굴이론을 요약정리하여 마제형와류계 이론을 규명하였고, 국부세굴의 형태를 무세굴, 정적세굴, 동적세굴로 구분하여 정적세굴시의 국부세굴공식으로 교각레이놀즈(Rep)함수로 나타내는 실험식을 제안하였다. Jain & Fisher(1979)는 유속에 따른 Froude수와 세굴심과의 관계를 연구하였고, Hughe(1980)는 하상재료의 변화에 따른 세굴심을 연구하였으며, Breuser(1964)는 기존에 연구된 많은 실험자료를 정리하여 한계유속(V_c)에 따라 정적세굴과 동적세굴에 각각 이용할 수 있는 실험식을 제안하였고, Raudkivi & Ettma(1977)는 정적세굴의 최대값을 단순하게 예상할 수 있는 공식을 제안하는등 지금까지 제안된 국부세굴공식은 수십종에 달하고 있다. 또한, 각각의 공식마다 세굴의 주요인자들을 다르게 고려하였을 뿐 만 아니라 실험실 조건과 현장의 지형·수리특성등의 차이로 인하여 세굴심 산출결과도 제안된 공식에 따라 매우 큰 차이를 나타내는 것으로 알려져 있으며, 이러한 이유들로 인하여 실제자연하천에서의 국부세굴심 산정을 위하여 공식을 선정하는 것은 매우 어려운 것이 현실이다. 따라서, 본 연구에서는 실제 교량등 수중구조물의 설계에 있어서 국부세굴을 감안할 경우 국부세굴심 산정공식의 적절한 선정을 위하여, 실측 세굴심과 각각의 공식이 산정한 계산세굴심과를 비교하고 이를 통하여 국부세굴심의 산정을 위한 적정 공식의 선택에 지침을 제공하고자 한다.

2. 세굴공식 선정 및 현장 측정자료의 수집

현장에서의 실측 세굴심도의 자료는 48개 강 또는 하천에 설치되어 있는 교량의 교각에 대한 272개 세굴 실측자료를 사용하였으며 그 내용은 표 2.1과 같다. 또한 실측자료와 비교하기 위한 공식으로는 Inglis-Poona공식, Chitale공식, Inglis-Lacey공식, Laursen-Toch공식, Blench공식, Laursen I 공식, Laursen II 공식, Varzeliotis공식, Bata공식, Ahmad공식, Larras공식, Neill공식, Breusers공식,

* 인천대학교 토목공학과 교수

** 인하대학교 토목공학과 교수

*** 인천대학교 토목공학과 석사과정

Hancu공식, Shen-Karaki I 공식, Shen-Karaki II 공식, Shen-Karaki III 공식, Coleman공식, C.S.U.공식, Melville공식, USGS공식, Basik-Basamily-Ergun공식, Raudikivi & Ettema공식, Jain & Fisher공식, Froehlich공식등 25개 공식을 선정하였다. 선정된 25개 각각의 공식에 의한 세굴심 산정량을 세로축에, 표 2.1의 내용과 같은 272개 실측 세굴심도 데이터를 가로축에 표시한 후 그 결과물 선형 회귀분석하여 굵은 실선으로 표시하고 실측-계산 일치곡선을 가는 실선으로 표시하여 두 개의 곡선이 나타내고 있는 결과를 비교하고 분석하였다.

표 2.1 자연하천의 교각에 대한 실측자료수

강 이름	교각형상	자료갯수	강 이름	교각형상	자료갯수
Ohau	Cylinder	11	Galizga	Oval	2
Red	Rectangular	5	Moscow	Oval	1
	Cylinder	2	Sozh	Oval	2
Atchafalaya	Lenticular	6	Dnieper	Oval	14
Mississippi	Rectangular	2	Dou	Oval	1
South platte	Rectangular	2	Chirchik	Oval	34
	Sharp nose	2		Pile Found	2
Alkansas	Rounded	2	Elek	Oval	1
Rio grande	Sharp nose	2	Deek	Oval	1
Beaver	Rounded	1	Anu-Darya	Round	31
Danude	Rounded	2	Ishru	Oval	2
Niger	Rounded	1	Skook	Oval	3
Waikato	Square	2	Seym	Oval	1
Big Wanganni	Square	1	Ravy	Round	8
Matawhero	Rounded	1	Pakustau	Oval	4
Susitna	Sharp nose	9	Protva	Round	13
Anchorage-Fairbanks	Sharp nose	1	Dzhelun	Round	1
Hwy bridge	Sharp nose	1	Oka	Round	29
	Rounded	1		Oval	9
Sunshine Alaska	Sharp nose	3	Rocky	Round	1
Knik	Sharp nose	1	Socham	Round	1
	Rounded	11	Indus	Round	1
Tazlina	Sharp nose	4	Selenga	Oval	2
Tanana	Rounded	5	Ob	Round	6
Snow	Rounded	1	Djhon	Round	1
Volga	Round	16	Tobol	Oval	2
Agul	Oval	3	Power line	Round	1

3. 세굴공식을 이용한 국부세굴심 산정결과의 비교

실측자료와 계산에 의한 세굴심 산정의 비교결과는 크게 네가지로 분류할 수 있다. 첫째는 실측세굴심보다 세굴심을 과도하게 산정하는 경우이며, 둘째는 계산에 의한 세굴심이 실측세굴심 보다 과소하게 산정하는 경우이고, 셋째는 실측세굴심의 깊이에 따라 크게도, 혹은 작게도 산정하는 경우이며, 넷째로 계산에 의한 세굴심 산정결과가 비교적 실측세굴심을 잘 예상하는 경우이다.

3.1 세굴심 과도산정의 경우

Hancu공식과 Raudkivi & Ettma공식의 경우를 살펴보면 그림 3.1과 그림 3.2에서 나타나듯이 계산에 의한 세굴심 산정이 실측세굴심보다 크게 산정하는 것을 알 수 있으며 세굴심이 커질수록 더욱 큰 세굴심을 산정하는 것을 알 수 있다. 실측세굴심도가 약 10m의 경우 Hancu공식은 약 40m의 세굴심을 나타내고 있고, Raudkivi & Ettma공식은 약 24m정도의 세굴심을 산정하는 것으로 나타나고 있다.

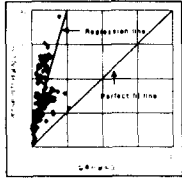


그림 3.1 Hancu공식

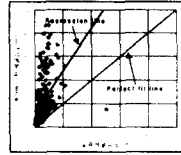


그림 3.2 Raudkivi & Etma공식

3.2 세굴심 과소산정의 경우

그림 3.3에서 3.5의 경우 Brench공식, Laursen II공식, Vazeliotis공식의 세굴심 산정결과와 실측세굴심의 비교를 나타내고 있다. 각각의 공식 모두 세굴심의 깊이에 상관없이 실측세굴심보다 적은 세굴심을 산정하는 것을 알 수 있다. 실측세굴심도가 약 10m인 경우 Blench공식과 Laursen II공식은 약 2.5m를 산정하는 것을 알 수 있고, Vazeliotis공식의 경우는 세굴보다 오히려 퇴적이 약 1m가 발생하는 것으로 나타남을 알 수 있다. Englis-Lacey공식의 경우 세굴심 산정결과가 실측세굴심보다 약 0.3~0.5m정도 작게 산정하고 있지만 세굴심의 추세는 비교적 정확히 산정하고 있는 것을 알 수 있다.

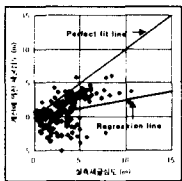


그림 3.3 Blench 공식

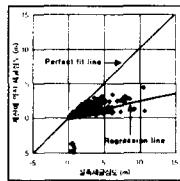


그림 3.4 Laursen II 공식

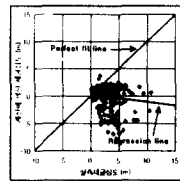


그림 3.5 Vazeliotis공식

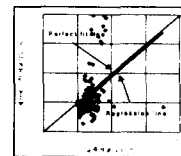


그림 3.6 Englis-Lacey공식

3.3 세굴심에 따른 과다, 과소 산정의 경우

그림 3.6부터 3.21까지를 살펴보면 세굴심도에 따라 계산에 의한 세굴심도 산정이 크게도, 혹은 작게도 산정하고 있는 것을 알 수 있으며 세굴심도가 비교적 작은 경우 과다 산정을, 세굴심도가 비교적 클 경우에는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있다.

Inglis-Poona공식의 경우 세굴깊이와 무관하게 대략 1m 정도의 세굴심을 산정하고 있음을 알 수 있으며 세굴심도 약 1m 이하에서는 과다산정을, 약 1m 이상에서는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있다. Chatale공식과 Ahmad공식, 그리고 Bata공식의 경우 실측세굴심도가 약 2.5m 이하에서는 과다산정을, 약 2.5m 이상에서는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있다.

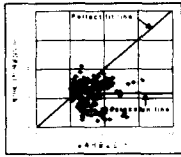


그림 3.7
Inglis-Poona공식

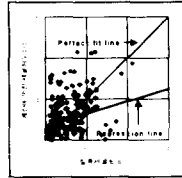


그림 3.8 Chatale공식

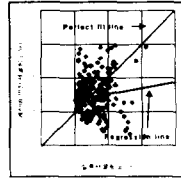


그림 3.9 Ahmad공식

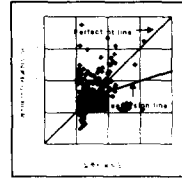


그림 3.10 Bata공식

USGS공식의 경우 실측세굴심도가 약 4m 이하에서는 과다산정을, 약 4m 이상에서는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있고, Coleman공식의 경우 실측세굴심도가 3m 이하에서는 과다산정을, 3m 이상에서는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있다. Larras공식과 Basik-Basamily-Ergun공식의 경우 실측세굴심도가 약 1~2m 이상에서는 과소산정을 하고 있으며 Basik-Basamily-Ergun공식에서는 세굴심 10 m에서 약 8m가 작은 2m 정도를 산정하고 있음을 알 수 있다.

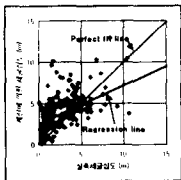


그림 3.11 USGS공식

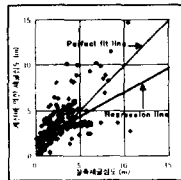


그림 3.12 Coleman공식

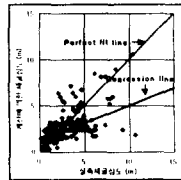


그림 3.13 Larras공식

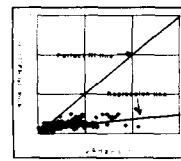


그림 3.14 Basik-Basamily-Ergun공식

Shen-Karaki I, II 공식의 경우 실측세굴심도가 약 3~4m 이하에서는 과다산정을, 약 3~4m 이상에서는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있고, 공식 I 보다는 공식 II가, 그리고 공식 II 보다는 공식 III이 실측-계산 일치곡선에 근접함을 알 수 있다. Shen-Karaki III공식과 Melville공식의 경우 실측세굴심도 6m까지는 과다산정을, 그 이상에서는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있다.

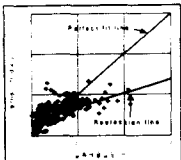


그림 3.15
Shen-Karaki I 공식

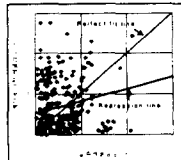


그림 3.16
Shen-Karaki II 공식

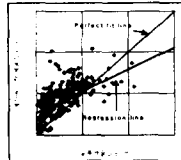


그림 3.17
Shen-Karaki III 공식

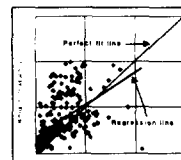


그림 3.18 Melville공식

Laursen I 공식과 Breusers 공식의 경우 실측세굴심도 약 8~10m까지는 과다산정을, 그 이상에서는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있고, Neill 공식과 Jain & Fisher 공식의 경우 실측세굴심도 약 11~12m까지는 과다산정을, 그 이상에서는 과소산정을 하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 아래 그림의 4개 공식은 지금까지 열거된 17개 공식과 비교해볼 때 선형회귀곡선과 실측-계산 일치곡선의 차이가 비교적 작음을 알 수 있다.

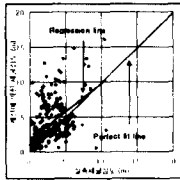


그림 3.19 Laursen I 공식

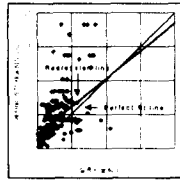


그림 3.20 Breusers 공식

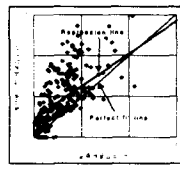


그림 3.21 Jain & Fisher 공식

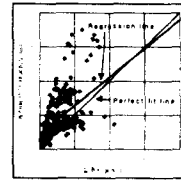


그림 3.22 Neill 공식

3.4 세굴심 산정결과가 비교적 적절한 경우

Laursen-Toch 공식과 Froehlich 공식의 경우는 실측세굴심 보다 약 2.5m 정도 과다산정을 하고 있지만 회귀곡선의 추세는 실측-계산 일치곡선과 거의 일치하는 것을 알 수 있으며, C.S.U. 공식의 경우는 실측세굴심 보다 약 1m 정도 과다산정을 하고 있지만 회귀곡선의 추세는 실측-계산 일치곡선과 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

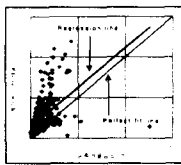


그림 3.23
Laursen-Toch 공식

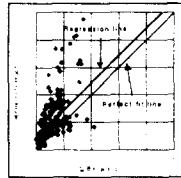


그림 3.24 Froehlich 공식

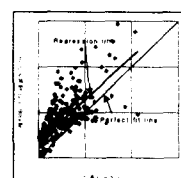


그림 3.25 C.S.U. 공식

4. 결론

앞에서 언급하였듯이 지금까지 제안되어진 수십종의 국부세굴공식들은 고려된 주요인자들이 서로 다르고 또한, 실험조건과 실제 자연하천의 지형·수리특성등의 차이로 인하여 실제하천에서 국부세굴산출을 위한 국부세굴공식으로서의 적용시 실제 세굴심도와는 큰 차이를 나타내었다.

Hancu 공식과 Raudikivi & Ettema 공식의 경우 지나치게 과도한 산정결과를 나타냄으로서 세굴심도 산정에 일반적인 적용은 부적합한 것으로 판단된다.

Inglis-Poona 공식, Chitale 공식, Blench 공식, Laursen II 공식, Varzeliotis 공식, Bata 공식, Ahmad 공

식, Larras공식, Shen-Karaki I 공식, Shen-Karaki II 공식, Shen-Karaki III 공식, Coleman 공식, Melville 공식, USGS 공식, Basik-Basamily-Ergun 공식, Breusers 공식 등은 세굴심에 따라 국부세굴 산정량이 과다 혹은 과소로 나타나고 있으며 그 차이도 상당히 큰 것으로 나타나 세굴심도 산정에 일반적인 적용은 부적합한 것으로 판단된다.

그러나 Neill 공식, Jain & Fisher 공식, Laursen I 공식 등은 세굴심에 따라 산정량이 과다 혹은 과소산정을 하지만 그 차이가 비교적 작고 또한 실제하천에서의 최대 세굴심이 10m를 넘는 경우가 적으므로 조심스러운 적용이 가능하다고 사료된다.

Inglis-Lacey 공식의 경우는 세굴심에 무관하게 과소산정을 하고 있지만 회귀분석곡선의 추세는 실측세굴심도를 비교적 잘 반영하고 있으므로 안전율등을 고려한다면 적용이 가능하다고 판단된다.

C.S.U. 공식, Froehlich 공식, Laursen-Toch 공식 등은 실측-계산 일치곡선과 회귀분석곡선의 기울기가 거의 일치하고 또한 약간의 과다산정을 하고 있으므로 안전한 측면에서도 적용이 가능하다고 판단된다. 따라서, C.S.U. 공식, Froehlich 공식, Laursen-Toch 공식 등은 자연하천의 범용적인 국부세굴 산정공식으로 적절하다고 판단되며 Neill 공식, Jain & Fisher 공식, Laursen I 공식, Inglis-Lacey 공식 등은 국부세굴 산정공식으로 제한된 적용이 가능하다고 사료된다.

5. 참고문헌

1. Ettema, R., Scour at Bridge piers, Report No. 216, Dept of Civil Engineering, Univ., of Auckland, New Zealand, 1980.
3. Henderson, F. M., Open Channel Flow, Dept. of Civil Engineering, Univ., of Canterbury, New Zealand, 1966.
2. Ishihara, T., Experimental Study of Scour at Bridge Piers, Trans. Jap. Soc. of Civ. Eng., 28(11), 1945.
3. Jain, S. C., Maximum Clear-Water Scour Around Circular Piers, Journal of Hydraulics division, ASCE, Vol. 107, 1981, pp. 611~626.
4. Laursen, E. M. and Toch A., A Generalized Model Study of Scour around Bridge Piers and Abutments, Proc. IAHR, 1953.
5. Melville, B. W., Local Scour at Bridge Sites, Report No. 117, School of Engineering, Univ. of Auckland, New Zealand, 1975.
6. Raudkivi, A. J. and R. Ettema, Effect of Sediment Gradation on Clear-Water Scour, J. of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 103, 1977.
7. Richardson, E. V. et al., "Highways in the River Environment", First ed., U. S. Dept of Transportation, FHWA, Ft. Collins, Co., III-14~III-22, 1987.
8. Richardson, et al., "Scour at Bridges", FHWA, U.S. Dept. of transportation. 1988.
9. Shen, H. W., V. R. Schneider, S. Karaki, Local Scour around Bridge Piers, Jour. of the Hydraulics Division ASCE, 1969, pp. 1919~1940.
10. Tanaka Shigru and Yano Motoaki, Local Scour around Circular Cylinders, Proc., IAHR, 1967.
11. 안경수, 최계운, 오정희, "Y형 교각 주위에서의 국부 세굴심도 및 배후 하상 변화", 한국수자원학회 학술발표회 논문집, 1996.