

1次元 不等流 計算模型을 이용한 橋梁에서의 洪水로 인한 最大洗掘深度 豫測
Estimation of Maximum Total Scour Depth At Bridge with Flood Hydraulics Analysis
By 1-Dimension Varied Flow Model

윤용남* 이광춘** 이재수*** 김중훈*

1. 서론

홍수로 인한 교량의 교각 및 교대에 있어서의 세굴은 교량의 붕괴 또는 구조적인 안정에 피해를 입히게 된다. 특히 대도시지역 교량의 경우 붕괴 또는 구조적인 안정성의 결여는 지역내 교통난과 함께 사회적, 경제적인 측면에서 많은 영향을 미치게 된다. 홍수로 인한 교량의 세굴의 피해는 교량 기초부의 세굴이 가장 일반적인 형태로, 교각 기초부의 세굴피해는 교량의 붕괴에 중요한 요인으로 작용될 수 있다.

홍수로 인한 교량의 최대 세굴심도의 예측에 있어 필요한 수리특성치의 분석을 위해 1차원 홍수위곡선 계산모형인 WSPRO모형과 HEC-2모형을 적용하였고, 두 모형의 적용을 통해 교량을 통과하는 흐름의 수리해석 방법을 비교 검토하여 세굴심 예측을 위한 수리특성 분석에의 적절성을 파악하고자 한다. 교량에서의 총세굴깊이를 결정하여, 각 수리모형의 적용성을 검토하기 위해 총세굴심의 예측을 HEC-18에 제시된 절차에 따라 통수단면의 수축으로 인한 세굴, 교각 및 교대에 서 발생하는 국부세굴을 각각 세굴심 공식을 적용하였다. 본 논문에서는 세굴예측과정을 통해 1차원 수리모형인 두 모형을 적용하여 얻은 수리특성치를 이용하여 교량세굴의 각 요소별로 결정하여 결정된 세굴심을 비교 검토하여 세굴심 산정에 적절한 모형의 판단과 세굴심예측절차의 정립을 목적으로 한다.

2. 적용 수리모형의 검토

개수로상의 1차원 정상점변류(Steady Gradually varied flow) 흐름을 분석하기 위한 WSPRO모형은 교

* 고려대학교 토목환경공학과 교수

** 고려대학교 토목환경공학과 대학원

*** 고려대학교 방재과학기술연구원 선임연구원

량의 통수단면(Bridge opening)와 교각의 설계를 주목적으로 하여 개발되어졌으며, 설계목적에 따라 다양한 형태의 교량 통수단면과 교대부 제방 제원을 고려할 수 있다. 또한 세굴심 예측을 위한 수리특성 분석의 적용시 5%유량통과구간을 설정하여 단면을 통수능이 같은 20개의 구간으로 나누어 각 구간별 수리특성을 분석할 수 있다.

WSPRO모형의 기본방정식은 표준축차법(Standard step method)으로 이 방법을 이용하여 배수위 계산을 실행한다. 표준축차법의 에너지 보존법칙에 따른 1차원 에너지 방정식은 다음과 같다.

$$h_1 + h_{v1} = h_0 + h_{v0} + h_f + h_e \quad (1)$$

여기서, h , h_v 는 각 단면의 위치수두, 속도수두이며, h_f , h_e 는 흐름으로 인한 마찰손실과 미소손실량이다.

교량 통과흐름이 자유흐름특성을 갖는 흐름해석시 Schneider와 수면곡선 계산법을 채택하게 된다. 이 방법은 교량주위의 마찰손실 계산을 수정, 보완한 방법으로 Schneider의 교량주위의 마찰손실 계산방법의 특징을 요약하면 다음과 같다.

- ① 교량단면과 상류단면사이의 유효흐름길이 채택
- ② 교량단면의 상하류 통수능으로 최소 통수능 선택
- ③ 교량단면과 하류단면사이의 확대손실 적용

WSPRO모형에서 교량단면의 흐름축소로 인한 에너지 손실을 고려하기 위해 유효흐름길이를 사용하는데, 이 유효흐름길이는 1차원 흐름조건을 만족시키며 1차원 흐름상태에 위치하게 된다. 수축정도가 미소하고 균일한 통수능을 가진 대칭형의 수축단면에서 실제 곡선 유심선을 직선형태로 단순화시켜 구한 평균유효길이는 정해보다 3%가 발생되며, 수축비가 큰 경우에는 정해와 차이가 5%정도 발생하는 것으로 알려져 있다.

HEC-2모형은 자연하천이나 인공하천에서의 흐름이 1차원 정상류(steady flow)상태의 연변류(gradually varied flow)인 흐름에 대해 적용할 수 있는 수리해석모형으로 기본방정식은 WSPRO모형과 같은 표준축차법을 채택하고 있다. 교량통과흐름에 대해 교량으로 인한 에너지 손실은 교량 상하류단에서 통수단면의 축소와 확대에 의한 손실과 교량 자체내에서 발생하는 손실로 나눌 수 있다. 특히 교량 자체내에서 발생하는 손실량을 계산하기 위해 HEC-2모형은 두가지 방법, 1) 표준축차계산법을 이용하여 마찰손실을 계산하는 Normal Bridge method, 2) Special Bridge method를 이용하여 각 흐름별로 에너지손실을 계산하는 방법이 있다.

표.1은 Normal Bridge method와 Special Bridge method의 특징을 요약 정리한 것이다.

표.1 교량손실 계산방법 비교

Normal Bridge method	Special Bridge method
<ul style="list-style-type: none"> - 마찰손실이 지배적인 경우 - 교량에 의한 단면변화와 흐름변화가 적은 경우 - 제형 등가단면으로 적용하기 힘든 경우 	<ul style="list-style-type: none"> - 폭넓은 범위의 흐름해석 가능 - 교량 이외의 Culvert, 댐, 웨어에도 적용가능

3. 교량세굴의 기본개념 및 세굴심 예측절차

세굴은 하천의 하상으로부터 유수의 침식작용으로 인해 하상물질이 굴착되어 이송되는 현상을 말한다. 세굴은 하상재료에 따라 다른 비율로 발생하게 되며, 세굴예측에 있어 예측지점의 하상평균 입도분포를 고려해야 한다. 교량단면에서 발생하는 총 세굴심(Total Scour)은 3가지 요소로 구성되어 있는데, 교량세굴의 각 요소별로 살펴보면 다음과 같다.

1) 장기적 하상변동 - 하상 상승(Aggradation)과 저하(Degradation)

교량이 위치한 하도구간내에서 자연적인 또는 인위적인 원인으로 하상표고의 장기적인 변화.

2) 수축 세굴(Contraction Scour)

자연하천상에서 통수단면의 수축으로 흐름속도가 증가되며, 그로 인해 하상의 전단응력 증가이 증가되게 되어 하상물질을 이송시키게 된다. 교량단면에서는 교대와 교각으로 인해 통수단면이 축소되어 수축세굴이 발생한다.

3) 국부 세굴(Local Scour)

흐름방향의 장애물이 설치되어 있는 경우 흐름의 가속과 와류의 발생으로 국부세굴이 발생하게 된다. 교량단면에서 교각, 교대주위에서 국부세굴로 인한 하상의 세굴이 발생한다.

4) 하천수로의 횡적이동(Lateral Stream Migration)

하천수로에서 홍수터내 주수로가 자연발생적으로 횡적 이동을 하게 된다. 하천수로의 횡적이동은 교각 및 교대의 접근방향을 변화시켜 세굴을 증가시킨다. 이로 인한 교량의 안전에 많은 영향을 미치게 된다.

수축세굴심을 결정하는 방법은 유사량 이송보존법칙(Principle of conservation of sediment transport)을 근거로 하여 결정한다. 수축단면으로의 하상물질이송에 따라 2가지 형태로 분류하여 적용한다. Live-bed Scour는 수축단면으로 유사이송이 발생한 경우로 수축단면으로 이송되어온 유사량이 수축단면 밖으로 이송되는 유사량과 같아지는 평형상태에 도달될때의 교량 수축단면의 세굴심을 구한다. Clear-Water Scour는 수축단면 상류흐름에서 유사이송이 발생되지 않는 경우로 수축단면의 전단응력이 세굴에 의한 통수면적 증가로 감소상태(한계전단응력)에 도달할 때의 세굴심으로 결정한다.

국부세굴은 교량의 교대와 교각에서 발생하는 기초부에서의 와류형성에 의한 것이다. 와류형성은 교대나 교각주위에서 상류흐름이 충돌하식 가속됨에 따라 기초부의 하상물질을 제거시키게 된다. 세굴심의 증가에 따라 와류의 세기는 약화되어 평형상태에 도달하면 세굴은 감소하게 된다. 국부 세굴에 영향을 미치는 요소로는 교각의 폭, 교대의 돌출길이, 교각이 흐름방향과 일직선상에 있지 않을 경우의 교각의 투영길이, 교각, 교대로 접근하는 흐름의 수심과 유속, 하상재료 크기와 입도분포, 교각, 교대로의 접근각 등이 있다.

교량 최대세굴심 계산절차는 교량단면에서 발생하는 총세굴심의 3가지 요소를 각기 다른 방법을 이용하여 HEC-18에서 제시한 7단계과정에 따라 추정한다. 수축세굴과 국부세굴에 대한 세굴심 추정에 앞서 고정상 수로 (Fixed-bed channel)에 대해 장기적인 하상변동을 고려하여 고정상 수로를

조정하게 된다. 교량 최대세굴심 계산에 있어 7단계과정은 다음과 같다.

- 1) 세굴계산에 필요한 수리학적 변수결정
- 2) 장기적인 하상변동을 분석
- 3) 세굴심 계산방법 평가
- 4) 수축세굴량 계산
- 5) 교대의 국부세굴심 계산
- 6) 교각의 국부세굴심 계산
- 7) 교량단면의 총세굴심 단면도 작성

4. 모형의 적용결과

4.1 수리특성 분석

모형 적용을 위해 교량으로 한강하류부에 위치한 영동대교를 선정하였다. 영동대교는 1973년에 건설된 교량으로 교량의 폭은 25m이며 교량길이는 850m에 이르는 한강상의 교량이다. 교량의 교각은 총 16기가 있으며 교량 양끝단에 2개의 교대가 설치되어 있다. (그림.1 참조)

실제 세굴심계산에 앞서 모형에 대한 평가를 위해 두 모형을 동일한 조건에서 수리계산을 실시시켜 그 결과를 비교 검토함으로써 모형의 적절성을 파악하고자 한다. 모형의 적용은 다음과 같은 조건으로 실시시켰다. (그림.2 참조)

- 1) HEC-2모형의 Normal Bridge method를 이용한 수리계산
- 2) 교량이 없는 상태로 HEC-2모형을 이용한 수리계산
- 3) WSPRO모형의 Design mode를 이용한 수리계산

1)과3)의 실행은 두 모형의 비교를 하기 위함이며, 2)의 실행은 대상구간에서 교량에 의한 수면곡선을 영향을 파악하기 위해 실행하였다. 교량이 없는 상태에서의 WSPRO모형의 실행은 여느 1차원 부정류 수리해석모형과 다르지 않기 때문이다. 모형의 실행시 동일한 조건의 실행을 위해 다음과 같은 값을 이용하였다.

1) 유량 - 한강본류상의 계획 홍수량인 37,000 cms를 유량으로 사용하였다.

2) 초기수심 - 영동대교 상하류단의 실제 수위의 실측치가 없기 때문에 대상구간을 신곡수 정보~왕숙천유입부까지의 수리계산을 실행하여 대상구간의 초기수심으로 사용하였다.

자연상태의 수리해석에는 두 모형이 표준축차법을 이용하여 수면곡선을 구하기 때문에 교량 하류부는 동일한 수면곡선을 나타냈다. 교량을 전후한 수심변화는 HEC-2모형의 경우 큰차이를 발생하였다. 이것은 Total losses 계산상의 문제보다는 Losses의 분포가 따른 것이다.

WSPRO모형의 계산결과는 상류부에 교량 전후의 손실을 적절히 분포시켜 상류부에서는 교량이 없는 상태의 수면곡선과 비슷한 양상을 보인다. (그림.3 참조)

HEC-2모형의 평균유속의 결과는 교량상류단면에서 급격한 유속의 증가를 보이며, WSPRO모형은 교량의 통과하면서 급격한 유속변화가 발생하였다. 이것은 수리계산시 유효흐름길이의 사용과

교대의 형태에 따른 단면축소로 인한 영향의 고려했기 때문이다. (그림.4 참조)

표 2 수면표고의 계산비교

단면번호	단면간의 거리	HEC-2 (교량이 없는 경우)	HEC-2 (Normal Bridge method)	WSPRO
55.000	0	16.60	16.60	16.60
56.000	500	16.74	16.74	16.75
57.000	500	16.81	16.81	16.82
57.320	320	16.98	16.96	16.90
58.000	180	17.01	17.05	17.01
59.000	500	17.14	17.18	17.14
60.000	500	17.34	17.39	17.35

4.2 교량단면의 세굴심 결과 및 분석

4.2.1 주수로의 수축세굴심 결정

주수로의 흐름상태가 Live-bed로 유사이송에 대한 한계유속에 비해 주수로의 평균유속이 큰 경우로 한계유속은 Neil's Equation을 이용한다.

$$V_c = 11.52y_1^{1/3}D_{50}^{1/3} \quad (2)$$

주수로의 수축세굴심은 Laursen의 live-bed 수축세굴방정식을 적용하여 구하게 된다.

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q_{m2}}{Q_{m1}} \right)^{6/7} \left(\frac{W_{c1}}{W_{c2}} \right)^{K_1} \quad (3)$$

주수로 수축세굴에 필요한 수리학적 변수로 하상재료 이송형태 보정계수, K_1 는 교량상류단면의 전단강도 V^* 와 하상재료의 중앙입경, d_{50} 의 낙하속도에 따라 결정된다.

영동대교의 하상재료의 중앙입경, d_{50} 가 0.5mm이고, 이 입경에 대한 낙하속도는 0.3ft/sec이다. 하상재료 이송형태 보정계수, K_1 는 0.64로 약간의 하상물질이 부류 유사이다.

주수로의 수축세굴심은

$$Y_s = Y_2 - Y_1 = 59.32 - 57.59 = 1.73\text{ft} = 0.53\text{m}$$

기존 교량의 수축세굴검토인 경우 수축세굴심 결과가 5.0ft이상으로 수축세굴이 국부세굴과 상호작용하여 세굴이 발생하는 경우로 국부세굴에 앞서 고정상 수로를 조정해야 한다.

4.2.2 홍수터의 수축세굴심 결정

교량단면의 주수로 제방과 교대사이의 홍수터지역에서 Clear-water 수축세굴이 발생한다. 이 홍수터지역은 식생피복상태가 좋아 하상물질의 이송을 방지하게 된다.

좌안 교대의 수축세굴심은 Laursen의 Cear-Water 수축세굴 방정식을 적용한다.

$$y_2 = \left(\frac{Q^2}{120D_m W^2} \right)^{3/7} \quad (4)$$

좌안 교대의 수축세굴로 인한 세굴은 평균 세굴심, y_s 는

$$y_s = y_2 - y_1 = 4.14 - 2.41 = 1.73 \text{ft} = 0.53 \text{m}$$

4.2.3 국부세굴심 결정

교량단면에서 최대유속이 발생하는 구간은 WSPRO모형의 동일통수능 구간중 12번째 통수능 구간에서 최대유속이 발생되어진다. (그림 5참조)

교각의 국부세굴심은 CSU's Equation을 적용하여 구한다.

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0 K_1 K_2 K_3 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (5)$$

교각 형태계수, K_1 는 Multiple-Column 교각의 경우 1.0의 값을 취한다. 교각으로부터 접근각 계수, K_2 는 교각의 길이에 대한 폭의 비, a/L 가 5.4이고, 교각과 흐름방향이 일치하기 때문에 1.0의 값을 선택했다. 하상상태의 보정계수, K_3 는 비교적 하상이 안정한 상태로 평형하상과 역사구하상 흐름(Plane bed and antidune flow)을 형성한다고 가정한다.

교각의 국부세굴심, $Y_s=9.77\text{ft}(2.98\text{m})$ 로 추정되어지며, 교각으로의 접근각이 5° 이상인 흐름에서 교각의 세굴심 계산시 접근각에 대한 보정계수로 세굴심을 조정하게 되는데, 교각으로의 접근각이 10° 인 경우 4.97m로 접근각에 따른 교각의 세굴심은 민감한 영향을 미친다.

좌안교대의 국부세굴심 계산은 Froehlich's Equation을 적용하여 교대의 국부세굴심을 구한다.

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{a'}{y_a} \right) Fr^{0.61} \quad (6)$$

그러나 Froehlich's Equation의 경우 교대가 주수로내에 있는 경우나 환원 홍수터흐름(Returning overbank flow)이 교대끝부근에서 주수로로 유입되는 경우에 적용될 수 있어 교대의 돌출길이의 흐름깊이의 비가 25이상인 경우에 한해 적용하는 세굴심을 구하는 식을 이용하였다.

$$\frac{y_s}{y_1} = 4 Fr^{0.33} \quad (7)$$

Frude number는 교대 끝단인접부근을 통과하는 흐름해석을 기초하여 결정하게 된다.

좌, 우안 교대의 국부세굴심, $y_s = 74.8\text{ft}=22.8\text{m}$ 로 결정되었다. 홍수터를 비롯하여 주수로 제방과 교대인근의 식생 피복상태가 좋고, 한강의 경우 고수부지내 포장으로 인해 실제 발생하기 힘들다

교대로 접근하는 흐름각에 대한 세굴심의 영향은 미소하며, 흐름각이 30° 인 경우 3~4%의 세굴심이 증가되어진다.

5. 결론

1) WSPRO모형은 세굴계산을 위한 수리특성 분석시 HEC-2모형에 비해 교량손실량의 적절한 분포와 세굴계산에 필요한 수리변수의 결정으로 적용성이 좋다.

2) WSPRO모형의 결과를 이용하여 교대의 국부세굴심 결정할때 교대주위의 평균수심의 적절한 조정을 통해 필요하다.

3) 세굴심 경험공식은 실험식으로 세굴발생시간의 차이에 의해 실제 세굴심보다 크게 결정된다.

6. 참고문헌

1. Port, M. A., Turner, T. G., and Froehlich, D. C., 1993, 'Practical comparison of one-dimensional and two-dimensional hydraulic analyses for bridge scour', Proceeding of Hydraulic Engineering conference(1993), American society of civil Engineer.
2. Richardson, E. V., Harrison, L. J., and Davis, S. R., 1993, 'Evaluating Scour at Bridge(2nd Edition)', Hydraulic Engineering Circular No.18, Federal Highway administration.
3. Shearman, J. O., Kirby, W. H., Schneider, V. R., and Flippo, H. N., 1986, 'Bridge waterways analysis model - Research report', Federal Highway administration, FHWA-RD-86-108.
4. Shearman, J. O., 1990, 'User's manual for WSPRO - A computer model for water surface profile computation', Federal Highway administration, FHWA-IP-89-027.
5. U.S. Army Corps of Engineers, 1990, 'Waterway surface profile, User's manual-HEC-2', Hydrologic Engineering Center.
6. 서울특별시, 1983, '한강종합개발 현지조사보고서(토질 및 지질측량)'.
7. 서울특별시, 1992, '서울시 관내 하천제방 안전검토 및 치수종합계획 수립'.
8. 서울특별시, 1993, '서울시 주요 구조물 안전진단(1차) - 한강교량 수중 하부구조'.

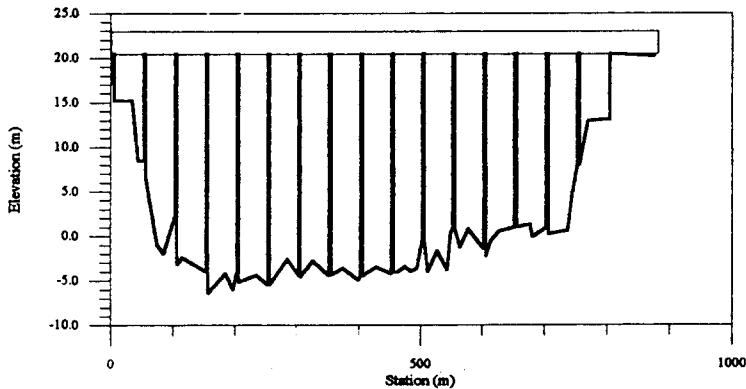


그림 1. 영동대교 단면도

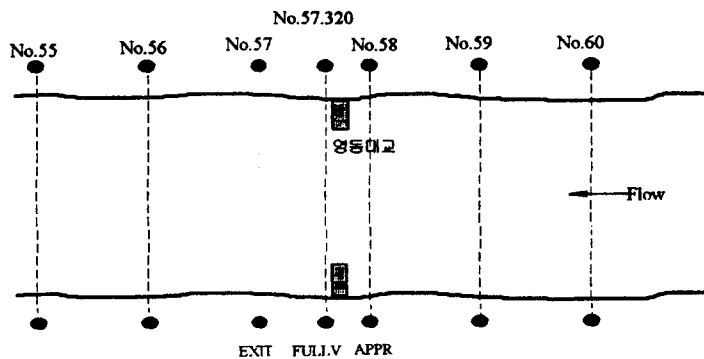


그림 2. 영동대교의 모형적용구간

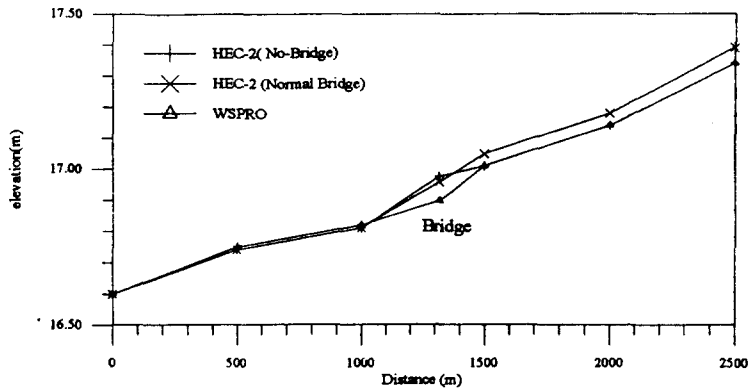


그림 3. 교량 통과 흐름의 평균수심 비교

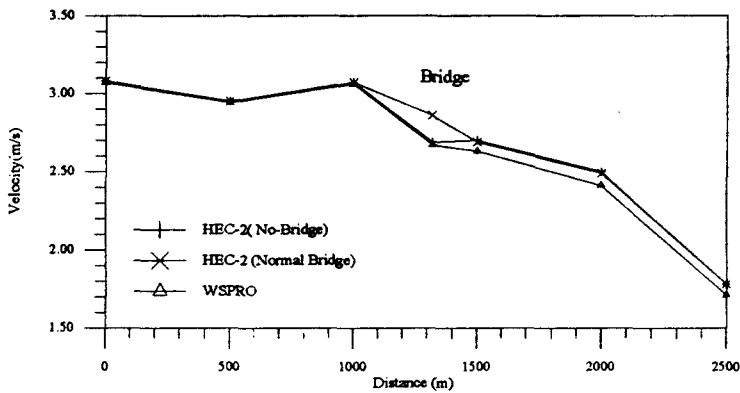


그림 4. 교량 통과 흐름의 평균유속 비교

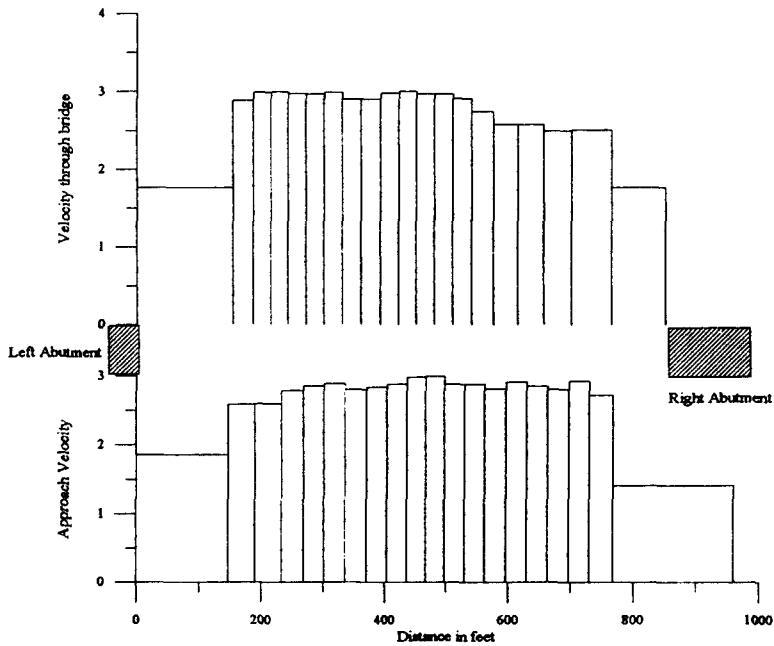


그림 5. 교량 통과 흐름의 유속분포