FOR FUTURE

일반기사

평면 이차원 수치모델링을 위한 하천 식생저항 연구 동향

이 남 주 |
경성대학교 건설환경공학부 교수
njlee@ks.ac.kr

최 성 욱 |
연세대학교 사회환경시스템공학부 교수
schoi@yonsei.ac.kr

김 원 |
한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 책임연구원
wonkim@kict.re.kr

우 효 섭 |
한국건설기술연구원 하천 · 해안항만연구실 연구위원
hswoo@kict.re.kr

1. 머리말

하천에 인위적인 교란으로 인해 식생이 들어와서 생장하는 과정, 구체적으로 이입(recruitment), 활착(establishment), 천이(succession), 퇴행(retrogression) 등의 과정에 대한 연구는 국제 문헌에서 1980년대부터 보이기 시작한다(우효섭, 2009a). 하천에 침입한 식생은 흐름 저항을 증가시키며, 이로 인해 유속이 감소하고 홍수위(또는 수심)가 증가하며 하천 지형 변화에도 상당한 영향을 미치게 된다. 식생이 흐름에 미치는 영향은 현장조사와 수리모형실험을 통해 다양한 연구가 진행되고 있으며, 이를 예측하기 위한 수치모델링 기법에 대해서도 활발한 연구가 수행되고 있다. 그렇지만 하천의 흐름이 식생에 미치는 영향 또는 상호작용에 대해서는 아직 초보적인 수준에 머물러 있다.

한국의 댐 하류 하천에서 백사장이 사라지고 풀과 나무로 덮이고 있는 현상이 점차 확대되고 있는데, 이런 문제점을 분석하고 가능한 해소방안을 찾기 위해서는 화이트리버가 그린리버로 변하는 인과과정을 이해하고, 이를 재현할 수 있는 모형을 개발하는 것이 중요하다(우효섭, 2008). 이렇게 하천 흐름과 식생의 상호작용을 예측 또는 평가하는 모형을 보통 수변식생모형(riparian vegetation model) 또는 홍수터식생모형(floodplain vegetation model)이라 한다.

홍수터식생모형에 대한 연구는 1990년대 후반부터 시작되었으며, 주로 하천에서 현장조사 및 시험결과를 토대로 홍수터나 사주에서 식생의 이입 과정을 모의하려는 노력을 하였다(우효섭, 2009b). 이런 모형에 대한 초기 연구로써 Mahoney and Rood(1998)는 홍수터에 북미산 포플러의 이입, 활착을 모의하는 RBM(Recruitment Box Model)을 제안하였다. 이후 Benjankar(2006)는 수리학적 과정과 생태변화에 대한 개념적 수치모형인 DFVM(Dynamic Floodplain Vegetation Model)을 개발하였다.

홍수터식생모형에 대한 연구는 국제적으로 시작 단계에 있는 연구이며, 국내에서도 에코리버21 연구단에서 2009년부터 '하천 식생천이 예측모형' 개발

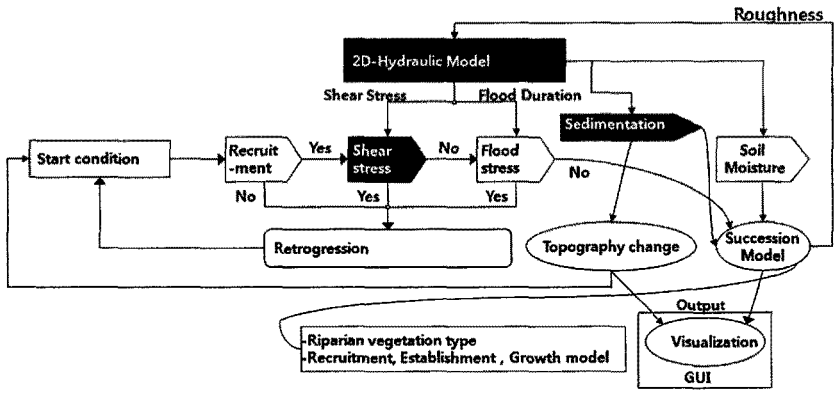

그림 1. 국내의 하천 식생천이 예측모형의 구조 (조강현, 2009)

을 시작하였다. 우리나라 식생에 적합한 하천 식생천이 예측모형을 개발할 목적으로 현재 국내에서 개발중인 하천 식생천이 예측모형의 구조는 그림 1과 같다. 이 모형은 국내 하천 식생의 대부분을 차지하고 있는 달뿌리풀(초본)과 버드나무(목본)을 대상으로 하고 있다. 이것은 하천 식생의 성장 단계를 하천 흐름 및 하상 전단응역 예측에 반영하여 수치모의하고, 수치모의 결과를 하천 식생 과정에 반영하여 식생 조건의 평가를 진행하는 'rule-based' 동적 식생모형에 해당한다. 이 모형에 포함되어 있는 식생저항 예측기법은 수리학적으로 가장 중요한 요소 중 하나이며, 이 학술기사는 식생모형에서 사용하는 식생저항 수치모델링 기법에 대한 기존의 연구를 정리한 것이다.

2. 평면 이차원 모형과 조도계수

하천에서 흐름 예측을 위해 사용하는 평면 이차원 수치모형의 일반적인 지배방정식은 다음과 같은 형태의 천수방정식(이남주, 1998)을 사용한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(hU)+\frac{\partial}{\partial y}(hV)=0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(hU)+\frac{\partial}{\partial x}(hU^2)+\frac{\partial}{\partial y}(hUV)&\\ =FhV-gh\frac{\partial}{\partial x}(h+z_b)+\frac{1}{\rho}(\tau_{w1}-\tau_{b1})&\\ +\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}(hT_{11})+\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial y}(hT_{12})&\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}(hV)+\frac{\partial}{\partial x}(hUV)+\frac{\partial}{\partial y}(hV^2)&\\ =-FhU-gh\frac{\partial}{\partial y}(h+z_b)+\frac{1}{\rho}(\tau_{w2}-\tau_{b2})&\\ +\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x}(hT_{12})+\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial y}(hT_{22})&\end{aligned} \tag{3}$$

여기서, x, y 는 수평면상의 공간좌표, t는 시간, F는 코리올리(Coriolis) 상수, ρ는 물의 밀도이며, U, V는 각각 x, y 방향의 수심평균 유속성분, τ_{b1}과 τ_{b2}는 각각 x, y 방향의 바닥 전단응력, τ_{w1} 과 τ_{w2}는 각각 x, y 방향의 바람에 의한 응력, 그리고 T_{11}, T_{12}, T_{22}는 유효응력이다.

운동량방정식 (2)와 (3)에서 흐름에 저항하는 항은 유효응력 T와 하상전단응력 τ가 있으며, 유효응력은 유체 흐름 내부에서 생성되는 저항(대표적으로 난류 전단응력)이며, 하상전단응력은 유체 경계에서 생성되는 저항이다. 하상전단응력을 매닝(Manning)의 조도계수를 사용하면 다음과 같이 표현할 수 있으며, 따라서 수치모델링에 있어서 하천의 조도계수는 유체와 고체의 경계에서 발생하는 제반 저항을 포함하는 인자로 생각할 수 있다.

$$\tau_{b1}=\frac{\rho g n^2}{h^{1/3}}U\sqrt{U^2+V^2},\ \tau_{b2}=\frac{\rho g n^2}{h^{1/3}}V\sqrt{U^2+V^2} \tag{4}$$

여기서 n은 매닝의 조도계수이다. 하천의 조도계수는 하천 흐름에 대한 하도의 저항을 나타내므로 기본적으로는 하상의 특성에 의해 결정되지만, 하천 흐름을 계산할 경우 식생, 구조물, 사행, 하상변화, 유사량, 수위, 유량 등의 다양한 요인들을 조도계수에 반영시킬 수 있다.

3. 조도계수와 식생저항

식생은 흐름 저항을 변화시키게 되며, 일반적으로 홍수위를 증가시키는 결과를 초래한다. Cowan (1956)은 조도계수를 다양한 조도 성분으로 분할하여 총조도계수를 결정하기 위한 조도 성분의 영향을 추정하는 절차를 개발하였다. Manning n 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \tag{5}$$

여기서 n_b는 직선이고 균일하며 매끈한 하도에 대한 기본 n 값, n_1은 하상 표면 불균일성에 대한 보정 성분, n_2는 하도 단면의 형상과 크기의 변동에 대한 값, n_3는 장애물에 대한 값, n_4는 식생과 흐름 조건에 대한 값, m은 사행에 대한 보정 성분이다.

식생에 의한 흐름 저항은 식물의 크기, 식물의 구조적 특성, 하도상에서의 위치, 국부적인 흐름 조건의 함수로 표현된다. 복합적인 저항 효과를 계산하는 현재의 모형들은 식생 저항을 이론적으로 고려하여 평가하고 있다. Morin et al.(2000)은 Cowan(1956)의 Manning 방정식 (5)에 대응하는 간단한 형태의 식을 제안하기도 했는데, 이 식은 저항 성분의 제곱을 사용하며 다음과 같이 표현하였다.

$$n_{tot}^2 = n_b^2 + n_4^2 \tag{6}$$

여기서 n_4는 식생과 흐름 조건에 따른 조도성분이다.

Petryk and Bosmajian(1975)은 식물에 의해 발생하는 항력에 기초하여 식생 저항에 대한 이론적인 모형을 개발했고, 이것은 홍수터의 식생에 주로 적용할 수 있다.

$$n_{tot} = \sqrt{1 + \frac{C_D \sum A_i}{2gAL} n_b^{-2} R^{4/3}} \tag{7}$$

여기서, R은 동수반경, C_D는 식생에 의한 항력계수, A_i는 i번째 식생의 상류방향 투영면적, A는 통수단면적, L은 하도의 길이이다.

건조중량으로 표현되는 생물량(Biomass, g/m^2)를 사용하여 Hearne et al.(1994)은 여름철에 적용할 수 있는 관계식을 제안하였다.

$$n = n_b(1 + 0.0143 \times \text{Biomass}) \tag{8}$$

이 식에는 몇 가지 문제점이 있다. 첫째는 모형 개발에 사용한 자료가 하나의 하천에서 수집된 것이어서, 수문학적 요인, 기질, 식물 성장의 기울기와 경향이 다른 하천에 적용하기 곤란하며, n_b가 경계의 저항을 표현하는데 사용될 뿐만 아니라, 이 값에 식생 저항의 척도를 얻기 위해 생물량을 곱해야 한다는 점이다. 하도 저항의 성분은 독립적이고 더하기가 가능하다는 가정에 상반된다. 마지막으로, 생물량은 단위 하상면적에 대한 질량의 항으로 측정되므로 하도 유량과는 관련이 없이 저항이 일정하다는 것을 의미한다.

Fisher(1992)는 표면적의 비를 측정하는 것이 Wright et al.(1981)의 대형 수생식물의 매핑 기술보다 실제로는 더 쉬다고 결론지었으며, 이 형태로써 가장 잘 맞는 관계식은 다음과 같다.

$$n = 0.0337 + 0.0239\left(\frac{B^{SA}}{VR}\right) \tag{9}$$

여기서 B^{SA}는 Watson(1986, 1987)이 제안한 방해성분(blockage factor)이다.

4. 식생하도의 유속분포

식생 관련 흐름저항과 등가 저항 계수에 대한 해석적인 연구와 실험적 연구 모두에서 저항 계수는 수심에 지배된다. Dawson and Charlton(1988)은 360개 이상의 식생 수리 저항에 대한 문헌연구를 정리한 바 있다. 식생 특성, 하상 저항, 수심, 그리고 등가저항계수 사이의 관계가 필요하다. Baptist et al(2007)은 이런 관계를 얻기 위해 네 가지 방법을 검토하였다. 첫째는 잠긴 식생의 위와 사이로 지나가는 유량을 구분하여 단순한 해석적으로 설명하는 방법이다. 둘째는 잠긴 식생의 위와 아래로 지나가는 흐름의 운동량 균

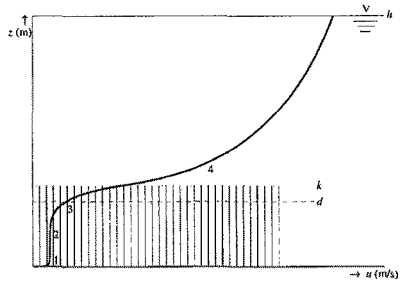

그림 2. 잠긴 식생에 의한 유속분포 (Baptist et al, 2007)

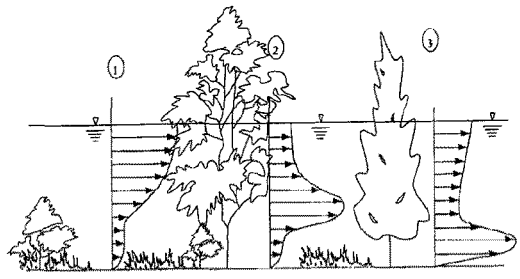

그림 3. 식생의 높이와 유속분포 (from Fischenich, 2000)

형에 대한 해석적인 해에 기초하는 방법이다. 셋째는 수치해석적으로 1-DV 모형을 사용하는 것이며, 넷째는 실험 또는 측정 자료에 기초하는 방법이다.

잠긴 식생에 대한 전형적인 시간평균된 유속분포는 그림 2에서 보는 바와 같다. 잠긴 식생의 위와 사이로 지나가는 흐름의 시간평균된 유속분포는 특징에 따라 4개의 영역으로 구분할 수 있다: i) 하상 근처의 첫째 영역에서 유속은 하상에 크게 영향을 받으며, 유속의 연직 분포는 로그형 경계층 분포로 표현되며, ii) 식생의 아래에서 위까지 식생의 내부에 해당하는 둘째 영역에서 유속은 일정하고, iii) 식생의 꼭대기 근처에 해당하는 셋째 영역에서 식생영역의 등유속 분포와 식생 상부의 로그형 유속분포 사이에 해당하는 천이 분포가 존재하며, iv) 넷째 영역은 식생의 상부의 영역에 대응하며, 이 영역에서는 로그형 유속분포가 관찰되고, 식생층의 정상 아래에 'zero-plane displacement'를 가진다. 일반적으로 식생의 밀도가 증가함에 따라 Manning n이 증가하는 것이 일반적인 현상이며, 유연한 식생에 대한 수심과 조도계수의 관계는 식물이 완전히 잠기면, 휨이 나타나고, 유효 조도계수는 감소한다(Mohseni, et al, 2009). 그림 3은 식생의 성장과 크기가 하도의 유속분포에 미치는 영향을 개념적으로 도시한 것이다.

5. 식생저항 개념모형

Darby(1999)는 식생저항 개념모형 도출을 위해 다음과 같은 목표를 가진 연구를 수행하였다: i) 불규칙한 단면, 노래와 자갈 하상, 하안식생 종류에 따라 수위-유량 곡선을 모의할 수 있는 수리학적 모형을 개발하고, ii) 현장 측정 자료를 사용한 수리학적 모형의 정확도를 평가하며, iii) 홍수 위험에 대한 하안 식생별 영향을 조사하기 위한 민감도 분석을 수행한다. Darby(1999)는 이차류항과 종방향 미분항은 분석에서 제외한 이차류가 없는 정상등류에 대한 연구를 수행하였다. 이런 한계 내에서 하천 단면에서 단위 유량에 대한 횡방향 분포 예측에는 하도 단면의 특징이 입력되는 각각의 계산점에서 와점성계수 ϵ과 Darcy-Weisbach의 마찰계수 f를 정확히 추정해야 한다. 간단하지만 신뢰성 있는 와점성계수 모형은 다음 식과 같다.

$$\epsilon = N_{EV} \cdot UD \tag{10}$$

여기서 $U = \sqrt{gDS}$는 국부적인 마찰속도, N_{EV}는 사용자가 지정하는 무차원 와점성계수이다. N_{EV}값은 보정을 통해 결정하며, 하폭에 걸쳐 상수로 생각한다.

그림 4는 Darby (1999)가 제안한 식생저항 개념모델이다. 이 모델에서 하상의 상태를 식생과 비식생으로 구분하고, 식생의 경우는 다시 유연성과 강성으

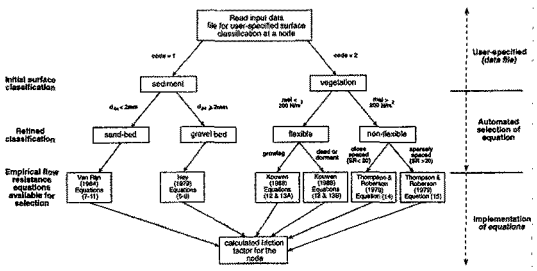

그림 4. Darby (1999)의 식생저항 개념모형

로 구분하며, 비식생의 경우는 모래하상과 자갈하상으로 구분하여, 각 상황에 적합한 조도계수(바닥저항)를 결정하는 방법을 사용한다.

6. 국내 연구자들의 연구

Rhee, et al(2008)의 연구에서는 세 가지 한국의 자생종인 고려잔디, 수크령, 한국갈대를 사용하여 개수로 실험을 수행하여 흐름 저항에 대한 식생 영향을 연구하였다. 이들은 n-VR 지연 곡선을 각 초본에 대하여 작성하였다. *Z. matrella*의 경우, *VR*이 증가함에 따라 저항계수를 Manning's *n*으로 변환한 값이 약 0.027에 수렴하였으며, 식생의 휨과 수위와의 상관관계는 저항계수를 증가시킬 수 있다는 연구 결과를 제시하였다.

수목에 의한 항력저항은 식(7)에서도 알 수 있듯이 투영면적과 동수반경, 즉 수심과 유속에 의해 변화되므로 하나의 Manning's *n*으로 지정하는 것부터 쉽지 않은 일이다. 따라서 김지성 등(2009a)은 수목에 의한 흐름저항에 상응하는 Manning's *n*을 사용하지 않고, 항력저항 식을 그대로 사용하는 1차원 부정류 해석기법을 개발하였다. 개발된 기법을 검증하기 위하여 실내 구형수로에서 수행된 수리실험과 좌우 홍수터에 인위적으로 식재한 수리실험 결과와 비교하였으며, 비교결과 2차원 효과가 크지 않은, 수심에 비하여 비교적 하폭이 넓은 하천에서 항력계산에 의한 수목저항 반영이 타당함을 확인하였다.

김지성 등(2009b)은 개발된 기법의 현장 적용성을 검토하기 위하여 소양강 수변 식생조사와 더불어 계획홍수량 규모에서 수목에 의한 수위상승 영향을 분석하였으나, 만곡부에서 발생하는 횡방향 유속의 변화를 반영하지 못하는 1차원 모형의 한계가 있었으며, 향후 홍수터 수목저항을 정량적으로 반영하기 위해서는 준2차원 이상의 해석기법 개발이 필요함을 제시하였다.

7. 맺음말

홍수터식생모형에 대한 연구는 국제적으로 시작 단계에 있으며, 국내에서 에코리버21 연구단에서 2009년부터 하천의 식생천이 예측모형 개발을 시작하였다. 식생천이 예측모형의 필수요소인 식생저항 예측기법과 관련하여 식생저항 수치모델링 기법에 대한 기존의 연구를 간략히 소개하였다. 이 학술기사에서 식물의 상태와 흐름 특성을 구분하여 식생저항을 예측하는 개념적 모형에 대한 소개는 하였지만, 다양한 상황에 적합한 공식을 구체적으로 평가하여 제시하지는 못하였다. 식생-흐름 상관관계에 따른 다양한 조건에 적합한 식생저항 모형에 대한 보다 자세한 내용은 향후 다른 기사를 통해 소개할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 및 한국건설교통기술평가원 건설핵심기술연구개발사업의 연구비지원(06건설핵심B01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 김지성, 김원, 이혜은, 김은미 (2009a). "수목에 의한 흐름저항 평가를 위한 1차원 상류이송 음해기법" 한국수자원학회 2009년도 학술대회논문집, pp. 822-826.
2. 김지성, 김극수, 김원, 노준우, 김호준 (2009b). "소양강댐 하류구간 자생 수목군에 의한 흐름저항 영향 평가" 대한토목학회 2009년도 학술대회논문집, pp. 756-759.
3. 우효섭 (2008). "화이트 리버? 그린 리버?" 물과 미래, 한국수자원학회, 제41권, 제12호, pp. 38-47.

4. 우효섭 (2009a). "하천에서 식생활착 연구 문헌조사(I), - 화이트리버가 그린리버로 변하는 과정의 연구 -" 물과 미래, 한국수자원학회, 제42권, 제8호, pp. 37-45.
5. 우효섭 (2009b). "하천에서 식생활착 연구 문헌조사(II), - 화이트리버가 그린리버로 변하는 과정의 연구 - " 물과 미래, 한국수자원학회, 제42권, 제8호, pp. 46-53.
6. 이남주, 이길성 (1998.9). "좌표변환에 의한 이차원 유사이동모형(I) - 모형의 개발." 대한토목학회논문집, 제18권, 제II-5호, pp. 407-412.
7. 조강현 (2009). "하천 식생천이 예측모델 개발." 홍수터 보전 복원 기술 개발, 4차년도 중간성과발표자료, 한국건설기술연구원.
8. Baptist, M.J., Babovix, V., Uthurburu, J.R., Keijzer, M., Uittenbogaard, R.E., Mynett, A., and Verwey, A. (2007). "On inducing equations for vegetation resistance." Journal of Hydraulic Research, Vol. 45, No. 4, pp. 435-450.
9. Benjankar (2006), Quantification of reservoir operation-based losses to floodplain physical processes and impact on floodplain vegetation at Kootenai River, USA, Research proposal towards fulfillment requirements for Doctoral degree, Univ. of Idao, Boise, Idaho.
10. Cowan, W.L. (1956). "Estimating hydraulic roughness coefficients." Agricultural Engineering, 37(7): 473-475.
11. Darby S.E. (1999). "Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential." Journal of Hydraulic Engineering 125(5): pp. 443-454.
12. Dawson, F.H. and Charlton, F.G. (1988). "Bibliography on the Hydraulic Resistance of Vegetated Watercourses." Technical Report, Freshwater Biological Association, Occasional Publication No. 25, ISNN 0308-6739, 25 pp.
13. Fischenich, J.C. (2000). "Resistance due to vegetation." EMRRP Technical Notes Collection (ERDC TN-EMRRP-SR-07), U. S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
14. Fisher K. (1992). The hydraulic roughness of vegetated channels. Report SR 305. Hydraulics Research Ltd, Wallingford.
15. Hearne, J, Johnson, I, and Armitage, P. (1994). Determination of ecologically acceptable flows in rivers with seasonal changes in the density of macrophyte. Regulated Rivers: Research and Management 9: 177-84.
16. Mahoney, J.M. and Rood, S.B. (1998). "Steam flow requirements for cottonwood seedling recruitment in integrative model", Wetlands, 18(4): 634.
17. Mohseni, O., Weiss, J., Cantelli, A., and Wilson, B. (2009). Scoping Study for the Development of Design Guidelines for Bioengineering in the Upper Midwest, St. Anthony Falls Laboratory, University of Minnesota.
18. Petryk, S. and Bosmajian, G. (1975). Analysis of flow through vegetation. Journal of the Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers 101(HY7): 871-84.
19. Rhee, D.S., Woo, H., Kwon, B.A., and Ahn, H.K. (2008). "Hydraulic resistance of some selected vegetation in open channel flows." River Research and Applications, 24: 673-687.
20. Watson, D. (1986). The effects of aquatic macrophytes on channel roughness and flow parameters. PhD thesis, University of Southampton (unpublished).
21. Watson, D. (1987). Hydraulic effects of aquatic weeds in UK rivers. Regulated Rivers: Research and Management 1: 211-27.
22. Wright, J.F, Hiley, P.D, Ham, S.F, and Berrie A.D. (1981). Comparison of three mapping procedures developed for river macrophytes. Freshwater Biology 11(4): 369-79.
23. Morin, J., Leclerc, M., Secretan, Y., and Boudreau, P. (2000). "Integrated two-dimensional macrophytes-hydrodynamic modelling." Journal of Hydraulic Research 38(3): 163.172.