

타설 노즐의 내부 블레이드에 의한 섬유 방향성 제어 성능에 관한 수치 해석적 연구

이종한^{1*}

Numerical Studies on the Control Performance of Fiber Orientation for Nozzle with Inside Blades

Jong-Han Lee^{1*}

Abstract: This study is aimed at controlling the fiber orientation and improve the fiber distribution in fiber-reinforced cement composites using blades that can be placed inside the existing nozzles. To optimize the blade parameters, multi-physics finite element analysis was performed that could account for the flow of the cementitious matrix material, the movement of the entrained fibers, and the interactions with the nozzle. As a result, this study defined the blade distance, length, and position as a function of the fiber length to be used in the field. The blades with a distance from 1.2 to 2.4 times the fiber length and length from 4 to 8 times the fiber length, as well as located at below 14 times the fiber length from the nozzle exit maintained the fiber orientation angle less than 5° . In addition, the blade-type nozzle proposed in the study can be attachable and detachable to the conventional casting equipment, and thus it can provide the usability and convenience in practical applications.

Keywords: Fiber-reinforced cement composite, fiber orientation, blade, nozzle, finite element analysis

1. 서론

시멘트 복합재료는 가장 기본적이며 중요한 건설재료로 사용되어 왔으나, 우수한 압축성능에 비해 인장성능은 매우 저조하다. 따라서, 강재, 플라스틱, 유리, 천연재료 등으로 제작된 짧은 길이의 섬유를 혼입하여 시멘트계 재료의 인장 저항능력과 연성능력을 향상시킨 섬유보강 시멘트 복합재료(FRCC, fiber-reinforced cement composite)에 대한 연구가 활발히 이루어졌다. 특히, 강섬유 보강 콘크리트(SFRC, steel fiber-reinforced concrete)는 타 섬유에 비해 재료적 성질이 우수하여 미국, 유럽 등을 중심으로 터널 샷크리트(tunnel shotcrete), 터널 라이닝(tunnel lining), 지반 바닥슬래브(ground supported slab) 등에 적용되어 왔다(Lee et al., 2016).

섬유보강 시멘트 복합재료에 대한 대부분의 연구는 섬유의 형상비(aspect ratio)(Wang et al., 2010), 섬유 혼입률(Soufeiani et al., 2010), 시멘트와의 부착성능(Cao and Yu, 2008; Ellis et al., 2014), 섬유와 매트릭스의 재료적 특성(Lee et al., 2017; Lee, 2017)등을 평가하였다. 이러한 재료적 성질과 함께 섬유보강 시

멘트 복합재료의 인장성능 향상은 혼입된 섬유의 방향성(orientation)과 분포도(distribution)와도 직접적인 관계가 있다. 즉, 섬유가 혼입된 시멘트 복합재료는 배합과 타설 시 섬유가 뭉치는 현상이 발생하거나 섬유가 균일하게 분산되지 않아 섬유를 혼입하였음에도 인장성능이 효율적으로 향상되지 않을 수 있다. 이러한 섬유의 방향성과 분포도 문제는 섬유 보강 시멘트계 재료의 우수한 역학적 성능이 다양한 연구를 통해 입증되었음에도 현장 적용의 한계성을 낳았다. 대부분의 연구는 타설방향(Rouseel et al., 2007; Ferrara et al., 2011), 매트릭스의 유동 특성(Ozyurt et al., 2006; Boulekbache et al., 2010; Liberato et al., 2012; Ferrara et al., 2012) 등을 고려하여 섬유의 방향성과 분포도를 평가하고자 하였다. 즉, 섬유 보강 시멘트계 재료의 유동 흐름 특성을 고려한 섬유의 분산성과 방향성을 예측하는 연구가 주로 수행되어 지고 있으나, 정량적인 평가 및 예측 기술은 아직 확립되지 못하고 있는 실정이다(Kang et al., 2013).

따라서, 본 연구에서는 기존에 일반적으로 사용되어 지고 있는 타설 노즐 내부에 블레이드(blade)를 설치하여 타설 시 시멘트 복합체에 혼입된 섬유의 방향성을 직접적으로 제어하고 분포도를 향상시키고자 하였다. 시멘트계 매트릭스 재료의 유동과 혼입된 섬유의 운동, 노즐간의 상호작용을 고려하기 위하여 multi-physics simulation 해석을 수행하였다. 해석 결과 시공에서 사용되는 섬유의 길이를 변수로 하여 블레이드형 노즐의 블레이드 간격(D_b), 블레이드 길이(L_b), 블레이드

¹정회원, 대구대학교 건설시스템공학과 조교수

*Corresponding author: jonghan@daegu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Daegu University, Gyeongsan, 38453, Korea
•본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

위치(L_I)를 결정하였다.

블레이드 변수 해석을 통해 제시된 노즐은 기존의 섬유보강 시멘트 복합체 타설장비와 타설관을 그대로 사용하면서, 탈·부착식으로 제작될 수 있어 사용성과 편의성을 동시에 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 유동-섬유-노즐 상호작용을 고려한 유한요소해석

2.1 해석형상과 변수

타설 노즐 내부에 부착되는 블레이드는 Fig. 1에 보인 바와 같이 블레이드간의 간격(D_b), 블레이드 길이(L_b), 블레이드 위치(L_I), 총 3개의 변수로 정의하였다. 노즐이 부착되는 L_I 길이는 노즐 출구부터의 거리이다. 해석 시 사용된 섬유는 일반적으로 사용되는 20mm 길이의 강섬유이며, 노즐의 직경 (D)은 섬유의 길이를 고려하여 160mm로 가정했다. 노즐 직경 변화에 따른 블레이드와 섬유 방향각에 대한 평가는 4.4장에 기술하였다.

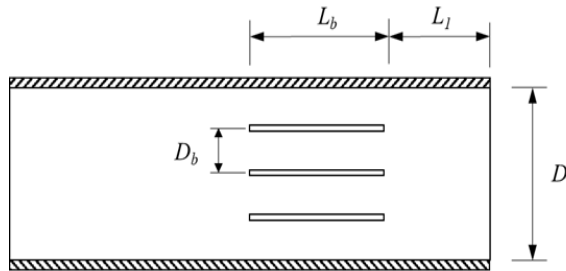


Fig. 1 Geometry and parameters of the nozzle and blade

노즐의 상·하부 위치에서는 노즐 벽면과 매트릭스간의 점성도 영향(viscosity effect)으로 속도 차이를 발생시키며, 이는 섬유의 회전운동을 유발시킨다. 따라서, 본 연구에서는 섬유를 노즐 상·하부 벽면에서 30mm 떨어진 위치에 각각 배치시켜 섬유의 회전운동을 고려하였으며, 동시에 섬유의 회전 시 벽면과의 충돌을 방지하였다.

2.2 해석모형화 및 전산해석기법

노즐의 형상은 원형이며 블레이드는 노즐의 둘레방향으로 일정한 간격으로 배치되므로, 노즐 및 블레이드 해석모형은 2차원(two-dimension)으로 가정하였다. 시멘트계 재료의 흐름과 노즐의 경계조건, 섬유 운동간의 상호작용을 고려하기 위하여 본 연구에서는 COMSOL multi-physics software를 사용하였다. Fig. 2는 2차원 유한요소(finite element)로 모형화된 노즐과 섬유의 형상이다.

시멘트계 재료의 유동속도는 난류 흐름(turbulent flow)에 비해 매우 낮은 속도이므로, 층류 유체(laminar fluid)로 가정할 수 있다(Azad et al., 2017). 따라서, 시멘트계 재료의 유동은 균질한 점성 층류 유체(homogeneous viscous laminar flow)로 정의하였다. 시멘트계 재료의 밀도는 2300 kg/m^3 , 동점성 계수(dynamic viscosity)는 $7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 이며, 강섬유의 재료 탄성계수(modulus of elasticity)는 205 GPa , 밀도(density)는 7850 kg/m^3 이다.

재료의 유동과 구조체, 구조요소간의 상호작용해석 시 해석값의 수렴(convergence)은 요소 크기(element size)에 지배적이다. 따라서, 본 연구에서는 적응적 요소 재구성 방법(adaptive mesh refinement method)을 사용하여 섬유의 회전운동과 방향각 변화를 분석할 수 있는 시간이력해석(time history analysis)를 수행하였다.

노즐의 해석 구간은 블레이드 도착 전 섬유의 회전운동을 충분히 발생시키고 길이방향의 영향을 최소화하기 위하여 노즐의 입구에서 블레이드 구간까지의 길이는 직경의 3배로 하였다. 도출 이후는 섬유의 방향각 변화를 분석하기 위해 노즐 출구에서부터 300mm 까지 해석영역을 확장하였다. 이때, 노즐 내부벽의 경계조건은 점성효과에 의한 속도차이를 구현할 수 있도록 하였으며, 도출 이후의 경계조건은 흐름의 접선방향 운동량을 영(0)으로 정의하였다.

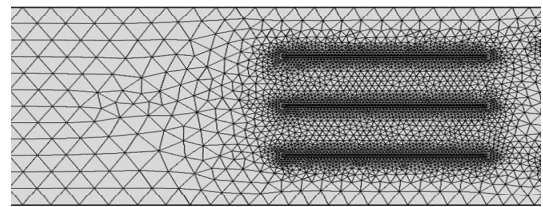


Fig. 2 Two-dimensional finite element modelling of the nozzle and blade

3. 기존 타설 노즐에서의 섬유 방향각

원형 타설 노즐에서 섬유가 배출되었을 때 섬유 방향각을 분석하였다. 노즐의 직경은 블레이드가 부착된 노즐과 동일하게 160mm이며, 강섬유는 노즐의 중앙과 상·하부에 위치시켰다. 상·하부 섬유는 노즐 벽에서 30mm 떨어진 곳에 위치시켰다. Fig. 3은 multi-physics simulation 해석결과 노즐의 내부, 출구, 외부에서의 섬유의 회전 변화 형상을 보여준다.

섬유의 방향각 변화를 평가하기 위하여 섬유가 도출된 후 50mm 간격으로 섬유의 방향각을 분석하였다. 섬유의 방향각은 시멘트계 재료의 방향, 즉 노즐의 길이방향과 일치하였을

때 영(0°)이다. Fig. 4에 보인 바와 같이, 노즐 중심에 위치한 섬유는 시멘트계 매트릭스의 일정한 속도에 의해 회전이 발생하지 않지만, 노즐의 상·하부에 위치한 섬유는 노즐 벽면에 의한 속도 차이로 섬유 회전이 발생하여 도출 시에 방향각이 약 70° 였다. 이후, 매트릭스의 속도 차이가 급격하게 줄어들어 도출 후 50mm 부근에서는 약 30° , 200mm 이후부터는 약 20° 로 일정하게 유지되었다. 즉, 기존의 타설 노즐은 최소 약 20° 정도로 섬유 방향각이 발생되며, 타설 후 도출길이가 줄어들수록 방향각은 더욱 높아지게 된다.

4. 블레이드에 의한 섬유 방향각

4.1 블레이드 길이

기존 타설 노즐 내부에 부착되는 블레이드의 영향을 평가하기 위하여 블레이드 길이 변화에 따른 섬유의 방향각을 분석하였다. 블레이드 길이(L_b)는 섬유길이(l_f)의 2, 4, 6, 8, 10배에 대하여 해석을 수행하였다. 이때, 블레이드 간격(D_b)은 $2l_f$,

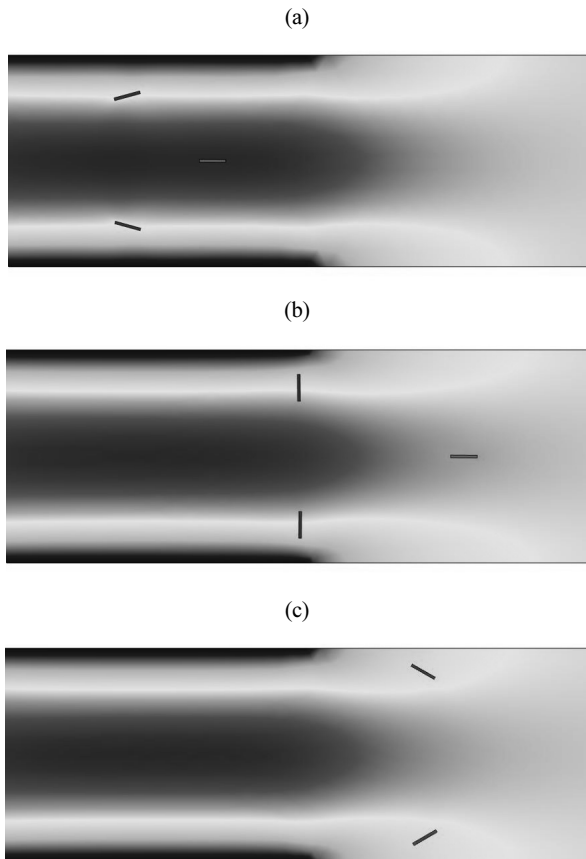


Fig. 3 Shape and rotation of the top, middle, and bottom fibers obtained from the multi-physics simulation: (a) inside the nozzle, (b) around the nozzle exit, and (c) outside the nozzle

블레이드 부착위치(L_l)는 노즐 출구 끝에서부터 $6l_f$ 로 동일하게 하였다.

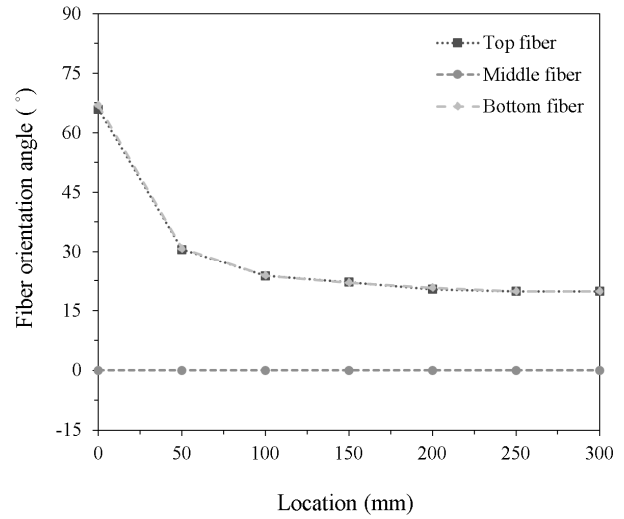


Fig. 4 Variation in the fiber orientation angles from the nozzle exit for the top, middle, and bottom fibers

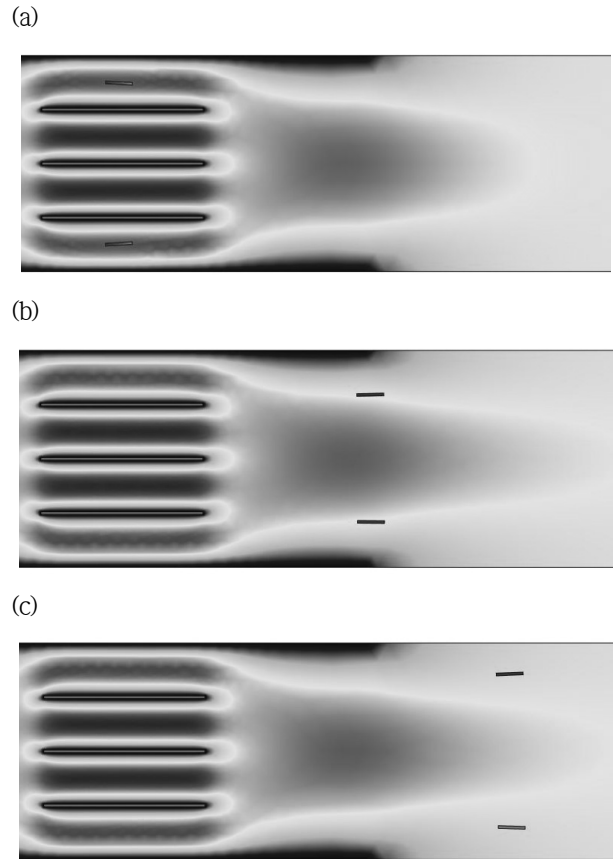


Fig. 5 Typical shape and rotation of the fibers obtained from the multi-physics simulation: (a) inside the blades, and (b) around the nozzle exit, and (c) outside the nozzle

Fig. 5는 $L_b=6l_f$ 일 때 블레이드 구간, 노즐의 출구, 외부구간에서의 섬유 방향각의 회전 변화 형상을 보여준다. 기존 노즐에서의 섬유 회전형상과 비교 시 블레이드 구간에서 섬유의 회전운동이 거의 제거되었다. 이후, 회전운동 없이 거의 일정한 방향각을 유지한 채 도출되었다. 따라서, Fig. 6에 보인 바와 같이 섬유가 도출된 후 50mm 간격으로 섬유의 방향각 변화를 분석하였다. $L_b=2l_f$ 경우, 블레이드가 부착된 노즐에서 도출된 섬유 방향각이 노즐이 부착되지 않은 기존의 타설 노즐에서 도출된 섬유 방향각보다 좋지 않아 블레이드 노즐에 의한 섬유의 방향각 향상을 기대할 수 없다. 하지만, $L_b=4, 6, 8l_f$ 일 때는 섬유의 방향각 향상을 기대할 있으며, 특히, $L_b=6l_f$ 일 때 가장 낮은 섬유 방향각을 보였다.

도출 이후 일정하게 유지된 섬유의 방향각을 비교하기 위하여 Fig. 7에 보인 바와 같이 노즐 출구에서 200mm 위치에서의 섬유 방향각을 분석하였다. $L_b=2l_f$ 에서 $6l_f$ 로 길어짐에

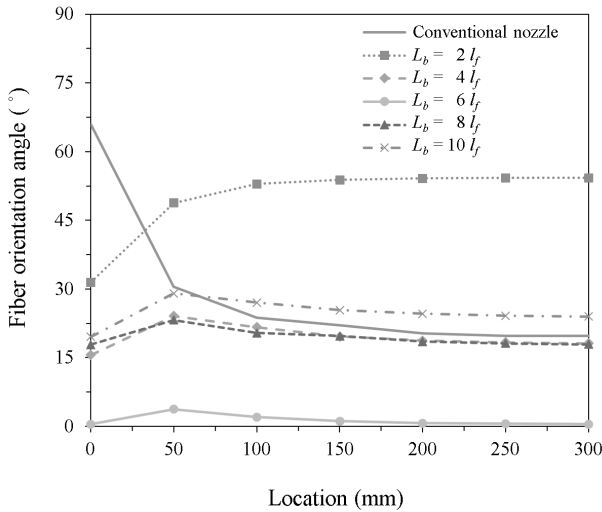


Fig. 6 Variation in the fiber orientation angles with changing blade lengths from the nozzle exit

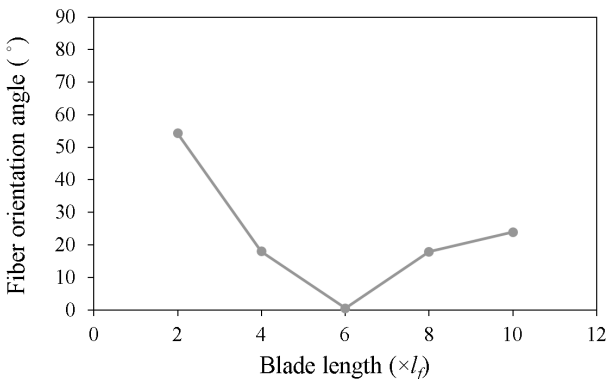


Fig. 7 Fiber orientation angles at 200 mm from the nozzle exit with changing blade lengths

따라, 섬유 방향각이 감소하였으며, $L_b=6l_f$ 이상인 경우는 섬유의 방향각이 다시 증가하였다. 즉, $L_b=4l_f$ 경우 섬유의 방향각이 약 15° , $L_b=6l_f$ 경우 섬유의 방향각이 거의 영(0°), $L_b=8l_f$ 경우 섬유의 방향각은 $L_b=4l_f$ 경우와 유사하게 약 15° 로 나타났다. $L_b=10l_f$ 경우는 섬유의 방향각이 약 24° 로 기존의 원형 타설 노즐 경우보다 높게 나타났다. 따라서, 블레이드의 길이 $L_b=4l_f \sim 8l_f$ 인 경우 섬유의 방향각을 약 15° 이내로 제어할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 도출 직후부터 거의 일정한 섬유 방향각을 유지했다.

4.2 블레이드 부착위치

기존 타설 노즐 끝에 부착된 블레이드형 노즐에서 블레이드가 부착되는 위치, 즉 노즐 출구 끝에서부터 길이변화 ($L_l=0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14l_f$)에 따른 해석을 수행하여 섬유의 회전각을 분석하였다. 이때, 블레이드 길이(L_b)는 앞서 최적화된 $6l_f$ 로 정의하였으며, 블레이드 간격(D_b)은 $2l_f$ 로 동일하게 하였다.

Fig. 8는 블레이드 부착 위치에 따른 섬유의 방향각 변화를 노즐 출구부터 50mm 간격으로 분석하였다. 모든 경우에 대하여 기존 타설 노즐에서 도출된 섬유 방향각보다 낮게 나타났다. 특히, $L_l=6 \sim 10l_f$ 일 때 섬유의 방향각 개선 효과가 매우 크게 나타났다.

따라서, Fig. 9에 보인 바와 같이 노즐 출구에서 200mm 위치에서 도출 이후 안정화된 섬유의 방향각을 분석하였다. 블레이드 위치(L_l)가 $0 \sim 2l_f$ 구간에서는 섬유의 방향각이 약 15° 로 거의 일정하게 유지되었다. $L_l=2l_f$ 에서 $6l_f$ 로 길어짐에 따라 섬유 방향각이 감소하였다. 즉, $L_l=2l_f$ 경우 섬유의 방향각이 약 15° , $L_l=4l_f$ 경우 약 12° , $L_l=6l_f$ 경우는 섬유의 방향각

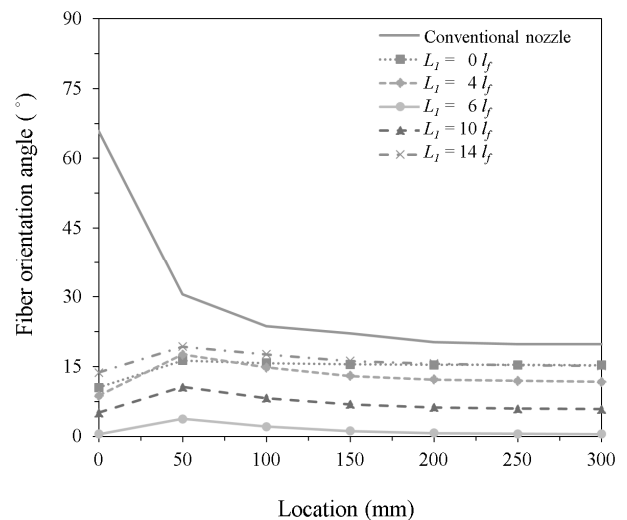


Fig. 8 Variation in the fiber orientation angles with changing blade locations from the nozzle exit

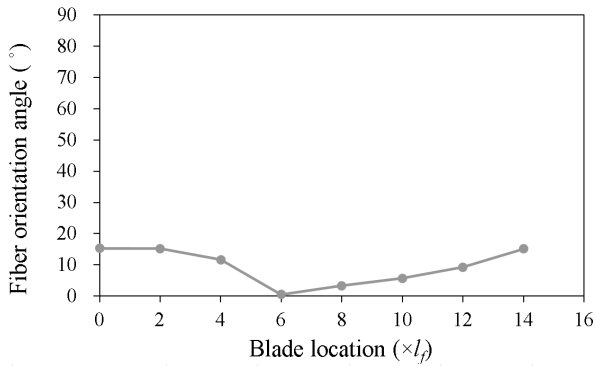


Fig. 9 Fiber orientation angles at 200mm from the nozzle exit with changing blade locations

이 거의 영(0°)으로 나타났다. $L_l = 6l_f$ 이상인 경우는 섬유 방향각이 다시 증가하여, $L_l = 8l_f$ 일 때 섬유의 방향각이 약 3° , $L_l = 10l_f$ 경우는 약 6° , $L_l = 12l_f$ 는 약 9° , $L_l = 14l_f$ 는 약 15° 로 나타났다.

따라서, 블레이드가 노즐 출구 끝에서부터 $14l_f$ 이내에 부착되는 경우는 섬유의 방향각을 약 15° 이내로 제어할 수 있음을 알 수 있다. 특히, $L_l = 6l_f$ 경우는 섬유의 방향각이 거의 영(0°)으로 나타났다. 또한, 섬유의 방향각은 노즐 출구에서 도출된 직후부터 거의 일정하게 유지되었다.

4.3 블레이드 간격

블레이드 길이와 부착위치에 대한 섬유의 방향각 분석 이후, 블레이드 간격(D_b) 변수에 대한 해석을 수행하였다. 블레이드 간격이 1.2배 이하인 경우는 섬유의 작은 운동에도 노즐의 벽 및 블레이드와의 충돌로 해석의 수렴값을 얻을 수 없었다. 따라서, 본 해석에서는 블레이드 간격을 섬유길이의 1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.7배로 고려하였다. 이때, 블레이드 길이(L_b)와 블레이드 부착위치(L_l)는 앞서 최적화된 $6l_f$ 로 정의하였다.

Fig. 10은 블레이드 간격에 따른 섬유의 방향각 변화를 노즐 출구부터 50mm 간격으로 분석하였다. $D_b = 2.7l_f$ 일 때는 섬유의 방향각 개선 효과가 나타나지 않고, 일반 노즐에서 도출된 방향각보다 높게 나타났다. 하지만, D_b 가 $2.7l_f$ 보다 작은 경우는 섬유의 방향각이 개선되었다.

Fig. 11는 섬유가 노즐에서 도출된 후 200mm 위치에서 섬유 방향각을 분석하였다. Fig. 10에서 보인 바와 같이, 블레이드 간격 D_b 가 $2.7l_f$ 에서 $2.0l_f$ 로 줄어들어 따라 섬유의 방향각이 약 25° 에서 0.5° 로 감소하였다. 즉, $D_b = 2.0l_f$ 일 때 섬유 방향각이 거의 영(0°)으로 최소의 값을 보였다. D_b 가 $2.0l_f$ 에서 $1.2l_f$ 로 감소할수록 섬유 방향각은 다시 증가하여, $D_b = 1.2l_f$ 일 때 섬유 방향각이 약 13° , $D_b = 2.4l_f$ 일 때 섬유의 방향각이 약 15° 로 나타났다.

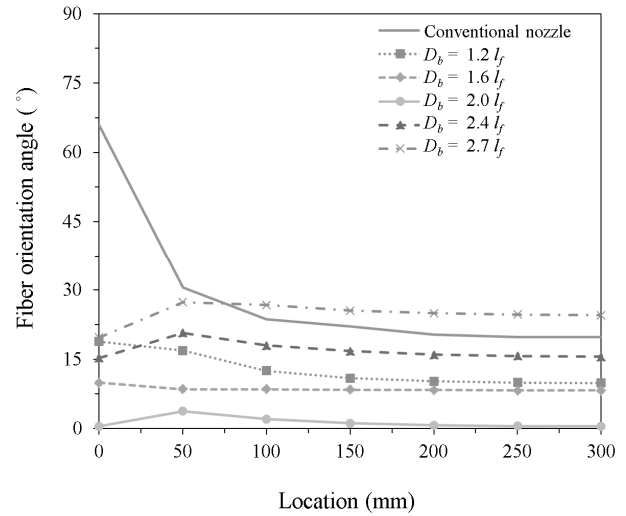


Fig. 10 Variation in the fiber orientation angles with changing blade distances from the nozzle exit

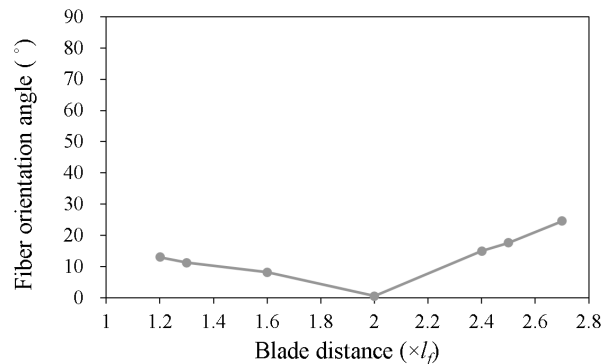


Fig. 11 Fiber orientation angles at 200mm from the nozzle exit with changing blade distances

따라서, 블레이드 간격 $D_b = 1.2 \sim 2.4l_f$ 일 때, 노즐 출구 직후부터 섬유 방향각을 거의 일정하게 약 15° 이내로 제어 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 섬유길이 및 노즐직경 변화

일반적으로 사용되는 타설 노즐 내부에 블레이드를 설치하여 섬유 방향각의 개선 효과와 제어 성능에 대해 분석하였다. 블레이드의 길이(L_b)와 부착위치(L_l), 간격(D_b)에 대한 해석 시 노즐의 직경은 160mm, 섬유의 길이는 20mm 가정하였다. 따라서, 최적화된 블레이드에 대하여 섬유 길이와 노즐 직경 변화에 따른 섬유의 방향각 및 제어 성능을 평가하였다. 즉, 앞서 최적화된 블레이드 변수인 $D_b = 2l_f$, $L_b = 6l_f$, $L_l = 6l_f$ 에 대하여 섬유 길이 20, 30, 40, 50mm에 대하여 해석을 수행하였다. 이때 노즐직경(D)은 섬유길이의 6배와 8배, 2가지 경우를 고려하였다.

길이(l_f) 20mm인 섬유가 최적화된 블레이드형 노즐을 통과한 경우 섬유의 방향각은 노즐직경이 $6l_f$ (=120mm)일 때는 약 0.7° , $8l_f$ (=160mm)일 때는 0.5° 였다. 또한, 섬유 길이가 30mm 일 때는 섬유의 방향각이 노즐직경 $6l_f$ (=180mm) 일 때 약 0.9° , $8l_f$ (=24mm)일 때 약 0.1° 로 나타났다. 그리고, 섬유 길이 40, 50mm 인 경우에도 최적화된 블레이드형 노즐에서 직경 $D=6l_f$ 일 때 섬유 방향각이 각각 약 1.0° , 0.8° 였으며, $D=8l_f$ 일 때는 방향각이 각각 약 0.6° , 0.1° 로 나타났다.

따라서, 본 연구에서 제시된 블레이드형 노즐 형상은 노즐의 직경 변화에 거의 영향을 받지 않고 1.0° 이내의 매우 낮은 섬유 방향각을 나타냈다. 또한, 사용되는 섬유길이도 적절히 반영하여 우수한 섬유 방향각 제어 성능을 보였다.

5. 결론

본 연구에서는 기존에 일반적으로 사용되는 타설 노즐 내부에 블레이드를 설치하여 타설 시 시멘트 복합체에 혼입된 섬유의 방향성을 제어하고 동시에 분포도를 향상시키고자 하였다. 시멘트계 매트릭스 재료의 유동특성과 혼입된 섬유의 운동, 노즐간의 상호작용을 고려한 다중물리계 유한요소해석을 수행하여 블레이드 변수를 정량적으로 분석하고 섬유 방향각 제어 성능을 평가하였다. 주요 연구 결과는 다음과 같다.

원형 타설 노즐에서 배출된 섬유의 방향각을 분석한 결과 노즐 중심에 위치한 섬유는 시멘트계 재료의 일정한 속도로 인해 회전운동이 발생하지 않았다. 반면에 노즐 상·하부에 위치한 섬유는 노즐 벽과의 속도 차이로 섬유 회전운동이 발생하였으며, 이는 섬유 방향각을 노즐 도출 시에는 약 70° , 이후 점점 감소하여 약 20° 로 유지하였다. 즉, 기존타설 노즐은 최소 약 20° 정도의 섬유 방향각이 발생하였다.

기존 타설 노즐 내부에 부착되는 블레이드형 노즐은 블레이드 길이(L_b)가 $4l_f \sim 8l_f$ 인 경우 섬유의 방향각을 약 15° 이내로 제어하였다. 특히, $L_b = 6l_f$ 경우 섬유의 방향각이 거의 영(0°)으로 나타났다. 또한, 최적화된 블레이드 길이(L_b)에 대해서 블레이드 부착 위치가 변화함에 따라 섬유의 방향각 변화를 분석하였다. 블레이드가 노즐 출구 끝에서부터 $14l_f$ 이내에 있는 경우 섬유의 방향각이 약 15° 이내로 나타났으며, 특히, $L_f = 6l_f$ 경우 섬유의 방향각이 거의 영(0°)에 가까웠다. 블레이드 간격은 $1.2 \sim 2.4l_f$ 일 때, 섬유 방향각을 거의 일정하게 노즐 출구 직후부터 약 15° 이내로 유지하였다. 결론적으로 섬유 길이(l_f)를 변수로 하여 내부 블레이드 간격이 섬유길이의 약 $1.2 \sim 2.4$ 배, 블레이드 길이는 섬유길이의 약 $4 \sim 8$ 배, 설치 위치는 시멘트 복합체가 도출되는 출구에서부터 섬유길이의 14배 이하일 때 섬유 방향각을 약 15° 이하로 제어되었다.

최적화된 블레이드에 대하여 노즐의 직경 변화에 따른 섬유 방향각을 분석한 결과, 직경 변화에 거의 영향을 받지 않고 1.0° 이내의 매우 낮은 섬유 방향각을 나타냈다. 또한, 사용되는 섬유길이 변화도 적절히 반영하여 우수한 섬유 방향각 제어 성능을 보였다.

본 연구에서 제시된 블레이드형 노즐은 섬유 방향각 제어 성능뿐만 아니라, 기존의 섬유보강 시멘트 복합체 타설장비와 타설관을 그대로 사용하면서, 탈·부착식으로 제작될 수 있어 사용성과 편의성을 동시에 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2018년 대구대학교 학술연구비 일부 지원에 의해 수행되어졌다.

References

- Azad, A., Lee, J.J., Lee, J.H., Lee, K.J., and An, Y.K. (2018), Numerical investigation of the density and inlet velocity effects on fiber orientation inside fresh SFRSCC, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 22(3), 16-20.
- Boulekbache, B., Hamrat, M., Chemrouk, M., and Amziane, S. (2010), Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material, *Construction and Building Materials*, 24, 1664-1671.
- Cao, Y.Y. and Yu, Q.L.(2008) Effect of inclination angle on hooked end steel fiber pullout behavior in ultra-high performance concrete, *Composite Structures*, 201, 151-160.
- Ellis, B.D., McDowell, D.L., and Zhou, M. (2014), Simulation of single fiber pullout response with account of fiber morphology, *Cement Concrete Composite*, 48, 42-52.
- Ferrara, L., Cremonesi, M., Tregger, N., Frangi, A., and Shah, S.P. (2012), On the identification of rheological properties of cement suspensions: rheometry, computational fluid dynamics modeling and field test measurements, *Cement and Concrete Research*, 42, 1134-1146.
- Ferrara, L., Ozyurt, N., and di Prisco, M. (2011) High mechanical performance of fiber reinforced cementitious composites: the role of "Casting-flow Induced" fiber orientation, *Materials and Structures*, 44, 109-128.
- Kang, S.T., Lee, B. Y., Koh, K. T. (2013), Prediction of fiber dispersion and orientation in fiber-reinforced cementitious composites, *Magazine of the Korea Concrete Institute*, 25(3), 39-42.
- Lee, J.H. (2017), Influence of concrete strength combined with fiber content in the residual flexural strengths of fiber reinforced concrete, *Composite Structures*, 168, 216-25

Lee, J.H., Cho, B.S., and Cho, C.O. (2016), Design of Ground Floor Slab According to the Method for Evaluating the Tensile Performance of Steel Fiber Reinforced Concrete, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 28(1), 95-104.

Lee, J.H., Cho, B.S., and Choi, E. (2017), Flexural capacity of fiber reinforced concrete with a consideration of concrete strength and fiber content, *Construction and Building Materials*, 138, 222-2231.

Roussel, N., Staquet, S., Schwarzenhuber, L.D., Roy, R.L., and Toutlemonde, F. (2007), SCC casting prediction for the realization of prototype VHPC-precambered composite beams, *Materials and Structures*, 40, 877-887.

Soufeiani, L., Raman, S.N., Jumaat, M.Z.B., Alengaram, U.J., Ghadyani, G., and Mendis, P. (2016), Influences of the volume

fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading – a review, *Engineering Structures*, 124(1), 405-417.

Wang, Z.L., Wu, J., and Wang, J.G. (2010), Experimental and numerical analyses on effect of fiber aspect ratio on mechanical properties of SRFC, *Construction and Building Materials*, 24(4), 559-565.

Received : 10/01/2018

Revised : 10/11/2018

Accepted : 10/12/2018

요 지 : 본 연구는 기존에 사용되어 지고 있는 타설 노즐 내부에 블레이드를 설치함으로써 타설 시 시멘트 복합체에 혼입된 섬유 방향성을 제어하고 동시에 분포도를 향상시키고자 하였다. 블레이드 변수 최적화를 위하여 시멘트계 매트릭스 재료의 유동과 혼입된 섬유의 운동, 노즐간의 상호작용을 고려한 다중물리계 유한요소해석을 수행하였다. 사용되는 섬유길이를 변수로 하여 블레이드의 간격, 길이, 위치를 결정하였다. 내부 블레이드 간격이 섬유길이의 약 1.2~2.4배, 블레이드 길이는 섬유길이의 약 4~8배, 설치 위치는 시멘트 복합체가 도출되는 입구에서부터 섬유길이의 14배 이하일 때 섬유 방향각이 약 15°이하로 제어되었다. 또한, 본 연구에서 제시된 블레이드형 노즐은 기존의 섬유보강 시멘트 복합체 타설장비와 타설관을 그대로 사용하면서, 탈·부착식으로 제작될 수 있어 사용성과 편의성을 동시에 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 섬유보강시멘트복합체, 섬유 방향성, 블레이드, 노즐, 유한요소해석
