

## 흡입성능 향상을 위한 복합가공기용 복합헤드 설계

김 성<sup>1</sup> · 최영석<sup>1,2</sup> · 김효영<sup>1</sup> · 김태곤<sup>1</sup> · 이석우<sup>1</sup> · 김진혁<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>한국생산기술연구원, <sup>2</sup>과학기술연합대학원대학교 생산기술전공

### Design of Composite Head for Compound Processing Machine on the Improved Suction Performance

SUNG KIM<sup>1</sup>, YOUNG-SEOK CHOI<sup>1,2</sup>, HYO-YOUNG KIM<sup>1</sup>, TAE-GON KIM<sup>1</sup>, SEOK-WOO LEE<sup>1</sup>, JIN-HYUK KIM<sup>1,2†</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology, 89 Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan 31056, Korea

<sup>2</sup>Industrial Technology, Korea University of Science and Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34113, Korea

†Corresponding author :  
jinhyuk@kitech.re.kr

Received 28 November, 2019

Revised 17 January, 2020

Accepted 28 February, 2020

**Abstract >>** This paper presents a numerical study on the design of composite head geometry used for compound processing machine. In order to achieve an optimum composite head geometry and to explain the interactions between the different geometric configurations, three dimensional computational fluid dynamics and design of experiment methods have been applied. From the 2k factorial design results, the most important design variable was found and the performance of the composite head was improved compared to the reference model.

**Key words :** Carbon fiber reinforced plastics(탄소섬유복합재), Composite head (복합헤드), Dust removal(분진회수), Design of experiment(실험계획법), Computation fluid dynamics(전산유체역학)

### 1. 서론

차량 및 항공기 등의 수송산업을 중심으로 미래 산업에 주로 적용되고 있고 핵심 부품소재로 각광받고 있는 탄소섬유복합재(carbon fiber reinforced plastics, CFRP)는 초경량 고효율 소재이다. 그러나 복합재 가공으로 인해 발생하는 CFRP 분진은 품질뿐만 아니라 작업 환경까지 저하시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 드릴링 헤드와 워터젯 헤드를 모두 장

착한 복합가공헤드를 개발하여 품질 및 작업환경 개선하는 추세이다. CFRP는 일반적인 금속보다 강도는 5-10배 이상이나 밀도는 약 25%이므로 경도가 높아 가공이 어렵고 가공 중에 박리(delamination) 및 미절삭(uncut fibers) 등의 결함이 발생하여 가공생산성이 저하된다. 뿐만 아니라 가공 중에 발생하는 CFRP 분진은 전자기기 및 각종 기기장치 내부에 이동하여 고장 및 화재를 유발하고, 다양한 유해 유기물질을 발생하므로 가공 생산자의 호흡기 및 피부에

악영향을 준다. 따라서 작업환경 개선 및 생산자의 생산능력을 향상시키기 위해 CFRP 가공시스템 개선 연구가 활발히 진행되고 있다.

이와 관련하여 Kim 등<sup>1)</sup>은 복합가공기용 복합헤드의 내부유동 및 성능평가를 computation fluid dynamics (CFD)를 활용하여 분석하였다. 또한 Suh 등<sup>2)</sup>은 CFRP 분진회수의 효율성을 높이기 위해 CFRP 흡입 모듈의 내부유동을 CFD를 활용하여 분석하였고, 분진흡입에 적합한 블로워 선정 및 성능평가를 수행하였다.

본 연구에서는 가공 중에 발생하는 CFRP 분진을 효과적으로 회수하기 위해 복합가공기용 복합헤드 유로설계를 수행하였다. 복합헤드 형상변화에 따른 흡입성능 특성은 실험계획법(design of experiment) 중에서  $2^k$  요인실험(factorial designs)을 적용하여 분석하였고, 복합헤드의 내부유동특성은 CFD를 활용하여 분석하였다. 복합가공기용 복합헤드의 유로설계를 위해 복합헤드 형상을 제어할 수 있는 설계변수를 선정하여 설계변수 변화에 따른 성능변화를 분석하였다. CFRP 분진을 효과적으로 회수하기 위해서는 압력손실이 최소화하는 유로설계가 필요하므로 복합헤드의 내부유동특성을 분석하여 내부 압력손실을 최소화하는 방안을 제시하였다. Fig. 1은 복합가공기용 복합헤드 유로설계 절차를 보여준다.

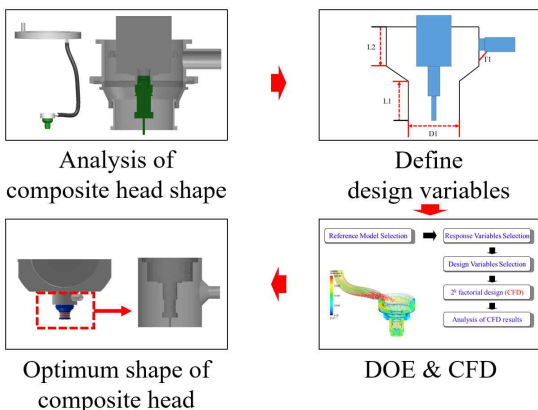


Fig. 1. Design process of composite head for compound pressing machine

## 2. 복합가공기용 복합헤드 형상

기존의 복합가공기용 헤드는 가공기능만 장착되어 있는 드릴링 헤드로 구성되어 있다. 가공 중에 발생하는 CFRP 분진을 효과적으로 제거하기 위해서는 흡입을 통한 분진제거는 제한적이다. 따라서 CFRP 분진을 효과적으로 제거하기 위해서는 세척기능이 추가적으로 헤드에 장착되어야 한다<sup>3)</sup>.

본 연구의 연구대상은 복합가공기용으로 복합헤드는 CFRP 가공기능인 드릴링 헤드와 세척기능인 워터젯 헤드가 구성되어 있는 복합헤드이다. Fig. 2는 복합가공기용 복합헤드 형상을 나타낸 것이다. 복합헤드는 가공 및 세척기능을 가지고 있어 내부유로형상이 매우 복잡하다. 따라서 복합가공기용 복합헤드의 흡입성능을 향상시키기 위해서는 내부유로설계가 필수적이다. 복합가공기용 복합헤드의 내부유로설계를 위해 Fig. 3과 같이 설계변수를 정의하였다. 복합

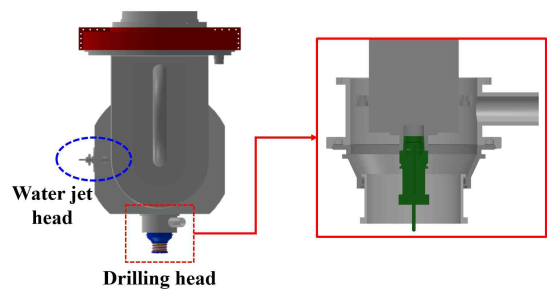


Fig. 2. Composite head for compound pressing machine

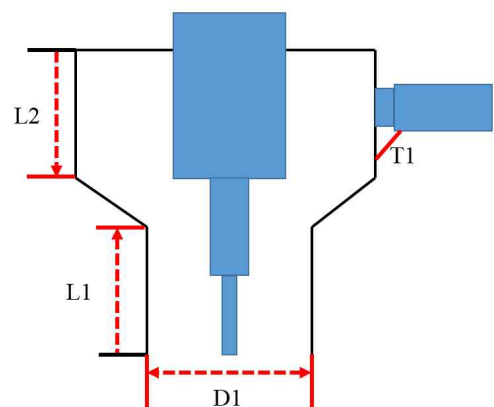


Fig. 3. Design variables of composite head

헤드는 드릴링 헤드와 워터젯 헤드로 구성되어 있으므로 시제품 제작을 고려하여 설계변수를 선정하였다. 복합헤드의 유로설계를 위해 설계변수는 복합헤드의 입구부 직경인 D1과 입구 및 출구부 축방향 길이인 L1 및 L2로 정하였다. 또한 출구부 관의 압력손실을 최소화하기 위해 출구부 연결부 형상은 T1으로 정하였다. 이때 T1의 설계변수는 연결부의 종축 및 횡축의 길이를 동일하게 적용하여 직선으로 연결하였다. 선정된 설계변수는 2<sup>k</sup> 요인실험 및 CFD를 활용하여 설계변수 변화에 따른 흡입성능 변화를 분석하였다.

### 3. 수치해석방법

복합헤드의 내부유동해석은 상용 CFD 코드인 ANSYS CFX-17.1을 이용하였다<sup>4)</sup>. 복합가공기용 복합헤드 형상은 Solid Works 프로그램을 이용하여 생성하였고, 격자계는 ANSYS ICEM-CFD를 사용하여

비정렬격자계(unstructured grid)로 생성하였다. 수치해석 결과의 신뢰성을 높이기 위해 복합가공기용 복합헤드의 격자 테스트를 수행하였고 약 230만 개에서 수치해석 결과가 일정하였다. Fig 4(a)는 격자 테스트 결과를 나타낸 것이다.

복합헤드의 비압축성 난류흐름(turbulent flow) 분석을 위해 3차원 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 이용하였다. 난류의 흐름을 분석하기 위해 난류모델(turbulent model)은 유동박리(flow separation)의 예측에 유리한 SST model을 사용하였다<sup>5,6)</sup>.

Fig. 4(b)는 복합헤드의 경계조건(boundary condition)을 보여준다. 복합가공기용 복합헤드의 입구 부분에 대기압(atmospheric pressure)을 주었고, 출구부에는 질량유량(mass flow rate)을 주었다. 작동유체(working fluid)는 25°C의 공기로 사용하였다.

### 4. 복합가공기용 복합헤드 성능 분석

#### 4.1 2<sup>k</sup> 요인실험

실험계획법은 근대적 통계해석법을 기반으로 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 적은 비용으로 선정하고 그 효과를 수량적으로 측정하는 방법이다. 그리고 동시에 두 종류 이상의 인자를 대상으로 하여 인자들의 효과를 개별적으로 측정

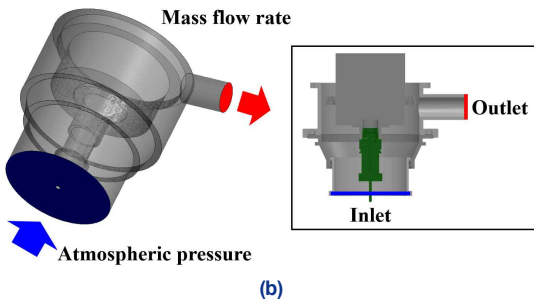
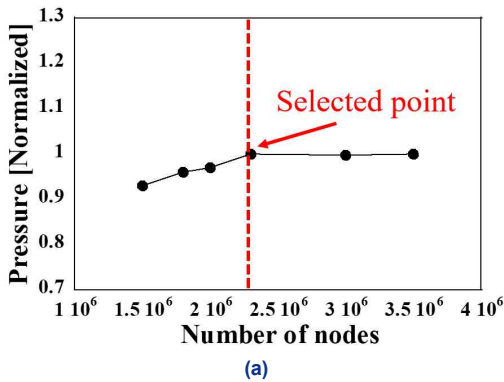


Fig. 4. Boundary conditions and grid system for the composite head calculation (a) grid test, (b) boundary conditions

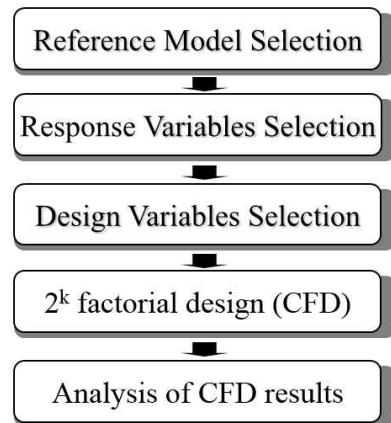


Fig. 5. Flow chart of 2<sup>k</sup> factorial design

할 수 있다. 본 연구에서는 복합헤드의 설계변수에 의한 유동특성을 알아보기 위해 실험계획법의  $2^k$  요인실험을 사용하였고, 분석은 상용 프로그램인 Minitab 14를 이용하였다.<sup>7)</sup> Fig. 5는  $2^k$  요인실험을 이용한 분석절차를 보여준다. 본고에서는 관심있는 인자의 수, 실행할 수 있는 실험의 수, 비용 및 시간 등을 고려하여 의미가 적은 고차의 상호작용을 교락시켜서 실험의 횟수를 적게 하는 일부실시설계(fractional factorial designs)로  $2^k$  요인실험을 수행하였다.  $2^k$  요인실험에서 선택한 변수들은 복합헤드의 변수 중에서 측면흡입구 단면적을 쉽게 제어하고, 성능에 영향을 미칠 것이라 인식되는 변수들 즉, D1, L1, L2 및 T1로 지정하였다. Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 일부실시설계의 해상도는 IV 수준으로 주 효과가 2차 상호작용과 교락되지 않으나, 2차 상호작용 간에는 교락된 형태로써 즉, 변수 4개의 중심값을 포함한 8개의 수치해석 실험 셋을 생성할 수 있다. Table 1은  $2^k$  요인 실험에 적용된 실험조건을 보여준다.

	Factors										
Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
4	Full	III									
8		Full	IV	III	III	III					
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	
128						Full	VIII	VI	V	V	

Fig. 6. Fractional factorial of DOE

Table 1.  $2^k$  factorial design set

	D1 (mm)	T1 (mm)	L1 (mm)	L2 (mm)
1	68	5	45	67
2	140	5	45	87
3	68	15	45	87
4	140	15	45	67
5	68	5	65	87
6	140	5	65	67
7	68	15	65	67
8	140	15	65	87
Center	104	10	55	77

#### 4.2 복합헤드 설계변수 변화에 의한 성능특성 분석

복합헤드를 통한 CFRP 분진흡입은 블로워로 흡입한다. 복합헤드에서 압력손실이 크면 블로워 작동특성이 변경되며 정상적인 운전이 불가하다. 따라서 복합헤드를 통해 블로워로 이동하는 동안 압력손실이 최소화 되어야 한다. 복합헤드 내부 압력손실이 감소하면 블로워에서 고유량 이송이 가능하다.

Fig. 7은 저항곡선(system curve)과 압력곡선(pressure curve)을 비교한 것이다. 내부압력손실이 증가하면 저항곡선의 기울기가 증가하여 블로워 작동점(operating point)이 저유량으로 이동하게 되어 흡입성능이 저하된다. 반면에 내부압력손실이 감소하면 저항곡선의

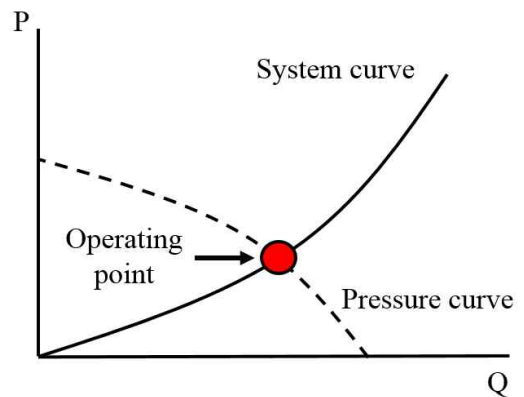
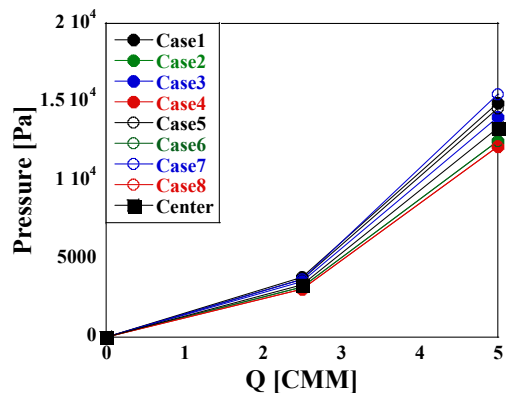


Fig. 7. Measuring method for operating point of fan installed in system (flow rate & pressure)



기울기가 감소하여 블로워 작동점이 고유량으로 이동하여 흡입성능이 향상된다.

복합가공기용 복합헤드의 성능 분석을 위해 복합헤드의 설계변수 변화에 따른 저항곡선을 분석하였다. Fig. 8은 복합헤드 설계변수 변화에 따른 저항곡선을 비교한 것이다. 저항곡선은 CFD를 활용하여 나타내었다. Fig. 8을 보면 복합헤드 설계변수 변화에 따라 저항곡선이 다른 것을 확인할 수 있다.

복합헤드 설계변수 변화에 따른 압력손실변화는 주 효과 도표(main effects plot)를 이용하여 분석하였고, Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9를 보면 D1, T1, L2는 증가할수록 압력손실이 감소하며, L1은 감소할수록 압력손실이 감소된다. Fig. 10은 파레토 도표를 보여준다. Fig. 10을 보면 압력손실에 영향을 주는 설계변수는 D1, L2, L1 및 T1 순으로 영향을 주고 있으나 D1에 대한 효과가 다른 설계변수에 비해 영향이

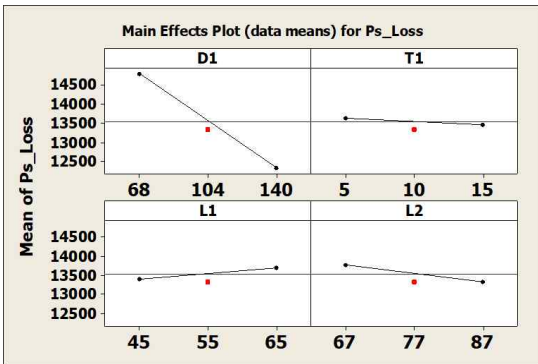


Fig. 9. Main effects plot

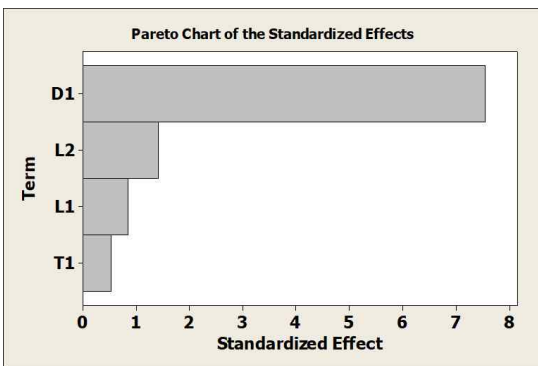


Fig. 10. Pareto chart

매우 큼을 알 수 있다. 즉, D1을 제어하는 것이 복합헤드 내부압력손실을 감소시키는 데 효과적이다.

본 연구에서는 압력손실이 최소화하는 모형을 설계 목표값(target of design)으로 설정하였다. 목표값을 만족하는 형상을 결정하기 위해 반응최적화(response optimization)기법을 이용하여 Fig. 11과 같은 반응최적화 도표를 도식하였다. 반응최적화 결과 D1은 140.0, T1은 15.0, L1은 45, L2는 87에서 압력손실이 최소화로 예측되었다. 이 결과는 설계 목표값을 만족하여 최적형상(optimum model)으로 선정하였다. Fig. 12는 복합헤드의 기존형상 및 최적형상을 비교한 것이다.

### 5. 복합가공기용 복합헤드 설계결과

반응최적화를 통해 도출된 형상의 성능은 CFD를 활용하여 검증하였고, 기존형상 및 2<sup>k</sup> 중심형상의 성능과 비교분석하였다.

Fig. 13은 기존형상, 2<sup>k</sup> 중심형상 및 최적형상의 저항곡선을 비교한 것이다. Fig. 13을 보면 2<sup>k</sup> 요인실험을 통해 저항곡선의 기울기가 감소되었고, 압력손실이 개선되었음을 확인할 수 있다. Fig. 14는 복합헤드 기존형상과 최적형상의 압력손실을 막대그래프

Optimal		D1	T1	L1	L2
D	Hi	140.0	15.0	65.0	87.0
	Cur	[140.0]	[15.0]	[45.0]	[87.0]
	Lo	68.0	5.0	45.0	67.0
Ps_Loss	Minimum				
		$y = 1.213E+04$ $d = 0.95622$			

Fig. 11. Plot of response optimization

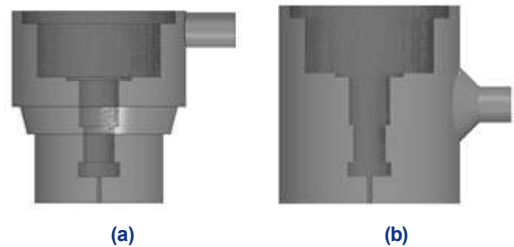


Fig. 12. Comparison of three-dimensional geometry composite head (a) reference model, (b) optimum model

로 비교하였고, Table 2는 압력손실을 기준형상 기준으로 백분율로 비교하였다. Fig. 14를 보면 2<sup>nd</sup> 중심형상 및 최적형상은 기준형상보다 압력손실이 감소되었고 특히 최적형상은 기준형상보다 약 41% 감소되었다.

최적설계 된 형상의 압력손실이 개선된 객관적인 검토를 위해 CFD를 활용하여 복합헤드 내부압력분포 및 유동흐름을 분석하였다. Fig. 15는 기준형상 및 최적형상의 내부유동흐름을 비교한 것이다. Fig. 15(a)

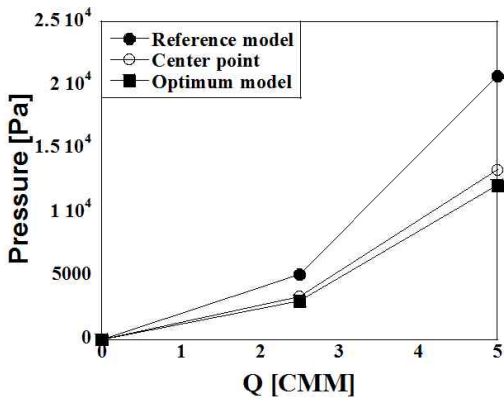


Fig. 13. Comparative analysis of system curves depending on composite head shapes

Table 2. Comparison of CFD results

	P/P <sub>Ref.</sub> (%)
Reference model	100
Center point	64.3
Optimum model	58.6

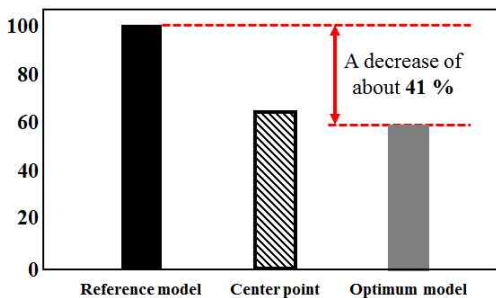


Fig. 14. Comparison of pressure loss

를 보면 기준형상의 출구부의 내부유동흐름에서 유동박리(separation)가 발생하고 파이프 방향의 유동흐름도 매끄럽지 않은 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 15(b)의 최적형상의 내부유동흐름은 파이프 방향으로 매우 부드럽게 흐르므로 기준형상보다 내부유동흐름이 개선된 것을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 복합가공기용 복합헤드의 성능을 분석하기 위해 CFD를 활용하였고, 복합헤드의 설계변수 변화에 따른 성능변화는 실험계획법 중 2<sup>nd</sup> 요인 실험을 이용하여 분석하였다. 본 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 복합가공기용 복합헤드의 내부유로형상은 복잡하여 CFRP 분진 흡입의 한계가 있다. 따라서 복합헤드의 내부유동흐름을 개선하는 형상을 설계하였다.
- 2) 복합가공기용 복합헤드의 형상을 제어할 수 있는 설계변수를 정의하였고, 형상을 효율적으로 제어

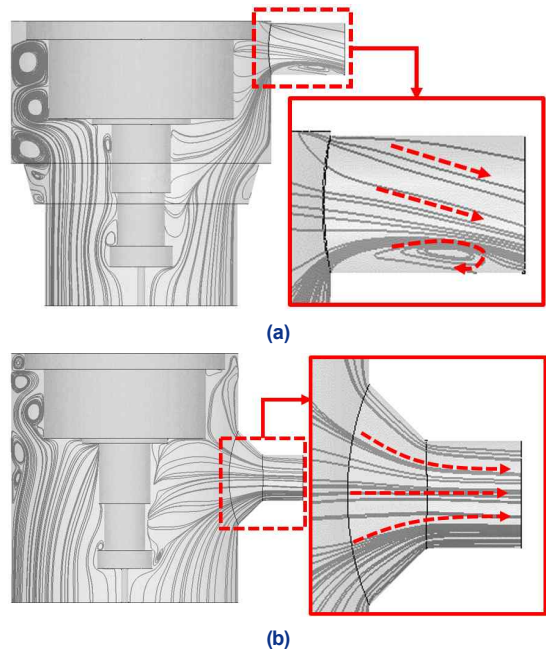


Fig. 15. Comparative analysis of streamline on composite head (a) reference model, (b) optimum model

할 수 있는 설계변수를 제시하였다.

3) 설계변수 변화에 따른 성능변화를 분석하면 복합헤드 입구부 직경에 대한 영향이 크며, 입구부 직경을 제어하면 효과적으로 성능을 향상시킬 수 있다.

4) 최적설계 된 형상은 기존형상보다 내부유동흐름이 안정적이며, 기존형상 대비 압력손실이 약 41% 감소되었다.

## 후 기

본 연구는 “탄소섬유복합재(CFRP) 가공시스템 개발사업(No. 10053248)”의 지원으로 이루어졌습니다.

## References

1. J. H. Kim, J. W. Suh, Y. S. Choi, W. G. Joo, H. Y. Kim, T. G. Kim, and S. W. Lee, “A performance evaluation on selection of blower and suction module for CFRP dust removal”, The KSPE 2018 Autumn Conference, 18AOS146. Retrieved from <http://journal.kspe.or.kr/archive/index.html?gubun=11>.
2. J. W. Suh, Y. S. Choi, W. G. Joo, H. Y. Kim, T. G. Kim, S. W. Lee, and J. H. Kim, “A performance evaluation on selection of blower and suction module for CFRP dust removal”, The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 22, No. 1, pp. 5–12, doi: <https://doi.org/10.5293/kfma.2019.22.1.005>.
3. S. Kim, Y. S. Choi, W. G. Joo, H. Y. Kim, T. G. Kim, S. W. Lee, and J. H. Kim, “A numerical study on the flow characteristics of composite head for compound processing machine for CFRP dust removal”, The KSPE 2019 Autumn Conference, P12-002. Retrieved from <http://journal.kspe.or.kr/archive/index.html?gubun=11>.
4. ANSYS, CFX. Version 17.0, “ANSYS CFX—solver theory guide”, ANSYS Inc 2016. Retrieved from <https://www.scribd.com/document/344928476/ANSYS-CFX-Solver-Theory-Guide>.
5. A. Hellsten and S. Laine, “Extension of the k- $\omega$ -SST turbulence models for flows over rough surfaces”, AIAA 22nd Atmospheric Flight Mechanics Conference, AIAA-97-3577, pp. 252–260, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1997-3577>.
6. F. R. Menter, “Zonal two equation k- $\omega$  turbulence models for aerodynamic flows”, 1993, AIAA 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, pp. 93–2906, doi: <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>.
7. Minitab Inc, “MINITAB statistical software release 14 for Windows”, State College USA, 2003. Retrieved from <http://www.minitab.co.kr/minitab/new/main/main.php>.