

## 제철소 소결냉각용 축류송풍기 출구 덕트 형상에 따른 내부유동특성

최영도\*† · 김경훈\*\*

### Internal Flow Characteristics of a Steelworks Sintering Cooler by the Duct Shape of Cooler Fan Outlet

Young-Do Choi\*†, Kyoung-Hoon Kim\*\*

*Key Words* : Steelworks(제철소), Sintering cooler(소결 냉각기), Axial blower(축류송풍기), Outlet duct shape(출구 덕트 형상), Internal flow characteristic(내부유동특성)

#### ABSTRACT

Because of overload working condition of sintering cooler, the cooler fan often suffers the break or damage of rotor blade and fixing shaft. Therefore, internal flow characteristics of a steelworks sintering cooler fan by the duct shape of the cooler fan outlet, such as duct outlet opening ratio, duct height and dividing wall shape on the duct outlet flow pattern are examined in detail. The results show that relatively short duct wall height and attachment of dividing wall shape improves flow patterns considerably.

#### 1. 서 론

제철소에서 소결광의 최대 생산을 위해서는 소결기 가동률을 향상시켜야 하며, 특히 소결광 생산성 증대에 따라 발생하는 소결 냉각팬의 고장 발생률을 감소시킬 필요가 있다. 이것은 소결 냉각기 대차에 다량의 소결광 적재와 기후영향으로 냉각팬에 실속이 발생하면, 적절한 운전조건 미 정립으로 인하여 냉각팬 블레이드가 절손되어 블레이드 교환 및 밸런싱 작업에 장시간이 소요되기 때문이다.

이러한 실속 발생의 원인으로는 냉각팬 용량 및 냉각기 대차 폭을 증대시켰지만, 냉각기 덕트의 크기는 증대시키지 않음에 따라서, 고생산성에 의한 과부하가 발생하여 증가한 미분 발생량 및 소결광 편적에 의하여 소결 냉각기 내부에서 원활한 냉각공기의 배출이 불가능하게 되어 냉각팬 내부에서 실속 및 서어징이 발생하고 출구 덕트에서 이상 압력분포가 발생하기 때문으로 확인되었다.

Fig. 1은 소결 냉각팬 블레이드와 고정 축 절손 사례를 나타내고 있다. 이와 같은 소결 냉각팬 블레이드와 고정 축의 절손 문제점을 해결하기 위하여 실속방지 시스템을 도입하여 운영 중에 있으나, 생산성 향상을 위해서 소결 냉각기 적재량이 과다하게 되면 소결 냉각기에 과부하가 발생하게 되며, 소결 냉각기의 냉각성능 향상을 위해서 냉각팬의 블레이드 피치각을 크게 하여 고압 및 과대유량 운전을 하게 될 경우에 실속 및 서어징이 발생하게 되는 문제점이 발생하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 제철소 소결기 운전여건으로 인하여, 출구 덕트의 용량을 증대시키지 않고 출구 덕트 내부유로 형상을 최적화함에 의하여 제철소 소결광 냉각팬에서 발생하는 실속 발생을 억제시킬 수 있는 방안을 제안하기 위하여, 소결광 냉각팬의 설계점 및 실속 발생 운전점에서의 냉각팬 성능을 검토하였고, 냉각팬 후방 덕트 출구의 공기유로 열림비율 및 냉각팬 후방 덕트 유로 형상에 따른 내부유동특성을 검토하였다.

\* 목포대학교 기계공학과, 신재생에너지기술연구소(Department of Mechanical Engineering, Institute of New and Renewable Energy Technology Research, Mokpo National University)

\*\* 포스코 광양제철소 제선부(Ironmaking Department, POSCO Gwangyang Works)

† 교신저자(Corresponding Author), E-mail : ydchoi@mokpo.ac.kr

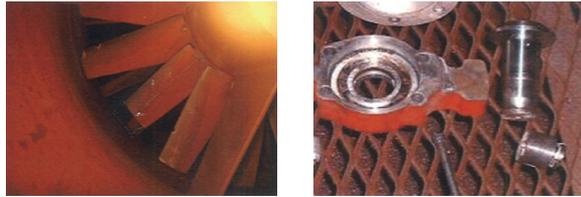


Fig. 1 Operation troubles occurred at (a) blade and (b) blade fixing shaft of sintering cooler fan

## 2. 수치해석 대상 및 방법

### 2.1. 수치해석 대상

Fig. 2는 소결 냉각팬 모델을 보이고 있으며, Table 1에 소결 냉각팬의 사양을 나타내고 있다. 소결 냉각팬으로는 축류송풍기를 적용하였으며, 정격 유량이 21,300 m<sup>3</sup>/min, Motor용량은 6,600V-1,800kW, 블레이드 회전속도가 1,190 min<sup>-1</sup>이다. 로터 블레이드 날개는 16매이며, 고정의 안내날개는 Fan 유입측에 4매, 블레이드 유출측에 19매, Fan 케이싱 출구측에 6매가 설치되어 있다.

한편, 냉각팬 유출관 출구부 작업조건(소결광 미분 및 편적 발생 조건)에 따른 냉각팬 성능 및 출구 덕트 공기 유동을 검토하기 위하여, Fig. 3과 같이 출구덕트 대차 하부의 바닥면 열림비율에 따른 출구 덕트 유동장 모델을 작성하였으며, 바닥면 전체 개방, 1/2 개방, 1/4 개방 상태의 모델에 대해서 유동해석을 수행하였다.

실제 소결 냉각기 덕트에는 2대의 냉각팬이 동시에 운전되고 있지만, 계산기 용량 및 계산시간의 단축 등을 고려하여 1대의 냉각팬과 전체 출구 덕트의 절반에 해당하는 유동장에 대해서만 계산을 수행하였다.

또한, 현재의 출구 덕트 형상으로부터 덕트 냉각성능 개선 방안을 검토하기 위해서 Fig. 4와 같이 출구 덕트의 벽면 형상 조건에 따른 3차원 형상 모델을 작성하였다. 기존의 덕트 형상에서 덕트 하부 벽면이 직교형상인 직교벽면, 원호로 새롭게 구성된 원호 벽면, 그리고, 소결 냉각팬 케이싱 유출측 맞은편 출구 덕트 벽면에 분리벽을 설치한 형상에 대해서 각 경우 별 조합을 통하여 3차원 형상을 작성하였다.

Fig. 5는 현재의 출구 덕트 형상(Case I)에 대하여 출구 덕트 하부를 매립했을 경우의 형상(Case II)에 대해서 3차원 형상을 작성한 결과이다.

### 2.2. 수치해석법

축류송풍기에 대한 설계 및 수치해석법에 대해서는 이전의 많은 연구결과가 수행되어 왔으며<sup>(1~8)</sup>, 본 연구에서는 solver로서는 상용 CFD코드인 ANSYS CFX<sup>(9)</sup>를 사용하였다.

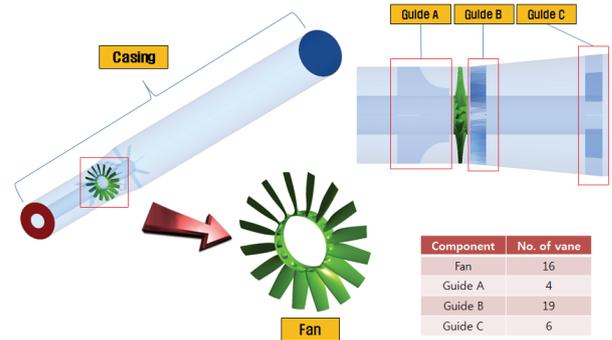


Fig. 2 Schematic view of sintering cooler fan model for CFD analysis

Table 1 Design specifications of axial blower used for steelworks sintering cooler fan

Item	Value
Rated flow rate	21,300 m <sup>3</sup> /min
Rated rotating speed	1,190 min <sup>-1</sup>
Motor capacity	6,600V-1,800kW
No. of rotor blade	16
No. of inlet guide vane	4
No. of guide vane at blade outlet	19
No. of guide vane at fan casing outlet	6



Fig. 3 3D modeling of sintering cooler flow field by the opening ratio of air duct outlet



Fig. 4 3D modeling of sintering cooler flow field by air duct wall shape condition

Fig. 6은 소결 냉각팬 성능 및 내부유동 해석을 위하여 구성한 계산격자를 보이고 있으며, Tetra-hedral 격자를 적용하였다. 계산결과에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 Fan 블레이드 케이싱 벽면, Fan 케이싱 유출부, 블레이드 부근 유동장에 대해서는 매우 세밀한 격자 구성을 수행하여 계산정도를 향상시킬 수 있도록 하였다.

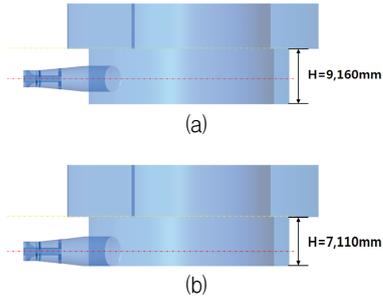


Fig. 5 3D modeling of sintering cooler flow field by air duct height : (a) H=9,160mm (Case I) and (b) H=7,110mm (Case II)

Fig. 7은 소결 냉각팬을 포함한 출구 덕트 유동장에 대한 계산격자를 보이고 있다. 계산기 용량, 계산시간 단축을 고려하여 복잡한 유동장을 잘 묘사할 수 있는 Tetra-hedral 격자를 이용하여 유동장에 대한 계산격자를 구성하였다.

소결 냉각팬 및 출구 덕트 유동장에 대한 수치해석을 위하여 유동장 각부의 경계조건을 설정하였으며, Fig. 8은 소결 냉각팬 내부유동장 CFD해석을 위한 경계조건을 나타내고 있다.

소결 냉각기 모델의 전체 유동장에 대해서 정상상태의 계산을 수행하였고, 난류모델로서는 유체기계에 대한 수치해석 시 저 레이놀즈수 및 고 레이놀즈수 영역에서 모두 상대적으로 높은 수렴성과 계산정도를 나타내는 것으로 알려진 SST모델을 적용하였다. 작동유체로서는 밀도 1.200kg/m<sup>3</sup>의 공기를 적용하였고, 벽면은 모두 No slip 조건을 적용하였다. 유동장 유입측에 평균유량, 유출측에 일정압력의 조건을 설정하였다.

그리고, 출구 덕트의 상부를 유출측으로 설정하여 대기로 개방된 상태로 경계조건을 설정하였다.

또한, 실제 소결 냉각팬의 운전 시에는 대차에 적재되는 소결광의 용량에 따라서 로터 블레이드의 피치 각도를 가변하여 유량과 압력을 조절하는 시스템으로 구성되어 있기 때문에 실험값으로부터 도출된 성능곡선의 양정과 유량을 참조하여 계산을 수행하였으며, 소결 냉각팬 출구 덕트 대차 하부 Cascade 바닥면 열림비율 및 벽면 형상에 따른 덕트 수직방향 속도성분 변화에 대해서 검토하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 성능곡선 및 축류송풍기 내부유동

Fig. 9는 소결 냉각팬으로 채용된 축류송풍기의 성능곡선을 보이고 있으며, 로터 블레이드 피치각도가 50°, 60°, 68°일 경우에 대해서 양정과 효율에 대한 실험결과(검은 실선)와 수치해석 결과를 비교하였다. 각 로터 블레이드 피치각도에서 효율곡선상의 최고효율점 이상의 유량 영역에서는 실험결과(검은 점선)와 수치해석결과가 비교적 잘 일치하며, 설계점

Item	Total number
Node	5,658,841
Element	25,796,479



Fig. 6 Numerical mesh of axial blower used for sintering cooler fan

Item	Total number
Node	3,937,971
Element	17,207,868

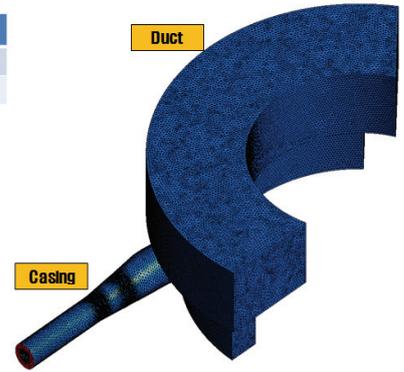


Fig. 7 Numerical mesh of total flow field of sintering cooler

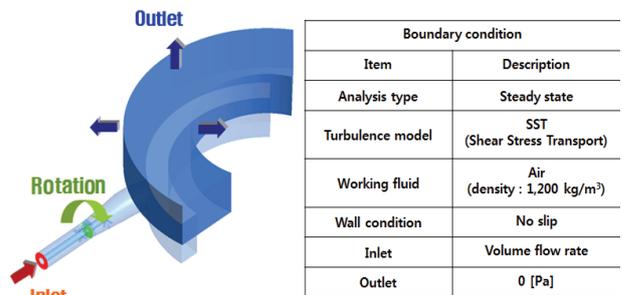


Fig. 8 Boundary condition of total flow field of sintering cooler

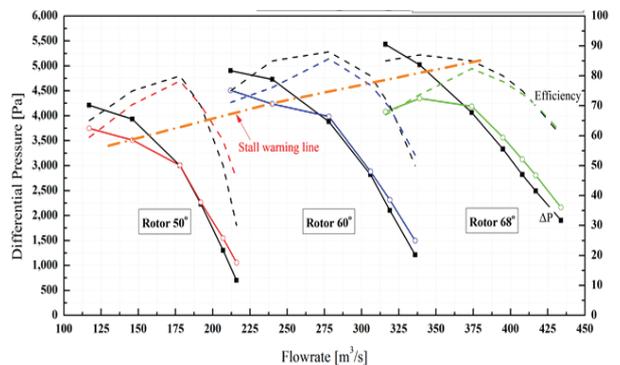


Fig. 9 Performance curves by rotor blade pitch angle and stall warning line of test blower

에서는 실험과 수치해석 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나, 설계점 유량 이하의 영역에서는 실험결과와 수치

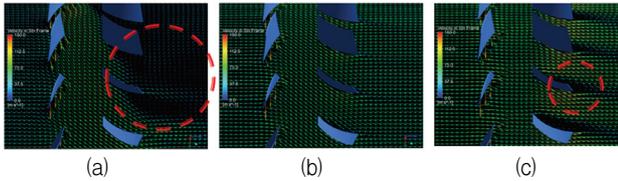


Fig. 10 Velocity vectors behind the guide vane of sintering cooler fan under the condition of (a) partial (Case 1), (b) design point (Case 2) and (c) excessive (Case 3) flow rates (rotor blade pitch angle : 60°)

해석결과 사이에 상대적으로 큰 차이를 보이고 있으며, 설계점 유량에서 과대유량으로 이동할수록 효율의 차이가 발생하고 있다.

이와 같은 결과의 원인으로서 Fig. 10에 보이고 있는 속도벡터(로터 블레이드 피치 각도 60°)에서 알 수 있는 바와 같이 최고효율점 유량 이하의 영역(Case 1)에서 발생하는 매우 넓은 영역의 가이드베인 후연 부근의 박리로 인한 실속의 영향으로 수치해석 결과가 실험결과와 차이를 보이는 것으로 판단된다.

설계점 유량(Case 2)에서는 흐름이 가이드베인의 형상을 따라서 균일하게 흘러가는 흐름을 확인할 수 있지만, 과대유량 영역(Case 3)에서도 가이드베인 후연 부근에서 유동 박리가 발생함을 알 수 있다.

이상의 결과로부터 유량의 변화에 따라서 블레이드 하류 가이드베인에서의 흐름이 크게 변화하고 저유량 및 과대유량 영역에서 발생하는 박리 및 실속 등의 비정상 유동현상에 의해 효율이 크게 저하함을 알 수 있다.

### 3.2. 출구 덕트 열림비율에 따른 내부유동

소결 냉각팬 하류측 출구 덕트의 작업조건에 따른 출구 덕트 내부의 유동현상을 상세하게 검토하기 위하여, 출구 덕트 상부에 위치한 대차 Cascade 바닥면에 적재된 소결광의 적재량에 따른 공기의 유출량을 검토하였으며, 유동해석을 위한 유동장의 단순화를 위하여 출구 덕트 상부가 전부 개방된 상태, 1/2 개방된 상태, 1/4 개방된 상태에 대하여 형상모델링을 수행하여 유동해석을 수행하였다.

Fig. 11은 출구 덕트의 실제 높이인 H=9,160 mm (Case 1)일 경우의 출구 덕트 유출측 열림비율에 따른 소결 냉각팬 출구 중심선 높이에서 덕트 내부 수평방향 단면 속도벡터를 보이고 있다.

Fig. 12와 13은 출구 덕트 유출측 열림비율에 따른 출구 덕트 내부 정압선도 및 출구 덕트 수직방향 유출측 속도선도를 보이고 있다.

한편, 출구 덕트 유출측 열림 비율에 따른 수직방향 속도 성분에 대한 정량적인 고찰을 위하여 Fig. 14에 보이는 바와 같이 출구 덕트 유출측에서 반경방향으로 일정한 간격으로

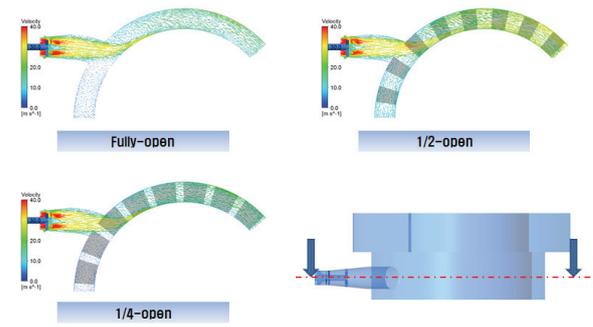


Fig. 11 Internal velocity vectors of sintering cooler by duct outlet opening ratio (duct height H=9,160mm, Case 1)

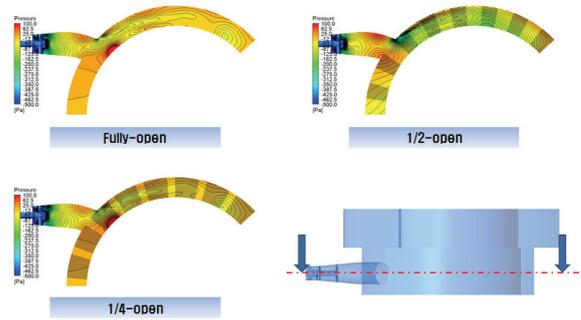


Fig. 12 Internal pressure contours of sintering cooler by duct outlet opening ratio (duct height H=9,160mm, Case 1)

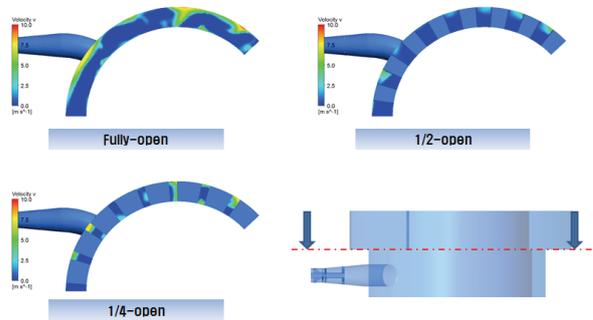


Fig. 13 Internal normal velocity contours of sintering cooler by duct outlet opening ratio (duct height H=9,160mm, Case 1)

기준선을 작성하여 그 기준선 위에서의 수직방향 속도분포를 검토하였다.

Fig. 15는 Fig. 3에서 나타난 바와 같은 출구 덕트 유출측 열림비율에 따른 수직방향 속도분포를 보이고 있으며, 출구 덕트 높이가 상대적으로 큰 Case I의 경우에 해당한다. 전체적인 경향으로서 출구 덕트 열림비율이 커지게 되면 수직방향 유출속도가 증가함을 알 수 있으며, 특히 출구 덕트 열림비율이 완전개방 시에는 Fig. 15(c)의 profile line 3에서 알 수 있는 바와 같이 상대적으로 매우 큰 수직방향 유속이 존재함을 알 수 있으며, 열림비율이 낮아질수록 수직방향 유속 성분이 작아짐을 알 수 있다.

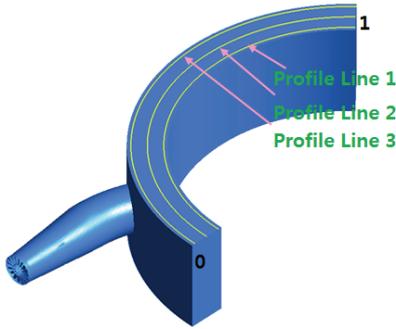


Fig. 14 Schematic view of profile line locations in duct outlet passage

### 3.3. 출구 덕트 벽면 높이에 따른 내부유동

Fig. 15와 16의 비교에서 알 수 있는 바와 같이 출구 덕트의 높이가 변화함에 따라서 전체적으로 출구 덕트 유출측 수직방향 속도선도에서 변화가 확인되고 있으며, 특히 출구 덕트 유출측이 완전히 개방된 상태에서는 출구 덕트 높이가 낮을수록 수직방향 속도성분의 크게 나타남을 알 수 있으며, 이러한 결과는 결국 출구 덕트 높이가 낮을수록 대차 내부에 적재된 소결광에 대한 냉각효율이 증가함을 의미한다.

### 3.4. 출구 덕트 벽면 형상에 따른 내부유동

출구 덕트의 유출측 수직방향 속도성분을 증가시키기 위하여 출구 덕트 내측 벽면에 분리벽을 설치한 경우와 미설치한 경우를 비교해볼 경우 Fig. 15와 16에서 알 수 있는 바와 같이 전체적으로 출구 덕트의 높이에 상관없이 분리벽을 설치했을 경우에 더 높은 수직방향 속도성분이 존재함을 알 수 있다.

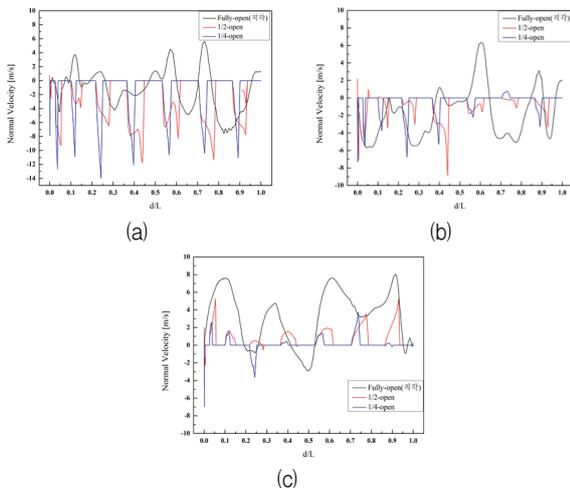


Fig. 15 Velocity distributions on the profile lines at the outlet of duct passage by opening ratio : (a) profile line 1, (b) profile line 2 and (c) profile line 3 (H=9,160mm, Case I)

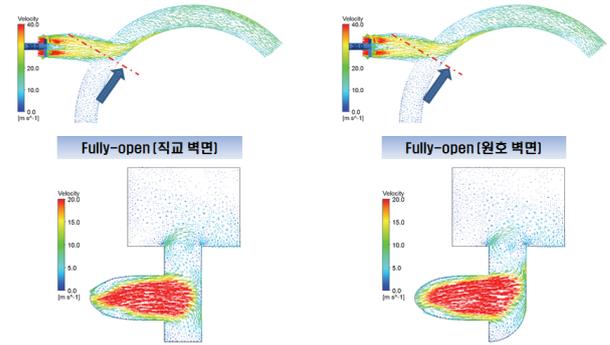


Fig. 17 Velocity vectors at the sintering cooler fan outlet of duct passage by the corner shape of duct bottom wall (H=9,160mm, Case I)

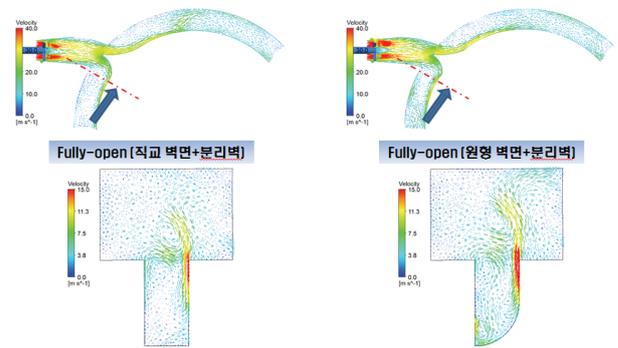


Fig. 18 Velocity vectors at the sintering cooler duct passage by the corner shape of duct bottom wall as well as dividing wall shape (H=7,110mm, Case II)

그리고, 출구 덕트 하부 모서리 형상에서도 직각모서리와 원호 모서리를 설치할 경우 분리벽을 함께 설치하면 현재의 출구 덕트 형상(Case I)에서보다 더 높은 Normal 방향 속도성분을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

또한, Fig. 17과 18의 출구 덕트 유출측 열림비율이 완전

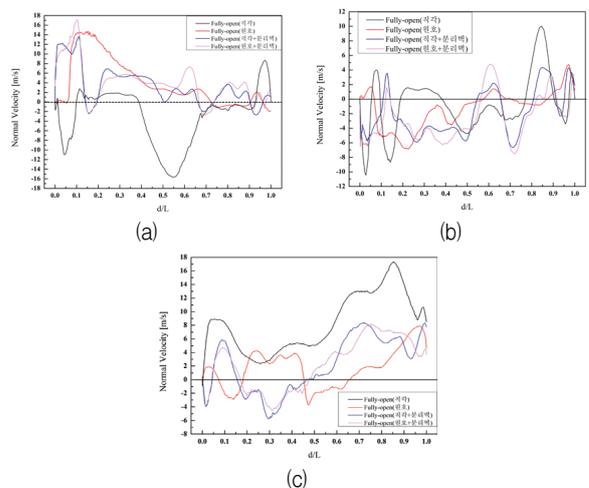


Fig. 16 Velocity distributions on the profile lines at the outlet of duct passage by opening ratio : (a) profile line 1, (b) profile line 2 and (c) profile line 3 (H=7,110mm, Case II)

히 열린 경우에 해당하는 속도벡터를 통해서도 출구 덕트 바닥벽면 형상, 출구 덕트 높이, 출구 덕트 벽면 분리벽 설치 등에 의해서 수직방향 속도가 크게 변화함을 알 수 있다.

이와 같은 결과로부터 출구 덕트의 벽면형상을 최적화함에 의해 소결 냉각기 대차 내부의 소결광 냉각효율을 상당히 개선할 수 있음을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결 론

제철소 소결냉각용 축류송풍기 출구 덕트 형상에 따른 내부유동특성 및 소결 냉각팬의 운전점 성능개선을 위한 방안을 얻기 위하여 CFD해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 소결 냉각팬 블레이드의 각 피치 각도에서 최고효율점 유량에서는 송풍기 내부 유로에서 박리가 발생하지 않음을 확인하였으나, 저유량영역으로 운전점이 이동할 경우 박리 및 실속에 의한 전압저하 및 서징발생 가능성이 높을 것으로 판단된다.

2) 소결 냉각팬 덕트 출구부 유로 열림비율에 따른 내부유동을 검토한 결과, 유로 열림비율에 따라서 덕트 수직방향 통과 속도성분에 큰 차이를 나타냄을 확인하였다. 따라서, 소결 냉각팬의 최적운전을 위해서는 적정량의 소결광을 대차 내부에 적재하여 과부하가 발생하지 않도록 하여 소결 냉각팬의 최적성능을 확보해야 한다.

3) 소결 냉각팬 하류 출구 덕트의 형상에 따른 소결 냉각기 대차 바닥면을 통한 유출 유속분포를 검토한 결과, 출구 덕트의 하부바닥을 매립하여 출구 덕트 전체 높이를 낮추게 되면 출구 덕트 수직방향 속도성분이 증가하게 되어 소결광 냉각효율이 증가할 수 있음을 확인하였다. 또한, 출구 덕트 벽면 분리벽과 하부 원호형상의 모서리부 형상 배치를 통하여 출구 덕트 유동장 전체에서 수직방향 속도성분이 증가함을 확인하였다.

#### 후 기

본 연구는 포스코 연구과제(과제코드 2012Z011) 수행 결과의 일부이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### References

- (1) Stepanoff, A. J., 1955, TURBOBLOWERS - Theory, Design and Application of Centrifugal and Axial Flow Compressors and Fans, John Wiley & Sons, Inc.
- (2) 이기상, 김광용, 최재호, 2008, “익형의 형상최적화를 통한 고효율 축류송풍기 설계,” 유체기계저널, 제11권, 제2호, pp. 46~54.
- (3) 조봉수, 조종현, 정양범, 조수용, 2007, “최적화기법을 이용한 축류형 송풍기개발에 관한 연구,” 유체기계저널, 제10권, 제6호, pp. 7~16.
- (4) 김재우, 김진혁, 김광용, 2010, “축류송풍기의 작동영역에 대한 삼차원 수치적 연구,” 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 490~491.
- (5) 최형준, 김창수, 조종현, 조수용, 2010, “축류형 흡입송풍기 설계기술에 관한 연구,” 유체기계저널, 제13권, 제1호, pp. 42~51.
- (6) 장춘만, 최승만, 김광용, 2006, “허브 캡 형상에 따른 축류송풍기 성능특성,” 유체기계저널, 제9권, 제6호, pp. 9~16.
- (7) 서성진, 최승만, 김광용, 2006, “형상 최적화를 통한 축류송풍기의 설계,” 대한기계학회논문집 B권, 제30권, 제7호, pp. 603~611.
- (8) 김재우, 김진혁, 김광용, 2010, “환기용 축류송풍기의 유동 해석 및 모터 위치에 따른 성능 특성 연구,” 유체기계저널, 제13권, 제4호, pp. 25~30.
- (9) ANSYS Inc., 2012, “ANSYS CFX documentation”, Ver. 12, <http://www.ansys.com>