

2016년 가스·스팀터빈 분야 연구동향

안 준*

1. 서 론

지난해(2016년) 한국유체기계학회 논문집과 한국유체기계학회 하계 및 동계 학술대회에 발표된 논문을 조사, 분석하여 국내 가스/스팀터빈 분야의 연구 동향을 분석하였다. 전년과 마찬가지로 조사된 논문을 유동장⁽¹⁻³⁾, 열전달 및 냉각⁽⁴⁻³³⁾, 시험평가 및 성능해석⁽³⁴⁻⁵⁵⁾, 기술 및 현황 소개⁽⁵⁵⁻⁶¹⁾ 등으로 분류하였다. 압축기, 연소, 베어링, 회전체 동역학 등은 별도로 연구동향을 분석하므로 이 분석에서는 제외하였다. 학술대회의 경우 포스터 세션에서 발표된 논문은 분석하지 않았고 특별 세션은 분석에 포함하였다.

2015년과 비교하여 2016년도 가스/스팀 터빈 분야로 구분된 논문 수를 Table 1에 정리하였다. 전년과 마찬가지로 열전달을 다룬 논문 수가 많았는데, 진행 중인 각종 터빈 개발 사업에서 고성능의 터빈 개발을 추구하며 나타난 경향으로 보인다. 산업체를 중심으로 성능 해석 및 평가 논문이 증가한 것도 주목할 만하다. 가스터빈 압축기를 분석에 포함시키지 않으면서 유동장 관련 논문은 다소 적게 분석되었고 특별 세션이 구성되면서 기술 및 현황 소개 논문이 증가하였다.

Table 1 분류 기준 별 논문 수

| 분류 기준 | 논문 수 (편) | |
|-------------|----------|-------|
| | 2015년 | 2016년 |
| 유동장 | 8 | 3 |
| 열전달 및 냉각 | 22 | 30 |
| 시험평가 및 성능해석 | 18 | 22 |
| 기술 및 현황 소개 | 3 | 6 |
| 합계 | 51 | 61 |

2. 유동장 관련 연구

터빈 내의 유동 현상과 공력 설계에 대한 논문을 유동장 관련 연구로 분류하였는데 터빈에 비해 압축기가 주목을 받았고 터빈의 경우 가스터빈에 비해 증기터빈이 많은 주목을 받았다.

이종현과 박희성⁽¹⁾은 수치해석을 수행하여 증기 터빈 노즐 단의 등엔트로피 효율을 예측한 결과를 발표하였다. 하태웅 등^(2,3)은 증기 터빈의 브러쉬실의 유동, 누설량, 동특성 등을 수치해석으로 연구한 결과를 발표하였다.

3. 열전달 및 냉각 관련 연구

가스터빈의 열전달은 막냉각, 복잡한 구조의 내부대류냉각, 틱, 끝벽면에서의 열전달 등 복잡한 형상에서 국소적인 열전달 분포를 측정하는 것이 중요하여 2016년에는 이를 위한 측정 기법에 대한 연구가 다수 발표되었다. 정희운과 조형희는 나프탈렌 승화법⁽⁴⁾, 광채수 등은 PSP(압력 감응 페인트)^(5,6), 정희운과 이동호⁽⁷⁾는 적외선 열화상 기법 관련 논문을 발표하였다.

가스터빈 열전달 관련 연구 중에서는 블레이드의 냉각 기법 중에 막냉각에 관한 연구가 가장 많이 발표되었다. 지난 20여년간 많은 연구가 진행되었던 막냉각의 성능을 높이기 위한 분사 형상 연구는 2016년에도 활발히 발표가 되었다. 확장홀⁽⁸⁾, 막냉각 홀의 최적 배치⁽⁹⁻¹¹⁾ 등이 주목을 받았다. 연구 방향은 높은 분사비에서 막냉각 제트가 표면을 보호하지 못하고 벽면에서 분리되어 주유동으로 침투하면서 막냉각 효율이 낮아지는 것을 막기 위한 것인데 광채수 등은 막냉각 홀 자체가 아닌 블레이드에 코안다 효과를 유도하는 연구 결과도 발표되었다.^(18,19)

막냉각 관련 기초 연구는 평판에서 주로 이루어져 왔는데 평판 실험 결과로 예측하기 어려운 선단이나 끝벽면 또는 틱과 슈라우드 사이의 열전달을 연구한 결과도 다수 발표되었다. 정희운 등⁽²⁶⁾은 실제 형상에 가까운 고압터빈 1단 노즐 압력면에서의 막냉각 특성을 보고하였고 정진영 등⁽²⁸⁾은 1단 베인과 엔드월에서 밀도비가 막냉각 특성에 미치는 영향을 발표하였다. 안준 등⁽²⁷⁾은 끝벽면에서 성장하는 경계층이 선단의 막냉각에 미치는 영향을 발표하였다.

막냉각을 중심으로 한 블레이드의 외부냉각에서 2016년 또 하나 주목을 받은 주제는 틱과 슈라우드 사이의 열전달이다. 이와 관련된 연구로 스킨러 틱⁽¹³⁾을 포함한 틱형상^(11,20)이

* 국민대학교 기계시스템공학부(School of Mechanical Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea)
E-mail : jahn@kookmin.ac.kr

블레이드 팁과 슈라우드의 열전달에 미치는 영향이 발표되었다. 김류근, 정진택⁽²²⁾은 막냉각 홀의 경사각이 팁 끝단 냉각 성능에 미치는 영향을 발표하였다. 이 외에 블레이드 외부 냉각에서 나타난 주제는 내부유동이 외부유동에 미치는 영향⁽²³⁾, 입구 유동 형태가 막냉각에 미치는 영향^(8,29), 막냉각에 의한 2차유동 발생 형태⁽²¹⁾를 연구한 결과가 발표되었다.

가스터빈 블레이드의 열전달에서 막냉각을 중심으로 한 외부 냉각에 비해 발표 논문 수는 작았지만 내부 대류냉각 분야에서도 주목할만한 연구가 많이 발표되었다. 기존의 연구가 요철 형상 등을 개선하여 블레이드 내부의 열전달을 촉진시키는 것에 집중하였다면 2016년 발표된 논문들은 복잡한 내부 유로에서 열전달 특성을 파악하고자 한 논문이 주류를 이루었다. 열전달 촉진 기법과 관련된 연구로서 장한나 등⁽³¹⁾이 불규칙한 입구 유동을 이용하여 요철이 설치된 채널에서 열전달을 촉진시킨 연구가 발표하였다. 정희섭 등⁽¹²⁾은 Serpentine 냉각유로 상사시험 결과를, 서도영 등⁽²⁴⁾은 내부 냉각유로 형상에서의 열전달 실험을 정희운 등⁽²⁵⁾은 기존 연구 자료를 기반으로 실제 형상에서 열전달 특성 향상을 위한 방안을 제시하였다.

가스터빈 블레이드의 내부 냉각과 외부 냉각 사이에 위치한 블레이드 자체의 열전도를 포함한 복합 열전달 관련 연구들도 선을 보였다. 김진욱⁽¹⁵⁾ 등은 가스터빈 블레이드의 복합 열전달 해석 결과를 이창용⁽¹⁶⁾은 블레이드 벽면 두께 최적화 관련된 결과를 발표하였다.

4. 시험평가 및 성능해석 관련 연구

시험평가 분야에서는 항공우주연구원에서 터보팬 엔진 고압터빈 공력-냉각 시험평가 시스템을 구축하고⁽⁴⁸⁾ 이를 이용하여 1400℃급의 고압터빈의 냉각성능을 시험, 평가한 결과를 발표하였다.⁽⁴⁹⁾ 서준혁 등⁽⁴²⁾은 하이브리드 타입 초소형 가스터빈엔진 시운전 결과를 발표하였다. 증기터빈과 관련하여 변재승 등^(61,52)은 브러쉬 실의 성능 실험 결과를 보고하였다.

성능해석 분야는 크게 기존의 시스템 시뮬레이션에서 고려하지 못했던 부분을 추가적으로 고려하여 시뮬레이션을 고도화하는 연구와 기존의 사이클을 개선하였거나 새롭게 제안된 사이클을 해석하여 성능 및 경제성 등을 평가한 연구로 구분할 수 있다. 전자에 해당하는 논문들로 사이클 해석에서 가스터빈의 성능을 실제에 가깝게 보정하는 기법^(34, 40), 탈설계 해석 모듈⁽³⁷⁾ 등이 제안되었다. 기존의 사이클을 개선한 시스템으로는 냉각공기의 중간냉각⁽³⁵⁾, 예냉각⁽³⁶⁾, 결빙방지 기법⁽³⁸⁾ 등이 검토되었다. 새로운 사이클로는 탄소포집이 고려된 복합화력발전 시스템이 검토되었다.⁽³⁹⁾

개발 및 설계 관련해서는 고온을 받는 연소기 및 터빈의 구조 안정성이 주목을 받았다. 가스터빈 블레이드의 구조 건

전성 평가⁽⁴⁵⁾, 노즐 베인의 구조해석 및 수명평가⁽⁴⁶⁾, 연소기의 구조 안정성⁽⁴⁷⁾, 터빈 입구 온도 섭동에 따른 고압 터빈 노즐의 신뢰도⁽⁵⁰⁾ 등이 발표되었다.

5. 기술 및 현황소개 관련 논문

기술 현황으로는 최재호 등⁽⁵⁶⁾이 가스터빈용 팬과 압축기의 개발동향을 소개하였고 고온용 소재 관련 기술 동향이 주로 소개되었다. 고온 소재와 관련하여 김인수 등⁽⁵⁷⁾이 초내열 합금을 변응선, 이성훈⁽⁵⁸⁾이 보호코팅 기술을 김준섭 등⁽⁵⁹⁾이 국산 블레이드 소재를 소개하였다. 소재 이외에는 특별 세션을 통해 변삼섭 등^(60,61)이 증기터빈을 위한 Brush Seal 기술을 소개하였다.

6. 결 론

2016년 한국유체기계학회 논문집과 한국유체기계학회 하계 및 학술대회에서 발표된 논문을 바탕으로 2016년 가스/스팀 터빈 분야의 연구 동향을 살펴보았다. 2016년에는 전년도에 비교하여 전체적으로 가스/스팀 터빈 분야의 논문 발표가 증가하였고 열전달 및 시스템 성능 해석 관련 논문이 주를 이루었다.

열전달 분야에서는 자세한 국소 열전달/막냉각 효율 특성을 실제 형상이나 실 터빈에 가까운 조건에서 측정할 수 있는 기법, 열전달 성능을 향상시킬 수 있는 형상 제안, 외부 냉각과 내부 냉각의 상호작용이나 블레이드의 열전도를 고려한 복합열전달 등이 주목을 받았다.

시험평가, 성능해석 분야에서는 실 터빈 조건을 모사하는 평가시스템의 구축 및 평가사례가 소개되었고 사이클을 개선했을 때의 효과를 검토한 논문이 다수 발표되었다. 설계 측면에서 터빈과 연소기의 고온 신뢰성, 구조 건전성 등이 소개되기도 하였다. 증기터빈의 경우 밀봉 기술을 중심으로 특별 세션에서 다루어 졌고 고온 소재가 기술 동향으로 소개가 되었는데 2017년에는 보다 다양하고 심도 있게 다루어지기를 기대해본다.

References

- (1) 이종현, 박희성, 2016, “증기 터빈 노즐 단의 등엔트로피 효율에 관한 수치해석적 연구,” 2016 한국유체기계학회 동계 학술대회 초록집, pp. 275~276
- (2) 김결, 박대성, 하태웅, 2016, “스팀터빈용 브러쉬실의 CFD 해석,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 185.
- (3) 박대성, 하태웅, 2016, “CFD를 활용한 증기터빈의 브러쉬실 누설량 및 동특성 해석,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 107.

- (4) 정희윤, 조형희, 2016, “나프탈렌 승화법을 이용한 대류열전달계수 측정법,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 37~38.
- (5) 김예지, 곽재수, 2016, “PSP기법을 이용한 막냉각 효율 측정,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 39~40.
- (6) 김예지, 강영준, 정진영, 서현재, 곽재수, 2016, “카메라와 시험부의 상대각도가 PSP기법으로 측정된 막냉각 효율에 미치는 영향,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 267~268.
- (7) 정희윤, 이동호, 2015, “천이 적외선 열화상 기법을 활용한 열전달계수 및 막냉각효율 측정,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 43~44.
- (8) 김예지, 박순상, 이동호, 곽재수, 2016, “PSP를 이용한 150반와류 홀과 30-7-7 펜형상 홀의 막냉각 효율 비교 연구,” 한국유체기계학회 논문집 제19권 5호, pp. 61~67.
- (9) 이상아, 김윤기, 이관중, 이동호, 2016, “터빈입구온도 프로파일의 수치적 재현을 위한 형상함수 제안,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 47~48.
- (10) 이상아, 이동호, 이관중, 2016, “다양한 조건을 고려한 고압터빈 노즐 막냉각 배열 강건 최적설계,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 65~66.
- (11) 이준식, 이봉구, 임형수, 방계성, 서정민, 손정락, 이정호, 2016, “가스터빈용 마이크로 스케일 분출냉각 유동가시화,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 279~280.
- (12) 차오리우, 김진욱, 강영석, 조진수, 2016, “터빈 냉각 블레이드의 틱 간극이 공력/열전달 특성에 미치는 영향성,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 49~50.
- (13) 정희섭, 손창민, 서도영, 이동호, 강영석, 차봉준, 2016, “터빈 블레이드 Serpentine 냉각유로 상사시험,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 51~52.
- (14) 서원직, 정희윤, 김정주, 이동호, 조형희, 2016, “가스터빈 블레이드에서 Shelf Squealer Tip 적용에 따른 열전달 특성 연구,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 53~54.
- (15) 차오리우, 김진욱, 강영석, 조진수, 2016, “가스터빈 노즐 앞전의 내부 증기 스웰 냉각 유동 특성에 대한 수치적 연구,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 247~248.
- (16) 김진욱, 강영석, 조진수, 2016, “고압터빈의 열유동 성능 향상을 위한 복합열전달 해석,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 63~64.
- (17) 이창용, 2016, “냉각터빈 블레이드 벽면 두께 최적화,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 261~262.
- (18) 이기돈, 박명환, 2016, “가스터빈 블레이드 외부열전달계수의 수치해석적 연구,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 283~284.
- (19) 김기문, 김예지, 곽재수, 2016, “Coanda 효과를 이용한 평판 슬롯의 막냉각 성능 향상,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 263~264.
- (20) 최정욱, 김기문, 곽재수, 2016, “코안다 효과 유도 구조물의 형상 변화가 슬롯의 막냉각 효율에 미치는 영향,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 291~292.
- (21) 박정신, 정진영, 강영준, 곽재수, 2016, “가스터빈 블레이드 틱 형상에 따른 틱 열전달 및 막냉각 효율 연구,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 269~270.
- (22) 정운성, 정국진, 박준수, 2016, “정방향분사와 역방향분사에 따른 가스터빈 막냉각 이차유동 특성연구,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 265~266.
- (23) 김류근, 정진택, 2016, “압력면 냉각홀의 경사각이 블레이드 틱 끝단 냉각 성능에 미치는 영향에 관한 수치해석적 연구,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 259~260.
- (24) 이연호, 김윤제, 2016, “냉각튜브 내벽 그루브 형상 변화가 가스터빈 블레이드 막냉각 성능에 미치는 영향,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 285~286.
- (25) 서도영, 손창민, 정희섭, 김귀순, 이동호, 차봉준, 2016, “고압터빈 노즐 내부 냉각 계통의 열전달 측정,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 71~72.
- (26) 정희윤, 손호성, 최석민, 이동호, 조형희, 2016, “가스터빈 블레이드 냉각성능 향상을 위한 내부유로 개선방안,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 73~74.
- (27) 정희윤, 김정주, 김선호, 이동호, 조형희, 2016, “가스터빈 엔진의 고압터빈 1단 노즐 압력면의 열전달 측정 및 막냉각성능 평가,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 75~76.
- (28) 안준, 엄태호, 이준식, 2016, “가스터빈 블레이드 선단 막냉각에 끝벽면이 미치는 영향,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 305~306.
- (29) 정진영, 박정신, 곽재수, 이기돈, 2016, “밀도비 변화에 따른 가스터빈 1단 베인과 엔드월의 막냉각 효율,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 309~310.
- (30) 김동화, 김진욱, 이현규, 이정수, 2016, “가스터빈 Pre-swirler 시스템 설계 및 해석,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 263~264.
- (31) 장한나, 강영준, 박정신, 곽재수, 2016, “불균일 입구유동 분포를 이용한 2:1 요철 유로의 열전달 증진,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 287~288.
- (32) P. Halder, 심현석, 서정화, 이신형, 김광용, A. Samad, 2016, “Performance Prediction of a Turbomachinery Blade through Numerical Modeling,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 227~228.
- (33) 이상래, 조찬용, 차경환, 2016, “박판으로 구성된 레큐퍼레이터(PSHE)의 격자민감도 및 압력손실 해석,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 227~228.
- (34) 강도원, 손정락, 김동섭, “가스터빈 모델기반 성능보정 기법에 관한 연구,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 261~262.
- (35) 문성원, 권현민, 김동섭, 손정락, 강도원, “냉각공기 중간냉각이 가스터빈 복합화력발전 성능에 미치는 영향,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 273~274.
- (36) 권현민, 김동섭, 강도원, 손정락, 2016, “냉각공기 예냉각을 통한 가스터빈 설계변수 변화와 복합발전 시스템 성능향상 분석,” 한국유체기계학회 논문집 제19권 5호, pp. 61~67.
- (37) 김상조, 박준철, 2016, “가스터빈 통합해석을 위한 터빈 탈설

- 계 모듈 개발,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 271~272.
- (38) 문성원, 김정호, 김동섭, 2016, “가스터빈 결빙방지 방법에 따른 복합화력발전 시스템 성능해석,” 한국유체기계학회 논문집 제19권 6호, pp. 19~25.
- (39) 윤석영, 안지호, 최병선, 김동섭, 2016, “탄소포집이 고려된 가스터빈 복합화력 발전플랜트의 성능 비교분석,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 273~274.
- (40) 최병선, 김정호, 김민재, 김동섭, 2016, “보정곡선을 이용한 마이크로 가스터빈 열병합발전 시스템의 성능예측과 활용,” 한국유체기계학회 논문집 제19권 2호, pp. 27~35.
- (41) 문성원, 김정호, 김동섭, 2016, “가스터빈 결빙방지 방법에 따른 복합화력발전 시스템 성능해석,” 한국유체기계학회 논문집 제19권 6호, pp. 19~25.
- (42) 서준혁, 최주찬, 권길성, 백제현, 2016, “하이브리드 타입 초소형 가스터빈엔진 개발 및 초도 시운전,” 한국유체기계학회 논문집 제19권 1호, pp. 24~30.
- (43) 이의중, 변창길, 안정환, 2016, “501D/F 가스터빈 블레이드/베인 제조기술 개발,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 60.
- (44) 배진호, 김경국, 정성철, 김기백, 2016, “대형 가스터빈 최종단 블레이드 설계 개선에 관한 연구,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 390~391.
- (45) 이무형, 김기백, 최재형, 김경국, 2016, “발전용 가스터빈 냉각 블레이드 구조 건전성 평가,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 297~298.
- (46) 정성용, 김경국, 정성철, 함동우, 양영찬, 2016, “대형 가스터빈 노즐베인 구조해석 및 수명평가,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 303~304.
- (47) 이종화, 박성완, 이동훈, 이상언, 2016, “발전용 대형 가스터빈 연소기의 구조 안정성 평가,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 400~401.
- (48) 이동호, 강영석, 허재성, 김형모, 박부민, 차봉준, 2016, “중소형 항공기용 터보팬 엔진 고압터빈 공력-냉각설계기술 개발 및 시험평가기술 구축 과제 소개,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 61~62.
- (49) 이동호, 김형모, 박부민, 김재호, 차봉준, 2016, “천음속 캐스케이드 및 고온 캐스케이드 시험리그를 이용한 1400°C급 고압터빈 냉각성능 시험평가 연구,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 77~78.
- (50) 허재성, 강영석, 이동호, 차봉준, 2016, “터빈입구온도 섭동에 대한 고압터빈노즐 신뢰도 해석,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 67~68.
- (51) 변재승, 변삼섭, Timochenko, 이용복, 2016, “스팀조건을 갖는 발전용 실의 성능 실험,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 184.
- (52) 변재승, Timochenko, 이용복, 2016, “발전용 터빈 브러쉬 실의 성능 연구,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 105.
- (53) 이정진, 강수영, 김동섭, 2016, “허브실 개선으로 인한 증기터빈 시스템의 성능 변화 분석,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 186.
- (54) 이정진, 강수영, 김동섭, 2016, “허브실 개선으로 인한 증기터빈 시스템의 성능 변화 및 경제성 분석,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 108.
- (55) 조건환, 2016, “터빈 림실 성능에 관한 실험적 연구,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 109.
- (56) 최재호, 김진욱, 이원석, 이진수, 최태우, 김용련, 2016, “가스터빈용 팬과 압축기의 개발 동향,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 185~186.
- (57) 김인수, 최백규, 정중은, 도정현, 조창용, 2016, “초내열합금의 특성 및 개발 현황,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 57.
- (58) 변응선, 이성훈, 2016, “가스터빈용 보호코팅 기술 현황,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 58.
- (59) 김준섭, 정예림, 정희원, 2016, “OEM 블레이드 역설계 및 국산 소재 적용 동향 분석,” 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 61.
- (60) 변삼섭, 하병기, 손재화, 2016, “발전용 Brush Seal 최신기술 및 특성비교”, 2016 한국유체기계학회 하계학술대회 초록집, pp. 183.
- (61) 변삼섭, 하병기, 손재화, 2016, “발전용 Brush Seal 제품특성 비교 분석,” 2016 한국유체기계학회 동계학술대회 초록집, pp. 106.