

가스터빈 마켓 및 연구 동향

2018.10.26., 신동혁

I

서론

가스터빈은 열역학 법칙을 통해서 알려진 특성, “엔진이 고온 혹은 고압에서 작동하게 되면 효율이 높아진다” 라는 특징을 이용하고 있다. 이에 가스터빈에서는, 연료를 태우기 전에, 압축기를 이용하여 공기의 온도와 압력을 올린 후 연소를 시키고, 터빈을 이용하여 추력이나 전기를 발생시키는 구조를 가지고 있다. 따라서 이에 동반하는 높은 효율과 높은 출력 때문에 전기발전이나 비행기엔진에 많이 사용되고 있다.

현재 가스터빈의 세계 시장은 300억 달러 (약 한화 34조원)에 달하고 있고, 앞으로 계속 커져나갈 것으로 보인다. 가장 큰 요인으로는 가스터빈을 사용하는 전기 발전과 비행기 엔진의 전망이 매우 좋기 때문이다.

전기발전에서 가스터빈은 주로 천연가스 발전소에서 사용되며, 이는 석탄이나 석유를 이용한 발전보다 2배 적은 온실가스를 방출한다. 지구온난화 방지정책에 따라서, 기존 석탄/석유 발전소들이 가스터빈을 이용하는 천연가스 발전소로 많이 변경되어가는 추세이며, 많은 전문가들은 앞으로 20년 동안 천연가스를 이용한 전기발전이 지속적으로 늘어날 것으로 보고 있다.

현대의 민간비행기 엔진은 대부분 가스터빈을 핵심기술로 사용하는 터보프롭이나 터보 제트 엔진을 사용하고 있다. 항공여행은 점점 더 값싸지고, 대중화되어 가고 있다. 국제 항공 운송 협회는 비행승객이 20년 후에는 현재보다 2배로 많아질 것이라고 보고 있으며, 이에 따른 비행기 엔진 수요도 동시에 증가할 것으로 보인다.

최근 유럽에서 지원된 가스터빈 관련 대형 연구 과제를 보면, 대부분 연소불안정성에 관한 연구라는 것을 알 수 있다. 연소불안정성은 압력과 화학반응의 상호작용으로 인해 연소기내의 압력과 온도가 비정상적으로 올라가는 현상을 말한다. 많은 연구자들이 이에 관해 연구를 하고 있지만, 아직 설계 전에 연소불안정성을 예측하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 현재 지원된 과제들은 기계 학습(Machine learning)이나 슈퍼컴퓨터 계산 (supercomputing)을 통해 연소불안정성을 설계 단계에서 예측하려는 시도를 하고 있다.

우리나라도 현재 두산 중공업과 한화중공업이 각각 발전용 가스터빈과 비행기용 가스터빈을 개발 중에 있다. 앞으로 가스터빈의 수요가 계속 증가할 것으로 예측되고 있고, 그 중에 연소불안정성이 가장 큰 기술적 문제로 인식되고 있다. 두 기업들이 향후에 높은 효율에 오염물질을 적게 배출하면서 안정적인 가스터빈을 개발하게 된다면, 한국 경제에 큰 도움을 줄 수 있을 것이라 예상된다.

1. 가스터빈을 핵심기술로 사용하는 시장들의 전망

가스터빈이 가장 많이 사용되고 있는 시장들은, 전기발전용으로 화력발전소와 비행기 추력을 위한 터보엔진으로 볼 수 있다. 따라서, 이들의 시장 전망이 가스터빈의 마켓에도 큰 영향을 주게 된다. 화력발전소 중에서는 천연가스를 주연료원으로 사용하는 발전소에서 주로 가스터빈이 사용이 되고, 민간항공기에 사용되는 터보프롭, 터보팬 모두 가스터빈이 사용되는 되는 엔진들이다.

가. 천연가스 가용량과 이를 이용한 전기 발전 전망

천연가스는 광범위한 수요, 저렴한 비용의 공급 증가, 전세계 천연 가스의 가용성을 높이는 액화천연가스(LNG) 공급의 지속적인 확장에 힘입어 강하게 성장하고 있다. 천연가스의 성장은 산업화와 전력수요의 증가 (신흥 아시아 및 아프리카 지역); 지속적인 석탄 대 가스 전환 (특히 중국); 저렴한 공급(북미 및 중동 지역)으로 인해 증가하고 있다. 특히 미국과 중동(카타르 및 이란)은 현재 추가생산의 절반 이상을 기여하고 있다. 2040년까지 미국은 셰일가스의 발견으로 인하여 세계 가스 생산량의 선두로 거의 25%를 차지할 것으로 예측되고 있다.

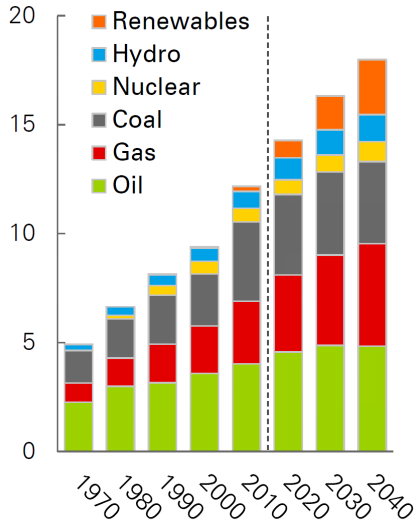
글로벌 액화 천연가스(LNG) 공급은 향후 5 년간 약 40 %의 확장으로 기존 전망보다 두 배 이상 증가할 것으로 보인다. 이러한 액화천연가스의 지속적인 공급성장으로 인해, 2020년 경에는 LNG 운송량이 지역 간 파이프 라인 운송량 보다 훨씬 많아지게 될 것이다.

전력부문에서 사용되는 가스의 증가는 전세계 전력 수요의 전반적인 증가에 의해 주도된다. 그림(a) 에서 보듯이, 재생 가능 에너지와 석탄 수요의 경쟁 추세는 전력부문의 가스 점유율이 전망보다 상대적으로 낮을 것으로 보인다.

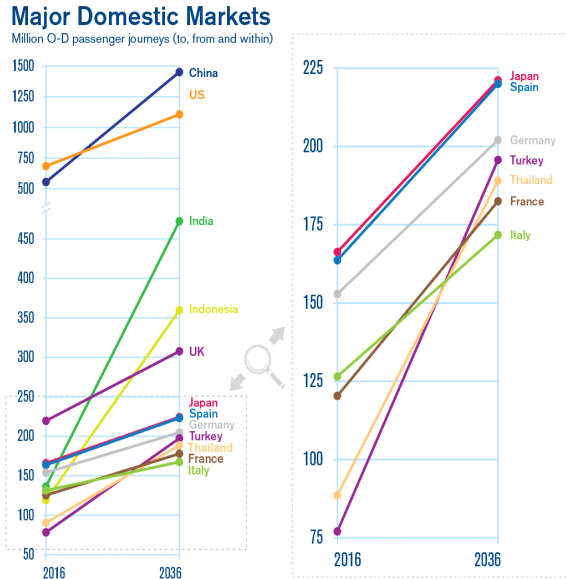
나. 항공운항 전망

국제 항공 운송 협회 (International Air Transport Association, IATA)는 앞으로 향후 2036년에 78억 명의 승객이 비행기를 타고 여행할 것으로 예상하고 있다. 이는 2018년에 비행할 것으로 예상되는 40억 명의 항공여행객의 거의 두 배에 해당한다.

가장 큰 수요는 아시아 태평양 지역이다. 이 지역은 앞으로 20년 동안 새로운 승객의 절반 이상을 차지하게 될 것이다. 그림(b)에서 보듯이, 중국이 항공시장 규모로 미국을 앞지를 시기는 2022년으로 내다보고 있다. 이는 작년의 예상치보다 2년 정도 빨라진 것이며, 빨라진 중국의 성장 속도와 약간 줄어든 미국의 성장률이 고려되었기 때문이다.



(a) 연료별 세계 전기발전 전망 (출처: 2018 BP Energy Outlook)



(b) 향후 20년 지역별 항공 승객수 전망 (출처: IATA 20 Year Passenger Forecast).

2. 전기 발전용 세계 가스터빈 시장

발전용 가스터빈 글로벌 시장은 낮은 셰일 가스 가격과 함께 이산화탄소 발생량을 줄이기 위한 국제 기관의 압력으로 인해 크게 성장할 것으로 예상되며, 2025년까지 300억 달러 (약 한화 34조)에 달할 전망이다. 2016년 가스터빈의 글로벌 생산 전력은 62.87GW로 추정되며 2025년 말까지 91.81 GW에 이를 것으로 예상된다.

지역별로 살펴보면, 라틴 아메리카에서는 가스터빈에 대한 주문이 빠르게 증가하고 있으며, 이는 스팀터빈 주문에 훨씬 앞서는 바이다. 중국의 가스터빈 시장 규모는 2016년에 8.07 GW로 추정되며, 연평균복합성장률은 5.2%을 보이고 있다. 중국을 제외한 아시아 태평양 지역은 이미 확충된 열기반 발전소와 일본의 경기 침체로 인해 성장세가 둔화될 것으로 보인다. 유럽은 기존의 많은 열기반 발전소들이 2025년 안으로 문을 닫을 예정이므로, 이를 대신할 가스터빈의 사용은 증가할 것으로 예측된다.

지멘스는 최근 몇 년 사이에 공격적인 합병 및 인수를 진행하여, 현재 가스터빈 시장의 선두가 되었다. 가령 2014년, 지멘스가 롤스로이스의 발전용 가스터빈 파트를 인수 합병한 것은 시장에 큰 영향을 주었다.

3. 롤스로이스 경영난

가. 제트엔진 결함으로 인해 상반기에 1.9조원의 적자 기록

롤스로이스는 반 년만에 적자를 냈으며, 추가로 두 종류의 제트 엔진의 기술적 결함 문제가 향후 3년 동안 10억 파운드의 (한화 약 1.5조원) 비용이 소요될 것이라고 인정했다. 보잉 787에 동력을 공급하는 Trent 1000 엔진과 자매엔진 Trent 900의 문제점으로 인해 회사는 현재 값비싼 검사와 수리를 진행하고 있으며, 일부 부품을

재설계해야 하는 상황에 놓여있다. 이 결함으로 인해 여러 항공기의 이착륙이 취소되었으며, 항공사가 다른 항공기를 임대했어야만 했다.

이 결함으로 롤스로이스는 5.5억 파운드 (한화 약 8천억원) 비용을 지불하게 되었으며, 올해 상반기에 13억 파운드 (한화 약 1.9 조원) 적자를 기록하였다. 이는 작년 같은 기간에 14억 파운드 (한화 약 2조원)의 이익을 낸 것과 사뭇 대조되는 모습이다.

이 문제를 해결하기 위해 롤스로이스는 올해와 다음해에 각각 약 4.5억 파운드 (한화 약 6.6천억원)의 비용이 들 것이라고 내다보고 있고, 2020년에는 3.5억 파운드(한화 약 5.1천억원)가 들 것으로 예상하고 있다.

나. 4,600 명의 인원 삭감 예정

롤스로이스 (Rolls-Royce)는 2018년 6월 사업의 주요 발전의 일환으로 경영 및 행정에 해당하는 4,600 개의 일자리를 삭감하겠다고 발표했다. 롤스로이스 CEO 워렌 이스트 (Warren East)는 영국에서는 3,000여명의 실업자가 발생할 것이라고 말했다. 이 회사는 올해 연말까지 약 1,500명의 인원을 삭감할 예정이며, 이는 2001년 이래로 회사에서 가장 큰 인원 삭감이라고 덧붙였다.

영국의 그룹 최대 생산기지인 더비(Derby)는 가장 큰 타격을 입을 것으로 예상되고 있다. 이 곳에서는 현재 15,700명의 인력이 롤스로이스를 위해 일하고 있고, 회사의 인사, 재무 및 법률 부서도 이 곳에 위치하고 있다. 또한, 영국에서 두 번째로 큰 브리스톨 (Bristol) 지부의 일부 행정 및 보조직도 함께 삭감될 예정이라고 한다.

대부분의 삭감 예정직은 중간 관리직에 속하지만, 초기단계 설계에 종사하는 엔지니어도 현재 필요하지 않으므로 해고될 것이라고 그룹은 전했다. 한편, 롤스로이스는 여전히 전기 및 디지털화 분야의 엔지니어를 고용하고 있다.

4. 제너럴 일렉트로나스: 복합사이클 발전효율, 세계기록 갱신에 다시 한 번 기여

2018년 3월, 일본의 니시-나고야 발전소는 63.08 % 총 효율성을 달성하여 가장 효율적인 복합 사이클 발전소로 기네스북에 등재되었다. 이 발전소는 제너럴일렉트로나스의 GE-7HA 가스터빈과 도시바 증기터빈 및 발전기 기술로 운영되는 발전소이다. 이 기록은 2016년 4월 프랑스의 부상 (Bouchain) 발전소에서 수립한 62.22%의 효율을 뛰어 넘는 새로운 세계 신기록이다. 이 프랑스의 발전소도 제너럴 일렉트로나스의 GE-7HA 가스터빈을 사용하였다.

세계 전력시장은 50Hz나 60Hz의 주파수로 나누어져 있으며, 프랑스는 50Hz주파수를 일본은 60Hz 의 주파수를 사용한다. 이 두 번의 기록은 제너럴일렉트로나스가 두 주파수대 모두 기네스북 기록을 가지고 있는 것을 알려주고 있다.

1. 지멘스: 최첨단 3D 인쇄 시설에 2700만 파운드 투자

지멘스는 3D인쇄 시설 설립을 위해 2700만 파운드 (한화 약 390억원)를 투자할 예정이라고 밝혔다. 이 시설은 영국의 우스터(Worcester)에 설립될 예정이며 9월에 개장할 예정이다. 이 공장에서는 3D 인쇄 기계를 15 대에서 50 대까지 늘릴 계획이다.

이 공장은 고온 초강력 합금에 초점을 맞춘 고성능 금속 부품 제조를 위한 레이저 용융 기술의 선구자인 머티리얼 솔루션(Materials Solutions)의 소유이며, 지멘스는 현재 이 회사의 지분 85%를 소유하고 있다. 지멘스는 이 투자가 고부가가치 제조 서비스의 글로벌 시장을 구축하고 성장시키기위한 계획의 일부라고 말했다.

지멘스 영국 지부 CEO인 주어진 마이어(Juergen Maier)는 “이 중요한 투자는 고부가가치 제조업 분야에서 혁신과 성장을 위한 거대한 잠재력이 있다는 신념을 뒷받침하며, 이 4차 산업혁명을 개척하려는 우리의 야망을 달성하기위한 다음 단계이다” 라고 언급하였다.

2. 러프브로 대학: 영국 내 가스터빈 연구 역량을 증진

가. 영국 연소 공기역학 테크센터 (NCCAT) 설립

러프브로 대학에서는 새로운 국가 연소 및 공기열전달 기술 센터 (National Centre for Combustion and Aerothermal Technology, NCCAT) 건설이 막바지로 다다르고 있다. 영국 항공 우주 기술 연구소 (Aerospace Technology Institute)의 자금 지원을 받고 롤스로이스가 지원하는 100만 파운드 (한화 약 150억원) 규모의 연구소는 2019 년 초에 문을 열 예정이다.

NCCAT는 미래의 저공해 항공용 가스터빈 연소 기술의 연구 및 개발을 위한 영국의 주요 허브 역할을 수행할 것이다. 앞으로 민간 항공 시장의 가파른 성장이 예측되는 가운데, 영국의 항공 기술 역량을 강화하고, 영국 산업 파트너들을 위한 최첨단 시설 및 주요 연구 전문 기술을 제공할뿐만 아니라, 현재 및 미래의 항공 우주 엔지니어를 위한 교육장으로서도 역할을 수행할 것이다. 항공 우주 분야를 넘어서 NCCAT는 발전, 해양 추진 및 열 관리 분야와 같은 분야뿐만 아니라 자동차 및 에너지 부문 등 광범위한 개발 잠재력을 제공 할 것으로 보인다.

연구, 설계 및 개발의 경계가 점차 희미해지는 현시대의 방향에 따라, NCCAT는 초기 연구 활동과 향후 상용 목표의 연계를 통해 다양한 기술 준비 수준(TRL)의 활동을 지원할 것이다. 이는 신기술을 신속하고 효율적으로 활용할 수있는 다분야 통합 설계 방법론을 촉진할 것으로 보인다.

이 연구소는 850m² 면적에 8개의 실험실과 여러 연소 실험 (단일상태유동, 복합 상태 유동)을 가능케 하는 특별 플랜트 및 계측장비를 갖추고 있으며, 100m²의 면적의 최첨단 기계공작소를 갖출 것이다.

나. 가스터빈 공기역학 박사과정 센터 설립

러프브러 대학, 캠브리지 대학, 옥스포드 및 글로벌 업계 파트너와 함께 터보 기계 교육 및 연구를 위한 독창적인 컨소시엄을 구성하는 파트너십을 맺었다. 이를 위해 영국 공학 연구재단(EPSC)은 5백만 파운드 (한화 약 75억원)을 지원하였다.

가스터빈 공기역학의 박사과정 센터(Centre for Doctoral Training or CDT)는 캠브리지 대학에서 1년 수업과정을 거쳐 석사학위를 마치고, 2-4 학년에 PhD 단계의 연구를 진행하는 과정이며, 학생들은 산업 중심의 박사 과정 프로젝트를 수행하게 된다. 러프브러 대학에서 3년 동안 산업에 중점을 둔 박사 과정 프로젝트는 톨스로이스 기술 센터에 기반을 두며, 박사 과정 프로젝트는 톨스로이스가 개발 중인 현재 및 미래의 기술이 될 것이다.

3. H2020: 가스터빈 관련 대형 연구 과제들

올해 H2020에서는 2개의 대형 가스터빈 과제가 선정되었고, 1개의 과제가 진행되고 있다. 이 세 과제 모두 연소불안정성에 관한 연구이고, 이 과제들에 유럽의 주요 가스터빈 회사들(지멘스, 사프란, 안살도, 제너럴일렉트릭)이 모두 참여하고 있다. 이는 현재 가장 기술적으로 문제가 되는 문제가 연소불안정성임을 암시하고 있다.

가. 연소 불안정성 예측을 위한 음향-유체 상호작용모델 개발 과제 (Acoustic-Flow Interaction Models for Advancing Thermoacoustic Instability prediction in Very low Emission combustors)

영국 임페리얼 대학의 에이미 모건스(Aimee Morgans) 교수는 최근 유럽 연구재단으로부터 200만 유로 (한화 약 26억원)의 연구비를 지원받았다. 모건스 교수는 앞으로 5년동안 “저공해 연소기에서의 연소 불안정성 예측을 위한 음향-유체 상호 작용 모델”에 관한 연구를 진행할 것이라고 말하였다. 연소 불안정성은 저공해 연소기를 개발하기 위한 가장 큰 걸림돌로 인식되고 있으며, 해당연구는 연소기내에서 음향과 복잡한 유체의 상호 작용을 이론적, 계산적으로 접근해 해당분야에 큰 이바지를 할 것으로 예상된다.

나. 환형 연소기의 연소불안정성 연구 과제 (Annular Instabilities and Transient Phenomena in Gas Turbine Combustors, ANNULIGH T)

유럽 연구재단은 400만 유로 (한화 약 52억원)를 환형 연소기의 연소불안정성 연구에 지원하기로 하였다. ANNULIGH T라고 명명된 이 과제는 연구적으로는 첨단이론, 전산 및 실험 방법을 결합하며, 교육적으로는 혁신적이고 구조화된 다양한 교육 프로그램을 제공하여 차세대 엔지니어를 배양하고 산업계 지도자들을 육성해냄으로 교육/연구 패러다임을 깨뜨릴 계획을 가지고 있다.

ANNULIGHT는 비정상적인 연소 분야에서 최근에 발생한 세 가지 혁명을 활용하는 새롭고 혁신적인 연구 및 교육 방법론을 제시한다. 첫째로, 실제 시스템에서 관찰된 현상을 재현할 수 있는 완전 환형 연소기에 적용된 난류계산 모델 (Large Eddy Simulation)을 기반으로 한 새로운 계산 방법, 둘째 실험실에서 이러한 현상을 상세하게 연구 할 수있는 새로운 환형 연소 설비, 그리고 마지막으로 새로운 고속 시간 결정 정보를 제공하는 이미징 진단을 사용한다.

이 연구과제는 5개의 유럽대학, 2개의 연구소와 3개의 민간업체가 참여를 하고 있다. 참여 기관들은 노르웨이 과학기술대학교 (NUTU), 문헨공대, 베를린공대, 캠브리지대학, 유럽 전산 연구/교육 센터 (CERFACS), 파리 국립과학연구센터 (CNRS), 취리히 연방공대, 사프란 항공엔진, 사프란 헬리콥터 엔진, 안살도다.

다. 기계 학습을 통한 가스터빈 연료주입 시스템과 성능향상 과제 (Machine Learning for Advanced Gas Turbine Injection Systems to Enhance Combustor Performance, MAGISTER)

현재 진행되고 있는 또 다른 가스터빈 관련 대형 연구 과제는 2021년까지 진행될 MAGISTER연구 과제이다. 380만 유로 (한화 약 49억원)가 지원된 이 과제는 항공기 엔진 연소기의 연소불안정성을 예측하고 이해하기 위해 기계 학습을 활용하고 이 분야에서 혁신적인 새로운 접근법을 이끌어 내려하고 있다. 주요 항공기 엔진제조사인 GE, 톨스 로이스, 사프란이 참여하게 되어 산업 관련성과 결과 도달 범위가 보장되는 과제이다. 이 프로젝트는 제 4차 산업 혁명의 정신의 하나인 젊은 과학자들을 양성과 세계를 선도하는 과학자 및 산업 파트너 네트워크 구성에 노력을 기울일 것이다.

이 연구과제는 항공 업계가 직면해 있는 제 4차 산업 혁명의 기술을 이용하려고 한다. 즉 사이버-물리적 시스템이 기술 시스템을 분석하고 모니터링함과 동시에 자동 결정을 내리는 것이다. 이 연구과제는 독일의 “Industry 4.0”과 미국의 “Industrial Internet”으로 알려져 있는 제 4차 산업혁명의 필수 요소인 기계 학습을 이용하여 문제를 해결하려 하고 있다. 네덜란드 트윈테 대학이 이 과제를 주도하고 있으며, 미국 2개 기관을 포함하여 총 17개의 기관들이 참여하고 있다.

4. 슈퍼 컴퓨터를 이용한 가스터빈 최적화 과제

바스트 파워시스템사(VAST Power Systems)는 로렌스 리버모어연구소 (LLNL)와 아르곤 연구소 (ANL)와 협력하여 슈퍼컴퓨터를 이용하여 가스 터빈 연소기의 효율을 높이고 시동 시간을 단축하는 연구과제, 초저공해 긴급시동 가스터빈 “Ultra-Clean Transient Turbine Combustor”를 진행한다.

캘리포니아 주는 현재 발전전력의 50%이상을 재생에너지원으로 생성한다는 법안을 통과 시켰다. 이를 위해서는 2030년까지 30,000 MW의 대기 전력량이 3시간안에 오리 커브 (Duck Curve)로 전력이 상승할 수 있어야한다. 이는 발전동력원에서 재생 에너지원의 비율이 높을 경우, 2년전 호주에서처럼 갑작스런 날씨변동으로 인하여 한 주 전체가

정전이 될 수 있기 때문이다. 이를 방지하기 위해서는 10분 내에 새로운 가스터빈 발전 가능, 5분 내에 매우 빠른 응답, 1 분안의 긴급 파견 가용력이 필요하다. 또한, 청정 공기 법령으로 인해 가스터빈 연소는 95% 더 깨끗해야 하며, 이는 대개 촉매사용을 통해 해결을 해왔다. 하지만 촉매 사용은 높은 비용을 초래하게 되고, 통상적으로 10분 이내의 급격한 시동 시에는 공해물질 배출 제어는 더 큰 어려움을 겪게 된다.

이 연구 과제를 통해 연소기 설계 최적화 기술이 개발되어, 60% 높은 출력과 24% 높은 터빈 효율이 실현될 것으로 보인다. 또한, 촉매나 암모니아를 사용하지 않고도 캘리포니아 주가 지정한 공해 배출량을 맞출 수 있을 것으로 보인다. 이것은 극도로 정확한 온도 제어로 이어지며, 잠재적으로 가스터빈 블레이드 수명이 두 배가 될 것으로 예상된다.

IV

참고문헌

- 1) GasTurbineMarketSizeWorth\$30.08BillionBy2025,GrandViewResearch<https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-gas-turbine-market>
- 2) BreakingthePowerPlantEfficiencyRecord,GEEnergy<https://www.ge.com/power/about/insights/articles/2018/03/nishi-nagoya-efficiency-record>
- 3) GEHATurbineSnagsAnotherWorldRecordforCCGTEfficiency,PowerMag<https://www.powermag.com/ge-ha-turbine-snags-another-world-record-for-ccgt-efficiency>
- 4) Rolls-Royce to cut 3,000 jobs in UK, the Guardian <https://www.theguardian.com/business/2018/jun/14/rolls-royce-cut-jobs-britain>
- 5) Rolls-Royce jet engine problems prompt £1.3bn loss, the Guardian <https://www.theguardian.com/business/2018/aug/02/rolls-royce-jet-engine-problems-prompt-13bn-loss>
- 6) Government boost for jet engines with 10 million investment for next generation technology, UK Department for Business <https://www.gov.uk/government/news/government-boost-for-jet-engines-with-10-million-investment-for-next-generation-technology>
- 7) H2020 project: Acoustic-Flow Interaction Models for Advancing Thermoacoustic Instability prediction in Very low Emission combustors, https://cordis.europa.eu/project/rcn/213487_en.html
- 8) H2020 project: Annular Instabilities and Transient Phenomena in Gas Turbine Combustors, https://cordis.europa.eu/project/rcn/211561_en.html

- 9) H2020project: MachineLearningforAdvancedGasTurbineInjectionSystemstoEnhanceCombustorPerformance. https://cordis.europa.eu/project/rcn/211678_en.html
- 10) IATA, 2036ForecastRevealsAirPassengersWillNearlyDoubleto7.8Billion <https://www.iata.org/pressroom/pr/Pages/2017-10-24-01.aspx>
- 11) BPEnergyOutlook2018BPEnergyOutlook2018, <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>
- 12) HPC4Manufacturing, Round5: Winter2018SolicitationSelectees, <https://hpc4mfg.llnl.gov/projects-round5.php>