

미래 산업 사회를 위한 생산 기술의 녹색화

에너지와 환경 위기 시대에 즈음하여, 저에너지/저탄소 생산기술의 중요성이 더욱 높아지고 있다. 소재 제조, 부품 생산 공정, 수송, 사용, 폐기, 재활용 등의 전주기 수명에 있어서 환경 부하를 줄일 수 있는 생산기술의 녹색화와 함께, 보다 선행되어야 할 에너지 사용량 정량화 사례를 분석하고, 국가 생산기술의 미래 전략 수립에 일조하고자 한다.

최 태 훈 한국생산기술연구원, 센터장/수석연구원
박 훈 재 한국생산기술연구원, 수석연구원
이 강 원 한국생산기술연구원, 본부장/수석연구원

e-mail : thchoi@kitech.re.kr

e-mail : phj@kitech.re.kr

e-mail : ggang@kitech.re.kr

에너지와 환경의 위기 도래

인류의 근대사는 산업의 발전과 함께 해왔다고 해도 과언이 아니다. 산업 및 기술의 발전은 인류의 주거, 의사소통, 교통, 문화, 우주개발뿐만 아니라, 전쟁에 이르기까지 다양한 분야에 걸쳐서 지대한 변화를 촉발시켰다. 그러나 이와 같은 인류의 발전에 있어서 화석연료의 사용이 기폭제 역할을 했음을 주목할 필요가 있다. Angus Maddison의 표 1을 보면 인류가 석탄 및 석유 등의 화석연료를 사용하기 시작한 19세기부터 현재까지의 경제성장률이 그 이전의 시기에 비해 엄청난 격차를 보이며 급등한 것을 알 수 있다.

사실상 19세기 이전의 연평균 성장률은 그 시대

의 선진국가에서도 0.15% 이하여서 2010년 현재 중국의 경제 성장률 예측치가 11%인 것을 고려하면 거의 무시할 만한 수준의 성장을 보여왔다. 이와 같은 통계 수치가 우리에게 시사하는 바는 매우 크다. 산업과 기술 발전에 공학자들이 크게 기여해 왔다고 자부하고 있지만, 실제로 화석연료의 공급 부족 혹은 가격 폭등 등의 이유로 에너지원 확보가 여의치 않을 경우에 어떤 생산 기술이 활용 가능할 것이며, 현재 사용되고 있는 자동차를 포함한 산업기기 중 어떤 것이 가동될 수 있는지를 생각해 보면 매우 비관적임을 부인할 수 없다. 혹자는 제조업체에서 사용하는 주된 에너지원은 전력이므로 화석연료의 위기와는 별개의 문제라고 할 수도 있겠으나, 국내 발전량 중 65% 이상이 화석연료에 의존한

표 1 시대별 1인당 국민 총생산 및 연평균 성장률

지역	시기 구분	0	1000	1820	1998	0-1000	1000-1820	1820-1998
		1인당 국민 총생산(달러)				연평균 성장률(%)		
A그룹 평균		443	405	1,130	21,470	-0.01	0.13	1.67
B그룹 평균		444	440	573	3,102	-0.00	0.03	0.95
세계 평균		444	435	667	5,709	-0.00	0.05	1.21

※A그룹: 서유럽, 서구식민지, 일본 등 선진국가 그룹

※B그룹: 라틴아메리카, 동유럽과 구소련, 아시아(일본 제외), 아프리카 등 개발도상 그룹

다는 사실을 상기하면 그런 주장을 고집할 수는 없을 것이다.

그렇다면, 과연 에너지원의 확보가 어려운 극단적인 위기 상황이 닥쳐올 가능성이 있을까? 에너지 위기는 화석연료의 완전고갈 시기에 닥쳐오는 것이 아니라, 화석연료의 생산량이 정점에 이르는 시기(Oil peak)와 함께 올 것이다. 왜냐하면, 생산량이 정점에 이르게 되더라도 인류의 개발과 인구 증가가 중단되지 않는다면 화석연료에 관한 수요는 증가할 것이고, 수요의 증가를 충족시킬 공급이 불가능해지는 순간 가격의 급상승과 함께 화석연료는 더 이상 유용한 에너지원이 되지 못할 것이기 때문이다. 불행하게도, 세계적으로 저명한 많은 학자들은 오일피크의 조기 도래 가능성을 매우 높게 예상하고 있다. 석유 위기의 예측은 1920년대부터 제기되어 왔으며, 1956년에 석유 생산량 추이와 석유 매장량 추정치로부터 미국의 석유 생산 정점이 1962년부터 1972년 사이에 발생할 것으로 예측하여 유명해진 Marion King Hubbert는 오일피크가 1990년에서 2000년 사이에 도래할 것으로 추정하였다.

Hubbert의 예측은 빗나갔으나, 이후의 연구자들이 그의 계산식과 세계 석유 매장량 추정치를 개선하여 새롭게 계산을 수행하고 세계 석유 생산 정점의 시기를 예측해 왔다. 특히 저명한 석유학자인 Colin J. Campbell과 Jean Laherrre는 ASPO(Association for the Study of Peak Oil and Gas)를 창설하여 석유 생산량의 추이 분석과 함께 생산 정점 시기를 예측해 왔다. 석유는 일반 원전에서 채취되는 일반 석유 외에도, 채취하기 어려운 중유, 심해저, 극지방에 존재하는 석유와 천연가스로부터 석유를 추출하는 방법에 의하여 생산될 수 있으며, 이들 모두를 포함하여 올 리퀴드(All liquid)라고 표현한다. Campbell과 Laherrre는 2004년에 올 리퀴드에 관한 궁극매장량을 각각 약 2조 5,000억 배럴과 약 3조 배럴로 추산하고 각각 2007년과 2015년에 오일피크가 올 것으로 예측하였다. 최근, Campbell은 2005년에 이미 세계 석유 생산량이 정점에 달했다고 지적하였다. 그림 1을 보면, 현재 오일피크가 진행 중에 있음을 분명히 확인할 수 있다.

화석연료에 의지한 산업과 기술 발전은 화석연료의 고갈에 따른 에너지 위기뿐만 아니라, 온실가스

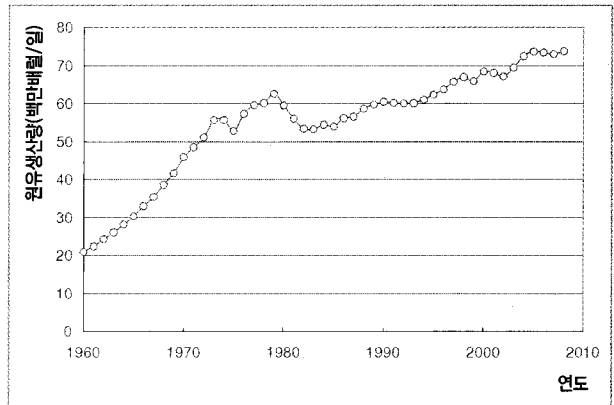


그림 1 세계 일평균 원유 생산량 추이(단위: 백만 배럴/일).

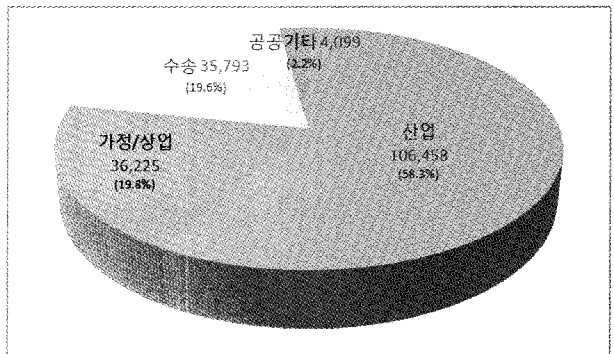


그림 2 2008년도 국내 부문별 에너지 사용량(단위: 1,000 TOE)

증가로 인한 온난화 및 이상 기후 발생 등의 글로벌 환경 위기마저 초래하고 있다. 교토의정서 및 발리 로드맵 등이 발효됨으로 인해, 우리나라도 2013년부터 온실가스 감축 의무 대상국에 포함될 것이 거의 확실하며 온실가스 감축 목표가 달성되지 못할 경우 온실가스 배출권을 구매하여야 한다. 2006년 당시 국내 온실가스 배출량 599.5백만 tCO₂(tons of CO₂, 등가 이산화탄소 톤수) 중에서 에너지 부문(공장, 수송, 난방, 전력 등)이 84.3%(505.4백만 tCO₂), 산업공정 부문(제조공정)이 10.6%(505.4백만 tCO₂)를 차지하고 있으므로, 온실가스 배출량 저감을 위해서는 에너지 사용량 저감이 선결 과제임을 알 수 있다.

그림 2는 2008년 부문별 에너지 사용 분포를 나타낸 것으로서, 산업 부문에서의 에너지 사용이 약 106x10⁶TOE(Tons of Oil Equivalent, 등가 석유 톤수)로서 전체의 58.3%를 차지하고 있다. 수송 부문도 19.6%를 차지하고 있는데, 산업 활동을 위한 수송량도 상당할 것으로 예상되므로 국가 에너지 소비량의 대부분은 산업과 연관된 활동으로부터 발생한다고 해도 과

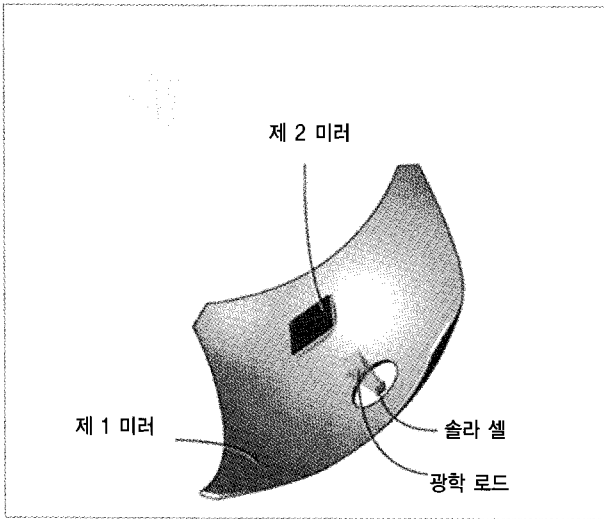


그림 3 CPV system의 개념도(미국, Solfocus 사)

언이 아니다.

작금의 시기에, 에너지와 환경적 측면에서의 위기는 너무도 혼란 야기될 수 있다. 그러나 거창하게 인류의 생존을 위협할 수 있는 사안이라고 단언할 수는 없더라도, 적어도 지속적인 산업과 생산 활동의 큰 장애물이 될 것이라는 사실은 아무리 강조해도 부족함이 없으며, 이것이 최근 지속적인 생산을 위한 제조 기술의 녹색화에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있는 이유일 것이다.

생산 기술의 녹색화 연구 사례

지속 가능 생산 기술 기반 연구-생산기술의 에너지 사용량 정량화 및 응용

TOE란 단위는 원유 1톤의 발열량을 뜻하며 약 1,000만 kcal에 해당한다. 일반 유전에서 원유 채굴이 진행되면서 유전 내부에 공간이 생기게 되고 이로 인해서 원유 채굴을 위해 더욱 많은 에너지가 소요되고 있다. 또한 최근에는 심해저나 극지방에 있는 원유까지 채굴되고 있다. 이에 따라서, 원유 1톤을 채굴하기 위해 소요되는 에너지는 더욱더 증가하고 있다.

IEA(International Energy Agency)에 의하면 세계 운송 체계의 95%가 석유에 의존한다고 하므로, 아무리 원유 가격이 비싸져도 원유의 수요는 존재할 것이다. 가격은 수요와 공급에 의하여 결정되는 상대적인 것이기 때문이다. 하지만, 에너지는 상대적인 것이 아니

고 절대적인 것이다. 극단적인 이야기이지만, 1톤의 원유를 채굴하기 위해 필요한 에너지가 1톤의 원유를 사용해서 얻을 수 있는 에너지보다 더 많이 필요하다면 더 이상 원유를 채굴할 이유가 없다.

이와 같은 개념은 최근 에너지 및 환경 위기 임박과 함께 급격히 조명받고 있는 신재생 에너지 분야에서도 마찬가지로 적용된다. 대표적인 사례가 미국 UC Berkeley의 David Dornfeld 교수 Lab이 수행한 연구 결과이다. 그는 미국의 태양광전지 제조업체인 Solfocus 사의 CPV(Concentrator PhotoVoltaic; 집중형 태양광전지)에 관해 EPBT(Energy PayBack Time)를 계산하였다. CPV는 태양광전지 셀의 고생산 비용과 고에너지 및 환경부하를 해소하기 위하여, 그림 3과 같이 두 개의 거울로 태양광을 집중시켜 단위 셀의 에너지 획득량을 배가시키는 방법을 사용한다.

이 경우에 EPBT란 태양광전지의 제조, 운송, 설치 등을 위해 소요되는 에너지를 획득하기 위해 필요한 태양광전지의 사용 연수를 뜻하며, 다음과 같이 계산된다.

$$EPBT = \frac{E_{Input}}{E_{Saved\ per\ year} - E_{tracking}} \times \eta_{elec} \quad (1)$$

E_{Input} 은 태양광전지의 소재 제조부터 셀 생산 및 모듈 조립에 이르기까지의 제조 과정과 생산지로부터 설치지역까지의 운송, 설비에 이르는 전주기 공정에 필요한 투입 에너지이고, $E_{saved\ per\ year}$ 는 CPV가 1년 동안 생산하는 에너지(전력)이며, $E_{tracking}$ 은 CPV를 태양의 움직임에 맞춰 따라가게 하기 위한 에너지(전력) 소모량이다. η_{elec} 은 일반적으로 화석연료에서 전기를 만들 때 변환 효율이다. 계산식은 복잡하여졌으나, 근본적으로 이 식은 앞장에서 기술한 EPBT의 개념을 따른다. CPV의 설치 지역 일사량을 고려하여 계산한 결과, SolFocus 사의 태양광 전지의 EPBT는 California 지역에서는 1.5년, Arizona 지역에서는 1.3년이 걸릴 것으로 계산되었다.

그러나 이 글에서 강조하고 싶은 것은 미국 신재생에너지 기업이 개발한 신제품의 EPBT 수치가 아니다. 현재, 국내 태양광전지의 개발은 발전효율 개선에 주력하고 있다. 반면, Dornfeld를 비롯한 많은 해외의 연구자들은 EPBT 등 다양한 개념의 메트릭을 개발하

고 있으며 이와 같은 개념을 태양광전지의 특성 비교 시 매우 중요한 인자로 고려하고 있다. 왜냐하면, 태양광전지의 발전효율은 제품만의 특성이지만 EPBT는 제품의 특성뿐만 아니라 제품 전주기 수명, 특히 제품 제조과정에서의 에너지 투입량이 고려된 정량적 수치로서 실질적인 에너지 획득 효율을 비교할 수 있기 때문이다. 즉, 똑같은 발전효율을 갖더라도 제조 시 에너지가 적게 드는 태양광전지가 더욱 좋은 제품으로 비교 평가되어 우선적으로 실용화될 수 있다.

EPBT 등 에너지 및 환경 메트릭 개발 연구에 있어서 우리가 꼭 주목해야 할 것은 제품 제조과정에서의 에너지 계산 방식이다. 흔히, 부품 제조과정에서 사용되는 에너지만을 포함되는 것으로 오해할 수 있지만 계산 과정을 보면 제조공정에 내재된 에너지(Embodied Energy)까지 포함하여 계산하고 있는데, 대표적인 내재 에너지는 제조공정 시 필요한 소재나 소모재, 촉매 등의 제조에 소요되는 에너지이다. 일반적인 태양광전지의 경우 셀 제조 시 내재 에너지가 차지하는 비중은 약 88%이다. 따라서, 내재 에너지를 고려해야만 실질적인 EPBT를 알 수 있으며 실용화 여부 결정에 있어서 오류를 최소화 할 수 있다.

이상과 같은 EPBT 계산은 매우 쉬워 보이지만 엄청난 시간과 비용이 수반되는 선행 연구가 필요하다. Carnegie-Mellon 대학의 Green Design Institute 에서는 미국 상무국과 환경보호국의 기본 데이터와 EIO-LCA(Economic Input-Output Life Cycle Assessment) 모델을 활용하여 다양한 소재 및 부품의 가격 대비 소요 에너지, 환경부하 발생량, 물 사용량 등을 제공하고 있다. 이론적인 연구의 중요성은 막론하고, 수많은 인력과 노력이 투입되어야 얻을 수 있는 결과임을 예상할 수 있다.

이와 같은 연구는 태양광전지뿐만 아니라 풍력, 해양, 지열 등 다른 신재생 에너지 분야에서도 당연히 진행될 것이다. 즉, 뿌리산업을 비롯한 산업 전반의 제조 기술에서 지금까지 초점을 맞추었던 생산성과 품질 향상 및 제조단가 저감 외에, 생산과정에서의 에너지/환경부하 정량화와 저에너지/저환경부하 생산기술 개발이 새롭게 부각될 것으로 전망된다.

저에너지/저환경부하 생산기술 개발

2009년 4월에 열린 하노버 박람회에서 독일과 한국은 지속가능 생산기술이란 주제로 공동 세미나를 개최하였으며, 이 세미나에서 Fraunhofer의 Matthias Putz는 생산기술의 에너지 및 자원 효율성이란 주제로 발표하였다. 그는 이 발표에서 독일의 기업 중 44% 이상이 새로운 투자 결정 시 에너지 비용을 고려하는 것으로 조사되었으며, 이를 근거로 Fraunhofer에서 생산기술의 에너지 및 자원 사용량 저감을 위한 연구를 진행 중이라고 밝혔다. 이 연구에서 Fraunhofer가 중점을 두고 있는 것은, ① 효율(생산과정 최적화), ② 지속가능성(에너지 관리), ③ 에너지 대체(친환경 에너지원 활용)의 3 단계에 입각한 에너지 효율이 높은 공장을 구현하는 것이다. 공정 효율 개선 연구를 통하여, 현재 자동차 생산 중 열접합 공정이 전체 접합 공정의 85%를 차지하고 있으나, 접합강도 대비 소요 에너지면에서 기계적 압축접합 방식이 세 배 효율적이라는 결과를 제시하였으며 기어 생산 시 기계가공에 의한 방식에서 소성가공 방식으로 바뀔 경우 생산 시간은 50%, 재료 사용률은 30%까지 저감될 수 있다고 보고하였다. 또한 생산 공정 에너지 관리 측면의 연구 결과로서, 공작기계의 에너지 소모량 중 22%만이 기계가공을 위하여 사용되고 있으며 78%가 잠재된 기본 에너지로 사용되고 있어서 이에 관한 생산관리가 필요함을 주장하였다. Fraunhofer의 중장기적인 전략혁신 3단계는 ① 공정의 최적화, ② 공정 대체, ③ 공정 생략으로 개선할 계획을 갖고 있다.

일본의 AIST에서도 “Minimal manufacturing and Maximal Servicing” 프로젝트를 수행하면서 부품의 고기능성과 저생산원가를 유지하면서 자원 사용량, 에너지 사용량, 폐기물 발생량을 최소화하기 위한 연구를 수행하고 있다. 이 연구에서도 환경 지표로서 Exergy와 같은 개념을 채택하였으며 실질적인 공정에 적용하여 계산함으로써 공정 개선의 효과를 정량화하고자 하는 노력을 기울이고 있다. 또한, 뿌리산업 관련 소형재 생산 기술 고도화를 위한 모노뿌리 국가전략 수립에 있어서도 단조, 주조, 금형가공 및 열처리 등의 생산기반 기술의 에너지 사용량 저감에 관한 기술 개발 계획을 포함하고 있다.

독일과 일본의 이상과 같은 저에너지/저환경부하 생산기술 개발 동향은 시사하는 바가 크다. 왜냐하면 두 국가는 생산기술에 있어서 세계적으로 선두를 다투는 국가이기 때문이다. 에너지와 환경을 고려한 생산 기술 개발에 있어서 국내의 연구 개발이 시급하다고 할 수 있겠다.

맺음말

에너지 및 환경 위기에 즈음하여, 지속가능한 산업 사회를 구현하기 위한 생산기술의 녹색화 필요성과 대표적인 사례들을 설명하였다. 한국의 에너지원 단위는 2007년 기준 0.323 TOE/GDP천불로서 일본의

1/3, 독일의 절반 수준에 머물고 있다. 특히, 에너지원 단위에서 제조업이 차지하는 비중이 전체의 28%를 차지하고 있어서 미국(13%), 일본(21%), 독일(22%)보다 훨씬 높다.

향후 친환경적이고 저에너지 소모적인 생산기술은 글로벌 에너지 위기 극복뿐만 아니라 지구 환경 보호라는 측면에서 필수적인 이슈가 될 것으로 전망되므로, 선진국의 기술 동향 분석을 통한 국내의 연구 개발 노력과 정부의 지원이 시급하다고 할 수 있다. 또한, 생산기술의 적용 및 신재생 에너지 분야의 제품 실용화 결정을 위한 제조 공정의 에너지 정량화 등의 기술 개발은 많은 연구자의 노력이 필요한 분야로서 유능한 공학도들의 관심과 연구 참여가 절실히 요망된다.

기계용어해설

수위조정기(水位調整器; Water Level Regulator)

발전소의 상수조의 수위를 항상 일정하게 조정하는 장치.

태코메터(Tachometer Generator)

측정하고자 하는 구동축에 발전기를 장착하고, 발전기에서 발생한 전력을 측정하여 축의 회전수를 측정하는 데 쓰이는 속도계용 발전기.

가용접(假鑄接; Tack Welding)

본 용접을 하기 전에 정해진 위치에 모재를 위치결정하기 위하여 필요한 위치에 띄엄띄엄 용접하는 것.

테일 로드(Tail Rod)

횡형 기관의 피스톤 중량을 지탱하기 위하여 피스톤 로드를 피스톤의 반대쪽으로 연장한 부분으로, 피스톤과 실린더벽의 마모를 감소시키고 증기의 누설을 줄이기 위하여 설치하는 것.

심압축(心押軸; Tail Spindle)

선반의 심압대에서 센터 또는 드릴 척을 지지하고 이송나사를 써서 세로 방향으로 움직일 수 있는 축부.

접선(탄젠트) 캠(Tangent Cam)

2개의 원호와 그것에 접하는 직선으로 연결한 윤곽의 캠으로, 내연기관의 밸브 기구 등에 널리 쓰이는 평면 캠의 일종.

수주(水柱; Water Column)

물의 높이로 유체의 정압, 동압, 총압을 나타내는 것처럼 유리관을 수직으로 장치했을 때 그 속으로 차오르는 물의 기둥.