

안 성 훈 서울대학교 기계항공공학부 교수

| e-mail : ahnsh@snu.ac.kr

추 원 식 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 연구교수

| e-mail : wschu79@snu.ac.k

오 진 우 서울대학교 기계항공공학부 석사과정

| e-mail : ojw92@snu.ac.kr

이 글에서는 제조기술의 발전과 패러다임의 변화에 따른 하이브리드 제조기술의 중요성을 알아보기 위해 그 정의와 공정 예를 살펴본다. 특히 하이브리드 제조기술을 위한 필요 연구 항목을 제시하고 앞으로의 발전 방향에 대하여 알아본다.

제조기술은 인류의 역사에 있어서 사회적, 경제적, 기술적인 제한 및 한계와 필요성 등이 반영되면서 그 패러다임이 변화되어 왔다. 이러한 변화는 항상 중요한 역사적 사건, 기술의 발달 또는 소비자 요구에 따라 그 형태를 달리 하게 되며, 산업혁명에서의 조립 라인, 20세기 생산성 중심 기술개발 등이 그 예가 된다. 특히 20세기 말에는 표준화와 대량생산이 제조 패러다임의 중심이 되었으며, 최근 제조기술 패러다임은 소비자들의 요구와 기술의 발달 등으로 인하여 기존에는 제한되었던 설계 영역을 확장할 수 있게 되었다. 기술 발달의 중심에는 다양한 제조공정들의 고안과 발전이 뒷받침되어 왔으며, 최근에는 다양한 소비자의 요구(복잡한 형상이나 불규칙적인 패턴 등)를 그대로 반영하기 위한 특수 제조공정들이 개발되었다. 하지만 개발된 공정들 또한 특징과 한계를 동시에 가지고 있으며, 이를 극복하기 위해 다양한 공정을 조합하여 사용하는 추세가 늘어나고 있다. 이와 같이 두 가지 이상의 공정을 조합하여 새로운 공정으로 구성하는 것을 하이브리드 제조공정이라고 한다. 하이브리드 제조공정의 정의는 연구자에 따라 그 범위를 달리 하고 있다. 역사적으로 살펴보면, 하이브리드 제조

라는 개념은 1820년대 사무엘 슬레이터의 방적(spinning; 紡績)과 직조(weaving; 織造)를 동시에 수행할 수 있는 기계화 공장의 방식을 보고 데이비드 J. 제레미가 그의 1973년 저널 'Innovation in American Textile Technology during the Early 19th Century'에서 '하이브리드 제조(hybrid manufacturing)'라고 기술하면서 정의되었다. 그후 2001년 스티븐 M. 길리언의 저서 'The American Experiment: A History of the United States'에서 프란시스 C. 로웰의 섬유 제조 시스템으로 현대 하이브리드 제조의 정의와 거의 흡사한 개념을 설명하였다. 방적과 직조를 여러 위치에 분산시켜 하나의 프로세스로 묶은 슬레이터와 달리 로웰은 직물 제조와 관련된 모든 프로세스를 한 장소에 밀집시켜 수행함으로써 일의 효율성을 증가시켰던 것이다. 이와 같이 공간을 잘 활용한 디자인으로 높은 효율성을 얻는 것은 오늘날 엔지니어들이 현실화하려 하는 목표이기도 하다. 공간적인 개념 이외에 공정을 동시에 수행(동시 공정)하거나 순차적으로 수행(순차공정)하는 것이 하이브리드 제조에 있어서 또 다른 이슈가 될 수 있다. 하이브리드 제조의 주요 목적은 생산성의 향상 또는

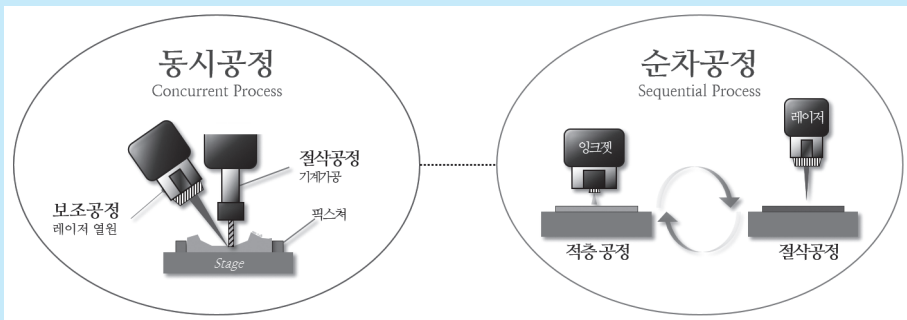


그림 1 대표적 하이브리드 제조공정의 방법(동시공정과 순차공정, Chu et. al, From Design for Manufacturing(DFM) to Manufacturing for Design(MFD) via Hybrid Manufacturing and Smart Factory: A Review and Perspective of Paradigm Shift, IJPEM-Green Technology 3(2), 2016)

가공품질의 개선이었으나, 최근 다양한 스케일에서의 공정을 수행하거나 복잡한 형상 또는 기존의 전통적인 제조 방법으로 구현하기 힘든 형상들을 제조하기 위한 연구들도 함께 수행되고 있다. 국제생산공학원(CIRP: International Academy for Production Engineering)에서는 아래와 같이 두 가지로 하이브리드 제조를 정의하고 있으며, 최근 하이브리드 제조에서 다루고자 하는 범위도 아래의 정의를 따라가고 있는 추세다.

- 넓은 정의(open definition) : 두 개 이상의 제조공정이 각 공정의 장점을 극대화할 수 있도록 하나의 시스템으로 구성
- 좁은 정의(narrow definition) : 각기 다른 공정(화학, 물리, 제어 등)이 하나의 공정영역(process zone)에서 동시에 작용

하이브리드 제조공정은 개별적인 공정의 장점을 통합할 수 있다는 이점이 있다. 나아가 각 공정이 가진 장점 이외에 이러한 장점들의 시너지효과가 더해지면서 하이브리드 제조공정으로 제품을 제작할 경

하이브리드 제조란 두 개 이상의 제조공정이 각 공정의 장점을 극대화 하거나, 각기 다른 공정이 하나의 공정영역에서 동시에 작용하는 시스템을 일컫는다.

우 단순히 두 가지 공정을 합한 것보다 더 나은 결과를 얻을 수도 있다.

예를 들어, 전해 방전 가공(ECDM) 같은 하이브리드 제조공정은 전해 가공(ECM)과 전기 방전 가공(EDM)의 특징들을 살려 이들을 각각 수행하였을 때에 비해 5배 ~ 40배 향상된 재료 제거율(MRR: Material Removal Rate)을 얻을 수

있으며, 더 빠른 MRR은 가공시간을 줄이므로 비용 절감효과를 가져올 수 있다. 이 외에도 하이브리드 제조공정을 통해 정밀도를 높여 공작물의 품질을 향상시킬 수도 있으며, 보조공정을 통해 각 공구의 마모를 감소함으로써 전체적 공구 수명을 늘릴 수도 있다. 어떤 특징을 강조할 것이냐에 따라 다양한 종류

의 하이브리드 제조공정을 개발할 수 있다.

물론 위와 같은 장점을 가질 수 있지만, 단점 또한 존재한다. 각 개별 공정의 단점이 복합적으로 존재하게 되며 이에 따라 하이브리드 제조공정을 효과적으로 사용할 수 있는 상황이 제한될 수 있다. ECDM은 ECM과 EDM에 비해 빠른 MRR을 제공하는 대신 표면 처리의 품질이 낮게 나올 수 있다. 재료를 빠르게 제거함으로써 국부적인 과열이 일어나기 때문에 정밀도가 떨어지고 표면에 결함 및 미세 균열이 발생하기 때문이다. 그 밖에 여러 제조공정을 통합하여 발생하는 단점으로는 공구 수명의 감소와 운영비용의 증가가 있다. 특히 순차적인 하이브리드 제조공정의 경우 두 가지 공정 중 하나만 사용하게 되면 나머지 공정은 다른 작업을 수행하지 않기 때문에 전체적으로

는 손실이 될 수 있다. 또한, 개별 공정은 각각 다른 가공 환경을 요구할 수 있기 때문에 수행할 공정에 필요한 환경 구축으로 인해 가공시간이 늘어나 효율성이 떨어질 수 있다. 이와 같이 특정 장점을 강조하는 과정에서 생겨난 단점이 고품질의 공작물을 제조하는 데 방해할 줄 수 있다. 따라서 엔지니어들은 단점을 최소화하고 공정을 최적화 하는 시스템을 개발하는 데 지속적인 연구를 하고 있다.

하이브리드 제조공정은 그림 2의 예와 같이 다양한 공정을 조합할 수 있으며, 필요에 따라 세 가지 이상으로 구성하여 새로운 공정을 구성할 수도 있다. 하이브리드 제조는 이러한 예와 같이 다양한 공정을 조합할 수 있기에 구성되는 전체 공정 개수를 간단히 표현하기는 쉽지 않다. 각 공정 카테고리별 여러 공정이 있다고 할 경우 그림 2에서와 같이 하이브리드 제조 공정으로 조합 가능한 수는 수 없이 많을 것이다. 그러나 모든 공정을 무작정 조합할 수는 없으며, 공정 특성에 따라 공정에 맞는 주위 환경조건을 맞추어야 하기에 그 수는 단순히 조합 가능한 이론적인 수에는 훨씬 미치지 못할 것이다. 하지만 여전히 다양한 조합의 하이브리드 제조공정이 가능하며, 기술의 발달에 따라 환경적인 조건을 크게 변화시키지 않고 다양한 공정을 조합할 수 있는 연구가 많이 진행되고 있다.

오늘날의 연구추이나 산업체의 상황을 보면 모두 하이브리드 제조기술의 중요성을 인식하고 있음을 알 수 있다. 도키아(Vimal Dhokia)가 서술한 2008년 논문 ‘Surface Roughness Prediction Model for CNC Machining of Polypropylene’에 의하면 기존의 사출 성형(injection molding) 공정을 대신하여 저비용의 하이브리드 제조공정인 극저온(cryogenic) CNC 기계가공이 사용되었음을 알 수 있다. 자한(Muhammad Pervej Jahan)의 2010년 논문 ‘Development, Modeling, and Experimental Investigation of Low Frequency Workpiece Vibration-Assisted Micro-EDM of Tungsten

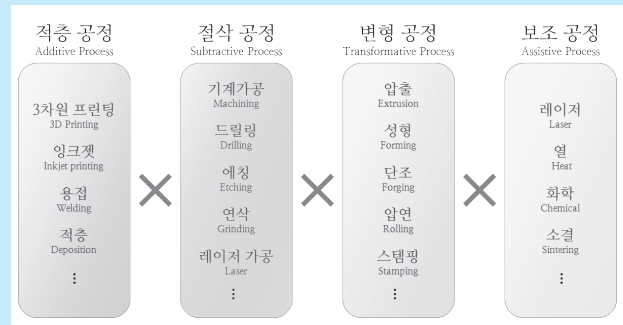


그림 2 하이브리드 제조공정 구성 가능 공정의 예

Carbide’에는 전극의 변형 때문에 텅스텐 카바이드의 가공에 사용하기 까다로왔던 기존의 EDM 공정이 초음파 복합 EDM의 하이브리드 제조공정으로 대체되어 공구 마모를 감소시킬 수 있었다고 한다. 최근 출시되는 제품들의 추세를 보면 하이브리드의 제조공정의 중요성을 강조했음을 확인할 수 있다. 두산인프라코어의 모델 PUMA MX2100은 터닝센터와 머시닝센터의 기능을 통합한 하이브리드 공작기계 시스템이며, DMG Mori의 모델 LASERTEC 65 3D는 레이저 적층 용접과 밀링가공을 통합한 공작기계 시스템이다. 또한 현대위아의 LM2600MTTS는 기존의 분리된 선반과 머시닝센터의 역할을 동시에 수행할 수 있다. 이와 같이 공작기계 업체들은 하이브리드 제조기술을 적극 수용하여 새로운 제품을 선보이고 있다.

하이브리드 제조공정을 개발하기 위해서는 어떠한 연구가 필요할까? 본 글에서는 세 가지의 하이브리드 제조의 연구 주제를 소개한다. 첫째는 하이브리드 공정과 장비의 기반이 되는 ‘플랫폼’이다. 그림 3과 같이 기존의 공작기계 또는 3차원 프린터를 플랫폼으로 하고 이에 새로운 기능을 추가하는 것과, 하이브리드 제조공정을 위한 연구실 기반으로 새로운 플랫폼을 구성하는 것을 고려할 수 있다. 전자는 상용으로 현재 기업에서 추구하는 공정 플랫폼 방향이며, 후자는 새로운 하이브리드 제조공정을 연구하기 위한 플랫폼으로 활용이 가능할 것이다. 둘째, 다양한 공정을 ‘모듈화’하여 개발된 플랫폼에 적용하는 것이다(그림 4).

각 공정마다 필요한 환경적 요인을 모듈화하고 표준화하게 되면 하나의 플랫폼에서 다양한 하이브리드 제조공정을 소비자의 요구에 맞게 유연하게 대체할 수 있을 것이다. 셋째, 위 언급된 플랫폼과 모듈을 통합할 수 있는 통합기술(하드웨어/소프트웨어)이다. 설계, 제조, 제어 등을 통합하기 위한 요인들을 연구하고 소프트웨어와 하드웨어가 통합되면 각 공정의 단점을 보완하고 장점을 최대화할 수 있는 다양한 조합의 하이브리드 제조공정의 개발이 가능할 것이다. 그림 5와 같이 미래 하이브리드 제조공정은 3차원 형상, 다중재

하이브리드 제조공정을 개발하기 위해서는 공정을 구성하는 플랫폼, 플랫폼에 적용될 모듈화된 공정 그리고, 제어를 위한 소프트웨어와 하드웨어의 통합이 필요하다.

료 사용(multiple workpiece material), 다기능(구조적, 기계적, 전기적, 자기적, 광학적, 바이오 기능) 구현, 재료의 특성 향상을 위한 조율 가능한 재료(tunable materials) 사용, 초정밀도(ultra-precision)의 구현 등이 가능할 것이다.

하이브리드 제조는 기존의 대량생산 개념에서 발전되어 맞춤형으로 소비자가 원하는 요구사항을 제품에 반영할 수 있게 한다. 다양한 물리-화학적 시너지 효과를 연구하는 분야는 아직도 그 연구의 초기 단계이며, 일반적인 제조공정에서 요구되는 공정계획 소프트웨어의 최적화뿐 아니라 최근 이슈가 되고 있는 IoT, 빅데이터 등 ICT 기술과 결합된다면 제조업에서의 혁신을 이끌 수 있을 것으로 기대한다.

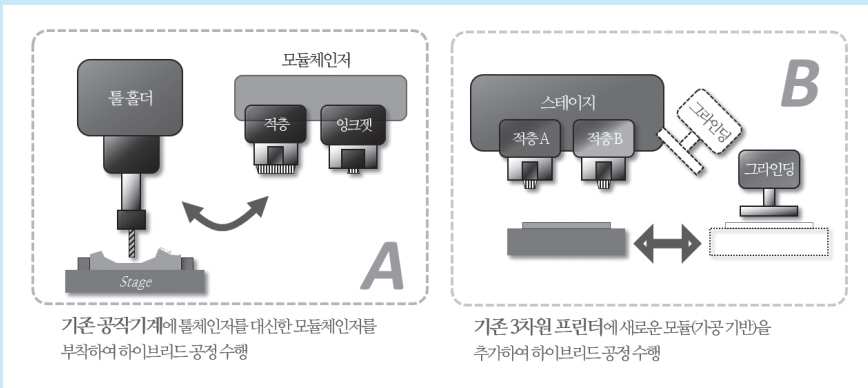


그림 3 하이브리드 제조공정에서 고려해야 할 플랫폼 구성의 예



그림 4 하이브리드 제조공정에서 고려해야 할 모듈화와 통합기술

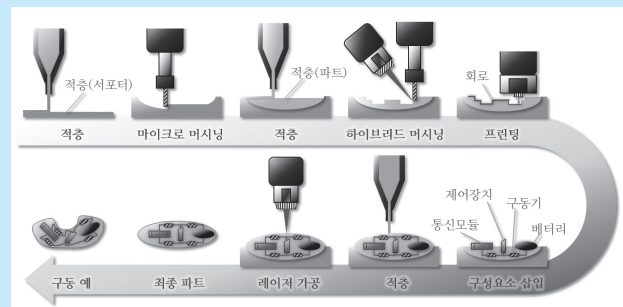


그림 5 미래 하이브리드 제조공정의 예