

## 스마트 제조의 분수령, 디지털 트윈의 혁명

오늘날 디지털 트윈은 프로세스, 사람, 장소, 시스템, 장치 등 실제 물리적 자산의 디지털 복제본으로, 다양한 용도로 사용될 수 있다. 산업 도구로서 디지털 트윈은 여러 분야에서 제조 공정의 결과를 가상으로 예측하는 데 사용된다. 이 글에서는 금속 스탬핑 패널 제조에 대한 디지털 트윈의 응용, 제공할 수 있는 특징, 그리고 이 기술의 적용에 사용되는 제품 및 지원되는 서비스에 대해서 간략하게 설명할 것이다.

‘디지털 트윈’이라는 용어는 산업계에서 최근에 널리 알려지기 시작했지만, 1992년 데이비드 겔런터(David Gelernter)가 출간한 ‘미러 월드(Mirror Worlds)’라는 책에서 처음 소개되었다. 당시 기술은 급속도로 발전하고 있었으며, 개인용 컴퓨터가 보급되고 소프트웨어가 급속도로 개발되고 있었다. 겔런터는 그의 책에서 이 모든 것이 미래에 어떤 의미를 가질 것인지에 대한 예측을 했다: “소프트웨어가 우주로 신발 상자에 담는 날... 어떻게 가능할 것이며 그 의미는 무엇인가.”

책이 출간된 지 30년이 지난 지금, ‘신발 상자 속의 우주’는 현재 월드 와이드 웹(World Wide Web)을 완벽하게 묘사하는 은유가 되었다. 겔런터 예측은 현실이 되었다.

그리고 책이 출간된 지 10년 후 그의 또 다른 예측이 검증되었다. 2002년 플로리다 공과대학의 마이클 그리브스(Michael Grieves)는 제품수명주기관리(PLM)의 기반이 되는 모델로서 디지털 트윈 개념을 제조 공정에 처음 적용한 것으로 인정받았다.

### 도전 과제 : 어셈블리 및 금속 스탬핑 시트의 복잡한 분야에 새로운 개념을 적용하다!

개발 과정상에서 발생하는 문제를 해결하기 위해서는 주요한 과제를 정확히 설정하는 것이 필수적이다. 기술적인 부분과 실제 실행, 그리고 프로젝트 관리 측면 등이 고려될 수 있다. 완벽하지는 않지만 기술적인 기반은 반드시 필요하며, 관련된 인원의 하드웨어와 소프트웨어에 대한 기술도 필수적으로 갖추어져야 한다.

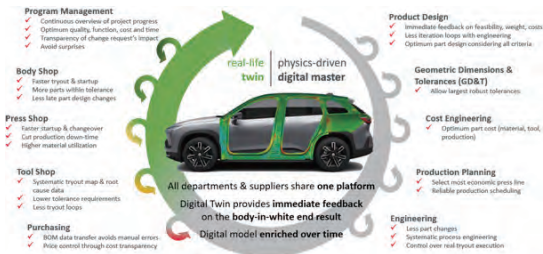
생산적인 관계, 원활한 소통, 그리고 정보 교환은 새로운 개념을 성공적으로 적용하는 데 필수적이다. 스탬핑 부품을 개발하고 제조하기 위해서는 여러 부서의 협력으로 업무가 진행된다. 또한, 디지털 트윈 모델을 적용하기 위해서도 소통이 가장 중요하다고 볼 수 있다. 하지만 이런 부서들은 보통 내부 경쟁이 심한 계층적 조직 구조를 가지고 있으며, 서로 다른 각각의 목표를 추구한다.

디지털 트윈 모델은 실제 세계와 가상 세계를 연결하며, 두 가지 프로세스로 구성된다.(그림 1)

- **디지털 마스터(Digital Master)** : 설계 및 엔지니어링 단계에서 가상 환경에서 생성된다. “설계된 대로(as designed)” 프로세스 또는 모델의 의도를 나타낸다.
- **실제 트윈(Real-life Twin)** : 작업장에서 물리적으로 구현된 디지털 마스터이며, “제조된 대로(as manufactured)” 데이터를 제공(궁극적으로 디지털 마스터로 피드백) 한다.

첫 번째는 가상에서 구현된다. 제품, 프로세스 및 제작 엔지니어링 부서는 견고하고 제조 가능한 프로세스를 통해 실행 가능한 제품을 개발하기 위해 노력한다.

두 번째는 물리적 세계에 존재한다. 금형 제작부서는 디지털 트윈에서 개발된 것을 구축하는 것을 목표로 한다. 여기에 가장 큰 과제가 있다. 즉, 엔지니어링이 개발한 것을 예상된 결과를 충족할 만큼 충분한 정밀도로 실행하는 방법이다.



Christoph Weber, Shanghai, 2020(출처 : Internal by courtesy of NIO)  
그림 1. 디지털화에 관련된 부서

**솔루션 : 부서 간 통합 플랫폼**

어셈블리 또는 스탬핑 부품의 개발에는 개별적인 목표와 목표를 가진 많은 부서가 관여한다.(그림 1)

- **제품 엔지니어링** : 자동차의 승인 사양을 충족하는 설계를 만드는 것이 목표

- **제조 엔지니어링** : 높은 품질로 부품을 반복적으로 생산할 수 있는 견고한 금형 제작이 목표.
- **프레스 샵** : 재료 소비를 줄이면서 요구 사항을 충족하는 프로세스를 개발하는 것이 목표

이처럼 각 부서의 목표가 다르기 때문에 이해 관계가 충돌하거나 변화에 저항하고, 내부 경쟁이 생길 수 있다. 하지만 모든 부서가 최대 효율성, 빠른 시장 출시, 그리고 최고의 비용 효율성을 목표로 한다는 점을 잊어서는 안 된다.

공통적으로 모든 스탬핑 부품은 <그림 2>에 설명된 것과 같은 일반적인 단계를 거친다.

디지털 마스터는 ‘가상 세계’의 모든 단계를 거치는 디지털 모델이다. 제품 개발 초기 단계부터 금형 제작을 위한 최종 검증까지, 부품 승인에 필요한 모든 요구 사항을 충족하도록 만들어져야 한다. 디지털 마스터는 모든 변경 사항이 기록되는 고유한 파일이 된다.

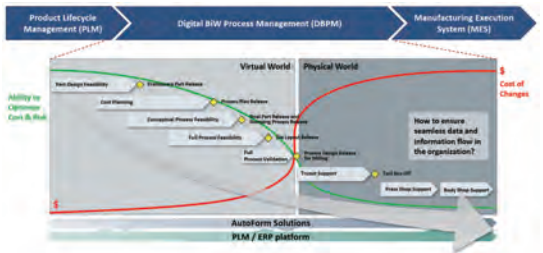


그림 2. 스탬핑 부품의 개발 단계 및 제품 변경에 따른 투자비 상관 관계

ERP 시스템의 도움을 받아, 모든 관련 당사자는 변경 사항에 대해 공개적으로 소통하고 필요한 조치를 적시에 취할 수 있는데, 이렇게 하면 완벽한 제품 수명 주기 관리(PLM)가 가능하다. AutoForm(오토폼) 같은 소프트웨어는 사용자에게 의해 생성된 모든 항목 및 단계를 안내하는 기능을 제공한다. 또한, 이러한 관리 시스템은 프로세스 전체에서 이루어진 변경 사항과 의견을 기록한 파일을 저장할 수 있다.

이것은 전통적인 모델에서 흔하지만, 비용이 많이 들고 지연을 초래하는 프로세스/제품의 후기 변경을 방지한다. <그림 2>에서 보는 바와 같이 프로세스가 성숙해짐에 따라 변경 비용과 변경 시간의 관계(빨간색 곡선)를 보여준다. 또한, 동일한 성숙도를 고려하여 이러한 변경을 실행할 수 있는 능력(녹색 곡선)도 설명한다. 두 곡선은 서로 다른 전략을 반영하며, 현재 기술은 리소스를 최적으로 사용하면 프로세스를 설계하여 문제를 예측하고 완화할 수 있음을 시사한다. 녹색 곡선은 실행 가능한 상태를 나타낸다.

통합 플랫폼이 원활하고 일관된 결과를 가능하게 하는 이유가 몇 가지 있는데, 비용과 시간을 줄이는 것이 가장 설득력 있는 이유일 수 있다. 왜냐하면 비용과 시간은 측정할 수 있기 때문이다.

### 마스터 디지털 프로세스 트윈 생성

마스터 디지털 프로세스 트윈을 만드는 과정은 여러 단계로 이루어지며, 올바르게 적용하기 위해 고려해야 할 여러 주제와 매개변수를 포함한다.

이 목적을 위해, 우리는 신뢰할 수 있는 디지털 마스터를 만드는 데 필요한 주의사항을 두 가지 단계를 거쳐서 확인할 수 있다. 첫 번째는 <그림 3>에 설명된 정확도 영향 범위(Accuracy Footprint)로, 현실을 반영하고 실제로 재현할 수 있는 디지털 트윈을 만들 때

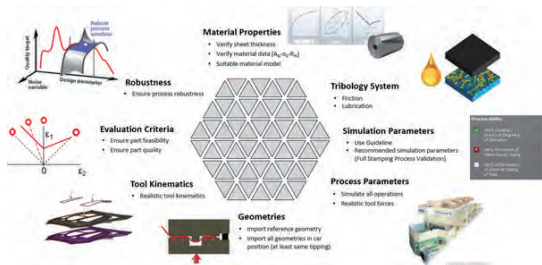


그림 3. 정확도 영향 범위(Accuracy Footprint)

고려해야 할 다양한 주제를 나타낸다. 이 그림은 각 주제를 간략하게만 다루고 있으며, 각 주제는 별도의 복잡하고 다양한 설명이 필요하나, 여기에서는 다루지 않기로 한다.

두 번째는 <그림 4>에 설명된 파레토(Pareto)로, 해당 분야(예: 판금 성형 공정)에서 현실과 일치하는 디지털 모델을 얻기 위해 필요한 엔지니어링 노력을 보여준다. 그래프는 엔지니어링 노력(소요 시간)과 예측 능력 향상 간의 관계를 보여주며, 단순한 주름 및 파단 분석에서부터 육안으로 보이는 복잡한 스프링백 및 미세 결함 예측까지 포함한다. 디지털 모델을 만드는 목적은 가상 세계에서 수정할 수 있을 만큼 정확하고 정밀한 정보를 제공하여 프로세스의 주관성 및 변동성을 제거하는 것이다. 신뢰할 수 있는 디지털 마스터가 달성되면, 즉 물리적 결과의 예측 가능성이 충분히 높아 프로세스를 승인할 수 있게 되면, 우리는 다음과 같은 도전에 직면한다: “금형 제작처(현실 세계)에서 디지털 마스터의 결과를 어떻게 달성할 것인가?”

이 도전을 달성하기 위해서는 정보 교환과 플랫폼 통합이 필수적이다. 부서 간의 일관된 소통이 필요한데, 이를 위해 두 가지 강력한 도구인 Tryout Map과 Production Map이 사용될 수 있다. 이 두 도구의 차이점은 적용 시점이지만, 목표는 동일하다. 디지털 마스터에 명시된 내용을 실제로 구현하는 데 필요한 정보를 제공하는 것이다.

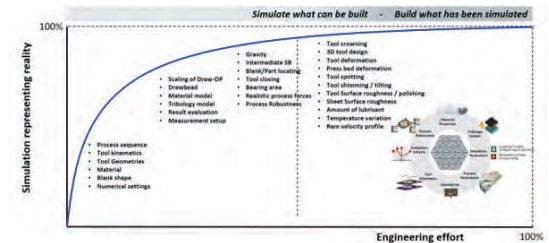


그림 4. 파레토

예를 들어, Tryout Map은 재료의 기계적 특성 변화, 패드 및 블랭크 홀더 힘의 변화, 다양한 마찰 조건 등 운영자가 제어할 수 없는 여러 시나리오를 고려하여 금형 제작소에서 발생할 일을 예측하는 정보를 포함한다.

또한, Tryout Map은 운영자가 금형에 대한 수정 결과를 예측할 수 있게 해준다. 예를 들어, <그림 5>에 나와 있는 것처럼 드로우 비드의 치수 변경이 부품의 스프링백에 미치는 영향을 식별할 수 있다.

이렇게 하면 금형 수정 시간이 크게 줄어드는데, Tryout Map의 변경이 프로세스/도구에 좋지 않은 영향을 줄 것으로 판단되면, 단순히 실행하지 않으면 된다. 대신 문제를 해결할 가능성이 높은 변경만 채택하고 구현하면 된다. 이렇게 하면 비용과 재작업에 소요되는 시간을 줄일 수 있다.

<그림 6>은 산업 공정의 디지털화 단계를 간단하게 보여준다. 현재 자동차 산업의 대부분은 4단계에 있으며, 이 단계에서는 무엇을 할 수 있는지, 이를 실현하기 위해 무엇이 필요한지, 그리고 어떻게 할 것인지에 대한 '이해'가 이루어진다. Tryout Map과 Production Map은 모두 5단계에 속하며, 이 단계에서는 발생할 일을 예측하고 이를 수정하기 위한 조치를 취할 수 있는 정보를 생성한다.

Tryout Map과 Production Map을 만드는 데 도움이 되는 소프트웨어가 있다. 이 소프트웨어는 결정론적 컴퓨터 시뮬레이션(즉, 고정된 경계 조건을 가지고 특정 조건에 대한 결과를 예측하는 것)에서 확률론적 컴퓨터 분석으로 전환할 수 있게 해준다. 이를 통해 공정의 견고성과 신뢰성을 확보할 수 있다.

이 분석에서는 사용자가 경계 조건의 범위를 정의하면, 소프트웨어가 통계적 조합을 실행하고 여러 번의 반복을 병렬로 계산하여 고유한 파일로 컴파일한다. 완



그림 5. 드로우비드 형상 변화에 따른 스프링백의 변화

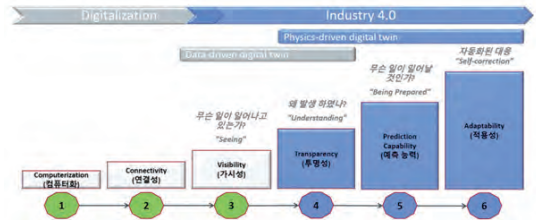


그림 6. 디지털화의 단계

료되면 이 파일은 여러 초기 시나리오에 대한 결과를 제공한다. 따라서 사용자는 트라이아웃 시작 시 (Tryout Map) 또는 생산 문제 발생 시(Production Map) 주어진 시나리오에 따라 어떤 조치를 취해야 하는지 알 수 있게 된다.

**미래 : 적응성 및 Industry 4.0**

확률론적 분석을 사용하면 소프트웨어의 통계 도구를 통해 많은 양의 정보를 생성하고 후처리하여 스탬핑 공정의 다양한 초기 조건 결과를 예측할 수 있다. 여기에는 직접적인 생산 제어가 불가능한 변수(재료 특성, 시트 거칠기, 시트 두께 등)와 제어할 수 있는 공정 매개변수(홀더 힘, 블랭크 형상 및 위치, 윤활유 양 등)의 영향을 포함한다. 결과적으로 디지털 트윈을 사용하면 특정 측정 가능한 요인의 변동으로 인해 발생할 수 있는 스탬핑 문제를 예측하고, 공정 매개변수 조절을 통해 이러한 문제의 해결책을 제시할 수 있다.

<그림 6>에 제시된 흐름도의 6단계(적응성)는 머지않은 미래를 나타낸다. 이 아이디어는 확률론적 시뮬레이션에서 얻은 정보를 사용하여 공장이 적응 가능해지

고, 생산 공정 조정을 자동으로 수정하는 완전한 센서 기반 디지털 공장을 구축하는 것이다. 이는 공정 변동과 잡음을 흡수하여 가동 중단 시간을 최소화하고 결과적으로 생산 효율성을 높일 수 있다.

〈그림 7〉은 이 시나리오를 보여주는데, 잡음 변수의 변동으로 인해 생산에서 문제가 발생하지만, 시뮬레이션의 확률론적 특성 덕분에 문제를 해결하기 위한 수정 방향을 디지털 트윈에서 확인할 수 있다. 해결책이 발견될 때까지 테스트한 후, 긍정적인 결과가 보장된 조건을 실제 생산 라인에 적용한다. 자동화 프로세스를 통해 문제가 실제로 발생하기 전에 감지하고, 인간의 개입 없이 공정 조정을 수행할 수 있게 해준다.

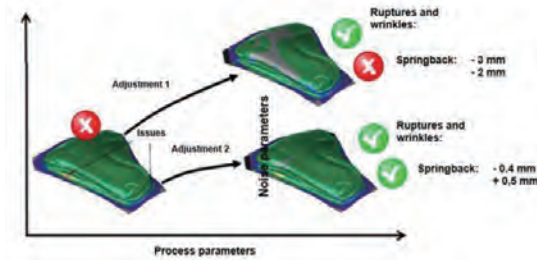


그림 7. 확률적 시뮬레이션으로 구현된 디지털 트윈을 통한 프로세스 개선

### 결론 : 현재 가능한 옵션은 무엇인가?

독일 슈투트가르트에 있는 Schuler사는 이미 실제 테스트에서 스마트 프레스샵(그림 8)을 구축해서 디지털 트윈과 산업 4.0 개념을 구현하고 있다. 이 공장은 완벽하게 통합된 센서가 장착되어 있어 공정 변화를 예측하고 제어, 조정할 수 있다.

이와 관련된 솔루션을 통해 디지털화 5단계(그림 6)로 진행할 수 있으며, 이는 디지털화 주기의 가장 핵심적인 부분을 다루고 있다고 볼 수 있다. 그 결과, 금속 패널 생산에서 가동 중단 시간과 스크랩을 줄이는 데 있어 이미 인상적인 성과를 거두고 있으며, 더 나아가

추가적인 다음 단계를 준비중이다.

AutoForm과 같은 가상 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하면 개발 단계에 투자된 비용의 약 10배 이상의 절감 효과를 얻을 수 있다고 추정된다. 즉, ROI 비율이 10배 이상인데(글로벌 고객의 보고서 기준 평균), 이는 공정의 완전한 디지털화를 구현하지 않고도, 결과를 예측하고, 시나리오를 매핑하며, 이 글에서 언급한 바와 같이 분석과정을 통해 정보를 확인하고, 이를 기반으로 한 수정에 대한 조치를 실행하는 것 만으로도 달성할 수 있다는 것을 의미한다.

마지막으로 디지털 트윈은 제조 공정의 예측과 개선을 위해 필수적인 도구로 자리 잡았으며, 향후 Industry 4.0의 발전에 따라 더 많은 산업 분야에서 그 활용 가능성이 확대될 것이다.



출처 : Internal by courtesy of Schuler group  
그림 8. 슈러사의 스마트 프레스샵



### 문명수 부장

오토폼엔지니어링코리아 컨설팅본부 소속으로 박판성형해석솔루션인 오토폼의 Solver, Material, TriboForm 및 HotForming 분야 기술 지원 및 차체 성형/조립 공정과 관련한 프로젝트 업무를 담당하고 있다.

myungsoo.moon@autoform.com  
홈페이지 www.autoform.com/kr