

엔진 연구 개발시 CFD 적용 사례

- CFD를 이용한 배기계 유동 개선을 중심으로 -

김 한 상, 김 우 태 · 현대자동차(주) 선행연구소

서 론

최근 자동차용 엔진의 고출력, 저연비, 배기 가스 저감, 경량화 추세와 환경 오염에 대한 관심이 크게 증대함에 따라 각 자동차 회사들은 이에 부합하는 보다 효율적인 미래형 엔진의 연구 및 개발에 많은 노력을 경주하고 있다.

엔진의 연구 개발에는 다양한 종류의 개발 Tool이 적용되어 오고 있는데, 그 중 전산기 속도의 비약적인 발전에 따라 CFD (Computational Fluid Dynamics)를 이용한 전산 해석이 엔진 연구에서 전통적으로 이용되어 온 기존의 엔진 시험 및 1차원 해석 등을 보완할 수 있는 기본 Tool로 국내외 자동차 회사의 관심 대상이 되고 있다. 실제로 각국 자동차 회사에

서는 CFD를 엔진 내 유동 및 열전달 현상, 더 나아가 연소, 분무 현상들을 파악하고 이를 엔진 설계 과정에 접목시켜 개선 설계안을 도출, 설계에 반영하는데 적극 이용하고 있으며, 그 사용 수준도 점점 고급화되고 있는 추세이다.

80년대 후반까지만 해도 CFD는 여러 장점에도 불구하고, 자동차 업계에서 엔진 개발에 적용될 수 있는 Tool로 적합하지 못한 한계 (해석 수행 시간 과다, 복잡한 형상에 대한 격자 생성 Tool 부족, CFD 코드의 상용화 미약 등) 때문에 많은 관심을 끌지 못했으나, 90년대 들어 언급된 한계의 상당 부분이 점차 해결되어 가면서, 중요한 Tool로 부각되고 있다.

국내의 경우도 90년대 들어 선진국에서 개발, 상용화된

CFD 코드의 도입이 활발해지면서 CFD가 엔진 개발 Tool로 인식되기 시작하였고, 90년대 후반기 들어서는 엔진 설계, 개발 과정에 점차 적용이 확대되고 있다.

엔진 연구 및 개발에 이용되는 CFD Tool의 적용 분야는 아래와 같이 크게 분류할 수 있다.

1. 연소실 및 포트, 실린더 내 유동, 연소, 분무 현상 해석
2. 흡기 시스템 내의 유동 특성 해석
3. 촉매를 포함한 배기 시스템 내의 유동 및 열전달 해석
4. 엔진 내 냉각수 유동 해석

이 중 본고에서는 배기 시스템 내 유동 개선과 관련한 CFD Tool의 적용 사례를 고찰해 봄으로써 엔진 개발에 적용되는 CFD의 현황 및 역할을 함께 살

펴보기로 한다.

배기계 유동 해석

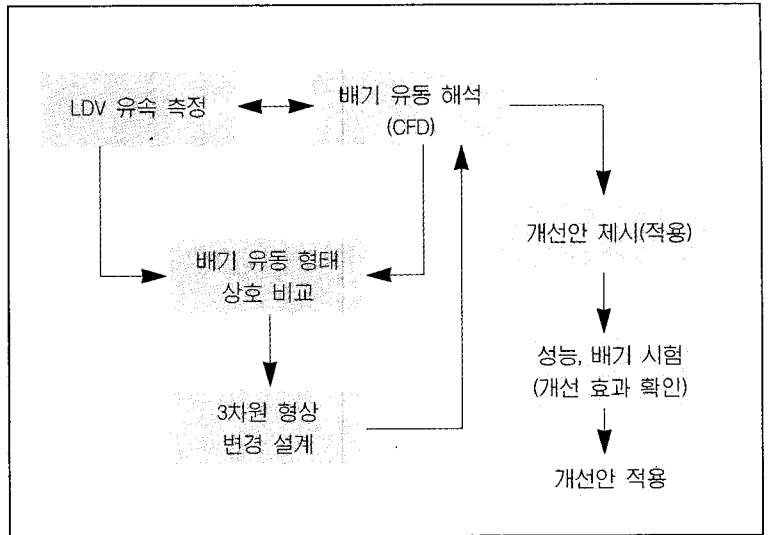
최근 환경 오염에 대한 인식과 관심이 증대되면서 강화된 배기 규제에 대응하기 위해 저공해 자동차 (ULEV (Ultra Low Emission Vehicle), SULEV (Super-Ultra Low Emission Vehicle)) 개발에 자동차 회사들이 많은 노력을 기울이고 있는데, 이를 위해서는 효율적인 배기 시스템의 구축이 필수적이다. 효율적인 배기 시스템의 구현을 위해 자동차 업계에서는 아래와 같은 개선 목표를 염두에 두고 CFD를 엔진 설계에 접목시킬 수 있는 Tool로 적용하고 있다.

- (a) 촉매 내 유동 분포 개선
- (b) 산소 센서 위치의 최적화
- (c) 촉매 활성화 시간 단축
- (d) 배압 상승 억제

위에서 언급된 개선 목표는 상호 간 Trade-off 경향이 존재하기는 하지만, 일반적으로 배기계 유동 개선에 의해 효과적으로 달성 가능성이 가능하다.

배기계 개발에서는 촉매를 주로 한 배기계의 주요 형상 설계 변수 변경 등에 대한 유동 특성 파악이 핵심적인 요소 중 하나인데, CFD를 이용하면 효과적인 파악이 가능하다.

실제, 배기계 내의 유동 현상은 열전달, 화학 반응, 물질 전



〈그림 1〉 CFDTool을 포함한 배기계 개선 Process

달 등이 복합된 물리적 현상이므로, 이를 CFD를 이용하여 정량적으로 정확히 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서, 몇 개의 해석 단계로 분류하여 체계적으로 연구가 수행되어 오고 있다.

1단계는 열전달을 고려하지 않은 유동 특성만을 고려하는 해석이고, 2단계는 촉매 내 화학 반응을 고려하지 않은 유동 및 열전달 해석이고, 3단계는 촉매 내 화학 반응을 포함한 유동 및 열전달 해석이다.

이 중, 1단계와 2단계 해석의 일부분 정도가 상용화된 CFD 코드를 사용하여 엔진 설계 과정과 접목시킬 수 있는 정도로 발전, 실용화되어 있는 반면, 3단계 해석은 아직 배기계 개발 과정에 직접 적용될 정도로 표준화

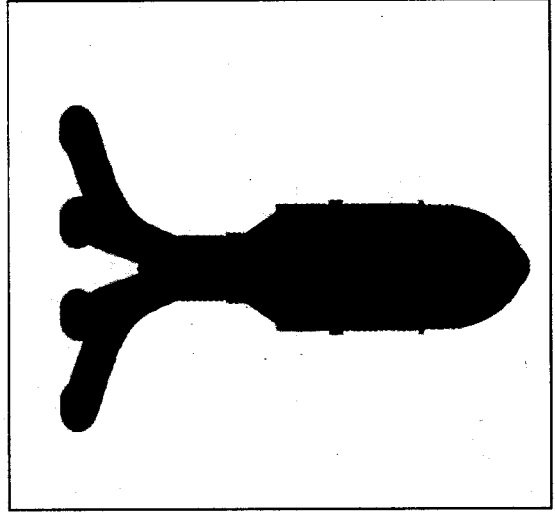
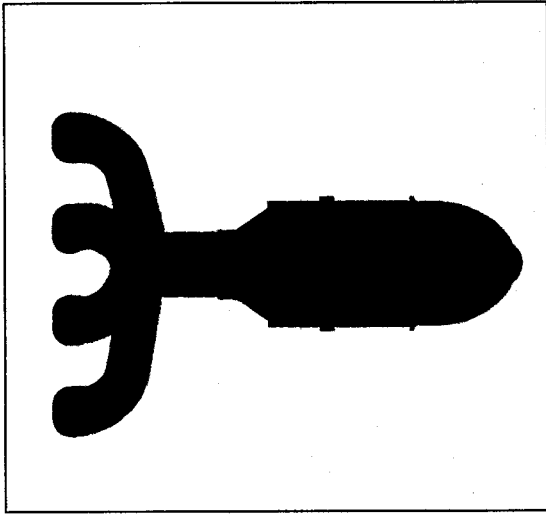
된 Process로 일반화되지 못하고 여러 국내외 연구 기관들에 의해 촉매 내 화학 반응 모델링 등 적극적인 기초 연구가 수행되고 있다.

그림 1은 CFD Tool을 포함한 배기계 개선 과정을 정리하여 나타낸 것으로 배기계 개발 과정 중 CFD를 이용한 해석 기능의 역할을 정확히 파악할 수 있다.

배기계 개선을 위한 CFD Tool 적용 현황을 단계별로 정리하여 살펴보기로 한다.

1) CAD 모델링 및 격자 생성

최근에는 다양한 기능의 CAD 소프트웨어와 CFD 해석을 위한 격자 생성 소프트웨어가 크게 발달하여 3차원 설계와 CFD 해석을 위한 격자 생성을 훨씬 빠른 속도로 (최근에는 거의 동시에)



〈그림 2〉 배기 매니폴드 및 CCC 시스템 3차원 격자 (2가지 사양 (Type A, Type B))

진행할 수 있다. 즉, 3차원 형상 Data를 다양한 형식(IGES, VDA, STL 파일 등)을 통해 격자 생성 소프트웨어에 제공된다.

격자 생성은 전통적으로 CFD 해석 중 가장 많은 시간이 소요되는 부분이지만, 최근에는 다중 블록 격자 생성기(Multi-Block Mesh Generator)와 자동 격자 생성기(Automatic Mesh Generator)의 비약적 발전으로 설계 변경 후 짧은 시간 내에 양질의 격자를 생성할 수 있다.

자동 격자 생성기의 경우, 격자 생성 소요 시간이 수시간에 불과하여 3차원 설계 변경과 격자 생성이 거의 동시에 이루어지는 장점이 있고, 다중 블록 개념의 격자 생성기를 사용하는 경우, 배기계 형상에 대한 다양한 Template를 데이터베이스로 구축하는 기법을 이용하면 양질의

격자를 효과적으로 생성할 수 있는 장점을 보유하고 있다. 이와 같은 격자 생성 시간의 단축은 여러 형상의 개념 설계안에 대한 해석을 엔진 설계 변경 기간 내에 수행할 수 있는 잇점을 가져다 주며, CFD Tool을 여러 설계안에 대한 Screening 과정에 적용, 시제품 제작 전 정성적인 평가를 통해 배기계 개발 기간 단축에 기여할 수 있게 한다.

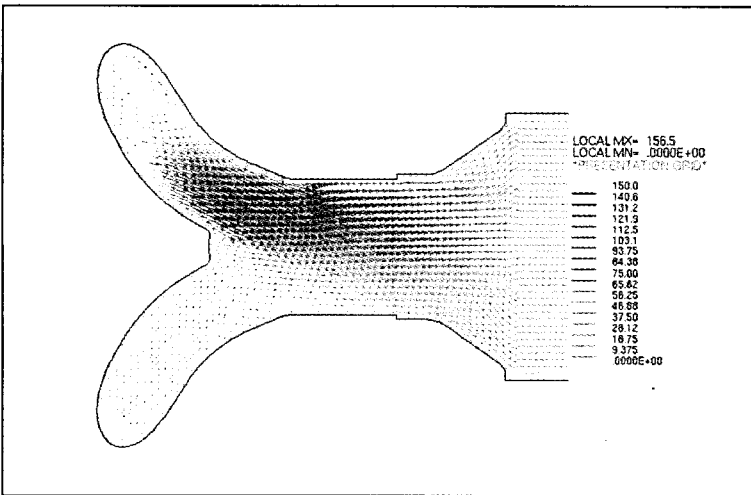
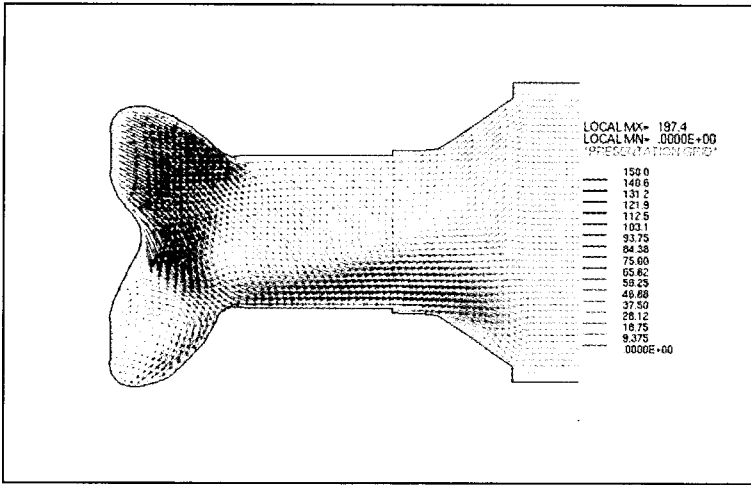
그림 2는 CCC(Close-coupled Catalytic Converter)를 포함한 2 종류의 배기계에 대한 Block 격자 생성기(ICEM-CFD/CAE)를 이용하여 생성된 계산 격자를 나타내고 있다.

2) 초기 및 경계 조건 설정

일반적으로 CFD 해석 결과는 초기 및 경계 조건 설정에 따라 크게 좌우되므로, 정확한 조건

의 지정이 필수적이다. 특히 배기계의 경우, 엔진 작동 조건에 따라 초기 및 경계 조건으로 이용되는 변수(배기 가스의 압력, 속도, 밀도, 온도 등)들이 크게 변화하므로, 정확한 초기 및 경계 조건 설정이 매우 어려운 것이 사실이다.

대개의 경우, 초기 및 경계 조건 설정을 위해서는 유동 측정 데이터를 이용하거나, 1차원 엔진 시뮬레이션 코드를 이용한다. 가장 이상적인 것은 유동 실험에서 얻어진 측정 데이터를 이용하는 방법이지만, 배기계 유동 측정 등의 어려움으로 인해 데이터 확보가 용이하지 않다. 최근에는 1차원 엔진 시뮬레이션 코드와 CFD 코드를 연결하여 계산을 수행하는 기법이 초기 및 경계 조건 제공의 새로운 방법으로 부각되어 점진적으로 적



〈그림 3〉 계산된 유동 속도 분포 (배기매니폴드 및 CCC 접합면)
(3번 실린더의 배기 밸브 열린 경우) (Type A, Type B)

용되기 시작하는 실정이다.

3) 계산 수행

3차원 배기계 형상에 대한 유동 해석 시 가장 문제되는 또 하나의 문제는 계산 수행 소요 시간이다. 90년대 초반까지만 하더라도 전산기 계산 용량 한계

때문에 실제 3차원 배기계 형상에 대한 비정상 상태 유동 해석은 자동차 업계의 엔진 개발 차원에서는 효과적으로 수행되지 못하고, 정상 상태 해석에 주로 국한되었다. 그렇지만, 정상 상태 해석만으로는 요즘 주관심 대상이 되고 있는 CCC가 장착

된 배기계에서의 변화하는 배기 유동 특성에 대한 고려에는 한계가 있어, 비정상 상태 해석이 필수적이다.

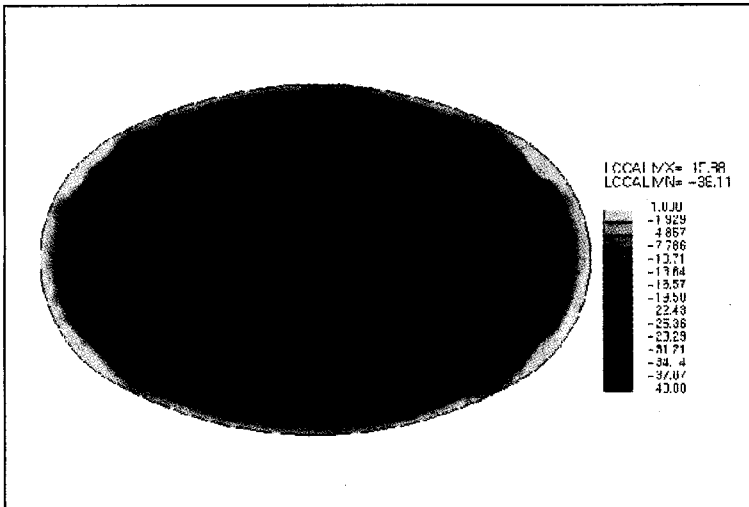
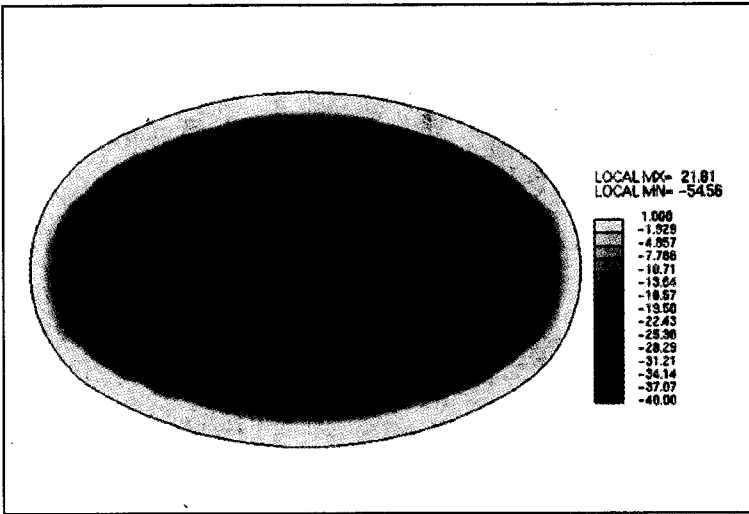
최근에는 전산기 계산 속도의 증대 및 병렬 처리 기법 (Parallel Processing)의 적용으로 계산 소요 시간이 크게 단축되어 엔진 개발 과정에 비정상 유동 해석 적용이 일반화되어 있고, 이를 통해 배기계 설계 변경 기간⁵ 내에 해석 결과 도출이 가능한 상태에 있다.

물론, 매우 많은 격자 수를 포함하는 해석 모델이나, 촉매 내 화학 반응과 같은 복잡한 물리적 현상을 모두 포함하는 경우에 대한 해석 시간 단축에는 아직 한계가 있지만, 전산기의 성능 개선에 따라 점진적으로 해결될 것으로 전망되므로, 향후 앞에서 언급된 3단계의 해석도 엔진 개발 과정에 실용화된 Process로 적용될 것으로 판단된다.

4) 해석 결과 검증

CFD Tool을 이용한 해석 결과를 배기계 개선 설계에 적용하기 위해서는 해석 결과의 신뢰도 검증이 선행되어야 한다.

실제 엔진 개발 시 CFD Tool의 해석 신뢰도 검증에는 유동 가시화 기법(LDV (Laser Doppler Velocimetry), PTV(Particle Tracking Velocimetry) 등)을 이용한 측정치에서 얻어지는 Local



〈그림 4〉 촉매 내 유동 분포 (첫번째 촉매 전면)
(3번 실린더의 배기 밸브 열린 경우) (Type A, Type B)

변수값(예 : 배기 유속 등) 과의 비교, 엔진 및 차량 시험에서 얻어지는 Global 값과의 상관 관계 정립 등이 함께 수행되는데, 배기계 자체의 급격한 유동 특성 변화 (고온의 배기 가스, 연소로 인한 배기 유량의 급격한 변동 등) 때문에 신뢰도 높은 비교 데

이터 측정치 확보에 어려움이 있어, 신뢰도 검증에 다소 제한이 있는 실정이다.

5) 결과 분석 및 평가

CFD를 이용한 배기계의 유동 해석 평가는 여러 종류의 형상 설계 변경안에 따른 촉매 전후의

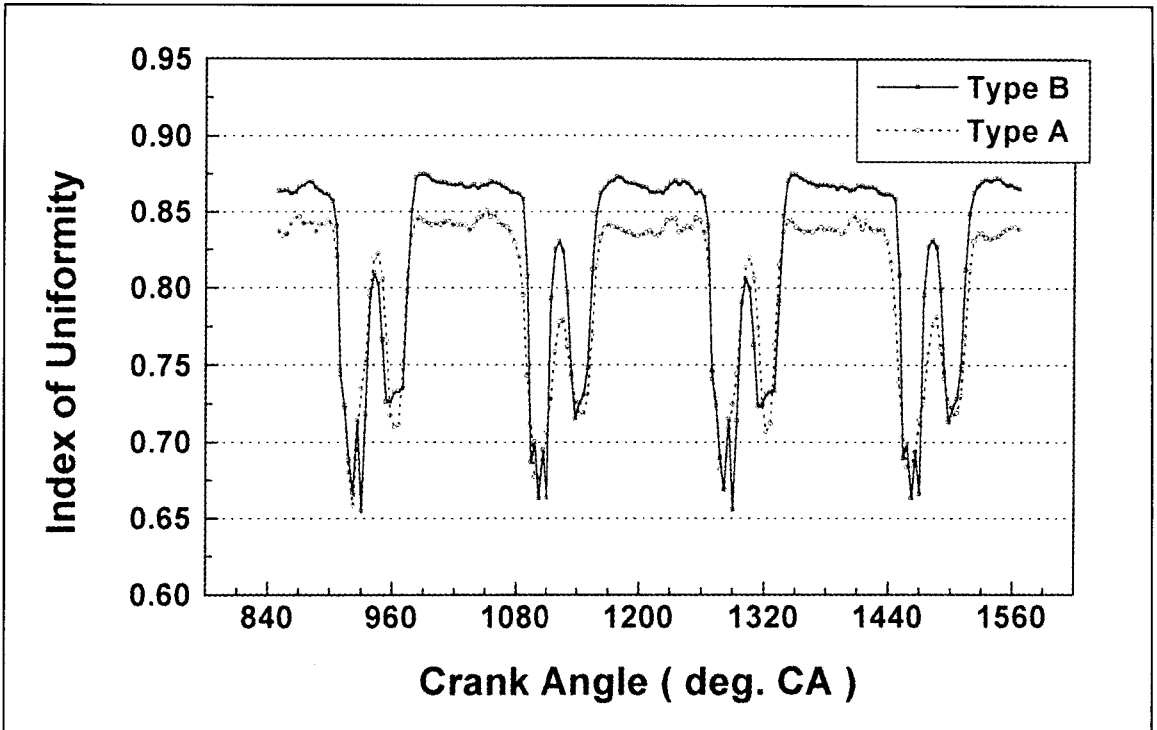
유동 분포를 고찰하고, 정량화하여 각 사양 간의 유동 분포의 차이점을 파악하는 것이 주안점이다. 다행히 이를 효과적으로 수행하기 위해서는 열전달을 고려하지 않은 유동 해석으로도 충분한 것으로 알려져 있다.

그림 3 및 그림 4는 2종류의 배기계에 대해 상용 CFD 코드인 STAR-CD를 이용한 비정상 유동 해석을 통해 얻어진 촉매 내 유동 분포를 나타낸 것이다. 위와 같은 촉매 내 유동 분포의 정성적 파악과 더불어 정량화된 유동 균일화 평가 인자를 도입하여 각 사양 간 비교, 평가를 할 수 있다.

이 때 주로 사용되는 인자는 유동 균일화 지수(Uniformity Index)로 촉매 내 유동 균일화 정도를 정량화하여 나타내는 것으로 값이 클수록 유동 특성이 유리함을 나타낸다. 그림 5는 4행정 엔진의 크랭크각에 따른 촉매 전면의 유동 균일화 지수를 나타낸 것이다. 일반적으로 차량에 배기계 장착 시 Lay-out을 고려하여 유동 균일화 지수가 설계 목표치에 도달할 수 있도록 촉매 전후의 형상을 변경, 최적화하는 데 기초 자료로 이용된다.

결론

최근 전산기의 계산 속도의 급속한 발전, CAD 및 격자 생성



〈그림 5〉 크랭크각에 따른 유동 균일화 지수 (Type A, Type B)

소프트웨어 기능의 획기적 개선 등으로 CFD는 엔진 내 열유동 현상을 3차원적으로 자세히 파악하고, 개선안을 제시할 수 있는 Tool로 엔진 개발에의 적용이 국내외적으로 급격히 확대되고 있는 추세이다.

CFD 코드에 적용, 제공되는 엔진 내 열, 유동 현상에 대한 물리적 모델들의 발전 속도가 다

소 느린 제한점이 있기는 하지만, CFD는 엔진 내 각 부품 등에 대한 열유동 현상을 시작품 제작 전에 파악, 평가하여 형상 설계 변경에 기초 자료를 제시하여, 엔진 개발 기간을 단축하고, 개발 비용을 효과적으로 절감할 수 있는 유용한 엔진 개발 Tool로 인식되고 있다.

향후, 상용화된 CFD 코드 등

의 기능 강화가 폭넓게 진행되면 엔진 설계 Process에 CFD 코드가 직접 접목되어 표준화된 Tool로 엔진 개발의 보다 다양한 분야에 적용될 것으로 판단되며, 국내 자동차 업계에서도 엔진 개발에의 적용이 보다 활발해질 것으로 기대된다.