

자동차용 엔진 설계에의 CAE 활용

염 대 준*
(*현대자동차 차량개발팀)

1. 머리말

자동차의 심장부라고 할 수 있는 엔진의 설계 개발에 있어서 CAE(computer aided engineering)의 활용이 개발 비용 및 기간 단축과 설계 품질의 향상에 효과적이며, CAE가 제품개발의 초기에 수행될 수록 그 효과가 큰 것으로 받아 지고 있다.⁽¹⁾ 한편, 컴퓨터 하드웨어와 소프트웨어의 발전으로, 설계 시에 컴퓨터의 이용이 크게 증가되고 있다. 특히, 솔리드 모델(solid model)을 기본으로 하는 설계와 이를 이용한 동시 공학의 도입은 해석과 그 결과의 설계 반영이 용이한 환경을 주고 있다. 따라서, 완성차 업체에서는 보다 신뢰성 있는 해석을 신속히 수행하기 위한 해석 기술의 개발과 CAE 적용 분야의 확대를 위해 노력하고 있다.

본 고에서는 엔진 및 변속기의 개발에 활용되는 CAE의 사례를 진동 소음 분야를 위주로 소개하고자 한다.

2. 엔진 개발에의 CAE 적용

엔진의 설계 개발을 위하여는 열역학, 유체 역학, 동력학 그리고 고체역학 등의 종합적인 해석 기술이 소요된다. 이러한 해석 기술들은 설계의 적절한 시점에 수행되어 성능, 내구, 그리고 소음 진동 등에 대한 종합적인 평가와 개선으로 경쟁력있는 엔진이 개발되도록 한다.

2.1 설계 단계별 CAE

엔진의 설계 과정에서 실시되는 CAE 절차의 예를 그림 1에 개략적으로 도시하였다. 1차 설계의 완료 후, 시제품 제작 및 1차 평가 시험이 진행된다. 평가 시험에서 성능, 내구, 진동 소음 등의 여러 가지 문제

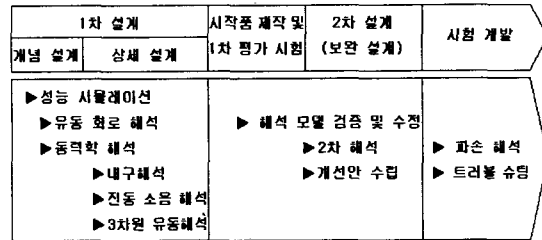


그림 1 개발 단계별 CAE

가 발생될 수 있으며, 이 문제점들을 해결하기 위해 2차 설계, 즉 보완 설계를 실시한다. 보완 설계에 따라 시제품이 다시 제작되고 양산 전까지 다양한 평가 시험이 계속되어, 양산 가능한 제품의 엔진이 개발된다. 1차 설계는 개념 설계와 상세 설계의 두 단계로 나눌 수 있으며 각각의 설계 단계에서의 CAE 수행 내역은 그림 1에 나타난 바와 같다. 즉, 개념 설계 시에는 주요 부품들의 배치, 주요 치수 그리고 각종 시스템들의 적용에 따른 각종 성능에의 영향성 예측이 중요하다. 따라서, 엔진의 성능 시뮬레이션이 필수적이며, 이어서 엔진 율활과 냉각 회로 시뮬레이션과 같은 유동 회로 해석, 크랭크 트레인과 밸브 트레인 등에 대한 동력학 해석을 수행함으로써 여러 가지 설계 대안들 간의 장단점을 파악하고, 최선책을 선택한다. 3차원 솔리드 모델이 완성되는 상세 설계 단계에서는 3차원 전산 유동 해석(computational fluid dynamics), 응력 해석을 통한 내구 평가, 그리고 진동 소음 해석 등을 실시하여 각 부품의 세부적인 최적화 설계를 유도한다. 1차 설계 시에 실시된 해석의 결과는 1차 평가 시험의 결과와 비교하여 검증되며 필요에 따라서 해석 모델을 보다 정밀하게 수정한다. 평가 시험에서 발생된 문제점에 대해서는 재 해석을 실시하여 개선안을 도출하고, 그 결과를 2차 설계에 반영한다. 이 과정을 통해 1차 해석의 신뢰도를 확인할 수 있으며, 시험 결과에 대해 검증된 해석 모델을 확보함으로써 이후 시험 개발 단계에서 발생될 문제에 대한 파손 해석이나 트러블 슈팅

* E-mail : yeomdj@shinbiro.com

(trouble shooting) 등에 신뢰성 있고 신속한 해석 수행이 가능하다.

2.2 해석 분야별 CAE

(1) 유동 해석

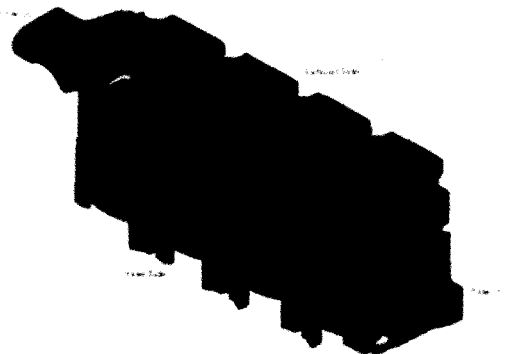
유동 해석의 대표적인 항목으로는 윤활 회로 및 냉각 회로 해석, 엔진 냉각수 유동 해석, 흡기 및 배기계 유동해석, 베어링 윤활 해석 등을 들 수 있다. 유동 해석을 위하여는 3차원 CFD 해석이 주로 실시되며, 엔진 내의 워터 자켓(water jacket)에 대한 3차원 유동 해석의 예를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 (a)는 CFD를 위한 실린더 블럭과 헤드 워터 자켓의 해석 모델을 보여 주고 있으며, (b)에서 실린더 헤드의 한 단면에 대한 냉각수 유동의 속도 분포를 볼 수 있다. 유동 해석에 의해, 관심 부위에서의 유동 속도의 목표 만족 여부를 사전에 평가하고, 더욱 원활한 유동을 위한 구체적인 형상을 도출한다. 그 밖에, 엔진 연소실에 대한 3차원 유동 및 연소 해석으로 엔진의 성능은 물론 배기 가스 발생 기구 및 그 절대량을 예측하려는 노력도 학계와 업체에서 활발히 진행 중이며, 그 기술은 부분적으로 엔진 개발에 사용되고 있다.^(2, 3)

(2) 내구 해석

연소실내에 작용하는 폭발력과 엔진의 운동에 수반하는 관성력, 그리고 엔진 고온 작동에 기인한 열

피로(thermal fatigue)가 엔진 부품 파손의 주요 원인이다. 크랭크축, 커넥팅 로드 등의 운동 부품이 폭발력과 관성력의 영향을 많이 받고 피스톤, 실린더 헤드, 실린더 블럭 그리고 배기 매니폴드와 같이 연소 가스 혹은 배기 가스에 노출되는 부품이 열응력을 많이 받는다. 내구 평가를 위하여는 주로 선형 유한 요소법을 이용한 응력 해석이 수행된다. 해석 결과를 사용 재료의 강도와 비교하여 설계된 부품의 내구성 확보 여부를 판단한다. 최근에는 고온에서 운전되는 부품의 내구 평가를 위해 고온시의 물성치를 적용하고 크리프(creep) 및 대변형을 고려한 비선형 해석을 실시한다. 이 후, 그 결과를 이용한 피로 평가를 실시하여 고온 부품의 내구수명을 정확히 예측하려는 해석 기술이 개발되고 점차 보편적인 해석 기술로 자리잡고 있다.^(4, 5)

부품 파손에 대한 내구 평가 외에도 커넥팅 로드와 메인 베어링 캡 등과 같이 베어링이 장착되는 부분의 변형은 베어링의 내구와 윤활 성능에 큰 영향을 미치므로, 그 변형량은 물론 변형 형상의 예측 또한 중요하다. 커넥팅 로드의 유한 요소 모델과 베어링이 지지되는 대단부의 변형 형상을 그림 3에 나타내었다. 한편, 연소실을 구성하는 실린더 보어(cylinder bore)는 실린더헤드 볼트의 체결력, 온도의 상승, 폭발 압력의 작용에 의해 가공시의 원통 형상을 유지할 수 없다. 실린더 보어의 변형은 경우에 따라서, 배기 가스 유출, 오일 소모량 증가, 피스톤 마찰력 증대 등의 악영향을 끼칠 수 있으므로, 시뮬레이션에 의해 변형량을 예측하고 이의 억제를 위한 설계 대응이 필요하다.



(a) 유동 해석 모델



(b) 실린더 헤드 단면의 유속 분포
그림 2 냉각수 유동 분포 해석

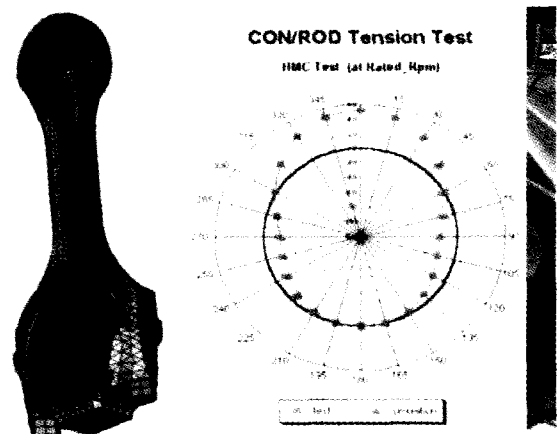


그림 3 코넥팅 로드의 유한 요소 모델 및 대단부 변형 형상

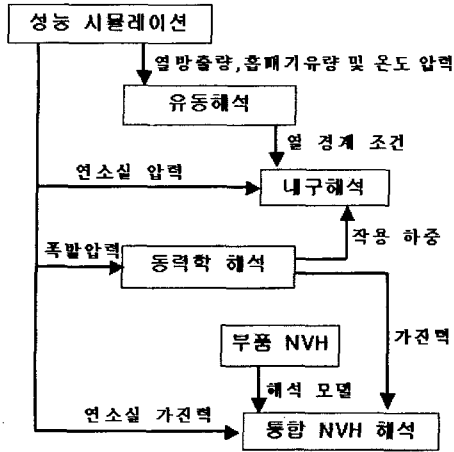


그림 4 해석 항목간의 데이터 교환

(3) 진동 소음 해석

엔진 진동 소음의 저감을 위해, 부품의 진동 특성 해석, 밸브 트레인이나 크랭크 트레인 등에 대한 동적 거동 해석 그리고 전체 엔진에 대한 강제 진동 및 방사 소음 해석 등이 설계 단계에서 수행된다. 이에 대하여는 다음 절에서 상세히 설명하고자 한다.

그림 4에서 보듯이 성능 시뮬레이션의 결과물인 연소 압력, 열 방출량, 배기 가스 유동량 및 온도 등의 정보는 타 해석의 경계 조건과 하중 조건의 결정을 위해 사용된다. 또한 냉각수 유동 해석 결과는 내구 해석 시의 열 경계 조건을 제공하며, 또 동역학 해석으로부터 부품에 작용하는 하중 또는 시스템에 작용하는 가진력을 얻게 된다. 즉, 개개의 해석은 그 자체의 결과뿐 아니라 다른 해석에 부과될 경계 조건의 수립을 위하여도 필요하다. 따라서, CAE의 효과적인 수행을 위하여는 해석 결과의 소요 시점, 해석의 소요 기간, 해석을 위한 필수 입력 데이터 등을 고려하여 설계 시점별 해석 내용 및 수행 순서 등의 해석 절차를 사전에 면밀히 검토하여야 한다. 최근에는 해석 기술의 진보와 컴퓨터 하드웨어의 발전으로 좀 더 복잡한 해석들이 가능해져서 여러 해석 분야를 통합한 해석이 시도되고 있다. 즉, 엔진의 온도 분포 해석을 위해서는 냉각수에 대한 유동 해석의 결과로부터 열 경계 조건을 산출한 후, 유한 요소법을 이용하여 엔진 부품의 온도 분포를 예측하던 것에서, 유체와 고체 부에 대한 통합 해석 기술을 사용하여 보다 용이하게 더욱 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다. 또한, 크랭크축계의 진동 해석 시에도 크랭크축의 3차원 유한 요소 모델을 사용하여, 크랭크축의 동적 거동과 국부 응력을 동시에 계산하기도 한다.

3. 진동 소음 해석 사례

엔진과 변속기의 진동 소음 저감은 자동차의 안락성 향상을 위해 추진되며, 그 중요성이 점점 더 강조되고 있다. 저진동 저소음을 위한 설계는 경량화의 요구와 상반되는 경우가 많으므로 시뮬레이션을 통한 설계 최적화가 필수적이다. 진동 소음은 부품 단위의 강성뿐 아니라 엔진의 기본 골격 및 변속기와의 결합 강성, 각종 주변 장치들의 배치, 그리고 운동 부품의 질량 및 강성 등의 복합 요인에 의해 결정된다. 따라서, 부품 단위 및 시스템 단위의 최적화를 위해 해석을 수행하며, 나아가 엔진과 변속기가 결합된 파워트레인 전체 진동과 소음을 예측함으로써 저소음과 저중량의 상반된 설계 목표를 달성한다.

3.1 부품 해석

엔진 소음에 영향을 주는 구성 부품에 대해서는 진동과 방사 소음 특성에 대한 설계 목표가 있어야 하며, 설계된 부품이 설정된 목표를 만족하는지의 여부가 설계 시에 확인되어야 한다. 해석에 의해 설계된 부품의 목표 달성 여부를 평가하고, 그 결과에 따라, 보강 또는 경량화 설계를 추진한다. 그림 5는 해석에 의한 부품 최적 설계의 예로서, 헤드커버에 대한 진동 특성의 평가와 개선 결과를 보여 주고 있다. 개선 전은 고유 진동수의 설계 목표를 만족하지 못하였다. 설계 제약 조건 내에서의 형상 변경과 리브(rib)의 적절한 배치에 의해 강성을 보강함으로써 개선 후의 설계는 엔진 가진과의 공진을 회피하기 위한 고유진동수 목표를 만족하였다. 한편, 부품의 강

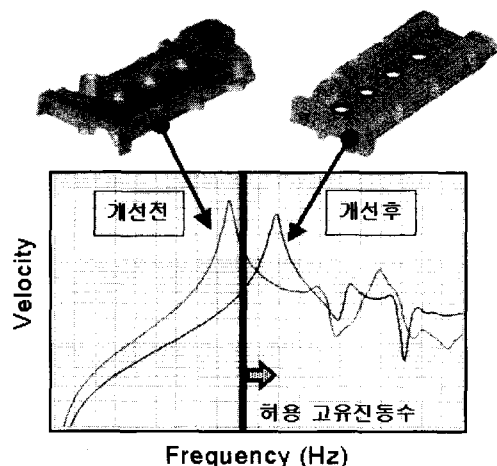


그림 5 부품진동 해석 예

리브 보강



보강전

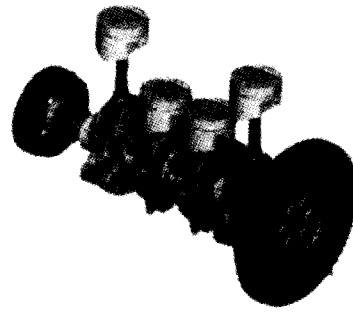
보강후

그림 6 변속기 케이스의 방사 소음 특성 해석

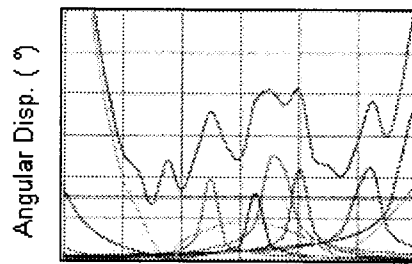
성 유지에 기여하지 않는 부분을 제거 또는 축소하여 부품의 중량을 감소시켰다. 이와 같은 단위 부품에 대한 최적화 해석은 엔진이나 변속기 설계 시에 실시되며, 실린더 블록, 실린더 헤드, 오일팬, 각종 커버류, 보기류 지지 브라켓 및 엔진 지지 브라켓, 변속기 케이스 등에 대해 흔히 실시된다. 그림 6은 변속기 케이스에 대한 시뮬레이션 결과의 예로서, 보강전의 방사 소음 특성 차이를 보여주고 있다.

3.2 시스템 해석

피스톤의 직선 운동을 크랭크축의 회전 운동으로 바꾸어 주는 크랭크 트레인은 그림 7의 (a)에서 보듯이 피스톤, 커넥팅 로드, 크랭크축 그리고 크랭크축 전단에 설치되는 댐퍼 풀리와 후단에 설치된 플라이휠로 구성된다. 연소실내 폭발 압력은 실린더 헤드와 실린더 블록에 진동을 일으키는 한편 피스톤, 커넥팅로드를 통해 크랭크축에 전달된다. 또한 피스톤과 커넥팅로드의 습동 운동에 의해 발생한 관성력 또한 크랭크축에 작용한다. 크랭크축은 회전하면서 동시에 굽힘과 비틀림 진동을 하고 크랭크축을 지지하는 메인 베어링에 변동 하중을 준다. 이와 같은 크랭크 트레인의 동적 거동은 엔진의 진동과 소음에 큰 영향을 준다. 따라서, 크랭크축 진동의 억제에는 엔진의 진동과 소음 저감을 위해 매우 중요하다. 이를 위해 피스톤과 커넥팅로드의 경량화, 고 강성의 크랭크축 설계, 댐퍼 풀리의 최적 튜닝(tuning) 등의 노력이 필요하고 이는 해석의 수행으로 가능하다. 그림 7(b)는 엔진운전시의 크랭크축 비틀림 진동의 해석 결과를, 그림 7(c)는 크랭크축의 동적 거동에 의한 메인 베어링 반력의 추이를 보여 주고 있다. 베어링 반력은 추후에 수행될 엔진 전체 진동 및 방사 소음 해석을 위한 주요 입력 데이터이다. 또한 크랭크 트레인의 거동에 따라 크랭크축에는 응력이 발생된다. 그림 7(d)에 크랭크축 응력 분포의 예측 결과를 나타내었다.

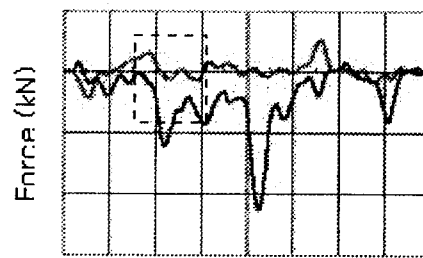


(a) 크랭크트레인 모델



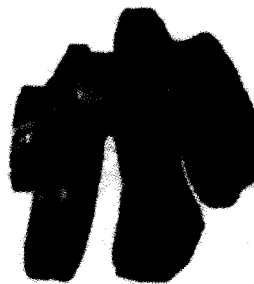
Engine Speed (rpm)

(b) 크랭크축 진동 해석



Crank Angle (Deg)

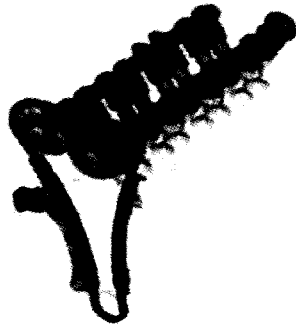
(c) 메인베어링캡 반력



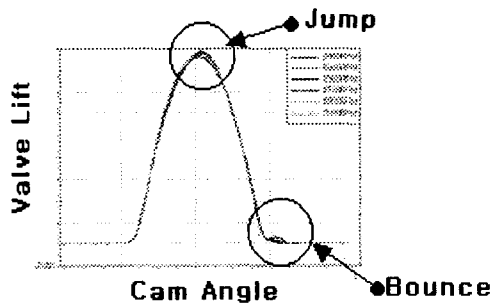
(d) 크랭크축 응력 해석

그림 7 크랭크 트레인 해석

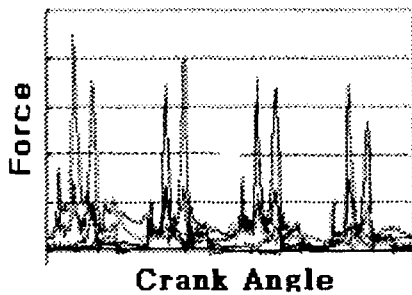
한편, 밸브트레인은 밸브의 개폐 운동을 위해 필요한 시스템으로서 크랭크축의 동력을 이용하여 캠축이 회전하고, 캠축의 회전 운동이 캠 기구를 통해 밸브를 직선 운동하게 한다. 크랭크축과 캠축 사이에는



(a) 밸브 트레인 모델



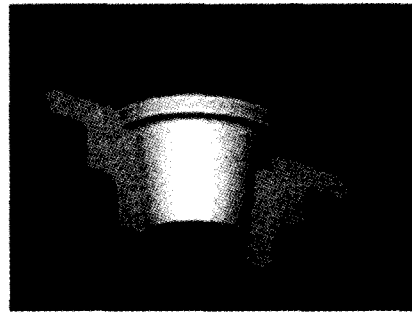
(b) 밸브 거동



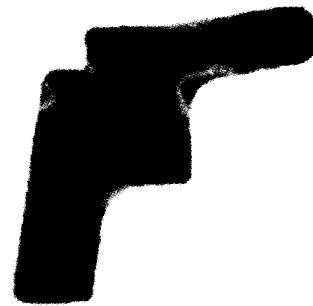
(c) 캠베어링 반력

그림 8 밸브 트레인 동력학 해석

타이밍 벨트(timing belt) 혹은 타이밍 체인(timing chain)이 설치되어 동력을 전달한다. 밸브의 열림은 캠 로브(cam rob) 형상에 의해 결정되고, 밸브의 닫힘을 위해 밸브 스프링이 장착된다. 그림 8(a)에는 타이밍 체인에 의해 구동되는 더블 오버 헤드캠(double over head camshaft) 형식의 밸브 트레인에 대한 솔리드 모델의 예를 보여주고 있다. 밸브 트레인은 캠축 및 캠축 지지 베어링 등의 유연성(flexibility)과 여러 운동부의 질량, 밸브 스프링의 거동이 서로 연관되면서 복잡한 동적 운동을 하게 된다. 그림 8(b)는 밸브트레인 시뮬레이션의 대표적인 결과로서, 캠축 회전 각도에 대한 밸브 열림 양의 추이를 나타낸 그림이다. 밸브의 운동은 캠축의 회전



(a) 밸브리테이너 모델



(b) 단면 응력 분포

그림 9 밸브 리테이너 응력 해석

속도가 증가함에 따라 불안정해지고 임계 속도 후에는 점프(jump)나 바운스(bounce)와 같은 이상 작동을 일으킨다. 또한, 밸브가 열리고 닫히면서 실린더 헤드의 밸브시트에 충격적인 힘을 가하며, 캠축은 이를 지지하는 베어링에 주기적인 가진력을 주어 엔진 소음의 원인이 된다. 그림 8(c)는 해석 결과 산출된 캠 베어링 반력의 추이를 보여 주고 있다. 엔진의 최고 운전 속도에서 밸브트레인의 안정된 거동을 보장하고, 발생하는 가진력을 최소화하기 위하여는 구성 부품의 경량화가 필요하다. 밸브트레인 구성부품 경량화를 위해 응력 해석이 수행되며 그림 9에 밸브 리테이너에 대한 해석 예를 제시하였다. 시뮬레이션을 이용한 설계 인자들의 영향성 검토에 의해 캠축 강성의 최적화와 캠 로브의 최적 형상을 결정한다. 밸브 스프링의 강성은 밸브 트레인에서 발생하는 마찰 저항에 큰 영향을 주므로 되도록 작게 하여 엔진의 효율을 높인다. 이와 같은 시스템 동적 거동 해석은 여러 가지 설계 변수들에 대한 엔진 내구, 진동 소음등에의 영향을 사전에 검토할 수 있게 하여 최적 형상의 도출과 부품의 적절한 선택을 가능하게 한다. 변속기내의 기어, 축, 그리고 베어링으로 구성되는 기어 트레인에 대하여도 동적 거동 해석이 실시되고 있다. 기어 트레인 해석에 의해 변속기 내부

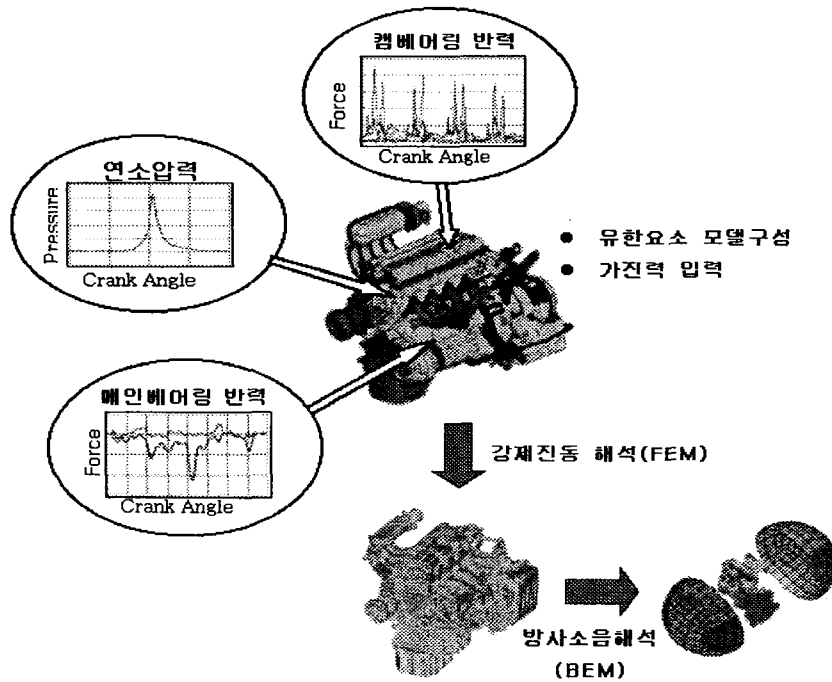


그림 10 파워트레인 진동 소음 해석 절차

에 있는 축 지지 베어링에 대한 동적 변동 하중을 계산함으로써 변속기의 중요 문제의 하나인 기어 하인 소음의 예측 및 저감을 위한 노력을 하고 있다.⁽¹¹⁾

3.3 파워트레인 통합 해석

3.1절에서 설명한 바와 같이 엔진 구성 부품에 대해 구조를 최적화 한 후, 이들의 조합인 파워트레인에 대해 진동 특성 해석 및 방사 소음 해석을 실시하여 설계 개선점을 찾아낸다. 즉, 전체 파워 트레인의 고유 진동수와 모드 형상의 계산으로 엔진에 장착된 보기류들의 고유 진동수와 엔진 전체 진동과의 공진 여부 등의 파악이 필요하다. 또한 시스템에 대한 동력학 해석으로부터 산출된 가진력을 파워트레인의 유한 요소 모델에 적용하여 방사 소음 수준을 확인하고, 부품별 소음 기여도를 파악하여 저소음 엔진 설계를 위한 개선 방향을 설정한다. 그림 10에는 파워트레인의 강제 진동 및 소음 해석의 절차를 간략히 도시하였다. 우선 엔진의 유한 요소 모델에 가진력을 주어서 강제 진동 해석을 실시하여 엔진 각 부위의 진동을 예측한다. 가진력으로는 그림에 나타난 연소압력, 메인 베어링 하중, 캠 베어링 하중과, 그 밖의 밸브 충격력, 피스톤 슬랩 힘(piston slap force), 변속기 베어링 하중 등을 고려 할 수도 있다.

강제 진동 해석에 의해 계산된 엔진 표면 진동으로부터 BEM(boundary element method)을 이용한 방사 소음을 계산하고, 소음 스펙트럼 분석, 부품별 소음 기여도 분석 등의 결과 처리를 실시한다. 이러한 일련의 분석 작업 후 소음의 저감 방안을 도출하고 이를 다시 해석 모델에 적용하여 그 효과를 점검한다. 이와 같이 해석, 개선안 제시, 적용 및 확인의 반복에 의해 저소음 엔진을 위한 최적 설계를 이룩한다. 일련의 해석 과정의 순조로운 진행을 위하여는 해석자와 설계자간의 긴밀한 커뮤니케이션이 매우 중요하다. 또한, 주어진 설계 기간에 모든 작업을 완료하여야 하므로 설계와 해석간의 모델 공유 시스템 등의 환경과 함께, 신속한 솔리드 및 해석 모델 작성 기술 등의 기능적인 요소들이 뒷받침되어야 한다.

4. 결 론

이상에서와 같이 엔진 개발에 활용되는 CAE의 사례를 소개하였다. CAE는 엔진의 설계 개발에 있어 품질의 향상, 개발 비용과 시간의 단축 등을 위해 매우 유용하게 활용되고 있다. 향후, 해석 기술과 컴퓨터의 발전으로 더 크고 복잡한 해석이 가능해지고 CAE의 활용은 더욱 확대될 전망이다. 그러나, CAE

의 효과를 극대화하기 위하여는 (1) 해석 신뢰도의 향상, (2) 모델링 및 해석 시간의 단축, 그리고 (3) 사용 재질에 대한 물성 데이터 확보 등이 절실하다. 설계 단계의 해석, 시험 결과와 해석 결과의 비교 검증을 반복하여 해석 경험을 축적함으로써 해석 신뢰도의 향상은 가능하며, 자동 모델링 및 새로운 해석 기술의 발전으로 모델링과 해석 소요 시간은 점점 단축될 것으로 기대된다.

궁극적으로 CAE는 시제품 제작과 평가 시험을 완전히 대체할 가상 엔진(virtual engine)의 구축을 지향한다. 이는 이상적인 목표이나 해석 기술의 향상 및 소프트웨어의 개발과 함께 해석자의 부단한 노력으로 가능해질 것이다.

참 고 문 헌

- (1) Shih S., Kuan S., Keeney C., Ledesma R., 1998, "Heavy and Medium Duty Vehicle Powertrain Virtual Prototyping", SAE 982824
- (2) Patterson, M. A., Fleitz R. D., 1998, "Modeling the Effects of Fuel Spray Characteristics on Diesel Engine Combustion and Emission", SAE980131
- (3) Iwamoto Y., Noma K., Yamauch T., Ando H., 1997, "Development of gasoline direct injection engine", SAE970541
- (4) Koch F., 1999, "Low Cycle Fatigue of Aluminum Cylinder Heads-Calculation and Measurement of Strain under Fired Operation", SAE Paper, 1999-01-0645
- (5) Watanabe Y., 1998, "Thermal Fatigue Life Prediction for Stainless Steel Exhaust Manifold", SAE980841, International Congress and Exposition, Detroit.
- (6) Beacham M. R., Bell D.J., Powel, N. N., 1999, "Development of Transmission Whine Prediction Tools", SAE Paper, 1999-01-1767