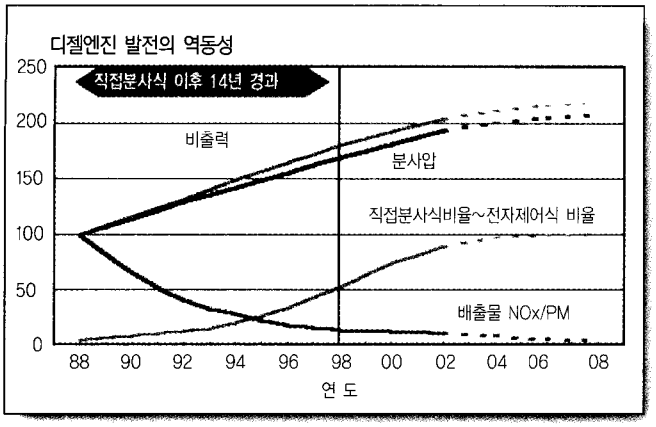
고속직접분사식(HSDI) 디젤 엔진의 기술 현황

글 ■ 최 태 우 / 현대자동차 연구개발본부 승용디젤엔진개발실, 수석연구원 e-mail ■ twchoi@hyundai-motor.com

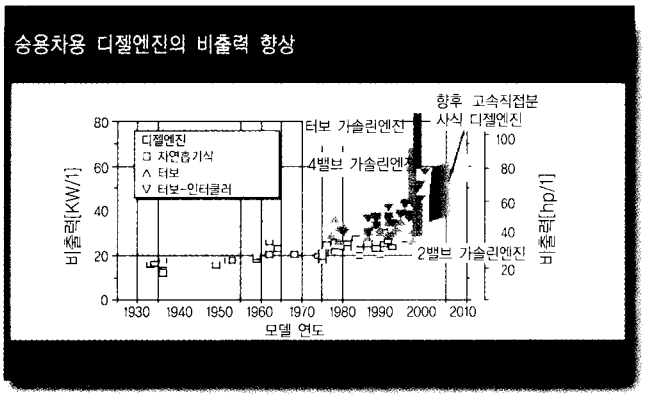
이 글에서는 최근 승용 및 RV 차량에 대한 탑재가 급격히 증가하고 있는 고속직접분사식 디젤엔진의 기술 개발 현황에 대해 소개하고자 한다.

최근까지도, 디젤엔진은 가솔린 엔진에 비해 뛰어난 연비 및 내구성에도 불구하고 낮은 비출력, 소음 · 진동 및 매연 배출 등 상품성 측면에서의 열세로 인해 승용차에는 탑재할 수 없는 엔진으로 인식되어 그 적용 범위가 상용 차량에 국한되어 왔다. 그러나 최근 디젤엔진의 핵심 기술인 연료분사장치 및 과급장치의 괄목할 만한 기술 발달에 힘입어 과거 디젤엔진의 약점이었던 비출력 및 소음, 진동 측면에서 가솔린엔진에 필적하는 수준으로 상품성이 향상되었고, 지구온난화 방지를 위한 이산화탄소 배출 규제에 대한 유력한 대안으로 친환경적인 엔진이라는 인식이 확산되면서 서유럽 시장을 중심으로 디젤 승용 차량의 시장 점유율이 급격히 증가하고 있으며, 고속직접분사식(HSDI : High Speed Direct Injection) 디젤엔진의 개발 기술은 완성차 메이커의 경쟁력을 좌우할 수 있는 핵심 기술로 인식되고 있다. 현대-기아 자동차도 이와 같은 디젤엔진의 기술 개발 추세에 발맞추어 경쟁력을 갖춘 디젤엔진을 개발하여 첨단 디젤엔진의 각축장인 서유럽 시장에 수출하고 있으며, RV 및 SUV 차량은 내수 시장에서도 판매하고 있다. 여기서는 자동차회사의 핵심 기술로 떠오르고 있는 디젤엔진의 기술 현황을 성능, 소음, 진동 및 연비 관점에서 살펴보고 국내 업체들이 디젤엔진 개발에 박차를 가할 수 있는 기반 조성에 대한 제언을 덧붙이고자 한다.

디젤엔진을 승용차에 탑재하고자 했던 시도는 고속직접분사식 디젤엔진 개발이 본격화된 '80년대 말 이전에도 있었으나, 대부분 실패로 끝났는데, 그 주된 이유는 당시 승용차에 탑재하고자 했던 디젤엔진은 간접분사식으로서 상품성 측성에서 핵심이라 할 수 있는 비출력, 소음, 진동 등이 가솔린엔진에 비해 열세였다는 점과 배출물 대응 기술이 미흡하여 다량의 스모크를 배출하여 소비자들로 하여금 디젤엔진은 청정하지 않고 환경 및 인체에 유해한 엔진이라는 인식을 심어준 데 있었다. 그러나 1980년대 후반부터 디젤엔진 연료분사장치와 터보차저 및 인터쿨러 등 과급장치의 비약적인 기술 발전과 함께 직접분사식 디젤엔진의 개발이 본격화되면서 비출력, 소음 진동 및 배출물



디젤엔진의 연료 분사 압력, 비출력 및 배출물 향상 추이



디젤엔진의 출력 증대 추이

등 모든 측면에서 디젤 진의 상품성이 비약적으로 개선되었다.

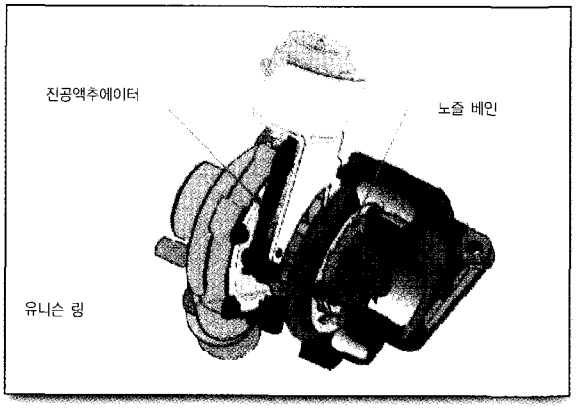
디젤엔진의 출력 및 배출물 향상을 기할 수 있는 가장 큰 원동력은 연료분사압력으로 분사 압력이 높아질수록 출력 및 배출물의 포텐셜은 증가하며, 디젤엔진 개발의 역사는 연료분사압력을 증대시키고자 하는 기술개발의 역사와 그 궤를 같이 한다고 할 수 있다. 고속직접분사식 디젤엔진의 양산이 본격화된 '80년대 말을 기준으로 할 때 연료분사압력은 약 2배 증가하였으며, 이에 힘입어 비출력은 약 2배, 배출물은 1/10 수준으로 저감되었음을 알 수 있다. 한 가지 주목할 사실은 전체 디젤엔진에서 직접분사식이 차지하는 비율의 급격한 증가로 현재까지는 간접분사식 디젤엔진이 일부 사용되고 있으나, 늦어도 EURO-IV 배기 규제가 실시되는 2005년까지는 거의 모든 디젤엔진은 직접분사식으로 바뀔 것으로 예상된다.

디젤엔진의 비출력 증대는 '80년대 말부터 본격화되기 시작했는데, 이는 앞서 언급한 연료분사압력의 고압화와 함께 터보차저 및 인터쿨러 등의 과급장치의 기술 향상에 힘입은 바가 크다. 그림 2는 디젤엔진의 출력 증대 추이를 가솔린엔진의 출력 수준과 비교하여 나타낸 것으로 현재 가솔린엔진의 주류를 이루고 있는 4밸브/실린더 엔진의 비출력은 엔진의 튜닝 특성이나 가변 밸브 기구 등 부가장치의 적용 여부에 따라 약간의 차이는 있으나, 평균 70마력/ℓ 수준이다. 이에 비해 디젤엔진의 비출력은 '80년대 초까지도 평균 30마력/ℓ 수준에 불과하였으나, '80년대 말부터 급격히 증가하기 시작하여 현재 양산되는 대부분의 디젤엔진들은 55~60마력/ℓ 수준의 비출력을 내고 있다. 최근에는 터보차저의 터빈 내부 배기가스 유로 면적을 최적으로 조절하여 전 영역에서 출력 증대가 가능한 가변 노즐 터보 차저(VNT : Variable Nozzle Turbine Turbocharger)가 적용되면서 현재 양산되는 일부 엔진들은 65~70마력/ℓ의 비출력으로 동일 배기량의 가솔린엔진에 필적하는 비출력을 내고 있으며, 특히 독일 Volkswagen 사에서 양산한 VNT를 적용한 1.9ℓ 엔진은 79마력/ℓ의 비출력으로 현재 양산되는 대부분의 가솔린엔진보다 높은 비출

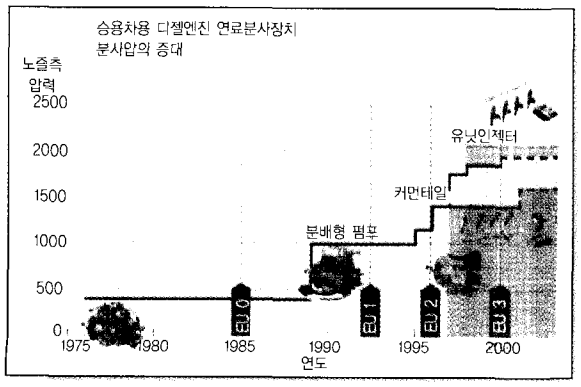
력을 보이고 있어 비출력 관점에서는 가솔린엔진에 필적하는 수준의 상품성을 가지게 되었다. 또, 최대 토크는 기존의 디젤엔진이 가솔린엔진에 대해 가지고 있던 강점의 하나였으나, 최근에는 그 격차가 더 커지고 있다. 4밸브/실린더 가솔린엔진의 최대 비토크는 9~9.5kgm/ℓ 수준이나 디젤엔진은 16~17kgmℓ로 가솔린엔진의 거의 2배 수준이며, 구동계의 내구 토크에 맞추어 토크를 낮추어 매핑하는 경우가 대부분이다.

아래의 그림에는 디젤엔진의 비출력 증대에 기여한 핵심 기술인 연료분사 시스템의 고압화 추이와 가변 노즐 터보차저를 표시한 것으로서 특히 가변 노즐 터보차저의 적용을 통해 기존의 웨이스트게이트 방식 터보차저의 단점인 터보차저 매칭에 따른 저속 또는 고속 영역의 출력 저하를 극복하고 전 운전 영역에서의 출력 증대를 실현할 수 있게 되었다. 연료분사 시스템의 기술 개발을 통한 분사 압력의 고압화도 지속적으로 이루어져 현재 주로 사용되는 1세대 커먼 레일 분사계는 최대 1,350bar까지 분사 압력을 높일 수 있으나, 이미 최대 분사 압력을 1,600bar까지 높인 2세대 커먼 레일 분사계를 적용한 차량의 양산이 시작되고 있다. 커먼 레일 분사계의 경우 최대 분사 압력을 궁극적으로 1,800bar 수준까지 높일 수 있을 것으로 예상되며, 이로 인해 향후 양산될 디젤엔진은 출력 및 배출물 저감 측면에서 현재의 디젤엔진보다 더욱 큰 포텐셜을 가질 것으로 예상되어 미래 지향적인 디젤엔진의 특징을 나타내고 있다. 커먼 레일 분사계의 또 하나의 장점은 연료분사 압력이 회전속도에 비례하는 분배형 펌프 방식이 기존 분사계와 달리 저속 영역에서도 높은 분사압력을 낼 수 있어 저속 출력 및 냉시동성에 큰 강점을 발휘하고 있다.

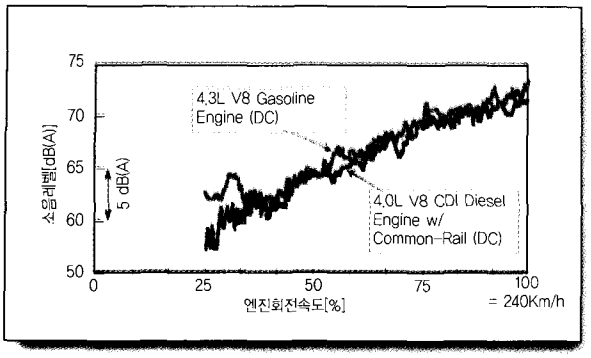
디젤엔진의 상품성 측면에서 이루어진 또 하나의 괄목할 만한 개선은 연소 소음 및 진동의 획기적인 저감에 있다. 과거 가솔린엔진과 비교할 때 디젤엔진의 가장 큰 취약점은 연소 소음 및 진동으로서 이로 인해 디젤엔진은 승용 차량에는 탑재가 곤란하여 상용 및 일부 RV 차량에만 적용이 제한되어 왔다. 그러나 주 분사에 앞서 소량의 연료를 분사하는 파일럿 분사(pilot injection) 및 운전 조건에 따라 분사 압력 및 분사 시기를 최적 상태로 제어할 수 있는 커먼 레일 분사계가 디젤엔진에 적용되면서 디젤 승용차의 실내 소음 수준은 동급의 가솔린 엔진과 거의 동등한 수준으로 개선되었다.



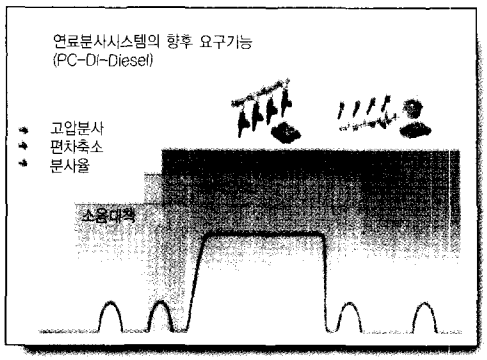
가변 노즐 터보 차저 (VNT)의 구조



디젤엔진 연료 분사계의 분사 압력 증대 추이



디젤엔진과 가솔린엔진의 실내 소음 수준 비교

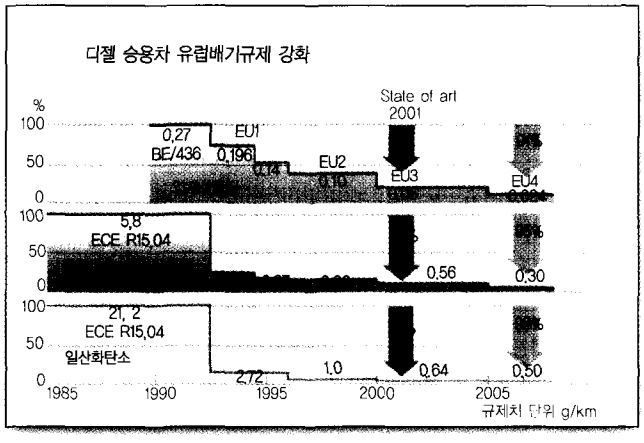


커먼 레일 분사계의 다중 파일럿 분사 기능

위 그림은 Daimler Chrysler 사의 S-Class 차량에 탑재된 4.3ℓ, V8 가솔린엔진과 4.0ℓ, V8 디젤엔진의 차속에 따른 실내 소음 수준을 비교한 것으로 디젤엔진으로도 가솔린엔진과 거의 동등한 수준의 실내 소음을 달성하였음을 알 수 있다. 물론, 동일한 엔진 속도 조건에서는 디젤엔진의 소음이 가솔린엔진에 비해 높은 수준이나 디젤엔진의 경우 가솔린엔진에 비해 월등하게 높은 잉여 토크를 활용하여 트랜스미션의 감속비를 증대시켜 동일한 차속 조건에서 엔진 회전속도를 낮추어 소음이 작은 영역으로 운전 조건을 유도할 수 있다. 또, 디젤 차량을 탑재하는 경우에는 외부 소음 및 실내로의 소음 유입 억제를 위해 차음장치를 추가하기도 하나 이러한 점을 감안하여도 최근에 개발된 고속직접분사식 디젤엔진은 과거에 소비자들이 가지고 있던 시끄러운 엔진이라는 선입견을 완전히 불식시키고 가솔린엔진에 필적하는 상품성을 갖는 수준으로 개선되었다.

또한, 향후 양산에 적용될 것으로 보이는 개선된 연료분사장치는 파일럿 분사 횟수를 현재의 1회에서 2회 이상으로 증대시킬 수 있으며, 이를 통해 배출물에 악영향을 미치지 않고 연소 소음을 현 수준보다 더욱 낮출 수 있을 것으로 예상된다.

이와 더불어 디젤엔진은 유해 배출물 측면에서도 획기적인 수준 향상을 이루었으며 특히, 최근에 디젤엔진 연료 분사계의 주류를 이루고 있는 커먼 레일 분사계에서는 연료분사와 관련된 각종 인자들(분사압력, 분사시기, 파일럿 분사량 등)을 엔진의 운전조건에 맞추어 최적화함으로써 기존 디젤엔진에 비해 흑연(black smoke)의 발생을 대폭 저감시켜 디젤엔진은 가솔린엔진에 비해 깨끗하지 못한 엔진이라는 소비자들이 기존에 가지고 있는 인식을 바꾸어 놓는 데 성

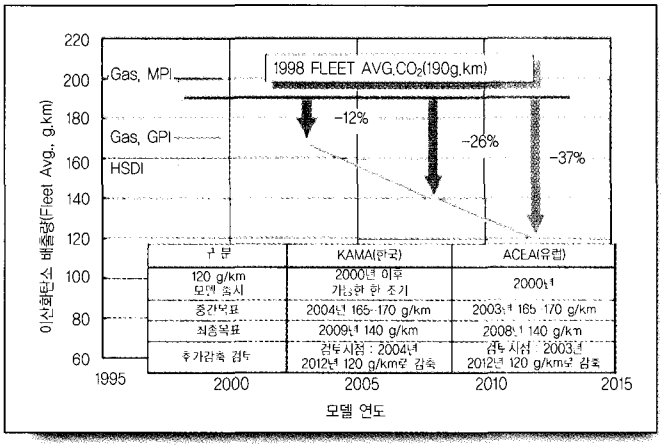


서유럽 시장의 디젤엔진에 대한 배출물 규제 강화 추이

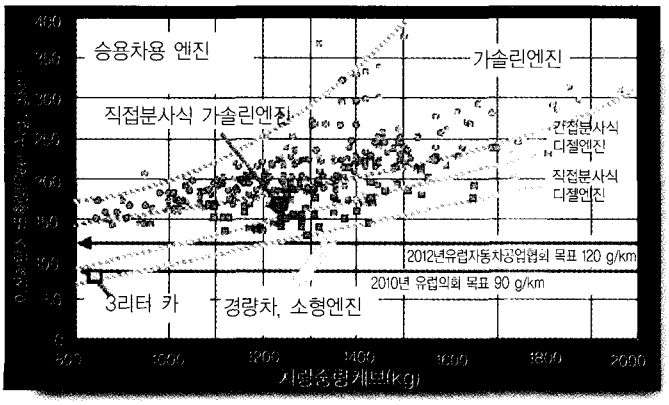
공하였다.

이 그림은 1985년 이후 서유럽 시장의 디젤엔진에 대한 유해 배출물 규제 강화 추이를 나타낸 것으로 현재의 배출물 규제인 EURO-III 규제는 지금부터 불과 10년 전인 1992년의 규제치와 비교할 때 흑연을 포함한 입자상 배출물(PM : Particulate Matter)은 81%, 미연탄화수소(HC, Hydrocarbon)와 질소산화물(NOx : Nitrogen Oxide)은 90%, 일산화탄소(CO)는 97% 강화된 수준이다. 또한 2005년도부터는(신차 기준, 기존 양산 차량의 경우에는 1년의 유예 기간이 적용됨) 현 규제치의 약 절반 수준으로 강화되는 EURO-IV 규제를 만족시켜야 하는데 이 시점이 되면 1992년의 규제 수준에 비해 입자상 배출물은 9%, 미연탄화수소 및 질소산화물은 5%, 일산화탄소는 2% 수준의 배출만이 허용되는 수준이다.

이와 같이 지속적으로 강화되는 디젤엔진에 대한 배출물 규제와 함께 지구온난화에 따른 환경 재앙을 억제하기 위한 이산화탄소 배출 규제에 대응하기 위한 유일한 대응 수단으로 디젤엔진이 부각되면서 디젤엔진은 청정하고 환경 친화적 엔진이라는 인식이 서유럽 시장을 중심으로 확산되고 있다.



서유럽 시장의 이산화탄소 배출량 규제 일정 및 목표

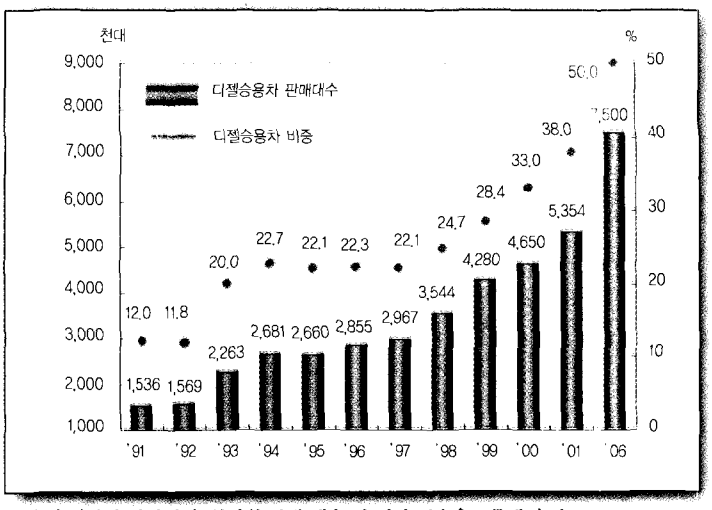


엔진 및 차량 중량에 따른 이산화탄소 배출량 비교

지난 세기에 걸친 급격한 산업화에 따른 이산화탄소 등 온실가스 배출량의 급증으로 지구의 평균 온도는 약 3°C 증가하였으며, 그 결과로 해수면 상승, 홍수 및 가뭄 등의 자연재해가 속발하고 있다. 온실가스로 인한 환경 재해를 막기 위해 유럽 연합의 집행 위원회는 유럽에 자동차를 수출하는 국가와 이산화탄소 배출량 저감에 대한 자율 규제를 체결하여 이행 중인데 기본적인 목표는 현재 180g/km 수준인 평균 이산화탄소 배출량을 2003년까지 167.5g/km, 2008년까지 140g/km(한국자동차공업협회와의 협상 결과는 동일한 목표에 대한 달성 시점을 각각 2004년 및 2009년으로 1년씩 유예함) 수준으로 저감시키는 것이다.

이와 같은 이산화탄소 배출량 저감 규제를 달성하기 위해서는 가솔린엔진의 소배기량화

나 가솔린직접분사(GDI : Gasoline Direct Injection) 기술의 도입 등으로는 불충분하여 디젤엔진 탑재 차량 판매 비율의 대폭적인 증가가 현실적으로 가능한 유일한 선택이며, 이러한 시장의 동향은 친환경적인 엔진으로서의 디젤엔진의 새로운 이미지를 소비자들에게 심어주고 있다.

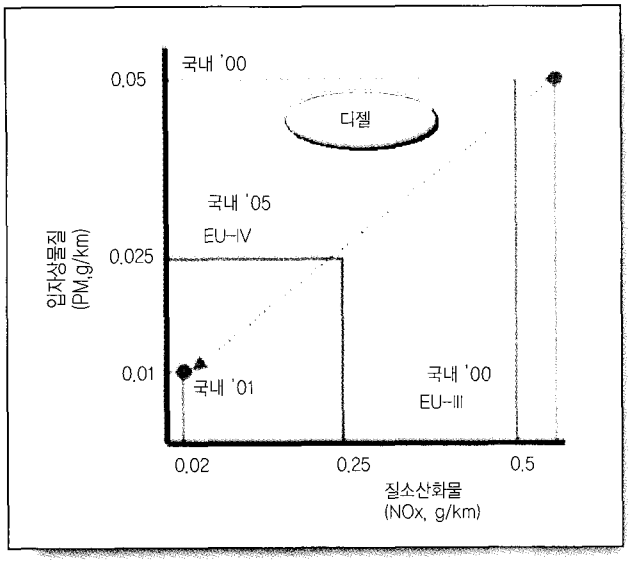


서유럽 시장의 디젤 승용 차량의 판매 대수 및 시장 점유율 증대 추이

앞서의 설명과 같이 1980년대 말 이후 디젤엔진은 연료분사장치와 과급장치의 기술 발달에 힘입어 비출력 및 소음, 진동 측면에서 가솔린엔진에 필적하는 상품성을 갖게 됨으로써 디젤엔진은 승용차 탑재에 부적합하다는 기존의 인식을 완전히 불식시켰으며, 가솔린엔진에 비해 월등한 연비 및 이에 따른 낮은 이산화탄소 배출량으로 인해 환경 친화적인 엔진으로 인식되면서, 특히 서유럽 시장을 중심으로 디젤엔진 탑재 승용차의 시장 점유율이 급격히 증가하는 추세를 보이고 있다.

위의 그림은 서유럽 지역에서 승용 디젤 차량의 판매 대수 및 시장 점유율 추이를 나타낸 것이다. 1990년대 초까지 승용 디젤 차량의 시장 점유율은 10%대 초반에 머물러 있었는데, 이 시기에 판매된 직접분사 엔진은 현재의 디젤엔진에 비해 종합적인 상품성이 미흡하였고 가솔린엔진에 비해 우수한 연비가 가장 큰 강점이었다. 1993~1997년도에는 시장 점유율이 20%대로 급증 하는데 이 시기는 전자 제어식 연료 분사계가 도입되어 디젤엔진의 출력 및 배출물이 한 단계 성장하고 디젤엔진에 대한 긍정적인 인식이 소비자들에게 자리잡기 시작한 때이다. 디젤엔진의 시장 점유율이 폭발적으로 증가하1998년 이후로 이 때는 커먼 레일 분사계의 적용이 본격화되면서 연소 소음이 획기적으로 개선되어 디젤엔진이 가솔린엔진에 필적하는 상품성을 갖게 된 시기와 일치한다. 이후 디젤 승용 차량의 시장 점유율은 매년 4~5%의 증가세를 보여 2000년도에 33%, 2001년도에 38%의 점유율을 달성하였고, 대부분의 시장 전문가들은 2006년까지는 50%의 시장 점유율에 도달할 것으로 예상하고 있다.

서유럽 시장에서 높은 상품성을 가진 승용 디젤 차량의 시장 점유율 급증은 상대적으로 승용 디젤엔진 개발 기술이 열세인 일본 자동차 업체들의 유럽 시장 내 승용차 판매량의 급격한 감소를 초래한 바 있다. 서유럽은 북미 시장과 함께 국내 완성차 업체의 양대 수출 시장으로 수출 물량이 지속적으로 증가되는 추세를 보이고 있으며, 제반 판매 여건이 디젤 승용차에 유리하게 전개되고 있는 점과 향후 지속적으로 증가할 것으로 예상되는 디젤 승용차의 시장 점유율을 감안할 때 디젤엔진의 상품력이 향후 서유럽 시장에서의 경쟁력에 중요한 요인으로



디젤 승용 차량에 대한 유럽 및 국내 배출물 규제 비교

작용할 것으로 예상된다.

앞서 살펴본 바와 같이 첨단 디젤엔진의 각축장인 서유럽 시장에서 국내 완성차 업체의 디젤 차량이 경쟁력을 갖기 위해서는 디젤엔진의 신기술에 대한 과감한 투자와 함께 디젤엔진 개발에 우호적인 환경의 조성이 필수적이다. 주지의 사실이지만 자동차 산업은 시장의 규모가 중·장기적인 판매 및 개발 전략을 좌우하는 가장 중요한 요인이며, 특히 디젤엔진의 경우 내수 시장의 기반 없이 수출만으로는 규모의 경제를 달성할 수 없어 선진 업체와 경쟁하기 위한 대규모의 투자가 어려운 것이 현실이다.

마지막으로 국내와 서유럽 시장의 배출물 규제 비교를 통해 디젤엔진 기술 개발 환경 조성 방향에 대한 제언을 하고자 한다.

위의 그림은 디젤 승용 차량에 대한 국내와 서유럽 지역의 배출물 규제를 비교한 것으로 서유럽 지역의 배출물 규제는 약 5년을 주기로 주요 배출물인 입자상 물질과 질소산화물이 약 2배씩 강화되고 있으며, 2005년에는 현재의 EURO-III 규제에 비해 2배 정도 강화되는 EURO-IV 규제의 적용이 예정되어 있다. 국내 규제도 서유럽 규제에 맞추어 강화되어 왔으며, 2002년 7월 1일부터 적용되는 국내 '02 규제의 경우 승용차를 제외한 나머지 차종에 대한 배기 규제치는 EURO-III와 동등한 수준으로 강화된 상태이다. 그러나 배출물 규제의 핵심인 승용차에 대한 규제치는 현재의 EURO-III 규제와 비교하여 입자상 물질은 1/5, 질소산화물은 1/25로 이는 기술적으로 달성 불가능한 수준이며, 배출물 규제를 통해 디젤 승용 차량의 시장 진입을 원천적으로 막고 있는 실정이다.

국내 업체들이 EURO-III 규제를 만족시키는 디젤 승용 차량을 개발하여 서유럽 시장에 이미 판매하고 있는 현실을 감안할 때 이와 같은 내수 시장의 진입 장벽은 국제적인 통상 문제를 발생시킬 가능성이 크고, 디젤엔진 개발 기술이 향후 자동차 메이커의 핵심 경쟁력이 될 것이라는 점을 감안할 때 국내 규제를 유럽 수준으로 현실화하여 국내 업체들의 기술 개발을 촉진시키고 내수 기반의 확충을 통해 국제적인 경쟁력을 갖출 수 있도록 유도하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.