

가솔린 직접분사엔진의 장래 및 각사의 동향

김 우 태 책임연구원 · 현대자동차(주) 파워트레인연구소

1. 서 론

파리에 위치한 경제협력개발기구(OECD) 산하 국제에너지기구(IEA)는 장기전망 보고서에서 2040년이면 석유가 완전히 고갈될 것이라고 예측했다. 또한 세계 석유발견량은 1962년 북해유전 발견 등으로 정점을 이루다가 그 이후로 모든 지역에서 급속히 떨어졌고 경제성 있는 대형 유전이 추가로 발견될 가능성도 희박한 것으로 알려져 있다. 따라서 매년 평균 2%의 세계 석유소비 증가율로 보아 전 세계에 묻혀 있는 1조376억 배럴의 석유가 40년 뒤면 자취를 감추게 되는 것이다. 석유가 바닥나는 시기보다는 바닥을 드러내기 이전에 공급부족 시점부터 인류의 에너지 위기는 시작될 것이라는 것은 쉽게 예측할 수 있다.

낙관론자들은 시장 기능과 기술 발전을 기대하며, 공급이 부

족해 석유가격이 상승하면 석유 회사들은 생산비용이 높아 폐기했던 유전들에 다시 손을 대기 시작하고 석유가격의 상승은 소비를 억제시킬 뿐만 아니라 에너지의 효율적 이용방법과 대체 에너지 개발을 촉진시킨다고 주장한다.

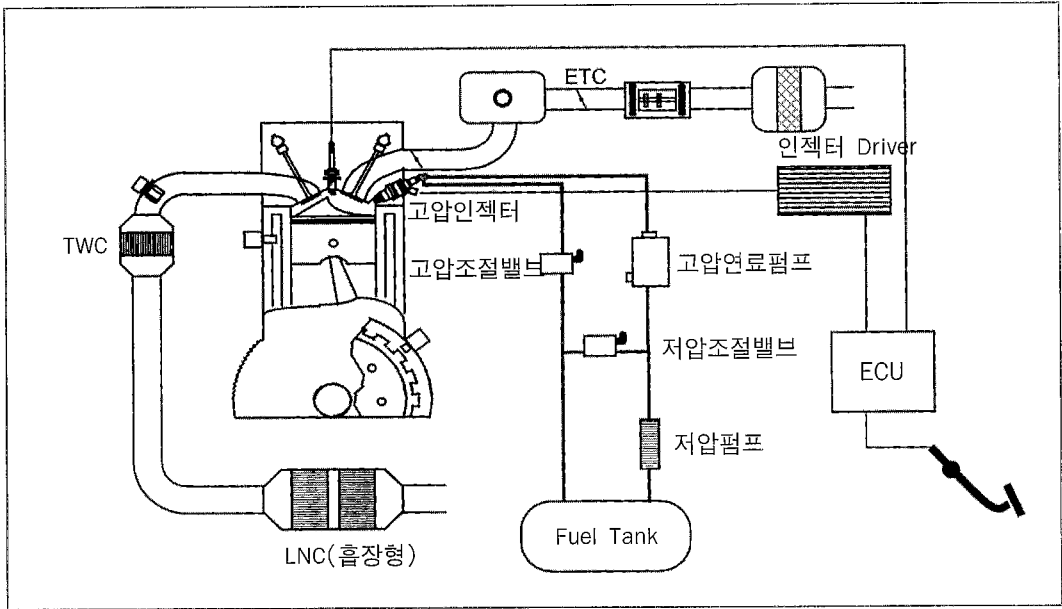
이는 고유가시대가 멀지 않았음을 예고하는 것으로 해석되며 최근 원유가의 상승이 고유가 시대로의 대체 전환으로 보여지고 있다.

이외에도 환경적인 측면에서는 지구온난화 방지를 위한 CO₂ 저감이라는 인류의 과제를 안고 있고, 최근 EU 집행위에서 발표한 CO₂ 배출감축 정책에서는 2008년에 1995년도 기준으로 약 25%의 CO₂ 배출량 감소를 요구하고 있어 앞으로의 엔진개발은 저공해 저연비를 목표로 대체에너지 개발이나 열효율 향상에 대해 더욱 적극적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

특히 가솔린엔진 분야에서의 열효율 향상분야에서는 엔진의 기계적 마찰손실의 저감과 아울러 연소효율 증대에 관련한 많은 노력이 필요한데 이를 위하여 연속 밸브타이밍가변기술, 실린더 휴지 기술, 전기와 내연기관의 Hybrid엔진 기술 등과 더불어 기존 희박 연소방식을 극대화한 직접분사식 초희박 연소 기술에 대해 주목할 필요가 있다.

가솔린 엔진에서의 열효율 향상을 위하여는 기계적 마찰손실을 줄이고 흡배기유동의 유동저항(pumping loss)을 최소화하고 압축비를 높여서 열효율을 증대하는 것이 주요 방안인데 배기 재순환장치를 이용한 연비개선도 pumping loss의 저감효과로 볼 수 있다.

희박연소기술은 연소를 위한 혼합기의 공기과잉상태를 만들어 주기 위해 throttle valve를 더 열어준다는 의미에서 pumping loss 저감을 이용한



〈그림 1〉 가솔린직접분사식엔진의 system도

기술이라고 볼 수 있으며 직접분사식 초회박연소기술은 희박효과를 극대화할 수 있는 것으로 이론에만 머물러 있던 연소실 내 연료직접분사기술이 실용화된 것이다.

이는 과거 수십년간 전자제어와 기계제어 기술이 비약적으로 발전하여 소형으로 미립 연료의 분무가 가능한 고압분사인젝터와 고압연료펌프 등의 제작이 가능해짐에 따른 것이다. 일반적인 가솔린엔진은 흡기포트에 설치되어 있는 인젝터를 통해 연료를 분사하고, 분사된 연료는 흡기포트에서 공기와 균일하게 혼합되어 연소실로 흡입되는 것과 달리 가솔린 직접 분사 엔진에서는 공기만이 연소실 내로 흡입되고 연료는 전자적으로 정밀히 제어

되는 고압인젝터에 의해 연소실로 직접 분사한다. 이 방식은 분사시기를 조절함으로써 균일 혼합기는 물론, 성층 혼합기의 형성을 가능케 함으로써 고출력과 저연비를 동시에 향상시키고자 하는 기술이다.

가솔린직접분사식엔진은 현재 일본 내에서는 MMC와 TOYOTA에서 활발히 개발 / 양산되고 있고 우리 국내에도 이미 직접분사식엔진을 양산하여 시판 중에 있다.

그러나 앞으로의 직접 분사식 엔진은 강화되는 배기규제를 만족해야 하고 연비 측면에서도 현존하는 직접분사식엔진보다는 향상되어야 하고 엔진 전개성능 면에서도 현존하는 직접분사식엔진의 power 부족을 보완해야

하는 과제를 안고 있다.

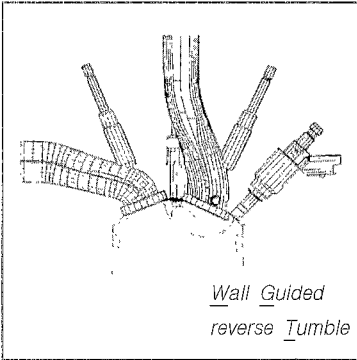
2. 본 론

2.1 직접분사식엔진의 개요

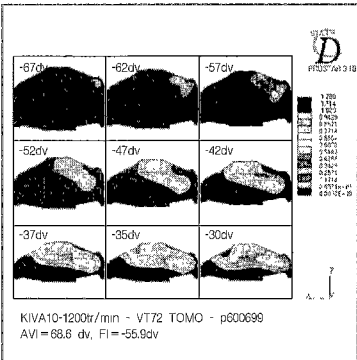
2.1.1 초회박연소란

일반적으로 가솔린 연소에 가장 이상적인 공기와 연료의 비율이 14.5:1 이므로 이를 이론공연비라고 부르고 있고 이보다 공기가 많은 경우의 연소를 희박연소라고 하고 있다.

직접분사식엔진에서는 초회박상태, 즉 공연비 40~50:1에서도 안정적인 연소를 유지하는 것을 초회박연소라고 하고 있고, 이러한 연소실 내에 혼합기가 전반적으로 고른 초회박혼합기일 경우는 화염의 발달이 느려 연소속도가 느리고 실화될 가능성이



〈그림 2〉 Wall guided 방식



〈그림 3〉 Air guided 방식의 연료 거동

높으므로 혼합기의 spark plug 주위의 국부적인 이론공연비화가 필수 요건이다. 이를 성층화라 하는데 이러한 성층화를 최적인 상태로 유지하기 위하여는 연료분사시기를 흡기밸브가 닫혀 있는 기간, 특히 압축행정 특히 압축 말기에 분사할 수 있는 연소실 내 직접분사 System이 필요하다. 또한 연료분사기의 경우 압축말기 고압 분위기에서의 연료분사가 가능해야 하므로 분사 압력이 최소한 5bar 이상은 되어야 한다.

〈표 1〉 초회박 직접분사엔진의 연비개선율 (AVL예상)

□ Pumping Loss 저감	- 희박연소 & 대량 EGR	10%
□ 열손실 감소	- 희박연소 & 대량 EGR	7%
□ 높은 비열비	- 희박연소	5%
□ 해리 감소	- 희박연소 & 대량 EGR	3%
→ 연소온도 저하		
Total Improvement		25%

초회박연소를 실현하는 성층화 방식으로는 크게 Wall guided 방식과 Air guided 방식으로 구분하는데 Wall guided 방식은 압축말기에 분사된 연료가 piston wall에 impinging 되면서 S/P 부근으로 유도되는 방식으로 성층화 측면에서는 유리한 반면 wall wetting에 의한 smoke 발생이 많고 piston bowl이 비교적 깊으므로 piston bowl내에 연료가 갇히는 현상에 의해 공기와의 mixing을 필요로 하는 전개성능 측면에서 불리한 면이 있는 방식이다. TOYOTA와 MMC 등 대부분이 이러한 방식을 사용하고 있다.

Air guided 방식은 압축말기에 분사된 연료가 연소실 내 유동의 의해 S/P 부근으로 유도되는 것으로 piston wall에 wetting 현상이 없기 때문에 HC Emission과 smoke 발생이 작고 비교적 강한 tumble 유동을 적용하기 때문에 공기와의 mixing 측면에서 매우 유리하나 유동과 연료분무의 거동에 지배받기 때문에 유동의 특성과 연료분무특성이 일정해야 한다는

제약조건을 갖고 있다.

2.1.2 직접분사식 엔진의 연비개선율 Potential

〈표 1〉과 같이 이론적인 초회박연소에 따른 연비개선율은 크게 발표되었으나 현실적으로 열손실 등의 항목은 매우 적게 나타나고 차량에서의 초기 Warm-up시 희박연소 제한, 배기가스 정화를 위한 추가 연료 (rich spike), 양산 여유, 운전성 확보등의 이유로 모드에서의 연비이득은 이보다 낮아지게 되어 실현비는 10% 이내로 볼 수 있다.

2.2 직접분사엔진의 개발동향

비교적 연료비가 높은 일본과 유럽에서 개발이 진행되고 있고 일본의 경우는 자국 내 배기규제가 심하지 않음에 따라 가장 앞장서서 양산을 추진하여 현재 시판 중이며 TOYOTA의 경우는 이미 2세대 직분엔진을 시장에 선보일 정도로 기술을 주도하고 있다.

〈표 2〉은 현재 양산 중이거나 개발 중인 업체와 대상엔진을 정

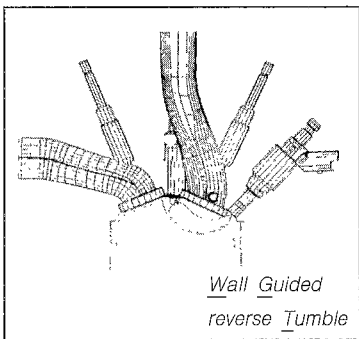
<표 2> 각 사의 가솔린직접분사식엔진 개발 동향

개발구분	지역	제조사	배기량	차종	연소방식	축매	양산일정	비고
양산중	일본	MMC	1.5~4.5	Galant, Legnum외 다수	초희박	선택환원	1996. 8 (최초)	
			1.8	Carisma	초희박	선택환원	1997. 10	유럽시장진출 (EURO II)
		TOYOTA	2.0	Corona Vista	초희박	흡장형	1996. 12 2000. 7	
			3.0	Crown	초희박	흡장형	2000. 5	
		NISSAN	3.0	Leopard	초희박	TWC	1997. 10	
	유럽	RENAULT	2.0	Megane	$\lambda=1$	TWC	1999. 10	이론공연비운전
개발단계	일본	HONDA	1.5		초희박	흡장형		축매개발 추진
	유럽	VW	1.4	Lupo	초희박	흡장형	2000. 12	
		OPEL	2.2	Astra ECO4	초희박	흡장형	'01.초	
		AUDI	1.2	AL2	초희박	흡장형		Concept car
		PSA	2.0		초희박	흡장형		

리한 것이다.

2-3. 각 업체별 직접분사식엔진 특성

2-3-1. MMC / PSA



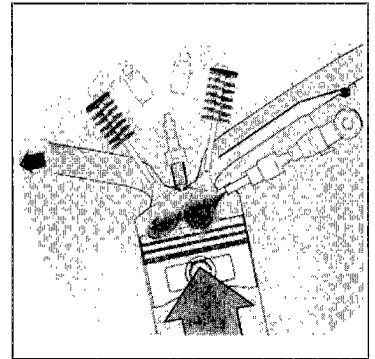
직접분사식엔진을 가장 먼저 양산하고 모든 라인업을 직접분사식엔진으로 대응하고 있는 MMC는 분사된 연료가 S/P부근으로 유도하기에 용이하도록 reverse tumble유동을 적용하

였다. Reverse tumble의 경우는 그림과 같이 흡기측에 Piston Bowl이 형성된 wall guided 방식에서는 필수적인 유동이나 강한 tumble 유동을 생성하지 못하므로 저속 저부하영역의 연소안정성 확보가 어려운 단점이 있다.

2-3-2. VW

유럽에서는 가장 먼저 직접분사식엔진을 개발하였고 초희박 연소엔진의 가장 걸림돌이 되고 있는 연료 내 황함유물문제를 해결하면서 유럽의 배기규제 EURO IV 규제를 만족하는 차량을 올해말 경에 양산에 들어가는 것으로 알려진 VW의 직접분사식엔진의 연소실 구조는 다음과 같다. 이는 air guided 방식과 wall guided 방식을 적절히

이용한 것으로 forward tumble을 강하게 발생시켜 배기측 유동을 강화함으로써 piston bowl에 impinging 된 연료를 S/P 위치로 유도하는 방식이다.

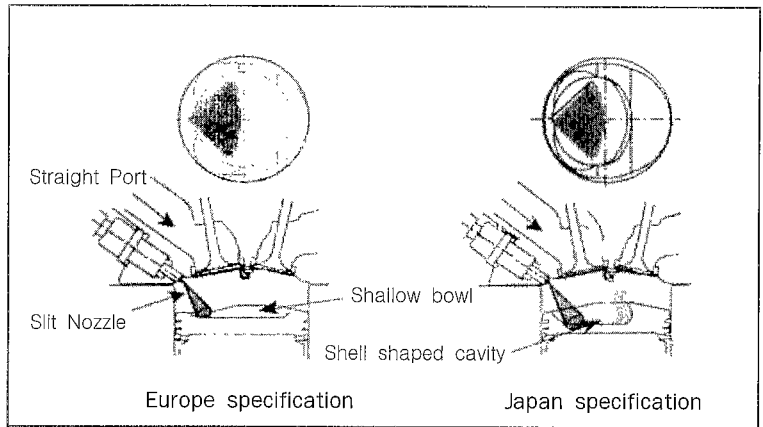
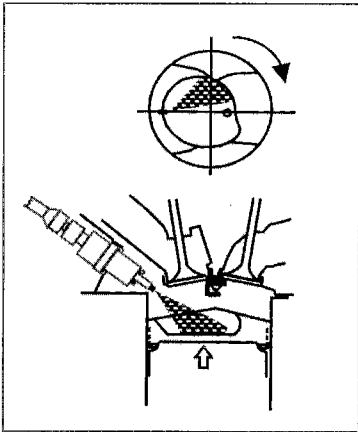


이의 경우는 그림에서 보는 바와 같이 흡기port 내에 상하분리용 격막을 이용하여 강한 tumble을 발생시킴으로써 안정

된 성층화를 유지할 수 있다.

2-3-3. TOYOTA

TOYOTA는 초기에는 Swirl 유동을 이용한 wall guided 방식의 직접분사식엔진을 선보인 바가 있다.



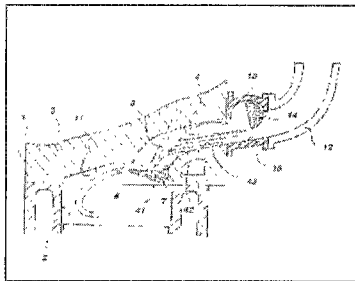
〈그림 6〉 TOYOTA 1st Gen

보하기 위한 것으로 판단된다.

이를 통해서 TOYOTA가 추구하는 앞으로의 직접분사식엔진의 연소계 설계개념을 이해할 수 있다.

2-3-4. Result

Renault의 경우는 최근 이론 공연비 직접분사식차량을 유럽 내 시판하고 있으나 내부적으로 초회박연소를 구현하고 있으며 이는 전형적인 Air guided 방식이다.



Air guided 방식은 유동이 성층화에 절대적인 영향을 미치고 있으므로 안정적인 유동제어가

필요하며 고압Injector의 분무 특성 역시 재현성이 있고 injector간 variation이 없어야 하는 등의 제약조건이 따른다.

이러한 Air guided 방식은 압축 시에도 tumble 유동의 mean flow가 유지될 수 있는 광각엔진에 적합한 방식이다.

3. 결론

지구환경을 보존하기 위한 노력의 일환으로 또한 향후 예견되는 고유가시대를 대비하기 위해 가솔린엔진의 저연비기술로서의 직접분사식 엔진개발은 필연적이나 위에서 서술된 바와 같이 실질적인 연비이득은 발표된 바와 다르고, 초회박연소를 실현하는 연소계 구조 및 부품개발수준이 아직 안정단계가 아니며, 여기에 기술되지 않은 Nox / Sox 정화기술 상의 문제점이 가솔린 직접분사식엔진개발의 향 후 과제이다.

〈표 3〉 TOYOTA 1st / 2nd Gen 직접분사식 엔진 비교

	Toyota (기존 D-4)	Toyota (신형 D-4)
실린더 내부유동	스월, SCV Straight + Helical	약한 텀블 Dual straight port
피스톤 형상	Deep dish	Deep dish*
인젝터 노즐 형상	스월 노즐	슬릿 노즐
분무 형상	Hollow cone*	Fan spray
연료압	8~13MPa 가변	8~13MPa 가변
압축비	10.0	11.3
성충시 공연비	25~50	17~50

〈참고문헌〉

[1] Souich Matsushita 外, Development of Toyota Lean Combustion System, SAE paper 850044

[2] Kaoru Horie 外, The Development of a High Fuel Economy and High Performance Four-Valve Lean Burn Engine, SAE paper

920455

[3] Aparicio J. Gomez, Paul E. Reinke, LEAN BURN: A Review of Incentives, Methods, and Tradeoffs, SAE paper 880291

[4] K Nakanishi 外, Development of a new intake system for a 4-valve lean burn engine, SAE paper 925020

[5] Karl C.C. Kharas, Ronald G. Siver 外, The Catalytic Implication of Lean Burn Engines: An Analysis of Factors Required to Meet Overall Emissions Requirements, SAE paper 932762

[6] Shgeo Furuno, Satoshi Iguchi, The Effects of Inclination Angle of Swirl Axis on Turbulence Characteristics in a 4-Valve Lean-Burn Engines with SCV, SAE paper 902139

[7] G.K.Fraidle, W.F.Piock 外, Gasoline Direct Injection: Actual Trends and Future Strategies for Injection and Combustion Systems

〈김우태 책임연구원: t1184@hyundai-motor.com〉