

## 린-번 엔진 개발

이태표\* 임국현\*\* 김종부\*\*\* 김민형\*\*\* 안두수\*\*\*\*

\*현대자동차 \*\*태산정밀 \*\*\*인덕대학 \*\*\*\*성균관대학교

### The Development of Lean-Burn Eng.

Lee Tae-Pyo\* Yim Kook-Hyun\*\* Kim Jong-Boo\*\*\* Kim min-Hyung\*\*\* Ah Doo-Soo\*\*\*\*  
\*Hyundai Motor Company \*\*Taesan Precision Co. \*\*\*Induk Institute of Tech. \*\*\*\*Sung-Kyun-Kwan

**Abstract** - HMC has developed the lean burn system with alpha 4-valve into domestic market in the end of 1997. In a viewpoint of saving energy and prevention of global warming (CO2 reduction), the lean burn system has recently attracted a considerable attentions in gasoline engines. There has been, however, difficulty in extending LML(Lean Misfire Limit) enough to meet the emission regulations and satisfaction of driveability. In this paper some descriptions will be given upon the new technology of lean burn engine which will be installed in Accent, especially the improvement of the combustion, the development of engine management system such as intake system and wide range air fuel control strategy, and the result of vehicle test.

## 1. 서 론

현대자동차는 1991년 후반부터 alpha-4V에 Lean Burn Eng.을 적용하여 약 6년 동안의 연구개발을 진행한 끝에 1997년 말 Accent에 장착하여 내수에 양산하였다. 이는 세계에서 2번째의 Lean Burn Engine 독자기술을 갖추었다는 것과 현재 세계적으로 많은 주목을 받고 있는 고효율, 저연비의 엔진기술의 개발에 성공했다는 데 의미가 있다.

이와 같이 세계적으로 각 자동차 제작사들이 Lean Burn기술에 많은 관심을 두는 것은 에너지절약의 차원에서뿐만 아니라, 세계적으로 문제가 되고 있는 지구온난화의 억제(CO2의 저감)의 가장 효과적인 수단이 되기 때문이다. 특히 에너지의 전량을 수입에 의존하는 우리나라의 경우는 이 필요성이 더욱 절실한 상황이다. ACCENT에 장착된 LEAN BURN 차량(M/T)인 경우 약 20%의 연비향상 효과를 얻었으며, 배기ガ스 국내 규제치 대비하여 탄화수소 76%, 일산화탄소 약 80%, 질소산화물 52%를 줄였고, 특히 지구온난화의 주원인인 이산화탄소를 기존 차량대비 약 16%정도 줄여 환경 친화적인 차량으로 인정받고 있다.

이처럼 Lean Burn Engine은 연비개선이라는 면에서 상당한 장점을 가지고 있으나, Lean Burn 운전중에 발생하는 NOx의 후처리에는 아직까지도 만족할 만한 수준에 도달하지 못한 상태이고, 이것이 Lean Burn의 확대적용에 큰 걸림돌이 되고 있는 것이 사실이다. 그러나 현재 Lean De-NOx 측면과 NOx 흡장형 측면에 대한 연구개발이 활발히 진행되고 있어 조만간 Lean Burn에서의 NOx 문제도 해결될 것으로 기대되고 있고, 이에 힘입어 도요다와 닛산에서는 2,000cc까지 Lean Burn Engine을 확대 적용하기로 결정하기에 이르렀다. 이밖에 도Lean Burn Eng.에는 기존차량 대비하여 흡입공기의 강력한 Swirl을 발생시켜 24:1 정도의 회박한 공연비 상태에서도 안정된 연소가 가능하도록 하는 Swirl

Generation System의 도입이 필수적이어서 이에 의한 최고출력 및 토크의 저하를 가져오게 되고, 이론공연비와 회박공연비 모두에 대하여 Feedback 제어를 위한 광역 공연비센서(LSU)의 적용등에 의하여 제조원가가 약간 상승하는 문제가 있다. 그러나 현재 이러한 문제들을 해결하기 위한 개발이 계속 진행중에 있어, 제2세대 Lean Burn Engine에서는 이러한 출력저하와 같은 문제점들은 거의 모두 해결될 것으로 기대된다.

본 논문에서는 HMC Lean Burn Engine 및 차량에 적용된 기술들 및 Lean Burn에 의한 연비향상 주요이유 등에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

## 2. Lean Burn의 특징

### 2.1 Lean Burn (회박연소)이란?

이론공연비(공기:연료=14.5:1)보다 공기가 과잉 공급된 상태의 혼합기를 연소시킨다는 의미로, 14.5:1의 혼합기로 얻을 수 있는 출력을 이보다 훨씬 회박한 22:1의 혼합기를 연소시켜 얻는 방식을 말하는 것이다. 표1에 동일출력을 기준으로 한 Lean Burn의 개략적 의미를 나타내었다.

표 1. Lean Burn의 기본개념

공연비	공기량	연료량	비고
14.5 : 1	14.5 g	1.0 g	흡입공기량 37%증가
22 : 1	19.8 g	0.9 g	연료량 10% 절감

### 2.2 Lean Burn 기술

Lean Burn(공연비22:1) 상태에서도 안정된 Engine 작동을 실현하기 위해서는 최적의 혼합기형성과 안정된 화염전파가 관건이 된다. 그리고 이들은 연료의 불균질 분포, 즉 성층화(Stratification)에 의하여 가능하게 된다. 이 성층화를 하는 방법으로는 크게 Swirl(와류)을 이용하는 방식과 Tumble을 이용하는 방식으로 나눌 수 있는데, HMC에서 적용된 기술은 전자의 Swirl(와류)을 이용한 축상성충급기(Axially stratified Charging) 방식으로 이는 흡기밸브가 열려있는 어느 특정한 기간 동안 Swirl Motion을 하는 흡기의 일정부분에 연료를 분사하게 되면, 이 강력한 와류에 실려있는 과농한 연료의 뎁어리(Fuel Band)들은 흡기의 다른 회박한 부분들과 혼합이 제한되게 됨으로써 압축말기까지도 연료의 성층화가 유지되는 것을 이용한 것이다. 따라서 이 성층화된 Fuel Band가 점화시기에 맞추어 Spark Plug주위에 존재하도록 유도함으로써, 혼합기 전체적으로 보면 회박혼합기의 상태이나 Spark Plug주위에는 상대적으로 농후한 공연비를 갖는 혼합기가 형성되도록 하는 방식이다.

그리하여 이 농후한 혼합기가 점화원에 의하여 강력한 초기화염을 형성시키고 이 화염이 나머지 회박한 혼합기를 급속 연소시킴으로써 공연비 24:1정도까지 어느 정도

안정된 연소가 가능해지는 것이다. 그림1에 이러한 스월 형성에 대한 개략적 원리를 도식적으로 나타내었다.

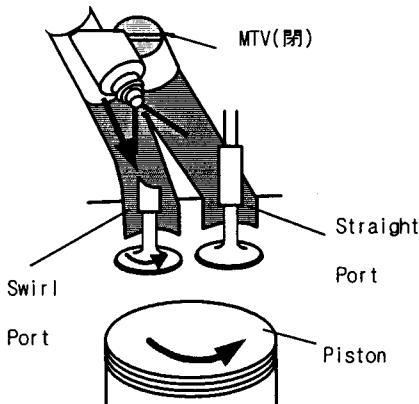


그림1. 스월 형성mechanism

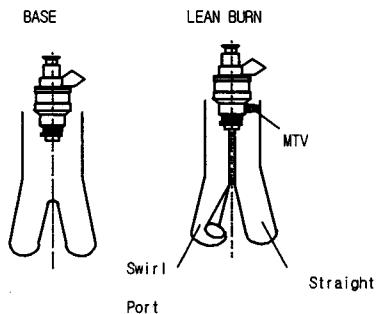


그림2. intake port 형상

흡기의 Swirl을 형성시키기 위하여 Intake Port 형상을 그림2와 같이 Helical Type으로 하였고 Swirl을 조절하기 위한 MTV(Manifold Throttling Valve)를 장착하여, Engine이 Lean Burn으로 운전될 때와 Idle시에는 이를 닫아 강력한 Swirl을 형성시킴으로써 Fast Burn에 의한 안정된 연소를 가능하게 하고, 고속 고부하 운전시에는 이를 열어 보다 많은 신기(Fresh Air)가 공급되도록 하였다. 그런데 여기에서 중요한 것은 혼합기에 Swirl을 형성시키는 것만으로 회박연소가 가능한 것이 아니고 이 Swirl강도에 따라 적정한 연료분사시기를 설정하는 것이 필요하다는 것이다. 결과적으로 Swirl이라는 것은 혼합기의 성충화를 유지시키는 기능을 하는 것이며 분사시기는 점화시점에서의 연소실내 연료분포상황을 대변해 주는 인자라 할 수 있다. 고속ガ스분석기를 이용 Spark Plug 위치에서 가스를 Sampling하여 분석한 결과를 보면 분사시기에 따른 LML(Lean Misfire Limit: 회박공연비 한계)의 변화경향이 점화직전 Spark Plug 주위의 공연비와 정확히 일치하는 것을 알 수 있었다.

### 3. 연비 향상 원리

회박연소에 의한 연비개선의 가장 큰 요인은 Pumping Loss의 저감에서 찾을 수 있다. 이는 부분부하 운전시 부압상태인 흡기계로부터 공기를 흡입하고, 정압상태인 배기계에 배기가스를 배출시키는데 필요한 일을 의미하는

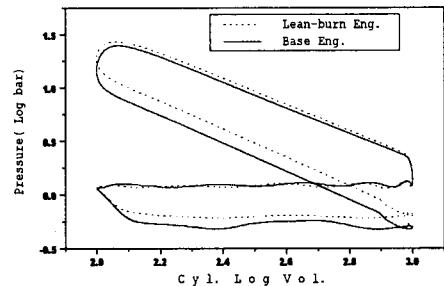


그림 3. 60 km/h 정속 조건에서의 P-V 선도

것으로, 외부에서 일을 받아 수행해야 하기 때문에 손실이 되는 것이다. 회박연소를 하게 되면 동일출력을 내는데 있어서  $\lambda = 1$  대비 흡입 공기량이 많게 되고 이는 결국 Throttle개도가 더 커진다는 것을 의미하기 때문에 흡기계와 배기계의 압력차이가 작아져 이 손실이 작아지게 되는 것이다. 그림3은 4단 60km/h 정속조건에서의 Engine부하 조건에 대한  $\lambda = 1$  운전과 회박연소 운전시의 P-V(압력-체적)선도를 Log Scale로 하여 측정한 것으로 아래쪽 면적으로 표시되는 Pumping Loss의 저감을 볼 수 있다. 또한, 회박운전을 하게 되면 연소가스온도가 저하되며 흡입 공기온도와 연소실벽면온도차이가 작아져 상대적으로 벽면으로의 열손실이 작아지게 된다. 아울러 연소최고온도의 저하에 의하여 연소 생성물인 CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O가 CO, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>로 분리되는 흡열반응인 열해리(Thermal dissociation)의 발생빈도가 작아지게 되는 효과가 있고, 배기ガ스의 온도도 낮아지게 되어 배기 손실도 감소되게 된다. 또, 공기의 물성치를 보게 되면, 공기의 정압비열과 정적비열의 비율인 비열비( $k = CP/CV$ )가 CO<sub>2</sub>나 H<sub>2</sub>O보다 큰 값을 갖는다. 정적비열이 크다는 것은 자체적으로 에너지를 많이 축적할 수 있다는 것으로, 연소가 진행되면서 발생되는 열량중 많은 부분이 자신의 내부에너지 증가에 사용된다는 것을 의미하는 것이고 반대로 정압비열이 크다는 것은 열을 받으면 외부로 일을 하는 데에 열량을 더 많이 사용한다는 것을 의미한다. 따라서 비열비가 크다고 하면 동일 발열량당 외부로의 일을 많이 한다는 것이고 이는 결국 연소효율을 높이게 되기 때문에 일반엔진에 비하여 공기가 과잉 공급되는 Lean Burn Engine의 경우가 연료효율이 더 좋게 되는 것이다.

## 4. 엔진 및 차량제어 기술

### 4.1 제어 공연비 설정

동일한 흡입 공기량에 대하여 회박연소 한다는 의미는,  $\lambda = 1$  운전에 비하여 연소실로 들어가는 연료량이 적다는 것을 말하는 것으로 이는 결국 출력의 저하를 초래한다. 따라서 적정한 운전부하 이상의 조건에서 회박운전을 하게 되면 가속성 불량등 운전성에 문제를 가져오게 되기 때문에 회박과  $\lambda = 1$  제어를 운전조건에 맞게 설정해줄 필요가 있다. 현재의 회박운전구간은 rpm 1200~4000, 그리고 스로틀개도 40도 이하로 설정되어 있다. 특히 고속, 고부하 영역에서는 제어공연비를 약간씩 Rich하게 해 줌으로써 차속으로 130km/h 정속에서도 회박운전이 가능하도록 공연비를 설정하였다.

## 4.2 공연비 제어로직

### 1) Cold상태 공연비

엔진이 Cold상태에서 회박운전을 하게 되면 흡입행정중 연료의 분사에 의한 과도한 Wall Wetting에 의하여 운전성이 나쁘게 되기 때문에 일반엔진과 동일하게 제어를 하여야 한다. 이때 공연비는 이론공연비이고 분사시기는 Wall Wetting을 줄이기 위하여 배기행정중에 분사한다. 따라서 회박공연비 운전은 냉각수온도가 80°C 이상의 조건이 되어야 가능하다. 그리고 회박운전시 연료분사시기는 LML과 NOx의 배출량이 최적이 되는 시점으로 하였고, 공연비센서 (Bosch LSU4)를 사용하여 전부하 영역을 제외하고는 전구간에서 공연비 피드백제어를 행하게 된다.

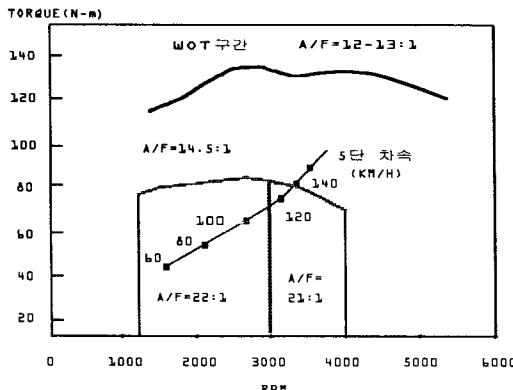


그림4. 공연비 분포

### 2) 공연비 천이시 제어

회박운전에서 이론운전으로 천이될 경우에 공연비 22:1에서 14.5:1로 순차적으로 변하게 하면 운전성 면에서는 상당히 좋게 되나, NOx가 문제 된다. 따라서 22:1의 회박공연비와 이론공연비 이외에는 나타나지 않도록 하는 로직을 사용하여 중부하(토오크 8Kg-m) 이하에서는 회박공연비로만 운전하여 연비개선과 Raw NOx의 저감을 도모하였고 중부하 이상에서는  $\lambda = 1$  운전하여 가속성 개선 및 TWC를 이용한 NOx정화를 피하였다. 이때 측매는 기존의 UCC대신 CCC를 사용함으로써 천이될 때 발생되는 NOx를 신속히 정화 시켜 UCC대비 20%정도 정화 효율을 높일 수 있었다.

### 4.3. 엔진 토오크 제어

#### 1) Air Bypass

동일 rpm과 동일 스로틀조건에 대하여 비교하였을 때, 회박연소의 경우가 이론공연비 연소에 비하여 흡입공기대비 투입되는 연료량이 적어 당연히 토오크가 떨어지게 되고 결국은 가속감이 불량하게 된다. 이를 보상하기 위하여 전자제어 스로틀 (ETC: Electronic Throttle Control)을 사용하여 동일한 Acceleration Pedal 개도에 대하여 회박구간에서는 이론구간보다 스로틀을 많이 열어주어 토오크를 보상해 주는 것이 가장 좋으나, Cost 상승등의 제약이 있다. 따라서 여기서는 Idle Speed Actuator (ISA)를 이용하여 회박연소 구간에서는 이를 거의 열어줌으로써 어느 정도 스로틀에 대하여 Linear한 주행성을 실현할 수 있었다.

#### 2) 점화시기 Retard

또한 전술한 바와 같이 회박구간에서 이론공연비 구간으로 천이될 경우 빠른 연료량의 증가에 의한 '토오크의 급작스러운 상승'으로 인하여 쇼크가 발생된다. 이 순간적으로 증가되는 토오크를 감소시켜 보다 부드러운 운전성을 구현하기 위한 기술로 ISA를 통한 Bypass공기량을

순간적으로 감소시켜 흡입 공기량을 줄임과 더불어 점화시기를 연료량 증가에 동기하여 지연시켜주는 로직을 사용하였다.

### 4.4. 차량시험결과

Accent DOHC차량에 Lean Burn Engine 및 기어비를 Base대비 10%정도 Down시킨 저연비형 T/M을 장착하여 정부공식 기관인 환경연구원에서 그림5와 같이 LA-4 Mode주행 시험한 결과, 1.5liter급 이상의 grade에서는 공식연비는 18.9km/liter로 국내에서 유일하게 1등급 판정을 받아 최대 25만원/년의 연료비 절감 효과를 얻었다.(1500km/월, 1200원/리터 기준)

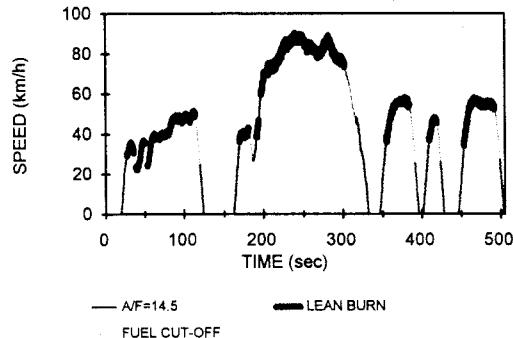


그림 5. LA-4 mode 중 Lean Burn 운전구간

## 5. 결론

지금까지의 대기문제는 주로 대기오염을 줄이기 위한 유해가스의 저감에 그 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 현재 CO2에 의한 지구의 온난화는 환경이라는 측면을 넘어 인류 생존의 문제로 까지 대두되어 있는 상황이다. 따라서 전세계적으로 이 온실가스의 감축에 대한 의정서의 채택을 결의하기에 이르렀고 이에 따라 우리나라 CO2의 저감을 위한 다방면에서의 기술 개발이 시급한 상황이다. 특히 자동차의 경우에서 보면 고효율의 높은 연비를 실현하기 위한 엔진기술 개발에 더욱 많은 노력을 경주해야 할 것이다. 가까운 일본의 경우 이미 Lean Burn뿐 아니라 GDI의 양산개발에 성공하였고, 앞으로도 이를 엔진을 더욱 확대 적용할 예정이라 한다. 더 나아가서 이를 보다 연비가 훨씬 뛰어난 Hybrid차량(HV)의 개발에도 성공한 상황이다. 다소 늦은감은 있으나, HMC에서도 국내 배기규제를 모두 만족하면서 연비는 Base대비 약 20%향상시킨 Lean Burn의 양산개발에 성공하여 Accent에 탑재, 국내시장에 판매중에 있다. 따라서 이를 하나의 시발점으로 하여 앞으로도 계속적으로 더욱 개선된 저연비형 차량의 개발에 보다 많은 노력들이 경주되어 지기를 기대해본다. 이러한 작은 노력들이 모여서 결국에는 우리의 지구를 살리는데 일조한다는 마음가짐을 우리 모두 가져야 하겠다.

## (참 고 문 헌)

- Souich Matsushita, Tokuta Inoue, Kiyoshi Nakanishi, Kenji Kato, and Nobuyuki Kobayashi, "Development of the Toyota Lean Combustion System," SAE Paper 850044
- Kaoru Horie, Kazutoshi Nishizawa, Toru Ogawa, Shusuke Akazaki, and Keiji Miura, "The Development of a High Fuel Economy and High Performance 4-Valve Lean Burn Engine," SAE Paper 920455
- Yasuhiko Iwamoto, Yoshiaki Danno, Osamu Hirako, Toyoaki Fukui, and Nobuaki Murakami, "The 1.5-Liter Vertical Vortex Engine," SAE Paper 920670

- (4) Tokuta Inoue ,Souichi Matsushita, Kiyoshi Nakanishi, and Hiroshi Okano, Toyota "Lean Combustion System- The Third Generation System," SAE Paper 930873
- (5) In-Young Ohm, Hee-Seok Ahn, Woo-Jik Lee, Woo-Tae Kim, Sim-Soo Park, and Dae Un Lee, "Development of a new intake system for a 4-valve lean burn engine," SAE Paper 930879
- (6) F.Saito, M.Misumi, K.Komatsu, N.Mitobe A.Nagao, Mazda "Advanced Lean Burn Engine with New Three- Way Catalyst" SAE Paper 945006
- (7) Naoto Miyoshi, Naoki Takahashi, Kouichi Kasahara et al., "Development of a New Concept Three-Way Catalyst for Automotive Lean Burn Engines" SAE Paper 950809
- (8) Jun Harada, Tsutomu Tomita, Hiroyuki Mizuno, Zenichiro Mashiki, and Yasushi Ito, "Development of Direct Injection Gasoline Engine" SAE Paper 970540