

〈논 문〉 SAE NO. 97370046

밸브 타이밍 변화가 3기통 LPG 엔진의 성능과 Idle 특성에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Valve Timing on the Performance and Idle Characteristics of 3-Cylinder LPG Engine

이 지 근*, 이 한 풍**, 노 병 준***
J. K. Lee, H. P. Lee, B. J. Rho

ABSTRACT

The effects of the intake and exhaust valve timing to improve the engine performance in a spark ignition 3-cylinder LPG engine with a colsed loop fuel supply system were studied. The engine torque and power have been measured using the 75kW EC-dynamometer while adjusting the optimal fuel consumption ratio with a solenoid driver.

As the results from this experiment, when intake valve opening is 12° BTDC, intake valve closing is 36° ABDC, exhaust valve opening is 12° ATDC, and exhaust valve closing is 36° BBDC respectively, the best torque characteristics in low and high speeds for a given engine were obtained. And also we could find that the torque characteristics in low speeds were affected by the timing of exhaust valve open. An increased valve overlap by means of the EVC delay was ineffectual to the torque characteristics improvement in high speeds.

주요기술용어 : LPG Engine(LPG 엔진), Valve Timing(밸브개폐시기), Valve Overlap(밸브 오버랩), Idling rpm(아이들 회전수)

1. 서 론

왕복동 4행정 내연기관에서 작동유체의 교환은 흡입, 압축, 팽창 및 배기의 연속적인 과정을

통하여 이루어진다. 따라서 유효일을 끝낸 연소 가스를 실린더 밖으로 배출하고, 새로운 혼합기를 가능한 한 최대로 실린더 내로 흡입하는 것은 엔진의 체적효율과 성능향상에 밀접한 관계가 있으며, 비출력을 증가시키기 위한 방법 중 하나로 지금까지 많이 연구 되어져 오고 있다.^{1, 3, 4, 5)} 이러한 것에는 실린더 내로 유입되는 혼합기의 유동저항을 감소시킴으로써 체적효율을 향상시키

* 정회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

** 아시아자동차기술연구소 엔진설계부 주임연구원

*** 정회원, 전북대학교 기계공학과

는 방법과 흡기계의 형상을 변경하여 혼합기의 관성효과(Ram Effect)와 동역학적 효과(Dynamic Effect)를 이용하는 방법이 있다. 또다른 방법으로, 주어진 흡기계에서 밸브 타이밍을 변화시키면 앞의 두가지 효과를 적절히 이용하여 혼합기의 흡입량을 증대시킬 수 있다. 특히 밸브 타이밍 변화를 이용하는 방법은 흡기계의 형상변경 없이, 캠축의 형상 변경만으로 최적의 엔진 튜닝을 이룰 수가 있다.

엔진 토크 특성은 혼합기 흡입량에 비례하므로 밸브타이밍에 직접 영향을 받는다. 따라서 양호한 토크 특성을 얻기 위해서는 질량을 가진 유체의 관성에 의한 지연을 고려하여, 열림시기는 빠르고 닫힘시기는 이보다 늦게 설정할 필요가 있다. 그 결과, 밸브개폐시기는 상사점과 하사점으로부터 어느 정도 벗어나 있어야 하며, 보다 긴 밸브열림 기간과 보다 큰 밸브오버랩 기간이 형성된다. 그러나 관성에 의한 지연은, 엔진의 회전수와 관계없이 일정한 시간이라고 가정하여 크랭크 각도로 나타내면, 회전수에 비례하여 커지게 된다. 또한 4행정 내연기관의 캠축은 크랭크축에 의해 구동되므로 밸브열림과 닫힘각은 상사점에 대하여 고정되어 있다. 이러한 이유로 밸브 타이밍의 최적 조합은 단지 하나의 엔진 속도에서만 존재하며, 넓은 엔진 속도를 만족하는 밸브 타이밍은 존재하지 않는다. 즉, 고정된 밸브 타이밍은 항상 고속영역에서의 최대 출력 특성과 저속영역의 토크 특성 사이에서 절충해야하는 문제점을 안고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, Stojek¹⁾ 등은 가변 밸브오버랩 장치를 이용하여 흡·배기밸브 타이밍과 밸브오버랩각을 변화시킴으로써 저속과 고속영역에서 향상된 엔진 토크 특성 및 부분부하 연료소모율, 그리고 감소된 배출가스 특성 등을 얻을 수 있음을 실험적으로 밝힌 바 있다.

그러나 경제성이 요구되는 엔진의 경우, 고정된 밸브개폐시기를 갖는 캠축을 사용하는 경우가 일반적이다. 따라서 저속영역의 토크 특성과 고속영역의 출력 특성이 적절히 절충된 최적의 밸브개폐시기를 찾는 것이 중요하다. Asmus²⁾ 등은 공회전 성능을 향상 시키기 위해서는 공회전 연

료소모율이 가장 작은 상태에서 밸브오버랩을 줄이는 것이 바람직하며, 밸브오버랩을 최소화하기 위해서는 저속 토크와 출력사이의 균형을 고려하여 흡기밸브의 닫힘시기를 설정한 후, 흡기밸브 열림시기의 전진을 늦추어야함을 밝힌 바 있다. 밸브 개폐시기와 관련하여 長尾不二夫³⁾는 흡기밸브 열림과 닫힘 그리고 배기밸브 열림과 닫힘에 대하여 과급방식 엔진의 경우, 상사점전 70°~80°, 하사점후 30°~45°, 하사점전 45°~55°, 상사점후 55°~65°, 그리고 자연흡기방식 엔진의 경우, 각각 상사점전 0°~40°, 하사점후 20°~60°, 하사점전 30°~80°, 상사점후 10°~35° 범위가 적절함을 제시한 바 있다. 또한, Heywood⁴⁾는 상사점전 10°~25°, 하사점후 40°~60°, 하사점전 50°~60°, 상사점후 8°~20° 등이 적합함을 제시한 바가 있지만, 3기통 LPG 기관에 대한 실험적 연구 결과는 아직 부족한 편이다.

본 연구에서는 폐루프 연료 공급계를 채택한 전기 점화 LPG엔진의 흡·배기 밸브 개폐시기와 밸브오버랩 변화가 엔진 성능과 아이들 특성에 어떠한 영향을 끼치는가를 고찰하고, 소형 3기통 LPG엔진 설계의 기초 자료로 삼고자 하였다.

2. 실험장치 및 측정방법

2.1 실험장치

밸브 개폐시기가 엔진 성능에 끼치는 효과를 알아보기 위하여 흡·배기밸브의 열림 및 닫힘시기와 작동각이 서로 다른 캠축을 이용하여 실험을 수행하였다. 밸브 개폐시기와 관련된 실험조건은 총 8개이다. 각각을 Type A, B, C, D, E, F, G, H로 정의 하였으며, 흡·배기밸브의 개폐시기와 밸브 작동각, 그리고 밸브오버랩각을 Table 1에 나타내었다.

Table 1에서 IVO(BTDC)는 흡기밸브열림(상사점전)을 의미하는 것으로서, 흡기밸브열림전진(Advanced)이라는 용어를 사용하여 표현하였다. IVC(ABDC)는 흡기밸브닫힘(하사점후)을 의미하는 것으로서, 흡기밸브닫힘 지연

Table 1 A List of Examined Valve Timing

Type	Valve Timing				Valve Duration		Overlap (deg.)
	IVO (°BTDC)	IVC (°ABDC)	EVO (°BBDC)	EVC (°ATDC)	Intake (deg.)	Exhaust (deg.)	
A	26	30	52	12	236	244	38
B	16	40	59	11	236	250	27
C	20	36	52	12	236	244	32
D	16	40	44	16	236	240	32
E	12	36	50	10	228	240	22
F	24	28	50	10	232	240	34
G	16	32	46	10	228	236	26
H	12	36	46	10	228	236	22

(Delay)이라는 용어를 사용하여 표현하였다. 또한, EVO(BBDC), EVC(ATDC)는 각각 배기밸브 열림(하사점전), 배기밸브닫힘(상사점후)을 의미하는 것으로서 배기밸브열림 전진, 배기밸브닫힘 지연이라는 용어를 사용하여 표현하였다. 표시된 각 밸브개폐시기 Type에서 밸브 작동각이 같은 경우, 요구되는 밸브개폐시기가 되도록 동일한 캠축의 중심각을 조정하여 이용하였다.

실험은 Type A로 정의된 캠의 밸브 개폐시기를 기준으로, 주어진 엔진과 최적의 튜닝조건을 찾는 방법으로 진행되었다. Fig.1은 Type A의 밸브개폐시기와 개폐시기 선도에 사용된 변수의 정의를 나타낸 것이다. 그림 우측의 사분면에 밸브 개폐시기를 표시하는 방법을 정의 하였다. 즉, 제 1사분면에는 배기 밸브 닫힘시기를 그리고 제 2, 3, 4 분면에는 흡기밸브 열림, 흡기밸브 닫힘, 배기밸브 열림시기를 각각 나타내었다.

흡입공기량은 밸브개폐시기 뿐만 아니라 밸브 양정곡선 즉, 밸브 움직임 속도와 가속도에 많은 영향을 받는다. 실험에 이용된 캠은 폴리노미얼(Polynomial) 캠으로서 Type A의 밸브개폐시기를 갖는 캠에 의해 구동되는 밸브의 양정곡선을 Fig.2에 나타내었다.

엔진은 경승합차용 796cc 3기통 LPG엔진으로, 주요제원은 Table 2에 도시한 바와 같다.

실험은 개스분석기(Horiba Co.)가 부착된, 최대 흡수동력 75kW, 최대 흡수 회전속도 8,000rpm인

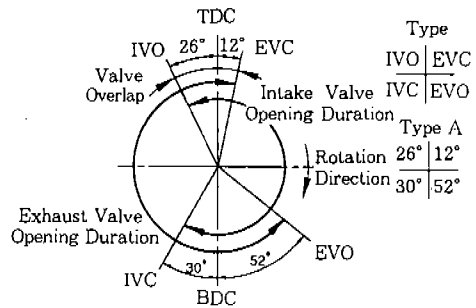


Fig.1 Valve Timing Diagram of Type A

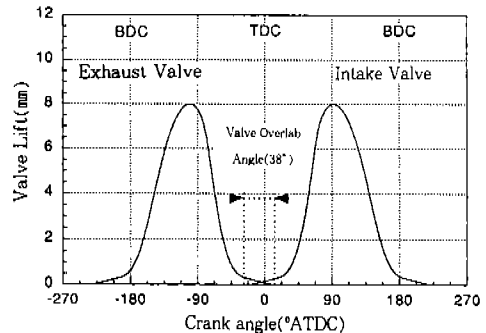


Fig.2 Valve-Lift Curve of the Type A as a Function of Camshaft Angle

수냉식 동력계(Meiden Co.)를 사용하였으며, 전체적인 실험장치의 구성을 Fig.3에 나타내었다.

실험에 사용된 LPG 연료는 하계용으로(5월 ~8월) KS 2150-1983에 규정된 "LPG종류 및

Table 2 Specifications of Test Engine

Item	Specification
Displacement(cc)	796
Type	In-line, 3-cylinder
Bore(mm) × Stroke(mm)	70 × 69
Compression ratio	9.5
Mixer type	Auto-choke, 1-barrel
Vaporizer type	Pre-heater

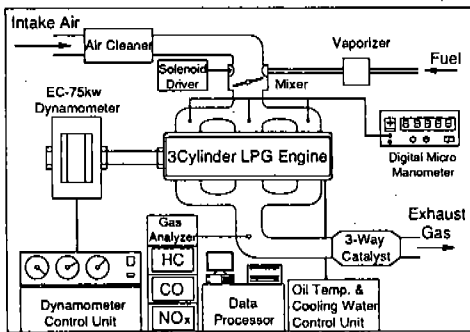


Fig.3 Experimental Setup

품질”의 2종 4호이다. 조성은 프로판 10%, 부탄 90%이며, 이론적인 저위 발열량은 약 11,000kcal/kg, 이론공연비는 15.6 이다.

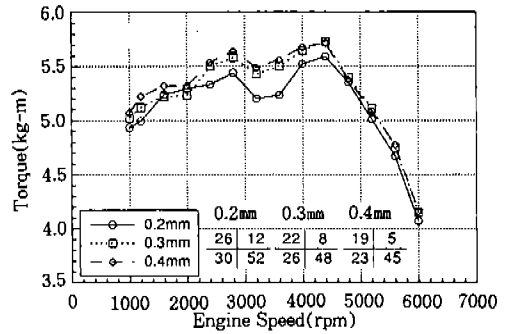
2.2 실험방법

실험은 드로틀밸브가 완전히 전개된 전부하(Full load) 상태에서 수행되었다. 엔진의 회전 속도는 1,200rpm부터 6,000rpm까지 400rpm 단위로 변경하였다. 각 운전 조건에서 밸브개폐 시기 변화에 따른 엔진의 제동토크 및 출력은 최적의 공연비로 조정한 후 측정하였다. 실험 중 엔진의 냉각수 온도는 80±2℃, 엔진 오일의 온도는 80~100℃를 유지 시켰다.

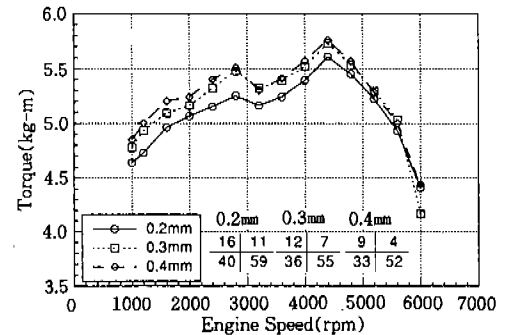
3. 실험결과 및 고찰

3.1 밸브간극 변화에 따른 토크특성

밸브간극이 변화하면 동일한 작동각을 갖는 캠에 의해 밸브가 구동 되어도 밸브 개폐시기가 변



(a) Type A



(b) Type B

Fig.4 Influence of Valve Clearance on Torque

하게 된다. 이에 따라 밸브오버랩과 흡·배기 밸브의 열림기간이 변화되어 엔진 성능에 영향을 끼치게 된다. Fig.4(a)는 밸브간극 0.2mm일 때, 38°의 밸브오버랩을 갖는 Type A의 밸브간극을 0.3mm, 0.4mm로 변화시켜 밸브오버랩을 30°, 24°로 줄였을 경우, 엔진 회전속도에 따른 제동 토크 분포를 나타낸 것이다. 그림 아래부분에 변화된 밸브간극에 대한 밸브 개폐시기를 나타내었다. 사분면에 표시된 밸브 개폐시기는 Fig.1에서 정의한 방법을 이용하여 나타내었으며, 이후의 그림에서도 같은 방법을 이용하여 표시하였다. 6,000rpm 근처를 제외하고 전회전속도 영역에서 밸브간극 증대에 의한 밸브오버랩을 줄였을 경우가 높은 토크분포를 나타내고 있다. 특히 2,000rpm~4,800rpm 사이에서 밸브오버랩 축소에 의한 효과가 두드러지게 나타나고 있음을 알 수 있다. Fig.4(b)는 밸브간극 0.2mm에서 27°의 밸브오버랩을 갖는 Type B의 밸브간극을 0.3mm, 0.4mm로 변화시켜 밸브오버랩을 19°,

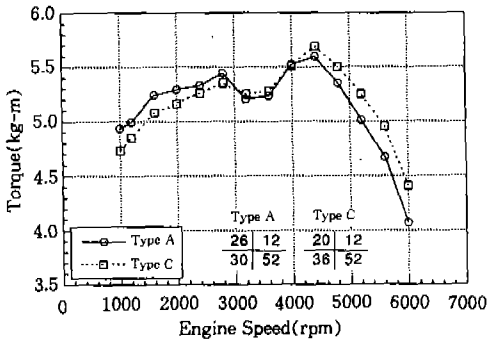


Fig.5 Influence of Intake Valve Timing on Torque with a Fixed Valve Opening Duration

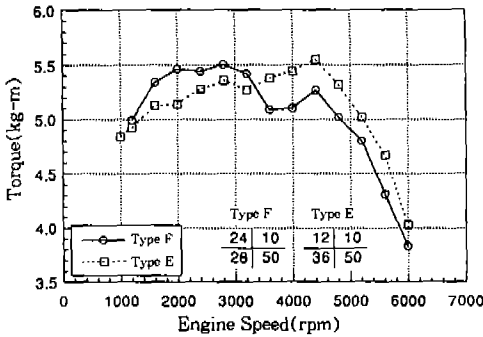


Fig.6 Influence of Intake Valve Timing on Torque with a Reduced Intake Valve Opening Duration

13°로 줄였을 경우, 엔진 회전속도에 따른 제동 토크 분포를 나타낸 것이다. 저·중속영역에서 토크 증가현상이 뚜렷함을 관찰할 수 있다. 이것으로부터 고속성능보다 중·저속의 토크특성을 향상시키기 위해서는 밸브오버랩의 축소가 필요하며, 최적의 밸브타이밍이 선정되어야 함을 알 수 있다.

3.2 흡기밸브 개폐시기의 효과

Fig.5는 엔진 회전수에 따른 토크분포를 동일한 캠작동각을 갖는 Type A와 Type C에 대하여 나타낸 것이다. 배기밸브 열림 시기는 일정하게 유지되었으며, 흡기밸브 열림시기를 상사점전 26°에서 20°로, 흡기밸브 닫힘시기를 하사점후

30°에서 36°로 각각 변경 시켰다. 따라서, 흡기 밸브 개폐시기의 변화로 인하여 밸브오버랩이 38°에서 32°로 변화되었다. 일반적으로 흡기밸브 열림시기가 상사점전 보다 빠르면 고속구간에서는 흡입공기의 동적효과로 인하여 체적효율이 증대되지만, 저속구간에서는 잔류가스량의 증대로 체적효율이 저하한다. 또한 흡기밸브의 닫힘시기가 하사점후로 늦춰지면 고속구간에서는 흡기관성에 의해 체적효율이 증대하지만, 너무 크면 흡입공기가 오히려 역류하여 체적효율이 저하하게 된다. 3,000rpm이하의 저속구간에서는 흡기밸브 닫힘 지연(IVC delay)이 증가된 Type C가 낮은 토크분포를 나타내고 있다. 그러나 4,000rpm 이상의 고속구간에서, Type C의 토크특성 향상이 두드러지게 나타나고 있다. 전반적으로 흡기밸브 열림 전진(IVO advanced)의 감소효과 보다 흡기밸브 닫힘 지연의 증가 효과가 상대적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 고속영역에서 체적효율을 결정하는 주요 인자는 흡기밸브 닫힘시기와 밸브오버랩임을 밝힌 바 있는 Asmus²⁾의 견해와 일치되는 현상이다.

Fig.6은 배기밸브 개폐시기를 일정하게 고정 한 채, 흡기밸브의 개폐시기를 변화시킨 Type F와 Type E의 토크분포를 나타낸 것이다. 흡기밸브 열림시기는 상사점전 24°에서 12°로, 흡기밸브 닫힘시기를 하사점후 28°에서 36°로 각각 변경 시켰다. 또한 흡기밸브의 작동각이 Type E가 Type F보다 4° 축소되었으며, 흡기밸브 개폐시기 변화로 인하여 밸브오버랩이 34°에서 22°로 축소되었다. 이것은 Fig.5와 비교해 볼 때, 저·중속 영역의 토크특성 향상을 위해 밸브 작동각을 줄인 경우이다. 이와 같이 작동각이 줄어들면 저·중속의 토크특성은 향상되지만 최대출력은 저하하는 것으로 알려져 있다. 3,200rpm이하의 저속영역에서 Type F의 토크 향상이 뚜렷하지만 3,200rpm이상의 중·고속영역에서 토크의 저하가 크게 나타나고 있다. 이것은 Type F의 흡기밸브 닫힘각 28°는 저속영역의 토크 향상에 일부 기여하지만, 고속영역에서 흡입 혼합기의 관성효과를 이용하기에는 너무 작음을 의미하는 것이다. Type E는 흡기밸브 닫힘각의 충분한 지연

(36°)으로 고속영역에서 상대적으로 높은 토크 분포를 나타내고 있지만, 저속영역에서는 낮은 토크 분포를 나타내고 있어 저속영역의 토크 특성 향상이 필요함을 알 수 있다.

Fig.7은 동일한 작동각을 갖는 Type G와 Type H에서 배기밸브 열림시기를 일정하게 고정한 채, 흡기밸브 열림시기를 상사점전 16°에서 12°로, 흡기밸브 닫힘시기를 하사점후 32°에서 36°로 각각 변경시켰을 때, 엔진 회전수에 따른 토크분포를 나타낸 것이다. 흡기밸브 개폐시기의 변화로 밸브오버랩이 34°에서 22°로 변화되었다. 전반적인 분포경향을 살펴보면 3,200rpm 이하의 저속영역에서 거의 동일한 값을 나타내고 있다. 그러나 흡기밸브열림 전진(IVO advanced)이 다소 큰 Fig.5의 Type A와 Type C보다 향상된 토크특성을 나타내고 있다. 또한 같은 흡·배기밸브 개폐시기를 갖는 Type E와 비교해 볼 때, 저속영역의 토크특성 향상이 현저함을 알 수 있다. 3,200rpm 이상의 중·고속 영역에서, 흡기밸브의 닫힘시기를 하사점후 32°로부터 36°로 변경시킨 Type H가 높은 토크 분포를 나타내고 있다. 이것으로부터 Type H의 흡기밸브 닫힘각은 주어진 흡기계에서 충분한 관성효과가 적용되는 시기임을 짐작할 수 있으며, 흡기밸브 열림시기 또한 적절한 시기임을 알 수 있다.

3.3 배기밸브 개폐시기의 효과

Fig.8은 흡기밸브 개폐시기를 고정한 채, 배기

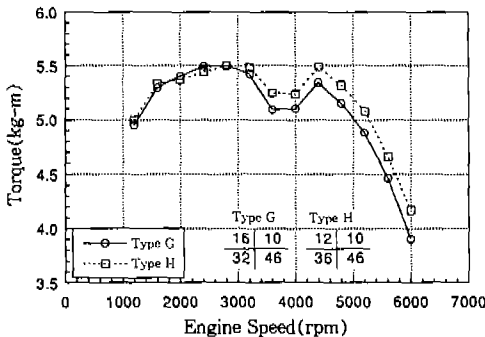


Fig.7 Influence of Reduced Intake Valve Advance on Torque with a Fixed Valve Opening Duration

밸브의 열림시기를 하사점전 50°에서 46°로 변경시킨 Type E와 Type H의 토크 분포를 엔진 회전속도에 따라 나타낸 것이다. 이 경우 배기밸브의 닫힘시기는 변경하지 않았으므로 배기밸브 캠 작동각이 240°에서 236°로 축소되었다. 일반적으로 배기밸브의 열림시기는 체적효율에 미치는 영향이 다른 밸브 개폐시기에 비하여 상대적으로 작은 것으로 알려져 있다. 그러나 Type H의 토크 특성이 4,000rpm 근처의 중속영역을 제외하고 저속과 고속영역에서 높은 분포를 나타내고 있다. 특히 저속영역의 토크특성 향상은 주목할만 하다.

Fig.9는 동일한 흡기밸브 개폐시기를 갖는 Type B와 Type D의 배기밸브 열림시기를 59°

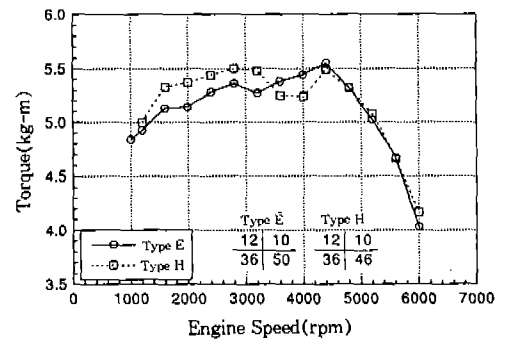


Fig.8 Influence of EVO on Torque with a Fixed EVC

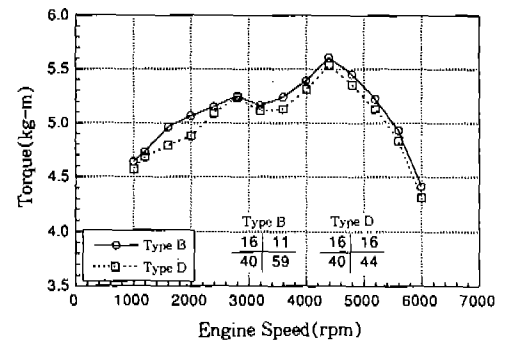


Fig.9 Influence of Exhaust Valve Timing on Torque with a Reduced Intake Valve Opening Duration

에서 44°로 그리고 배기밸브 닫힘시기를 11°에서 16°로 각각 변경 시켰을 때, 엔진회전수에 따른 토크 분포를 나타낸 것이다. 이 경우 배기밸브 개폐시기의 변화로 인하여 밸브오버랩이 27°에서 32°로 증가 되었다. 배기밸브 닫힘각을 빠르게 함으로써 밸브오버랩이 줄어든 Type B가 전 회전속도 영역에서 높은 토크 분포를 나타내고 있다. 이것으로부터 배기밸브 열림시기는 전체 속도 영역의 토크특성에 영향을 끼치며, 배기밸브 닫힘 지연을 이용한 오버랩 증가는 고속 영역의 토크 특성 향상에 도움을 주지 못함을 짐작 할 수 있다.

3.4 밸브오버랩 효과

Fig.10(a)는 Fig.4~9로부터 중·저속성능이 우수한 Type A, F, G, H의 토크 분포를 엔진 회전속도에 대하여 나타낸 것이다. 이때 밸브오버랩은 각각 38°, 34°, 26°, 22°이다. 일반적으로

로 밸브오버랩이 큰 것은 고속영역의 출력향상에 적당하고, 밸브오버랩이 작은 것은 저속영역의 토크 특성향상에 유리한 것으로 알려져 있다. 그러나 밸브오버랩 22°로 가장 작은 Type H 캠이 전 회전영역에서 가장 높은 토크분포를 나타내고 있다. 이러한 현상은 주어진 흡기시스템에 대한 최적의 밸브 개폐시기는 단지 밸브오버랩만의 함수가 아님을 나타내는 것이며, 흡·배기 밸브 개폐시기의 최적화를 통하여 이루어질 수 있음을 의미하는 것이다.

Fig.10(b)는 Type A, F, G, H의 최대출력이 발생하는 5,600rpm에서의 출력을 밸브오버랩에 대하여 나타낸 것이다. 밸브오버랩이 가장 작은 Type H의 최대출력이 가장 크게 나타나고 있어 주어진 흡기시스템과 적절한 조화를 이루고 있음을 알 수 있다.

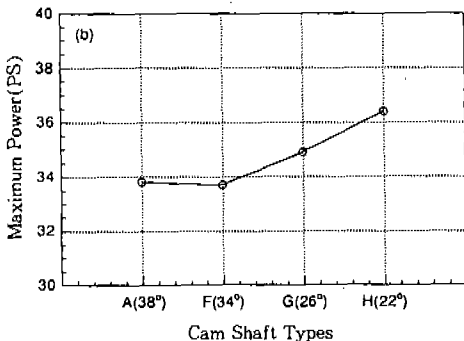
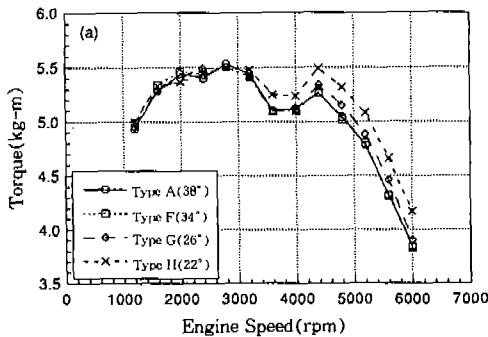


Fig.10 Influence of Valve Overlap on Torque and Maximum Power

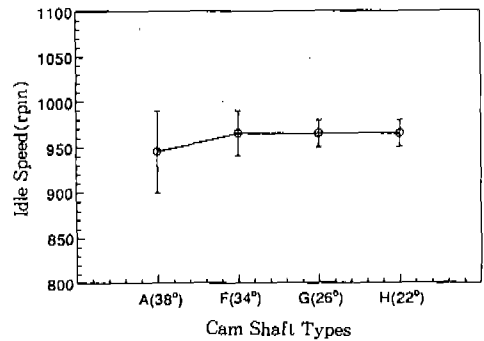


Fig.11 Variation of Idle Speed for a Given Valve Overlap

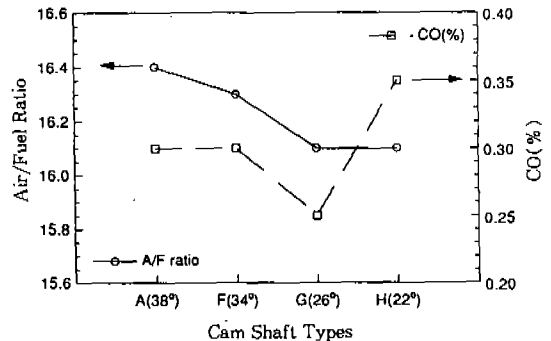


Fig.12 A/F Ratio and CO Emission at Idle Condition

3.5 공회전시의 안정성

Fig.11은 밸브오버랩이 서로다른 Type A, F, G, H의 공회전시의 안정도를 알아보기 위하여 공회전속도와 변동치를 함께 나타낸 것이다. 밸브오버랩이 가장 작은 Type H가 비록 공회전속도가 상승하기는 했지만 변동치가 줄어들어 공회전 안정도가 증가됨을 알 수 있다.

Fig.12는 Type A, F, G, H의 공회전시의 배출가스 특성을 알아보기 위하여 공연비와 CO 배출농도를 밸브오버랩에 대하여 나타내었다. 토크 특성이 가장 좋은 Type H가 가장 낮은 공연비를 나타내고 있으며, 이에 따라 일산화 탄소의 배출량이 다소 증가됨을 보여주고 있다.

4. 결 론

경승합차용 796cc 3기통 LPG엔진을 대상으로 흡·배기 밸브의 개폐시기를 변화시켜 가면서 주어진 흡기시스템에 대한 최적의 조건을 찾고자 하였으며, 실험을 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

실험을 행한 8개의 개폐시기 중에서 흡기밸브 열림은 상사점전 12°, 흡기밸브 닫힘은 하사점 후 36°, 배기밸브 열림은 하사점전 46°, 배기밸브 닫힘은 상사점 후 10°일 때, 저속영역 및 고속영역에서 가장 양호한 토크 특성을 나타냈다. 또한 공회전시의 안정성 역시 동일한 밸브 개폐시기에서 가장 양호하게 나타났지만, 공연비는 낮아지고 일산화탄소(CO)의 방출량은 약간 증

가하였다. 배기밸브 개폐시기 조정에서 열림시기는 저속영역의 토크 특성에 영향을 끼치며, 닫힘시기 지연을 이용한 오버랩 증가는 고속영역의 토크 특성 향상에 도움을 주지 못함을 보였다. 또한 주어진 흡기시스템에 대한 최적의 밸브 개폐시기는 단지 밸브오버랩만의 함수가 아니며 흡·배기 밸브 개폐시기의 최적화를 통하여 이루어질 수 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Stojek, D. and Stwiorok, A., "Valve Timing with Variable Overlap Control", SAE 845026, 1984.
2. Asmus, T. W., "Valve Events and Engine Operation", SAE 820749, 1982.
3. Tuttle J. H., "Controlling Engine Load by means of Early Intake-Valve Closing", SAE 820408, 1982.
4. Tuttle J. H., "Controlling Engine Load by means of Late Intake-Valve Closing", SAE 800794, 1980.
5. 長尾不二夫, "內燃機關", 大光書林, 1985.
6. Heywood, J. B., "Internal Combustion Engine Fundamentals", McGraw Hill, 1988.
7. 조진호, 內燃機關工學, 學研社, 1993.
8. Fukutani, I. and Watanabe, E., "Air Flow through Poppet Inlet Valves—Analysis of Static and Dynamic Flow Coefficients", SAE 820154, 1982.