

스파크 점화기관에서 이차 공기 분사가 냉시동시 THC 배출량에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

이 승 재¹⁾ · 함 윤 영²⁾ · 전 광 민¹⁾

연세대학교 기계공학과¹⁾ · 우석대학교 자동차공학과²⁾

Experimental Study of the Effect of Secondary Air Injection on the Cold Start Total Hydrocarbon Emissions in a Spark Ignition Engine

SeungJae Lee^{*1)} · Yun Young Ham²⁾ · Kwang Min Chun¹⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Department of Automotive Engineering, Woosuk University, Jeollabuk-do 565-701, Korea

(Received 12 April 2002 / Accepted 29 October 2002)

Abstract : Engine emission regulations are becoming more stringent nowadays. In cold transient regime, about 80% THC is exhausted to the atmosphere in the first 200s (US FTP cycles). Accordingly, reducing emission levels in the cold period immediately after the engine start before the catalysts reach their working temperature will be an especially critical factor in meeting more stringent regulations in the future. In this study, the total hydrocarbon quantities are measured using a Fast FID with gasoline fuel for a 4-cylinder SI engine, including Secondary Air Injection (SAI) system. Commercial SAI device's direction is reverse to the exhaust flow. In this study, a swirl flow type SAI system which is positioned between the exhaust manifold and exhaust port, was developed. We compared the swirl type secondary air injection with a commercial secondary air injection of reverse flow. The swirl type SAI showed better results in reducing HC by 26% than the commercial flow type SAI of reverse flow which was caused by the better mixing between the exhaust gas and the secondary air.

Key words : Secondary air injection(이차공기분사), THC(Total Hydrocarbon Carbon), Swirl flow(스월유동), Mixing(혼합), Cold start(냉간시동)

1. 서 론

엔진 설계의 궁극적 목표는 고효율, 고출력, 고연비, 저소음, 저진동, 공회전 안정을 포함한 운전의 안정성 및 유해가스의 배출 저감이라고 말할 수 있다. 이중에서도 현재 배출가스에 대한 규제가 심화되면서 배출 가스 저감을 목표로 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 가솔린을 연료로 사용하는 SI엔진의 경우에 시동초기 약 2~3분 사이에 전체 HC의

약 80% (FTP mode)가 배출된다. 초기 시동 시에는 엔진이 차가운 상태이기 때문에 TWC(Three Way Catalyst)가 활성화 되어 있지 않고 연소가 잘 이루어지지 않기에 많은 HC가 배출된다. 이를 해결하기 위한 방법으로 후처리 방법이 있다. 후처리 방법은 엔진의 TWC의 온도를 빨리 올리기 위한 방법으로 배기포트에 TWC가 손상되지 않는 범위에서 Catalyst를 배기포트에 근접하여 부착하는 CCC(Closed Coupled Catalyst)방법이 있고, Battery의 전기에너지를 이용하여 Catalyst에 코일을 감싼 후 코일에 전기

*To whom correspondence should be addressed.
leesjxyz@yonsei.ac.kr

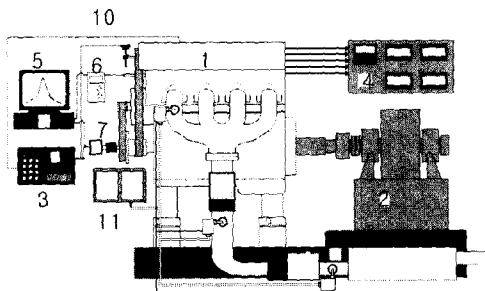
를 공급해 Catalyst의 온도를 빨리 올리는 EHC (Electrically Heated Catalyst) 방법과 엔진의 배기포트에 이차 공기를 분사하여 엔진의 배기 HC을 산화하여 HC을 줄이는 방법이 있다.

본 연구에서는 4기통 스파크점화기관을 대상으로 냉 시동 시 2차 공기분사가 THC에 미치는 영향을 2차 공기분사방향, 분사시기, 분사량을 변화시켜 그 효과를 실험적으로 연구하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구의 실험장치구성은 Fig. 1과 같다. 실험에 사용된 엔진은 상용 1.5L DOHC 스파크 점화기관이며 매니폴드에서 배출가스를 추출하여 HC농도를 측정하기 위하여 FFID(Fast Flame ionization detector)를 사용하였다. Fig. 2는 2차공기분사장치로서 1번



1. Engine 2. Dynamometer(EC, AC, Transient AC) 3. Engine controller 4. Temperature measuring system & coolant temp. controller 5. Combustion pressure data acquisition system 6. Charge amplifier 7. Encoder 8. Cam location sensor 9. Three way catalyst 10. Exhaust gas analyzer 11. FastFID

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

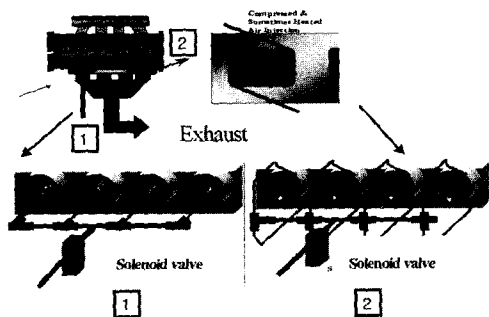


Fig. 2 Secondary air injection system(Reverse VS Swirl injection system)

의 그림은 배출가스유동방향의 역방향으로 공기를 분사하는 역방향 2차공기분사(RSAI, Reverse Secondary Air Injection) 이고 2번의 그림은 2차공기에 스월을 유도한 스월방향 2차공기분사(SSAI, Swirl Secondary Air Injection)이다.

2.2 실험방법

본 실험은 냉간 시동 구간이 주요 관심 분야 이므로 냉각수 온도를 20℃에 고정한 후에 FFID (Fast Flame Ionization Detector)를 사용하여 실험을 행하였다. 기존의 이차 공기분사 시스템은 배출가스 유동방향의 정반대 방향으로 공기를 분사하였지만^{1,4)} 본 실험에서는 이차 공기를 분사할 때 스월을 유도하여 배출가스와 이차 공기와의 혼합을 더 잘 되도록 하여 RSAI와 SSAI시스템과의 THC차이를 비교하였다. 이차 공기 분사는 분사시기와 분사량에 따라 THC의 저감 정도가 다르다. 특히 분사시기에 크게 영향을 받는다. 이차 공기의 분사시기는 배기밸브가 열리는 시점을 전후로 하여 실험을 행하였다. 배기밸브는 크랭크각으로 144° ATDC(압축 TDC)에 열리고, 13° ATDC(흡기 TDC)에 닫힌다. 즉 배기밸브는 크랭크각으로 234° 정도 열려 있게 된다. 이차공기의 분사시기는 크랭크각을 기준으로 분사하며 엔진의 회전수와는 무관하게 크랭크각에 따라 그 분사시간이 결정된다.

2.2.1 이차 공기 분사시기 변화 실험

EVO(Exhaust Valve Opening)시점을 전후로 하여 이차 공기를 공급하여 그 저감 효과를 알아본다. 실험은 크랭크각으로 ATDC 100°, 120°, 140°, 160°에 한하여 행하였다.

2.2.2 이차 공기 분사기간 변화 실험

크랭크각을 기준으로 하여 그 분사기간을 결정하였다. 이차 공기 분사기간은 100°, 140°, 180° CAD (Crank angle degree)이다. 실제 엔진에서 배기밸브가 열려 있는 기간은 234° CAD인데 이 기간 중 배출가스는 초기에 대부분이 빠져 나오기 때문에 위에서 결정한 분사기간 동안 배출가스와 이차 공기간의 혼합이 이루어질 수 있다.

2.2.3 이차공기의 분사방향 변화 실험

기존의 상용화된 이차 공기는 배출가스의 유동방향의 역방향으로 공기를 공급하였으나 이번 실험에서는 배기포트에 Inserter를 설치한 후에 그 Inserter에 이차 공기를 스월이 생성되게 하기 위해서 배출가스 유동방향에 수직으로 공기를 분사하였다.

3. 실험 결과

3.1 스월 방향과 역방향의 경우 이차 공기 분사와 배출가스와의 혼합

기초실험으로써 반응성이 적은 기체인 N₂를 공급하였을 때 혼합의 정도를 FFID로 측정해 보았다. 혼합이 잘 되는 구간에서의 FFID신호는 균일한 신호가 나오고 반대로 N₂와 배출가스와의 혼합이 잘 이루어지지 않는 경우에는 신호의 편차가 크게 나올 것이다.

스월 유동을 준 이차 공기분사의 경우 실험 모드는 전부 12개 였으나 그 중에 분사시기가 ATDC120°(CAD)인 경우가 배기밸브가 열리기 직전인데 기존의 연구결과에서 알 수 있듯이 이 때의 혼합이 가장 잘 되기 때문에 이 시기의 FFID 신호를 그래프로 나타내 보았다.⁴⁾ 혼합이 잘 되는 경우와 안 되는 경우의 기준은 이차 공기를 분사하지 않은 공회전시의 THC 농도의 1차 미분 최대값을 기준으로 하였는데 최대값은 1000(ppm/sample)이다. Fig. 3에서부터 Fig. 6까지의 그래프는 스월 유동을 주었을 때의 분사시기 ATDC120°(CAD)인 경우 X축을 시간 축으로 하고 분사시간에 따른 FFID의 신호의 미분값을 Y축에 나타낸 것이다. Fig. 3, Fig. 4의 그래프는 질소와 배출가스가 균일한 혼합을 형성했음을 알 수 있다. 질소를 분사하였을 때 배출가스와 혼합이 잘 되지 않으면 시간에 따라 일정한 값을 나타내지 않을 것이다. 그 이유는 배출가스와 섞이지 못한 이차 공기가 균일 혼합되지 않고 국부적으로 샘플링 되어 FFID의 신호가 0에 가깝게 나오는 경우가 많기 때문이다. 스월 유동 SAI분사의 경우 이차 공기 분사시간에 따른 신호의 편차가 작다. 즉 배출가스와 질소가스와의 균일한 혼합이 이루어 졌다고 말할 수 있다. Fig. 5, Fig. 6은 역방향 분사의 경우인데 Fig. 3, Fig. 4의 경우보다 혼합이 잘 안 되었음을 알 수 있다.

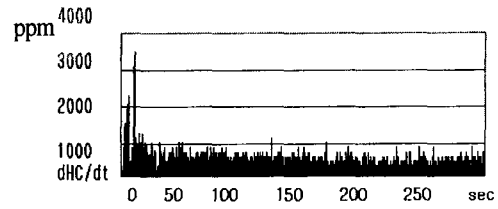


Fig. 3 Time derivative of total HC concentrations(Swirl, Cold start 20°C, SAI T120° ATDC, SAID100°)

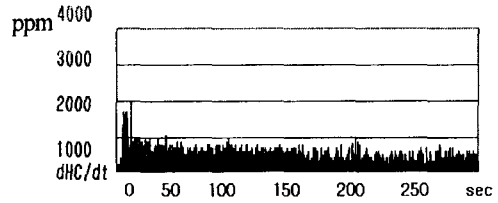


Fig. 4 Time derivative of total HC concentrations(Swirl, Cold start 20°C, SAI T120° ATDC, SAID140°)

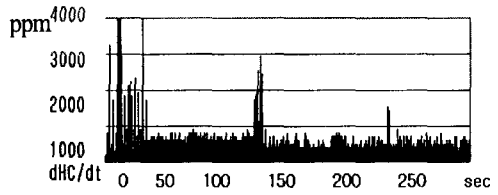


Fig. 5 Time derivative of total HC concentrations(Reverse, Cold start 20°C, SAI T120° ATDC, SAID100°)

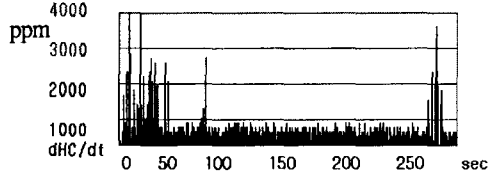


Fig. 6 Time derivative of total HC concentrations(Reverse, Cold start 20°C, SAI T120° ATDC, SAID140°)

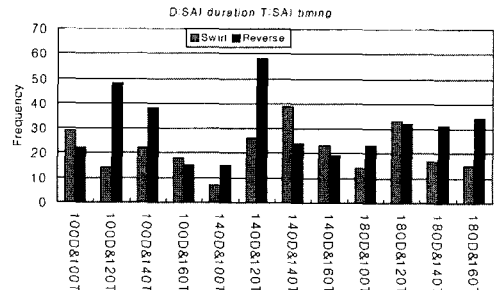


Fig. 7 Comparison of the frequency over 1000ppm/sample (Reverse SAI and swirl SAI)

위의 Fig. 7에서 X축의 D의 경우 공기 분사시간을 의미하고 T의 경우에는 공기 분사시기를 의미한다. 각 시험조건에 대해 THC 농도를 1차 미분한 값이 1000ppm/sample 이상인 빈도를 비교하여 나타낸 것으로 빈도가 많음은 2차 공기와 배출가스와의 혼합이 좋지 않음을 의미한다. 그래프를 보면 스윙방향 2차 공기분사가 역방향 2차공기분사보다 빈도가 작아 혼합효과가 더 좋음을 알 수 있다. 특히 분사시간이 180° 일 때는 분사시기에 관계없이 전반적으로 빈도(over 1000ppm/sample)가 많음을 알 수 있는데 그 이유는 분사시간 180° 일 때는 솔레노이드가 분사시기에 관계없이 연속 이차 공기 분사(Continuous SAI)이기 때문이다. (4기통 이므로 각 실린더 당 분사 가능한 최장시기가 180°이다.) 연속적으로 질소가 분사되어서 배기밸브가 닫혀 있는 경우에도 배기 매니폴드에 질소 가스가 머물기 때문에 배출가스와의 혼합이 안 되고 그대로 샘플링되어 빈도가 크다.¹⁾ 역방향 이차 공기 분사의 경우 분사시기가 ATDC120° 인 경우에는 분사시간 100°, 140°의 경우에 빈도가 크다. 그 이유는 초기 시동 직후 상대적으로 낮은 온도의 배출가스가 배기밸브가 열리는 시점에서 질소가스와 혼합이 잘 안되었기 때문이다.

3.2 냉시동 시에 공기 분사량에 따른 역방향 이차 공기분사와 스윙 방향 이차 공기분사의 THC 농도 비교

스파크 점화기관에서 냉시동 시에 이차 공기를 분사했을 경우에 분사시간을 100°, 140°, 180° CAD로 하여 분사시간에 대한 영향을 알아 보았다. 분사시간에 따른 영향은 분사시간이 100°인 Fig. 8의 경우 Fig. 9보다 약간 적은 THC 농도 저감을 보인다. 배기밸브가 열리기 전에 분사되므로 공기가 상대적으로 적게 들어가고 또 배출가스가 배기포트에 머무는 기간에 SAI가 분사되므로 배출가스와 이차 공기와의 균일한 혼합이 어려워 SAI분사시간 140°보다 상대적으로 배출가스 저감 효율이 적다. 분사시간이 140°인 Fig. 9의 경우에는 공기가 단속적으로 공급되며 그 중 분사시기가 ATDC120° 일 때는 배출가스와 이차 공기와의 혼합이 잘 되고 배출가스 중의 미연 HC농도가 상대적으로 높아서 THC농도 저

감 효율이 좋다. 분사시간이 180°인 Fig. 10의 경우에는 상대적으로 다른 분사시간에 비해 많은 공기가 들어감에도 불구하고 THC농도 저감 효과가 적다. 이차 공기가 배기포트에 계속 공급되어 배기밸브가 닫혀 있는 경우에도 배기포트로 공기가 공급되어 배출가스와의 균일한 혼합이 이루어 지지 않기 때문이고 배기포트에 잔류하는 이차 공기가 배출가스의 온도를 낮추기 때문이다.⁴⁾ 분사시기에 따른 영향은 다음과 같다. 분사시기가 ATDC120°인 경우에는 Swirl SAI가 이차 공기를 분사하지 않은 경우의 THC에 비해 최고 약 25.85% 정도 저감되었다. Reverse SAI의 경우에 THC농도 저감율은 약 13%정도 되었다. Swirl SAI가 혼합이 잘 되고 이 시기에 나오는 배출가스가 상대적으로 고온이고 미연 HC의 농도가 많다. 분사시기 ATDC100°, 140°, 160°인 경우에는 스윙 방향 이차 공기분사와 역방향 이차 공기 분사의 THC 농도값에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 그 이유는 THC 농도에 영향을 끼치는 것은 분사시기와 배출가스와 이차 공기와의 혼합의 정도

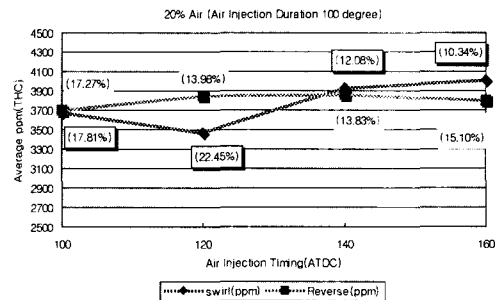


Fig. 8 Average THC concentrations of the swirl SAI and reverse SAI(coolant temp 20°C)

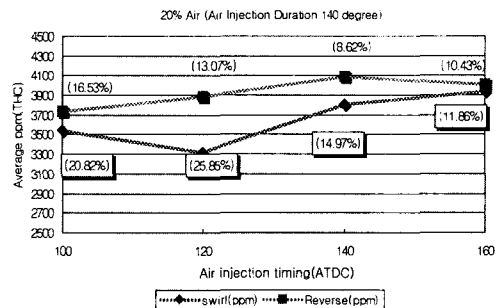


Fig. 9 Average THC concentrations of the swirl SAI and reverse SAI(coolant temp 20°C)

인데 분사시기 ATDC100°, 140°, 160° 경우에는 배출가스가 나오는 시점보다 미리 분사되거나 늦게 분사되어 배출가스와 이차 공기와의 혼합이 일어나는 정도에 있어서 큰 차이가 없기 때문이다. Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10의 결과를 Fig. 11과 Fig. 12에서 분사방향에 따라 다시 도시해보았다.

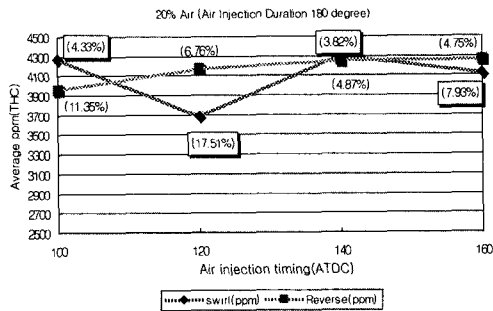


Fig. 10 Average THC concentrations of the swirl SAI and reverse SAI (coolant temp 20 °C)

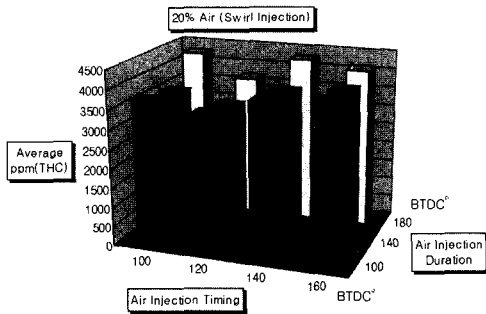


Fig. 11 Average THC concentrations of swirl SAI as a function of SAI timing and SAI duration (coolant temp 20 °C)

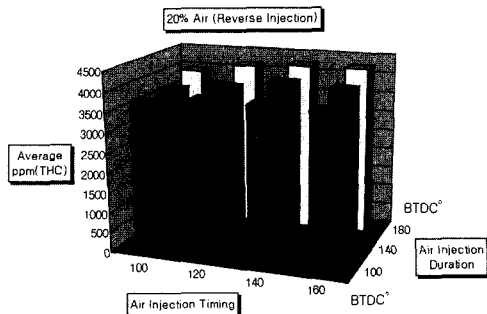


Fig. 12 Average THC concentrations of reverse SAI as a function of SAI timing and SAI duration (coolant temp 20 °C)

3.3 냉시동 시에 역방향 이차 공기 분사와 스웰 방향 이차 공기 분사의 희석량과 산화량 비교

Fig. 13, Fig. 14에서 Y축은 공기를 분사하였을 때의 THC농도 감소량을 나타낸다. X축의 D는 분사시간을 의미하고 T는 분사시기를 의미한다. Fig. 18은 스웰방향 이차 공기 분사시의 산화농도와 희석농도의 정도를 나타내었는데 THC의 저감이 가장 큰 분사시기 ATDC120° 인 경우에 다른 이차 공기 분사시기보다 산화농도값이 큼을 알 수 있다. 배출가스가 나오기 직전에 공기를 분사하는 것이 배출가스와 이차 공기와의 혼합이 잘 되어 산화량을 증가시켜 실제 산화된 양이 가장 많기 때문이라고 할 수 있다. Fig. 14의 역방향 분사의 경우에는 스웰방향 분사에 비해 실제 산화된 양은 작지만 실질적으로 감소된 THC농도 경향은 스웰방향 분사와 비슷함을 알 수 있다. 저감된 THC농도가 적은 구간의 경우 산화량과 희석량의 차이가 별로 없음을 알 수 있다. 즉

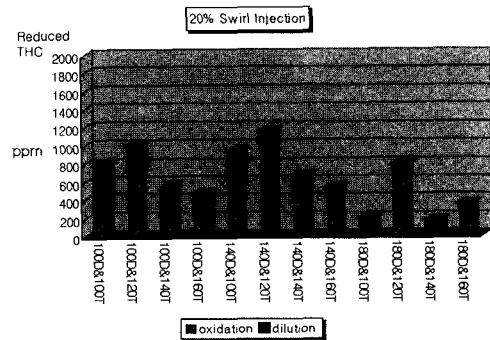


Fig. 13 The swirl effect of oxidation and dilution in reduced THC concentrations (Air, cold start)

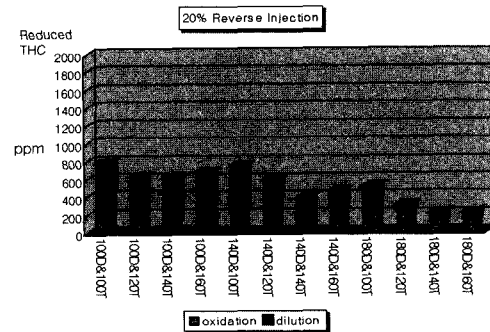


Fig. 14 The reverse effect of oxidation and dilution in reduced THC concentrations (Air, cold start)

THC의 저감이 큰 구간은 혼합에 의한 영향으로 산화된 양이 많기 때문이라고 말할 수 있고 저감된 정도가 적은 구간은 산화에 의한 저감이 적기 때문이라고 말할 수 있다. Fig. 13에서 보면 이차 공기 분사 시기 120°, 분사기간 140°의 미연 HC산화량이 가장 크고 같은 분사시기라도 분사량 100°와 180°의 산화량에 차이가 있다. 분사기간 100°의 경우는 공급된 공기중의 산소의 양이 적어서 실질적인 산화량이 분사기간 140°인 경우보다 적으며 분사기간 180°의 경우는 연속 분사(Continuous SAI) 이므로 배기포트에 이차 공기가 계속 머물면서 배출가스와 혼합이 좋지 않고 잔류하는 이차 공기가 배출가스의 온도를 감소시키기 때문에 산화된 양이 분사기간 140°보다 상대적으로 적다. Fig. 13과 Fig. 14의 두 그래프를 비교해 보면 알 수 있듯이 스윙방향 분사가 역방향 이차 공기 분사보다 실질적인 산화량이 크다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 배출가스와 이차 공기와의 혼합이 스윙방향 이차 공기 분사가 더 좋아서 실제 산화된 양이 크기 때문이다.

4. 결론

1) 분사시기에 따른 영향 : 배기밸브가 열리기 직전인 ATDC 120°(CAD)에 분사하는 경우 미연 HC의 양이 가장 많고 배출가스의 온도가 가장 고온이기 때문에 이차 공기와의 혼합된 산소가 가장 효율적인 산화 반응을 일으켜 THC농도 저감 효과가 가장 컸다.

2) 분사기간에 따른 영향 : 배기밸브가 열려 있는 기간은 234°(CAD) 인데 그 중 초기에 대부분의 배출가스가 배출된다. 이차 공기 분사기간이 100°, 140°인 경우는 이차 공기를 단속적으로 공급하는 경우이고 180°는 이차 공기를 연속적으로 공급하는 경우이다. 분사기간 100°인 경우에는 공급되는 공

기의 양이 상대적으로 적어서 산화를 일으키기에 충분한 산소가 공급되지 못해서 THC저감 정도가 적었고 분사기간 140°인 경우에는 상대적으로 충분한 이차 공기가 공급되어 산화되는 양이 많았고 분사기간 180°의 경우에는 연속적으로 이차 공기를 분사하는 경우였기에 배기포트에 미리 머물고 있던 이차 공기로 인해 배출가스와 이차 공기간의 산화가 잘 되지 않았다.

3) 분사방향에 따른 영향 : 분사시기가 ATDC 120°인 경우의 Swirl SAI의 경우에 Reverse SAI와의 THC농도 저감에 있어서 최고 12%의 차이를 보였다. 그 이유는 이 Swirl SAI시스템이 배기밸브가 열리는 시점에서의 배출가스와 이차 공기와의 균일한 혼합으로 인해 산화를 촉진시켰기 때문이다.

References

- 1) F. Zimmermann, "An Internally Heated Tip Injector to Reduce HC Emissions During Cold-Start," SAE 1999-01-0792, 1999.
- 2) M. D. Patil, Y. Lisa Peng, Kathleen E. Morse, "Airless In-line Adsorber System For Reducing Cold Start HC Emissions," SAE 980419, 1998.
- 3) P. J. Shayler, C. Belton, A. Scarisbrick, "Emissions and Fuel Utilization After Cold Starting Spark Ignition Engines," SAE 1999-01-0220, 1999.
- 4) Hun Sung Sim, Se Jun Kim, Suk Ho Chung, "An Experimental Study for Reducing the Exhaust Hydrocarbon Emission at SI Engine Using Timed Secondary Air Injection," SAE 99370225, 1999.
- 5) Keesoo Park, Simsoo Park, "SI Engine Hydrocarbon Emissions Reduction with Secondary Air Injection and Coolant Control," KSAE Autumn Conference Proceeding, 1999.