

Research Paper

DOI: <http://dx.doi.org/10.6108/KSPE.2013.17.6.011>

스월 인젝터를 통한 고온 연료의 분사특성 연구

이형주^a · 최호진^a · 김일두^{a,*} · 황기영^a

A Study on High-Temperature Fuel Injection Characteristics through Swirl Injectors

Hyung Ju Lee^a · Hojin Choi^a · Ildoo Kim^{a,*} · Ki-Young Hwang^a

^aAdvanced Propulsion Technology Center, Agency for Defense Development, Korea

*Corresponding author. E-mail: ildoo.kim@add.re.kr

ABSTRACT

An experimental study was conducted to investigate fuel injection characteristics through swirl injectors when the fuel was heated to very high temperature conditions. Three swirl injectors with different orifice diameters and swirler geometries were used to measure the flow coefficient (α) for the injection pressure ranges between 3 and 10 bar and the fuel temperature from 50 to 270°C. The results showed that the variation characteristics of α with respect to cavitation number (K_c) were highly dependent on both the orifice diameter and the swirler geometry. In addition, the characteristics of a variation with respect to AR, the area ratio of the flow through the swirler and the orifice, has revealed that the effect of boiling is retarded but the slope of decreasing α after the boiling effect is present tumbles as AR increases.

초 록

본 연구에서는 고온으로 가열된 연료가 다양한 종류의 스월 인젝터를 통해 분사되는 경우 분사 특성의 변화를 실험적으로 확인하였다. 3종의 스월 인젝터로 3 ~ 10 bar의 분사압력을 가하면서 연료온도가 50 ~ 270°C 범위에서 변화하는 경우 인젝터의 유량계수(α)를 측정하였다. cavitation number (K_c)에 대한 α 변화 특성을 확인한 결과 α 변동 특성이 오리피스 직경과 스월러 형상에 모두 영향을 받았고, 비등에 의한 연료분사 특성을 스월러 유로와 오리피스 유로 면적비인 AR과 관련지어 살펴 본 결과에서는 AR이 커질수록 비등 영향은 더 지연되고 비등의 영향이 미치기 시작하면 α 감소 기울기는 더 큰 것으로 확인되었다.

Key Words: Swirl Injector(스월 인젝터), High-Temperature Fuel Injection(고온 연료 분사), Injection Characteristics(분사 특성), Fuel Boiling(연료 비등)

Received 3 June 2013 / Revised 11 October 2013 / Accepted 19 October 2013

Copyright © The Korean Society of Propulsion Engineers
pISSN 1226-6027 / eISSN 2288-4548 / <http://journal.kspe.org>

[이 논문은 한국추진공학회 2013년도 춘계학술대회(2013. 5. 30-31, 부산 해운대 한화리조트) 발표논문을 심사하여 수정·보완한 것임.]

1. 서 론

탄화수소 계열의 액체 연료는 지난 수십년간 항공기 및 유도무기용 공기흡입식 추진기관의 주 연료로서 유용하게 사용되어 왔다. 현재 공기흡입식 추진기관에 주로 사용되는 연료로는 원유(crude oil) 기반의 혼합물인 JP-8(또는 Jet A-1)과 유기합성으로 제조된 합성유인 JP-10이 대표적인데, 특히 JP-8은 전세계적으로 가스터빈 항공기용으로 광범위하게 사용되고 있으며, JP-10은 현재 미국의 모든 공기흡입식 유도무기에 적용되고 있다[1].

최근 20여년 동안 세계 각국에서는 극초음속 공기흡입식 추진기관 개발기술을 경쟁적으로 연구하였는데, 특히 실용화에 대비하여 탄화수소 계열의 액체연료를 이용한 연구가 많이 진행되고 있다[2]. 그런데 이와 같은 극초음속 비행의 난제 중 하나는 고속 비행에 의한 동체와 엔진의 극심한 가열문제로, 이를 극복하기 위하여 현재까지 알려진 가장 효과적인 해결 방법은 탑재된 액체 연료의 흡열반응을 이용한 능동 냉각방식이다[3]. 이와 같이 초고속 비행체에서 액체 연료가 능동냉각에 사용되는 경우에는 연료가 가열되어 연료의 온도가 상승하고, 결국 끓는점 이상으로 연료가 가열되면 비등의 영향으로 인젝터를 통한 연료의 분사특성이 완전히 바뀌게 된다. 그러나 현재까지 상변화를 일으키는 고온 연료의 분사특성에 관한 연구는 디젤엔진 인젝터에 대한 연구가 대부분이며[4], 항공 추진기관 분야에서 흡열반응으로 불가피하게 상변화된 연료의 분사특성 변화에 대한 연구는 알려진 결과가 거의 없는 실정이다. 특히 연료 온도가 비등점 이상으로 상승하는 경우 연료 자체의 물성치 변화는 물성 시험을 통해 확인이 가능하지만, 실제 인젝터에서 연료 비등에 의해 분사 성능이 크게 바뀌는 현상은 실제 분사시험을 통해서만 확인이 가능하다.

따라서 본 연구에서는 연료가 끓는점 이상으로 가열되어 스윙 인젝터(Swirl Injector)를 통해 분사되는 경우 분사특성이 어떻게 변화하는지를 실험적으로 연구하였다. 특히 인젝터 특성 파라미터 중에서 가장 기본이 되는 유량계수가 연료

의 온도에 따라 변화하는 특성을 측정하고 cavitation number를 도입하여 분석함으로써 다양한 종류의 스윙 인젝터에 대해 비등에 의한 분사특성 변화를 비교해 보았다. 본 논문의 2절에서는 실험장치 및 방법, 3절에서는 결과 분석 및 토론, 4절에서는 요약 및 결론을 제시하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 고온연료 분사시험장치

Fig. 1에는 본 연구를 위해 설치된 고온연료 분사시험장치의 전체 구성도를 보여준다. 가압연료탱크에 저장된 연료는 공압에 의해 가압되어 연료가열장치로 공급된다. 연료가열장치(이하 히터)는 고주파 발진기를 이용한 유도가열방식을 적용하였는데, 고주파 코일 내부에 코일 형태의 연료배관을 설치하여 배관이 유도가열됨으로 인해 배관 내부를 통과하는 연료를 빠른 시간에 고온으로 가열하게 된다. 이 유도가열장치는 가열되는 연료의 유량에 따라 약간의 차이는 있지만 대체로 3분 이내에 상온의 연료를 250℃ 이상으로 가열하는 것이 가능하다.

히터를 통과한 연료는 분사시험용 연료챔버에 장착된 오리피스 인젝터를 통해 분사된다. 분사 시험용 챔버는 가로-세로가 800 mm x 800 mm

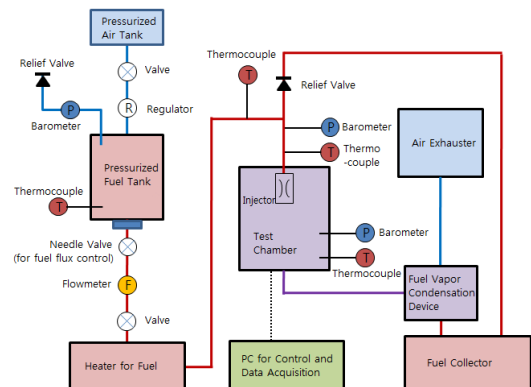


Fig. 1 Schematic layout of high-temperature fuel injection test rig.

의 정사각형 단면에 높이 1000 mm를 가지는 상자형태로 상단 중앙에 연료 인젝터가 장착되어 있고, 챔버로 유입되는 공기가 균일한 분포를 가지도록 하기 위하여 상단에 각각 75 mm의 두께를 가지는 하니콤-글래스비드-하니콤 층을 설치하였다. 챔버 내에서 분무된 연료와 주변 공기의 혼합기체 분리를 위해 연료챔버 하단에 1층의 하니콤을 설치하였고, 분리된 공기의 배출을 위하여 실외에 송풍기를 설치하고 배관으로 연결하였다. 또한 분사챔버의 재질은 투명한 폴리카보네이트를 사용하였고, 광학계측을 위한 윈도우에는 BK7 재질을 적용하였다.

22 계측 방법

Fig. 1에 보인 바와 같이 연료가 저장된 가압 연료탱크로부터 분사시험용 연료챔버에 이르기까지 주요 부분에는 압력 및 온도센서가 장착되어 연료의 상태를 측정하였다. 사용된 압력센서는 Honeywell사의 FPG 모델이며, 온도센서는 K-type 열전대를 사용하였다. 한편 가압연료탱크 출구단에는 터빈유량계(KMA사 ZHA02)를 설치

하여 분사되는 연료유량을 계측하였다. 유량계의 최대 측정범위는 0.1 ~ 7.0 LPM이며, 시험 전 calibration을 수행하였고, 측정하고자 하는 유량 범위에서 선형성을 확인하였다. 앞서 언급한 압력센서와 본 유량계의 측정 오차는 모두 ±0.5% 이내이다. 데이터 획득은 Labview S/W로 구현한 히터 제어 및 데이터 획득 프로그램을 사용하였고, sampling rate는 10 Hz이다.

23 시험조건 및 방법

본 연구에서는 서로 다른 직경과 스윌러 형상을 가지는 3종의 스윙 인젝터를 사용하였는데 스윙 인젝터의 단면 형상은 Fig. 2와 같다. 그리고 Table 1에는 본 연구에서 사용한 스윌러의 기호와 형상 및 특징을 정리하였고 Table 2에는 각 스윙 인젝터를 기호로 표기하였는데 예를 들면 PS-150은 오리피스 직경 1.5 mm의 스윙 인젝터를 의미한다. 그리고 뒤에 붙은 기호는 스윌러를 구분하기 위한 것으로, 예를 들어 +Sw2은 Table 1의 Sw2 스윌러를 장착하였음을 의미한다.

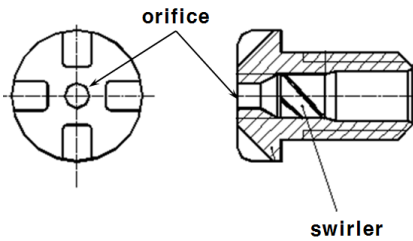


Fig. 2 Schematic of the swirl injector.

Table 2. Comparison of pressure swirl injectors.

ID #	Orifice Area, A_o (mm ²)	Flow Area of Swirler, A_s (mm ²)	Area Ratio, AR (= A_s/A_o)	Swirl Number
PS-150 +Sw2	1.77	2.48	1.40	0.54
PS-170 +Sw1	2.27	2.32	1.02	1.24
PS-080 +Sw1	0.503	2.32	4.61	1.24

Table 1. Comparison of swirlers.

ID #	Shape	Flow Area (mm ²)	Swirl Number
Sw1		2.32	1.24
Sw2		2.48	0.54

Table 3. Test conditions.

Fuel Injection Temperature, T_{fuel} (°C)	Fuel Injection Pressure* (bar)
50 ~ 270	3, 5, 10

*Gauge Pressure

본 연구에서 수행한 시험 조건은 다음 Table 3과 같다. 연료 분사압력 조건은 3 ~ 10 bar 이며 연료 온도는 최대 270°C까지 가열하였다. 한편, 시험에 사용한 연료는 상온(15°C)에서의 점도가 3.4 cSt, 대기압에서의 비등점은 187°C이다 [5]. 따라서 인젝터 내부의 압력이 모두 대기압보다 높아도 연료온도가 200°C 이상으로 상승하면 연료는 분사되기 전부터 비등하여 분사특성이나 패턴이 비등 전과 확연히 다르게 된다. 고온연료 분사시험은 히터로 연료 온도를 목표치(약 270°C)까지 상승시킨 후 히터를 끄고 연료를 서서히 냉각하면서 데이터를 저장하여 연료 온도가 50°C까지 떨어지면 다음 조건의 실험을 수행한다. 본 실험방법은 참고문헌 [6]에 상세히 기술되어 있다.

2.4 분석 방법

연료 인젝터의 분사특성을 정량화하는 파라미터들 중 본 연구에서는 유량계수(α)를 사용하였다. 참고문헌 [7]의 정의로부터 α 는 다음 Eq. 1로 구해진다.

$$\alpha = \frac{\dot{Q}}{A_t} \sqrt{\frac{\rho}{2\Delta P}} \quad (1)$$

Eq. 1에서 \dot{Q} 은 체적유량, A_t 는 오리피스 단면적, ρ 는 연료의 밀도, ΔP 는 인젝터 입출구의 압력차이다. 여기에서 연료의 밀도는 온도의 함수인데, 본 연구에서는 연료의 온도가 넓은 범위에서 변화하므로 온도에 따른 연료밀도의 변화를 고려하였다[5].

한편 비등하는 연료의 분사특성 파악을 위해 cavitation number를 도입하였다. 참고문헌 [8]의 정의를 이용한 cavitation number (K_c)는 다음과 같다.

$$K_c = \frac{P_1 - P_v}{P_1 - P_2} \quad (2)$$

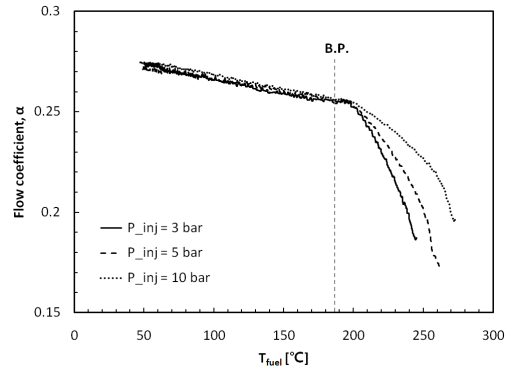


Fig. 3 Flow coefficient versus fuel temperature for PS-150+Sw2 injector.

여기에서 P_1 , P_2 는 각각 인젝터 오리피스의 상류와 하류 압력이고, P_v 는 분사되는 연료 온도에서의 증기압을 의미한다. 본 연구에서는 분사되는 연료 온도가 계속 변화하므로 온도에 따른 증기압 관계식으로 다음과 같이 Clausius-Clapeyron equation을 적용하였다[9].

$$P_v = C \cdot \exp\left(\frac{-\Delta H_{fg}}{RT_{sat}}\right) \quad (3)$$

위 식에서 본 연구에 사용한 연료의 물성치들은 다음과 같다[9].

$$\begin{aligned} C &= 4.46 \times 10^6 \\ \Delta H_{fg} &= 302 \text{ kJ/kg} \\ R &= 0.06114 \text{ kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

3. 결과 분석 및 토론

3.1 분사 압력별 특성 비교

Fig. 4에는 PS-150+Sw2 인젝터에 대한 연료 온도 및 분사 압력에 따른 유량계수(α)의 변동 특성이 나와 있다. 비등에 의해 α 가 급격히 감소하기 전에는 α 값이 0.25 ~ 0.27의 값을 보이고 있다. 이전에 수행된 같은 크기의 단순 오리피스 (plain orifice) 인젝터에 대한 실험 결과에서는 α

가 0.60 ~ 0.67 범위의 값을 가지고 있음을 확인하였다[6]. 따라서 스웰러가 추가됨으로 인해 스웰러 구조물에 의한 유로 면적 축소와 스웰 유동 효과가 더해져서 같은 분사 압력에서 분사되는 연료유량이 크게 감소하였음을 알 수 있다. 한편, 비등점 이후 α 가 급격히 감소하는 경향은 단순 오리피스 인젝터 실험에서 관찰된 것과 같이 낮은 분사압력에서 더 심하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

스웰러가 추가되면서 나타나는 α 특성의 변화를 좀 더 확실하게 살펴보기 위하여 Fig. 4에는 PS-150+Sw2 인젝터와 PO-150 인젝터에 대한 α 비교가 나와 있다. 참고로 PO-150 인젝터는 직

경이 1.5 mm인 단순 오리피스형(plain orifice type) 인젝터를 의미한다. 앞서 언급한 바와 같이 두 인젝터 사이의 α 절대값은 큰 차이를 보이고 있으므로 특성 비교의 편의를 위하여 각각의 인젝터에 대하여 50°C에서의 α 값을 기준으로 표준화(normalization)하여 비교를 수행하였다. Fig. 4에 의하면 우선 단순 오리피스형 인젝터의 경우에는 연료 온도가 비등점을 지나면서 바로 α 의 감소가 관찰되는데 반해 스웰 인젝터의 경우에는 연료 온도가 약 200°C 이상이 되면 α 의 감소 현상이 두드러짐을 알 수 있다. 이는 스웰 유동이 인젝터 내부의 연료 비등을 어느정도 지연시키는 효과가 있음을 의미하는데, 이 현상에 대한 보다 상세한 분석은 다음 절에서 다시 다루기로 한다. 한편, Fig. 4에 의하면 단순 오리피스 인젝터가 스웰 인젝터에 비해 비등에 의한 α 감소 현상이 더 빨리 시작되기는 하지만 비등점 이상에서 연료 온도 상승에 따른 α 감소 특성은 오히려 더딘 것으로 확인되고 있다. 다시 말하면 비등점 이상의 연료 온도에서 일단 α 가 감소하기 시작하면 단순 오리피스 인젝터보다 스웰 인젝터의 α 감소가 더 급격하게 나타남을 확인할 수 있다.

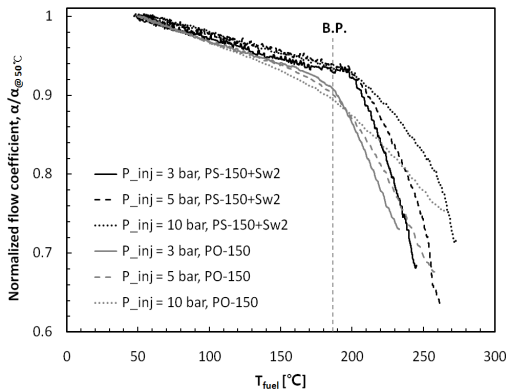


Fig. 4 Normalized flow coefficient versus fuel temperature for PS-150+Sw2 and PO-150 injectors.

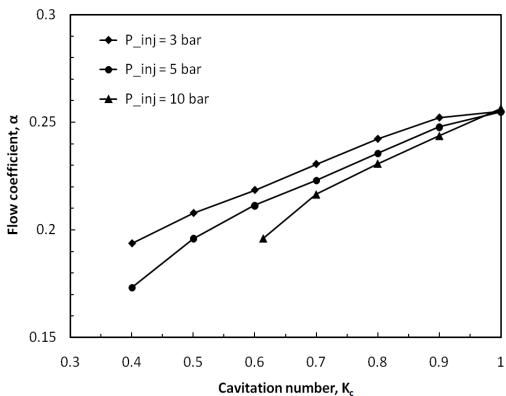


Fig. 5 Flow coefficient versus cavitation number for PS-150+Sw2 injector.

Fig. 5에는 PS-150+Sw2 인젝터에 대하여 cavitation number (K_c)에 따른 α 변화 특성을 보여주고 있다. 단순 오리피스 인젝터에 대한 연구결과[10]에서는 분사 압력에 관계없이 거의 같은 패턴으로 α 의 감소가 확인되었지만, 스웰 인젝터의 경우에는 분사 압력에 따라 α 의 감소 기울기가 매우 다른 양상을 보이고 있다. 또한 Fig. 3의 연료 온도에 따른 α 변화 특성에서는 분사 압력이 3 bar 일 때 비등에 의한 α 의 급격한 감소가 관찰되었지만 K_c 에 대한 α 의 변화 특성에서는 그와 반대로 분사 압력이 3 bar 일 때 가장 더디게 감소하는 것으로 확인된다. 이와 같은 특성을 좀더 확실하게 살펴보기 위하여 Fig. 6에는 PS-150+Sw2 인젝터와 PO-150 인젝터에 대한 K_c 에 따른 α 비교가 나와 있다. 앞에서 언급된 것처럼 두 인젝터의 α 절대값에는 큰 차이가 있기 때문에 이 그림에서는 $K_c = 1$ 일 때의 α 를 기준으로 표준화하여 두 인젝터 사이의 α 특성

비교를 수행하였다. Fig. 6에 의하면 PO-150 인젝터의 경우 K_c 가 1보다 작아지면 바로 α 가 급격히 감소하는 특성을 보이는데 반하여 PS-150+Sw2 인젝터의 경우에는 분사 압력에 따라 약간씩 차이가 있기는 하지만 K_c 가 약 0.95 미만으로 떨어진 이후에 α 가 감소하기 시작한다. 즉, 스월 인젝터의 비등효과 지연 현상이 Fig. 6을 통해서도 명확하게 관찰됨을 알 수 있다. 그리고, 오리피스 인젝터의 α 감소 특성은 분사 압력에 관계없이 거의 유사하게 나타나지만 스월 인젝터의 경우에는 분사 압력이 낮을수록 α 가 더 천천히 감소하는 특성을 보이며, 분사 압력이 10 bar 일 때의 α 감소 특성은 오리피스 인젝터의 그것과 매우 유사하게 나타나고 있다.

다른 스월 인젝터에 대하여 분사 압력에 따른 α 감소 특성도 함께 살펴 보았다. Fig. 7과 8에는 PS-170+Sw1 및 PS-080+Sw1 인젝터에 대한 K_c 에 따른 α 변동 특성이 각각 도시되어 있다. Fig. 7의 PS-170+Sw1 인젝터의 경우에는 단순 오리피스 인젝터와 마찬가지로 α 감소 특성이 분사 압력별로 거의 유사하게 나타나지만, Fig. 8의 PS-080+Sw1 인젝터의 경우에는 다른 두 종의 스월 인젝터와는 매우 다른 특성을 보이고 있다. 그 특징을 크게 두 가지로 요약해 보면 첫째로 Fig. 8의 점선 화살표로 표기한 것과 같이 다양한 분사 압력에서의 비등효과 지연 현상이 두드러짐을 알 수 있다. 즉, 분사 압력에 따라 약간 다르긴 하지만 K_c 가 0.8 이하로 떨어지면서 α 가 급격히 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 Fig. 5와 7에서는 볼 수 없었던 경향이다. 둘째로는 Fig. 8의 실선 화살표로 표기한 것처럼 K_c 가 더욱 낮아져서 약 0.5 이하로 떨어지면 α 의 감소가 더욱 가속화되고 있다. 이러한 특성 또한 다른 두 종의 스월 인젝터와는 차이가 있는 부분이다. 이와 같이 스월 인젝터의 경우에는 비등에 의한 분사 특성의 변화가 단순히 오리피스 직경 뿐 아니라 장착된 스월러의 종류와도 밀접한 관련이 있는 것을 알 수 있으며 이에 대한 좀 더 상세한 분석은 다음 절에서 다루기로 한다.

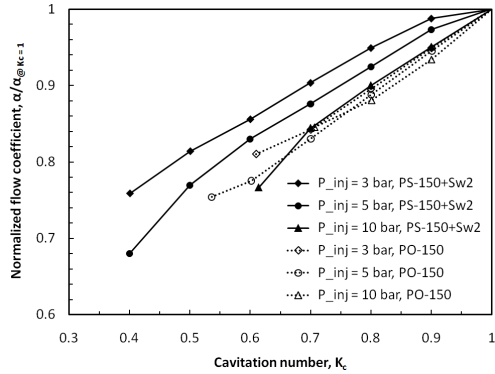


Fig. 6 Normalized flow coefficient versus cavitation number for PS-150+Sw2 and PO-150 injectors.

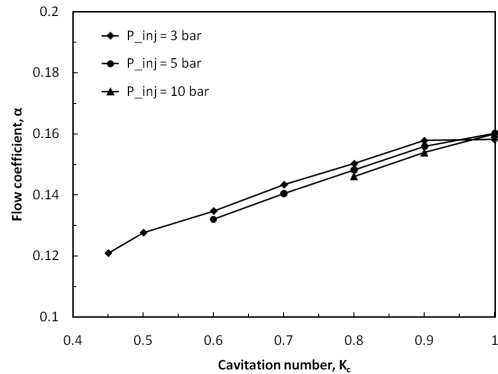


Fig. 7 Flow coefficient versus cavitation number for PS-170+Sw1 injector.

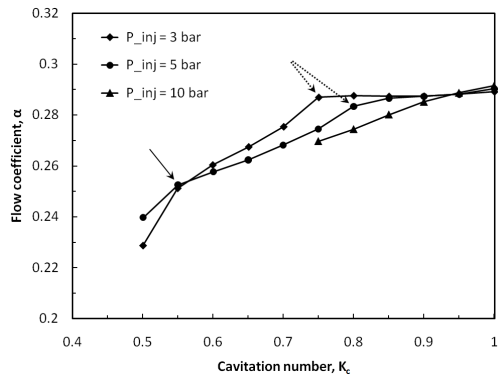


Fig. 8 Flow coefficient versus cavitation number for PS-080+Sw1 injector.

3.2 인젝터별 분사 특성 비교

Fig. 9에는 분사 압력 3 bar 조건에서 연료 온도에 따른 α 변화 특성을 각 인젝터 별로 비교한 결과가 나와 있다. 그림에는 단순 오리피스 인젝터인 PO-150을 포함하여 스웰 인젝터 3종에 대한 실험 결과를 모두 보여주고 있는데, α 의 절대값은 오리피스 인젝터가 가장 크게 나타나고 있으며, 스웰 인젝터의 α 는 인젝터 오리피스의 면적 뿐 아니라 스웰러의 형상에도 크게 영향을 받기 때문에 α 값의 분포가 인젝터의 오리피스 직경에 비례하지 않는 특성이 있다. 단순 오리피스 인젝터에 대한 이전의 연구에서는 오리피스의 면적에 따라서 α 의 절대값이 비례하여 커지는 특성이 있음을 확인한 바 있다[6]. 서로 다른 α 값을 가지는 인젝터들 사이의 연료 온도변화에 따른 특성을 좀더 확실하게 비교하기 위하여 Fig. 10에는 각 인젝터별로 50°C에서의 α 를 기준으로 표준화된 α 를 그려 보았다. Fig. 10에 의하면 PS-170+Sw1 인젝터는 PS-150+Sw2 인젝터와 거의 유사한 α 특성을 보이는데 두 인젝터 모두 연료 온도가 200°C 부근에서 비등에 의한 α 감소 영향이 나타나기 시작한다. 한편, PS-080+Sw1 인젝터의 경우에는 비등의 효과가 더욱 지연되어 연료 온도가 약 220°C 이상 상승한 이후에야 비등에 의한 α 감소 영향이 나타나고 있는데, 비등영향 지연은 가장 크지만 비등의 영향이 나타난 이후에는 가장 빨리 α 가 감소하는 특성도 함께 보이고 있다. 또한 비등이 일어나기 전에도 연료 온도 상승에 따른 α 의 감소폭이 다른 인젝터들에 비해 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11에는 각 인젝터별로 K_c 에 따른 α 변화 특성을 보여준다. 각 인젝터별 α 의 절대값이 크게 다르므로 Fig. 6처럼 $K_c = 1$ 일 때의 α 값을 기준으로 표준화하여 각 인젝터별 α 특성의 비교를 수행하였는데, 그림에 의하면 PO-150 인젝터의 경우에는 K_c 가 1 이하로 떨어지면서 α 의 감소 기울기가 급격히 커지지만 PS-150 및 PS170 인젝터의 경우에는 K_c 가 약 0.9 이하에서 α 의 감소가 급격해진다. 그리고 PS-080 인젝터의 경우에는 $K_c = 0.7$ 까지도 α 가 유지되다가 K_c 가 그 이하로 떨어지면 α 가 급격히 감소하게 된다.

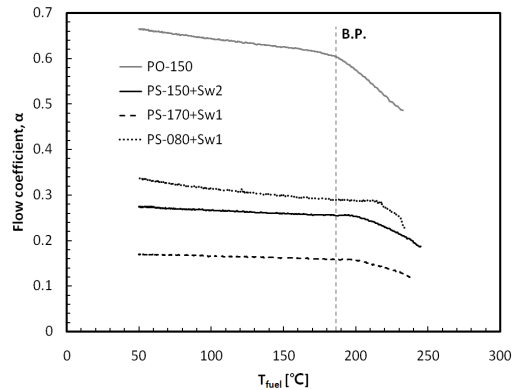


Fig. 9 Flow coefficient versus fuel temperature for plain orifice and pressure swirl injectors at $P_{inj} = 3$ bar.

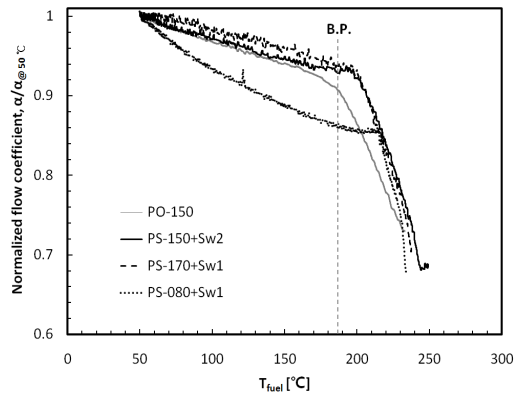


Fig. 10 Normalized flow coefficient versus fuel temperature at $P_{inj} = 3$ bar.

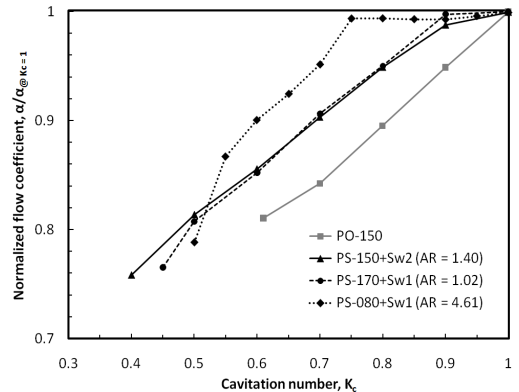


Fig. 11 Normalized flow coefficient versus cavitation number at $P_{inj} = 3$ bar.

각 인젝터별 비등영향 지연 효과를 스윌러 유로와 오리피스 유로 면적비인 $AR (=A_s/A_o)$ 값과 관련지어 보았다. 3종의 스윌 인젝터에 대하여 Table 2에서 AR 은 각각 1.40, 1.02, 4.61의 값을 가지는데 이는 Fig. 11에도 표기되어 있다. PS-150과 PS-170 인젝터는 장착된 스윌러가 서로 다르지만 AR 은 서로 유사한데 Fig. 11의 α 감소 특성 역시 서로 잘 일치하고 있다. 그러나 PS-080 인젝터의 경우에는 PS-170 인젝터와 같은 스윌러를 장착하였지만 AR 이 훨씬 크고 α 감소 특성 또한 PS-170과는 확연히 다른 경향을 보여준다. 앞 절의 Fig. 5, 7 및 8에서 각각의 스윌 인젝터에 대한 압력별 α 변동 특성을 살펴본 결과에서도 Fig. 7의 PS-170+Sw1 ($AR = 1.02$) 인젝터는 압력에 관계없이 α 감소 특성이 거의 일정하였고, Fig. 5의 PS-150+Sw2 ($AR = 1.40$) 인젝터의 경우에는 K_c 가 감소할수록 낮은 분사 압력에서의 α 감소가 가장 천천히 이루어지는 특성을 보였으며, Fig. 8의 PS-080+Sw1 ($AR = 4.61$) 인젝터는 비등영향 지연 효과는 가장 두드러지면서도 일단 비등의 효과가 나타나기 시작하면 낮은 분사 압력에서의 α 감소가 가장 급격하고 그 후로 K_c 가 더욱 낮아지면 α 감소가 더욱 가속화되는 영역이 존재하는 것도 확인하였다. 이와 같이 3종의 스윌 인젝터에 대한 실험 결과로부터 스윌러의 유로면적과 출구 오리피스 면적의 관계에 따라 비등영향 지연 효과 및 α 감소 특성이 달라지는 것으로 파악되는데, 특히 AR 이 커질수록 비등 영향은 더 지연되지만 일단 비등이 분사특성에 영향을 미치게 되면 그 이후의 α 감소 기울기는 더 큰 것으로 확인되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 고온으로 가열된 연료가 다양한 종류의 스윌 인젝터를 통해 분사되는 경우 분사 특성의 변화를 실험적으로 확인하였다. 3종의 스윌 인젝터로 3 ~ 10 bar의 분사압력을 가하면서 연료온도가 50 ~ 270°C 범위에서 변화하

는 경우 인젝터의 유량계수(α)를 측정하였다. 측정된 α 는 단순 오리피스형 인젝터에 대한 실험 결과와 함께 비교하였는데, 단순 오리피스형 인젝터의 경우에는 연료 온도가 비등점을 지나면서 바로 α 의 감소가 관찰되는데 반해 스윌 인젝터의 경우에는 연료 온도가 약 200°C 이상으로 상승하면서 α 의 감소 현상이 두드러짐을 알 수 있다. 이는 스윌 유동으로 인해 인젝터 내부의 연료 압력이 단순 오리피스형 인젝터보다 높게 유지되어 인젝터 내부의 연료 비등이 다소 지연되는 효과가 있음을 의미한다. 또한 비등점 이상의 연료 온도에서 일단 α 가 감소하기 시작하면 단순 오리피스 인젝터보다 스윌 인젝터의 α 감소가 더 급격하게 나타남을 확인하였다.

Cavitation number (K_c)에 대한 α 변화 특성을 확인한 결과 단순 오리피스 인젝터의 α 감소 특성은 분사 압력에 관계없이 거의 유사하게 나타나지만 스윌 인젝터의 경우에는 오리피스 직경과 장착된 스윌러의 형상에 따라 분사 압력에 따른 α 변동 특성이 일정하지 않은 것으로 확인되었다. 각 인젝터별로 비등에 의한 분사특성 변화 효과를 스윌러 유로와 오리피스 유로 면적비인 $AR (=A_s/A_o)$ 값과 관련지어 살펴 본 결과 스윌러의 유로면적과 출구 오리피스 면적의 관계에 따라 비등영향 지연 효과 및 α 감소 특성이 달라지는 것으로 파악되는데, 특히 AR 이 커질수록 비등영향은 더 지연되고 일단 비등의 영향이 나타난 이후에는 α 감소 기울기가 더 큰 것으로 확인되었다. 인젝터의 종류와 모양에 따라 비등영향 지연 효과와 비등 후 성능 감소가 서로 상보 관계에 있으므로, 연료의 종류, 유량, 엔진의 운용범위 등을 다각적으로 검토하여 최적의 인젝터를 선택하여야 할 것이다.

References

1. Edwards, T., "Liquid Fuels and Propellants for Aerospace Propulsion: 1903-2003," *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 19, No. 6, pp. 1089-1107, 2003.

2. Van Wie, D.M., D'Alessio, S.M. and White M.E., "Hypersonic Air-breathing Propulsion," *Johns Hopkins APL Technology Digest*, Vol. 26, No. 4, pp. 430-437, 2005.
3. Lee, H.J., Park, J., Kwon, M., and Hwang, K.Y., "Study on a Conceptual Design Process of Fuel Supply Systems for High-Speed Vehicles," *2012 KSASS Fall Conference*, pp. 2345-2351, 2012.
4. Soteriou, C., Andrews, R., and Smith, M., "Direct Injection Diesel Sprays and the Effect of Cavitation and Dydraulic Flip on Atomization," *1995 SAE International Congress and Exhibition*, Detroit, Michigan, Paper No. 950080, 1995.
5. Coordinating Research Council, *Handbook of Aviation Fuel Properties*, 3rd ed., CRC Report No. 635, 2004.
6. Lee, H.J., Choi, H., Kim, I., Hwang, K.Y., and Min, S.K., "Injection Characteristics through Orifice Injectors at High Fuel Temperature Conditions," *2013 SASE Spring Conference*, pp. 1-6, 2013.
7. White, F.M., *Fluid Mechanics*, 2nd ed., McGraw Hill, 1986.
8. Nurick, W.H., "Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing," *Transactions of the ASME Journal of Fluids Engineering*, December, pp. 681-687, 1976.
9. Cooper, M. and Shepherd, J.E., "Thermal and Catalytic Cracking of JP-10 for Pulse Detonation Engine Applications," *GALCIT Report FM 2002.002*, Caltech, December, 2002.
10. Kim, I., Lee, H.J., Choi, H., and Hwang, K.Y., "A Study on the Effect of Fuel Boiling on Injection Characteristics through Orifice Injectors," *2013 KSPE Spring Conference*, pp. 795-801, 2013.