

정상류 조건에서의 디젤 연료 분사 노즐내의 유동가시화

Visualization of the Flow in a Diesel Injection Nozzle In Case of the Steady Flow Condition

김 장 현*, 송 규 근**
Jangheon Kim, Kyukeun Song

ABSTRACT

The effects of the internal flow in a D. I. Diesel injection nozzle on the atomization of a spray were analyzed experimentally. Flow visualization studies were made using a transparent acrylic model nozzle as a diesel nozzle. Water instead of diesel fuel was used as the injection liquid. The geometry of the model nozzle was scaled up 10 times of the actual nozzle and the injection pressure for the model nozzle was adjusted so as to achieve a Reynolds number at the discharge hole that was the same as the actual nozzle. Experimental results show that when the needle lift was small, the high turbulence in the sac chamber generated by the high velocity seat flow made the spread angle of the spray plume large. Cavitation, which arose from the sac chamber, makes the spread angle of the spray plume large but the discharge coefficient small.

주요기술용어 : Diesel Injector(디젤분사노즐), Sac Chamber(색크실), Cavitation(케비테이션), Internal Flow(내부유동), Atomization(미립화)

1. 서 론

디젤 연료 분사 노즐로부터 분사되는 액체 연료의 분열과정은 Fig. 1에서 보여주는 것과 같이 노즐내의 유동 즉, 니들 시트부, 색크실 및 분공

내의 복잡하고 비정상적인 유동의 영향을 받는다. 색크실에서는 니들 시트부로부터 유입되는 유동에 의해 와류가 형성되며, 또한, 색크실내의 강한 난동의 영향으로 분공내에서는 축류 및 케비테이션이 형성된다. 한편, 분류에 있어서는 분공내의 케비테이션이 분출후의 액체분류를 교란시켜, 분류의 확산각에 영향을 미친다. 지금까지는 비교적 단순한 형상의 홀형 노즐을 이용한 분

* 정회원, 현대자동차 선형연구소

** 정회원, 전북대학교 자동차신기술연구소

공내의 유동과 이에 따른 미립화의 영향에 관한 기초적인 연구⁽¹⁻³⁾, 실제 디젤노즐과 동일 형상의 투명한 노즐을 이용한 분공내의 가시화 관찰⁽³⁻⁵⁾ 등이 행하여졌으나, 연료분무의 미립화에 영향을 미치는 연료분사노즐의 섹크실내의 유동 및 분공내에 생성되는 케비테이션 등의 노즐내의 유동의 영향에 대해서는 불명료한 점이 많이 남아있다. 이는 디젤 노즐 내부가 미소하고, 또한 매우 빠른 유동현상으로서, 디젤 연료분사노즐을 직접 관찰하는 것은 매우 어렵기 때문으로 생각된다.

이에 본 연구에서는 연료 미립화 과정에 미치는 노즐내의 유동의 영향을 규명하기 위해, 디젤 노즐의 내부 형상을 10배로 확대한 아크릴제 모형 노즐을 이용하여, 분공부의 레이놀즈수를 일치시킨 조건에서, 노즐내의 유동가시화를 행하였다. 본 실험에서는 노즐의 형상, 섹크실내의 분공의 위치, 니들 리프트 등이 섹크실과 분공내의 유동 및 분류의 미립화에 미치는 영향에 관하여 정상류의 조건하에서 검토하였다.

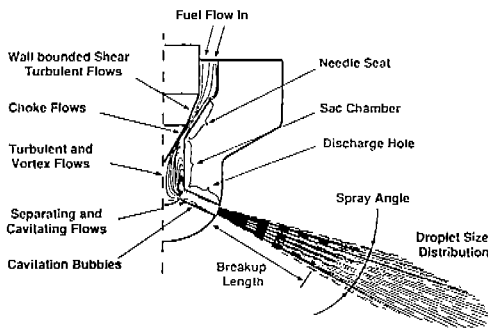


Fig. 1 Nature of the Fuel Flow in the Hole Type Diesel Injection Nozzle

2. 실험장치 및 실험 방법

Fig. 2에 실험장치의 개략을 보인다. 실험장치는 유체도입부, 트레이서 혼합부, 모형노즐, 광학계 및 촬영부로 구성되었다. 섹크실내의 유동의 가시화 실험의 경우, 어큐뮬레이터로부터의

수도수를 트레이서 혼합실에서 적당량의 트레이서와 충분히 혼합한 뒤 모형노즐로 보내, 노즐 축압실, 니들 시트부, 섹크실을 통과하여, 분공으로부터 분출시켰다. 트레이서는 입경이 0.2-0.3mm로 물과 거의 동일 밀도(1.07)인 폴리스티렌 입자를 사용하였다. 광원으로는 Ar+ 레이저(파장 488nm)를 이용하여, 레이저빔을 폭 1mm의 시트광으로 만들어서, 모형노즐의 하부로부터 섹크실의 중심 축을 포함한 단면을 조사하여, 정면에서 폴리스티렌 입자의 세적을 스틸 카메라로 촬영하였다. 섹크실내와 분공내의 케비테이션 및 분류의 분열거동의 촬영에는 트레이서를 넣지 않은 물만을 분출시켜, 고속도 비디오 카메라(Kodak社製 HS4540)로 촬영하였다. 광원으로는 마이크로 플래시를 이용하였다.

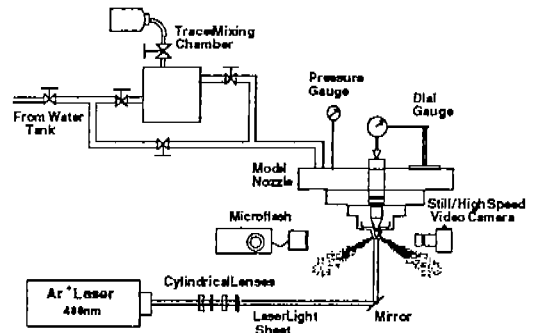


Fig. 2 Experimental Apparatus

모형노즐의 축압실내에 유입되는 수류는 정상류 조건으로 하여, 모형노즐의 분공내의 레이놀즈수를 실제 디젤노즐의 분공에서의 레이놀즈수와 일치시킨 조건에서 도출한 분사압력으로 실험을 행하였다. 노즐의 상세 및 실험 조건을 표 1에 보인다.

여기서, 레이놀즈수 Re 및 케비테이션수 K 는 다음과 같이 구하였다.

$$Re = \frac{V_c d_h}{\nu} \quad (1)$$

$$K = \frac{P_i - P_v}{P_i - P_a} \quad (\text{reference [7]} \quad (2)$$

여기서, V_i 는 분공출구의 평균분출속도, d_h 는 분공경, ν 는 동점성 계수, P_i 는 상류측의 분사압력, P_a 는 분위기 압력, P_v 는 연료의 증기압력, 사용액체는 경유 대신 물을 사용하였다. 모델노즐의 분사압력은 0.2MPa으로, 실제 디젤노즐의 분사압력 149MPa에 상당한다. 캐비테이션수는 실제의 노즐보다, 모델노즐의 경우가 크며, 모델노즐의 경우가 캐비테이션이 발생하기 어려운 상태를 나타내고 있다.

Table 1 Specifications of Diesel Nozzle and Model Nozzle

Parameters	Unit	Diescl Nozzle	Model Nozzle
Hole Dia. d_h	mm	0.2	2
Size Ratio	-	1	10
Reynolds No	-	3.98×10^4	3.98×10^1
Cavitation Number	-	1.02	1.48
Injection Pressure	MPa	149	0.2
Injection Velocity	m/s	598	20
Fluid	-	Diesel Fuel	Water
Density	kg/m ³	835	998
Kinematic Viscosity	m ² /s	3.0×10^{-6}	1.004×10^{-6}

니들 리프트에 대한 모형노즐내의 니들 시트부의 유로 단면적의 변화를 Fig. 3에 보인다. 니들 시트부의 단면적은 니들 리프트의 상승과 더불어 증가하지만, 분공의 단면적은 니들 리프트와 관계없이 일정하여, 노즐내의 최소 유로 단면적은 니들리프트가 0.47mm 지점에서 니들 시트 축소부로부터 분공 축소부로 바뀐다.

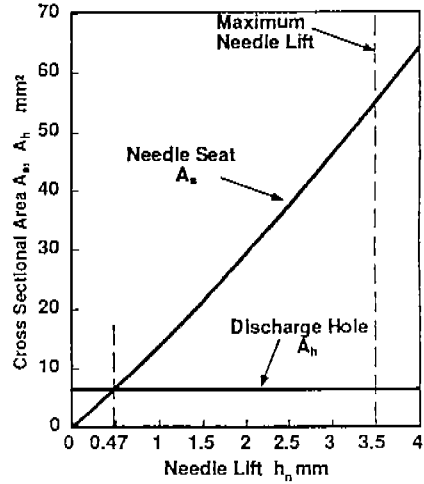


Fig. 3 Geometrical change of cross sectional area

실험에 사용한 투명한 아크릴 수지제의 모형노즐의 개요를 Fig. 4에 보인다.

사용된 노즐은 표준모델 I (STD Model I), 표준모델 II (STD Model II), 표준모델 III (STD Model III), 미니잭크 모델 (Mini Sac Model)의 4종류를 사용하였다.

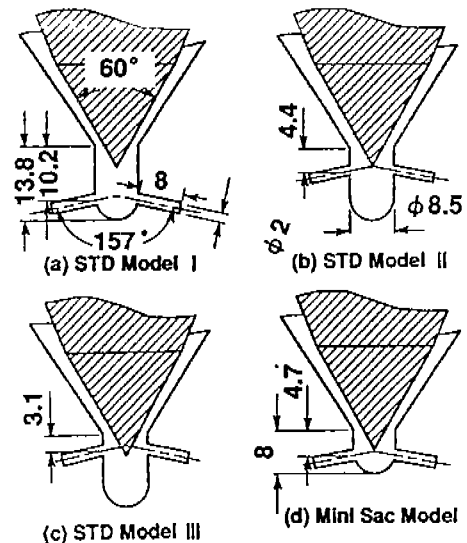


Fig. 4 Configuration of Four Types of Model Nozzles

이들은 분공경이 0.2mm 의 직분식 디젤기관 용의 다공 홀형 노즐의 형상에 기초를 하여, 내부 치수를 10배로 확대한 노즐이다. 분공수는 노즐 내부의 조명과 관찰을 위하여, 좌우의 2개의 분공으로 하여, 분공경을 2mm , 분공길이와 분공경의 비가 4, 분사각이 157° 로 하였다. 표준모델 I은, 실제디젤노즐의 형상을 10배로 확대한 모델이며, 표준모델 II는 표준모델I과 동일한 섹크실 형상으로, 분공을 섹크실 상류에 위치시킨 모델이다. 표준모델 III은, 분공이 니들 시트부 가까이 위치해있다. 미니섹크 모델의 형상은 표준모델 I과 동일한 형상으로, 섹크실의 높이를 1/2로 하여, 섹크실의 용적을 적게 한 모델이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 노즐내의 유동과 분류의분열거동

3.1.1 표준모델 I의 경우

Fig. 5의 (a), (b)에 표준모델 I의 섹크실내의 유동패턴, 분공내의 케비테이션 및 분출후의 분류의 형태를 보인다. 니들 리프트가 0.7mm인 Fig. 5의 (a) 경우는, 섹크실내의 유동은 니들 시트부로부터의 빠른 흐름의 영향으로 섹크실의 벽면 근방에서 커다란 와류가 형성됨을 알 수 있다. 분공내에는 케비테이션이 발생하지 않았으나, 섹크실내의 난류성분의 증대에 의해 분류 각이 확대되어 있음을 알 수 있다. 한편, 니들 리프트가 3.5mm인 Fig. 5의 (b) 경우는 섹크실내의 유동은 매우 완만하여, 유선은 니들 시트부로부터 직접 각 분공으로 향함을 보인다. 또한, 분공에서의 케비테이션은 분공 출구에서 생성과 붕괴를 반복하여, 분공내의 압력변동을 일으켜, 임의 순간에는 분공으로부터 필름상의 케비테이션이 섹크실까지 발달하다가 배출되거나, 양분공의 사이에 연결되었다가 곧 소멸하는 것을 알 수 있다. 분공에서의 케비테이션의 양상은 유속증대로 인한 축류가 분공의 모서리부에서 발생하여, 분공내의 거의 전역에 걸쳐 분포하고 있음을 보인다. 또한, 섹크실내에 발생하는 케비테이션이 분공으로부터

유출될 때에 분류의 확산각을 주기적으로 변동한다.

3.1.2 표준모델 II의 경우

Fig. 6의 (a), (b)에 표준모델 II의 섹크실내의 유동패턴, 분공내의 케비테이션 및 분출후의 분류의 형태를 보인다. 니들 리프트가 0.7mm인 Fig. 6의 (a)의 경우를 살펴보면, 섹크실내의 유동은 니들 시트부로부터 직접 분공으로 향하는 유동과 섹크실하부로 유입되어 와류를 형성시킨 뒤, 분공으로 향하는 두가지의 유동패턴을 보인다. 분공내의 유동상태로는 분공의 입구에만 케비테이션이 발생하고 있음을 보인다. 분출후의 분류의 상태는 섹크실내의 난류성분과 분공내의 케비테이션이 분류의 분열을 촉진시켜 분무각을 증대시킴을 알 수 있다.

한편, 니들 리프트가 3.5mm인 Fig. 6의 (b)의 경우는 섹크실내의 유동은 니들 리프트가 증가해도 니들 시트부로부터 직접 분공으로 향하는 유동과 니들 시트부로부터 섹크실하부로 유입되어 와류를 형성시킨 뒤, 분공으로 향하는 두가지의 유동패턴이 유지되는 경향을 보인다. 그러나, 분공내의 유동상태는 케비테이션이 분공의 입구에서 발생하여 분공의 하류까지 성장해 있음을 보인다.

분공내의 케비테이션이 분공출구까지 형성되어, 분열되지 않은 채로 분출됨에 따라, 분출후의 분류의 상태는 분류의 확산각이 작아짐을 보인다. 그러나, 섹크실내의 난류성분의 증대로 인해 표준모델 I의 경우보다 분류의 확산각이 큼을 알 수 있다.

3.1.3 표준모델 III의 경우

Fig. 7의 (a), (b)에 표준모델 III의 섹크실내의 유동패턴, 분공내의 케비테이션 및 분출후의 분류의 형태를 보인다. 먼저, Fig. 7의 (a)의 니들 리프트가 0.7mm의 경우, 섹크실내의 유동은 니들 시트부로부터의 빠른 흐름의 영향으로 섹크

실의 저면에서 작은 와류 군이 형성되어 있음을 알 수 있다. 그러나, 유동의 대부분은 니들 시트로부터 직접 분공으로 흘러 들어가지 않고, 니들 벨브의 벽면을 따라서 섹크실내로 유입된 후 분공을 향한다. 분공내의 유동을 살펴보면, 분공 내에는 케비테이션이 발생하여 분공 입구부터 분공의 중간까지 형성되어 있어, 분공 출구에서 유출되기 직전에 파괴되고 있음을 보인다. 분류에 대해서는, 분공내의 케비테이션이 분공내에서 붕괴되어 분류에 매우 큰 교란을 야기시키기 때문에 분류의 확산각이 매우 큼을 알 수 있다.

한편, Fig. 7 (b)의 니들 리프트가 3.5mm의 경우, 섹크실내의 유동은 니들 시트로부터 그대로 분공에 유입되는 유선과 니들 시트로부터 섹크실내에 향하여 재차 분공으로 향하는 두개의 유동을 보이고 있다. 이 모델의 경우도 분공에서 필름상의 케비테이션이 섹크실 내부까지 발달하여, 곧바로 분공밖으로 유출되거나, 양분공간에 연결된 후 소멸됨을 보인다. 이때의 케비테이션의 띠는 니들 시트로부터 직접 분공으로 향하는 유동과 분공의 위치보다 아래인 섹크실의 하부의 불규칙한 유동과의 경계상에 생기는 것을 알 수 있다. 분공내에는 케비테이션이 발생하여, 거의 분공 전역에 걸쳐 성장해 있음을 알 수 있다. 분류에 대해서는, 분공내에 풀홀-케비테이션이 발생하여 있으나, 섹크실내의 강한 난류의 영향을 받아 분류의 확산각이 증대되어 있음을 알 수 있다.

3.1.4 미니섹크 모델의 결과

Fig. 8의 (a), (b)에 미니섹크 모델의 섹크내실의 유동패턴, 분공내의 케비테이션 및 분출후의 분류의 형태를 보인다. 먼저, 니들 리프트가 0.7mm의 경우의 섹크실내의 유동은, 둥근 띠형의 케비테이션이 섹크실 내에 생겨 니들의 선단에서 분공의 출구까지 성장해있음을 알 수 있다. 이 케비테이션의 띠는 섹크실의 단면의 일부의 유동을 상하로 분리시키나, 니들 리프트가 1.5 - 2.0mm로 증대되면 이 원형 띠의 케비테이션은

섹크실에서 소멸됨을 알 수 있었다. 분류에 대해서는, 섹크실 내에서 발생하는 케비테이션의 영향을 받아, 분류가 중공상으로 됨을 알 수 있으며, 분류의 확산각이 매우 큼을 알 수 있다.

한편, 니들 리프트가 3.5mm의 경우, 섹크실내의 유동은 니들 시트로부터 분공으로 완만히 굽어 유입되는 유선을 보인다. 또한, 표준 모델 I, III과 더불어 분공으로부터 편형상의 케비테이션이 섹크실 내로 발달하여, 곧 유출되거나, 양분공 사이에서 연결되었다가 소멸하거나 한다. 분공내의 유동상태에 대해서는, 분공의 입구영역에서만 케비테이션이 발생하고 있다. 분류의 확산각은 섹크실내의 완만한 유동의 영향으로 액체 분류의 확산각은 작으며, 액주상으로 되어 있다. 또한, 섹크실내의 케비테이션의 생성과 소멸의 영향으로, 케비테이션이 분공으로부터 유출되는 경우, 분류의 확산각이 주기적으로 변동함을 알았다.

3.2 니들 리프트에 따른 유량의 변화

Fig. 9에 각 모델의 니들 리프트에 대한 유량의 변화를 보인다. 전 모델에 대해서, 니들 리프트의 상승과 더불어 유량은 증가하는 경향을 보인다. 니들 리프트가 0.5 mm에서 2.0 mm 사이의 증가가 두드러지며, 니들 리프트 2.0 mm를 초과하면 유량의 증가는 작아짐을 보인다. 모델들간의 결과를 비교해보면, 표준 모델 I의 경우가 최대의 유량을 보인다. 이는 표준 모델 I의 섹크실내의 유로가 완만해 유동저항이 작기 때문으로 생각된다.

미니섹크 모델의 경우, 니들 리프트 0.7 mm에서 1.5 mm까지의 범위에서 매우 작은 유량을 보여주나, 이는 섹크실 내로부터 분공에 걸쳐 발생한 케비테이션의 띠의 영향으로, 분공내의 유로면적이 작아지기 때문으로 생각된다. 그러나, 니들 리프트가 2.0 mm이상이 되면, 이 케비테이션의 띠가 소멸됨에 따라 유량이 급격히 증가함을 보인다. 니들 리프트가 2.5mm 이상에서 전 모델의 유량을 비교해보면, 표준 모델 I, 표준 모델

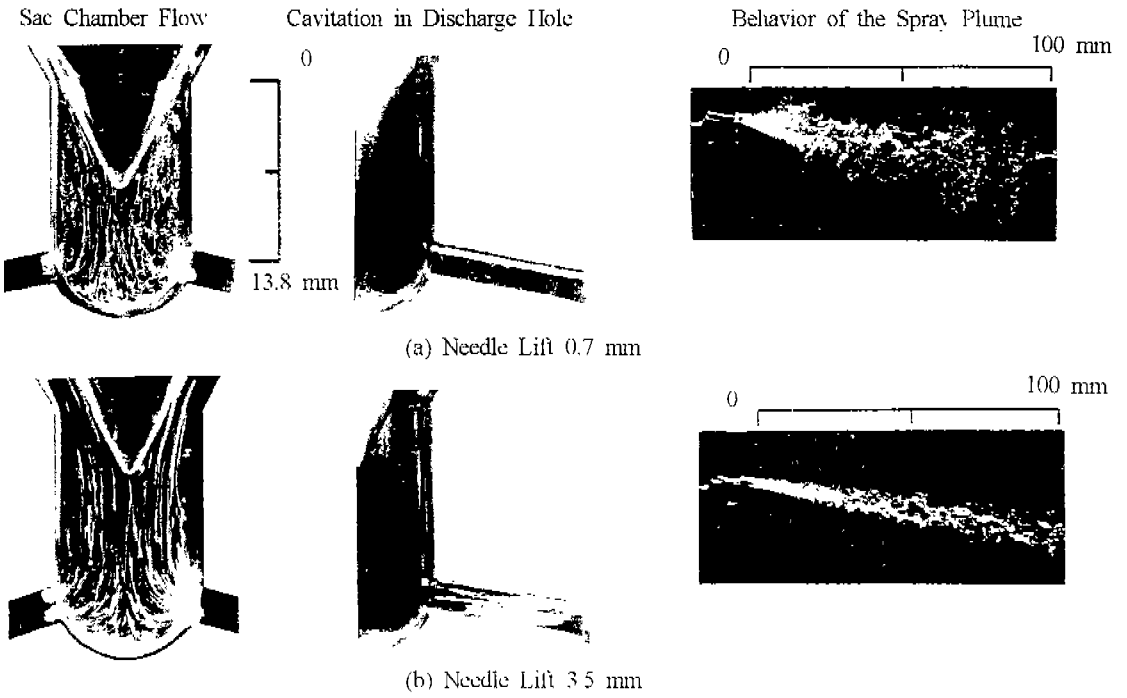


Fig. 5 Flow Patterns in Sac Chamber, Cavitation in Discharge Hole and Behaviors of Spray Plume for the STD Model I

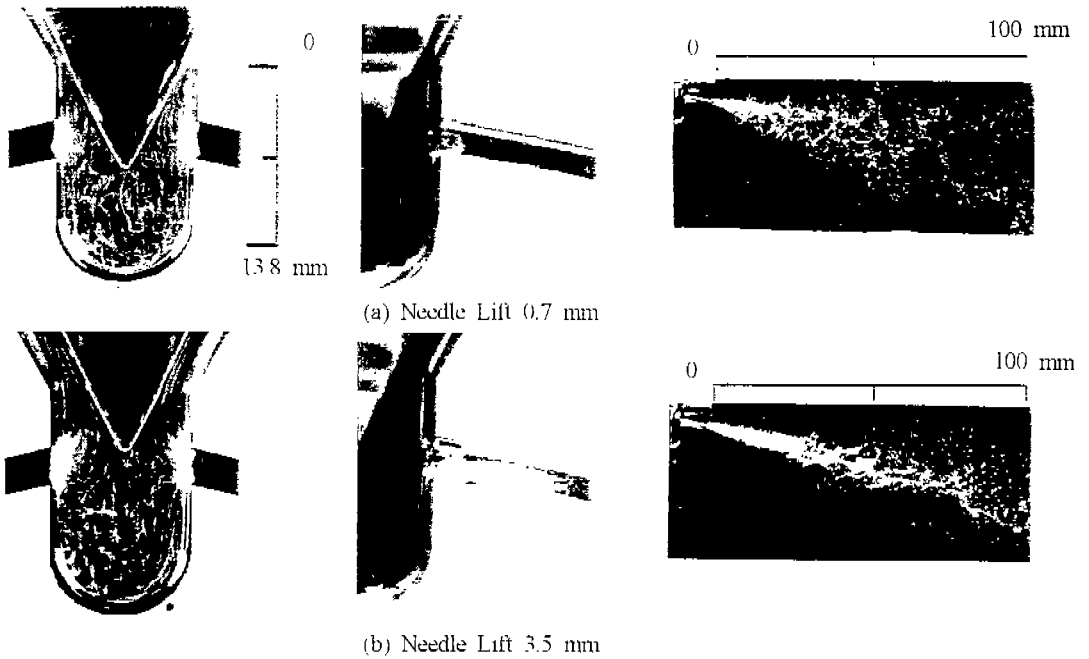


Fig. 6 Flow Patterns in Sac Chamber, Cavitation in Discharge Hole and Behaviors of Spray Plume for the STD Model II

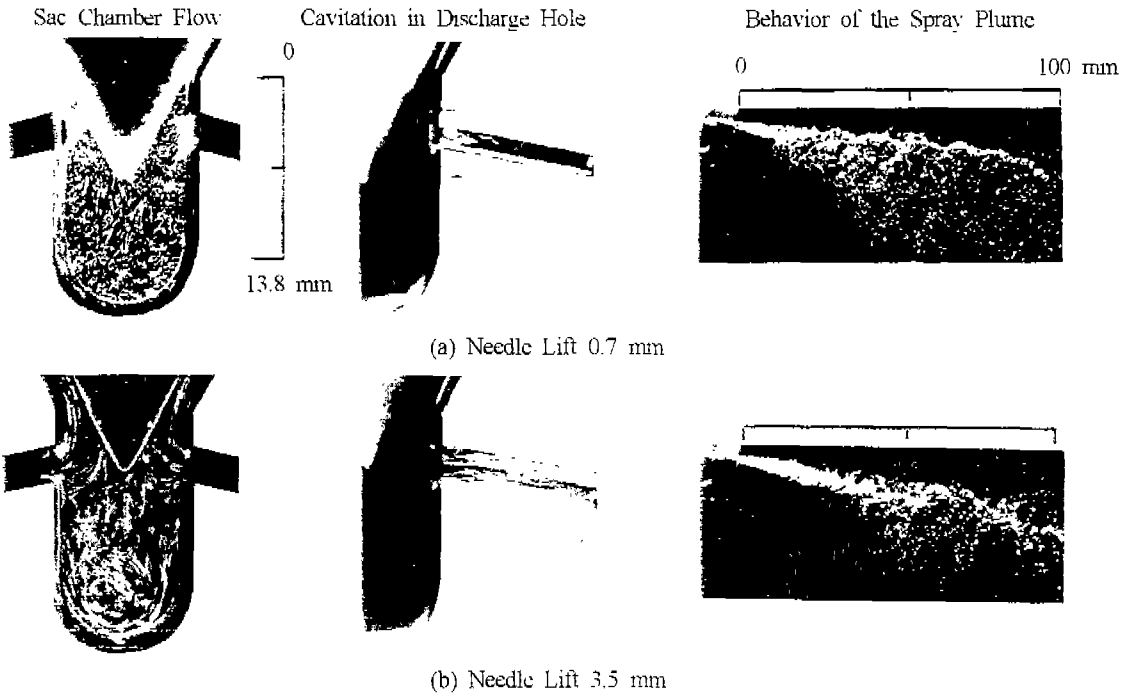


Fig. 7 Flow Patterns in Sac Chamber, Cavitation in Discharge Hole and Behaviors of Spray Plume for the STD Model III

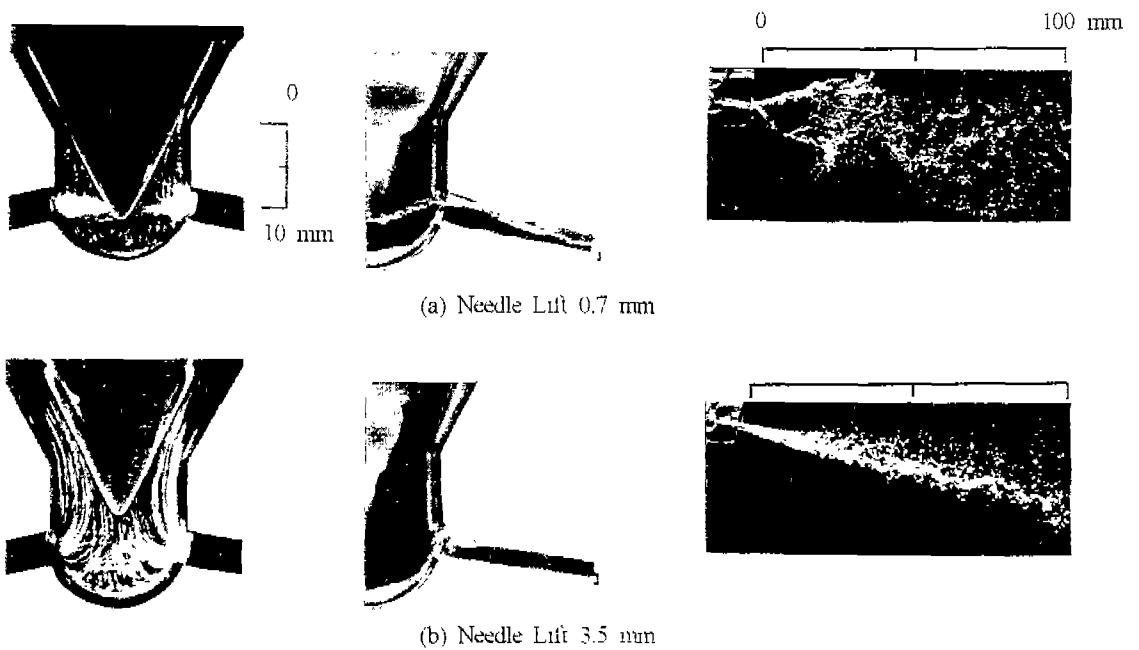


Fig. 8 Flow Patterns in Sac Chamber, Cavitation in Discharge Hole and Behaviors of Spray Plume for the Mini Sac Model

III. 미니샷크 모델, 표준 모델 II의 순으로 유량이 작아지고 있음을 보인다.

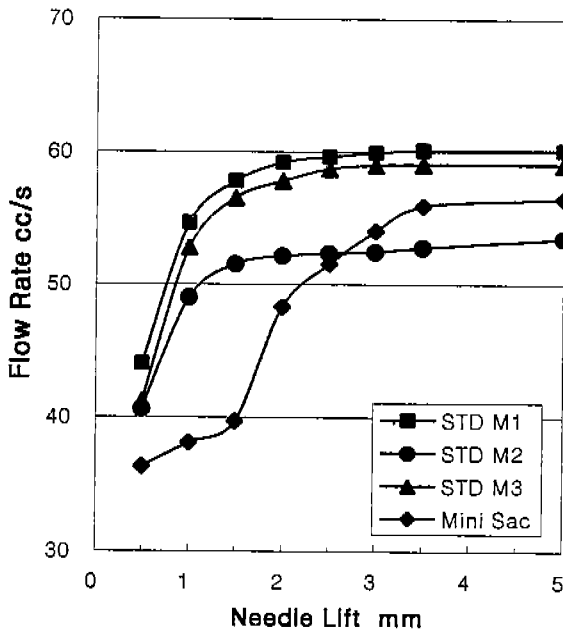


Fig. 9 Variation of Flow Rate with Needle Lift

4. 결론

내부 형상을 10배로 확대한 투명한 수류모형 노즐을 사용하여, 가시화 실험에 의해 디젤 연료 분사 노즐내의 유동을 정상류의 조건에서 고찰한 결과, 다음의 사실을 알게 되었다.

(1) 표준 모델 중에서 분공이 샷크실의 하부에 위치한 표준 모델I의 경우, 니들 리프트가 커짐에 따라 샷크실내의 유동이 층류와 유사하여, 니들 시트부에서 직접 분공으로 향하는 유선을 보이며, 분류 확산각은 작음을 알 수 있다.

(2) 표준 모델 중에서 분공이 샷크실의 상부에 위치한 표준 모델III의 경우, 분공이 샷크실내의 저면에 위치한 표준 모델 I의 경우에 비해, 샷크실내의 유동이 난동 된 상태로 되어, 분류 확산각이 크게 된다. 그러나, 유량은 작게 된다.

(3) 미니샷크 모델의 경우, 니들 리프트가 작은

때에는 좌우의 분공 출구로부터 분공 상류부, 샷크실내의 니들 하단부근에 걸쳐 둥근 줄 모양의 케비테이션이 발생하여, 좌우의 케비테이션이 연결됨을 알았다. 이때 분공내의 액류는 선화하며, 분류는 중공의 구조로 되며, 분류의 확산각이 표준 모델에 비해 상당히 크게 된다. 그러나, 유량은 표준 모델에 비해 작다.

(4) 전 모델에 대해서, 니들 리프트의 증가에 따라 유량이 급격히 증가하다가 완만히 증가함을 보인다.

참고문헌

1. H. Hiroyasu, M. Aria and M. Shimizu, Break-up Length of a Liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle, Porch. 5th. ICLASS, pp. 275-282, 1991.
2. 許, 新井, 廣 安, ディーゼル噴射弁の水流模型による流れの觀察, 日本機械學會論文 集B編, 53-491, pp. 2214-2218, 1986.
3. 横田, 伊藤, 四戸, 細い絞りを通る高壓・高速流中のキャビテーションの瞬間寫眞觀察, 日本機械學會論文集, (B編) 55卷 515號, pp. 1817-1822, 1989.
4. C. Arcoumanis and R.J. Fairbrother, Computer Simulation of Fuel Injection System for D. I. Diesel Engine, SAE Paper 922223, 1992.
5. K. Date, M. Manabe, H. Kano, M. Kato and T. Oya, Combustion of Fuel Improvement in Nozzle to Spray Formation, SAE Paper 920622, 1992.
6. W. H. Nurick, Orifice Cavitation and Its Effect on Spray Mixing, Journal of Fluid Engineering, pp. 681-687, 1976.