

## 디젤 엔진 연료 분사 펌프 캐비테이션 현상의 가시화 연구

류승협<sup>†</sup> · 김동훈<sup>1</sup> · 김병석<sup>1</sup> · 박태형<sup>1</sup>

(원고접수일 : 2010년 12월 6일, 원고수정일 : 2011년 2월 8일, 심사완료일 : 2011년 4월 5일)

### Optical Observation of Cavitation Phenomena in Diesel Fuel Injection Pumps

Seung-Hyup Ryu<sup>†</sup> · Dong-Hun Kim<sup>1</sup> · Byung-Seok Kim<sup>1</sup> · Tae-Hyung Park<sup>1</sup>

**요 약 :** 중속 디젤 엔진에 적용된 연료 펌프의 스필 포트 및 플런저 벽면에서 발생하는 캐비테이션 손상 원인을 규명하기 위해, 연료 펌프의 스필 포트 내부에서 일어나는 캐비테이션 유동 현상에 대한 가시화를 수행하였다. 이를 위해 기존 연료 펌프를 개조하여 사파이어 가시창을 제작, 설치하고, 고속 카메라와 Nd-YAG 레이저 및 산업용 내시경을 이용한 다양한 가시화 방법을 모색하였다. 취득한 영상의 분석 결과 연료의 분사 과정 동안 네 가지 형태의 특징적인 캐비테이션 현상이 목격되며, 특히 연료 압송 과정의 종료 직전과 직후에서 발생하는 분수 형태와 제트 형태의 캐비테이션이 손상의 지배적인 원인으로 판명되었다.

**주제어 :** 연료 분사 펌프, 캐비테이션, 유동 가시화, 디젤 엔진

**Abstract:** Cavitation phenomena during the spill process of the Bosch type fuel injection pump for medium-speed diesel engine were investigated by optical observations. Typically, these phenomena can cause a surface damage with material removal or round-off at the plunger and barrel port etc., and may shorten their expected life time. The images, which were recorded with high speed CCD camera and borescope, show that the plunger damage is mainly affected by fountain-like cavitation generated before the end of delivery. And the damages of barrel port and deflector are caused by jet-type cavitation generated after end of delivery.

**Key words:** Fuel injection pump, Cavitation, Flow visualization, Diesel engine

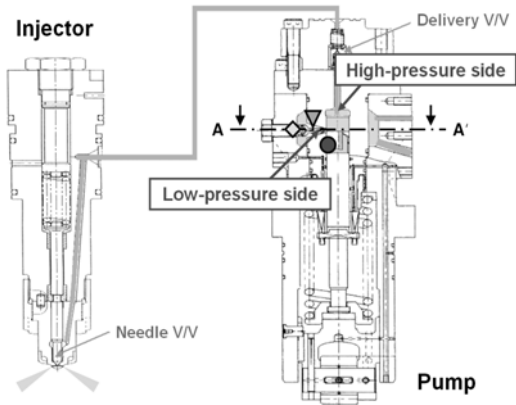
### 1. 서 론

디젤 엔진의 연료 분사 장치는 엔진의 연소 과정에 크게 영향을 미치므로, 엔진의 연소 효율을 향상시키고 유해한 배기가스의 발생을 감소하는 데 있어서 핵심적인 역할을 하고 있다. 특히, 중·소형 디젤 엔진에서는 연료 액적의 미립화를 향상시키고 분사 기간을 단축시켜 연소 효율을 높이기 위한 방법으로 최대 연료 분사 압력을 1,500bar 이상으로 고압화하는 추세에 있는데, 이는 연료 분사 장치의 내구성 및 안정성을 크게 떨어뜨리는 주요 원인이 되고 있다. Figure 1은 당사 엔진에 적용된 디젤

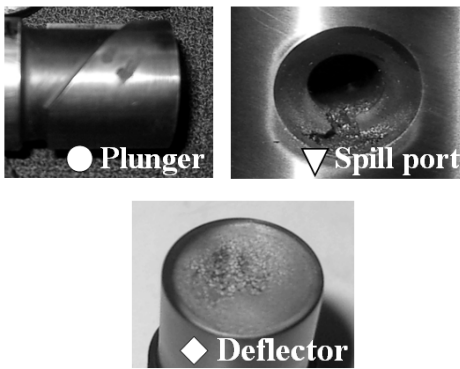
연료 분사 시스템의 개략도와 연료 분사 펌프의 배럴(barrel)에 나타난 캐비테이션[1] 손상 형상을 보인 것으로, 이는 연료펌프의 내구 수명을 크게 감소시키는 주요 원인이 되고 있다. 하지만, 연료 펌프의 연료 압송 및 스필 과정에서 발생하는 복잡한 캐비테이션 현상 규명에 관련한 연구[2-4]가 아직까지 미흡해 손상의 근본 원인 규명에는 어려움이 있다. 본 연구에서는 실제 펌프의 구동 시에 발생하는 캐비테이션의 기본 현상을 이해하고, 이에 기초한 근본적인 손상 방지 및 저감 대책을 수립하고자, 연료 펌프의 스필 포트 내부에서 일어나는 캐비테이션 유동 현상에 대한 가시화를 실시하였다.

<sup>†</sup> 교신저자(현대중공업 제품개발연구소 시험평가연구실, E-mail:shryu2@hhi.co.kr, Tel: 052-202-3225)

<sup>1</sup> 현대중공업 제품개발연구소 엔진연구실



(a) Diesel fuel spray system



(b) Shape of material removal

Figure 1: Cavitation damage to pump components

## 2. 실험 장치

### 2.1 가시화 연료펌프 제작

연료 펌프 스피어 포트 내의 유동 현상과 캐비테이션 발생 과정을 관찰하기 위하여, 엔진의 별도 구동 없이 연료 분사 시스템의 단독 운전이 가능하도록 리그 시험 설비를 구축하였다. Figure 2는 전기 모터와 감속기 및 플라이 휠로 구성되어 실제 엔진과 같이 원하는 운전 조건에서 연료 캠을 구동하도록 설계된 디젤 연료 분사 리그 설비의 개략도이다. 또한, 본 리그 설비에는 광학 장치의 원활한 접근을 위하여 가시화용 연료 분사 펌프를 신규 설계, 장착하였다. Figure 3은 본 연구를 위해 적용된 가시화용 연료 분사 펌프의 가시 영역을 도시한 그림이며, Table 1은 연구 대상 펌프의 주요 제원을 나타내고 있다.

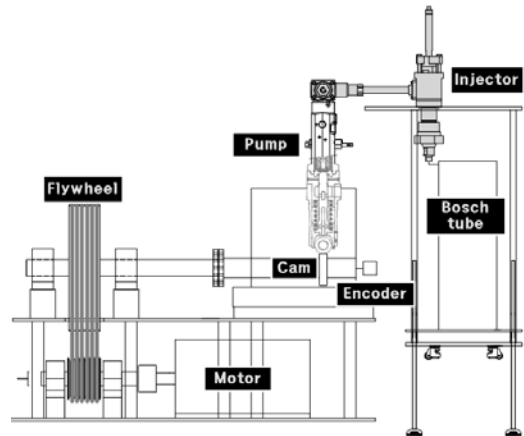
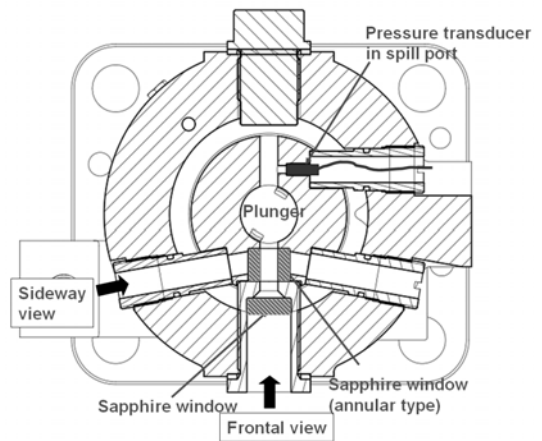
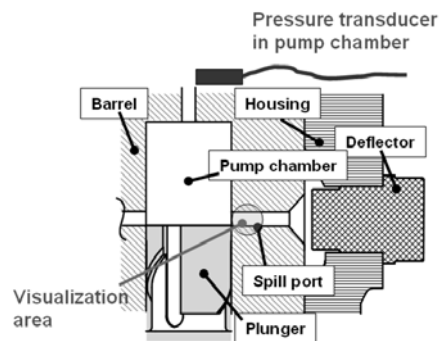


Figure 2: Test rig for optical observation of cavitation phenomena



(a) A-A' cross sectional view of Figure 1(a)



(b) Visualization zone in sideways view

Figure 3: Arrangement of optical windows and pressure transducer

**Table 1:** Specifications of fuel injection pump

Rated speed	360 rpm(cam)
Max. pumping pressure	1,500 bar
Plunger diameter	22 mm
Control bore diameter	7 mm
Max. plunger stroke	20 mm

가시창은 캐비테이션에 의한 주요 부품 손상이 발생한 스피ل 포트 내부를 관찰할 수 있도록 설계하였으며, 이는 스피ل 포트를 원주 방향으로 감싸는 중공(中空)형 실린더 형태와 디플렉터의 축 방향으로 설치된 원통 형태의 두 가지로 제작하였다. 이때, 가시창의 재질은 순간적으로 100bar 이상 상승하는 스피ل 포트 내부 압력에 안정적으로 견딜 수 있도록 사파이어로 선정하였다. 본 연구에서는 제작된 가시화 연료 펌프를 통해 연료의 공급과 스피ل과정에서 발생하는 유동 현상을 스피ل 포트의 정면과 측면의 방향에서 관찰하였다.

2.2 영상 획득 방법

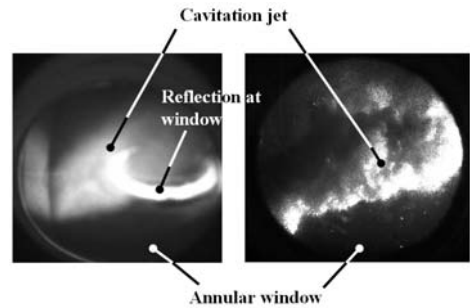
가시창을 통해 관찰되는 영상은 엔진 사이클에 대한 촬영 속도에 따라 연속적인 촬영과 주기적인 촬영의 두 가지 방법으로 획득하였다. 본 연구에서 적용된 광학 장비의 주요 제원은 Table 2와 같다. 또한, Figure 4는 각각의 접근 방법에 따라 획득한 연료 펌프 압축 말기의 제트 타입 캐비테이션 영상을 비교한 것이다.

**Table 2:** Specifications of optical system

Item	Model / Company
High speed camera	Phantom5.0/Vision Research
Digital CCD camera	Megaplus ES4.0/Redlake
Borescope	R080-24-000-50/Olympus
Xenon lamp	ILP-1(200W)/Olympus
Nd-YAG laser	Gemini solo 2x120mJ @532nm/New Wave
Pressure transducer	6051A/Kistler
Rotary encoder	3600ppr/Omron
Concave lens	focal length;-3mm/OptoSigma
Data processing & Timing control	PXI-1042.6133,6602 /National Instruments

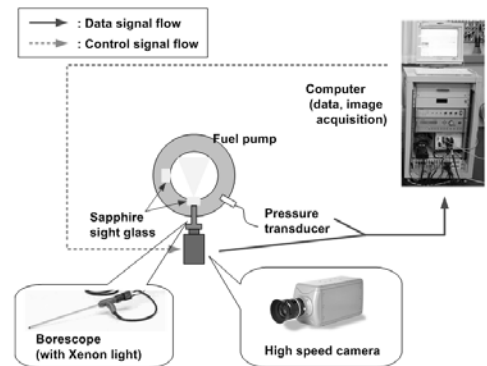
2.2.1 연속 촬영 기법

가시화를 위한 첫 번째 방법으로 Figure 5에 나타난 것처럼 제논(Xenon) 조명을 끝단에 장착한 산업용 내시경을 고속카메라 렌즈에 설치하여 초당 12,000장의 영상을 연속적으로 취득하였다. 본 방법은 한 사이클 내에서 연속적인 유동 현상을 고속으로 촬영할 수 있다는 장점이 있으나, 조명 광량의 제약으로 촬영 노출 시간을 줄이는 데 한계가 있어 순간적인 유동 변화를 관찰하기는 어렵다. 이와 더불어, 측면 영상(Figure 4(a))에서 스피ل 포트를 감싸고 있는 원통형 가시창의 벽면에서 발생한 반사광이 영상에 나타나는 문제와 정면 영상의 경우 기 생성된 캐비티들이 포트 내에 머물면서 신규로 발생하는 현상의 관찰을 방해하는 문제가 발생하였다. 이에 따라, 본 연구에서는 캐비테이션 현상의 이해를 높이기 위해 레이저 시트(laser sheet)를 광원으로 한 단면 촬영을 추가적으로 진행하였다.



(a) Sequential approach (b) Periodical approach

**Figure 4:** Acquired image at each optical approach (jet-type cavitation at spill process, sideways view)



**Figure 5:** Sequential approach using high speed optical system

2.2.2 주기 촬영 기법

가시화를 위한 두 번째 접근 방법으로 펄스 타입의 Nd-YAG 레이저를 시트 형태로 0.1 $\mu$ s 이내의 짧은 기간에 조사하여, 캐비테이션이 산란하는 영상을 CCD 카메라로 취득하였다. 이러한, 주기 촬영 기법에 의한 획득 영상을 앞선 Figure 4(b)에 나타내었다. 또한, Figure 6과 Figure 7은 각각 본 실험 장치의 개략도와 실제 영상 취득 모습을 보여준다.

본 방법에서 가능한 영상 획득 속도는 레이저 펄스의 반복 가능 속도에 의해 제약되는데, 적용된 장비의 경우 약 12Hz 정도가 가능하다. 이러한 촬영 속도로는 연료 공급 과정의 현상을 연속적으로 관찰하는 것이 불가능하므로, 캠 축에 설치한 로터리 엔코더와 동기하여 주기적으로 여러 사이클에 걸쳐 플러저 위치별 영상을 취득한 뒤 이를 연결하여 연속적인 현상 변화를 관찰하였다. 따라서, 본 방법은 영상의 노출 시간을 레이저가 발광한 시간으로 제어 가능하므로 순간적으로 변하는 캐비테이션 현상의 분석에 유용하다는 장점이 있으나, 사이클 변화가 심한 조건에서는 적용이 어렵다는 한계가 있다. Table 3에 고속 카메라를 이용한 연속 촬영 기법과 레이저를 이용한 주기 촬영 기법의 차이와 장단점을 간략하게 비교하였다.

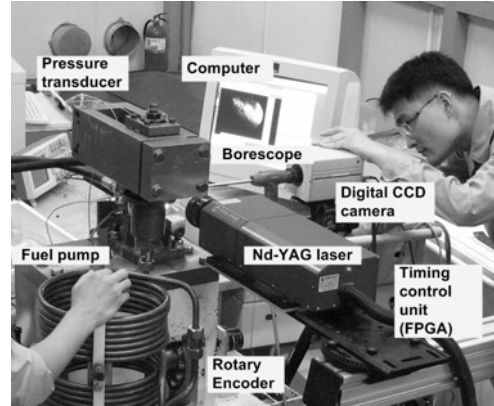


Figure 7: Laser optical setting for visualization

Table 3: Comparison with each optical approach

촬영방법	연속 촬영 (1사이클)	주기 촬영 (수십 사이클)
영상장비	High speed camera	CCD camera
조명장비	Xenon lamp (연속광원)	Laser sheet (펄스광원)
획득 영상간격	83 $\mu$ s, 0.09degCAM (@12,000frame/sec)	23 $\mu$ s, 0.025degCAM (회전수와 엔코더 분해능에 따름)
노출시간	10~70 $\mu$ s	<0.1 $\mu$ s
획득영상	볼륨 이미지	단면 이미지
영상정보	256x256픽셀 (8bit)	512x512픽셀 (12bit)
적용시 단점	-노출 조절한계 -반사광 존재	-사이클 변화 존재 시 적용 한계
기준 운전조건	-캠 회전속도; 180rpm(926 $\mu$ s/degCAM) -컨트롤 로드; 10mm -최대압축압력; 800bar	

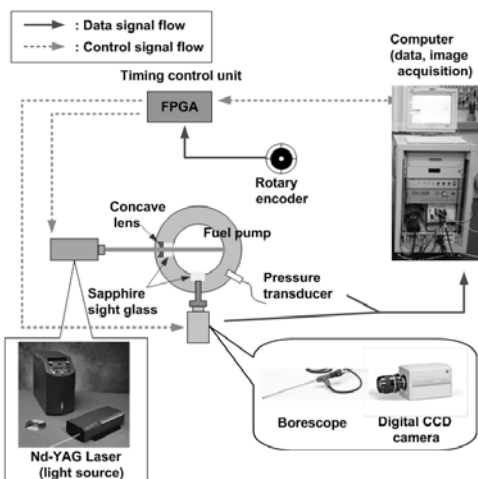


Figure 6: Periodical approach using laser optical system

3. 실험 결과

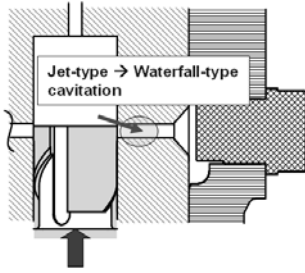
3.1 캐비테이션 영상 분석

지나친 압력 상승에 의한 가시창의 손상 방지와 획득 영상의 질을 높이기 위해, 연료의 최대 압축 압력은 800bar로 적용하여 캐비테이션의 발생량을 적절히 조절하였다. 이 경우 연료 캠의 회전 속도는 180 rpm, 컨트롤 로드는 10mm에 해당한다. 이와 같은 구동 조건에서 앞서 언급한 두 가지 촬영 기법으로 플러저의 유효 스트로크 전, 후의 캠 각도 약 14도 기간의 영상을 최소 0.025도 간격으로 스캔

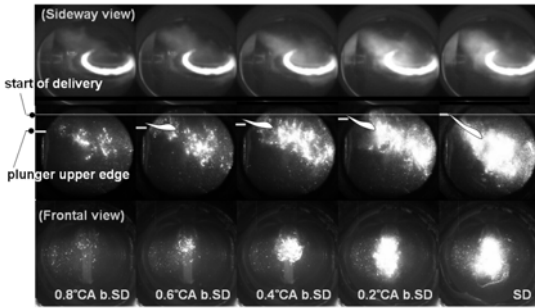
포트의 정면과 측면을 통해 기록한 뒤 이를 분석하였다.

분석 결과 캐비테이션의 발생 형태는 연료의 공급, 압송, 스필 과정이 진행되는 동안 크게 네 가지 형태로 구분되어 보이며, 이는 플런저가 상승하면서 달라지는 플런저 위치에 대해 스필포트의 개도의 변화에 관계하는 것으로 나타났다.

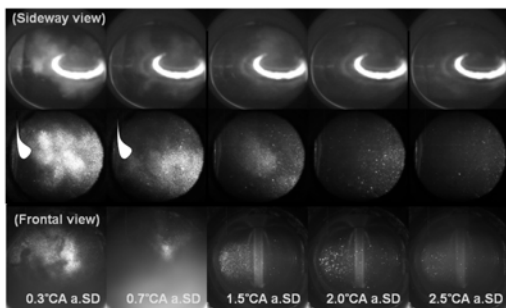
### 3.1.1 연료 압송 과정



(a) Schematic of start of fuel delivery



(b) Jet-type cavitation before start of delivery



(c) Waterfall-type and no cavitation period

**Figure 8:** Sequential images during start of fuel delivery (SD: Start of Delivery)

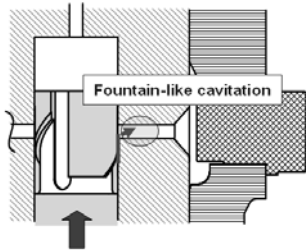
연료 압송 과정 중 최초로 나타나는 캐비테이션 현상은 압송 시작 직전의 스필 포트가 닫히는 과정에서 목격된다. 본 과정에서는 챔버와 스필 포트와의 압력차로 인한 유동 내의 정압력 강하로 캐비티가 생성되며, 생성된 캐비티들은 챔버에서 스필 포트 방향으로 제트(jet) 형태의 유동을 따라 분출되는 것이 목격된다. Figure 8(b)는 이러한 제트 형태의 캐비테이션 현상을 연료 캠의 위치에 대해 연속적으로 나타낸 것이며, 위에서부터 차례로 각각 연속 측면, 주기 측면과 정면 촬영 방법으로 획득된 영상을 보여준다. 제트 형태의 캐비테이션은 플런저의 상승에 의해 스필 포트가 완전히 닫힐 때까지 지속된다.

연료 압송이 시작된 직후, 다시 말해서 플런저의 프리 스트로크(free stroke) 이후에는 플런저 벽면과 배럴 벽면 사이의 간극을 따라서 캐비티들이 위에서 아래로 배출되는 폭포(waterfall) 형태의 캐비테이션 현상이 두 번째로 목격된다(Figure 8(c)). 폭포 형태로 발생된 캐비티들은 이후 마치 안개처럼 스필 포트 내부를 가득 채웠다(압송 시작 후 캠 각도 0.7도 부근), 스필 포트가 완전히 닫히면서 점차 사라지게 되고 이후 포트 내부는 다시 투명하게 연료만 남아있는 것이 목격된다.

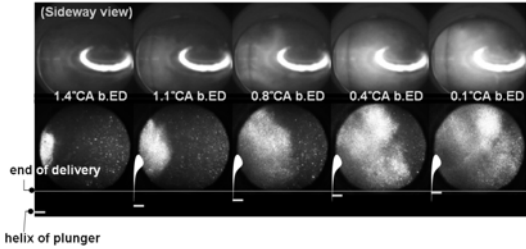
### 3.1.2 연료 스필 과정

연료 압송이 끝나고 연료가 스필되기 직전, 또 다시 배럴 벽면을 통한 새로운 캐비테이션 현상이 목격된다. 이에 대한 영상을 Figure 9(b)에 나타내었다. 이 시점에서 캐비테이션 유동은 분수 형태(fountain-like)로 아래쪽에서 플런저 벽면을 따라 비교적 느린 속도로 전파된다. 이때 발생된 캐비티들은 운동량이 크지 않아 발생 이후 포트를 통해 빨리 빠져나가지 못하고 많은 양이 플런저 벽면 주위에 그대로 머무르게 된다.

이후 유효 스트로크의 종료 직전 캠 각도 0.2도에서 스필 포트가 다시 열리게 되면서, 여러 과정 중 가장 강력한 에너지를 가진 제트(jet) 형태의 캐비테이션 유동이 스필 포트에 분출되는 현상을 목격할 수 있다. Figure 10(b)는 스필 과정의 제트 타입 캐비테이션 유동의 영상으로 스필 포트가 열

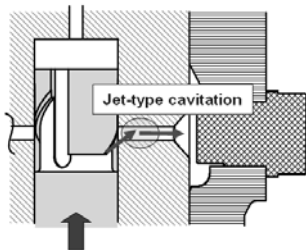


(a) Schematic of end of fuel delivery

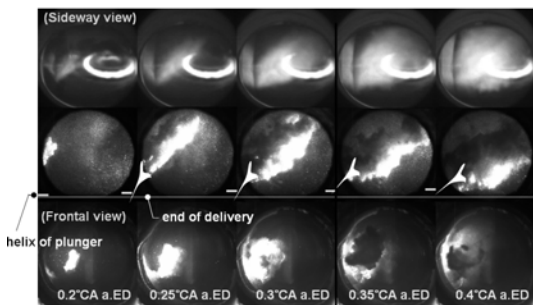


(b) Fountain-like cavitation before end of delivery

**Figure 9:** Sequential images during end of fuel delivery (ED: End of Delivery)



(a) Schematic of the fuel spill process



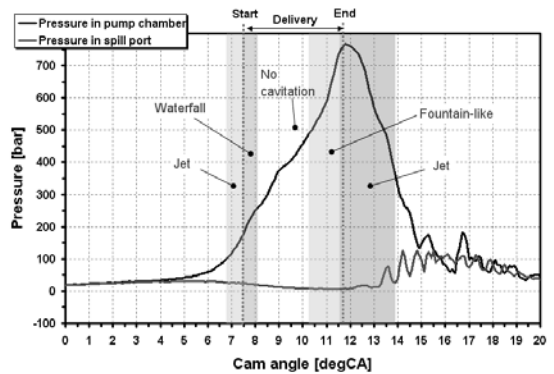
(b) Jet-type cavitation during the fuel spill process

**Figure 10:** Sequential images during the fuel spill process (ED: End of Delivery)

리는 개도에 따라 제트 유동의 중심이 플런저의 벽면에서 스피어 포트를 향하여 변하는 것이 목격된다. 이때 발생된 제트 타입의 캐비테이션은 스피어 포트의 벽면에서 반사되어 압력의 맥동을 가져오게 되고, 이후 캠 각도 2도 정도의 기간 동안 지속되다가 이후 가시창에서 사라진다.

3.2 캐비테이션 손상 원인

Figure 11은 연료 분사 펌프의 고압이 형성되는 챔버 내의 압축 압력과 저압 영역인 스피어 포트 내의 압력 변화를 캠 각도에 대해 측정된 데이터이다. 본 압력 선도에 앞서 언급한 네 가지 형태의 캐비테이션 현상이 목격되는 구간을 도시하였다.



**Figure 11:** Pressure characteristics in pump chamber and spill port

연료 압송 초기에 발생하는 제트와 폭포 형태의 캐비테이션 유동은 압축 챔버와 스피어 포트 내의 압력 차가 그다지 크지 않은 구간에서 발생하므로 상대적으로 강도가 크지 않고, 손상에 끼치는 영향도 미미할 것으로 판단된다. 이에 반해, 연료 스피어 직전의 분수 형태로 방출되는 캐비티들은 상대적으로 커진 압력 차이로 인하여 많은 양이 발생되며, 낮은 전과 속도로 플런저 인근의 배럴 벽면의 상부에 머물게 된다. 이후 스피어 포트가 열리는 순간 발생하는 강도 및 유동 속도가 큰 강력한 제트 형태의 캐비테이션 유동은 스피어 포트 벽면에 직접 충돌하여 붕괴하고 이를 통해 디플렉터의 직접적인 침식 손상이 발생된다. 또한 이때 발생하는 포트 내의 급격한 압

력 상승은 추가적으로 플런저 주변에 머물러 있던 캐비티들을 붕괴시키게 되고, 이로 인해 플런저 벽면에서의 침식 손상이 야기되는 것으로 판단된다. Figure 12에 나타나 있는 주요 부품의 손상 위치는 가시화를 통한 앞선 분석 결과와 잘 일치하고 있어, 캐비테이션에 의한 침식 손상에 대한 이러한 가정을 뒷받침하고 있다.

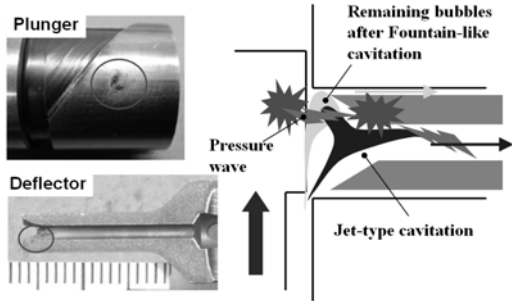


Figure 12: Schematic of the damage caused by cavitation

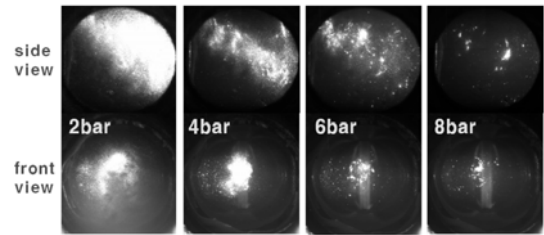
### 3.3 연료 공급 압력의 영향

캐비테이션 발생을 억제하기 위한 근본적인 방법 중 하나는 스피ل 포트 내의 압력을 중기압 이하로 떨어지지 않도록 유지하는 것이다. 이를 위해 Figure 13은 연료 공급 압력을 각각 2bar, 4bar, 6bar, 8bar로 각각 변화시켜 가면서 압축 초기, 압축 말기, 스피ل 과정에서 얻어진 영상을 관찰한 결과이다.

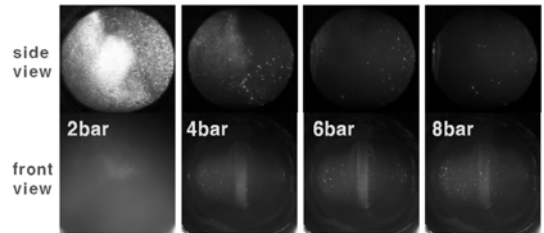
연료 공급 압력 증가에 따라 Figure 13(a)의 압축 초기와 Figure 13(b)와 같이 연료의 스피ل 직전에 발생하는 캐비티 양은 눈에 띄게 감소되는 것이 목격된다. 특히 스피ل 직전에 발생하는 분수 형태 캐비테이션의 양적 감소로 플런저 표면에서 발생하는 손상은 상당히 저감될 것으로 보인다. 하지만, 이러한 공급 압력의 상승은 스피ل 과정에서 발생하는 제트 형태의 캐비테이션 강도에는 크게 영향을 끼치지 않아 배럴 벽면의 손상 저감에는 크게 도움이 되지 못할 것으로 판단된다.

[3] 등은 이와 관련하여 간극 사이의 누설로 발생되는 캐비테이션의 경우 스피ل 포트의 압력을 6~8bar 정도로 증가할 경우 억제가 가능하나, 스피ل 과정의 제트 형태의 캐비테이션의 발생을 막기

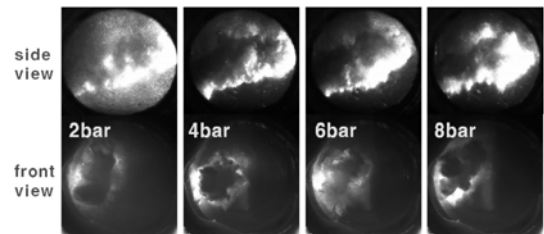
위해서는 300bar 이상의 압력이 요구된다고 발표한 바 있다. 하지만, 이러한 높은 공급 압력의 실제 적용에는 복잡한 연료 공급 시스템이 추가적으로 요구되어 가격 상승과 압력파에 의한 추가적인 문제를 야기할 수 있으므로 보다 근본적인 대책에 대한 연구가 요구된다.



(a) Jet-type cavitation before start of delivery



(b) Fountain-like cavitation before end of delivery



(c) Jet-type cavitation after end of delivery

Figure 13: Comparison with the variation of fuel supply pressure

본 연구에서는 연료 펌프 내부에서 일어나는 캐비테이션의 기초 현상을 이해하고 이로 인한 주요 부품의 손상 원인을 분석하였다. 향후 연료 펌프에서 발생하는 캐비테이션에 의한 손상에 대한 유용한 저감 방법을 강구하기 위해, 본 연구 결과는 캐비테이션 현상의 전산 유체 해석의 정확성을 높이

고 평가하는 데 지속적으로 활용될 예정이다.

#### 4. 결 론

중속 디젤 엔진용 연료 분사 펌프의 캐비테이션 손상에 대한 정확한 원인을 규명하기 위해, 연료 분사 펌프의 연료 공급 및 스피ل 과정의 캐비테이션 현상에 대한 유동 가시화를 실시하였다. 본 연구로부터 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 연료의 압송 과정 동안에 네 가지로 구별되는 캐비테이션 현상이 목격되며, 이는 플런저의 위치에 따른 스피ل 포트의 개도와 연관된다.

- 침식 손상의 주요 원인은 스피ل 과정의 직전과 직후에서 각각 발생하는 분수 형태와 제트 형태의 캐비테이션으로, 압축 챔버와 스피ل 포트 내의 압력차가 가장 큰 상황에서 발생한다.

- 스피ل 포트 내 분위기 압력의 증가는 스피ل 직전에 발생하는 캐비티의 양적인 감소를 가져오며, 이는 플런저 벽면의 손상 저감에 도움을 준다. 하지만, 배럴 벽면 손상의 주요 원인인 스피ل 과정의 제트 형태 캐비테이션은 포트 내부 압력의 증가에 의한 저감을 기대하기 어려우며, 향후 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

#### 참고문헌

[1] Frederick G. Hammit, Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, Mcgraw-Hill, 1980

[2] M. Miyake, T. Biwa, S. Mizuhara, M. Takahashi, "Experiences with cavitation problems on MITSUI diesel engines", Proceedings of the 16th International Congress on Combustion Engines, Diesel Engine Papers, vol. 2, Oslo, NO, Jun3-7, 1985, Congress International des Machines a Combustion (CIMAC), 1985

[3] Horst Rulfs and Matthias Wöhnke, "Cavitation Phenomena in Fuel Injection Pumps", Proceedings of the 22nd International Congress on Combustion

Engines, Diesel Engine Papers, vol. 4, pp 1093-1102, Copenhagen, DK, May 18-21, 1998, Congress International des Machines a Combustion (CIMAC), 1998

[5] P.Herzog and TH. Stipek, "Studies on Heavy Fuel Operated Injection pumps", Proceedings of the 14th International Congress on Combustion Engines, Diesel Engines, pp 1-15, Helsinki, FI, 1981, Congress International des Machines a Combustion (CIMAC), 1981

#### 저 자 소 개



##### 류승협(柳昇協)

1999년 경북대학교 기계공학과 (공학사), 2001년 경북대학교 기계공학과(공학석사), 2001년 - 현재 (주)현대중공업 제품개발연구소 시험평가연구실(선임연구원), 관심분야: 내연기관, 연소, 유동가시화



##### 김동훈(金東勳)

1995년 한국항공대학교 기계설계학과 (공학사), 1997년 한국항공대학교 기계설계학과 (공학석사), 1997년- 현재 (주)현대중공업 제품개발연구소 엔진연구실(책임연구원), 관심분야: 내연기관, 연소, 연료분사시스템, 전자제어



##### 김병석(金秉洙)

1998년 부산대학교 기계공학과 (공학사), 2000년 부산대학교 기계공학과(공학석사), 2000년 - 현재 (주)현대중공업 제품개발연구소 엔진연구실(선임연구원), 관심분야: 내연기관, 엔진 성능개선



##### 박태형(朴泰炯)

2004년 한국항공대학교 항공기계공학과(공학사), 2008년 서울대학교 항공공학(공학석사), 2008년 - 현재 (주)현대중공업 제품개발연구소 엔진연구실(연구원), 관심분야: 내연기관, 연료분사시스템, 유압시스템 해석