

〈 논문 〉

극초고압 디젤분무의 충돌면 온도거동에 관한 연구

정 대 용[†] · 이 종 태^{*}
(2004년 11월 30일 접수, 2005년 1월 13일 심사완료)

A Study on the Temperature Behavior on Impinging Plate of Diesel Spray with Ultra High Pressure

Dae Yong Jeong and Jong Tai Lee

Key Words: Instantaneous Temperature Probe(순간온도 프로브), Impinging Spray Characteristics(충돌분무특성), Impinging Plate(충돌면), Temperature Drop(온도 진폭)

Abstract

The instantaneous temperature behaviors on impinging plate in case of ultra high pressure have been measured and analyzed by using the instantaneous temperature probe and ultra high pressure injection equipment. The temperature drop was largest at P1 which is center of impinging spray and decreased with propagation of spray to the radius direction. The temperature drop was bigger in case of higher temperature of impinging plate. The temperature drop decreased with increase of injection pressure. But decreasing rate of temperature drop was slight over 2,500 bars. Therefore, it was predicted that the fuel evaporation versus the increase of injection pressure was maximum at around 2,500 bars.

1. 서 론

극초고압 충돌분무시 고온의 벽면과 연료의 충돌이 일어날 경우 1차 분열에 의해 기화된 연료를 제외한 액적들이 벽면에 충돌하여 벽면과의 열전달이 발생한다.^(1,2) 이 때 열전달은 분무입경, 충돌전의 기화량과 벽면에 흡착되는 연료 등에 의해 좌우되므로 극초고압 충돌분무 벽면의 순간온도 거동을 파악하면 극초고압화에 따른 충돌분무시 연료액적의 미립화 정도, 기화정도 및 벽면에 흡착되는 정도를 간접적으로 예측이 가능하다고 생각된다.

본 연구실에서는 극초고압영역에서 디젤충돌분무의 분무거동에 대한 해석을 수행한 바가 있다.

상기의 해석으로부터 분사압력 2,500bars를 전후로 하여 충돌분무특성의 향상율이 최대가 되는 것을 제시한 바가 있다.⁽³⁾

극초고압 충돌분무의 향상율이 최대가 되는 적정분사압력을 명확히 파악하기 위해서는 충돌분무시 분무와 벽면과의 상호작용에 대한 특성과 벽면 또는 피스톤에서의 열전달 현상에 대한 규명 및 성능에 영향을 미치는 연료의 기화정도에 대한 규명이 요구된다. 그러나 현재까지 분사압력이 극초고압인 경우 피스톤 상부에서의 열전달 현상 및 충돌 시 고온벽면에서의 순간온도거동에 대한 해석은 이루어지지 않은 상태이다.

따라서 본 연구에서는 3,000bars 이상의 분사압력을 형성할 수 있는 극초고압 분사장치를 이용하여 극초고압분사에 따른 충돌벽면의 온도거동의 해석을 통하여 연료입자의 미립화 및 연료의 기화량 정도를 간접적으로 예측하여 분무특성 향상이 최대가 되는 극초고압 충돌분무의 적정분사압력을 명확히 하고자 한다.

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 기계공학부

E-mail : dyjeong@mail.skku.edu

TEL : (031)290-7472 FAX : (031)290-5848

^{*} 회원, 성균관대학교 기계공학부

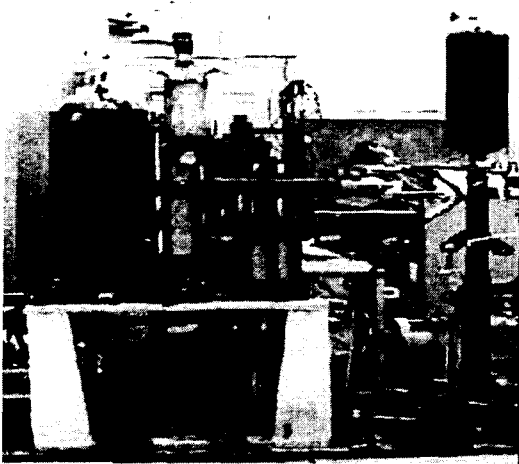


Fig. 1 The photograph of modified UHPIE

2. 실험장치 및 방법

2.1 극초고압분사장치

극초고압 단발분사시스템의 실물사진을 Fig. 1에 나타낸다.

극초고압 분사장치는 크게 플런저에 공급되는 연료를 플런저펌프내로 압송하기 위한 연료압송장치부, 압송된 연료를 플런저 펌프내에서 가압하는 가압장치부, 가압장치부의 플런저 구동실린더 움직임을 단속하는 걸림장치부, 작동된 플런저 구동실린더를 원상태로 복귀시키는 복귀장치부 및 연료분사 인젝터로 구성된다.

극초고압 분사장치의 작동은 다음과 같다.

디젤 연료는 연료탱크로부터 플런저 펌프내로 압송된다. 압송된 디젤 연료는 고압의 작동유에 의해 구동되는 플런저 구동용 유압실린더의 움직임으로 플런저 펌프 내에서 압축된다. 압축된 고압의 디젤 연료는 연료 인젝터의 니들 밸브를 통해 단발 분사된다. 작동이 완료된 플런저 구동실린더는 유압펌프로 작동되는 복귀실린더에 의해 복귀된다.

2.2 충돌판 벽표면의 순간온도 측정장치

2.2.1 박막형 순간온도 프로브

Fig. 2는 본 연구에서 제작한 박막형 순간온도 프로브의 개략이다. 박막형 순간온도 프로브의 형상은 지름 3mm의 원통형이다. 프로브의 표면에는 연소실 벽표면의 순간온도를 측정하기 위한

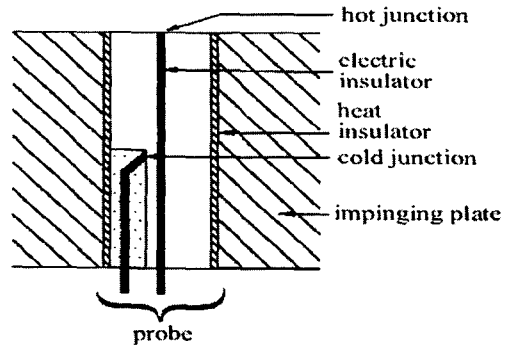


Fig. 2 Thin-film temperature probe to measure instantaneous wall-surface temperature of impinging plate

열접점(hot junction)이 구성되어 있다.

디젤 고압분사의 경우 분사시간이 매우 짧으므로, 충돌분무에 의한 충돌판 벽표면의 온도진폭 및 온도진폭 기간은 크지 않으리라 생각된다. 따라서 충돌분무시 분무액적의 충돌 및 기화에 의한 벽표면의 온도변화를 상세히 파악하기 위해서는 열적감응도가 뛰어나고 측정오차가 작은 것이 바람직하다.

열접점의 온도를 두 소선으로 측정하면, 열적 감응도가 저하되고 절연층의 두께 증가에 의한 측정오차가 수반된다. 따라서 프로브 표면에 하나의 소선을 삽입하여, 이 소선과 프로브 모재로 열접점을 구성하였다. 그리고 기준온도를 알기 위해 프로브의 열접점에서 수직방향으로 임의의 깊이 떨어진 위치에 냉접점(cold junction)을 구성하였다. 벽표면에서 임의의 깊이 떨어진 냉접점의 온도는 정상상태의 온도이므로 종류가 다른 두 소선으로부터 측정되는 기전력으로 온도를 직접 측정한다. 벽표면의 순간온도는 두 접점의 온도차에 의한 기전력과 냉접점의 기준온도의 합으로 측정한다. 박막형 순간온도 프로브는 모재의 재질, 소선의 열적 물성치, 직경과 박막 두께 등의 차이에 따라 측정결과에 오차가 생긴다. 프로브의 소선과 모재의 재질 및 크기, 박막 두께 및 박막도체의 재료는 응답성, 내구성을 고려하여 제작하였다.

2.2.2 순간온도 프로브의 삽입위치와 삽입법

고온 충돌판에 삽입한 순간온도 프로브의 삽입 위치를 Fig. 3에 나타낸다. 삽입위치는 분무액적

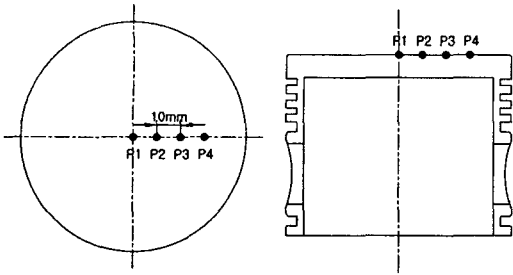


Fig. 3 Measuring points of instantaneous wall-surface temperature

의 충돌시 벽표면의 온도분포를 전반적으로 파악할 수 있는 위치로 선정한다. 또한 전술한 바와 같이 분무액적의 양상이 거의 대칭이므로 프로브를 분무중심에서 10mm 간격으로 4지점에 삽입한다. 고온 충돌판에 박막형 순간온도 프로브를 삽입하는 경우의 고려사항은 다음과 같다. (1) 순간온도 프로브의 삽입시 고온 충돌판의 표면에 수직이 되고, 충돌판 표면과 단차가 없도록 한다. (2) 프로브의 접촉은 열전도율이 작고, 내수성 및 내열성이 우수한 polyamide 접착제를 사용한다. (3) 충돌판 벽면과 프로브 사이의 단열층 두께는 약 0.05 mm로 한다.

2.2.3 박막형 순간온도 프로브의 검정

출력되는 기전력을 온도로 환산하기 위하여 제작한 순간온도 프로브를 검정하였다. Fig. 4에 열접점 및 냉접점에 대한 온도와 기전력의 검정선도를 나타낸다.

기준온도인 냉접점부의 검정은 프로브와 표준온도계를 함께 전기로에 넣은 후, 표준온도계의 온도와 프로브에서 출력되는 기전력을 동시에 읽어 검정선도를 작성하여 냉접점의 온도환산계수를 얻었다. 열접점부의 검정은 충돌판의 재료를 절단하여 제작한 순간온도 프로브 검정용 환봉의 양단의 온도차를 변화시켜 가면서 기전력을 측정하여 열접점의 온도환산계수를 얻었다.

상기 방법으로 각각의 순간온도 프로브에 대해 모두 검정하였다. 검정 결과, 열접점과 냉접점의 기전력대 온도의 환산계수는 각각 40.7°C/mV와 23.6°C/mV로 모든 프로브가 거의 동일한 값이었다.

2.3 실험방법

충돌판 설계시 가장 중요한 것은 충돌판 전체

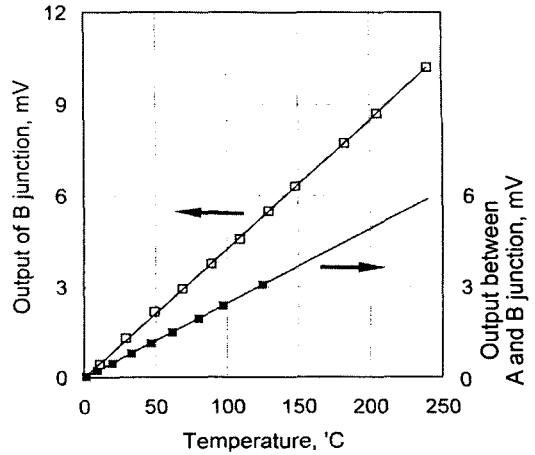


Fig. 4 Calibration curve of hot junction and cold junction

를 등온도분포화 하는 것이다. 일반적으로 사용되는 plate heater의 경우 접촉부의 상태에 따라 국부적인 온도차가 발생되며, 특히 순간온도 프로브에서 발생하는 수 mV 정도의 출력신호에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 본 실험에서는 오일 가열장치로 충돌판을 가열하였다. 충돌판의 가열 정도는 오일 가열장치 내에 설치한 표준온도계와 충돌판에 설치된 순간온도 프로브의 열접점과 냉접점의 온도로 파악하였다.

박막형 순간온도 프로브로부터 측정된 온도값은 미소 전압이므로 amplifier를 제작하여 증폭시켰다. 측정시에 수반되는 고주파수의 간섭파(noise)는 콘덴서에 의해 제거하였다. 간섭파 제거에 결정적인 영향을 주는 차단 주파수는 콘덴서의 용량에 영향을 받는다. 여러 용량의 콘덴서에 대한 간섭파의 제거효과를 비교한 바, 0.001μF 용량의 콘덴서가 온도파형에 영향을 주지 않고 간섭파의 제거에 유효한 것으로 확인되었다.

순간온도 프로브의 출력은 데이터 레코드와 A/D 변환기가 내장되어 있는 컴퓨터에 각각 저장된 후 해석하였다. 순간온도 측정용 A/D 변환기는 12bit의 direct memory 방식이며, 최대 sampling 속도는 250kHz 이다.

각각에 대한 실험조건은 다음과 같다. 충돌판의 가열온도는 발화운전하의 피스톤 벽표면 온도의 측정결과를 바탕으로 120°C, 150°C에 대해 수행하였다. 분사압력은 1,200 bars에서 3,500 bars

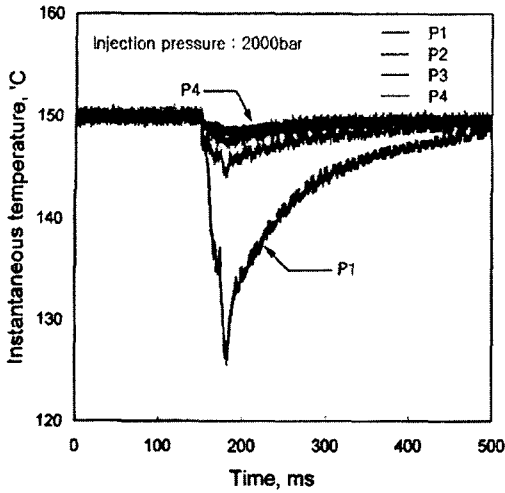


Fig. 5 Instantaneous wall-surface temperature history at each measuring point with the time lapse

까지 단계적으로 변화시켜가면서 수행하였다. 각 조건에서 인젝터 선단에서 충돌판까지의 거리는 15mm, 충돌각도는 0°로 설정하였다.

3. 극초고압분무의 고온벽표면 충돌 특성

3.1 측정위치에 따른 충돌판 벽표면 순간온도의 거동 및 분포

Fig. 5는 디젤분무의 충돌판에 충돌시 벽표면 순간온도의 거동을 나타낸 것이다. 여기서, 분사압력은 2,000 bars이며, 충돌판 온도는 150°C이다.

충돌판의 벽표면 온도는 분무가 판에 충돌하면서 급격히 감소하여 최소치를 이룬 후 완만히 증가하는 경향을 나타낸다. 온도하강지점은 니들리프트에 의한 분무 개시점 즉, 분무 충돌시와 일치하며 온도의 최대하락지점은 분사종료시기와 대체로 일치한다. 분무종료 이후 온도가 완만히 상승하는 것은 남아있는 분무의 일부가 충돌판에 흡착되어 증발되기 때문이다.

각 측정위치에 따른 충돌판의 벽표면 순간온도는 분무 중앙에 위치한 P1 지점의 경우 충돌판의 온도에서 연료분사가 끝나는 시점까지 감소하여 큰 온도진폭을 보이고 있으나 다른 3 지점의 온도진폭은 다소 작은 것을 나타내고 있다. 이는 분무중앙에 위치한 P1 지점은 분사기간 동안 계속해서 저온의 연료액적의 유입이 있기 때문이

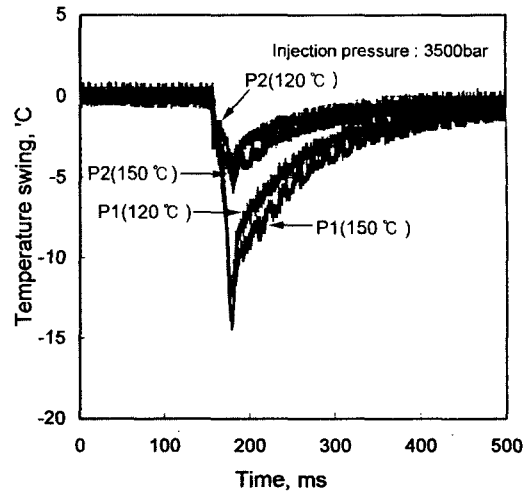


Fig. 6 Temperature history at different wall-surface temperature with the time lapse

다. 이에 반해 P3 지점은 충돌분무의 가시화결과에서 밝힌 바와 같이 P1 지점에 유입된 연료분무가 반경방향으로 발달함에 따라 가열된 연료액적과 접촉하게 된다.⁽³⁾ 따라서 P1 지점을 지나면서 어느 정도 가열된 연료액적과 접촉하게 되며, 특히 중심부에서 멀어질수록 접촉하는 연료액적의 양이 중심부의 비해 현저히 작아지기 때문이다. 측정위치에 따른 온도 진폭은 P1인 경우 약 23°C 정도로 크게 떨어지는 것을 보였고, P2인 경우 7°C, P3, P4인 경우는 온도진폭이 거의 유사하며 약 2~3°C로 미약함을 나타내고 있다.

3.2 충돌판 온도변화에 따른 벽표면 순간 온도의 거동 및 분포

Fig. 6은 충돌분무의 충돌판 벽표면 순간온도진폭을 충돌판의 온도에 대해 비교한 것이다. 여기서 분사압력은 3,500 bars, 충돌판의 온도는 각각 120°C, 150°C이며, 측정지점은 P1과 P2 지점이다.

전술한 바와 같이 120°C와 150°C의 충돌판 모두 벽표면 순간온도는 분무의 충돌에 의해 분무종료 시까지 감소한 후 완만히 증가함을 나타낸다. 하지만 온도진폭은 고온 충돌판인 경우가 큰 값을 나타낸다. 디젤분무가 충돌판 표면과 충돌할 때 분무와 충돌판 표면사이에서는 대류 및 전도열전달이 발생한다. 대류 및 전도 열전달량은 식 (1)에서 보는 것처럼 충돌판 표면온도와 연료와의 온도차가 크면 크게 나타난다.

$$Q_{conduction} = k(T_{plate} - T_{fuel}) \quad (1)$$

여기서, K : 전도열전달계수, T_p : 충돌판 표면온도, T_f : 연료 온도

그러므로 분무액적과 충돌판 표면과의 온도차가 큰 고온 충돌판인 경우에 온도 진폭이 크게 나타나는 것으로 판단된다. 충돌면 온도가 150°C 일 때 최대 온도 진폭은 P1 지점의 경우 약 14.5°C로 120°C의 충돌판의 경우에 비해 2°C정도 크다. P2 지점은 P1 지점과 경향은 동일하나 분무 중심부에서의 거리차로 인해 하강치는 P1 지점의 1/3 정도이다.

이처럼 충돌판의 온도가 높은 경우 온도진폭이 크게 나타나는 것은 분사된 연료로의 열전달이 크기 때문인 것으로 판단되며 충돌판이 고온인 경우 열전달량의 증가에 의한 연료의 기화량이 증가되는 것을 예측할 수 있다.

3.3 분사압력에 의한 벽표면 순간온도의 거동 및 분포

Fig. 7은 디젤분무가 충돌판에 충돌시 벽표면 순간온도의 거동을 분사압력의 변화에 대해 나타낸 것이다. 여기서 충돌판의 온도는 150°C이며, 측정지점은 분무 중심부인 P1 지점이다.

분사압력을 극초고압화 하는데 따른 충돌판의 벽표면 순간온도거동은 정성적으로 동일한 경향을 나타낸다. 그러나 분사압력을 극초고압화함에

따라 온도진폭은 감소하는 경향이다. 전술한 바와 같이 디젤분무가 충돌판 표면에 충돌할 때 분무와 충돌판 표면 사이에서의 지배적인 열전달은 대류와 전도이다. 일반적으로 분사압력이 극초고압화함에 따라 대류는 분무액적 주변의 유동 및 분무의 속도 증가로 활발해진다. 그럼에도 불구하고 온도진폭은 극초고압화함에 따라 감소하는 경향을 보이고 있다. 이것은 분사압력을 극초고압화함에 따라 액적의 운동에너지의 증가 및 연료액적의 미립화로 인해 충돌판 도착 전에 증발되는 액적의 양이 증가하여 실제 벽면에 충돌하여 흡착되는 연료액적의 양이 작아지기 때문으로 판단된다. 그리고 분사압력을 극초고압화함에 따라 충돌 후 반경반향 및 충돌판으로부터의 수직 방향으로의 분무발달이 활발해져 분무가 분산되므로 측정지점에서의 액적량이 감소하기 때문이라 생각된다.

분사압력 1,200 bars 에서의 온도진폭은 약 28°C 정도를 나타내며, 분사압력 2,500 bars인 경우 약 16°C, 3,500 bars 인 경우 약 14.5°C 정도를 나타내었다. 이는 각각 약 43%, 48%를 나타내는 것이며 분사압력 2,500 bars 이후 5% 정도의 온도진폭 감소를 나타내는 것이다. 그러므로 분사압력 2,500 bars 이후의 분사압력 증가에 따른 온도진폭의 감소는 그리 크지 않음을 나타낸다.

상기의 분사압력 극초고압화에 따른 온도 진폭을 상세히 파악하고자 분사압력 변화에 따른 온

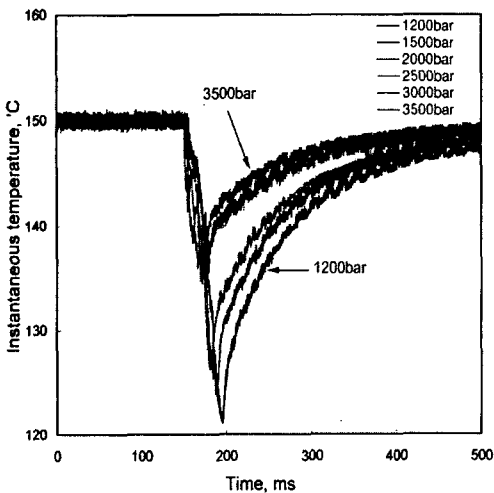


Fig. 7 Instantaneous wall-surface temperature history at each injection pressure with the time lapse

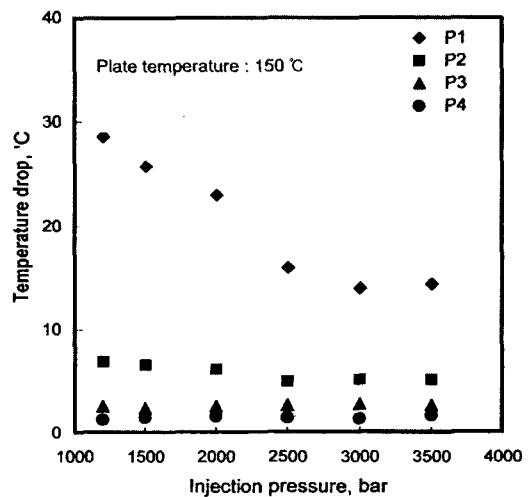


Fig. 8 Instantaneous wall-surface temperature drop as a function of injection pressure

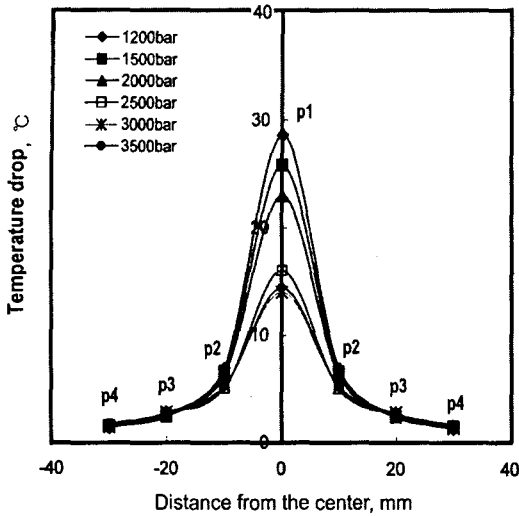


Fig. 9 Wall-surface temperature drop of impinging plate as a function of distance

도진폭을 Fig. 8에 나타낸다. 여기서 충돌판의 온도는 150°C이다.

전술한 바와 같이 분무 중심인 P1지점의 온도진폭은 분사압력이 극초고압화함에 따라 급격히 감소하다가 분사압력 2,500 bars 이상의 극초고압 분사시에는 온도진폭의 감소율이 작아지는 것을 나타낸다. P2 지점의 경우도 P1 지점과 유사한 경향이나 온도진폭 및 그 감소율은 현저히 작은 것을 보인다. P3 지점 및 P4 지점의 경우는 온도진폭이 거의 일정하거나, 오히려 약간 증가하는 경향이다. 이 지점은 가시화 결과에서 보는 바와 같이 인젝터로부터 직접적인 분무유입이 없고, 분무 충돌시 반경방향으로의 발달에 의해 충돌분무와 접촉하는 지점이다.⁽³⁾ 따라서 분사압력을 극초고압화 함에 따라 충돌분무의 반경방향으로의 발달이 활발해지고 분무속도 또한 크기 때문으로 볼 수 있다.

상기의 분사압력변화 및 위치에 따른 온도진폭을 종합적으로 파악하고자 분사압력 및 측정위치에 따른 온도진폭을 Fig. 9에 나타낸다. 여기서, 충돌판의 온도는 150°C이며, 충돌분무가 대칭이라고 가정하고 표시한 것이다.

전술한 바와 같이 모든 분사압력에서 분무 중심부에서 멀어질수록 지수함수적으로 급격히 감소하는 경향을 나타낸다. 분사압력 변화에 따른 온도진폭은 분무 중심부에서 현저하게 크며, 분무 중심부로부터 10 mm 떨어진 지점 이후에서는 약

간 차이를 나타낸다. 특히 인젝터로부터 분무의 직접적인 유입이 없는 P3, P4 지점의 경우는, 분사압력이 고압화함에 따른 충돌분무의 반경방향 발달 및 충돌분무의 속도 증가로 미세하게 증가함을 나타낸다.

P1 지점의 온도진폭은 분사압력 3,000bars인 경우 약 14°C로 분사압력 1,200bars에 비해 약 1/2 정도의 온도진폭만을 나타낸다.

상기의 결과에서 분사압력 2,500bars 이상의 극초고압영역에서는 충돌판 표면의 온도진폭 감소율은 급격히 작아져 온도진폭은 큰 차이가 없음을 보임을 확인할 수 있다. 그러므로 극초고압 디젤 충돌분무시 분사압력 2,500bars 정도에서 연료의 기화량이 극대화 될 것을 예측할 수 있었다.

4. 결 론

극초고압 분사장치와 순간온도 프루브를 이용하여 극초고압 충돌분무시의 충돌벽면에서의 온도거동을 해석한 결과는 다음과 같다.

(1) 측정위치에 따른 충돌판의 벽표면 순간온도는 분무가 직접적으로 유입되는 P1 지점의 경우 23°C의 큰 온도진폭을 나타내었으나 반경방향으로 진행할수록 온도진폭은 7°C와 2°C로 온도진폭이 미약함을 알 수 있었다.

(2) 충돌판 표면의 온도변화에 따른 온도진폭은 표면 온도가 높은 경우 충돌판에서 분무액적으로 열전달량의 증가로 인해 고온 충돌판인 경우에 온도진폭이 약 14% 정도 크게 나타났으며 충돌면이 고온인 경우 연료의 기화량이 증가하는 것을 예측할 수 있었다.

(3) 분사압력이 1,200bars에서 2,500bars로 증가하는 경우 약 43% 정도 온도진폭의 감소를 나타내었으나 분사압력 2,500bars 이후에는 약 5%로 미약한 것을 나타내었으며 분사압력 2,500 bars 이후에서의 온도진폭은 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

(4) 상기의 충돌판 표면의 온도거동 해석으로부터 분사압력이 증가함에 따라 연료의 기화량이 증가함을 예측할 수 있었으며, 분사압력 2,500 bars 영역에서 최대가 될 것을 예측할 수 있었다. 그러므로 극초고압 디젤충돌분무의 적정분사압력은 분무특성해석과 마찬가지로 분사압력 2,500 bars 영역에 존재하는 것을 확인할 수 있었다.

후기

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구 (R01-2001-000-00386-0(2003) 및 BK21(2004) 지원에 의하여 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Enomoto, Yoshiteru, 1985, "Measurement of Heat-Flux and Heat Transfer Coefficient on Combustion Chamber Wall," *Journal of the Society of Automotive Japan*, Vol. 39, No. 11, pp. 1270~ 1278.
- (2) Choi, G. H., Choi, K. H., Lee, J. T., Song, Y. S., Ryu, Y. and Cho, J. W., 1997, "Analysis of Combustion Chamber Temperature and Heat Flux in a DOHC Engine," *SAE*, No. 970895, pp. 135~147.
- (3) Daeyong Jeong and Jongtai Lee, 2003, "An Anlysis of Impinging Spray Characteristics with Ultra High Pressure to Examine a Limit Pressure," *Spring Conference of KSAE*, Vol. 1, pp. 329~335.
- (4) Kato, T., Tsujimura, K., Shintani, M., Minami, T. and Yamaguchi, I., 1989, "Spray Characteristics and Combustion Improvement of a D. I. Diesel Engine with High-Pressure Fuel Injection." *SAE Paper* No. 890265.
- (5) Senda, J., Kanda, T., Kobayashi, M., Iwashita, S. and Fujimoto, H., 1994, "Modeling of Diesel Spray Impingement on a Flat Wall," *SAE NO.* 941894.
- (6) Shi-Wen Li, Shigeharu Kobori and Takeyuki Kamimoto, 1997, "Heat Transfer From Impinging Diesel Flames to the Combustion Wall," *SAE Trans.*, Vol. 106, pp. 1508~1521.
- (7) Suk Bum Moon and Ja Ye Koo, 1999, "Characteristics of a Diesel Spray Impinging on the Hot Plate," *SAE*, NO. 99370251.
- (8) Chang, J-C., 1993, "Diesel Spray Characteristics and Spray/Wall Heat Transfer," *Ph. D. Thesis*, University of London.
- (9) Daeyong Jeong and Jongtai Lee, 2003, "A Study on Combustion Characteristics of Diesel-water Emulsion with High Pressure Injection," *Trans. of the KSME(B)*, Vol. 27, No. 10, pp. 1435~1441.