

〈논 문〉 SAE NO. 953787

솔레노이드 구동 수소인젝터의 성능특성

Characteristics of Solenoid Actuated Hydrogen Injector

이 형 승,* 김 한 조,* 김 용 서**
H. S. Yi, H. J. Kim, E. S. Kim

ABSTRACT

The solenoid actuated hydrogen injector and the capacitive peak-hold type driving circuit were designed and made, and the hydrogen supply system for in-cylinder injection was constructed with these. The performance of the injector was investigated through measuring the pintle lift profiles and the injection quantities, and the performance of the hydrogen supply system was confirmed through the experiments at the single cylinder engine.

The injection quantity increased linearly as the duration of driving signal increased. At the single cylinder engine, the hydrogen injector was operated stably. The hydrogen flow rate of the injector with the peak-hold type driving circuit could be controlled precisely at high engine speed or low load condition only with the variation of signal duration.

주요기술용어 : solenoid(솔레노이드), peak-hold type(피크-홀드형), gas injector(가스 인젝터), hydrogen fueled engine(수소연료기관), in-cylinder injection(연소실내 분사), alternative fuel(대체연료)

1. 서 론

대체에너지로서 천연가스와 수소 등을 사용한 내연 기관에 관한 연구는 현재까지 다양하게 진행되어 왔으며, 수소의 경우 탄화수소나 일산화탄소와 같은 탄소화합물을 배출하지 않는 청정연

료로서 주목받고 있다¹⁾.

수소와 공기의 혼합기는 체적비로 4~75%에 해당하는 넓은 가연범위를 갖고 있어, 기관의 연료로 사용할 경우, 희박 연소가 가능하여 공기 흡입시 스로틀(throttle) 전개 상태로 운전이 가능하므로 스로틀 손실이 없으며, 화염 전파 속도가 빨라 급격 연소를 하므로 기관 운전시 사이클 변동이 적다. 그리고 자발화 온도가 858K로 가솔린(501~744K)보다 높아서 고압축비로 운전

* 정회원, 서울대학교 대학원 기계공학과

** 정회원, 서울대학교 기계공학과

이 가능하여 열효율을 증가시킬 수 있다^{2), 3)}.

초기의 수소 기관은 기화기 형식으로 수소를 공급하였고, 이후 흡기관에 분사하는 방식이 시도되었다. 이 방법을 사용할 경우 연료량의 정밀한 제어가 어렵고, 흡기관 내에 항상 수소가 잔류할 수 있으므로 역화가 발생하기 쉬워 안정된 운전이 힘들며, 수소와 공기가 섞인 채로 연소실 안에 공급되므로, 체적 효율이 감소하게 된다^{4), 5)}.

연소실내 분사 방식은 흡기관에 분사하지 않고, 공기가 흡입되고 흡기 밸브가 닫힌 후 직접 연소실 내에 분사하므로 역화가 발생하지 않고 체적 효율도 감소하지 않게 되나, 실용화하기 위해서는 연소실내 분사 방식 수소 인젝터의 개발이 선행되어야 한다⁶⁾.

연소실내 분사 수소 인젝터를 구동하는 방법은 크게 캠방식, 유압식, 솔레노이드식으로 나눌 수 있다. 캠방식은 기관 캠축의 구동력을 이용하여 인젝터를 구동하는 방식으로서 정확한 시기 제어가 가능한 반면, 분사량이나 분사시기 등의 변화가 매우 어려우며⁷⁾, 유압식은 기관에 설치된 펌프로부터 고압의 유압을 발생시켜 인젝터를 구동하는 방식으로 작동이 확실하고 구동력도 충분하나, 가솔린 기관을 사용하는 경우 별도의 분사 펌프를 설치하여야 하므로 구조가 복잡해지게 된다^{8), 9)}. 솔레노이드를 사용하는 방식은 분사 시작 시기 및 분사 지속 시간 등의 변화가 쉽지만, 구동 신호와 실제 구동 사이에 시간 지연이 존재하게 되는데 이를 최소화하는 것이 중요하다^{9), 10), 11), 12)}.

현재까지의 수소 인젝터에 관한 연구는 디젤 인젝터의 분사계를 이용하여 수소의 분사계를 구성한 예가 많으나^{10), 11)}, 디젤 인젝터의 경우 고압의 액체 연료를 작은 노즐 구멍을 통해 소량 분사하지만 수소 인젝터의 경우 수소가 기체이기 때문에 비체적이 커서 같은 공연비를 유지하기 위해서는 훨씬 많은 양이 분사되어야 하므로, 디젤 인젝터와는 근본적으로 다른 구조를 가져야 한다.

본 연구에서는 솔레노이드 구동 연소실내 분사 수소 인젝터와 구동 회로를 제작하여 여러 가지 인자를 변화시키며 솔레노이드 특성, 핀들의 양정 및 분사량을 알아보았다. 그리고 제작된 인젝

터를 단기통 기관에 장착한 후, 기관 실험을 통하여 인젝터와 구동 회로의 성능을 검토하였다.

2. 수소 인젝터와 구동 회로

2.1 수소 인젝터

Figure 1은 설계된 인젝터의 전체적인 조립도를 반단면도의 형태로 나타낸 것으로서, 전체의 치수는 높이 140mm, 최대 지름 60mm이다. 이의 외형은 기관 시험에 사용될 단기통 기관에 장착될 수 있도록 정해졌으며, 나사를 이용하여 실린더 헤드에 장착된다. Figure 2는 인젝터가 실험에 사용된 단기통 기관의 실린더 헤드에 장착되는 경우를 보여준다.

인젝터는 Lucas ledex사의 솔레노이드(model 3EF)로 구동되며, 솔레노이드의 직경은 33.3mm로서, 실린더 외부에 설치되어 기관에 장착하여 사용될 때 기관에서 방출되는 열의 영향을 가급

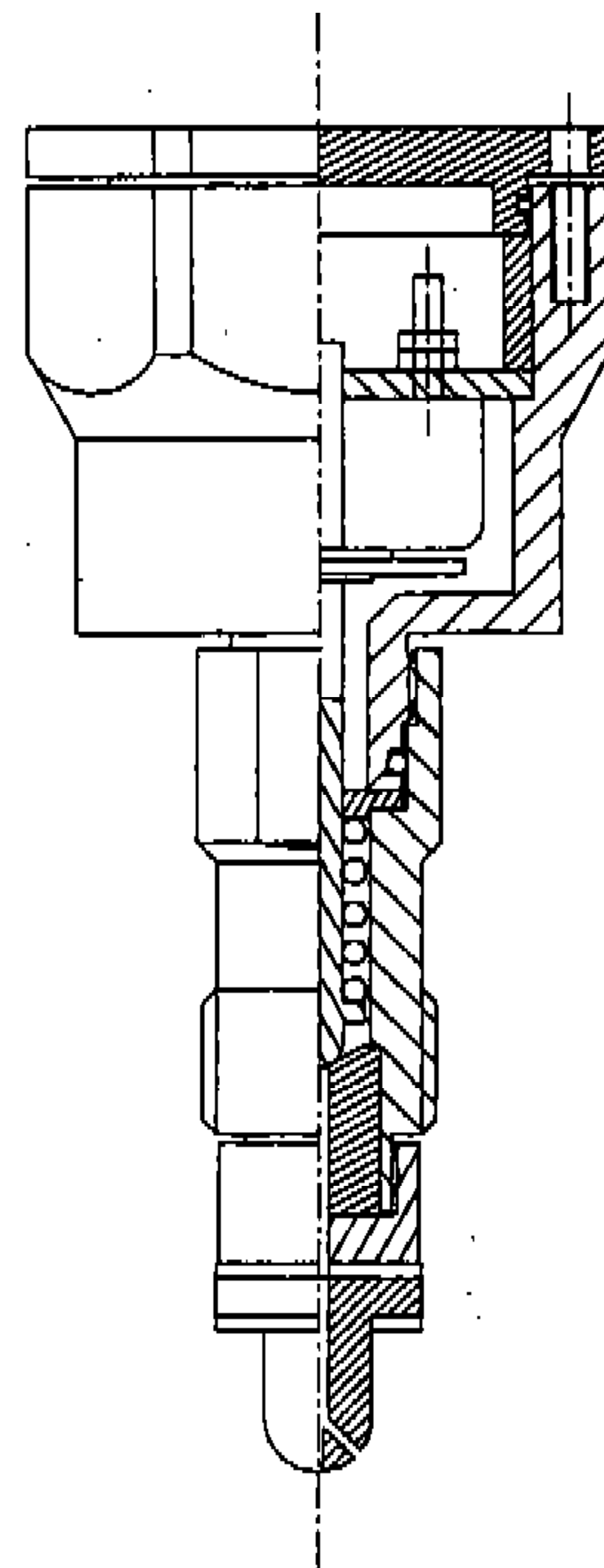


Fig.1 Sectional drawing of assembled hydrogen injector

적 덜 받도록 하였다. 또한 솔레노이드는 장시간 작동하게 되면 자체의 코일에서 발열을 하게 되고 온도가 높아지면 솔레노이드의 성능이 저하될 수 있으므로, 수소의 공급 경로가 솔레노이드를 통과하도록 하여, 공급되는 수소 기체에 의해 솔레노이드가 냉각될 수 있도록 하였다.

인젝터에서 가장 중요한 부분은 핀틀과 핀틀시트이며, 본 인젝터에는 핀틀과 시트사이의 접촉을 확실히 할 수 있도록 반구형의 핀틀을 사용하였다. 핀틀의 재질은 스테인레스강으로 강도와 내구성을 증대시켰으며, 핀틀시트는 120°의 각

을 지니는 원추형으로 설계하였다.

핀틀의 상승은 솔레노이드에 의해서 이루어지며, 하강시에는 스프링의 복원력에 의해서 핀틀이 제자리로 되돌아가게 된다. 스프링의 힘이 지나치게 크면 핀틀상승시의 지연시간이 길어지며, 지나치게 작으면 하강시의 지연시간이 길어지고 하강후에도 시트에 완전히 안착하지 못하고 진동을 할 수 있다.

강도를 필요로 하는 핀틀을 제외한 다른 부분은 모두 열처리된 듀랄루민으로 제작하였다. 800K에서 수중에 담금질한 뒤 상온에서 2~4일간 시효 경화한 듀랄루민은 0.2%C의 탄소강과 기계적 성질이 비슷하므로¹³⁾, 기계적 강도가 떨어지지 않으면서도 중량을 줄일 수 있으므로 듀랄루민을 사용하였다.

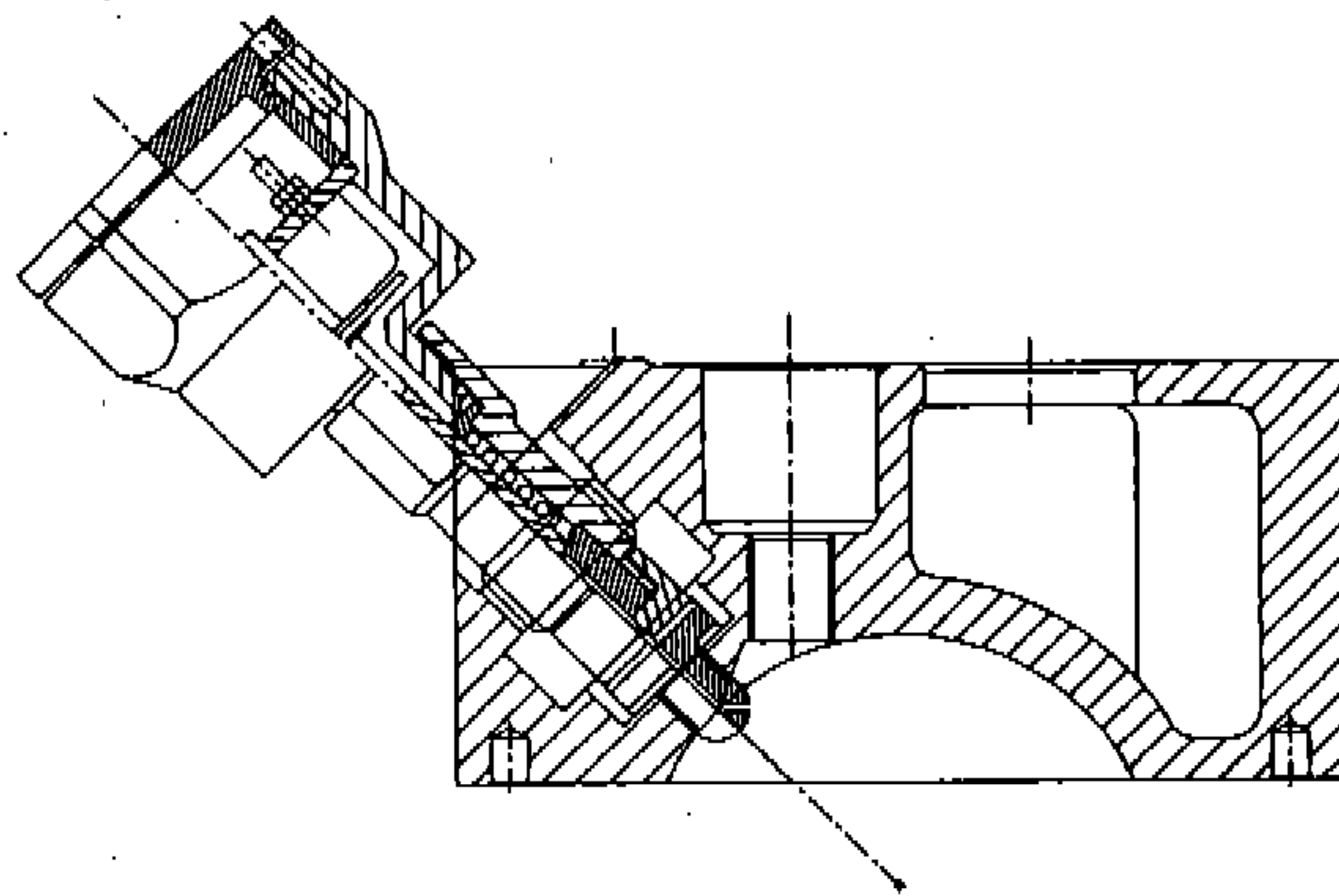


Fig.2 Hydrogen injector installed at cylinder head

2.2 수소 인젝터 구동회로

솔레노이드 구동 인젝터의 구동회로에는 새츄레이션(saturation)형과 피크-홀드(peak-hold)형이 있다. 일반적으로 새츄레이션형의 회로가 많이 사용되는데, 새츄레이션형의 회로에서는 솔레노이드 양단에 작동기간동안 일정한 전압을 인가하여 준다.

새츄레이션형의 구동회로는 Fig.3에서 보는

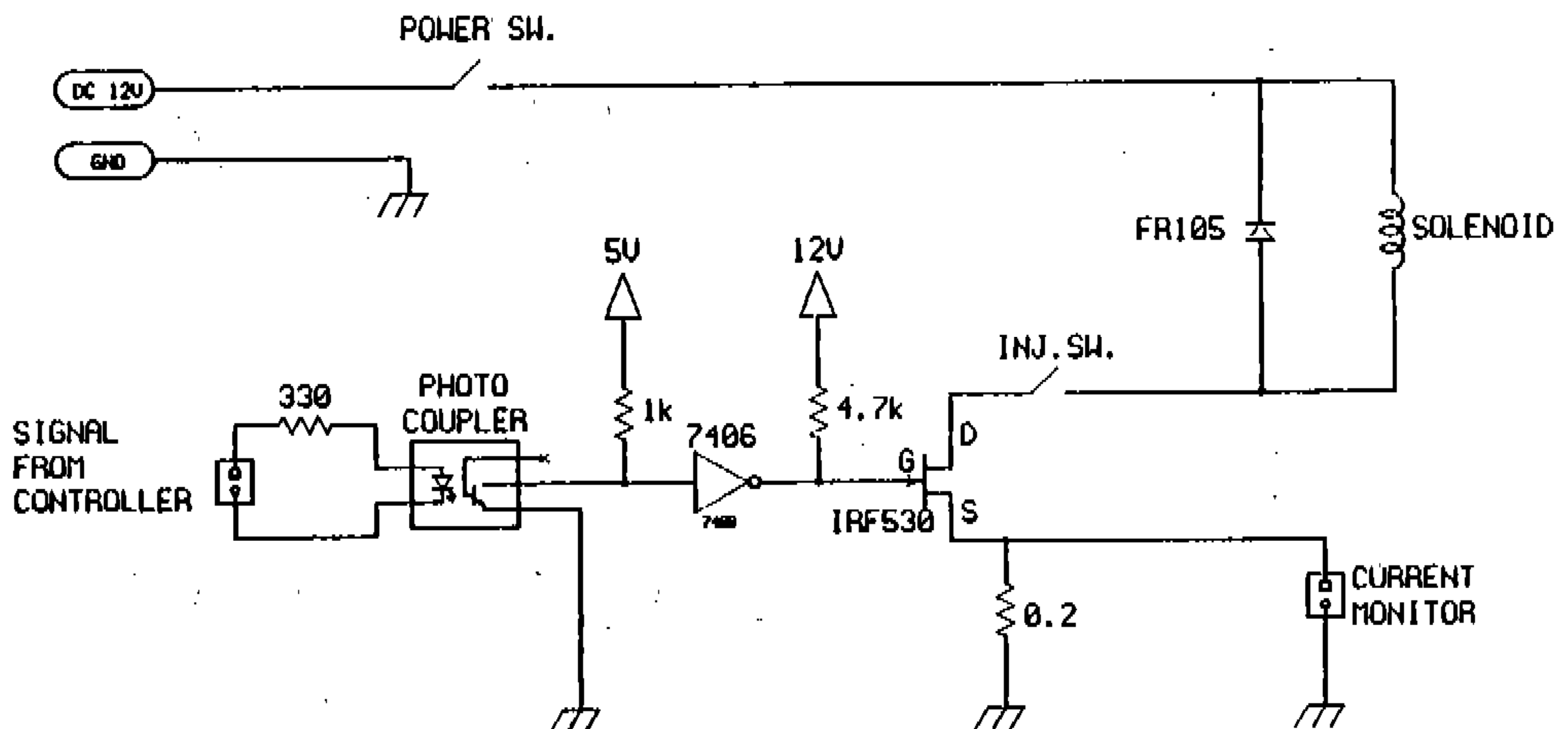


Fig.3 Circuit diagram of saturation type solenoid driving circuit

바와 같이, 회로의 구조가 간단하고 사용되는 회로 소자의 숫자도 적다는 장점이 있는 반면, 구동 신호가 인가되어 처음 전류가 투입되는 시점부터 솔레노이드 내의 코일과 코어(core)를 흐르는 자속이 포화되는 시점, 즉 최대 구동력이 발생하는 시점까지의 시간지연이 발생하게 된다.

솔레노이드를 구동하는 또 다른 방식으로는 피크-홀드형이 있는데 이 방식으로 제작한 회로의 회로도도 Fig.4와 같다. 피크-홀드형의 회로에서는 초기 작동 시간에는 비교적 큰 전압을 인가하여 많은 전류가 흐르도록 하여 솔레노이드의 구동력을 크게 해주며, 일단 솔레노이드 코어가 움직인 뒤에는 전압을 낮추어 흐르는 전류의 양을 줄이도록 하여 솔레노이드의 구동력을 필요한 정도로 유지하게 하면서 솔레노이드에 과부하가 걸리지 않도록 한다.

피크-홀드형은 새츄레이션형보다 복잡한 구조를 가지며 제어가 더 까다롭다는 단점이 있지만 구동부가 처음 운동하는데 필요한 큰 구동력과, 새츄레이션형의 경우에 발생하는 솔레노이드 코일에 자속이 포화되는 시점까지의 긴 시

간지연을 초기에 많은 전류를 흘려줌으로써 반응을 빠르게 하여 극복하고, 일단 코어가 움직여서 에어갭(airgap)이 작아지면 솔레노이드의 구동력이 커지므로 완전히 들린 이후에는 적은 전류를 흘려주어서 닫힐 때의 시간지연을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 연구에서 사용한 회로의 방식은 커패시터(capacitor)를 이용한 피크-홀드형⁹⁾으로, 다음과 같은 원리로 작동한다.

- (1) 솔레노이드가 작동하지 않는 동안 구동용 커패시터인 C1을 고압전원으로 전류 조절용 저항 R1을 통하여 충전시킨다.
- (2) 신호가 들어오면 포토커플러(photo coupler)내의 다이오드(diode)가 동작하면서 포토트랜지스터를 작동시켜 반전된 신호가 인버터(inverter)의 입력단으로 들어가게 되고 출력단에서 FET(field effect transistor; 전계 효과 트랜지스터)의 입력특성에 맞는 12V 크기의 신호로 다시 반전되어 원래의 신호와 다시 같은 위상으로 FET를 동작시킨다.

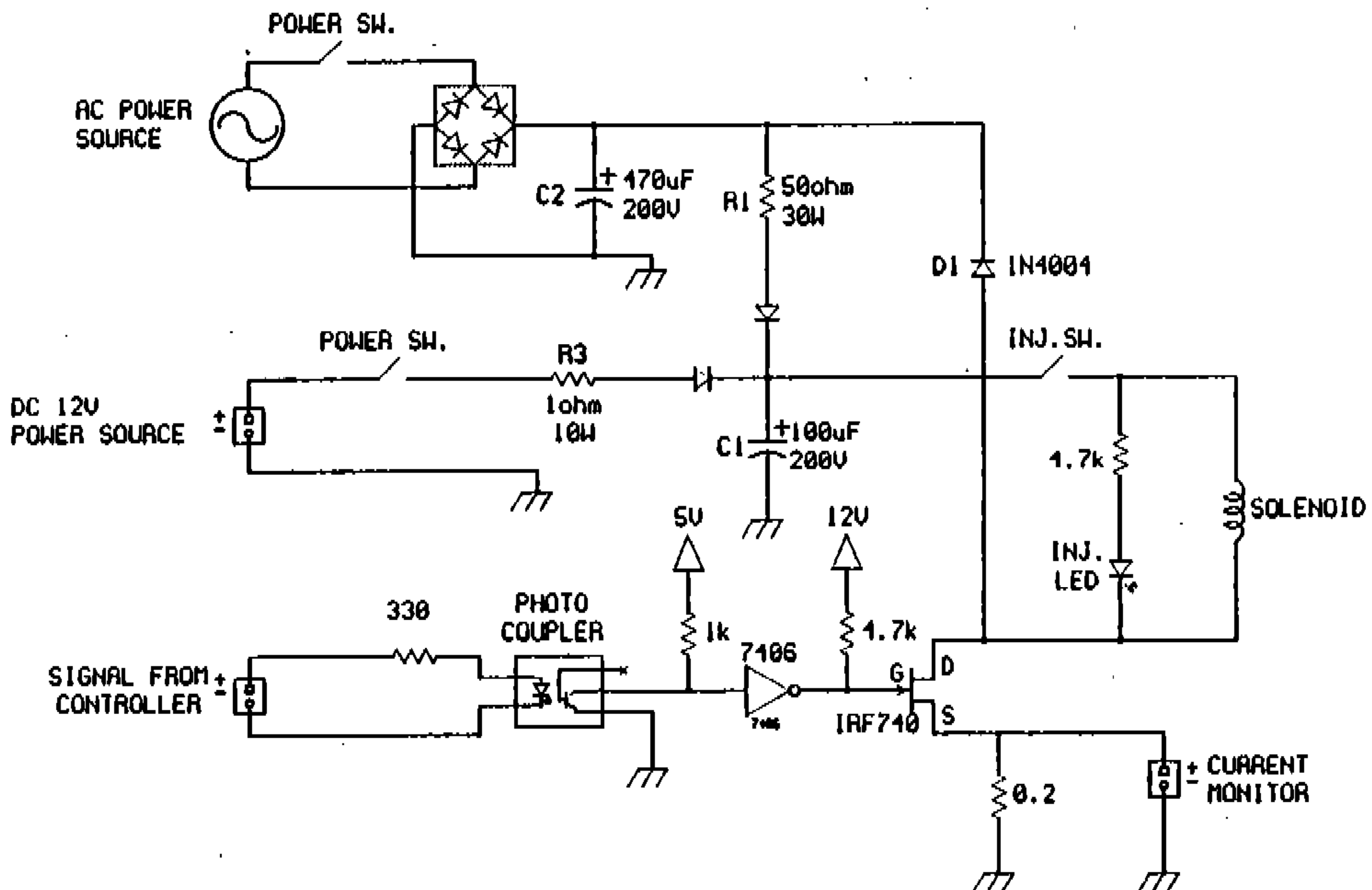


Fig.4 Circuit diagram of peak-hold type solenoid driving circuit

- (3) FET가 트리거(trigger)되면 C1은 양단 전위차가 12V가 될 때까지 코일을 통해 방전한다. 이 때 피크(peak) 전류가 발생한다.
- (4) C1의 방전이 끝난 후 조정저항 R3를 통해 12V 전압원에서 홀드(hold) 전류가 공급된다.
- (5) FET가 신호에 의해 차단되면 코일에 높은 역기전력이 발생하게 되는데, 이로부터 FET를 보호하기 위해 보호 다이오드 D1을 FET의 드레인에서 고전압 공급원 쪽으로 순바이어스(forward bias) 방향으로 설치하여 역기전력을 빠르게 제거한다.

3. 실험 장치 및 방법

솔레노이드의 특성을 시험하기 위하여 강철 재질의 축으로 코어와 로드 셀(load cell) 그리고 로드 와셔(load washer)를 연결하고 다이얼 게이지(dial gauge)가 설치된 볼 스크류(ball screw)를 이용하여 솔레노이드 코일을 수직 방향으로 0~1mm까지 0.1mm 간격으로 이송하여 코

일에 흐르는 전류와 그로 인해 발생하는 구동력을 측정하였다. 이 시험에 사용된 장치의 개략도는 Fig.5와 같다.

전류의 크기와 모양은 전류 프로브(Tektronix사 model A6303)와 전류 증폭기(Tektronix사, model AM503)를 이용하여 측정하였으며, 솔레노이드의 구동력은 스트레인 게이지형 로드 셀(Minebea사, model T3P1)과 압전형 변환기인 로드 와셔(Kistler사, model 9031A)로 측정하여, 솔레노이드 구동 전류와 함께 A/D 변환기로 PC에 저장하였다.

분사량 측정을 위하여 인젝터 분사구 끝부분에 관을 연결하고 관의 끝은 매스실린더에 연결하여 상방치환에 의해 분사되는 수소기체의 체적을 측정하였다.

인젝터 핀들의 양정을 측정하기 위하여 인젝터의 수소 공급관과 전극이 설치된 인젝터의 캡 대신, 홀-효과(hall-effect)를 이용한 양정 센서(Wolff사, Style 2)를 장착할 수 있는 어댑터를 가공하여 설치하였다.

실험에 사용된 기관은 실린더 지름 85mm, 피스톤 행정 86mm, 배기 체적 0.488dm³, 압축비 8.5 : 1의 연구용 단기통 기관(Toyota사, model

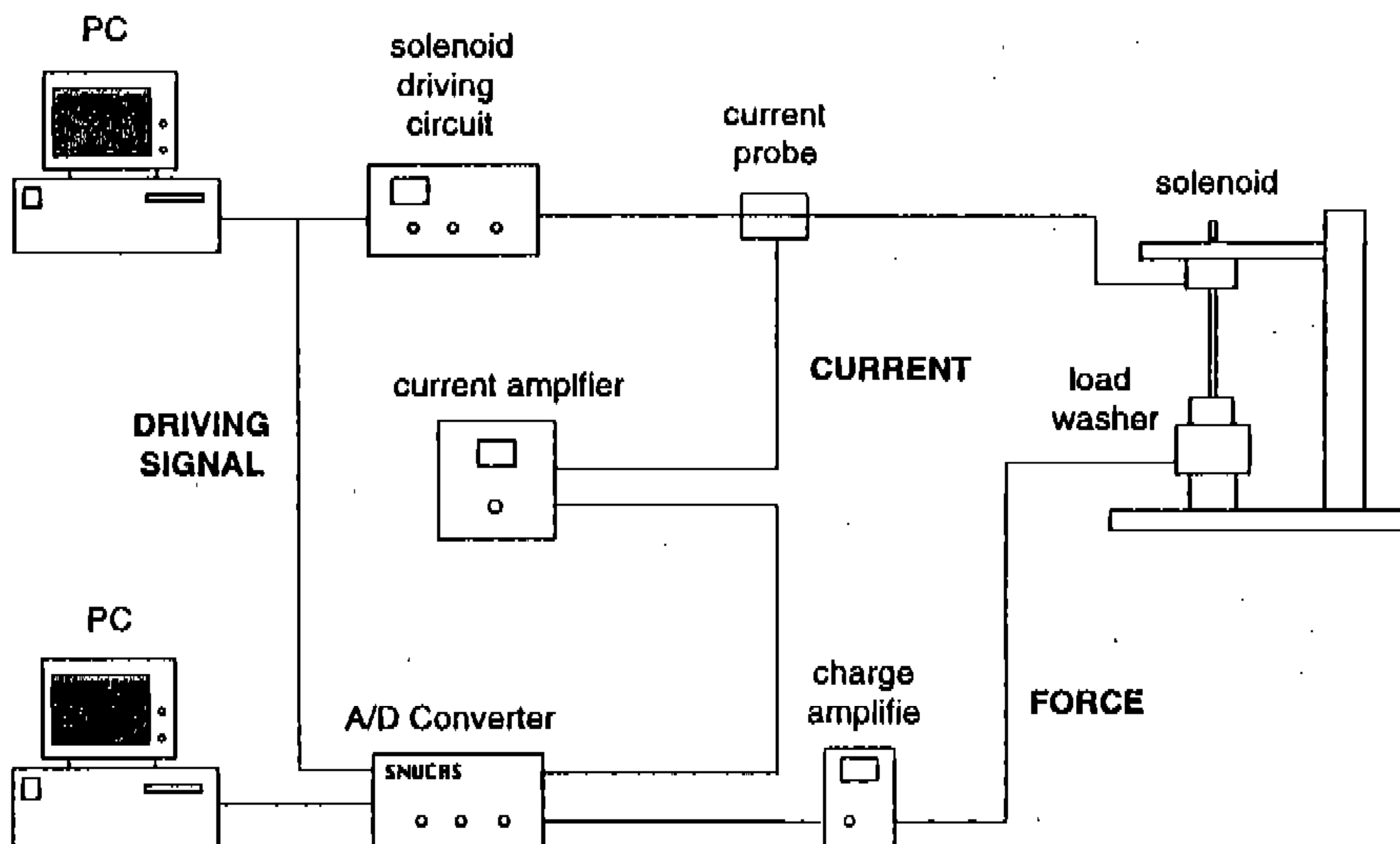


Fig.5 Schematic diagram of the solenoid rig test apparatus

TRE-2G)이다. 기관 동력계로는 수냉 와전류식 동력계(model ED15)를 사용하였다. 연소실 내의 압력을 측정하기 위해서 점화플러그형 어댑터와 일체로 되어 있는 압력변환기(Kistler사, model 6117A13)를 사용하였다.

실험에 사용된 수소는 고압 용기에 12MPa로 충전된 상태의 순도 99.9%의 것을 사용하였으며, 압력조정기를 거쳐 분사 조건에 따라 1.0~3.0MPa의 압력으로 강하시킨 후 사용하였다. 고압 용기로부터 압력조정기를 거친 수소는 차단 밸브와 체크 밸브를 지나 수소 인젝터로 공급되며, 그 사이에 열식 질량 유량계(Omega사, model FMA-875-V)를 설치하여 공급되는 수소의 유량을 측정하였다.

4. 결과 및 검토

4.1 솔레노이드 특성

새추레이션형 구동 회로에서의 시간 지연은 솔레노이드 코일의 인덕턴스와 내부저항, 그리고 초기 양단 전압 등에 의해 결정된다. 실제 인젝터의 솔레노이드에 흐르는 전류의 형태는 Fig.6과 같으며, 전류의 시간 지연과 더불어 전류에 의해 발생하는 구동력도 전류보다 뒤쳐지게 된다. 이렇게 되면 정확한 인젝터 핀틀의 열림 시

기 제어가 어려울 뿐만 아니라 신호의 폭이 좁아지면 Fig.6과 같이 최대 전류, 그리고 최대 출력에 도달하기도 전에 신호가 끝나 버려서 인젝터의 핀틀이 완전히 들리지 못하거나, 경우에 따라서는 전혀 들리지 못할 수도 있다.

피크-홀드형 구동 회로의 경우에는 작동 신호가 인가된 뒤 Fig.7과 같이 즉시 충분한 전류가 흐르게 되고 솔레노이드에서 큰 구동력이 발생되므로, 새추레이션형과 같은 시간 지연의 문제가 대폭 감소하므로 매우 짧은 구동 신호로도 솔레노이드를 작동시킬 수 있다.

솔레노이드의 구동에 있어서 구동 신호가 끝난 뒤 솔레노이드에서 즉시 구동력이 사라져 솔레노이드가 빨리 원래의 위치로 회복되는 것도 인젝터의 성능 향상에 큰 영향을 미친다^{9),10)}. 전류가 끊어진 직후 코일에 유도되는 높은 역기전력으로 부터 구동용 FET를 보호하는 다이오드는 대부분의 경우 Fig.3의 회로에서와 같이, 솔레노이드 코일의 양단 사이에 역바이어스(reverse bias) 방향으로 위치하게 되는데, 이러한 경로로 역방향 전류가 흐르게 되면 그림처럼 전류가 소멸하는데 시간이 오래 걸리고, 잔류하는 전류로 인해서 솔레노이드에 구동력이 즉시 사라지지 않고 남아있게 되어 솔레노이드 코어가 원래 상태로 복귀하는 시간이 길어지게 된다. 그러나 Fig.4의 구동 회로처럼 다이오드를 FET의 드레인

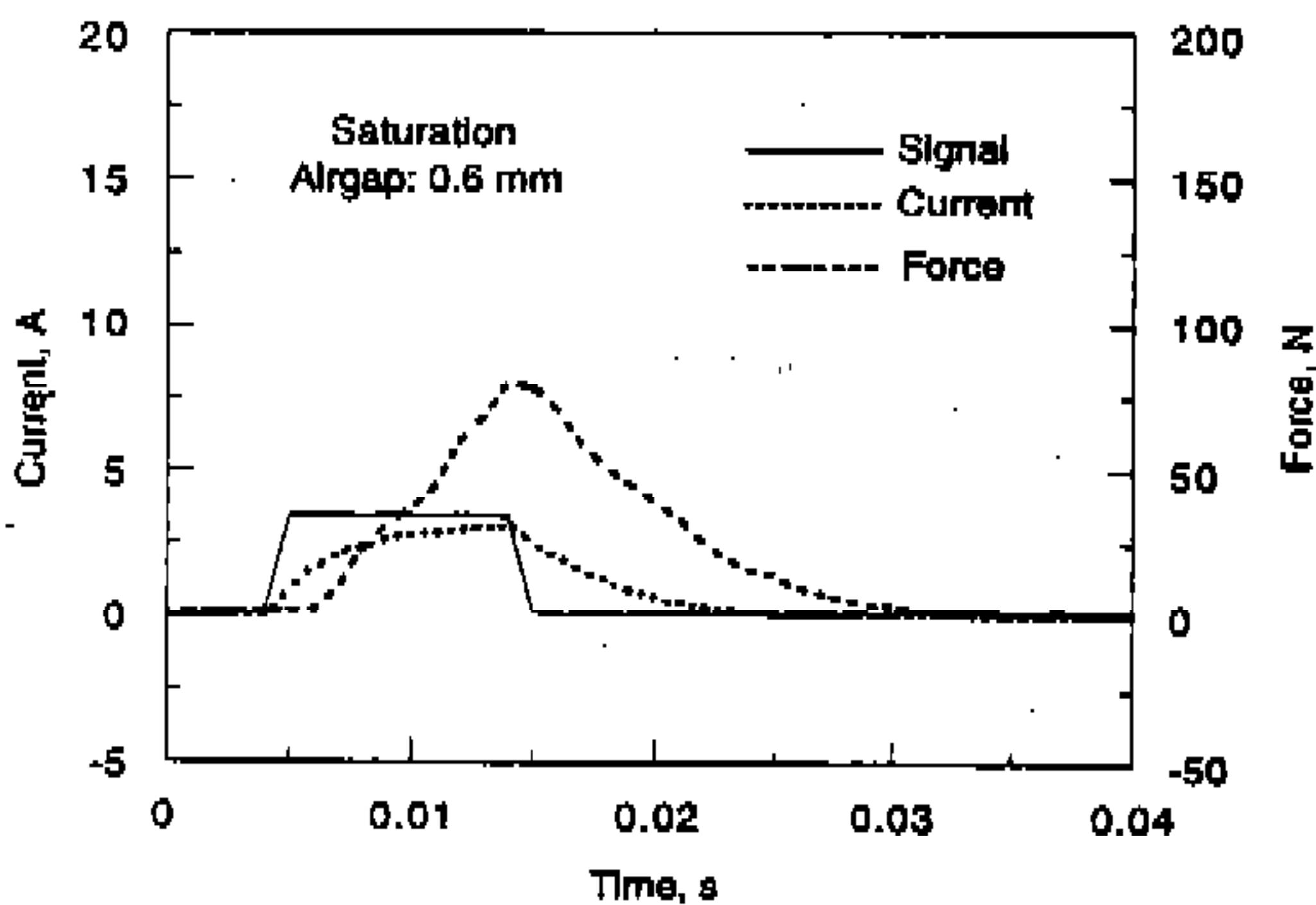


Fig.6 Solenoid current and force generated by saturation type solenoid driving circuit(steady state, airgap : 0.6mm, signal width : 10ms)

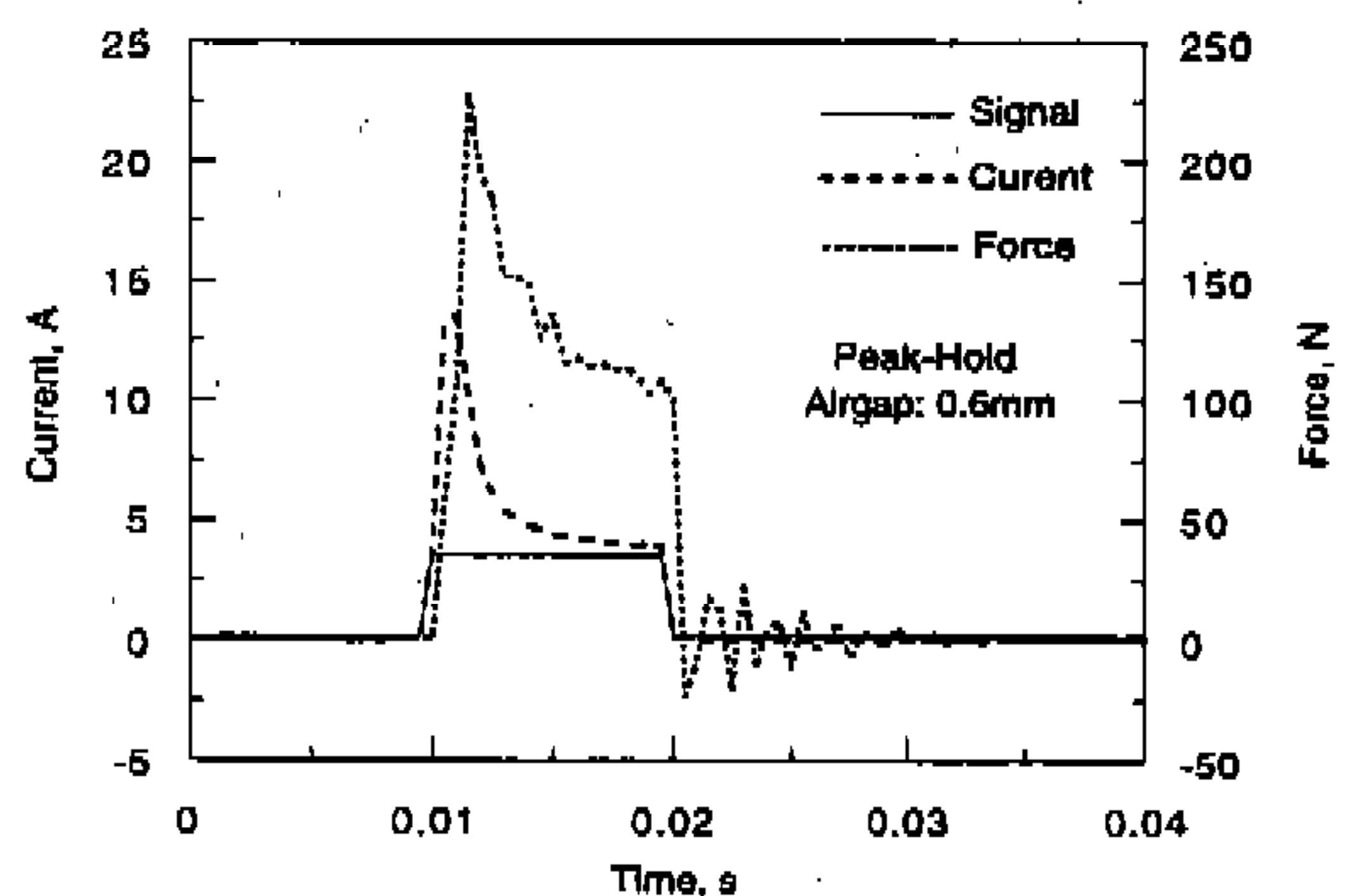


Fig.7 Solenoid current and force generated by peak-hold type solenoid driving circuit(steady state, airgap : 0.6mm, signal width : 10ms)

(drain)에서 고전압 공급원 쪽으로 순바이어스 방향으로 연결하면 전류가 소멸하는 시간이 줄어들고, 따라서 코어가 복귀하는 시간이 줄어든다"'. 이로 인하여 보다 짧은 시간 내에서의 운동부의 동작이 가능하게 되며, 고속과 저부하의 조건에서 인젝터를 원활하고 정확하게 동작시킬 수 있다.

Figure 8은 동일한 피크-홀드 회로에서 다이오드의 위치에 따른 전류의 형태를 나타낸 것이다. 그림의 회로(a)의 경우가 다이오드를 FET의 드레인에서 고전압 공급원 쪽으로 순바이어스 방향으로 연결한 경우이고, 회로(b)가 솔레노이드 코일의 양단 사이에 다이오드를 역바이어스 방향으로 연결한 경우이다. 그림을 보면, 같은 크기인 10ms의 구동 신호를 보냈음에도 불구하고 회로(a)에는 10ms동안 전류가 흘렀으나, 회로(b)는 그 2배인 20ms 동안 전류가 흘렀음을 볼 수 있다. 따라서 솔레노이드의 구동력이 걸리는 시간도 2배 정도가 되므로 핀틀이 필요 이상 들리게 되어, 회로(b)의 경우에는 정밀한 유량의 제어가 어렵게 된다. 새츄레이션형 구동 회로의 경우에는 고전압 공급원이 없기 때문에 회로(a)와 같이 회로를 구성하지 못하므로 구동 신

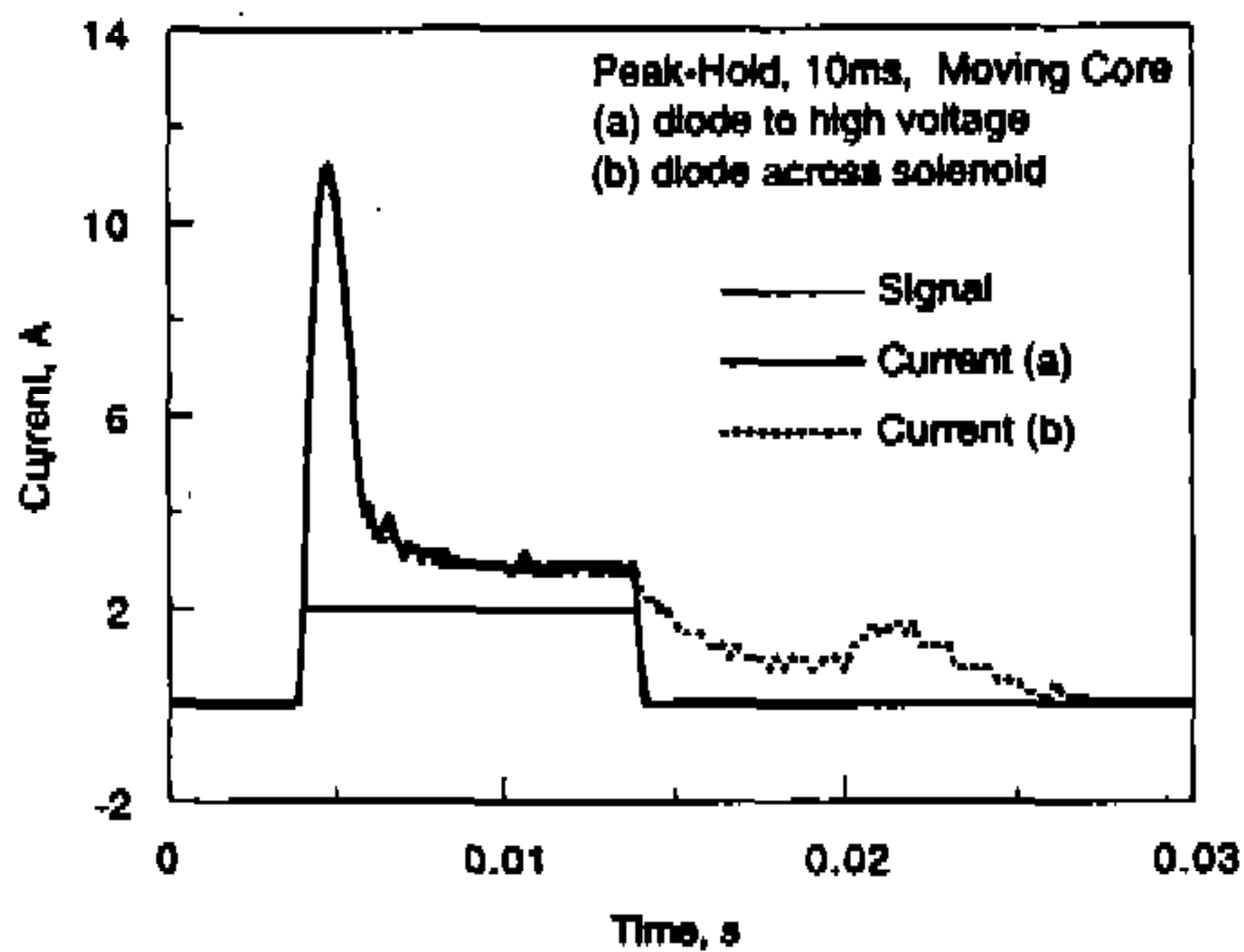


Fig.8 Solenoid currents according to respective diode positions, (a) with forward-biased direction to high voltage source, (b) with reverse-biased direction across solenoid coil(peak-hold circuit driven, moving core, signal width : 10ms)

호와 전류 사이의 차이 및 지연을 줄이기가 매우 어렵다.

Figure 9는 피크-홀드형과 새츄레이션형 회로를 사용하여, 발생하는 구동력을 측정 후 비교한 그림이다. 이 그림에서 보듯이 피크-홀드형 회로에서는 신호를 가한 즉시 큰 구동력이 발생하고 신호를 끊은 직후에 구동력이 사라지지만, 새츄레이션형의 경우에는 구동력이 증가하고 사라지는 데에 많은 시간이 걸리고 있음을 볼 수 있다.

4.2 인젝터 성능

Figure 10은 스프링 상수의 변화에 따라 실제

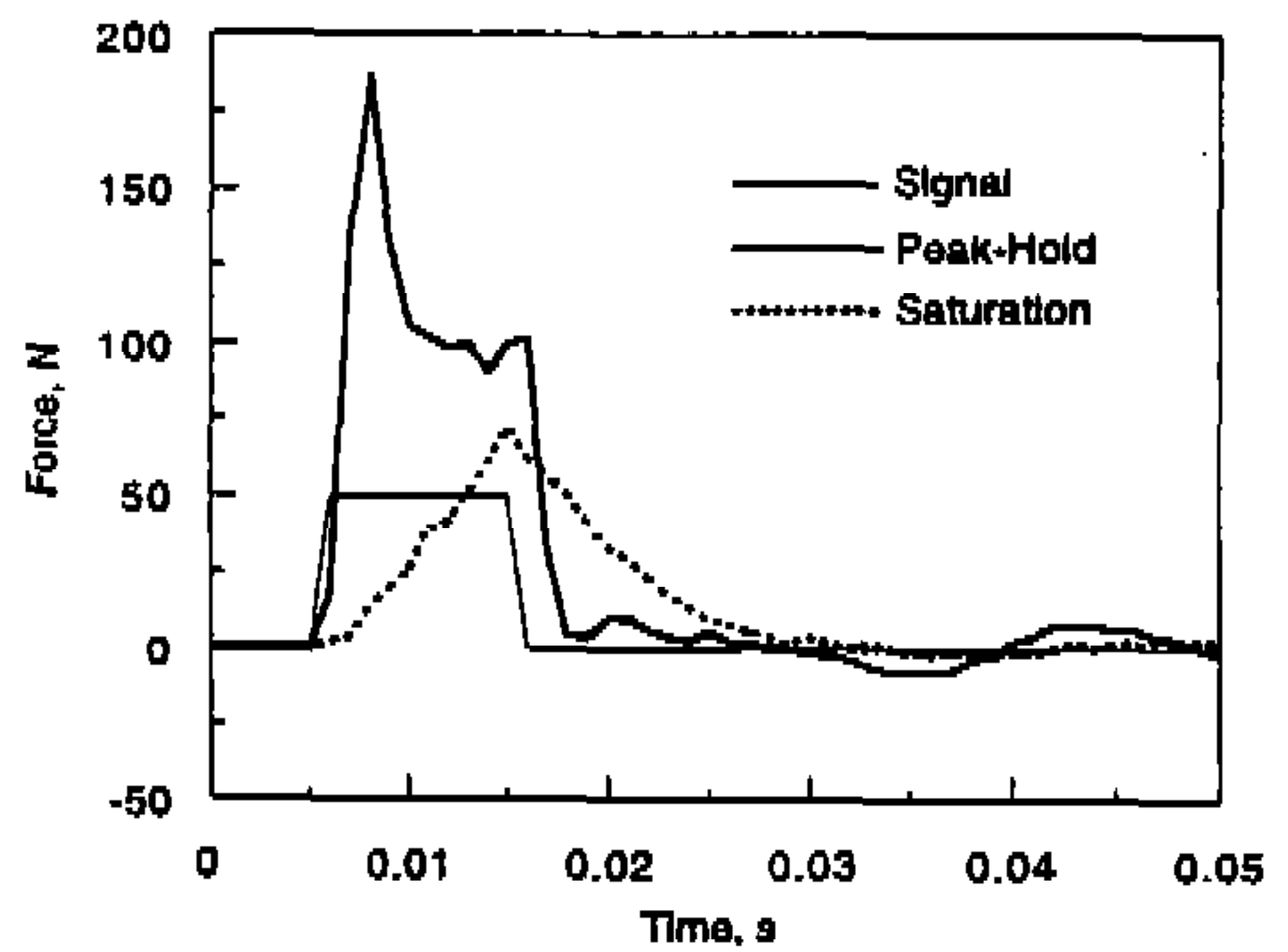


Fig.9 Comparison of solenoid forces generated by peak-hold and saturation type circuits

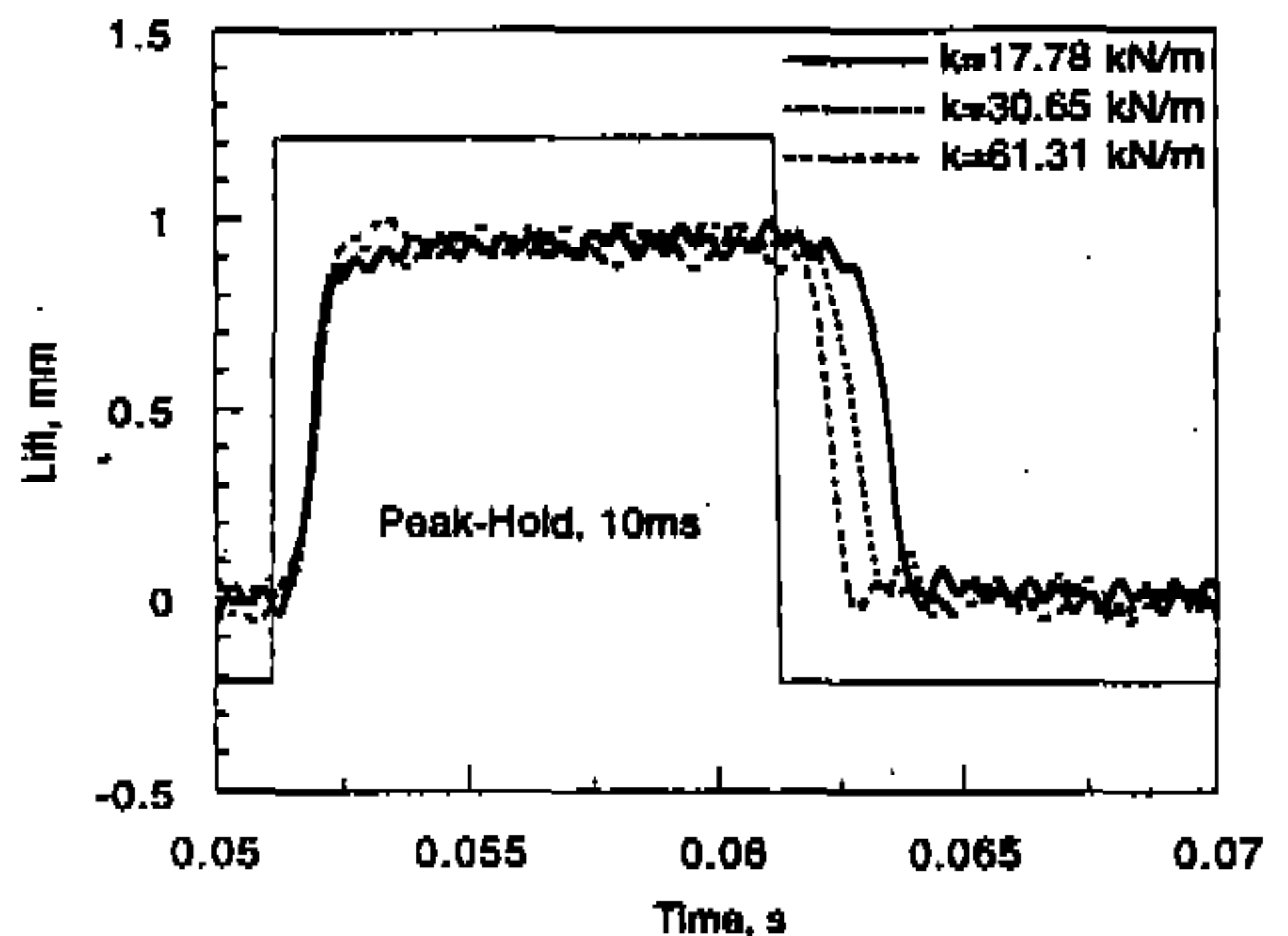


Fig.10 Pintle lift vs. time for spring constant of 17.78, 30.65, 61.31kN/m(peak-hold type, signal width : 10ms)

로 측정된 양정의 변화를 나타낸다. 위에서 언급한 바와 같이, 전류에 의해 발생하는 구동력에 비하여 스프링에 의한 힘이 상대적으로 작으므로 스프링 상수가 커져도 핀들의 상승 시간에는 별 영향을 미치지 않지만, 핀들이 원상태로 회복하는 데는, 스프링 상수(k)가 17.78, 30.65, 61.3kN/m인 스프링을 사용했을 때 최대 2ms 정도 까지 차이가 나고 기울기도 스프링 상수가 클수록 가파른 것을 볼 수 있다. 따라서 핀들의 동작 상태만으로 본다면 초기 상승 시간에 영향을 주지 않는 범위에서 큰 스프링 상수를 갖는 스프링을 쓰는 것이 정확한 핀들의 개폐와 기밀유지면에서 바람직하지만 닫는 힘이 너무 커져서, 장시간 동작시켰을 경우에 직접 맞는 핀들과 핀들 시트가 마모되어 버리므로 핀들 시트와 핀들의 내구성을 고려할 때에는 인젝터를 기관에 적용했을 경우, 적절한 스프링의 선택이 중요해진다.

Figure 11은 새추레이션형의 구동 회로를 이용한 인젝터 리그 시험 결과로, 수소 공급 압력을 1, 2, 3 MPa로 변화시킨 경우이다. 3.5ms 이하의 분사 신호에서 솔레노이드의 동작이 일어나지 않아 분사가 되지 않는 것을 알 수 있다. 특히 기관 운전과 같이 연속적인 작동을 시킬 경우에, 1,500rpm에서 8ms 이하의 분사가 어려웠음을 알 수 있다¹⁴⁾. 따라서 이러한 경우 저부하 영역의 기관 운전을 위해서는 공급 압력을 줄이는 수밖에 없으므로, 인젝터의 작동 시간과 인젝터 수소 공급 압력을 동시에 변화시켜서 부하 조절을 해야하는 어려움이 있다. 그리고 Fig.11에서 볼 수 있듯이 분사 신호의 폭이 작아질 수록 분사량이 선형적으로 감소하지 않고 더 많이 감소하는 것을 알 수 있는데, 이것은 신호의 폭이 작아지면 솔레노이드의 구동력이 작동 시간 내에 핀들을 완전히 들어주지 못해서 수소가 흐를 수 있는 유로 면적이 점점 감소하기 때문으로 생각된다.

Figure 12, 13은 각각 스프링 상수 17.78, 30.65 N/m인 스프링을 사용하고 최대 양정이 1.0mm일 때, 수소 공급 압력을 1, 2, 3 MPa으로 변화시키며 예하중을 두 가지씩으로 달리하여 얻은 실제 분사량이다. 이 그림들은 피크-홀드형

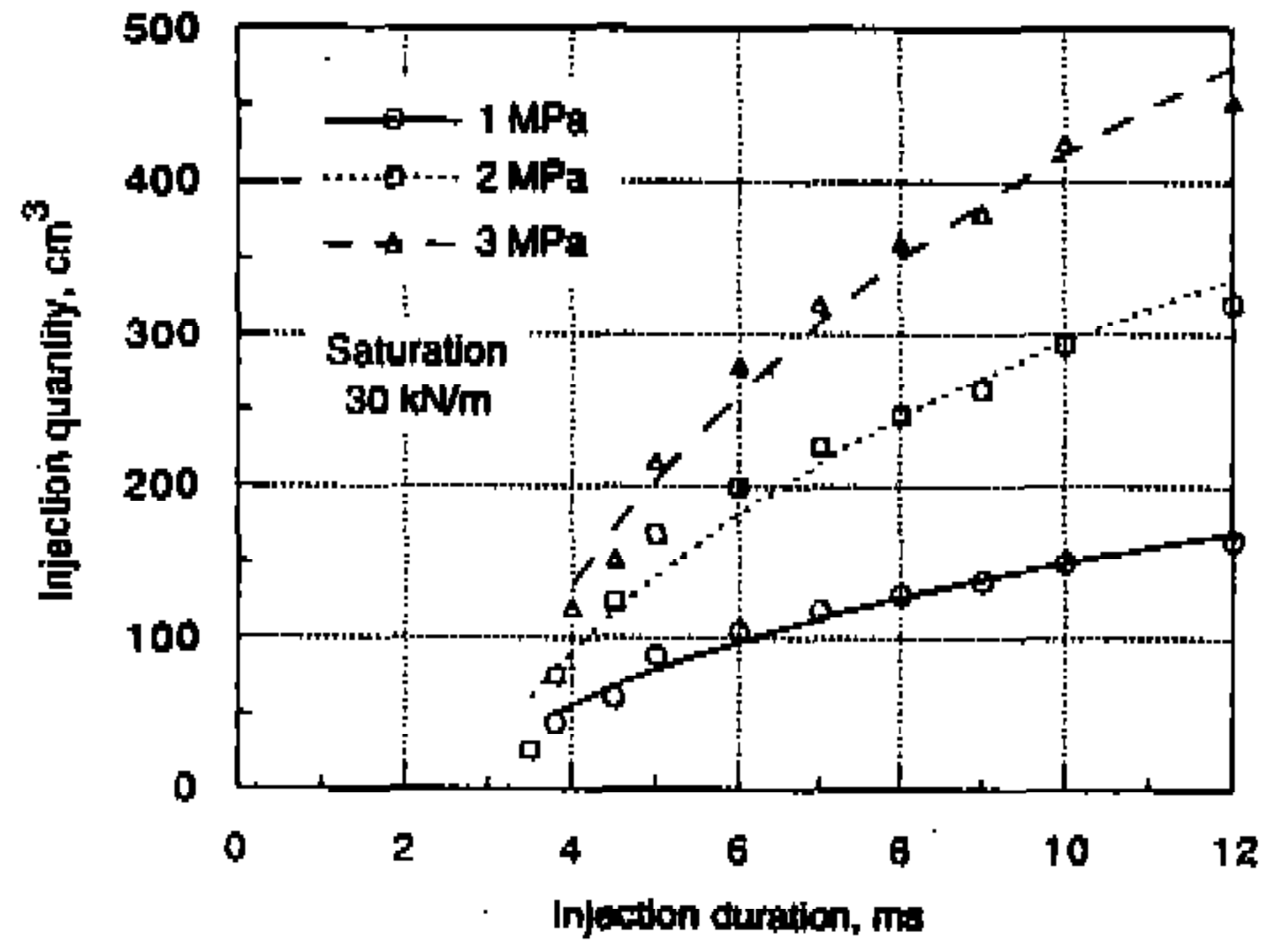


Fig.11 Hydrogen injection quantity vs. injection duration for supply pressure of 1, 2, 3MPa(saturation type, spring constant : 30.65kN/m)

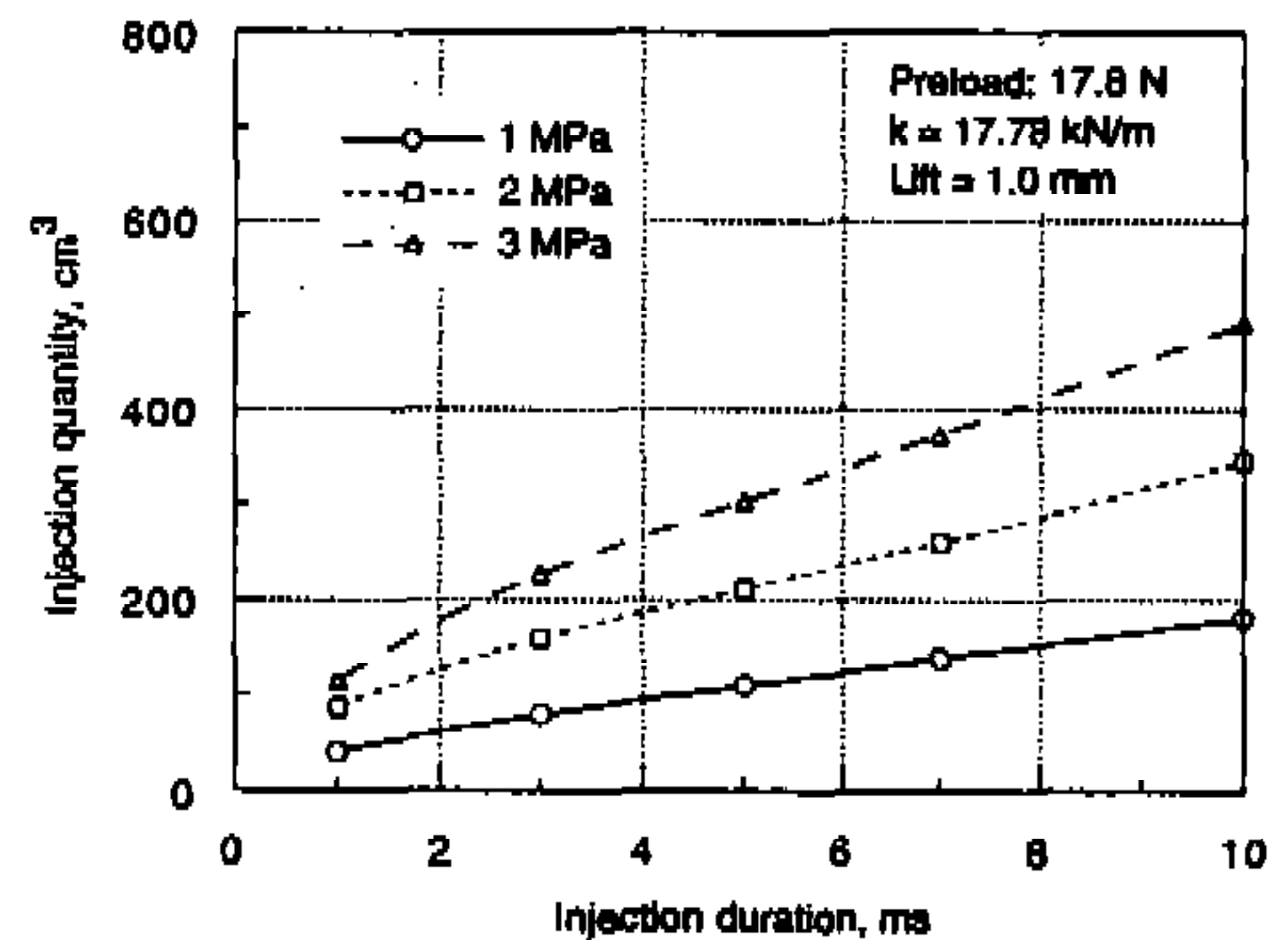
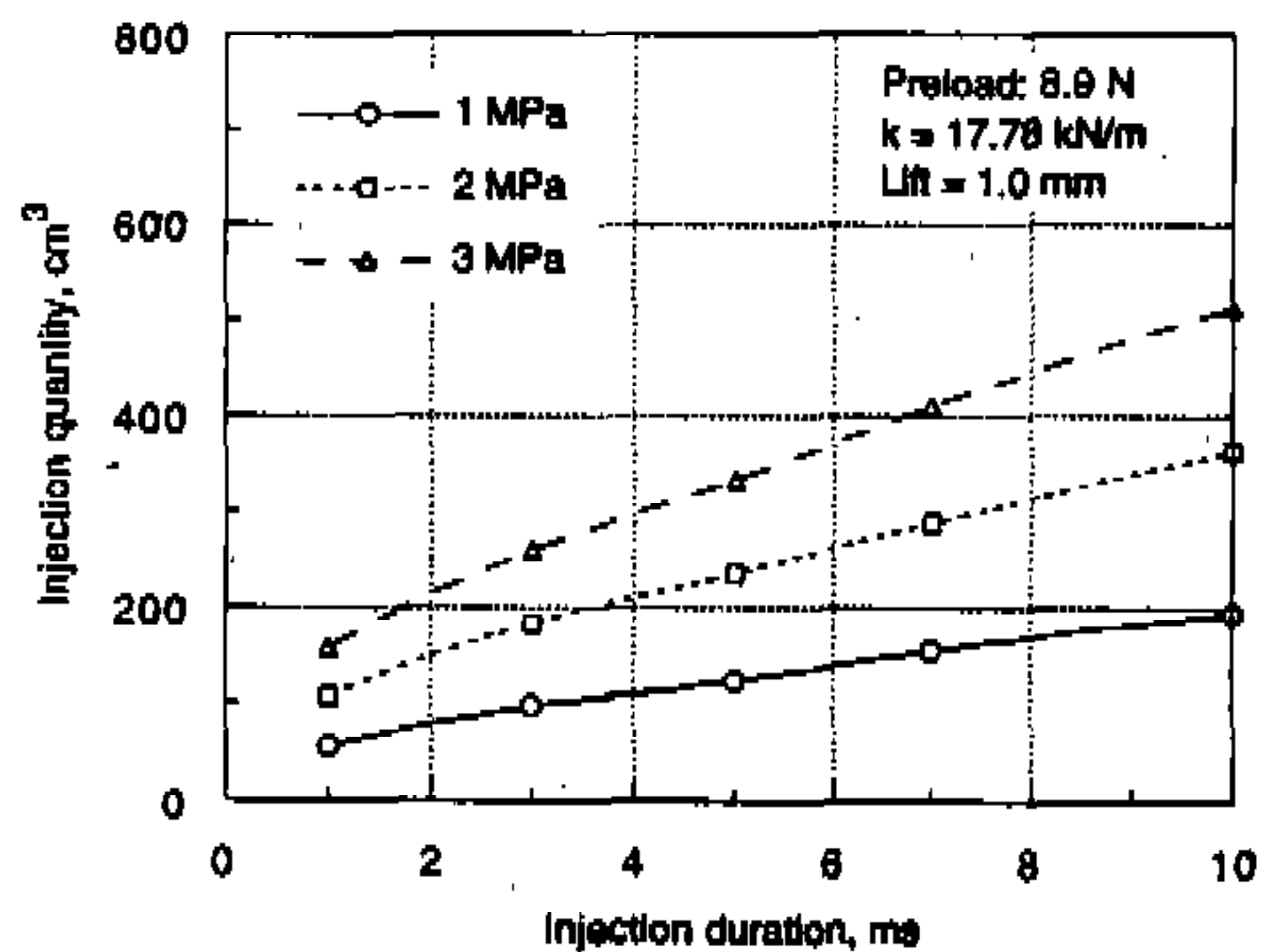


Fig.12 Hydrogen injection quantity vs. injection duration for supply pressure of 1, 2, 3MPa (a) with preload of 8.9N, (b) with preload of 17.8N(peak-hold type, spring constant : 17.78kN/m, full lift : 1.0mm)

의 구동 회로를 이용한 인젝터리그 시험 결과로서 1ms 이하의 분사 신호에서도 작동하고 있음을 보여준다. 이는 피크-홀드형 구동 회로의 특성을 보여주는 것으로 분사 시작 초기에 솔레노이드에서 큰 구동력이 발생하게 되므로 초기 분사 지연이 줄어들고 매우 작은 분사 신호에서도 작동하게 됨을 알 수 있다. 따라서 고속 저부하 영역에서도 공급 압력의 조절 없이 분사 신호만의 제어로 기관 부하의 조절이 가능하다. 그리고 새츄레이션형 구동 회로의 경우에 비하여 작동 시간에 따른 분사량의 증가가 선형적이므로 보다 정밀한 분사량의 제어 및 예측이 가능하다.

새츄레이션형의 구동 회로와 피크-홀드형의 구동 회로의 분사량을 비교해 보면, 새츄레이션

형 회로에서 전류가 완전히 포화되는 10ms 이상의 작동 신호의 경우에는, 동일한 폭의 작동 신호에 대해 두 가지의 분사량이 유사함을 알 수 있는데, 이는 새츄레이션형의 경우에 초기에 구동력이 약하여 핀틀이 늦게 들리므로 처음에 분사되는 양은 적지만 분사 후반부에서는 작동 신호가 끝나더라도 솔레노이드의 구동력이 즉시 사라지지 않으므로, 핀틀이 열린 채로 상당 기간 유지되어서 그 기간 동안 수소가 분사되어 최종적으로 분사되는 총량이 증가하게 되기 때문에 핀틀의 양정이 구동 신호의 모양에 상당히 근접하는 피크-홀드형의 경우와 비슷한 분사량을 보여주고 있다. 그러나 10ms 미만의 신호에서는 새츄레이션형 구동 회로의 경우 분사량이 점점

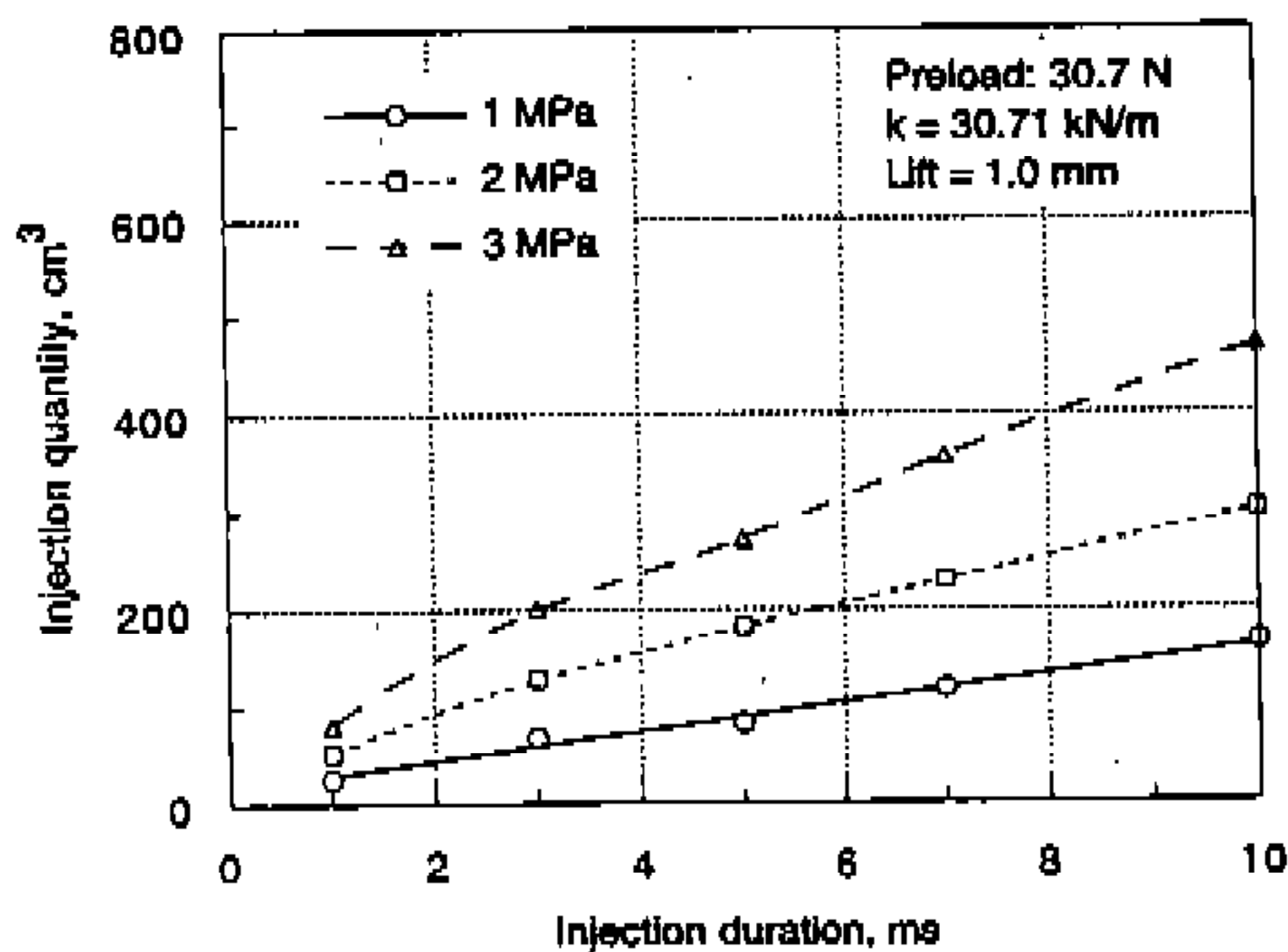
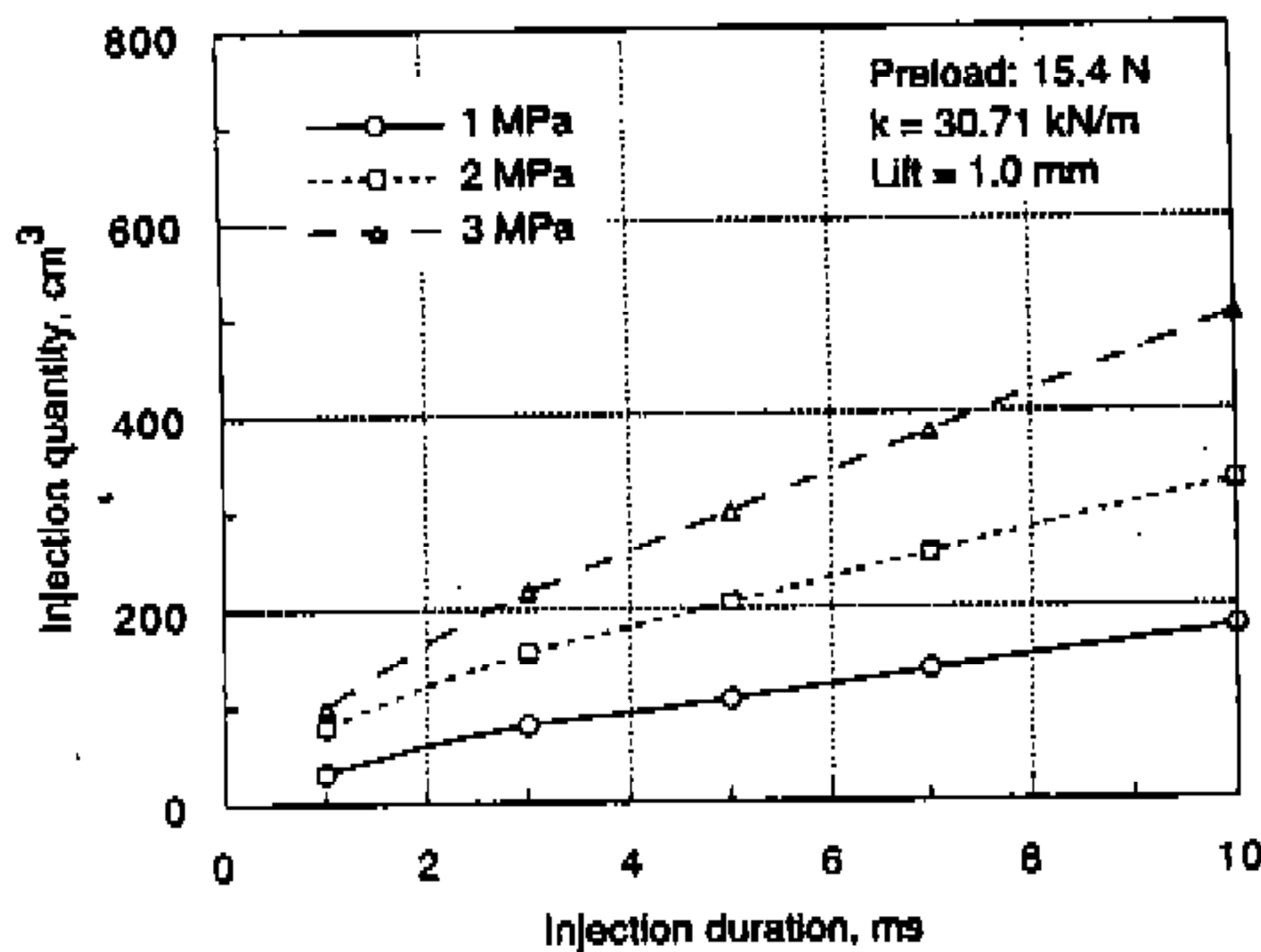


Fig.13 Hydrogen injection quantity vs. injection duration for supply pressure of 1, 2, 3MPa (a) with preload of 15.4N, (b) with preload of 30.7N(peak-hold type, spring constant : 30.71kN/m, full lift : 1.0mm)

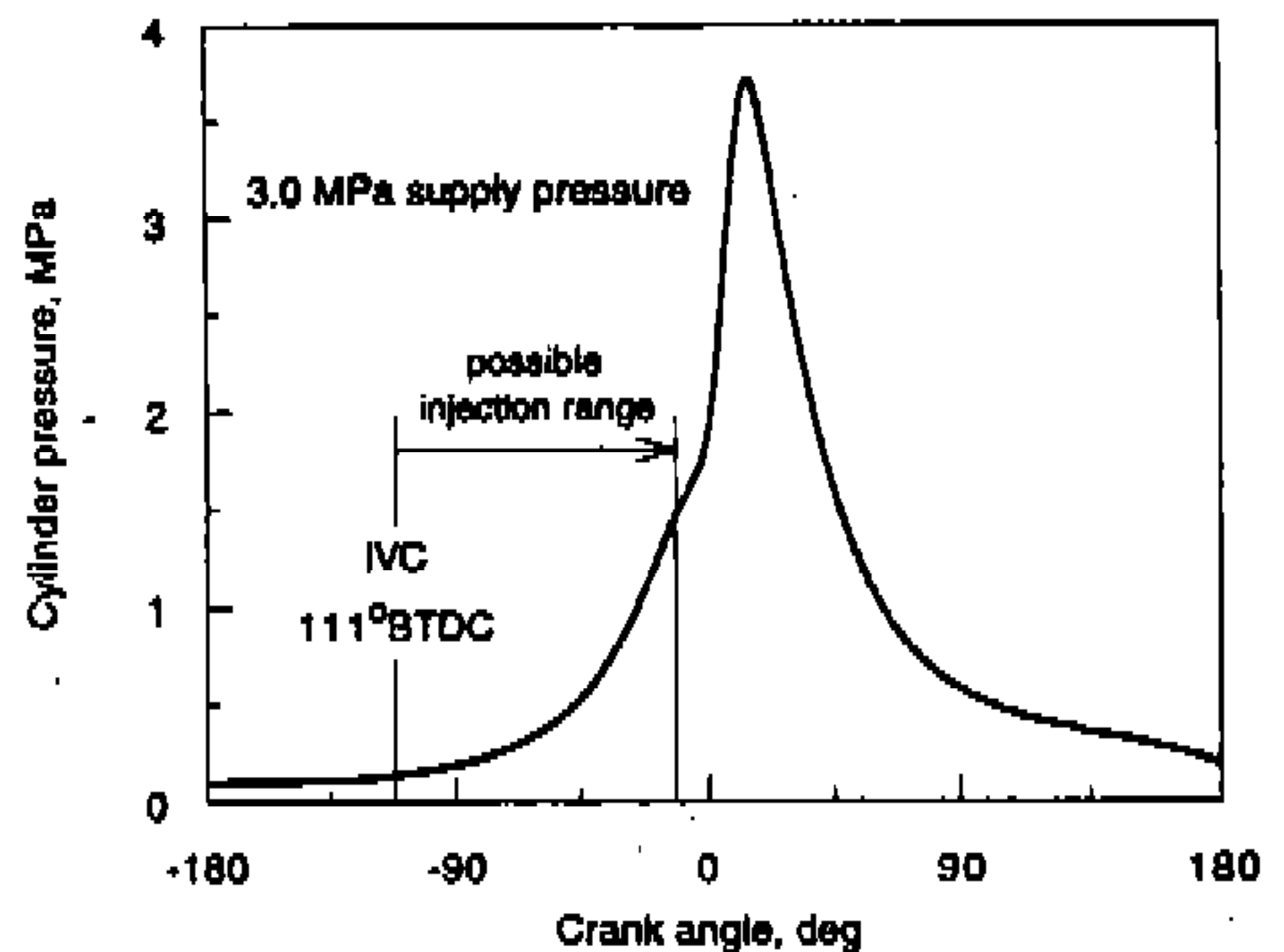


Fig.14 Injection starting point and possible injection range for supply pressure of 3MPa

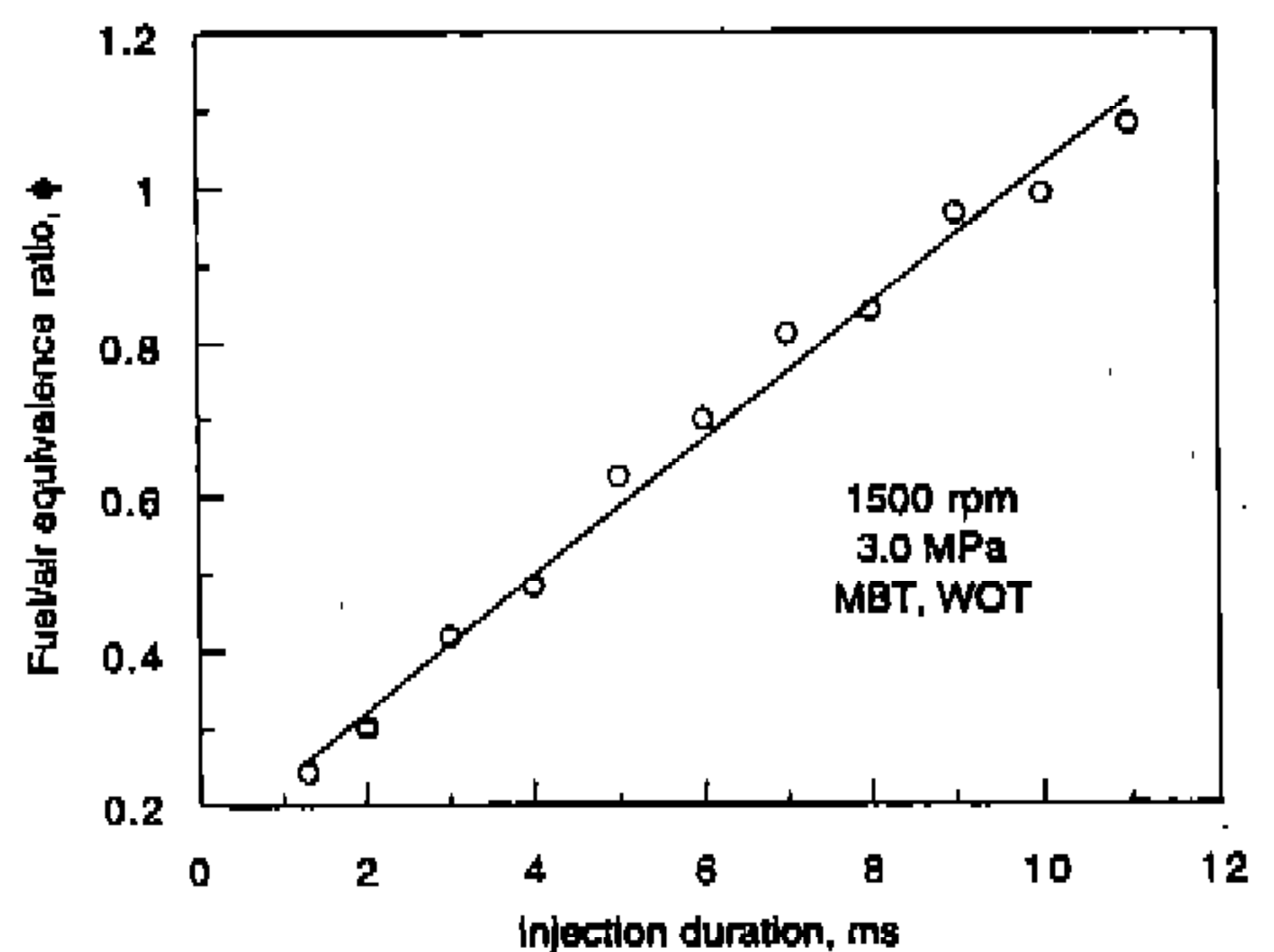


Fig.15 Fuel/air equivalence ratio vs. injection duration for supply pressure of 3MPa at 1,500rpm(MBT, WOT)

적어지고 4ms 이하의 신호에서는 피크-홀드형의 분사량의 절반에도 미치지 못하는 분사량을 보여준다. 이것은 신호의 폭이 좁아질 수록 전체 핀틀이 열려있는 시간 중에서 완전히 들려있는 시간이 차지하는 몫이, 부분적으로 열려있는 시간의 몫에 비해서 상대적으로 점점 줄어들기 때문이다. 이와같은 결과는, 저부하시의 인젝터의 안정적인 분사 성능을 보장하지 못하여 모든 분사 조건에서 인젝터의 작동을 원하는 대로 조절할 수 없으므로 바람직하지 못하다.

4.3 기관 실험

피크-홀드형 구동회로, 스프링 상수 30.65kN/m의 스프링의 인젝터 조건으로 MBT, 3.0MPa의 수소 공급 압력으로 기관 실험을 수행하였다.

1,500rpm의 일정한 기관 속도로 분사 지속 시간을 변화시키며 실험하였다. 분사 시작 시점과 분사 가능 범위를 Fig.14에 연소실내 압력선도 함께 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 분사 시작 시점은 흡기 밸브가 닫히는 시점으로 하였고 분사 가능 범위는 분사되는 수소의 유동이 초크(choke)되는 한계로 정하였다. 수소 공급 압력이 연소실 내 압력의 약 2배 이상이 되어야 공급되는 수소의 유량이 초크가 되므로 공급 압력이 1.0, 2.0, 3.0MPa일 경우에 분사 가능 범위는 실험에 사용된 단기통 기관의 경우 각각 크랭크각으로 61, 83, 96°에 해당하였다.

Figure15는 분사 지속 시간에 대한 연료-공기 당량비 ϕ 의 변화를 나타낸 그림이다. 새츄레이션형 구동 회로로 기관을 운전하였을 경우, 기관 회전 속도 1,000rpm에서 분사 지속 시간을 8ms으로부터 12ms까지의 범위 내에서 변화시킬 수 있었고, 당량비 0.27~1.04의 범위로 운전하기 위하여 분사 지속 시간과 더불어 분사 압력을 1~3MPa로 동시에 조절하여야 하였다¹⁵⁾. 그러나 피크-홀드형 구동 회로를 사용하여 기관 실험을 한 결과, 기관 회전 속도 1,500rpm, 분사 압력 3.0MPa의 조건으로 1.3ms에서 11ms의 범위내에서 분사 지속 시간만을 변화시켜 당량비 0.24~1.08로 기관을 운전할 수 있었다. 기관 실험시 최소 분사 지속 시간은 1.3ms인데 이

이하의 분사 시간에서는 기관이 불안정한 운전상태를 보였다. 수소 기관의 적절한 운전을 위하여 연료-공기 당량비는 0.26~1.0으로 알려져 있다⁶⁾. 최대 분사 지속 시간은 11ms로서 이는 앞서 언급한 연소실 내의 압력 상승에 따른 유동의 초크 조건에 의한 한계에 해당한다.

5. 결 론

솔레노이드 구동 수소 인젝터를 설계, 제작하고, 커패시터를 이용한 피크-홀드형의 구동회로를 제작하여 연소실내 분사식 수소공급장치를 구성하였다. 인젝터와 구동회로의 특성을 파악하기 위한 솔레노이드 리그 시험과 분사량 리그 시험, 그리고 단기통 기관 시험을 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 제작된 피크-홀드형 구동회로의 경우, 새츄레이션형 구동회로에 비하여 인젝터 작동시의 시간지연이 짧으므로, 1ms 이하의 짧은 구동신호에도 인젝터가 안정적으로 작동하였다. 따라서 기관의 고속 저부하 영역에서도 작동신호의 조절만으로 수소 인젝터의 유량을 제어할 수 있다.
- 2) 피크-홀드형의 구동회로에서는 역기전력 방지용 다이오드의 위치에 따라 솔레노이드 코일에서 발생하는 역기전력의 소멸에 소요되는 시간이 달라지게 되어 인젝터의 신속한 폐쇄에 영향을 준다.
- 3) 인젝터 핀틀의 하강은 스프링의 복원력에 의하는데, 스프링 상수에 따라 인젝터의 기밀성과 내구성이 결정되므로 적절한 스프링의 선택이 중요하다.
- 4) 본 연구에서 제작된 수소 인젝터와 구동회로를 배기체적 488cm³의 단기통 기관에 적용하여 시험한 결과, 1,500rpm의 기관 회전 속도, 3MPa의 분사 압력의 조건으로 분사지속시간을 1.3ms에서 11ms까지 변화시켜, 연료 공기 당량비 약 0.24~1.08 범위내에서 안정적인 운전이 가능하였다.

후 기

이 논문은 상공자원부에서 시행한 G7과제(차세대자동차기술) 개발사업의 기술개발 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Carl A. Kukkonen, and Mordecai Shelef : "Hydrogen as an alternative automotive fuel", *Automotive Engineering*, vol. 102, No. 10, pp. 25~29, 1994.
2. T. Petkov, T. N. Veziroglu, and J. W. Sheffield : "An Outlook of Hydrogen as an Automotive Fuel," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 14, No. 7, pp. 449~474, 1989.
3. L. M. Das : "Hydrogen Engines : a View of the Past and a Look into the Future", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 15, No. 6, pp. 425~443, 1990.
4. R. Mathur, and L. M. Das : "Performance Characteristics of a Hydrogen Fueled S. I. engine Using Timed Manifold Injection", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 16, No. 2, 1991.
5. 이형승, 이석재, 이종화, 유재석, 김용서 : "흡기관 분사 방식 수소 연료 기관의 성능 및 배출물에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, 제1권, 제2호, SAE paper 933747, 1993.
6. L. M. Das : "Fuel Induction Techniques for a Hydrogen Operated Engine", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 15, No. 11, pp. 833~842, 1990.
7. S. Furuhashi, and Y. Kobayashi : "Hydrogen Cars with LH₂-Tank, LH₂-Pump and Cold GH₂-Injection Two-Stroke Engine", SAE paper 820349, 1982.
8. T. Kushida : "High Speed, Powerful and Simple Solenoid Actuator "DISOLE" and its Dynamic Analysis Results", SAE paper 850373, 1985.
9. C. J. Green, and J. S. Wallace : "Electrically Actuated Injectors for Gaseous Fuels", SAE paper 892143, 1989.
10. H. Hong, T. Krepec, and R. M. H. Cheng : "Optimization of Electronically Controlled Injectors for Direct Injection of Natural Gas in Diesel Engines", SAE paper 930928, 1993.
11. T. Krepec, T. Giannacopoulos, and D. Miele : "New Electronically Controlled Hydrogen-Gas Injector Development and Testing", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 12, No. 12, pp. 855~861, 1987.
12. H. Kekedjian, and T. Krepec : "Further Development of Solenoid Operated Gas Injectors with Fast Opening and Closing", SAE paper 940450, 1994.
13. 염영하, 최신금속재료학, 동명사, pp. 280~283, 1991.
14. 이석재 : "수소를 연료로 하는 오토기관의 성능특성에 관한 연구", 서울대학교 공학박사학위 논문, 1994.
15. 조우흠 : "실린더내 분사 방식 수소기관에 관한 연구", 서울대학교 공학석사학위 논문, 1994.