

디젤 機關의 系統識別

— 燃料注入率 對 煤煙反應 —

System Identification of a Diesel Engine

— Throttle-Smoke Response —

趙 漢 根*

H. K. Cho

Summary

An empirical model for diesel engine control was obtained using a system identification method. A pseudo-random binary sequence was used as an input signal. Spectral analysis was used to find the frequency response of system. Model parameters of transfer functions were obtained using nonlinear regression.

1. 서론

디젤유의 상대적 경제성으로 인하여, 디젤기관은 농업과 일반산업 분야에서 다른 기관보다도 많이 사용되어 왔다. 또 디젤기관에는 식물성유등의 대체연료 사용이 가능하여 가까운 장래에 화석연료가 완전히 고갈되었을 때, 값싸고 안전한 대체 에너지가 개발될 때까지는 식물성유를 연료로 한 디젤 기관을 계속해서 많이 사용하게 되리라는 전망이다. 비록 디젤기관에서 배출되는 일산화 탄소와 불연수화 탄소의 양들이 가솔린의 경우 보다는 적지만, 인체 및 생물의 건강에 해로운 매연의 배출로 인해 사용의 폭에 많은 제약이 따른다. Particulate emission은 보통 흑색의 매연으로 나타나고, 건강에 해로우면서도 아니라 기관의 출력을 제한하는 요소이다. 일반적으로 흑색매연은 잘 조절된 정상상태의 운전 조건하에서는 심하게 나타나지는 않고, 보통의 연료 주입펌프등의 기계적인 연료 주입방법에

서, 속도 또는 부하변화에 따른 연료주입율의 급격한 변화에 기인한다.

배기가스를 제어하는 방법으로는 새로운 하드웨어의 개발과 기관의 최적화 운전을 목표로 하는 제어시스템의 개발을 들 수 있으나, 최고의 성능을 보장받기 위해서는 두가지 방법의 적절한 조화가 필요하다. 그러나 형태가 정해진 경우의 기관에는 운전변수의 제어가 효과적인 방법이라 할 수 있다. 배기가스의 재순환, 공기스윙과 고압 연료주입, 배기가스의 후처리 시스템등을 통한 기관 하드웨어의 개조는 지금까지 Particulate emission을 감소시키는 효과적인 방법으로 알려져 있지만, 실용단계에 도달하기 위해서는 많은 개선이 요구된다. 기관 제어계의 설계를 위해서는 복잡한 연소과정을 포함한 동적이고 비선형의 기관특성에 관한 자료들을 필요로 한다. 실린더내의 연소과정에 관한 완전하고도 기초적인 이해로 연소과정의 개선을 하여 배기가스를 줄이려는 광범위한 연구가 수행되어 왔으나 배

* 忠北大學校 農科大學 農業機械工學科

기가스의 생성과정에 관한 상세한 이론은 아직 밝혀지지 않고 있는 실정이다.

디젤기관에 관한 수학적 모형들이 발표되었지만, 이러한 모형들은 물리적인 상호작용에 근거하여 충분히 개발되지 않아서 제어에 적합하지가 않다. 따라서 요즈음의 기관 제어 시스템은 거의가 주어진 기관과 특정한 실험조건하에서 측정된 자료로부터 구한 실험적 모형을 근거로 개발되고 있다. Zhang등⁶⁾은 동력계 작동법을 사용하여 농용트랙터의 기관제어 시스템을 개발하여 연료의 경제성 향상을 꾀하였다.

운전시 제반 변수의 변화에 따른 기관작동상의 변화는 계수오차를 발생케 한다. 동적변화가 심한 경우의 문제해결 방법으로는 적응제어법이 최적이다. 기관에의 적응제어 연구로는 Wells-tead와 Zanker⁵⁾에 의한 디젤기관의 속도제어와 Sawada와 Shigemot⁴⁾에 의한 가솔린 기관에서의 녹킹 개선등을 들 수 있다. 적응제어법은 시스템 전체의 특성을 일정하게 유지하려는 목적으로 시스템의 계수변화에 대응하기 위하여 변형된 모든 형태의 제어전략들을 포함한다. 적응제어는 1) 식별 (Identification), 2) 결정 (Decision) 및 3) 조작 (Manipulation) 기능들을 차례로 수행한다. 적응제어 설계에 있어서, 식별은 짧은 시간 내에 수행되어 시스템의 변화를 추적하여 시스템의 성능을 항상 유지할 수 있도록 해야 한다.

본 연구의 목표는 컴퓨터 제어에 의하여 디젤 기관에서 배출되는 매연가스를 최소화하려는 것이다. 본 연구결과는 매연가스의 배출을 가능한 한 낮게 유지하면서, 속도제어가 가능한 새로운 연료주입장치의 개발에 적용될 수 있다. 본 연구에서는 적응제어를 채택한 연료 주입장치를 개발하기 위한 기초 단계로, 연료주입율과 매연강도간의 기초모형을 구하기 위한 계통식별이 시도되었다. 세부목적으로는 1) 디젤기관의 수학적 모형을 실험방법에 의하여 구하기 위한 개인 컴퓨터 중심의 모형개발 패키지를 개발하여, 2) 연료주입율과 매연강도간의 실험적 모형을 결정하는 것이다.

2. 실험방법 및 재료

본 실험에 사용된 기관계통의 식별방법은 기 발표된 조한근등에⁷⁾ 상세히 기술되어 있다.

가. 디젤기관과 동력계

본 연구에 사용된 기관은 미국 John Deere 사 제품의 4기통형 트랙터용 기관(Model 4239D)으로서 자연 흡입방식이며, 직접분사식이다. 배기량은 3.92 liters 이고(106mm bore, 100mm stroke), 압축비는 17.2 이다. 분사펌프로는 Standa-dyne Roosa-Master type DB2 기종이 장착되어 있다. 제작사 사양에 명시된 최대 구동마력은 2500 r/min 에서 56 kw 이다. 기관의 부하는 A&W 사의 Agri-dyno 350, 이동형 수냉식의 동력계로 조절되었다. 기관과 동력계는 마찰 클러치로 직접 연결되었고, 실험을 시작하기 전에 동력계는 제작자에 의해 보정 작업을 하였다. 실험용 기관은 자체 라디에터로 냉각되었고, 연료주입율을 외부에서 직접 조절할 수 있도록 하기 위해 분사펌프의 내부를 새롭게 개조하였다. 동력계의 고장등에 의한 부하의 급강하에 따른 기관 속도의 급상승과 같은 위험에 대비하기위해, 기관의 운전을 급히 중지할 수 있게 하기 위하여 기관 흡입구측에 조작을 쉽고 간단하게 할 수 있는 수동밸브를 장착하였다.

나. 데이터 수집장치(모델링 패키지)

1) 하드웨어

개인용 컴퓨터를 중심으로 한 계측제어 시스템을 제작 사용하였는데, 컴퓨터가 보내는 시스템 입력신호에 의해 연료량의 교란작업이 수행되고 시스템 출력인 기관 매연가스, 온도등은 측정계기를 거쳐서 컴퓨터에 저장되어 분석된다. 데이터 수집장치에는 주컴퓨터와 더불어 아나로그 및 디지털 신호 처리용 다목적 인터페이스 보드, 연료주입 교란장치, 매연의 연속 측정용 Optical Opacity Meter와 흡기 온도 및 연료주입을 측정장치 등이 포함되어 있다. 그림 1은 전반적인 데이터 수집장치의 구성도를 보여 준다.

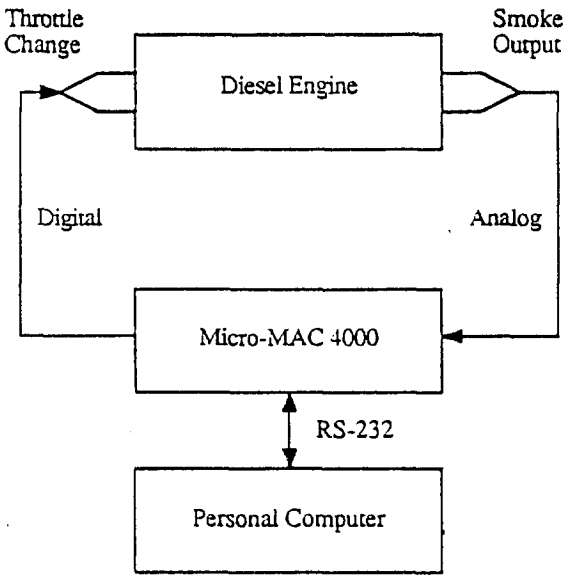


Figure 1. Block diagram of data logging system for identification

가) 개인용 컴퓨터

Intel 8088 processor를 장착한 이동형 Zenith 개인용 컴퓨터 (Model Z161)를 주 컴퓨터로 사용하여, 시스템의 입력신호를 만들어 보내고, 시스템의 출력신호를 수집하고, 자료들을 on-line 방식으로 저장하여, 제어용 모형계산을 off-line 방식으로 처리하도록 하였다. 인터페이스 보드와의 통신을 위하여는 컴퓨터의 RS-232 호환 시리얼 포트가 사용되었다.

나) 다목적 인터페이스 보드

아나로그 형태의 입력신호와 디지털 형태의 입출력 신호를 처리하기 위하여, 내장 8bit 마이크로 프로세서, 센서 신호 조절, 아나로그 멀티플렉싱, 아나로그 디지털 변환, 디지털 입출력 및 시리얼 커뮤니케이션 기능이 포함된 단일 보드 형태의 마이크로컴퓨터용 계측 및 제어용 인터페이스 보드인 Micro-Mac 4000 이 사용되었다 (Analog Devices).²⁾ 본 연구에서는 5개의 아나로그 신호채널(매연측정 1점, 온도 측정 4점) 과 1개의 디지털 신호채널(연료 주입을 교란)이 사용되었다. 내장된 마이크로프로세서는 입력되는 신호들을 선형화하고, 공업용 단위로 변환해 주어 자체 RAM (Random Access Memory)에 저장해 준다.

다) 연료주입 교란장치

입력신호인 2진신호를 연료주입에 적용하기 위해, 우선 연료주입펌프 내의 조속기(Governor)와 스로틀(Throttle)에 의해 조절되는 연료주입 조절방법을, 외부에서 스로틀(Throttle) 단독으로 조절하도록 하기 위해 속도조절기의 모든 연결 부품을 제거하고, 미터링 밸브와 조속레버를 2개의 링크로 연결하였다. 따라서 조속레버로 미터링 밸브를 직접 조절할 수 있도록 하였다. 연료주입을 교란시키기 위하여, 두개의 솔레노이드와 전력증폭용 회로를 사용하여, 조속레버의 연장레버가 좌우로 왕복운동이 가능하게 하였다. 이 솔레노이드는 주컴퓨터에서 보내는 신호에 따라 작동되게 하였다. 두 솔레노이드는 별도의 판에 장착되었고, 이판은 전체의 위치가 정교하게 조절되도록 긴 볼트형의 봉에 연결하였다. 그림 2는 연료 주입을 교란장치 부분을 보여준다.



Figure 2. Overall view of fuel perturbing system

라) 매연 측정

배출되는 매연을 연속적으로 측정하기 위하여 가격이 저렴하면서도 정밀한 이동식 Opacity 매연측정계(Berkely control 사, Model 200)를 사용하였다. 이 측정계는 센서부분과 표시부분으로 구성되었고, 광원은 광선을 실리콘 광 탐지기에 송출하는 펄스형의, Solid-state의 녹색 LED 형태이다. 전체 Scale의 90%에 도달하는데 0.01s 정도의 아주 짧은 반응시간을 갖고 있고, 시간당 2.5% 미만의 기계 또는 전기적 drift를 나타낸다. 배출되는 매연강도인 opacity는 % 혹은 밀도 K (m⁻¹)로 자체의 indicator에 표시되고 동시에 다

목적 인터페이스 보드를 통하여 주컴퓨터의 모니터에 voltage 단위로 표시된다.

마) 온도 측정

기관 주요 부분의 온도를 측정하기 위해, 실험실에서 제작하여 보정된 ANSI K type(Chromel-Alumel) 열전대가 사용되었다. 이들이 부착된 기관의 위치 및 피측정부는 다음과 같다.

- i) 기관오일 sump : 윤활유
- ii) 냉각수 펌프의 흡입구 : 냉각수
- iii) 흡입 manifold : 흡기가스
- iv) 배기 manifold : 배기가스

이 4점의 열전대는 MicroMac-4000 인터페이스 보드의 QMX03 모듈에 연결되어, 각부의 온도값이 주 컴퓨터의 모니터에 표시 되도록 했고, 매연강도의 값과 함께 보조 기억장치에 기억 되도록 하였다.

바) 연료 소모율 및 흡입 공기량 측정

연료소모율은 일정한 기관 작동시간 동안 연료 용기의 무게를 측정 한 후에 무게의 차이를 경과된 시간으로 나누어 구하였다. 무게측정에 사용된 전자식 저울은 최대 용량이 20 kg 이고, 정밀도는 5g이며, 시간측정에는 디지털 스톱워치가 사용되었다. 흡입공기량을 측정하기 위하여 층류요소(Laminar flow element, Meriam model 50 MC2-4) 와 마노미터가 사용되었다.

2) 소프트웨어

식별작업에 필요한 계측 및 제어용 소프트웨어는 주로 C 언어와 일부 실시간 작업을 위한 Assembly 언어로 작성 되었으며, Turbo-C 컴파일러와 Microsoft 매크로 어셈블러로 각각 번역하여 사용하였다. 소프트웨어는 MicroMac-4000 인터페이스 보드를 제어하여, 연료주입기관에 필요한 디지털 신호를 보내고, 출력값을 수집 및 저장하여 후에 분석이 가능하도록 구성하였다. 각각의 서브루틴에 대한 자세한 설명은 다음에 언급되어 있고, 프로그램 코우드는 조한근³⁾에 기록되어 있다.

가) 실시간 운전 및 샘플링 간격

주컴퓨터의 타이머 칩(8253)을 프로그램하여 실시간 운전이 가능하게 하는 어셈블리 루틴을 구성하였다. 이 루틴은 최초의 래치값인 65535를 11931로 바꾸어, 클럭 펄스를 초당 18.206회에서 99.998회로 바꾸어 샘플링 간격의 제어를 용이하게 해준다. 예를 들면, 10회의 펄스는 100 ms의 샘플링 간격을 제공한다. 새로운 래치값으로 클럭펄스 간의 시간은 10ms로 바뀌게 되었다. 샘플링 간격은 하드웨어상의 제한으로(대부분이 컴퓨터와 인터페이스 보드와의 직렬통신) 62 ms 보다 더 빨리 샘플을 수집할 수 없는 이유로 가장 빠른 경우의 샘플링 간격을 70ms로 하였다.

나) MicroMac-4000 인터페이스 보드와의 통신

MicroMac-4000 인터페이스 보드와의 통신을 목적으로 5개의 어셈블리 모듈과 4개의 서브루틴이 작성되었는데, 이들은 주 컴퓨터의 통신 포트의 초기화, 인터페이스 보드에 대한 명령 전달, 이들 명령에 따른 응답 수신과 수신된 자료중 불필요한 문자 제거를 하기 위한 것들이다.

다. 자료 수집

전형적인 기관 운전을 대표할 수 있는 9점의 서로 다른 機關 운전점에서 식별을 위한 자료수집이 수행되었다(표1 참조). 각 운전점에서 機關의 운전상태가 정상 상태에 도달된 후에 9 sets의 연속적인 2진 신호를 보내면서 나중의 8 sets 분에 해당하는 출력값을 수집하여 분석자료로 이용하였다. 사용된 입력신호로는 다중주파수 2진신호(조한근¹⁾)와 의사임의 2진신호가 사용되었는데, 의사임의 2진신호는 비트 간격이 0.28s 인 7단 변환 레지스터에 의해 소프트웨어로 제작되었다. (조한근³⁾)

Table 1. Engine operating matrix

Speed (r/min)	Load (N-m)		
	Low	Midium	High
1000	80	120	160
1500	80	120	160
2000	80	120	160

3. 결과 및 고찰

그림 3은 실험을 통하여 구해진 시간 영역에서의 전형적인 연료주입을 변화에 따른 매연강

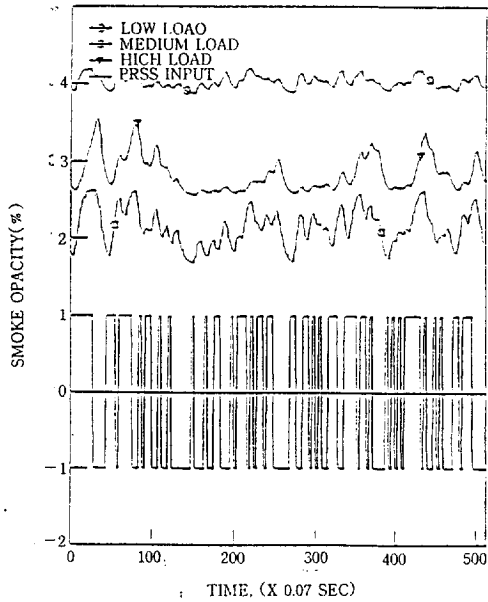


Figure 3. Response of fuel change on the smoke opacity at 2000 r/min

도의 변화를 보여준다. 그림 3은 의사임의 2진 신호의 형태를 출력과의 비교를 목적으로 포함하고 있고, 실제의 연료주입율의 변화값은 표 2에 나타나 있다. 표 2는 또한 실제의 기관 속도 변화와 각 운전점에서의 공기 연료비를 보여준다. 2진 신호에 의해 교란된 연료주입을 변화에 대한 매연강도의 주파수 응답을 구하기 위하여 Power spectral density법이 적용되었다(조한근¹⁾). 각 자료들의 위상차 응답을 관찰한 결과 다음과 같은 형태를 갖는 예상 전달함수인 식(1)을 선택하였다.

$$T(s) = \frac{G(as+1)e^{-Ds}}{(b_1s+1)(b_2s+1)\dots(b_ns+1)} \quad (1)$$

여기서 $T(s)$: 예상 전달함수(Postulated Transfer function)

a, b_n : 시정수(Time constant)

D : 부동작 시간(Dead time)

상기 전달함수의 시정수 및 부동작 시간의 값을 구하기 위하여 Box의 직접 탐색 알고리즘(조한근³⁾)을 적용하였다. 정확한 값을 찾기 위하

Table 2. Actual engine speed and air fuel ratio

Normal Speed	Load (N-m)	speed (r/min)	Air flow (g/min)	fuel flow (g/min)	Air-fuel ratio
Low	80 (low)	1120	2292	55.0	41.67
		800	1608	39.0	44.67
	120 (medium)	1150	2250	74.0	30.41
		980	1790	53.0	33.77
	160 (high)	1150	2285	88.3	25.88
		920	1876	66.7	28.13
Medium	80 (low)	1640	3056	87.5	34.93
		1330	2859	68.8	41.59
	120 (medium)	1670	3507	107.5	32.62
		1430	3029	86.3	35.15
	160 (high)	1980	4144	146.7	28.25
		1310	2809	85.0	33.05
High	80 (low)	2430	5022	104.1	48.29
		1910	4090	71.3	57.36
	120 (medium)	2395	4916	132.9	36.99
		1830	3863	96.5	40.03
	160 (high)	2360	4817	161.7	29.79
		1750	3678	121.7	30.22

Table 3. Parameters and object function value of transfer function

Speed	Load	Order	Gain ^a	Dead time (s)	Num. (s)	Time constants				Value of object function (Eq. 16)
						Denominator (c)				
Low	Low	4 ^b	5.9205	0.0000	0.0268	0.4679	0.4634	0.4666	0.4666	241.63
	Med.	4 w/d	3.3873	0.2889	1.0000	0.3090	0.2961	0.2976	0.2970	148.10
	High	4 w/d	3.4408	0.3432	1.0000	0.2855	0.2856	0.2842	0.2865	370.90
Med.	Low	3 w/d	0.1351	0.2938	1.7895	0.2007	0.4736	0.3819	—	8.44
	Med.	3 w/d	0.2140	0.3391	0.9977	0.3026	0.3695	0.2887	—	3.01
	High	3 w/d	0.1439	0.3717	0.9996	0.3199	0.2882	0.3158	—	0.77
High	Low	3 w/d	0.2991	0.2782	1.9813	0.4495	0.2522	0.5827	—	2.95
	Med.	4 w/d	1.6645	0.1161	0.0000	0.1207	0.1206	0.1207	0.3215	1.10
	High	4 w/d	1.9755	0.2916	0.0000	0.0002	0.3343	0.0022	0.9998	8.24

^aUnit=[% opacity/fuel rate(g/s)].

^bHas a additional numberator S term.

여 Box의 알고리즘을 10회 이상 실행하여 구한 값들이 표 3에 나타나 있다. 그림 4는 본 실험에서 얻어진 자료중 120N-m의 부하와 2000r/min의 속도에서의 주파수 응답도를 보여준다.

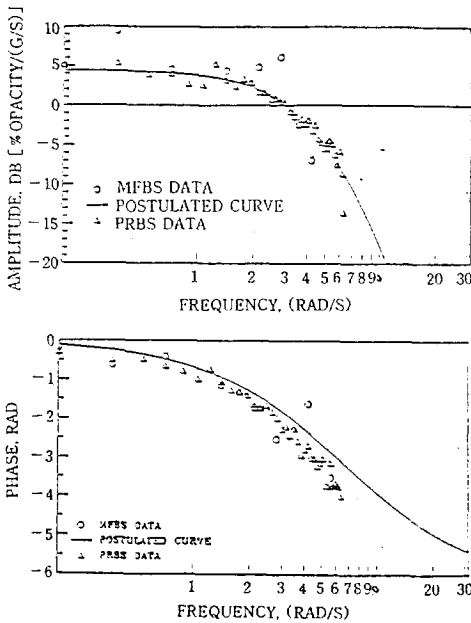


Figure 4. Amplitude and phase angel in transfer function for experimental data and postulated curve at high speed and medium load.

4. 결론 및 요약

본 연구의 목적은 디젤 기관의 제어를 위한

실험적 모형인 전달함수를 식별방법에 의하여 구하는 것이었다. 제한된 운전 범위에서 디젤 기관의 연소공정을 선형으로 가정하여 식별방법에 선형이론을 적용하였다. 입력신호로는 의사 임의의 2진 신호 (Pseudo-random binary signal)가 선택되었고, 실험을 정확하고 용이하게 수행하기 위하여, 16비트 프로세서를 내장한 개인용 컴퓨터를 중심으로 한 모형개발 패키지를 제작 사용하였다. 이 패키지에는 주 컴퓨터를 비롯하여 신호처리를 위한 다목적 인터페이스 보드, 입력 신호에 대응한 연료주입을 처리를 위한 개조된 연료주입 펌프를 포함하는 연료주입 교란 장치 및 구동 소프트웨어를 포함하고 있다. 정상상태의 확인에 필요한 여러 부분에서의 온도와 연료 및 공기 소모율등이 측정대상에 포함되었다.

자료분석에는 스펙트랄 분석방법을 적용한 주파수 응답법이 사용 되었다. 모형의 매개변수들을 찾기 위하여 측정된 자료들은 주파수 영역으로 치환된 후 비선형 최적법을 적용하였다. 결과로서 얻어진 매연도와 연료 주입율과의 사이의 고차식으로 표현되는 전달함수는 매연을 낮게 유지하여 연료의 경제성을 향상시킬 수 있는 전자식 연료 주입펌프의 개발에 활용될 수 있을 것이다. 좀 더 빠른 속도를 갖는 컴퓨터의 대체로, 온라인 식별이 가능하고, 적응제어 방법이 적용 될 수 있을 것이다. 온라인 식별을 포함한 적응제어와 적절한 센서의 채택으로 종합적인 기관 관리 시스템의 개발이 가능하리라 본다.

5. 참고문헌

- 1) 조한근, R. J. Smith, and S. J. Marley. 1990. 디젤기관의 계통식별 - 시뮬레이션 연구, 한국농업기계학회지, 15권 4호.
- 2) Analog Devices. 1981. User's manual, Micro-Mac-4000. Analog devices INC., System components division, NORwood, MA.
- 3) Cho, H. K. 1988. System identification of the smoke opacity vs. fuel metering in a diesel engine. Ph.D. Dissertation. Iowa State University. Ames, IA.
- 4) Sawada, D. and T. Shigematsu. 1981. Improvement of spark inginiton knock detector performance by learning control. SAE Publication SP-481 : 1-10.
- 5) Wellstead, P. E., and P. M. Zanker. 1981. Application of self-tuning to engine control. Ch.12. In C. J. Harris and S. A. Billings, Ed. Selr-tuning and adaptive control : Theory and applications. Peregrinus, London.
- 6) Zhang, N., J. V. Perampral, and R. K. Byler. 1985. Automatic control system for optimizing diesel engine performance. ASAE Paper No.85-1582.



學位取得



姓名: 洪 鍾 浩

生 年 月 日: 1950年 8月 5日

勤 務 處: 안성농업전문대학

取得學位名: 농학박사

學位授與大學: 충북대학교 대학원

學位取得年月日: 1990年 8月 26日

學 位 論 文: 수도 이앙기의 진행저하율 및 Float 접지압 분포 특성