

화포추진에서의 연소

윤 재 건
국방과학연구소



●1958년생
●연소공학을 전공하였으며, 추진공학(로켓트 추진, 화포추진)에서의 연소현상 및 모델링에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

열기관(heat engine)이란 열에너지를 기계적(mechanical)인 에너지로 변환시키는 장치이다. 장약(charge)인 추진제(propellant)를 연소시켜 발생한 열에너지를 탄체(projectile)의 운동에너지로 변환시키는 화포(gun)는 하나의 열기관임에 틀림없다. 모든 열기관은 효율을 높이고, 단위 무게당 발생에너지를 크게 하기 위하여 많은 노력이 오래 전부터 경주되어 왔다. 화포체계(gun system) 역시 각 구성품들의 개량이나 체계 전체의 개선을 통하여 효율

을 높이고 발생에너지를 크게 하는 시도가 이루어지고 있다.

화포추진(gun propulsion)도 추진공학의 한 분야이다. 그림 1에 추진공학의 분류를 시도해 보았다. 일반적으로 추진공학의 범주에서 취급하는 것은 제트추진(jet propulsion)과 로켓추진(rocket propulsion)이다. 차기 세대의 화포로 연구되고 있는 액체추진화포(liquid propellant gun)와 전자기력포(electromagnetic force gun)등을 제외한 기존의 모든 화포는 고체추진제(solid propellant)를 사용하고 있기 때문에 추진제의 연소현상(combustion phenomena)은 로켓추진에서 사용되고 있는 고체추진제와 유사한 점이 많다. 추진력(propulsive force)을 얻기 위하여 추진제가 연소하여 높은 온도와 높은 압력의 가스를 이용하는 것이 같지만, 일반적으로 화포추진과 로켓추진 사이에는 작동 압력에서 큰 차이가 있다. 로켓추진에서는 10~300atm 정도이지만, 화포추진에서는 500~5000atm 수준이다⁽⁵⁾.

본 글에서는 연소공학을 전공한 필자의 관점에서 화포추진공학을 소개하고, 고체추진제의 연소모델이 화포의 성능예측시(강내탄도해석) 어떻게 사용되고 있는가를 살펴보고자 한다.

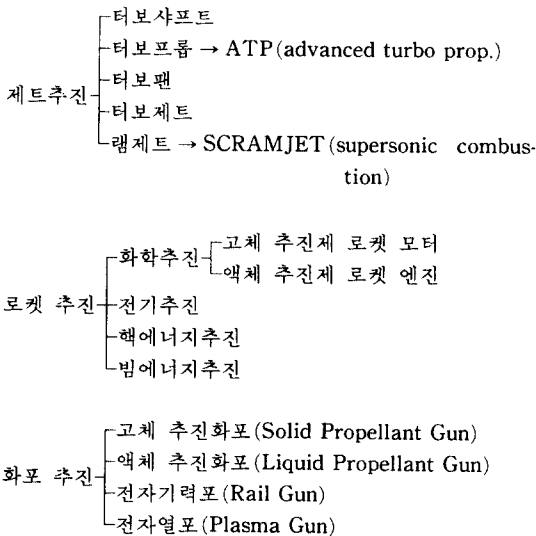


그림 1. 추진공학의 분류도

2. 화포추진공학 (Gun Dropulsion Technology)

그림 2에 대표적인 화포체계(gun system)를

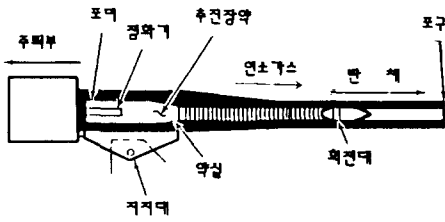


그림 2 화포의 개념도

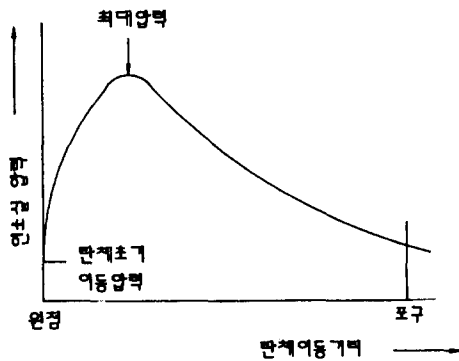


그림 3 화포의 성능선도(압력변위선도)

보이고 있다. 화포체계는 화포(gun), 탄체(projectile), 장약(charge)으로 구성된다. 탄체의 비행안정성을 확보하는 방법은 탄체에 회전을 주는 방법과 탄체에 날개를 부착하는 방법이 사용되고 있다. 그림에서의 회전대(rotating band)는 강선을 따라 움직이면서 탄체를 회전시키는 장치이다.

그림 3은 화포체계의 성능곡선인 압력 변위선도이다. 변위는 탄체가 포신내에서 이동한 거리이고, 압력은 연소실내의 평균압력이다. 압력선도 밑의 면적이 탄체에 가해지는 일(work)을 나타내고, 이 일은 마찰등에 의한 손실을 제외하고는 전부 탄체의 운동에너지로 변환된다.

$$A \int P \cdot dS \approx \frac{1}{2} \cdot Mp \cdot Vp^2 \quad (1)$$

A : 탄체의 단면적
P : 탄체에 작용하는 압력

S : 탄체의 이동거리
Mp : 탄체의 질량
Vp : 포구속도

이 성능성도에서 제일 중요한 것은 최고압력(maximum pressure)과 포구속도(muzzle velocity)이다. 최고압력은 포신을 포함한 화포의 구조적인 설계에 가장 중요한 기준이고, 포구속도는 강외탄도(exterior ballistics)를 결정하기 때문이다. 따라서 그림과 같은 압력변위선도는 화포라는 열기관을의 가장 중요한 성능선도이다.

화포체계 역시 다른 열기관과 마찬가지로 효율이 중요하다. 일반적으로 열기관의 크기와 운용조건에 따라 효율에 차이가 있을 수 있고, 특히 화포체계에서만 사용하는 효율(piezometric efficiency)의 정의도 있지만, 일반적인 탄도효율(ballistic efficiency)은 에너지의 분포로써 알 수 있다. 표 1에⁽²⁾ 중구경(medium caliber) 강선포(rifled gun)의 에너지분포를 보이고 있다. 포구속도에 의한 운동에너지가 30%정도이므로 이 포의 효율은 30%이다. 가장 많은 에너지 손실은 연소가스의 열(40%)로 없어지고, 포신의 벽면을 통하여 20%정도의 열손실이 발생한다. 특기할 만한 점은 화포의 반동(recoil) 에너지가 무척 작다는 것이다.

화포추진공학은 화포체계를 구성하는 각 구

표 1 화포의 효율(중구경 강선포의 경우)

항 목	%
탄체의 선형 운동에너지	30.6
연소가스의 현열	40.0
연소가스 및 미연추진체의 운동에너지	3.0
주퇴기의 반동에너지	1.0
화포벽면 및 탄체로의 열손실	20.0
화포의 변형에너지	0.8
탄체와 화포벽면의 마찰손실	4.0
탄체의 회전에너지	0.6
합 계	100.0

성품 각각에 관한 분야(화포, 추진체, 탄두/탄체)와, 포신내에서의 탄체의 운동과 관련한 모든 현상을 연구하고 따라서 화포의 성능곡선인 압력변위선도를 예측하는 강내탄도해석과, 포구현상(muzzle flash & blast)에 중점을 두고 포신과 포구주변의 유동을 연구하는 포구유동기체역학(muzzle flow gasdynamics) 등을 포함하여 무척 다양한 분야들을 갖고 있다.

3. 화포추진제의 연소모델(Combustion Model of Gun Propellant)

표 2⁽⁸⁾에 화포추진제의 종류 및 특성을 보이고 있다. 주성분은 니트로셀룰로오스와 니트로글리세린이며, 니트로구아니딘을 포함하는 삼

기추진제(triple base)가 에너지의 손실없이 낮은 화염온도를 갖기 때문에 최근에 많이 적용되고 있다. 추진제는 조성에 따라서 무수히 많은 종류가 있고, 화포체계마다 조건에 따라 가장 적합한 조성이 선택된다. 일반적인 선택조건은 가격, 강내탄도 요구 조건의 만족도, 추진제와 화포의 부합성(interface)여부, 그리고 포구효과(muzzle effect)에 따른 제한조건 등이다. 전반적인 화포추진제의 개발방향은 연기, 섬광, 취약성(vulnerability), 침식도(erosivity)등이 적고, 낮은 화염온도와 고에너지 밀도를 갖는 추진제 조성을 찾아내는 것이다.

그림 4에 화포에 사용되는 추진제의 형상을 보이고 있다. 이 외에도 19공통브형(19-

표 2 화포추진제의 종류 및 특성⁽⁸⁾

구분 \ 종류	단기추진제 (Single Base)	복기 추진제 (Double Base)	삼기 추진제 (Triple Base)	기타
추진제 호칭	M1, M6, M10	M2, M5, M7, M8, M9, M26, N-5, AA-2	M30, M30A1	JA-2, DIGL-RP LOVA
조성 성분	· NC · 기타(가소제, 안정제)	· N/C, N/G · 기타(가소제, 안정제, 연소 촉매 등)	· N/C, N/G, N/Q · 기타(가소제, 안정제, 연소 촉매 등)	· N/C, N/G · DEGDN, TEGDN · RDX, HMX · 결합제
열역학적 특성치 (충진률=0.2g/cc) Impetus (J/g)	920	1174	1077	1000
연소실 최대압력 (MPa)	236	290	272	270
최고 화염온도 (K)	2450	3870	3010	2400
평균 분자량	22.1	27.4	23.2	19.5
밀도 (g/cm ³)	1.57	1.60	1.66	—
연소열량 (J/g)	3300	5360	4100	—
제작방법	압출(용제사용)	압출(용제, 무용제) 주조	압출(용제, 무용제)	압출(무용제) 주조
안전성	중	중	중	중, 하

(비고) N/C : Nitrocellulose RDX : Cyclotrimethylene Trinitramine
 N/G : Nitroglycerin HMX : Cyclotetramethylene Tetranitramine
 N/Q : Nitroguanidine DEGDN : Diethylene Glycol Dinitrate
 Impetus = $\frac{\bar{R}}{M_w} \cdot T_v$ TEGDN : Triethylene Glycol Dinitrate

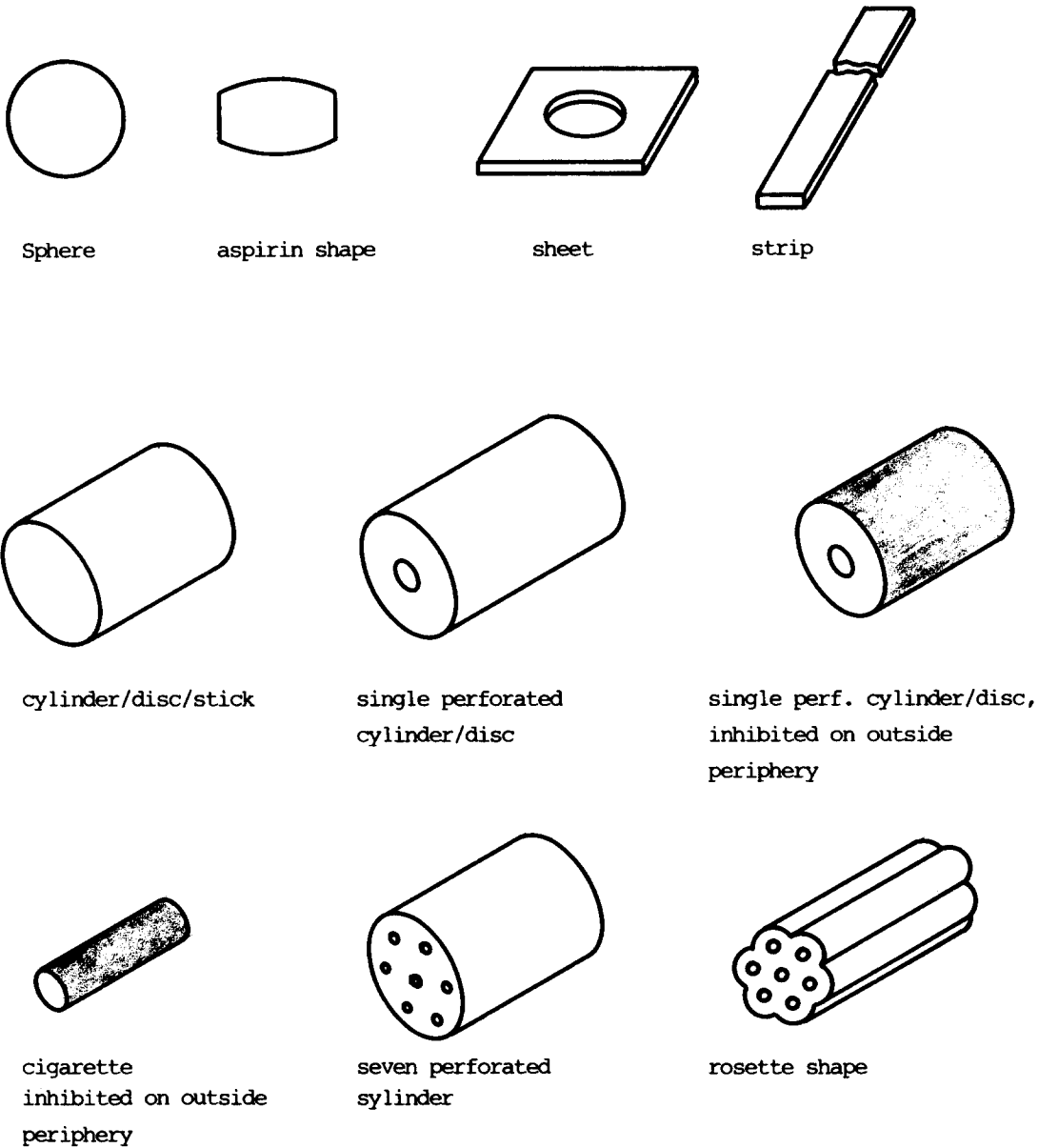


그림 4 화포추진제의 여러가지 형상

perforated cylinder grain) 및 육각형(hexagon) 그레인 등 연구개발 측면에서 많은 형상들이 시도되고 있다. 이와 같은 고체추진제의 연소현상의 모델은 다음과 같고, 로켓용 고체추진제에도 적용될 수 있다.

$$\dot{M}_b = r \cdot \rho \cdot S \quad (2)$$

\dot{M}_b : 추진제연소율 (mass of burning propellant)
 r : 추진제표면의 연속도 (regression rate)
 ρ : 추진제밀도

S : 연소표면적 (burning surface area)

$$r = a + b \cdot p \quad (3)$$

또는

$$r = B \cdot P^n \quad (4)$$

연소가 일어나고 있는 표면의 압력이 어디서나 동일하다면, 모든 표면에서 동일한 속도로 연소가 진행된다. 그리고 이 연소속도는 압력에만 의존한다. 추진제 고유의 상수들(a, b, B, n)은 실험에 의해서 구해진다. 위의 모델은 가장 이상적인 경우이며, 실제 현상에서는 침식연소(erosive burning)나 천이연소(transient burning)와 같은 이상연소가 발생한다. 침식연소란 뜨거운 가스가 추진제 표면 위를 매우 빠른 속도로 지나갈 때, 추진제 표면으로의 열전달(convective & radiative)이 증가하여 부분적으로 연소속도가 정상연소속도(normal burning velocity)보다 크게 증가하는 현상이다. 추진제 그레인에 성형된 구멍의 직경이 작고 길 경우 발생이 용이하다. 천이연소란 동적연소(dynamic burning)라고도 하며 주로 압력이 급격하게 변할 때(특히 점화초기), 정압(static pressure)뿐만 아니라 시간에 대한 압력의 변화율에 의해서 연소속도가 영향을 받는 현상이다. 따라서 점화현상과 관련하여 추진제의 초기연소현상의 해석에는 천이연소의 고려가 필수적이다.

연소가 진행되어 감에 따라 연소된 추진제의 중량의 변화는 그레인 형상에 의해서 결정되며, 이것을 하나의 식으로 표현한 것이 형상함수(form function)이다.

$$\phi = (1-f)(1+\theta \cdot f) \quad (5)$$

ϕ : 형상함수(form function)

θ : 형상인자(form factor)

f : 잔여웹분율(residual web fraction)

ϕ 는 형상함수로서, 연소 초기의 그레인 중량을 C 라고 할 때 $C\phi(t)$ 는 시간 t 까지 발생한 가스의 총 중량을 의미하고 연소초기에는 0, 연소종료시 1의 값을 갖는다. D 를 웹(web) 길이라고 할 때, $Df(t)$ 는 시간 t 에 남아 있는

웹의 길이가 된다. 따라서 f 는 연소초기에는 1, 연소종료시에는 0의 값을 갖는다. θ 는 그레인 형상 특유의 값이다. 그레인의 형상이 비교적 단순하고, 컴퓨터가 발달되지 못한 시대에는 그레인의 연소되는 양을 위와 같은 하나의 식으로 만들어야 강내탄도 해석이나 그레인형상간의 특성비교가 가능하였다. 하나의 식으로 묘사가 어려울 만큼 그레인의 형상이 복잡해졌지만(7- p , 19- p , Hexapon), 근자에는 강내탄도해석의 부프로그램(subroutine)으로써 형상함수해석(form function analysis)이 이루어지고 있다.

4. 강내탄도해석(Gun Interior Ballistic Analysis)

강내탄도학이란 화포의 포신 내에서의 탄체의 움직임과 그와 관련이 있는 모든 현상을 연구하는 분야이다. 화포체계를 연구개발하는 과정에서 강내탄도해석은 필수적이다. 화포의 종류, 크기 및 해결해야 할 문제의 다양성에 따라서 가장 적합한 강내탄도 모델(model)이 우선 설정되어야 한다. 이러한 모델은 반경험적(semi-empirical)인 지배방정식(governing equation)도 많이 포함한다. 해결하고자하는 문제에 가장 적합한 모델, 가장 적합한 전산코드가 사용되므로 다양하고 많은 코드가 개발되고 보완되어 사용된다. 몇 가지의 유형으로 분류하여 보면 다음과 같다.

(1) 추진제양산공정의 수락시험용(modelling of propellant acceptance tests)

자동화된 연속공정으로 추진제가 양산될 경우, 공정제어 및 신속한 약량(charge weight) 산출을 위한 화포모사(gun simulation)모델링이 필요하다.

(2) 기존의 화포 및 탄약성능개선용(improvement of existing gun performance)

탄체를 고정하고, 추진체를 변화시켜 보다 높은 포구속도의 가능성 판단 및 탄체의 무게

가 변화되었을 때, 제한된 압력 하에서 얻을 수 있는 최대포구속도의 예측등에 사용된다.

(3) 새로운 화포설계용 (design of new guns)

강의탄도 및 종말탄도분석과 연계하여 새로운 화포에 대한 제약조건 (constraint) 을 만족시키는 새로운 화포설계에 사용된다.

(4) 점화기 설계 및 점화현상해석용 (reduction of pressure waves in guns)

화포 내의 압력파 (pressure wave) 는 점화기와 깊은 관련이 있다. 점화현상은 매우 짧고 변화가 빠른 현상이므로 해석이 그 어느 경우보다 어렵다. 따라서 가장 복잡한 모델이 필요하다.

강내탄도해석의 기본방정식과 그 방법을 알아보기 위하여 가장 단순하고 이상화된 경우를 살펴보면 다음과 같다. 모델을 단순화시키기 위한 가장 큰 가정은 추진체가 연소되는 연소실 내에서는 온도와 압력이 공간적으로 균일하다는 것이다. 그러나 실제로는 약실에서 측정되는 압력과 탄체에 적용되는 압력에 큰 차이가 있고, 연소실내에는 탄체의 이동 방향을 따라서 진동하는 압력파가 존재한다.

(가) 에너지보존식 (energy equation)

$$Q = W + U + L \quad (6)$$

Q 는 추진체의 연소에 의한 방출에너지이고, W 는 탄체에 주어진 일, U 는 연소가스가 갖고 있는 내부에너지, L 은 2차적인 손실의 총합이다. 표 1에 의하면, Q 를 100이라고 할 때, W 는 30.6, 일차적인 손실인 U 가 40 정도이다. L 은 표 1에서 U 와 W 를 제외한 나머지의 합이다. 2차적인 손실 각각의 모델링이 모두 중요하지만, 강내탄도해석의 정확도 측면에서는 포신의 벽면을 통한 열손실이 크므로 가장 중요하다. 이 식을 정리하면 연소실 내의 압력에 관한 식이 된다.

(나) 상태방정식 (equation of state)

고압에서는 이상기체의 상태방정식을 사용할 수 없다. 고압에서 제안된 상태방정식 중에서 보통 covolume 형태의 Abel's eg이 많이 사용

된다.

$$P(V - \eta) = mRT \quad (7)$$

η : ocvolume of propellant gases

(다) 연소율방정식 (burning rate equation)

앞 절에서 고찰한 모델을 사용하면 다음과 같다.

$$\phi = (1 - f)(1 + \theta f) \Rightarrow \phi = \text{function}(f) \quad (8)$$

$$d\phi/dt = p \cdot S \cdot r / C \quad (9)$$

$$r = B \cdot P^n$$

여기서 C 는 장약의 중량이다.

(라) 탄체의 운동방정식

탄체의 가속도 a , 속도 V , 변위 X 는 뉴턴의 운동법칙에 의해서 다음과 같다.

$$a = \frac{A(P_B - P_R)}{(M_P)} \quad (10)$$

P_B 는 탄체에 작용하는 압력이고, P_R 은 탄체의 움직임에 반하는 저항력을 압력의 형태로 표현한 것이다. 강선포나 활강포 (smooth bore gun) 나에 따라서 P_R 의 모델링은 근본적으로 달라지고, 포의 구경, 노후정도 등에 의해서도 큰 변화가 있다.

$$V = \int_0^t a \cdot dt \quad (11)$$

$$X = \int_0^t V \cdot dt \quad (12)$$

이상과 같은 에너지보존식, 상태방정식, 연소율방정식, 탄체의 운동방정식을 시간에 대하여 적분하여 풀면, 압력변위선도를 포함한 가장 기본적인 강내탄도해석이 가능하다.

5. 맺음말

화포란 효율이 30% 정도인 열기관의 하나이다. 따라서 화포의 추진기구 (propulsion mechanism) 를 이해하고 예측하기 위해서는 추진체의 연소현상에 대한 이해가 필수적이다.

고체추진체의 연소현상은 압력에 절대적 영향을 받고, 상수들은 운용압력범위에서 실험적

으로 구한 값을 사용한다.

강내탄도해석은 해결하고자 하는 문제에 가장 적합한 모델설정, 그에 따른 전산코드의 사용으로 이루어지는데, 일반적인 강내탄도프로 그램에서 필요한 지배방정식은 에너지보존식, 고압에서의 상태방정식, 연소속도식, 탄체의 운동방정식 등이다.

후기

본 글을 다듬고 교정해 주신 국방과학연구소 이원백 실장님께 감사의 뜻을 포함합니다.

참고문헌

- (1) Corner, J., 1950, "Theory of Interior Ballistics of Guns", Wiley, New York.
- (2) Krier, H. and Summerfield, M.(eds.), 1979, "Progress in Astronautics and Aeronautics : Interior Ballistics of Guns", Vol. 66, AIAA, Wash., D.C.
- (3) Fisher, E.B., 1981, "Continued Development and Documentation of the CALSPAN Interior Ballistics Code", Rept. ARBRL-CR-00465.
- (4) Stiefel, L.(eds.), 1988, "Progress in Astronautics and Aeronautics : Gun Propulsion Technology", Vol. 109, AIAA, Wash., D.C.,
- (5) Kuo, K.K. and Summerfield, M.(eds.), 1984, "Progress in Astronautics and Aeronautics : Fundamentals of Solid-Propellant Combustion", Vol. 90, AIAA, Wash., D.C.,
- (6) 윤재건, 김종률, 1990, "화포추진제의 연소현상", 대한기계학회 '90년도 춘계학술대회 논문집 III, pp.255~258.
- (7) 광윤근, 이홍주, 김철환, 이회각, 1984, "병기공학", 청문각.
- (8) 김인철, 1990, 개인자료.



■ 국제학술대회 참가 안내 ■

International Symposium on Impact Engineering (ISIE) First Announcement

주 관 : ISIE

일 시 : 1992년 11월 2~4일(3일간)

장 소 : 일본 센다이(仙台)시

일 정 : 논문 abstract 마감(500 words) : 1991년 12월 31일

채택가부 통보 : 1992년 3월 31일

논문제출 마감 : 1992년 7월 31일

연락처 : 부산대학교 공과대학 기계설계공학과 김문생 교수

전화 (051)510-2318(1421)