

압축 충격파를 이용한 세라믹의 파괴특성에 관한 연구

황권태*· 김재훈[†]· 이영신*· 박종호*· 송기혁*· 윤수진**

A Study on the Fracture Characteristics of Ceramics Using Compressed Shock Wave

Kwon-Tae Hwang, Jae-Hoon Kim, Young-Shin Lee, Jong-Ho Park,
Kee-Hyeuk Song and Su-Jin Yoon

Key Words: Shock tunnel(충격파 터널), Fracture Pressure(파괴압력), Dome shape(돔형상), Fractured Shape(파괴형상).

Abstract

Fracture characteristics of plates and dome shapes for machinable glass ceramics using compressed shock wave. Machinable glass ceramics have been considered as a promising candidate material for the dome port cover of air breathing engine. This part of the air breathing engine has an important role separating solid and liquid fuel, and needs the frangible characteristics whereby the fracture of a part should not affect the internal components of combustion. The objective of this study are to evaluate the fracture pressure and phenomena of separated membrane using a shock tunnel. The experimental apparatus consists of driver, a driven section and a dump tank. The used material is machinable glass ceramic from Corning company. Specimens are used 3, 4.5 and 6mm thickness with plates and dome shapes. It is expected that the results obtained from this study can be used in the basic data for the dome port cover design of an air breathing engine.

기호설명

- P_1 : 저압부 압력 (bar)
 P_2 : 저압부 입사충격 뒤 압력 (bar)
 P_3 : 고압부 팽창과 전 압력 (bar)
 P_4 : 고압부 압력 (bar)
 P_5 : 반사파 압력 (bar)
 M_s : 입사충격파 마하수
 k : 가스의 비열비 ($\equiv c_p/c_v$)

1. 서 론

본 연구의 목적은 고체연료와 액체연료를 추진제로 사용하는 Air-breathing 엔진의 돔포트 커버 재료로 사용될 수 있는 세라믹을 선정하여 파괴 거동을 관찰하는 것이다. 돔포트 커버 재료의 특성으로는 잘게 부스러지고, 일정한 압력과 높은 온도에 대한 저항성이 있어야 하며, 파괴 직전까지 변형이 일어나지 않아야 하고 가공이 용이해야 한다⁽¹⁾. 이러한 성질을 가진 돔포트 커버의 재료와 유사한 세라믹인 Corning사의 Macor 세라믹을 선정하여 두께와 형상에 따른 파괴된 형상과 파괴 압력을 측정 하였다.

돔포트 커버는 파괴 시 까지 일정한 압력을 견디다가 고체 연료가 모두 연소되면 압력이 떨어져 램압으로 파괴된다⁽²⁾. 이러한 원리를 유사하게

[†] 중신회원, 충남대학교 기계설계공학과
E-mail : kimjhoon@cnu.ac.kr
TEL : (042)821-6645 FAX : (042)822-7366

* 충남대학교

** 국방과학연구소

적용시킬 수 있는 장치가 충격파 터널이다. 충격파 터널은 고압부에 압력을 채우고 다이어프램 파괴 시 압축파가 관을 따라 흐르게 되어 출구 쪽으로 방출되는 원리를 가지고 있다. 이러한 충격파 터널은 압축파나 증폭파의 유체 흐름을 이용하여 실험 할 수 있는 장비로써 충격파 및 고속공기 역학 연구의 유력한 실험 장치이다. 현재는 기계역학과 항공우주공학 분야뿐만 아니라 고온 물리학, 고속 고온의 화학 등 다양한 분야에서 널리 이용되고 있다^(3,4).

본 연구에서는 평판과 돔형상의 세라믹 시편에 대하여 두께를 변화시켜 파괴 압력을 측정하고 이론적인 파괴 압력과의 비교 및 파괴된 시편의 형상과 특성을 충격파 터널을 이용하여 관찰 하였다.

여기에서 얻어진 충격파관을 이용한 세라믹의 파괴 특성 데이터는 Air-breathing 엔진의 분리막 소재 개발의 기초 자료로 이용된다.

2. 관련 이론

충격파 터널에서의 유동을 해석하려면 다음과 같은 가정이 필요하다. 1. 유동은 1차원 유동으로 한다. 2. 가스의 비열비는 온도에 관계없이 일정하다. 기체는 완전 기체이고, 충격파를 제외하고 점도와 전도가 없는 등 엔트로피 유동으로 한다. 3. 고압실과 저압실을 막고 있는 격막은 순간적으로 열리고, 그 순간에 초기 조건으로 정한 일정 강도의 충격파가 형성되어 전달한다.

Fig. 1 에서는 충격파관의 개략도를 나타내고 있다.

충격파 터널에서의 고압부와 저압부의 압력비는 입사충격파 마하수를 결정하는 가장 중요한 인자로 위의 가정 아래 연속방정식과 운동량방정식, 에너지방정식을 이용하여 아래와 같은 식을 구할 수 있다.

$$\frac{P_4}{P_1} = \left[\frac{2k_1 M_s^2 - (k_1 - 1)}{k_1 + 1} \right] \cdot \left[\frac{1}{1 - \frac{a_1}{a_4} \frac{k_4 - 1}{k_1 + 1} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right)} \right]^{\frac{2k_4}{k_4 - 1}} \quad (1)$$

식 (1) 은 충격파 터널에서 얻을 수 있는 충격

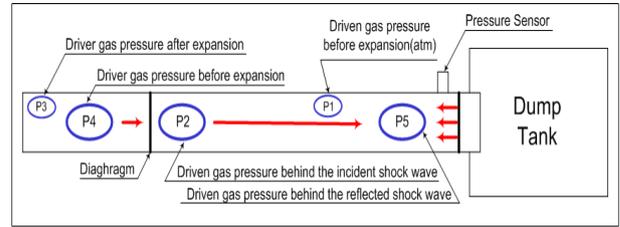


Fig. 1 Schematic diagram of shock tunnel

파 속도인 마하수는 고압관 내의 압력과 저압관 내의 압력 비 P_4/P_1 , 사용하는 가스들의 비열비 k 및 음속에 의해 결정된다.

세라믹 시편에 충격을 가하기 위한 시험을 하기 위하여 반사 충격파 뒤의 가스를 이용하는 방법을 사용할 것이다⁽⁵⁾.

입사파 압력과 저압부 압력비 P_2/P_1 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{2k_1 M_s^2 - k_1 - 1}{k_1 + 1} \quad (2)$$

또한 반사파와 입사파의 압력비 P_5/P_2 는 다음과 같다.

$$\frac{P_5}{P_2} = \frac{(3k_1 - 1)M_s^2 - 2(k_1 - 1)}{(k_1 - 1)M_s^2 + 2} \quad (3)$$

반사충격파 배후의 압력 P_5 와 초기압력 P_1 의 비는 식 (2), (3)에 따라 다음과 같이 계산된다⁽⁶⁾.

$$\frac{P_5}{P_1} = \left[\frac{2k_1 M_s^2 - (k_1 - 1)}{k_1 + 1} \right] \cdot \left[\frac{(3k_1 - 1)M_s^2 - 2(k_1 - 1)}{(k_1 - 1)M_s^2 + 2} \right] \quad (4)$$

본 논문에서는 시험가스와 구동가스 모두를 공기로 사용하였다.

3. 시험재료 및 시험방법

3.1 시험 재료

본 연구에 사용된 재료는 Corning 사의 Macor 세라믹이다. Table 1은 Macor 세라믹의 화학조성을 나타낸 것이며⁽⁷⁾, Table 2는 기계적 특성을 나

Table 1 Chemical compositions of Macor ceramic

Compositions	Approximate weight (%)
Silicon, SiO_2	46
Magnesium, MgO	17
Aluminum, Al_2O_3	16
Potassium, K_2O	10
Boron, B_2O_3	7
Fluorine, F	4

Table 2 Mechanical properties of Macor ceramic

Mechanical property	Value
Density, (g/cc)	2.52
Young's modulus at 25°C, (GPa)	67.7
Poisson's ratio	0.27
Compressive strength, (MPa)	341.7
Hardness of Rockwell, (H_{RA})	47.4
Fracture toughness, ($MPa\sqrt{m}$)	1.7

타낸 것이다. 또한, Fig. 2는 시편의 형상을 나타낸 것으로 시편의 지름은 98mm로 가공을 하였으며, 시편의 두께는 3, 4.5, 6mm로 준비하였다. 또한 돔형상의 경우 곡률반경을 80mm로 하였으며 곡률과 평면 사이에 불연속을 고려하여 곡률 25mm로 부드럽게 가공을 하였다. 공기를 시험가스로 사용하므로 $k=1.4$ 이고, 상온에서 실험하였으므로 $T=297K$ 이며, M_s 는 입사파의 마하수이다.

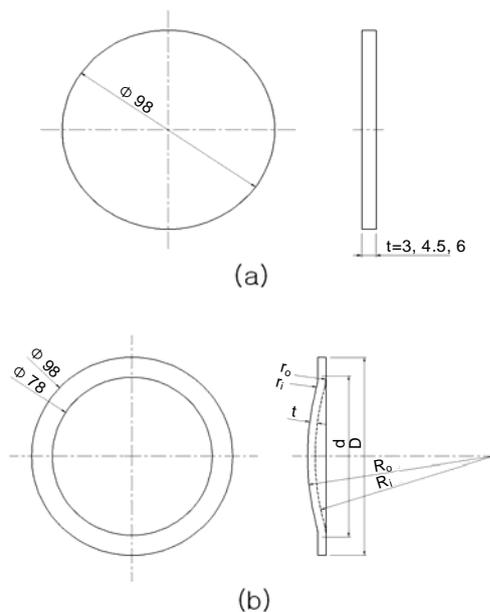


Fig. 2 Configurations and dimensions of Macor ceramics for (a) Plate, (b) Dome.

3.2 시험기기 및 시험방법

세라믹의 충격 파괴에 의한 파괴 현상을 연구하기 위한 장비는 압축파에 의한 충격파를 발생시킬 수 있는 Shock Tunnel 이다. 충남대학교 기계공학과 유체실험실에서 직접 설계 제작한 것으로서 최대 입사충격파의 마하수 M_s 는 4이다. 여러 가지 가스를 사용하여 다양한 마하수를 얻을 수 있는 장점을 가진 장비이다. Air-breathing 엔진이 마하수 3에서 작동되고, inlet 압력은 마하수 1 전 후 압력에서 분리막이 파괴된다고 예상하여 마하수 1~2.5를 얻을 수 있는 가스로 구동가스, 시험가스 모두 공기를 사용하였다⁽⁸⁾. Fig. 3은 충격파 터널을 나타내고 있다.

높은 압력과 압력의 조절을 용이하게 하기 위하여 2중 다이어프램을 사용하였고, 재료로는 1장당 5bar의 압력을 견딜 수 있는 OHP 필름을 사용하였다.

Fig. 4는 2중 다이어프램의 장착모습이다⁽⁹⁾.

고압부에 압력을 채우는 3상 에어 컴프레셔를 이용하여 압력을 가압하고 다이어프램 사이에 또한 원하는 압력을 가압한다. 그리고 시험장치의 끝부분에 시편을 Shock Tunnel과 수직하게 설치한 후 소켓을 끼워 완전히 고정한다. 돔형상 시편의 경우 오목한 부분에 충격파를 가하였다.

Shock Tunnel의 시편 장착부분에서 150mm 떨어진 부분에 압력센서 PCB 112A를 설치하고 오실로스코프와 연결하여 입사파압력(P_2)과 반사파압력(파괴압력, P_3)을 측정한다. 또한 시편을 수집하기 위하여 Shock Tunnel의 소켓부분과 Steel로 제작된 덤프탱크를 연결하였다. 세라믹이 압축 충격파에 의해 파괴된 후 덤프탱크 안의 벽면에 부딪혀 깨지는 것을 방지하기 위하여 10mm 두께



Fig. 3 Experimental apparatus of shock tunnel

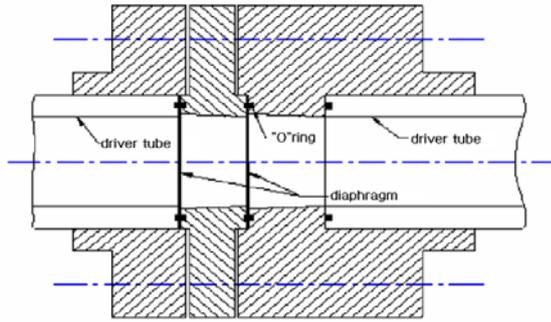


Fig. 4 Detail of diaphragm section

의 강화 고무판을 장착하였다.

각 두께별로 Macor 세라믹 시편을 장착하여 1bar 단위로 고압부의 압력을 증가시켜 각 두께에 따른 파괴 압력을 측정하였으며 불룩한 형상과 오목한 형상의 파괴된 모습과 파괴 압력을 측정하였다. 또한 파괴된 시편들을 수집하여 비산된 시편들의 거동을 연구하였다.

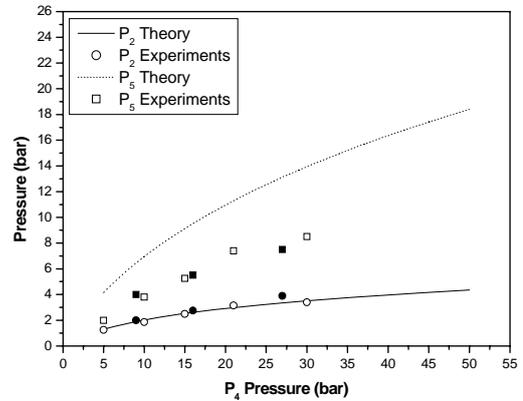
4. 결과 및 고찰

Table 3은 Macor 세라믹의 형상 및 두께에 따른 파괴압력(P_4)과 입사파(P_2) 및 반사파(P_5)의 실험 값 과 이론값을 나타낸 것이다. Fig. 5 는 각 시험압력에 대한 입사파와 반사파의 이론값과 실험값을 비교한 그래프이며, Fig. 6은 평판시편과 돔형상 시편의 파괴 압력을 비교한 그래프이다.

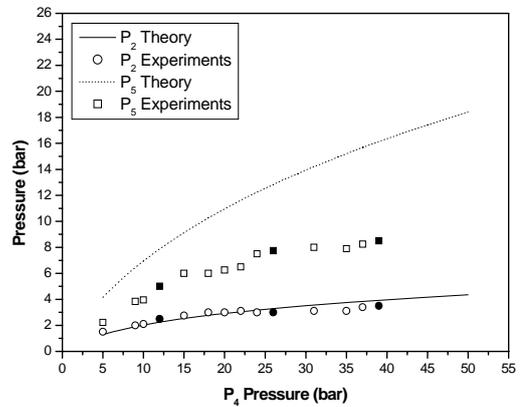
실험결과 입사파의 압력은 이론값과 잘 맞는 것으로 나왔으나 반사파의 경우 압력이 증가할수록 오차의 폭이 증가하는 것으로 나타났다.

Table 3 Result of pressures P_4 , P_2 and P_5

Pressure	Shape	Plate			Dome (Concave)		
		3.0	4.5	6.0	3.0	4.5	6.0
P_4 (bar)		9	16	27	12	26	39
P_2 (bar)	(Theory)	1.90	2.61	3.35	2.24	3.29	3.92
P_2 (bar)	(Experiment)	2.0	2.75	3.9	2.5	3.0	3.5
P_5 (bar)	(Theory)	6.45	9.52	13.13	7.87	12.83	16.14
P_5 (bar)	(Experiment)	4.0	5.5	7.5	5.0	7.75	8.5



(a)



(b)

Fig. 5 Pressure P_2 and Pressure P_5 for (a) Plate and (b) Dome

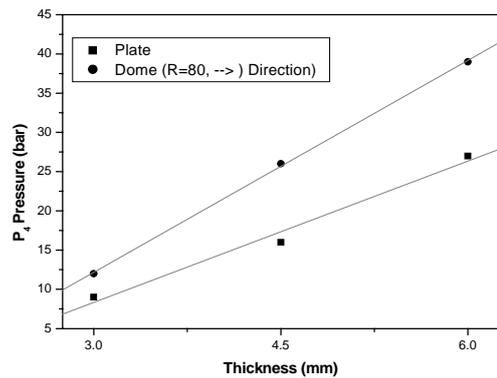


Fig. 6 Relationship of pressure P_4 and thickness for Plate and Dome specimen.

평판 시편과 돔형상 시편의 파괴압력을 비교해보면 돔형상 시편이 평판시편보다 파괴 압력이 높았으며, 두께가 증가할수록 파괴 압력의 차이는 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 Shock Tunnel 시험 후의 평판과 돔형상 시편에 대한 파괴 형상을 나타낸 것이다. 시험결과 돔형상의 두께 4.5mm가 비교적 적당한 압력과 깨끗한 제거를 보였으며, 파편도 잘게 부서지는 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 8 에서는 4.5mm 두께의 돔형상의 파괴 시편에 대해서 8, 4, 2, 1 mm 체에 걸러서 무게 분석을 하여 초기 시편에 대한 비율을 나타내었다.

Thickness	Fractured Shape	Fragments
3.0		
4.5		
6.0		

(a)

Thickness	Fractured Shape	Fragments
3.0		
4.5		
6.0		

(b)

Fig. 7 Photos of fractured shape after shock tunnel testing for (a) Plate and (b) Dome.

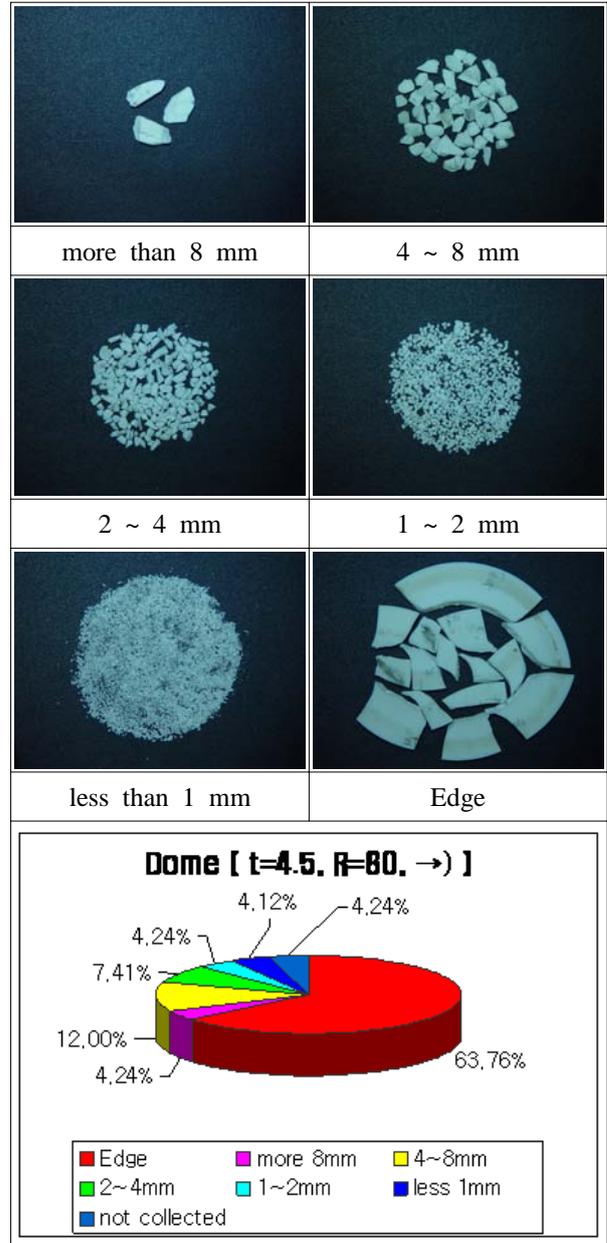
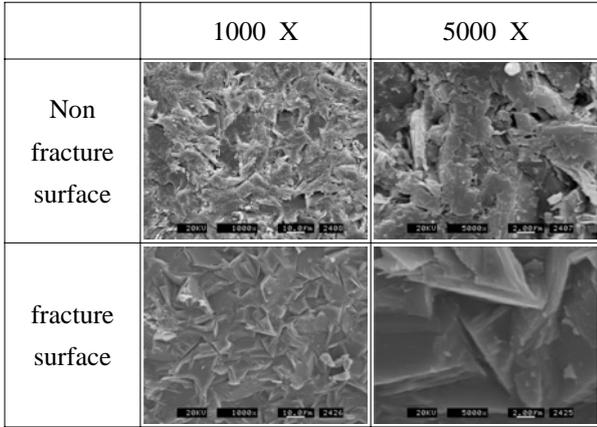
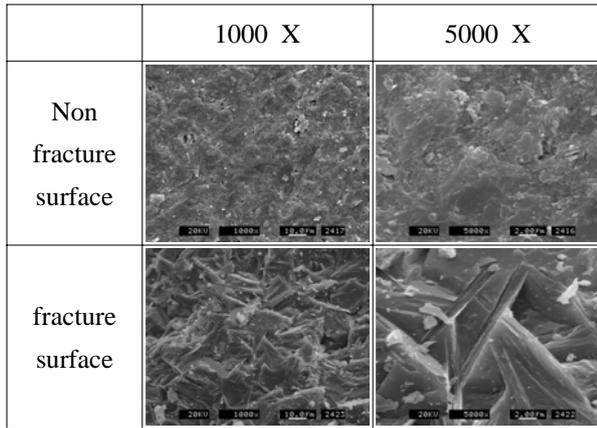


Fig. 8 Detail fragments for dome specimen(t=4.5).

Fig. 9 에서는 Macor 세라믹의 미세구조를 나타낸 것이며, Fig. 10은 가공 후의 표면에 대한 SEM 미세구조 및 파괴된 후의 파단면에 대한 미세 구조를 비교하여 나타낸 것이다. 관찰결과 미세 구조는 가공 후에 변화하였으며, 평판시편과 돔시편의 파괴되기 전의 표면 상태가 다른 것으로 나타났다. 그러나 파단된 후의 단면은 평판과 돔형상 시편 모두 날카롭게 깨진 것으로 나타났다. 파괴된 단면의 형상은 초기 시편의 형상에는 관계없이 같은 형상으로 나타났다.



(a)



(b)

Fig. 9 SEM micrographs of non-fracture surface and fracture surface for (a) Plate and (b) Dome.

5. 결 론

본 연구에서는 Shock Tunnel을 이용하여 Macor 세라믹의 충격파압력에 대한 파괴 압력의 이론값과 실험값을 비교하였으며, 파괴형상을 관찰하고 시험 전 후의 미세구조를 관찰하였으며, 결론은 다음과 같다.

1. 파괴 압력은 시편의 두께가 증가할수록 선형적으로 증가하며, 두께 증가에 따라 평판시편과 돔형상 시편의 파괴압력의 차이도 증가하였다. 또한 입사파의 경우 이론식과 실험값이 잘 맞았으나 반사파의 경우 이론값보다 실험값이 낮게 나왔다.
2. 파괴된 형상을 관찰한 결과 대부분 시편의 고정된 부분의 가까운 부분까지 깨끗하게 제거되었다. 그러나 돔형상의 6.0mm 두께의 경우 제거가

약간 덜 된 것으로 나타났다.

3. 파괴시편의 수집결과 대부분 잘게 부스러지는 특성이 나타났다.
4. 미세구조 관찰결과 파단면은 날카롭게 깨지는 것으로 나타났으며, 평판형상과 돔형상 모두 비슷한 양상으로 파단 되었다.

후 기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.(UD060012AD)

참고문헌

- (1) Scannell. P. R., Milich. N. R. and Kalil. E. O., 1980, "Advanced Integral Rocket Ramjet Port Cover Development," *AIAA Journal*, No. 1980-1279.
- (2) Webster. F. F., 1978, "Liquid Fueled Integral Rocket Ramjet Technology Review," *AIAA Journal*, No. 1978-1108.
- (3) Glass. I. I. & Hall. J. G., 1959, "handbook of Supersonic Aerodynamics," section 18, Shock tube, Vol. 6, pp.317~522.
- (4) Mirels. H., "Shock Tube Test Time Limitation due to Turbulent-wall Boundary Layer," *AIAA Journal*, Vol. 2, No 1.
- (5) A. Ferri., 1961, "Fundamental Data Obtained from Shock-Tube Experiment," pp.86~136.
- (6) Smith. L. G., 1945, "Photographic Investigation of the Reflection of Plane Shock in Air," OSRD Report 6271.
- (7) [Http://www.Corning.com](http://www.Corning.com)
- (8) Masao Takegoshi and Takeshi Kanda, 2008, "Research Activity on Rocket-Ramjet Combined cycle Engine in JAXA," *AJCPP 2008*.
- (9) So. M. S., 1997, "The Design and Performance Evaluation of a Ground Test Facility for High Speed Flow Simulation Test," Doctoral dissertation, Chungnam national university graduate school.