

내연기관의 연소실험을 위한 신형 급속 압축-팽창 장치의 개발

정 남 훈* · 배 중 욱**

Development of a New Rapid Compression-Expansion Machine for Combustion Test of Internal Combustion Engine

N. H. Jeong · J. U. Bae

Key words : internal combustion engine(내연기관), rapid compression-expansion machine(급속 압축-팽창 장치), compression ratio(압축비), compression speed(압축속도), optimum throttle opening area(최적 스톨 개도면적)

Abstract

Investigators who study on combustion in the cylinders of reciprocating piston type internal combustion engines have been encountered embarrassments due to the difficulties of adjusting specific parameter without interfacing other parameters such as cylinder wall temperature, composition of gas in the cylinder, existence of cylinder lubricant etc. Rapid compression-expansion machine, the position and speed of piston of which are able to be controlled by means of a system controlled electrically, and actuated hydraulically could be utilized as one of the most preferable countermeasures against those difficulties. Several units of rapid compression-expansion machines were developed but the speed up of frequency of piston movement still is the problem to be improved to cope with actual speed of internal combustion engines.

Authors designed and manufactured a new rapid compression-expansion machine electrically controlled, hydraulically actuated, and computer programed and then examined the performance of one. Results of a set of experiments revealed acquirements of certain improvement on frequency of piston movement preserving the stability of system response and reproducing accurate compression ratio of cylinder, those are the key function for the in-cylinder combustion experiments on internal combustion engines.

* 한국해양대학교 대학원 운항시스템공학과(원교접수일 : 2000년 5월)

** 한국해양대학교 해사대학 운항시스템공학부

1. 서 론

최근 내연기관은, 연비 향상은 물론이고 당연한 오염배출량 저감에 의한 환경 개선을 목적으로 과급, EGR, 고압분사, 물분사 및 축압식 분사 등 다양한 연소 방식을 동원하여 실린더 내의 실험적 연소에 대한 연구가 진행되고 있다. 연소실내의 연소 과정을 관찰하는 것이 엔진개발에 대단히 유용하나, 내연기관에서의 연소는 수 10 ms에서 진행하며 여러 가지의 연소 파라미터들이 상호 연관하여 변화하므로 다른 연소 조건들을 고정시켜 둔 상태로 특정 조건만을 조절하는 것은 불가능에 가깝다. 그렇기 때문에 단발연소실험을 할 수 있는 급속 압축 장치와 급속 압축-팽창 장치를 이용한 실험이 이 문제에 대한 가장 바람직한 방법으로 취급되어 왔다¹⁾. 池上²⁾ 등은 고압질소 구동방식, 小林³⁾ 등은 고압질소구동-유압제동방식으로 급속 압축 장치를 개발하였다. 그 이후 전자제어 유압구동방식의 급속 압축-팽창 장치가 개발되었다⁴⁻⁶⁾. 전자제어 유압구동방식은 소형, 고출력이며 압축비를 자유롭게 조절할 수 있기 때문에 이 방식이 채용되고 있다.

이전에 개발된 급속 압축-팽창 장치는 연소실험을 통하여 다음과 같은 특성이 확인되었다. 1) 전기 히터에 의해 연소실 각 부분 온도의 독립 제어가 가능하고, 2) 무급유 피스톤의 사용으로 실린더 윤활유 영향이 없는 배기 특성의 실험이 가능하며, 3) 흡기 조성, 압력, 온도 등 압축 시 분위기 상태의 광범위한 조절이 가능하고, 4) 소량의 연료로 연소실험이 가능하며, 5) 대부분의 광학계측이 가능하다.

본 연구에서는 기존의 장치⁶⁾와 같은 방식을 채용하고 피스톤의 동작 빈도를 향상시키기 위하여 유압계통을 개선시켰으며, 피스톤의 행정을 대폭 증대하여 충분한 실린더 내 공간을 확보할 수 있도록 신행 급속 압축 팽창 장치를 설계, 제작하여 그 성능과 특성을 조사하고 그 결과를 보고한다.

2. 실험장치 및 방법

급속 압축-팽창 장치는 순간적인 출력과 정확

한 위치제어가 필요하기 때문에 기존 장치와 같은 전자제어, 유압구동방식을 사용하였다. 피스톤을 급속 압축-팽창시키기 위하여 컴퓨터에서 나온 신호는 서보밸브를 구동하고, 이에 의해 스푼(Spool)과 액츄에이터(Actuator)가 구동된다. 스푼과 액츄에이터의 제원은 Table 1과 같다.

더욱 정확한 피스톤의 위치 정밀도를 위해서 스푼 변위와 액츄에이터의 변위를 피드 백(feed back)하는 2중 루프제어방식을 사용하였다.

Fig.1에서 나타낸 것과 같이 실험장치의 구성요소는 PC, D/A 컨버터(DA12-4(PC), CONTAC), 서보 콘트롤러(SK1056-100-20, YUKEN), 서보밸브(SVD-F13, YUKEN), 레이저 변위계(LB-02, KEYENCE), 레이저 변위계 증폭기(LB-62, KEYENCE), 연결상자 등이다. 서보밸브 콘트롤러에서는 스푼과 액츄에이터의 변위가 피드 백되어 서보밸브의 개폐량이 조절된다. 레이저 변위계와 서보밸브의 제원은 Table 2와 같다.

Table 1. Specification of spool and actuator

	Spool	Actuator
Max. stroke	11 mm	150 mm
Bore	60 mm	100 mm
Over lap	1.5 mm	-

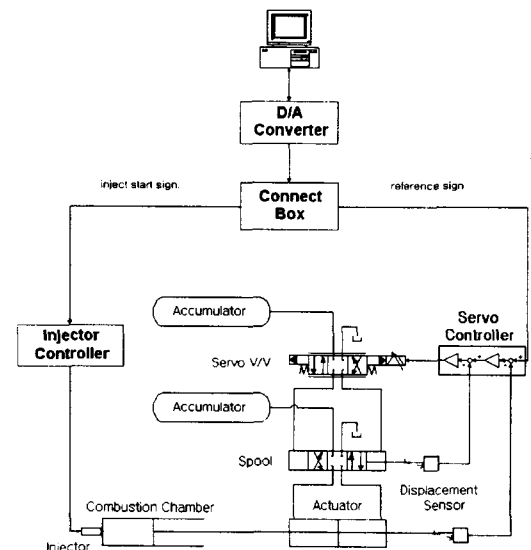


Fig. 1 Control system of a new RCEM

Table 2 Specification of laser sensor and servo valve

	Laser sensor
Laser	Wave 780 nm
Measuring range	± 10 mm
Resolving power	2 μm(at 60 ms)
Output	± 4 V
	Servo valve
Dynamic response	190Hz(at 60 l/min)
Operating pressure	Max. 21.4 MPa
Leakage at 14.3 MPa	less than 2 l/min

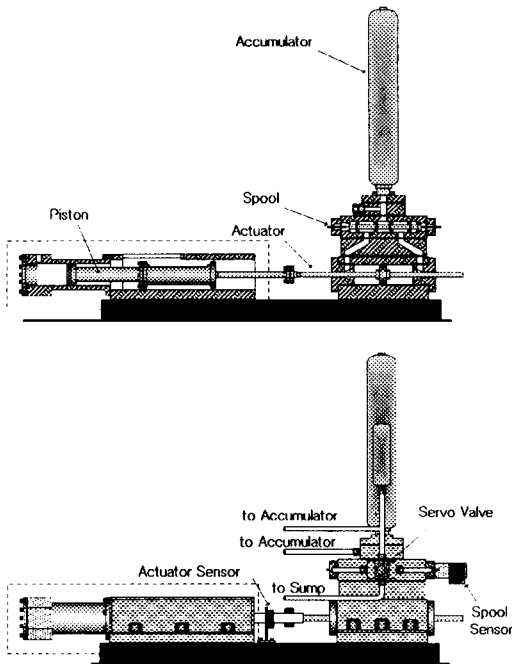


Fig. 2 Sectional view and outlook of a new RCEM (the parts enclosed by dotted line are cylinder & piston to be manufactured later)

스풀 및 액츄에이터 구동용 축압기(Accumulator)의 압력은 21.4 MPa이며, 액츄에이터 구동용 축압기의 용량은 60 l이다. Fig.2는 급속 압축-팽창 장치의 단면도와 외형도를 나타낸 것이다.

Kobori® 등에 의하면 무부하 동작 시와 연소실 최고압력 10 MPa의 부하 동작 시를 비교한 결과 위상 지연에 대한 최고압력의 영향은 거의 없고 게인(gain)에는 근소한 차이가 나는 것으로 보고되

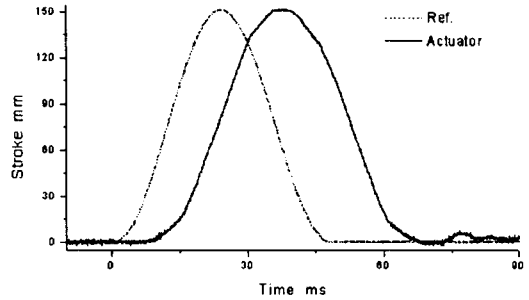


Fig. 3 A sample curves of actuator displacement in accordance with reference signal at 21 Hz

고 있다. 선행 연구의 경우와 동일한 압력으로 구동시키며, 액츄에이터의 수압면적도 동일하므로 본 연구에서는 피스톤이 제작되지 않은 상태에서 무부하 시험만을 시행하였으며, 컴퓨터로부터의 입력신호와 서보컨트롤러로 피드 백되는 액츄에이터 변위센서의 신호를 측정하여 액츄에이터의 작동 성능을 연구, 조사하였다.

Fig.3은 시간에 대하여 입력 정현파에 따른 액츄에이터의 변위를 나타내는 예이다.

3. 결과 및 고찰

3. 1. 압축비의 재현성

이 장치를 내연기관의 연소실험에 사용하기 위해서는 정확한 압축비의 재현성이 요구되며, 이것은 상사점의 위치제어나 하사점의 위치제어를 통하여 얻을 수 있다.

우선 상사점의 위치제어만을 통하여 압축비의 재현성을 조사하여 보았다. 행정 140 mm, 실린더 직경 100mm, 압축비 15인 연소실을 가정하여 주파수의 변화에 따른 상사점의 위치를 5회씩 측정하였을 때 상사점의 위치 변화와 압축비를 Fig.4에 나타내었다.

액츄에이터의 정지 위치의 변화 폭은 주파수에 따라 증가하고, 같은 주파수에서 최대 ±2 mm 이 내이지만, 이것을 압축비로 환산하면 13.1에서 17.6까지의 변화를 나타내는 것이 되기 때문에 상사점의 위치제어를 통하여 압축비를 결정하는 것은 곤란하다는 것을 알았다.

따라서 상사점의 위치는 액츄에이터가 액츄에

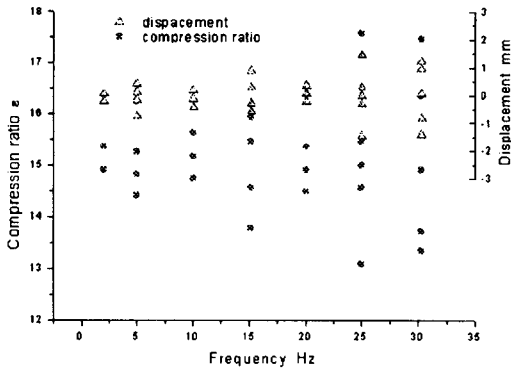


Fig. 4 Compression ratio and displacement of assuming the stroke to be 140 mm, cylinder bore 100 mm, compression ratio 15

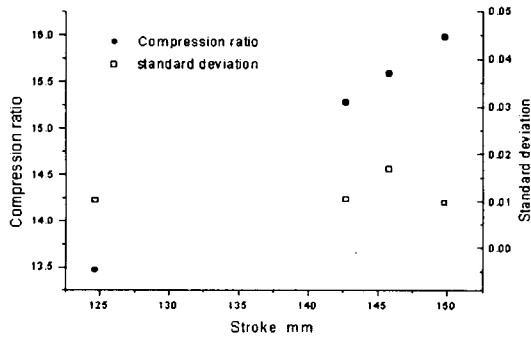


Fig. 5 Mean compression ratio and standard deviation by contact method

이더 실린더 벽에 접촉하여 정지하는 방법을 사용하여 고정하고, 하사점 위치는 압축 시작 전 정지 상태의 위치를 제어함으로써 압축비를 결정하는 방식을 사용하였다. 행정 140 mm, 실린더 직경 100 mm, 압축비 15인 연소실을 가정하였을 때 하사점 위치제어만을 통하여 15회씩 얻은 평균 압축비와 표준편차를 Fig.5에 나타내었다. 압축비의 표준편차는 전 범위에서 0.02 이내이다.

그러므로 상사점의 위치는 고정하고 하사점의 위치만을 제어함으로써 주파수의 영향이 없으며 정확하고 다양한 압축비의 재현이 가능함을 확인하였다.

3. 2. 니들밸브의 영향

액츄에이터를 액츄에이터 실린더 벽에 접촉시켜 상사점을 얻으므로 이 충격을 감소시키기 위하

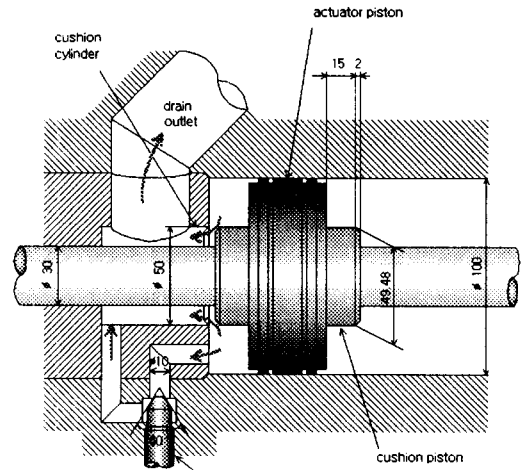


Fig. 6 Oil cushion at actuator

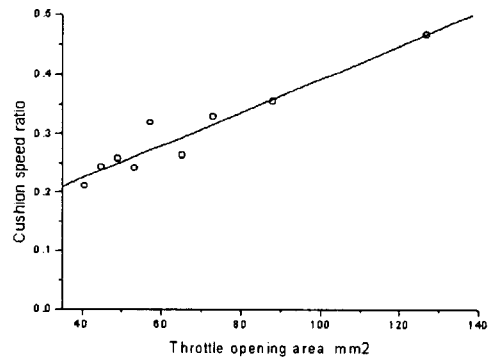


Fig. 7 Cushion speed ratio as throttle opening area at 20 Hz

여 액츄에이터의 양단에 유압 쿠션을 설치하였다.

Fig.6은 유압 쿠션의 구조와 쿠션 조절용 니들밸브를 나타낸다. 쿠션 피스톤이 쿠션 실린더에 삽입될 때부터 작동유는 쿠션 실린더와 쿠션 피스톤의 틈새를 통하여 스로틀 되면서 드레인 출구로 배출되며, 2개의 니들밸브 개도(開度)를 조절함으로써 쿠션강도를 조절할 수 있다. 본 연구에서는 쿠션 피스톤과 쿠션 실린더의 틈새면적과 니들밸브의 개도면적을 합하여 스로틀 개도면적(throttle opening area)라고 정의한다. 또 쿠션 피스톤이 쿠션에 삽입되기 전의 액츄에이터 속도에 대한 삽입 후 감속된 액츄에이터의 속도비를 쿠션 속도비(cushion speed ratio)라고 하고, 이 값이 0.5가 되는 스로틀 개도를 최적 스로틀 개도(optimum

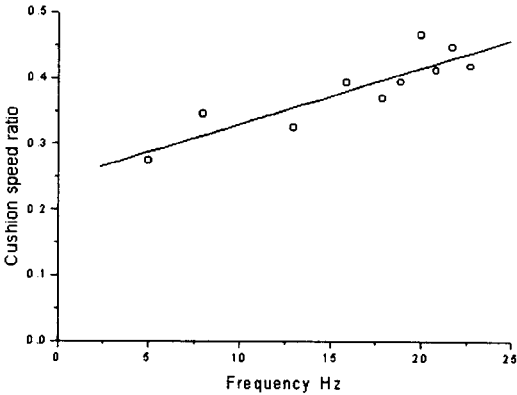


Fig. 8 Cushion speed ratio as frequency at throttle opening area 126.8 mm²

throttle opening area)라고 정의한다.

Fig.7은 입력신호를 20 Hz의 정현파로 일정히 하였을 때 스로틀 개도에 따른 쿠션 속도비를 조사한 것이다. 쿠션 속도비는 스로틀 개도면적의 증가에 따라 직선적으로 증가하였다.

Fig.8은 스로틀 개도면적을 126.8mm²로 일정히 하였을 때 입력 정현파의 주파수에 따른 쿠션 속도비를 나타낸 것이다. 이때 역시 쿠션 속도비는 주파수의 증가에 따라 직선적으로 변화함을 확인하였다. 위의 두 결과로부터, 20 Hz에서의 최적 스로틀 개도면적 138.1 mm²를 얻었으며, 126 mm²가 최적 스로틀 개도면적이 되는 주파수 29.8 Hz를 얻었다. Fig.9는 이 두 점을 연결한 것으로 전운전 범위에서 입력 정현파의 주파수에 따른 최적 스로틀 개도면적을 얻는 것이 가능하였다.

3. 3. 주파수 응답특성

시스템의 주파수 응답특성을 조사하기 위하여 스로틀 개도면적 126.8 mm², 하사점 1 mm일 때, 1Hz의 입력 정현파에서 액츄에이터의 행정 149 mm를 얻는 진폭을 찾았다. Fig.10은 이 진폭으로 일정히 하였을 때의 주파수 응답특성을 나타내는 보드선도이다. 이 시스템은 다차 시스템이기 때문에 오버슈트가 발생하지만, 앞에서 설명한 것처럼 상사점의 위치가 제한되어 있으므로 최대 게인(gain)은 0 dB이다.

보드선도에서 29.4 Hz까지는 게인 0.0 dB을 유지하고 있으며, 15.8 Hz에서부터 위상지연이 크게

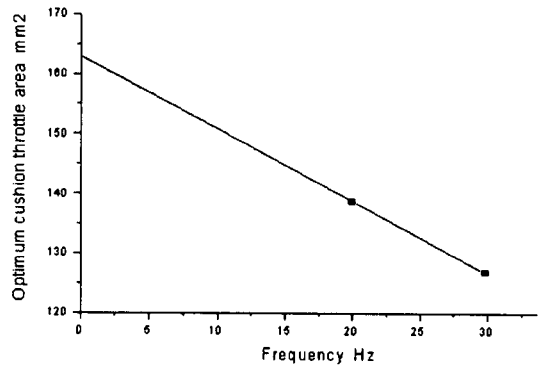


Fig. 9 Optimum throttle opening area as frequency

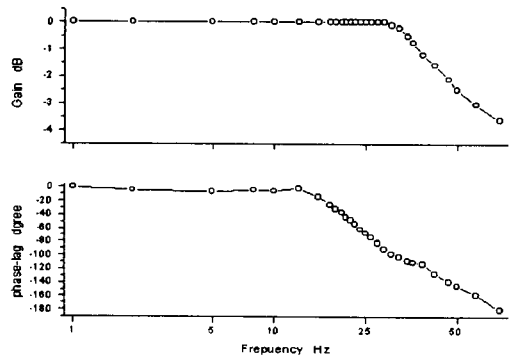


Fig.10 Bode plot of a new RCEM

증가하기 시작하여 62.5 Hz에서는 179.4°에 이르고 있는 것을 알 수 있다. 최대행정 100 mm인 기존 급속 압축-팽창 장치는 게인 0.0 dB인 최대 주파수는 16.7 Hz이었고 이때 위상지연은 약 40°이었으나⁶⁾, 본 장치는 게인 0.0 dB인 최대 주파수는 29.4 Hz이며, 기존 장치와 같은 위상지연 40°되는 주파수는 20.8 Hz이었다. 따라서 최대 행정이 150% 증가하였음에도 불구하고, 액츄에이터 구동용 축압기의 용량증대, 축압기와 액츄에이터 사이의 유로 개선, 서보밸브의 응답속도 향상 등을 통하여 주파수 응답특성이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

위상지연이 -180°일 때 게인이 0 dB이하이거나, 또는 게인이 0 dB일 때 위상각이 -180°이내에 있으면 안정하기 때문에 본 시스템은 안정하고, 이때 게인여유(gain margin)는 3.61dB이며 위상여유(phase margin)는 81.6°이다.

3.4. 압축속도

피스톤 왕복식 내연기관의 연소 시험에 급속 압축-팽창 장치를 활용하는데 있어서 압축 속도가 중요하다고 할 수 있다. Fig.11는 입력신호의 주파수를 요구 피스톤 속도(required piston speed)로 간주하고 액츄에이터의 실제 주파수를 실제 피스톤 속도(actual piston speed)라고 볼 때, 요구 피스톤 속도에 대한 실제의 피스톤 속도의 실현 상태를 나타낸다. 보드선도에서 31.3 Hz에서 개인 -0.102 dB이기 때문에, 29.4 Hz까지 입력 정현파에 대한 액츄에이터의 속도를 나타내었으며 신호가 입력되어 액츄에이터가 움직이기 시작하는 시간은 지연기간을 뺀 액츄에이터의 압축속도를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

주파수가 18.1 Hz이하의 범위에서는 주파수가 증가함에 따라 액츄에이터의 속도도 빨라지나, 그 이상의 주파수에서는 액츄에이터의 속도증가가 급격히 감소하였다. 이러한 현상은 Kobori⁶⁾ 등이 제시한 바 스프링의 오버랩 가공에 따른 영향으로 생각된다. 시험의 범위에서 최고의 실제 피스톤 속도는 19.4Hz를 얻을 수 있으며 이는 크랭크 회전수 1162rpm에 상당한다.

4. 결 론

내연기관의 연소실험을 위한 신형 급속 압축-팽창 장치를 설계 제작하고 그 성능시험으로부터

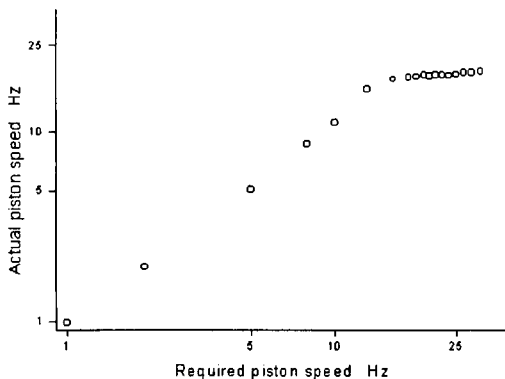


Fig.11 Actual piston speed as required piston speed

다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 다양한 압축비로 조정이 가능하고, 압축비 표준편차 0.01~0.02의 정밀도를 갖는 RCEM이 실현되었다.
2. 유압 쿠션장치의 니들밸브로써 쿠션강도의 조정이 가능하며, 주파수에 따른 최적 스톱트 개도면적을 결정할 수 있다.
3. 최대행정 증가에도 불구하고, 기존 RCEM보다 주파수 응답특성이 향상되었음을 확인하였다.
4. 무부하 운전시험으로써 최고 피스톤 압축속도가 19.4Hz(1162rpm 상당)인 RCEM이 실현되었다.

참고문헌

1. 河野 通方, 角田 敏一, 勝本 元, 氏家 康成, 最新内燃機關, 朝倉書店, P. 53~71, 1995
2. 池上 詢, 三輪 惠, 稻田 満, “急速壓縮裝置によるディーゼル噴霧の着火および燃焼の研究”, 日本機械學會, 47권 413호, 1981
3. 小林 治樹, 神本 武征, 松岡 信, “ディーゼル機關の燃焼および熱傳達の基本的研究のための大形急速壓縮裝置の試作”, 日本機械學會, 48권 425호, 1982
4. Tasakuni Hayashi, Masahiro Taki, Shinji Kojima and Teruaki Kondo, “Photographic Observation of Knock with Rapid Compression and Expansion Machine”, SAE, 841336, 1984
5. 神本 武征, 神 英彦, 小堀 繁治, 小林 治樹, 土屋 一雄, “ディーゼル機關の燃焼のための急速壓縮膨脹裝置の試作に関する研究”, 日本機械學會, 55권 512호, 1989
6. Shigeharu Kobori and Takeyuki Kamimoto, “Development of a Rapid Compression-Expansion Machine Simulating Diesel Combustion”, SAE, 952514, 1995
7. 林 眞作, 吉田 裕一, 電氣電子工學大百科事典, 2권, P. 135~150, 1984

저 자 소 개



정남훈 (鄭南勳)

1974년 3월생. 1997년 한국해양대학교 운
항시스템공학부 졸업. 1998년~현재 동 대
학원 재학중. 1999년 4월~2000년 2월 일
본 동경공업대학 단기 교환학생



배종욱 (裴鍾旭)

1948년 2월생. 1970년 한국해양대학교 기
관공학과 졸업. 1985년 부산수산대학교 기
관학과 대학원 졸업(석사). 1990년 동 대
학원 졸업(박사). 1976년~현재 한국해양
대학교 해사대학 교수.