

## 해양공학광폭수조의 탱크특성함수 생성을 위한 연구\*

신현경\*\*, 김성겸\*\*\*  
수송시스템공학부

### A Study on the Creation of Tank Transfer Functions of the Ocean Engineering Wide Tank

H. Shin, S.K. Kim  
School of Transportation Systems Engineering

#### <Abstract>

The wavemaker and software in the UOU Ocean Engineering Wide Tank provide a complete package for wave generation and data collection. The wavemaker generates accurate waves and controls the hardware by "OCEAN" software and "WAVE" language. Both "OCEAN" and "WAVE" use a Tank Transfer Function to translate output signals to physical wave heights, and this is kept in the ulsan.ttf file along with details about the tank depth and the number of paddles and sample devices. The optimized information of TTF file was acquired by a lot of experiments.

#### 1. 서론

21세기 선진해양국 진입을 위한 해양공학교육 및 연구의 기본설비인 해양공학광폭수조(Ocean Engineering Wide Tank)에서는 실험해상상태 재현과 파력실험, 부유식 해양구조물의 고정 또는 예인실험, 조종실험 등 여러 가지 실험이 가능하다. 그러나 이런 많은 실험들이 파랑중에서 실시되기 위해서는 파도생성을 제어하기 위한 탱크특성함수(Tank

---

\* 이 논문은 1998년 울산대학교의 연구비에 의하여 지원되었음.

\*\* 울산대학교 수송시스템공학부 교수

\*\*\* 울산대학교 수송시스템공학부 대학원

Transfer Function)가 생성되어야 하며, 실험 가능한 신뢰구역의 조사가 선행되어야 한다.  
 조파기의 패들(paddle) 수, 수심, 데이터 취득기구(sampling device) 등에 대한 상세한 정보와 정확한 파도를 만들기 위한 변수값들을 포함한 탱크특성함수(TTF) 생성을 위한 연구가 수행되었으며 본 논문에서는 울산대학교 해양공학수조의 조파성능을 제시한다.

## 2. 장비

### (1) 조파기

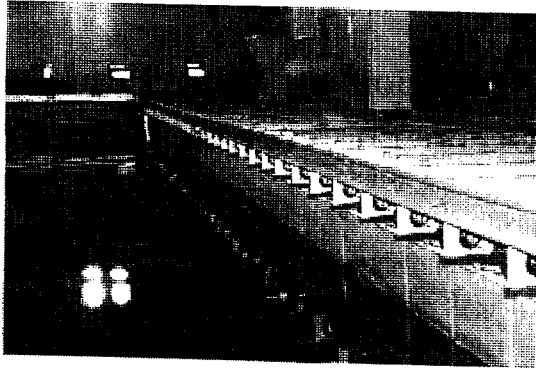


Fig 1 UOU Wavemaker

#### A. 조파기의 구성 (Composition)

- ① 다방향성 흡수식(multi-directional absorbing) 조파기
- ② 구동시스템 (Drive system)
- ③ 제어시스템 (Control system)
- ④ 데이터 처리 시스템 (Data acquisition system)

#### B. 제원

- ① 생성 가능 파도
  - 규칙파 : Sine파 (평행파, 사파)
  - 불규칙파 : Pierson-Moskowitz, JONSWAP, ISSC, ITTC, Bretschneider, Neumann 등
- ② 최대 파고 : 20cm (0.875Hz 일 때)
- ③ 주기 : 0.5 ~ 5sec
- ④ 조파판 (paddle)
  - 종류 : Flap type
  - 폭 : 0.5m
  - 갯수 : 40개

## (2) 파고계와 증폭기

Fig.2에서 실험에 사용된 저항식 파고계와 증폭기를 볼 수 있으며, Fig.3은 파고계가 부착된 예인전차(carriage)를 보여준다.

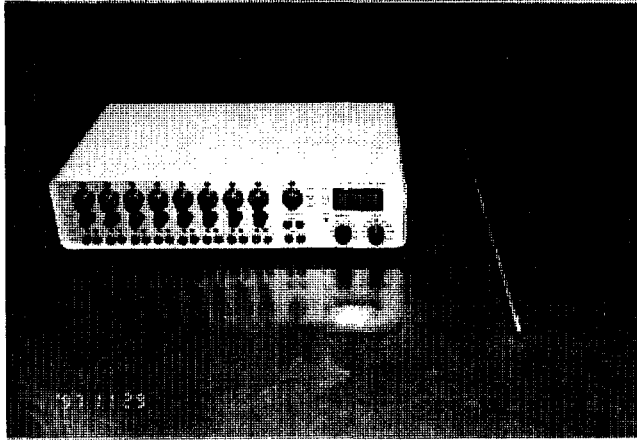


Fig. 2 Amplifier and Wave probe

저항식 파고계의 원리는 파고계의 프루브(probe)가 물에 잠기는 깊이에 따라 저항이 변하는데 있다.[1]

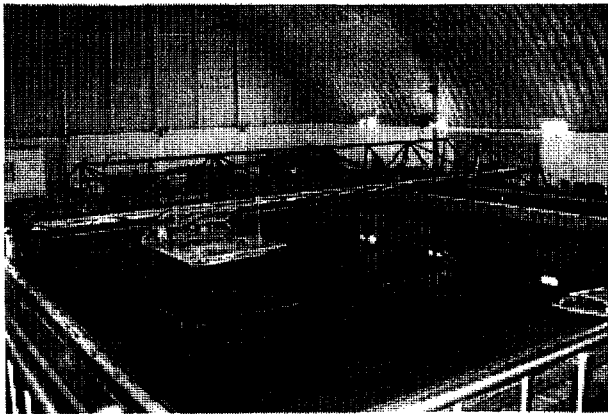


Fig. 3 Carriage with wave probes

## 3. 데이터와 신호의 흐름

### (1) 데이터의 흐름

“OCEAN” 소프트웨어는 수조에서의 실험에 요구되어지는 운용과 결과의 분석을 위한 과정

을 제공한다. “WAVE” 언어는 이 소프트웨어에서 사용하기 위해 만들어진 최적화된 복합적 언어이다. 이 “WAVE” 언어로 작성된 조파 프로그램이 컴파일되고 실행되어 데이터 파일을 생성하는 과정은 Fig. 4와 같다.

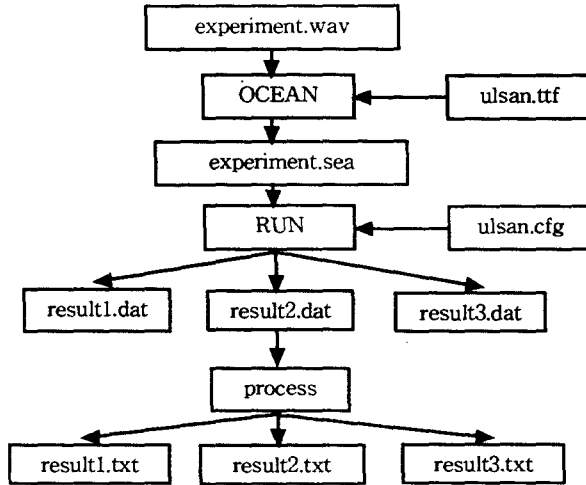


Fig. 4 File Flow Chart

A. 컴파일 : “OCEAN”을 이용하여 컴파일한다. 이 때 컴파일러는 “ulsan.ttf”파일을 참조하여 텍스트 문서에서 작성된 experiment.wav 문에 문법적 오류가 있는지 확인하고 오류가 없을 때 기계어로 번역된 “experiment.sea” 파일이 생성된다. 그리고 “ulsan.ttf”파일에는 탱크특성함수가 포함되어 있는데 그 역할은 주어진 입력값을 만족하는 파고와 주파수의 파를 생성하기 위해 패들 움직임의 크기와 속도 및 위상을 조정하기 위한 상수값이 포함되어 있다.

B. 파의 생성 : “RUN”은 “.sea” 파일의 내용대로 파를 생성시키는 실행 명령이다. 파의 생성을 위해 “ulsan.cfg” 파일이 불러지며 “ulsan.cfg”파일 속에는 수조의 크기와 수심, 패들의 수 등의 정보와 조파에 필요한 이론식에서의 상수값들이 포함되어 있다.

C. 후처리(Post-processing) : 마지막으로 “process”는 취득된 데이터 파일을 사람이 볼 수 있는 텍스트 문서파일로 변환시킨다.[2]

## (2) 신호의 흐름

PC로부터의 조파 명령은 인터페이스 박스를 통해 조파기를 제어하는 제어박스로 신호를 전달한다.(Fig.5) 제어박스는 주어진 신호에 따라 40개의 패들을 제어한다. 이렇게 생성된 파도를 파고계가 계측하고 앰프에서 신호가 증폭된 후 인터페이스 박스로 보내지며 다시 이 신호는 PC안의 인터페이스 카드에서 디지털 신호로 변환되어 PC에 데이터 파일로 저장된다.[3]

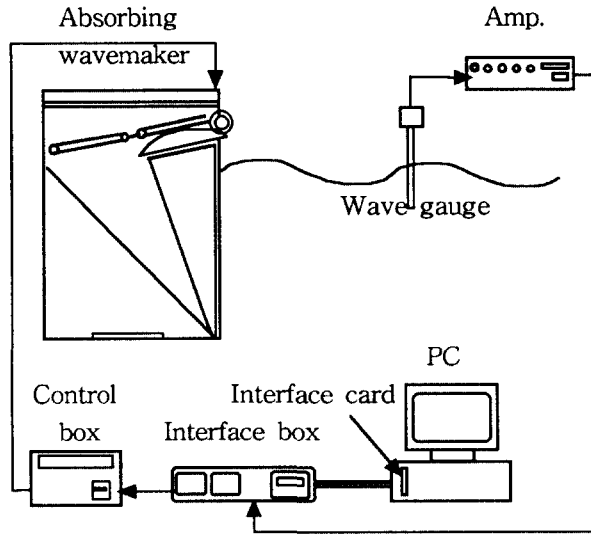


Fig. 5 Overview of the UOU Tank System

### 4. 조파실험

#### (1) 조파한계

Fig.6의 파도특성곡선에서와 같이 중력과 점성 및 장치상의 영향으로 인한 조파의 한계가 주어진다.

종모양의 아래쪽은 조파가 가능한 영역이고 바깥쪽은 조파가 불가능한 영역이다. 조파가 불가능한 영역중 종모양의 왼편은 조파판의 크기나 움직임의 한계로 인하여 그 이상의 파고를 못 만드는 경우이고 종모양의 오른쪽은 중력의 영향으로 파도가 부서지기 때문에 조파가 불가능하다.

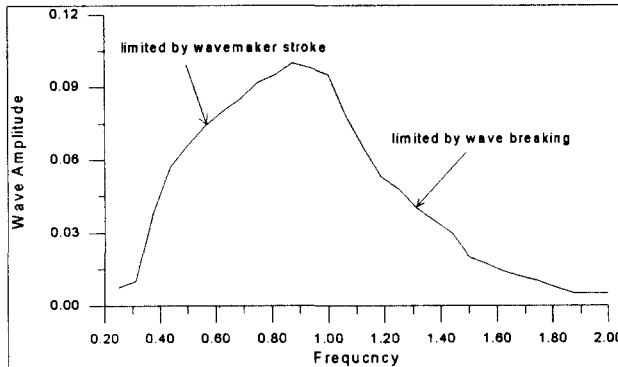


Fig. 6 Wave Characteristic Curve of the UOU Ocean Engineering Wide Tank

본 수조에서는 0.875Hz에서 최대파고 0.20m의 규칙파를 만들 수 있다.

## (2) 조파시간

이 조파시스템은 초당 16개의 데이터를 취득하도록 결정되어 있다. 조파를 위한 패들의 움직임은 가속시간(ramp time), 감속시간(ramp down)이라는 시간을 가지고 서서히 움직임을 시작하고 끝낸다. 이는 조파시의 무리한 가동을 방지하기 위한 것이다. Fig. 7에서 취득 시간(repeat time)은 데이터를 읽어들이는 시간을 나타낸다. 데이터 취득은 일정시간으로 지정할 수 있으며 파도가 생성된 후 데이터를 취득하지 않고 기다리는 시간을 취득 지연 시간(sampling delay time)이라 한다.

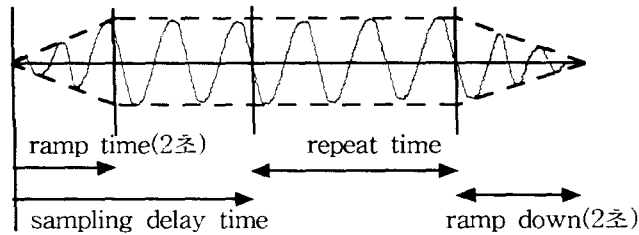


Fig. 7 Sampling Time

아래의 간단한 조파 프로그램을 보면서 위에서 설명한 값들을 다시 살펴보면

```
run "test wave" with (10, 256, 1, 32)
  makewave single(1.0, 0.06) on 1;
  makewave front(32, 0.06) on 1;
end;
```

위 프로그램의 제일 윗줄의 괄호 안의 값은  $n_{number} = 10$ ,  $sampling\ delay$ (취득 지연) = 256,  $sample-repeats$ (조파 반복 횟수) = 1,  $ramp$ (가감속) = 32 순으로 입력되어 있다. 이 때 취득시간(repeat time)은 식(1)에 의해 64초가 된다.

$$repeat\ time = \frac{2^{n_{number}}}{clock\_rate} \quad (1)$$

$$frequency = \frac{front\ number * clock\ rate}{2^{n_{number}}} \quad (2)$$

여기서,

clock rate : 초당 sampling 횟수이다. 디폴트값이 16Hz로 정해져있다.

A. number : 파도생성시간을  $2^{n_{number}} / clock\ rate$ 로 정의하며 다른 변수값의 결정에 영향을 준다.

B. sample-delay : 조파 후 데이터 취득을 시작할 때 까지의 시간이다. 그것의 default

값은 256이다.

C. sample-repeats : “experiment” 문장의 반복실행 횟수이다. 이것의 default 값은 1이다.

D. front\_number : 진동수를 “WAVE” 언어에서 사용할 때 수학적으로 용이하게 쓰기 위해 변형한 값이다. 가령 주파수를 0.8125Hz라고 쓰는 것보다 26(front\_number)로 쓰는 것이 프로그램상에서 루프문의 변수값으로 사용하기 편리하다.

두 번째 줄의 괄호안의 값은 주파수(frequency), 진폭(amplitude, 단위: m) 순으로 들어가 있고 다음줄의 front 문에서 괄호안의 값은 front\_number, 진폭순으로 들어가 있다. 두 문장은 모두 주파수 1.0Hz 진폭 0.06m의 파도를 64초동안 만들며 식(2)에의해 그 입력값이 같음을 알 수 있다. 총 조파시간은 ramp time(2초) + sample delay(16초) + “single”문의 repeat time(64초) + “front” 문의 repeat time(64초) +ramp down(2초)의 합으로 결정된다.

### (3) 파의 합성

두 개의 진동수가 다른 파도를 합성한 불규칙파는 Fig. 8에서와 같이 생성된다.

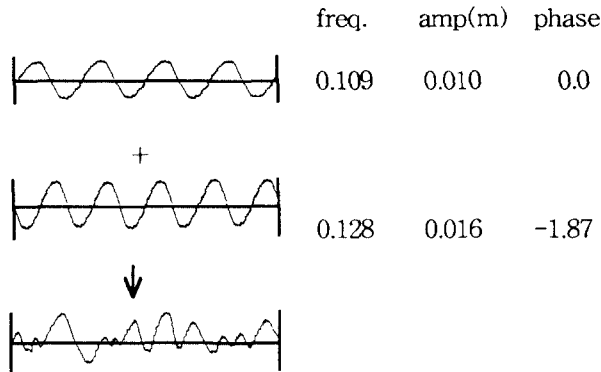


Fig. 8 Wave Synthesis

### (4) 사파와 불규칙파

#### A. 사파의 생성원리

Fig. 9에서 왼쪽 각 패들이  $\lambda/2$ 의 위상차를 가지고 움직이면 진행각이  $\phi$ 인 사파가 만들어진다.

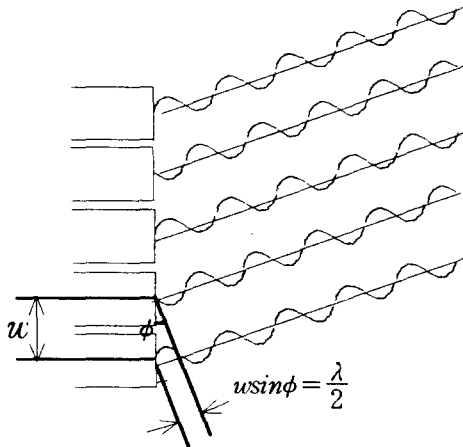


Fig. 9 Angled Wave

### B. 불규칙파

불규칙파의 생성원리는 Random number generator에 의해 파고, 진행각, 위상차, 분산값을 random하게 결정하여 식 (3)에서와 같은 식에 대입하는 방식을 취하는 것이다. 여기서 파고는 Gaussian 분포, 진행각은  $\cos n$  또는  $\cos 2n$  함수, 위상차는 random 함수, 분산값은 입력값에 따라 결정된다.

#### ● Pierson-Moskowitz Spectrum

$$E(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^4 f^5} \exp\left[-\gamma \left(\frac{f_p}{f}\right)^4\right] \quad (3)$$

$$f' = \frac{f_e}{\frac{f_p/f - \tau}{C_e} + \tau} \quad (4)$$

여기서,

$f$  : 주파수

$f_p$  : 스펙트럼의 Peak frequency

$f_e$  :  $f_p/0.857222$

$C_e$  : Compression factor

$\gamma$  : 5/4,  $\tau$  : 0.857222,  $\alpha = 0.0081$

PM, JONSWAP 등의 불규칙파는 주파수를 입력값으로 하고 Bretschneider, Neumann, ISSC 등의 불규칙파는 주파수와 분산값을 입력값으로 하여 파를 생성한다.

### C. 새로운 파의 생성

UOU 수조에서는 사용자가 원하는 특정한 파도를 만들 수 있는데 가령 수조 한 가운데서 솟아오르는 파(Bulls-eye)를 만드는 경우 주파수가 작은 파도가 주파수가 큰 파도보다 파형의 전달 속도가 빠르다는 성질을 이용하여 주파수를 큰 값에서 작은 값으로 변화시키



면서 그 진행각을 수조 가운데로 모은다.[4]

## 5. 탱크특성함수 생성 및 신뢰성 평가

### (1) 탱크특성함수

Fig. 10에서 보면 “ulsan.ttf”파일은 각 진행각(angle)과 주파수별로 이득(gain)값과 위상(phase)값을 가지고 있다. 여기서 이득값이라 하면 조파기를 작동시키는 힘에 관련된 값이다. 즉 이득값이 클수록 파고가 커진다. 위상값은 프로그램상에서 지정한 일정 지점에서 파도의 파정 부분이 정확하게 일어나게 하는 파도의 위상값이다.

| Rnumber | 9 |                     |                     |                      |                     |       |          |    |  |  |
|---------|---|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|-------|----------|----|--|--|
| Data:   |   |                     |                     |                      |                     |       |          |    |  |  |
| 8       | : | -0.75,108.62,-2.217 | -0.5,153.92,-2.5540 | -0.25,269.74,-2.9894 | 0.0,444.93,-3.4875  | #0.25 | Hz       |    |  |  |
| 10      | : | -0.75,82.38,-13.641 | -0.5,308.35,-14.515 | -0.25,734.76,-13.978 | 0.0,1562.53,-16.809 | #     | 0.3125Hz |    |  |  |
| 12      | : | -0.75,74.95,0.1036  | -0.5,479.55,-0.4545 | -0.25,64.83,-0.8608  | 0.0,126.72,-1.6769  | #     | 0.375    | Hz |  |  |
| 14      | : | -0.75,17.62,12.44   | -0.5,120.62,-12.301 | -0.25,45.58,-11.7826 | 0.0,51.72,-4.176    | #     | 0.4375   | Hz |  |  |
| 16      | : | -0.75,59.73,0.3155  | -0.5,43.88,0.3973   | -0.25,52.23,-0.3209  | 0.0,57.39,-1.1605   | #     | 0.5      | Hz |  |  |
| 18      | : | -0.75,17.96,-9.2638 | -0.5,75.71,-11.346  | -0.25,43.94,-12.353  | 0.0,43.25,3.6914    | #     | 0.5625   | Hz |  |  |
| 20      | : | -0.75,40.58,-0.6713 | -0.5,36.29,-0.6498  | -0.25,42.89,-1.3402  | 0.0,39.99,-2.8868   | #     | 0.625    | Hz |  |  |
| 22      | : | -0.75,67.78,-11.657 | -0.5,45.00,-12.145  | -0.25,35.69,-0.7622  | 0.0,41.14,-1.9756   | #     | 0.6875   | Hz |  |  |

~중략~

Fig. 10 “ulsan.ttf” File

위 숫자배열의 첫줄은 front\_number 값이고 다음의 첫값은 진행각의 라디안값이다. 그 다음 값이 이득, 위상 순으로 구성되고 다시 진행각, 이득, 위상 ... 의 순으로 반복된다. 위 값들이 적절한 값으로 선택되어졌을 때 정확한 파도를 생성할 수 있으며 그 적절한 값은 반복적인 TTF 수정 작업(trial and error)을 통해 얻어진다.

식(5)에서 진행각과 위상별로 파를 생성하여 그 정확성을 Table 1에서 보여준다.

$$\mu = \frac{\text{Measured } H_w}{\text{Input } H_w} \quad (5)$$

입력파고에 대한 측정된 파고의 비를  $\mu$  라하면  $\mu$  값이 1.0에 가까운 값일 때 정확한 파도가 생성됨을 의미한다. 위상값은 입력된 파를 정확한 시간과 위치에 파정이 오도록 파를 생성하기 위해 정해지는 값이다.

Table 1 Accuracy of the "ulsan.ttf" File

| Fnumber<br>(HZ) | ANGLE     |         |          |         |           |         |          |         |
|-----------------|-----------|---------|----------|---------|-----------|---------|----------|---------|
|                 | 0.75(rad) |         | 0.5(rad) |         | 0.25(rad) |         | 0.0(rad) |         |
|                 | $\mu$     | PHASE   | $\mu$    | PHASE   | $\mu$     | PHASE   | $\mu$    | PHASE   |
| 8(0.25)         | 0.991     | 0.008   | 0.994    | -0.0017 | 0.990     | -0.010  | 1.078    | -0.057  |
| 10(0.3125)      | 1.009     | -3.14   | 1.011    | -0.0418 | 1.007     | 3.136   | 1.008    | 3.089   |
| 12(0.375)       | 1.000     | -0.002  | 0.992    | 0.0055  | 0.987     | -0.005  | 1.000    | 0.0217  |
| 14(0.4375)      | 1.013     | -0.001  | 1.012    | -0.0077 | 1.012     | -0.008  | 0.979    | 0.0016  |
| 16(0.5)         | 0.992     | 0.010   | 0.995    | -0.0037 | 0.986     | 0.008   | 0.994    | 0.0049  |
| 18(0.5625)      | 1.017     | -0.016  | 1.050    | -0.0032 | 1.040     | 0.045   | 1.002    | -0.0088 |
| 20(0.625)       | 0.988     | 0.0174  | 0.999    | 0.0067  | 0.982     | 0.0101  | 1.009    | 0.0125  |
| 22(0.6875)      | 1.014     | -0.0313 | 1.007    | -0.0338 | 0.962     | 0.0943  | 1.038    | 0.0104  |
| 24(0.75)        | 1.002     | 0.0163  | 0.988    | 0.0038  | 1.016     | -0.0429 | 0.994    | 0.0075  |
| 26(0.8125)      | 1.044     | -0.0529 | 0.999    | -0.0178 | 0.991     | 0.0175  | 1.006    | 0.0162  |
| 28(0.875)       | 1.009     | 0.0227  | 0.981    | 0.0463  | 0.992     | 0.0707  | 1.010    | 0.0042  |
| 30(0.9375)      | 1.023     | 0.0122  | 1.034    | 0.0526  | 1.001     | -0.0472 | 1.016    | 0.3813  |
| 32(1.0)         | 1.024     | 0.3716  | 1.027    | 0.004   | 1.000     | 0.038   | 1.021    | -0.057  |
| 34(1.062)       | 0.980     | -0.1293 | 1.038    | -0.0396 | 1.002     | -0.0451 | 1.013    | 0.0261  |
| 36(1.125)       | 0.999     | 0.0133  | 0.984    | -0.0353 | 1.037     | 3.105   | 1.011    | 0.0362  |
| 38(1.188)       | 1.008     | -0.1161 | 0.990    | -0.0826 | 1.003     | -0.1517 | 0.9882   | 0.0413  |
| 40(1.25)        | 0.996     | 0.0459  | 0.999    | 0.0106  | 0.973     | 0.0694  | 0.9911   | 0.4241  |
| 42(1.312)       | 0.996     | 0.09    | 0.987    | 0.0556  | 0.987     | 0.1504  | 0.9991   | 0.054   |
| 44(1.375)       | 0.958     | 0.163   | 0.962    | -0.633  | 1.032     | 0.1793  | 0.983    | -0.2572 |
| 46(1.438)       | 1.101     | -0.1266 | 1.013    | -0.3391 | 1.083     | -0.0909 | 1.083    | -0.0788 |
| 48(1.5)         | 0.991     | 0.3176  | 0.964    | -0.0344 | 1.061     | 0.1036  | 1.017    | -0.0775 |
| 50(1.562)       | 1.103     | 0.2391  | 1.133    | 0.1691  | 1.16      | 0.3334  | 1.05     | 0.1993  |
| 52(1.625)       | 1.028     | 0.1677  | 0.9711   | 0.0247  | 0.6129    | 2.658   | 0.9415   | -0.6545 |
| 54(1.688)       | 1.26      | 0.3507  | 0.605    | 0.9254  | 0.9923    | -2.591  | 1.001    | 0.1963  |
| 56(1.75)        | 0.946     | 0.1167  | 1.048    | 0.2675  | 1.096     | 0.2989  | 1.139    | -0.1435 |
| 58(1.812)       | 1.067     | 0.0617  | 0.1927   | 0.8894  | 0.3555    | -0.1983 | 1.017    | 0.6024  |
| 60(1.875)       | 0.611     | -1.827  | 0.9311   | -0.1099 | 0.97      | 0.3798  | 0.8693   | -0.4155 |
| 62(1.938)       | 0.669     | -0.1581 | 1.213    | 0.7845  | 0.8293    | -1.1    | 0.8173   | 0.088   |
| 64(2.0)         | 0.734     | 0.2796  | 0.5248   | -0.9383 | 0.887     | 0.6007  | 1.171    | 0.009   |

(2) 신뢰구역 조사

A. 필요성 : 수조라는 공간적 제약으로 인한 반사파는 필수적으로 생성되기 마련이다. 소파기가 완벽한 소파 효율을 갖기란 불가능하므로 그 소파기에 대한 반사파의 영향과 사파 생성시 측면벽에서의 반사파의 영향 등을 고려하지 않을 수 없다. wave 생성 후 시간이 지남에 따라 수조내 전 구역이 반사파 영향에 접어들 것이므로 처음 wave 생성 후 반사파 영향이 없는 구역과 그 시간을 측정하는 것은 정확한 실험을 하기 위한 필수조건이다.

다음의 3가지 시간을 조사하였다.

- ㉠ 파도가 생성되어 소파기에 도달 시간.
- ㉡ 파도가 소파기에 반사된 후 일정지점(조파기로부터 15m)까지 도달하는데 걸린시간.
- ㉢ ㉠의 반사파가 조파기에 도달할 때까지 걸린 시간을 각 진행각 별로 조사하였다.

Fig. 11에 0.25rad인 경우 그 신뢰구역을 나타내었다.

B. 신뢰구역( angle = 0.25 rad. 일 때)

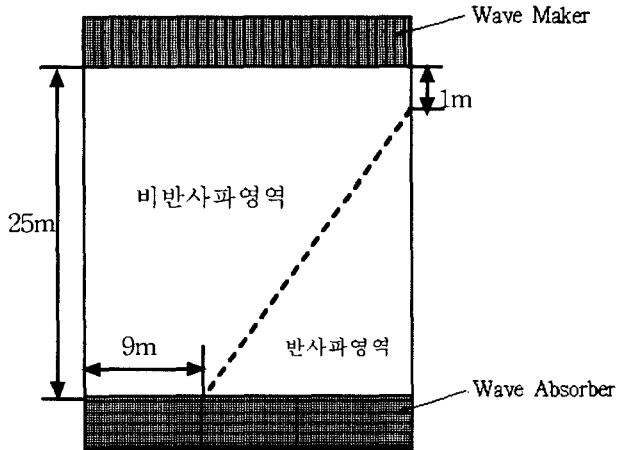


Fig. 11 Confidence Area (angle=0.25rad)

위 영역에서 실험가능 시간은 파의 주파수별로 약 30~60초 가량이다.

6. 결론

2년간의 연구와 실험을 통해 탱크특성함수 생성과 검증을 하였고, UOU 해양공학광폭수조의 파도특성곡선을 작성하여 조파생성가능 범위를 제시하였다. 또한 생성된 파의 정확성이 높은 것을 확인하였다. 앞으로 파고와 진동수, 파의 진행방향, 위상 등의 함수에 의해 생성되는 불규칙파에 대한 검증이 수행될 것이다.

## 참고문헌

- [1] D. Rogers & G. Bolton King, "Wave generation using OCEAN and WAVE", Edinburgh Designs Ltd, 1996.
- [2] Edinburgh Designs Ltd., "University of Ulsan wide tank wavemaker hardware manual", 1996.
- [3] 구본호, 권혁승, 강창수 외, "전자회로", 진영사, 1996.
- [4] J.N. Newman, "Marine Hydrodynamics", Massachusetts Institute of Technology, 1977.