

## 反射波 吸收用 新 造波制御 시스템의 設計 A New Wavemaker Control System with Reflected Wave Absorbing Capability

全仁植\* · 朴佑善\* · 吳榮敏\*

In Sik Chun\*, Woo Sun Park\* and Young Min Oh\*

**要 旨** : 波浪水槽를 이용하는 수리실험에서 실험결과들 사이에 동질성 및 호환성을 유지하는 것은 매우 중요한 문제이며 이는 目的波浪을 얼마나 장시간 수조내에 유지시킬 수 있는가에 달려있다. 本稿에서는 계측과랑을 목적과랑에 일치시키기 위한 循環性 제어회로를 구성하고 회로해석을 통하여 컴퓨터로 용이하게 조파기 하드웨어를 제어할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘의 주된 기능으로서 시간영역에서 離散的으로 적용되는 반사파 흡수필터를 포함하였다. 필터의 구현방식은 이산적 입력과 출력이 직접대응하는 방식이므로 데이터의 통계적 성격이 사전에 알려져 있지 않은 不確定的 입력데이터에 대해서도 적용이 가능하다. 예제해석을 통하여 알고리즘을 수치시험해 본 결과, 임의의 규칙 또는 불규칙 반사파 시그널에 대해서 本 제어회로의 반사파 흡수기능이 매우 탁월함을 입증하였다.

**Abstract** □ It has been acknowledged as an important problem to maintain identity or compatibility among experimental laboratory data obtained separately in different wave flumes. The data quality mainly depends on how long the target waves can be realized in a flume without distortions. In the present paper a control circuit is devised in the form of multiple feed-back operations to attain a complete equality of the intended waves and the realized waves. The analysis of the circuit gives an algorithm which can be easily adapted to a small computer controlling wave making hardwares. As a main feature of the algorithm, a numerical filter with wave absorbing capability is presented. The filter is discretely realized so that the discrete input matches to the output directly, hence applicable even to nondeterministic input. Through several example analyses, the algorithm proved its accuracy, being effective to both regular and irregular reflected waves.

### 1. 緒 論

아직 이론적으로 접근이 어려운 해안역에서의 물리현상을 해석하기 위한 주요한 수단으로서 수리실험을 고려할 때 서로 다른 장소와 시간에 수행된 실험들간에 실험자료의 동질성과 互換性을 확보하는 것은 매우 중요한 문제이다. 실험별 실험결과들의 차이를 초래하는 것은 여러가지 원인이 있으나 무엇보다도 중용한 것은 실험에 사용된 실험장치 및 계측기기라고 할 수 있다. 동일한 실험조건에 대해서도 사용된 造波機의 특성에 따라서 결과들이 많은 차이를 보이는 것으로 지적되어 왔다. 이와 관련하여, Ploeg

and Funke(1980)는 세계 유명 수리실험소들에 설치되어 있는 조파기들에 대하여 각각의 기계장치의 구성과 제어특성을 조사한 바 있다.

造波機의 작용에 대해서는 오래전부터 많은 연구가 수행되어 왔으나 아직도 해결해야 될 몇가지 어려운 문제들이 남아 있다. 이중에 가장 중요하게 거론할 수 있는 것이 反謝波 문제이다. 이것은 길이가 有限한 수조에서 항상 경험하게 되는 문제로서 조파기에서 발생한 파랑이 수조의 下流 끝 또는 水槽內에 설치된 模型構造物에 반사되어 조파기쪽으로 진행하다가 조파기에서 再反謝되는 현상에 관련된 문제이다. 재반사파는 본래 의도된 目的波浪에 부가되어 진행하고,

\*韓國海洋研究所 海洋工學研究部(Ocean Engineering Division, Korea Ocean Research and Development Institute, P.O. Box 29, Ansan 425-600, Korea)

다시 반사되어 逆流, 재반사되는 과정을 되풀이한다. 이러한 과정중에서 主 실험구간에서 발생하는 파랑은 목적파랑과는 상당한 정도의 차이를 보이게 되는 것이며, 이 경우에 실험결과를 목적파랑에 결부시키는 것은 중대한 實驗誤差를 야기시키는 원인이 된다고 할 수 있다. 이러한 문제는 조파기 쪽을 향하여 直立壁을 갖는 모형구조물에 대한 수리모형실험에서 더욱 심각하게 발생한다.

이러한 반사파 문제를 해소하기 위하여 이용하는 대표적인 방법으로 다음 두 가지가 있다. 첫번째는 반사파가 조파판에서 재반사되기 전까지만 실험을 수행하는 것이다. 이 방법은 아직도 防波堤의 반사 특성을 파악하는 실험에 많이 이용되고 있으며 水槽의 길이가 매우 길 경우에(일반적으로 50 m 이상) 적용 가능하다. 그러나, 조파기 최초 稼動時에는 일반적으로 파랑이 불안정하며, 특히 조파기의 안전을 위하여 목적파랑의 수 주기에 해당하는 시간 동안 Slow start 기능을 가동할 경우에는 재반사파 발생 이전의 시간 중에서도 실로 目的波浪을 재현하고 있는 區間은 얼마 되지 않기 때문에 실험자료 분석의 시간구간을 정하는데 많은 주의를 요한다. 두번째 방법은 수조를 幅이 다른 두 부분으로 나누어 폭이 작은 부분에서 실험을 수행함으로써 반사파의 영향을 상대적으로 약화시키는 것이다. 이 방법은 비교적 폭이 넓으면서(약 1.5 m 이상) 길이도 충분히 확보되어 있는(약 50 m 이상) 수조에 적용 가능하다. 그러나, 이 방법에도 반사파의 수조내 累積이 완전히 해소되는 것은 아니기 때문에 실험중에도 發生波浪이 목적파랑에 符合하는지를 계속적으로 점검할 필요가 있다.

반사파문제를 해소 또는 輕減할 수 있는 上記 두 가지 방법은 흔히 설치되는 소규모의 수조(길이 30 m 이내, 폭 60 cm 내외)에서는 사용이 곤란하며 다른 방법을 강구할 필요가 있다. 최근에 컴퓨터를 이용한 전기식 또는 油壓式 서보 시스템의 도입으로 인하여 조파판의 가동중에도 반사파를 조파판의 운동을 통하여 계속적으로 吸收할 수 있는 방법이 제시된 바 있다(全 等, 1989; Bullock과 Murton, 1989; Tanimoto 等, 1983; Salter, 1982). 이 방법에는 조파판 발생파랑을 계속하는 파고계를 조파판 전면에 설치 운영하며, 이 파고계로부터의 시그널로 목적파랑에 相應하는 시그널을 수정하고 수정된 시그널을 일종의 數值 필터를 통과시켜 造波板 입력 시그널을 결정하는 절차를

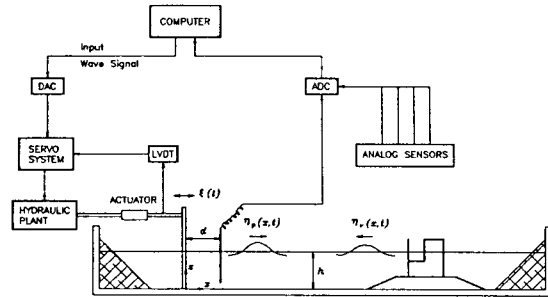


Fig. 1. Schematic diagram of wave making system.

가진다.

이 방법은 현재 부분적으로 실용화 단계에 있으나 (Hirakuchi 等, 1990) 반사파 흡수필터의 時間 領域에서의 離散的 적용방법에 대해서는 구체적으로 제시된 바가 없었다. 본 연구에서는 반사파흡수 기능을 포함하는 포괄적 制御 시스템을 재구성하고, 시간영역에서 斷續적으로 적용할 수 있는 반사파 흡수필터의 설계를 시도하였다. 이용된 필터의 이산적 具現方式은 입력데이터와 출력데이터가 1대 1로 相應하는 방식이므로 데이터의 통계적 성격이 사전에 알려져 있지 않은 불확정적 입력데이터에 대해서도 적용이 가능하도록 하였다. Fig. 1은 전체적인 조파시스템의 구성과 본 연구에 이용된 座標系를 보여준다.

## 2. 油壓 서보 조파시스템의 구성

油壓 서보 조파시스템은 제어 컴퓨터에서 시그널을 받아 유압장치를 제어하며 최종적으로 수조에 설치된 造波板을 구동하여 파랑을 발생시키는 일련의 전기-기계 장치를 의미한다. 컴퓨터 시그널이 파랑으로 변환되는 데에는 중간의 여러가지 부속 기계장치와 조파판 고유의 傳達函數(Transfer function)들을 경험하게 되며 Fig. 2는 이러한 전달함수와 입출력 데이터들의 상관관계를 나타내는 전체적인 제어회로를 보여주고 있다. 조파판에 의하여 발생된 파랑은 진행하면서 수조의 형태적 특성에 의하여 변형을 하고 또한 수조의 끝에서 발생한 반사파가 진행파에 부가, 또는 조파판에서 再反射 됨으로써 진행파의 왜곡을 초래한다. 따라서, 目的波浪의 왜곡을 피하기 위해서는 수조에서의 파랑을 계속적으로 모니터링하여 입력시그널을 보정하는 循環性(Feed-back loop)제어시

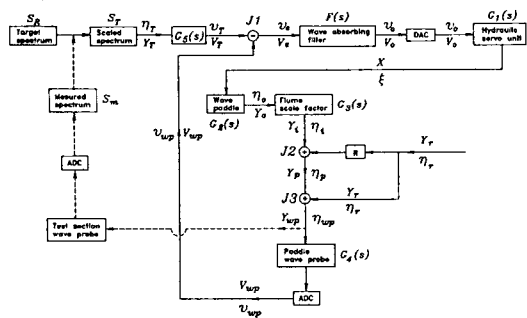


Fig. 2. Overall control circuit of wave making system.

시스템 회로를 구성할 필요가 있다.

Fig. 2에는 각각의 전달함수를 직사각형 안에 나타내었으며 이들의 적용순서는 화살표로 표시하였다. 각 전달함수의 입출력 데이터에 대해서는 화살표 진행 방향으로 보아 왼쪽에 입, 출력시그널의 時系列을 Greek 문자 또는 영어 소문자로 표기하였으며, 오른쪽은 시그널의 Laplace 변환을 영어 대문자로 표기하였다. 회로도에서 J1, J2, J3는 독립된 시그널들이 모이는 連結点(Joint)을 의미하며 원으로 표시된 기호안의 부호는 演算의 종류를 의미한다. 실제로 J2, J3는 모니터링 波高計이며 여러 복합된 파랑의 동시 계측을 의미한다.

회로도 상에서 상세히 설명하면 임의의 規則波 또는 스펙트럼  $S_R$ 의 불규칙파에 상응하는 컴퓨터 입력시그널  $\eta_R(t)$ 를 제조하고 이 시그널을 전달함수  $G_1(s)$ 를 적용하여 電壓시그널  $v_T(t)$ 로 변환한다. 여기까지는 제어 컴퓨터에서 이루어지며 최종값  $v_0(t)$ 는 디지털 값들이다.  $v_0(t)$ 는 컴퓨터에서 출력되어 디지털-아날로그 변환기에 의하여 아날로그 시그널로 변환되며 유압 시스템 및 조파판을 제어하여 파랑,  $\eta_0(t)$ 를 발생시킨다. 발생된 파랑은 수조내에서 진행중 수조자체의 전달함수  $G_3(s)$ 에 의하여 자체변형을 하며 반사파  $\eta_r(t)$ 의 영향을 받아 왜곡된 형태의  $\eta_{wp}(t)$ 를 형성한다.  $\eta_{wp}(t)$ 는 보정계수  $G_4(s)$ 를 갖는 파고계에 의하여  $v_{wp}(t)$ 로 감지된 다음 컴퓨터에 입력되어  $G_5(s)$ 의 출력,  $v_T(t)$ 를 수정시킨다. 수정된 시그널은  $v_0(t)$ 로서  $F(s)$ 에 입력되고 이와같은 과정이 계속 반복되면서 파랑을 발생시키게 된다.

전달함수  $G_1(s)$ 는 서보 유압장치에 대한 것이며 입력시그널  $v_0(t)$ 에 대해 피스톤 Actuator와 이에 연결된 造波板의 운동  $\xi(t)$ 를 발생시킨다. Fig. 3에서 보

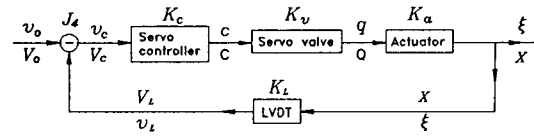


Fig. 3. Feed-back circuit of hydro-servo system.

이는 것처럼 서보 유압장치도 循環性 回路로 되어 있다. Servo-controller는 Fig. 2에서  $F(s)$ 의 電壓出力  $v_0(t)$ 를 電流 시그널  $c(t)$ 로 변환한다. Servo valve는 전류구동이며  $c(t)$ 에 의하여 유량  $q(t)$ 를 조절하며 최종적으로 Actuator의 운동  $\xi(t)$ 를 제어하게 된다.  $\xi(t)$ 는 LVDT에 의하여 감지되어 전압  $v_L(t)$ 로 변환된 다음 최초 입력 전압  $v_0(t)$ 를 수정한다.

Fig. 2에서 點線 화살표로 표시된 부분은 사전에 지정된 순환 Loop의 지속시간이 끝나고 나서 進行波 (Progressive mode)를 파고계로 계속하여 컴퓨터에 입력된 目的波浪과 일치하는지 확인하는 작업으로서 이들이 일치하지 않으면 목적파랑을 수정시켜  $\eta_T(t)$ 를 발생시키는 절차를 의미한다(全等, 1989). 이는 사실상 수조에 의하여 발생파랑이 변형되는 정도, 즉, Fig. 2에서 Flume scale factor  $G_3(s)$ 를 실험적으로 결정하는 과정이라고 할 수 있다. 回路圖에서는 불규칙파의 목적파랑 스펙트럼  $S_R$ 과 계측된 스펙트럼  $S_m$ 을 포함하였다.

### 3. 制御回路의 해석

조파판에 의하여 발생된 파랑이 왜곡이 없는 상태는 결국 Fig. 2에서  $\eta_p(t)$ 가  $\eta_r(t)$ 에 일치됨을 의미한다. 傳達函數들은  $G_3(s)$ 와  $F(s)$ 의 두 함수를 제외하고는 기계장치, 수조 및 계측기에 의해서 자동적으로 구현됨을 알 수 있다. 반면에 상기 두 함수는 컴퓨터 내에서 연산에 적용되기 때문에 이들을 효과적으로 구성함으로써 발생파랑의 왜곡을 배제할 수 있다. 이를 위한 회로분석을 시도하는데 있어서 발생파랑 모니터링용 波高計는 조파판에 부착하여 사용하는 것을 전제로 하였다. 이 경우에는  $G_3(s)=1$ 이며 發生波浪의 관심범위를 조파판 근방에 국한시킴을 의미한다. 즉, 회로분석에서 목적파랑을 조파판에서의 진행파랑과 일치시키는 데 주목하고 실질적인 실험구간까지의 수조 전달함수의 추출과 이에 의한 目的波浪의 수정은 Fig. 2에서의 점선 화살표 부분에 일임

하기로 한다.

Fig. 2의 연결점 J1에서 入出力 데이터의 Laplace 變換을 고려하면,

$$V_e(s) = V_T(s) - V_{wp}(s) \quad (1)$$

와 같다.

연결점 J2에서는 조파판에서 발생하는 파랑  $\eta_r(t)$ 에 反射波의 조파판에서의 再反謝파랑이 重疊되어 進行波  $\eta_p(t)$ 를 형성한다. 이를  $s$  영역에서 표현하면

$$Y_i(s) = V_e(s)F(s)G_1(s)G_2(s)G_3(s) \quad (2)$$

$$Y_p(s) = Y_i(s) + R(s)Y_i(s) \quad (3)$$

와 같다. 전달함수  $R(s)$ 는 모니터링 파고계 위치에서 조파판 재반사 파랑의 반사파에 대한 位相差로 반사파의 波數  $k_r$ 에 대해서

$$R(s) = \exp(2k_r d) \quad (4)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $d$ 는 모니터링 파고계의 조파판으로부터의 이격거리이다.

연결점 J3에서 진행파  $\eta_p(t)$ 는 반사파  $\eta_r(t)$ 와 중첩되어 결국 總 波浪  $\eta_{wp}(t)$ 를 형성한다.

$$Y_{wp}(s) = Y_p(s) + Y_r(s) \quad (5)$$

$$V_{wp}(s) = G_4(s)Y_{wp}(s) \quad (6)$$

모니터링 파고계가 조파판에 부착되었을 때,  $G_3(s) = 1$ ,  $R(s) = 1$ 이 되며 식 (1), (2), (3), (5)와 (6)으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$Y_p(s) = \frac{1}{1+B(s)} [F(s)G_1(s)G_2(s)V_T(s) + \{1-B(s)\} Y_r(s)] \quad (7)$$

여기서,

$$B(s) = F(s)G_1(s)G_2(s)G_4(s) \quad (8)$$

이다. 식 (7)에서 진행파  $\eta_p(t)$ 가 반사파  $\eta_r(t)$ 에 무관하려면,

$$B(s) = 1 \quad (9)$$

이 되어야 하며 식(8)과 (9)를 식 (7)에 대입하면,

$$Y_p(s) = \frac{V_T(s)}{2G_4(s)} \quad (10)$$

즉,

$$Y_p(s) = \frac{G_5(s)}{2G_4(s)} Y_T(s) \quad (11)$$

이 된다. 식 (11)에서  $Y_p(s)$ 가  $Y_T(s)$ 와 일치하려면

$$G_5(s) = 2G_4(s) \quad (12)$$

가 성립되어야 한다.

식 (9)는 반사파가 조파판에서 吸收됨을 나타내며 실제로는 반사파가 조파판에서 재반사되지 않고 에너지가 조파판 운동에 의해서 조파판 뒷면으로 통과되는 것을 의미한다. 결국, 目的波浪  $\eta_T(t)$ 가 모니터링 파고계에 의하여 계측되는 進行波 成分  $\eta_p(t)$ 와 일치하려면 식 (9)와 식 (12)가 동시에 만족되어야 함을 알 수 있다.

식 (8), (9)에서

$$F(s) = \frac{1}{G_1(s)G_2(s)G_4(s)} \quad (13)$$

임을 알 수 있다. 전달함수  $F(s)$ 는 반사파 흡수필터로 정의되며 컴퓨터로 내장되어 에러시그널  $u_e(t)$ 에 계속적으로 적용된다.

#### 4. 反射波 吸收필터의 설계

식 (13)에서 전달함수  $G_1(s)$ 는 Fig. 3에 대한 회로 분석을 통하여 구할 수 있다. 즉, 연결점 J4에서

$$V_r(s) = V_o(s) - K_L(s)X(s) \quad (14)$$

$$X(s) = V_r(s)K_c(s)K_v(s)K_a(s) \quad (15)$$

이며, 이 두 식에서

$$G_1(s) = \frac{K_c(s)K_v(s)K_a(s)}{1 + K_L(s)K_c(s)K_v(s)K_a(s)} \quad (16)$$

임을 알 수 있다. 식 (16)의 전달함수들은 유압장치에 관련되어 있으며 모듈러스와 위상은 입력데이터의 周波數에 따라 변하는 固有特性을 갖는다. 그러나 Actuator의 전달함수  $K_a(s)$ 를 제외한 다른 傳達函數들,  $K_c(s)$ ,  $K_v(s)$ ,  $K_L(s)$ 는 통상의 조파기에서 채택하는 주파수 범위(5 Hz 미만)내에서 제로 위상에 모듈러스가 거의 일정하게 나타나는 특성을 갖는다.

피스톤식 Actuator는 입력유량을 수평변위로 변환

시키는 역할을 한다. 따라서,

$$q(t) = A \frac{d\zeta(t)}{dt} \quad (17)$$

의 관계식이 성립되며 이를  $s$ -領域에서 표현하면,

$$Q(s) = sAX(s) \quad (18)$$

가 된다. 여기서  $A$ 는 Actuator의 斷面積을 의미한다. 따라서, 전달함수  $K_a(s)$ 는

$$K_a(s) = \frac{1}{A s} \quad (19)$$

이 된다. 식 (19)를 식 (16)에 대입하면 전달함수  $G_1(s)$ 는 다음과 같다.

$$G_1(s) = K_1 \frac{s}{K_L(s)[s + K_1(s)]} \quad (20)$$

여기서,

$$K_1(s) = \frac{K_r(s)K_f(s)K_L(s)}{A} \quad (21)$$

이다.

다음, 식 (13)에서 조파판 전달함수  $G_2(s)$ 는 매우 복잡한 波數의 함수형태이며 이론적으로 다음과 같이 제시된 바 있다(全 等, 1993)

$$G_2(s) = \sqrt{E^2 + P^2} \exp\left[itan^{-1}\left(\frac{P}{E}\right)\right] \quad (22)$$

여기서,

$$E = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{4\sin^2(k_m h)}{2k_m h + \sin(2k_m h)},$$

$$P = \frac{4\sinh^2(k_p h)}{2k_p h + \sinh(2k_p h)} \quad (23)$$

식 (23)에서 波數  $k_p$ 와  $k_m$ 은 각각 進行波 성분과 消滅波 성분을 나타내며 다음과 같은 分數 關係式으로부터 구할 수 있다.

$$\omega^2 = gk_p \tanh k_p h \quad (24)$$

$$\omega^2 = -gk_m \tan k_m h \quad (25)$$

$\omega$ 는 각주파수이며 Laplace 演算子  $s$ 와의 관계는  $s =$

$i\omega$ 와 같다. 상기 식 (22)에 의하여 주어지는  $G_2(s)$ 는 그 함수형태의 복잡성으로 인하여 이를 조파기 회로 구성에 직접적으로 이용하는 것은 거의 불가능하다. 全 等(1993)은 다음과 같은 간단한 유리함수를 이용하여 식 (22)를 근사적으로 표현한 바 있다.

$$G_2(s) = \frac{bs}{s+a} \quad (26)$$

식 (26)에서  $a$ 와  $b$ 는 水深의 함수로서 결정되는 상수이다.

일반적으로 선형인 波高計 傳達函數  $G_4(s)$ 는 수면 변화를 電壓으로 변환하는 역할을 하며 입력 수면변화의 주파수와 무관하게 일정한 값을 갖는다. 식 (20)과 (26)을 식 (13)에 대입하면 반사파 흡수필터  $F(s)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F(s) = K_2 \left[ (a + K_1) + s + \frac{aK_1}{s} \right] \quad (27)$$

여기서,

$$K_2 = \frac{K_L}{bK_1G_4} \quad (28)$$

식 (27)은 주파수 영역으로 표현되어 있으며  $v_e(t)$ 의 離散的 時系列  $v_{e,n}$ 에 적용하여  $v_{o,n}$ 을 출력시키기 위해서는 식 (27)을 먼저 時間領域으로 표현하여야 한다. 시간영역에서 식 (27)은

$$v_o(t) = K_2 \left[ (a + K_1)v_e(t) + \frac{dv_e(t)}{dt} + aK_1 \int_0^t v_e(t') dt' \right] \quad (29)$$

와 같다. 식 (29)를 데이터 독취간격  $\Delta t$ 에 대하여 이산적으로 구현하면,

$$v_{o,n} = K_p(v_{e,n}) + K_i \left[ 0.5 \sum_{i=1}^n (v_{e,i} + v_{e,i-1}) \right] + K_d(v_{e,n} - v_{e,n-1}), \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (30)$$

와 같다. 여기서,  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ 는 상수로 다음과 같이 정위된다.

$$K_p = K_2(a + K_1) \quad (31)$$

$$K_i = a K_1 K_2 \Delta t \quad (32)$$

$$K_d = \frac{K_2}{\Delta t} \quad (33)$$

상기 제어해석에서 반사파 흡수기능을 포함시키지 않을 때는 Fig. 2 연결점 J1에서 단순히  $v_{wp}=0$ 이며, 반사파가 조파판에 도달하기 이전에는  $\eta_T=\eta_i$ 가 성립되어야 한다. 이를 s-領域에서 표현하면,

$$\frac{Y_i(s)}{Y_T(s)} = G_5(s)F(s)G_1(s)G_2(s)G_3(s)=1 \quad (34)$$

이 된다. 식 (34)로부터 反射波 非吸收時的 필터를  $\bar{F}(s)$ 로 나타내면,

$$\bar{F}(s) = \frac{1}{G_1(s)G_2(s)G_5(s)} \quad (35)$$

와 같이 나타낼 수 있다. 식 (13)과 식 (35)를 비교하고 식 (12)를 참조하면

$$\bar{F}(s) = \frac{F(s)}{2} \quad (36)$$

임을 알 수 있다. 식 (36)의 시간영역에서의 이산적 구현형태는 식 (30)과 동일하다. 다만,  $\bar{F}(s)$ 에 해당하는 상수들은

$$\bar{K}_p = 0.5K_p, \bar{K}_i = 0.5K_i, \bar{K}_d = 0.5K_d \quad (37)$$

와 같다.

### 5. 反射波 吸收필터의 適用結果 및 討議

반사파 흡수필터의 이산적 구현 형태, 즉, 식 (30)의 성능을 파악하기 위하여 규칙 또는 불규칙 입력조건에 대한 예제해석을 시도하였다. 필터의 성능은 임의의 반사파량  $\eta_r(t)$ 에 대하여 시스템입력  $\eta_T(t)$ 가 Fig. 1에서 수조내 진행파량  $\eta_b(t)$ 와 일치하는 정도로서 판별하였다. 여기에서는 편의상  $\eta_T(t)$ 와  $\eta_b(t)$ 를 각각 目的波와 시스템 출력파량이라 칭하기로 한다.

반사파 흡수필터에 의하여 출력된 電壓  $v_o(t)$ 는 유압장치와 조파판의 작용에 의하여 造波板 出力  $\eta_i(t)$ 로 변환된다. 즉, s-영역에서,

$$Y_i(s) = [G_1(s)G_2(s)G_3(s)]V_o(s) \quad (38)$$

이다. 앞서 언급한 것처럼,  $G_3(s)=1$ 이며  $G_1(s)$ 는 식 (20)에 의하여 정확히 표현된다. 현재의 반사파 흡수 필터의 수치적 성능확인을 위해서 조파판의 자연적 전달작용을 나타내기 위해서는 최소한 식 (22)를 정

확히 만족시키는  $G_2(s)$ 를 사용해야 한다. 식 (22)에 의한  $G_2(s)$ 의 周波數帶가 데이터 독취율에 상응하는 限界周波數 내에서 한정되어 있다면 식 (22)의 逆離散的 Fourier 變換, 즉 一定衝動量(Impulse invariance)이 시간영역에서 가장 정확한 이산적 필터작용을 한다. 그러나, 현재의  $G_2(s)$ 의 주파수대가 전혀 한정되어 있지 않고 오히려 高周波數 通過필터와 유사한 역할을 하기 때문에, 일정충동량을 이용하는 방법을 적용하는 것은 적절하지 않다. 따라서, 여기에서도 식 (26)에 의한 근사 조파판 전달함수를 이용하였다. 즉,

$$Y_i(s) = \frac{1}{K_L(s+K_1)} - \frac{bs}{s+a} V_o(s) \quad (39)$$

식 (39)를 정리하면

$$[s + (a + K_1) + \frac{1}{s}aK_1]Y_i(s) = \frac{bK_1}{K_L} V_o(s) \quad (40)$$

와 같으며 이를 시간영역에서 표현하면,

$$\eta_{i,n} = \frac{1}{R_1} [R_2 v_{o,n} + R_3 \eta_{i,n-1} + R_4 \{ \sum_{j=1}^{n-1} 0.5 (\eta_{i,j} + \eta_{i,j-1}) + R_5 \eta_{i,n-1} \}], n = 1, 2, 3, \dots \quad (41)$$

이 된다. 여기서,

$$R_1 = a + K_1 + \frac{1}{\Delta t} + \frac{aK_1\Delta t}{2} \quad (42)$$

$$R_2 = \frac{bK_1}{K_L} \quad (43)$$

$$R_3 = \frac{1}{\Delta t} \quad (44)$$

$$R_4 = -aK_1 \quad (45)$$

$$R_5 = \frac{\Delta t}{2} \quad (46)$$

성능확인 예제계산은 최초 目的波의 시그널  $\eta_{T,1}$ 에 식 (12)에 의하여 정의되는 전달함수  $G_5(s)$ 를 적용하여 최초 에러 시그널  $v_{e,1}$ 를 결정하고 여기에 식 (30)과 (41)를 적용하여 出力波  $\eta_{i,1}$ 를 계산한다(Fig. 2 참조). 여기에 반사파성분  $\eta_{r,1}$ 을 부가하여 시스템 출력파장  $\eta_{b,1}$ 과 총파량  $\eta_{wp,1}$ 를 결정하며 이에 상응하는  $v_{wp,1}$ 를 구하고  $\eta_{T,2}$ 와의 두번째 에러시그널  $v_{e,2}$ 를 결정하여 식 (30)에 입력한다. 이와 같은 계산을 離散的 目的

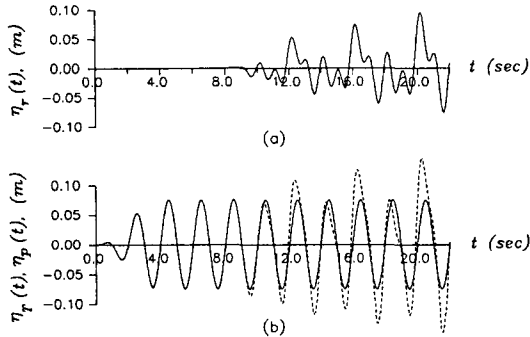


Fig. 4. Comparison of target and realized waves without wave absorbing filter operating: (a) gradually growing reflected wave; (b) —: regular target wave, ---: realized wave.

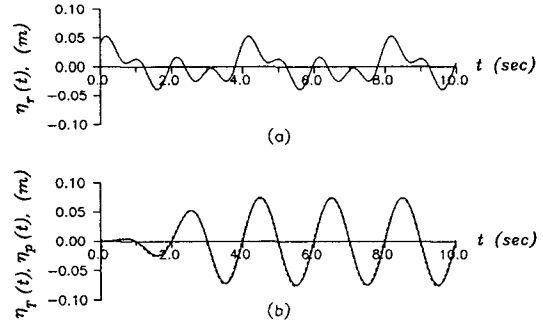


Fig. 5. Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) reflected wave of 3 different frequency components; (b) —: regular target wave, ---: realized wave.

波浪의 데이터 갯수만큼 계속 반복한다.

목적파랑으로 파고  $H=0.15$  m, 주기  $T=2.0$  sec의 규칙파와 동일한 값의 有義波高 및 有義週期를 갖는 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 만족하는 不規則波를 선정하였다. 수조내 수심은 0.5 m, 데이터 독취간격은  $\Delta t=1/60$  sec로 하였다. Actuator의 단면적은  $0.002$  m<sup>2</sup>로 하였으며, 입력파랑의 주파수에 관계없이 값이 일정한 전달함수 또는 Gain들, 즉  $K_c$ ,  $K_v$ ,  $K_L$ 과  $G_4$ 는 일반적인 유압서보 시스템과 波高計 사양을 참조하여 각각  $K_c=20$  madc/volts,  $K_v=0.0057$  m<sup>-3</sup>/madc,  $K_L=28.6$  volts/m,  $G_4=25$  volts/m로 설정하였다. 예제해석은 다음의 총 4가지 경우에 대하여 각각 시도하였다.

(i) 反射波 非吸收時 규칙 正弦波 입력과 반사파의 조합.

(ii) 반사파 흡수시 규칙 정현파 입력과 3개 주파수 성분을 갖는 반사파의 조합

(iii) 반사파 흡수시 不規則波 入力과 불규칙 반사파의 조합

(iv) 반사파 흡수시 불규칙파 입력과 白色 雜音 성격을 갖는 반사파의 조합

경우 (i)에서는 제어시스템에서 반사파 흡수기능을 제외시킨 경우에 해당하며 이 때의 반사파 흡수필터는 식 (35)에서의  $\bar{F}(s)$ 를 이용하였다. 실제로 조파수조내에서 반사파는 최초 조파기 가동 후 어느 정도 시간이 흘러야 조판판에서 출력파랑과 중첩이 되기 시작한다. 이때 반사파가 吸收 또는 제거되지 않으면 反射波는 시간경과에 따라 增幅되는 성향을 갖는다. 따라서 본

예제에서의 반사파 변화 양상은 Fig. 4(a)에서 보이는 것처럼 서서히 증폭되는 것으로 취하였다. Fig. 4(b)에서 알 수 있듯이 反射波가 造波板에 도래하기 이전의 시간구간에서는 목적파랑과 출력파랑이 완전히 동일하게 나타난다. 그러나, 반사파가 도래하여 증폭되는 구간에서는 시스템 출력파랑도 시간경과에 따라 증폭되며 목적파랑과 상당한 격차를 보임을 알 수 있다. 실제 조파수조에서도 反射波 非吸收時에 이러한 반사파랑과 시스템 출력파랑의 上昇作用이 나타나며 결국에는 碎破限界에 도달하거나, 長週期의 파랑의 경우에는 수조 밖으로 물이 넘치는 경우도 발생한다.

경우 (ii)에 해당하는 正弦波와 反射波는 각각 다음과 같이 설정하였다.

$$\eta_r(t) = \left[ \frac{H}{2} \sin(\omega t) \right] Z(t) \quad (47)$$

$$\eta_r(t) = \frac{H}{4} \left[ \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) + \sin\left(\frac{\omega}{2} + \frac{\pi}{3}\right) + \sin\left(2\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (48)$$

식 (47)에서  $Z(t)$ 는 조파기 최초 가동시 급격한 운동을 방지하기 위한 Slow start 기능을 하는 함수이며 다음과 같이 취하였다.

$$Z(t) = 0.5 \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2T} t\right) \right], \quad 0 \leq t \leq 2T \quad (49)$$

이와 같이 주어진 入力條件에 대하여 반사파 흡수필터를 가동하고 시스템 출력  $\eta_p(t)$ 를 계산하여 그 결

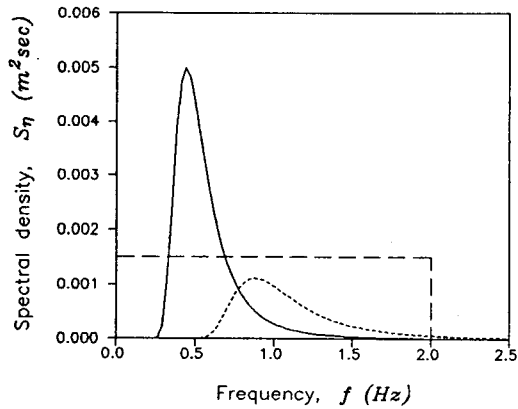


Fig. 6. Spectra of target and reflected waves (—: target wave, —: reflected wave, -·-: wide-banded reflected wave).

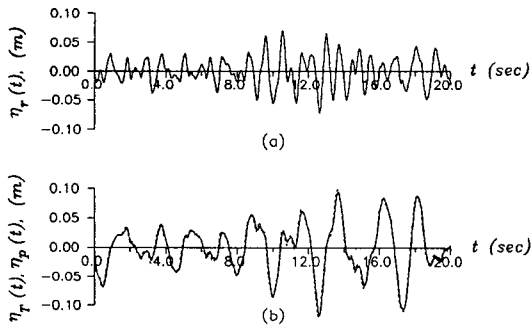


Fig. 7. Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) irregular reflected wave; (b) —: irregular target wave, -·-: realized wave.

파를 目的波浪  $\eta_T(t)$ 와 비교하였다. Fig. 5에서 이들 시그널은 서로 매우 잘 일치하며 반사파 흡수필터의 성능이 잘 반영되고 있음을 알 수 있다.

경우 (iii)와 (iv)는 不規則 入力波浪과 반사파랑에 대한 것이며 이들 파랑의 스펙트럼은 Fig. 6과 같다. 경우 (iii)의 反射波는 有義波高 0.1 m, 週期 1.0 sec인 Bretschneider-Mitsuyasu 스펙트럼을 사용하였으며, 경우 (iv)에서의 반사파는 0-2 Hz의 주파수 범위내에서 스펙트럼 密度 0.0015  $m^2 sec$ 의 白色 雜音 성격을 갖는 파랑을 선택하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 각각 경우 (iii)와 (iv)에 대한 결과를 보여준다. 두 그림에서 알 수 있듯이 불규칙 파랑의 경우에도 전반적으로 出力 波浪은 目的波浪의 시그널에 매우 잘 일치하나 (iv)의 경우에는 시그널이 비교적 급격하게 변하는 구간, 즉, 고주파수 부분에서는 다소의 차이가 있음을 관찰할

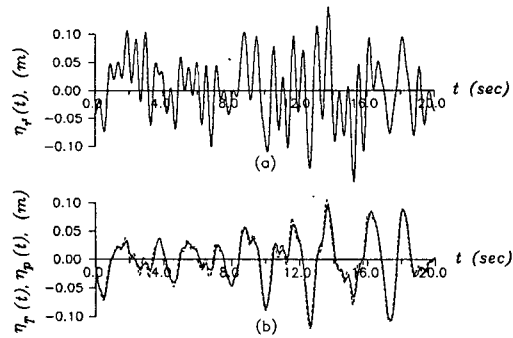


Fig. 8. Comparison of target and realized waves with wave absorbing filter operating: (a) wide-banded reflected wave; (b) —: irregular target wave, -·-: realized wave.

수 있다.

상기 예제해석의 결과에서 反射波 吸收필터의 성능은 입력 목적파랑과 반사파랑의 규칙 또는 불규칙성에 관계없이 매우 우수하게 나타남을 알 수 있다. 일반적인 수조실험에서 반사파는 대략적으로 目的波浪과 유사한 주파수대를 가지고 있으며 경우 (iv)에서 나타났던 高周波數 부근에 존재하는 약간의 부정확성조차 현실적으로 발생하지 않을 것으로 판단된다. 경우 (i)의 결과는 제어시스템에서 반사파흡수 기능의 역할이 매우 중요함을 잘 나타내어 주고 있다.

### 6. 結 論

파랑수조를 이용하는 수리실험 결과의 신빙도는 목적파랑을 얼마나 장시간 수조내에 유지시킬 수 있는가에 달려있다. 본 고에서는 계측파랑을 목적파랑에 일치시키기 위한 순환성 制御回路를 구성하고 회로 해석을 수행하여 컴퓨터로 용이하게 조파기 하드웨어를 제어할 수 있는 알고리즘을 제시하였다. 알고리즘의 주된 기능은 조파판에 부착된 파고계에 의해 감지되는 시그널을 이용하여 조파판에서의 再反射를 억제하는 反射波 흡수필터이다. 예제해석을 통하여 알고리즘을 수치시험해 본 결과, 임의의 規則 또는 不規則 反射波 시그널에 대해서 본 제어회로의 반사파 흡수기능이 매우 탁월함을 보였다.

전체 제어회로는 세 가지 순환성 회로, 즉 LVDT를 포함하는 서보시스템, 반사사 흡수필터 시스템, 水槽 傳達函數 補正 시스템으로 구성되나 여기에서는 처음



두 가지만 포함하였으며, 따라서 계측과량은 조파기 근방에만 국한하였다. 세번째 순환성 회로는 조파기 발생파랑이 水槽 縱方向으로 진행하면서 변형하는 것을 보정하기 위한 것이며 이는 2~3차례 스펙트럼 보정작업으로 용이하게 달성할 수 있다.

**謝 辭**

본 논문은 韓國海洋研究所에서 수행한 특정연구사업인 “波浪水槽 制御시스템의 개발(I)”의 결과 중 일부를 정리한 것입니다.

**參考文獻**

全仁植, 吳榮敏, 鄭信澤, 宋源吾, 1989. 反射波 吸收필터를

이용한 不規則波 再現方法. 해양연구, 11(2): 23-29.  
 全仁植, 朴佑善, 吳榮敏, 1993. 時間領域에서 造波板 傳達函數의 離散的 適用. 한국해양·해양공학회지, 5(2): 133-142.  
 Bullock, G.N. and Murton, G.J., 1989. Performance of a wedge-type absorbing wave maker. *J. Wtrway, Port, Coast. and Oc. Engrg.*, ASCE, 115(1), pp. 1-17.  
 Hirakuchi, H., Kajma, R. and Kawaguchi, T., 1990. Application of a piston-type absorbing wavemaker to irregular wave experiments. *Coastal Engineering in Japan*, 33(1), pp. 11-24.  
 Ploeg, J. and Funke, E.R., 1980. A survey of random wave generation techniques. *Proc 17th Coast. Engrg. Conf.*, ASCE, pp. 135-153.  
 Salter, S.H., 1982. Absorbing wave-makers and wide tanks. *Proc. Conf. Directional Wave Spectra Applications*, pp. 185-202.  
 Tanimoto, K., Haranaka, T. and Tomida, E., 1983. A new approach to absorbing wave generators. *Proc. 30th Japanese Conf. Coastal Eng.*, JSCE, pp. 54-58 (in Japanese).