

이중덕트를 이용한 U자형 감요수조의 주기조절 실험 연구

주영광¹ · 김용직^{2,†} · 하영록³

부경대학교 조선해양시스템공학과 대학원¹

부경대학교 조선해양시스템공학과²

거제대학교 조선해양공학과³

Experimental Study on the Period Control of an U-tube Type Anti-Rolling Tank by using a Double Layer Duct

Youngkwang Ju¹ · Yong Jig Kim^{2,†} · Youngrok Ha³

Dept. of Naval Architecture & Marine Systems Engineering, Graduate School, Pukyong National University¹

Dept. of Naval Architecture & Marine Systems Engineering, Pukyong National University²

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Kojje College³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The Anti-Rolling Tank(ART) has an advantage over the other roll stabilizing devices, when ship is staying and working at one site of sea. An important design point of ART is the tank tuning, that is, matching the tank natural period to the ship's roll natural period. Since the load condition and consequently the roll natural period of ship is to be changed widely, the natural period of ART also has to be changed widely. In case of the existing U-tube type ART with a single layer duct, the tank natural period can be changed in a relatively narrow range. This paper suggests a new U-tube type ART system using a double layer duct to enable wide change of ART natural period. Through the roll experiments performed in regular beam waves for a box-type model ship, it is shown that the double layer duct ART has about two times wider period range and a better reducing effect of roll magnitude than the single layer duct ART.

Keywords : Double layer duct(이중덕트), Anti-rolling tank(감요수조), Period control(주기조절), Experimental study(실험연구)

1. 서론

선박은 파랑이 존재하는 해상에서 운항되고 파랑 중에서 선박은 6자유도 운동을 하게 된다. 이러한 운동 중 특히 횡동요(roll)는 선박 탑승자와 기기, 화물 등에 큰 영향을 주므로 횡동요 억제를 위한 많은 연구들이 수행되고 있다. 선박 횡동요 억제를 위한 장치로는 빌지 킬과 핀 안정기, 감요수조 등이 있으며 빌지 킬은 가장 기본적인 장치로서 거의 모든 배들이 장착하고 있다. 핀 안정기는 선속이 있을 때 효과가 크고, FPSO와 같이 일정한 위치에 머물러서 작업을 하는 선박의 경우에는 감요수조(Anti-Rolling Tank, ART)가 더 적합할 수 있다 (Sellars & Martin, 1992).

감요수조에는 능동형과 수동형, 자유표면형과 U자형 등이 있다. 이들 중 U자형 수동형 감요수조(이하 감요수조)는 Stigter (1966)에 의해 이론적 체계가 정립된 이후 이에 대한 많은 연구

(Woo & Koo, 1971; Woo, et al., 1974; Field & Martin, 1975; Gawad, et al., 2001; Lew, et al., 2003; Moaleji & Greig, 2007)가 수행되어 왔다. 선체 횡동요는 감쇠가 작아 공진현상이 심하며, 실제 해상에서 횡동요를 줄이기 위해서는 공진주기에서의 횡동요 억제가 매우 중요하다. 감요수조 설계 시 주안점은 선체 횡동요 고유주기와 감요수조 유동 고유주기를 일치시키는데 있다. 이렇게 함으로써 횡동요 공진주기에서 선체 기진모멘트와 감요수조 유체모멘트가 서로 상쇄되도록 하여 횡동요를 감소시킬 수 있다 (Lloyd, 1989).

선박은 여러 가지 이유로 하중상태나 무게중심이 변하고, 이에 따라 선박의 횡동요 고유주기도 변할 수 있다. 따라서 감요수조를 효율적으로 작동시키기 위해서는 횡동요 고유주기의 변화에 맞추어 감요수조의 고유주기도 변화시켜 줄 필요가 있다. 감요수조 덕트(duct)의 중앙부에 댐퍼를 설치하여 조절하는 방식 (Lew, et al., 2003)이나 탱크를 연결하는 에어덕트(air duct)에

댐퍼를 삽입하여 개폐하는 방식 등이 감요수조의 유동 주기를 변화시키기 위해 현재 사용되고 있지만 단일덕트의 구조로 감요수조의 유동주기를 조절 할 경우 변화폭이 그리 넓지 못하다.

본 논문에서는 하부덕트를 2층 구조로 설계하고, 이 이중덕트를 선별적/부분적으로 개폐함으로써 감요수조의 주기를 폭 넓게 변화시키는 방법을 제안하고, 그 효용성을 실험을 통해 확인하였다.

2. U자형 감요수조의 작동원리

Fig. 1에 단일덕트 U자형 감요수조의 횡단면을 보인다. 이 감요수조는 좌우에 하나씩 두개의 저수조(reservoir)를 가지며 하부에 두 저수조를 연결하는 하나의 덕트가 있다. 덕트높이는 h_d 이고, 덕트의 횡방향 폭은 w_d 이다. 양쪽 저수조 각각의 폭은 w_r 이고, 덕트 중간높이에서 저수조 수면 평균높이까지의 거리는 h_r 이다. 저수조 수면의 좌우 높이 차 z 에 의한 저수조 수면의 회전각 τ 는 작다고 가정하며, $w = w_d + w_r$ 일 때 $\tau = \tan^{-1}(z/w) \approx z/w$ 이다. 이 횡단면에 수직한 방향으로 감요수조의 길이는 x_t 이다.

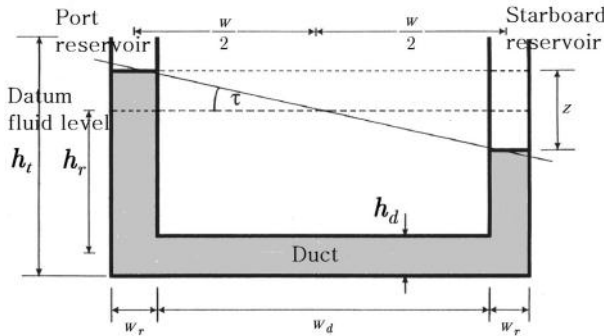


Fig. 1 Cross section of a single layer duct ART

Lloyd (1989)는 Stigter (1966)의 연구를 바탕으로 Fig. 1에 보인 단일덕트 U자형 감요수조내 유체의 자유동요 방정식을 다음과 같이 나타내었다.

$$a_{\tau\tau} \ddot{\tau} + b_{\tau\tau} \dot{\tau} + c_{\tau\tau} \tau = 0 \quad (1)$$

여기에서 계수 $a_{\tau\tau}$ 와 $c_{\tau\tau}$ 는 다음과 같고,

$$a_{\tau\tau} = \frac{\rho w_r^2 w^2 x_t}{2} \left(\frac{w}{2h_d} + \frac{h_r}{w_r} \right) \quad (2)$$

$$c_{\tau\tau} = \frac{\rho g w_r w^2 x_t}{2} \quad (3)$$

계수 $b_{\tau\tau}$ 는 감요수조 유동의 선형화된 감쇠계수이며, ρ 는 수조내 유체의 밀도이고 g 는 중력가속도이다.

식 (1)~식 (3)으로부터 감요수조내 유체의 고유원주파수 (natural circular frequency) ω_t 는 다음과 같다.

$$\omega_t = \sqrt{\frac{c_{\tau\tau}}{a_{\tau\tau}}} = \sqrt{\frac{2gh_d}{w_r w + 2h_r h_d}} \quad (4)$$

감쇠를 고려할 경우 유체 자유동요의 원주파수 ω_d 는 다음과 같다.

$$\omega_d = \sqrt{\omega_t^2 - \left(\frac{b_{\tau\tau}}{2a_{\tau\tau}}\right)^2} \quad (5)$$

선박이나 FPSO 등의 횡동요(roll)는 공진 시 운동응답이 특히 크고, 공진에서 운동응답을 줄이면 실제 해상에서 전체적으로 횡동요가 감소하는 특징이 있다. 수동형 감요수조 설계의 주안점은 선체 횡동요 고유주파수와 감요수조 유동 고유주파수를 일치시키는 것이다. 잘 알려져 있듯이 공진 시 선체에 가해지는 파 기진모멘트와 선체 횡동요 사이에는 90° 위상차가 난다. 선체 횡동요 고유주파수와 감요수조 유동 고유주파수를 일치시키면 공진 시 감요수조와 함께 움직이는 선체의 횡동요와 감요수조내 유체 모멘트 사이에 또다시 90°의 위상차가 난다 (Lloyd, 1989). 결국 선체 횡동요 기진모멘트와 감요수조 유체 모멘트 사이에 180°의 위상차가 나므로 감요수조 유체 모멘트가 파 기진모멘트를 상쇄시켜 선체의 횡동요를 감소시키는 감요효과가 발생한다.

선체의 횡동요 고유주기는 하중상태 등에 따라 변화할 수 있으며, 감요수조의 유동 주기도 그때마다 선체 횡동요 고유주기에 맞게 변화시킬 필요가 있다. 단일덕트 감요수조의 유동 주기를 조절하는 데는 덕트의 중앙부에 조절밸브(control throttle valve)를 설치하여 주로 유체감쇠를 조절하는 방식 등이 사용된다. 이 경우 밸브가 많이 닫힐수록 감쇠가 커지고 식 (5)에서 보듯이 감요수조 유동의 주파수가 감소하여 주기가 증가하는 효과가 있다.

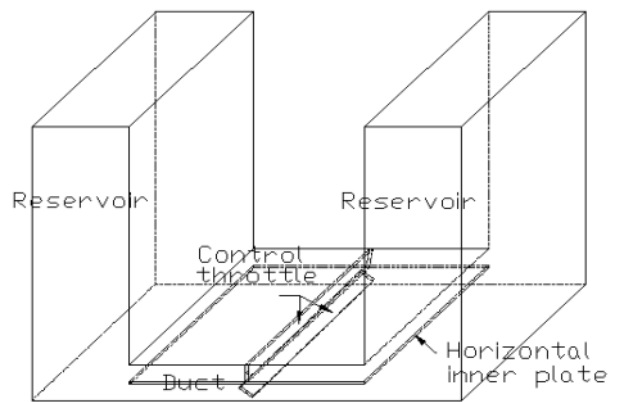


Fig. 2 Geometry of double layer duct ART

본 연구에서 이중덕트 감요수조의 구조는 Fig. 2에서와 같이 얇은 수평삽입판(horizontal inner plate)을 덕트 높이의 중앙에

수평방향으로 삽입하여 덕트를 1층과 2층으로 나누고, 개폐를 통해 유동주기를 조절 할 수 있는 주기조절판(period control throttle)을 덕트 1층과 2층 중앙에 각각 길이방향으로 설치하는 형태로 가정한다. 이 경우 한 층을 닫고 한 층만 열어 유체통로를 조절하면 덕트높이 h_d 가 반으로 줄어드는 효과가 있어 식 (2)의 관성항 계수 a_{rr} 도 상당히 변화한다. 따라서 각 조절판의 부분적 개폐에 의한 유동감쇠의 변화 외에도 추가적인 주기조절 효과를 얻을 수 있어 단일덕트에 비해 폭넓은 주기조절이 가능할 것으로 예상된다. 본 논문에서는 이를 실험을 통해 확인하고자 한다.

3. 실험모형 및 실험방법

3.1 실험모형

3.1.1 감요수조

투명 아크릴판으로 제작된 이중덕트 감요수조의 내면기준 주요 치수는 Fig. 3과 같고, 사용된 외판의 두께는 0.5cm이다. 덕트를 1층과 2층으로 나누는 수평삽입판의 두께는 0.15cm이며, 덕트의 겉보기 높이 1.95cm는 수평삽입판의 두께를 포함한 높이이므로 삽입판의 두께를 뺀 유효 덕트높이 h_d 는 1.80cm이다. 덕트의 횡방향 폭 w_d 는 12cm이며, 양쪽 저수조의 폭 w_r 은 각각 5cm이다. 감요수조의 길이 x_t 는 9cm이며, 덕트부 중간높이(통로가 열린 덕트부의 평균높이)로부터 저수조 수면 높이까지의 거리 h_r 이 5cm가 되도록 물을 채워 실험하였다. 따라서 3.1.2절의 선체 전체질량 대비 감요수조내 유체질량의 비는 대략 3.5% 정도이다.

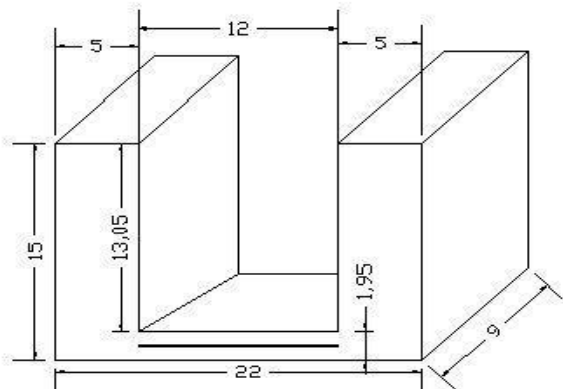


Fig. 3 Dimensions of double layer duct ART(unit in cm)

1층과 2층의 덕트 중앙에 설치되는 주기조절판은 실물에서는 덕트 내부 유동을 조절할 수 있도록 회전 밸브 형태로 설치될 수 있겠지만, 작은 모형 내부에 회전이 가능한 밸브를 설치하기는 어렵다. 따라서 Fig. 4와 같이 덕트 중앙을 막는 개폐정도에 따라 5가지 감요수조 모형을 제작하고 편의를 위해 각각의 모형에 이름을 부여하였다(폐쇄에 사용된 아크릴판의 두께는 0.5cm).

덕트를 100% 개방한 경우로 이중덕트 주기조절판을 1층과 2층 모두 개방한 모델을 ART1, 덕트를 75% 개방한 경우로 아래 1층 덕트는 완전히 개방하고 위 2층 덕트는 절반만 개방한 모델을 ART2, 덕트를 50% 개방한 경우로 1층 덕트는 완전히 개방하고 2층 덕트는 완전히 닫은 모델을 ART3, 덕트를 25% 개방한 경우로 2층 덕트는 완전히 닫고 1층 밸브는 절반만 개방한 모델을 ART4로, 감요수조가 작동하지 않는 경우로 덕트가 완전히 닫힌 모델을 ART0으로 이름을 각각 부여하였다.

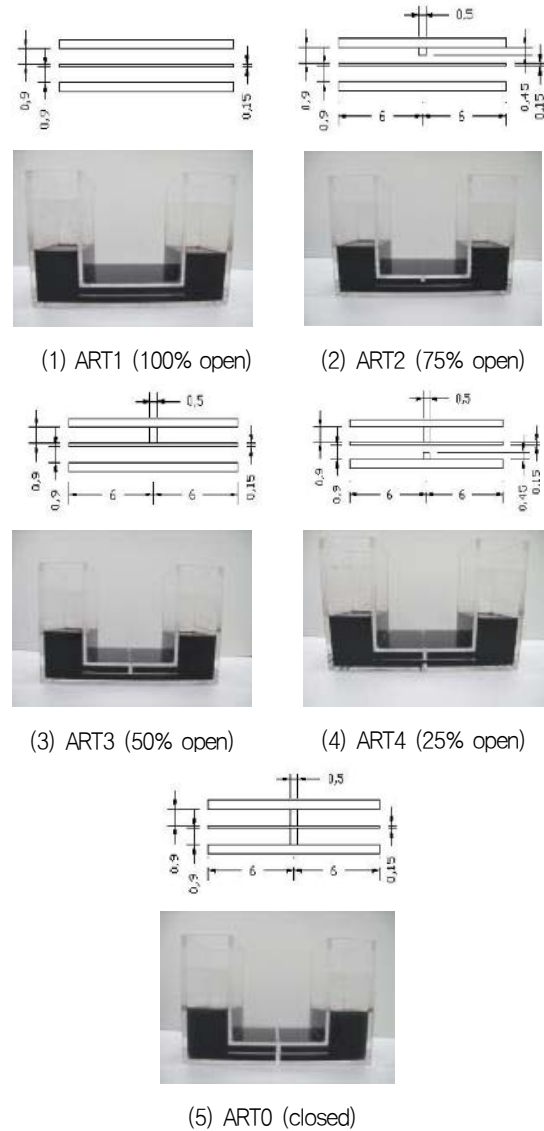


Fig. 4 Double layer duct ART models(unit in cm)

감요수조를 옆으로 기울였다 놓는 방법으로 수조내 유체의 동요를 유발하고 동영상 분석을 통해 각 모형의 유동주기를 측정하였으며, Table 1에 결과를 보인다. ART1의 주기 1.02sec로부터 ART4의 주기 1.45sec까지 주기가 폭 넓게 변화함을 알 수 있다. ART1과 ART3의 경우 식 (4)에 의해 계산된 주기(ART1의 경우 $h_d = 1.8\text{cm}$, ART3의 경우 $h_d = 0.9\text{cm}$ 로 가정하여 계산함)도 함께 수록하였는데, 실제 측정 주기와 다소 차이가 있고 이론 주기가 측정 주기에 비해 대체로 길게 산출됨을 알 수 있다.

Table 1 Fluid oscillation periods of double layer duct ART models

ART model	Measurement	Theory
ART1 (100% open)	1.02 sec	1.07 sec
ART2 (75% open)	1.05 sec	
ART3 (50% open)	1.35 sec	1.45 sec
ART4 (25% open)	1.45 sec	

3.1.2 모형선

모형선은 두께 1 cm의 투명 아크릴판으로 제작하였으며, 형상은 실험의 단순화를 위해 Fig. 5와 같이 박스 형태로 제작하였다. 모형의 외측 면을 기준으로 길이가 100cm이고 폭이 25cm, 깊이(높이)가 16cm이다. 모형선에 감요수조와 무게추 등을 설치한 상태에서 흘수는 8cm이며, 각각의 감요수조는 모형선 길이의 중앙에 그리고 감요수조 바닥판 밑면이 모형선 바닥판 윗면 위 1.5cm에 위치하도록 설치되었다. Fig. 6에 감요수조가 설치된 모형선의 사진을 보인다.

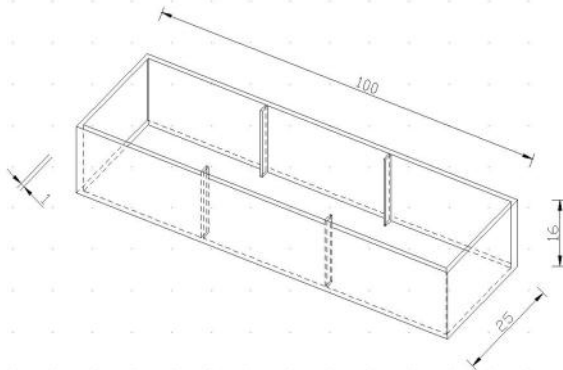


Fig. 5 Dimensions of model ship (unit in cm)

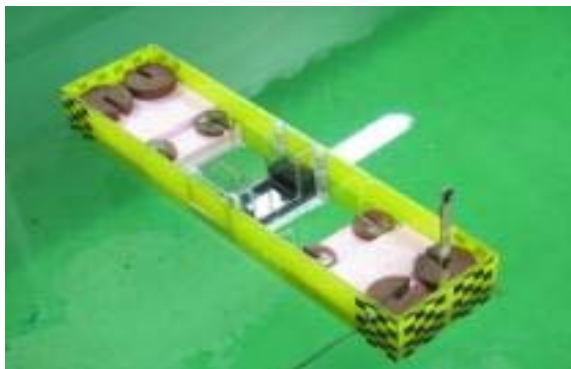


Fig. 6 Photo of the model ship equipped with ART

흘수 8cm의 동일한 배수량에서 단순히 모형 내 무게추를 상하방향으로 이동시켜 감요수조 ART0(closed)을 장착한 모형선의 횡동요 주기를 1.02sec, 1.05sec, 1.35sec, 1.45sec로 변화시킨 Case 1~Case 4의 하중상태를 만들었고, 각각의 경우 횡동

요 주기와 바닥으로부터 무게중심까지의 높이 KG를 Table 2에 보인다. Case 1~Case 4의 하중상태는 각각 감요수조 ART1~ART4의 실험을 위해 준비된다.

Table 2 Roll periods and KG's of model ship for four load cases

Load case	Roll period	KG
Case 1 (for 100% open ART1)	1.02 sec	4.95cm
Case 2 (for 75% open ART2)	1.05 sec	6.40cm
Case 3 (for 50% open ART3)	1.35 sec	8.10cm
Case 4 (for 25% open ART4)	1.45 sec	9.03cm

3.2 실험방법

실험은 부경대학교 조파수조(길이 40m, 폭 2.5m, 수심 1.3m)에서 수행되었다. 모형선은 횡파 중에 놓이도록 수조 폭 방향으로 전진속도 없이 계류시켰으며, 구속된 운동이 없어 6자유도 운동을 할 수 있지만 모형의 대칭성으로 횡동요(roll)와 상하동요(heave), 좌우동요(sway)만 나타나는 상태가 된다. 파주기의 모형선 운동에 영향을 주지 않을 만큼 충분히 연한 스프링으로 계류하였으며, 계류계에 의한 장주기 좌우동요 주기는 약 17sec이었다. 모형선으로부터 조파기 방향으로 6m 떨어진 위치에 저항식 파고계를 설치하여 수면변위를 계속하였고, 모형선에 설치된 LED 타겟을 이용한 비접촉 광학방식으로 운동응답을 계속하였다.

실제의 감요수조는 파랑중 선박의 횡동요 주기를 계속하고 선박에 설치된 감요수조의 주기를 조절밸브 등을 이용하여 선체의 주기에 맞추어 주는 방식으로 운용될 수 있다. 하지만 모형시험에 있어 소형 감요수조 모형의 덕트에 작동이 가능한 밸브를 설치하는 것은 현실적으로 곤란하여 미리 선정된 덕트 개폐상태별 유동주기에 모형선의 횡동요 주기를 맞추는 역순의 방식으로 실험이 수행되었다. 실험의 순서는 아래와 같다.

- ① 감요수조 ART1의 유동주기를 측정한다.
- ② 모형선에 덕트가 닫혀있는 감요수조 ART0을 설치하고 ①에서 측정된 감요수조의 유동주기에 모형선의 횡동요 주기를 무게추 이동으로 맞춘다.
- ③ 감요수조 ART0이 설치된 ②의 모형선에 대해 규칙파 중 횡동요 RAO(response amplitude operator)를 구하는 실험을 수행한다.
- ④ 감요수조 ART0을 모형선에서 제거하고 감요수조 ART1을 모형선에 설치해서 규칙파 중 횡동요 RAO 실험을 수행한다.
- ⑤ 감요수조를 ART2~ART4로 바꿔가며 ①~④의 과정을 반복하여 수행한다.

4. 실험결과 및 고찰

감요수조의 성능을 파악하기 위하여 규칙파 중 횡동요 RAO를 구하는 실험을 수행하였다. 파고($H_w = 2A_w$)는 약 2cm로 비교적 일정하게 주었고, 파주기(T_w)는 0.7sec ~ 1.7sec 또는 0.7

sec ~ 1.8sec 범위의 0.1sec 간격을 기본으로 하여 실험하였다. 공진점이나 극소점을 찾기 위해 공진점이나 극소점 근방에서는 주기를 0.05sec 간격으로 좁혀서 실험하기도 하여 이중덕트 모형에 대한 총 실험횟수는 대략 108번이었다. Fig. 7에는 계속된 파와 횡동요의 시간이력 예를 보인다. Case 2의 공진주기 0.15sec에 대한 결과이며, 감요수조를 작동시키지 않는 ART0을 장착한 (1)의 횡동요에 비해 감요수조 ART2를 작동시킨 (2)의 횡동요가 현저히 줄어드는 것을 볼 수 있다.

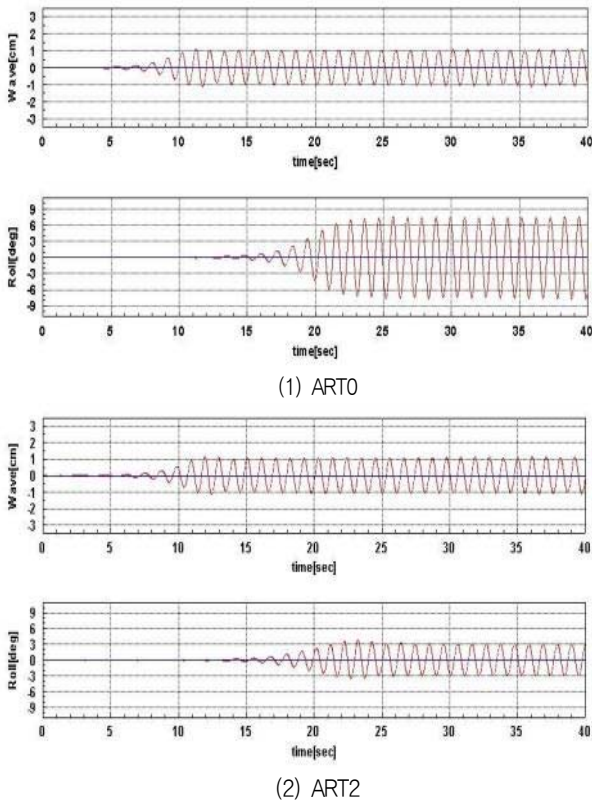


Fig. 7 Example time history of wave and roll(Case 2, $T_w = 1.05$ sec)

모형선의 고유주기가 1.02sec에 세팅된 Case 1의 주요 실험 데이터를 Table 3에 보이고 횡동요 RAO의 변화를 Fig. 8에 보인다. ϕ_a 는 횡동요 진폭이고, A_w 는 파 진폭이다. 감요수조가 작동하지 않는 경우에 해당하는 ART0이 설치된 실험 결과와 감요수조가 작동하는 경우에 해당하는 ART1이 설치된 실험 결과를 비교하여 보이고 있다. 감요수조가 작동하지 않는 경우 고유주기 1.02sec에서 공진 현상이 나타나고, 감요수조가 작동하는 경우 0.95sec와 1.15sec에서 완화된 2번의 공진이 나타남을 볼 수 있다. 주기 1.02sec에서 보면 감요수조가 작동하는 경우에 감요수조가 작동하지 않는 경우에 비해 52%의 횡동요 저감 효과가 나타나는 것을 알 수 있다.

모형선의 고유주기가 1.05sec에 세팅된 Case 2의 주요 실험 데이터를 Table 4에 보이고 횡동요 RAO의 변화를 Fig. 9에 보인다. 감요수조가 작동하지 않는 ART0을 장착한 경우 고유주기 1.05sec에서 공진 현상이 나타나고, 감요수조가 작동하는 ART2

Table 3 Result summary of Case 1 experiment

T_w [sec]	ART0			ART1		
	H_w ($2 \cdot A_w$) [cm]	ϕ_a [deg]	ϕ_a/A_w [deg/cm]	H_w ($2 \cdot A_w$) [cm]	ϕ_a [deg]	ϕ_a/A_w [deg/cm]
0.70	1.98	1.13	1.14	1.97	1.23	1.25
0.80	2.15	1.98	1.84	2.12	2.25	2.12
0.90	2.01	3.47	3.46	1.89	3.90	4.12
0.95				2.02	4.56	4.52
1.00	1.96	7.09	7.22	1.89	3.78	4.01
1.02	1.98	7.43	7.49	1.93	3.46	3.58
1.05				2.04	3.49	3.43
1.10	2.07	5.18	5.00	2.04	3.89	3.43
1.15				1.97	4.21	3.95
1.20	2.21	3.10	2.80	2.15	3.71	3.45
1.30	2.10	2.20	2.10	2.11	2.48	2.36
1.40	2.06	1.70	1.65	2.07	1.82	1.76
1.50	2.10	1.42	1.35	2.09	1.47	1.41
1.60	2.08	1.22	1.17	2.09	1.23	1.18
1.70	2.19	1.12	1.03	2.17	1.15	1.06

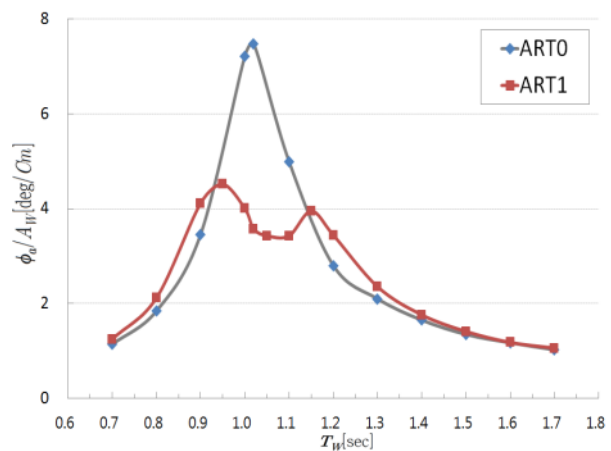


Fig. 8 Comparison of roll RAOs of ART0 and ART1 for Case 1 experiment

를 장착한 경우 1.0sec와 1.1sec에서 완화된 공진들이 나타남을 볼 수 있다. 주기 1.05sec에서 보면 감요수조가 작동하는 경우에 감요수조가 작동하지 않는 경우에 비해 45%의 횡동요 저감효과가 나타나는 것을 알 수 있다.

모형선의 고유주기가 1.35sec에 세팅된 Case 3의 주요 실험 데이터를 Table 5에 보이고 횡동요 RAO의 변화를 Fig. 10에 보인다. 감요수조가 작동하지 않는 ART0을 장착한 경우 고유주기 1.35sec에서 공진 현상이 나타나고, 감요수조가 작동하는 ART3를 장착한 경우 1.2sec와 1.6sec에서 완화된 공진들이 나타남을 볼 수 있다. 주기 1.35sec에서 보면 감요수조가 작동하는 경우에 감요수조가 작동하지 않는 경우에 비해 68%의 횡동요 저감 효과가 나타나는 것을 알 수 있다.

Table 4 Result summary of Case 2 experiment

T_w [sec]	ART0			ART2		
	H_w ($2 \cdot A_w$) [cm]	ϕ_a [deg]	ϕ_a/A_w [deg/cm]	H_w ($2 \cdot A_w$) [cm]	ϕ_a [deg]	ϕ_a/A_w [deg/cm]
0.70	1.93	0.95	0.98	1.99	1.02	1.02
0.80	2.07	1.56	1.51	2.05	1.83	1.79
0.90	1.91	2.67	2.80	1.87	3.10	3.31
0.95				1.88	3.99	4.25
1.00	1.86	6.17	6.65	1.88	4.32	4.59
1.05	2.02	7.53	7.47	2.05	4.21	4.11
1.10	1.95	6.63	6.81	1.94	4.01	4.13
1.15				2.00	3.96	3.97
1.20	2.16	3.58	3.32	2.12	3.82	3.60
1.30	2.08	2.44	2.35	2.04	2.77	2.72
1.40	2.04	1.80	1.76	2.03	1.97	1.94
1.50	2.08	1.51	1.45	2.09	1.57	1.50
1.60	2.04	1.26	1.24	2.05	1.29	1.25
1.70	2.15	1.12	1.04	2.13	1.18	1.11

Table 5 Result summary of Case 3 experiment

T_w [sec]	ART0			ART3		
	H_w ($2 \cdot A_w$) [cm]	ϕ_a [deg]	ϕ_a/A_w [deg/cm]	H_w ($2 \cdot A_w$) [cm]	ϕ_a [deg]	ϕ_a/A_w [deg/cm]
0.70	1.99	0.22	0.22	2.11	0.24	0.23
0.80	2.17	0.45	0.42	2.18	0.40	0.37
0.90	1.91	0.48	0.50	1.88	0.57	0.61
1.00	1.95	0.67	0.69	1.91	0.90	0.95
1.10	2.02	1.19	1.18	2.07	1.80	1.74
1.20	2.28	2.50	2.19	2.25	2.84	2.53
1.30	2.04	4.87	4.78	2.07	2.46	2.37
1.35	1.88	5.94	6.33	1.95	2.00	2.05
1.40	1.98	6.10	6.16	2.00	1.69	1.69
1.45	2.05	4.46	4.36	2.04	1.62	1.59
1.50	2.04	3.51	3.44	2.07	1.79	1.73
1.60	2.07	2.18	2.11	2.07	2.30	2.22
1.70	2.16	1.67	1.55	2.17	2.37	2.17

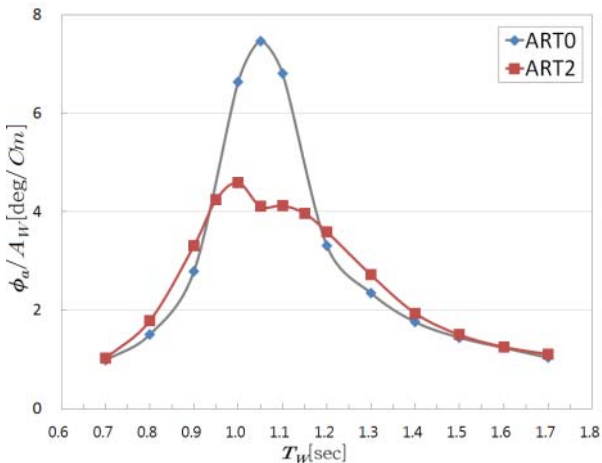


Fig. 9 Comparison of roll RAOs of ART0 and ART2 for Case 2 experiment

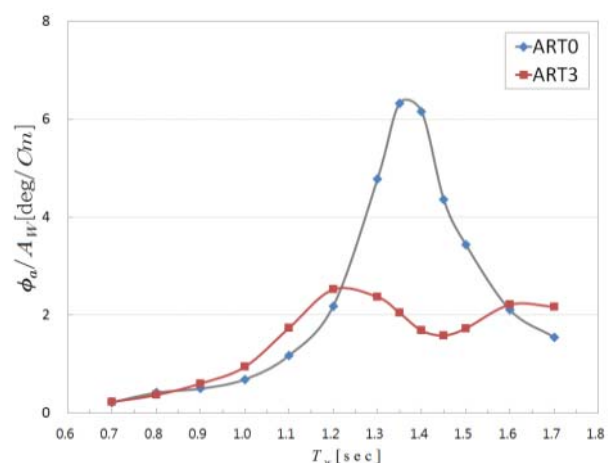


Fig. 10 Comparison of roll RAOs of ART0 and ART3 for Case 3 experiment

모형선의 고유주기가 1.45sec에 세팅된 Case 4의 주요 실험 데이터를 Table 6에 보이고 횡동요 RAO의 변화를 Fig. 11에 보인다. 감요수조가 작동하지 않는 ART0을 장착한 경우 고유주기 1.45sec에서 공진 현상이 나타나고, 감요수조가 작동하는 ART4를 장착한 경우 1.35sec와 1.7sec에서 완화된 공진들이 나타남을 볼 수 있다. 주기 1.45sec에서 보면 감요수조가 작동하는 경우에 감요수조가 작동하지 않는 경우에 비해 61%의 횡동요 저감 효과가 나타나는 것을 알 수 있다.

비교 목적으로 거의 동일한 제원의 단일덕트 감요수조에 대한 실험도 수행하였다. 앞에서 기술한 이중덕트와 비교하여 1층과 2층을 나누는 수평삽입판이 없고 덕트높이 h_d 가 이중덕트에서 삽입판의 두께를 뺀 유효 덕트높이 1.8cm와 같도록 제작하였다.

이 외의 제원은 이중덕트의 경우와 같고, 실험방법도 이중덕트의 경우와 같다. 단일덕트에서 100% 개방된 모델을 ART-SD100이라 하고, 50% 개방된 모델(덕트 중앙에서 위아래 동일한 틈을 두고 중간에서 통로의 50%를 막음)을 ART-SD50, 25% 개방된 모델(덕트 중앙에서 아래에만 틈을 두고 통로의 위쪽을 75% 막음)을 ART-SD25라 표시하기로 한다. ART-SD100의 유동주기는 이중덕트 ART1과 같은 1.02sec로 측정되었고, ART-SD50의 유동주기는 1.08sec, ART-SD25의 유동주기는 1.20sec로 측정되었다. Fig. 12 ~ Fig. 14에는 각각 ART-SD100과 ART-SD50, ART-SD25의 횡동요 RAO를 감요수조가 작동하지 않는 ART0의 경우와 비교하여 보인다. ART-SD100의 경우 이중덕트 ART1과 거의 같은 결과를 보이고 있고, 고유주기 1.02sec에서 감요수조가 작동하지 않는 경우에 비해 51%의 횡동요 저감 효과를 보인

다. ART-SD50의 경우 고유주기에 가까운 1.10sec에서 감요수조가 작동하지 않는 경우에 비해 39%의 횡동요 저감 효과를 보이며, ART-SD25의 경우 고유주기 1.20sec에서 30%의 횡동요 저감 효과를 보이고 있다. 일반적으로 유동감쇠가 큰 감요수조의 경우 하나의 공진점만 나타나는데 ART-SD50과 ART-SD25의 결과에서도 이와 유사한 특징이 나타나고 있다.

Table 6 Result summary of Case 4 experiment

T_w [sec]	ART0			ART4		
	H_w ($2 \cdot A_w$) [cm]	ϕ_a [deg]	ϕ_a/A_w [deg/cm]	H_w ($2 \cdot A_w$) [cm]	ϕ_a [deg]	ϕ_a/A_w [deg/cm]
0.70	1.95	0.26	0.26	1.96	0.16	0.16
0.80	2.09	0.29	0.27	2.10	0.17	0.17
0.90	1.92	0.33	0.35	1.91	0.32	0.34
1.00	1.90	0.45	0.47	1.93	0.56	0.58
1.10	2.01	0.82	0.82	1.97	1.05	1.06
1.20	2.15	1.48	1.37	2.19	1.81	1.65
1.30	2.01	2.60	2.59	2.03	2.72	2.68
1.40	2.01	5.24	5.23	1.97	2.42	2.47
1.45	2.03	5.87	5.79	2.03	2.29	2.26
1.50	2.07	5.43	5.25	2.04	2.13	2.09
1.60	2.05	2.82	2.75	2.04	1.95	1.92
1.70	2.16	2.06	1.91	2.15	2.13	1.98
1.80	2.17	1.48	1.37	2.18	2.00	1.84

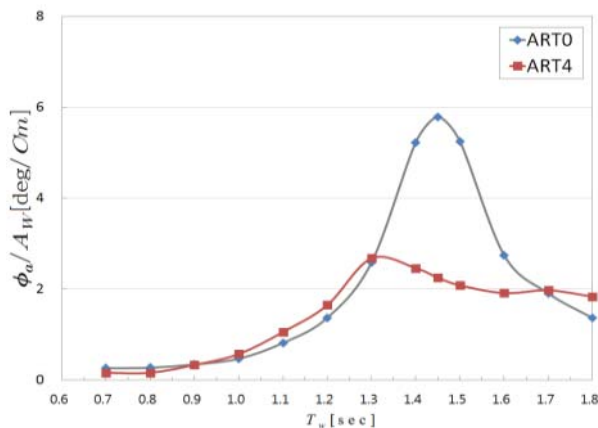


Fig. 11 Comparison of roll RAOs of ART0 and ART4 for Case 4 experiment

Fig. 8~ Fig. 11의 이중덕트 실험결과와 Fig. 12~ Fig. 14의 단일덕트 실험결과를 비교해 보면 이중덕트 감요수조의 우수성을 확인할 수 있다. 실험이 수행된 덕트 개방비율 100%~25% 범위에서 이중덕트는 1.02sec~1.45sec의 주기변화를 보인 반면 단일덕트는 1.02sec~1.20sec의 주기변화를 보여서 이중덕트 감요수조가 단일덕트 감요수조에 비해 대략 2배 넓게 주기조절이 가능함을 알 수 있다. 이중덕트가 이러한 우수한 주기조절 성능을 나타내는 이유는 개폐정도에 따른 감쇠변화 외에도 유체통로가 되는

유리한 덕트높이 h_d 자체가 이중덕트의 개폐정도에 따라 변함으로써 관성항 변화의 효과도 추가되기 때문이라고 할 수 있다[식 (2)와 식 (4) 참조]. 또한, 수행된 실험들에서 선체의 횡동요 공진점을 기준으로 할 때 이중덕트는 45%~68%의 저감효과를 보였고 단일덕트는 30%~51%의 저감효과를 보여서 이중덕트 감요수조가 상대적으로 더 큰 횡동요 저감효과를 냈다고 할 수 있다.

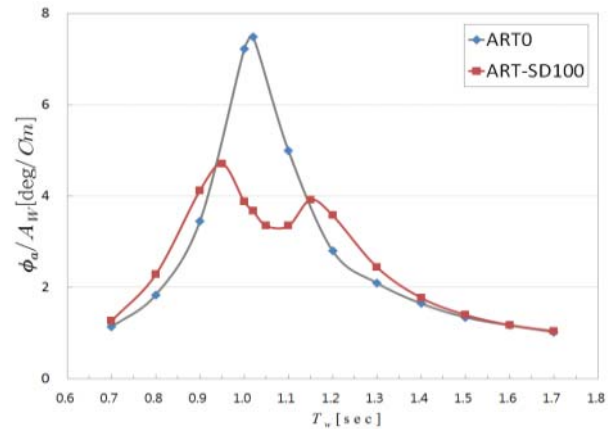


Fig. 12 Comparison of roll RAOs of ART0 and ART-SD100

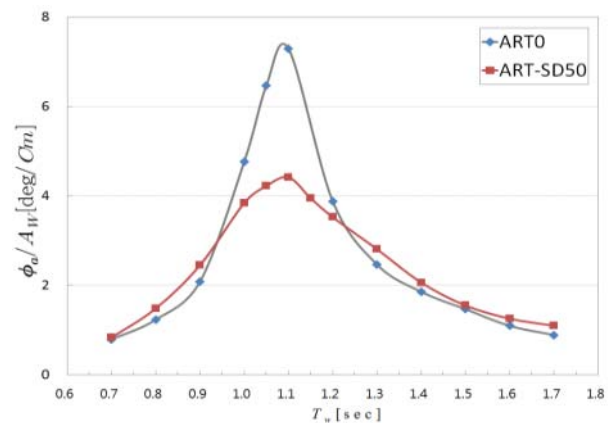


Fig. 13 Comparison of roll RAOs of ART0 and ART-SD50

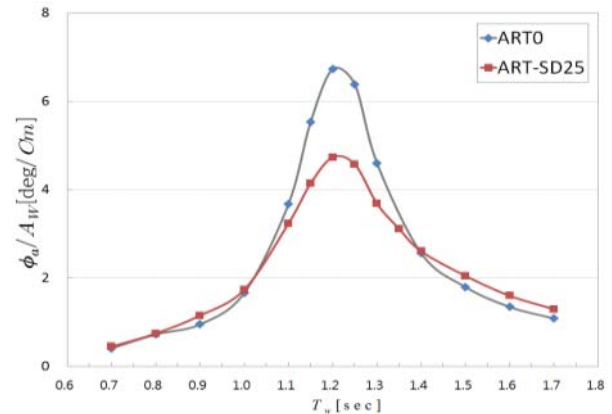


Fig. 14 Comparison of roll RAOs of ART0 and ART-SD25

5. 결론

선체의 횡동요 고유주기는 하중상태에 따라 변화하며, 감요수조의 유동주기도 그때마다 횡동요 고유주기에 맞게 변화시켜야 효과적으로 선박의 횡동요를 감소시킬 수 있다. 현재 다양한 방법으로 감요수조의 유동주기를 넓게 변화시키려는 시도가 있지만 단일덕트의 구조로 감요수조의 유동주기를 조절 할 경우 변화 폭이 그리 넓지 못하다. 본 연구에서는 감요수조의 덕트를 2층으로 설계하여 선별적/부분적으로 개폐함으로써 유동주기를 보다 넓게 변화시키는 방법을 제안하였고, 실험을 통해 그 효과를 확인하였다. 주요 결과들은 다음과 같다.

첫째, 실험이 수행된 덕트 개방비율 100%~25% 범위에서 이중덕트는 1.02sec~1.45sec의 주기변화를 보인 반면 단일덕트는 1.02sec~1.20sec의 주기변화를 보여서 이중덕트 감요수조가 단일덕트 감요수조에 비해 대략 2배 넓은 주기조절이 가능함을 확인하였다. 이중덕트가 우수한 주기조절 성능을 나타내는 이유는 개폐정도에 따라 유동감쇠가 변할 뿐 아니라 관성항도 변하기 때문이라고 할 수 있다.

둘째, 수행된 횡규척과 중 실험들에서 선체의 횡동요 공진점을 기준으로 할 때 이중덕트는 45%~68%의 횡동요 저감효과를 보였고 단일덕트는 30%~51%의 횡동요 저감효과를 보여서 이중덕트 감요수조를 사용할 경우 상대적으로 더 우수한 횡동요 저감효과를 얻을 수 있음도 확인하였다.

본 논문에서 확인된 단일덕트 대비 이중덕트의 우수성은 3층 이상의 다중덕트에도 확장이 가능하며, 향후 축적효과를 줄일 수 있는 큰 모형에서 개폐정도를 마음대로 조절할 수 있는 밸브를 장착한 실험도 필요하다고 생각된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2013년)에 의하여 연구되었습니다.

References

Field, S.B. & Martin, J.P., 1975. Comparative effects of U-Tube and free Surface Type Passive Roll Stabilisation Systems. *The Royal Institution of Naval*

- Architects, Spring Meetings*, London, 24 April 1975, pp.1-14.
- Gawad, A.F.A., Ragab, S.A., Nayfeh, A.H. & Mook, D.T., 2001. Roll Stabilization by Anti-Roll Passive Tanks. *Ocean Engineering*, 28, pp.457-469.
- Lew, J.M., Kim, H. & Lee, H.Y., 2003. A Study on the Effects of the Period Control Device of Anti-Rolling Tanks. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(1), pp.1-7.
- Lloyd, A.R.J.M., 1989. *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*. Ellis Horwood Limited, Chichester, New York, pp.377-397.
- Moaleji, R. & Greig, A.R., 2007. On the Development of Ship Anti-Roll Tanks. *Ocean Engineering*, 34, pp.103-121.
- Sellers, F.H. & Martin, J.P., 1992. Selection and Evaluation of Ship Roll Stabilization Systems. *Marine Technology*, 29(2), pp.84-101.
- Stigter, C., 1966. The Performance of U-Tanks as a Passive Anti-Rolling Device. *ISP*, 13(144), pp.249-275.
- Woo, B.K. & Koo, J.D., 1971. On the Performance of the Anti-Rolling Tank(1). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 8(2), pp.35-44.
- Woo, B.K., In, C.H. & Koo, J.D., 1974. On the Performance of Anti-Rolling Tanks(2). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 11(1), pp.17-26.



주영광



김용직



하영락