

추진기 캐비테이션 성능해석법

이 진 태 <선박해양공학연구원>

1. 서 언

최근 선박의 대형화·고속화로 인하여 추진기의 부하가 증가되고 있으며, 특히 최근 등장한 5,000TEU급 컨테이너선의 경우 추진기가 흡수해야 되는 축마력이 70,000HP 이상인 경우도 있다. 커다란 축마력을 흡수하여 선박을 빠른 속도로 추진시켜야 되는 최근의 추진기는 작동 원리상 캐비테이션 발생을 피할 수 없으며 캐비테이션 발생량의 허용범위 및 캐비테이션 거동의 특성을 고려하여 추진기를 설계하여야 된다. 캐비테이션의 여유가 없이 추진기 설계가 수행되기 때문에 추진기 캐비테이션의 성능해석은 엄밀한 정밀도가 요구된다.

캐비테이션이란 일정한 온도에서 유체동역학 작용에 의해서 유체주위의 압력이 일정한 압력(예 : 증기압) 이하로 낮아질 때 물이 기화하여 수증기로 변하면서 빈 공간을 형성하는 현상을 말한다. 이렇게 발생된 캐비티는 주위 압력환경에 따라 생성, 성장, 수축, 붕괴의 과정을 거치게 된다. 특히 붕괴의 과정은 짧은 시간내에 급격히 진행되기 때문에 진동 및 소음의 원인이 되고, 심할 경우 추진기 혹은 주위 물체 표면에 침식작용의 원인이 되기도 한다. 본 고에서는 캐비테이션의 물리적 특성 및 분류방법을 간단히 소개하고, 캐비테이션에 의한 선박추진기의 성능저하 특성 및 모형시험 기법을 이용한 캐비테이션 성능해석법을 소개하였다.

2. 추진기 캐비테이션의 종류

캐비테이션은 형태, 발생부위 등에 따라 여러 분류

방법[1]이 있을 수 있으나 선박용 추진기에 발생하는 캐비테이션을 외부 형상 및 특성에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

a) 쉬이트 캐비테이션 (Sheet Cavitation)

쉬이트 캐비테이션은 프로펠러 날개단면의 입사각이 큰 경우 날개면의 압력강하가 큰 날개 앞날 부근부터 발생한다. 이 경우 유체가 날개 표면으로부터 분리되고 커다란 캐비티가 얇은 층을 이루며 날개표면을 덮게 된다. 대부분의 경우 쉬이트 캐비테이션은 투명하고 매끈한 표면을 갖게 되며 거동 또한 안정적인 경우가 많으므로 날개표면 침식의 위험성이 낮다.

b) 기포 캐비테이션 (Bubble Cavitation)

유체중에 유체와 비슷한 속도로 이동하는 기포의 형상을 갖고 있으며, 추진기 날개표면중 코오드 길이의 중간점 혹은 날개단면중 최고 두께를 갖는 점에서 발생한다. 유체와 함께 움직이면서 생성, 성장, 수축, 붕괴의 과정을 거치므로 비정상 특성이 강하며 특히 붕괴시 날개표면에 커다란 충격압력을 주게 되어 침식의 원인이 된다.

c) 구름 캐비테이션 (Cloud Cavitation)

쉬이트 캐비테이션이 발달하여 불안정해지고 캐비티 내부가 작은 기포들로 가득 차게 되면 안개 혹은 구름처럼 보이게 된다. 일반적으로 구름 캐비테이션은 기포들이 군을 이루어 붕괴되기 때문에 날개표면 침식을 발생시키는 가장 위험한 캐비테이션이다.

d) 날개끝 보오텍스 캐비테이션 (Tip Vortex Cavi-

tation)

프로펠러 날개 끝에서 떨어지는 보오텍스 내부에 전단류(Shear flow)가 큰 중심부에서 발생된다. 보통의 경우 날개끝 보오텍스 캐비테이션은 날개 끝으로부터 얼마간 뒤쪽에서 발생하기 시작한다. 많은 프로펠러의 경우 캐비테이션의 초기 발생은 날개끝 보오텍스 캐비테이션이 가장 먼저 발생한다. 캐비테이션 초기발생 속도를 높이기 위해 프로펠러 날개의 반경방향 부하를 날개끝에서 적게 하여 설계하기도 한다. 이런 종류의 캐비테이션은 붕괴과정이 비교적 천천히 진행되기 때문에 프로펠러 날개의 침식에 직접적인 영향은 주지 않으나 붕괴가 주위 고체표면 바로 근처에서 발생하는 덕트 프로펠러의 경우 덕트 내부 표면에 침식을 야기시킬 수 있다.

e) 허브 보오텍스 캐비테이션
(Hub Vortex Cavitation)

날개 뿌리에서 나온 날개수 만큼의 보오텍스가 허브끝에서 모여서 강력한 보오텍스를 형성하게 되고 이 보오텍스의 중심부(Core)에 허브 보오텍스 캐비테이션이 발생한다. 이것은 프로펠러 날개수와 같은 가닥수의 두꺼운 로프처럼 보인다.

3. 캐비테이션에 의한 성능저하

캐비테이션 발생에 의한 선박 추진기 성능저하를 다음과 같이 분류하였다.

a) 추력 감소

캐비테이션이 과다하게 발생하게 되면 날개 흡입면에서의 압력이 증기압이 되므로 프로펠러가 발생해야 될 추력을 내지 못하게 되고 그에 따라 추력, 토오크 및 추진효율이 감소하게 된다. 캐비테이션 발생 허용량은 일반적으로 캐비테이션에 의한 추력감소가 크지 않은 범위이다.

b) 선체표면 변동압력 증가

프로펠러가 선미 후류에서 작동하면서 캐비테이션이 발생하게 되면 캐비테이션의 발생량이 추진기 날개 위치각에 따라 주기적으로 변하게 된다. 날개회전 진동수에 따라 주기적으로 변화되는 캐비테이션 양은 유체를 통하여 선체표면에 변동압력을 주게 된다. 이러한 비정상 선체표면 변동압력의 크기는 캐비테이션이 발생하지 않는 경우에 비해 발생할 경우 10 배 이상 증가하게 된다. 이러한 선체표면 변동압력의

크기를 일정한 기준보다 적게 하여 선체 진동의 기진력을 낮추어야만 된다.

c) 추진기 및 주위 물체 손상

캐비티가 붕괴할때 물체 표면에 침식이 일어난다. 이러한 침식은 주로 기포 캐비테이션 및 구름 캐비테이션에 의해 일어난다. 캐비테이션에 의한 침식작용은 선박 추진기 이외의 다른 분야에서도 활발히 연구되고 있는 분야이다. 이러한 침식작용을 피하기 위한 방법으로서 완전 캐비테이션 프로펠러를 설계하여 설치할 수 있다.

d) 수중 방사소음 증가

캐비티가 붕괴될때 소음이 발생된다. 특히 은밀하게 주어진 임무를 수행해야 되는 특수목적을 갖는 선박(잠수함 혹은 해군함정)은 캐비테이션에 의한 방사소음의 증가는 크게 문제가 된다. 해군 함정과 관련된 캐비테이션 연구의 대부분은 수중 방사소음의 크기를 최소화하고 수중 방사소음의 특성을 해석하기 위한 연구이다.

4. 모형시험에 의한 캐비테이션 성능해석

4.1 시험 조건

캐비테이션 터널이란 밀폐된 수로 안으로 물을 흐르게 하고 내부의 압력을 조절할 수 있어 모형과 실선 프로펠러 사이의 역학적 상사법칙을 만족시킬 수 있도록 만들어진 시험시설이다. 국내에서는 선박·해양공학연구원[2][3]와 현대선박해양연구소가 각각 1대의 시설을 갖고 있다.

캐비테이션 터널에서의 모형시험은 가능한 한 실선 프로펠러와 동일한 환경에서 수행되는 것이 바람직하나 모든 조건을 만족할 수는 없다. 기하학적으로 상사한 모형프로펠러가 캐비테이션 터널에서 재현된 반류중에서 작동하는 경우를 생각하여 보자. 터널 내부의 유체는 기포 핵(Nuclei)이 충분히 있고 공기함유량(Air Content)이 충분히 작아서 캐비테이션이 안정적으로 발생하도록 하여야 된다.

캐비테이션의 발생에 관련되는 파라메타로서 캐비테이션 수 $\left(\sigma_0 = \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2} \rho V_R^2} \right)$ 를 정의한다. 여기서 P_0 는 기준점에서의 유체정압, P_V 는 증기압, ρ 는 유체밀도, V_R 은 기준속도이다. 일반적으로 캐비테이션 수가 크면 캐비테이션이 발생하지 않은 경우이고, 캐비테이션 수가 작으면 캐비테이션이 발생할 가능성이 높은 경

우이다. 캐비테이션 수가 작아지거나 입사각이 서서히 증가하면 압력이 낮은 부분부터 캐비테이션이 발생하기 시작하고, 캐비테이션 수가 감소함에 따라 캐비테이션 발생면적이 증가하여 결국 날개면 전체가 캐비테이션으로 덮히게 되는 완전 캐비테이션(Super-Cavitation)상태가 된다. 캐비테이션 시험은 프로펠러 전진계수 $(J_A = \frac{V_A}{nD})$ 혹은 추력계수 $(K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4})$ 가 실선 프로펠러의 값과 대응되는 값에서 캐비테이션 수 $(\sigma_n = \frac{P_0 - P_V}{\frac{1}{2} \rho n^2 D^2})$ 가 실선의 값과 같아지도록 터널의 압력을 조절하여 시험조건을 결정한다. 이때 레이놀드수는 가능한 큰 값에서 실험을 수행하여야만 캐비테이션 발생량이 안정적이 된다.

4.2 캐비테이션 시험 종류

캐비테이션 터널을 이용한 시험은 3차원 날개, 타, 그리고 물수채 주위 유동 및 힘계측을 포함하여 다양하지만 추진기 관련 시험은 다음과 같이 정리할 수 있다.

a) 균일류중 단독시험

터널 내부의 균일류중 작동하는 추진기의 추력 및 토크를 계측한다. 일반적으로 예인수조에서의 단독시험 상태보다 레이놀드수가 높은 조건에서 시험을 수행하기 때문에 안정적인 결과를 얻을 수 있으나 터널의 위벽효과(Wall effect)를 고려하여 계측값의 수정이 필요하다. 터널 내부의 압력을 낮추어 캐비테이션 발생시 추력 및 토크 감소값을 계측할 수도 있다.

b) 선체반류 재현시험

예인수조에서 계측된 선미반류를 캐비테이션 터널에서 재현하는 시험이다. 예인수조에서 사용되었던 선체를 직접 터널에 설치하는 방법, 선미부분을 재생한 부분모형선(Dummy hull) 혹은 철사망(Wire mesh)을 이용하여 재현하는 방법 등이 있다. 모형선을 직접 설치하는 방법이 가장 이상적이나 대형 시험부를 갖는 대형 캐비테이션 터널을 필요로 한다. 또한 위벽효과를 감소시키기 위해 유동조절체(Flow liner)를 설치하기도 한다[4]. 철사망에 의한 반류재현 방법은 축방향 반류만을 재현한다는 단점이 있으나 비교적 저렴하여 널리 쓰이고 있다. 반류분포를 재현하기 위하여 여러 종류의 철사망을 중첩하여 설치한다. 철사망은 실적반류형상 재현시 사용되었던

철사망을 근거로 하여 몇차례의 설계 및 반류계측의 반복작업을 통하여 제작된다.

c) 캐비테이션 관찰시험

재현된 선체후류중에 작동하는 추진기에 발생하는 캐비테이션의 양 및 거동을 관찰하는 시험이다. 실선 프로펠러 운항속도에서의 추력계수(K_T)와 캐비테이션 수(σ_n)에 맞추어 모형시험을 수행한다. 캐비테이션 관찰은 발생면적, 캐비티 두께, 캐비티 종류 및 거동을 면밀히 관찰하여 스케치한다. 관찰결과 침식의 위험성이 높을 경우 침식시험을 실시하여야 된다. 모형 프로펠러의 회전수가 커서 발생된 캐비테이션을 육안으로 직접 확인하기 어렵기 때문에 프로펠러 날개가 일정한 위치에 왔을 때 섬광을 비추어 주는 스트로보장치(Stroboscope)을 이용하여 캐비테이션을 관찰한다. 캐비테이션의 생성, 성장, 수축, 붕괴의 과정을 연속적으로 관찰하기 위해서는 고속 촬영장치(8,000 ~ 100,000 frame/sec)가 필요하다.

d) 변동압력 계측시험

캐비테이션 발생에 의한 선체 변동압력 계측은 프로펠러 상방 근처에 압력센서를 설치하여 계측한다. 계측점은 모형선 혹은 부분 모형선을 설치할 경우 선미부에 센서를 직접 설치하여 계측하고, 반류스크린을 설치할 경우 압력센서를 부착한 평판을 선체와의 거리만큼 유지한 상태에서 계측한다. 일반적으로 날개 진동수의 배수의 값에서 변동압력이 크다. 1차 날개진동수에서의 값이 가장 큰 경우가 많으나 캐비테이션의 거동이 불안정할 경우 2차 이상의 날개진동수에서의 변동압력이 큰 경우도 있다.

e) 이외에 캐비테이션 초기발생시험, 침식시험, 방사소음 계측시험 등이 있으나 지면관계상 생략 한다.

5. 캐비테이션 시험법 발전 방향

캐비테이션은 짧은 순간에 생성, 성장, 수축, 붕괴의 과정을 거치는 복잡한 현상으로써 물리적 중요 파라미터들이 생성과 붕괴시 미치는 영향에 대한 연구는 계속적으로 진행될 것이다. 선박 추진기의 캐비테이션 시험을 수행함에 있어 가장 어려운 문제는 선미반류의 재현문제이다. 즉, 실선 프로펠러 작동조건과 가장 유사하게 시험조건을 맞추기 위해서는 실선 호칭반류분포(Full-scale nominal wake distribution)를 재현시켜야 된다. 그러나 실선에서 실선 호

Table 1 최근 신설된 대형 캐비테이션 터널과 KRISO Tunnel과의 비교

터널 명칭	기관	건설시기	관측부 크기	최대유속	가격
LCC (Large Cav. Channel)	미국, DTMB, CDNSWC	1991년	3 ^m ×3 ^m ×12.2 ^m	15.4m/s	약 800억원
GTH	프랑스, DCN	1988년	2 ^m ×1.35 ^m ×10 ^m 1.14 ^m ×1.14 ^m ×6 ^m	12m/s 20m/s	약 300억원
HYKAT	독일, HSVA	1991년	2.8 ^m ×1.6 ^m ×11 ^m	12.6m/s	약 200억원
K-15	한국, KRISO	1982년	0.6 ^m ×0.6 ^m ×2.5 ^m	10m/s	약 16억원

칭반류를 계측하기는 불가능하며, 프로펠러에 의한 유기속도를 포함하는 전체 속도분포(Total velocity distribution)를 계측할 수 밖에 없다. 이에 따라 실선과 모형 프로펠러 주위의 전체 속도분포를 갖게 하여 실험을 수행해야 된다는 의견도 나오고 있다[5].

모형시험은 실선시험에서의 성능을 미리 검증하기 위한 시험으로써 반드시 실선시험에 의한 확인이 필요하다. 최근 소형 수중 비디오 카메라를 선체 외부에 설치하여 선체 외관에 관찰창을 뚫지 않고 실선 프로펠러 캐비테이션 관찰이 가능해짐에 따라, 앞으로 실선 캐비테이션 관찰시험이 많이 시도되리라 추측된다. 실선 캐비테이션 관찰이 가능해지면 실선-모형선 캐비테이션 상관관계를 확립하여 더욱 정도높은 모형시험이 가능하리라 생각된다.

최근 미국, 프랑스, 독일을 중심으로 대형 캐비테이션 터널을 신축하고 있다 (Table 1 참조). 이들은 주로 추진기에 의한 수중방사소음에 관련된 연구를 하기 위한 시험시설들로서 터널 자체의 배경소음 (Background noise) 최소화, 터널내부 소음반사 방지, 모형선 직접 설치 등을 위해서 막대한 예산을 사용하여 신축한 시설들이다. 해군 함정의 성능은 방사소음의 특성에 의해 결정되므로 함정성능의 고도화를 위해서는 이러한 시설이 필수적이라 하겠다. 국

내에서도 대양해군을 지향하여 수중함 및 수상함정의 성능 고도화를 추진하기 위해서는 대형 캐비테이션 터널의 신축은 꼭 필요하다고 생각한다.

참고 문헌

- [1] Knapp, R.T., Daily, J.W., Hammitt, F.G., "Cavitation," McGraw-Hill, 1970.
- [2] 이창섭, 김기섭, 이진태, "캐비테이션 터널에서의 모형시험을 위한 예비조사에 관한 연구," 한국기계연구소 연구보고서 UCE73-126.D, 1981. 1.
- [3] 이창섭외, "캐비테이션 터널의 시운전시험 및 캐비테이션 시험법 개발에 관한 연구," 한국기계연구소 연구보고서 UCN131A-276.D, 1982. 12.
- [4] Lee, J.T., Kim, Y.G., "Effect of flow liners on ship's wake simulation in a cavitation tunnel," *Trans. of SNAK*, Vol.30, No.2, May 1993.
- [5] 20th ITTC, Report of the Cavitation Committee, Sanfrancisco, 1993.