

터어보펌프에서 발생하는 제반현상

Phenomena Occurring in Turbo - Pumps



김 춘 식

C. S. Kim

- 한국해양대 기관공학부 교수
- 유체역학 및 유체기계 전공



최 민 선

M. S. Choi

- 목포해양대 기관공학과 조교수
- 유체기계설계 전공

1. 머 리 말

터어보형 펌프는 회전기계이므로 펌프에 발생하는 특이한 현상은 운전에 관련된 것이 많다. 그 중에는 부식현상과 같이 운전과는 직접적인 관계가 없을 것 같은 경우에도 펌프의 운전과 정지 중에서 부식의 발생장소와 그 양상이 다르다. 또한 펌프의 운전에 관해서도 펌프 시동시, 그후 정상운전으로 이행해서 소정의 작업을 종료하고 정지하기 까지는 각 단계에서 펌프에 발생하는 현상은 다르게 나타난다. 더우기 경년적인 요인에 따른 현상에 관해서는 전혀 다른 접근이 필요하게 된다. 이러한 관점에서 소음, 부식, 마찰, 피식, 진동 및 파괴 등과 같은 터어보기계의 고장원인이 되는 제반 현상과 함께 펌프고유의 현상에 대하여 구체적인 대응방법을 소개하고자 한다.

2. 소음, 맥동

펌프는 공기기계 등과 비교하면 회전수가 낮은 것이 많다. 따라서 캐비테이션 발생시 등을 제외하고는 운전중의 펌프 자체의 소음현상에 관해서는 대책기술이 거의 확립되어 있다. 오히려 펌프가 발생하는 맥동 등이 가진원이 되어 펌프실 등의 건물벽을 흔들게 됨으로서 발생하는 소음이 문제가 될 수도 있다. 이 현상에는 공기를 매체로 하는 공기전파음 및 미진동이 구조체를 전파하는 고체전파음이 있다. 특히 고체전파음에 관해서는 전파경로의 확정과 그 저감방법에 어려운 점이 많다. 이러한 전파경로를 구성하는 건축물에 기인하는 소음의 주파수는 30 - 100Hz범위이며 비교적 저주파수이기 때문에 펌프의 NZ (N 은 회전수, Z 는 임펠러 익수)성분은 이 범위내에 포함된다. 그럼 1은 빗물을 배수하는 펌프시설에서의 건축물과 펌프를 비롯한 기기의 배치관계를 나타내고 있다. 펌프

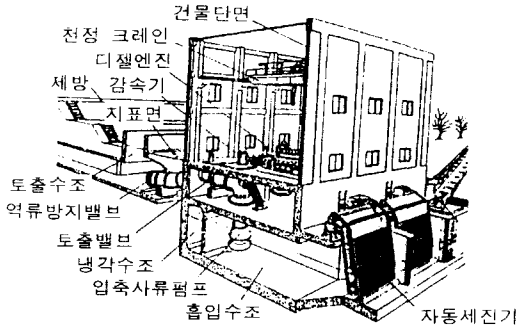
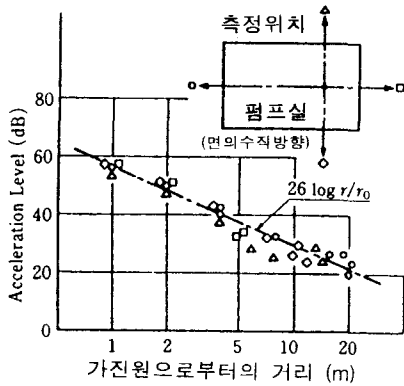
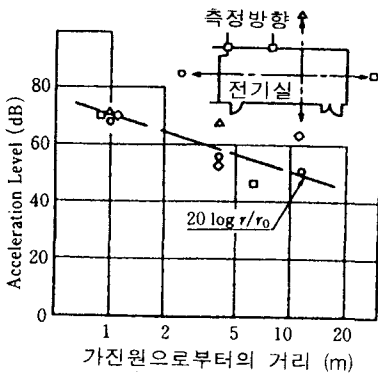


그림 1 우수배수펌프시설



(a) 지하펌프실의 특성



(b) 2계전기실의 특성

그림 2 진동전파특성

가 배치되어 있는 아래부분은 지하에 있으며 건물의 기초기둥이 암반까지 도달해 있다. 또한 펌프나 구동기가 고정되어 있는 마루나 이것을 지탱하고 있는 벽은 보통의 건물과 비교하여 두꺼운 콘크리트 구조로 되어 있다. 따라서 펌프 및 구동기를 가

진원으로 하는 고체음은 임피던스가 다른 마루면을 전파하게 된다.

그림 2(a)는 한 펌프시설내의 지하펌프실의 진동전파특성이며 (b)는 같은 시설의 2층에 설치되어 있는 진동전파특성을 나타내고 있다. 이들의 그림에서 거리감쇠는 $Lvr = Lvro - 20 \log(r/ro)$ 으로 표시될 수 있다. 여기에서 Lvr : 가진원으로부터 $r(m)$ 떨어진 수신점의 진동레벨, $Lvro$: 가진원으로부터 $ro(m)$ 떨어진 기준점의 진동레벨, r : 가진원으로부터 수신점까지의 거리, ro : 가진원으로부터 기준점까지의 거리, n : 기하감쇠정수를 의미한다. 이때에 그림 2(a)에서 보면 펌프실이 튼튼한 콘크리트 구조이기 때문에 $n=1.3$ 의 압반과 유사한 값을 갖는다. 그림 2(b)에서는 $n=1$ 이며 일반적인 건물의 감쇠특성에 가까운 것을 보여주고 있다. 또한 펌프가 받침다리로 강도를 유지하는 마루면에 부착되어 있는 경우에는 이 마루면을 면진원으로 하여 횡파가 $n=0.5$ 로 전달되며 굽은 기둥으로 지탱되고 있는 건물에서는 지하에서 발생하는 진동이 상부층으로 전파될 때에는 종파의 형태가 되어 거의 감쇠하지 않고 전달된다. 이렇게 하여 지장을 초래하는 마루(벽)면의 고유진동수의 해명이 이루어져서 소음이나 진동의 전파경로가 밝혀지면 이에 대한 대책이 필요하게 된다. 이 때에 앞에서 언급한 건물각부의 전파특성을 염두에 두어야 하며 거리감쇠에 의존하거나 마루나 벽의 보강만으로는 고유진동수의 이동, 감쇠특성의 개선에 한도가 있으면 앞서 언급한 가진원 NZ 의 Z , 즉 임펠러 익수를 변경하기도 한다.

3. 부식, 마모

이들 두 가지의 현상은 어느 경우에도 재질을 "값아먹는" 점에서 공통의 특성이 있으나 그 메커니즘은 서로 다르다. 여기서는 펌프에서의 각각의 현상의 구체적인 예를 들고 효과적인 대처법을 요약한다.

3.1 부식

부식이라고 하면 해수에 의한 부식이 가장 일반적인 것이다. 대량의 냉각수를 바다에 의존하는 경

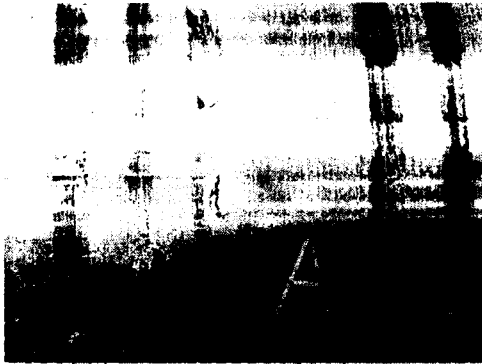


그림 3 글랜드패킹 습동부에서만 나타나는 피팅

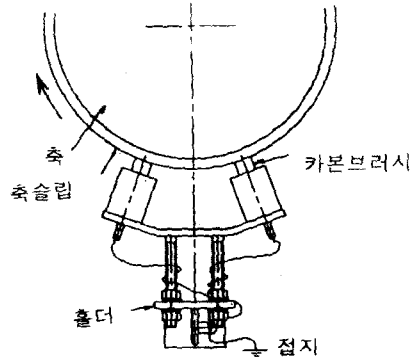


그림 4 카본브러시의 부착에

우에 많은 발생세가 있다. 최근에 해수부식에 내성이 강한 오스테나이트계의 스테인레스강의 사용빈도가 높아지고 있다. 그러나 스테인레스강이라고 하여도 양수관 플랜지 등 과 같이 구조적으로 불가피한 극간형성부에 발생하는 틈새부식의 문제가 지속되고 있다. 이에 대한 대책으로서는 해수의 침입을 방지하는 것이 가장 간편한 방법일 것이다. 흐름의 영향을 직접 받지 않는 틈새에는 불건성 시일재(쓰리본드#1212, 선닥실러 등)가 적합하며 가격이 저렴한데 비하여 효과가 크다. 흐름에 노출되거나 불건성으로 부적합한 장소에는 경화형의 우레탄수지제품이나 에폭시수지로 만든 코팅재[미제론, 쓰리폰드#2003 등]가 효과가 높다. 이 밖에도 틈새형성부에 내식성이 매우 높은 금속을 용사하여 육성하는 방법이 효과가 있다.

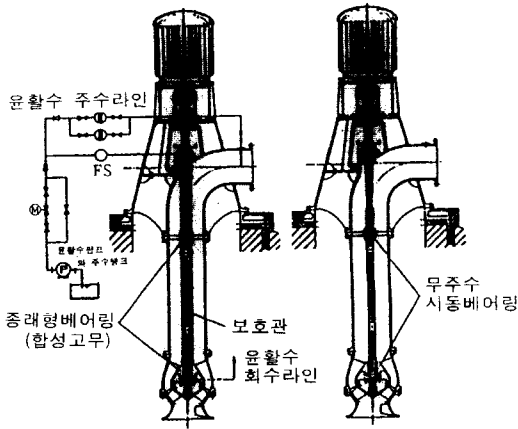
해수부식의 매커니즘은 도전성수용액 중의 전기화학적 작용으로 설명되고 있으나 이것과 직접적인 관련이 있는 예를 들어 보면 다음과 같다. 해수공급용으로 1주간 사용한 입축펌프에서 글랜드패킹용의 슬리브에서 원주방향으로 피팅이 발생하였다(그림 3참조). 여러가지로 조사를 한 결과 펌프최상부의 전동기축이 帶電한 상태로 되어 있어 펌프축과 직결되어 전류가 흘러(축전류라고 부름), 이것이 펌프의 글랜드패킹부에서 방전되었음이 판명되었다. 즉 팩킹용 슬리브가(희생)전극이 되었기 때문이었다. 전동기권선의 비대칭성 등으로부터 발생한다고 알려져 있는 축전류를 단절시키기 위하여 그림 4와 같이 글랜드패킹 상부에 카본 브러시를 부착하고 이를 지면과 연결하여 해결

하고 있다.

한편 취수조안에는 별도의 기기류(스크린 등)를 부식으로부터 보호하기 위하여 설치된 방식장치의 전원으로부터 흘러나온 전류가 있다. 단, 이 경우에는 전원이 양극으로서 작용하기때문에 희생되는 양극재(Fe 등)가 펌프의 표면에서 화합물로 석출되는 것 뿐으로서 부식작용은 없다. 이 때에 해수중에는 Ca화합물(CaCO₃ 등)이 많이 포함되어 있기 때문에 펌프는 회색 변색한다. 또 한가지의 예로서 해수생물의 부착생성에 의한 피해를 막기 위하여 염소를 투여하고 있으나 이 때에 염소과잉으로 투여하게 되면 스테인레스강에서도 부식을 조장하기 때문에 적정량을 투여하여야 한다. 이를 위하여 원래부터 은백색을 띠고 있는 스테인레스강의 표면이 Mn 화합물 등 때문에 검게 코팅된 것처럼 변색되는 것을 관찰하는 방법이 주로 사용된다.

3.2 마모

마모가 일어나기 쉬운 곳은 모터와 스테이터의 간섭부이다. 구체적으로는 베어링, 웨어링이나 네크부쉬 등의 회전 시일부, 축추력 저감용 밸런스드럼 및 글랜드패킹의 습동부 등이다. 이러한 부분에서는 회전축의 흔들림회전 접촉에 의한 "유사접촉마모"와 양수중의 이물질이 개재가 되는 "abrasive 마모"의 두 종류가 일어날 수 있다. 최근의 우수배수용 입축펌프에서는 기기의 간소화나 보조기계류의 부적합 등에 의한 펌프시동시의 지체원인을 제거하기 위하여 無注水시동베어링을 일반



(a) 합성고무 시동 베어링 사용 (b) 무주수 시동베어링 사용

그림 5 무주수 시동베어링 채용에 의한 입축펌프의 간소화

적으로 채용하고 있다. 종래의 기술에서는 그림 5(a)에서와 같이 펌프의 외부로부터 청정수를 부어서 합성고무제의 베어링을 사용하여 왔다. 그러나 지금은 앞에서의 이유로 인하여 그림 (b)에서와 같이 무주수상태에서 시동하여 정상운전시에는 자기양수로 베어링의 윤활을 행하는 방법으로 변해 가고 있다. 이 때문에 수중베어링에는 양수중의 토사 등의 슬러리보다 경도가 높은 탄화규소 등의 세라믹소재 베어링이 텅스텐카바이트제 등과 같은 고경도의 슬리브와 결합되어 많이 사용되고 있으며 큰 효과를 거두고 있다. 횡축다단 펌프에서는 고압을 효율 좋게 얻기 위하여 각단의 칸막이에 네크 (혹은 throat)부쉬를 사용하고 있으나 여기에서도 마모가 쉽게 발생한다. 여기에서 사용하는 부쉬 혹은 슬리브(양쪽의 경우도 있음)의 원통면에 원주방향 혹은 스파이럴 모양으로 홈을 설치하면 본래 목적의 시일성능을 높일 뿐 아니라 유사접촉마모에 대하여 내마모성을 높이는데 효과가 있음이 보고되고 있다. 그러나 반대의 효과도 생긴다. 즉 다단펌프는 회전축의 길이에 비해서 직경이 작고 휘어지기 쉽다. 이 때문에 부쉬에서도 베어링과 거의 같은 작용을 기대하고 있으나 홈의 존재가 부쉬의 베어링으로서의 스프링정수나 감쇠계수를 저하시키게 된다. 이 때문에 로터의 위험속도의 저하를 초래하여 결과적으로 회전수와 동기하여 공진을 일으킬 수가 있다. 회전수 제어를 행하거나 구

동원에 증기 터빈을 사용하여 펌프를 시동하거나 정지과정에서 장시간을 요하는 경우에는 주의가 필요하다. 더구나 발생장소가 자려진동의 원인이 되는 경우도 있기 때문에 단지 홈의 유무에만 그치지 말고 설계단계에서부터 신중히 계획하여야 할 문제이다. 또한 홈이 없어도 해당장소가 경년마모를 일으켜 같은 현상이 일어나기도 한다.

4. 진동, 파괴

앞에서의 소음, 맥동과도 약간의 관계가 있으나 여기에서는 펌프의 기계적 진동을 대상으로 한다. 펌프의 한 부분을 파괴하는 것과 같은 고장이 생길 경우에 강도설계에 대한 배려부족도 있으나 설계상으로는 충분히 주의를 하였다고 하여도 예상하지 못한 큰 진동을 초래하여 이것이 원인이 되는 예가 많다. 즉 공진이나 자려진동에 의한 과대응력을 주원인으로 하는 경우가 대부분이라고 생각된다. 이 때문에 진동을 피하기 위하여 특별한 고려가 요구되고 있다.

“진동이 발생하고 있다”라고 한마디로 표현을 하지만 이 경우에는 보통 때와는 다른 큰 진동을 의미하며 공진에 의한 경우와 자려진동에 의한 것이 있으며 펌프에 있어서는 공진에 의한 것이 대부분이다. 그 중에서도 대부분이 회전수 N 과의 공진이며 FFT분석에 의하여 일목요연하게 원인이 규명될 수 있다. 그 대책으로는 해당부분의 고유진동수를 N 으로부터 “detune” 시키거나 큰 감쇠력을 부과할 수밖에 없게 된다. 그러나 일단 완성된 기계의 감쇠 능력을 높이는 데는 곤란한 점이 많기 때문에 고유진동수 “detune”의 수단을 택하게 된다. 이 때에 볼트의 크기를 증가시키거나 개수를 늘이기도 한다. 혹은 보강리브를 추가하거나 하여 “剛”측으로 “detune” 시키는 것이 일반적이다. 단 여기에서는 반대로 “柔”측으로 “detune”하여 성공한 예를 소개한다. 그림 6은 입축펌프 베드상부의 공진에 대하여 모터와 모터받침대와의 사이에 2장의 플랜지를 삽입하고 또한 볼트의 피치원을 원래의 600mm로부터 335mm로 이동하여 강성의 저하를 꾀한 것이다. 간단하지만 효과가 있는 방법이다.

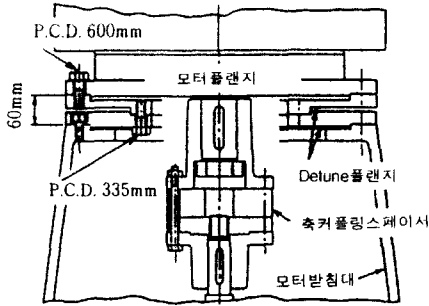


그림 6 “柔”축 detune의 예

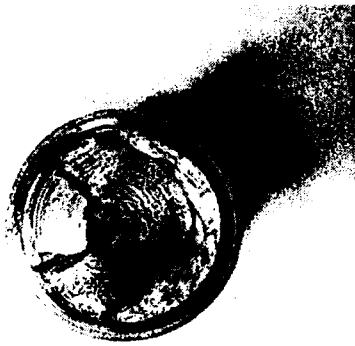


그림 7 피로파괴를 일으킨 회전축의 파손단면

자려진동도 가끔 발생한다. 펌프의 자려진동은 회전수 N의 약 1/2의 진동수로 베어링부 혹은 앞에서 언급한 부속나 밸런스드럼에서 일어나기 쉽다. 이것은 일반적으로 1/2分數調波진동이라고 부르며 회전축의 “떨림회전”이 발생한다. 이 주파수 근처에 회전축의 위험속도(=고유 진동수)가 있으면 회전축은 대진동을 일으켜 비극적인 파손사고로 진전되는 위험성이 높다. 예를 들면 그림 7은 이러한 대진동에 의한 반복응력을 받아서 피로파괴에 이른 회전축의 파단상황을 보여주는 사진이다. 파단면을 관찰하면 특징적으로 조개껍질문양이 보이고 있다.

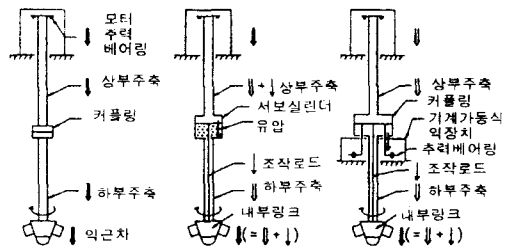
5. 과도현상

정상(회전속도, 토출량, 압력 등이 거의 변화하지 않음)운전시에는 문제가 없었지만 시동 혹은 정지시에 과도적인 특이한 현상이 생길 경우가 있다. 펌프에 있어서 과도적 현상의 대표적인 예는 펌프

시동시 발생하는 반대방향의 축추력이나 워터해머링일 것이다. 전자는 펌프시동시에 있어서 펌프 작동점의 변동에 기인하며 후자는 펌프급정지 등과 같이 송수관내의 물의 관성효과가 크게 영향을 미치기 때문이다. 여기에서는 2가지의 새로운 현상을 언급하고자 한다.

5.1 가동익펌프의 축추력

부분토출 유량영역에서 효율상승이나 전역적으로 캐비테이션 특성이 높다는 등의 이유로 최근에는 대형입축펌프에서 가동익펌프가 많이 사용되고 있다. 이하에서 이들의 입축가동익 펌프에서 발생하는 상방향 축추력현상에 관하여 설명한다. 그림 8(a)-(c)는 입축펌프에 있어서의 축방향 추력의 작용상황을 보여주고 있다. (a)는 일반적인 고정익 펌프이며 이름그대로 익(익근)은 임펠러허브에 고정되어 있다. 이 그림은 임펠러가 발생하는 축추력을 모터내의 추력베어링으로 지지하고 있는 모양을 표시하고 있다. 그림 (b)는 유압에 의한 익조작형식의 가동익펌프이다. (c)는 같은 가동익 펌프이지만 익조작력을 기계력에 의존하는 점이다. 펌프주축에 작용하는 축추력(그림 9에서 기호[⇒]로 표시)는 펌프의 토출압력발생에 의해 임펠러배면이 부담하는 하중과 회전체의 중량의 합계(기호 [⇒])와 다음에 설명하는 익각조작력(기호[→])을 합친것과 같다. (a)에서는 익과 임펠러허브가 일체이기 때문에 [⇒]과 [→]을 분리할 수 없다. 이에 반하여 (b)와 (c)는 익이 임펠러허브에 대하여(회전될 수 있지만) 부착되어 있기 때문에 익면압력분포로부터 발생한 힘과 개개의 익에 작용하는 원심력과와의 합력에 의해 익의 피복에 회전력이 발생한다. 이 회전력은 임펠러허브내의 링



(a) 고정익 (b) 유압식가동익 (c) 기계식가동익

그림 8 고정익/가동익의 축추력 작용현황

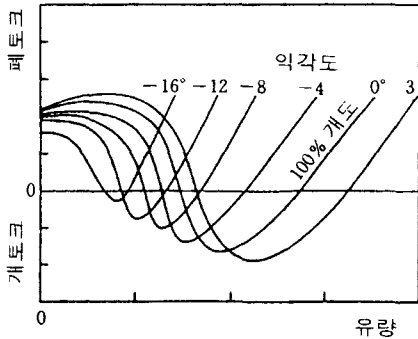


그림 9 각 익개도마다의 개토크오크

크기구를 통하여 하부 주축내에 있는 조작로드를 위로 아니면 아래 방향으로 구동하는 익각조작력 [→]으로 나타난다. 그러나 (b)의 유압식의 경우는 조작로드에 전달되는 힘 [→]은 서보실린더내의 유압을 변화시키며 이와 같이 유압을 통하여 주축에 전달을 행하지만 주축계의 외부에는 나타나지는 않는다. 즉 (a)의 고정익 펌프의 경우와 같다. 한편 (c)의 기계식 경우는 [→]가 기계식 가동의 장치내의 추력베어링에서 별도로 지지되기 때문에 주축계의 외부로 전달되고 있다. 이 때문에 만일 [→]이 [그림 9로부터 폐토크가 크기 때문에] 위방향으로 되어 아래방향[⇒]보다 크게 되는 경우에는 결과적으로 위쪽방향으로의 축추력이 작용하여 회전체 그 자체가 솟아오르게 된다. 가동익에서는 시동토크의 저감을 고려하여서 최소익각으로 시동하지만 익개도를 높일 때에 이와 같은 현상이 생기게 된다. 이것을 피하기 위하여 익형상의 설계단계에서 압력분포의 개선을 꾀하거나 익의 피봇중심위치를 잘 고려하여 폐토크를 줄이도록 한다.

5.2 천이계수로에서의 워터햄머

워터햄머로 대표되는 과도현상이 펌프급정지에 한하지 않고 다음과 같은 경우에도 발생한다. 대도시에 있어서의 시가구조의 변화 특히 녹지의 감소에 의한 보수기능의 저하 등에 의해 대량의 강우로 도시기능이 마비될 염려가 있다. 이에 대처하는 한 방안으로서 大深度지하에 수로를 형성해서 강우시 긴급하게 수직관으로 빗물을 모아서 수로하류 단부에 설치된 펌프에 의해 순차배수하는 지하하

천 시스템이 고안되고 있다. 이와 같이 펌프도수관에 상당하는 지하수로에서는 강우초기에 있어서는 개수로 흐름이지만 강우가 계속되거나 강우량의 증가에 따른 기액이상류, 혹은 폐수로 흐름으로 천이한다. 더우기 하류단부에서 펌프에 의한 배수가 행해지면 상당히 복잡한 흐름이 되어 취급을 잘못하면 설비손상 등을 초래할 위험이있다. 이 때문에 펌프운전대수를 포함한 수직관을 갖는 수로내의 천이상태의 해석은 중요하며 동시에 곤란한 작업으로 여겨진다. 이와 같은 상황을 고려하여 모형 실험 및 시뮬레이션 기술의 확립을 꾀하고 있다. 다음과 같은 해석사례를 소개한다. 천이계수로에 있어서는 개, 폐의 양수로가 존재한다. 여기에서 연속의 식과 운동방정식의 2개의 편미분방정식을 $B_s = (\pi D^2 g) / (4a^2)$ (여기서 B_s 는 slot폭, D 는 수로의 직경, g 는 중력가속도, a 는 수중의 압력전파속도를 의미함)인 가상slot과 미정승수를 이용하여 한 개의 전미분방정식을 얻는다. 즉 가상slot에 의하여 수로의 수심이 직경보다 크게 되어도 수로의 단면적, 徑深이 변화하지 않는 것으로 취급할 수 있게 된다. 다음으로 각종 경계조건을 정하여 차분법에 의해 수치해를 구하게 된다.

이밖에도 여러 가지의 현상이 펌프운전 중에 발생하고 있다. 예를 들면 비속도가 비교적 작은 펌프에서는 선회실속에 의한 진동이나 맥동 등의 발생사례도 많이 보고되고 있다. 또한 흡입수조에 관련된 고장도 여전히 많이 발생하고 있다. 이밖에 펌프운전에 연관된 특징적인 현상으로 보여지는 중고곡선의 펌프특성으로 부터의 자려진동 등이 있다.

6. 피 식

펌프에서는 캐비테이션 에로전(cavitaion erosion)은 생략할 수 없는 현상이다. 캐비테이션은 고속유동중의 환경하에서 흐름이 박리하기 쉬운 저압부분에서 발생한다. 따라서 펌프설계점을 벗어난 과소수량영역이나 과대수량영역에서 빈번히 운전되는 경우에는 캐비테이션의 발생을 각오하여야 한다. 그림 10은 개방형 임펠러의 익근외주부의 뒷면에 생긴 에로전(피식)의 예이다. 익근의

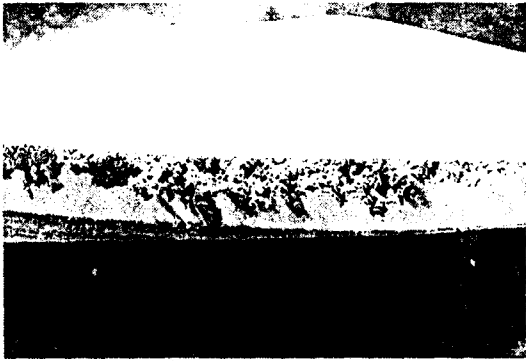
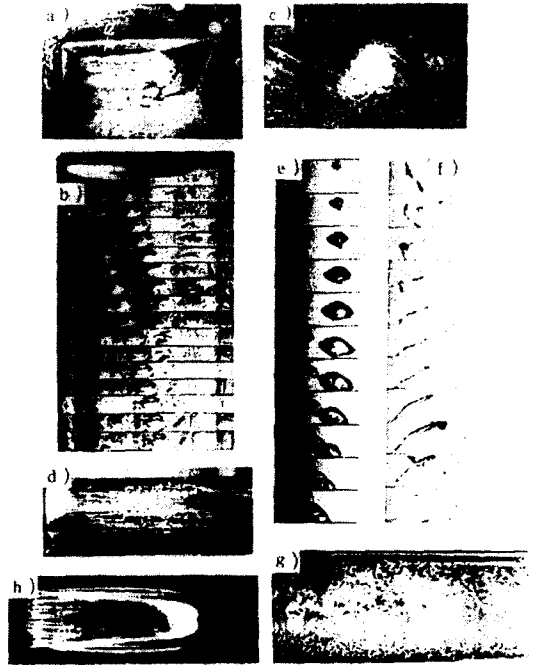


그림 10 개방형 임펠러 이면의 캐비테이션 에로전

외주부는 원주속도도 높을 뿐만이 아니라 익근과 임펠러케이싱과의 사이의 좁은 간격을 익근의 표면으로부터 뒷면으로 고속으로 작동수가 흐르기 때문에 양쪽의 영향을 받아 캐비테이션이 발생하기가 쉽다. 여기에 대하여 모터를 변경하여 회전속도를 저하시키면 코스트면에서 허용할 수 없는 경우도 많기 때문에 사양에 맞춰서 익근입구의 영각을 수정하는 등의 설계의 배려가 필요하며 재료경도를 높이는 것도 효과가 있다. 경험적으로는 Stellite66의 육성방법이 작업면과 코스트면에서 바람직한 것으로 알려져 있다. 이 경우에 비교적 경도가 높은 것에 비하여 해수중에서도 어느 정도의 내식성이 있어서 효과적인 재질로 평가되고 있다. 이하에서는 캐비테이션에 의한 피식현상에 대한 몇 가지를 중점적으로 고찰해 보기로 한다.

6. 1 피식의 정의

μs 오더에서 끊임없이 초고속으로 변화하고 있는 캐비테이션현상에 대한 인식이 근년들어 자주 바뀌었으나 최근에 와서야 정착되고 있으며 새로운 캐비테이션 학문이 급속히 발전되고 있는 추세이다. 분명히 캐비테이션 기포(이하 간단히 기포라고 함)는 오랫동안 믿어온 것처럼 다만 球狀기포로만이 구성되어 있는 것이 아니고, 독자적인 양상, 생성 원인, 피식성(문제가 되는 고피식성의 것은 극히 적은 종류임) 및 초생법칙을 갖는 약 50가지의 종류에 의해 다원적으로 구성되어 있다 (그림 11참조). 그러나 이런 구성은 액체피식의 단서가 되는 weak spot, 즉 캐비테이션핵과 이의 급속한



a) 부착기포 b) 유동기포 c) 와류형기포
 d) 세관열상기포 e) 괴상기포 f) 끈형기포
 g) 기포운 h) SC공동

그림 11 각종의 기포

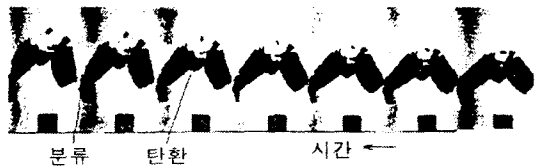


그림 12 수분류의 충격파손의 모양(분류속도 24 m/sec)

기포로의 성장을 촉진하는 고속압입, 더욱이 고압하에서의 기포붕괴에 의해 지배되고 있다. 따라서 일반적으로 기계의 종류, 작동조건은 원래부터 급속히 변하는 흐름, 특히 유체에너지를 극단으로 국소적으로 집중시키는 「두드러지게 비정상성이 강한 와류, 충격파, 돌출분류 등」의 coherent흐름 구조를 동반하는 비정상 흐름에 지배되고 있다. 그리고 또한 전형적인 확률현상인 캐비테이션에 대한 규정에서 「평균적인 기포발생영역을 규정하는」캐비테이션 계수 σ 한가지만에 의한 종래의 방법은 불완전하며 급후에는 σ , 기포의 종류, 캐비테이션 핵, coherent한 흐름구조 등의 3~4개의 지배인자

에 의한 규정이 불가결할 것이다.

6.2 캐비테이션의 발생과 괴식

먼저, 괴식은 다음 3가지 조건을 만족할 때만이 생긴다. (i) 충분히 높은 괴식성 충격압의 존재, (ii) 벽면보호작용의 결여, (iii) 재료내력의 부족이다. 따라서 괴식방지에는 이들 중의 한가지를 제거하면 충분하다. 이하에서는 주로 (i)에 대해서 알아보기로 한다.

앞에서처럼 캐비테이션은 통상 여러 종류의 것으로부터 구성되나 그중 어느 정도의 종류가 고괴식성인가를 고찰해 본다. 문헌에 의하면 벽면 부근에 존재하는 10⁴~10⁶개의 각종의 기포중 강판에 괴식pit를 발생할 정도의 괴식성이 있는 것은 고작 1개인 것으로 알려져 있다. 이 사실은 「괴식은 캐비테이션이 발생하면 언제나 일어나는 것이 아니고, 극히 특수한 환경하에서 그것도 특정장소에 생기는 괴식성 기포에 의해서만 일어난다」것을 명시하고 있다. 그리고 이런 사실이야말로 각각 주어진 조건하에서 가장 적절하고 유효한 괴식 대책을 세울 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

따라서 우선 「이러한 괴식성기포가 기계주변에 어떻게 분포하고 있는가」를 기포붕괴시에 발생하는 캐비테이션 충격압(이하, 간단히 충격압이라 함)을 인용하여 조사해 본다. 그림 13에는 그림 14 (좌표 X, Y, Z 참조)에서의 스톱밸브의 1/10 모형을 이용하여, 대표적인 개구비 $m=0.24$, 캐비테이션 계수 $\sigma=0.16$ 의 경우에 대하여 캐비테이션이 주로 발생하는 영역이 존재하는 減勢漕내의 관측($y=0$)을 통하는 검사면 X-Y면상의 충격압 분포를 나타낸다. 이 충격압의 검출에는 다루기 쉬운 감압지

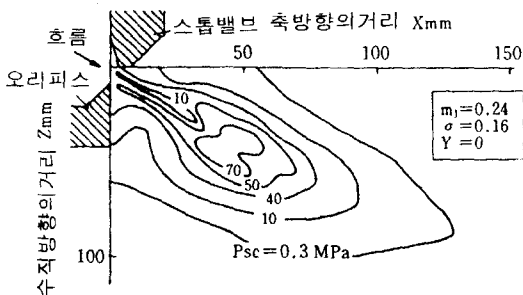


그림 13 스톱밸브의 감쇄조내의 충격압분포

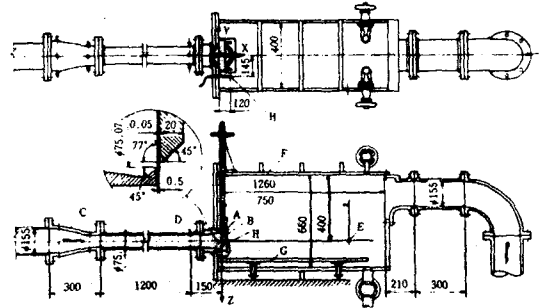


그림 14 시험 1/10모델의 스톱밸브

(후지필름사제, 측정범위는 0.3~0.7MPa, 동적응답은 극소량 화약의 수중폭발을 이용하여 검정, 충격파관에 미친 동적검정에 의해 μ s의 충분한 문제 추종성도 확인)을 이용하였다. 또 감압지는 6~60 μ m직경의 캡슐에 담겨진 발색제와 현색제를 도포한 2장의 sheet를 밀착하여 사용하는 것이기 때문에 수 μ s의 초고속현상인 충격압의 측정오차를 근소하게 하기 위해서는 음향임피던스의 매칭을 현저하게 깨뜨리는 「양 sheet사이로의 공기층의 개재」는 조금이라도 허용하지 않는다. 여기에서 고급 진공팩기구를 이용해서 이 공기층의 제거를 시도하여 충분히 만족할만한 결과를 얻고 있다. 또한 감압지상의 수십 μ m의 적색반점으로 나타나 있는 국소적인 충격압은 적어도 강판상의 괴식 pit를 초래한 수백 Mpa의 값이 될 것 같으나 지금으로서는 이러한 국소적 고충격압의 검정법은 확립되어 있지 않기 때문에, 우선 후지필름사제의 농도계(3mm경의 원내의 평균 충격압을 검출한다)에 의하여 근사적으로 70Mpa이상의 괴식이 가능하다고 보여지는 고충격압영역을 구하고 있다.

그림 15에는 충격압(괴식성 기포)과 모든 기포의 수평면 분포를 알기 위하여, $\frac{Z}{D_p}=(D_p$ 는 관경)에 있어서 X-Y면의 충격압 분포와 모든 기포의 분포상황과를 비교하고 있다. 분명히 수 Mpa이상의 괴식성 충격압의 발생영역(이하 괴식성 영역이라고 한다.)은 기포의 모든 발생영역중의 극히 일부, 즉 분류계면근방의 오리피스에지(edge) 하류의 수 cm이내에 한정되어 있다. 따라서 이 한계영역내에 기기재료가 설치되지 않도록 설계만 한다면 괴식은 간단하게 제거될 수 있다. 그러면 이 한

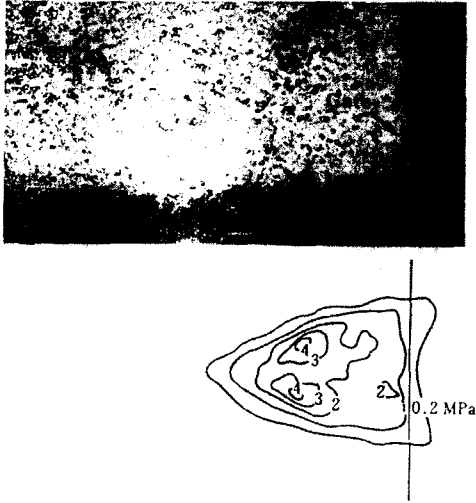


그림 15 기포의 모양과 충격압의 분포

정영역내에서의 캐비테이션의 특성을 알아보기로 한다. 고속 비디오 관찰에 의하면 확실히 이 한정영역내에는 이 영역외에서도 확인 될 수 있는 저괴식성 기포 캐비테이션외에 오리피스에서부터 분출하는 분류(이하 오리피스분류라고 한다.)의 경계면 전단층의 근방에 발생하고 있는 캐비테이션의 일부가 불안정하게 돌출하는「돌출분류」에 의한 것으로 여겨지는 큰 직경의 특이와류 캐비테이션이 현저하게 발생함을 알 수가 있다. 또한 오리피스분류에 접하고 있는 사수권(dead zone)내에서 성장하면서 돌아 다니는 기포를 캐비테이션 핵으로 하여 급성장한 거대기포운의 흔적도 확인할 수 있다. 그리고 이러한 양상은 심하게 재료를 파괴하는 초고속 수중분류 주위의 고괴식성 캐비테이션의 그것과 흡사하다. 따라서 고괴식성 캐비테이션으로서 이 특이와류 캐비테이션과 거대기포운의 2종류, 특히 통상의 기기주위의 유동에 있어서는 대부분 전자의 특성에 속하고 있다고 생각된다.

6.3 n승 법칙과 에너지 증폭기구

주지하는 바와 같이 괴식을 WIR 또는 괴식성 충격압 Psh와 대표유속 V_{∞} 사이에는 다음 n승법칙이 성립한다.

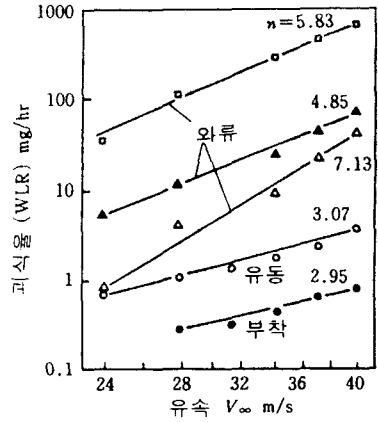


그림 16 부착, 유동, 와류형의 기포류에 의한 n승법칙

$$WLR \propto N_{\infty}^n$$

오랫동안 이 n 값은 괴식이 현저한 경우에는 5~8이라고 알려져 왔지만 실측치는 1~12의 범위로서 분산되어 있어 큰 수수께끼로 여겨져 왔다. 근년, Hutton 등은 n의 캐비테이션 계수 σ 에 대한 현저한 의존성을 제거하기 위해 여러 가지 형태의 시편을 통과하는 흐름에 있어서, 서브캐비테이션 Sub C 영역과 SC영역 중간의 극히 불안정한 흐름이 되는 괴식성이 가장 높게 되는 천이 영역의 α 를 0.03으로 일정하게 하여 부착기포 attached C, 유동기포 travelling C와 와류형기포에 대한 n승 법칙을 $20\text{m/s} < V_{\infty} < 40\text{m/s}$ 의 범위에서 실험적으로 검토하였다(그림 16참조). 예상한 바와 같이 부착기포 및 유동기포에 대해서는 유체에너지 밀도 V_{∞}^3 에 상당하여 $n \approx 3$ 이 되지만 와류형기포에 대하여는 $n \approx 5 \sim 7$ 과 같이 과도하게 크게 되어 부착기포 등보다 아주 강력한 유체에너지의 국소적 증폭기구의 존재를 시사하고 있다. 이것은 앞에서 서술한 돌출분류가 이 기구에 해당한다고 보여지며 일반적으로는 익근의 압력면, 분류의 충돌부, 급속하게 붕괴하는 클러스터, 또는 충격파 등의 「고압영역에 있어서의 기포붕괴 등의 기구에 특유한 증폭기구」도 생각할 필요가 있을 것이다.

또한 그림 16의 와류형기포의 3곡선을 비교해보면, 시편형상의 차이에 따라 괴식율이 2오더까지도 변하고 있다(그러나 n의 변화는 5~7정도로 비교적 작다). 이 사실은 에너지의 증폭기구가 흐

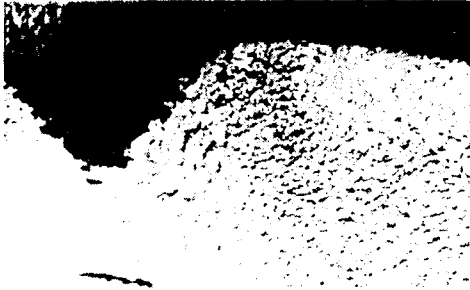


그림 17 심한 피식의 모양

름의 조건에 극히 민감하다는 것을 여실히 보여준다. 예를 들면 5~6년간이나 거의 피식의 징후가 나타나지 않았던 기계가 토사마모 또는 부식 등이 어느 한계까지 진행된 시점을 경계로 하여 급속히 피식이 진행되고, 때로는 피식율이 통상보다 2~3 오더나 크게 되어 심한 피식을 초래하여 수주간만에 기계가 파괴되는 사례는 이와 같은 증폭기구의 특성으로부터 잘 이해될 수가 있다. 다음에는 가장 치명적인 결과를 초래하는 이와 같은 심한 피식문제로 국한하여 알아보기로 한다(그림 17 참조).

6.4 상류cavitator의 현저한 영향

다행스럽게도, 심한 피식은 10 - 50m/s 정도에 해당하는 유체기계의 저속류에서는 거의 생기지 않기 때문에, 이것은 매우 큰 고속유동을 동반하는 기계에 특유한 현상이다. 주지하는 바와 같이 100m/s 이상의 고속유체에서는 상당한 저항장력을 순간적으로 보이며, 캐비테이션이 일어나는 저압하에서는 국소적으로는 고체파괴의 거동을 보인다(그림 12참조). 즉 캐비테이션은 수십 μ m 직경의 통상의 캐비테이션핵에 의한 것으로부터 수백 μ m 직경의 hole핵에 의해 극히 급격하게 또한 극히 간헐적으로 불안정하게 발생하는 형태로 이동해 간다. 이 사실은 고압 보일러용 고압처리수라든가 탈기수에 있어서의 캐비테이션의 발생은 지극히 불안정하고 일단 발생하면 심한 진동 또는 피식을 가져온다는 사실과 잘 부합하고 있다. 그리고 이러한 캐비테이션에서는 상기의 에너지 증폭기구와 고체 충돌 작용도 더해지기 때문에 현저히 심한 피식이 일어나는 것은 당연하다고 말할 수 있다.

다음으로 임펠러상류의 임펠러고정 너트용 구



그림 18 자왜식 진동피식시험중 발생하는 강력한 충격파고리

멍(상류 cavitator)에서 발생한 캐비테이션이 익근간의 캐비테이션에 극히 강력한 유효핵을 공급하여 심한 피식을 초래하는 기구에 관해서 간단하게 알아보기로 한다.

분명히 cavitator의 직하류에 어떤 익근의 부압측에 발생하는 캐비티의 길이는 고속비디오 사진 관측에 의하면 다른 익근의 것과 비교해서 크기 때문에 cavitator로부터 발생한 기포내에 집적한 가스가 익근간의 캐비티 내압을 올리고, 국소캐비테이션 계수를 감소시키면 캐비티 길이가 급히 증가하여 상술한 돌출분류의 급격한 발달을 현저히 촉진시키기 때문으로 보여진다.

6.5 충격압에 의한 피로파괴

이미 심한 피식의 전형적 양상을 보이는 자왜식 진동피식 시험에 있어서의 피식성 충격압, 캐비테이션 양상, 피식의 진행과정의 SEM관찰 등의 결과가 보고되어 있다. 분명히 이 경우에는 진동시편의 주변부에 도너츠형으로 발달하고 있는 Hopper 渦流의 저압역내에 있는 큰 직경의 기포가 압축과정에 있어서의 압력파괴를 피하여 강력한 유효핵으로서 잔류하고 다음의 팽창과정에 있어서는 급속히 충분히 큰 기포 또는 기포운으로 성장한다. 그리고 다음의 압축과정에서 붕괴하여 매우 강한 충격파를 발생하고 구면파 내의 모든 미세 기포운을 壓壞하여 그림 18과 같은 검은 원형 영역(충격파고리)을 발생하고 있다. 한편 시편 표면의 SEM

관찰에 의하면 이 충격파고리와 거의 같은 크기의 소성 변형 파문이 진동자의 가진의 직후부터 나타나며 이것이 점차로 성장해서 마침내 표면의 국부 탈락을 가져오고 피식을 진행시킨다. 즉 심한 피식은 심한 피로파괴의 형태로 진행되고 있다고 말할 수 있다.

후 기

이 해설은 일본 터어보기계협회에서 발행하는 "터어보기계" 96년 5월호에서 발췌하여 정리한 것이며 상세한 참고문헌은 원본을 참고하도록 한다. 또한 일어원본의 번역을 도와준 한국해양대학교 이영호 교수에게 사의를 표한다.