

## 슬러리 펌프

신광진\*

### 1. 서 론

세계적으로 매년 슬러리라고 알려진 수만 톤의 고체-액체 혼합물이 펌핑되고 있다. 이러한 슬러리를 펌핑하는데 사용되는 슬러리 펌프가 항만이나 강의 준설작업, 건설업, 비료산업, 전력산업 등 다양한 곳에서 이용되고 있다. 슬러리 펌프는 원심펌프가 주종을 이루고 있는데 이것은 시간당 처리용량이 크기 때문이다. 예로, 한번의 준설작업으로 7,000 톤의 슬러리를 1시간 내에 처리할 수 있다. 비료산업에서는 슬러리 펌프가 인산염 슬러리를 파이프라인을 통해 이송하기 위해 사용된다. 그밖에, 슬러리 펌프는 석유를 함유한 모래나, 바닷물의 소금 슬러리를 이송하거나 슬러리 형태로 된 석탄을 세척하기 위하여 사용되고 있다. 한편 발전설비에서는 석탄연소 후 발생한 회를 처리하기 위해 슬러리 펌프가 사용되며 습식의 배연 탈황설비에서 분쇄된 석회석을 이송하기 위해서도 많이 사용되고 있다.

이와 같이 사용되는 슬러리 펌프는 고상의 입자가 80%까지 포함된 액체를 이송하기 때문에 임펠러나 케이싱 등에 마모, 침식 등이 문제가 발생하고 있으며 슬러리가 포함된 화공약품을 이송할 경우 부식의 문제도 발생하고 있다. 이러한 문제들을 극복하고 보다 내구성이 높은 고성능의 슬러리 펌프들이 지속적으로 개발되고 있다. 한편 국내에서는 주로 양수 펌프를 중심으로 펌프가 개발되고 제품화되어 왔으며 슬러리 펌프의 대부분은 수입에 의존해 왔다. 최근 국내 산업이 양적, 질적으로 성장하여 슬러리 펌프에 대한 수요가 증가함에 따라 국내에서도 400 mm (펌프 토출구경) 이하의 펌프는 국산화 되어 수입 대체되고 있다.

### 2. 국외 개발 동향

현재 슬러리 펌프를 생산하고 있는 대표적인 기업으로 미국의 GIW와 호주의 Warman사를 들 수가 있으며 이를 중심으로 슬러리 펌프의 개발 및 연구 동향을 정리하였다.

#### 2.1. GIW Industry

미국의 대표적이 슬러리 펌프 제조사로 100여년의 역사를 가진 GIW사는 27,000 m<sup>2</sup> 면적의 공장에서 다양한 종류의 슬러리 펌프를 설계에서 주조, 가공 및 조립까지 한 곳에서 이루어지고 있다. GIW는 자체시험 연구소를 통해 개발된 슬러리 펌프를 다양한 종류의 슬러리를 이용하여 시험하고 있다. 슬러리 함량 70%까지, 시간당 7,000 m<sup>3</sup>까지 용량의 펌프를 성능 시험한다. 이곳에서 생산되는 슬러리 펌프 중 침식이나 부식에 강한 슬러리 펌프는 수평형의 원심 펌프이다. 이들 펌프는 케이싱 라이너가 금속인 것과 고무로 된 것으로 구별된다.

고무 라이너로 사용되는 소재는 다양한 종류의 천연 고무 및 인조고무 재질을 사용한다. 한편, 임펠러와 케이싱에 사용되는 금속소재는 대부분 내침식성이 좋은 Hi-Cr Alloy 계열의 재질을 사용하는 것으로 알려져 있다.

#### 2.2. Warman International

슬러리 펌프를 생산하는 Warman International은 호주의 중앙연구소에서 연구개발이 중점적으로 이루어지고 있다. 펌프 설계는 자체 개발된 CAE/CAD/CAM용 소프트웨어를 이용하여 3차원의 solid 모델을 구성하여 이루어지고 있다. Finite Element Analysis (FEA)를 이용하여 3차원 모델에서의 응력과 변형을 분석하며 Computational Fluid Dynamics (CFD)를 이용하여 FEA에 기초하여 펌프 내의 슬러리 흐름을 모사하여 3차원 모

\* 덕지산업주식회사 기술연구소 부장  
E-mail : shinkj@dukji.co.kr

델을 구성한다. 이 프로그램의 한 부분인 SHEEL 마모 분석으로 슬러리 펌프의 벽과 고행입자 사이의 기계적 상호작용으로 야기된 침식속도와 그 형상을 예측할 수 있다. 재질은 케이싱을 금속을 사용하는 경우와 고무 라이닝을 사용하는 두 경우가 있다. 이들 소재를 연구개발하고 있으며 또한 금속 소재를 주조할 때의 거동에 대해서도 연구하여 펌프설계에 반영하고 있다.

### 3. 국내 개발 동향

슬러리 펌프를 개발하는데 필요한 기술은 CAD/CAM 등을 이용한 설계기술, 펌프의 성능과 부품의 마모현상을 묘사하기 위한 전산모사기술, 주조 시 주조결함을 최소화하는 주조기술, 배연탈황설비와 같은 열악한 부식마모 환경 하에서 규정된 내구성을 확보할 수 있는 소재에 대한 기술 등이 포함된다.

최근 가장 활발하게 슬러리펌프에 대한 연구 개발 활동과 제품을 생산하고 있는 덕지산업은 한전 및 전력연구원과 협동연구 및 국산화개발과제를 추진하여 소재의 연구 개발부터 펌프 내에서의 유동해석과 성능 전산모사, 주조모사, 열처리 기술 등을 개발하여 슬러리펌프를 국산화하는데 성공하고 주요 부품의 수입 대체 및 완제품 수입 대체효과를 거두고 있다. 최근에는 2,050 m<sup>3</sup>/h의 슬러리펌프를 개발하여 납품하였으며 6,500 m<sup>3</sup>/h의 슬러리펌프 개발을 진행하는 등 국내의 슬러리펌프 시장을 선도하고 있다.

## 4. 슬러리펌프 개요

### 4.1. Slurry 종류

Slurry라 함은 고행입자가 일부 함유된 유체를 말한

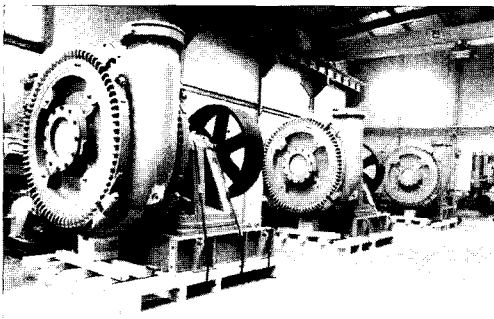


Fig. 1 대용량 슬러리펌프 개발

다. 슬러리의 정확한 특성과 유체로의 성질은 이송 유체 자체의 특성과 더불어 고행 입자의 형태, 크기, 종류나 양에 따라 결정된다. 슬러리는 고행 입자가 부유하는가의 여부에 따라 개략적으로 non-settling (고행입자가 부유하는) 슬러리와 settling (고행입자가 가라앉는) 슬러리로 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

Non-settling slurry는 점성이 높고, 균일한 혼합물을 형성하는 아주 미세한 입자로 구성되며, 보통 마모성은 적으나 가끔 정성적인 액체와 같이 운전되지 않으므로 Pump 및 Driver를 선정할 때 신중한 고려가 필요하다. 그리고 Slurry의 solid 농도가 너무 높으면 pump 성능 저하의 원인이 된다.

Settling slurry는 거친 입자로 불안정한 혼합물로 구성되어 있으므로 동력 및 유량 계산에 있어서 신중한 주의가 필요하다. 이 입자는 마모성이 큰 경향이 있지만 대부분의 slurry가 이에 준용되고 있다.

### 4.2. 슬러리 pH

흡수탑 내의 pH를 높이는 것은 SO<sub>2</sub> 제거효율을 높이기 위해 필요하지만 흡수탑 내의 석회석 용해를 감소와 스케일 발생, 액적제거기 (ME)에서의 스케일과 막힘 (Plugging)을 유발하므로 4.5~6.0의 범위에서 운전하는 것이 일반적이다. pH가 4이하일 경우 SO<sub>2</sub> 제거효율이 떨어지고 부식발생 가능성이 증가하며 6이상일 경우 석회석 이용률 감소, 부산석고의 순도저하, 슬러리 발생량 증가 등의 문제가 발생한다. 그러나 생석회 (Lime)를 사용하는 흡수탑에서는 생석회의 용해시간이 20~30초로 짧고 석회석과 같은 완충작용이 없으므로 pH 8~9의 범위에서도 운전이 가능하다.

### 4.3. 슬러리의 특성

석회석-석고 반응을 이용하는 국내 배연탈황설비의 경우에, 석회석을 분쇄하여 슬러리로 만드는 공정, 흡수탑내에서 슬러리를 순환시키는 공정, 결정화된 석고를 분리/추출하여 상품화 할 수 있는 석고를 제조하는 공정 등에서 사용되는 각종 배관, 펌프, 스프레이 노즐, 교반기, 저장탱크 및 흡수탑 내벽 등에 적용되는 재질에서 다양한 손상이 발생한다. 슬러리계통을 구성하는 각종 부품의 소재는 마모성 입자에 의한 침식 또는 마모환경과 부식성 용액에 의한 부식 환경에 동시에 노출되므로 침식과 부식손상을 동시에 받는다고 볼 수 있다. 그러나

슬러리 계통내의 부위에 따라서 주요 손상인자로 손상 형태에 따라 마모에 의한 손상, 침식에 의한 손상, 부식에 의한 손상 등으로 분류할 수 있다.

#### 4.3.1. 마찰 마모 (abrasion)

마찰마모는 딱딱한 입자가 고체표면에 대하여 힘이 수직으로 가해진 상태에서 상대적으로 3가지 유형 (gouging, high and low stress grinding)을 나타내고 있다. 원심형 슬러리 펌프에서는 이와 같은 유형의 마모는 임펠러와 throatbush 사이와 축 sleeve와 packing 사이에서 주로 발생하지만 슬러리 펌프에서는 주 침식 원인은 아니다.

#### 4.3.2. 침식

슬러리 펌프에서 주로 발생하는 마모의 형태는 침식이다. 침식은 유체 속에 있는 입자의 작용으로 표면의 소재가 마모되는 현상이다. 침식 시에는 마찰 마모 시와는 달리 입자에 의해 부품 표면으로 운동에너지가 전달된다. 이와 같이 운동에너지가 전달되면 높은 접촉응력이 발생한다. 개개의 충돌 점에서의 평균적인 접촉응력

은 미미한 반면 비접촉 압은 입자의 불균일한 모양 때문에 높다. 침식에는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 sliding bed, random 및 directional impact의 3가지 모드가 있다. 펌핑 시 임펠러, side liner 및 volute에서 일어나는 침식마모는 다음과 같다.

- 펌프 임펠러는 직접충돌 (vane의 선단부, back shroud와 만나는 vane의 기저 상), sliding bed 마모, 저각 충돌 (vane과 평행, shroud 사이의 통로 안쪽) 등 3가지가 복합적으로 발생
- side liner는 주로 sliding bed 마모가 발생하며 때로는 저각 충돌로 발생
- volute에서는 cutwater부에서는 직각 충돌, 주변부 sliding bed 마모 발생.

#### 4.3.3. 부식

금속의 부식현상에는 여러 종류가 있다 : 일반부식, galvanic, 틈새, 공식, intergranular, 선택적 leaching, 응력부식, 침부식 등. 이 중에서 침부식은 슬러리 펌프에서 가장 중요한데, 그것은 침식과 부식이 동시에 작용하며 개별적으로 분리해내기 힘들기 때문이다. 침부식은 펌프 부품이 액체와 접촉하고 있을 때 표면에 생기는 산화층이 지속적으로 마멸되는 결과로 발생한다. 보호피막인 산화층은 슬러리 이송하는 액체와 금속부위 사이에서 화학반응의 결과로 생겨 금속을 부식으로부터 방지한다. 이것이 지속적으로 마멸되면 금속이 슬러리에 직접 노출되기 때문에 침부식이 일어나며 금속이 마모된다.

elastomer는 보통 기체와 액체의 환경에서 손상된다. elastomer 종류에 따라서 기체와 액체를 흡수하는 능력이 다르며 용체에 용해될 경향도 또한 다르다. 일부 흡수와 용해가 일어나면 elastomer는 팽윤하여 그 소재의 탄성에 치명적인 영향을 미친다. 이 결과로 elastomer의 내마모 특성이 감소한다. 내화학성은 유체에 소재가 침

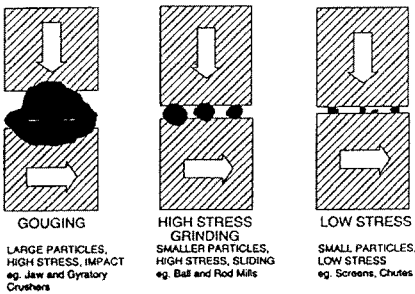


Fig. 2 마찰 마모의 주 손상 모드

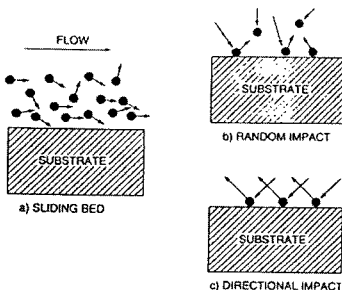


Fig. 3 침식의 3가지 주 모드

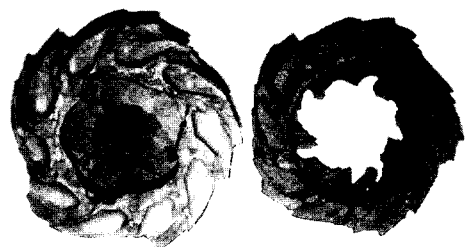


Fig. 4 니켈슬러리에 의한 임펠러의 손상 예

지되었을 때의 손상정도를 나타내는 광범위한 개념이다. elastomer의 경우 내화학성은 내부식성 또는 팽윤에 대한 저항성 및 강도저하를 의미한다.

Figure 4는 니켈 슬러리에 의한 임펠러의 손상정도를 나타낸다.

#### 4.3.4. 슬러리 입자의 영향

재료의 표면에 기계적인 충격을 가하여 침식손상을 일으키는 슬러리 입자의 특성은 전체 침부식 손상에 미치는 영향이 크며 항목별로 살펴보면 입자의 형상(shape), 크기, 분포, 슬러리 압자의 경도 등에 따라 그 효과가 다양하게 나타난다. 부식이 심하지 않은 곳에서는 입자의 표면의 예리한 정도(angularity)에 마모율이 비례하며, 슬러리가 재순환되는 경우 마모율은 시간에 따라 감소하는데 이는 실험이 진행됨에 따라 입자 자체가 마모되어 표면이 무더지기(rounding) 때문이다. 침부식 시험 후 손상면의 형태는 재순환 슬러리의 경우는 deformation wear를 파이프와 같이 슬러리가 통과하는 경우에는 cutting wear 양상을 띤다.

그러나 예리함이 증가하더라도 슬러리농도가 높아서 슬러리 입자간의 충돌이 발생하거나, 부식이 지배적인 경우 입자형상의 효과는 그다지 중요치 않은 것으로 알려져 있다.

슬러리 농도가 증가하면 일반적으로 같은 부피에서 더 많은 에너지가 전달되므로 밀도가 증가할수록 손상량이 증가하며 농도에 따라 비례한다. 입자의 크기가 클수록 더 많은 운동에너지가 전달되므로, 같은 조건에서 크기가 클수록 손상량이 증가한다. 슬러리 입자 자체의 경도가 시험소재의 경도보다 클 경우 경도가 증가할 수

록 손상량이 증가하나 어느 일정 단계를 지나면 입자경도의 효과는 점차 줄어드는 것으로 알려져 있다.

#### 4.4. 슬러리 펌프

슬러리를 이송하는 데는 여러 종류의 펌프가 있다.

일반적으로 스크류펌프, 볼텍스펌프 등의 특수펌프가 고형물을 이송하는데 사용되지만 한전의 탈황설비에서는 Fig. 5와 같은 슬러리전용 원심형 이송펌프가 사용되고 있다. 원심형 슬러리 펌프는 임펠러를 회전시켜 발생하는 원심력을 이용하여 슬러리에 운동에너지를 전달하고 이 운동에너지는 위치에너지로 변경되어 목적지까지 이송된다. 이것은 일반 청수 원심펌프의 원리와 동일하다.

Metal type의 슬러리 펌프의 기본적인 구조는 Fig. 5와 같다. 유체와 접촉하는 내부의 volute liner와 임펠러는 Hi-Cr Alloy 재질로 제작되어 있으며 Rubber 재질의 부품과 호환성이 있게 설계되었다. 이들 제품은 펌프 운전 후 손상 부위가 발생되면 교체하여 사용할 수 있는 구조로 제작되어 있다.

원심형 슬러리 펌프를 설계할 경우 고형입자를 통과시킬 임펠러의 크기와 모양, 적절한 shaft sealing 방법, 내구성이 강한 재료의 선택 등을 고려해야 슬러리와 접촉하는 부위에서 마모, 마멸, 침식, 부식 등으로 일어나는 손상을 최대한으로 억제할 수 있다. 슬러리 펌프는 청수를 이송하는 펌프에 비해 일반적으로 크기가 큰 데 이것은 회전 속도를 낮추어 슬러리에 의한 펌프 마모 속도를 최대한으로 억제하기 위함이다.

블류트나 임펠러와 같이 유체와 접촉하는 부품은 마모를 최소화하고 고형물이 막히지 않도록 충분히 크게 설계한다.

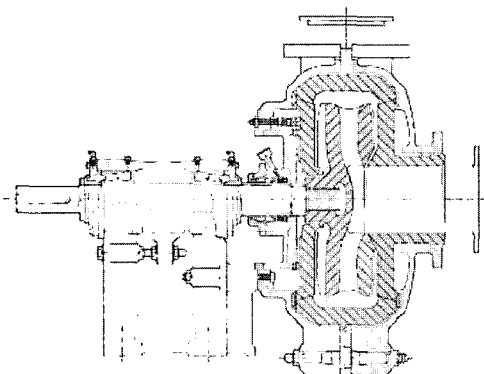


Fig. 5 슬러리펌프의 구조