

조선용 블록의 도장 전처리 효율 향상 연구 - 연마재 회수 효율 제어 인자별 특성 평가

백재진^{†*}, 이병헌^{*}

현대중공업(주) 산업기술연구소^{*}

A Study on Efficiency Improvement of Surface Preparation Process for Ship's Block - the Effect of Design and Operation Parameters for the Abrasive Recovery System

Jea jin Baek^{†*} and Byung Hun Lee^{*}

Hyundai Industrial Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd^{*}

Abstract

Reduction of labor hour for cleaning up of the used abrasives after blasting. is attempted by improving the efficiency of abrasive recovery process in the protective coating of ship's block, For this purpose, the theoretical background for pneumatic transport technology in the abrasive recovery system as well as experimental evaluation on the effect of design parameters such as flow pattern, saltation velocity and pressure drop on the efficiency of the abrasive recovery system are employed. By optimizing the operating parameters such as the length and diameter of the suction hose, specification of recovery device and recovery mouth, a new method which can dramatically increase the efficiency of abrasive recovery system, is proposed.

※Keywords: Abrasive(연마재), Blasting(블라스팅), Pneumatic Transport(기력 수송), Recovery System(회수 시스템), Saltation Velocity(최소 이송속도)

1. 서론

선박의 건조 공정중 블록을 도장하는 공정에서 도장 작업 전에 블록(block) 표면의 이물질 제거와 표면의 조도(profile) 형성을 통한 도막의 부착

성 증가를 위해 연마재인 그리트(grit)를 사용하여 블라스팅(blasting)을 하고 있다

본 생산 공정에서 블록 내부에 쌓인 연마재는 회수 장치를 이용하여 기력 수송으로 회수하고 있으나 적절하지 못한 회수 시스템의 구성으로 인하여 과다한 압력 손실이 발생하여 연마재 회수 효율 저하 및 호스 막힘 등 여러 가지 문제가 빈번하게 발생하고 있으며, 이로 인하여 도장 공정

† 주저자, E-mail: jjbaek@hhi.co.kr

Tel:051-230-3232

이 지연되고 있다.

연마재를 기력으로 이송하기 위해서는 분체의 특성, 흐름 패턴, 이송 공기 속도, 압력 손실 등의 운전 특성이 최적으로 구성되어 운전되어야 하지만, 현재 이에 대한 체계적인 연구가 이루어져 있지 않는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 이러한 요소 기술에 대한 이론적 배경을 구축하였고, 연마재 회수 실험을 통하여 흐름 패턴, 최소 이송 속도, 압력 손실 특성 등의 설계 인자를 도출하였다. 도출된 설계 인자로부터 흡입 호스의 길이, 호스 직경, 회수 장치 사양, 회수 마우스, 호스 연결 방법 등의 운전 인자를 최적화하여 연마재를 효율적으로 이송시킬 수 있는 시스템을 개발하였으며, 이를 적용함으로써 조선 생산 공정의 병목 지점인 블라스팅 공정의 생산성을 향상할 수 있을 것이다.

2. 연마재 회수 시스템 특성

연마재를 공기로 이송하는 기력 수송 기술은 이송하고자 하는 분체의 물성과 모양이 각기 다르고, 그 상태가 환경의 조건 및 취급량의 정도에 따라 다르기 때문에, 지금까지는 경험적인 요소가 많았다. 그러나 장치의 생산성과 공정의 안정성을 높이기 위해서는 회수 시스템의 제어 인자에 대한 최적화가 필요하다.

2.1 입자 특성에 따른 흐름 패턴

기력에 의해 수송되는 입자들은 입자 크기, 크기 분포, 형상, 밀도, 표면 경도 등의 고유한 물리적인 특성을 가진다. 기력 수송 입자의 흐름 패턴(flow pattern)은 이들 물리적 특성에 의해 좌우되며, 특히 입자와 공기의 상호 작용과 관련된 permeability, air retention, de-aeration과 같은 특성에 영향을 받으며, 이 특성은 기본 입자 특성(입자 크기, 크기 분포, 밀도, 경도)들의 함수이다. 따라서 기력 수송 시스템을 설계할 때 이송할 입자의 물리적 특성에 적합한 흐름 패턴을 정하는 것은 매우 중요하다.

Pan(1999)은 입자 특성의 적합한 흐름 패턴을 선택하기 위하여 이론적인 근거와 실험 결과로부터

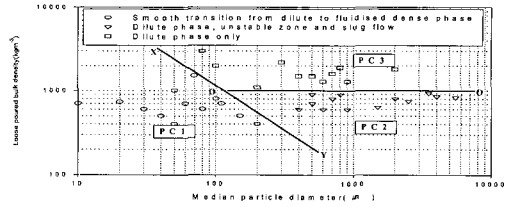


Fig. 1 Flow mode diagram of materials in pneumatic conveying

터, 겉보기 밀도(loose-poured bulk density)와 평균 입자 크기에 의해 간단하게 특성화한 diagram을 개발하였다. 새롭게 개발된 diagram은 입자들을 흐름 형태를 Fig. 1과 같이 3가지 그룹(PC1, PC2, PC3)로 분류하였다.

2.2 이송 공기 속도

기력 수송 장치에서는 이송 공기 속도가 장치의 성능에 결정적인 영향을 미친다. 그러나 주어진 이송 조건에 적절한 이송 공기 속도를 명확하게 산출하는 이론적인 기술은 아직 확립되지 않았다. 또 이송 실험 결과를 그대로 적용하는 것은 위험하며, 실험 값은 어디까지나 참고 값에 지나지 않으므로, 실험 값을 실제의 공정에서는 여러 조건에 따라 수정할 필요가 있다.

적절한 이송 공기 속도는 분체의 물성과 농도, 이송 공기의 압력, 온도, 수송관의 지름, 수송관 안의 속도 분포, 수평 거리, 수직 거리, 경사관의 각도와 길이, 곡관의 각도와 수에 관계되는 것으로 알려져 있다.

입자의 이송 발생하는 조건을 이론적으로 예상하기는 불가능하다. 그러나 최소 이송 속도를 예상할 수 있는 많은 경험식이 있다. Rizk(1973)은 반-이론적인 접근 방법을 기초로 한 경험식을 제시하였다.

수야무(1994)에 의하면 압력 손실은 이송 속도의 제곱에 비례하고, 소요동력은 속도의 3승에 비례하므로 수평 및 수직 흐름에서 운전비 감소, 마모 감소, 마찰 압력 손실을 최소화하기 위해 최소한 속도에서 운전하여야 한다. 일반적으로 기력 수송 설비의 설계 시에 시스템의 불안정성을 고려하여 최소 이송 속도를 선택할 때는 안전율(safe

margin)을 50% 이상을 추천하고 있다.

2.3 압력 손실

기류가 분체를 이송하는 일에는 기류가 압력의 형태로 갖고 있는 에너지를 활용하게 된다. 일반적으로 직선관의 전체 압력 손실은 가속에 의한 압력 손실, 입자에 생기는 저항력에 의한 압력 손실 및 공기가 관 벽과의 마찰에서 생기는 압력 손실 등의 합으로 이루어진다.

Weber(1991)는 분체 이송시 발생하는 압력손실을 계산할 수 있는 이론식 (1)을 도출하였다.

$$\Delta p_p/L = (\lambda_a + \lambda_p) \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

여기서 공기 마찰 손실 계수인 λ_a 는 이송관의 조도와 Reynolds수 함수에 관계되며, 문헌에서 쉽게 구할 수 있지만 분체의 마찰 손실 계수인 λ_p 는 분체와 이송 공기의 여러 조건과 관계된다고 알려져 있다. 이들 변수들을 살펴보면, 공기 속도, 관의 안지름, 공기의 점도, 공기의 밀도 ρ , 공기 속도와 입자 속도의 차, 입자의 직경, 입자의 밀도, 중력 가속도, 혼합비, 입자의 속도 등과 같이 많은 인자와 관계되므로 연마재의 압력 손실 값을 이론적으로 도출하기는 어렵다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구에 사용된 연마재 회수 실험 설비는 연마재 공급 장치 → 회수 마우스 → 압력 측정 장치(입구) → 회수 호스 → 압력 측정 장치(출구) → 연마재 분리 탱크 → 오리피스 유량계 → 회수 시스템으로 구성되며 실험 장치를 Fig. 2에 나타내었다.

연마재 회수 시 이송량을 변화시키기 위해 회전수에 따라 연마재의 투입량을 변화시킬 수 있는 연마재 공급 장치를 설치하였다. 실험에 사용된 회수 시스템은 Roots Blower (50m³/min, -430 mmHg)에 의해 진공 압력을 형성하여 공기를 흡입하고 흡입된 공기에서 사이클론과 백 필터에 의해 분진이 제거 되도록 설계되어 있다. 흡입되는 공기의 유량은 회수 시스템과 분리 탱크 사이에

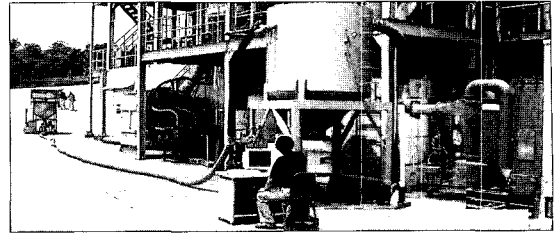


Fig. 2 Experimental apparatus

설치된 오리피스 유량계에서 측정되며, 호스 각 위치별 압력은 아날로그와 디지털 압력 측정 센서에 의해 호스 각 위치별로 측정된다. 측정된 공기 속도와 압력은 PLC로 연결된 Data 저장장치에서 실시간으로 저장하여 각각의 변수에 대하여 연마재 회수 성능을 분석, 평가하였다.

3.2 실험 방법

기력수송 장치인 연마재 회수 시스템의 설계 인자를 구하기 위해 공기 속도, 혼합비, 호스 직경, 호스 길이, 진공 압력 등을 변화시키면서 최소 이송 속도와 압력 손실의 특성을 고찰하였다.

공기 속도는 회수 시스템의 후단에 설치된 밸브의 개폐 정도를 조절하면서 변화시켰고, 유입 공기 유량과 연마재 투입량의 변화를 통하여 혼합비를 조절하였다. 진공 압력은 회수 시스템에 설치된 안전 밸브의 개폐 정도를 변화시키면서 조절하였다. 압력 손실은 호스 입, 출구에 설치된 압력 센스로부터 측정된 압력의 차이를 이용하여 계산하였다.

실험 변수들은 실제 공정과 비슷한 조건에서 수행하였는데, 연마재 이송량은 0-5 ton/hr, 진공압력은 320-560 mmHg, 혼합비는 1-8, 공기 속도는 5-60 m/s, 호스 직경은 50, 75, 90, 100mm, 호스 길이는 20 ~ 55m로 변화시키면서 실험을 행하였으며, 회수 마우스는 여러 가지 형상에 대하여 비교 실험을 행하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 연마재 물성에 따른 흐름 패턴

연마재 입자를 기력수송 방법으로 이송하기 위해 가장 적당한 흐름 패턴을 알기 위해

Pan(1999)이 제시한 입자의 걸보기 밀도를 이용한 Fig. 1의 Flow mode diagram을 이용하여 현재 사용중인 연마재 입자 특성으로부터 흐름 패턴을 구하였다.

연마재 입자의 평균 직경은 800 μm 이고, 걸보기 밀도가 4590 kg/m^3 이므로 PC3 그룹에 속하게 된다. PC3 그룹의 입자들은 쉽게 잘 뭉쳐져 입자의 흐름성이 급격히 변한다. 입자 유량을 일정하게 유지하면서 공기 속도를 감소하면 압력 손실은 감소하지만, 최소 압력 손실에 도달하기 전에 입자들은 가라앉기 시작하고 입자들은 바닥을 따라 빠르게 쌓이기 시작한다. 입자가 수송관 단면을 완전히 차단하면 더 이상의 흐름은 발생하지 않는다. 따라서 연마재의 기력수송 흐름 패턴은 균일상(dilute phase)으로 이송하여야 하며, 진한 상(dense phase)으로 운전하면 관이 막히게 되어 연속적으로 운전 할 수 없다.

연마재를 이송관 내에서 균일 상의 흐름 형태로 운전하기 위해서는 공기 속도를 최소 이송 속도(saltation velocity) 이상으로 유지하여야 한다.

4.2 연마재의 최소 이송 속도

연마재 물성에 따른 흐름 패턴 분석 결과 연마재는 균일 상으로만 이송이 가능함으로 회수 호스 내에서 연마재의 최소 이송 속도(saltation velocity)를 구하여, 그 이상의 속도에서 운전하여야 한다.

이송관을 투명 아크릴을 이용하여 호스 직경별로 공기 속도와 연마재 이송량을 변화시키면서 시간적으로 연마재가 수송관 내에 침적되기 시작하는 속도를 측정하였다.

Fig. 3은 혼합비(mixing ratio)에 대한 최소 이송 속도를 측정한 결과로서 호스 직경 100A에 비해 75A가 약간 높게 나타났으나 큰 차이는 없었다. 혼합비가 증가하면 선형적으로 증가하는 결과를 나타내었으며 이는 연마재를 균일 상으로 운전하기 위해서는 연마재 이송량이 많아지면 공기 속도도 상대적으로 크게 증가되어야 함을 알 수 있다.

공기 속도가 증가하면 압력 손실이 증가하기 때문에 연마재 이송 시스템에서는 회수 시스템이 가

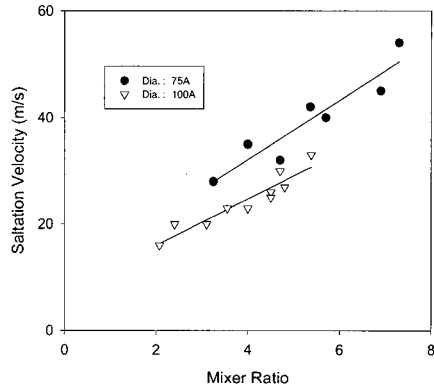


Fig. 3 Effect of mixing ratio on saltation velocity

공진 진공 압력 이상의 압력 손실을 극복할 수 없기 때문에 이송 라인은 막히게 된다. 따라서 연마재 이송 시 적당량의 연마재가 흡입되게 설계하여야 함을 알 수가 있다.

연마재 회수 시스템의 운전에 필요한 공기 속도는 작업 조건의 불안정성을 고려하여 보통 도약 속도의 1.5배 이상이 되어야 한다. 따라서 연마재 회수 시스템의 적정 혼합비는 3~4 이므로 적정 공기 속도는 40 m/s 이상을 유지하여야만 연마재를 균일 상으로 이송할 수 있다.

4.3 압력 손실

기력 수송에서 공기에 의하여 입자를 수송하는 관 전체에 걸리는 압력 손실에 대한 정보는 안정적인 조업과 설계를 위해서 매우 중요한 인자이다. 만약 관내에서 이송되는 입자의 속도와 마찰 계수를 정확히 알고 있다면 관 내 압력 손실 측정을 통하여 이송되는 입자의 유량 예측이 가능하다. 최근까지 수송관 내 압력 손실을 예측하기 위한 많은 상관식이 제안되었지만 상대적으로 연마재의 입자에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 그러므로 본 실험에서는 공기를 이용한 수송 장치에서 연마재 이송 시 공기 속도와 연마재의 혼합비에 따른 압력 손실 특성을 도출하였고, 기력수송계에서 관 내 압력 손실을 예측할 수 있는 반-경험식을 제시하고자 한다.

반-경험 상관식은 Weber(1991)가 제시한 이론식 (1)을 식 (2)와 같이 변형하여 나타낼 수 있으며, 공기 속도와 혼합비를 변화시키면서 측정된 압력 손실을 이용하여 상수 k와 a를 구할 수 있다.

$$\Delta p/L = k \times M^a \times \frac{\rho v^2}{2} \quad (2)$$

여기서 $\Delta p/L$ 는 단위 길이당 압력 손실이고, M은 연마재와 공기의 무게비로 나타낸 혼합비이다. 상수 k와 지수 a는 실험에 의해 구해지는 값이다.

Fig. 4는 호스 직경이 75A인 실험 결과를 식에 대입하여 유도한 식과 실험 결과의 상관 관계를 도시한 것으로 상관성이 96% 이상으로 매우 뛰어난 것을 알 수 있다.

실험을 통하여 도출된 직선관의 압력 손실의 상관관계식을 Table 1에 나타내었다.

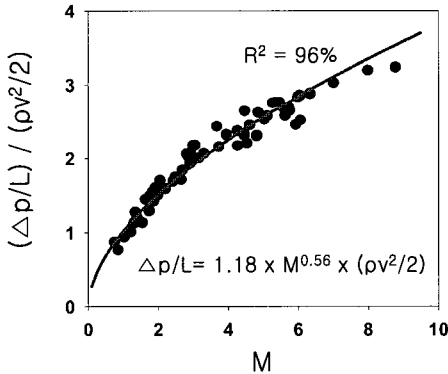


Fig. 4 Comparison between experimental and theoretical values

Table 1 Correlation equation of pressure loss

직경	상관 관계식
50A	$\Delta p/L = 1.1 \times M^{0.59} \times \rho v^2 / 2$
75A	$\Delta p/L = 1.18 \times M^{0.56} \times \rho v^2 / 2$
90A	$\Delta p/L = 0.98 \times M^{0.54} \times \rho v^2 / 2$
100A	$\Delta p/L = 0.85 \times M^{0.55} \times \rho v^2 / 2$

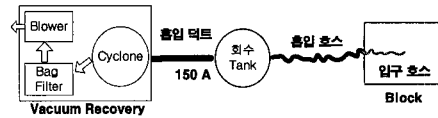


Fig. 5 Schematic diagram of abrasive recovery system

호스 직경에 따른 도출된 압력 손실 상관식은 거의 비슷한 값을 나타내고 있으나 동일한 공기 유량과 연마재가 호스 내를 흐를 때의 압력 손실은 공기 속도의 제곱에 비례하므로 큰 차이를 나타내고 있다. 즉, 호스 직경이 75A를 기준 하였을 때, 50A는 2.0배 증가한 반면, 90A는 0.7배, 100A는 0.56배로 각각 감소함을 알 수 있다. 이는 호스 직경이 커지면 단면적이 커져 공기 속도가 감소하기 때문에 압력 손실이 줄어드는 것을 알 수 있다.

혼합비에 대한 압력 손실은 약 0.55 승에 비례함을 알 수 있다.

4.4 호스 길이에 따른 회수 특성

실 공정의 연마재 회수 시스템은 Fig. 5와 같이 구성되며, 회수 시스템에서부터 블록 내부의 연마재 흡입 위치까지의 거리는 최소 40m 이상이다. 회수 탱크에서 연마재가 분리됨으로 인하여 압력 손실은 1m당 최대 0.5 mmHg로 매우 작게 발생한다. 회수 라인 중 압력 손실이 가장 많이 발생하는 부위는 연마재가 호스 상에서 이송되는 흡입 호스와 입구 호스이다.

흡입 덕트 길이를 길게 하여 회수 탱크 위치를 블록과 가까이 하면 압력 손실이 감소하게 되며 감소한 압력 손실만큼 공기 속도가 증가하여 연마재를 더 많이 이송시킬 수 있다. 따라서, 회수 호스 길이에 따른 연마재 회수량을 검토하기 위해 직경이 75A인 호스의 길이를 변화시키면서 회수 성능 실험을 행하였다.

Fig. 6은 호스 길이 변화에 대한 시간당 연마재 회수량을 측정된 실험 결과를 나타낸 것으로 연마재 회수량은 호스 길이에 반비례함을 알 수 있다. 회수 호스 길이를 55m에서 25m로 줄일 경우, 길이는 반 이상 줄어들지만 회수량은 약 26%(90A),

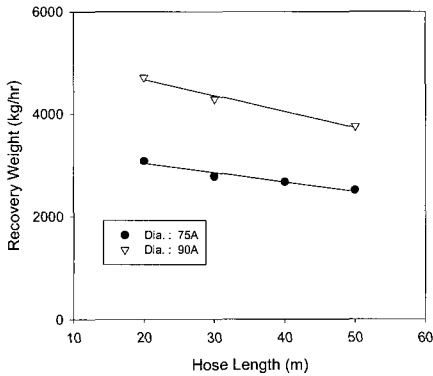


Fig. 6 Effect of hose length on recovery weight

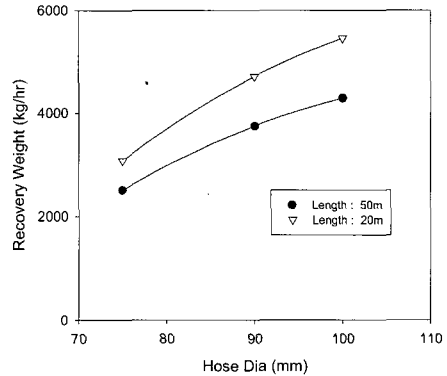


Fig. 7 Effect of hose diameter on recovery weight

23%(75A) 증가하는 것으로 나타났다.

4.5 호스 직경에 따른 회수 특성

현재 연마재 회수 호스로 조선업계에서 사용되고 있는 내마모 PVC 호스는 경질 PVC를 나선형상으로 만들어 연질 호스 외부에 성형 용작 시킨 것으로 내외압에 강하고 굴곡성이 뛰어나며 내마모성이 우수하지만, 무거운 단점이 있다. 그리고 작업자의 조작성을 고려하여 전체 흡입 호스로서 75A를 사용하고 소형의 입구 호스(50A, 5m)에 회수 마우스를 연결하여 연마재를 회수하고 있다. 그러나 현재 호스 직경으로는 연마재 회수 효율을 향상시키기에는 한계가 있으며 최적의 호스 직경을 선정하기 위해 호스 직경에 대한 연마재 회수 성능을 실험하였다.

Fig. 7은 시간당 연마재 회수량을 호스 직경별로 실험한 결과를 나타낸 것으로 호스 직경이 증가할수록 비선형적으로 회수량이 증가함을 알 수 있다. 현재 사용중인 기존 호스 시스템(75A + 50A)을 기준 했을 때 개선 호스 시스템(90A + 65A)은 회수 효율이 50% 증가함을 알 수 있다.

위 실험 결과에서 알 수 있듯이 회수 호스의 직경이 큰 것을 적용하는 것이 회수 효율을 증가시키는 데는 가장 효율적인 방법이지만 호스의 직경이 커지면 전체 중량이 무거워져 작업자가 호스를 취급하기가 힘들어진다. 직경이 큰 호스를 실 공정에 적용하기 위해서는 기존과 동일한 성능(굴곡

성, 내마모성)을 가지면서 경량화 된 호스의 개발이 필요하다. 100A 호스는 경량화 해도 호스 직경이 커서 작업자가 취급하기가 불편하기 때문에 향후의 회수 호스 사용 기준은 흡입 호스는 90A, 입구호스는 65A를 사용하는 것이 타당하다. 이와 같은 사용 기준에 따라 작업 시에는 기존 시스템보다 연마재 회수 효율을 50% 이상 향상시킬 수 있다.

4.6 진공 압력

연마재 회수 시스템의 운전 변수 중의 하나인 진공 압력에 대하여 회수 효율의 특성을 검토하여 최적의 사양을 선정할 필요가 있다.

Fig. 8은 진공 압력을 변화시키면서 연마재 회수량을 측정하여 진공압이 증가하면 회수량은 선형적으로 증가하였다. 현재 일반적으로 사용되는 430 mmHg인 진공 압력을 630mmHg까지 증가시키면 회수 효율은 약 42% 증가하게 된다.

4.7 회수 마우스

회수 마우스 형상 설계에 있어서 가장 중요한 설계 인자는 조작이 간편하면서 압력 손실이 적고 흡입력이 좋아야 한다. Fig. 9와 같이 기존 사용되고 있는 회수 마우스와 개선하고자 하는 회수 마우스의 성능을 평가하기 위하여 여러 종류의 회수 마우스를 제작하였다.

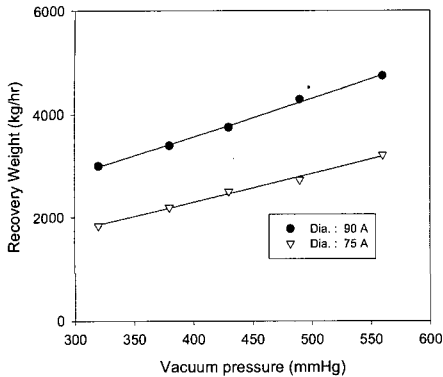


Fig. 8 Effect of vacuum pressure on recovery weight

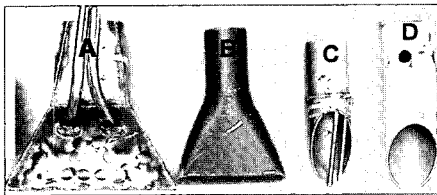


Fig. 9 Recovery mouth

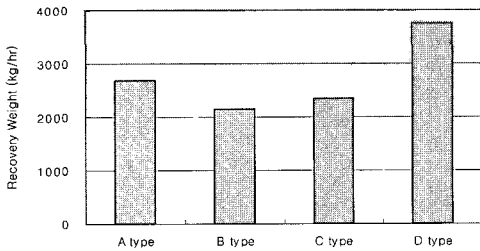


Fig. 10 Effect of Mouth type on recovery weight

A 형태는 삼각 구조로 흡입구의 면적과 마우스 상부에 공기 유입구를 뚫어 개폐의 정도에 따라 연마재 성능을 평가할 수 있는 형태이다. B와 C 형태는 실 공정에서 적용되고 있는 50A 회수 마우스이고, D 형태는 개선된 65A 입구 호스에 맞추어 하부에 구멍을 뚫어 공기의 유입이 원활하도록 한 것이다.

마우스별 연마재 회수 성능을 평가한 결과를

Fig. 10에 도시하였다.

A와 D 형태는 회수 호스를 90A(50m), 65A(5m)로 시스템을 구성하였고, B와 C 형태는 75A(50m), 50A (5m)로 구성하였다. 회수 시간은 D→A→C→B 순으로 증가하였으며, 60A 일자 경사형인 D 형태가 가장 빠른 회수 속도를 보였다. 호스 내 연마재 유출 시간은 A→D→C→B 순으로 회수 시간과 동일한 경향을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 연마재를 이송하는 기력 수송 기술에 대한 이론적 배경을 확립하였고, 실험을 통하여 설계 인자를 도출하고 이를 바탕으로 연마재 회수 효율을 향상시킬 수 있는 최적의 방안을 도출하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 연마재가 호스 내에서 침적되거나 막힘 현상 없이 연속적으로 이송되기 위해서는 공기 속도와 혼합비를 적절히 조절되어 균일 상 흐름을 유지하여야 하며 공기 속도는 40m/s 이상을 유지하여야 한다.

- 연마재 회수 시스템의 압력 손실을 예측할 수 있는 상관 관계식을 도출하였다.

- 회수 탱크 위치를 변경하여 호스 길이를 55m에서 25m로 짧게 하면, 연마재 회수 효율을 25% 증가시킬 수 있다.

- 기존 75A 호스에 비해 직경이 크지만 작업성(무게, 굴곡성)이 비슷한 경량화 호스(90A)를 개발하였으며, 직경이 증가되면 회수 효율을 50% 증가시킬 수 있다.

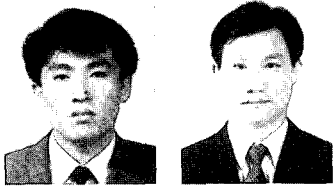
- 회수 시스템의 진공압을 630mmHg까지 증가시키면 회수 효율은 43% 증가한다.

- 도출된 방안에 따른 개선 효과는 호스 직경(50%) > 진공 압력(42%) > 호스 길이(25%) 순으로 나타났으며 전체 회수 효율을 약 160% 이상 향상시킬 수 있다.

참고 문헌

- 守野武, 1994, “분체 수송 기술”, 技術

- F. Rizk, 1973, "Technische Hochschule Karlsruhe", Dr-Ing. Dissertation
- M. Weber, 1991, "Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying", Bulk Solids handling, 11,
- R. Pan, 1999, "Material properties and flow modes in pneumatic conveying", Power Technology 104 157-163



< 백 재 진 >

< 이 병 헌 >