

하·폐수 슬러지 열건조 시스템 및 장치개발

<연속감압식 간접 열건조 시스템>

Development of thermal-drying system and equipment for sewage/waste water sludge

<Continuous type low vacuum indirect thermal drying system>

연구기관:장우기계(주) 부설연구소, 참여기업:장우기계(주)

허병수, 신용한, 김태훈, 장당엽, 인영철

기술개발요약

본 연구에서는 기존의 로터리 방식이나 플래시 방식 등의 직접열에 의한 건조방식이 2차 공해 유발 및 폭발이나 화재의 위험을 항상 내포하는 등 여러 가지 단점이 있으므로 이러한 문제점을 연속 감압식 간접열 방식의 건조장치를 개발하여 근원적으로 해결하고자 하였다. 본 연구의 목표는 50kg/hr용량의 연속 감압식 간접열 방식의 디스크 건조장치를 개발하여 건조효율을 70% 이상 향상시키며(기존의 제품은 50% 이하) 기존 장치에 비하여 약 50% 이상의 건조기 크기를 축소시켜 장치의 소형, 경량화를 이루고 그로 인한 설치비 및 운전비 절감효과를 20%이상 향상시키는 것이다. 현재는 기존의 1축식 및 2축식 간접열 건조장치를 분석하여 구조적인 개선점을 도출하였으며 기초실험을 통하여 우수한 건조성능을 확인하였다. 또한 감압조건에서의 실험을 수행하여 열전달 및 건조특성이 향상되는 것을 확인하였다. 향후 간접열 건조장치의 실플랜트 적용을 통한 Scale-Up 요소의 파악 및 건조특성 파악이 진행될 예정이다.

keyword : 건조기(Dryer), 함수율(Moisture Content), 슬러지(Sludge), 간접열(Indirect Heat), 감압(Vacuum)

1. 서 론

하수 및 폐수처리 등의 수처리 공정과 시멘트, 염색, 피혁 및 제지 등의 각종 생산공정 등에서 불가피하게 발생하는 슬러지는 수질 및 토양 오염의 근원적인 역할을 하기 때문에 슬러지의 효과적인 처리문제는 환경공해 방지 관점에서 매우 중요한 일이며 지속적인 기술 개발을 필요로 한다. 종래의 슬러지 처리는 수송의 과정을 거쳐, 육지 또는 해양 등에 매립하여 왔는데 최근 해양투기 금지법 등의 환경 규제 강화로 재활용 또는 소각의 공정으로 대체되고 있으며 이러한 재활용 또는 소각의 공정에서 슬러지 내에 존재하

는 다량의 수분은 소각시 환경 공해 방지 및 에너지의 효율적 사용 관점에서 방해 요소로 작용하고 있고 이를 위하여 슬러지 건조공정의 필요성이 점차적으로 고조되고 있다.

그러나 기존의 건조공정은 직접 건조방식을 사용하여 상대적으로 간단하고 효율적인 건조처리를 달성하고 있지만, 처리 공정상에서의 공해물질의 방출 등의 2차오염의 문제가 심각하기 때문에 최근에는 간접 열전달에 의한 건조방식이 선진국들에서 주로 채택되어지고 있다. 그러나 그에 대한 국내 수준은 대부분의 업체들이 영세한 업체들이 대부분으로 효율과 성능적인 면에서 상당히 뒤지는 상황이다. 그러므로 본 연구에서는 고효율 대용량의 간접열 건조장치

를 개발하여 선진국 수준의 고효율 시스템의 국산화 개발을 목표로 하고자 한다

2. 2축식 Pilot Scale 실험장치의 설계 및 제작

2.1 장치설계

표 1에는 Pilot Scale 실험장치의 기본 설계 사양을 나타내었다. 주로 적용하고자 하는 슬러지의 종류로는 하수 슬러지, 안료 슬러지, 유·무기 슬러지 등이 있으며 슬러지 처리 용량은 50kg/hr이고 함수율은 건조전 80wt%에서 건조후 40wt%가 되도록 설계하였다. 열원으로는 열매체유를 사용하였으며 160℃로 유입되어 열전달 과정을 거쳐 150℃로 배출된다. 건조된 함수율 40wt%의 슬러지 배출 온도는 약 70~80℃이다. 그림 1은 Pilot Scale 실험장치의 구조도를 나타낸 것이다.

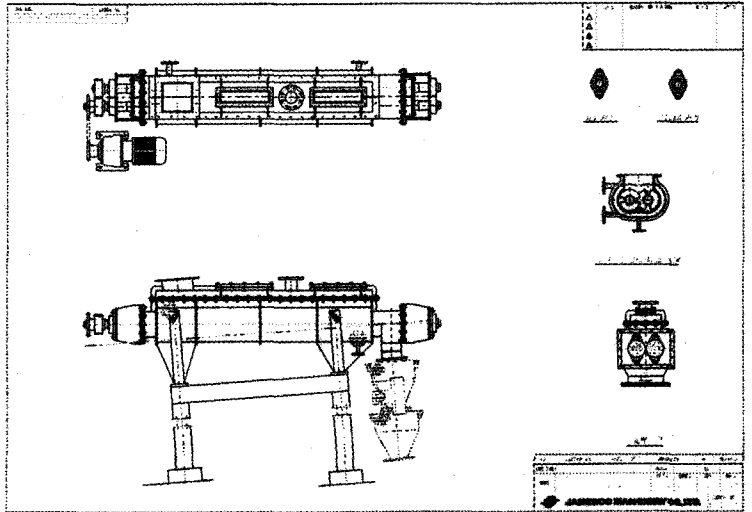


그림 1. Pilot Scale 2축식디스크 건조장치의 구조도

[표 1. Pilot scale 실험장치의 기본설계사양]

항 목	사 양
대상물질	하수슬러지
목표처리량 (슬러지 초기 함수율)	50kg/hr (80wt%)
건조 슬러지 배출량 (슬러지 최종 함수율)	17kg/hr (40wt%)
수분 증발량	33kg/hr
열매체유의 건조기 유입 온도	160℃
열매체유의 건조기 유출 온도	150℃
건조슬러지의 온도	70~80℃

2.2 장치 제작

그림 2와 3은 본 연구를 위해 제작된 PILOT 시제품의 사진을 나타낸 것이다. 그림 2는 2축식 디스크 건조장치의 전체 모습을 나타낸 것으로서 건조기 본체, 시료 공급장치, 배기장치 등으로 크게 이루어져 있으며 건조실 내에서 재료



그림 2. 2축식디스크 건조장치 전체전경

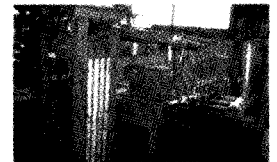


그림 3. 오리피스 및 U자형 압력계를 이용한 열매유 유량측정장치

의 원활한 혼합을 위하여 회전축의 Gear Ratio를 달리하여 회전비가 1 : 1.5가 되도록 설치하였다. 또한, 건조된 시료의 배출구로서 감압 실험시 일정한 진공도를 유지하기 위하여 2중 댐퍼를 설치한 모습이다. 이 2중 댐퍼는 공기압에 의해 구동되며 타이머를 설치하여 일정 시간 간격을 두고 서로 열리고 닫히도록 구성되어 있어 시료의 배출에 의한 진공도의 파괴를 최소화하였다. 그림 3은 오리피스 유량측정장치로서 2개의 회전축과 SHELL의 JACKET에서 유출되는 열매유의 유량을 측정하기 위하여 U자형 압력계이지와 함께 설치한 것으로서, 오리피스를 통과하는 열매유의 유량에 따라 다르게 나타나는 압력 강하 값을 미리 보정하여 정확한 유량을 측정하였으며 그것을 바탕으로 공급 열

량을 산정하였다.

3. 연구개발결과

3.1 성능평가

3.1.1 실험장치 보정

보다 정확한 실험을 수행하기 위하여 슬러지 공급을 위한 Screw Feeder와 유량계를 보정(Calibration)을 수행하였다. 그림 4는 Screw Feeder의 보정 결과로서 Screw의 회전수에 따른 시료의 토출량을 측정된 것이다. Screw의 회전이 증가할수록 시료의 토출량도 증가하며 거의 선형적으로 비례한다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 열매유의 유량측정을 위해 설치한 오리피스에의 차압에 따른 유량의 변화를 나타낸 것이다. 오리피스에 의한 열매유의 정확한 계측으로 인하여 건조기에 사용되는 정확한 열량을 산정할수 있어 건조기의 성능 및 건조효율의 산정시 중요한 결과를 도출할 수 있었다.

3.1.2 상압 건조실험

① 성능 검증 실험

Pilot 시제품의 성능을 평가하기 위하여 시료의 투입량, 축의 회전수 등에 따른 건조물의 함수율과 그때의 열전달 계수 등을 측정, 계산하였다. 그림 6은 상압조건에서 시료의 투입량을 40 ~ 50 kg/hr로 변화시켰을 경우 축의 회전속도가 각각 20/30RPM일 때와 25/ 37.5 RPM일 경우의 건조물의 함수율 변화를 나타낸 것이다. 두 조건 모두 시료의 투입량이 증가함에 따라 건조물의 함수율도 증가하는 경향을 나타내고 있으며 건조기 회전축의 회전속도가 빠를 경우 열전달이 더욱 촉진되어 수분 증발이 양호해져 건조물의 함수율이 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

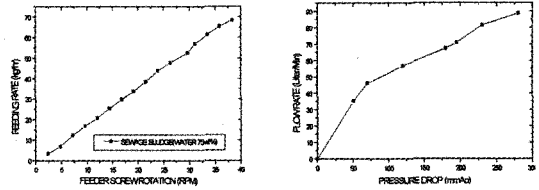


그림4. 시료 토출량 CALIBRATION 그림5. 오리피스 이용 열매유 유량 CALIBRATION

② 열전달계수 산정

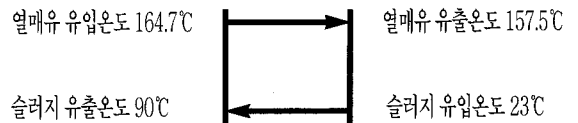
슬러지 건조장치의 가장 중요한 수치인 열전달계수 산정을 위하여 슬러지 공급량이 40kg/hr이고, 열매유 유입온도를 164.7℃일 경우의 건조시 투입되는 열량과 열전달계수, 온도변화, 및 전열면적과의 관계는 다음의 식 (1) 및 (2)와 같이 주어진다. 이에 산정된 총괄열전달 계수는 69 [kcal/m²·hr·℃]로서 이론 설계치인 100[kcal/m²·hr·℃]이하로 나타났다.

$$Q = U_d \times A \times \Delta T \quad (1)$$

$$U_d = \frac{Q}{A \times \Delta T} \quad (2)$$

Q : 투입 열량, 17,568 kcal/hr, A : 전열 면적, 2.5m², ΔTLMTD : 대수 평균 온도차, 101.6℃

※ ΔTLMTD



[그림6 참조]

$$T1 = 164.7 - 90 = 74.7$$

$$T2 = 157.5 - 23 = 134.5$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{T2 - T1}{\ln(\frac{T2}{T1})} = \frac{134.5 - 74.7}{\ln(\frac{134.5}{74.7})} = 101.6℃$$

$$\therefore U_d = \frac{17568}{2.5 \times 101.6} = 69 [kcal/m^2 \cdot hr \cdot \text{℃}]$$

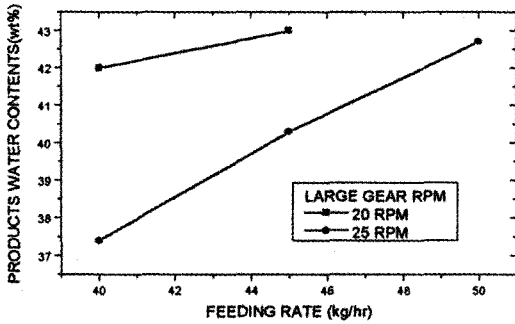


그림 6. 상압하에서 시료의 투입량과 축의 회전수에 따른 건조물의 함수율 변화

3.1.3 감압 건조실험

① 성능 검증 실험

그림 7은 감압(200 Torr)하에서 시료의 투입량과 건조기 회전축의 회전속도 변화에 따른 건조물의 함수율 변화를 나타낸 것이다. 시료의 투입량은 40 ~ 50 kg/hr로 변화시켰으며 축의 회전속도는 15/22.5RPM ~ 25/37.5RPM으로 변화시켜 실험을 수행하였다. 실험결과, 동일한 조건에서 시료의 투입량이 증가할수록 건조 시료의 함수율이 증가하는 경향을 나타내었으며 건조기 회전축의 회전속도가 증가할 때 건조 시료의 함수율이 감소하는 경향을 나타내었으나 일정 값 이상으로 회전수를 증가하였을 경우는 오히려 건조후 함수율이 증가하는 것을 알수 있었는데, 이는 슬러지가 건조됨에 따라 표면부터 건조가 되므로 일정 함수율 이하에서는 회전하는 디스크에 의해 미끄럼이 발생하여 충분한 열전달이 이루어지지 않아 함수율이 오히려 높아지는 것으로 판단된다. 이러한 임계함수율과 건조기 회전축의 회전속도와의 관계는 추가적인 보강 실험을 통해 그리고 50kg/hr의 투입시 20RPM으로 운전할 때 건조물의 함수율이 28.5%로서 초기 설계값인 처리량 50kg/hr와 건조물의 함수율 30% 이하를 만족하는 운전조건임을 알 수 있다.

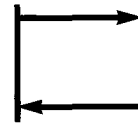
② 열전달계수 산정

감압 건조시의 열전달 계수를 추정하기 위하여 앞의 식 (2)를 이용하였다.

Q : 투입 열량, 17,954 kcal/hr, A : 전열 면적, 2.5m², ΔT_{LMTD} : 대수 평균 온도차, 76.6℃

※ ΔT_{LMTD}

열매유 유입온도 123.6℃



열매유 유출온도 114.4℃

슬러지 유출온도 60℃

슬러지 유입온도 23℃

$$T_1 = 123.6 - 60 = 63.6 \quad T_2 = 114.4 - 23 = 91.4$$

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} = \frac{91.4 - 63.6}{\ln\left(\frac{91.4}{63.6}\right)} = 76.6^\circ\text{C}$$

$$\therefore U_d = \frac{17954}{2.5 \times 76.6} = 93.8 [\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}]$$

3.1.4 상압과 감압건조의 건조특성 비교

그림 8은 상압과 감압(200Torr, 100Torr)하에서 시료의 투입에 따른 건조물의 함수율 변화를 실험을 수행하여 측정된 값으로써, 건조후 슬러지 함수율이 약 41%에서 감압 조건시 38%, 29.8%로 낮게 예측이 되어, 감압 조건하에서의 건조후 슬러지 함수율이 상압하에 비하여 월등히 낮게 나타났으며, 이를 토대로 산정한 총괄열전도계수(Ud)값을

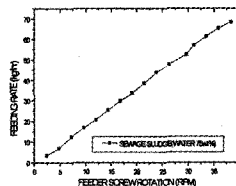


그림 7. 감압(200Torr)하에서 시료 투입량과 축의 회전수에 따른 건조물의 함수율 변화

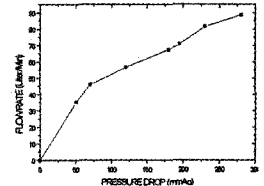


그림 8. 상압과 감압하에서 시료 투입량에 따른 건조물의 함수율 변화

산정하여 표 2에 나타내었다.

표 2에서 보는바와 같이 유사한 투입 열량하에서 건조기 총괄열전달계수(Ud)가 200Torr감압하에서는 약 136% 정도, 100Torr에서는 194%로 크게 향상되는 것을 알 수 있었다.

이러한 결과는 동일한 열량을 공급할 경우 건조기의 크기를 최대 약 50%로 감소시킬 수 있다는 결과이나, 간접열 건조기의 특성상 건조기의 크기와 사용열량을 일정비율이하로 줄일 경우 그 비율이 비례적으로 줄어들지 않기 때문에 건조가 이루어지지 않을 수 있으므로 현실적으로는 50%까지 건조기의 크기가 감소하지는 않는다.

3.2 경제성 분석

슬러지 간접열 건조기의 초기 제작비용과 운전비용은 제작회사에 따른 가격에 의해 차이가 많이 날 수가 있기 때문에 객관적으로 정확하게 경제성 평가를 하기에는 매우 어려운 일이다.

그러나, 본 연구에서 상압과 감압조건하에서 수행된 실험결과(Ud값과 열매유사용량)를 토대로 경제성 분석을 실시하였으며, 가능한 현실성 있는 분석을 위하여 장우기계(주)의 제작사양과 기본 견적가격을 기초로 경제성 분석을 실시하였다.

표 3은 상압과 감압의 각 공정에 따른 건조장치의 설치비용 및 운전비용을 토대로 한 경제성을 분석한 결과이다. 상압과 감압(200Torr와 100Torr)조

표 2. 상압과 감압하에서의 실험조건 및 열전도 계수

* 열전달 계수의 단위 : Kcal/m².hr.℃

조건	투입 열량 (kcal/hr)	시료 투입량 (kg/hr)	초기 슬러지 함수율 (%)	건조 후 슬러지 함수율 (%)	수분 증발량 (kg/hr)	시료 온도 (℃)	열전달계수*비교	
							열전달 계수	비율
상압	17,568	40	79	41.2	25.73	91	69.0	100%
감압 (200Torr)	17,954	40	79	38.3	26.38	59	93.8	136%
감압 (100Torr)	17,581	40	79	29.8	28.20	52	134	194%

건하에서 젖은 하수슬러지 처리량 1ton/hr를 초기함수율 80%에서 40%로 건조시 슬러지 건조장치의 규모 및 사양을 결정하였다.

1ton/hr처리용량의 하수슬러지 건조시스템 경제성 분석결과, 시설투자비에서는 진공펌프와 콘덴서의 설치비가 다소 증가하였으나, 건조기 본체의 크기가 감소함(전열면적 : 72m²에서 58m²로 약 20%감소)에 따른 비용감소가 더 큰

표 3. 감압식 간접열 건조장치의 경제성 분석

		상압	감압(200torr)	감압(100torr)
DRYER	전열면적 : 72m ² SIZE : φ1500x5000L 동력 : 22.5KW		전열면적 : 58m ² SIZE : φ1400x5000L 동력 : 19KW	전열면적 : 58m ² SIZE : φ1350x4720L 동력 : 15.5KW
		100,000,000원	90,000,000원	85,000,000원
FEED	VAT SIZE : φ1020x1800H 동력 : 7.5KW		SIZE : φ1020x1800H 동력 : 7.5KW	SIZE : φ1020x1800H 동력 : 7.5KW
	SCREW SIZE : 8B 동력 : 7.5KW		SIZE : 8B 동력 : 7.5KW	SIZE : 8B 동력 : 7.5KW
계		17,000,000원	17,000,000원	17,000,000원
BAG FILTER	CAP : 25m ³ /min SIZE : 1100W x 1300L x 4000H		CAP : 22m ³ /min SIZE : 1100W x 1100L x 4000H	CAP : 20m ³ /min SIZE : 700W x 1500L x 4000H
		10,000,000원	9,000,000원	8,000,000원
CONDENSER	CAPA : 24m ³		CAPA : 42m ³	CAPA : 45m ³
	7,000,000원		10,000,000원	10,000,000원
RECEIVE TANK	CAPA : 1000L		CAPA : 1000L	CAPA : 1000L
	5,000,000원		5,000,000원	5,000,000원
EXHAUST FAN	CAPA : 5m ³ /min 동력 : 2.25KW			
	1,500,000원			
VACUUM PUMP			CAPA : 5m ³ /min 동력 : 11.25KW	CAPA : 5m ³ /min 동력 : 11.25KW
			3,000,000원	3,000,000원
STEAM UNIT	CONTROL V/V : 80A TRAP : 50A STRAINER : 80A.50A		CONTROL V/V : 65A TRAP : 40A STRAINER : 65A. 40A	CONTROL V/V : 65A TRAP : 40A STRAINER : 65A. 40A
		3,000,000원	2,500,000원	2,500,000원
INSULATION	ROCKWOOL 50mm Color sheet 1t		ROCKWOOL 50mm Color sheet 1t	ROCKWOOL 50mm Color sheet 1t
	5,000,000원		5,000,000원	5,000,000원
CONTROL PANEL				
	20,000,000원		22,000,000원	22,000,000원
장치비 합계		168,500,000원	163,500,000원	157,500,000원
STEAM CONSUMPTION	1140KG/HR(34,200원/hr)		850KG/HR(25,500원/hr)	830KG/HR(24,900원/hr)
			스팀 7KG/㎥ 금액 : 30,000원/TON기준	
TOTAL POWER	39.75KW(1,789원/hr)		45.25KW(2,035원/hr)	41.75KW(1,879원/hr)
			전기료 : 45원/KW	
운전비 합계		35,989원/hr	27,536원/hr	26,779원/hr
			Steam 사용료 + 전력비	

것으로 나타나, 감압(100Torr)가 시설설치비가 168,500,000원에서 157,500,000원으로 6.5% 감소 하는 것으로 나타났다. 또한, 운전비용 측면에서는 전기료가 감압 조건일 수록 다소 증가하였으나, 스팀사용량의 감소(1140KG/HR에서 830KG/HR으로 약 27%감소)에 의하여 전체 운전비용이 35,989원/hr에서 26,779원/hr으로 25.6%로 감소하였다. 이상으로부터 분석결과, 표 3에서 보는 바와 같이 100Torr감압건조방식이 가장 경제적이었으며, 이는 상압 건조방식보다 감압건조(100Torr)에 따른 Ud값이 94.2% 증가함에 따라 건조기의 크기 감소(약 20%) 및 스팀사용량 감소(약 27%)에 의한 효과인 것으로 나타났다. 그러나 자체적으로 잉여 스팀을 이용하여 건조 열원으로 사용할 경우에는 스팀 비용이 절감되므로 오히려 전기소모량이 많은 감압건조시에 비용이 많이 소요되는 것으로 분석되었다. 그러므로 건조대상 슬러지의 특성 및 여러 가지 주위 조건들에 따라 경제성 평가 상당히 영향을 받으므로 종합적인 분석을 통하여 감압과 상압중 어느 것이 더 유리할 것인가를 정확히 판단하여 장치를 설계해야 할 것으로 사료된다.

4. 기술개발 효과 및 적용분야

4.1 기술개발효과

본 장치의 개발을 통한 기술개발효과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 연속 감압식 건조장치의 개발로 고부가가치화/고효율화에 의한 에너지 절감(20%)
- 각종 슬러지의 특성에 따른 건조 Data Base 확립
- 주어진 처리용량, 건조효율 및 설치공간에 대하여 최적의 슬러지 열건조 장치의 설계로 인한 제작비 및 운전비 절감
- 국내 열건조기 분야의 기술 수준 향상과 국산화에 따른 수입 대체와 국제 경쟁력 제고로 인한 수출 증대 기여
- 균일 건조를 통한 건조물 고급화에 의한 건조관련 산업 활성화

4.2 적용분야

간접열 건조방식의 핵심요소 및 최적화 기술의 개발로 국내의 하·폐수 슬러지의 건조 처리 시스템의 수요가 가속화 될 것으로 전망되며 고효율 슬러지 간접건조 처리공정의 개발로 슬러지 폐기물의 소각 및 퇴비화, 건축자재생산 등의 폐자원 재활용에 응용할 수 있다.

5. 결론 및 향후 전망

본 연구는 기존의 직접열 건조방식의 여러 가지 단점을 개선한 연속 감압식 간접열 방식의 건조장치를 개발하고자 하는 것으로, 1단계 연구 결과로서 75kg/hr용량의 연속식 간접열 방식의 디스크 건조장치를 제작하여 성능 테스트 결과 그 우수성을 확인하였으며 2단계 연구 결과로서 감압 방식의 적용에 대한 건조성능의 향상을 확인하였다. 현재는 실 플랜트 적용을 통한 Scale Up요소의 확인 및 성능검증을 진행중에 있다.

향후 국제적인 환경협약의 대두와 국내에서도 환경문제에 적극적으로 대처하기 위한 일환으로 2001년 이후 하수, 폐수 슬러지의 매립 및 해양투기가 금지되므로 슬러지 소각 처리장치와연계한 연속 감압식 간접열 건조장치에 대한 수요가 급증할 것으로 예상되고 있으므로 본 기술의 개발 및 상용화는 국내·외적으로 큰 파급효과를 가져올 것으로 판단된다.

참여기업소개

기업명	장우기계(주)	대표자	허병수
주소	부산광역시가장군정관면예림리712	연락처	051-727-7171
설립년월일	1990년 7월 1일	주원업종	제조업
기술보유현황		기술보유현황	
		산업용 건조기, 화학기계, 산업기계	
홈페이지	www.shinwu.co.kr (E-mail : sweng03@chollan.net)		

