

스크레퍼형 슬러리아이스 제빙기의 열전달 특성 연구

김 중 하, 윤 재 호, 김 민 준, 김 규 진*, 조 형 석**, 안 성 국**

한국생산기술연구원, *유일시스템, **삼일산업

A Study on the Heat Transfer Characteristics of Slurry Ice Generator using Scraper

Joung-Ha Kim, Jae-Ho Yun, Min-Jun Kim, Kyu-Jin Kim*, Hyoug-Seok Cho**, Seong-Kuk An**

ABSTRACT: In this study, ice making characteristics are experimentally investigated for the ice slurry generating system which is pneumatically operated. The experimentations are conducted under the various test conditions such as chilled water inlet temperature, aqueous solution concentration, flow rate of cooling water, scraper pitch and frequency of cylinder stroke. For the above experimental conditions, ice making characteristics of the slurry ice generating system are evaluated in terms of the overall heat transfer coefficient, heat transfer rate and the amount of slurry ice generation. And the experimental results show that the heat transfer rate of the system increases as the flow rate of cooling water solution increases and the concentration of ethylene glycol and inlet temperature of chilled water decreases.

Key words: Scraper(스크레퍼), Ice generator(제빙기), Cooling water(냉수), Chilled water(냉각수), Heat transfer(열전달)

기 호 설 명

c_p : 비열 [kJ/kg·°C]
 A : 열교환면적 [m²]
 $LMTD$: 대수평균온도차 [°C]
 \dot{m} : 질량유량 [kg/hr]
 q : 냉동능력 [kcal/hr]
 T : 온도 [°C]
 U : 총괄열전달계수 [W/m²·°C]

1 : 입구측
 2 : 출구측

하첨자

i : 냉수측
 m : 평균
 o : 냉각수측

1. 서 론

최근에 국내에서 여름철 냉방부하가 큰 낮 시간에 전기소비량이 크게 증가하여 전기의 수급이 불안정하다. 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 전력 예비율이 여유가 있는 야간에 냉동기를 작동시켜 냉열원을 축열조에 저장하였다가 주간에 그 열을 사용하는 빙축열시스템의 보급이 하나의 방안으로 제시되고 있다.

빙축열시스템은 축열방식에 따라 정적제빙방식과 동적제빙방식으로 구분되며, 일반적으로 정적제빙방식이 주를 이루고 있으나, 제빙표면에 얼음이 성장하면서 열전달 효율이 저하됨에 따라 시스템 효율이 낮아지는 단점이 있다. 따라서 정적제빙방식 보다 전열 특성 및 부하 추종성이 좋고, 반송이 가능한 슬러리아이스(slurry ice)를

†Corresponding author

Tel.: +82-41-589-8348; fax: +82-41-589-8330

E-mail address: joungha@kitech.re.kr

이용한 동적제빙방식에 관한 연구^(1,2)와 개발이 이루어지고 있으며, 국내에서도 일부 회사에서 슬러리아이스를 이용한 빙축열 시스템을 개발하여 상당한 성과를 이루고 있는 것으로 알려져 있다.⁽³⁻⁵⁾

따라서 본 연구에서는 공압실린더를 이용하여 스크레이퍼 상하 왕복운동 하는 제빙기 단품을 설계 제작하였으며, 공압구동형 제빙기의 특성을 파악하기 위하여 제빙기로 유입되는 EG 수용액의 농도, 유량 그리고 공압실린더의 왕복운동 시간의 변화에 따른 제빙기의 특성을 살펴보았다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 구성

본 연구에서 개발하고자 하는 공압구동형 축냉 시스템에 사용되는 제빙기는 Fig.1와 같은 형상을 가지며, 동관으로 제작된 제빙기는 관 외부에 냉매 또는 브라인이 흐르고 내부에 물이 순환한다. 관 내부로 순환하는 물은 관벽에서 얼음이 생성되고, 공압실린더에 의하여 상하 왕복운동하는 원판형 스크레퍼(scraper)에 의하여 생성된 얼음을 제거하는 방식으로 얼음이 만들어진다.

이러한 공압구동형 냉각방식의 제빙기의 특성을 연구하기 위하여 먼저 제빙기의 성능에 영향을 주는 인자인 원판형 스크레퍼 간격, 원판형 스크레퍼 고정축의 상하 왕복운동(stroke, frequency), 냉수 유속 등의 변화에 따른 제빙 성능(열전달)특성 연구가 필요하다. 제빙기의 성능에 영향을 미치는 설계인자를 규명하기 위하여 Fig. 2과 같은 Lab. scale의 축냉시스템을 제작하였다. 축냉시스템의 주요 구성품은 공압실린더에 의하여 왕복운동하는 원판형 스크레퍼가 장착된 제빙기와 제빙기의 물을 순환시키는 펌프, 순환되는 물 유량을 측정할 수 있는 유량계, 얼음을 저장하기 위한 축열조, 제빙기 입출구에 온도 및 압력 센서를 부착하여 온도 및 압력을 측정하였다. 또한 실제 시스템에서 제빙기의 냉열원으로 냉매 또는 브라인이 사용하지만, 본 연구에서는 냉열원으로 항온조에서 일정한 온도의 냉각수를 공급하도록 하였으며, 냉각수측에도 냉각수를 순

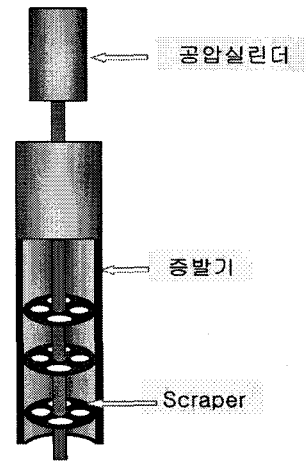


Fig. 1 Schematic diagram of operation for slurry ice generator

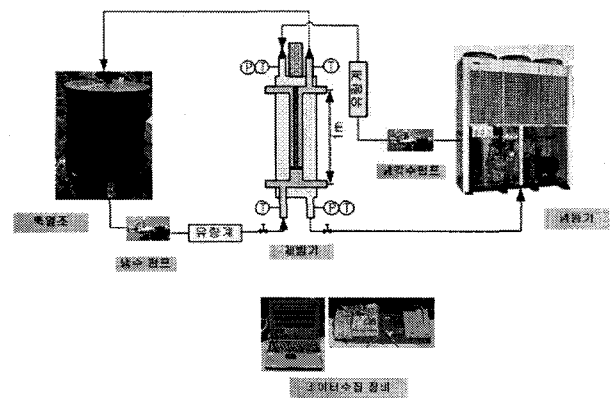


Fig. 2 Schematic diagram of slurry ice making system

환시키기 위한 펌프, 유량계, 온도 및 압력계를 설치하였다. 냉각수 및 냉수 펌프의 유량을 변화시키기 위하여 바이패스 밸브를 설치하였으며, 냉각수측에 공급하는 브라인은 5RT급 항온조를 제작하여 일정한 온도의 브라인을 공급하도록 하였다.

2.2 성능실험 방법

제빙기의 열전달에 영향을 미치는 설계인자에 대한 연구를 위하여 위에 기술한 실험장치를 구성하였다. 공압구동형 제빙기의 성능실험은 먼저 항온조의 온도를 실험설정 온도로 유지하도록 가동시킨 후 제빙기에 냉각수를 공급하고, 공압실

린더를 왕복운동시키면서 냉수를 순환시켜 열교환이 되도록 하였다. 냉수의 초기 온도는 6~10℃ 시작하여 냉수온도가 슬러리 아이스가 생성되는 온도까지 냉각시키고 이때 생성되는 슬러리 아이스는 가는 메쉬로 모아서 생성량을 측정하고, 상온에서 슬러리 아이스가 생성되는 온도까지 열교환량, 총괄열전달 계수 등을 계산하여 열교환 성능을 분석하였다. 슬러리 아이스 생성량 측정 방법으로는 슬러리 아이스가 생성되기 시작하여 안정적으로 슬러리 아이스가 생성될 때 30분 간격으로 2회 슬러리 아이스 무게를 측정하고 평균값을 사용하였으며, 이때 슬러리 아이스 내에 물을 함유하고 있는데 충분히 물을 제거한 후에 순수한 슬러리 아이스 무게를 측정하여 실험 데이터로 사용하였다.

공압구동형 제빙기의 제빙성능에 영향을 주는 설계인자로는 냉수측 유속, 공압실린더 스크레퍼 왕복시간, 냉각수 입구온도, 스크레퍼 간격, 에틸렌글리콜 농도 변화 등으로 예측하였다. 이러한 설계인자 변화시험을 위하여 먼저 기준조건을 선정하고 기준조건에 대하여 Table 1.과 같이 설계인자를 변화시키면서 성능시험을 수행하였다.

실험에 사용된 온도센서 RTD를 사용하였으며, 제빙기 성능시험의 오차를 줄이기 위하여 정밀도 ±0.1℃의 정밀 온도계로 검교정하였다. 또한 냉각수와 냉수의 유량은 마그네틱 유량계를 사용하였고, 유량계의 정밀도는 ±0.2% 정밀도를 가지고 있다. 슬러리 아이스 생성량을 측정하기 위하여 2g~30kg까지 측정이 가능한 정밀 저울을 사용하였다. 실험장치를 구성하는 제빙기, 축열조, 냉각수 및 냉수 배관은 20mm의 두께를 가진 단열재로 단열하여 대기중으로 냉열원이 방출되는 것을 방지하였다. 실험에서 측정된 냉각수 입출구 온도 및 압력, 냉각수 유량, 냉수 입출구 온도 및 압력, 물유량 등의 측정 값은 데이터 수집장치(DA-100)를 통하여 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

3. 실험데이터 분석

제빙기의 열전달 특성을 알아보기 위하여 총괄 열전달계수(Overall heat transfer coefficient)를 식 (1)을 이용하여 구하였다.

Table 1. Test condition of experiment

Parameter	condition	standard condition
Flow rate of chilled water (m/sec)	1.31, 0.87, 0.65	1.31
Scraper frequency(sec)	1.0, 1.5, 2.0	1.0
Cooling water inlet temp. (°C)	-12, -10, -8	-12
Scraper pitch(mm)	50, 100	100
E.G. concentration(%)	3, 4, 5	3

$$q_m = UA\Delta T_m \quad (1)$$

여기서 A는 제빙기 내의 평균열교환면적을 나타내며, ΔT_m 는 대수평균온도차(log mean temperature difference)로 식 (2)에 나타내었다.

$$LMTD = \frac{(T_{i2} - T_{o2}) - (T_{i1} - T_{o1})}{\ln \frac{T_{i2} - T_{o2}}{T_{i1} - T_{o1}}} \quad (2)$$

관내측과 관외측의 유동은 에너지 평형을 이루므로 관내측에서 얻은 열량은 관외측에서 잃은 열량과 동일하다. 따라서 에너지보존식을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} q_i &= \dot{m}_i c_p (T_{i1} - T_{i2}) \\ &= \dot{m}_o c_p (T_{o2} - T_{o1}) \\ &= UA\Delta T_m \end{aligned} \quad (3)$$

4. 제빙기 시험 결과

4.1 냉각수 입구온도 변화에 따른 제빙기 특성

냉각수 입구온도 변화에 따른 공압구동형 제빙기의 성능특성 실험을 위하여 기준 조건인 냉수측 물 유속 1.31m/s, 스크레퍼 왕복시간 1초, 스크레퍼 간격 100mm, 에틸렌 글리콜 3%에서 냉각수 입구온도를 -8℃, -10℃, -12℃로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 냉각수 입구온도 변화에 따른 실험 결과로는 열교환량에 대하여 Fig 3와 같이 냉각수 온도가 -12℃일때 냉수 온도가 실험 초기인 7℃에서 열교환량이 대략 2200

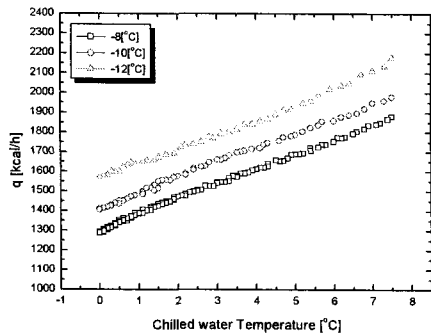


Fig. 3 Variation of heat transfer rate for cooling water inlet temp.

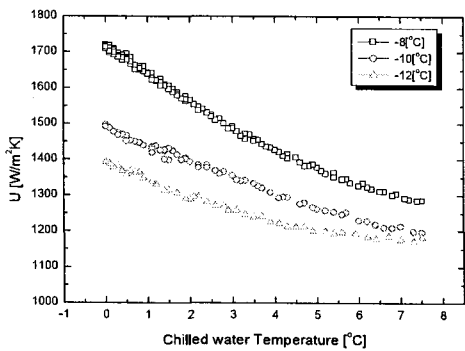


Fig. 4 Variation of overall Heat transfer coefficient for cooling water inlet temp.

kcal/h에서 냉수 온도가 0°C로 하강하면서 열교환량이 1500 kcal/h로 일정하게 감소하는 것으로 나타났다. 이는 제빙기 내부와 외부의 온도차가 감소하면서 열교환량이 감소하는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 냉각수 입구온도 변화에 따른 총괄열저항을 나타내는 그래프로 총괄열전달계수는 열전달량과 반대로 냉각수 온도가 상승하면서 총괄열전달계수도 증가하며, 냉수 온도가 감소할수록 총괄열전달계수는 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 총괄열전달계수는 냉각수 온도 -12°C에 대하여 냉수온도가 7°C에서 0°C로 감소하면서 1200 W/m²K에서 1400w/m²K로 증가한다.

4.2 냉수 유속 변화에 따른 제빙기 특성

냉수 유속 변화에 따른 공압구동형 제빙기의

성능특성 실험을 위하여 기준 조건에서 냉수 유속을 0.65m/s, 0.89m/s, 1.31m/s로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 냉수 유속 변화에 따라 열교환량은 냉수 유속이 증가하면서 열교환량은 비례적으로 증가하는 경향을 나타내며, Fig. 5와 같이 냉수 유속이 1.31m/s에서 대하여 냉수 온도가 실험 초기인 7°C에서 열교환량이 대략 2200 kcal/h에서 냉수 온도가 0°C 하강하면 열교환량이 1500 kcal/h로 일정하게 감소하지만 냉수 유속이 0.65m/s의 경우 냉수 온도가 7°C에서 0°C로 감소하면서 열교환량은 1850 kcal/h에서 1150kcal/h로 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 관내 유속이 증가하면서 레이놀드 수가 증가하여 열전달 계수가 크게 증가하기 때문으로 판단된다. 총괄열전달계수는 Fig. 6에서 같이 유속이 증가하면서 총괄열전달계수는 크게 증가하고, 냉수 입구온도가

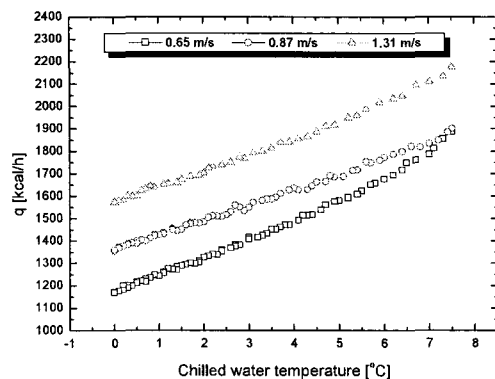


Fig. 5 Variation of heat transfer rate for chilled water velocity

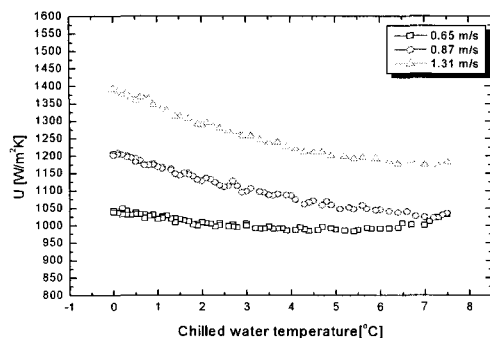


Fig. 6 Variation of overall Heat transfer coefficient for chilled water velocity

감소하면서 완만하게 증가하는 것을 알 수 있으며, 1.31m/s에서의 경우 7℃에서 총괄열저항은 대략 1150 W/m²K에서 냉수 온도가 0℃ 하강하면 1400 W/m²K으로 증가하는 것으로 나타난다.

4.3 Frequency 변화에 따른 제빙기 특성

공압구동형 제빙기는 제빙기 내에 생성된 슬러리 아이스를 원판형 스크레퍼로 주기적으로 왕복하면서 제거해 낸다. 스크레퍼를 고정하는 축의 frequency의 변화가 제빙기의 열전달이나 슬러리 아이스 생성량과의 관계를 규명하기 위하여 기준 조건에서 frequency를 1초, 1.5초, 2초로 변화시키면서 실험을 수행하였다. frequency 변화에 따라 열교환량은 Fig. 7에서 frequency 1초에서의 열교환 성능이 우수하며, frequency 1.5초, 2초에서 열교환량은 거의 동일하게 나타났으나, frequency 1초에서보다 조금 감소하였다.

4.4 스크레퍼 간격 및 EG 농도 변화에 따른 제빙기 특성

공압구동형 제빙기의 원판형 스크레퍼 간격에 대한 열전달 특성을 규명하기 위하여 기준 조건에서 스크레퍼 간격을 50mm, 100mm로 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig. 8의 스크레퍼 간격에 대한 열교환량에 대한 그래프에서 스크레퍼 간격은 열교환량에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 동일한 frequency 조건에서 스크레퍼 간격은 하나의 스크레퍼가 슬러리아이스를 제거하

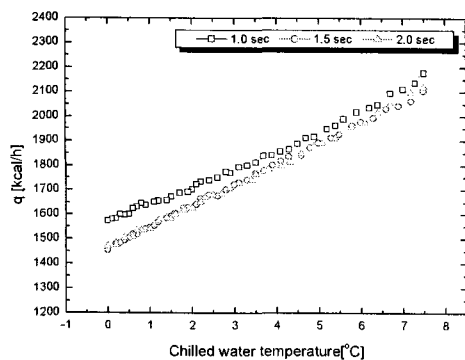


Fig. 7 Variation of heat transfer rate for air cylinder frequency

는 간격을 나타내므로 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

공압구동형 제빙기에서 슬러리아이스가 생성되면 제빙기 표면에 부착하여 제거하기가 쉽지 않다. 따라서 원활한 슬러리아이스 제거를 위하여 에틸렌 글리콜을 사용하였으며, 그 농도를 변화시켜 제빙기의 특성을 연구하였다. 첨가제의 영향에 대한 열전달 특성을 규명하기 위하여 기준 조건에서 에틸렌 글리콜 농도를 3%, 4%, 5%로 변화시키면서 실험을 수행하였다. Fig. 9의 에틸렌 글리콜 농도 변화에 대한 열교환량에 대한 그래프로 에틸렌 글리콜 농도가 4%에서 열교환량이 가장 높은 값을 나타내었으나, 에틸렌글리콜의 농도에 크게 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있었다.

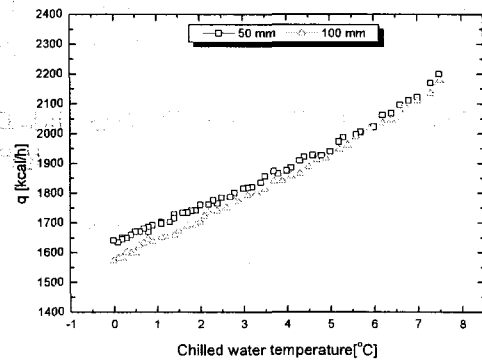


Fig. 8 Variation of heat transfer rate for scraper pitch

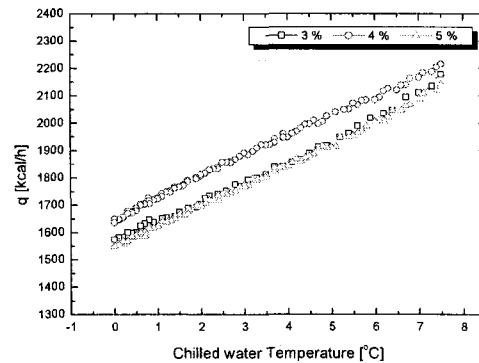


Fig. 9 Variation of heat transfer rate for aqueous solution concentration of ethylen glycol

4.5 슬러리아이스 생성량

Fig. 10은 슬러리아이스 생성량을 나타낸 그래프로 슬러리아이스 생성량은 슬러리아이스가 생성되기 전의 제빙기 열교환 특성과 유사하며, 각각의 조건에 대하여 최대 슬러리아이스 생성 조건은 냉수 유속은 1.31m/s로 유속이 빠를수록 슬러리아이스 생성량이 증대되며, frequency 1초에서 슬러리아이스가 최대 생성되며, 냉각수 온도는 -12°C에서 최대 슬러리아이스가 생성되었으며, 냉각수와 냉수 온도차가 증가할수록 열교환량 및 슬러리아이스 생성량이 증가하는 것을 알 수 있었다.

또한 스크레퍼 간격에 대한 영향은 슬러리아이스 생성량이나 열교환량의 결과로부터 영향이 없는 것으로 나타났으며, 첨가제인 에틸렌글리콜 농도 변화에 대한 영향은 상온에서 4%에서 열전달량이 최대값이 나타났으나 슬러리아이스가 생성되는 제빙 기간에는 에틸렌글리콜 농도가 낮은 3%에서 슬러리아이스 생성량이 최대로 증가하였다. 이는 제빙 기간에는 에틸렌글리콜 농도가 높아지면서 빙점이 강하하여 냉각수와 온도차가 줄어들기 때문으로 판단된다. 하지만 첨가제는 열전달량 뿐만 아니라, 얼음입자의 크기, 입자간의 결합 방식, 빙점강하 등의 복합적인 영향이 있으므로 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

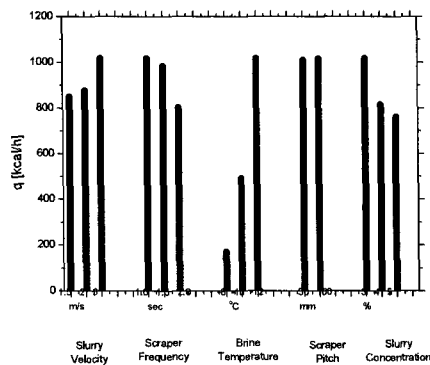


Fig. 10 Variation of amount of ice generation for the design parameter

5. 결론

본 연구의 Lab scale 공압구동형 제빙기의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 냉수측 유속이 빠를수록 열전달량 및 슬러리아이스 생성량이 증가하고, 스크레퍼 pitch에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.
2. 에틸렌글리콜 농도변화에 따른 열교환량은 슬러리아이스가 생성되기 전에는 에틸렌글리콜 4%에서 가장 큰 열교환량을 나타냈으나, 에틸렌글리콜 농도 3%에서 슬러리아이스가 가장 많이 생성되었다.
3. 스크레퍼 왕복시간 변화에 따른 열교환량의 변화는 스크레퍼 왕복시간이 1초에서 우수하였으며, 1.5초, 2초에서 동일한 열교환량을 나타내었다. 냉각수 온도 변화에 따른 열교환량은 냉각수 온도가 낮을수록 열전달량이 크게 증가하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부에서 지원하는 “신기술실용화기술개발산업”에 일환으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사사를 드립니다.

참고문헌

1. Yao Tzu Li, 1995, Heat transfer apparatus with positive drive orbital whip rod, U.S. Patent 5,385,645
2. Sam P. Gladis, Michael J Marciniak, Josep B, O'Hanlon, Brda Yundt, 1996, Crystal slurry TES system using the orbital evaporator, EPRI International conference on sustainable thermal energy storage, August 7-9, pp. 27-30
3. Oh, J. S. Park, S. S., Peck, J. H., Lee, K. H., 2000, A Study on the Characteristics of Scraped-film Heat Transfer, SAREK 2000 Summer Annual Conference, pp. 91-96.
4. Park, D. W., Moon, I. H., Cho, S. J., Min, M. K., 2000, Study on the Ice Making Characteristics of Ice Slurry Maker using scraper, SAREK 2000 Summer Annual Conference, pp. 1109-1114.
5. Yim, H. M. Pyo, S. H., 2004, Scraped-surface Ice Slurry Generator, SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 461-468.