

11-1543
000-001
737-01

발간등록번호

11-1543000-001737-01

직접가열을 통한 우유류의 고효율 살균장비개발 최종보고서

2016

농림축산식품부

고부가가치식품기술개발사업 R&D Report

직접가열을 통한 우유류의 고효율 살균장비개발 최종보고서

2017. 04. 10.

주관연구기관 / 한양대학교
협동연구기관 / 세원시스첸

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “직접가열을 통한 우유류의 고효율 살균장비 개발”(개발기간 : 2014. 12. 20
~ 2016. 12. 19)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2017. 04. 10.

주관연구기관명 : 한양대학교 산학협력단 (대표자) 성 태 현 (인)
협동연구기관명 : (대표자) (인)
참여기관명 : ㈜세원시스켄 (대표자) 김 원 규 (인)



주관연구책임자 : 한양대학교 임애선
협동연구책임자 :
참여기관책임자 : ㈜세원시스켄 김원규

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의
합니다.

보고서 요약서

과제고유번호	313045	해 당 단 계 연 구 기 간	최종3년	단 계 구 분	(최종)/ (3단계)
연구 사업 명	중 사 업 명	고부가가치식품기술개발사업			
	세부 사업명				
연구 과제 명	대 과 제 명	직접 가열을 통한 우유류의 고효율 살균장비 개발			
	세부 과제명				
연구 책임자	업 애 선	해당단계 참 여 연구원 수	총: 11 명 내부: 10 명 외부: 1 명	해당단계 연 구 개 발 비	정부:240,000천원 민간:80,000천원 계:320,000천원
		총 연구기간 참 여 연구원 수	총: 27 명 내부: 25 명 외부: 2 명	총 연구개발비	정부:720,000천원 민간:240,000천원 계:960,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한양대학교 산학협력단			참여기업명 (주)세원시스첸	
위탁 연구	-			-	
수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation, HC)을 이용한 액상식품의 살균 영향인자는 순간상승온도 및 퇴출온도, 각각 23℃, 75℃에서 살균력이 가장 높았음. <i>B. cereus</i> (3.25 log CFU/ml 감소)를 제외한 <i>E. coli</i> , <i>S. aureus</i> , <i>L. monocytogenes</i> , <i>S. typhimurium</i> 균은 사멸됨 (살균 처리 시간: <2초). HC처리 전 후 영양소 Ca, P, Mg, K, Zn, Na, vitamin C, B ₁ , B ₂ , B ₁₂ , D, A, 유지방과 유단백질 함량 차이가 거의 없었음. HC처리는 LTLT처리와 비슷한 수준의 살균력과 저장기간을 갖고 있어 HC 처리 기술이 우유의 새로운 살균 방법이 될 가능성 확인함				보고서 면수 155	

		코드번호	D-01		
연구의 목적 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ❖ 회전하는 와류 발생기의 공동현상(cavitation)을 응용하여 액상식품의 유해 세균을 순간적으로 가열하여 살균하는 장비 개발 ❖ 안전성 평가를 통한 액상식품을 고온단시간(72℃, 15초 이상)으로 가열·살균하는 장비 개발 ❖ 전동기 55 kW급 기준 열효율 90 %의 고효율 가열 살균 장비 개발 				
연구개발성과	<p>1. 15KW 고온단시간 살균장비의 성능실험 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> - 형상A, 형상B, 형상C의 3가지 형상의 작동압력(0.5bar - 1.5bar) 및 회전 속도(2,700rpm - 3,600rpm)의 제어를 통한 최적효율 도출 실험을 진행 - 열효율과 열 발생량이 매우 낮게 도출된 형상A를 제외한 형상B 및 형상C에서 모두 회전속도의 증가에 따라 열효율이 증가 하였으며, 압력이 증가함에 따라 열 발생량이 상승하지만 열효율은 오히려 낮아지는 경우를 간혹 보임. 따라서 형상C의 0.5bar, 3,600rpm에서 살균실험을 진행하는 것이 좋을 것으로 생각됨 <p>2. 55KW 고온단시간 살균장비의 성능실험 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> - 주요 변인인 회전속도(2,900rpm - 3,200rpm) 및 작동압력(1.0bar - 1.9bar)의 제어를 통한 최적효율 도출 실험을 진행하였음 - 입구압력의 상승이 부하로 작용하고 토크요구량이 상승하여 효율이 감소하는 경향을 보임. 현재 설계 및 제작된 살균장치는 압력이 낮을수록, 회전속도가 증가할수록 높은 열효율 및 처리량이 나타나는 경향이 있음. 처리량 및 열효율을 고려한 1.0bar, 3,200rpm 조건에서 열효율 90.88%로 나타남. <p>3. 액상식품의 살균효율성 및 이화학적 특성 분석</p> <p>① 살균 효율성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation, HC)을 이용한 액상식품의 살균 영향인자는 순간상승온도 및 퇴출온도, 각각 23℃, 75℃에서 살균력이 가장 높았음 - <i>B. cereus</i>(3.25 log CFU/ml 감소)를 제외한 <i>E. coli</i>, <i>S. aureus</i>, <i>L. monocytogenes</i>, <i>S. typhimurium</i> 균은 사멸됨 (살균 처리시간: <2초) <p>② 살균 전후 영양소 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> - HC처리 전 후 영양소 Ca, P, Mg, K, Zn, Na, vitamin C, B₁, B₂, B₁₂, D, A, 유지방과 유단백질 함량 차이가 거의 없었음 <p>③ 저장기간 중 품질변화: 일반세균, 대장균군, pH, 산도실험</p> <ul style="list-style-type: none"> - HC처리는 LTLT처리와 비슷한 수준의 살균력과 저장기간을 갖고 있어 HC 처리 기술이 우유의 새로운 살균 방법이 될 가능성 확인함 				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	<ul style="list-style-type: none"> ❖ 직접가열을 통한 고효율 살균장비' 을 보급함으로써 농가소득 증대와 목장형 유가공 활성화 정책에 기여 ❖ 개발 기술 이전을 통한 중소기업 일자리 창출 및 낙농농가의 수익 창출을 통해 지역경제 활성화에 도움 ❖ 수력학적 공동현상을 이용한 액상식품 살균 연구에 대해 선행연구 데이터 구축 및 활용 				
중심어 (5개 이내)	Cavitation	HTST(High Temperature Short Time) System	Milks	Pasteurizing process	Directly Heated

< SUMMARY >

		코드번호	D-02			
Purpose& Contents	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Development of sterilization device that spontaneously heats bacteria in liquid foods by applying cavitation of rotating vortex generator ❖ Development of device that heats liquid foods, which have been through safety evaluation at a high temperature short time ❖ Development of high efficiency heat and sterilization device that hold 90% thermal efficiency at 55kW level motor standard 					
Results	<ol style="list-style-type: none"> 1. 15kW high-temperature instantaneous type sterilization device performance test The optimum thermal efficiencies for various dimple shapes (A, B and C) were evaluated by means of appropriately adjusting pump setting pressures (0.5 bar-1.5 bar) and rotational speed (2700 rpm-3600 rpm) Except for shape A, which showed extremely low thermal efficiency and heat generation, both shape B and C displayed increase thermal efficiency with increased rotational speed, and heat generation increased with increased pump setting pressure but occasionally showed decrease in thermal efficiency. Therefore, shape C achieved the best sterilization effect under 0.5bar pump setting pressure and 3600rpm rotational speed 2. 55kW high-temperature instantaneous type sterilization device performance test The optimum thermal efficiency was evaluated by means of appropriately adjusting the major factors of pump setting pressures (1.0 bar-1.9 bar) and rotational speed (2900 rpm-3200 rpm) Thermal efficiency decreased with increased pump setting pressure as a result of increased required torque Present design and manufactured design show tendency to have high thermal efficiency and process capacity under lower pump setting pressure and higher rotational speed. Thermal efficiency of 90.88% was obtained under 1.0 bar pump setting pressure and 3200rpm rotation speed condition 3. Analysis of sterilization efficiency and physiochemical characteristics of liquid foods <ol style="list-style-type: none"> ① Sterilization efficiency <ul style="list-style-type: none"> - Sterilization influential factor in liquid foods using Hydrodynamic cavitation(HC) showed greatest sterilizing power at 23°C spontaneous temperature rise and 75°C exiting temperature - <i>E. coli</i>, <i>S. aureus</i>, <i>L. monocytogenes</i>, <i>S. typhimurium</i> were destructed with exception of <i>B. cereus</i>(3.25 log CFU/ml decrease) (sterilization process time: <2seconds) ② Nutrient analysis before and after sterilization There were no significant difference in Ca, P, Mg, K, Zn, Na, vitamin C, B1, B2, B12, D, A, milk fat and proteinoid before and after HC process ③ Quality variation during self life Possibility of HC process use as a new method of milk pasteurization was confirmed as it holds a similar level of pasteurization and shelf life to LTLT process 					
Expected Contribution	<ul style="list-style-type: none"> ❖ Supply high heat, high efficiency pasteurization device to increase rural income and contribute to revitalize stock farm type milk processing policy ❖ Job creation for small businesses through development technology transfer and aid in regional economy revitalization through creating profit of dairy farmhouses ❖ Build and utilize data from previous studies on liquid food sterilization research using HC 					
Keywords	Cavitation	HTST(High Temperature Short Time) System	Milks	Pasteurizing process	Directly Heated	

<CONTENTS>

Chapter 1. Summary of research	7
Chapter 2. Preliminary research for current research development	15
Chapter 3. Contents and results of research	17
Chapter 4. Objectives achievement and contribution of related fields ...	143
Chapter 5. Application of research outcome	145
Chapter 6. Collected international scientific & technical information in the research process	147
Chapter 7. Security level of research achievement	148
Chapter 8. Registered research facilities & equipment on the NTIS	149
Chapter 9. Performance result for laboratory safety	150
Chapter 10. Primary research achievement	151
Chapter 11. References	153

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의개요	7
2. 국내외 기술개발 현황	15
3. 연구수행 내용 및 결과	17
4. 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	143
5. 연구결과의 활용계획 등	145
6. 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	147
7. 연구개발성과의 보안등급	148
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비현황	149
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행실적	150
10. 연구개발과제의 대표적 연구실적	151
11. 참고문헌	153

제 1 장 연구개발과제의 개요

코드번호	D-03
------	------

제 1 절 연구개발 목적

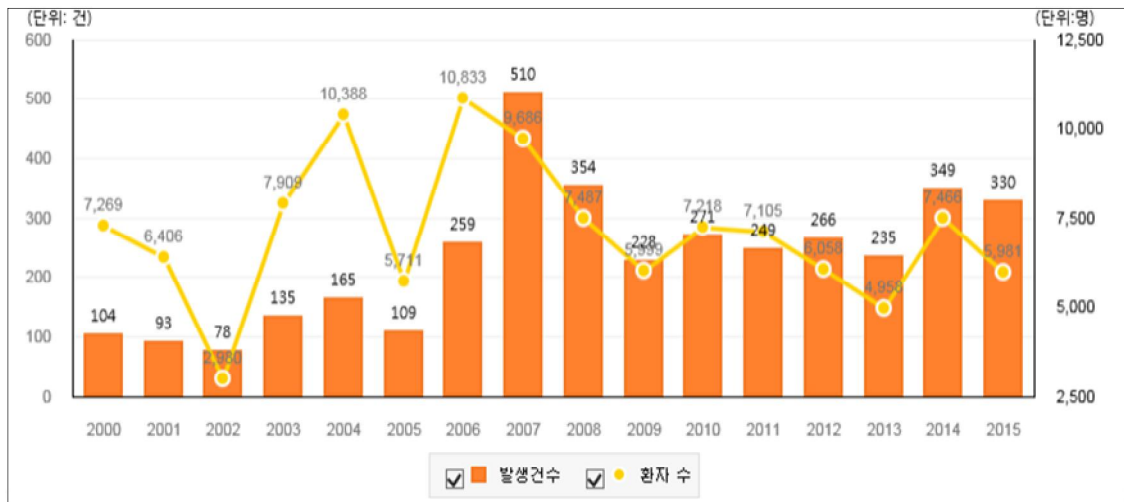
- ❖ 회전하는 와류 발생기의 공동현상(cavitation)을 응용하여 액상식품의 유해 세균을 순간적으로 가열하여 살균하는 장비 개발
- ❖ 안전성 평가를 통한 액상식품을 고온단시간(72℃, 15초 이상)으로 가열·살균하는 장비 개발
- ❖ 전동기 55 kW급 기준 열효율 90 %의 고효율 가열 살균 장비 개발

제 2 절 연구개발의 필요성

1. 국내·외 액상식품에서의 식중독 발생 증가

가. 국내 식중독 발생 현황

(1) 식품의약품안전처의 식중독 발생현황 자료에 의하면, 국내 식중독 발생건수는 2000년 104건에서 2015년 330건으로 3배 이상 증가하였으며, 매년 평균 5,000명 이상의 식중독 환자가 발생하고 있다[그림 1].



[그림 2] 연도별 식중독 발생건수 및 환자 수

(2) 소비자보호원의 우유 관련 식중독 접수현황에 따르면 기온이 높은 하절기인 6~7월에 집중적으로 식중독균이 검출되었다.

(3) 특히, 2012년에는 130℃이상의 온도에서 무균상태가 될 때까지 가열한 매일유업의 멸균우유에서 식중독균인 황색포도상구균이 검출되어 중국으로 수출되는 과정에서 전량 폐기된 사건이 있었다[그림 2].



[그림 3] 국내 유제품 식중독 발생 현황 1

(4) 또한 다양한 소비자의 입맛을 겨냥하기 위해 출시된 가공유 제품에서도 식중독 균이 검출되는 사례가 발생하고 있다[그림 3].

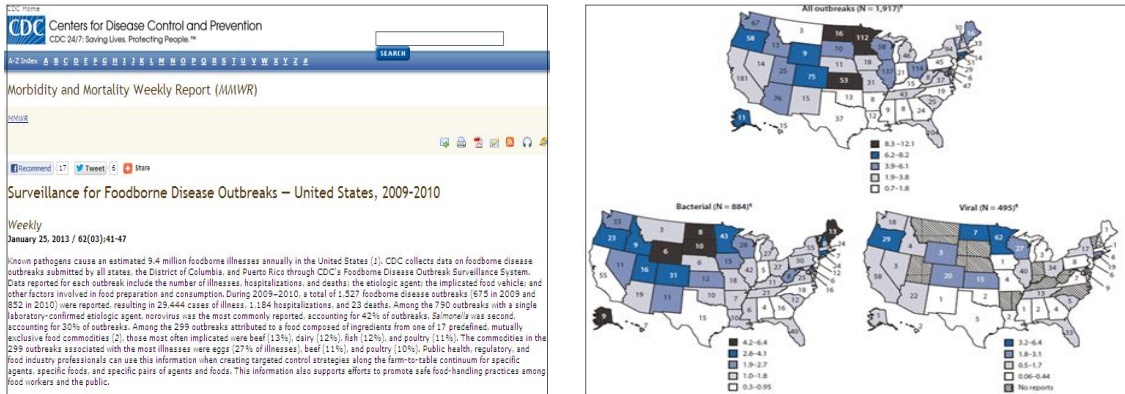


[그림 4] 국내 유제품 식중독 발생 현황 2

(5) 식중독 발생은 사회·경제적 피해는 물론 국민 전체의 건강을 위협하는 요소로 그 피해가 심각하며, 미국의 경우 식중독 질병에 따른 치료비용만 연간 1,520억 달러로 추정된다. 2009년 우리나라의 식중독 발생에 따른 사회·경제적 피해 규모는 연간 1조 3,000억 원 정도이다.

나. 국외 식중독 발생 현황

(1) 미국 질병통제예방센터(Centers for Disease Control and Prevention : CDC)에서 보고된 ‘유병율 및 사망률 주간보고서(MMWR)’에 의하면, 2009년부터 2010년까지 식중독 사고 발생건수는 1,500건 이상이였으며, 발병자는 약 29,500명이라고 보고하였다(2013). 살모넬라에 오염된 계란 이외에도 **저온 살균되지 않은 유제품의 캄필로박터(campylobacter) 오염** 등이 식중독의 주요 요인으로 포함된다[그림 4].



[그림 5] 국외 유제품 식중독 발생 현황 1

(2) 중국 매체에 따르면 2011년 간쑤성(甘肅省) 평량시(平涼市)에서 날개 포장 우유로 인해 37명이 잇달아 식중독 증세를 보였으며 이들 중 3명이 사망했다는 보도가 있으며, 2016년 광시좡족자치구(廣西壯族自治區) 류저우(柳州)시의 유치원 30여 곳에서 4~6세 원생들이 지난 1년 동안 불량 우유 등으로 인해 복통·설사 등의 증상을 보였다고 보도했다[그림 5].



[그림 6] 국외 유제품 식중독 발생 현황 2

2. 국내·외 액상식품 살균 현황 비교 및 필요 연구 분야

국내·외에서 액상식품에 대한 살균법은 지속적으로 연구되고 있으며, 현재까지 개발된 액상식품의 살균법은 크게 가열 살균법과 비가열 살균법으로 나눌 수 있다. 가열 살균법은 살균방법 중 가장 오래전부터 사용되어 왔으며, 신뢰성이 있고 제조회사 및 감독기관에 의해 관리하기 쉬운 장점이 있다. 액상식품에서 가장 많이 사용되고 있는 가열살균법으로는 저온장시간살균법(Low Temperature Long Time, LTLT), 고온단시간살균법(High Temperature Short Time, HTST), 초고온순간처리법(Ultra High Temperature, UHT)을 주로 이용하고 있다[표 1].

[표 2] 가열 살균법에 따른 살균온도 및 처리시간

살균법	살균온도(℃)	처리시간
저온장시간살균법(LTLT)	63~65	30분
고온단시간살균법(HTST)	72~75	15~20초
초고온순간처리법(UHT)	130~135	0.5~2초

액상식품 중 가열살균법을 가장 많이 사용하는 제품은 우유로 우리나라의 경우 과거 저온장시간살균법(LTLT)과 고온단시간살균법(HTST)을 주로 사용하였으며, 1980년대 이후부터는 거의 대부분이 유통과정상 보존성이 좋은 초고온순간처리법(UHT)을 이용하고 있다. 그러나 우유의 열처리 조건이 우유의 품질 즉, 성분 및 영양에 미치는 영향에 대해서는 의견이 분분하다.

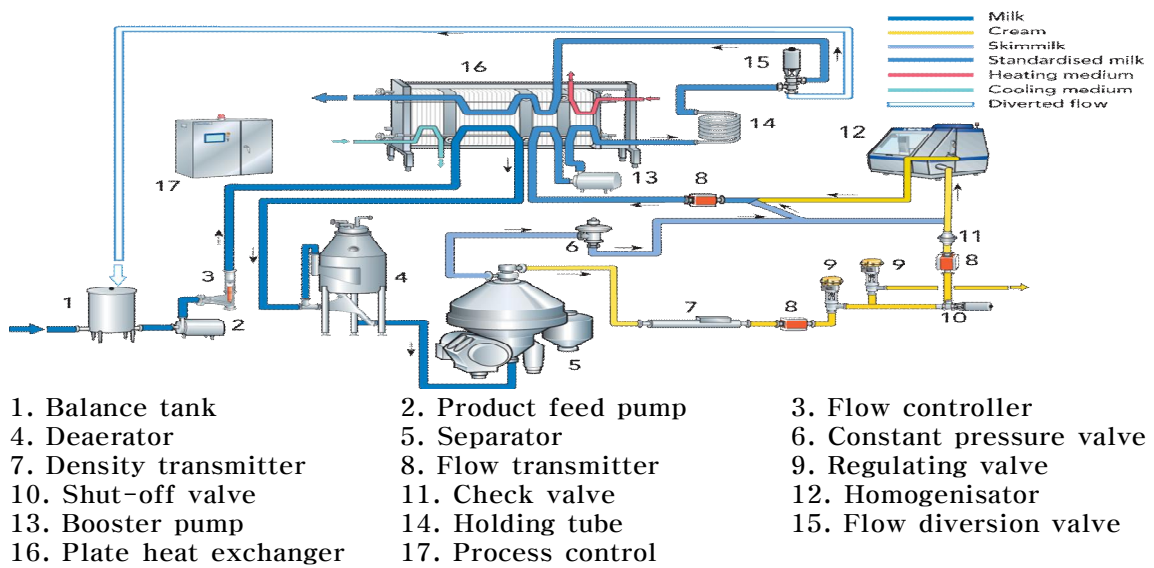
기존에 사용된 고온단시간살균법(HTST)은 저온장시간살균법(LTLT)에 비해 식중독을 포함한 미생물의 효과적인 살균을 주요 목적으로 개발된 방법이며, 초고온순간처리법(UHT)에 비해 영양소 파괴가 적어 현재까지 전 세계적으로 널리 활용되고 있다. 단, 저온장시간살균법(LTLT)에 비해 가열처리에 따른 영양소의 파괴 및 제품의 신선도 저하 등이 단점으로 제시되어 이를 보완하기 위한 여러 연구가 수행 중에 있다[표 2].

[표 3] 국내·외 살균방법의 특성 비교

	LTLT	HTST	UHT	Hydrodynamic cavitation	Ultrasonic	High pressure processing	Pulsed electric fields
포자 살균	×	×	○	×	×	×	×
영양세포 살균	○	○	○	○	○	○	○
저장수명 연장	×	○	○	- ¹⁾	×	×	×
효소 불활성화	○	○	○	-	○	○	○
단백질 변성	○	○	○	-	×	×	×

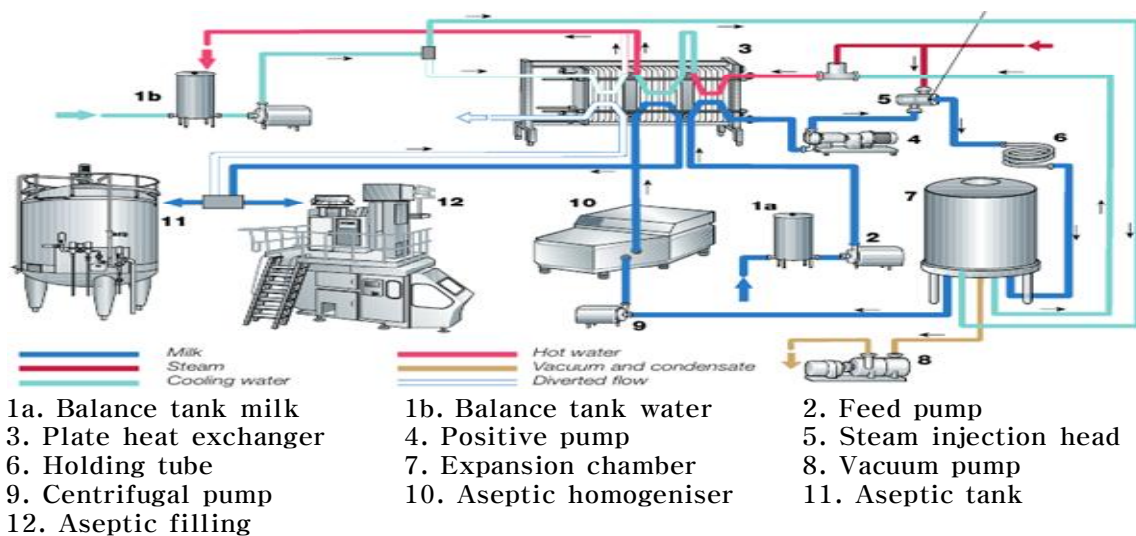
¹⁾ - : No studies.

기존 가열 살균법은 외부의 증기와 액상식품간의 판상식 열교환기(Plate Heat Exchanger)를 이용한 간접 가열방식을 이용하고 있다[그림 6, 7]. 그러나 판상식 열교환기를 이용한 경우, 열전달 촉진을 위해 판 내부에 주름(Corrugation)이 많은 구조를 갖고 있어 열교환기의 표면온도에 의해 판 표면에 부착물(Fouling)이 발생할 수 있다. 이 부착물에 의하여 열교환기 성능저하 및 판 내부의 과열로 인하여 비타민 등 열에 약한 성분을 손상시키며, 부착된 물질이 분해되면서 식중독균 번식은 물론 가열취가 발생하는 등 2차 오염을 유발할 수 있다. 특히 우유의 경우, 열에 민감하기 때문에 열교환기 표면에 부착물이 형성되기 쉬운 단점이 있다.



[그림 7] 저온살균장치 구조도

[자료 : Dairy Processing Handbook, Tetra Pak]



[그림 8] UHT 살균장치 구조도

[자료 : Dairy Processing Handbook, Tetra Pak]

최근 참살이(Well-being)와 같은 건강에 대한 관심이 증가하면서 고가이나 영양가와 맛이 풍부한 저온장시간살균법(LTLT)과 고온단시간살균법(HTST)이 다시 각광을 받고 있다. 그러나 저온장시간살균법(LTLT) 및 고온단시간살균법(HTST)은 초고온순간처리법(UHT)에 비해 저장기간 및 보관방법 등 상대적으로 품질관리가 어려운 단점이 있다.

기존의 국내외 연구현황을 비교한 결과 기존의 살균력을 보완하는 새로운 살균 기술은 살균처리의 효율성, 생산된 제품(식품)의 안전성 및 품질의 보존성 증진을 중점으로 연구되고 있다. 국내에서는 가열살균에 대한 추가 연구는 없는 실정이며, 비가열 살균에 집중되어 있다. 그러나 비가열 살균은 꾸준히 연구되고 있음에도 불구하고 단독적으로 액상식품의 살균에 적용하기에는 대량 생산 및 보건상 위생적 안전성이 100%보장 될 수 없는 등의 이유로 아직 상용화는 어려운 실정이다.

우유를 비롯한 액상식품은 균질화되어 있는 상태로 소비자에게 공급되는 영양식품으로써 이러한 액상식품은 미생물의 생육이 가능한 영양조건을 갖추고 있으며, 공장에서 단일 Pipeline에서 균질화된 후 가공 처리를 통하여 포장된다. 가공단계에서 소량의 식중독균에 오염될 경우에도 모든 제품으로 오염이 빠르게 진행될 수 있어 소비자에게 심각한 위해 물질로 공급될 수 있다. 따라서 우유와 같은 액상식품의 가공과정에서 유해균 살균은 식품의 안전성을 확보하기 위한 가장 중요한 가공 단계이다.

이에 본 연구팀은 최근 증가하고 있는 액상식품 식중독 증가와 관련하여 식중독 발생의 위험이 크며, 어린이와 같은 취약계층의 소비가 많아 안전성이 특히 중요시되고 있는 우유의 기존 살균법의 단점을 보완하고 살균 처리의 효율성을 극대화한 새로운 고온단시간살균장비를 개발하고자 한다. 본 연구 과제를 통하여 개발하고자 하는 기술은 유체(액상식품)를 가열기(generator)내에서 고속으로 회전시켜 유체의 압력이 증기압 이하일 때 유체의 상(phase, 相)변화에 의해 발생하는 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation)으로서, 이 때 발생하는 열에너지와 압력을 통해 액상식품을 고온단시간(HTST)으로 직접 살균하는 기술이다.

열 발생 원리는 전동기에 의하여 가열기를 고속으로 회전시켜 액상식품의 흐름이 소용돌이치는 와류가 발생하는데, 이 때 압력이 포화증기압 이하로 떨어져 공동현상(cavitation)이 발생하게 된다. 압력이 급격히 떨어져 국부적으로 수 μm 크기의 기포가 생성되고 수 μs 후 기포가 붕괴되면서, 인접한 영역의 온도는 순간적으로 약 4,000 K (Kelvin)에 달하게 된다. 이러한 기포의 생성과, 성장 그리고 소멸은 수 ns~ μs 동안 일어나는 현상이므로 유체가 가열기를 통과하는 동안 반복적으로 일어나는데, 이 때 순간적으로 발생하는 열을 이용하여 살균하는 원리이다.

즉 공동현상으로 발생하는 기포의 생성, 발달, 소멸 과정에서 발생하는 에너지를 이용하여 가열 살균하므로 기존의 전기 히터 및 보일러를 이용하는 증기의 간접 살균 방법에 비하여 열효율과 내구성이 우수한 제품을 구현할 수 있는 기술이다.

본 연구팀은 공동현상(Cavitation)을 이용한 ‘직접가열을 통한 고효율 살균장비’는 비가열 살균법의 장점인 영양소 파괴 최소화 및 신전도 유지, 가열 살균의 높은 살균력과 대량 생산의 장점을 모두 가질 수 있을 것으로 예상된다.

수력학적 공동현상(Hydrodynamic Cavitation)에 대한 국내 연구현황은 공동현상으로 인해 발생하는 열에너지를 단순 가열을 목적으로 보일러 및 온수가열장치 등에 대한 연구이며, 식품 살균에 도입한 연구사례는 없는 실정이다.

국외의 경우 수력학적 공동현상(Hydrodynamic Cavitation)의 이론 확립 및 가열기 형상에 따른 성능, 가열기의 조건에 따른 성능 등 다양한 방면으로 연구되어 지고 있다.

또한 탈지우유, 사과주스, 토마토 주스, 물 등 다양한 액상식품에 수력학적 공동현상을 이용한 살균실험을 통해 새로운 살균방법으로서의 기초데이터를 구축하고 있다.

하지만 액상식품에 대한 가열살균의 문제로 제시되고 있는 영양소 손실에 대한 데이터는 연구되고 있지 않다. 따라서 본 연구진은 수력학적 공동현상(Hydrodynamic Cavitation)에 대한 살균 성능 제시 및 이화학 분석을 통한 기초 연구 자료를 제시하고자 한다.

제 3 절 연구개발 범위

1. 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 기초기술 개발

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 공동현상의 메커니즘 연구 및 열 발생과의 관계 규명
- 다. 공동현상과 살균온도와의 상관관계 메커니즘 파악
- 라. 공동현상의 생성 및 발달에 적합한 가열기 형상 도출 및 설계
- 마. 고온단시간(HTST) 살균 장비의 설계
- 바. 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 시제품 제작

2. 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 핵심기술 개발

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작
- 다. 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행
- 라. 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행
- 마. 성능시험을 통한 공동현상과 살균온도와의 메커니즘 파악
- 바. 살균된 액상식품에서의 살균효율성 영향 및 물리적 특성 분석
- 사. 액상식품에 대한 공동현상 영향인자 분석
- 아. 고온살균시스템의 식품별 살균효율성 및 분석방법 파악
- 자. 고온단시간 살균 장비의 시제품 제작

3. 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 원천기술 개발

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 고온단시간 살균 장비의 성능평가 및 성능시험 수행
- 다. 살균 액상식품의 미생물학적 및 화학적 특성 분석
- 라. 살균 전후 식품의 영양소 비교/분석 및 영양소 손실 정도 파악
- 마. 살균 액상식품의 안전성 평가
- 바. 살균된 액상식품에서의 살균효율성 영향 및 물리적 특성 분석
- 사. 고온단시간 살균 장비의 시제품 제작
- 아. 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작
- 자. 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행
- 차. 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행
- 카. 고온단시간 살균 장비의 사업화 방안 마련

제 2 장 국내 · 외 기술개발 현황

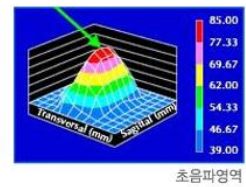
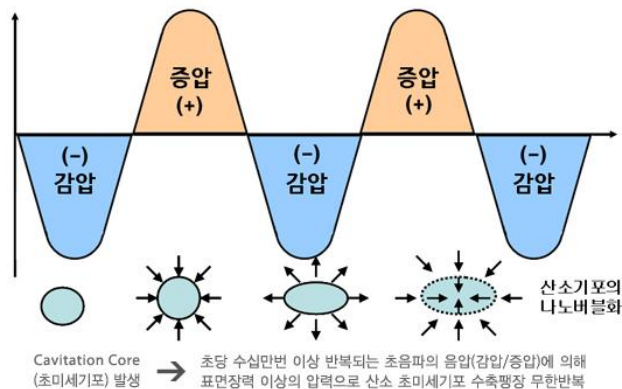
코드번호	D-04
------	------

제 1 절 국내 기술 개발 현황

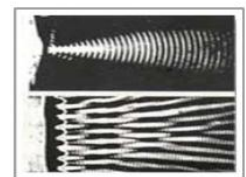
1. 생체 표피 주위에서 초음파에 의한 공동화(cavitation) 유발을 통한 캐비테이션 시드(cavitation seed) 기술 개발로 인해 체내 약물 전달 효과를 향상시킬 수 있는 결과가 보고된다.
2. 회전체에 의해서 발생하는 수리동력학적 캐비테이션 현상을 이용하여 하·폐수처리장에서 발생하는 슬러지를 가용화하여 수처리하는 장치의 개발을 통해 하수처리장 및 폐수처리장에서 발생하는 슬러지의 양 감소와 혐기성 소화조 전단에서 메탄가스 발생량을 극대화 할 수 있으며, 에너지 절감을 통해 환경 친화적 효과를 볼 수 있을 것으로 보고된다.
3. 알루미늄을 용해하여 용탕을 제조하는 단계, 상기 용탕이 보온로에 저장되도록 이송하는 단계, 상기 보온로에 저장된 용탕을 주조금형에 설치된 주입용기(basin)에 주입하는 단계 및, 상기 주입용기(basin)에 주입된 용탕에 캐비테이션 버블과 이질핵(Ti) 입자가 동시에 형성되도록 한 초음파를 이용한 알루미늄 용탕의 수소농도 저하 및 입자미세화 동시처리 기술과 장치개발 결과를 통해 고농도 산소 용해 장치를 제공할 수 있을 것으로 보고된다.
4. 제주산소수는 초음파를 이용한 고농도 산소 용해 기술은 특정 영역의 초음파를 먹는 물에 주사하여 물 분자의 고 진동을 가속시키고 초당 수십만 번 발생하는 초음파의 음압변화로 초미세 캐비테이션을 대량으로 생성하면서 산소의 유입을 유도하여 전 세계 그 어디에서도 흉내 내지 못하는 120ppm이상의 고농도 산소수를 제조 하였다.

120PPM 고농도의 제주산소수는 어떻게 만들어 지는가?

세계 최초로 제주산소수가 발명 개발한 '초음파를 이용한 고농도 산소 용해기술'은 특정 영역의 초음파를 먹는 물에 주사하여 물분자의 고진동을 가속시키고 초당 수십만 번 발생하는 초음파의 음압변화로 초미세 Cavitation을 대량으로 생성하면서 산소의 유입을 유도하여 전 세계 그 어디에서도 흉내내지 못하는 120ppm이상의 고농도 산소수 즉, 제주산소수를 만들 수 있게 되는 것입니다.



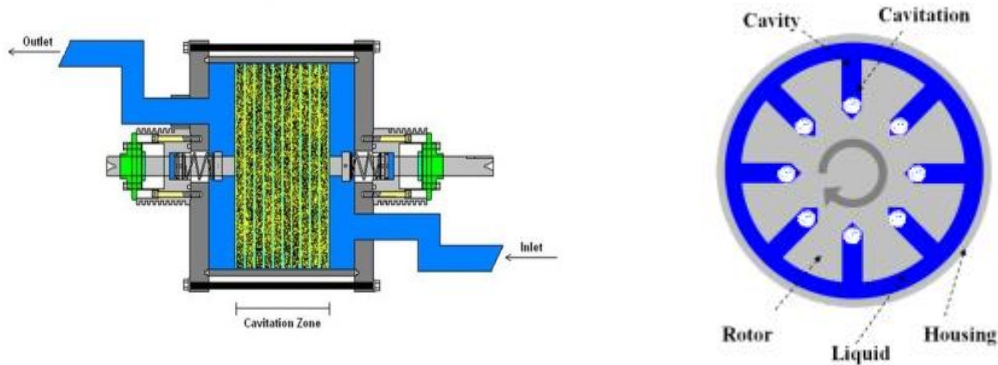
초음파영역



초음파 음장현상

제 2 절 국외 기술 개발 현황

1. Hydro Dynamics, Inc.은 특별히 설계된 로터 회전 작용의 캐비테이션(cavitation)기술개발을 통해 현재 다양한 분야에서 활용하고 있다.



- 대체연료

: 캐비테이션 기술을 이용하여 생산한 SPR(ShockWave Power)은 바이오가스, 해조류 추출 등의 분야에서 제품의 반응시간을 가속화하고, 품질을 크게 향상시키는 동시에 기존 기술에 비해 높은 수율과 높은 생산 속도를 제공함으로써 석유의 대체 에너지로 공급받고 있다.

- 화학

: 세계 산업기반으로 화학 분야에서 추출, 혼합 등 화학물질의 생산 증가와 비용절감 및 신제품 도입을 위한 신기술에 도입을 목표로 하고 있다,

- 식품

: 식품의 순도를 보장하는 규제가 강화됨에 따른 SPR기술을 통한 안전한 음식 처리 효과를 볼 수 있을 것으로 보고된다.

- 정유

: SPR은 우수한 질량전달, 자유로운 가열능력을 활용하는 석유 시추 및 정제 응용 분야에서 시추용 머드를 위한 유기염류 농도, 석유제품 저온가열, 불순한 물에서 증기생산, 석유제품의 동적 혼합 등의 효율성을 향상시키고 환경적 위험을 줄이는 새로운 기술을 개발하고 있다.

제 3 장 연구수행 내용 및 결과

제 1 절 연구개발의 추진전략 및 방법

[제1세부] 직접 가열을 통한 액상식품의 고효율 살균장비 개발



[그림 9] 제1세부 추진전략 및 방법

1. 고온단시간 살균 장비의 설계

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 공동현상의 생성, 성장, 소멸의 메커니즘 연구 및 열 발생과의 관계 규명
- 다. 공동현상과 살균온도와의 상관관계 메커니즘 파악
- 라. 공동현상의 생성 및 발달에 적합한 가열기 형상 도출 및 설계
- 마. 고온단시간(HST) 살균 장비의 설계

2. 개발된 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작
- 다. 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행
- 라. 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행
- 마. 성능시험을 통한 공동현상과 살균온도와의 상관관계 메커니즘 파악
- 바. 살균된 액상식품에서의 살균효율성 영향 및 물리적 특성 분석
- 사. 액상식품에 대한 공동현상 영향인자 분석
- 아. 고온살균시스템의 식품별 살균효율성 및 분석방법 파악

3. 고온단시간 살균장비의 안전성 평가 및 살균효율성 분석

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 고온단시간 살균 장비의 성능평가 및 성능시험 수행
- 다. 살균 액상식품의 미생물학적 및 화학적 특성 분석
- 라. 살균 전후 식품 시료의 영양소 비교/분석 및 영양소 손실 정도 파악
- 마. 살균 액상식품의 안전성 평가
- 바. 살균된 액상식품에서의 살균효율성 영향 및 물리적 특성 분석

[제1협동(참여기업)] 직접 가열을 통한 액상식품의 고효율 살균장치 개발



[그림 10] 제1협동 추진전략 및 방법

1. 고온단시간 살균 장비의 기본 설계 및 시작품 제작

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 공동현상의 생성 및 발달에 적합한 가열기 형상 도출 및 설계
- 다. 고온단시간(HTST) 살균 장비의 설계
- 라. 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 시작품 제작

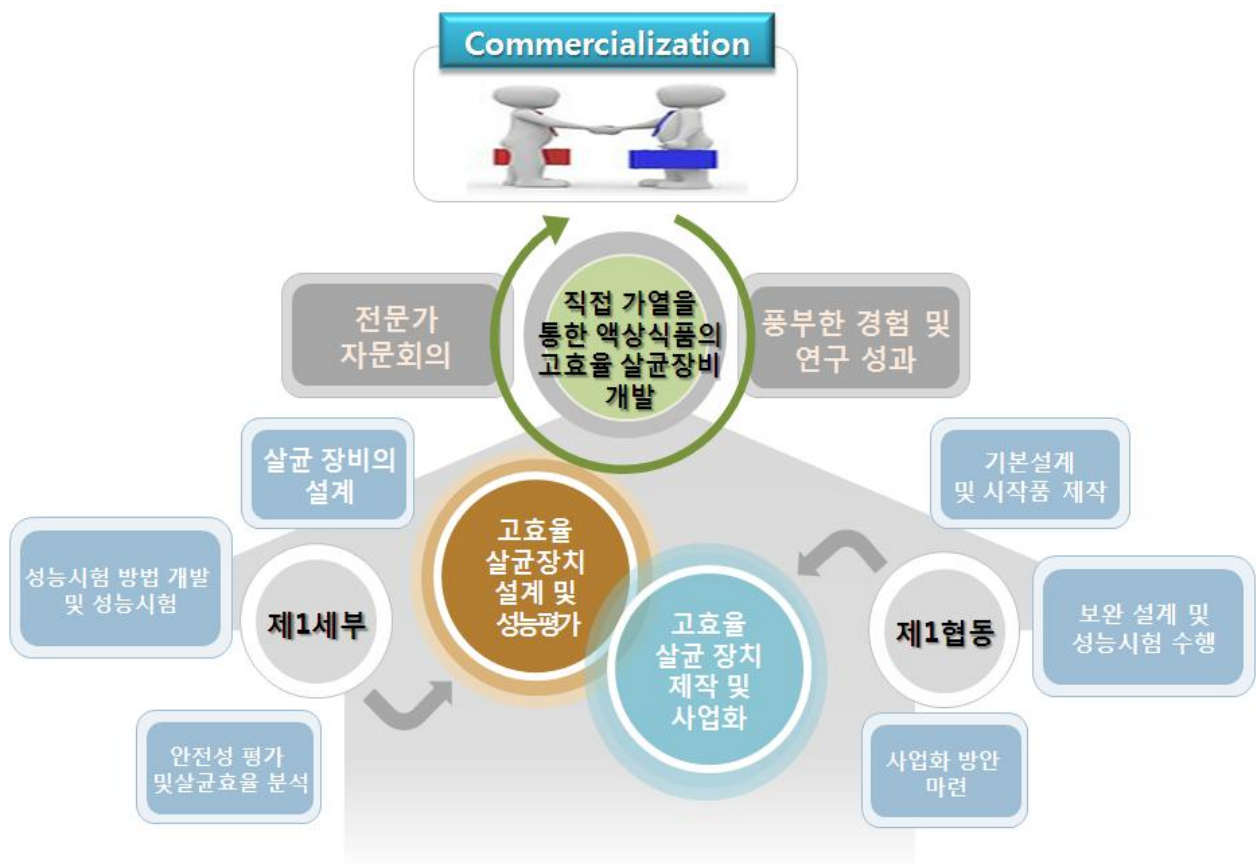
2. 개발된 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 고온단시간 살균 장비의 시작품 제작
- 다. 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작
- 라. 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행
- 마. 고온단시간 살균 장비의 보완

3. 개발된 고온단시간 살균 장비의 사업화 방안 마련

- 가. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- 나. 고온단시간 살균 장비의 시작품 제작
- 다. 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작
- 라. 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행
- 마. 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행
- 바. 고온단시간 살균 장비의 사업화 방안 마련

제 2 절 연구개발 추진체계



[그림 11] 연구개발 추진체계

제 3 절 연구개발 추진일정

단계	연구개발의 내용	추진일정(월)												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1차 년도 (14)	1세부	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 기초기술 개발												
	1협동	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 기본설계 및 시작품 제작												
2차 년도 (15)	1세부	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 핵심기술 개발												
	1협동	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 시작품 제작 및 성능평가												
3차 년도 (16)	1세부	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 원천기술 개발												
	1협동	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 시작품 제작 및 성능평가												

제 4 절 연구수행 내용

1. 연구개발의 최종목표 및 주요 내용

본 연구는 국내 최초 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation)을 이용한 액상식품 살균방법에 관한 개발이며, 직접 가열을 통한 우유류의 고효율 살균장비 개발을 최종 목표로 한다. 또한, 본 연구에서 개발되는 직접 가열을 통한 우유류의 고효율 살균장비를 소규모 낙농가에 보급함으로써 목장형 유가공 공장 운영과 농가소득 향상에 기여하고자 한다.

2. 연구개발의 목표 및 내용

- ❖ 회전하는 와류 발생기의 공동현상(cavitation)을 응용하여 액상식품의 유해 세균을 순간적으로 가열하여 살균하는 장비 개발
- ❖ 안전성 평가를 통한 액상식품을 고온단시간(72℃, 15초 이하)으로 가열·살균하는 장비 개발
- ❖ 전동기 55 kW급 기준, 열효율 90 %의 고효율 가열 살균 장비 개발

짧은 살균 시간을 통해 우유 가공기준·규격에 부합하면서 열효율 약 90%에 달하는 고효율 살균장비 개발을 위해 다음의 연차별 연구 내용을 개발한다.



[그림 12] 연구개발의 연차별 연구목표

3. 연차별 연구개발의 목표 및 내용

가. 연차별 연구개발의 목표

	연구목표	연구내용
1차 년도 (’14)	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 기초기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석 ○ 공동현상의 생성, 성장, 소멸의 메커니즘 연구 및 열 발생과의 관계 규명 ○ 공동현상과 살균온도와의 상관관계 메커니즘 파악 ○ 공동현상의 생성 및 발달에 적합한 가열기 형상 도출 및 설계 ○ 고온단시간(HTST) 살균 장비의 설계 ○ 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 시제품 제작
2차 년도 (’15)	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 핵심기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석 ○ 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작 ○ 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행 ○ 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행 ○ 성능시험을 통한 공동현상과 살균온도와의 상관관계 메커니즘 파악 ○ 살균된 액상식품에서의 살균효율성 영향 및 물리적 특성 분석 ○ 액상식품에 대한 공동현상 영향인자 분석 ○ 고온살균시스템의 식품별 살균효율성 및 분석방법 파악 ○ 고온단시간 살균 장비의 시제품 제작
3차 년도 (’16)	액상식품용 고온단시간 살균 장비의 원천기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석 ○ 고온단시간 살균 장비의 성능평가 및 성능시험 수행 ○ 살균 액상식품의 미생물학적 및 화학적 특성 분석 ○ 살균 전후 식품 시료의 영양소 비교/분석 및 영양소 손실 정도 파악 ○ 살균 액상식품의 안전성 평가 ○ 살균된 액상식품에서의 살균효율성 영향 및 물리적 특성 분석 ○ 고온단시간 살균 장비의 시제품 제작 ○ 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작 ○ 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행 ○ 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행 ○ 고온단시간 살균 장비의 사업화 방안 마련

나. 연차별 세부 연구 내용

(1) [1차년도] 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 기초기술 개발

(가) 제1세부

① 연구목표 : 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 기초기술 개발

② 연구내용

㉠ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석

㉡ 공동현상의 생성, 성장, 소멸의 메커니즘 연구 및 열 발생과의 관계 규명

㉢ 공동현상과 살균온도와의 상관관계 메커니즘 파악

㉣ 공동현상의 생성 및 발달에 적합한 가열기 형상 도출 및 설계

㉤ 고온단시간(HTST) 살균 장비의 설계

- 살균온도 및 시간(72℃, 15초)을 고려한 회전체의 공동현상 시스템 설계

- 공동현상 생성을 가속화 시킬 수 있는 가열기 내부 최적형상 설계

- 최적의 효율을 구현하기 위한 입·출구부 배관(inlet & outlet pipe) 설계

- 전산유체역학(CFD)을 이용한 살균시스템의 유동특성 분석

- 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 시제품 제작

- 살균된 액상식품의 안정성 평가 방법 도출

- 미생물학적 및 화학적 특성

- 살균효율성 영향 및 물리적 특성

(나) 제1협동

① 연구목표 : 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 기본설계 및 시제품 제작

② 연구내용

㉠ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석

㉡ 공동현상의 생성 및 발달에 적합한 가열기 형상 도출 및 설계

㉢ 고온단시간(HTST) 살균 장비의 설계

㉣ 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 시제품 제작

(2) [2차년도] 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 핵심기술 개발

(가) 제1세부

① 연구목표 : 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 핵심기술 개발

② 연구내용

- ㉠ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- ㉡ 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작
- ㉢ 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행
- ㉣ 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행
- ㉤ 성능시험을 통한 공동현상과 살균온도와의 상관관계 메커니즘 파악
- ㉥ 살균된 액상식품에서의 살균효율성 영향 및 물리적 특성 분석
- ㉦ 액상식품에 대한 공동현상 영향인자 분석(액체 수용액의 특성, 농도 등)
- ㉧ 고온살균시스템의 식품별 살균효율성 및 분석방법 파악 (살균시간, 온도 등)

(나) 제1협동

① 연구목표 : 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 시제품 제작 및 성능평가

② 연구내용

- ㉠ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석
- ㉡ 고온단시간 살균 장비의 시제품 제작
- ㉢ 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작
- ㉣ 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행
- ㉤ 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행

(3) [3차년도] 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 원천기술 개발

(가) 제1세부

① 연구목표 : 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 원천기술 개발

② 연구내용

㉠ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석

㉡ 고온단시간 살균 장비의 성능평가 및 성능시험 수행

㉢ 살균 액상식품의 미생물학적 및 화학적 특성 분석

㉣ 살균 전후 식품 시료의 영양소 비교/분석 및 영양소 손실 정도 파악

㉤ 살균 액상식품의 안전성 평가

- 이화학적(pH, 유지방, 산도 등) 및 미생물학적 특성(일반세균, 살모넬라 등) 분석 및 비교(모든 실험법은 축산물 가공기준 및 성분규격(2013) 및 식품공전(2013)준함)

- 소비자 관능검사를 통한 우유의 기호도 조사

- 살균 액상식품의 저장성 평가 및 비교 분석

㉥ 살균된 액상식품에서의 살균효율성 영향 및 물리적 특성 분석

- 액상식품에 대한 공동현상 영향인자 분석(액체 수용액의 특성, 농도 등)

- 고온살균시스템의 식품별 살균효율성 및 분석방법 파악 (살균시간, 온도 등)

(나) 제1협동

① 연구목표 : 액상식품용 고온단시간 살균 장비의 시제품 제작 및 성능평가

② 연구내용

㉠ 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석

㉡ 고온단시간 살균 장비의 시제품 제작

㉢ 살균 성능평가를 위한 pilot 설비의 설계 및 제작

㉣ 고온단시간 살균 장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행

㉤ 고온단시간 살균 장비의 보완 설계 및 성능시험 수행

㉥ 고온단시간 살균 장비의 사업화 방안 마련

제 5 절 연구수행 결과

1. 국내·외 선행 연구자료 비교 및 분석

가. 국내 선행연구 현황

(1) 전자파 처리(감마선, 마이크로파 이용)

(가) Kim(1999)은 연속식 마이크로파 HTST 살균시스템을 이용하여 72℃에서 15초를 기준으로 MP0, 1, 2 조건으로 우유의 이화학적 성분 변화 실험을 진행하였다. 적정 산도와 pH의 경우 살균 전·후 큰 차이가 관찰되지 않았으며 살균 조건별에서도 유의차가 관찰되지 않았다. 비타민 A의 경우 MP0의 경우 살균 전 기준 23%의 파괴율을 보였으나 살균 방법별 유의차는 나타나지 않았으며, 비타민 B₁의 경우 살균 방법에 따라 MP0(일반적인 열수를 사용한 HTST 살균법) 살균 전 기준 32%의 높은 파괴율을 보였으며 MP1(마이크로파로 72℃로 가열하고 수조에서 15초간 유지하는 HTST 병용 살균법)은 4%의 낮은 파괴율을 보였다. MP2(마이크로파만을 이용한 HTST살균법)의 경우는 28%의 파괴율을 보였다. ascorbic acid의 경우 살균방법에 따라 MP0는 ascorbid acid 파괴율 43%, MP2는 29%, MP1은 18%를 보여주었고, Lysine은 MP0의 경우 살균 전 기준 51%의 높은 파괴율을 보였으나 MP1은 16%, MP2는 10%의 낮은 파괴율을 보였다. 이로써 마이크로파로 승온시킨 후 holding하는 병용법(MP1) 또는 마이크로파 단독처리법(MP2)을 활용할 경우 통상적 HTST방법(MP0)보다 비타민이나 필수아미노산의 손실방지는 물론 Maillard 반응과 같은 바람직하지 않은 갈변 반응이나 가열취 방지에도 효과가 있다는 결론을 얻었다.

(나) Noh *et al.*(2005)은 열처리와 감마선 조사 처리 시 열처리 온도와 조사량이 높을수록 유리지방산 함량이 증가하는 경향을 나타내었으며 UHT 처리 시와 5kGy 조사 시 유리지방산 함량은 유사하였다. CFU/ml 수준의 원유를 저온, 고온, 초고온으로 열처리 시와 1~10kGy로 감마선 조사 처리 시 모두 일반세균과 대장균군이 검출되지 않았으나, 일주일 지난 후에도 UHT 처리유와 3kGy 이상 조사 처리유에서 일반세균과 대장균군이 검출되지 않았다. 원유를 열처리 시 arginine, aspartate, iso-leucine, leucine, lysine, methionine이 감소된 반면 조사 처리에 의해 aspartate, histidine, iso-leucine, leucine, lysine이 감소되어 열처리와 조사처리가 단백질의 일차구조에도 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 우유의 항원성은 감마선 조사처리 시 5kGy 이상에서 유의적으로 감소하였다.

(2) 수력학적 공동현상(Hydrodynamic Cavitation)

(가) Namkung(2007) 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation)은 오리피스(Orifice)의 모양이 구형이 아닌 타원형일 때 공동현상이 매우 뚜렷하고 효과적으로 일어난다고 보고하였다. 수력학적 공동현상에 영향을 주는 변수들로는 압력, 유속, 케비테이션 챔버(Cavitation chamber)설계 등과 함께 공동현상 발생의 시간적 요인이 있다고 보고하였다.

(나) Kwon and Yoon(2013) 회전체를 이용하여 수력학적 공동현상을 이용한 발열장치(Heat generator)에 대하여 연구한 결과, 공동현상에 의한 열 발생량(Heat generation rate)은 입구압력과 Rotor 회전속도에 의하여 영향을 받는 것으로 보고하였다. 회전속도 3,300 r/min, 입구 압력 2 bar일 때 90%의 최대 열효율을 보인다고 보고하였다.

(다) Kang and Song(2015) 보일러 응축수 가온을 목적으로 회전형 기포발생장치(용량 25L)를 개발하여 가온능력 및 열효율 실험을 한 결과, 시간별 온도상승 경향은 전동기 동력 수준 3, 5HP에 관계없이 거의 직선적으로 증가하며, 시간별 열효율은 3HP의 경우 약 107%가 나온다고 보고하였다.

(라) Park 등(2015) 수력학적 공동현상(Hydrodynamic Cavitation)에 대한 국내·외 연구현황에 대한 자료를 수집 및 정리하여 수력학적 공동현상의 원리 및 식품 살균의 도입과 결과에 대하여 정리하였다.

(3) 펄스 자기장 기술(PEF, Pulsed Electronic Field)

(가) Lee 등(2013) PEF(Pulsed electronic field) 처리에 의한 우유 단백질과 물리·화학적 특성의 변화를 확인하기 위하여 원유, 탈지유, HTST, LTLT, UHT 우유를 PEF 처리하였다. 시료 중의 단백질을 SDS-PAGE로 확인하였을 때, PEF 처리에 의한 우유 단백질의 변성은 관찰할 수 없었다. DSC(Differential Scanning Calorimetry)로 우유 단백질의 열변성 정점 온도(Td)를 분석한 결과, 탈지유를 65℃에서 PEF 처리하였을 때 Td가 87.66℃에서 97.18℃로 증가하여 PEF 처리가 우유 단백질의 변성에 영향을 미치는 것을 확인하였다. PEF 처리에 의한 alkaline phosphatase, protease, lactoperoxidase의 잔존 효소활성을 측정된 결과, 원유와 탈지유에서 alkaline phosphatase는 PEF 처리에 의해 효소활성이 감소하였으며, protease와 lactoperoxidase의 활성은 PEF 처리에 의해 영향을 받지 않았다. 65℃에서 PEF 처리한 원유는 처리하지 않은 원유보다 높은 갈색도를 나타내었으나, 기타 우유는 PEF에 의한 유의적인 차이가 없었다. 우유를 PEF 처리 하였을 경우 산도의 변화는 관찰되지 않았고 pH의 경우에도 PEF 처리 여부에 따라 유의적인 차이는 있었으나 크게 변화하지는 않았다.

(나) Kang and Shin(2014) 비열 살균의 일종인 펄스 전기장 기술은 살균 시 열을 이용하지 않고 펄스 전기장을 방출하여 미생물을 사멸하기 때문에 온도 상승을 최소화하여 단백질 및 열에 민감한 비타민 등의 변성 및 손실을 억제할 수 있을 것으로 기대된다고 보고하였다. 이러한 장점으로 인해 PEF 처리는 열처리에 의해 품질 특성이 열화 되기 쉬운 유제품, 과일·야채 음료에 적용 시 효과적인 신 살균법으로 적용 가능할 것으로 여겨진다고 결론 맺었다.

(다) 농림축산식품부(2015) PEF 비가열적 살균방법을 사용하여 고전압 처리할 경우 온도가 거의 상승하지 않으며, 처리시간이 짧고 대부분 연속처리가 가능하며, 처리 후에도 식품의 물리적, 화학적 및 영양학적 특성들이 거의 변화하지 않는 것을 확인하였다.

(4) 초고압처리(HPP, High Pressure Processing)

(가) Lee 등(2014) 우유를 15℃에서 600 MPa의 압력조건으로 3분간 처리했을 시 일반세균 및 유산균의 수는 2-3 Log CFU/ml 수준으로 감소하였으며, 대장균군은 HPP 처리 후 4℃에서 15일 저장 기간 중에 검출되지 않았다. HPP 처리에 따른 유단백의 변성을 알아보려고 유단백의 전기영동 패턴을 분석한 결과, HPP 처리 우유가 가열살균 우유에 비하여 단백질 변성도가 낮게 나타났다. 또한 HPP 처리 우유의 경우 비타민 및 무기질의 함량 변화는 상대적으로 낮았으나, protease, lipase 및 alkaline phosphatase와 같은 우유 효소는 불활성화 시키는 특징을 나타낸다.

(나) Lim 등(2015) 모든 HPP 처리구(HPP A-F) 및 LTLT 처리한 CM(Conventional feed-fed cow's milk)과 GM(Grass-fed cow's milk)의 저장기간 중 pH는 6.7-6.8, 산도는 0.14-0.16% 수준을 유지하였다. CM 및 GM의 LTLT 및 HPP A-F처리구는 저장 온도에 상관없이 저장기간 동안 대장균군이 검출되지 않았으며, 일반세균의 경우 LTLT 및 HPP A-F 처리구는 저장 온도에 상관없이 저장기간 동안 대장균군이 검출되지 않았으며, 일반세균의 경우 LTLT 및 HPP A-F처리구가 원유에 비해 4-7Log CFU/mL 낮은 수준을 유지하였다. 지방산 조성 분석 결과 원유, LTLT, 그리고 HPP A-F처리구의 지방산 조성에는 차이가 없어 초고압처리(HPP)가 지방산 조성의 변화에 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

(5) 자외선 살균(Ultraviolet ray sterilization)

(가) 최 등(2010) 해수에 상재하고 있는 대장균 살균에 중압(Medium pressure, MP) UV Lamp 처리시 99% 사멸율을 나타냈으며, 저압(Low pressure, LP) UV Lamp 처리시 81.9%의 사멸율을 보고함. 중압 UV Lamp 사용시 전력소비가 커서 에너지 소비량이 많아 발전기 용량의 증대 또는 추가 설치의 문제가 있다고 보고하였다.

(나) 장 등(2005) 자외선살균은 유기물 농도가 높은 곳에서는 부적합한 단점이 지적되었다.

나. 국외 선행연구 현황

(1) 수력학적 공동현상(Hydrodynamic Cavitation)

(가) Earnshaw RG(1998) *Bacillus* spp.의 포자는 영양세포에 비해 공동현상(Cavitation)을 이용한 살균에 높은 내성을 가지고 있다고 보고하였다.

(나) Kumar PS(1999) 임펠러(Impeller)의 회전체를 4,000 - 20,000 r/min의 회전속도로 구동하여 발생하는 공동현상을 이용한 고속 균질기(high-speed homogenizer)에 대해 연구한 결과, 회전체를 이용한 발생장치가 형상을 설계하기 매우 용이하여 대규모의 살균공정 구현 가능과 우수한 살균성을 주장하였다.

(다) Suslick KS 등(1999), Gong C 등(1998)과 Goncharuk VV(2008) 기존 연구는 공동현상(Cavitation)이론 중 산업적으로 가장 널리 활용되고 있으며, 그에 대한 연구도 활발히 되고 있는 분야는 초음파를 이용한 음파 공동현상(Acoustic cavitation)이다.

(라) Kumar PS 등(2000) 모양이 서로 다른 오리피스(Orifice) 장치를 이용하여 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation)을 발생시켜 화학반응기로 사용되는 장치에 대한 실험을 진행하였다. 오리피스 입구에서의 압력과 오리피스 토출부에서의 복원 압력, 그리고 공동현상 발생을 위한 최소 압력 등과 공동현상 수와의 관계를 규명하였다. 이에 따라 수력학적 공동현상은 음파 공동현상에 비교하여 상업적인 대규모 공정 구현 용이와 반응에 미치는 영향이 우수하다고 결론지었다.

(마) Jyoti KK(2001) 우물물의 총 균수를 살균하는 과정에서 공동현상(Cavitation) 발생장치의 펌프 배출 압력을 1.72 bar로 가동시 41%의 치사율을 나타내는데 2시간이 걸린 반면, 5.17 bar로 가동시 44%의 치사율을 나타내는데 1시간으로 처리시간이 감소되었다고 보고하였다.

(바) Gogate PR(2001) 공동현상(Cavitation) 발생장치의 펌프 배출 압력의 증가는 공동현상이 일어나는 동안 생성되는 압력 강도, 즉 공동현상의 강도를 증가시킨다고 보고하였다.

(사) Kumar 등 (2002) 임펠러(impeller)형태의 회전체를 4,000 ~ 20,000 r/min의 회전속도로 구동하여 발생하는 공동현상을 이용한 고속 균질기(high-speed homogenizer)에 대한 연구를 발표하였다. 회전체의 끝부분에서의 속도가 임계속도에 도달하였을 때 국부적인 압력이 포화증기압 이하로 떨어지게 되어 공동현상이 발생하는 원리이다. 이들은 오리피스 형태나 벤추리(venturi)의 수력학적 공동현상 발생장치보다 회전체를 이용한 발생장치가 에너지 효율이 상당히 좋으며, 형상을 설계하기 매우 용이하다고 주장하였다.

- (아) Gogate PR 등(2005)과 Lucia U 등(2009) 최근 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation)이 음파 공동현상(Acoustic cavitation) 장치보다 에너지 효율과 큰 스케일의 적용에서 보다 우수한 것으로 보고되고 있다.
- (자) Gregory 등 (2007) 수력학적 공동현상을 발생시키는 DYNAJET 장치를 이용하여 물을 살균하는 연구를 진행하였다. 이 장치는 특별히 설계된 노즐을 물속에 담근 후 고압 펌프를 이용하여 고속으로 물을 분사함으로써 공동현상을 발생시켰다. 대장균에 대한 살균 처리 효과를 확인하여 10⁵CFU/ml만큼 감소하는 효과를 얻었으며 초음파를 이용한 공정보다 빠르고 우수한 살균 처리 효과라고 주장하였다.
- (차) Kumar KS등(2007) 기존 오리피스 형태가 아닌 발산노즐(Divergent nozzle)을 이용하여 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation)을 발생시키는 연구를 진행하였다. 공동현상이 미생물 치사나 음식물 살균에 미치는 영향을 확인하였으며, 노즐을 통한 수력학적 공동현상의 효과가 초음파 공동현상에 의한 효과보다 좋다고 기술하였다.
- (카) Milly PJ등(2007) 회전체를 이용하여 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation)을 발생시키는 Shockwave Power Reactor (SPR) 장치를 이용하여 사과주스, 토마토 주스, 우유의 액상식품 살균에 적용하였다. 전동기의 회전속도와 유량조건을 변화시켜 각 변수에 의한 미생물의 치사율에 대한 실험결과, 치사율은 상업적으로 이용하기에는 충분한 살균 효과로는 부족하며, 차후 적절한 장치 개선을 통해 살균장치로써 적용될 수 있을 것이라고 주장하였다.
- (타) Milly PJ등(2007) 사과주스에 *Zygosaccharomyces bailii*을 접종시켜 65.6℃ ~ 76.7℃에서 시료를 채취할 때, 그리고 skim milk에 P. A. 3679 spores를 접종시켜 104℃ ~ 116℃에서 시료를 채취할 때, 두 그룹 모두 rotor 회전속도가 3,000RPM에서 3,600RPM으로 증가함에 따라 공동현상(Cavitation)에 의한 영양세포의 치사율이 증가했다고 보고하였다.
- (파) Milly PJ등(2008) 기존 장치를 이용하여 사과주스에서 *Saccharomyces cerevisiae*균의 살균 성능에 대해 연구하였다. 수력학적 공동현상(Hydrodynamic cavitation)을 이용한 살균 장치는 최소한의 살균 공정으로 기존의 살균 장치보다 높은 치사율을 보이며, 대용량 상업적인 목적으로 적용 가능하다고 주장하였다.
- (하) Ozonек J등(2011) 오리피스의 형상을 변경하여 모양과 크기가 공동현상 발생에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 공동현상은 오리피스 형상의 크기와 모양에 따라 공동현상 수와 형상계수로써 나타낼 수 있으며, 오리피스 모양은 구형보다는 타원형이 공동현상 발생에 적합하다고 보고하였다.

2. 공동현상의 생성 및 발달에 적합한 가열기 형상 도출 및 설계

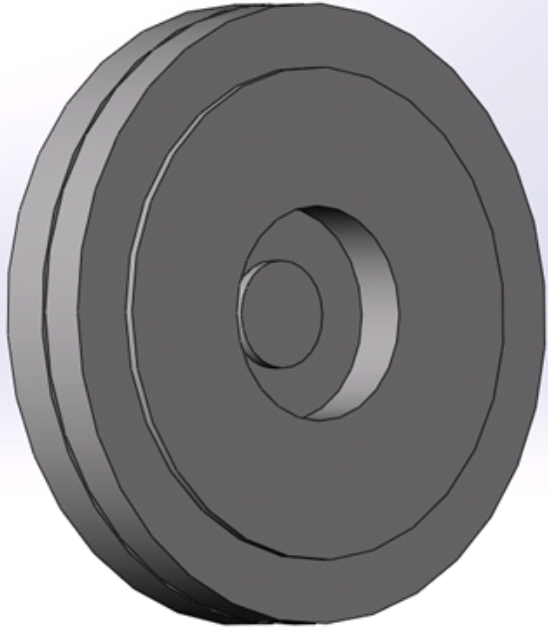
공동현상 생성을 가속화 시킬 수 있는 가열기 내부 최적 형상 설계를 진행하였다. 공동현상은 날카로운 모서리나 큰 모양의 딩플 등이 유동장에 존재할 때 포화증기압보다 높은 압력에서 공동현상의 시작이 가능한 것으로 알려져 있다. 또한 이러한 형상은 공동현상의 발달에도 도움을 준다. 이를 고려하여 가열기의 형상은 딩플이 없는 형상과 회전체에 딩플(Dimple)이 있는 형상을 제안하고 이에 대하여 유동장 해석을 수행하였다. 또한 형상의 형태 및 크기를 변경하여 수치해석을 수행하였으며, 공동현상 발생이 가장 용이한 형상을 제안하였다.

전산유체역학(CFD) 모형 구축에 수반되는 공통된 수치해석 절차에 의하여, 우선 각각의 해석대상에 대한 3D 모델링을 수행하였다. 일반적인 상용 모델링 프로그램 중 하나인 SolidWorks를 이용하여 2D 도면을 3D형상으로 변환하는 작업을 수행하였으며, 유동이 형성되는 해석 도메인(analysis domain)을 추출하는 과정에 있어 유동해석에 불필요한 부분 혹은 격자 건전성을 저하하는 형상에 대한 모델링(simplification) 작업 또한 병행하였다. 수치해석 프로그램은 ANSYS v14.0 내의 유동해석 모듈인 Fluent를 이용하였다. 수치해석의 전처리(pre-processing) 과정으로서 모델링된 해석 도메인에 격자(mesh)를 생성하였으며, 적절한 경계조건(boundary condition) 및 해석 방법을 부여하여 수치계산을 수행하였다.

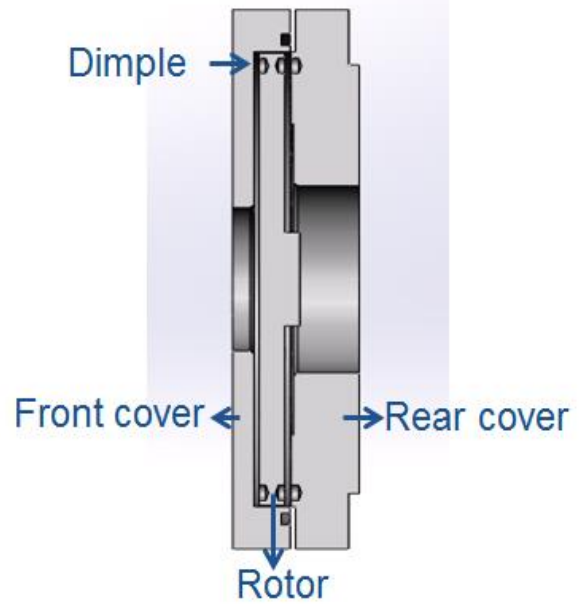
[그림 12]에서 보는 바와 같이 3차원 영역을 가열기의 해석 영역으로 설정하여 3D 형상 모델링을 수행하였고, 유동해석에 영향을 주지 않는 부분은 사전에 배제하거나 간략화하여 최종 solid part 모델을 도출하였다. 가열기를 구성하는 부품 중 유체가 흐르는 경로를 고려하여 내부 공동현상이 발생하는 유동장에 영향이 없는 부분은 배제하였다. 앞덮개(front cover), 회전체(rotor), 뒷덮개(rear cover)를 결합한 형상을 해석영역으로 설정하였고, 앞덮개와 회전체의 간극은 2.5 mm, 회전체와 뒷 덮개의 간극은 3.0 mm로 하였으며, 이 간극은 요구되는 입구와 출구의 물 온도의 차이와 열량 등에 따라 조정될 수 있다. 직관적으로 간극이 작아질수록 공동현상이 잘 발생할 것이라고 생각할 수 있으나 수치해석을 수행하는데 있어서 매우 작은 간극은 격자 건전성을 저하하기 때문에 위와 같이 설정하였다.

먼저, 가열기의 형상은 회전체에 딩플이 없는 형상과 딩플이 있는 형상을 제안하여 이에 대하여 유동장 해석을 수행하였으며, 수행결과 딩플이 있는 형상이 공동현상의 발생에 보다 유리한 형상임을 확인하였다. 수행된 결과를 토대로 딩플의 형상이 원통(cylinder)형과 원뿔(cone)형의 형상을 제안하여 공동현상의 생성 및 발달에 적합한 시작품의 가열기 형상 도출 및 설계에 적용하였다.

유동해석에 불필요한 부분을 제외하고 가열기를 결합하게 되면 [그림 12]의 (a)와 같게 되며, 이를 통해 내부의 유로를 결정하고 입구 및 출구를 고려하여 [그림 12]의 (c)와 같은 유로 형상을 도출하였다.



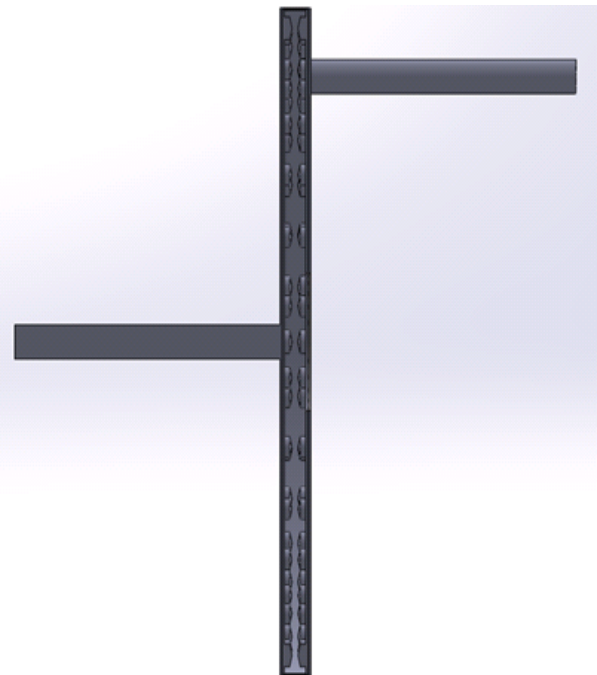
(a) 가열기 형상



(b) 단면도



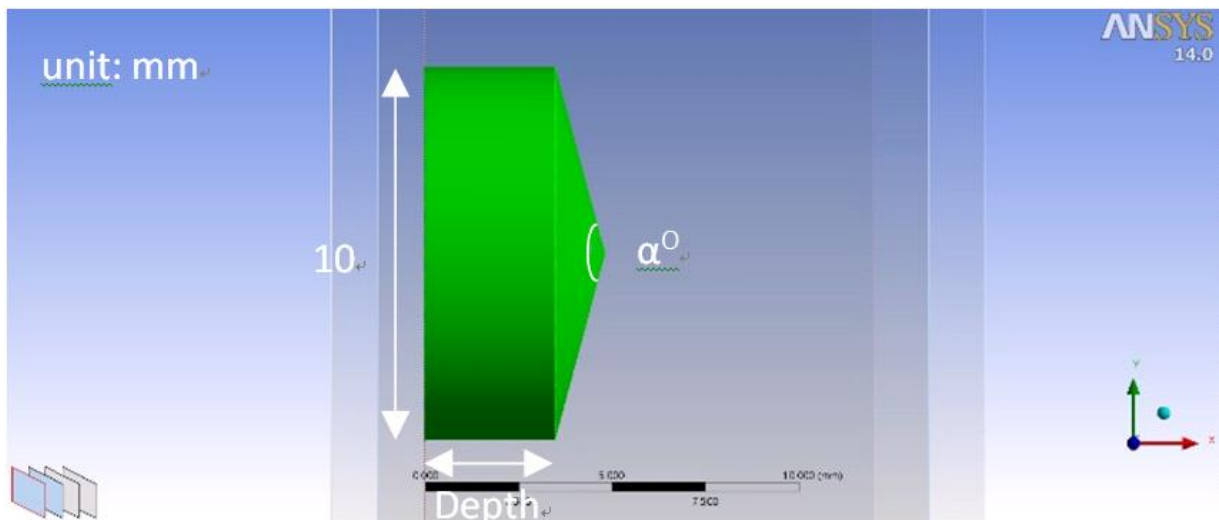
(c) 유로 형상



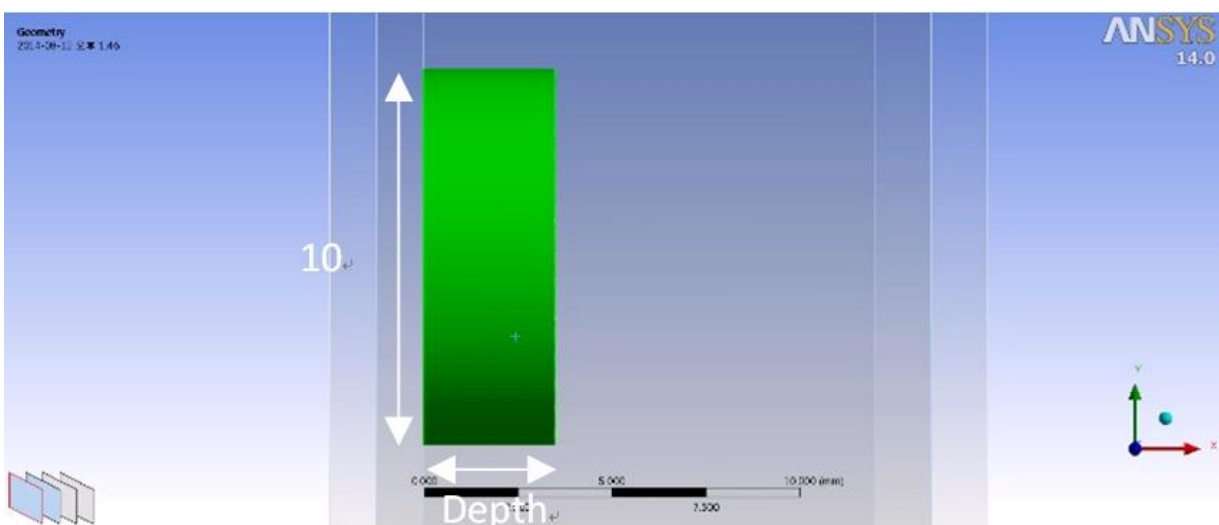
(d) 단면도

[그림 13] 가열기의 3D 형상 모델링

형상 조건으로는 딩플이 없는 형상과 디스크 면에 딩플이 있는 형상을 제안하여 이에 대하여 유동장 해석을 수행하였다. 또한 형상의 형태 및 크기를 변경하여 수치해석을 수행하였다. 딩플의 형상을 원통(cylinder)형과 원뿔(cone)형의 두 가지 형상으로 결정하였으며 각 형상의 깊이를 변경하여 깊이에 따른 영향을 확인하였다. 각 형상의 딩플 직경은 10 mm로 고정하였다. 원뿔형 딩플 형상은 [그림 13]의 (a)와 같으며 원뿔 각도(α)를 변경하여 각도의 변화에 따른 영향을 확인하고자 하였다. 원뿔형의 깊이가 4.0 mm, 원뿔 각도 140° 일 경우에는 양쪽 딩플의 길이는 회전체의 두께에 매우 가까워 지므로 안정성을 위해 수치해석 조건에서 제외하였다. 원뿔형의 딩플 깊이 4.5 mm, 150° 또한 회전체의 두께에 매우 가까워 안정성이 매우 떨어지나 딩플 깊이에 따른 영향을 확인하기 위해 실험적으로 해석 조건에 포함하여 진행하였다. 총 13개의 형상 조건을 설정하였으며 [표 3]에 정리하였다.



(a) Cone



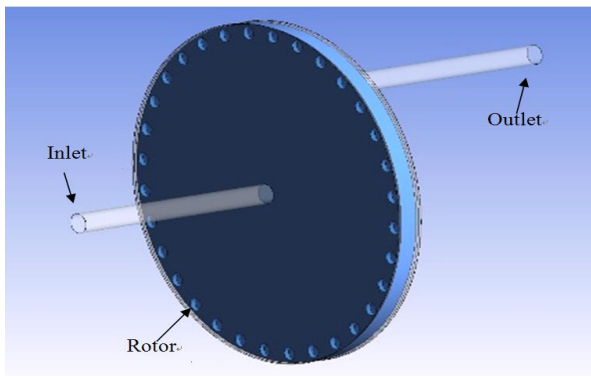
(b) Cylinder

[그림 14] 가열기 회전체의 딩플 형상

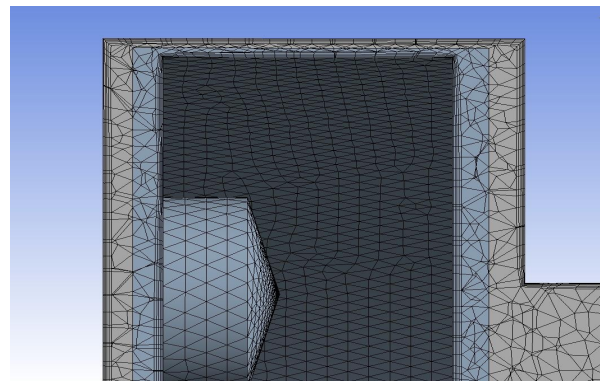
[표 4] 딴플 형상 조건

Shape type	Depth (mm)	Angle α (degree)
Cylinder	3.0	-
	3.5	
	4.0	
	4.5	
Cone	3.0	140
		150
		160
	3.5	140
		150
		160
	4.0	150
		160
		160
		150

해석 모델의 선택 및 경계 조건의 선정만큼이나 중요한 요소는 격자의 건전성이라 할 수 있는데, [그림 14]와 같이 해석 모델이 단순한 형태를 가지고 있으나 매우 좁은 영역을 포함하고 있어 해당 영역에 대한 격자 생성이 중요하다. 해석 방법 또한 격자를 생성하는데 있어서 고려하여야 하며, 수치해석에 적용된 난류(Turbulence) 모델은 일반적으로 공학용으로 가장 많이 사용되는 Standard k-epsilon 모델을 사용하였다. Standard k-epsilon 모델은 다상유동 및 cavitation 모델에 대하여 수렴성이 우수하며, 다른 모델보다 계산 시간이 적은 장점을 가지고 있어 선택하였다. Standard k-epsilon 모델을 사용하여 경계층(boundary layer)에서 벽함수(wall function)를 선택하여 Wall 근처에 Inflation layer를 5 layer 생성하였다. 다른 모델의 경우 Wall 근처에 Inflation layer를 10 layer 이상 생성하여야 하지만 Standard k-epsilon 모델은 보다 적게 생성할 수 있어 격자수 감소를 통한 CPU time을 감소할 수 있었다. [그림 15]는 유동장 해석 영역의 격자 생성 형태를 나타내고 있으며, 정렬격자(structured grid)와 비정렬격자(unstructured grid)를 혼합하여 해석영역에 격자를 생성하였다.



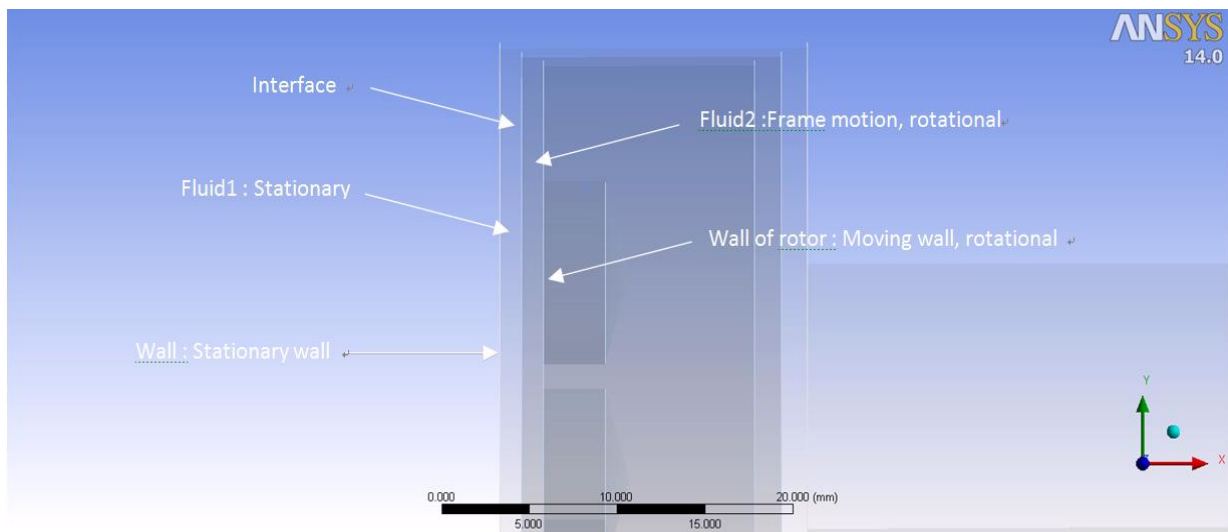
[그림 15] 유동장 해석 영역



[그림 16] 격자 생성 형태

실제 자연현상이나 공학적 적용에서 접하게 되는 대부분의 유동현상은 다상(multi-phase) 유동으로서 이를 수치해석적 방법을 이용하여 해석하는 것은 단일 상(single-phase)으로 구성된 유동장을 해석할 경우와는 달리, 서로 다른 상에 대한 유동방정식을 고려해야 하므로 더 많은 노력과 경험 그리고 해석 시간을 필요로 한다.

다상유동 모델은 단일 유체 접근 방식을 이용한 해석 기법이며, 국부적인 평형 상태를 가정하여 계면의 힘은 오직 점성항력(viscous drag force)에 의해서만 결정된다. Fluent에 적용된 cavitation 모델은 액상(liquid phase)에서 단일 증기 기포(vapor phase)의 성장에 대해 기술한 Rayleigh-Plesset 방정식을 기반으로 개발된 수치모델로 기포의 생성(evaporation)과 소멸(condensation)을 고려하여 수치해석을 진행하게 된다. Fluent에 적용된 3가지의 cavitation 모델 중 Schnerr and Sauer의 모델은 다른 모델들보다 빠른 수렴성을 가진 강건(robust)한 모델로 다상유동 및 Fluent의 모든 난류 모델과 함께 사용할 수 있어 Schnerr and Sauer 모델을 선택하여 본 연구에서의 가열기 내부의 유동장 해석에 적용하였다. Cavitation 모델은 조직적인 공동현상이 발생하기 이전에 실제적인 압력 영역을 해석하는데 유용하게 사용될 수 있다. 먼저 액체의 단상에 대한 유동해석을 수행하고, 수렴한 이후 cavitation 모델을 활성화하여 수치해석을 수행하였으며, Primary phase는 물(water), Secondary phase는 증기(Vapor)로 설정하였다. [그림 16]과 같이 입구부(inlet)와 출구부(outlet)의 경계조건으로서 일정한 유량이 유입되는 것을 토대로 속도 경계조건 및 압력 일정(대기압) 조건을 사용하였으며, 가열기의 벽면조건으로는 벽면점착(No slip) 조건으로 설정하였다. 회전체(rotor)의 회전조건을 설정하기 위해 해석 영역을 두 개의 영역으로 나누어 생성하였으며, [그림 16]과 같이 다중 참조 프레임(multi-reference frame)을 사용하였다. Fluid 1 부분과 Fluid 2 부분의 좌표를 각각 나누어 설정하여 Fluid 1은 정지 상태이며, 회전하는 Fluid 2는 기준 축을 중심으로 좌표계가 회전하게 된다. 전체적인 수치해석 조건은 [표 4]에 정리하여 나타내었다.



[그림 17] Multi-Reference Frame

[표 5] 수치해석 조건

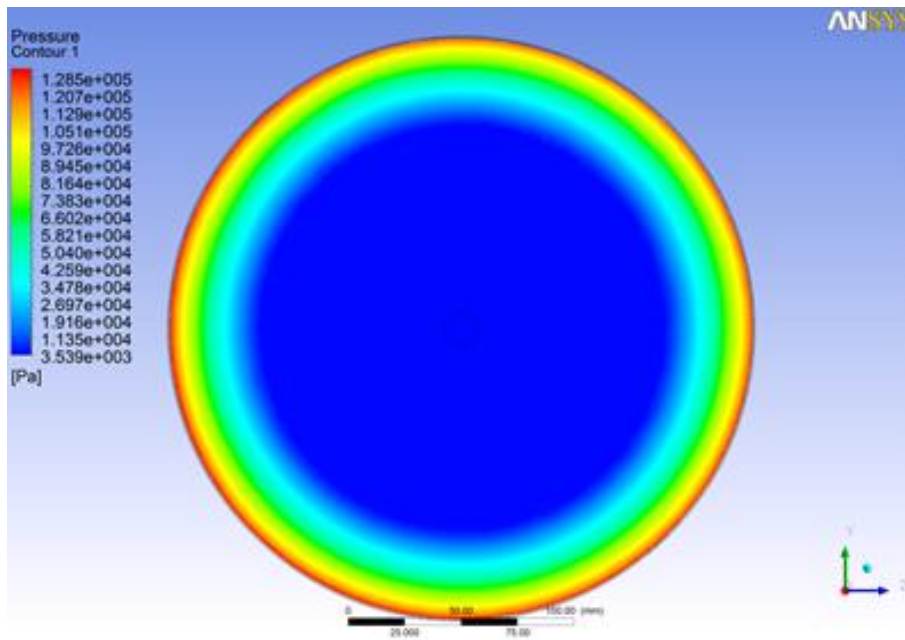
Classify	Condition
Primary phase	Water
Secondary phase	Vapor
Velocity inlet	0.8 m/s
Pressure outlet (P_{abs})	101,325 Pa
Wall	No-slip
Vaporization pressure (P_{gage})	3,540 Pa
Multi-Reference Frame	-
Rotation speed of disk	3,600 rpm
Rotation direction	clockwise

수치해석 결과는 먼저 덩플이 없는 형상과 덩플이 존재하는 형상을 비교하여 덩플의 유무가 공동현상 발생에 미치는 영향을 확인하였다.

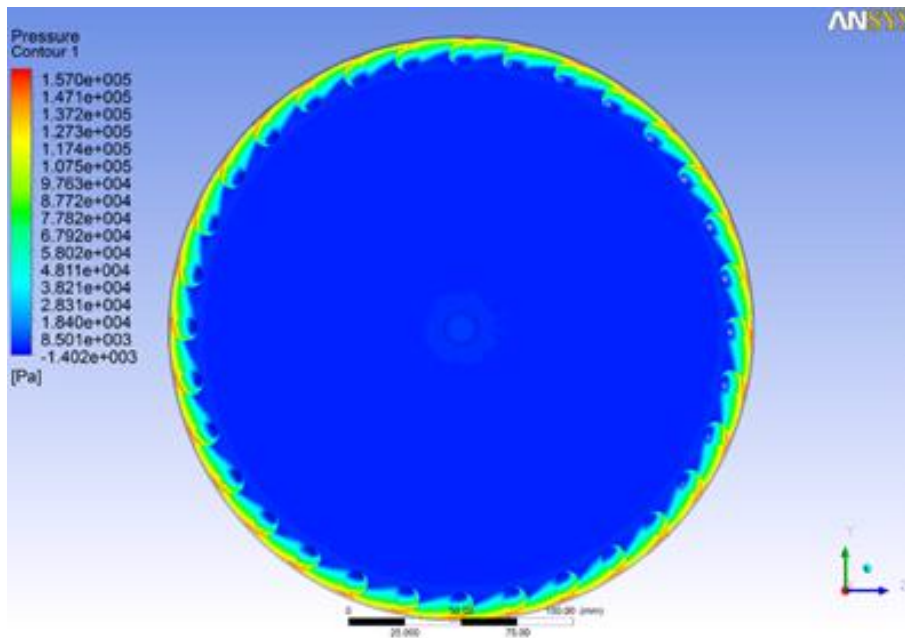
[그림 17]의 (a)는 덩플이 없는 형상, (b)는 덩플이 있는 형상의 표면에서 압력분포를 나타내며, [그림 18]의 (a)는 덩플이 없는 형상, (b)는 덩플이 있는 형상의 기포의 체적분율(volume fraction)을 나타낸다.

[그림 19]는 덩플이 없는 형상과 있는 형상의 체적분율 그래프를 나타낸다. 체적분율 측정 위치는 중심을 기준으로 Y축을 따라 측정하였고, 덩플의 영향을 중점적으로 확인하기 위해 중심기준으로 Y축을 따라 -70 mm인 지점부터 측정하였다. 중심을 기준으로 좌측, 우측 및 상단에 대한 체적분율 그래프는 차이가 미미하여 생략하였다. 아래쪽으로 측정 한 이유는 뒷면 상단에 출구가 있기 때문에 덩플의 영향을 확인하는데 있어서 출구의 영향이 없는 결과를 뽑기 위해서이다. 덩플이 있는 형상이 없는 형상보다 더 많이, 즉 중심으로 부터 덩플이 존재하는 위치까지 기포가 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이는 곳 덩플의 존재가 공동형상을 더 잘 일어나게 한다고 생각할 수 있다.

이 결과를 바탕으로 덩플의 형상을 변경하여 각각의 해석 결과를 비교하였다. 덩플의 형상 변화에 따른 영향, 각 형상의 깊이 변화에 따른 영향, 원뿔형의 각도 변화에 따른 영향 등 각각의 유리한 형상들을 비교하여 가장 유리한 형상을 도출하는 순서로 기술하였다.

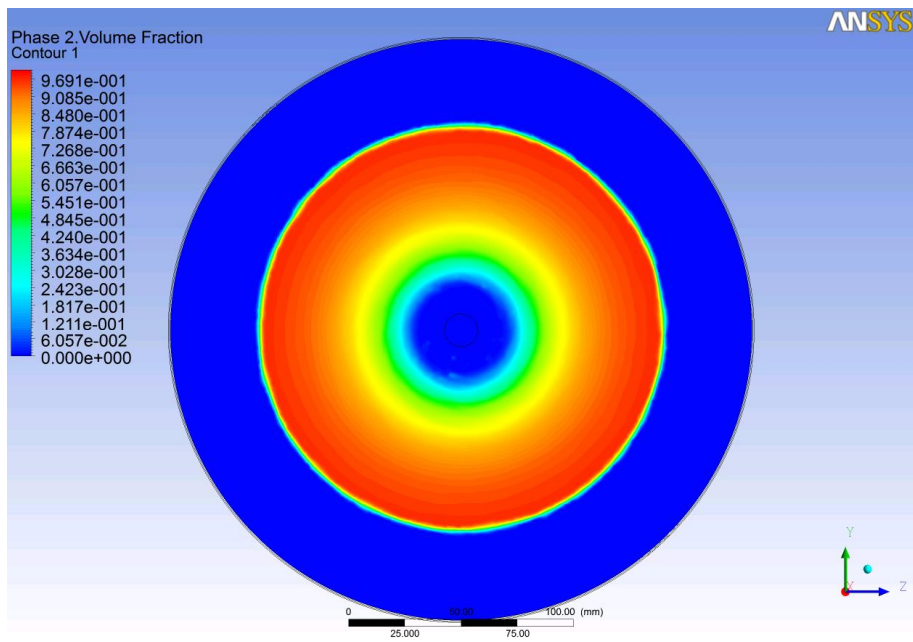


(a) No dimple

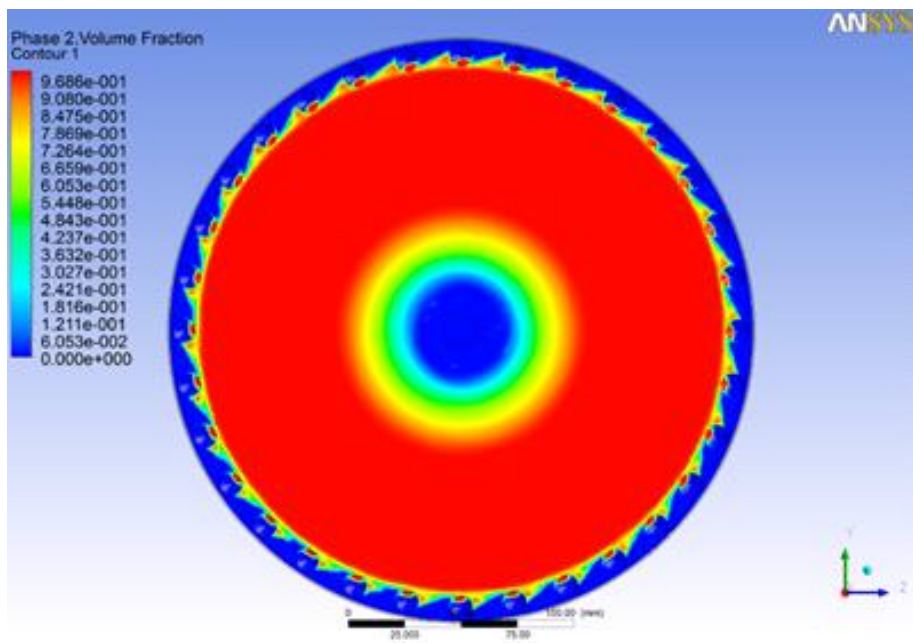


(b) Dimple

[그림 18] Pressure distribution

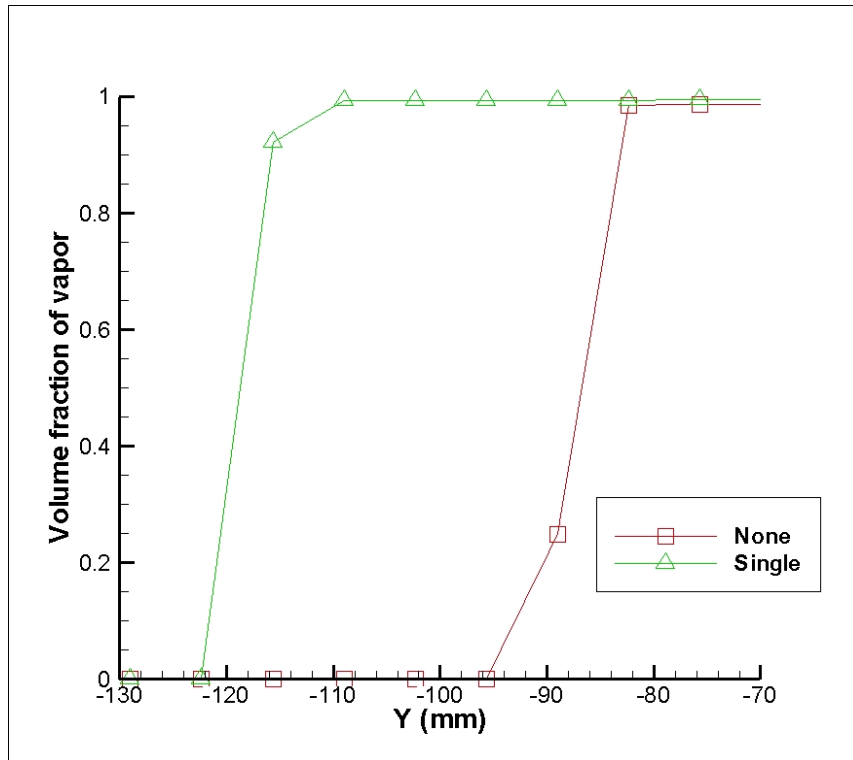


(a) No dimple



(b) Dimple

[그림 19] Volume fraction of vapor



[그림 20] Comparison of volume fraction

[그림 20]은 깊이가 3.0 mm일 때 원뿔형 덩플의 압력분포 및 각도에 따른 기포의 체적분율 (volume fraction) 결과이며, (a)는 140° , (b)는 150° , (c)는 160° 를 나타낸다.

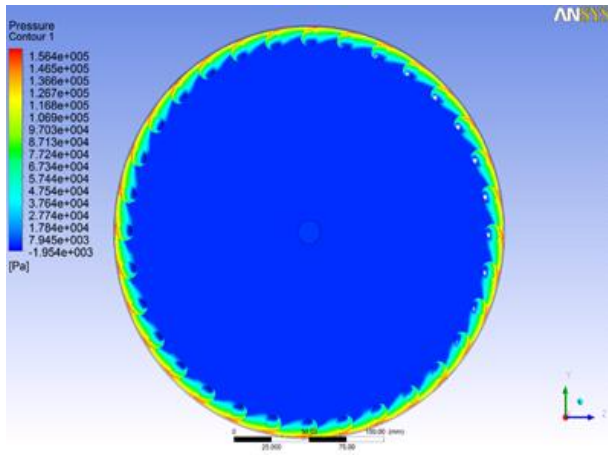
[그림 23]은 깊이가 3.0 mm일 때 원뿔형 덩플 형상의 체적분율 그래프를 나타낸 것이며 원뿔형의 각도가 150° 일 때 140° , 160° 보다 기포의 체적분율이 높게 나타났다.

[그림 21]은 깊이가 3.5 mm일 때 원뿔형 덩플의 압력분포 및 각도에 따른 기포의 체적분율 (volume fraction) 결과이며, (a)는 140° , (b)는 150° , (c)는 160° 를 나타낸다.

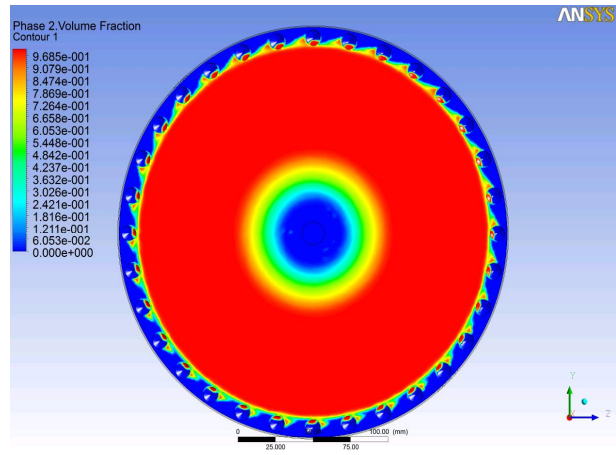
[그림 24]는 깊이가 3.5 mm일 때 원뿔형 덩플 형상의 체적분율 그래프를 나타낸 것이며 원뿔형의 각도가 150° 일 때 140° , 160° 보다 기포의 체적분율이 높게 나타났다.

[그림 22]는 깊이가 4.0 mm일 때 원뿔형 덩플의 압력분포 및 각도에 따른 기포의 체적분율 (volume fraction) 결과이며, (a)는 150° , (b)는 160° 를 나타낸다.

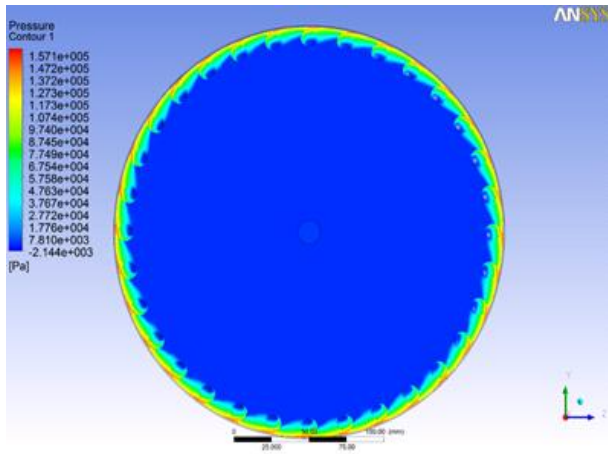
[그림 25]는 깊이가 4.0 mm일 때 원뿔형 덩플 형상의 체적분율 그래프를 나타낸 것이며 원뿔형의 각도가 160° 일 때 150° 보다 기포의 체적분율이 높게 나타났다.



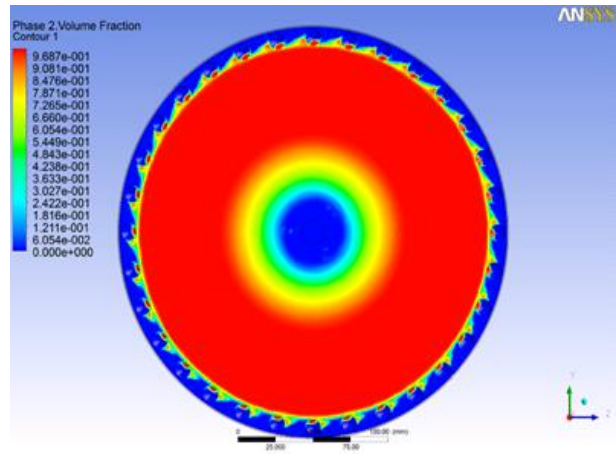
(a) 140°



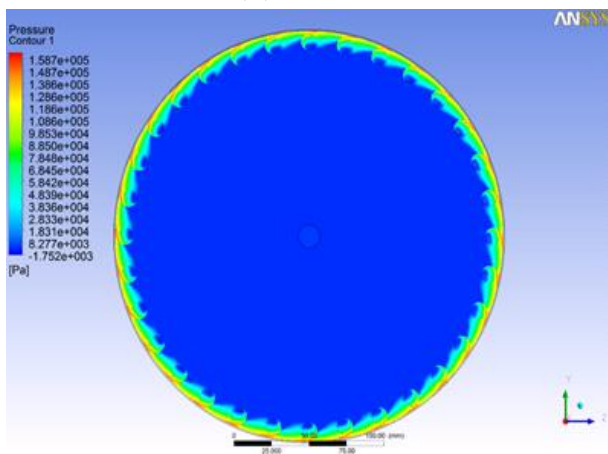
(a') 140°



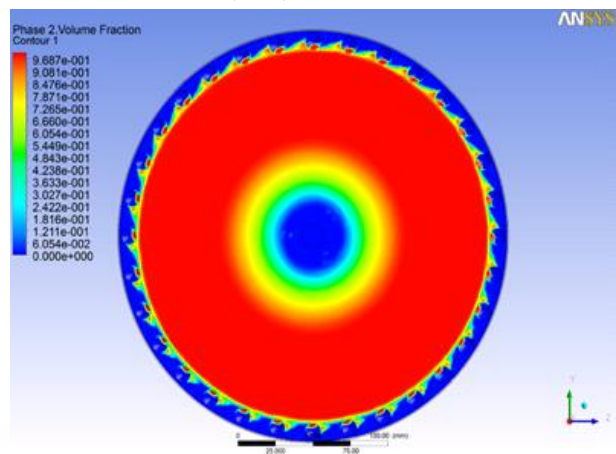
(b) 150°



(b') 150°

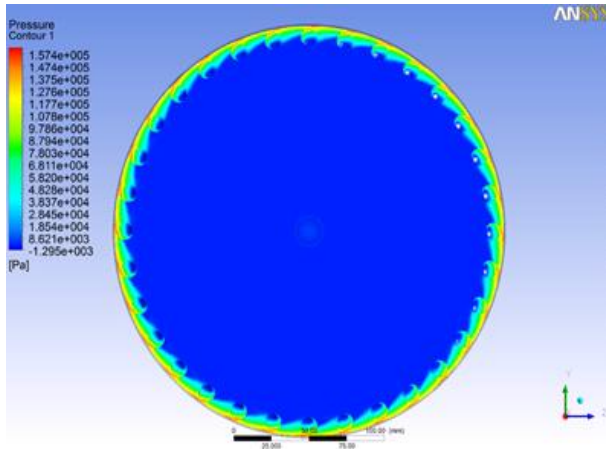


(c) 160°

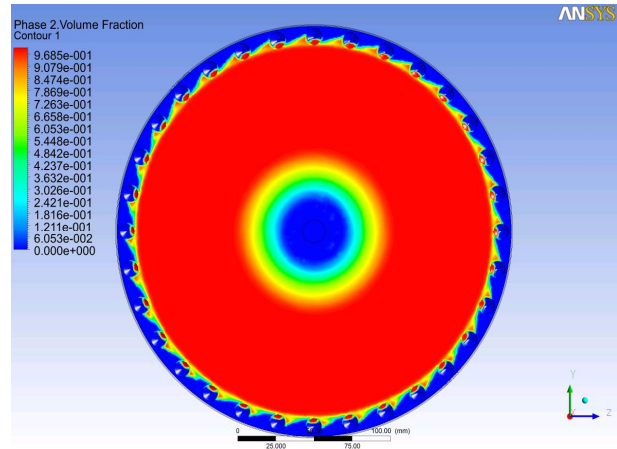


(c') 160°

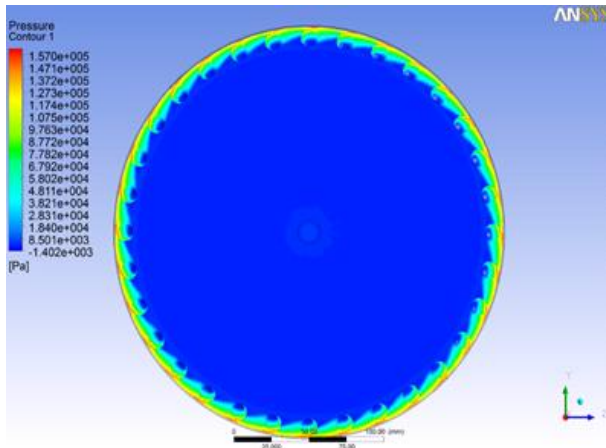
[그림 21] Pressure distribution ($De = 3.0$ mm) (Left), Volume fraction of vapor ($De = 3.0$ mm) (Right)



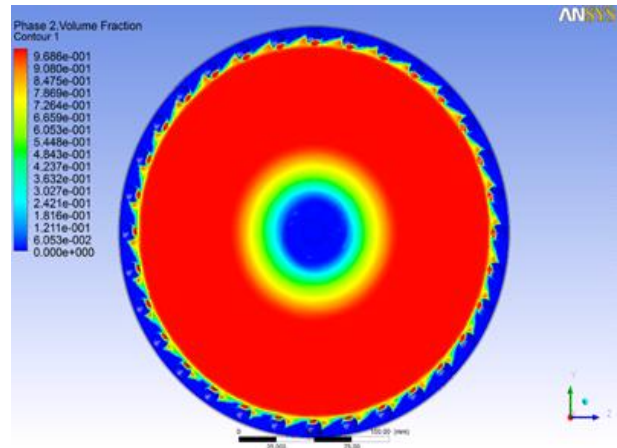
(a) 140°



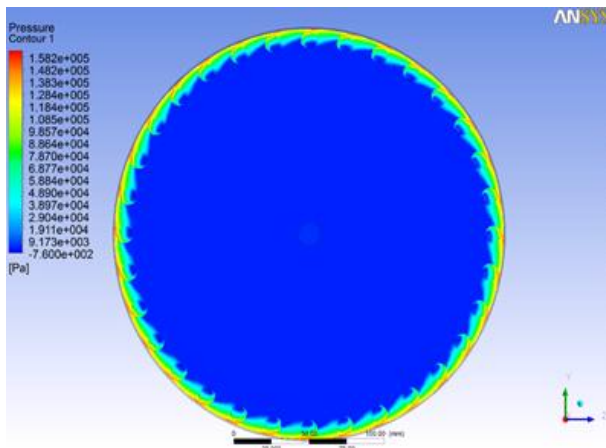
(a') 140°



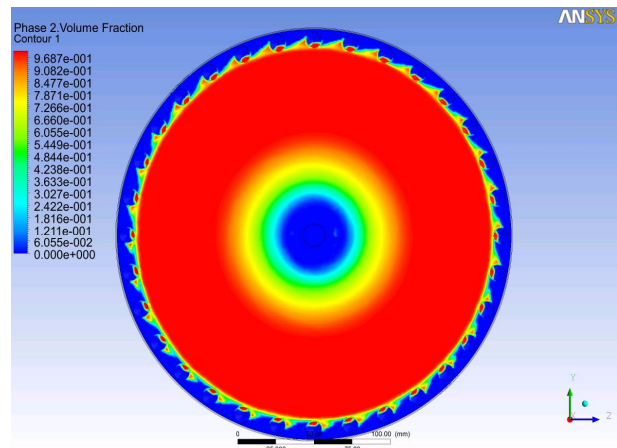
(b) 150°



(b') 150°

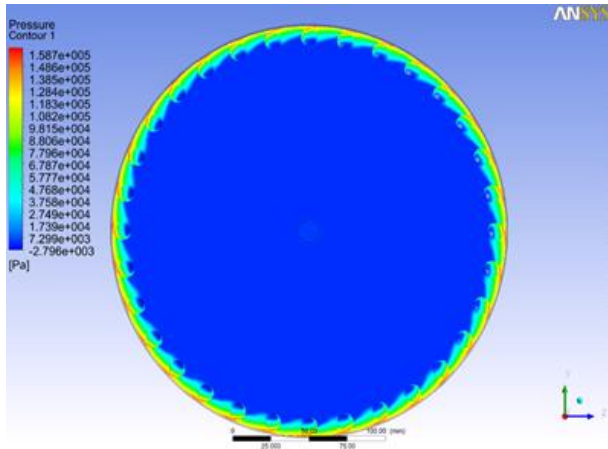


(c) 160°

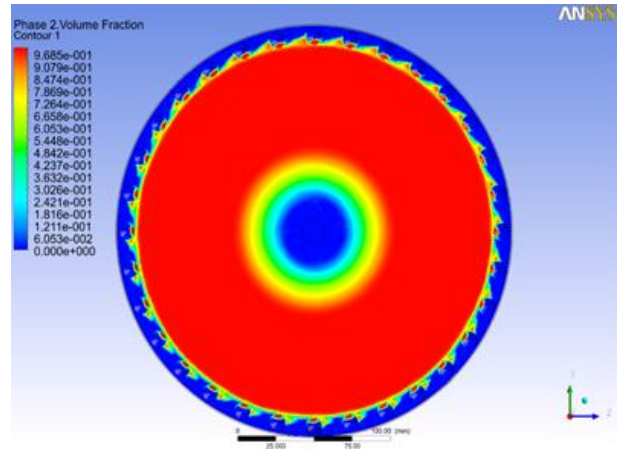


(c') 160°

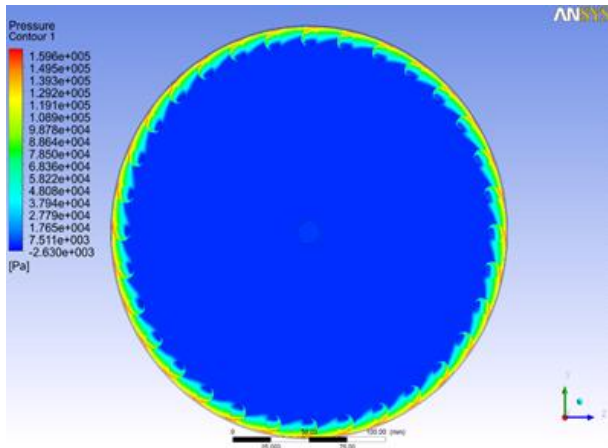
[그림 22] Pressure distribution ($De = 3.5$ mm) (Left), Volume fraction of vapor ($De = 3.5$ mm) (Right)



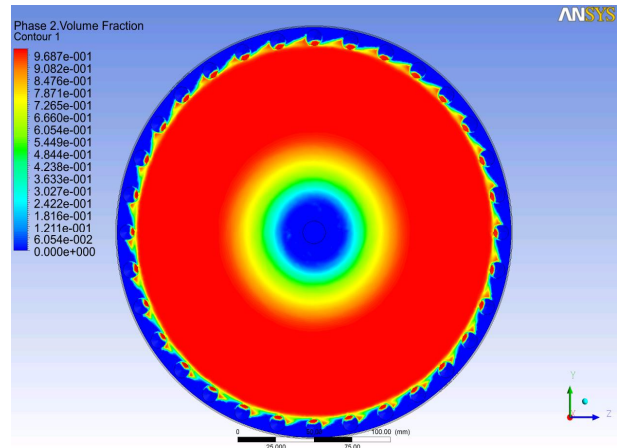
(a) 150°



(a') 150°

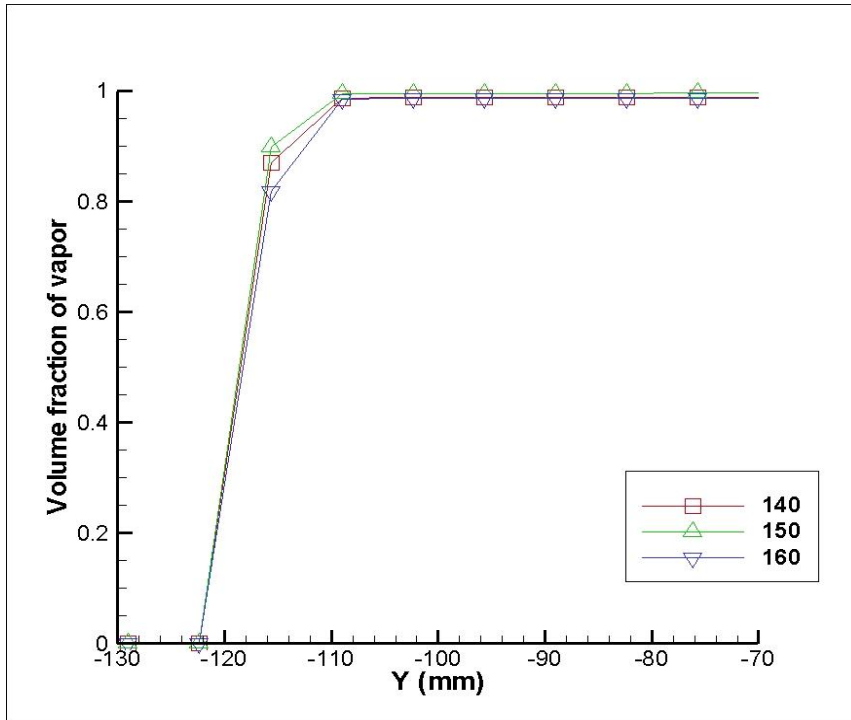


(b) 160°

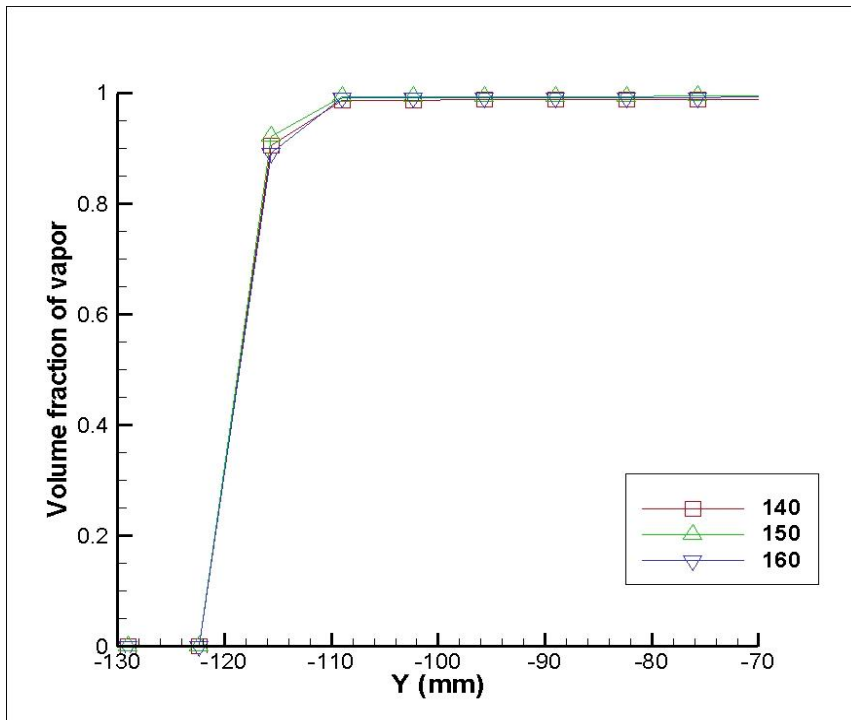


(b') 160°

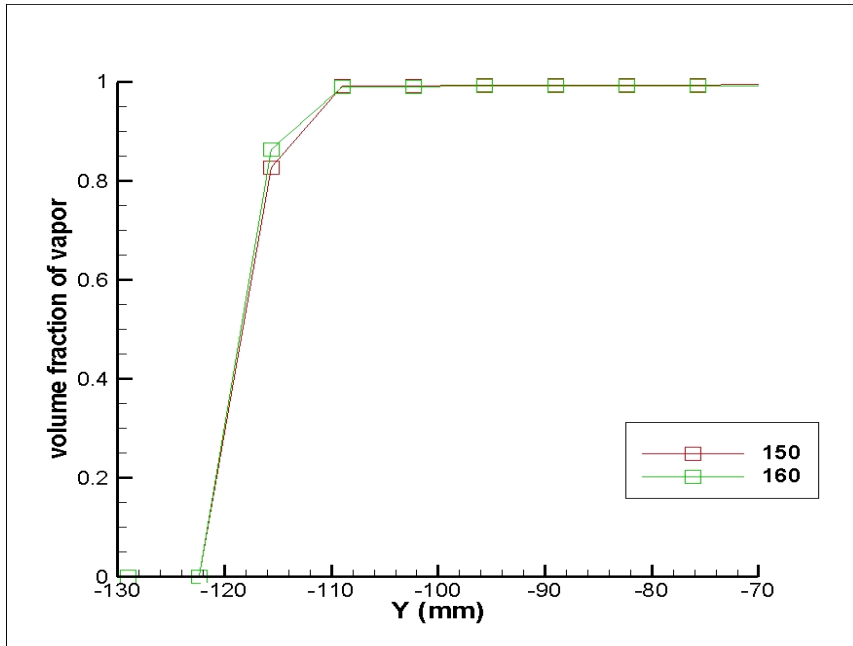
[그림 23] Pressure distribution ($De = 4.0$ mm) (Left), Volume fraction of vapor ($De = 4.0$ mm) (Right)



[그림 24] Comparison of volume fraction (De = 3.0 mm)

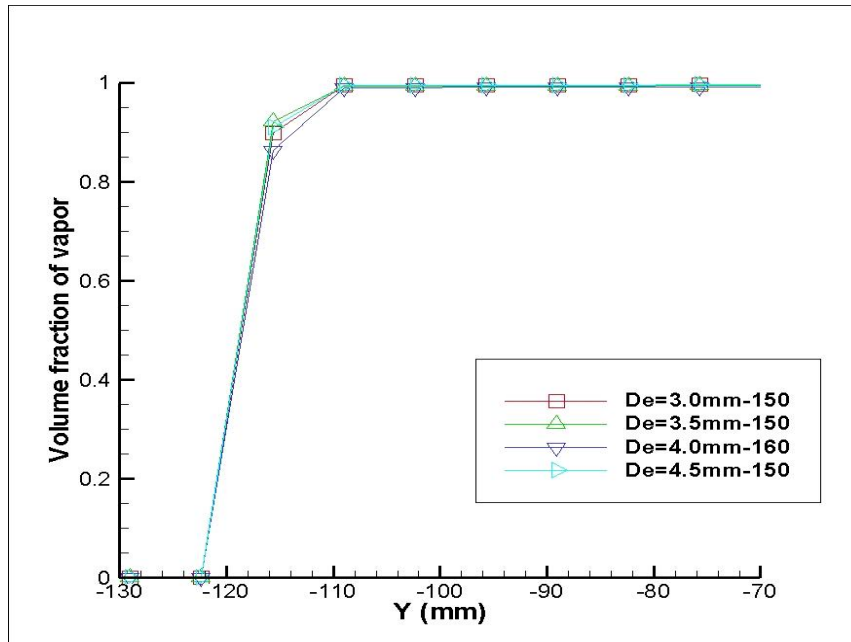


[그림 25] Comparison of volume fraction (De = 3.5 mm)



[그림 26] Comparison of volume fraction (De = 4.0 mm)

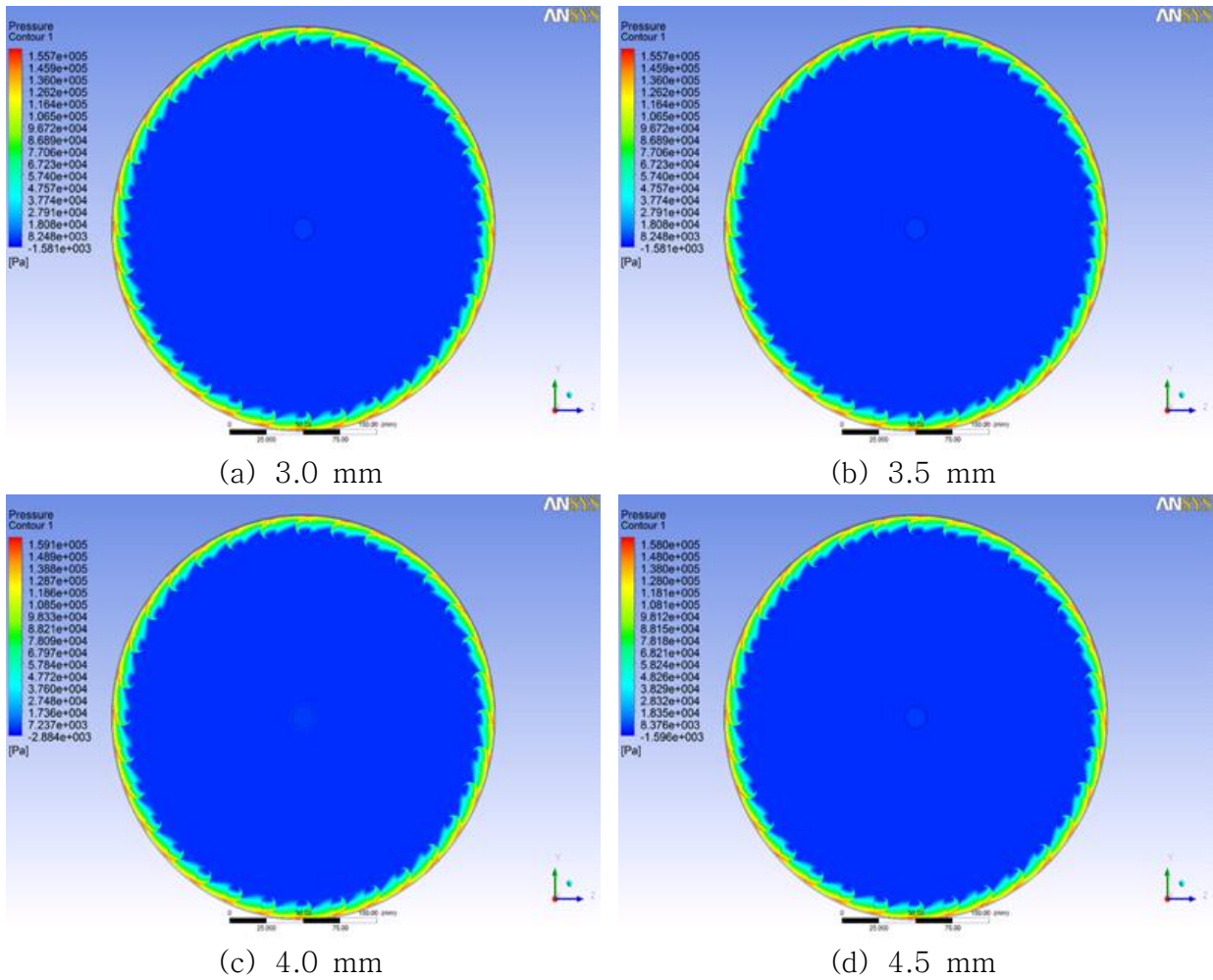
딴플의 형상이 원뿔형일 때 딴플의 깊이와 원뿔 각도를 비교하여 가장 유리한 깊이와 각도를 비교하였다. [그림 26]는 딴플의 형상이 원뿔형이며 딴플의 깊이에 따라 가장 유리한 각도를 선택하여 Volume fraction을 비교한 그림이다. 딴플의 형상이 원뿔형, 딴플의 깊이 3.5mm, 원뿔형의 각도 150° 일 경우에 가장 우수한 효과를 보일 것으로 예상된다.



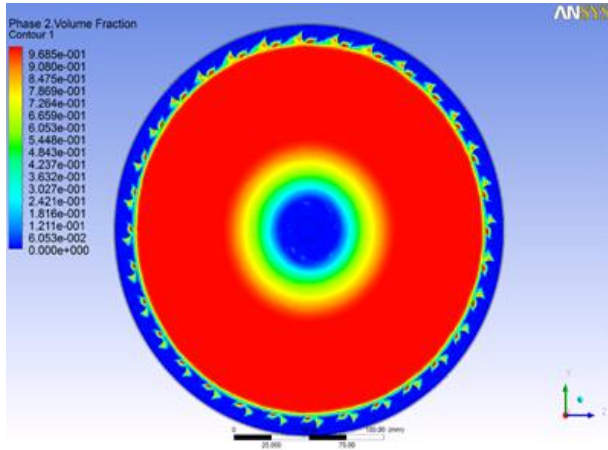
[그림 27] Comparison of volume fraction

[그림 27]은 원통형 덩플의 깊이를 3.0 mm, 3.5 mm, 4.0 mm, 4.5 mm로 변경한 압력 분포 결과이며 [그림 28]은 깊이에 따른 기포의 체적분율(volume fraction) 결과이다.

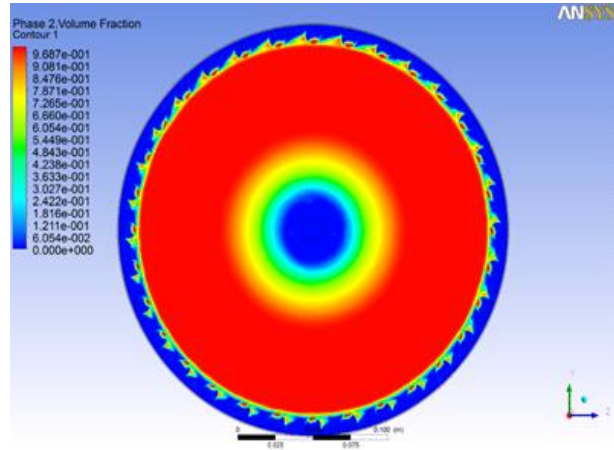
[그림 29]는 각 깊이에 따른 원통형 덩플 형상의 체적분율 그래프를 나타내고 있다. 원통형 덩플의 깊이가 4.0 mm일 때 3.0 mm, 3.5 mm, 4.5 mm 보다 기포의 체적분율이 높게 나타나 원통형 덩플 형상에서는 덩플의 깊이가 4.0 mm일 때 기포가 발생하기에 가장 유리한 형상으로 나타났다.



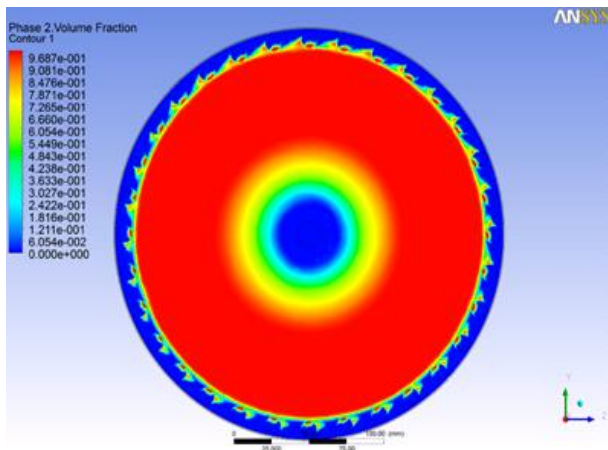
[그림 28] Pressure distribution



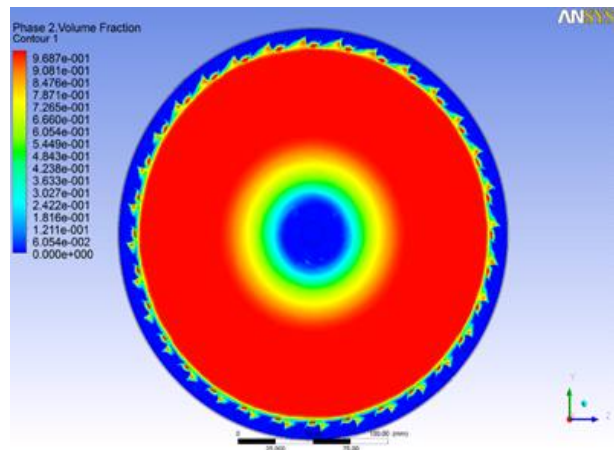
(a) 3.0 mm



(b) 3.5 mm

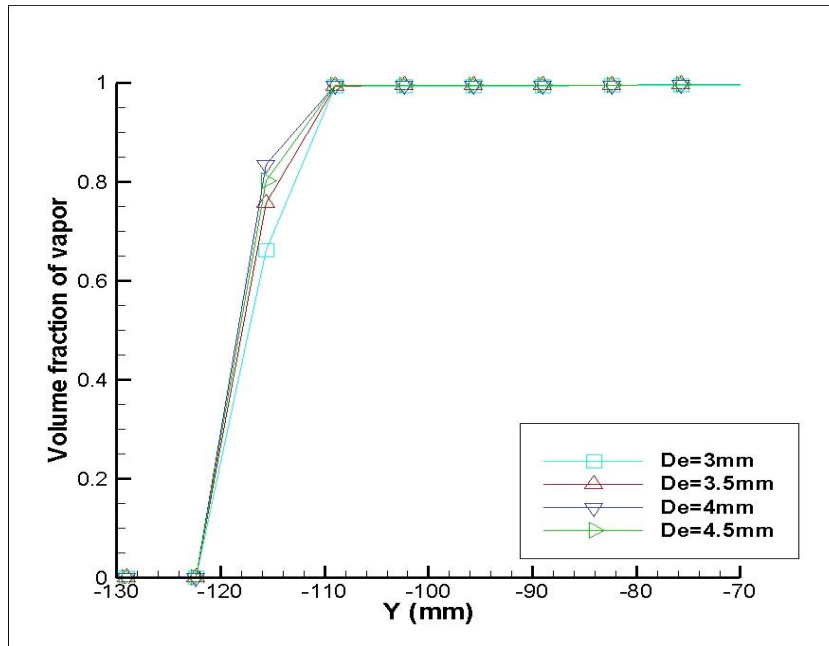


(c) 4.0 mm



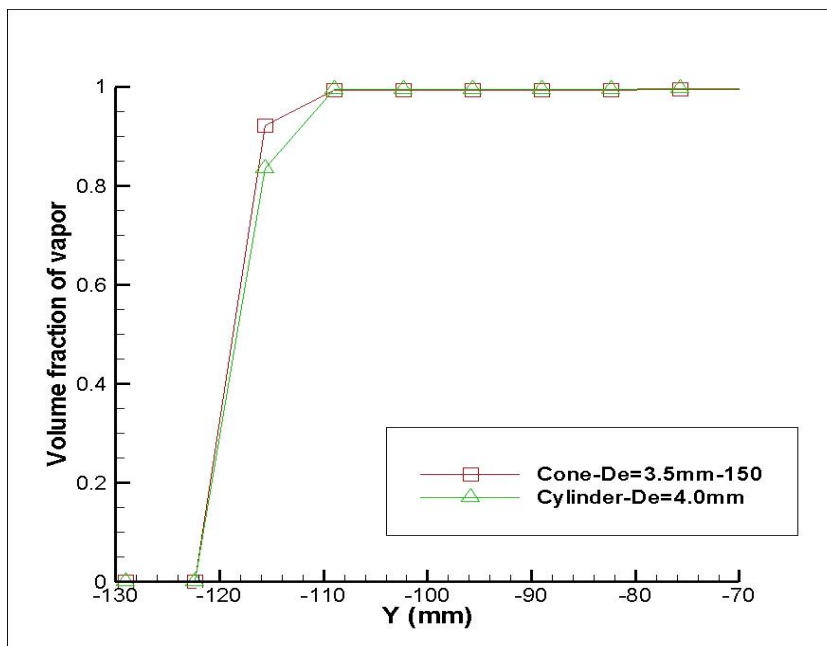
(d) 4.5 mm

[그림 29] Volume fraction of vapor



[그림 30] Comparison of volume fraction

딴플의 형상을 원통형과 원뿔형으로 변경하여 계산한 결과, 원통형일 경우에는 딴플의 깊이가 4.0 mm일 때 가장 유리한 것으로 나타났고, 원뿔형일 경우에는 딴플의 깊이가 3.5 mm, 각도가 150° 일 경우 가장 유리한 것으로 나타났다. 딴플 형상을 결정하기 위해 원통형과 원뿔형의 가장 우수한 두 경우를 비교해 보았다. [그림 30]은 가장 우수한 두 경우의 체적분율 비교를 나타낸 것이다.



[그림 31] Comparison of volume fraction

각각의 해석은 형상에 따른 모델의 수정 및 물리적 가정의 적용 등에 의하여 수치해석이 잠재적으로 내포하고 있는 오차를 수반하고 있으나, 해석결과에 의한 간접적인 물리적 타당성 분석을 통하여 전반적으로 실제 유동현상을 적절히 모사하고 있다고 판단되었다. 직관적으로 딴플의 깊이가 깊어질수록 유리할 것으로 예상하였으나 원통형 딴플 형상의 계산결과를 보면 일정한 깊이 이상이 될 경우 오히려 체적분율이 줄어드는 모습이 나타났다. 원뿔형에서도 일정한 각도일 경우 딴플의 깊이에 따른 결과는 원통형과 비슷한 결과가 나타났다. 여러 가지 해석조건을 통해 가장 유리한 딴플의 깊이를 예상할 수 있었으며, 해석결과 비교를 통해 결과적으로 딴플의 형상이 원뿔형이며 깊이 3.5 mm, 각도 150° 인 경우가 공동현상 발생에 가장 유리할 것으로 예상되었다.

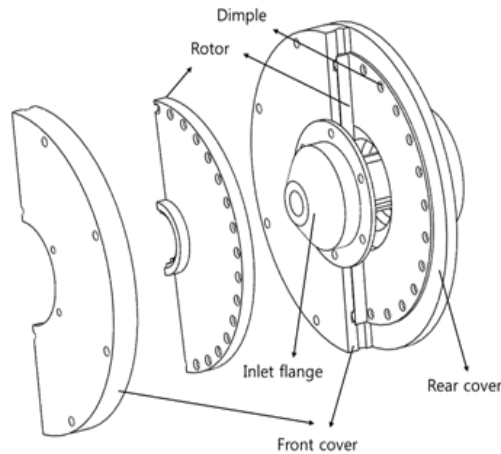
[표 5]는 유로 전체의 부피에 대한 체적분율의 비를 나타내며, [그림 16]에서 나누었던 Fluid 1과 Fluid 2의 체적분율을 각각 표시하였으며, 평균값을 Total에 나타내었다. 공동현상 발생에 가장 유리할 것으로 나타났던 깊이 3.5 mm, 각도 150° 의 원뿔형 딴플 형태가 유로 전체의 부피에 대한 체적분율 또한 가장 높게 나타나는 것을 확인하였다. 전산 유체역학(CFD)을 통해 공동현상이 가장 잘 일어날 것으로 예상되는 딴플형상을 예측할 수 있었고, 이를 시작품 설계에 반영하였다. 전동기의 성능 한계로 과부하가 예상되어 수치해석을 진행하지 않은 딴플 개수 증가 및 딴플 Line 개수 증가에 대한 수치해석은 시작품을 통한 결과를 검토 후 더 높은 성능의 전동기를 사용하게 될 경우 추가적인 수치해석을 진행할 수 있을 것이다. 전동기의 안정성이 확보되는 범위 내에서는 딴플의 개수가 증가한다면 공동현상 발생에 더 유리할 것이라는 것을 직관적으로 예상할 수 있다.

[표 6] 딴플 형상별 체적분율

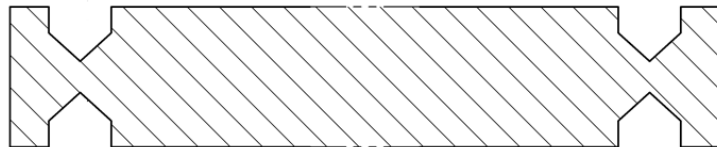
Shape type	Depth (mm)	Angle α (degree)	Volume average of Volume Fraction (%)		
			Fluid 1	Fluid 2	Total
Cylinder	3.0	-	0.54770	0.56524	0.55532
	3.5		0.55209	0.56486	0.55766
	4.0		0.54909	0.55568	0.55199
	4.5		0.54997	0.56064	0.55465
Cone	3.0	140	0.55318	0.56715	0.55929
		150	0.55191	0.56667	0.55835
		160	0.55230	0.56557	0.55808
	3.5	140	0.55439	0.57004	0.56125
		150	0.55450	0.57056	0.56154
		160	0.55133	0.56424	0.55698
	4.0	150	0.55224	0.56120	0.55619
		160	0.55113	0.56059	0.55529
	4.5	150	0.55382	0.56042	0.55674

3. 성능 평가를 위한 살균장치의 pilot장비 설계 및 제작

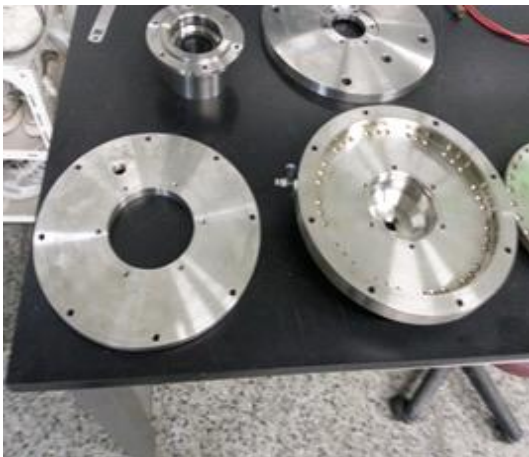
살균장치는 열을 발생시키는 가열기, 가열기와 전동기를 연결하는 축 연결장치와 가열기로 공급된 물이 누수되지 않게 하는 실링부로 구성되어 있다. [그림 31]과 같이 가열기는 앞덮개(front cover), 뒷덮개(rear cover), 회전체(rotor)로 구성되어 있으며, 공동현상의 발생 및 발달을 위해 이곳에 [그림 32]와 같이 일정 깊이의 원통형과 원뿔형 형태를 결합한 딴플을 위치시켰다. 각 디스크의 딴플의 개수가 같을 경우 고주파 잡음(high frequency noise)의 원인이 될 수 있으므로 이를 피하기 위하여 각 디스크에서 딴플의 개수는 다르게 설계하였다. [그림 33]은 살균장치의 시제품 사진이다.



[그림 32] 살균장비의 개략도

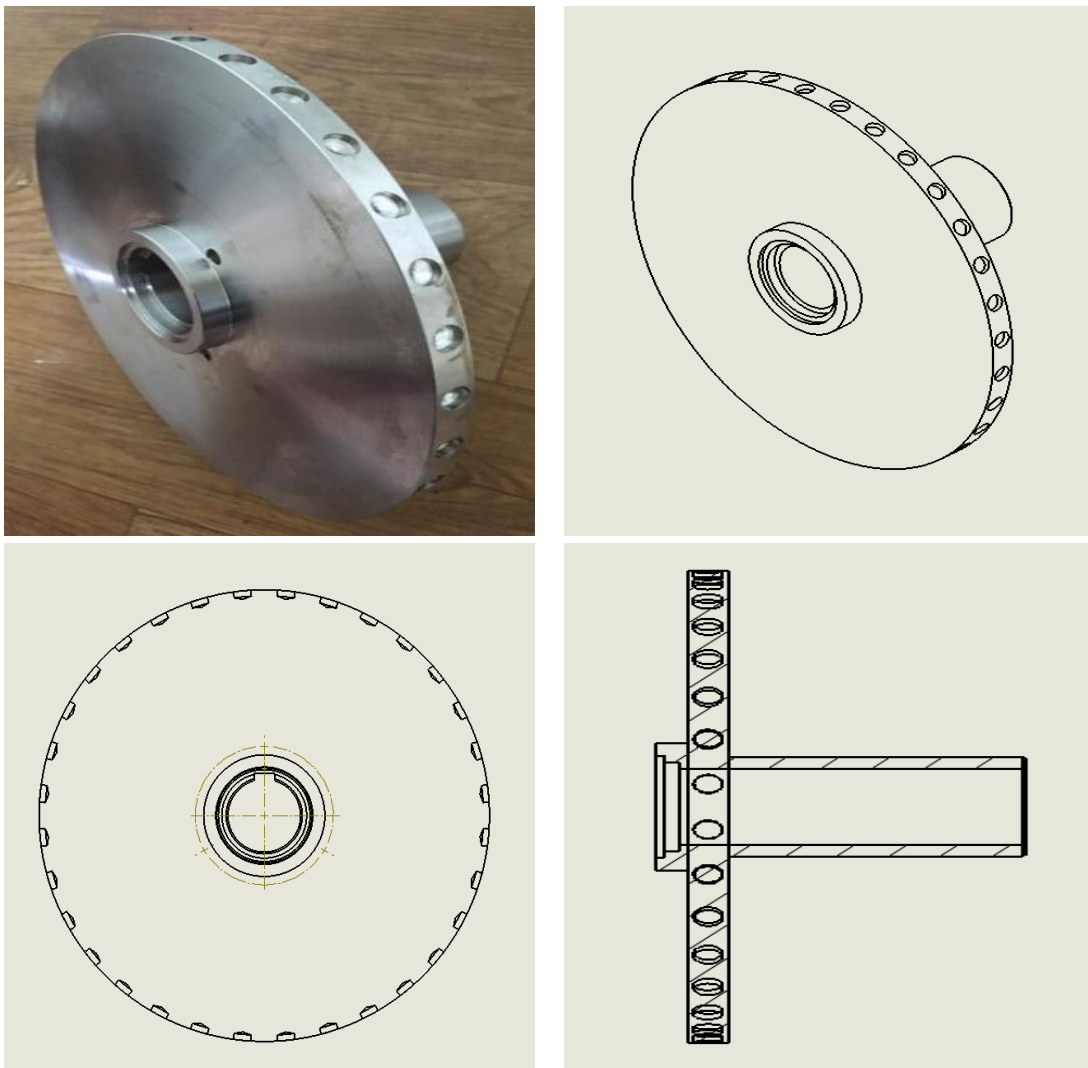


[그림 33] 딴플(Dimple) 모양의 도식

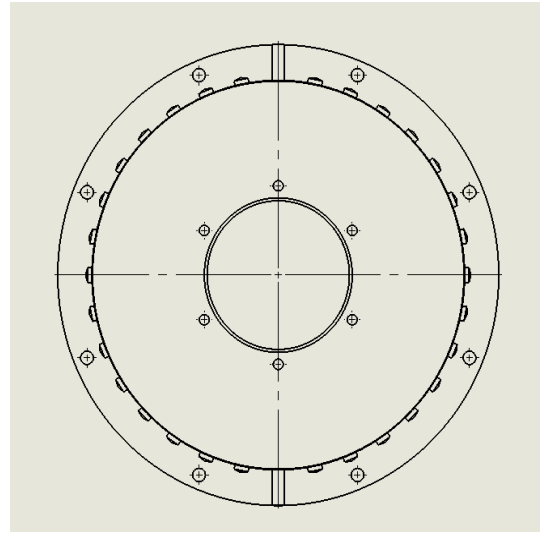


[그림 34] 살균장비의 구성 부품

2차년도 연구개발에서 가열기 형상에 존재하는 덩플에 의한 공동현상의 발생여부를 고속카메라 촬영으로 입증하였고 살균효과를 확인 할 수 있었다. 따라서 앞덮개(Front cover), 뒷덮개(Rear cover), 회전체(Rotor)로 구성되는 가열기의 덩플의 개수와 위치를 다르게 제작하여 공동현상의 발생으로 인한 살균효과 및 열효율 비교 실험을 수행하였다. 아래의 [그림 34, 35, 36]은 3가지 케이스로 구분되는 가열기의 형상이다. 덩플의 형상은 일정 깊이의 원통형과 원뿔형 형태를 결합한 형상으로 3가지 케이스에 대해 모두 동일하다. 아래의 [그림 34, 35, 36]에 해당하는 3가지 경우에 대해 순차적으로 형상(A), (B), (C)로 지칭하였다.



[그림 35-(a)] 원주방향에 덩플이 가공된 회전체(rotor)의 실물사진 및 도면

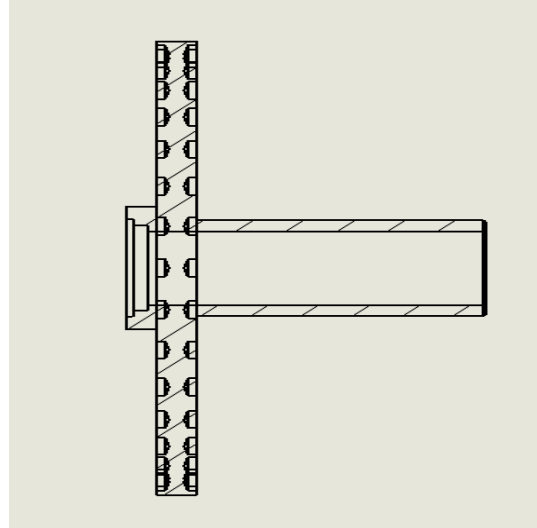
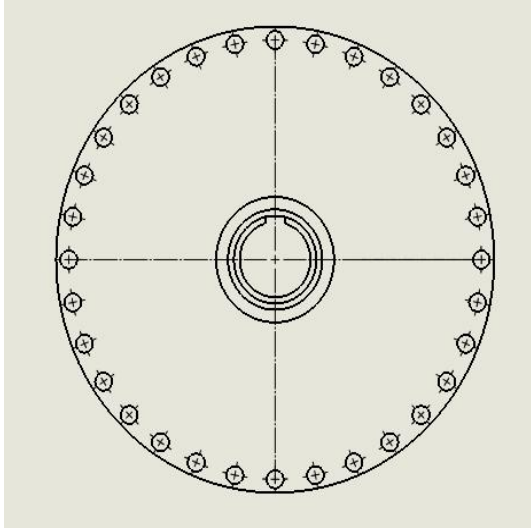
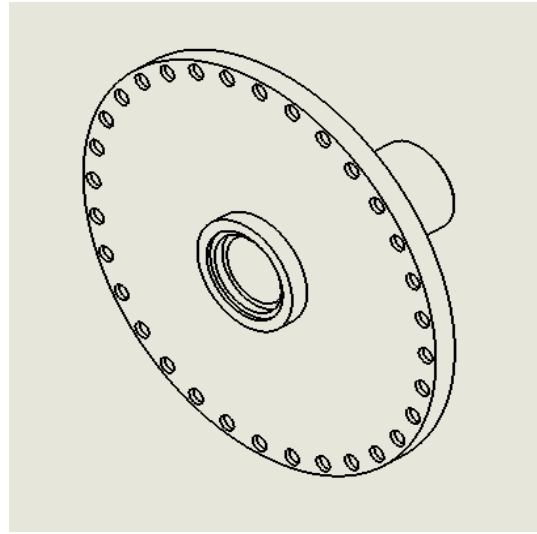


[그림 34-(b)] 원주방향에 댄플이 가공된 앞덮개(Front cover)의 실물사진 및 도면

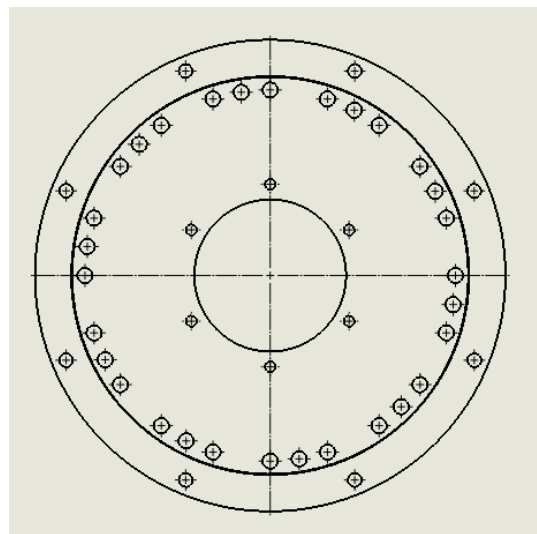
[그림 34]는 가열기의 회전체(Rotor) 원주방향에만 댄플이 가공되어 있는 경우이다. 2차년도 연구개발을 통해 공동현상의 발생정도가 무차원수인 캐비테이션 넘버가 감소할 때 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 공동현상을 발생시키는 댄플의 위치를 기존의 양쪽 표면에서 원주방향으로 축에서 더 멀리 위치시켜 속도를 증가시키고 캐비테이션 넘버가 감소할 수 있도록 구성하였다. 댄플의 개수는 회전체(Rotor) 부에 32개, 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover)에 각각 32개, 24개로 구성되었으며 댄플의 총 개수는 88개 이다.

[그림 35]는 가열기의 회전체(Rotor) 양쪽 표면에만 댄플이 가공되어 있는 경우이다. 2차년도 연구개발에서 평가된 살균장치의 기존모델로써 정량적인 살균효과 및 열효율 평가를 위해 비교군으로 포함시키도록 하였다. 댄플의 개수는 회전체(Rotor) 부에 64개, 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover)에 각각 30개, 24개로 구성되었으며 댄플의 총 개수는 114개이다.

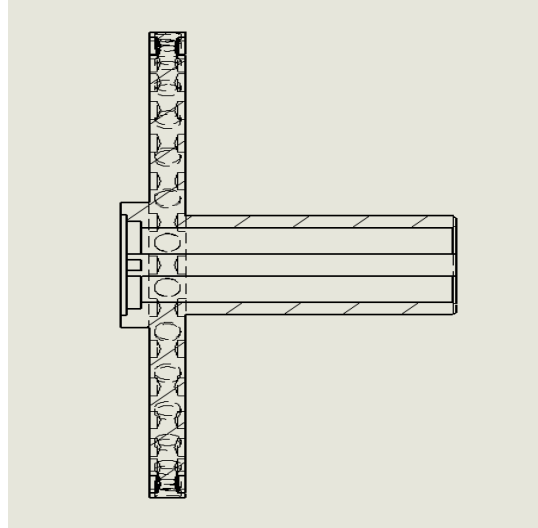
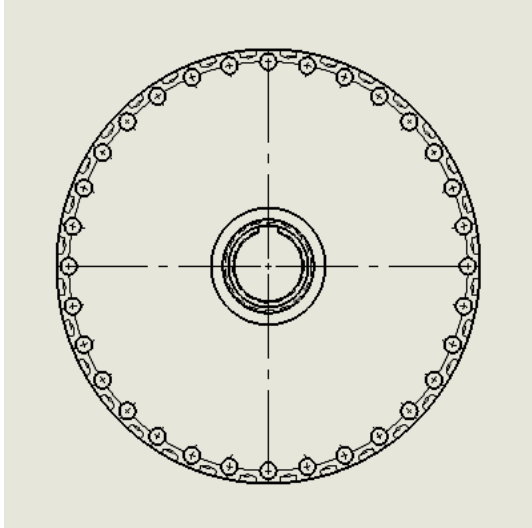
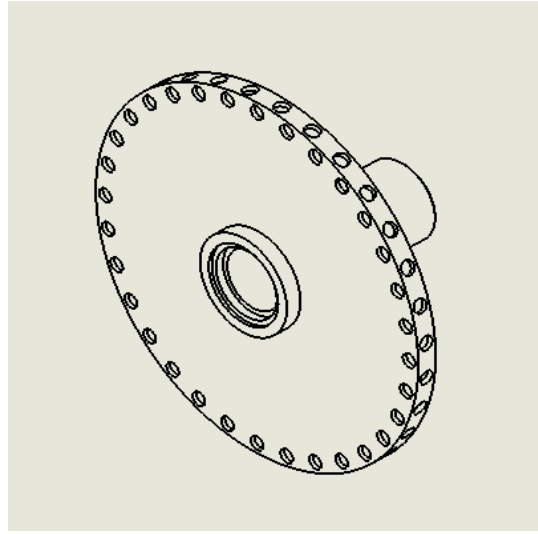
[그림 36]은 가열기의 회전체(Rotor) 원주방향 및 양쪽 표면에 댄플이 모두 가공 되어 있는 경우로 가열기를 구성하는 앞덮개(Front cover), 뒷덮개(Rear cover)와 결합되었을 시 회전체(Rotor)가 회전운동을 할 때 댄플이 서로 교차하는 위치에 댄플이 구성되어 있다. 댄플의 개수는 회전체(Rotor) 부에 96개, 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover)에 각각 62개, 24개로 구성되었으며 댄플의 총 개수는 182개이다.



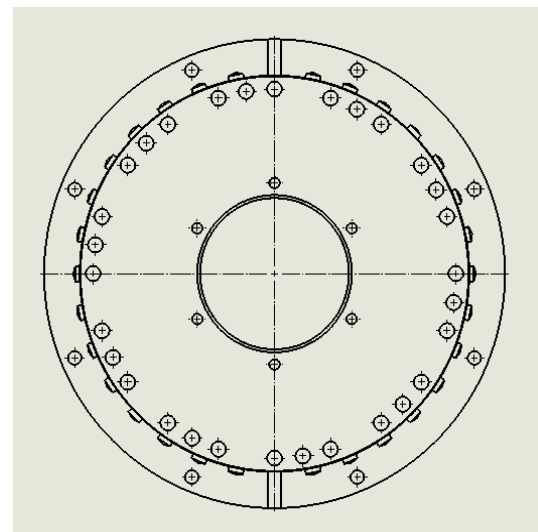
[그림 36-(a)] 양쪽 표면에 댄플이 가공된 회전체(rotor)의 실물사진 및 도면



[그림 35-(b)] 양쪽표면에 댄플이 가공된 앞덮개(Front cover)의 실물사진 및 도면



[그림 37-(a)] 원주방향 및 양쪽 표면에 딩플이 가공된 회전체(rotor)의 실물사진 및 도면



[그림 36-(b)] 원주방향 및 양쪽 표면에 딩플이 가공된 앞덮개(Front cover)의 실물사진 및 도면

4. 15kw급 고온단시간 살균 장비의 설계 및 제작

고안된 고온단시간 살균 처리방식은 비순환형 처리방식으로써 다음과 같은 순서로 살균 처리가 진행되었다. 물탱크에 액상을 초기온도까지 가열기를 통해 가열하고 세균을 접종하여 배양하였다. 그 후 가압펌프를 통한 입구압력 조건, 유량조절밸브를 통한 유량 조건, 전동기를 통한 회전속도 등의 운전조건을 상정한 후 토출온도까지 약 30도의 큰 온도차를 주고 한번 살균 처리하여 바로 배출하도록 실험이 진행되었다.

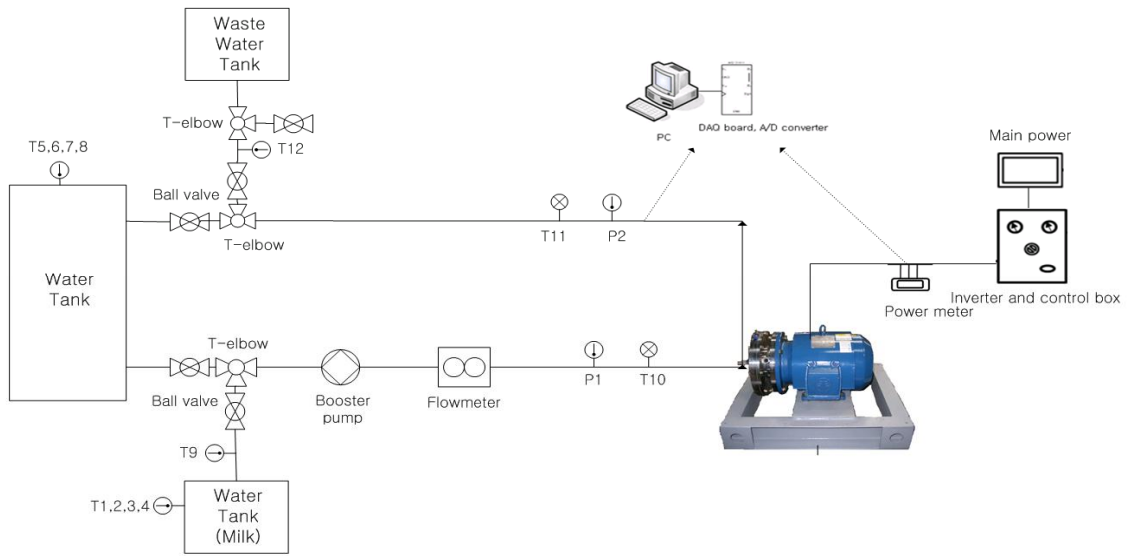
본 시험라인의 모든 배관은 15A(약 15mm)로 구성하였고, 시험에서 사용된 전동기는 효성의 정격소비전력 15kw, 3상 380V, 표준효율 90.2%의 사양을 사용함. 회전속도의 영향을 알아보기 위하여 전동기의 전력을 인버터를 통해 공급하였으며 인버터의 주파수를 제어하여 전동기의 회전속도를 변화시켰다. 사용된 인버터는 LS산전(LS Industrial System)의 모델명 iG5A이며 회전속도는 2,100~3,600 r/min 범위에서 제어하였다.

배관의 지름은 입구(inlet)와 출구(outlet) 모두 호칭 치수 15A(약 15 mm)로 하였으며 배관의 재질은 부식에 의한 영향을 최소화하기 위하여 스테인리스로 제작하였다. 입구 압력을 제어하기 위하여 윌로(Wilo)의 인버터형 가압 펌프(booster pump)인 PBI-203MA 모델을 사용하였으며 사용된 가압 펌프의 사양은 양정 33m, 정격소비전력 0.75kw, 단상 220V 이다.

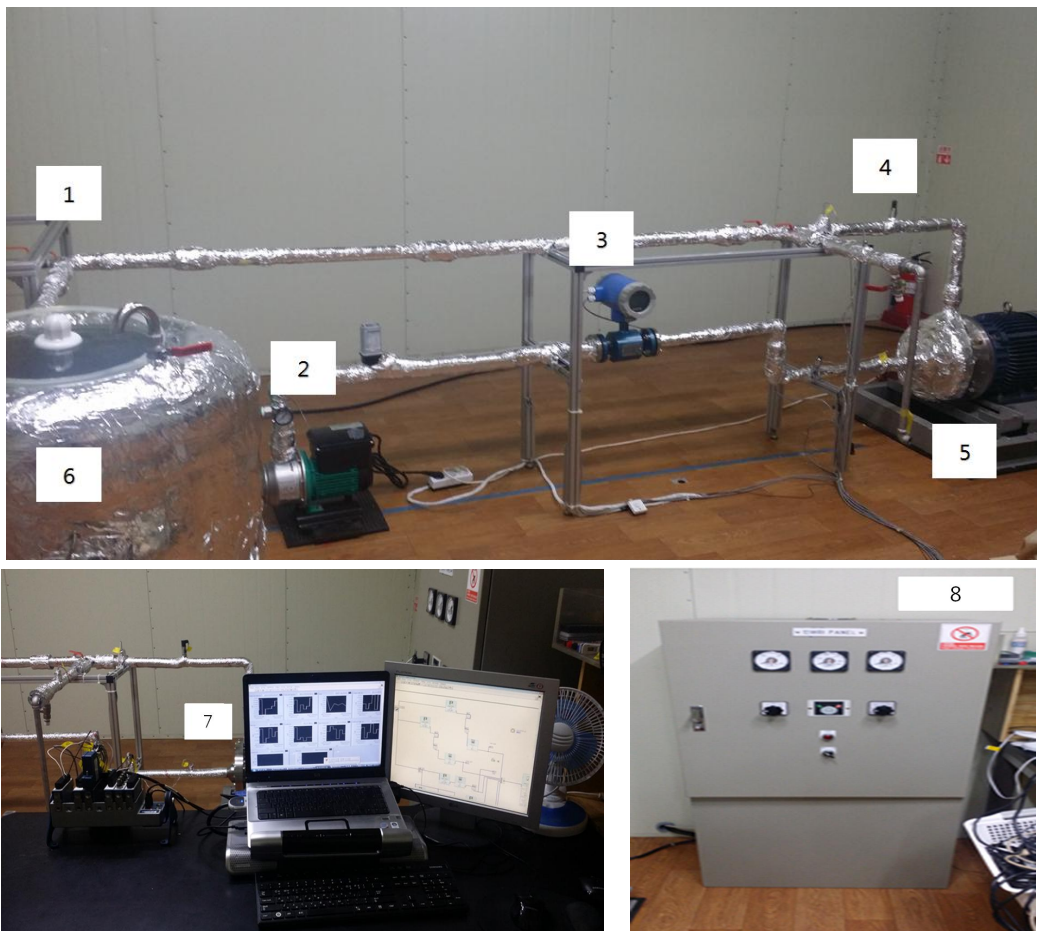
입구와 출구부 및 수조의 온도를 측정하기 위해 사용된 온도센서는 K type 의 Thermo Couple 을 사용하였다. 입구와 출구부의 압력 측정을 위하여 사용된 압력센서는 Sensys M5100를 사용하였다. 유량을 측정하기 위하여 배관 지름 기준 15A 규격의 전자유량계 (electromagnetic flowmeter)를 사용하였다. 유량의 요동(Flow Fluctuation) 억제 및 유량 제어(Flow control)를 위하여 유량제어밸브를 장착하게 된다.

PID 유량제어밸브(Proportional-Integral-Derivative control valve)는 MIC 15P모델을 사용하였으며 가압펌프 출구와 유량계 입구사이에 설치하였다. LabVIEW를 통해 4~20 mA의 전기적 신호를 이용하여 밸브의 개폐를 변경하여 유량을 제어하였으며, 유량 조건 변경에 따른 순간상승온도를 확인할 수 있도록 하였다. 측정된 온도와 압력 및 유량 데이터를 처리하기 위한 데이터 획득(data acquisition, DAQ)장치로 National Instruments사의 NI cDAQ-9178 모델을 사용하여 아날로그 신호를 디지털신호로 변환하여 PC로 자료를 수집하였다. 전체적인 시험 장치 구성도는 [그림 37] 및 [그림 38], [표 6]에 나타내었다.

최대 60L의 용량을 갖는 저장탱크를 투명 아크릴 재질로 제작하여 가시성을 고려하였으며 [그림 38]은 물탱크 및 유량제어 밸브를 적용한 전체 시험장치 구성도를 나타낸다. [그림 39]는 유량제어밸브 및 펌프를 시험라인에 설치한 모습이며, [표 7]에 자세한 사양을 나타내었다. 이를 통하여 유량의 요동 제어 및 조절을 통해 순간상승온도를 손쉽게 변경할 수 있게 되었다.



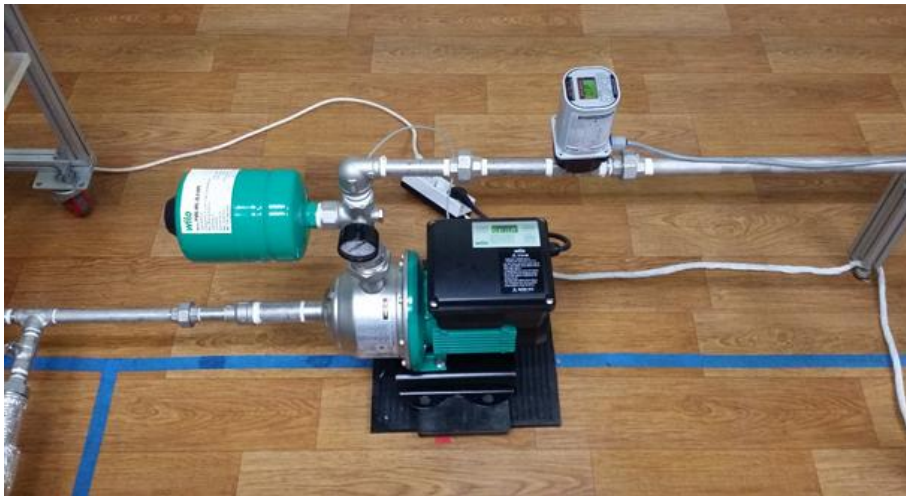
[그림 38] 15kw 급 성능시험을 위한 실험 장치 구성도



[그림 39] 성능시험을 위한 실험장치 전체 구성도

[표 7] 성능실험을 위한 실험장치 전체 구성도

No.	Part name
1	Water tank
2	Booster pump & Flow control valve
3	Flow meter
4	Pressure % temp. sensors
5	Generator
6	Milk tank
7	DAQ system
8	Inverter & control box



[그림 40] 유량제어 밸브 및 펌프

[표 8] 유량제어 밸브 및 펌프의 사양

Description	Specification
Power supply	AC220V 50/60Hz
Input signal	4~20mA , 0~20mA, 0~5V, 2~10V
Feedback output	4mA ~ 20mA
Calibration	Auto Calibration
Action mode	Reverse/Direct
Resolution	400:1
Fail mode	Close/Stop/Open
Digital dead band	Narrow : 0.3 mA Wide : 0.7 mA
Noise skip	0.2V
Indicator	3 Digit LCD

압력 탭의 경우 온도 탭과의 거리를 배관지름의 약 300(20D)mm 정도의 간격을 유지하여 서로간의 영향을 최소화 하고자 하였다. 온도 센서에 비하여 압력센서가 유동에 의한 영향에 더 민감하므로 온도 센서에 의한 영향을 최소화하기 위하여 압력 탭을 온도 탭의 위치보다 상류에 설치하였다. 출구의 압력 및 온도 탭의 경우 [그림 40] 에서 나타난 바와 같이 압력 탭은 가열기 출구에서부터 배관지름의 약 300(20D)mm의 직관을 확보하여 설치하였다. 가열기에서 발생한 공동현상에 의한 기포가 붕괴하여 주변의 물과 충분히 혼합될 수 있도록 하여 출구의 온도 센서에서 측정하는 물의 온도가 출구의 물의 온도를 대표할 수 있게 하였다. 출구 또한 입구와 마찬가지로 온도 탭과 압력 탭 사이의 간격을 유지하여 설치하였으며, 탭에 의한 관내 유동 흐름의 영향을 최소화하기 위해 각각의 탭은 온도 및 압력을 측정하기 위해 필요한 최소한의 크기로 가공 및 설치하였다. 본 연구의 실험에서 측정한 압력 데이터는 모두 절대 압력으로 측정하였으며, 본 연구의 압력 데이터는 특별한 언급이 없는 한 모두 절대압력이다. 측정에 사용된 압력 센서의 자세한 사양은 [표 8]에 나타내었다.

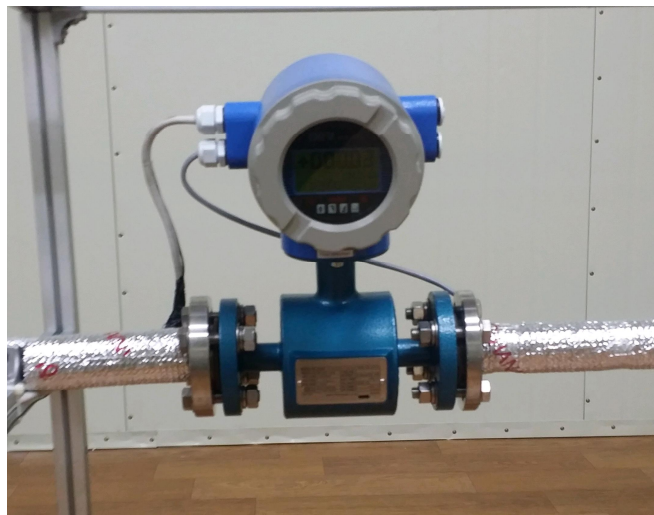


[그림 41] 압력 및 온도 센서

[표 9] 압력 센서 사양

Description	Specification
Range	0~1,000 kPa
Accuracy	±0.50 % (FS, RSS)
Temperature characteristic	±0.05 %FS/℃
Output characteristics	±0.05 %FS/℃
Power supply	9 ~ 30VDC
Temperature	-40 ~ 125 ℃
Output signal	4 ~ 20mA
Standard screw	PT1/4

발생열량을 측정하기 위해서는 온도 측정 못지않게 중요한 것이 정확한 유량 측정이다. 유량계의 경우 일반적으로 부피 유량을 측정한 후 작동유체의 밀도를 계산하여 질량 유량으로 환산하여 사용한다. 발전소 및 제철소 등의 고온·고압 조건의 경우 차압식 유량계를 주로 사용하지만 본 연구에서는 사용 조건이 압력 1,000 kPa 미만, 온도 100℃ 미만이므로 설치가 간편하고 데이터의 전송이 비교적 용이하며 온도에 대한 보상이 가능한 전자식 유량계(electro-magnetic flowmeter)를 사용하였다. 배관 지름 기준으로 15A 유량계를 사용하였으며, 자세한 사양은 [표 9]에 나타내었고, [그림 41]은 유량계를 시험 라인에 설치한 모습이다. KS규격에서 규정하고 있는 전자 유량계의 설치는 일반적으로 제어밸브 등이 유량계의 검출부 전단에 있을 경우 전단의 직관부를 배관 지름의 10배 이상, 엘보우, 리듀서 등의 배관 연결 부품만 있을 경우 배관 지름의 5배 이상을 확보하게 되어 있으며, 후단부는 배관 지름의 2배에서 10배 이상의 직관부를 확보하게 되어있음. 유량계는 가열기 입구를 기준으로 상류 쪽에 설치하였으며, 검출부를 기준으로 전단 1,000 mm(65D), 후단 500 mm(30D)의 직관부를 확보하여 전·후단 모두 배관 지름의 30배 이상의 직관부를 확보하여 유량측정의 정확도를 높이고자 하였다.



[그림 42] 유량계

[표 10] 유량계 사양

Description	Specification
Size	DN 15
Range	0.2~10 m ³ /h
Accuracy	0.50 %
Repeatability	0.08 %
Cal. Factor	1.7154
STD. Press	1.0 Mpa
Power source	220VAC
Output signal	4~20mA
Max. Temp	100℃
Electrodes material	316L

5. 15kw급 고온단시간 살균장비의 성능시험 방법 개발 및 성능시험 수행

15kw급 고온단시간 살균장비의 성능시험에서 사용된 가열기는 [그림 34], [그림 35], [그림 36]에 해당하는 형상(A), 형상(B), 형상(C) 중 최초 고안된 형상(B)에 해당하며 회전속도와 입구압력 등의 인자에 대한 영향도를 파악하기 위해 수행되었다. 살균장치의 유동 및 운전 조건과 발생열량 및 열효율과의 관계를 통해 실험적 조건과 방법을 파악하기 위하여 먼저, 물을 이용하여 기계적 성능 평가를 수행하였다. 원활한 유동 유입 및 입구 유동 조건에 대한 성능을 확인하기 위해 가압 펌프를 이용하여 입구에서의 유동 조건을 변화시켰다. 입구 압력 조건으로 가압펌프를 가동하지 않았을 때($P_{set} = 0$)와 가압 펌프의 표시 부를 기준(P_{set})으로 토출 압력을 0.5 ~ 1.5 bar(gage pressure)범위에서 변화시켰다. 각 압력 조건에 대하여 살균장치의 회전 속도에 의한 영향을 확인하기 위해 인버터를 이용하여 살균장치에 인가되는 전류의 설정 주파수를 변경하여 제어하였다. 회전속도는 2,700 ~ 3,600 r/min(45~60Hz) 범위에서 300 r/min(5Hz) 간격으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 가압펌프를 가동하지 않은 상태에서 살균장치의 회전속도가 3,000 r/min 미만일 경우 살균장치내로 물이 원활하게 유입되지 않아 실험을 수행하지 않았다.

본 연구는 발열장치에서 발생하는 발생열량을 이용하여 미생물을 살균하는 것을 목적으로 하고 있으므로, 가압펌프를 가동한 경우 살균장치의 회전속도가 2,700 r/min 미만인 조건은 발생열량과 열효율이 현저히 낮을 것으로 예상되어 실험을 수행하지 않았다. 실험 조건은 [표 10]에 나타내었다. 모든 데이터의 획득은 살균장치의 운전 시작 후 전동기가 정상 상태라고 판단되어 질 때 하였으며, 정상 상태의 판단은 살균장치 출구 온도의 변화가 0.1℃미만 일 때로 판단하였다.

[표 11] 수력학적 공동현상 발생장치의 실험 조건

Booster Pump Setting (Bar-gage Pressure)	Rotating Velocity (r/min)
$P_{set} = 0$	3,000
	3,300
	3,600
$P_{set} = 0.5$	2,700
	3,000
	3,300
$P_{set} = 0.7$	3,600
	2,700
	3,000
$P_{set} = 1.0$	3,300
	3,600
	2,700
$P_{set} = 1.5$	3,000
	3,300
	3,600

고온단시간 살균장비의 실험 조건과 방법을 파악하기 위하여 각 실험조건에 따라 일반 용수를 이용하여 기계적 성능 실험을 수행하였다. 공동현상 수(C_v) 및 순간상승온도(ΔT) 그리고 열효율(η)은 입구 압력, 유량, 전동기 회전속도(ω_r) 등의 실험조건에 의해서 결정되며, 각 요인에 대한 정의는 다음과 같다.

가. 공동현상 수(C_v)

공동현상 수는 공동현상의 발생 정도를 나타내는 무차원수이며, 작을수록 공동현상 발생 빈도가 높다. 본 보고서에서 사용된 공동현상 수에 대한 정의는 식 (1) 및 식 (2)와 같다.

$$C_v = \frac{P_1 - P_v}{\frac{1}{2}\rho(R_r\omega_r)^2} \quad \text{식 (1)}$$

(P_v : vapor saturation pressure, R_r : radius of rotor, ω_r : angular velocity of rotor(rad/sec))

P_v : vapor saturation pressure

$$\ln \frac{P_1}{P_v} = \frac{\Delta H_{vap}}{R} \left(\frac{1}{T_v} - \frac{1}{T_1} \right) \quad \text{식 (2)}$$

(ΔH_{vap} : vapor enthalpy, T_v : vapor saturation temperature)

나. 발생열량 및 열효율

본 보고서에서는 발생열량(\dot{H})을 구할 때 가열기 기준 전단과 후단에서 측정하는 온도만을 가지고 구하였다. 가열기와 배관에서 손실되는 열은 고려하지 않았으며 식 (3)과 같이 구하였다.

$$\dot{H} = \rho \dot{Q} C_P \Delta T \quad \text{식 (3)}$$

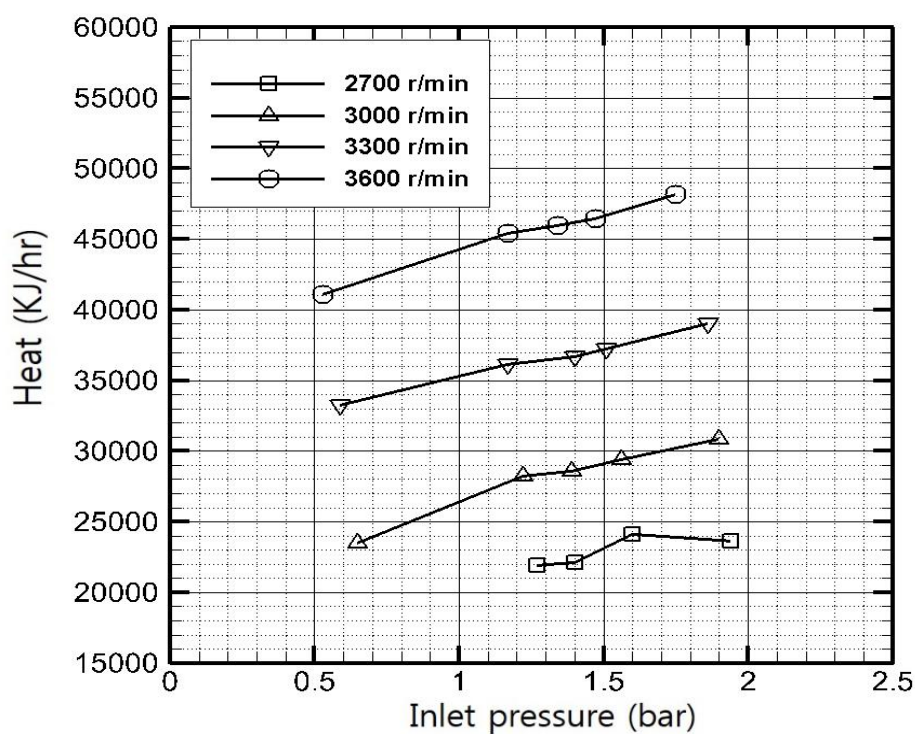
($\Delta T = (T_2 - T_1)$, C_P = specific heat at constant pressure)

입력 에너지는 전동기에서 소비되는 누적 전력(\dot{E})을 측정하였으며, 이를 이용하여 식 (4)와 같이 열효율을 구하였다.

$$\eta = \frac{\dot{H}}{\dot{E}} \times 100[\%] \quad \text{식 (4)}$$

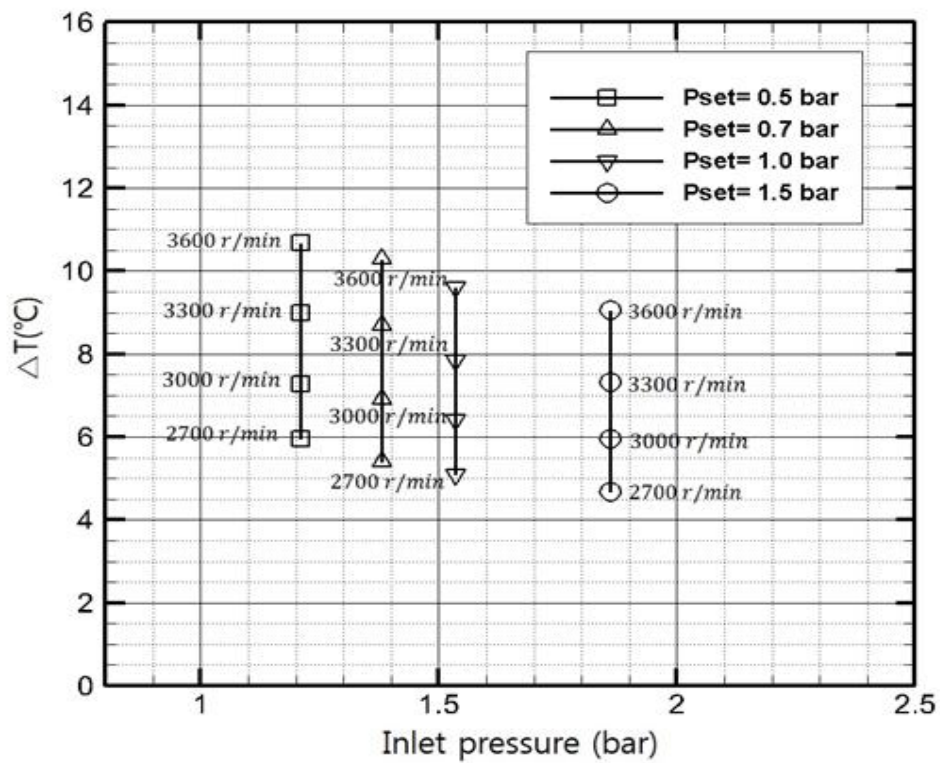
본 수식에 사용된 포화증기압, 비열 및 밀도는 온도에 대한 물의 물성표를 이용하여 3차 spline 보간법으로 구하여 대입하였다.

유체기계 입구에서의 압력은 공동현상 발생에 있어 회전 속도와 더불어 가장 중요한 파라미터 중 하나이다. [그림 42]는 입구압력과 발생열량의 관계를 나타낸다. 같은 회전 속도에서 입구압력이 증가할수록 열 발생이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 다른 선행 연구들의 결과에서도 동일한 현상을 보이고 있다.



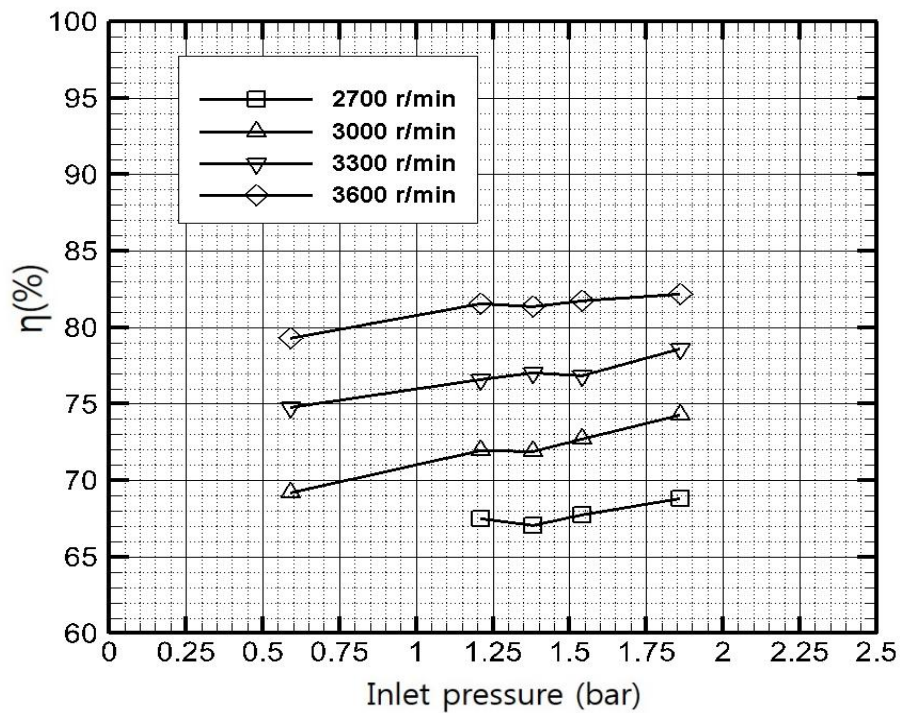
[그림 43] 입구 압력에 따른 열 발생량

[그림 43]은 순간상승온도(ΔT)와 입구압력과 관계를 나타낸다. 앞서 본 바와 같이 회전속도가 증가할수록 순간상승온도도 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 입구압력이 감소할수록 순간상승온도가 증가하는 것으로 나타났다. 입구압력이 증가할수록 발생열량과 열효율이 증가하는 것을 확인하였으나, 이는 유량의 증가로 인한 영향이며, 순간상승온도는 감소하는 것으로 나타났다.



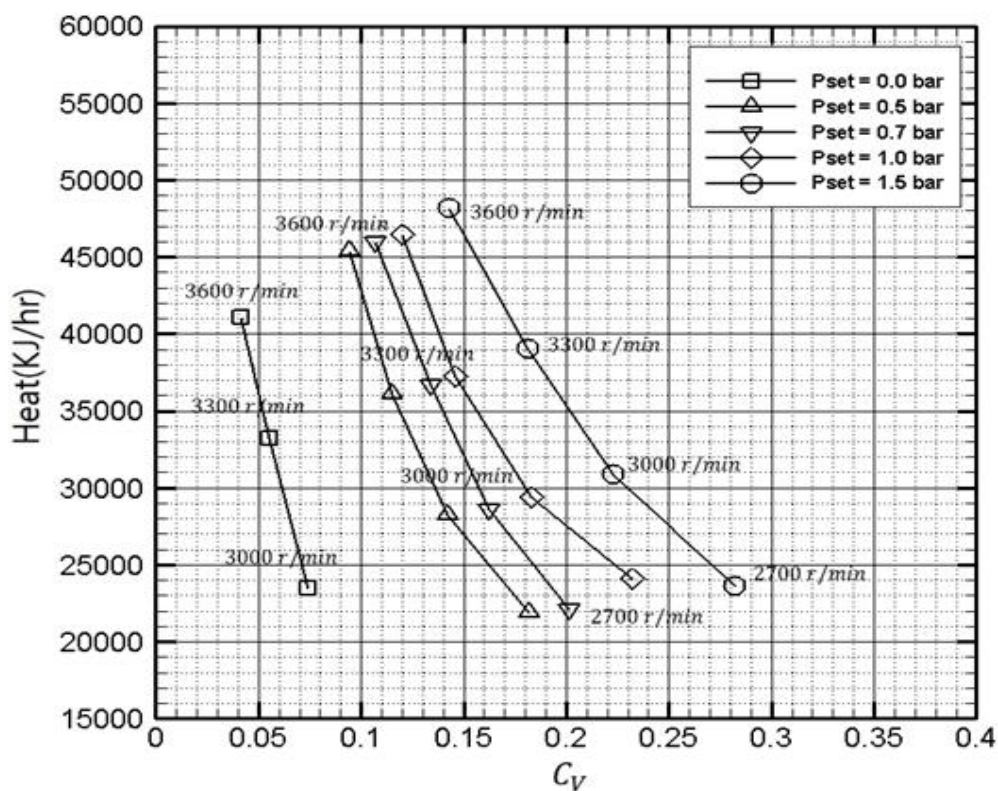
[그림 44] 입구 압력에 따른 온도 변화

[그림 44]는 입구압력과 열효율과의 관계를 나타낸 결과이다. [그림 44]에서 볼 수 있듯이 가압펌프의 작동 후 열효율이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 최대 열효율은 입구압력 1.75 bar, 회전속도 3,600 r/min에서 82.18%로 측정되었다. 발생열량 및 열효율에 미치는 영향은 입구압력보다 회전속도에서 더 큰 것으로 확인되었다.



[그림 45] 입구압력에 따른 열효율

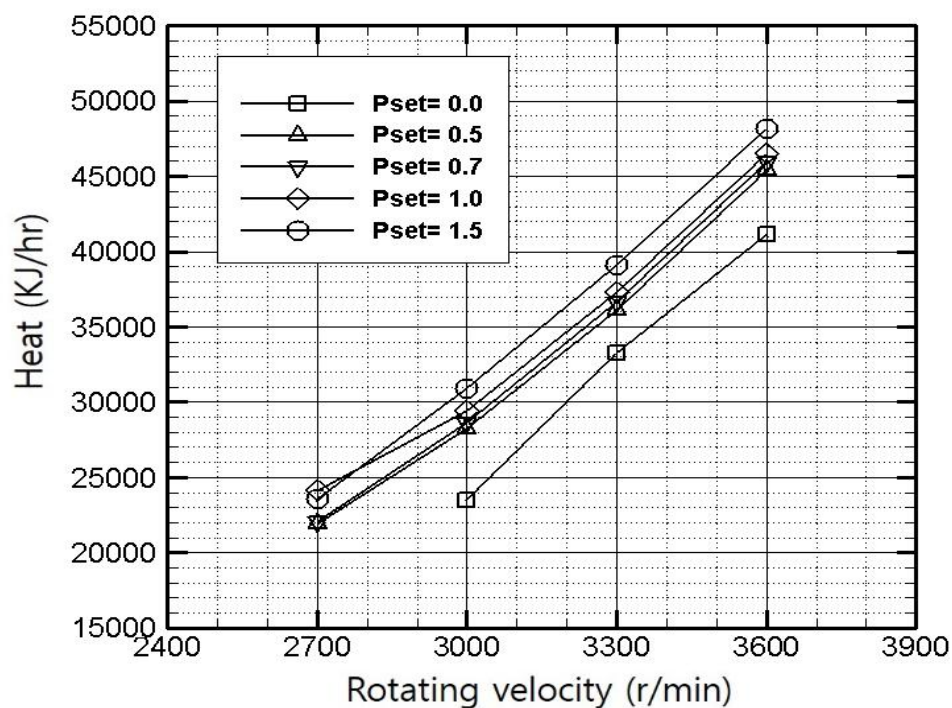
[그림 45]는 입구압력과 캐비테이션 수, 발생열량과의 결과이다. 앞서 설명한 캐비테이션 수와 밀접한 관계가 있는데, 3,000 r/min 이상에서 가압 펌프를 작동 시키지 않고 가열 장치를 운전시킨 경우와 가압 펌프를 작동시킨 후 가열장치를 운전시킨 경우를 비교한 결과 가압 펌프를 작동 하였을 때 발생열량이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 회전속도가 증가함으로써 캐비테이션 수는 감소하는 것으로 나타나고, 이는 회전속도가 증가하면 공동현상이 더 활발히 발생한다는 것을 의미한다. 또한 입구압력 조건은 입구 압력이 작을수록 캐비테이션 수는 감소한다. 이러한 사실을 통해 회전속도는 빠를수록, 입구 압력 조건은 낮을수록 공동현상 발생에 유리한 것으로 판단할 수 있다.



[그림 46] 공동현상 수(C_v)에 따른 열 발생량

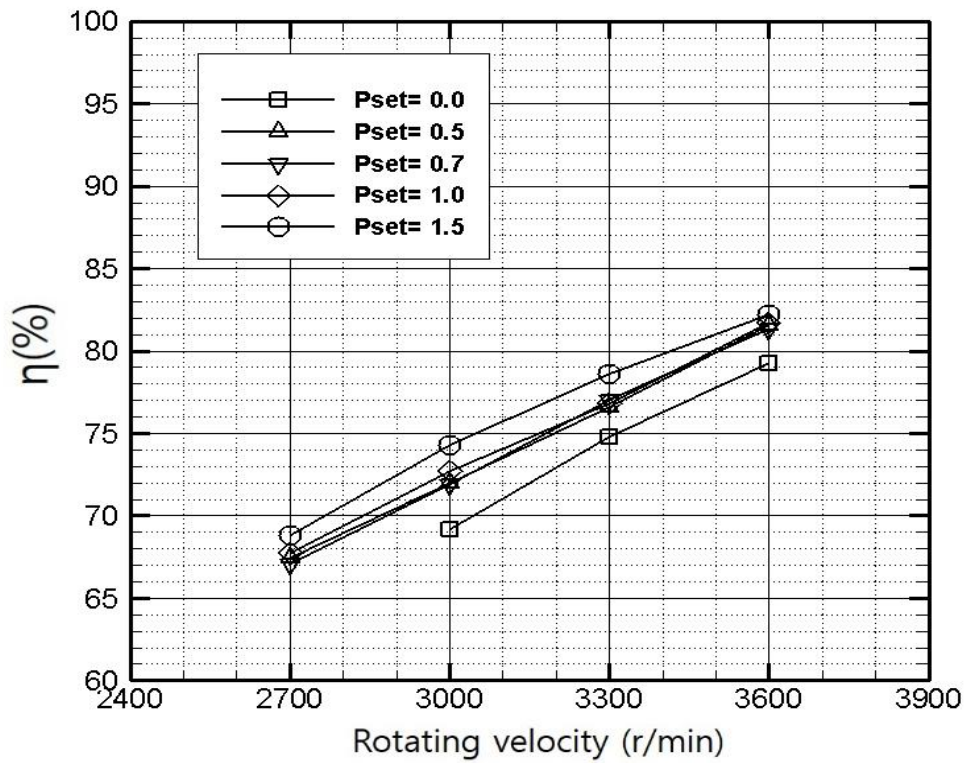
가열장치의 회전 속도에 의한 열 발생량을 알아보기 위하여 가압 펌프의 가동 여부 및 조건별 살균장치의 회전속도를 변경하여 실험을 수행하였으며, 회전속도가 2,700 r/min 미만인 경우 발생열량 및 열효율이 현저히 낮은 것을 확인하여 실험 조건에서 제외하였다.

[그림 46]은 가열장치의 회전속도와 발생열량을 나타낸다. 동일한 입구 압력 조건에서 회전속도를 2,700 r/min에서 3,600 r/min으로 증가할수록 발생열량이 증가하는 것을 확인할 수 있는데 앞서 설명한 [그림 45]의 캐비테이션 수에 대한 결과와 일치하였다.



[그림 47] 회전속도에 따른 열 발생량

[그림 47]은 회전속도와 열효율과의 관계를 나타낸 그래프이다. 열효율의 경우 회전 속도에 의한 영향과 입구 압력에 의한 영향을 비교하여 명확히 규명하기는 어렵지만 입구 압력에 의한 영향보다는 회전 속도에 의한 영향이 더 큰 것으로 확인되었다. 하지만 열효율은 전동기의 과부하로 인한 효율저하를 고려해야 하므로 개별적인 상황에 맞추어 판단해야 한다.



[그림 48] 회전속도에 따른 열효율

[표 11]은 기계적 성능 평가 결과의 주요 데이터들을 열효율 결과와 함께 정리한 것이다. 최대 열효율은 82.18%로 나왔으며, 실험에서 사용된 가압 펌프의 소비 전력은 측정하지 않았다.

살균장치의 운전 조건은 유량, 입구압력, 열효율 등을 모두 고려하여야 한다. 발생열량이 많을 때 열효율이 높게 나오지만 이는 무리한 유량의 공급으로 인한 것이며 전동기의 과부하를 초래할 수 있기 때문이다.

지금까지의 데이터를 통하여 회전속도(rotating velocity)는 증가시키고 입구압력(inlet pressure) 조건은 낮을수록 가열기에서의 cavitation 발생에 유리하다는 것을 확인하였다.

[표 12] 기계적 성능평가 결과 및 열효율

(r/min)	Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/kg°C)	Booster pump set (bar-gage pressure)	P1 (bar)	P2 (bar)	T1 (°C)	T2 (°C)	ΔT (°C)	Flow rate (m ³ /hr)	Heat (kJ/hr)	Energy (kJ/hr)	Efficiency (%)
3,000	996.81	4.179	$P_{set} = 0$	0.65	1.18	27.88	38.20	10.3 2	0.61	23,472. 06	33,930. 14	69.18
3,300	996.71	4.179		0.59	1.13	28.23	40.36	12.1 3	0.66	33,241. 20	44,467. 92	74.75
3,600	996.38	4.179		0.53	1.14	29.41	43.61	14.2 0	0.70	41,114. 50	51,866. 78	79.27
2,700	996.30	4.179	$P_{set} = 0.5$	1.27	1.19	29.69	35.64	5.95	0.88	21,882. 85	32,435. 42	67.47
3,000	996.31	4.179		1.22	1.17	28.59	35.86	7.27	0.93	28,233. 76	39,236. 40	71.96
3,300	997.37	4.180		1.17	1.17	25.66	34.66	9.00	0.96	36,130. 32	47,158. 42	76.61
3,600	995.61	4.179		1.17	1.14	32.00	42.68	10.6 8	1.02	45,403. 13	55,678. 32	81.55
2,700	995.97	4.179	$P_{set} = 0.7$	1.40	1.12	30.82	36.21	5.39	0.99	22,103. 47	32,958. 58	67.06
3,000	995.53	4.179		1.39	1.27	32.24	39.14	6.90	1.00	28,581. 16	39,759. 55	71.89
3,300	994.31	4.179		1.40	1.37	35.88	44.56	8.68	1.02	36,667. 63	47,606. 83	77.02
3,600	994.43	4.179		1.34	1.25	35.53	45.82	10.2 9	1.07	45,965. 21	56,500. 42	81.35
2,700	996.49	4.179	$P_{set} = 1.0$	1.60	1.20	29.03	34.12	5.09	1.07	24,099. 54	35,574. 34	67.74
3,000	996.49	4.179		1.56	1.22	29.02	35.44	6.42	1.10	29,396. 90	40,432. 18	72.71
3,300	996.64	4.179		1.51	1.17	28.48	36.34	7.86	1.14	37,258. 42	48,503. 66	76.82
3,600	996.55	4.179		1.47	1.20	28.82	38.44	9.62	1.16	46,483. 81	56,874. 10	81.73
2,700	996.35	4.179	$P_{set} = 1.5$	1.94	1.28	29.53	34.22	4.69	1.21	23,603. 98	34,303. 82	68.81
3,000	996.06	4.179		1.90	1.28	30.51	36.46	5.95	1.25	30,875. 04	41,553. 22	74.30
3,300	996.11	4.179		1.86	1.30	30.35	37.67	7.32	1.28	39,063. 12	49,699. 44	78.60
3,600	996.09	4.179		1.75	1.24	30.41	39.48	9.07	1.28	48,149. 26	58,593. 02	82.18

6. 고온단시간 살균장비의 설계형상별 효율 분석을 위한 성능실험 수행

가. 설계형상별 기계적 성능평가

고온단시간 살균장비의 덤플 위치에 따른 공동현상 발생 성능의 비교 분석을 위하여 물을 이용한 기계적 성능평가를 실시하였다. 회전모터에 발생하는 부하를 고려하여 가압펌프의 압력조건을 $P_{set} = 0.5 \text{ bar} \sim 1.1 \text{ bar}$ 범위에서 변경하여 실험을 수행하였다.

[표 12]에 설계형상별 효율실험의 실험조건을 나타내었다. 이전 데이터를 바탕으로 회전속도는 3,600 rpm으로 고정하였고, 각 압력 단계별로 입구/출구압력, 유량, 온도 등의 데이터를 수집하였다. 모든 데이터의 획득은 살균장치의 운전 시작 후 전동기가 정상 상태라고 판단되어 질 때 수집하였다. 정상 상태의 판단은 살균장치 출구 온도의 변화가 0.1°C 미만 일 때로 판단하였다.

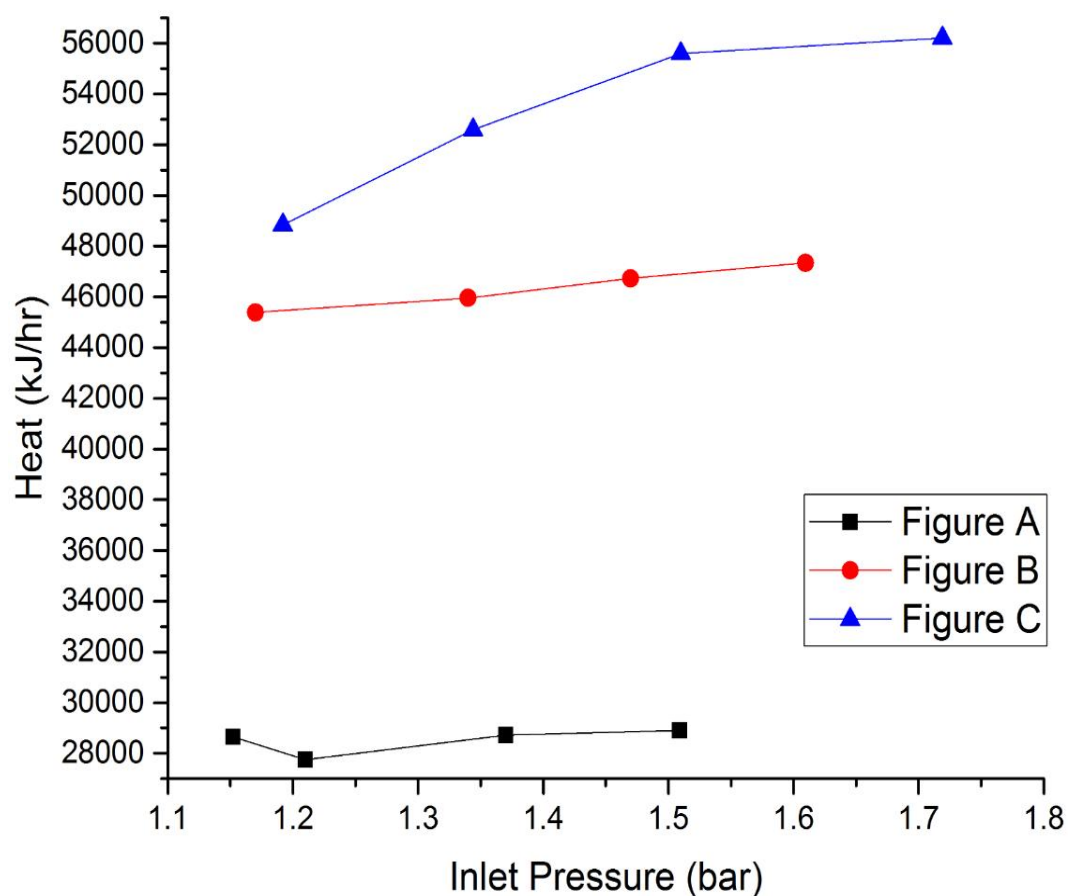
[표 13] 수력학적 공동현상 발생장치의 실험 조건

Booster Pump Setting (Bar-gage Pressure)	Design		
$P_{set} = 0.5$	Figure A	Figure B	Figure C
$P_{set} = 0.7$			
$P_{set} = 0.9$			
$P_{set} = 1.1$			

* 회전속도 : 3,600 rpm

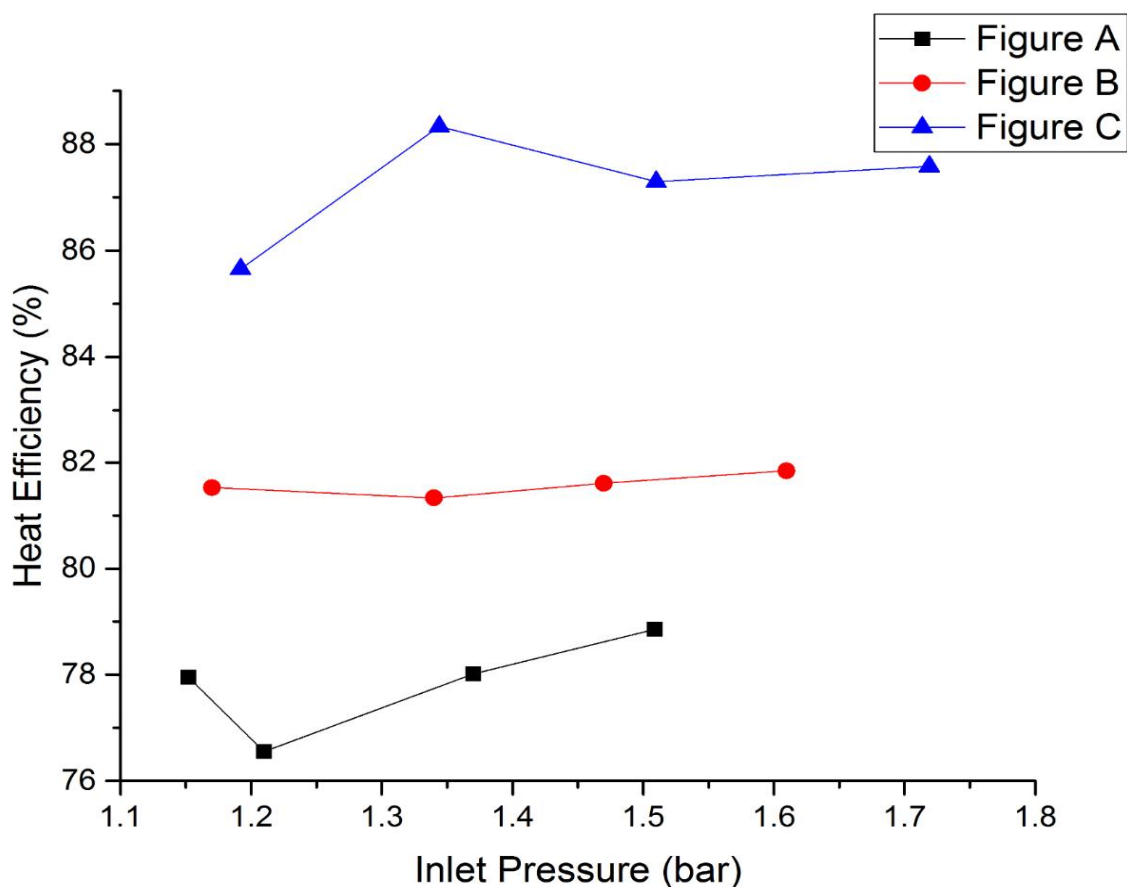
[표 12]의 각 실험조건에 따라 일반 용수를 이용하여 기계적 성능 실험을 수행하였다. 공동현상 수(C_v), 순간상승온도(ΔT)와 열효율(η)은 입구 압력(P), 유량(Q), 전동기 회전속도(w_r)의 실험조건에 의해서 결정된다. 각 요소에 대한 정의는 식(1) ~ (4)에 기술되어 있다.

입구압력에 따른 열 발생량은 [그림 48]에 나타내었다. 형상A 이외의 경우에서 $P_{set} = 0.5$ 의 열 발생량이 제일 적은 경향을 보였다. 이후 압력이 증가하면서 점차 열 발생량이 선형적으로 증가하게 되는데, 형상A는 $P_{set} = 0.7$ 에서 가장 낮은 열 발생량을 보이지만 전체적으로 압력조건의 변화에 따른 열 발생량 변화가 미미하므로 오차범위 안에서 거의 변화가 없다고 생각된다. 최대 열 발생량은 형상C의 $P_{set} = 1.1$ 에서 56,204 kJ/hr 로 나타났다.



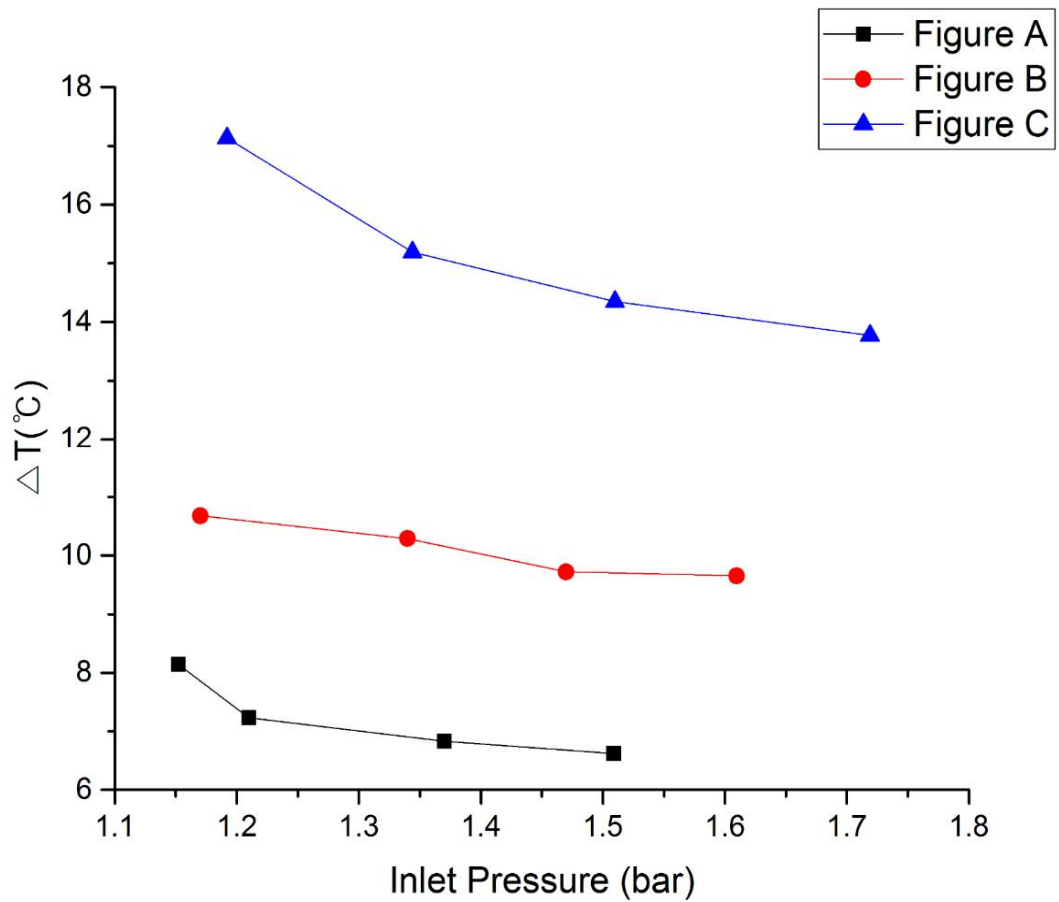
[그림 49] 입구압력에 따른 열 발생량

입구압력의 변화에 따른 열효율은 [그림 49]에 나타내었다. 형상A 에서는 $P_{set} = 0.7$ 에서 가장 낮은 열 발생량을 보였고, 그에 따라 모터동력 소모량도 감소하나 열 발생량의 감소폭이 더 큰 관계로 열효율이 가장 낮게 나타났다. 형상B 에서는 입구압력의 증가에 따라 열효율이 선형적으로 증가하였으며, 형상C 에서는 $P_{set} = 0.7$ 까지 열효율이 상승하지만 이후 감소하게 되었다.



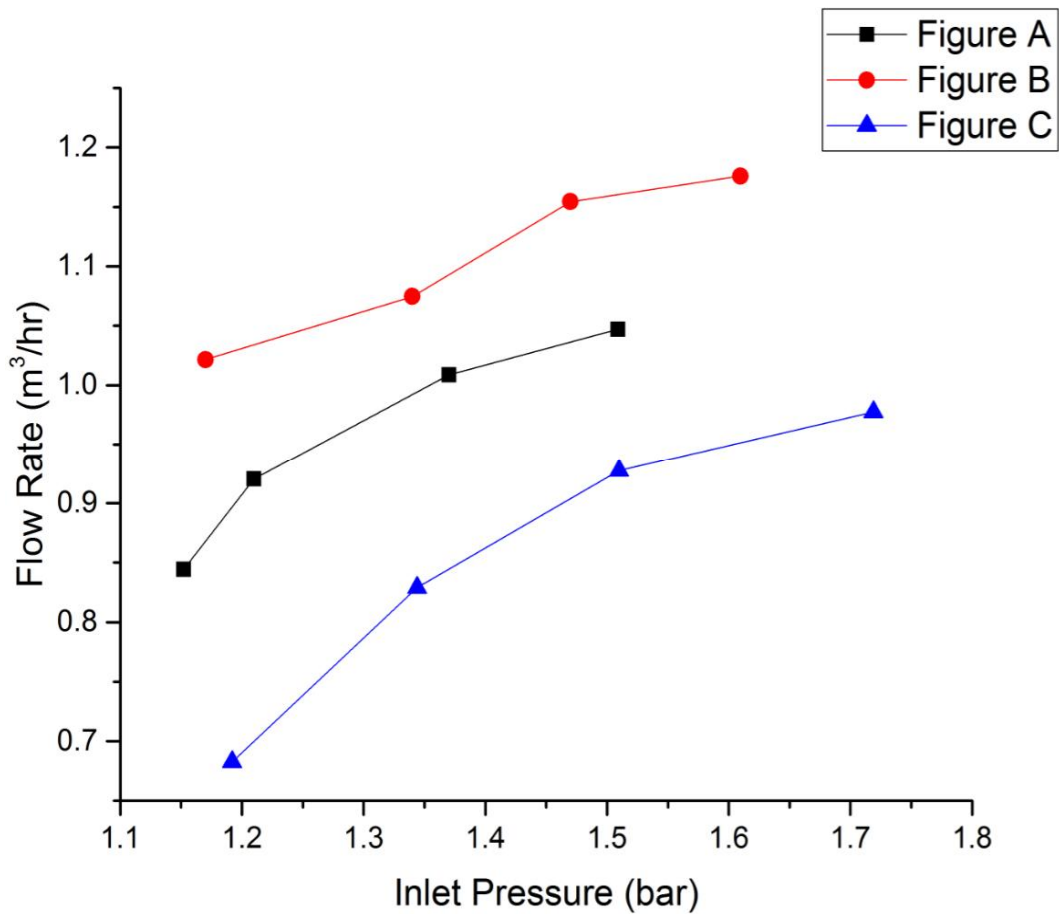
[그림 50] 입구압력에 따른 열효율

입구압력에 따른 순간상승온도는 [그림 50]에 나타내었다. 모든 형상에서 압력이 증가하면 순간상승온도가 감소하고 유량이 증가하게 된다. 제한된 열 발생량에서 비압축성 유체가 가압되면서 유량이 증가하여 식(3)에 의해 결과적으로 순간상승온도가 감소하였기 때문이다.



[그림 51] 입구압력에 따른 온도변화

입구압력에 따른 유량 변화는 [그림 51]에 나타내었다. 입구압력의 변화에 따라 유량이 점차 증가하게 된다. 세 형상 모두 경향은 동일하게 선형 증가형태로 나타났다. 입구압력에 따른 유량변화는 형상별로 상이하게 나타나는데 이는 로터 양면의 덤플이 일종의 임펠러 역할을 수행하기 때문으로 판단된다. 이 때문에 형상A와 형상B 사이에서 전반적인 유량 증가가 있음을 확인 할 수 있었다. 형상C에서는 로터의 가장자리에 덤플이 추가되어 유체의 흐름이 공동현상으로 인해 방해 받아 유량이 감소하게 되었다.



[그림 52] 입구압력에 따른 유량변화

[표 13]에 성능실험 결과의 주요 데이터를 나타내었다. 형상A에서는 열 발생량 및 모터 소모 동력이 모두 낮게 나타났다. 이는 모터의 동력을 열로 변환해야 할 덤플의 총 갯수가 제한되기 때문이다. 열 발생량은 형상C의 $P_{set} = 1.1$ 에서 가장 높게 나타났다. 압력이 증가할수록 열 발생량은 지속적으로 증가하지만, 일정 압력을 지나게 되면 모터 소모동력이 급격히 증가하여 열효율은 오히려 감소하는 경향을 보인다. 또한 모터최대동력 범위 (60,000 kJ/hr)를 초과하게 되어 전류가 간헐적으로 차단되는 현상이 나타나게 된다.

따라서 상기 데이터를 통하여 살균실험을 진행하게 될 경우 모터 부하 및 최적 열효율을 고려하여 형상C의 $P_{set} = 0.5$ 에서 진행하는 것이 유리하다고 생각된다.

[표 14] 기계적 성능평가 결과 및 열효율

Figure	Density (kg/m ³)	Specific heat (kJ/kg℃)	Booster pump set (bar-gage pressure)	P1 (bar)	P2 (bar)	T1 (℃)	T2 (℃)	ΔT (℃)	Flow rate (m ³ /hr)	Heat (kJ/hr)	Energy (kJ/hr)	Efficiency (%)
A	997.77	4.179	$P_{set} = 0.5$	1.15	1.09	23.97	32.11	8.14	0.84	28653.07	36759.29	77.95
	997.74	4.179	$P_{set} = 0.7$	1.21	1.11	24.11	31.34	7.23	0.92	27746.14	36243.26	76.56
	997.71	4.179	$P_{set} = 0.9$	1.37	1.19	24.22	31.05	6.83	1.01	28722.12	36814.27	78.02
	997.71	4.179	$P_{set} = 1.1$	1.51	1.24	24.24	30.86	6.62	1.05	28898.79	36646.82	78.86
B	995.61	4.179	$P_{set} = 0.5$	1.17	1.14	32.00	42.68	10.68	1.02	45391.14	55678.32	81.52
	994.43	4.179	$P_{set} = 0.7$	1.34	1.25	35.53	45.82	10.29	1.07	45952.59	56500.42	81.33
	996.55	4.179	$P_{set} = 0.9$	1.47	1.20	28.82	38.54	9.72	1.15	46729.82	57261.87	81.61
	997.73	4.179	$P_{set} = 1.1$	1.61	1.33	24.14	33.80	9.65	1.18	47337.34	57840.52	81.84
C	999.28	4.179	$P_{set} = 0.5$	1.19	1.08	15.36	32.49	17.13	0.68	48843.78	57023.33	85.66
	999.23	4.179	$P_{set} = 0.7$	1.34	1.10	15.70	30.89	15.19	0.83	52596.44	59544.30	88.33
	999.29	4.179	$P_{set} = 0.9$	1.51	1.37	15.26	29.61	14.35	0.93	55587.42	63677.11	87.30
	999.29	4.179	$P_{set} = 1.1$	1.72	1.54	15.24	29.01	13.77	0.98	56204.52	64174.06	87.58

나. 고온단시간 살균장비에 대한 살균력 평가

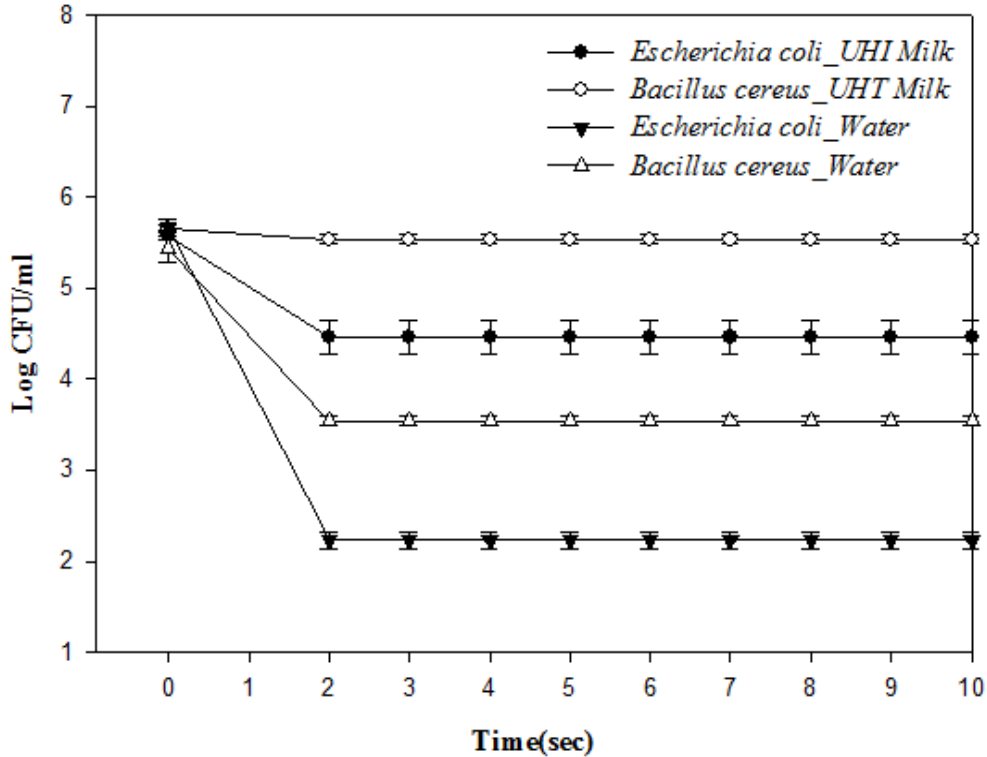
고온단시간 살균장비의 덤플 위치에 따른 공동현상 발생 성능실험에서 형상 A는 열 발생량 및 열효율 모두 형상 B, C보다 현저히 낮게 나타났기에, 형상A에 대한 살균실험은 수행하지 않았다. 기계적 성능실험 결과에 따라 형상 B, C 중 모터 부하 및 최적 열효율을 고려하여 형상 C를 대상으로 살균실험을 진행하였으며, 운전조건은 $P_{set} = 0.5$, 3,600 rpm으로 고정하고 시료 용량은 60 L로 설정하여 살균력 실험을 수행하였다.

[표 14]와 [그림 52]는 고온단시간 살균장비를 이용해 *E. coli*와 *B. cereus*를 접종시킨 UHT 우유 및 물을 40°C의 입구온도와 60°C의 퇴출온도로 설정하여 실험한 결과이다. 이때 UHT우유에 접종시킨 *E. coli*와 *B. cereus*의 살균 처리 전 균수는 각각 5.58 ± 0.07 , 5.66 ± 0.57 log CFU/ml 이다. 고온단시간 살균장비를 이용해 UHT 우유를 약 2초 미만으로 살균한 결과, *E. coli*와 *B. cereus* 각각 1.11 ± 0.05 , 0.12 ± 0.48 log CFU/ml 감소하였다. 물에 접종시킨 *E. coli*와 *B. cereus*의 살균 처리 전 균수는 각각 5.67 ± 0.17 , 5.43 ± 0.25 log CFU/ml 이었다. 고온단시간 살균장비를 이용해 물을 약 2초미만으로 살균한 결과, *E. coli*와 *B. cereus* 각각 3.44 ± 0.01 , 1.89 ± 0.16 log CFU/ml 감소하였다. 고온단시간 살균장비를 이용해 UHT우유와 물의 살균력 비교 실험결과 60°C의 퇴출 온도에서 살균 실험결과, 약 1~3 log CFU/ml 의 감소 경향을 보이며, 우유보다 물에서 *E. coli*는 39.01%, *B. cereus*는 32.69% 더 높은 살균력을 나타냈다. ($p < 0.05$)

[표 15] 고온단시간 살균장비의 UHT우유와 물에 대한 살균 실험

	Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp. (°C)	ΔT (°C)	Non-treatment (Log CFU/ml \pm SD)	Treatment (Log CFU/ml \pm SD)	LR ¹⁾
UHT Milk	<i>Escherichia coli</i>	40.0 / 60.0	20	5.58 ± 0.07	4.47 ± 0.30	1.11 ± 0.05
	<i>Bacillus cereus</i>			5.66 ± 0.57	5.54 ± 0.09	0.12 ± 0.48
Water	<i>Escherichia coli</i>			5.67 ± 0.17	2.23 ± 0.16	3.34 ± 0.01
	<i>Bacillus cereus</i>			5.43 ± 0.25	3.54 ± 0.09	1.89 ± 0.16

1) Log Reduction



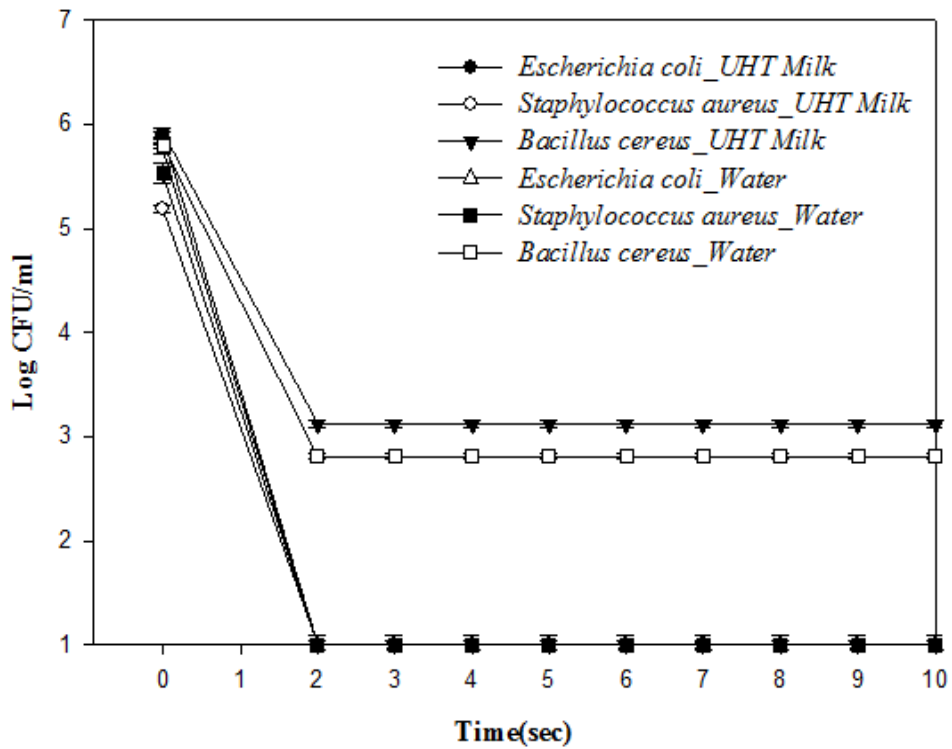
[그림 53] 고온단시간 살균장비의 UHT 우유와 물에 대한 살균실험 결과

[표 15]와 [그림 53]은 고온단시간 살균장비를 이용해 *E. coli*와 *S. aureus* 그리고 *B. cereus*를 접종시킨 UHT 우유 및 물을 40℃의 입구온도와 70℃의 퇴출온도로 설정하여 실험한 결과이다. 이때 UHT우유에 접종시킨 *E. coli*와 *S. aureus* 그리고 *B. cereus*의 살균 처리 전 균수는 각각 5.89 ± 0.05 , 5.19 ± 0.06 , 5.92 ± 0.08 log CFU/ml 이다. 고온단시간 살균장비를 이용해 UHT 우유를 약 2초미만으로 살균한 결과, *E. coli*와 *S. aureus* 두 균은 불검출로 나타났으며, *B. cereus*는 2.80 ± 0.11 log CFU/ml 감소하였다. 물에 접종시킨 *E. coli*와 *S. aureus* 그리고 *B. cereus*의 살균 처리 전 균수는 각각 5.76 ± 0.07 , 5.53 ± 0.16 , 5.80 ± 0.05 log CFU/ml 이다. 고온단시간 살균장비를 이용해 물을 2초미만으로 살균한 결과, *E. coli*와 *S. aureus* 두 균은 불검출로 나타났으며, *B. cereus*는 2.99 ± 0.08 log CFU/ml 감소하였다. 고온단시간 살균장비를 이용해 UHT 우유와 물의 살균력 비교 실험결과, 70℃의 퇴출온도에서 *E. coli*와 *S. aureus*는 모두 사멸되었으며 *B. cereus*는 우유보다 물에서 살균력이 4.25% 더 높게 나타났다.($p < 0.05$)

[표 16] 고온단시간 살균장비의 UHT우유와 물에 대한 살균력 평가

Spoilage organism		Inlet/Outlet Temp.(°C)	ΔT (°C)	Non-treatment (Log CFU/ml±SD)	Treatment (Log CFU/ml±SD)	LR ¹⁾
UHT Milk	<i>Escherichia coli</i>	40.0 / 70.0	30	5.89±0.05	ND ²⁾	5.89
	<i>Staphylococcus aureus</i>			5.19±0.06	ND	5.19
	<i>Bacillus cereus</i>			5.92±0.08	3.12±0.07	2.80±0.11
Water	<i>Escherichia coli</i>			5.76±0.07	ND	5.76
	<i>Staphylococcus aureus</i>			5.53±0.16	ND	5.53
	<i>Bacillus cereus</i>			5.80±0.05	2.81±0.04	2.99±0.08

1) Log Reduction
2) Non-Detection



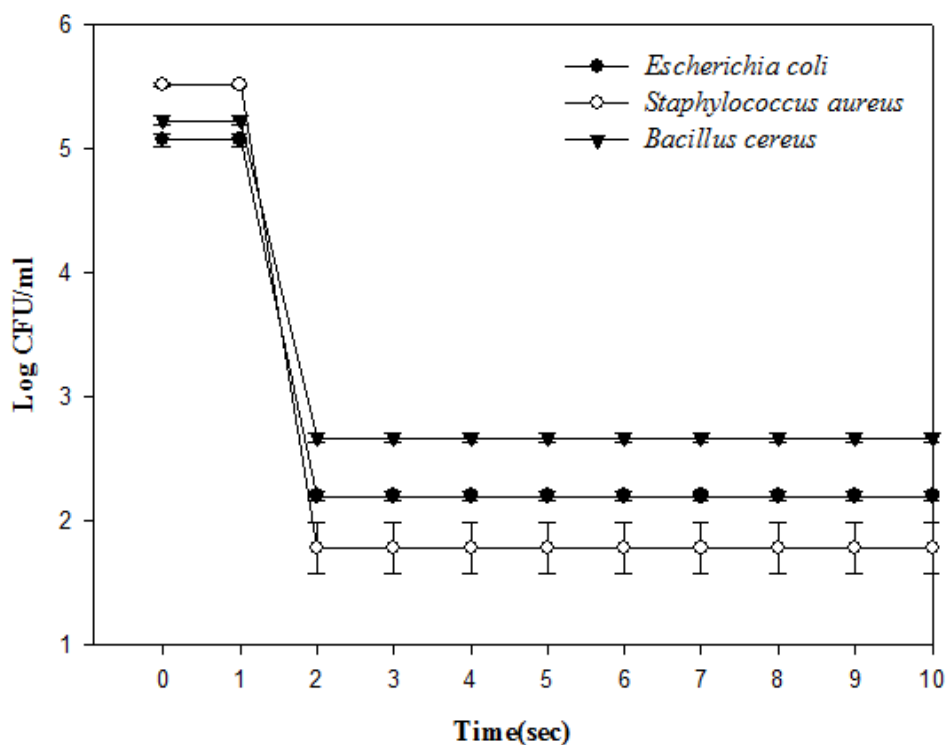
[그림 54] 고온단시간 살균장비의 UHT 우유와 물에 대한 살균력 평가

[표 16]과 [그림 54]는 고온단시간 살균장비를 이용해 *E. coli*와 *S. aureus* 그리고 *B. cereus*를 접종시킨 물을 45℃의 입구온도와 70℃의 퇴출온도로 설정하여 실험한 결과이다. 이때 물에 접종시킨 *E. coli*와 *S. aureus* 그리고 *B. cereus*의 살균 처리 전 균수는 각각 5.07 ± 0.08 , 5.52 ± 0.03 과 5.23 ± 0.07 log CFU/ml 이다. 고온단시간 살균장비를 이용해 물을 약 2초미만으로 살균한 결과, *E. coli*와 *S. aureus* 그리고 *B. cereus* 각각 2.87 ± 0.05 , 3.74 ± 0.37 , 2.56 ± 0.09 log CFU/ml의 감소를 보였다.

[표 17] 고온단시간 살균장비를 이용한 물 살균 실험

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp. (°C)	ΔT (°C)	Non-treatment (Log CFU/ml±SD)	Treatment (Log CFU/ml±SD)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>			5.07 ± 0.08	2.20 ± 0.07	2.87 ± 0.05
<i>Staphylococcus aureus</i>	45.0 / 70.0	25	5.52 ± 0.03	1.78 ± 0.35	3.74 ± 0.37
<i>Bacillus cereus</i>			5.23 ± 0.07	2.67 ± 0.06	2.56 ± 0.09

1) Log Reduction



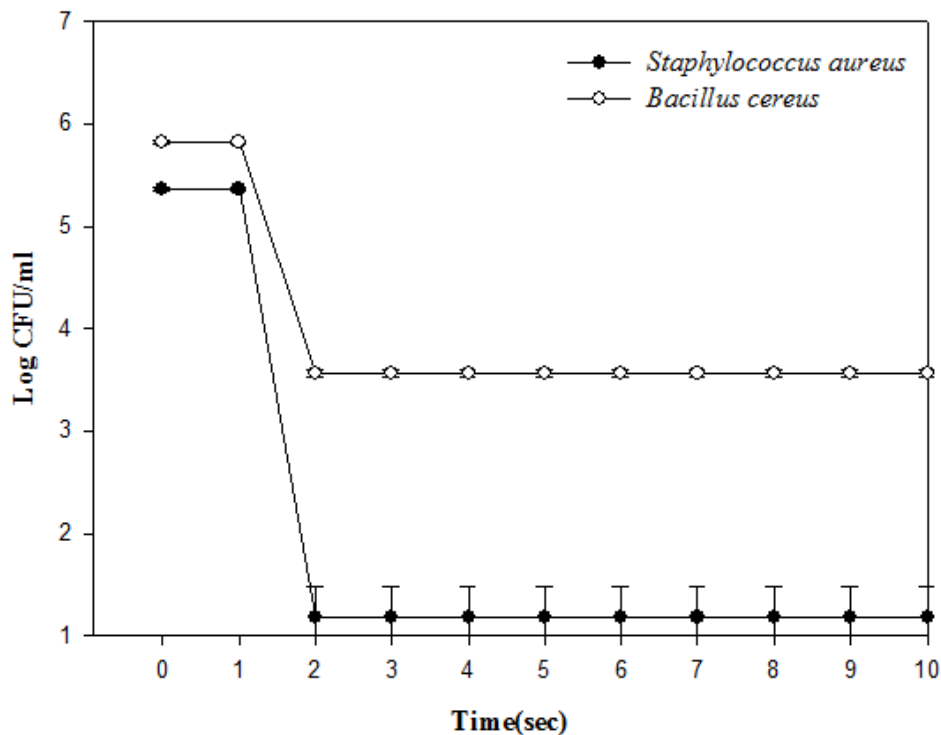
[그림 55] 고온단시간 살균장비를 이용한 물 살균실험

[표 17]과 [그림 55]는 고온단시간 살균장비를 이용해 *S. aureus*와 *B. cereus* 접종시킨 UHT 우유를 50℃의 입구온도와 70℃의 퇴출온도로 설정하여 실험한 결과이다. 이때 UHT우유에 접종시킨 *S. aureus*와 *B. cereus*의 살균 처리 전 균수는 각각 5.36 ± 0.04 , 5.82 ± 0.03 log CFU/ml 이다. 고온단시간 살균장비를 이용해 UHT 우유를 2초미만으로 살균한 결과, *S. aureus*와 *B. cereus* 각각 4.18 ± 0.49 , 2.26 ± 0.09 log CFU/ml 감소하였다.

[표 18] 고온단시간 살균장비의 UHT 우유 살균 실험

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	$\Delta T(℃)$	Non-treatment (Log CFU/ml±SD)	Treatment (Log CFU/ml±SD)	LR ¹⁾
<i>Staphylococcus aureus</i>	50.0 / 70.0	20	5.36 ± 0.04	1.18 ± 0.52	4.18 ± 0.49
<i>Bacillus cereus</i>			5.82 ± 0.03	3.56 ± 0.07	2.26 ± 0.09

1) Log Reduction



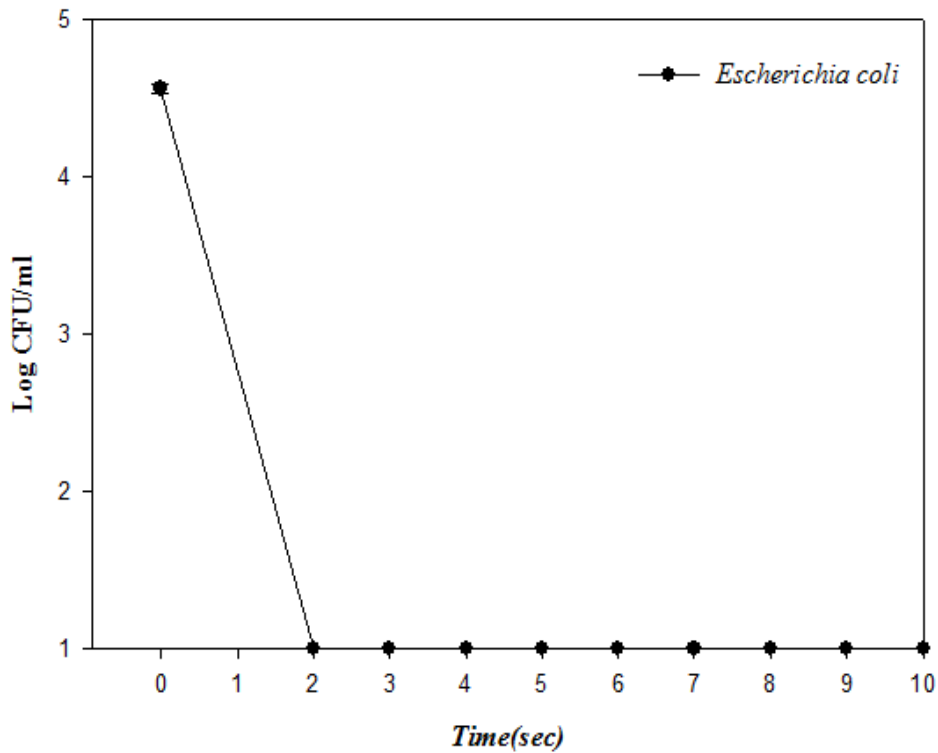
[그림 56] 고온단시간 살균장비를 이용한 UHT우유 살균 실험

[표 18]과 [그림 56]은 고온단시간 살균장비를 이용해 *E. coli*를 접종시킨 UHT 우유를 50℃의 입구온도와 75℃의 퇴출온도로 설정하여 실험한 결과이다. 이때 UHT우유에 접종시킨 *E. coli*의 살균 처리 전 균수는 4.56 ± 0.05 log CFU/ml 이다. 고온단시간 살균장비를 이용해 UHT 우유를 2초미만으로 살균한 결과, *E. coli*은 불검출로 나타났다.

[표 19] 고온단시간 살균장비를 이용한 UHT 우유 살균 실험

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	$\Delta T(℃)$	Non-treatment (Log CFU/ml \pm SD)	Treatment (Log CFU/ml \pm SD)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	50.0 / 75.0	25	4.56 ± 0.05	ND ²⁾	4.56 ± 0.05

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection



[그림 57] 고온단시간 살균장비를 이용한 UHT우유 살균실험

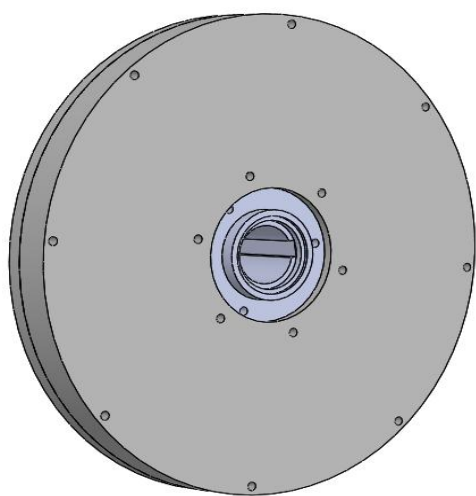
7. 수치해석을 통한 55kw 살균장치의 공동현상 생성, 발달의 열 발생구조 예측

공동현상은 날카로운 모서리나 콘 모양의 덩플 등이 유동장에 존재할 때 포화증기압보다 높은 압력에서 공동현상의 시작이 가능하다. 이러한 구조는 공동현상의 발달에도 도움을 주는데, 이를 고려하여 기존의 15kw급 살균장치에 대한 수치해석으로 공동현상을 가속화시키는 내부 덩플 형상의 구조를 결정하여 회전체(Rotor), 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover) 표면에 덩플을 구성하여 설계하였다. 실증실험을 통해 살균장치의 운전조건별 발생열량, 효율, 살균성능을 평가하였으며 연구결과를 55kw급 살균장치의 내부설계에 반영하여 설계하기 위해 수치해석을 진행하였다.

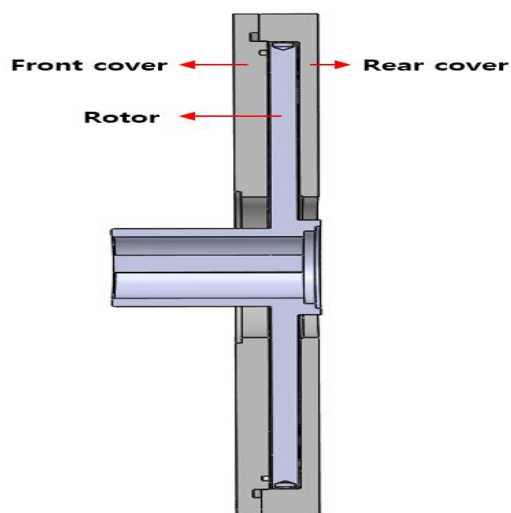
15kw급 살균장치의 뒷덮개(Rear cover)에는 1개의 출구부가 구성되어있으며 살균된 용액이 토출되어 출구 배관라인 내부에서 이동하게 된다. 출구부 배관라인 내부는 외부의 물탱크(Waste tank)와 연결되어있으며 따라서 대기압조건을 형성하게 되고 살균장치 내부 유동영역의 출구부 근처에서 상대적으로 낮은 압력분포를 갖게 된다. 따라서 살균장치의 운전 시 공동현상의 발생정도가 균일하지 못하고 출구부 주변에서 더 많이 야기 되게 된다. 실제로 실증실험을 진행한 후 뒷덮개(Rear cover) 출구부 주변 표면에서 기계적 손상이 상대적으로 많이 관찰되었다. 이는 15kw급 살균장치의 수치해석을 통한 압력분포 결과와 동일하며 55kw급 살균장치 개발에서는 내부유동 영역의 균일 압력분포를 구성하고 공동현상 발생구조를 예측하기 위해 수치해석을 진행하였다.

전산유체역학(CFD) 모형 구축에 수반되는 공통된 수치해석 절차에 의하여, 우선 각각의 해석대상에 대한 3D 모델링을 수행하였다. 일반적인 상용 모델링 프로그램 중 하나인 SolidWorks를 이용하여 2D 도면을 3D형상으로 변환하는 작업을 수행하였으며, 유동이 형성되는 해석 도메인(analysis domain)을 추출하는 과정에 있어 유동해석에 불필요한 부분 혹은 격자 건전성을 저하하는 형상에 대한 모델링(simplification) 작업 또한 병행하였다. 수치해석 프로그램은 ANSYS v17.0 내의 유동해석 모듈인 Fluent를 이용하였다. 수치해석의 전처리(pre-processing) 과정으로서 모델링된 해석 도메인에 격자(mesh)를 생성하였으며, 적절한 경계조건(boundary condition) 및 해석 방법을 부여하여 수치계산을 수행하였다.

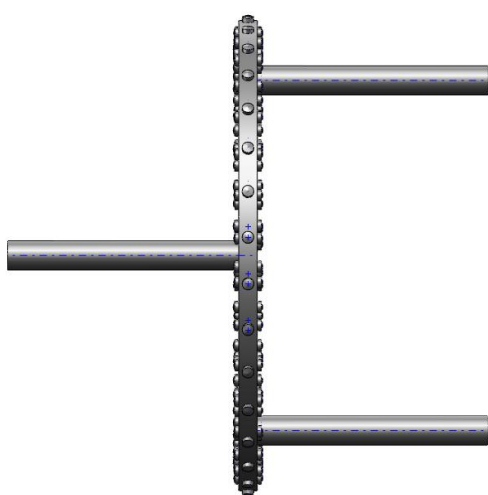
[그림 57]에서 보는 바와 같이 수치해석에 필요한 가열기의 형상을 3차원 영역으로 설정하여 해석영역을 설정하였다. 유동해석은 용액이 유입, 유출되는 입구부와 출구부, 그리고 공동현상이 발생하는 회전부(Rotor), 앞덮개(Front cover), 뒷덮개(Rear cover) 부품으로 간략화 되었으며 실제 유동해석에 영향을 미치지 않는 부분은 사전에 배제하여 solid part 모델을 도출하였다. 회전조건을 갖는 회전부와 이를 둘러싸고 있는 앞덮개, 뒷덮개와의 간극은 모두 2 mm로 하였다. 이 간극은 살균장치의 운전조건에 해당하는 입구부, 출구부의 압력과 유량을 고려하여 조정될 수 있다. 간극이 작아질수록 공동현상의 가속화를 예상할 수 있으나 수치해석을 수행하는데 있어서 매우 작은 간극은 격자 건전성을 저하하기 때문에 위와 같이 설정하였다.



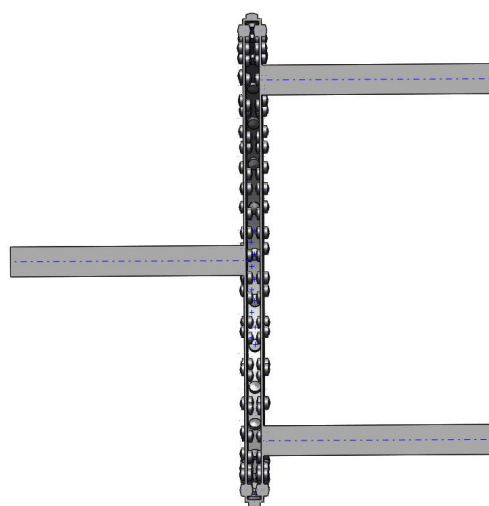
(a) 가열기 형상



(b) 단면도



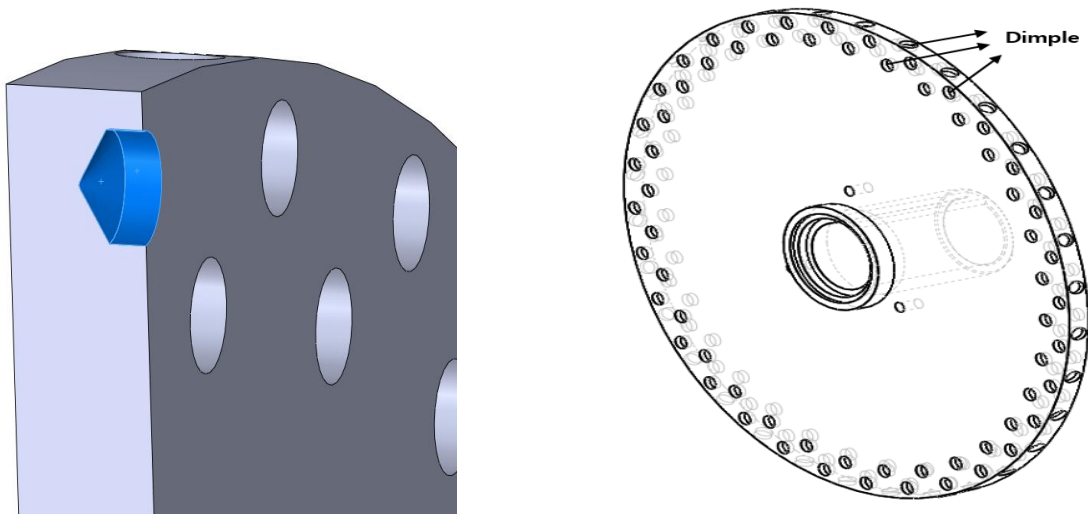
(c) 유로 형상



(d) 단면도

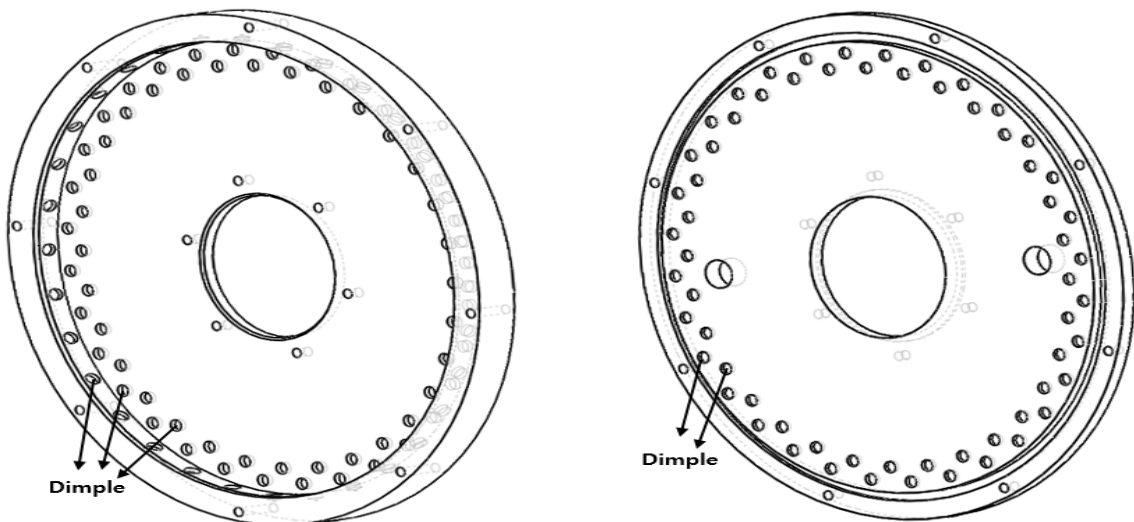
[그림 58] 가열기의 3D 형상 모델링

딴플의 단일형상 조건으로는 15 kw 살균장치 수치해석에서 공동현상으로 발생하는 기포의 체적분율을 통해 가장 우수한 형상조건인 원통(cylinder)형과 원뿔(cone)이 결합되어 있는 형태로 고안하여 적용하도록 하였다. 딴플의 배열 및 위치의 경우 실증실험을 통해 회전축에서 거리가 멀수록 그리고 그 개수가 증가할수록 공동현상의 가속화에 유리함을 입증한 결과를 바탕으로 아래의 [그림 58]과 같이 회전부(Rotor)의 양쪽 표면과 원주방향, 앞덮개(Front cover), 뒷덮개(Rear cover)의 양쪽표면과 원주방향에 구성하였으며 양쪽 표면의 경우 총 2개의 동심원을 기준으로 동일 간격으로 이중 구성하도록 하였다.



(a) 원통형과 원뿔형이 결합된 단일 딴플형상

(b) 회전부(Rotor) 딴플 구성도



(c) 앞덮개(Front cover) 딴플 구성도

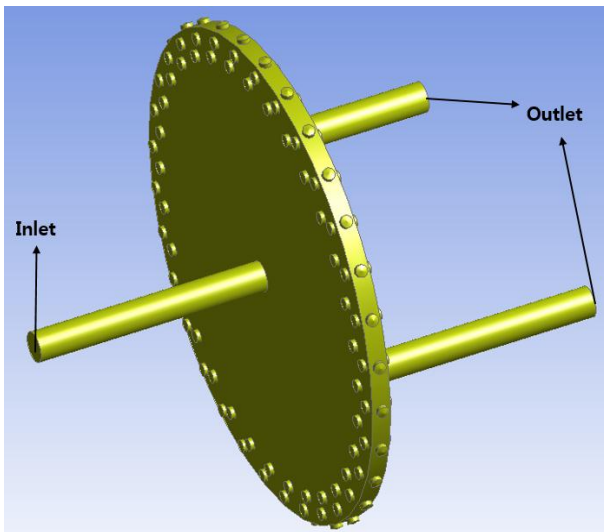
(d) 뒷덮개(Rear cover) 딴플 구성도

[그림 59] 단일 딴플형상 및 가열기 각 파트별 딴플 구성도

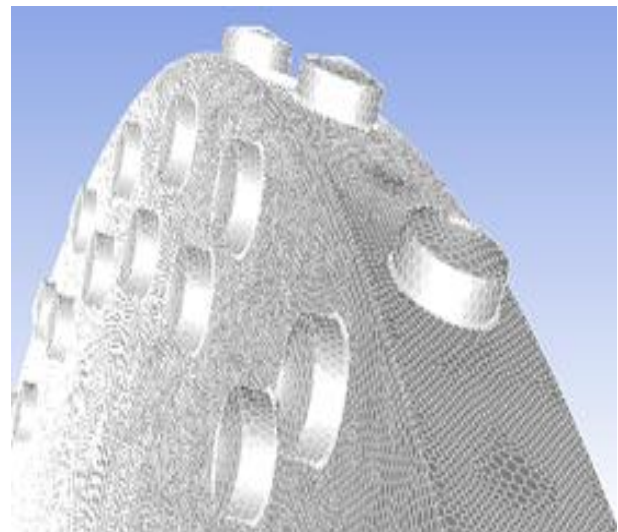
[표 20] 가열기 각 파트별 가공된 덩플 수

Part	양쪽표면(Surface) 덩플 수	원주방향(Edge) 덩플 수	
회전부(Rotor)	128	32	
덮개 (Cover)	앞덮개 (Front cover)	64	32
	뒷덮개 (Rear cover)	64	-

해석 모델의 선택 및 경계 조건의 선정만큼이나 중요한 요소는 격자의 건전성이라 할 수 있는데, [그림 59]와 같이 해석 모델이 단순한 형태를 가지고 있으나 매우 좁은 영역을 포함하고 있어 해당 영역에 대한 격자 생성이 중요하였다. 해석 방법 또한 격자를 생성하는데 있어서 고려하여야 한다. 수치해석에 적용된 난류(Turbulence) 모델은 일반적으로 공학용으로 가장 많이 사용되는 Standard k-epsilon 모델에서 변형된 Realizable k-epsilon 모델을 사용하였다. Realizable k-epsilon 모델은 highly strained flow 및 swirling flow 예측에 우수하며, 다른 모델보다 계산시간이 적으며 정확하게 수립할 가능성을 갖는 장점을 가지고 있어 선택하였다. 기본적인 사면체 격자를 생성할 경우 격자수가 13,634,527개로 생성되는데 계산시간 속도를 높이기 위하여 12면체로 격자를 변환하여 3,944,842개의 격자를 생성하여 격자수 감소를 통한 CPU time을 감소시킬 수 있었다. 아래의 [그림 60]은 유동장 해석 영역의 격자 생성 형태를 나타낸다.

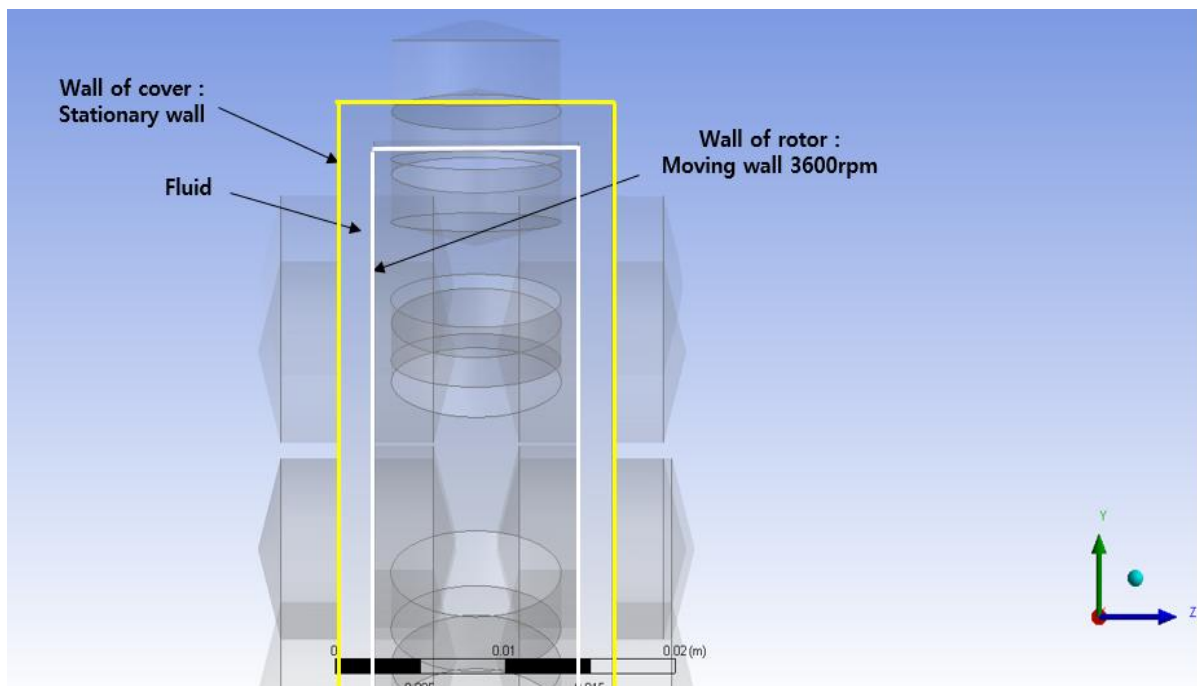


[그림 60] 유동장 해석 영역



[그림 61] 격자 생성 형태

다상유동 모델은 단일 유체 접근 방식을 이용한 해석 기법이며, 국부적인 평형 상태를 가정하여 계면의 힘은 오직 점성항력(viscous drag force)에 의해서만 결정된다. Fluent에 적용된 cavitation 모델은 액상(liquid phase)에서 단일 증기 기포(vapor phase)의 성장에 대해 기술한 Rayleigh-Plesset 방정식을 기반으로 개발된 수치모델로 기포의 생성(evaporation)과 소멸(condensation)을 고려하여 수치해석을 진행하게 된다. Fluent에 적용된 3가지의 cavitation 모델 중 Schnerr and Sauer의 모델은 다른 모델들보다 빠른 수렴성을 가진 강건(robust)한 모델로 다상유동 및 Fluent의 모든 난류 모델과 함께 사용할 수 있어 Schnerr and Sauer 모델을 선택하여 본 연구에서의 가열기 내부의 유동장 해석에 적용하였다. Cavitation 모델은 조직적인 공동현상이 발생하기 이전에 실제적인 압력 영역을 해석하는데 유용하게 사용될 수 있다. 먼저 액체의 단상에 대한 유동해석을 수행하고, 수렴한 이후 cavitation 모델을 활성화하여 수치해석을 수행하였으며, Primary phase는 물(water), Secondary phase는 증기(Vapor)로 설정하였다. [그림 61]과 같이 입구부(inlet)와 출구부(outlet)의 경계조건으로서 일정한 유량이 유입되는 것을 토대로 속도 경계조건 및 압력 일정(대기압) 조건을 사용하였으며, 가열기의 벽면조건으로는 벽면점착(No slip) 조건으로 설정하였다. 회전체(rotor)의 회전조건을 설정하기 위해 해석 영역을 두 개의 영역으로 나누어 생성하였으며, [그림 61]과 같이 회전부(Rotor)와 이를 감싸고 있는 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover)에 wall motion을 부여하여 운전조건을 모사하도록 하였다. 회전부는 Moving wall 조건으로 3,600 rpm 속도로 회전하며 앞덮개, 뒷덮개는 Stationary wall 조건으로 정지 상태에 있다. Fluid 영역은 입구부로 들어오는 살균용액이 유동하는 영역이며 회전부의 운동으로 인해 유동하게 된다. [표 20]은 전체적인 수치해석 조건을 정리하여 나타낸 것이다.



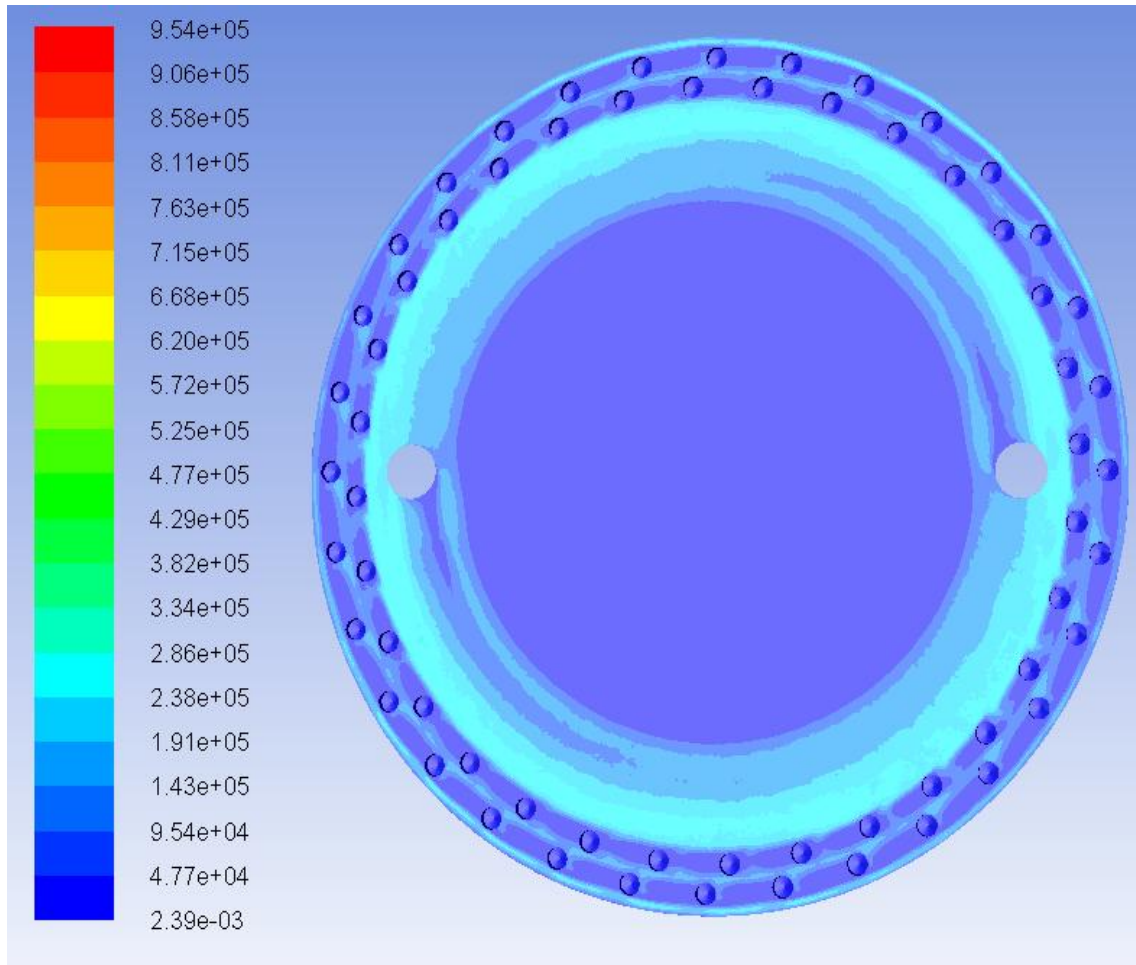
[그림 62] Wall of motion

[표 21] 수치해석 조건

Classify	Condition
Primary phase	Water
Secondary phase	Vapor
Velocity inlet	0.8 m/s
Pressure outlet (P_{abs})	106,325 Pa
Wall	No-slip
Vaporization pressure (P_{gage})	10,000 Pa
Wall motion of cover	Stationary wall
Wall motion of rotor	Moving wall (3,600 rpm)

수치해석 결과를 통해 뒷덮개(Rear cover)에 나타나는 균일한 압력분포가 형성되는지 여부를 판단하도록 하였다. 1개의 출구부를 갖는 15 kw 살균장치 설계에서 출구부 주변 저압상태의 압력분포를 형성하게 되어 운전 시 기계표면 손상이 출구부 쪽으로 치우쳐 발생하는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 수치해석 결과와 일치하였다. 현재 좌우 대칭으로 2곳의 출구부를 갖도록 설계한 55kw 살균장치의 압력분포를 통해 균일한 압력장을 형성하여 기계손상을 방지하도록 하였다.

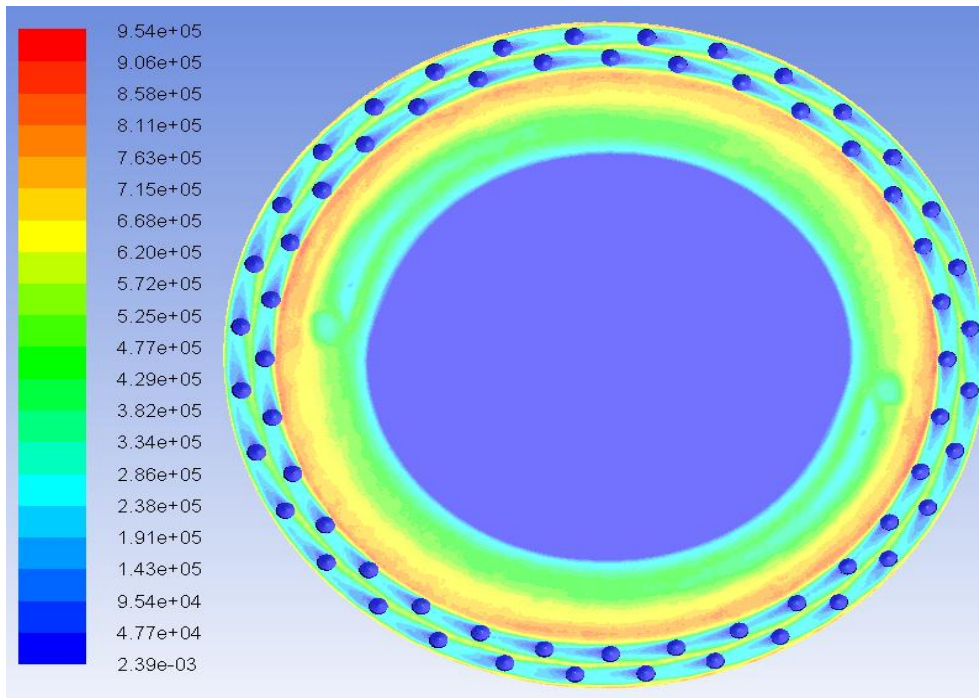
15 kw 살균장치의 실증실험을 통한 공동현상을 가시화시킨 사진에서 공동현상으로 발생된 기포는 덤플 주변에서 발생하여 회전방향과 반대방향으로 점차 소멸 되는 것을 확인 할 수 있었다. 수치해석을 통해 공동현상을 가속화 시키는 저압상태의 압력분포가 실제 덤플 주변에서 발생하는지의 여부와 그 분포형태를 확인하고 가시화 사진과 비교하여 열 발생 구조를 예측하도록 하였다.



Contours of Dynamic Pressure (mixture) (pascal)

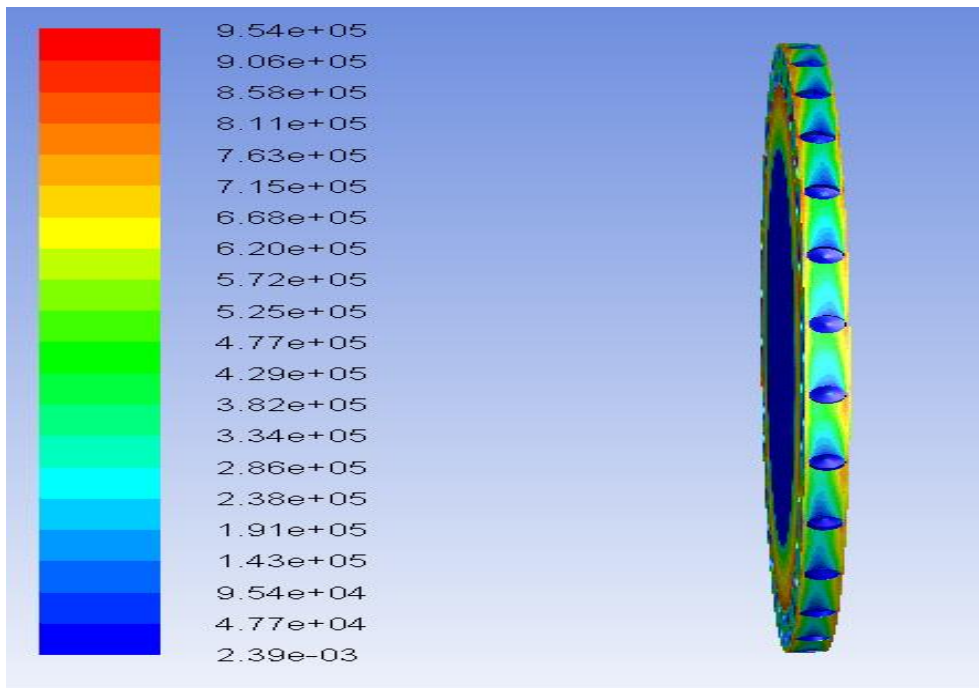
[그림 63] Pressure distribution of Back cover

위의 [그림 62]는 2개의 출구부를 갖도록 설계한 55kw급 살균장치 뒷덮개(Back cover)의 압력분포 결과이다. 앞덮개(Front cover), 뒷덮개(Back cover)의 내부 공간에서 고속으로 회전하는 회전부(Rotor)로부터 야기된 용액의 유동을 고려했을 때 전체적으로 모두 균일한 압력분포를 형성하는 것으로 확인되었다. 출구부 근처의 미세한 압력분포 차이는 용액의 회전운동과 출구부로의 토출로 발생한 압력차이며 축을 중심으로 하였을 때 기계손상을 야기 시키는 압력분포는 없다고 판단되어진다.



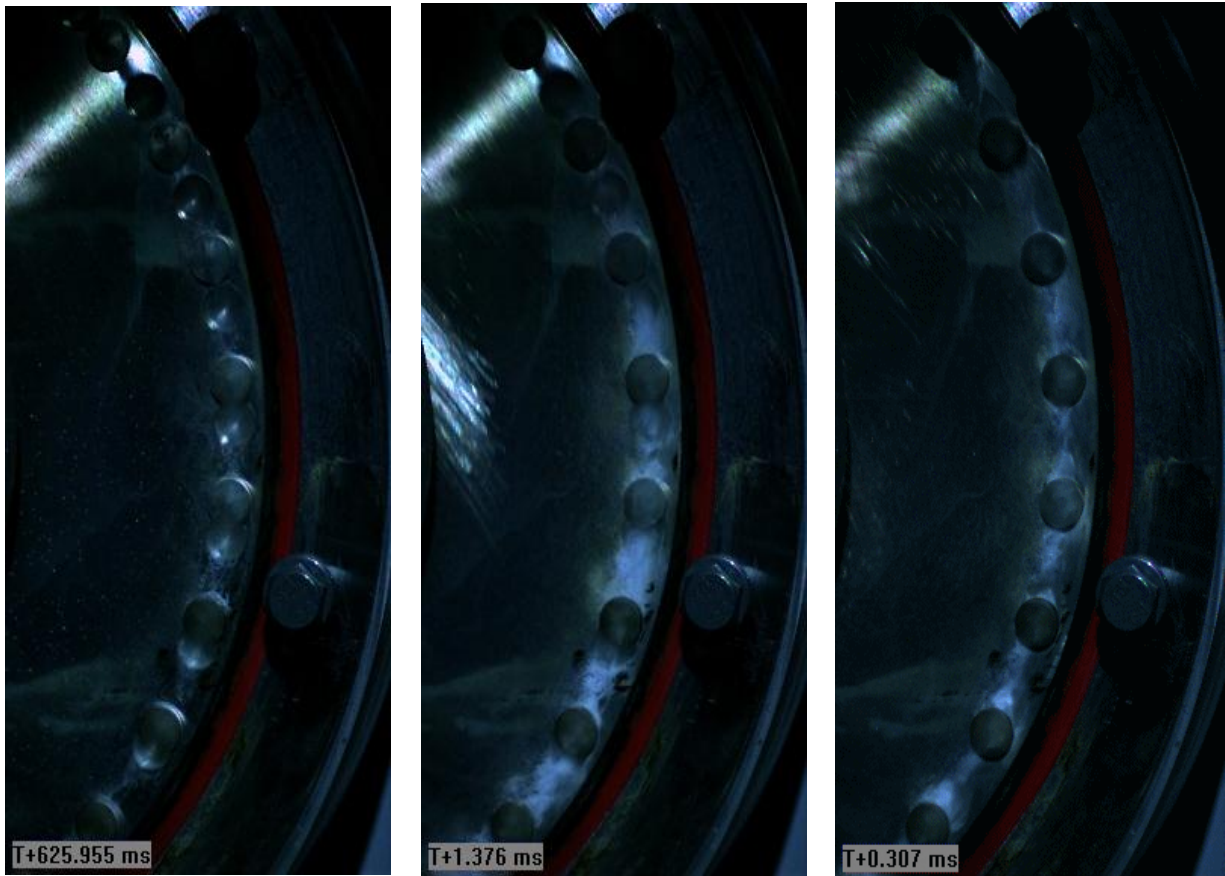
Contours of Dynamic Pressure (mixture) (pascal)

[그림 64] Pressure distribution of Rotor' s surface



Contours of Dynamic Pressure (mixture) (pascal)

[그림 65] Pressure distribution of Rotor' s edge



(A) Stop

(B) Steady State

(C) Animated GIF File
at Steady State

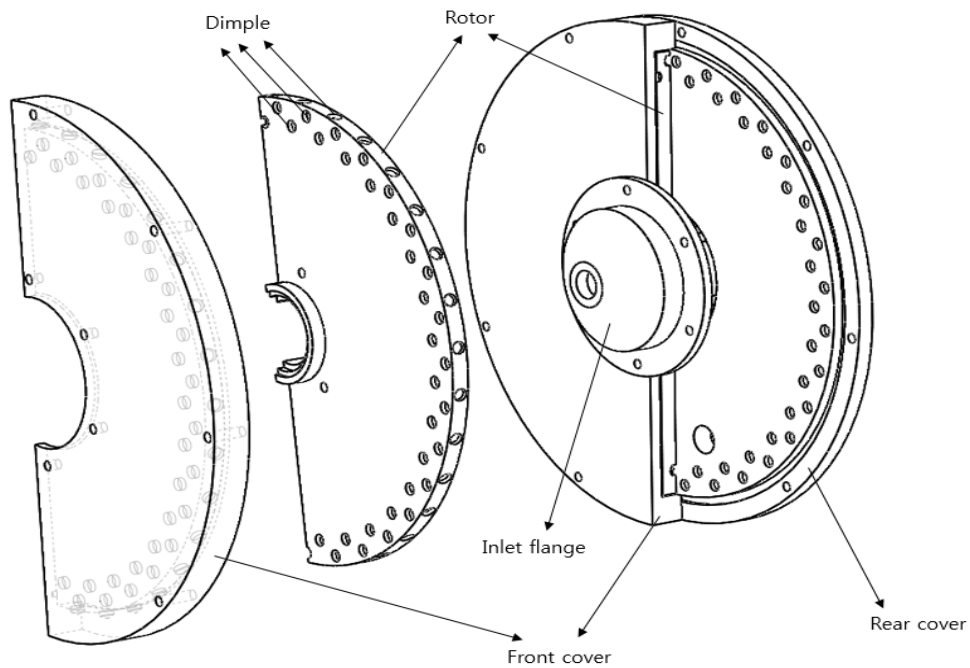
[그림 66] 고속 비디오 카메라로 촬영한 수력학적 공동현상 발생 장면

위의 [그림 63, 64] 및 [그림 65]는 각각 55 kw 살균장치의 회전부(Rotor) 표면의 압력분포와 15 kw 살균장치의 실증실험을 통해 관측한 공동현상 가시화 실물사진이다. 유동장 내부의 기하학적 형상 변화가 존재할 때 공동현상 발생에 유리하다. 실제로 투명 아크릴 재질을 이용한 앞덮개(Front cover)를 제작하여 고속카메라로 촬영한 [그림 65]에 나타나는 기포의 형상과 수치해석을 통해 얻어진 55 kw 살균장치 덤플 주변의 압력분포는 매우 유사함을 확인할 수 있었다. 공동현상의 열 발생구조는 기하학적 형상변화로 야기되는 덤플주위의 압력분포를 통해 확인하였다.

15 kw 실증실험에서 덤플 변화에 의한 열효율 비교실험을 통해 원주방향에 위치하는 경우와 덤플 수량을 증가시킨 결과 열효율이 증가되는 경향을 보였다. 공동현상을 발생시키는 압력분포 구조가 실제로 양쪽표면의 덤플 주변과 원주방향의 덤플 주변에서 동일함을 수치해석을 통해 확인하였다. 따라서 덤플의 위치를 회전부(Rotor)의 양쪽 표면 및 원주방향으로 확장시키고 개수를 증가시켜 설계한 55 kw 살균장치에서 동일 유량대비 공동현상의 발생이 활발히 일어날 것으로 예상할 수 있었다.

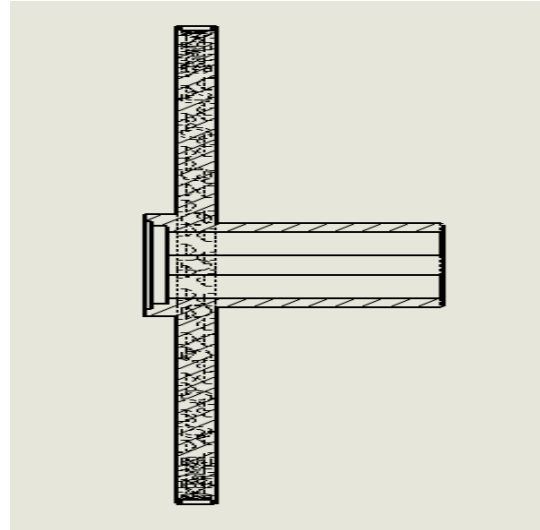
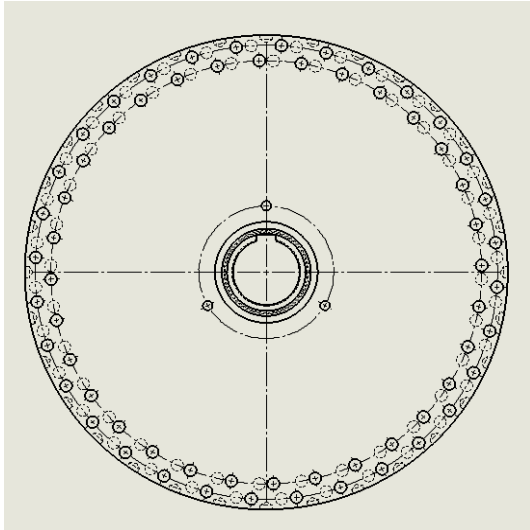
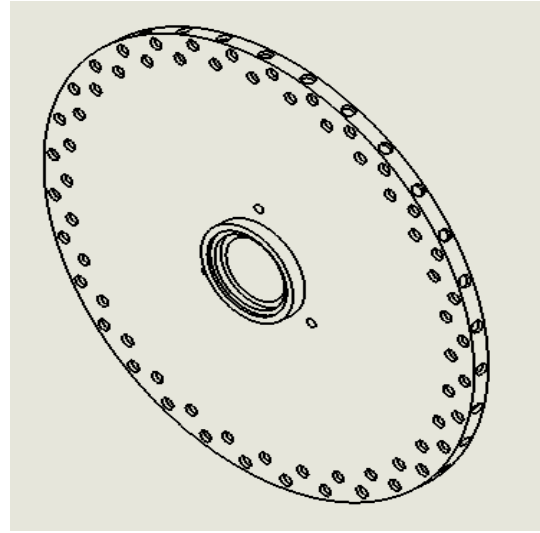
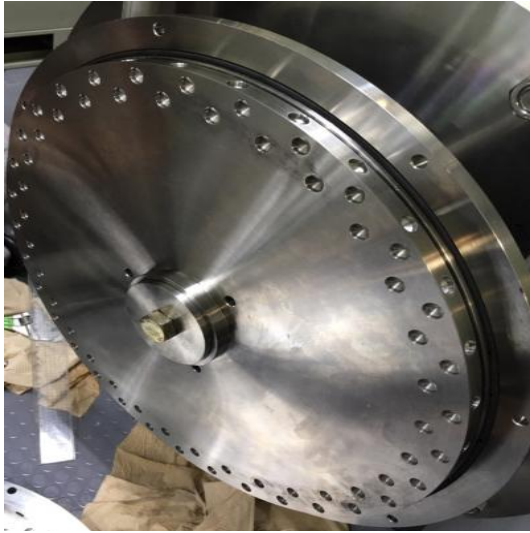
8. 55kw급 고온단시간 살균장비의 설계 및 pilot 설비 제작

기존에 개발된 15 kw급 전동기를 이용한 고온단시간 살균장치를 통해 공동현상 발생에 의한 열 발생구조를 딩플의 개수 및 위치 변화에 의한 성능시험 평가로 검증하였으며, 이에 따라 공동현상을 가속화 및 유량증가로 살균효과, 열효율 및 처리용량 증대를 위한 55 kw급 전동기를 이용한 고온단시간 살균장치의 설계 및 제작을 수행하였다. 15 kw급 전동기에 비해 55 kw급 전동기의 출력이 약 3.67배 증가하였으므로 처리용량, 즉 유량 증가를 위해 유체의 관로 역할을 하는 배관 및 가열기 내부 형상의 크기를 확장시켜 설계하였다.



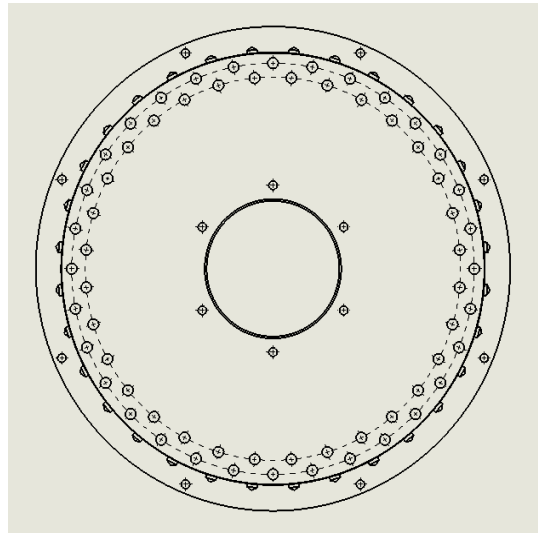
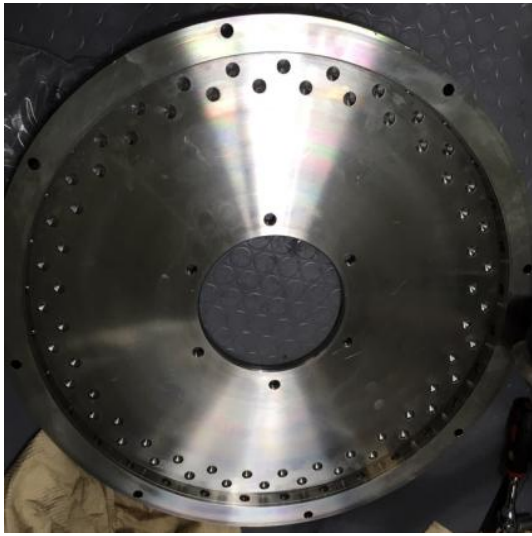
[그림 67] 살균장비의 개략도

공동현상을 발생시키는 가열기 내부 딩플의 개수 및 위치에 따른 열효율 성능시험 평가로 공동현상 가속화에 유리한 딩플의 개수와 위치의 영향력을 정량적으로 평가하였으며, 이를 바탕으로 55 kw급 가열기 내부 딩플 설계의 완성도를 개량하였다. 딩플의 개수가 증가할수록 그리고 그 위치가 회전체(Rotor)의 축 중심에서 멀어질수록 공동현상 발생에 유리하였다. 따라서 위의 [그림 66] 살균장비의 개략도와 같이 회전체(Rotor) 원주방향과 양쪽 표면에 딩플을 구성하였으며 회전운동 시 딩플이 교차하여 공동현상을 가속화 시킬 수 있도록 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover) 내부의 마주보는 표면에 딩플을 구성시켰다.

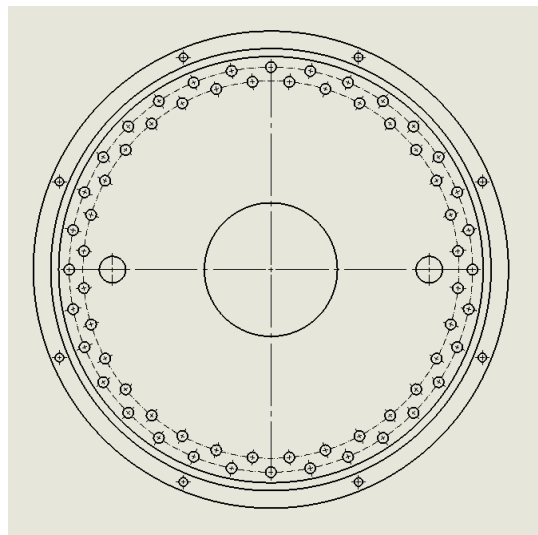
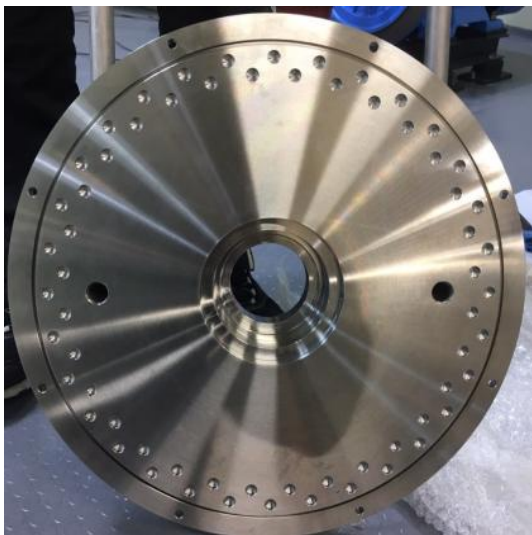


[그림 68-(a) 55kw급 전동기 살균장치의 회전부(Rotor) 실물사진 및 도면

위의 [그림 67-(a)]는 회전부(Rotor)의 실물사진과 도면이다. 원주방향에 위치한 덤플의 경우 32개, 양쪽 표면에 위치한 덤플의 경우 회전축 기준 서로 다른 2개의 동심원 위에 균일 간격으로 구성되었고 그 개수는 128개이며, 총 160개의 덤플이 회전부(Rotor)에 구성되어있다. 기존의 15 kw급 전동기 살균장치의 경우 원주표면에만 덤플이 존재하며 그 개수도 55 kw의 절반에 해당한다. 공동현상의 발생정도를 평가하는 캐비테이션 수는 덤플의 위치가 축 방향에서 멀어질수록 낮아지고 공동현상을 가속화 시킬 수 있다. 따라서 양쪽 표면에 위치하는 덤플을 서로 교차하는 방식으로 설계하여 축 방향에서의 거리를 확장 할 수 있도록 하였으며 총 개수는 3배 정량적으로 증가시켰으며 160개로 구성된다.

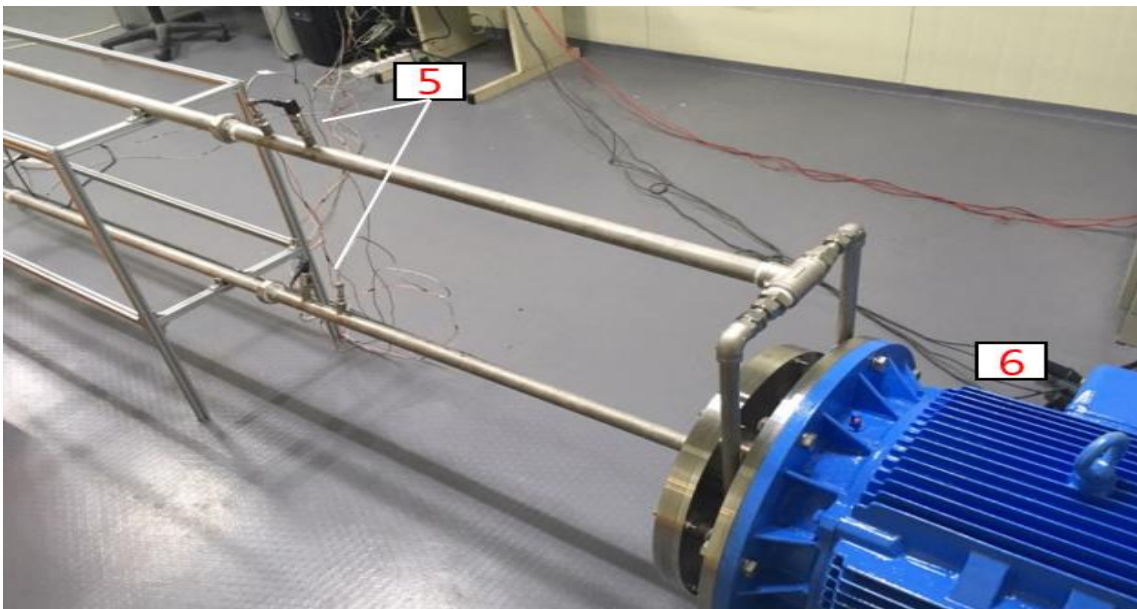
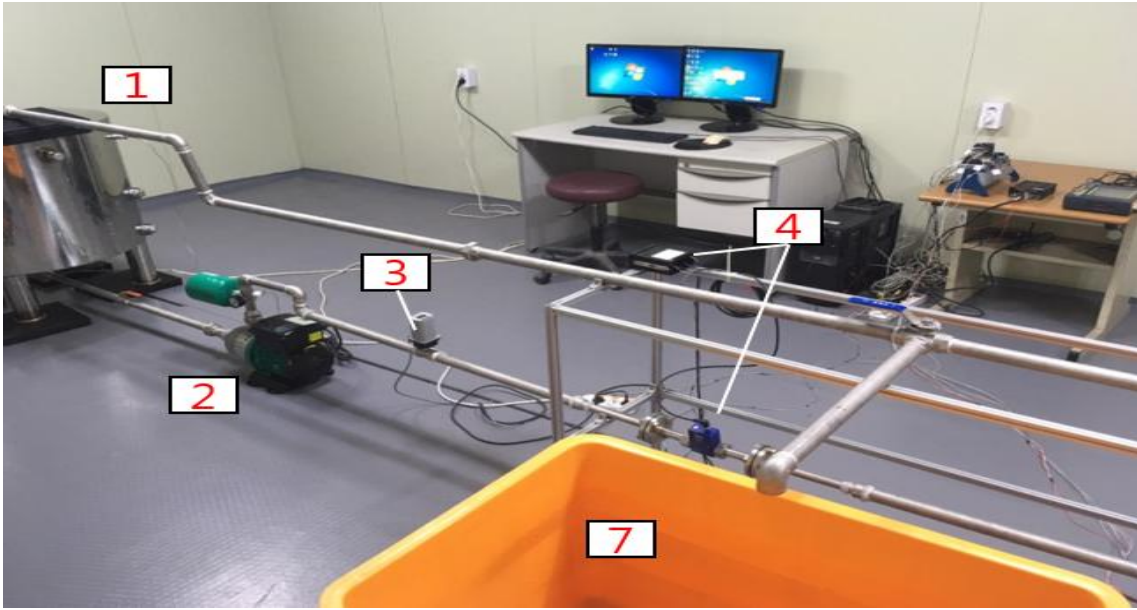


[그림 67-(b)] 55kw급 전동기 살균장치의 앞덮개(Front cover) 실물사진 및 도면



[그림 67-(c)] 55kw급 전동기 살균장치의 뒷덮개(Rear cover) 실물사진 및 도면

위의 [그림 67-(b), (c)]는 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover)의 실물사진과 도면이다. 본 과제에 살균장치는 가열기 내부에서 회전운동을 하는 회전부(Rotor)와 살균용액이 유동하는 영역의 일정간격을 유지하며 감싸고 있는 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear convert)로 구성되어 있다. 공동현상 가시화 사진에서와 같이 덩플이 교차할 때 공동현상이 활발하게 발생하게 됨을 확인하였다. 따라서 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover)의 표면에 덩플이 서로 교차하며 공동현상을 발생시킬 수 있도록 축을 기준으로 회전부(Rotor)와 동일한 거리에 각각 96개, 64개가 존재하며 총 개수는 160개로 회전부(Rotor)의 개수와 동일하다.



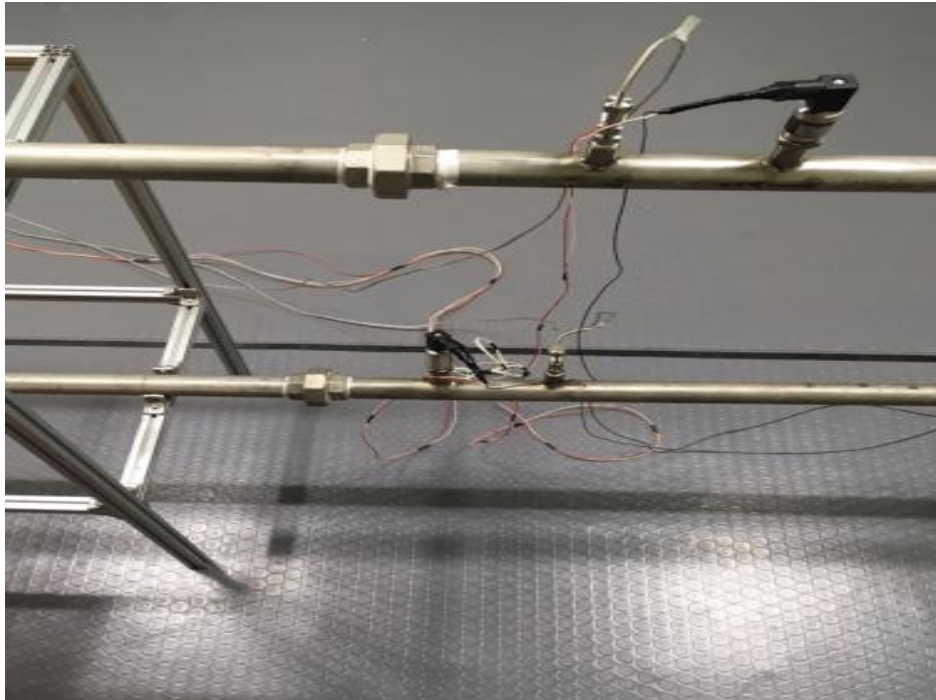
[그림 70] 성능실험을 위한 실험장치 전체 구성도

[표 22] 성능실험을 위한 실험장치 전체 구성도

No.	Part name
1	Water tank
2	Booster pump
3	Control valve
4	Flow meter
5	Pressure & temp. sensors
6	Generator
7	Waste tank
8	DAQ system
9	Inverter & control box

본 과제를 통해 수행된 살균방식은 살균 용액의 배출방식에 따라 순환형 및 비순환형 처리방식으로 나눌 수 있다. 전년도 연구개발을 통해 비순환형 처리방식을 통한 고온단시간 살균장비의 살균효율 및 처리량 면에서 우수하다는 것을 입증하였다. 따라서 55 kw급 살균장비의 개발에서는 살균 용액이 토출되어 이동하는 배관에 밸브개폐장치(T-valve)가 포함되도록 설계하여 비순환형 및 순환형 처리방식으로의 변경이 가능하도록 하였다.

온도와 압력의 경우 가열기를 기준으로 입구부 및 출구부 각각 1곳에서 측정하였다. 입구부에서 측정되는 온도, 압력의 경우 공급된 액체가 가압펌프, 유량계 등을 거치면서 받는 온도의 영향을 없애고 측정부에서 살균 용액이 충분히 혼합될 수 있는 위치에 설치하여 보다 정확한 입구온도를 측정할 수 있도록 하였다. 압력 탭의 경우 온도 탭과의 거리를 배관지름의 약 500(20D) mm 정도의 간격을 유지하여 서로간의 영향을 최소화하고자 하였다. 온도 센서에 비하여 압력센서가 유동에 의한 영향에 더 민감하므로 온도 센서에 의한 영향을 최소화하기 위하여 압력 탭을 온도 탭의 위치보다 상류에 설치하였다. 가열기 출구부에 연결되는 배관에 위치하는 온도계 및 압력센서의 경우 출구부에서 약 500(20D) mm의 직관을 확보하여 설치하였다. 가열기 내부에서 발생하는 공동현상으로 인해 기포가 붕괴하고 물과 충분히 혼합된 상태로 출구부로 토출되도록 설계하여 온도계 및 압력센서로부터 측정되는 데이터에 미치는 영향을 최소화하였다.



[그림 71] 압력 및 온도센서

[표 23] 압력센서 사양

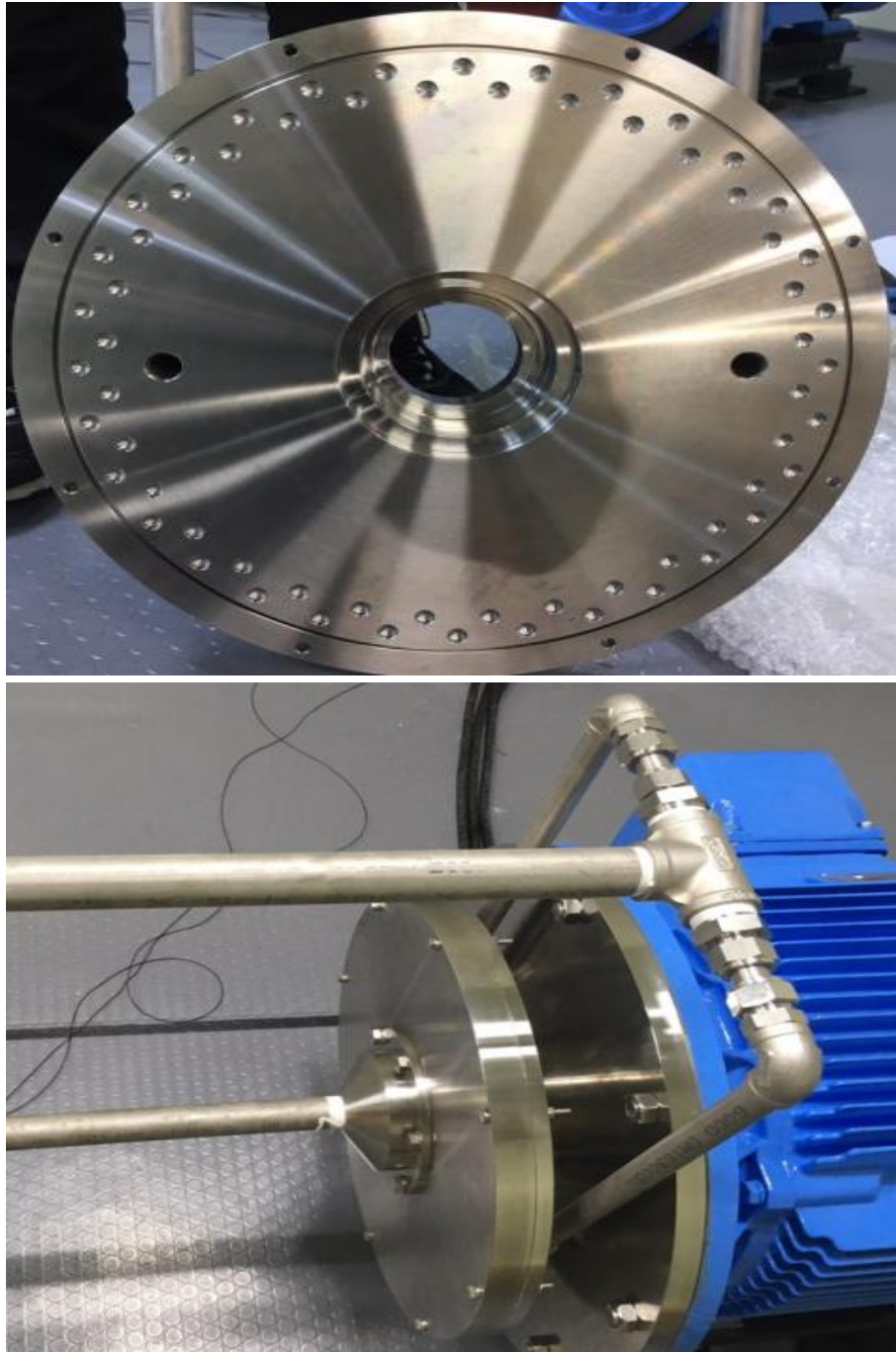
Description	Specification
Range	0~1,600 kPa
Accuracy	±0.50 % (FS, RSS)
Temperature characteristic	±0.05 %FS/°C
Output characteristics	±0.05 %FS/°C
Power supply	9 ~ 30VDC
Temperature	-40 ~ 125 °C
Output signal	4 ~ 20mA
Standard screw	PT1/4

기존 15 kw급 살균장치의 경우 각 1개의 입출구의 배관라인이 존재하도록 설계되었으나 55 kw급 살균장치의 경우 1개의 입구부와 2개의 출구부로 구성되어 있다. 2개로 나뉘지는 출구부의 경우 가열기 뒷덮개(Rear cover) 축을 기준으로 수평하게 양쪽 대칭으로 구성되어 있다. 2개의 출구부는 다시 하나의 배관라인으로 연결되며, 이때의 온도, 압력 데이터가 출구데이터로 획득되도록 하였다. 유입되는 유량은 증가하지만 가열기를 구성하는 회전부(Rotor)와 앞덮개(Front cover) 및 뒷덮개(Rear cover)의 간극은 공동현상 발생을 위해 제한되므로 원활한 토출과 운전조건에서의 안전성을 위해 위의 설명과 같이 설계하였다. 또한 아래의 [그림 71] 및 [그림 72]의 설명에서와 같이 공동현상으로 야기되는 일부 영역에서의 치우쳐진 기계적 손상을 방지하고자 대칭으로 2개로 나뉘 설계하도록 하였다.



[그림 72] 15kw급 살균장치 뒷덮개(Rear cover) 출구부 주변 기계손상 사진

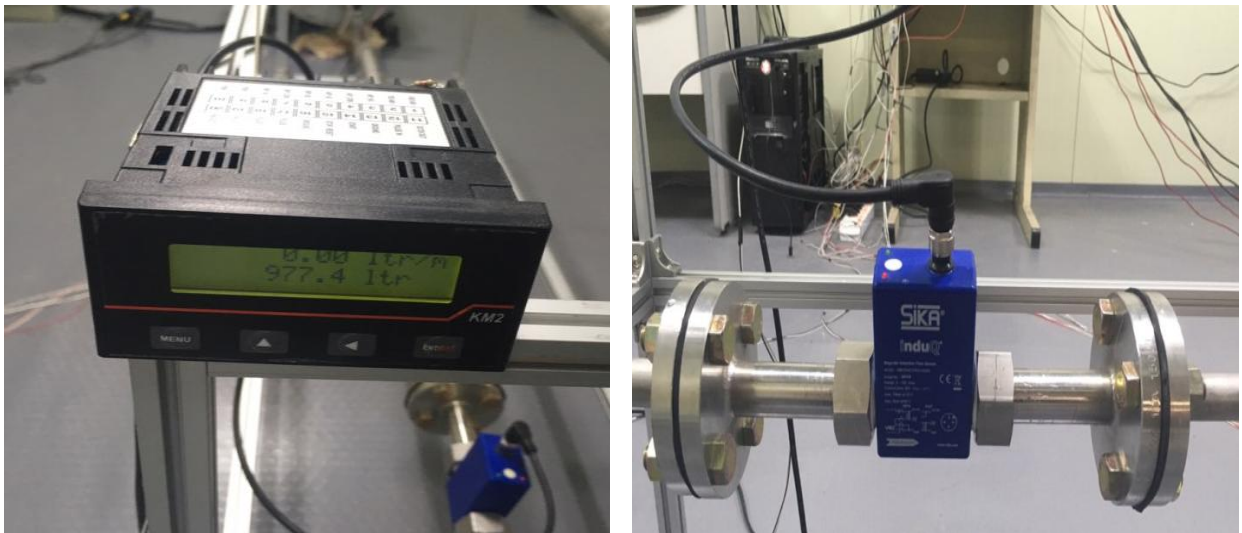
[그림 71]은 용액이 토출되어 나오는 출구부가 1개인 15 kw급 살균장치의 뒷덮개 (Rear cover) 사진이다. 위아래의 영역을 중앙선 기준으로 나눴을 때 기계 표면의 손상 정도가 출구부 근처에서 일어나는 것을 확인하였다. 공동현상은 내부 용액의 순간절대 압력이 포화증기압 이하로 내려갈 경우 발생하게 되는데 대기압 상태인 외부와 연결되는 출구부 근처에서의 압력이 다른 내부영역보다 낮아지게 된다. 따라서 출구부 근처의 영역으로 치우쳐진 상태로 기계적 손상이 발생하게 되는 것을 확인할 수 있었다.



[그림 73] 55kw급 살균장치의 뒷덮개(Rear cover) 출구부 사진

[그림 72]는 용액이 토출되어 나오는 2개의 출구부가 지면 기준으로 양쪽 대칭으로 설계되어있다. [그림 72]에서와 같이 출구부 근처에서 공동현상으로 인한 기계손상을 용액이 유동하는 가열기 내부영역의 압력분포를 균일하도록 설계하여 방지하였다. 또한 유입되는 유량의 증가로 인해 야기될 수 있는 살균장치의 과부하를 방지하고 살균된 용액의 원활한 토출이 가능하도록 하였다.

15 kw급 전동기를 사용한 살균장치에서 유량 변경에 대한 순간상승온도에 대한 영향 실험수행결과 유량이 감소할수록 순간상승온도는 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 미생물 치사율 실험에서는 순간상승온도가 매우 중요한 실험 조건이며 온도상승 및 압력변화 등과 같이 실험조건으로써의 데이터 측정이 요구된다. 따라서 실험조건 별 유량데이터 획득에 필요한 유량계를 설치하고 유량조절밸브를 설치하여 운전조건을 변화시킬 수 있도록 실험라인을 구성하였다.



[그림 74] 유량계

[표 24] 유량계 사양

Description	Specification
Size	DN 20
Range	5~100L/min
Accuracy	± 1 %
Repeatability	± 1 %
Response time	< 100 ms
Power source	24 VDC(± 15%)
Output signal	Max. 25mA
Power consumption	0.6 W
Temperature range	-10~60 °C

[그림 74]는 유량제어밸브 및 펌프를 시험라인에 설치한 모습이며, [표 24]는 자세한 사양이다. 이를 통하여 유입되는 용액을 가압시켜 입구압력 조건을 형성할 수 있으며 배관라인 내부에서의 용액의 요동을 제어하고, 유량을 조절하여 순간 상승온도를 손쉽게 변경할 수 있게 되었다.



[그림 75] 유량제어 밸브 및 펌프

[표 25] 유량제어 밸브 사양

유량제어 밸브 사양	유량제어 밸브 사양
Power supply	AC220V 50/60Hz
Input signal	4~20mA , 0~20mA, 0~5V, 2~10V
Feedback output	4mA ~ 20mA
Calibration	Auto Calibration
Action mode	Reverse/Direct
Resolution	400:1
Fail mode	Close/Stop/Open
Digital dead band	Narrow : 0.3 mA Wide : 0.7 mA
Noise skip	0.2V
Indicator	3 Digit LCD

시험에서 사용된 전동기는 효성의 정격소비전력 15kW, 3상 380V, 표준효율 90.2%의 사양을 사용하였으며 전동기의 전력을 인버터를 통해 공급하였다. 운전조건에 해당하는 전동기의 회전속도는 인버터의 주파수를 변화를 통해 제어하였다. 사용된 인버터는 LS산전 (LS Industrial System)의 모델명 iG5A이며 회전속도는 0 ~ 60Hz 범위 내에서 제어한다. 전체 판넬 구성도는 아래의 [그림 75]와 같다.



[그림 76] 인버터 전체 실물사진

아래의 [그림 76]은 인버터 전체 전원 공급 단자부로 온오프 스위치를 통해 인버터에 전원을 공급하며 이 때 전원표시가 되어있는 붉은색 불이 점등되며 상태를 확인할 수 있다.



[그림 77] 인버터 전원 공급 단자부

전동기를 통해 부과되는 회전부의 회전운동의 경우 회전속도 rpm의 기준으로 주파수를 통해 제어된다. 전동기의 회전속도 범위 0 ~ 3,600 rpm에서 인버터의 정격출력 주파수 범위 0 ~ 60Hz를 통해 회전속도를 제어하게 된다. 실제 기계 가동 시 3,600 rpm의 경우 주파수 60Hz에서 운전하게 된다. 초록색의 Run 버튼을 입력하게 되면 인버터를 통해 전동기에 출력이 부과되며 출력범위는 위아래 화살표 버튼을 통해 제어할 수 있다. 붉은색의 Stop 버튼을 입력하게 되면 부과되는 출력이 중단되며 운전을 정지한다.

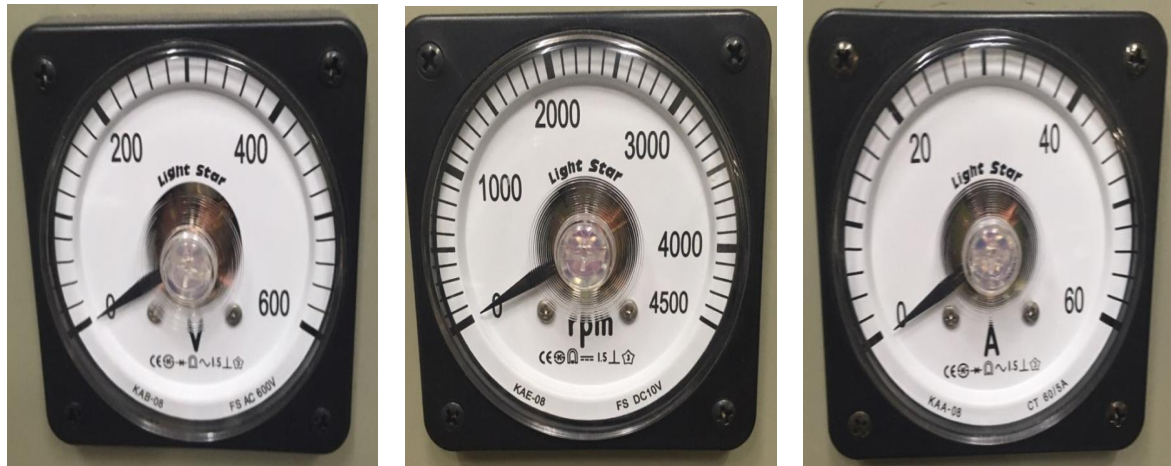


[그림 78] 인버터 주파수 제어부

[표 26] 인버터 주파수 제어부 패널 기능 설명도

구분	표시	기능 명칭	기능 설명
KEY	RUN	운전 키	운전 지령
	STOP/RESET	정지/리셋 키	STOP : 운전 시 정지 지령 RESET : 고장 시 리셋 지령
	▲	업 키	코드를 이동하거나 파라미터 설정값을 증가시킬 때 사용
	▼	다운 키	코드를 이동하거나 파라미터 설정값을 감소시킬 때 사용
	▶	우 쉬프트 키	그룹간의 이동이나 파라미터 설정시 자릿수를 우측으로 이동할 때 사용
	◀	좌 쉬프트 키	그룹간의 이동이나 파라미터 설정시 자릿수를 좌측으로 이동할 때 사용
LED	●	엔터 키	파라미터 값을 변경할 때 나 변경된 파라미터를 저장하고자 할 때 사용
	FWD	정방향 표시	정방향 운전 중일 때 점등
	REV	역방향 표시	역방향 운전중일 때 점등
	RUN	운전중 표시	가, 감속 중인 경우 점멸 정속인 경우 점등
	SET	설정중 표시	파라미터를 설정 중에 점등

아래의 [그림 78]는 인버터에서 출력되는 전압(V), 회전속도(rpm), 전류(A)의 상태를 아날로그 계기판을 통해 표시해 주는 인디게이터 역할을 한다. 출력되는 상태를 실시간으로 확인 할 수 있으며 운전조건 중 회전속도(rpm)에 대해 사용자가 외부 단자를 통해 실시간으로 확인이 가능하다.



[그림 79] 전압(V), 회전속도(rpm), 전류(A) 아날로그 계기판

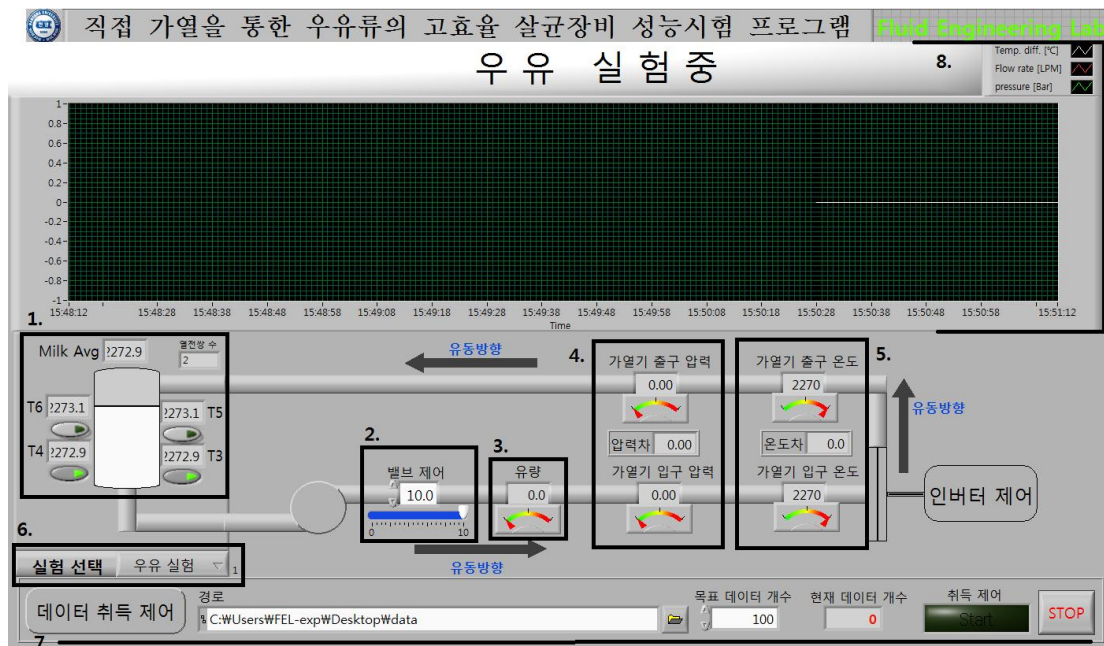
구조 및 사용 환경에 대한 제품 사양은 아래의 [표 26]과 같다.

[표 27] 구조 및 사용 환경

Description	Specification
보호구조	개방형
주위온도	-10℃~50℃
보존온도	-20℃~60℃
주위습도	상대 습도 90% RH 이하 (이슬 맺힘 현상 없을 것)
고도, 진동	1,000m이하, 5.9 m/sec ² (0.6G) 이하
주위기압	70~106kPa
주위환경	실내에 부식성 가스, 인화성 가스, 오일 미스트, 먼지 등이 없을 것

실험 과정에서 요구되는 데이터의 효율적인 획득 및 처리를 위해 LABVIEW 2015를 이용하여 다음과 같은 형태의 데이터 취득 프로그램을 개발하였다. 먼저 전체 실험라인의 개략적인 형태를 모사하였고 유량, 압력, 온도 등의 데이터를 실제 위치에 가깝게 위치시켰다.

[그림 79]의 1번은 우유 탱크의 예열온도 조절을 위한 온도 측정부이다. 투입된 시료의 양에 따라 사용할 열전대를 취사선택하면 자동으로 해당범위의 평균이 도출되어 데이터 시트에 출력된다. 2번은 PID Control Valve의 제어를 위해 DAQ N9264 모듈을 이용하여 1~5 V 범위 내에서 전압 제어하였다. 3번 및 4번은 유량계와 압력계로 N9203모듈을 사용해 전압 4~20 mA 범위 내에서 아날로그 신호를 취득하고, 보간을 통하여 실제 값으로 변환한 값을 데이터로 저장하였다. 5번은 살균장치 전/후의 온도 변화량을 측정하기 위해 장착된 열전대의 데이터 취득부이다. 6~7번에서는 데이터의 획득 설정을 제어하게 된다. 7번에서 실행할 실험을 선택하고, 데이터 취득경로를 선택한 뒤, start를 선택하면 데이터 취득이 목표 데이터 개수(초)까지 진행된다. 8번에서는 현재 실험장비의 데이터 시각화를 위한 그래프 출력부로 이루어져 있다. 가열기 입구/출구사이의 온도차는 흰색, 압력차는 청색, 현재 유량은 붉은색으로 출력된다.

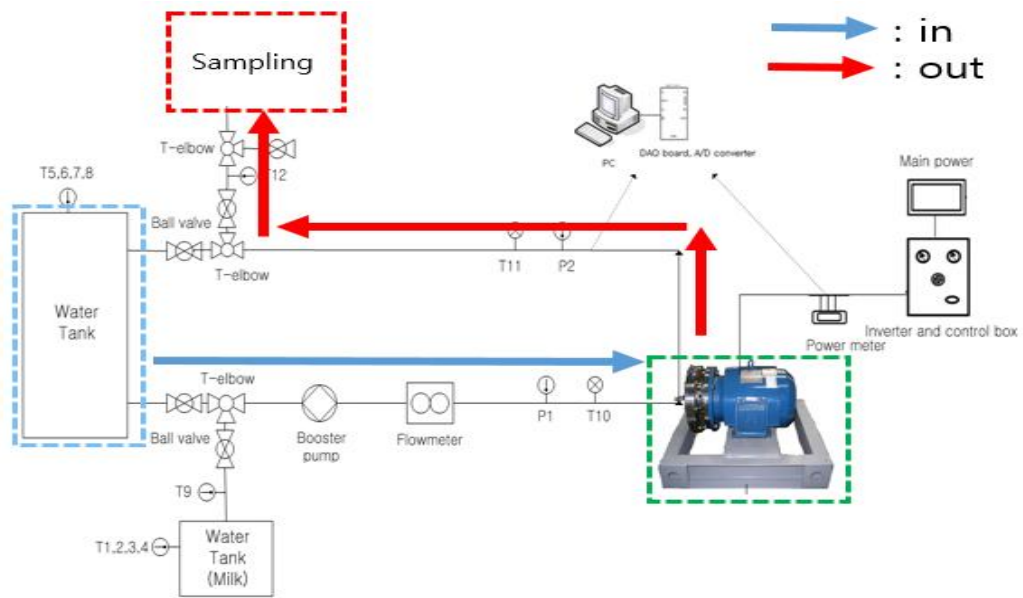


- | | |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| 1. MILK TANK Preheating Temperature | 2. PID Control Valve |
| 3. Flowmeter | 4. Pressure Transmitter |
| 5. Cavitation Sterilizer Temperature | 6. Data Acquirement Control |
| 7. Experiment Selection | 8. Graph Panel |

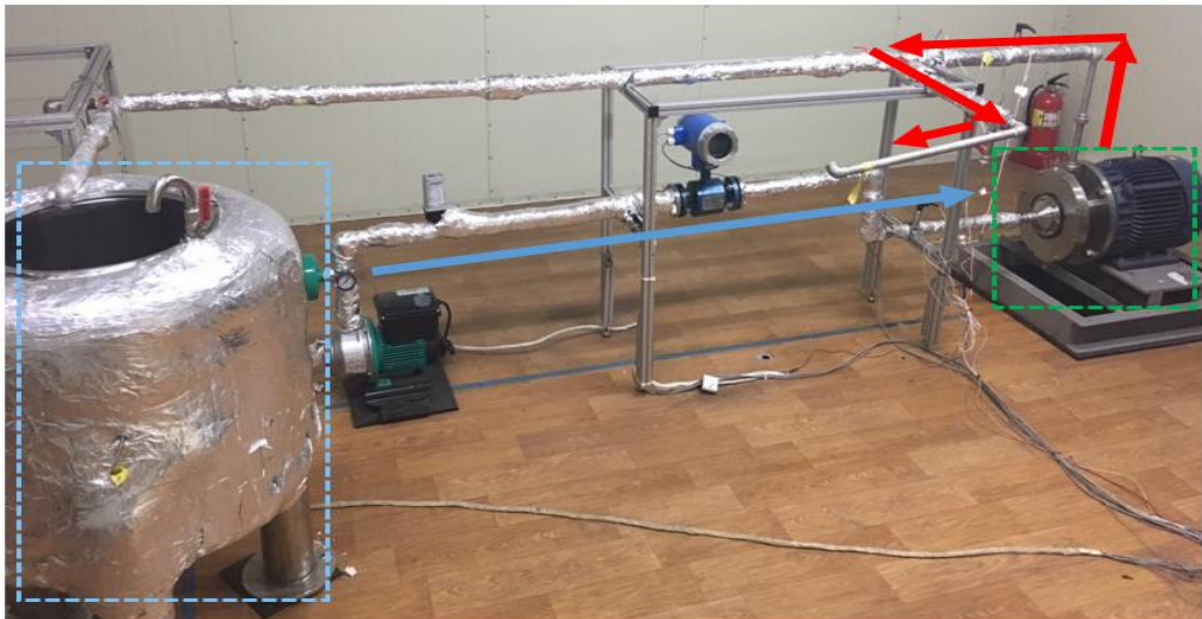
[그림 80] 살균성능 시험장비 LABVIEW 프론트 패널

위와 같은 살균장비 성능실험 프로그램을 통하여 실험 및 데이터획득을 진행하였으며, 세부 코드 및 프로그램은 본 보고서에 첨부하여 제출하였다.

아래의 [그림 80]과 [그림 81]은 직접가열을 통한 우유류 고효율 살균장비의 실험 장치 구성도와 실물 사진이다. 파란색으로 표시된 라인은 저온상태로 저장되어진 저장탱크에서 살균장비 내부로 유입되어지는 살균용액의 흐름을 도시하며 붉은색으로 표시된 라인은 살균장비 내부에서 공동현상으로 살균되어 고온상태로 도출되는 흐름을 도시한다.

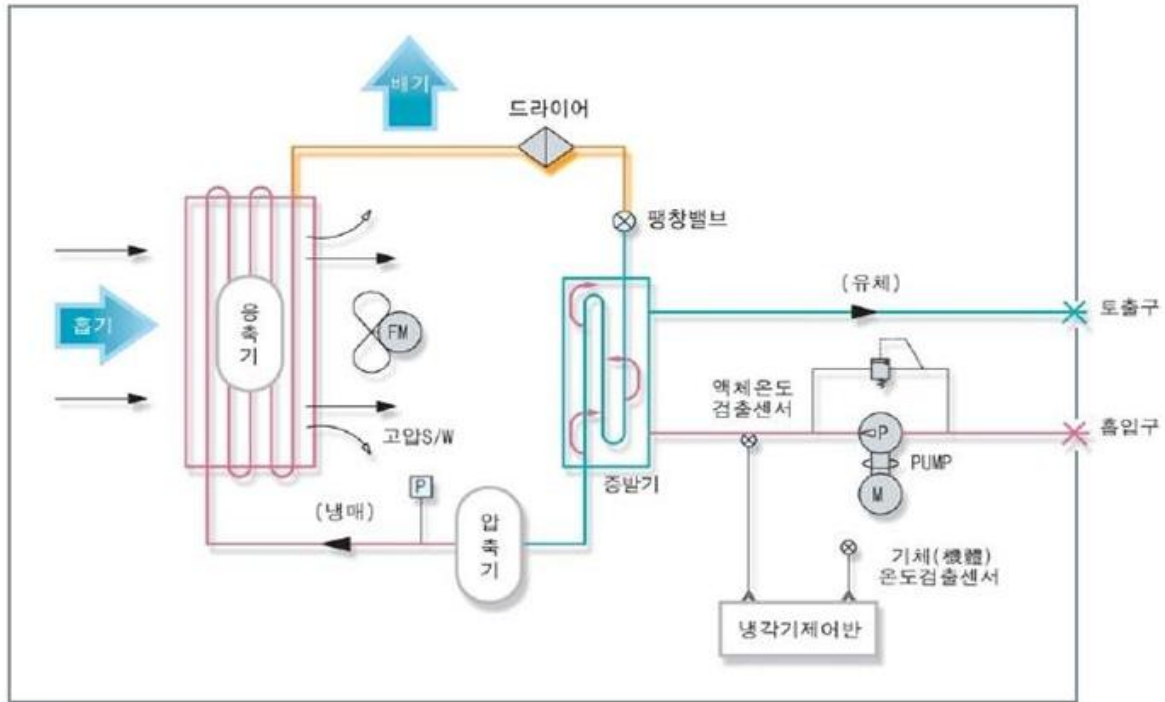


[그림 81] 15kW 실험 장치 구성도



[그림 82] 15kW 실험장치 실물사진

본 연구는 살균장비 개발이 목적이거나 우유류의 가공, 운송에서 살균되어진 용액의 냉각은 식품의 안전성과 보존성을 확보하기 위해 필요하므로 추후의 연구에서 다뤄질 냉각시스템을 다음과 같이 구성 및 응용하여 제시해보았다.



[그림 83] 냉각 Cycle 시스템 구성도

냉각 Cycle은 압축과정, 응축과정, 팽창과정, 증발과정으로 나누어지며 각각의 과정에는 압축기, 응축기, 팽창밸브, 증발기로 구성되어있다.

- 압축기 - 증발기에서 증발한 냉매 증기(저온, 저압, 기체)가 응축되기 쉽도록 냉매증기를 압축하여 압력을 높이는 역할을 하며 이러한 작용에 의하여 냉매는 증발과 응축과정을 반복하면서 냉동장치 내를 순환, 열을 저온으로부터 고온으로 운반하게 된다.
- 응축기 - 압축기로부터 순환력이 가해진 냉매증기(고온, 고압, 기체)를 냉각 액화시키는 열교환기로 응축기를 통과 하면서 송풍기에 의해 공기와 고온의 냉매가 열교환을 통해 고온, 고압 기체의 냉매는 중온, 고압의 액체상 태로 응축이 된다.
- 팽창밸브 - 냉각 Cycle에서 냉매유량을 조절하는 역할을 하며, 냉매액을 증발기에 공급하여 액의 증발에 의한 열 흡수작용이 용이하도록 압력과 온도를 강하시키고, 동시에 냉동부하의 변동에 대응하여 적정한 냉매유량을 조절, 공급하는 역할을 한다.
- 증발기 - 냉동장치에서 냉각작용을 하는 열교환기로 증발기에 공급된 저온, 저압의 냉매액이 냉각대상인 물질등과 열을 교환하는 장치로 냉각에 필요한 냉매액은 팽창밸브를 통해 공급받고 증발된 증기는 압축기로 공급된다.

이러한 사이클의 반복을 통하여 냉각기 측으로 흡입, 토출되는 유체를 사용자가 원하는 온도로 유지, 관리할 수 있게 된다.

실제 살균되어진 우유를 냉각, 보관하는 시스템의 구성은 위와 동일하며 실시 예를 통해 본 살균장비와 냉각시스템의 결합을 통해 저온상태로 저장, 보관 등을 용이하게 활용할 수 있다. 아래의 [그림 83]은 원유냉각기의 실물사진으로써 냉매가 직접 스텐 사이를 통과하여 냉각시키는 플레이트 직접 냉각 방식을 사용하고 있다. 일정온도를 유지하여 냉각 및 단열 효과가 높으며 상부의 세척기능을 포함할 경우 위생세척으로 유지, 보수가 용이하다.



[그림 84] 원유 냉각기 실물 구조

[그림 80] 및 [그림 81]의 직접가열을 통한 우유류 고효율 살균장비의 실험 장치 구성도 및 실물사진에서 살균되어진 용액이 토출되는 실험라인은 사용자가 지정한 배관직경을 갖게 되며 이는 다른 저장용기에 쉽게 결합되어 질 수 있는 구조로 구성된다. 따라서 살균되어진 용액은 대기, 공기와의 접촉 없이 직관을 통해 저장탱크로 저장되는 구조로 설치가 가능하며 유량 조절밸브를 통한 생산량 및 살균처리용량을 산정하여 냉각시스템의 용량을 결정할 수 있게 된다.

9. 55 kw 고온단시간 살균장비의 효율 분석을 위한 성능실험 수행

55 kw급 고온단시간 살균장비의 공동현상 발생 성능 분석을 위하여 물을 이용한 기계적 성능평가를 실시하였다. 상승할 것으로 예상되는 유량 및 압력 조건을 고려하여 압력 및 회전속도를 변경하여 실험을 진행하였다.

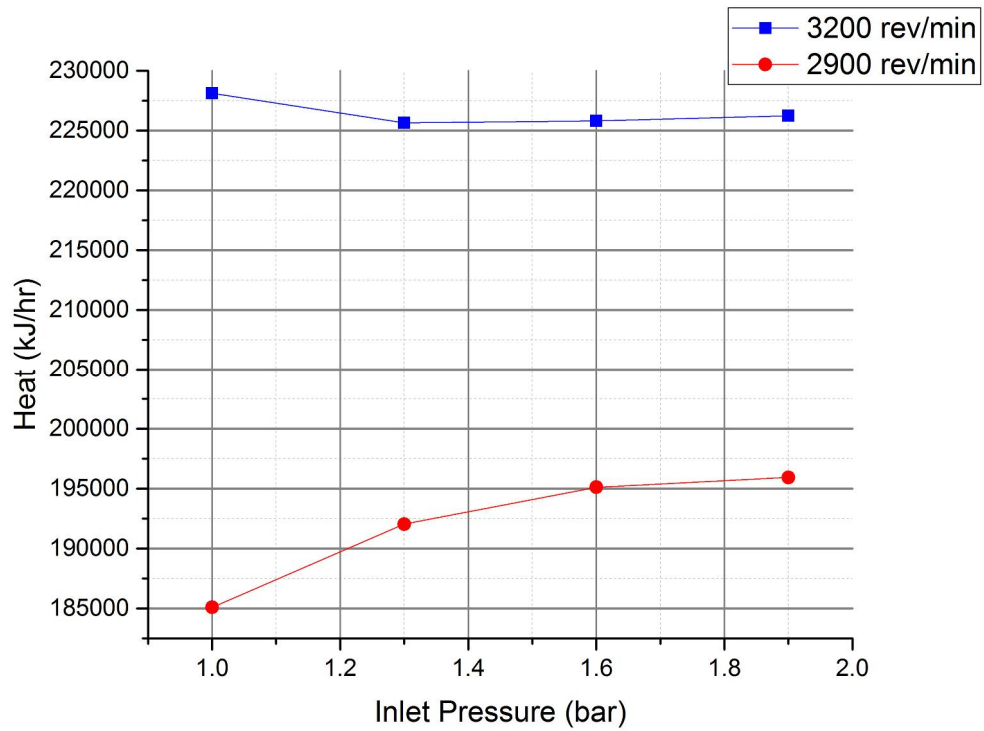
[표 27]에 효율실험의 실험조건을 나타내었다. 변인은 압력과 회전속도로, 압력 범위는 가압펌프의 압력조건을 $P_{set} = 1.0 \text{ bar} \sim 1.9 \text{ bar}$ 범위에서 변경하였고, 회전속도는 2,900 rpm 및 3,200 rpm에서 실험하였다. 각 실험 조건별로 입구/출구압력, 유량, 온도 등의 데이터를 수집하였다. 모든 데이터의 획득은 살균장치의 운전 시작 후 전동기가 정상 상태라고 판단되어 질 때 획득하였다. 정상 상태의 판단은 살균장치 출구 온도의 변화가 0.1℃미만 일 때로 판단하였다.

[표 28] 55 kw 공동현상 발생장치의 실험 조건

Booster Pump Setting (Bar-gage Pressure)	Rotating Velocity (r/min)
$P_{set} = 1.0$	2,900
	3,200
$P_{set} = 1.3$	2,900
	3,200
$P_{set} = 1.6$	2,900
	3,200
$P_{set} = 1.9$	2,900
	3,200

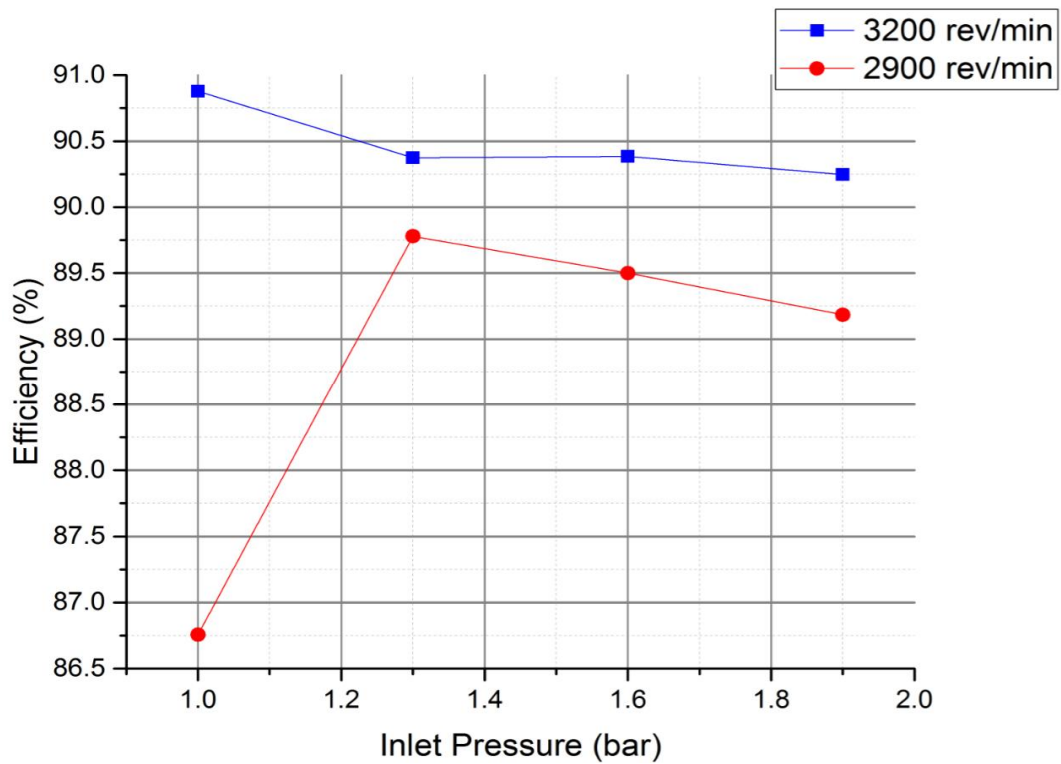
실험조건에 따라 일반 용수를 이용하여 기계적 성능 실험을 수행하였다. 공동현상 수 (C_v), 순간상승온도(ΔT)와 열효율(η)은 입구 압력(P), 유량(Q), 전동기의 회전속도 (w_r)의 실험조건에 의해서 결정된다. 각 요소에 대한 정의는 15 kw급 장비와 동일하며, 상세한 내용은 식(1) ~ (4)에 기술되어 있다.

[그림 84]에서는 입력압력에 따른 열 발생량을 각 회전속도에 따라 나타내었다. 2,900 rpm의 열 발생량은 점차 증가하는 양상을 보이거나 3,200rpm에서는 열 발생량이 $P_{set} = 1.3$ bar와 $P_{set} = 1.6$ bar에서 어느 정도 감소하나 $P_{set} = 1.9$ bar에서 다시 약간 증가하게 된다. 그러나 여전히 $P_{set} = 1.0$ bar 보다는 낮게 나타난다.



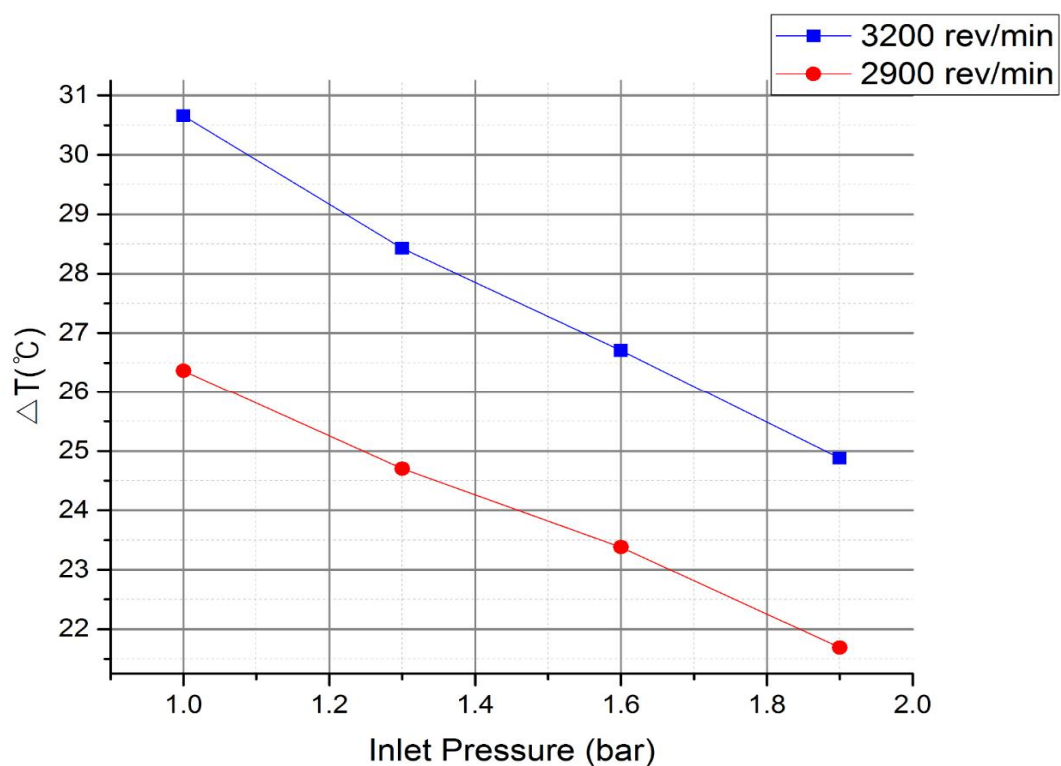
[그림 85] 입력압력에 따른 열 발생량

[그림 85]에서는 입력압력에 따른 효율변화량을 나타내었다. 3,200 rpm의 전 구간에서, 그리고 2,900 rpm의 $P_{set} = 1.0$ bar 부분을 제외한 모든 구간의 효율이 89 ~ 91% 사이에서 나타났다. 2,900 rpm은 열 발생량이 압력의 증가에 따라 어느 정도 증가하지만 그에 따른 모터의 동력상승이 동반되어 결과적으로 $P_{set} = 1.3$ bar ~ 1.9 bar 구간에서 열효율이 약간씩 감소하게 된다. 3,200 rpm에서는 모터동력이 전 구간 한계치에서 더 상승하지 않았다. 그러나 압력이 증가함에 따라 유량이 증가하여 모터 회전에 필요한 토크요구량이 상승하고, 그로인해 정격 회전속도를 유지하지 못하여 열효율이 감소하는 것으로 보인다.



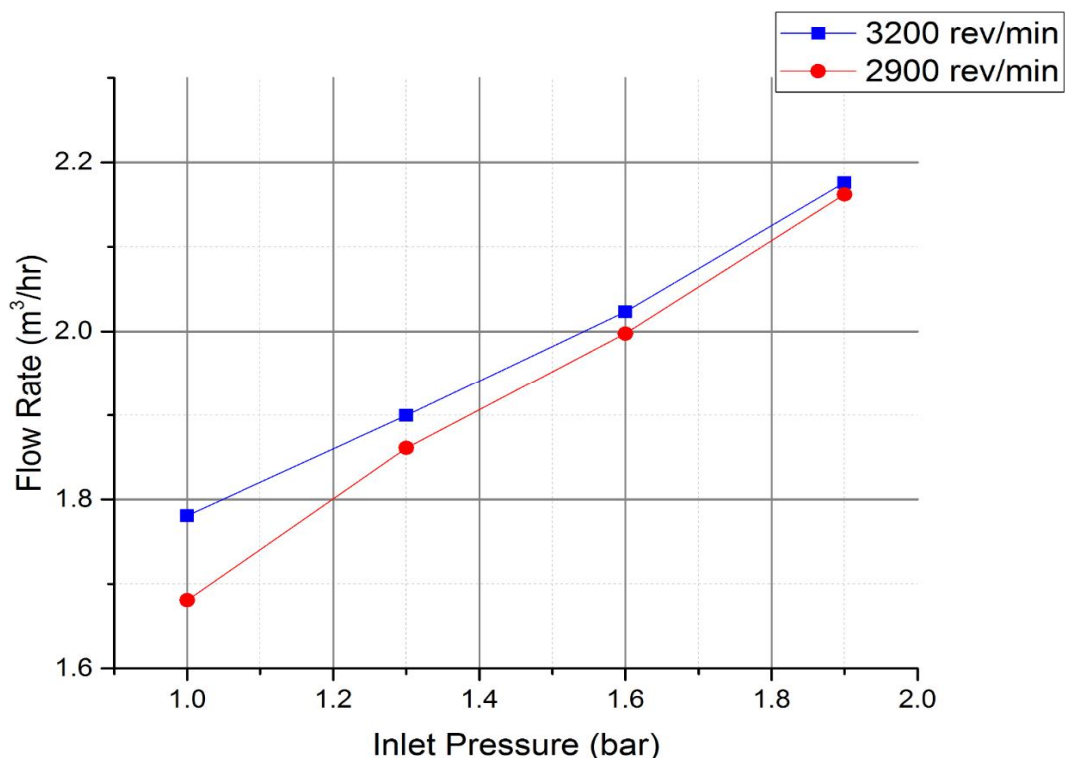
[그림 86] 입력압력에 따른 효율

[그림 86]에서는 입력압력에 따른 순간상승온도에 대해 나타내었다. 입구압력이 상승하면 비압축성 유체인 물의 유속이 상승하여 가열장치 통과시간이 감소하고 그에 따라 순간상승온도의 하강이 나타난다. 모든 구간에서 순간상승온도차가 거의 동일 하다는 것을 알 수 있다.



[그림 87] 입력압력에 따른 순간상승온도

[그림 87]에서는 입력압력에 따른 유량변화량을 회전속도별로 표기하였다. 높은 압력으로 변화할수록 2,900 rpm의 유량이 3,200 rpm 보다 증가하게 됨을 볼 수 있다. 수치적으로는 $P_{set} = 1.3$ bar에서 2%, $P_{set} = 1.6$ bar와 $P_{set} = 1.9$ bar에서 약 1%의 차이를 보인다. $P_{set} = 1.0$ bar와 $P_{set} = 1.3$ bar 사이에서의 변화량이 가장 크게 나타나는데, 이 변화량이 열 발생량에 영향을 미친 것으로 보인다.



[그림 88] 입력압력에 따른 유량

[표 28]에서는 55kw 살균장비의 기계적 성능평가 결과를 수치적으로 도시하였다. 주요 지표는 열 발생량 및 열효율로, 3,200 rpm에서는 입력압력의 변화에 따라 열 발생량이 감소 추세로 나타나고, 따라서 열효율은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 모터의 한계동력 (198,000 kJ/hr)을 초과할 수 있는 범위가 한계동력의 130% 이내로 제한되기 때문으로 보이며, 감당할 수 있는 이상의 토크가 부하로 작용하면 회전속도가 정격으로 유지되지 못하여 열 발생량이 감소하는 것으로 보인다. 따라서 3,200 rpm이상의 동력 및 회전속도 향상은 어려울 것으로 판단된다.

토크 소모량은 로터 자체 무게에 따른 질량모멘트의 영향이 있을 것으로 보이므로 차후 연구과제로 보다 가볍고 공동현상 저항이 높은 신소재 적용을 통한 설계변경을 진행하여 회전속도가 상승할 수 있다면 그에 따른 추가적인 열효율 상승을 이끌어 낼 수도 있을 것으로 보인다.

다음과 같은 성능실험 결과를 통해 현재 설계 및 제작된 살균장치의 작동조건은 모터부하 및 열효율을 고려하여 $P_{set} = 1.0$ bar, 3,200 rpm 조건에서 열효율 90.88%로 가장 효과적인 가동이 가능하다.

[표 29] 55kW 기계적 성능평가 결과

(r/min)	Density (kg/m^3)	Specific heat ($kJ/kg^{\circ}C$)	Booster pump set (bar-gage pressure)	P1 (bar)	P2 (bar)	T1 ($^{\circ}C$)	T2 ($^{\circ}C$)	ΔT ($^{\circ}C$)	Flow rate (m^3/hr)	Heat (kJ/hr)	Energy (kJ/hr)	Efficiency (%)
2,900	999.69	4.179	$P_{set} = 1$	4.62	4.39	11.46	37.82	26.3 6	1.68	185098 .21	213356 .33	86.76
3,200	999.77	4.179		3.40	3.28	10.42	41.08	30.6 6	1.78	228112 .43	251007 .26	90.88
2,900	999.70	4.179	$P_{set} = 1.3$	4.63	4.45	11.36	36.06	24.7 0	1.86	192043 .96	213907 .67	89.78
3,200	999.87	4.179		3.53	3.28	8.80	37.23	28.4 3	1.90	225643 .60	249676 .67	90.37
2,900	999.81	4.179	$P_{set} = 1.6$	4.63	4.51	9.77	33.15	23.3 8	2.00	195123 .75	218014 .40	89.50
3,200	999.91	4.179		3.69	3.40	8.10	34.81	26.7 1	2.02	225807 .69	249831 .77	90.38
2,900	999.77	4.179	$P_{set} = 1.9$	4.70	4.49	10.35	32.05	21.6 9	2.16	195943 .86	219707 .84	89.18
3,200	999.91	4.179		3.79	3.45	7.90	32.78	24.8 8	2.18	226254 .59	250703 .77	90.25

10. 공동현상을 이용한 고온단시간 살균장비가 액상식품의 살균에 미치는 영향인자 분석

가. 액상식품에 대한 공동현상 영향인자 분석

공동현상을 이용한 고온단시간 살균장비가 액상식품의 살균에 미치는 영향인자는 순간 상승온도 및 퇴출온도 등으로 확인되었으며, 순간상승온도 및 퇴출온도가 높을수록 살균력이 증가하는 것으로 나타났다. 공동현상이 액상식품에 미치는 영향인자(순간상승온도, 퇴출온도)에 대한 최적 조건 파악을 위한 실험방법 및 결과는 다음과 같다.

(1) 공동현상과 순간상승온도와의 상관관계 파악

(가) 목적 : 공동현상을 이용한 액상식품 살균 시 최적 순간상승온도 파악

(나) 시료 : 정량실험 시 실험대상균 외의 균에 의한 오염 및 오차 범위를 줄이기 위해 멸균 상태의 UHT milk 사용

(다) 실험균주 및 배양조건

실험균주의 최적 활성도를 맞추기 위해 3회 계대배양하여 실험에 사용하였으며, 실험균주 및 배양조건은 [표 29]과 같다. 이 때 최종 균주의 농도는 10^7 CFU/ml이다.

[표 30] 최적 순간상승온도 파악을 위한 실험균주 및 배양조건

Strains	Medium	Incubation temp.(°C)	Incubation time (h)	Manufacturer
<i>Escherichia coli</i> (ATCC 8739)	Tryptic Soy Broth	37	24	Difco
<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 6538)	Tryptic Soy Broth	37	24	Laboratories, Division of
<i>Bacillus cereus</i> (ATCC 14579)	Tryptic Soy Broth	30	24	Becton Dickinson
<i>Listeria monocytogenes</i> (ATCC 15313)	Listeria Enrichment Broth	37	24	and Co., Sparks, Md.,
<i>Salmonella typhimurium</i> (ATCC 23564)	Buffered Peptone Water	37	24	U.S.A

(라) 실험방법

- ① 준비된 UHT milk 80 L 에 배양된 실험균주를 인위적으로 접종
- ② 유량밸브 조절을 통해 순간상승온도(ΔT , °C)를 17, 20, 23, 26으로 설정하여 75, 80°C 2개의 퇴출온도에서 검체 채취

[표 31] 순간상승온도 실험조건

실험조건	퇴출온도(°C)	순간상승온도(°C)
1	75	17, 20, 23, 26
2	80	

(마) 실험결과

① 실험조건 1

Escherichia coli, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium* 5가지 균을 접종하여 퇴출온도를 75°C로 고정 후 ΔT (°C)를 17, 20, 23, 26 4개의 실험군으로 실험한 결과 *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium* 4가지 균은 4개 실험군에서 모두 사멸하였으며, *Bacillus cereus*의 경우 0.9, 1.01, 1.58, 1.54 순으로 감소율을 보였다.

[표 32] 순간상승온도 17°C, 퇴출온도 75°C 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(°C)	ΔT (°C)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	58.0 / 75.0	17	5.23	ND ²⁾	5.23
<i>Bacillus cereus</i>			4.21	3.31	0.9
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.40	ND	5.40
<i>Listeria monocytogenes</i>			+ ³⁾	- ⁴⁾	
<i>Salmonella typhimurium</i>			+	-	

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection
- 3) Positive reaction
- 4) Negative reaction

[표 33] 순간상승온도 20℃, 퇴출온도 75℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	55.0 / 75.0	20	5.26	ND ²⁾	5.26
<i>Bacillus cereus</i>			4.29	3.28	1.01
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.45	ND	5.45
<i>Listeria monocytogenes</i>			+ ³⁾	- ⁴⁾	
<i>Salmonella typhimurium</i>			+	-	

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection
- 3) Positive reaction
- 4) Negative reaction

[표 34] 순간상승온도 23℃, 퇴출온도 75℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	52.0 / 75.0	23	5.33	ND ²⁾	5.33
<i>Bacillus cereus</i>			4.81	3.23	1.58
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.52	ND	5.52
<i>Listeria monocytogenes</i>			+ ³⁾	- ⁴⁾	
<i>Salmonella typhimurium</i>			+	-	

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection
- 3) Positive reaction
- 4) Negative reaction

[표 35] 순간상승온도 26℃, 퇴출온도 75℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	49.0 / 75.0	26	5.27	ND ²⁾	5.27
<i>Bacillus cereus</i>			4.86	3.32	1.54
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.48	ND	5.48
<i>Listeria monocytogenes</i>			+ ³⁾	- ⁴⁾	
<i>Salmonella typhimurium</i>			+	-	

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection
- 3) Positive reaction
- 4) Negative reaction

② 실험조건 2

Escherichia coli, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium* 5가지 균을 접종하여 퇴출온도를 80℃로 고정 후 ΔT(℃)를 17, 20, 23, 26 4개의 실험군으로 실험한 결과 *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhimurium* 3가지 균은 4개 실험군에서 모두 사멸하였으며, *Listeria monocytogenes*는 4개 실험군 모두 양성반응으로 나타났다. *Bacillus cereus*의 경우 1.12, 1.26, 1.87, 1.74 순으로 감소율을 보였다.

[표 36] 순간상승온도 17℃, 퇴출온도 80℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	63.0 / 80.0	17	5.28	ND ²⁾	5.28
<i>Bacillus cereus</i>			4.29	3.17	1.12
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.41	ND	5.41
<i>Listeria monocytogenes</i>			+ ³⁾	+	
<i>Salmonella typhimurium</i>			+	- ⁴⁾	

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection
- 3) Positive reaction
- 4) Negative reaction

[표 37] 순간상승온도 20℃, 퇴출온도 80℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	60.0 / 80.0	20	5.25	ND ²⁾	5.25
<i>Bacillus cereus</i>			4.20	2.94	1.26
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.48	ND	5.48
<i>Listeria monocytogenes</i>			+ ³⁾	+	
<i>Salmonella typhimurium</i>			+	- ⁴⁾	

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection
- 3) Positive reaction
- 4) Negative reaction

[표 38] 순간상승온도 23℃, 퇴출온도 80℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	57.0 / 80.0	23	5.23	ND ²⁾	5.23
<i>Bacillus cereus</i>			4.17	2.30	1.87
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.35	ND	5.35
<i>Listeria monocytogenes</i>			+ ³⁾	+	
<i>Salmonella typhimurium</i>			+	- ⁴⁾	

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection
- 3) Positive reaction
- 4) Negative reaction

[표 39] 순간상승온도 26℃, 퇴출온도 80℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	54.0 / 80.0	26	5.35	ND ²⁾	5.35
<i>Bacillus cereus</i>			3.04	1.30	1.74
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.51	ND	5.51
<i>Listeria monocytogenes</i>			+ ³⁾	+	
<i>Salmonella typhimurium</i>			+	- ⁴⁾	

- 1) Log Reduction
- 2) Non-Detection
- 3) Positive reaction
- 4) Negative reaction

(2) 공동현상과 퇴출온도와의 상관관계 파악

(가) 목적 : 공동현상을 이용한 액상식품 살균 시 최적 퇴출온도 파악

(나) 시료 : 정량실험 시 실험대상균 외의 균에 의한 오염 및 오차 범위를 줄이기 위해 멸균 상태의 UHT milk 사용

(다) 실험균주 및 배양조건

실험균주의 최적 활성도를 맞추기 위해 3회 계대배양하여 실험에 사용하였으며, 실험균주 및 배양조건은 [표 39]과 같다. 이 때 최종 균주의 농도는 10^7 CFU/ml이다.

[표 40] 최적 순간상승온도 파악을 위한 실험균주 및 배양조건

Strains	Medium	Incubation temp.(°C)	Incubation time(h)	Manufacturer
<i>Escherichia coli</i> (ATCC 8739)	Tryptic Soy Broth	37	24	Difco Laboratories, Division of Becton Dickinson and Co., Sparks, Md., U.S.A
<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 6538)	Tryptic Soy Broth	37	24	
<i>Bacillus cereus</i> (ATCC 14579)	Tryptic Soy Broth	30	24	

(라) 실험방법

① 준비된 UHT milk 80L에 배양된 실험균주를 인위적으로 접종

② 유량밸브 조절을 통해 순간상승온도(ΔT , °C)를 17로 설정하여 50, 60, 70°C 3개의 퇴출온도에서 검체 채취

[표 41] 순간상승온도 실험조건

실험조건	퇴출온도(°C)	순간상승온도(°C)
1	50	17
2	60	
3	70	

(마) 실험결과

Escherichia coli, *Bacillus cereus*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium* 5가지 균을 접종하여 ΔT 를 17로 고정 후, 퇴출온도 50, 60, 70°C 3개의 실험균으로 실험한 결과 *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, 2가지 균은 3개 실험균에서 모두 사멸하였으며, *Bacillus cereus*의 경우 0.31, 0.48, 1.17 순으로 감소율을 보였다.

[표 42] 순간상승온도 17℃, 퇴출온도 50℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	33.0 / 50.0	17	7.38	6.26	1.12
<i>Bacillus cereus</i>			4.06	3.75	0.31
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.32	5.06	0.26

1) Log Reduction
2) Non-Detection

[표 43] 순간상승온도 17℃, 퇴출온도 60℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	43.0 / 60.0	17	7.61	5.44	2.17
<i>Bacillus cereus</i>			4.03	3.55	0.48
<i>Staphylococcus aureus</i>			4.92	2.51	2.41

1) Log Reduction
2) Non-Detection

[표 44] 순간상승온도 17℃, 퇴출온도 70℃ 조건에 따른 살균력

Spoilage organism	Inlet/Outlet Temp.(℃)	ΔT(℃)	Non-treatment (Log CFU/ml)	Treatment (Log CFU/ml)	LR ¹⁾
<i>Escherichia coli</i>	53.0 / 70.0	17	7.15	ND ²⁾	7.15
<i>Bacillus cereus</i>			4.22	3.05	1.17
<i>Staphylococcus aureus</i>			5.42	ND	5.42

1) Log Reduction
2) Non-Detection

나. 공동현상 영향인자 실험 결과

순간상승온도와 퇴출온도가 살균력에 미치는 영향을 파악하기 위해 온도를 달리 설정하여 실험한 결과, 퇴출온도 75℃에서는 *Bacillus cereus*를 제외한 *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Salmonella typhimurium* 모두 사멸하였으며, 80℃에서는 *Bacillus cereus*와 *Listeria monocytogenes*를 제외한 *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella typhimurium*만 사멸되었다.

퇴출온도가 높을수록 사멸율이 높았으며, 순간상승온도는 23℃일 때 가장 사멸율이 높은 것으로 나타났다. 하지만 *Listeria monocytogenes*의 경우 동일한 순간상승온도에서 75℃에서는 음성으로 나타난 반면, 80℃에서는 양성으로 확인되었다. *Listeria monocytogenes*는 75℃에서 24초간, 85℃에서는 순간 사멸하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 사용된 살균장비가 2초 미만의 시간으로 순간 살균하는 방식임을 감안할 때, 80℃보다 낮은 75℃에서 음성으로 나타난 것은 순간상승온도, 퇴출온도 외에 공동현상이 발생하면서 나타는 압력 등과 같은 부가적인 요인이 작용한 것으로 판단되며, 이러한 요인은 순간상승온도가 낮을수록 효과가 증대되는 것으로 생각된다.

*Bacillus cereus*의 경우 모든 실험군에서 사멸되지 않은 것으로 나타났다. *Bacillus cereus*는 그람 양성 간균으로 내·외부에서 환경적 요인 또는 스트레스 발생 시 아포를 형성하며, 보통의 세포들은 열에 의해 빠르게 사멸되지만 포자의 경우 열 저항성을 가지는 특징이 있다.

축산물의 가공기준 및 성분규격(식품의약품안전처 고시 제2016-130호)에 의하면 원유의 살균 기준규격에서 *Bacillus cereus*는 별도로 규정하고 있지 않으며, 조제유류의 경우에만 ml 당 100 CFU 이하로 설정하고 있다. 식품공전에서는 개별 규격이 정하여지지 않은 식품의 경우 ml 당 1,000 CFU 이하로 규정하고 있다.

본 연구 결과 공동현상에 의한 *Bacillus cereus*의 저해효과는 퇴출온도 80℃, 순간상승온도 23℃ 이상부터 1.74 ~ 1.87 Log reduction을 보이며, 살균 후 1.3 ~ 2.3 Log CFU/ml로 나타났다. 공동현상을 이용한 살균장비를 이용하여 원유 내 *Bacillus cereus*를 살균한 결과 법정 규정치를 벗어나지 않았으나, 우유의 살균공정에서 적절한 살균이 이루어지지 않을 경우 아포를 형성하여 우유 중에 존재하면서 증식에 적당한 온도가 되었을 때, 포자가 발아하여 재오염을 일으킬 수 있다. 이를 방지하기 위해 살균 후 냉각시스템을 통해 급냉한 후 콜드체인시스템(Cold Chain System)을 통하여 신선도를 유지할 필요가 있다. Moon 등(2005)의 연구에 따르면 균의 성장속도는 초기 균수보다 온도에 지배적인 영향을 받는다고 하였으며, Kim 등(2014)은 저장온도의 영향으로 초기 환경에 적응하는 과정에서 성장이 지연된다고 보고하였다. 따라서 우유의 생산 및 유통과정 중 법정 규정치를 준수하는 살균효과와 더불어 신선도 유지를 위한 냉각시스템 및 콜드체인시스템을 통해 적절한 온도관리가 필요할 것으로 생각된다.

11. 살균 전후 식품 시료의 영양소 비교/분석 및 영양소 손실 정도 파악

가. 고온단시간 살균장비를 이용한 UHT 우유의 영양소 분석

유량 밸브 조절을 통해 순간상승온도(ΔT) 30℃, 퇴출온도 70℃으로 설정하여 고온단시간 살균 처리한 UHT 우유를 식품의약품안전처의 축산물 가공기준 및 성분규격 실험법 (2015)에 따라 실험하였으며, 실험결과는 [표 44, 45]와 같다.

[표 45] 고온단시간 살균장비를 이용한 UHT 우유의 미네랄 분석

(mg/100g \pm SD)

	Non-treatment	Treatment
Ca	97.1	97.1
Zn	0.3	0.3
P	98.5	96.5
Mg	9.5	9.4
K	0	0
Na	0	0

UHT 우유의 살균 처리 전 Ca과 Zn은 97.1 mg/100g과 0.3 mg/100g였으며, 살균 처리 후 변화량은 없었다. P은 살균 처리 전 98.5 mg/100g에서 살균 처리 후 96.5 mg/100g으로 2 mg/100g이 감소된 것으로 나타났으며, Mg은 살균 처리 전 9.5 mg/100g에서 살균 처리 후 9.4 mg/100g으로 0.1 mg/100g 감소하였다. 또한 K과 Na은 처리 전 불검출로 나타났다.

Ca은 우유의 대표적인 무기질로 알려져 있으며 우유에 불용성 칼슘과 가용성 칼슘으로 존재하고, 가열 살균 처리 과정에서 가용성 칼슘의 양이 감소하거나 존재 형태가 변할 수 있다. Claeys *et al.*, (2012), Burton(1984)은 가열처리로 인한 Ca, P, Mg의 함량 변화는 거의 없거나 크지 않다고 보고하였으며, 이는 본 연구결과와 같았다.

[표 46] 고온단시간 살균장비를 이용한 UHT 우유의 비타민 분석

	Non-treatment	Treatment
Vitamin C	0.00	0.00
Vitamin B ₁ mg/100g	0.04	0.04
Vitamin B ₂	0.09	0.07
Vitamin B ₁₂ μg/100g	0.00	0.00
Vitamin D	2.61	2.93
Vitamin A μg RE/100g	75.09	57.23

UHT 우유의 살균 처리 전 Vitamin B₂의 함량은 0.09 mg/100g로 0.02 mg/100g 감소하였고, Vitamin B₁은 살균 처리 전 0.04 mg/100g 였으며 살균 처리 후 변화량이 없었다. 지용성 비타민의 경우 수용성 비타민보다 열에 안정하고 가열 살균처리로 인한 함량 변화가 크지 않다고 알려져(Lee *et al.*, 2014)있으나, Hur & Hwang(2002)은 Vitamin A는 빛에 의한 파괴와 산소에 의한 산화가 빠르고 고온·고압의 환경에서 절반 이상이 파괴된다고 하였다. Vitamin A는 살균 처리 전 75.09 μg RE/100g에서 살균 처리 후 57.23 μg RE/100g 으로 17.86 μg RE/100g 감소하였고, Vitamin C와 Vitamin B₁₂는 살균 처리 전 불검출로 나타났다.

나. 고온단시간 살균장비를 이용한 원유의 영양소 분석

고온단시간 살균장비의 처리조건은 최적 순간상승온도와 최적 퇴출온도 실험을 통해 결정된 순간상승온도(ΔT) 23℃, 퇴출온도 75℃로 설정하였다. 살균 처리된 원유는 식품의약품안전처의 축산물 가공기준 및 성분규격 실험법(2016)에 따라 실험하였으며, 그 결과는 [표 46 ~ 48]과 같다.

[표 47] 고온단시간 살균장비를 이용한 원유의 미네랄 분석

(mg/100g)

	Non-treatment	Treatment
Ca	115.55	106.74
Zn	0.38	0.30
P	86.97	84.88
Mg	11.11	9.81
K	125.63	123.12
Na	39.87	29.53

원유의 살균 처리 전 Ca, Zn, P의 함량은 115.55, 0.38, 86.97 mg/100g 이었으며, 살균 처리 후 106.74, 0.30, 84.88 mg/100g으로 각각 8.81, 0.08, 2.09 mg/100g 감소하였다. Mg, K, Na의 살균 처리 전 함량은 11.11, 125.63, 39.87 mg/100g 이었으며, 살균 처리 후 9.81, 123.12, 29.53 mg/100g 으로 각각 1.30, 2.51, 10.34 mg/100g 감소하였다. UHT 우유에서는 K과 Na 함량을 볼 수 없었으나, 원유에서는 K과 Na의 함량 변화를 확인할 수 있었다.

[표 48] 고온단시간 살균장비를 이용한 원유의 유지방 및 유단백질 분석

	Non-treatment	Treatment
Milk fat(%)	3.1	3.03
Milk protein(%)	3.15	2.68

우유 중 유지방은 제품의 향과 맛의 형성에 중요한 역할을 하는데 열처리 과정 중 풍미에 손상을 일으키는 lactones 또는 methyl ketone이 형성되면서 품질에 영향을 준다고 알려져 있다(In & Jung, 2001). 유단백은 가열살균 함에 따라 3차 단백질 구조가 파괴되어 변성 및 영양소가 파괴되어 알레르기를 유발한다(Johnston DE et al., 2000). 살균 처리 후 유지방 함량은 3.1%에서 3.03%로 0.07% 감소하였고, 유단백질 함량은 3.15%에서 2.68%로 0.47% 감소한 것으로 나타났다.

[표 49] 고온단시간 살균장비를 이용한 원유의 비타민 분석

	Non-treatment	Treatment
Vitamin C	3.1	2.7
Vitamin B ₁ mg/100g	0.12	0.04
Vitamin B ₂	0.12	0.1
Vitamin B ₁₂	0.59	0.47
Vitamin D μg/100g	0.00	0.00
Vitamin A μg RE/100g	29.03	23.01

원유의 살균 처리 전 Vitamin C, B₁, B₂의 함량은 3.1, 0.12, 0.12 mg/100g이었으며, 살균 처리 후 2.7, 0.04, 0.1 mg/100g으로 각각 0.4, 0.08, 0.02 mg/100g 감소하였다. Vitamin B₁₂의 살균 처리 전 함량은 0.59 μg/100g에서 살균 처리 후 0.47 μg/100g으로 0.12 μg/100g 감소하였다. Vitamin A의 살균 처리 전 함량은 29.03 μg RE/100g에서 살균 처리 후 23.01 μg RE/100g으로 6.02 μg RE/100g 감소하였다. Vitamin D는 살균 처리 전 불검출로 나타났다.

기존 우유 살균법은 낮은 온도에서 장시간 살균(LTLT : 63℃에서 30분), 고온에서 단시간 살균(HTST : 72 ~ 75℃에서 15초), 초고온에서 초단시간 살균(UHT : 135℃에서 2초)하는 방법이므로, 살균 온도와 시간에 의해 우유가 갖는 성분의 변화를 야기한다. 비타민의 경우 LTLT처리는 10 ~ 15%, HTST처리는 20%, UHT처리는 20% 이상의 손실을 유발하며, 무기질의 경우 기존 살균법 모두 10% 이하의 손실을 유발한다. 본 연구 기술인 수력학적 공동현상을 이용한 살균법은 고온에서 초단시간 살균함으로써 비타민은 0 ~ 15%의 손실을 유발했고, 무기질은 2%내외의 손실을 유발하였다. 이는 수력학적 공동현상을 이용한 살균법이 기존 우유 살균법보다 우유의 성분 변화를 최소화할 수 있다는 것을 의미한다.

12. 살균 액상식품의 안전성 평가

5가지 우유 시료(원유, LTLT, HTST, UHT, HC 처리 원유)를 대상으로 5℃와 10℃의 2개 온도로 분류하여 14일간 저장하면서, AOAC법(1990)에 따라 미생물 실험(일반세균, 대장균군)과 이화학 실험(pH, 산도)을 진행하였다. 실험에 사용된 시료는 같은 날 제조된 것으로 수행하였으며, 공동현상 처리 조건은 순간상승온도 23℃, 퇴출온도 75℃로 설정하여 수행하였다.

[그림 88]과 [그림 89]는 5℃와 10℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 일반세균 변화를 나타낸 것이다. 살균처리를 하지 않은 원유의 초기 균수는 3.42 log CFU/ml 였고 원유를 75℃의 온도에서 2 초미만의 시간으로 살균 처리했을 시 0.22 log CFU/ml 검출되어, 살균 처리로 3.2 log CFU/ml 감소한 것으로 나타났다.

5℃에서 저장했을 때 원유는 2.5일 차에 4.3 log CFU/ml 이상 검출되어 법적 기준인 20,000 CFU/ml 를 초과하였다. LTLT 우유는 초기 균수가 0.3 log CFU/ml 였고 4일 차에는 2.05 log CFU/ml 검출되었으며, HC 처리 우유는 2.5일 차에 2.45 log CFU/ml 였고 11일 차에는 3 log CFU/ml 로 나타났으나 저장기간 동안 법적 기준을 초과하지 않았다.

10℃에서는 원유가 1일차에 5.43 log CFU/ml를 나타내었으며, LTLT 우유는 2일 차에 4.92 log CFU/ml 로 법적 기준을 초과하였고 14일 차에 7.26 log CFU/ml 까지 증가하였다. HC 처리 우유의 경우 저장 1일 차부터 2.26 log CFU/ml 로 급격히 증가하였으며, 4일 차부터 법적 기준인 20,000 CFU/ml 이상 검출되었다.

[그림 90]과 [그림 91]은 5℃와 10℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 대장균군 변화를 나타낸 것이다. 원유의 대장균군 초기 균수는 2.29 log CFU/ml 였고 5℃에서는 5.17 log CFU/ml, 10℃에서는 6.62 log CFU/ml 까지 증가하였으나 LTLT, HTST, UHT 그리고 HC 처리 우유에서는 검출되지 않았다.

[그림 92 ~ 95]은 5℃와 10℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 pH 및 산도 변화를 나타낸 것이다. 5℃에서 저장했을 시, 원유를 제외한 4가지 우유 시료는 일반적인 우유 수준의 pH 및 산도를 유지하였고, 10℃에서는 LTLT 우유는 저장 5.5일 차까지, HC 처리 원유는 저장 10.5일 차까지 유지하였다.

우유의 살균방법에 따른 관능적 특성을 비교하기 위해 Blind test를 통해 30인 이상의 전문 식품 패널들을 대상으로 Rank order test를 실시하여 살균방법에 따른 선호도를 파악하였다.

[표 50] 관능평가 시료 및 평가 항목

Samples	Blind test contents
<ul style="list-style-type: none"> - UHT milk - LTLT milk - HTST milk - HC milk 	Tastes, Flavor, Texture

우유는 살균 온도와 시간에 따라 관능적 특성(맛, 향, 입안 감촉 등)이 변하는데, 낮은 온도에서 장시간 살균하는 LTLT 우유는 고소하고 신선한 맛이 강했으나, 비린 향과 발효유향이 타 살균법을 이용한 우유보다 빠른 것으로 나타났다. 비린 향과 발효유향이 난다는 것은 내열성 젖산균에 의한 발효가 진행되고 있는 것을 의미하며, LTLT 우유는 저장기간이 길어질수록 다른 우유들보다 발효유향, 비린 향, 산패취 등의 이취가 강하게 나타났다.

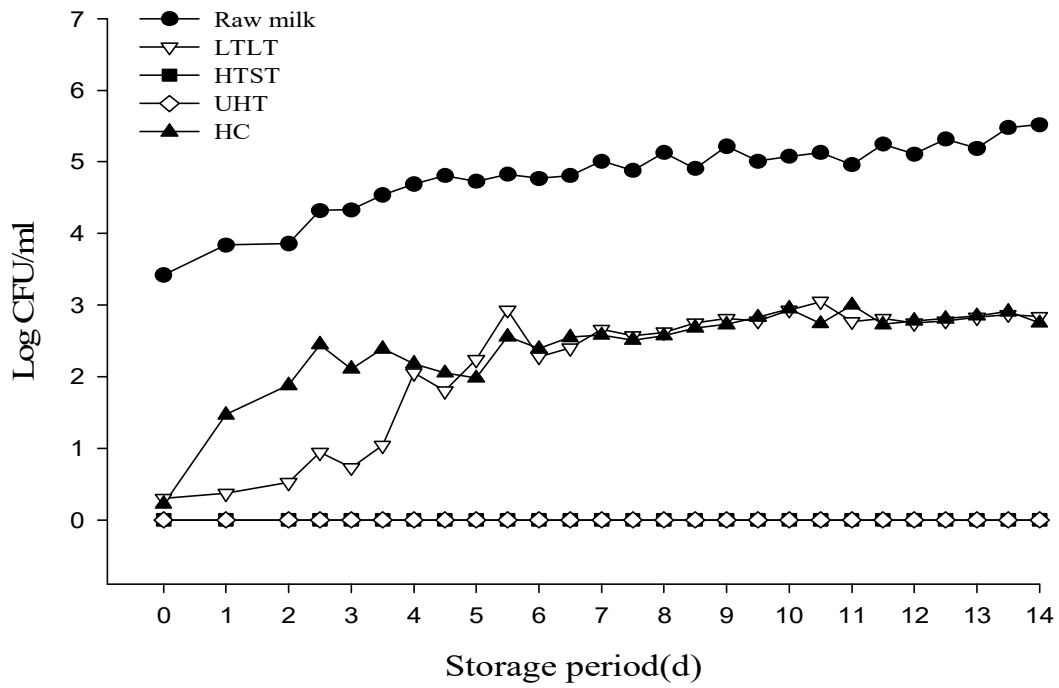
HTST 우유는 고온에서 단시간 살균한 우유로 저장기간이 길어질수록 고소한 맛이 감소하고 산패취가 강하게 났고, 그 외에는 다른 우유와 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 초고온 살균하는 UHT처리로 살균한 우유는 색, 가열취(cooked flavor) 및 가열향(cooked aroma)에 의한 관능적 특성이 높게 나타났다. 이는 초고온에서 살균됨에 따라 생기는 갈색화 반응과 Hydroxymethyl-furfural(HMF)과 같은 갈색물질의 생성으로 인해 높게 나타난 것으로 보인다.

고온에서 초단시간 살균하는 수력학적 공동현상을 이용한 살균법은 저장기간이 짧을수록 고소하고 신선한 맛이 강했으며, 저장기간이 길어질수록 LTLT 우유와 마찬가지로 산패취, 발효유향, 비린 향 등 이취가 강하게 발생했다. 그러나 UHT와 같은 가열취 및 가열향에 의한 관능적 특성이 높게 나타났다.

우유 살균법의 기호도는 UHT 우유를 가장 선호하고, 그 다음은 수력학적 공동현상을 이용한 우유, LTLT 우유, HTST 우유 순이었다. 이것은 대부분 유업체에서 UHT 살균 방식으로 우유를 생산하기 때문에 소비자들 대부분이 UHT 우유에 익숙하기 때문인 것으로 보인다. 수력학적 공동현상 처리 우유는 UHT 우유 다음으로 선호하는 것으로 나타나 우유의 관능적 특성은 양호한 것으로 판단된다.

[표 51] 5℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 일반세균 변화

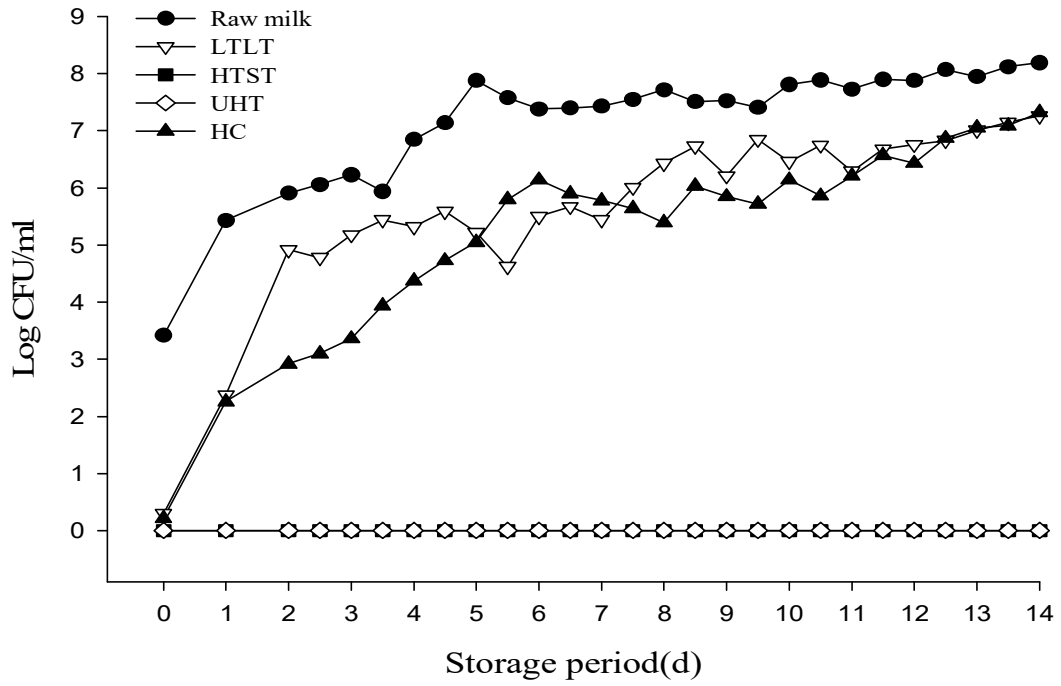
Samples	Raw milk	LTLT	HTST	UHT	HC
0	3.42	0.3	0	0	0.22
1	3.84	0.37	0	0	1.47
2	3.86	0.52	0	0	1.88
2.5	4.32	0.94	0	0	2.45
3	4.33	0.73	0	0	2.11
3.5	4.54	1.04	0	0	2.39
4	4.69	2.05	0	0	2.18
4.5	4.81	1.8	0	0	2.05
5	4.73	2.24	0	0	1.98
5.5	4.83	2.93	0	0	2.56
6	4.77	2.28	0	0	2.39
6.5	4.81	2.4	0	0	2.55
7	5.01	2.66	0	0	2.58
7.5	4.88	2.57	0	0	2.51
8	5.13	2.62	0	0	2.57
8.5	4.91	2.75	0	0	2.68
9	5.22	2.81	0	0	2.73
9.5	5.01	2.78	0	0	2.83
10	5.08	2.93	0	0	2.95
10.5	5.13	3.05	0	0	2.74
11	4.96	2.77	0	0	3.00
11.5	5.25	2.81	0	0	2.73
12	5.11	2.75	0	0	2.78
12.5	5.32	2.78	0	0	2.81
13	5.19	2.83	0	0	2.85
13.5	5.48	2.87	0	0	2.91
14	5.52	2.84	0	0	2.75



[그림 89] 5℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 일반세균 변화

[표 52] 10℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 일반세균 변화

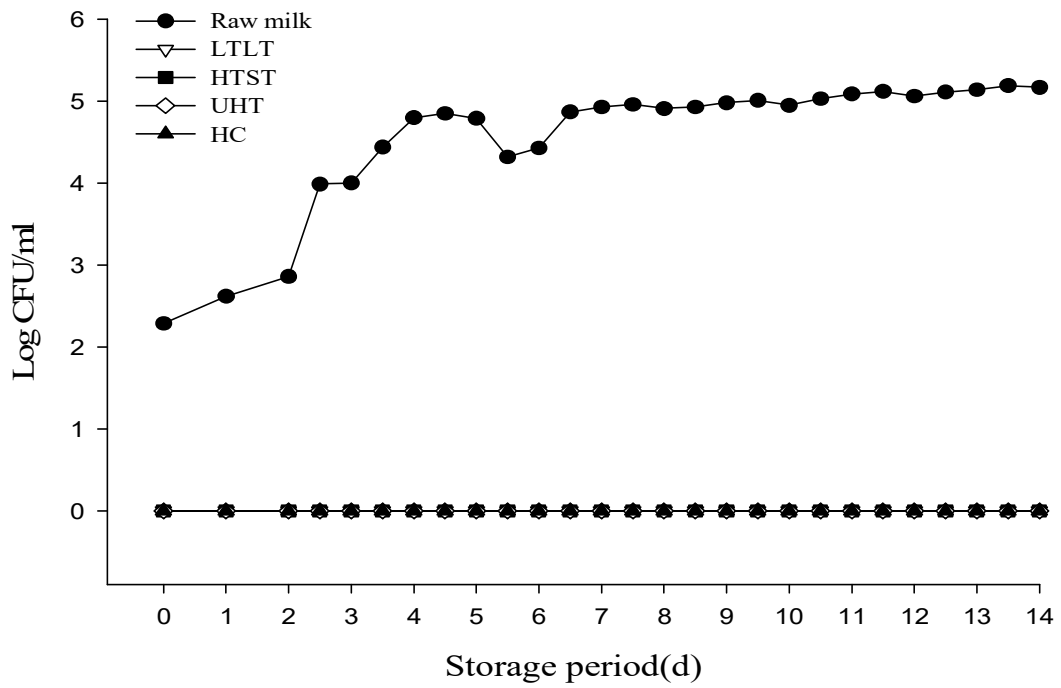
Samples		Raw milk	LTLT	HTST	UHT	HC
Storage period(d)	0	3.42	0.3	0	0	0.22
	1	5.43	2.37	0	0	2.26
	2	5.91	4.92	0	0	2.92
	2.5	6.06	4.78	0	0	3.1
	3	6.23	5.18	0	0	3.36
	3.5	5.94	5.44	0	0	3.94
	4	6.85	5.32	0	0	4.37
	4.5	7.14	5.59	0	0	4.73
	5	7.88	5.22	0	0	5.05
	5.5	7.58	4.62	0	0	5.8
	6	7.38	5.5	0	0	6.14
	6.5	7.4	5.67	0	0	5.9
	7	7.43	5.44	0	0	5.78
	7.5	7.55	6.01	0	0	5.64
	8	7.72	6.43	0	0	5.392
8.5	7.51	6.73	0	0	6.03	
9	7.53	6.21	0	0	5.85	
9.5	7.41	6.85	0	0	5.72	
10	7.81	6.46	0	0	6.14	
10.5	7.89	6.75	0	0	5.86	
11	7.73	6.29	0	0	6.21	
11.5	7.9	6.68	0	0	6.57	
12	7.88	6.76	0	0	6.43	
12.5	8.07	6.83	0	0	6.87	
13	7.95	7.01	0	0	7.05	
13.5	8.12	7.15	0	0	7.09	
14	8.19	7.26	0	0	7.32	



[그림 90] 10℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 일반세균 변화

[표 53] 5℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 대장균군 변화

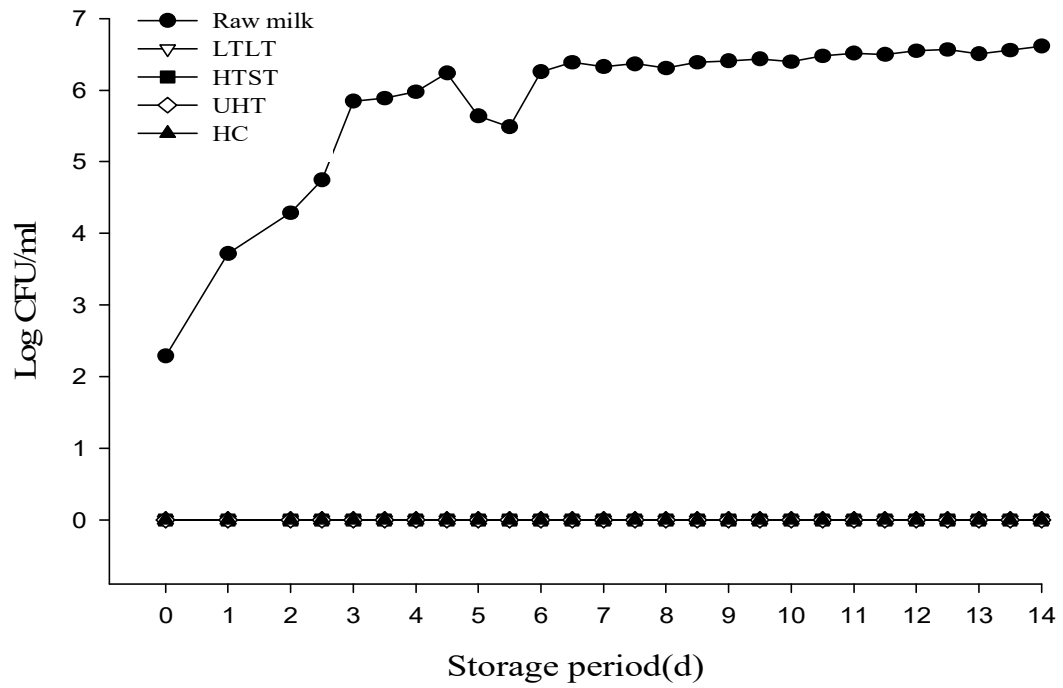
Samples	Raw milk	LTLT	HTST	UHT	HC
0	2.29	0	0	0	0
1	2.62	0	0	0	0
2	2.86	0	0	0	0
2.5	3.99	0	0	0	0
3	4	0	0	0	0
3.5	4.44	0	0	0	0
4	4.8	0	0	0	0
4.5	4.85	0	0	0	0
5	4.79	0	0	0	0
5.5	4.32	0	0	0	0
6	4.43	0	0	0	0
6.5	4.87	0	0	0	0
7	4.93	0	0	0	0
7.5	4.96	0	0	0	0
8	4.91	0	0	0	0
8.5	4.93	0	0	0	0
9	4.98	0	0	0	0
9.5	5.01	0	0	0	0
10	4.95	0	0	0	0
10.5	5.03	0	0	0	0
11	5.09	0	0	0	0
11.5	5.12	0	0	0	0
12	5.06	0	0	0	0
12.5	5.11	0	0	0	0
13	5.14	0	0	0	0
13.5	5.19	0	0	0	0
14	5.17	0	0	0	0



[그림 91] 5℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 대장균군 변화

[표 54] 10℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 대장균군 변화

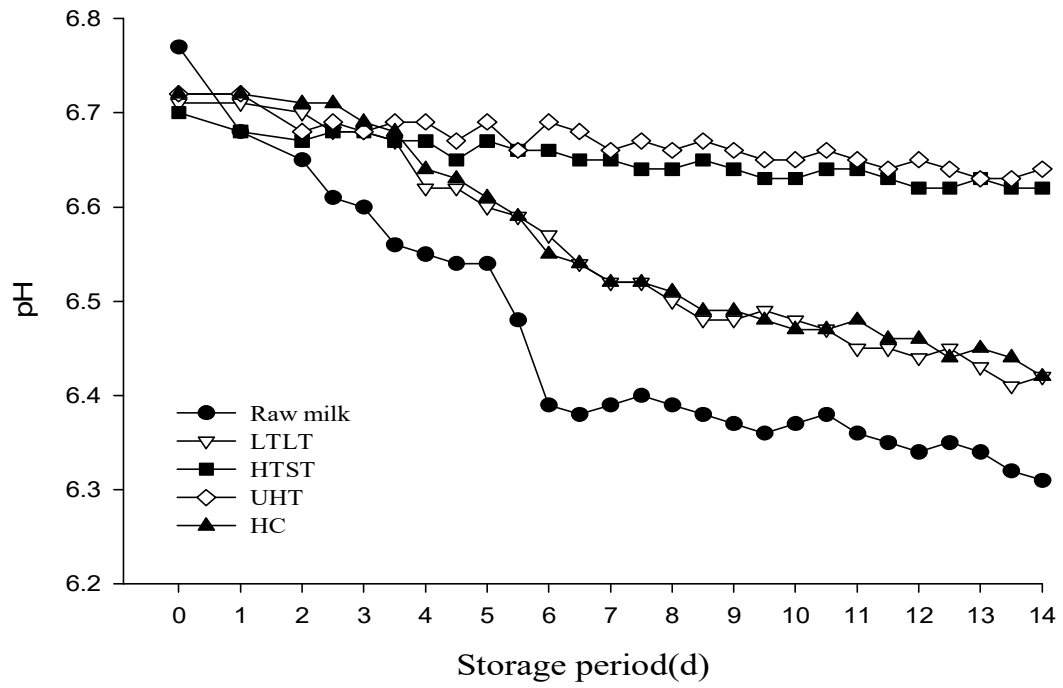
Samples		Raw milk	LTLT	HTST	UHT	HC
Storage period(d)	0	2.29	0	0	0	0
	1	3.72	0	0	0	0
	2	4.29	0	0	0	0
	2.5	4.75	0	0	0	0
	3	5.85	0	0	0	0
	3.5	5.89	0	0	0	0
	4	5.98	0	0	0	0
	4.5	6.24	0	0	0	0
	5	5.64	0	0	0	0
	5.5	5.49	0	0	0	0
	6	6.26	0	0	0	0
	6.5	6.39	0	0	0	0
	7	6.33	0	0	0	0
	7.5	6.37	0	0	0	0
	8	6.31	0	0	0	0
8.5	6.39	0	0	0	0	
9	6.41	0	0	0	0	
9.5	6.44	0	0	0	0	
10	6.4	0	0	0	0	
10.5	6.48	0	0	0	0	
11	6.52	0	0	0	0	
11.5	6.5	0	0	0	0	
12	6.55	0	0	0	0	
12.5	6.57	0	0	0	0	
13	6.51	0	0	0	0	
13.5	6.56	0	0	0	0	
14	6.62	0	0	0	0	



[그림 92] 10°C에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 대장균군 변화

[표 55] 5℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 pH 변화

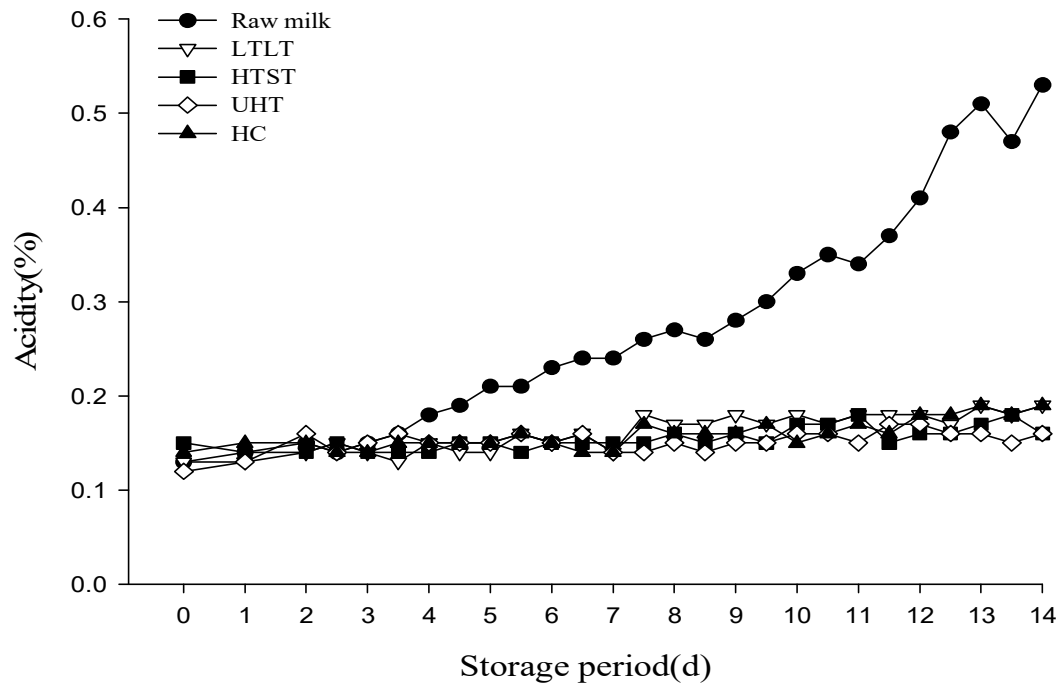
Samples	Raw milk	LTLT	HTST	UHT	HC
0	6.77	6.71	6.62	6.72	6.75
1	6.68	6.7	6.61	6.72	6.75
2	6.65	6.68	6.6	6.68	6.73
2.5	6.61	6.63	6.61	6.69	6.72
3	6.6	6.58	6.6	6.68	6.69
3.5	6.56	6.56	6.59	6.69	6.68
4	6.55	6.56	6.6	6.69	6.64
4.5	6.54	6.57	6.58	6.67	6.6
5	6.54	6.55	6.6	6.69	6.61
5.5	6.48	6.54	6.59	6.66	6.59
6	6.39	6.45	6.61	6.69	6.55
6.5	6.38	6.45	6.59	6.68	6.51
7	6.37	6.43	6.6	6.66	6.47
7.5	6.43	6.45	6.59	6.67	6.47
8	6.41	6.47	6.6	6.66	6.46
8.5	6.38	6.42	6.51	6.67	6.45
9	6.37	6.41	6.58	6.66	6.46
9.5	6.36	6.43	6.58	6.65	6.45
10	6.37	6.4	6.57	6.65	6.46
10.5	6.38	6.49	6.56	6.66	6.45
11	6.36	6.4	6.57	6.65	6.44
11.5	6.35	6.38	6.56	6.64	6.43
12	6.34	6.37	6.55	6.65	6.44
12.5	6.35	6.38	6.56	6.64	6.42
13	6.34	6.36	6.54	6.63	6.42
13.5	6.32	6.35	6.53	6.63	6.41
14	6.31	6.34	6.54	6.64	6.4



[그림 93] 5°C에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 pH 변화

[표 56] 5℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 산도 변화

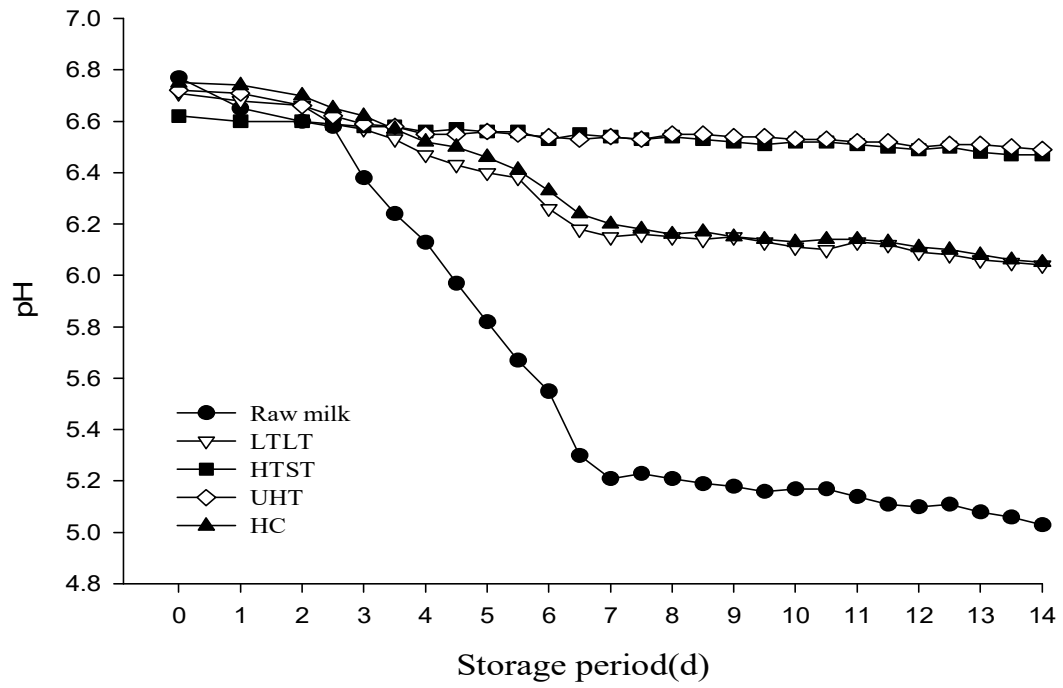
Samples	Raw milk	LTLT	HTST	UHT	HC
0	0.13	0.13	0.15	0.12	0.14
1	0.14	0.13	0.14	0.13	0.15
2	0.15	0.14	0.14	0.16	0.15
2.5	0.14	0.15	0.15	0.14	0.14
3	0.15	0.14	0.14	0.15	0.14
3.5	0.16	0.13	0.14	0.16	0.15
4	0.18	0.15	0.14	0.15	0.15
4.5	0.19	0.14	0.15	0.15	0.15
5	0.21	0.14	0.15	0.15	0.15
5.5	0.21	0.16	0.14	0.16	0.16
6	0.23	0.15	0.15	0.15	0.15
6.5	0.24	0.16	0.15	0.16	0.14
7	0.24	0.14	0.15	0.14	0.14
7.5	0.26	0.18	0.15	0.14	0.17
8	0.27	0.17	0.16	0.15	0.16
8.5	0.26	0.17	0.15	0.14	0.16
9	0.28	0.18	0.16	0.15	0.16
9.5	0.3	0.17	0.15	0.15	0.17
10	0.33	0.18	0.17	0.16	0.15
10.5	0.35	0.17	0.17	0.16	0.16
11	0.34	0.18	0.18	0.15	0.17
11.5	0.37	0.18	0.15	0.17	0.16
12	0.41	0.18	0.16	0.17	0.18
12.5	0.48	0.17	0.16	0.16	0.18
13	0.51	0.18	0.17	0.16	0.16
13.5	0.47	0.16	0.18	0.15	0.18
14	0.53	0.18	0.16	0.16	0.17



[그림 94] 5°C에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 산도 변화

[표 57] 10℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 pH 변화

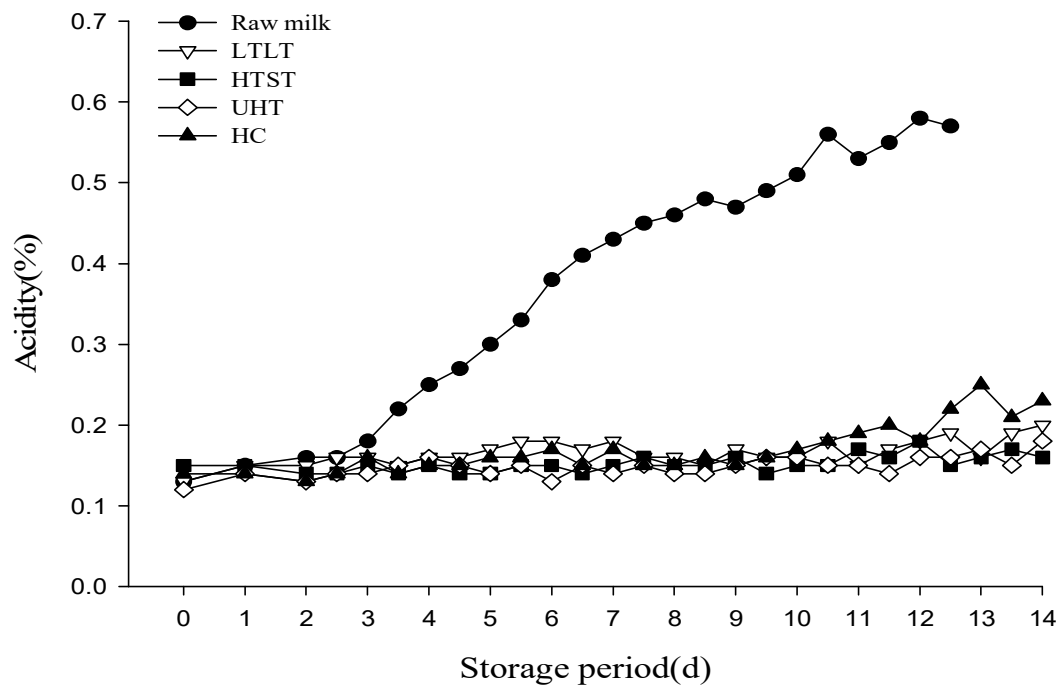
Samples		Raw milk	LTLT	HTST	UHT	HC
Storage period (d)	0	6.77	6.71	6.62	6.72	6.75
	1	6.65	6.68	6.6	6.71	6.74
	2	6.6	6.66	6.6	6.66	6.7
	2.5	6.58	6.59	6.59	6.62	6.65
	3	6.38	6.57	6.58	6.59	6.62
	3.5	6.24	6.53	6.58	6.58	6.57
	4	6.13	6.47	6.56	6.55	6.52
	4.5	5.97	6.43	6.57	6.55	6.5
	5	5.82	6.4	6.56	6.56	6.46
	5.5	5.67	6.38	6.56	6.55	6.41
	6	5.55	6.26	6.53	6.54	6.33
	6.5	5.3	6.18	6.55	6.53	6.24
	7	5.21	6.15	6.54	6.54	6.2
	7.5	5.23	6.16	6.53	6.53	6.18
	8	5.21	6.15	6.54	6.55	6.16
8.5	5.19	6.14	6.53	6.55	6.17	
9	5.18	6.15	6.52	6.54	6.15	
9.5	5.16	6.13	6.51	6.54	6.14	
10	5.17	6.11	6.52	6.53	6.13	
10.5	5.17	6.1	6.52	6.53	6.14	
11	5.14	6.13	6.51	6.52	6.14	
11.5	5.11	6.12	6.5	6.52	6.13	
12	5.1	6.09	6.49	6.5	6.11	
12.5	5.11	6.08	6.5	6.51	6.1	
13	5.08	6.06	6.48	6.51	6.08	
13.5	5.06	6.05	6.47	6.5	6.06	
14	5.03	6.04	6.47	6.49	6.05	



[그림 95] 10°C에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 pH 변화

[표 58] 10℃에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 산도 변화

Samples	Raw milk	LTLT	HTST	UHT	HC
0	0.13	0.13	0.15	0.12	0.14
1	0.15	0.15	0.15	0.14	0.14
2	0.16	0.15	0.14	0.13	0.13
2.5	0.16	0.16	0.14	0.14	0.14
3	0.18	0.16	0.15	0.14	0.16
3.5	0.22	0.15	0.14	0.15	0.14
4	0.25	0.16	0.15	0.16	0.15
4.5	0.27	0.16	0.14	0.15	0.15
5	0.3	0.17	0.14	0.14	0.16
5.5	0.33	0.18	0.15	0.15	0.16
6	0.38	0.18	0.15	0.13	0.17
6.5	0.41	0.17	0.14	0.15	0.15
7	0.43	0.18	0.15	0.14	0.17
7.5	0.45	0.16	0.16	0.15	0.15
8	0.46	0.16	0.15	0.14	0.15
8.5	0.48	0.15	0.15	0.14	0.16
9	0.47	0.17	0.16	0.15	0.15
9.5	0.49	0.16	0.14	0.16	0.16
10	0.51	0.16	0.15	0.16	0.17
10.5	0.56	0.18	0.15	0.15	0.18
11	0.53	0.15	0.17	0.15	0.19
11.5	0.55	0.17	0.16	0.14	0.2
12	0.58	0.18	0.18	0.16	0.18
12.5	0.57	0.19	0.15	0.16	0.22
13		0.16	0.16	0.17	0.25
13.5		0.19	0.17	0.15	0.21
14		0.2	0.16	0.18	0.23



[그림 96] 10°C에서 우유시료 5종을 14일간 저장하였을 때의 산도 변화

제 4 장 목표달성도 및 관련분야 기여도

코드번호

D-06

제 1 절 목표달성도

[표 59] 세부연구목표 및 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
회전하는 와류 발생기의 공동현상(cavitation)을 응용하여 액상식품의 유해 세균을 순간적으로 가열하여 살균하는 장비 개발	30	100	계획한 살균장비 개발을 완료하였음
안전성 평가를 통한 액상식품을 고온단시간(72℃, 15초 이상)으로 가열·살균하는 장비 개발	50	100	살균된 액상식품의 안전성 평가 및 살균 효율성 분석 시 '축산물 가공기준 및 성분규격'에 부합하였음. 살균온도는 유량 조절에 따라 유동적으로 조정가능하며, 2초 미만의 처리시간으로 살균 가능 - 유지방(%) : 3.0이상 - 세균수 : 1ml 당 20,000 CFU 이하 - 대장균군 : n=5, c=2, m=0, M=10
전동기 55 kW급 기준 열효율 90%의 고효율 가열 살균 장비 개발	20	100	55kW급 기준 열효율 90% 이상 달성하였음
합계	100	100	본 과제를 수행하면서 계획했던 세부연구 목표를 100% 달성하였음

제 2 절 관련분야 기여도

본 과제를 수행하면서 개발한 '직접가열을 통한 우유류의 고효율 살균장비'는 국내에서는 현재 온수가열장치 정도로만 사용되고 있는 실정이며, 식품 살균에 활용한 것은 국내 최초이다. 향후 수력학적 공동현상 연구 분야의 선행연구로서 기초 자료 제공에 기여할 것으로 생각된다.

제 3 절 전략적 목표성과계획

본 연구결과의 객관적 검증을 위해 과제 종료 이후에도 정량적 지표 달성을 위해 특허출원 및 등록, 국제학술지(SCI급) 게재

1. 특허출원 : 국내 특허출원 2건 현재(2017.03) 심사 중

2. 특허등록 : 국내 특허등록 1건 현재(2017.03) 심사 중

3. 국제학술지

- 총 3편 중 1편(Experimental Study of a New Sterilization Method Using a Hydrodynamic Cavitation Reactor, 2017, IMECH-PART E)은 심사 중, 2편은 투고 예정

제 5 장 연구결과의 활용 계획

코드번호	D-07
------	------

- 참여기업에 직접가열을 통한 고효율 살균장비 기술 이전을 통한 수익창출과 일자리 창출 유도
- 직접가열을 통한 고효율 살균장비 생산업체에 Validation 확보 및 K-마크 획득에 활용
- 살균장비 보급형 개발을 통한 농가소득 활성화 국가정책에 기여

아래의 [그림 96]은 체험목장수와 방문객수의 증가 추이를 도시하고 있다. 체험 목장의 수와 방문객 수는 전년 대비 11.11%, 15.82%로 증가추세에 있으며 이를 반영했을 시 예상되는 체험목장의 수는 40(호) 이상, 방문객의 수는 870(천명) 이상으로 추산된다.

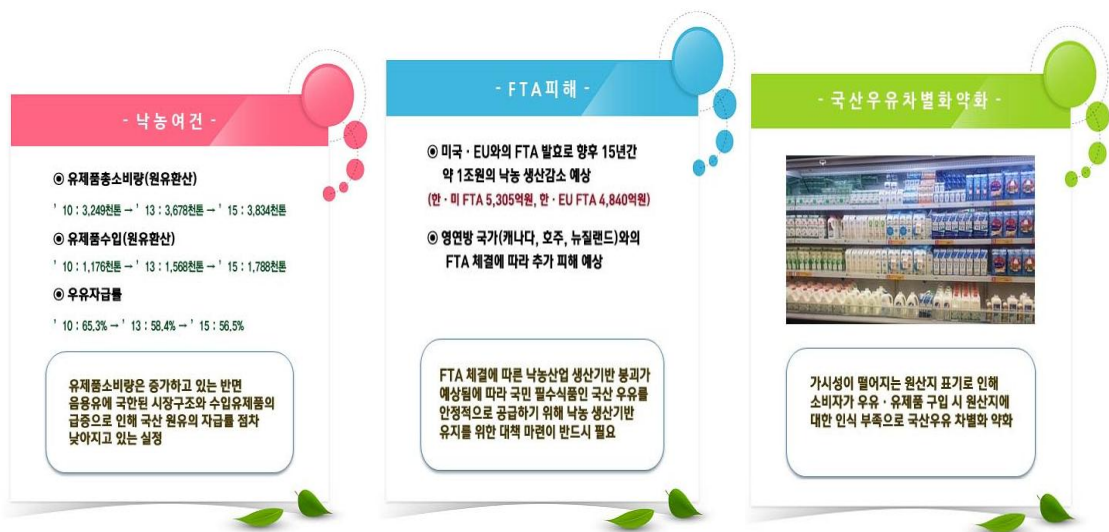


[그림 97] 국내 낙농가 체험목장 수 및 방문객 수 증가 추이

[표 60] 국내 낙농가 살균장비 보급 시장규모 예측치

구 분	현재의 시장규모(2017년)	예상 시장규모(2020년)
국내 낙농가 시장규모 (단위 : 만원)	40,000	53,240 (과년도 대비 +10% 추산)
산출 근거	<ul style="list-style-type: none"> ○ 우유·유제품을 직접생산하는 체험목장수 및 방문객수 증가 추이 ○ K-MILK 등 한국낙농육우협회의 낙농가 활성화 정책 반영 ○ 소비자 기호를 반영한 소비트렌드, 국내 2차 가공 유제품의 증가 추이 반영 	

한국낙농육우협회는 2017년도 제 1차 K-MILK 인증위원회를 개최하고 3월 현재 총 18개 유업체 371개 국산 우유·유제품, 커피업체 1개사가 K-MILK 인증을 받았다고 발표하였으며 국산 우유·유제품의 소비자 선택지의 확대와 소비활성화를 위해 K-MILK인증이 소비자에게 안정적으로 다가갈 수 있도록 확대해 나갈 계획을 공표했다.



[그림 98] K-MILK 사업 추진배경

소비자공익네트워크는 시중에서 판매되고 있는 309개 유제품에 대해 모니터링을 실시한 결과 K-MILK인증 제품은 168개로 전체의 54.4%였다고 밝혔다. 특히, 흰 우유 제품의 경우 104개 제품 중 93개가 인증을 받았고, 그 외 제품들도 모두 국산원료 사용표기가 이뤄지고 있는 것으로 나타났다. 반면에 유가공품의 인증은 이에 비해 저조한 실적을 보였다.

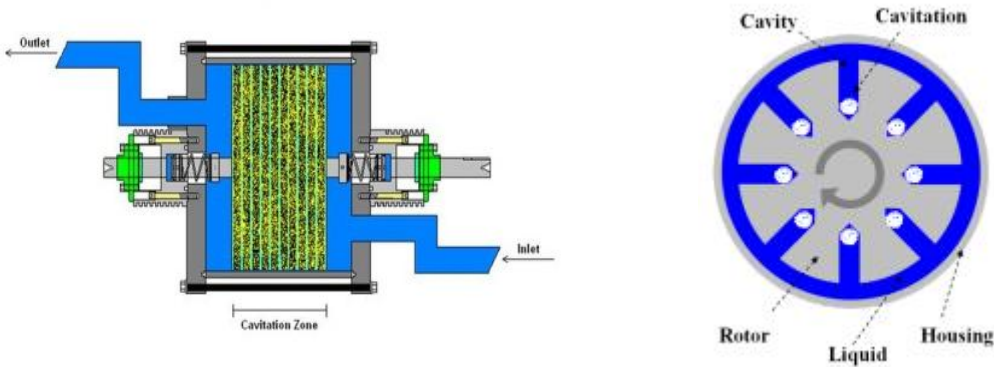
현재 소비자공익네트워크는 이를 개선하기 위한 방안으로 참여도를 확대하기 위해 K-MILK 제품에 대한 검증과 관리를 통해 신뢰를 높이고, 단순한 국내산 원유를 사용한 제품이라는 것에서 한발 더 나아가 품질차별화 전략을 펼쳐야 한다고 덧붙이고 있다. 또한 소비자들의 인지도가 높아지는 만큼 업체들의 참여의지도 높아지리라 예상하고 있으며, 소비확대가 지상과제로 대두되고 있는 상황에서 정부차원의 적극적 지원과 범 낙농유업계의 참여가 필요한 시점이다.

제 6 장 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

코드번호

D-08

○ Hydro Dynamics, Inc.은 특별히 설계된 로터 회전 작용의 캐비테이션(cavitation)기술개발을 통해 현재 다양한 분야에서 활용하고 있다.



- 대체연료

: 캐비테이션 기술을 이용하여 생산한 SPR(ShockWave Power)은 바이오가스, 해조류 추출 등의 분야에서 제품의 반응시간을 가속화하고, 품질을 크게 향상시키는 동시에 기존 기술에 비해 높은 수율과 높은 생산 속도를 제공함으로써 석유의 대체 에너지로 공급받고 있다.

- 화학

: 세계 산업기반으로 화학 분야에서 추출, 혼합 등 화학물질의 생산 증가와 비용절감 및 신제품 도입을 위한 신기술에 도입을 목표로 하고 있다.

- 식품

: 식품의 순도를 보장하는 규제가 강화됨에 따른 SPR기술을 통한 안전한 음식 처리 효과를 볼 수 있을 것으로 보고된다.

- 정유

: SPR은 우수한 질량전달, 자유로운 가열능력을 활용하는 석유 시추 및 정제 응용 분야에서 시추용 머드를 위한 유기염류 농도, 석유제품 저온가열, 불순한 물에서 증기생산, 석유제품의 동적 혼합 등의 효율성을 향상시키고 환경적 위험을 줄이는 새로운 기술을 개발하고 있다.

제 7 장 연구개발결과의 보안등급

		코드번호	D-09
보안등급분류	일반		
결정사유	「국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4에 해당하지 않음		

제 8 장 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설 장비 현황

해당사항 없음

제 9 장 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전조치 이행 실적

코드번호 D-11

○ 기술적 위험요소 분석 및 안전조치 실시

구분		실시시기	실시부서	관련근거	비고
업무분류	세부내용				
안전점검	일일안전점검	매일	실험실	1. 연안법 제8조 2. 원규 제6, 7, 10 조	
	정기안전점검	매월	실험실	1. 연안법 제8조 2. 원규 제6, 7, 10 조	
	특별안전점검	하-동절기	시설안전팀		

○ 안전관리대책 마련 및 교육 실시

구분		실시시기	실시부서	관련근거	비고
업무분류	세부내용				
안전점검	인트라넷교육	상시	시설안전팀	-	

제 10 장 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분 (논문 /특허 /기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국 가	코드번호		D-12	
						Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기사항 (SCI여부/인 용횟수 등)
1	특허 출원	살균장치 및 그 동작방법	한양대	-		-	2015.08.03	단독사사	-
2	논문	우유의 가열 및 비가열 살균 기술에 관한 연구 동향 수력학적	한양대	교신 저자	한국유가공 기술과학회 /한국	-	2015.09.30	단독사사	비SCI
3	논문	공동현상을 이용한 가열 살균처리가 우유의 영양성에 미치는 영향 - 비타민 A, B2, 칼슘, 인, 마그네슘, 아연, 지방- 수력학적	한양대	교신 저자	한국조리과 학회/한국	-	2016.12.23	단독사사	비SCI
4	논문	공동현상을 이용한 온수 발생 장치에서의 회전체 형상에 대한 수치해석적 연구	한양대	교신 저자	한국유체 기계학회/ 한국	-	2016.12.13	단독사사	비SCI
5	기타	기술이전	한양대	-	-	-	2016.12.13	-	-
6	학회	Effect of Cavitation on Liquid Food Sterilization	한양대	교신 저자	식품과학회 /한국	-	2015.06.04	-	-
7	학회	공동현상을 이용한 온수발생장치 개발 캐비테이션이 물과	한양대	교신 저자	대한기계 학회/한국	-	2015.05.21	-	-
8	학회	우유에 미치는 긍정적인 영향	한양대	교신 저자	한국유가공 기술과학회 /한국	-	2015.05.14	-	-
9	학회	Effects of hydrodynamic cavitation treatment on the microbiological and chemical properties of milk	한양대	교신 저자	식품과학회 /한국	-	2015.11.23	단독사사	-
10	학회	수질계측시스템의버 블트랩에 대한수치해 석적연구	한양대	교신 저자	대한기계 학회/한국	-	2015.11.11	단독사사	-

11	학회	전동식 주유 펌프용 임펠러의 형상에 따른 수력학적 효율향상에 관한 수치해석적 연구	한양대	교신 저자	대한기계학회/한국	-	2016.12.14	단독사사	-
12	학회	수력학적 공동현상을 이용한 가열장치 내부 덩플 변화에 의한 열효율 성능평가	한양대	교신 저자	대한기계학회/한국	-	2016.12.14	단독사사	-
13	학회	A Numerical Study on the Effect of Dimple Shape and the Gap between Rotor and Cover in Hydrodynamic Cavitation Generator	한양대	교신 저자	대한기계학회/한국	-	2016.12.14	단독사사	-
14	학회	Hydrodynamic Cavitation Effects on Microorganisms and Physicochemical Properties of Milk	한양대	교신 저자	한국식품영양과학회/한국	-	2016.11.02	단독사사	-
15	기타	구두발표 장려상	한양대	교신 저자	한국유가공기술과학회/한국	-	2015.05.14	단독사사	-
16	기타	푸드위크2016 (서울국제식품산업전)	한양대	-	코엑스, 더바이어, 한국조리기계공업협동조합/한국	-	2016.11.02	-	-
17	기타	WORLD FOOD EXPO 2016	한양대	-	(주)월드 박람/한국	-	2016.12.02	-	-

제 11 장 참고문헌

코드번호	D-14
[1] Suk Shin Kim, 1999, Changes in Chemical Components of Milk during Microwave HTST Pasteurization, <i>KOREAN J. FOOD SCI. TECHNOL.</i> 31 (6):1518-1522	
[2] Lyster R L J, 1970, The denaturation of α -lactalbumin and β -globulin in heated milk, <i>J. Dairy Res.</i> 37 :233-243	
[3] P K. Nema, A K. Datta, 2006, Comparative Study of Heat Induced Fouling of Various Types of Milk Flowing over a Heated Metal Surface, <i>Int J. Food Eng.</i> 2 :Iss. 3, Article 9	
[4] Lee, C. J. and Joung, H. J., 2012, Milk intake is associated with metabolic syndrome - Using data from the Korea national health and nutrition examination survey. <i>Korean J. Community Nutr.</i> 17 :795-804.	
[5] Claeys, W. L., Cardoen, S., Daube, G., De, B. J., Dewettinck, K., Dierick, Ka., ... Herman L., 2012, Raw or heated cow milk consumption: Review of risks and benefits. <i>Food Control</i> , 31 (1), 251-262.	
[6] Burton, H., 1984, Reviews of the progress of dairy science: The bacteriological, chemical, biochemical and physical changes that occur in milk at temperatures of 100-150°C. <i>J Dairy Res</i> , 51 , 341-363.	
[7] Lee, J. E., Choi, E. J., Park, S. Y., Jeon, G. Y., Jang, J. Y., Oh, Y. J., ... Choi H. J., 2014, Effects of High Pressure Treatment on the Microbiological and Chemical Properties of Milk. <i>Korean J. Microbiol. Biotechnol</i> , 42 (3), 267-274.	
[8] Hur, J. Y. & Hwang, I. K., 2002, The Stability of Water-soluble and Fat-soluble vitamin in milk by Heat treatments. <i>Korean J. Soc. Food Coockey</i> , 18 (5), 487-494.	
[9] Ministry of Food and Drug Safety., 2016, Standard and Specification of Livestock Products, No. 2016-130.	
[10] In, Y. M., & Jung, I. K., 2001, A Review on the Change of Physicochemical Quality during Heating of Milk. <i>J Korean Dairy Technol</i> , 19 (1), 13-21.	
[11] Johnston D. E., Austin B. A., Murphy R. J., 1992, Effects of high hydrostatic pressure on milk. <i>Milchwissenschaft</i> 47 , 760-763.	
[12] In, Y. M., Jung, I. K., Jeong, S. G., & Ham, J. S., 2002, A Study on the Vitamins Contents in UHT Milk according to Fortification Methods. <i>Korean J. Food Sci. Ani. Resour</i> , 22 (2), 172-178.	
[13] Young FR., 1999, "Cavitation," London, U.K., Imperial College Press, p. 418.	
[14] Vogel A. and Busch S. and Parlitz U., 1996, "Shock wave emission and cavitation bubble generation by picosecond and nanosecond optical breakdown in water," <i>J. acoust. Soc. Am.</i> , 100 (1), 148-165.	

- [15] Gogate PR., Tayal RK. and Pandit AB., 2006, "Cavitation: A technology on the horizon", *Current Science*, **91**(1), 35–46.
- [16] Suslick KS, Didenko Y., Fang MM., Hyeon T., Kolbeck KJ., McNamara WB., Mdleleni MM., and Wong M., 1999, "Acoustic cavitation and its chemical consequences," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, **357**, 335–353.
- [17] Goncharuk VV., Malyarenko VV. and Yaremenko VA., 2008, "Use of ultrasound in water treatment," *Journal of Water chemistry and Technology*, **30**(3), 137–150.
- [18] Lucia U., and Gervino G., 2009, "Hydrodynamic cavitation: from theory towards a new experimental approach," *Cent. Eur. J. Phys.*, **7**(3), 368–644.
- [19] Ozonek J. and Lenik K., 2011, "Effect of different design features of the reactor on hydrodynamic cavitation process" , *Archives of Materials Science and Engineering*, **52**(2), 112–117.
- [20] Kalumuck KM., Chahine GL., Hsiao CT., and Choi JK., 2003, "Remediation and disinfection of water using jet generated cavitation" , *Fifth International Symposium on Cavitation (CAV2003)*, Osaka, Japan, Nov.
- [21] Kumar KS., and Moholkar VS., 2007, "Conceptual design of a novel hydrodynamic cavitation reactor" , *Chemical Engineering Science* **62**, 2698–2711.
- [22] Milly PJ., Toledo RT., Harrison MA., and Armstead D., 2007, "Inactivation of food spoilage microorganisms by hydrodynamic cavitation to achieve Pasteurization and sterilization of fluid food," *Journal of Food Science*, **72**(9), M414–422.
- [23] Milly PJ., Toledo RT., Kerr WL., and Armstead D., 2008, "Hydrodynamic cavitation: Characterization of a novel design with energy considerations for the inactivation of *Saccharomyces cerevisiae* in apple juice," *Journal of Food Science*, **73**(6), M298–M303.
- [24] Kwon WC., and Yoon JY., 2013, "Experimental study of a cavitation heat generator," *Proc. IMechE Part E: J. Process Mechanical Engineering*, **227**(1), 67–73.
- [25] Earnshaw RG, 1998, "Ultrasound: a new opportunity for food preservation," pp. 183–92, In: Povey MJW, Mason TJ, editors. *Ultra sound in food processing*. London, U.K.: Blackie Academic & Professional.
- [26] Jyoti KK., and Pandit AB., 2001, "Water disinfection by acoustic and hydrodynamic cavitation," *Biochemical Engineering Journal*, **7**, 201–212.
- [27] Subhash Shivram Sawanta, Arga Chandrashekar Anila, Venkat Krishnamurthya, Chetan Gaonkara, Janhavi Kolwalkara, Lidita Khandeparkera, Dattesh Desai, Amit Vinod Mahulkarb, Vivek Vinayak Ranadec, Aniruddha Balchandra Panditb, 2008, "Effect of hydrodynamic cavitation on zooplankton: A tool for disinfection," *Biochemical Engineering Journal*, **42**, 320–328.

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 고부가가치식품기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 고부가가치식품 기술개발사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.