

유럽의 최근 콜드체인 R&D 동향

■ 오 종택 / 전남대학교 냉동공조공학과, ohjt@chonnam.ac.kr

식품의 생산부터 최종 소비자에 이르기 까지 그 품질 유지와 지구환경 보존을 위한 콜드체인의 최근 유럽 연구개발 동향을 알아본다.

서론

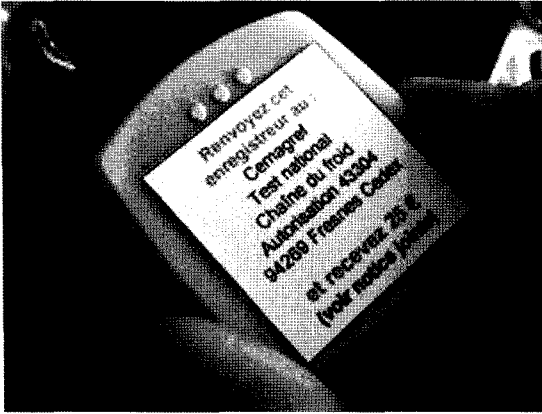
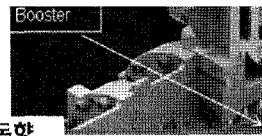
콜드체인(cold chain)은 식품의 신선도를 유지시키고 부패를 지연시킬 뿐만 아니라 생산의 유효 및 품질 보존기간을 더 오래 지속시킬 수 있다는 것은 오래전부터 알려진 사실이고 최근에는 지구환경보호 및 저탄소 녹색상장을 위해서라도 이것을 이용해야 한다는 이 분야 전문가들의 주장과 더불어 각종 매체를 통해서 홍보도 되고 있다. 콜드체인에서 가장 중요한 것이 식품의 냉동·냉장이며, 냉동은 전 세계 식량 공급에 중요한 역할을 한다. 전 세계에서 매년 평균 생산한 식량 55억 톤의 14%에 해당하는 약 4억 톤은 유통 중 한번 이상 냉동이 적용되고 있으나 약 18억톤은 냉동을 전혀 하지 않은 상태로 유통되고 있다. 냉동을 식품에 적용시킬수록 질적 및 양적으로 더 좋은 영양을 가진 식품을 전 세계인들에 공급할 수 있다. 특히, 개발도상국들은 냉동의 부족으로 부패하기 쉬운 식품의 손실율이 23%나 된다¹⁾.

콜드체인은 수확 및 유통과 최종 소비자까지 연속적으로 적용되어야 하며 그것의 성능은 가장 취약한 부분과 관련이 깊고 또한 그 부분 때문에 위생적 및 경제적으로 상당한 손실을 잃게 된다. 그러므로 콜드체인의 발전은 식품의 품질 뿐만 아니라 안전성을 동시에 확립하면서 탄소발자국

(footprint)이 가장 작은 직접 및 간접 효과를 내기 위한 실질적인 도전에 직면해 있다. 따라서 본 특집에서는 유럽에서도 프랑스가 중심이 되어 5년간 식품의 온도 및 각종 측정과 성능향상을 위한 세 가지 방법의 콜드체인 실험연구에서 소비자에게 신뢰성을 증가시키기 위한 콜드체인 전 과정의 온도 모니터링과 식품을 좀 더 효과적이고 더 빨리 냉각시킬 수 있는 새로운 장비의 개발, 끝으로 저 환경적 요소를 제공하는 냉동기술에 대해 소개하고자 한다.

콜드체인의 성능 모니터링

물류의 종합적인 다양성은 콜드체인의 전체적인 성능 평가를 어렵게 만들고 있다. 식품 유통 중의 전체 위험요소 중에서 콜드체인과 관련된 것만 평가를 하는 것은 대단히 어려울 뿐만 아니라 다른 것과 비교하더라도 대단히 취약하기 때문이다. 프랑스의 C사가 2000 ~ 2005년 동안 콜드체인 평가 및 성능 향상에 큰 역할을 했다고 할 수 있다. 프랑스에서 매일 소비하는 생산식품의 50% 및 육류의 18%와 이전에 만들어진 육류들이 이러한 유통을 통해 판매된다. 여기에 나타난 실험결과들은 이와 다른 제품이나 물류에 적용되는 콜드체인을 확장시키는 데는 제약이 따르지만 본 연구에서 얻은 결과들은 식생활 습관 및 물류가 프랑스와 비슷한 국가에서 콜드체인의 연구 및 시행에서 일어날 수 있는 아이디어를 제공해 줄 것이다.

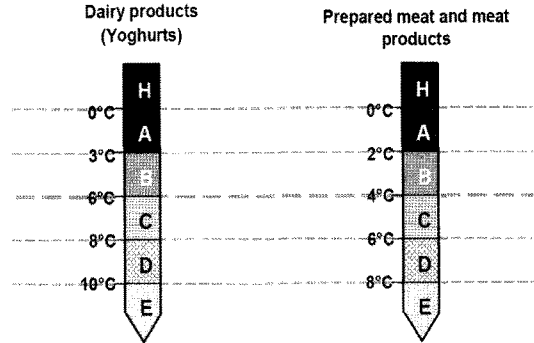


[그림 1] 콜드체인 모니터링 온도 기록계

프로토콜(Protocol)

본 실증연구는 식품 공장의 생산라인부터 가정에서 최종 소비될 때까지 제품의 온도를 계속해서 모니터링 한 것이 독창적이라고 할 수 있다. 이를 위해 온도기록을 위한 센서가 제품내부에 심어져 있고, 이 제품들은 다른 제품과 구별되지 않게 포장 등 모든 것을 똑 같게 하였다. 이것은 제품의 열적 추적이 다른 제품과 비교를 하지 않고도 모니터링 되었음을 의미한다. 즉 소비자가 식품을 구매하여 냉장고에 넣기 전 또는 소비하기 전에 제품 포장을 풀었을 때 센서 및 실험과 관련된 설명서를 발견하고서야 알 수 있게 하였다. 따라서 그것을 발견한 주민이 센서를 C사의 실험실로 보내주면 그들에게 별도의 보상을 해 주는 방식으로 연구를 수행하였다. 이 과정에서 480센서 중 65%의 높은 회수율을 보였고 연구를 주도한 C사가 그것들을 분석하였다. 본 연구에서 데이터베이스에 기록된 데이터가 3800일 이상이고 1백 1십만 데이터²⁾가 집적되었다. 그러므로 데이터 해석이 하나의 거대한 연구가 되었고 대부분 기록계의 배열에 따르게 하였다. 적절한 통계를 위해 온도가 기록된 콜드체인 제품을 정확히 링크(link)시키는 것이 가장 중요한 연구과정의 한 부분이라고 할 수 있다.

그림 1은 콜드체인 연구에 이용된 온도기록계이고 그림 2는 기록된 온도의 범위를 나타낸 것이다.



[그림 2] 온도기록계인 그림 1의 온도 범위

콜드체인 제품이 냉동 및 냉장과 수송 등에는 링크가 아주 잘 되어 관리되었으나 소매, 소매 수송 및 가정용 냉장고 등의 온도 관리는 오차가 일부 나타났다. 특히, 모니터 되어진 가정용 냉장고의 44% 중에 모니터링 한 온도는 추천한 값보다 적어도 4℃ 더 상승하였다. 비록 이와 같은 결과가 일부 발생했을지라도 본 연구에서 얻은 데이터 중에는 프랑스에서 생산된 식품의 생산지역과 소비지역 사이에 평균 거리 780 km로 운반된 것도 있으므로 프랑스 및 유럽의 콜드체인 기술 발전에 기여했을 뿐만 아니라 다른 대륙의 유통에도 참고될 수 있는 자료가 많다고 사료된다. 본 특집에서는 원고의 페이지 제약으로 생략하오니 상세한 연구내용은 참고문헌을 참고해 주시기 바랍니다.

데이터 검토

본 연구에서 얻은 데이터는 방정식 (1)과 같이 부패하기 쉬운 식품의 안전 및 품질에 미치는 온도의 영향이 시간/온도의 적분으로 계산하여 정리하였다. 이 방정식은 Derens 등³⁾이 콜드체인의 각 다른 링크(link)에서 시간/온도를 평가하는 기본 방정식으로 이용한 것이다.

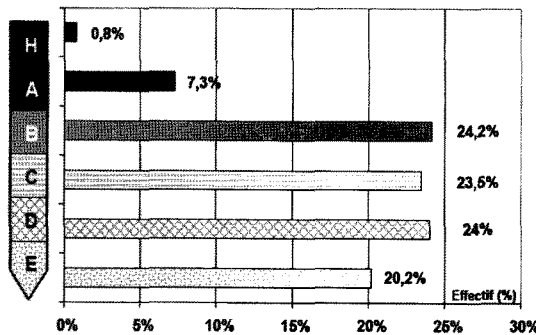
$$\int \theta^2 dt \tag{1}$$

여기서, θ 는 온도이고 t는 시간이다.

온도가 콜드체인으로 링크되는 동안 비정상적으로 상승할지라도 이 링크의 짧은 기간 동안에 제품 전체 수명에 미치는 영향은 대단히 적다. 이와 같은 결과는 더 적절한 미생물 예측 모델을 이용함으로써 신뢰성을 더 확보할 수 있었다. 예를 들면, Wilson 등⁴⁾은 식품의 미생물 비용 평가를 위해 시간-온도 추적의 성장모델을 이용할 것을 제안하였다. 즉 연구는 수학적이고 통계적인 방법으로 수행되었으며, 그리고 데이터는 백업이 잘 되었다. 그림 3은 소비자에 의해 관리된 콜드체인의 평가를 나타낸 것이다.

콜드체인의 전문적인 링크

콜드체인의 전문적인 링크를 위하여 차별화 된 기술을 이용하였다. 즉 소비자들은 일반적인 TIs 및 TTIs 개념⁹⁾을 이해하기 어렵지만 콜드체인의 안전성에 대한 신뢰를 향상시키기 위한 지식이 필요하다. 본 프로젝트는 RFID⁶⁾ 기술의 개발 이용뿐만 아니라 전화, 인터넷 및 인공위성 등의 무선 리모트 통화까지 콜드체인 개발에 이용하였다. 이와 같은 첨단 기술들의 사용에 “변수 수명(variable shelf life)” 개념이 도입되었으며 아주 훌륭한 첨단 기술이라도 가격이 비싸고 사용자가 해석하기 어려울 때가 종종 있었으며 그 때는 비용을 추가로 지불하여 문제점을 해결하였다. 그림 4는 콜드체인에 있어 온도 모니터링을 위한 RFID 시스템의 모형을 나타낸 것이다.



[그림 3] 소비자의 콜드체인 평가

식품 콜드 체인에 사용되는 프로세스 및 장치

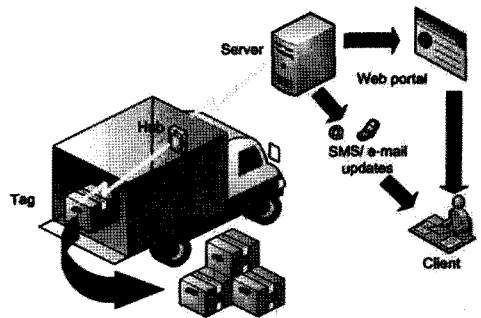
세계적으로 식품의 콜드 체인에 사용되는 첨단장치 개발에 대한 욕구가 점점 증가하고 있다.

냉동냉장창고 뿐만 아니라, 냉동(장) 탑차 및 컨테이너⁷⁾, 디스플레이 캐비닛 및 가정용 냉장고 등의 성능이 지속적으로 향상될 것이고, 이 시스템들의 효율성을 높이기 위해 연구가 계속 진행되고 있다. 냉기의 효과적인 분배를 위한 덕트 설계, 에어커튼 효율의 향상 그리고 냉장실내 레이아웃(layout)을 위하여 전산유체역학이 대형 창고⁸⁾, 소매 디스플레이 캐비닛⁹⁾, 냉장 수송¹⁰⁾ 및 가정용 냉장고¹¹⁾의 공기 흐름을 최적화하는데 광범위하게 사용되고 있다.

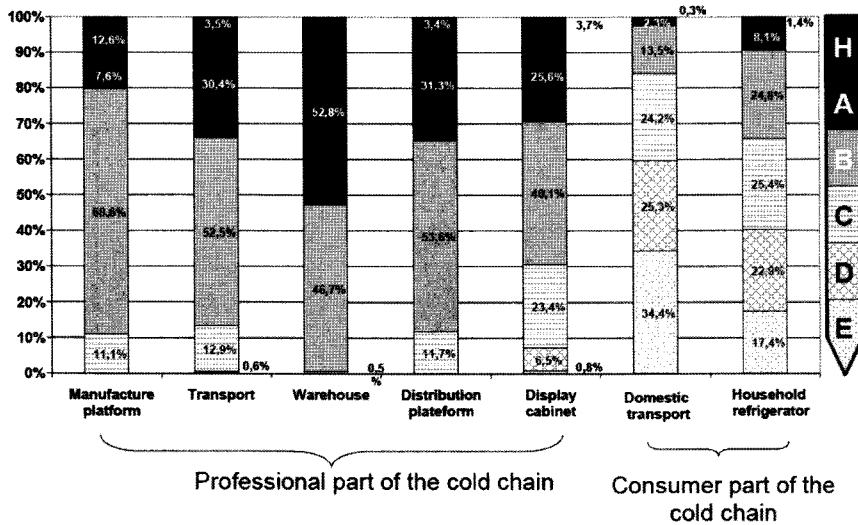
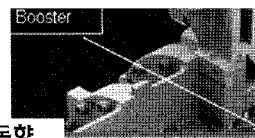
이 외에도 본 콜드체인 연구에서는 시체를 부패하지 않게 하는 냉동¹²⁾, 열전달 향상을 위한 공기 충돌¹³⁾, 침지동결¹⁴⁾, 아이스 슬러리의 식품 응용¹⁵⁾, 심온냉각(deep chilling), 다소 혼합 냉각(mist chilling) 응용들에 의한 “자유냉각(free cooling)”¹⁶⁾과 다수의 혁신적인 기술들을 위해 특정 장치를 요구하는 몇 가지 기술들을 개발하였다. 그림 5는 콜드체인의 각 다른 링크의 성능을 나타낸 것이다.

식품의 안전과 냉동 기술의 링크

본 연구는 콜드체인의 혁신을 위해 3년 동안 14명의 과학자 및 산업 파트너가 참여하였다. 그리고



[그림 4] 콜드체인 모니터링 RFID 시스템



[그림 5] 콜드체인 각 단계의 온도 변화

본 프로젝트의 핵심 기능은 시스템과 가공 식품 사이에 열 및 물질 전달이 공기 및 액체의 이동벡터로 나타난다는 것을 관찰한 것이다. 그리고 이 프로젝트는 가정용 냉장고와 같은 일상적인 시스템, 그리고 열교환기들과 같이 제어 및 관리하는데 어려운 시스템, 냉동냉장창고와 같이 공기를 공급하는 장치가 소매 디스플레이 캐비닛과 같은 에너지 소비 장치의 연구에 중점을 두었다.

장치 설계 및 개념에 CFD 모델링의 응용

본 프로젝트는 스크랩 열교환기, 디스플레이 캐비닛, 창고용 및 가정용 냉장고에서 일어나는 열 및 물질 전달의 CFD 접근 방식 개발과 타당성에 대해서도 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- ① 오픈 디스플레이 캐비닛의 에어 커튼 모델링은 “cold alleys” 문제를 해결하기 위해 슈퍼마켓에서 사용하는 장치를 최적화 하였다.
- ② 냉동냉장창고의 공기흐름 모델링은 일반 및 항공 수송 입자의 증착 (1 ~ 50 μm의)에 초점을 맞추었다. 개발된 모델의 사용은 가능한 입자의 크기에 따라 객체 저장, 벽, 천장 및 바닥 등의 증착 위치를 예측할 수 있다. 이 모델은 냉동냉장창고에서 회전율과 2중 온도

사이에 존재할 수 있는 관계를 예측하는 데 성공적으로 사용되었다.

- ③ 가정용 냉장고의 무부하 및 부하상태에서 자연 대류의 모델링에서 고내의 피할 수 없는 온도 형성층을 확인하였고 이 온도 형성층을 해결하기 위한 시도도 하였다.

위의 내용은 콜드 체인 장치 설계 및 개념에 대한 CFD 모델링의 가능성을 강조한 것이라고 할 수 있다. CFD 모델링은 전반적으로 효율적이고 신뢰할 수 있을 지라도 그것의 복잡성은 심도있는 정확한 지식 및 때때로 실현하기가 어려워 실험적 검증과 구체적인 방법을 필요로 한다.

냉동프로세스 제어에 대한 중요한 결과

냉동프로세스의 스마트 제어는 비교적 새로운 원리인 예측 제어이다. 그것은 자동 제어에 대한 최근의 연구 및 이미 일부 화학 공학에서 성공적으로 응용되었다. 예측 제어의 원리는 아주 이해하기 쉽고 직관적이며 최고의 미래 명령 전략을 결정하기 위해 기계 또는/그리고 프로세스의 능력을 최적화하기 위한 것이다. 냉동 기계 또는 전체 프로세스의 실행 조건을 단기간을 통해 시뮬레이

선을 하는 것으로 구성하였다.

“최고의 미래 명령(best future command)”의 개념은 상대적으로 자유로운 공식을 적용할 수 있고 사용자의 기대에 정확히 일치할 수 있는 기준에 따라 결정된다. 즉 어떤 에너지 문제, 사용자에게 해 부과된 제약 조건에 따라 몇 가지 기술적인 문제, 일부 제품의 품질에 대한 우려, 또는 이들의 혼합에 대해서도 해결할 수 있다. 그것은 “최적화(optimising)”로 이루어지며 최적화 기능을 위해서 모든 것을 공식화시켰다.

이 예측 제어 원리를 냉동시스템에 적용시켰을 때 10 ~ 20%의 에너지를 절약시켰으며 최소의 에너지 소비로써 최적의 상태를 유지할 수 있었다. 그럼에도 불구하고 다소 실시간으로 어려운 제품의 품질 모델링에 필요한 몇 가지 연구가 이 분야에서 할 수 있는 것들이 남아 있다.

지속적인 냉동 시스템

Don Cleland에 의해 언급된 바가 있는 지속적인 냉동 기술 개발 연구에 대해 아래와 같이 요약해서 나타낼 수 있다.

- ① 냉동 시스템의 작동유체로 사용하는 냉매질량을 감소시키는 연구가 필요할 뿐만 아니라 계속 진행되어야만 한다. 앞으로의 연구는 주로 minichannel 열교환기의 사용 ($D_h \approx 0.3 - 1.5 \text{ mm}$) 및 파이프, 용기 등 구성 요소의 크기에 중점을 두어야 할 것이다. 이것은 잠재적인 GWP 효과를 감소시키는 동시에, 시스템의 성능을 향상시키기 때문이다. 또한 냉매 질량의 감소는 이와 관련된 기술적인 위험 감소를 의미하며 앞으로 점점 자연 냉매 사용이 확대될 것이다.
- ② 고체 / 액체 슬러리 및 보조 냉매의 사용은 에너지 절약 및 관리를 위해 필요하다. 아이스 슬러리 기술은 스마트한 에너지 저장 및 피크 에너지를 절약하는 방법을 제공하였을 뿐만 아니라 시스템의 구성요소로 사용되고 있는 기기를 콤팩트화시킬 수 있다.
- ③ 가까운 장래에 자기 냉동의 사용이 의료 및 에어컨 등 특정 응용분야에 대해 사용될 것이

다. 이 기술은 냉매 없이 시스템을 작동시키면서 에너지 효율은 기존 냉동시스템보다 더 높일 수 있을 것으로 사료된다. 그러므로 대기 중으로 방출되는 CO₂의 양을 줄일 수 있고 시스템의 TEWIs는 지속 가능성을 다루는 모든 프로젝트에 인용될 수 있으며 자기열량 재료에 대한 연구가 활발히 이루어 질 것이다.

결론

냉동은 식품 공급에 있어 필수이며, 지구촌의 식량 확보 및 저탄소 녹색성장을 위해서 콜드체인이 가장 효율적이라고 말할 수 있다. 그리고 콜드 체인의 안정성에 대한 신뢰를 높이려면 추락된 신뢰 회복 및 규제에 대한 특별한 노력들이 계속 유지되어야 할 뿐만 아니라 냉동에 관한 소비자의 인식과 행동이 일치되어야 할 것이다.

콜드 체인의 모니터링은 공중 보건 문제 발생을 방지하기 위하여 적절한 수준에서 유지되어 져야만 하며, 이것을 위해 계속 새로운 온도 모니터링 기술들이 개발되어야 할 것이다. 이러한 기술들이 개발되면 전 세계 인구의 식량 공급 확보 및 유지가 가능할 것이다. 이를 위해서는 지속적인 기술 및 제품 개발이 필요하며, 현재로서는 식품보관 및 콜드체인 온도가 유일하게 규칙으로써 준수되고 있는 실정이다.

향후 냉동의 수요는 선진국보다 개발도상국에서 성장률이 더 향상될 것이며, 이와 더불어 탄소 발자국과 지속 가능한 냉동에 대해서도 계속적으로 연구개발 및 논쟁이 필요하다. 연구자 및 엔지니어들은 과학적인 엄격한 관점에서 냉동기술이 지구환경 문제를 해결할 수 있다는 가능성을 가지고 지구와 인류의 복지를 위해 지속적으로 연구를 해야 할 것이다.

참고문헌

1. “The role of refrigeration in Worldwide nutrition”, 5th IIR informatory note on refrigeration and food, 2009
2. Derens & al : “The cold chain of chilled



- products under supervision in France”, Iufost 13th World Congress Food is Life, Nantes, France, 17 - 21 september 2006
3. Derens & al : “The food cold chain in France and its impact on food safety”. XXI int. Congress of refrigeration, Beijing, August 2007.
 4. Wilson & al : “Modelling microbial growth in structured foods: towards a unified approach”, International Journal of Food Microbiology 73 (2002) 275 - 289
 5. “Temperature indicators and time-temperature integrators”. 3rd IIR informatory note on refrigeration and food, 2004
 6. “RFID technologies for cold chain applications”. 4th IIR informatory note on refrigeration and food, 2008
 7. Olafsdottir & al “Improved efficiency and real time temperature monitoring in the food supply chain” 1st International Cold chain and sustainability Conferences, Cambridge, 2010
 8. Mirade & al “Computational fluid dynamics (CFD) modelling of local mean age of air distribution in forcedventilation food plants”, Journal of Food Engineering, Volume 90, Issue 1, January 2009, Pages 90-103
 9. D'Agaro & al “Two- and three-dimensional CFD applied to vertical display cabinets simulation” International Journal of Refrigeration Volume 29, Issue 2, March 2006, Pages 178-190
 10. Moureh & al “Air velocity characteristics within vented pallets loaded in a refrigerated vehicle with and without air ducts” International Journal of Refrigeration Volume 32, Issue 2, March 2009, Pages 220-234
 11. Laguerre & al “Numerical simulation of air flow and heat transfer in domestic refrigerators” Journal of Food Engineering Volume 81, Issue 1, July 2007, Pages 144-156.
 12. Brown & al “Vascular perfusion chilling of red meat carcasses - A feasibility study” Meat Science. Volume 83, Issue 4, December 2009, Pages 666-671
 13. Imraan & al “Jet impingement heat transfer in a frost-free refrigerator: The influence of confinement” International Journal of Refrigeration Volume 32, Issue 3, May 2009, Pages 515-523
 14. Lucas & al “Immersion chilling and freezing of a porous medium”. International Journal of Food Science and Technology Volume 35, Issue 6, 2000, Pages 583-598
 15. Wang & al “Application of ice slurry technology in fishery” (1999) Proceedings of the 20th International Congress of Refrigeration, IIF/IIR, paper 569.
 16. Allais & al “Influence of mist-chilling on post-harvest quality of fresh strawberries Cv. Mara des Bois and Gariguette” International Journal of Refrigeration Volume 32, Issue 6, September 2009, Pages 1495-1504 