

산 · 학 · 연 논문

신선식품에 대한 Modified Atmosphere Packaging (MAP) 기술의 적용 현황

황태영 · 안정좌[†]

충원대학교 식품공학과

Recent Application of Modified Atmosphere Packaging (MAP) in Fresh and Fresh-Cut Foods

Tae-Young Hwang and Joungjwa Ahn[†]

Department of Food Science and Technology, Jungwon University, Goesan, Chungbuk 28024, Korea

서 론

급변하는 소비자의 수요에 부응하는 고품질의 신선식품 및 신선편의식품을 위해 이제 ‘포장’은 필요불가결한 요소가 되었다. 식품 포장은 제품의 상품가치를 높이고, 유통기간에 식품의 물리화학적, 생화학적 변패 방지 및 안전하고 원래의 맛과 향을 잃지 않게 제품을 보호한다. 또한, 유통 중 취급의 편리성 제공과 식품의 정보 전달을 통한 판매 촉진에 그 목적이 있다. 따라서 식품과 포장재의 특성을 서로 연결하여 최상의 식품 재료, 가공조건, 포장 재질, 유통방법 등을 찾아내는 전반적인 과정이라 할 수 있다(1).

많은 식품 중 특히 과일 및 채소와 같은 신선 농식품의 경우 대기조건 하에서 수분의 손실 혹은 흡습, 산소와의 반응, 호기성 미생물의 증식 등의 반응으로 인해 쉽게 변질될 수 있다. 이때 대기 조성의 조절을 통해 각종 이화학적, 생화학적 반응속도를 조절하고 미생물의 증식 억제제를 통해 품질 유지 및 저장기간 연장을 꾀할 수 있기 때문에 최근의 포장 기법 중 포장 내부의 환경기체 조성을 조절하여 농식품의 최적 품질을 유지할 수 있는 기법 즉, modified atmosphere packaging(MAP) 기술이 널리 적용되고 있다(2). 이들 신선식품에서 포장의 의의, 포장에 따른 품질변화 및 이를 방지하고 신선도를 유지할 수 있는 포장기법의 종류, 원리 및 최근 동향 등에 대해 알아보고자 한다.

MAP의 정의 및 장단점

MAP로 알려진 환경기체조절포장과 controlled atmosphere storage(CAS)는 농식품의 보존성 연장을 위

해 널리 적용되고 있는 포장 및 저장 관련 신기술로 저온 저장과 병행하였을 때 농식품의 속도 조절, 생화학적 이상반응 및 부패, 변질을 방지할 수 있다(2). MAP는 환경기체 조성의 조절을 통해 변질되기 쉬운 식품을 포장하는 것이고, CAS는 식품에 영향을 미치는 기체 조성을 모니터링과 기체의 추가 등을 통해 일정한 기체 조성을 지속적으로 유지하는 것을 의미한다(3). 식품을 둘러싼 환경기체의 조성이 일정한 수준으로 유지되는 CAS와 달리 MAP는 식품의 이화학적 변화 및 미생물 증식 등의 이유로 포장 내부의 기체 조성이 연속적으로 변화하는데, 이러한 기체의 변화는 포장 재질의 투과성에 따라 포장 내 외부 기체의 교환을 통해 일어나게 된다(3).

MAP는 12세기 호주에서 영국으로 양고기를 수송하기 위해 처음 이용되었으며, 1927년 사과의 유통기한 연장을 위해 산소 함량을 줄이고 이산화탄소 함량을 증가시킨 MAP 적용이 시도되었다(4). 즉, MAP는 품질열화나 신선도 저하 없이 저장성을 연장하기 위해 사용하는 기술로, 적용하지 않은 경우와 비교하여 최대 400%까지 유통기한이 연장되지만 관련 비용이 증가하게 된다. 또한, 저장시에 발생하는 손실률을 줄임으로써 경제적 이익을 얻을 수 있지만, 반드시 냉장과 같은 온도 조절을 동시에 시행해야 하며 제품의 종류에 따른 조건 설정을 해야만 한다. 이러한 MAP의 장단점은 Table 1과 같다(5).

MAP는 수동적 조건과 능동적 조건으로 대별될 수 있는데, 수동적 MAP에서는 식품의 호흡률과 포장 필름의 투과성이 중요한 요인이 된다. 식품의 호흡에 의해 산소는 소비되고 이산화탄소는 비례하여 증가하기 때문에, MAP 포장 후 일정 시간이 경과하면 식품의 호흡률 및 필름 투과성에 의해 포장 내부의 기체 조성은 일정 수준 즉, 평형 수준에 도달하게 된다. 반면 능동적 MAP의 경우, 농식품이 고농도의 부적절한 기체에 노출되는 것을 방지하기 위해 포장 내부 공기를 배출하여 적정 기체 조합으로 기체 조성을 변화시키게 된다(4).

[†]Corresponding author

E-mail: jjahn@jwu.ac.kr, Phone: 043-830-8611

Table 1. Advantages and disadvantages of modified atmosphere packaging

Advantages	Disadvantages
Increased shelf life of 50~400%	Added cost
Extended storage results in reduced economic losses and wider distribution radius	Temperature control required Different gas compositions for each type of product
Fewer distribution deliveries leads to lower costs	Requirement for special equipment and operator training
Little or no need for chemical preservatives	Increased pack volume has impact on transport and retail display costs
Easier separation of sliced foods (except vacuum packing)	Benefits are lost once the pack is opened or leaks
Good presentation of products	Product safety to be established for some foods

MAP의 적용

서로 다른 식품에 적합한 MAP를 적용하기 위해서는 MAP 포장의 역동성 즉, 연속적인 호흡, 투과 등의 특성에 대해 이해할 필요가 있다. 특히 호흡률과 투과율은 포장 디자인에서 반드시 고려해야 하는 항목이 된다(6). 포장에서 호흡률 및 호흡특성에 미치는 영향 인자로는 포장 내부의 식품, 저장 온도, 산소 및 이산화탄소, 에틸렌 분압, 속도 등이 있다(2). 필름의 투과율 즉, 산소와 이산화탄소의 투과에 영향을 미치는 요인으로는 필름의 종류, 두께, 표면적 등이 있으며 포장 내부에 존재하는 headspace 용량, 온도, 상대 습도, 산소 및 이산화탄소 기체의 분압 등이 있다(7). 즉, MAP 포장의 설계 시에는 호흡률, 최적 산소 및 이산화탄소 농도, 필름의 투과율과 같은 제품 고유의 특성을 확인해야만 하는데, 일반적으로 과일과 채소류 대부분은 0~10°C에서 저장 시 1~10%의 산소와 1~10%의 이산화탄소가 MAP 조건으로 권장되고 있다(8).

과일 및 채소와 같은 신선식품의 경우 수확 후에도 호흡, 증산과 같은 생리작용을 지속적으로 나타내는데, 이는 가공이나 유통 중에 발생할 수 있는 각종 상처에 의해 발생된다. 즉, 증산에 의한 감도, 호흡에 의한 성분의 소모, 대사 작용에 의한 성숙 등에 의해 신선식품의 품질이 저하될 수 있다. 일반적으로 이러한 신선식품의 품질 유지를 위해서는 저온 하에서 유통, 저장하고 MAP를 적용할 때의 목표도 호흡을 최소화하는데 두게 된다. 즉, 신선식품의 포장 시 초기 산소농도를 최대한 감소시키고 밀봉 포장하여, 저장 중 저산소, 고이산화탄소 조건의 MAP 효과가 나타나도록 하여 호흡을 억제시키고 장기간 선도유지가 가능하도록 하는 것이다.

신선식품의 저장 중 기체 조성의 변화는 다음과 같은 조건에 따라 달라지므로, 이러한 영향 요인을 바탕으로 기체 조절 조건을 설정해야 한다.

- 신선식품의 종류, 저장온도에 따른 호흡률의 차이
- 포장 재질의 기체 및 수증기 투과율
- 외부의 상대습도에 따른 필름 종류별 투과율의 변화
- 포장의 용적 즉, 표면적에 따른 영향

즉, 호흡이 진행됨에 따라 신선식품의 종류, 포장 재질, 온도와 같은 저장 조건, 초기 산소 기체 조성에 따라 호흡 양상이 달라지게 되므로 신선식품의 종류별 최적 조건을 예측하는 것이 쉬운 일은 아니다. 또한, 저온 하에서도 그 정도는 낮지만, 증산을 계속하고 있기 때문에 플라스틱 포장의 경우 내부에 결로가 생기기 쉽고 세균번식에 의한 부패, 곰팡이 발생 등의 원인이 되는 경우도 있다. 이를 방지하기 위해 과잉의 수분을 흡수하게 하여 포장 내부를 적절한 습도로 유지하는 것이 중요하다. 또한, 포장에 의한 추숙을 촉진하는 에틸렌 등이 포장 내부에 축적되어 선도저하를 가져오는 것도 고려되어야 한다. 여러 연구자에 의해 신선식품의 최적 MAP 조건에 관련한 보고 및 제안이 계속되고 있으며(9,10), 이러한 데이터를 바탕으로 MAP 조건 설정 및 디자인을 해야 한다(Table 2).

MAP에서 주로 사용되는 기체는 산소, 이산화탄소 및 질소로 포장 내부의 headspace에 주입하게 되는데, 포장 내부에 주입할 기체 종류, 조성은 포장할 대상 식품에 따라 달라진다. 이때 고려할 점으로는 식품의 안전성과 최적 수준의 관능적 품질특성 등이 있다. 또한, MAP를 설계할 때 온도 관리를 매우 중요한 요소로 고려해야 하는데, 이는 필름 투과율이나 식품의 호흡률에도 큰 영향을 미치기 때문이다. 일반적으로 온도가 10°C 상승할 때 2~3배의 생리적 변화를 수반하기 때문에 MAP 시스템에서도 온도 관리가 절대적으로 중요한 요소로 고려되어야 한다(8).

MAP에 사용되는 필름의 종류 및 특징

MAP 포장은 호흡하는 산물을 중합체 필름 포장 내부에 밀봉하여 포장 내 headspace의 산소와 이산화탄소 함량을 조절하는 기술이라고 할 수 있으며(11), 신선식품에 대한 이러한 필름 사용은 그 역사가 35년 이상인 것으로 알려져 있다(8). MAP에서 자주 사용되고 있는 필름은 유연 포장 구조로 polyolefin, low-density polyethylene(LDPE), linear low-density polyethylene(LLDPE), high-density polyethylene(HDPE), polypropylene(PP), polyvinyl chloride(PVC), polyesters, polyethylene terephthalate(PET), polyvinylidene chloride(PVDC),

Table 2. Optimal atmosphere conditions for vegetables and fruits

Commodity	Storage temperature (°C)	Relative humidity (%)	Atmosphere	
			O ₂ (%)	CO ₂ (%)
Asparagus	0~5	95	air	5~10
Broccoli	0~5	95	1~2	5~10
Cabbage	0~5	90~95	2~5	5~7
Cauliflower	0~5	95	2~5	2~5
Lettuce, head	0~5	95	2~5	0
Mushrooms	0~5	90	air	10~15
Spinach	0~5	95	air	10~20
Tomato	8~12	85~90	3~5	0
Apple	0~5	90	2~3	1~2
Avocados	5~13	85~90	2~5	3~10
Banana	12~15	85~95	2~5	2~5
Blueberries	0~5	90~95	0~10	11~20
Peach	0~5	90	1~2	5
Persimmons	0~5	90~95	2	8
Strawberries	0~5	90~95	10	15~20

ethylene-vinyl alcohol(EVOH), polyamide(Nylon), polychlorotrifluoroethylene(PCTFE), polyvinyl alcohol(PVOH), ethylene-vinyl acetate(EVA), ionomers, polycarbonate films, polystyrene, cellulose-based plastics, biodegradable polymers 등이 있다(2,12). MAP 산업에서 선택할 수 있는 필름의 종류는 더욱 다양해졌지만, 여전히 대부분의 필름은 PVC, PET, PP, PE 4가지의 기본적인 중합체로부터 제조되고 있다(2,11). 이들 재질의 필름들은 MAP에 요구되는 포장 특성 즉, 기체 및 수증기 투과도에 있어 일정 범위를 충족하고 있다.

또한, 한 가지 재질만으로는 MAP의 요건을 모두 충족시키지는 못하지만, 이들 중합체 필름들을 병용하거나 종이, 알루미늄 등의 재질과 함께 가공하는 경우 즉, lamination, coextrusion 하거나 metallization process를 통해 원하는 수준의 품질로 개선시킬 수 있다(11). MAP 포장을 위한 재질을 선정할 때 고려해야 하는 요인은 다음과 같다.

- The type of package (i.e. flexible pouch or rigid or semi-rigid lidded tray)
- The barrier properties needed (i.e. permeability of individual gases and gas ratios when more than one gas is used)
- The physical properties of machinability, strength, clarity and durability
- Integrity of closure (heat sealing), fogging of the film as a result of product respiration
- Sealing reliability
- Water vapor transmission rate
- Resistance to chemical degradation
- Nontoxic and chemically inert
- Printability
- Commercial suitability with economic feasibility

또한, MAP를 위한 중합체 필름은 다음의 3가지 형태로 대별될 수 있다(11).

- Microperforated or non-perforations polymeric films
- Macroperforated polymeric films
- Perforation-mediated packaging systems

미세천공 필름(microperforated film)은 식품의 유통기한 연장을 위해 적절한 수준의 이산화탄소 및 산소 농도로 신속히 도달할 수 있게 해 준다(13). 미세천공 필름의 기체 투과율은 천공의 개수 및 크기에 따라 달라진다. 미세 천공의 크기나 밀도를 조절함으로써 포장 필름은 특정한 flow rate를 가지게 되고 이에 따라 특정 식품, 용도에 맞는 투과율을 나타내게 된다. 일반적인 MAP에 적용되고 있는 천공의 지름은 50~200 μm 이다(13). 미세 천공 필름에 적합한 식품은 고농도의 이산화탄소, 저농도의 산소 환경에 맞는 망고, 바나나, 포도 및 사과 등이 있다. 이 필름의 투과율은 온도에 매우 의존적이며 이 현상은 Arrhenius-type equations로 설명될 수 있다(14).

일반적인 천공 필름(macroperforated films)은 신선 편의형 제품(fresh-cut products) 및 호흡률이 높은 산물에 적합하다(15). 이 포장의 내부 기체 조성 변화는 macroperforation의 개수에 따라 달라지는데, 필름에 단 순히 원하는 수준의 구멍을 뚫어 기체 확산정도를 증가시키는 것이다. 그러나 적절한 수준의 산소, 이산화탄소 분압을 유지하기는 쉽지 않으며 반복 실험을 통해 조건을 찾아내야 하므로 실험으로 인한 cost가 증가하는 경향이 있다(16).

한편 perforation-mediated MAP는 매우 높은 수준의 기술이나 노하우가 필요한 것은 아니며, 주로 버섯류를 대상으로 품질을 높이기 위한 다양한 연구가 이루어져 왔다(11). 이 경우 기체 교환 및 조절은 한 개 혹은 여러 개의 튜브나 불투과성 포장 재질을 통해 이루어지며, 확산이나 동방향 수송과 같은 복합적인 원리로 설명될 수 있다. 매우 높은 수준의 기체 교환이 이루어지며 투과율

이 낮기 때문에 호흡률이 높은 산물들을 위한 포장에 적합하다(17).

MAP 설비

1950대 말부터 60년대 초 상용화를 위해 MAP 설비의 산업적 이용이 시작되어 진공 포장 기술이 소개되었고, 포장 측면에서 효율성, 안전성을 확보함과 동시에 저비용인 설비의 중요성이 대두되었다. 이후 다양한 MAP 포장 제조설비가 개발되고 있는데, 최근 초소형 전자공학(micro-electronics)의 발달에 힘입어 포장 설비의 경우도 온도조절, movement of the web과 같은 기능이 정교해져서 매우 복잡한 재질의 구조도 다룰 수 있게 되었다(12). MAP 설비는 크게 pillow wrap과 chamber로 이루어져 있다. Flexible pillow wrapping 기기는 horizontal form-fill-seal(HFFS) machines와 vertical form-fill-seal(VFFS) 시스템이 있다. Chamber machine은 2가지 다른 기술을 사용할 수 있는데, 열 성형 기법과 이미 만들어진 용기를 이용한 포장, preformed container machine이 그것이다(18).

신선식품에 대한 MAP 기술의 변화 및 전망

MAP 기술은 초기 조건이 저장 중 변화 없이 유지되는 단점이 있었기 때문에 최근에는 신선식품에 대한 적용에 있어 좀 더 능동적인 접근 기법으로 active packaging 기법이 활용되고 있다. 이는 intelligent packaging 혹은 smart films 등으로 불리며, 가식성 코팅을 통해 신선식품의 효소적 갈변을 방지하거나 에틸렌 제거제를 봉입하여 신선식품의 숙도를 조정하는 등 다양한 목적과 수단을 사용하여 신선식품의 선도유지 기간을 늘리는데 적용되고 있다(8,19). 이를 통해 망고, 토마토, 바나나와 같은 신선식품을 에틸렌 제거제와 함께 포장할 경우 2~3주의 유통기한을 연장할 수 있는 것으로 보고되고 있다(8).

포장식품의 경우 일반적으로 행해지고 있는 함기 포장, 즉 대기 중에서 충전 밀봉하는 경우, 포장 내에 들어간 산소는 탈산소제, 즉 산소흡수제의 봉입포장으로 거의 모두 흡수 제거할 수 있다. 또한, 질소가스를 사용한 가스치환포장에 있어서도 약간의 산소는 잔류하기 때문에 이 잔류 산소(0.5~1%)를 완전히 제거할 목적으로, 탈산소제의 봉입포장은 극히 효율적이기 때문에 넓게 보급되어 있다. 탈산소제는 다양한 타입이 개발되어 있는데, 아스코르빈산(비타민 C) 등을 이용한 유기계 타입과 활성철 등을 이용한 무기계 타입이 있으며, 최근에는 철을 활용한 것이 대부분이다. 이러한 탈산소제의 봉입포장을 통해서 통상적으로 포장 내의 산소는 약 24시간에서 0.01% 정도까지 흡수 제거된다(8,19).

이산화탄소 제거제의 경우 분말화된 산화철 및 과산화칼슘, 탄산철 및 금속성 할로젠 등을 주성분으로 하며,

커피나 신선육, 포장 김치 등에 봉입 포장되어 사용된다. 또한, 신선식품의 숙성에 영향을 미치는 에틸렌을 제거하여 선도유지 기간을 연장하기도 한다. 이는 대부분 과일과 채소류는 수확 후 에틸렌이 발생하게 되어 숙성을 유도하여 조직의 연화, 클로로필 분해 등 품질이 저하되기 때문이다. 특히 에틸렌에 민감한 사과, 바나나, 망고, 토마토, 양파, 당근 등의 유통기한을 연장하는 데 매우 유용하다(8).

또한, BHA, BHT 및 소르빈산 등과 같은 보존료를 신선육, 생선류, 빵, 시리얼, 치즈 등에 적용하여 미생물 증식을 억제하고 있다. 즉, 케이크, 빵 등에 에탄올을 분무하거나 encapsulation 하여 식품의 보존성을 연장시키고, 수분흡습 특성을 조절할 수 있는 PVA blanket 등을 신선육, 가금육 등에 사용하기도 한다. 한편 지질의 산화는 이미, 이취, 조직 열화, 영양 손실 등 식품의 품질 저하 및 미생물 증식을 유발할 수 있기 때문에 항산화제를 포장에 적용하고 있다(20). 각종 라디칼 즉, oxo, hydroxyl, superoxide 등이 산화의 개시자로 작용하기 때문에 이러한 라디칼을 제거하여 산화를 방지하게 되는데, 천연 항산화제인 로즈마리 추출물 등을 포장에 첨가하는 방식으로 적용하게 된다(21,22).

최근 들어 효소적 반응, IT 기술을 접목한 다양한 방법을 MAP에 적용하고 있는데, 식품의 포장 내부에서 발생하는 각종 성분의 변화를 구명하고, 정량하고 모니터링할 수 있는 각종 도구를 사용하여 유통 및 저장 중 식품의 미생물적 품질을 조절할 수 있도록 하는 포장을 특히 'intelligent packaging'이라고 한다. 대표적인 수단으로는 time-temperature indicators(TTI)가 있는데, 특정 온도에서 유지된 시간을 색깔 변화로 확인할 수 있는 visual indicators가 활용되고 있다(Fig. 1). 또한, 수송, 유통 중 부적절한 온도에서 노출되었는지를 확인할 수 있는 radio frequency identification(RFID) tag 등이 대표적인 intelligent packaging의 사례로, RFID의 경우 제품의 이력추적관리가 가능하다. 또 식품 포장의 seal and leak indicators, 식품의 freshness and/or ripening indicators 등의 적용을 통해 식품 포장의 건전성, 신선도 및 식품 품질을 시각적으로 확인할 수 있게 되었다(8).

결 론

다변화하는 기술 환경하에서 식품 포장의 역할도 식품

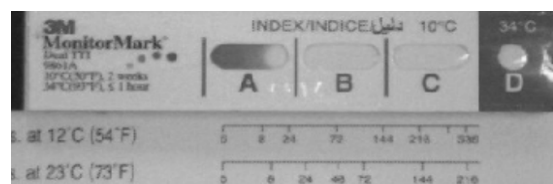


Fig. 1. Use case of time-temperature indicators (TTI) (Monitor Mark, 3M™).

을 보호하고, 그 품질을 유지하며 정보를 제공하는 등의 단순한 수준에서 점차 변화해 가고 있다. 즉, 포장에 다양한 기술을 접목하여 급변하는 소비자의 요구와 수요에 식품산업이 부합할 수 있도록 보다 진전된 수단으로 발전되고 있다. 그 대표적인 사례로 active/intelligent packaging 컨셉을 들 수 있는데, 신규 기술을 포장에 접목하여 소비자의 요구에 부합하는 새로운 기능을 확보한 제품으로 변화하고 있다. 식품의 품질, 안전성 및 유통의 측면을 제외하고라도 intelligent packaging은 강력한 마케팅 수단으로써의 잠재력도 충분히 확보하고 있다. 즉, 식품의 환경기체조절포장을 통해 식품의 근본적인 기능, 품질, 선도 유지를 달성하고 환경친화적 포장 등 시대 변화에 맞는 부가적인 요구사항을 충족시킬 수 있도록 다양한 intelligent packaging 기법을 활용하는 것이다. 한편 이러한 신규 포장기법의 개발 및 적용 시 산업 및 소비자 관점에서의 수용도, 원가 등을 감안한 비용 효율성 등을 반드시 고려해야 할 것이다.

참고문헌

1. Opara UL, Mdutshwa A. 2013. A review on the role of packaging in securing food system: Adding value to food products and reducing losses and waste. *Afr J Agric Res* 8: 2621-2630.
2. Kader AA, Zagory D, Kerbel EL, Wang CY. 1989. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. *Crit Rev Food Sci Nutr* 28: 1-30.
3. Church N. 1994. Developments in modified-atmosphere packaging and related technologies. *Trends Food Sci Technol* 5: 345-352.
4. Phillips CA. 1996. Review: Modified Atmosphere Packaging and its effects on the microbiological quality and safety of produce. *Int J Food Sci Technol* 31: 463-479.
5. Davies AR. 1995. Advances in modified-atmosphere packaging. In *New Methods of Food Preservation*. Gould GW, ed. Springer, Boston, MA, USA. p 304-320.
6. Cameron AC, Boylan-Pett W, Lee J. 1989. Design of modified atmosphere packaging systems: modeling oxygen concentrations within sealed packages of tomato fruits. *J Food Sci* 54: 1413-1416.
7. Ashley RJ. 1985. Permeability and plastics packaging. In *Polymer Permeability*. Comyn J, ed. Elsevier Applied Science, New York, NY, USA. p 269-308.
8. Ščetar M, Kurek M, Galić K. 2010. Trends in fruit and vegetable packaging - a review. *Croat J Food Technol Biotechnol Nutr* 5: 69-86.
9. Labuza TP, Breene WM. 1989. Application of "active packaging" for improvement of shelf-life and nutritional quality of fresh and extended shelf-life foods. *J Food Process Preserv* 13: 1-69.
10. Powrie WD, Skura BJ. 1991. Modified atmosphere packaging of fruits and vegetables. In *Modified Atmosphere Packaging of Food*. Ooraikul B, Stiles ME, eds. Ellis Horwood, New York, NY, USA. p 169-245.
11. Mangaraj S, Goswami TK, Mahajan PV. 2009. Applications of plastic films for modified atmosphere packaging of fruits and vegetables: a review. *Food Eng Rev* 1: 133.
12. Day BPF. 1993. Fruits and vegetables. In *Principles and Applications of Modified Atmosphere Packaging of Foods*. Parry RT, ed. Blackie Academic and Professional, Glasgow, UK. p 63-100, 114-133.
13. Kartal S, Aday MS, Caner C. 2012. Use of microperforated films and oxygen scavengers to maintain storage stability of fresh strawberries. *Postharvest Biol Technol* 71: 32-40.
14. Mahajan PV, Oliveira FAR, Montanez JC, Frias J. 2007. Development of user-friendly software for design of modified atmosphere packaging for fresh and fresh-cut produce. *Innovative Food Sci Emerging Technol* 8: 84-92.
15. Fonseca SC, Oliveira FAR, Lino IBM, Brecht JK, Chau KV. 2000. Modelling O₂ and CO₂ exchange for development of perforation-mediated modified atmosphere packaging. *J Food Eng* 43: 9-15.
16. Rai DR, Singh R. 2012. Package headspace dynamics for baby corn under modified atmosphere packaging with macroperforations. *J Food Process Eng* 35: 191-208.
17. Montanez JC, Rodríguez FAS, Mahajan PV, Frias JM. 2010. Modelling the effect of gas composition on the gas exchange rate in Perforation-Mediated Modified Atmosphere Packaging. *J Food Eng* 96: 348-355.
18. Arvanitoyannis IS. 2012. Principles, materials, gases, and machinery for map. In *Modified Atmosphere and Active Packaging Technologies*. Arvanitoyannis IS, ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. p 3-58.
19. Yildirim S, Röcker B, Pettersen MK, Nilsen-Nygaard J, Ayhan Z, Rutkaite R, Radusin T, Suminska P, Marcos B, Coma V. 2018. Active packaging applications for food. *Compr Rev Food Sci Food Saf* 17: 165-199.
20. Pereira de Abreu DA, Losada PP, Maroto J, Cruz JM. 2010. Evaluation of the effectiveness of a new active packaging film containing natural antioxidants (from barley husks) that retard lipid damage in frozen Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Food Res Int* 43: 1277-1282.
21. Nerín C, Tovar L, Salafranca J. 2008. Behaviour of a new antioxidant active film versus oxidizable model compounds. *J Food Eng* 84: 313-320.
22. Pereira de Abreu DA, Losada PP, Maroto J, Cruz JM. 2011. Lipid damage during frozen storage of Atlantic halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) in active packaging film containing antioxidants. *Food Chem* 126: 315-320.