

3D 프린팅을 이용한 명태(*Gadus chalcogrammus*) 수리미 기반 대체 새우 제품의 개발 및 품질 최적화

박선우¹ · 이상민¹ · 이용석² · 안동현^{1,3*}

¹국립부경대학교 식품공학과, ²국립부경대학교 미생물학과, ³국립부경대학교 식품연구소

Development and Quality Optimization of 3D-printed Shrimp Alternative Based on Alaska Pollock *Gadus chalcogrammus* Surimi

Seon-Woo Park¹, Sang-Min Lee¹, Yong-Suk Lee² and Dong-Hyun Ahn^{1,3*}

¹Department of Food Science and Technology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

²Department of Microbiology, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

³Institute of Food Science, Pukyong National University, Busan 48513, Republic of Korea

The aim of this study was to develop a shrimp analogue by using 3D printing technology with surimi-based formulations. Initially, the textural characteristics of Alaska pollock *Gadus chalcogrammus* was superior to those of golden threadfin bream. Attempts to improve the texture of threadfin bream surimi by adding 0.5 wt% gum or glutinous rice starch were unsuccessful in replicating natural shrimp texture; therefore, Alaska pollock was selected as the base material. The optimal formulation, containing 3.0 wt% tapioca starch and 2.0 wt% strong flour, demonstrated suitable printability. Texture profile analysis of the optimal sample indicated no significant differences in hardness and shear force when compared with natural shrimp ($P>0.05$). Sensory evaluation further confirmed the high similarity in texture, color, and overall preference, with taste being the only attribute that showed a significant difference ($P<0.05$). These results suggest that 3D printing of optimized Alaska pollock surimi is a feasible method for producing seafood analogues that closely replicate the texture and sensory quality of natural shrimp.

Keywords: 3D printing, Shrimp analogue, Alaska pollock, Surimi, Textural properties

서론

전 세계적으로 수산물 소비량은 꾸준히 증가하고 있으며 전 세계 1인당 수산물 소비량은 1961년부터 2019년까지 연평균 3.0%의 증가율을 보였으며 이는 연간 전세계 인구 증가율의 두 배에 해당한다. 이러한 수요 증가는 수산 자원의 과도한 착취로 이어져 남획과 생태계 파괴 문제를 야기하고 있다(Teixeira and Silva, 2023). 특히 새우는 감칠맛과 고단백으로 인해 중요한 식재료로 자리 잡고 있으나 습지, 농경지 등으로 구성된 100–150만 헥타르의 해안 저지대가 새우 양식장으로 전환되면서 해안 침식, 탄소 저장 능력 약화 등 해양 생태계의 기능적 파괴가 진행되고 있다(Paez-Osuna, 2001). 수리미는 어류의 뼈와 내장을 제거하고 마쇄, 수세 공정을 통해 근장단백질, 지질, 비

단백태 질소화합물 등을 제거하여 근원섬유단백질을 농축시킨 후 냉동변성방지제를 혼합한 염용성 어육단백질이다(Park and Morrissey, 2000). 냉동 수리미의 등급은 수분 함량, 조단백질, 백색도, 겔강도 등을 이용하여 나뉘게 되며, 등급은 일반적으로 SSA, SA, FA, A, KA, RA 및 B 등급으로 나뉘어져 있다(Ahn et al., 2019). 특히 수리미에 전분을 첨가하게 되면 질감이 변형되고 겔강도가 상승하여 수리미의 물성에 주된 영향을 미친다(Yang and Park, 1998). 또한 열처리를 통해 수리미를 겔화가 이루어져 치밀한 네트워크 구조를 형성하여 높은 겔 강도를 가질 수 있다(Xiong et al., 2024). 따라서 수리미는 높은 겔화력과 겔 구조의 안정성을 갖추고 있으며 압출 기반 3D 프린팅용 소재로서의 잠재력을 지닌다(Prithviraj et al., 2025). 밀은 당질이 70–74%, 단백질 10–14%, 지질 1.9–2.3%를 함유하고 있으며

*Corresponding author: Tel: +82. 51. 629. 5831 Fax: +82. 51. 629. 5824

E-mail address: dhahn@pknu.ac.kr



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

<https://doi.org/10.5657/KFAS.2025.0666>

Korean J Fish Aquat Sci 58(6), 666–674, December 2025

Received 31 October 2025; Revised 7 December 2025; Accepted 16 December 2025

저자 직위: 박선우(대학원생), 이상민(대학원생), 이용석(연구교수), 안동현(교수)

(Kang et al., 2014), 밀가루는 페이스트에서 점탄성을 나타내는 글루텐(gluten)이 밀 단백질의 주성분인데 이 밀 단백질의 함량에 따라서 강력분, 중력분, 박력분으로 나뉘며 제빵용으로는 일반적으로 단백질 함량이 높은 강력분을 사용한다. 특히 수리미에 밀 단백질인 글루텐을 첨가했을 때 냉동-해동 후 수분 유출이 감소하고 수분 분배를 조절하며 수리미 기반 제품의 품질 유지를 유도할 수 있다(Chung and Lee, 1996). 또한 카사바의 뿌리에서 유래된 타피오카 전분은 식용전분으로 동남아시아에서 주로 재배되는데(Ahn, 2005) 팽윤성과 점도가 높아 겔 네트워크 구조를 강화할 수 있다. 수리미에 타피오카 전분을 첨가하였을 때 수리미 겔 시스템에서 수소결합 및 소수성 상호작용을 증진시켜 물리적 특성을 개선하는 것으로 알려져 있다(Huang et al., 2024).

3D 프린팅 기술은 다양한 원료를 적용시킬 수 있으며 노즐 또는 다른 프린터 기술을 사용하여 제조하는 기술이다. 일반적으로 비식품 분야에서 사용되어왔지만 최근 3D 프린팅 기술이 식품에 적용되는 속도가 빨라졌다. 3D 프린팅에서 사용되는 식품 원료는 연속적으로 압출되어 층이 형성되어야 하고 형상 유지가 가능한 유동성과 겔화 특성이 중요하다(Li et al., 2023; Na et al., 2023). 따라서 유동성을 가지는 상태로 공급되어야 하며 유동성을 유지하기 위해 열을 이용한 가소화나 용융 상태로 냉각하여 형상을 유지시키며 3D 프린팅 기술은 이러한 특성을 가질 수 있는 원료를 선정해야 한다(Lille et al., 2018). 이를 위해 다당류 등을 첨가하는 방식으로 겔화를 생성할 수 있으며(Nachal et al., 2019; Lee et al., 2024), 수리미에 염화나트륨을 첨가하고 이의 겔 특성에 미치는 영향에 대해 연구된 바 있다(Wang et al., 2018) 수리미는 3D 프린팅용 식품 잉크로서의 가능성을 지닌다.

따라서 본 연구에서는 대체 새우 제품 개발을 위해 명태 수리미 기반의 3D 프린터 식품 잉크를 활용하여 새우 형태를 구현하고 3D 프린터용 식품 소재로서 pH, 색도, 물리적 특성 및 관능 특성을 평가하여 최적화 조건을 도출하고자 하였다.

재료 및 방법

실험 재료

본 실험에서 사용된 수리미는 KOREAN SEAFOOD사(Busan, Korea)에서 KA급의 명태(Alaska pollock *Gadus chalcogrammus*) 수리미, SA 급 실꼬리돔(golden threadfin bream *Nemipterus virgatus*) 수리미를 25년도에 구입하여 영하 30°C 이하의 냉동고(Togliere Tensione Prima; Larp S.R.L. Co., Genova, Italy)에서 저장하여 사용하였다. 또한, 대조군으로 사용된 새우는 더파시(Mokpo, Korea)에서 국내산 급속 냉동 흰다리 새우(*Litopenaeus vannamei*)를 구매하여 사용하였다. 머리와 껍질이 포함된 온전한 형태(head-on, shell-on) 상태였으며, 마리당 약 25–28 g인 것을 사용하였다.

시료 준비

명태 및 실꼬리돔 냉동 수리미를 4°C에서 냉장 해동하고 Sil-lent cutter (ST11; ADE Co., Hamburg, Germany)에 넣고 분쇄하였다. 분쇄 수리미에 전체 중량 기준 소금(Hanjusalt Co., Ahnsan, Korea) 1.2 wt%, 설탕(CJ CheilJedang Co., Seoul, Korea) 1.5 wt%, 인산염 혼합제(MSC Co. Ltd., Yangsan, Korea) 0.5 wt%, 트랜스글루타미나아제(Ajinomoto Co. Inc., Tokyo, Japan) 1.0 wt%를 첨가하였다. 고기 갈이를 하며 재료를 혼합한 후 4°C 냉수(33.0 wt%), 새우향 추출물(MSC Co. Ltd.) 1.3 wt%, 조미액(MSC Co. Ltd.) 0.7 wt%를 첨가하여 다시 혼합하여 기본 수리미 페이스트를 제조하였다. 이때 각 첨가물 배합 농도와 제조 공정은 선행연구(Seo et al., 2021; Na et al., 2023; Kim et al., 2024; Lee et al., 2024)를 참고하여 설정하였다. 제조된 두 어종의 기본 페이스트는 상호 비교 분석하였으며, 이후 각 기본 페이스트는 어종에 따라 다르게 처리되었다. 실꼬리돔 수리미 페이스트는 구아검(Shree Vijaylaxmi International, Rajasthan, India), 잔탄검(Xinjiang Fufeng Biotechnologies, Xinjiang, China), 참쌀전분(Sungjin Food Co. Ltd., Busan, Korea)을 각각 0.5 wt% 농도로 첨가하였고, 명태 수리미 페이스트는 타피오카 전분(Wooriga Story Co. Ltd., Yangju, Korea), 강력분(CJ CheilJedang Co.), 감자전분(MSC Co. Ltd.)을 각각 4.0 wt% 농도로 첨가하였으며 실험 결과를 바탕으로 선정된 명태 수리미를 이용한 최종 품질 최적화 단계에서는 첨가물을 타피오카 전분 3.0 wt%, 강력분 2.0 wt%로 조정하여 첨가하였다. 이후 강한 물리적인 충격을 주어 충전기(DICK 15LB; DICK Co., Metten, Germany)에 충전하여 페이스트의 기포를 제거하고 124 mesh 여과기로 여과하면서 PVDC casing에 충전하여 sealing machine (PACKNER HRPS2; MAX Co., Tokyo, Japan)에서 결찰하였다. 최적 조건 수리미의 충전 수리미 중 일부는 비가열 수리미로 실험을 진행하였다. 나머지 페이스트는 3D cartridge에 충전하여 3D 프린터(Vistech Korea Co., Daejeon, Korea)를 이용해 새우 형태로 3D 프린팅 한 후, 열수탱크(DDW-WBT110 Co.; Dongwon Scientific System, Seoul, Korea)에서 40°C 조건으로 setting 과정을 거친 후 90°C 조건에서 30분간 증기 가열하였다. 이후 4°C 이하에서 냉각하여 실험에 사용하였다. 프린팅은 노즐 직경이 1.55 mm, 부피는 10 mL인 실린지를 사용하여 layer height 0.5 mm, 내부 채움 100%로 설정한 직선형 패턴을 적용하고 상온에서 토출비 1.2, 프린팅 속도 800 mm/sec으로 프린팅 하였다. 대조군으로 사용한 새우는 증기가 충분히 발생한 이후 9분간 증기 가열하고 4°C이하에서 10분간 냉각한 후 껍질을 제거하여 사용하였다.

물성 측정

비가열, 가열 시료의 물성은 Texture meter (TA-XT plus; Stable Micro Systems Ltd., Surrey, UK)를 사용하여 측정하였다.

최적 조건 비가열 수리미 페이스트는 지름 6 cm의 원통 전용 용기인 A/BE (back extrusion probe)를 이용해 시료를 60% 답아 test speed 1.0 mm/s, strain 40.0%, trigger force 5.0 g의 조건에서 5회 이상 후방 압출 테스트를 진행하여 견고성(firmness)와 접착성(adhesiveness)의 평균값을 계산하였다. 가열 수리미는 출력물을 사용하여 P/45 (45 mm diameter aluminum cylinder probe)를 이용하여 test speed 1.0 mm/s, strain 50.0%, trigger force 5.0 g의 조건에서 5회 이상 압출 테스트를 진행하고 경도(hardness), 접착성(adhesiveness), 탄력성(springiness), 응집성(cohesiveness), 겹섬성(gumminess), 씹힘성(chewiness), 복원성(resilience)의 평균값을 계산하였다. 전단테스트(shear force)의 경우 test speed 0.17 mm/s의 조건으로 시료를 전단하여 전단력(shear force)의 평균값을 이용하였다.

pH 측정

최적 조건으로 제조된 수리미 페이스트의 pH는 시료 3 g에 증류수 27 mL를 가하여 10,000 rpm의 속도로 1분 간 균질기(Nissei ACE homogenizer; Nihonseiki Kaisha LTD., Nissei, Japan)로 균질화한 10% 현탁액을 사용하였다. 시료 현탁액을 pH계(TOADKK pH meter HM-42X; TOADKK, Tokyo, Japan)로 pH를 3회 이상 측정하고 평균값으로 계산하였다.

색도 측정

최적 조건으로 제조된 수리미의 비가열, 가열 시료의 단면을 절단하여 분광색도계(Colormeter, JC 801; Color Technology Co., Nagoya, Japan)로 측정하였다. 측정값은 L* (명도), a* (적색도), b* (황색도)를 값으로 나타내었다. Whiteness (백색도)는 L^*-3b^* 를 이용하여 계산하였다. 표준백판 값은 $X=92.35$, $Y=83.92$, $Z=96.98$ 이었다. ΔE^* (색차)는 아래의 식을 이용하여 나타내었다.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

관능 평가

최적 조건으로 제조된 3D 프린팅 수리미와 실제 새우의 색(color), 냄새(smell), 비린내(fishy smell), 맛(taste), 이미(abnormal taste), 조직감(texture), 경도(hardness), 탄력성(springiness) 및 종합적 기호도(preference)의 9가지 항목에 panel이 직접 섭취하여 평가하는 관능평가를 진행하였다(부경대학교 기관생명윤리위원회 승인번호, 1041386-202005-HR-30-02). 평가는 9점 척도로 실시하였다. 9점 척도 중 1점은 매우 나쁘거나 낮음(extremely bad or slight), 9점은 매우 좋거나 강함(extremely good or much)으로 표시하여 관능 평가를 실시하였다. 이때 panel은 평가항목에 대해 이해되었으며, 평가방법이 숙지된 사람으로 10명(부경대학교 식품공학과 남 4명, 여 6명. 23-26세)으로 선별하였다.

통계 분석

모든 실험에서 얻은 측정 결과 및 관능평가 결과는 SAS program (ver. 9.3, SAS Institute, Inc., NC, USA)을 이용하여 실험 처리된 값의 평균값을 분산분석 한 후 Duncan's multiple range test 법을 이용해 $P<0.05$ 수준으로 진행하였다.

결과 및 고찰

원료 어종에 따른 물성 비교

어종에 따른 3D 프린팅하여 가열한 수리미의 물성 측정결과는 Fig. 1과 같다. 전반적으로 가열 수리미의 물성은 명태 수리미가 실꼬리돔 수리미보다 경도(hardness), 응집성(cohesiveness), 씹힘성(chewiness), 복원성(resilience), 전단력(shear force)에서 유의적으로 우수하였다($P<0.05$). 이러한 결과는 두 어종의 수리미가 가진 고유한 특성 차이에 기인한 것으로 명태 수리미가 실꼬리돔 수리미보다 단백질 함량이 더 높기 때문이다(Choi et al., 2023). Ahn et al. (2019)의 연구결과에서 동일한 조건에서 제조된 가열 겔의 겔 강도는 명태 수리미(412.3-769.4 g·cm)가 실꼬리돔 수리미(280.2-456.5 g·cm)보다 확연히 높았으며, 이는 명태 수리미의 겔 형성능이 더 우수하기 때문이라고 보고되고 있다. 일반적으로 명태와 실꼬리돔은 서식 환경 차이로 인해 미오신의 열 안정성이 상이한 것으로 알려져 있다. 그러나 본 연구의 목적은 동일한 공정에서 원료 어종 차이에 따른 물성을 비교하는 것이며, 실제 수리미 가공 산업에서는 생산 효율성을 위해 40°C 부근에서 예비 가열을 수행한다(Benjakul et al., 2003; Uemura et al., 2022). 이에 본 연구에서는 3D 프린팅 공정 변수를 통제하여 산업적 적용성을 평가하기 위해 두 어종 모두 동일한 setting 조건으로 적용하였다. 따라서 본 연구에서 3D 프린팅을 거친 후에도 원료 어종의 차이가 최종 제품의 조직적 특성에 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 이는 명태 수리미가 실꼬리돔 수리미보다 대체 새우 제품의 단단하고 탄력있는 질감을 구현하는데 더 적합한 원료임을 시사한다.

실꼬리돔 수리미의 다당류 종류에 따른 물성 비교

앞선 실험에서 명태 수리미가 우수한 물성을 보였으나, 실꼬리돔 수리미의 활용 가능성을 최종적으로 검증하기 위해 실꼬리돔 수리미에 다당류 3종(구아검, 잔탄검, 참쌀전분)을 각각 첨가하여 조직적 특성을 실제 새우와 비교하였으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다. 수리미에 전분을 첨가하면 조직적 특성을 개선할 수 있다고 보고되고 있다(Yang and Park, 1998). 또한 구아검은 3D 프린팅용 수리미 잉크의 적합성을 높인다고 밝혀진 바 있다(Na et al., 2023). 측정된 8가지 항목 중 탄력성(Springiness), 응집성(Cohesiveness), 복원성(resilience)을 제외한 모든 항목에서 실제 새우가 수리미 시료보다 유의적으로 높은 값을 나타내었다($P<0.05$). 특히 경도(hardness), 씹힘성(chewiness) 등에서

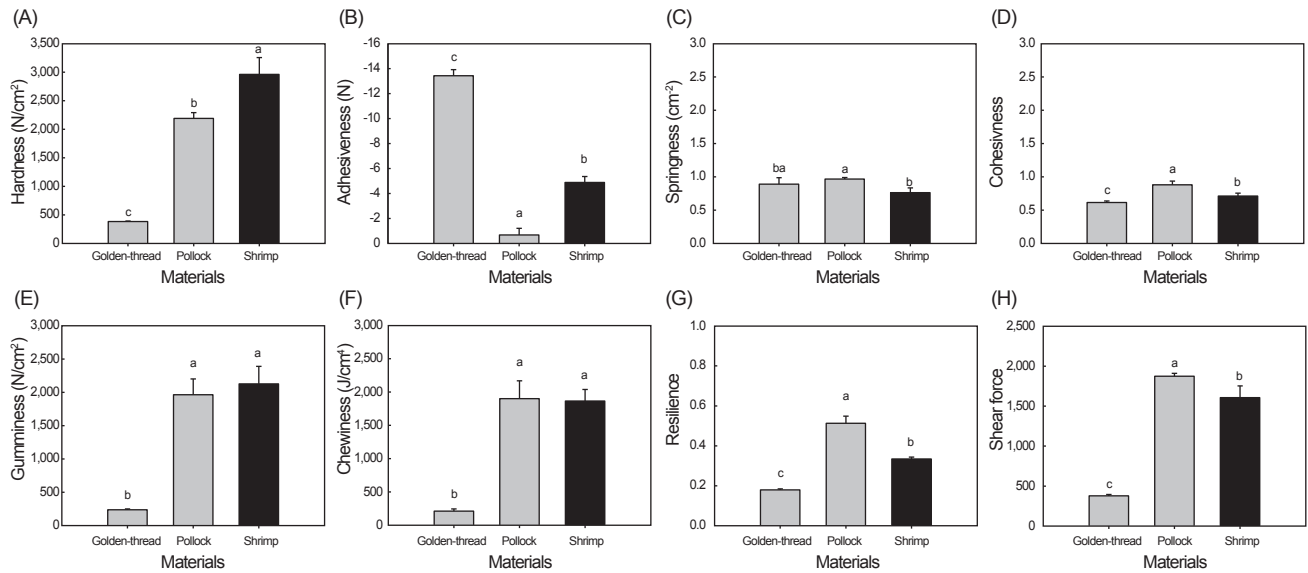


Fig. 1. Comparison of texture profile analysis (TPA) and shearing force between Alaska pollock *Gadus chalcogrammus* and golden threadfin bream surimi gels compared to natural steamed shrimp. Each panel represents: A, Hardness; B, Adhesiveness; C, Springiness; D, Cohesiveness; E, Gumminess; F, Chewiness; G, Resilience; H, Shear force. Means in the same column (a-c) bearing different superscript in sample are significantly different (P<0.05).

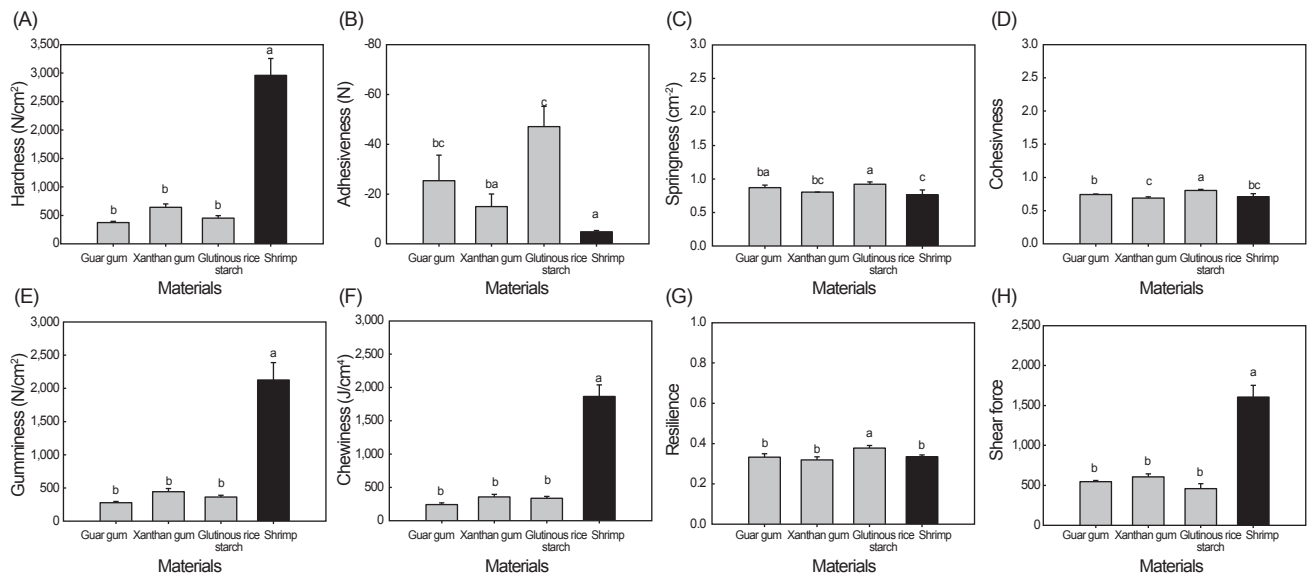


Fig. 2. Texture profile analysis (TPA) and shearing force of golden threadfin bream surimi gels containing different gums/starch (0.5 wt% guar gum, xanthan gum, and glutinous rice starch) compared to natural steamed shrimp. Each panel represents: A, Hardness; B, Adhesiveness; C, Springiness; D, Cohesiveness; E, Gumminess; F, Chewiness; G, Resilience; H, Shear force. Means in the same column (a-c) bearing different superscript in sample are significantly different (P<0.05).

큰 차이를 보였는데, 이는 새우 고유의 근섬유 구조와 수리미 겔 네트워크 구조의 근본적인 차이 때문이다. 수리미 겔화는 단백질의 변성과 재응집에 의해 일어나므로, 원래의 근육 조직과는

다른 구조를 형성한다(Wang et al., 2018). 한편 구아검, 잔탄검, 참쌀전분을 첨가한 수리미 시료들 간에는 경도(hardness), 감성(gumminess), 씹힘성(chewiness) 등에서 유의적인 차이가 나

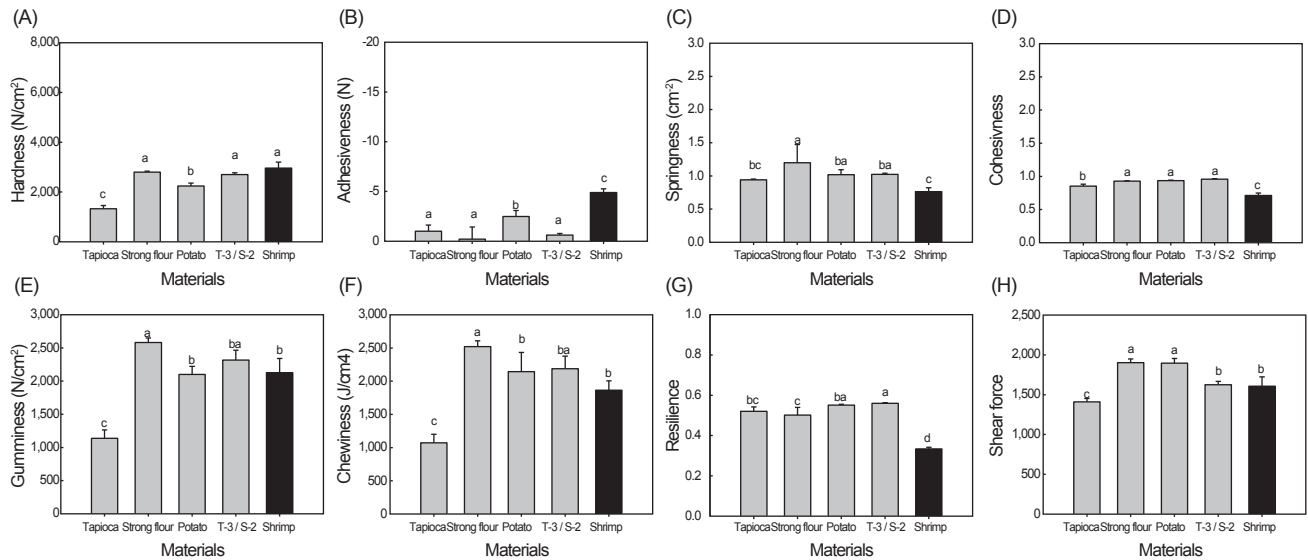


Fig. 3. Texture profile analysis (TPA) and shearing force of Alaska pollock *Gadus chalcogrammus* surimi gels containing different starch/ flour concentration (4.0 wt% tapioca starch, strong flour, potato starch) and the optimized mixture (T-3/S-2, formulated with 3.0 wt% Tapioca starch and 2.0 wt% Strong flour) compared to natural steamed shrimp. Each panel represents: A, Hardness; B, Adhesiveness; C, Springiness; D, Cohesiveness; E, Gumminess; F, Chewiness; G, Resilience; H, Shear force. Means in the same column (a-d) bearing different superscript in sample are significantly different ($P < 0.05$).

타나지 않았다. 이는 첨가된 다당류 농도가 낮아 최종 가열 겔의 조직감보다는 프린팅 전 페이스트 상태에서의 안정성에 주로 기여했기 때문일 수 있다. 3D 프린팅 페이스트의 유변학적 특성, 특히 항복 응력(yield stress)은 위에 쌓이는 원료 층에 의해 생성되는 응력 하에서 원료가 형태를 유지하는 능력과 관련이 있으며(Lille et al., 2018), 구아검이 최종 제품의 경도보다는 프린팅 정확도와 안정성을 높이는 데 영향을 준다는 연구 결과도 보고되고 있다(Na et al., 2023). 따라서 실크리듬 수리미에 0.5 wt%의 다당류를 첨가하는 것만으로는 실제 새우의 조직감을 모방하기에는 한계가 있음을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 기초 물성이 약한 실크리듬 수리미를 주원료에서 배제하고, 기초 물성이 우수한 명태 수리미를 기반으로 최적화 단계를 수행하였다.

명태 수리미의 품질 최적화 및 실제 새우와의 비교

앞선 단계에서 주원료로 선정된 명태 수리미의 물성을 실제 새우와 유사하게 최적화하기 위해, 3종의 다당류(강력분, 타피오카 전분, 감자전분)를 선정하였다. 강력분은 글루텐 함량이 높아 수리미 페이스트 내 망상 구조를 형성하여 3D 프린팅된 후 형태 유지력을 부여할 수 있으며 강도를 높일 수 있다(Chung and Lee, 1996; Wang et al., 2014). 타피오카 전분은 수리미 겔 품질을 향상시키는 것으로 알려져 있으며(Huang et al., 2024), 감자전분은 팽윤력이 우수하여 수리미 겔 강도를 높일 수 있다(Kim and Lee, 1987; Seo et al., 2021). 또한 Hunt et al. (2009)

의 연구에 따르면 수리미 제품에 첨가되는 범위는 통상적으로 4–12%로 보고되고 있으며, 넙치 수리미 연구(Cha et al., 2009)에서는 전분 최적 농도를 4.0 wt%로 설정한 바 있다. 따라서 본 연구에서는 선행연구결과를 바탕으로 첨가물의 농도를 4.0 wt%로 설정하였다. 명태 수리미에 다당류 3종(타피오카 전분, 강력분, 감자전분)을 4.0 wt% 첨가한 시료와 이를 바탕으로 도출한 최적 조건(타피오카 전분 3.0 wt%+강력분 2.0 wt%) 시료의 조직적 특성을 실제 새우와 비교한 결과는 Fig. 3과 같다. 분석 결과, 단일 다당류를 4.0 wt% 첨가한 실험군 중에서 강력분(strong flour)첨가 시료가 경도, 점성, 씹힘성에서 가장 높은 물성 강화 효과를 보였으며($P < 0.05$) 특히 씹힘성에서 새우보다 유의적으로 높은 것으로 나타나 질긴 물성을 나타냈다($P < 0.05$). 이는 강력분 내 단백질인 글루텐이 수분 유지력이 뛰어나 수분 유출을 감소시키는 효과가 있으며(Chung and Lee, 1996) 수리미의 근원섬유 단백질과 글루텐 단백질이 서로 얽히면서 강화된 구조를 만들어 겔 강도가 강해진 것으로 사료된다(Zhang et al., 2015). 또한 강력분에 포함된 전분 입자들은 가열 시 수분을 흡수하고 호화하여 단백질 네트워크 사이의 빈 공간을 채우며 물리적으로 구조를 지지하여 강도를 높이는 역할을 한다(Wang et al., 2014). 반면 타피오카 전분 첨가 시료는 경도, 응집성, 점성, 씹힘성이 유의적으로 가장 낮았다($P < 0.05$). 수리미 겔의 기본 구조는 근원섬유 단백질이 그물처럼 얽혀서 만들어지는데 단백질 구조 내에 너무 많은 전분이 분포하게 되면 단백질 간의 상호작용을 방해하여 구조를 약화시킬 수 있다

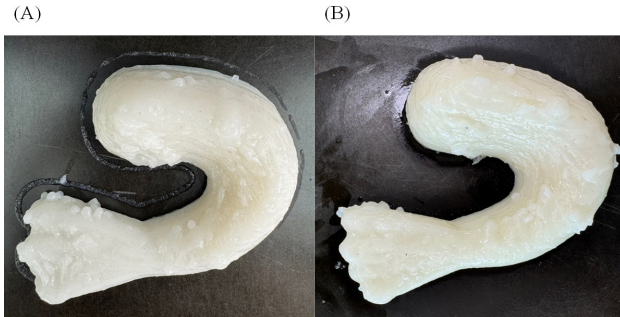


Fig. 4. Appearance of 3D-printed shrimp analogues prepared with the optimized formulation (3.0 wt% tapioca starch and 2.0 wt% strong flour). A, Unheated state; B, Heated state.

(Huang et al., 2024). 감자전분을 첨가한 시료는 경도, 감성, 씹힘성, 전단력이 타피오카 전분보다 높게 나타났다. 감자전분은 Zhang et al. (2013)의 연구에 따르면 타피오카 전분을 첨가한 겔보다 감자전분을 첨가한 겔이 높은 겔 강도를 나타냈다고 보고했다. 감자전분은 다른 전분에 비해 입자가 크고 가열 시 팽창하는 힘이 강하며 이 거대한 팽창 입자들이 수리미 겔 구조를 더 단단하게 만들기 때문이다(Kim and Lee, 1987; Zhang et al., 2013). 이러한 각 다당류의 특성 차이를 바탕으로 강력분의 구조 형성 능력과 타피오카 전분의 조직감 완화 효과를 고려하여 여러 비율로 예비 실험을 진행하였다. 강력분 함량이 증가할수록 경도, 탄성, 감성, 전단력이 향상되어 겔 구조가 강화되었으나, 타피오카 전분의 함량이 증가할수록 경도, 탄성, 감성, 전단력이 감소하여 조직 연화 효과가 나타났다. 각 소재의 상반된 특성을 바탕으로 강력분 함량을 2.0 wt%로 제한하여 과도한 경도를 억제하고 타피오카 전분 3.0 wt%를 첨가하여 조직의 유연성을 보완하는 최적 조건을 설계했다. 최적 조건 시료의 물성을 새우와 비교한 결과 경도, 감성, 씹힘성과 전단력에서 통계적으로 유의적인 차이가 없었다($P>0.05$). 이는 단순 수리미 겔이나 단일 다당류 첨가군에서는 나타나지 않았던 결과로 두 다당류의 복합적인 효과가 나타났음을 의미한다. 강력분내에 존재하는 전분과 글루텐 단백질이 수리미의 근원섬유 단백질과 함께 골격 구조를 형성하고(Wang et al., 2014; Zhang et al., 2015) 상대적으로 부드러운 물성을 나타낸 타피오카 전분이 효과적으로 제어하고 보완함으로써 단일 첨가군만으로는 구현할 수 없는 새우의 조직감을 성공적으로 모사했음을 의미한다(Chisenga et al., 2019; Huang et al., 2024).

3D 프린팅 출력

Fig. 4는 최적 조건으로 제조된 새우 모양으로 3D 프린팅한 가열 전(A), 가열 후(B)의 외관을 비교한 사진이다. 가열 전 불투명한 페이스트 상태로 형태를 유지하고 있는 것을 확인할 수 있으며 가열한 후 시료 표면에 광택이 있고 탄력있는 겔 형태로 전환되었다. 이는 가열 과정에서 수리미의 주요 단백질인 근원

섬유 단백질이 열에 의해 변성되면서 기존의 접힌 구조가 풀리고 단백질 사슬들이 서로 재결합하면서 안정적이고 치밀한 3차원 망상 구조를 형성하게 된다(Wang et al., 2018; Huang et al., 2024). 이렇게 형성된 단백질 망상 구조는 다량의 수분을 포획하여 부드러운 페이스트 상태에서 단단하고 탄력있는 겔 형태로 전환시킨다(Wang et al., 2018). 따라서 3D 프린팅으로 정교하게 제조된 수리미 잉크에 열을 가하는 겔화 과정은 대체 새우 제품이 실제 새우와 유사한 바람직한 조직감을 갖추기 위한 필수적인 과정이란 것을 시각적으로 보여준다.

비가열 수리미 특성

3D 프린팅 공정에서 잉크의 물리화학적 특성은 최종 제품의 품질을 결정하는 핵심적인 요소이다. 이에 본 연구에서는 최적 조건(타피오카 전분 3.0 wt% + 강력분 2.0 wt%)으로 제조된 비가열 수리미 페이스트가 3D 프린팅 잉크로서 갖는 적합성을 평가했으며 그 결과는 Table 1과 같다. 최적 조건 페이스트의 pH는 7.33으로 측정되었다. 수리미 겔 강도를 결정하는 중요한 요소 중 하나는 pH이며, pH 7.0–8.0에서 수리미 겔이 강하게 형성되는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2017). 따라서 본 시료의 pH는 프린팅 후 가열 시 견고하고 안정적인 네트워크 구조를 형성하기에 매우 유리한 조건임을 나타낸다. 수리미 잉크의 색상은 최종 제품의 외관 품질에 직접적인 영향을 미친다. 수리미의 명도는 수세 공정을 통해 수용성인 근장단백질이 제거될수록 높아지게 된다(Jin et al., 2007). 또한 수리미 등급이 낮아질수록 적색도(a^*), 황색도(b^*), 색차값(ΔE)이 증가하며 백색도(whiteness)는 감소하는 특성이 있다(Ahn et al., 2019). 본 연구에서 제조한 최적 조건 페이스트는 높은 명도와 백색도, 낮은 적색도와 황색도를 나타내어 고품질 수리미의 색상 특성과 일치하였다. 이는 원료 잉크가 백색에 가까운 우수한 색상을 지녔음을 의미하며 최종 제품의 높은 관능적 특성을 나타낼 수 있다. 3D 프린팅 공정의 성공 여부는 최종 출력물 특성뿐만 아니라 원료가 되는 잉크 자체의 물리적 특성에 크게 좌우된다.

Table 1. Physicochemical properties of Alaska pollock *Gadus chalcogrammus* surimi paste prepared with the optimized formulation

	Optimized sample
pH	7.33±0.07
L*	75.40±0.09
a*	-1.74±0.13
b*	3.42±0.16
Whiteness	65.15±0.40
ΔE	18.25±0.06
Firmness (g)	2413±129
Adhesiveness (N)	-1,829.84±152.58

L*, Lightness; a*, Redness; b*, Yellowness. Optimized sample: 3.0 wt% tapioca starch and 2.0 wt% strong flour.

본 연구에서 최적 조건으로 제조된 비가열 수리미 페이스트의 견고성(firmness)와 접착성(adhesiveness)을 측정하여 3D 프린팅 잉크로서의 적합성을 평가했다. 견고성은 2,413 g, 접착성은 -1,829.84 N으로 나타났다. 접착성의 음의 부호(-)는 sample이 probe 표면에 부착되어 떨어지지 않으려는 저항력을 의미하며, 절댓값이 클수록 시료의 접착성이 강한 것을 의미한다. 이는 잉크가 노즐에서 토출된 후 자체 무게와 후속 층의 하중을 견디며 형태를 유지하는 능력이 매우 뛰어난 것을 의미한다. 선행 연구에서 견고성이 높을수록 출력물의 형태가 무너짐 없이 온전히 유지되는 것으로 보고하였다(Na et al., 2023). 또한 선행 연구에서 나타난 접착성 범위는 -2,300– -3,000 N과 -730– -870 N으로 나타났으며 토출 시 마힘없이 매끄럽게 압출되고 3D 프린팅 후 층간 접착력을 확보할 수 있는 것으로 보고하였다(Seo et al., 2021; Kim et al., 2024). 따라서 본 연구에서 측정된 접착성은 기존 연구의 수치와 비교할 때 원활한 토출에 충분히 적합하고 층간 접착력을 유지할 수 있는 범위에 속한다.

가열 수리미 색도 측정

3D 프린팅 후 가열 공정을 거친 최적 조건 수리미 제품과 실제 새우의 색도를 비교한 결과는 Table 2와 같다. 모든 색도 지표에서 두 시료 간에 유의적인 차이가 나타났다($P<0.05$). L^* (명도) 값과 whiteness (백색도)는 실제 새우가 최적 조건 수리미보다 높게 나타나 더 밝은 색을 나타냈다. 수리미 기반 제품에서는 높은 L^* (명도) 값과 whiteness (백색도)는 중요한 품질 지표로 여겨진다(Ahn et al., 2019). 반면, a^* (적색도)와 b^* (황색도) 값은 최적 조건 수리미가 실제 새우보다 유의적으로($P<0.05$) 낮게 나타났다. 이는 수리미 제품이 붉은 기와 노란 기가 적어 더 깨끗하고 순수한 백색에 가까운 색조를 지녔음을 의미한다. 실제 새우는 아스타잔틴(astaxanthin)과 같은 천연 색소를 미량 함유하여 고유의 색을 띠는 반면, 명태 수리미는 수세 공정을 통해 색소 단백질을 포함한 근장단백질을 제거하여 만들기 때문에

이러한 차이가 나타난 것으로 사료된다(Jin et al., 2007). Park et al. (2003)과 Jin et al. (2007)의 연구에 따르면 수리미의 b^* (황색도)는 근육 내 잔존하는 미오글로빈(myoglobin)이나 헤모글로빈(hemoglobin)과 같은 헴(heme)색소에 영향을 받으며 수세 공정을 통해 황색도가 감소하고 백색도가 향상된다고 보고하였다. 또한, 첨가된 전분이 b^* (황색도)를 희석시켜 결과적으로 백색도가 향상될 수 있다. Ahn et al. (2019)의 연구에 따르면 최상급 명태 수리미의 백색도가 70.8이었으며 본 연구에서 제조된 가열 수리미의 백색도(78.42)가 이보다 더 높게 나타났다. 이는 본 연구의 최적화 배합에 첨가된 전분과 밀가루가 수리미 페이스트 내의 색소를 물리적으로 희석시키는 효과를 주어 결과적으로 백색도 향상에 기여했기 때문으로 판단된다. 그러나, 대체 수산물 제품이 최종적으로 소비자에게 수용되기 위해서는 시각적인 유사성(visual similarity) 또한 필수적인 요소이다. 본 연구의 3D 프린팅 수리미는 모든 색도 항목에서 유의적인 차이가 나타났으며($P<0.05$), 시각적 재현성이 다소 부족한 한계가 있다. 따라서 향후 실제 새우 특유의 붉은 색감을 구현하여 소비자 기호도를 충족시키기 위해서는 천연 색소를 이용하여 외관 품질을 보완하는 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

관능 평가

3D 프린팅 대체 새우 제품의 최종적인 소비자 수용성을 평가하기 위해 최적 조건으로 제조된 가열 수리미 제품과 실제 새우를 대상을 관능평가를 진행했으며 그 결과는 Table 3과 같다. 분석 결과, 9개의 항목 중 맛(taste)을 제외한 모든 항목에서 유의적인 차이가 나타나지 않았다($P>0.05$). 이는 본 연구를 통해 개발된 대체 새우 제품이 실제 새우와 매우 유사한 관능적 특성을 가지며 높은 소비자 수용성을 가지는 것을 나타낸다. 특히 식감을 인지하는데 중요한 지표인 경도(hardness), 탄력성(elasticity) 그리고 조직감(texture) 항목에서 통계적 차이가 없었다. 이는 앞서 진행된 기계적 물성 측정 결과(Fig. 3)에서 최적 조건 시

Table 2. Comparison of color values between natural steamed shrimp and the heated 3D-printed shrimp analogue prepared with the optimized formulation

	L^*	a^*	b^*	Whiteness	ΔE^*
Shrimp	89.15±0.23 ^a	-1.14±0.13 ^a	2.80±0.33 ^a	80.75±1.15 ^a	10.22±0.28 ^b
Optimized sample	84.90±0.16 ^b	-3.17±0.10 ^b	2.16±0.09 ^b	78.42±0.34 ^b	14.41±0.16 ^a

L^* , Lightness; a^* , Redness; b^* , Yellowness. Optimized sample: 3.0 wt% tapioca starch and 2.0 wt% strong flour. ^{a,b} Means in the same column (a-b) bearing different superscript in sample are significantly different ($P<0.05$).

Table 3. Sensory evaluation scores of the heated 3D-printed shrimp analogue compared to natural steamed shrimp

	Color	Smell	Fishy smell	Taste	Abnormal	Texture	Hardness	Elasticity	Preference
Shrimp	7.70±1.06 ^a	8.10±0.88 ^a	7.30±1.57 ^a	8.50±0.53 ^a	8.30±0.82 ^a	7.70±1.42 ^a	7.40±1.26 ^a	6.10±1.97 ^a	7.90±1.10 ^a
Optimized sample	8.00±0.94 ^a	7.60±0.97 ^a	7.50±1.18 ^a	7.40±0.97 ^b	7.70±1.57 ^a	7.30±0.95 ^a	6.50±1.58 ^a	7.20±1.23 ^a	7.00±1.15 ^a

Optimized sample: 3.0 wt% tapioca starch and 2.0 wt% strong flour. ^{a,b} Means in the same column (a-b) bearing different superscript in sample are significantly different ($P<0.05$).

료의 정도와 전단력이 실제 새우와 유사하게 나타난 것을 관능적으로 뒷받침하는 결과이다. 유일하게 유의적 차이($P<0.05$)를 보인 맛 항목에서는 실제 새우가 8.50으로 수리미(7.40)보다 높은 점수를 받았다. 이는 향미료 만으로는 실제 새우가 가진 감칠맛과 풍미를 완벽하게 재현하는데 한계가 있음을 보여주며 향후 맛에 대한 추가 연구는 필요할 것으로 사료된다.

사 사

이 논문은 2025년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2018-KS181195, 수산전문인력양성사업).

References

- Ahn BS, Kim BG, Jeon EB, Lee IS and Oh KS. 2019. Quality characteristics by grade of commercial frozen surimi. *Korean J Fish Aquat Sci* 52, 555-561. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0555>.
- Ahn GJ. 2005. Quality characteristics of the chol-pyon added tapioca powder. *Korean J Culinary Res* 11, 179-189.
- Benjakul S, Chantarasuwan C and Visessanguan W. 2003. Effect of medium temperature setting on gelling characteristics of surimi from some tropical fish. *Food Chem* 82, 567-574. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(03\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(03)00012-8).
- Cha SH, Jo MR, Lee JS, Lee JH, Ko JY and Jeon YJ. 2009. Preparation and texture characterization of surimi gel using a unmarketable rearing olive flounder. *Korean J Fish Aquat Sci* 42, 109-115. <https://doi.org/10.5657/kfas.2009.42.2.109>.
- Chisenga SM, Workneh TS, Bultosa G and Alimi BA. 2019. Progress in research and applications of cassava flour and starch: A review. *J Food Sci Technol* 56, 2799-2813. <https://doi.org/10.1007/s13197-019-03814-6>.
- Choi YJ, Chae JH, Kim SH, Shin EC, Choi GB, Kim DH and Cho SM. 2023. Surimi for snacks: Physicochemical and sensory properties of fried fish snacks prepared from surimi of different fish species. *Fish Aquat Sci* 26, 145-157. <https://doi.org/10.47853/FAS.2023.e12>.
- Chung KH and Lee CM. 1996. Evaluation of wheat gluten and modified starches for their texture-modifying and freeze-thaw stabilizing effects on surimi based-products. *J Food Sci Nutr* 1, 190-195.
- Huang X, Liu Q, Wang P, Song C, Ma H, Hong P and Zhou C. 2024. Tapioca starch improves the quality of *Virgatus nemipterus* surimi gel by enhancing molecular interaction in the gel system. *Foods* 13, 169. <https://doi.org/10.3390/foods13010169>.
- Hunt A, Getty KJ and Park JW. 2009. Roles of starch in surimi seafood: A review. *Food Rev Int* 25, 299-312. <https://doi.org/10.1080/87559120903155834>.
- Jin SK, Kim IS, Yang HS, Choi YJ and Kim BG. 2007. Quality characteristics of surimi manufactured by Alaska pollock, barren hen breast meat and mechanically deboned chicken meat. *J Anim Sci Technol* 49, 395-404. <https://doi.org/10.5187/JAST.2007.49.3.395>.
- Kang BK, Kim KBWR, Kim MJ, Bark SW, Pak WM, Kim BR, Ahn NK, Choi YU, Choi JS, Choi HD and Ahn DH. 2014. Changes in allergenicity of gliadin in strong wheat flour by physical treatments. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 43, 557-563. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2014.43.4.557>.
- Kim DH, Na HS, Lee HY, Yu HJ, Lee SM, Seo GW, Ko CH, Park SW, Choi YJ, Jo MJ, Kim DW and Ahn DH. 2024. Coagulation characteristics by calcium lactate with addition concentration of alginic acid in 3D printing mixtures for fish surimi. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 53, 755-761. <https://doi.org/10.3746/jkfn.2024.53.7.755>.
- Kim JM and Lee CM. 1987. Effect of starch of textural properties of surimi gel. *J Food Sci* 52, 722-725. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1987.tb06711.x>.
- Lee HY, Yu HJ, Lee SM, Na HS, Kim DH, Seo GW, Ko CH, Park SW, Choi HW, Choi YJ, Jo MJ, Kim DW and Ahn DH. 2024. Effects of naked barley starch on properties of fish surimi mixture for 3D printing. *Korean J Fish Aquat Sci* 57, 109-115. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2024.0109>.
- Lee MG, Yoon WB and Park JW. 2017. Combined effect of pH and heating conditions on the physical properties of Alaska pollock surimi gels. *J Texture Stud* 48, 215-220. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12230>.
- Li X, Fan L and Li J. 2023. Extrusion-based 3D printing of high internal phase emulsions stabilized by co-assembled β -cyclodextrin and chitosan. *Food Hydrocoll* 134, 108036. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108036>.
- Lille M, Nurmela A, Nordlund E, Metsä-Kortelainen S and Sozer N. 2018. Applicability of protein and fiber-rich food materials in extrusion-based 3D printing. *J Food Eng* 220, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.04.034>.
- Na HS, Kim DH, Lee HY, Lee SM, Yu HJ, Seo GW, Ko CH, Park SW, Choi HW, Choi YJ, Jo MJ, Kim DW and Ahn DH. 2023. Effects of guar gum addition on optimal properties of fish surimi mixture for 3D printing. *Korean J Fish Aquat Sci* 56, 790-797. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2023.0790>.
- Nachal N, Moses JA, Karthik P and Anandharamakrishnan C. 2019. Applications of 3D printing in food processing. *Food Eng Rev* 11, 123-141. <https://doi.org/10.1007/s12393-019-09199-8>.
- Paez-Osuna F. 2001. The environmental impact of shrimp aquaculture: Causes, effects, and mitigating alternatives. *Environ Manage* 28, 131-140. <https://doi.org/10.1007/s002670010212>.
- Park JD, Kim JS, Cho YJ, Choi YD and Choi YJ. 2003. Optimum formulation of starch and non-muscle protein for Alkali surimi gel from frozen white croaker. *J Korean Soc Food Sci Nutr* 32, 1026-1031. <https://doi.org/10.3746/>

- jkfn.2003.32.7.1026.
- Park JW and Morrissey MT. 2000. Manufacturing of surimi from light muscle fish. In: Surimi and Surimi Seafood. Park JW, ed. Marcel Dekker Inc., New York, NY, U.S.A., 23-58.
- Prithviraj V, Díaz LP, Lemus-Mondaca R, Ullah A and Roopesh MS. 2025. Emerging advancements in 3D food printing. Front Food Sci Technol 5, 1607449. <https://doi.org/10.3389/frfst.2025.1607449>.
- Seo HS, Park YL, Park JC, Han HS, Kang YS, Choi YH, Kim SH, Kim HH, Jeong SM, Kang WS, Kim SR, Ryu SH, Lee JE, Xu X, Lee GH and Ahn DH. 2021. Effect of potato starch on suitability for 3D printing in golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) surimi mixture preparation. J Appl Biol Chem 64, 413-419. <https://doi.org/10.3839/jabc.2021.056>.
- Teixeira CM and Silva PM. 2023. The huge dilemma: How to increase seafood consumption for health benefits without impacting fisheries' sustainability?. INT J Food Sci Technol 59, 661-672. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16841>.
- Uemura M, Yamamura T, Mizusawa N, Koyama H, Yasumoto K, Jimbo M, Ikeda D, Kan-no N, Matsuoka Y, Ueki N, Wan J, Fukushima H and Watabe S. 2022. Molecular mechanisms involved in thermally induced gel formation of Japanese codling meat paste during a two-step heating procedure. ACS Food Sci Technol 2, 249-259. <https://doi.org/10.1021/acsfoodscitech.1c00362>.
- Wang L, Zhang M, Bhandari B and Yang C. 2018. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing. J Food Eng 220, 101-108. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.02.029>.
- Wang X, Xu Y, Jiang Q, Yu P and Xia W. 2014. Effect of incorporated surimi on the wheat dough rheological properties and noodle quality. Food Sci Technol Res 20, 1191-1197. <https://doi.org/10.3136/fstr.20.1191>.
- Xiong Z, Shi T, Jin W, Bao Y, Monto AR, Yuan L and Gao R. 2024. Gel performance of surimi induced by various thermal technologies: A review. Crit Rev Food Sci Nutr 64, 3075-3090. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2130154>.
- Yang H and Park JW. 1998. Effects of starch properties and thermal-processing conditions on surimi-starch gels. LWT Food Sci Technol 31, 344-353. <https://doi.org/10.1006/fstl.1997.0366>.
- Zhang F, Fang L, Wang C, Shi L, Chang T, Yang H and Cui M. 2013. Effects of starches on the textural, rheological, and color properties of surimi-beef gels with microbial transglutaminase. Meat Sci 93, 533-537. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.11.013>.
- Zhang L, Zhang F and Wang X. 2015. Effects of hydrolyzed wheat gluten on the properties of high-temperature ($\geq 100^{\circ}\text{C}$) treated surimi gels. Food Hydrocoll 45, 196-202. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.11.016>.