

A Stiffness-Based Real-Time Appearance Deformation Method for 2D Frozen Hair Without Physical Simulation

Jong-Hyun Kim*

*Associate Professor, College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology),
Graduate School of Electrical and Computer Engineering, Inha University, Incheon, Korea

[Abstract]

This paper presents a stiffness-based real-time deformation method for frozen hair without physical simulation. Frozen hair exhibits increased rigidity, limited deformation, and clumping with gaps, which are difficult to reproduce with existing physics-based or manual approaches in real time. We model freezing effects using stretching and bending stiffness, approximated through lightweight vertex displacement and rotational deformation. The method supports user interaction and strand-wise intensity variation, and extends a wet-hair adhesion model to simulate clumping with spatial separation. Applicable to generic static hair meshes, the approach achieves consistent real-time results without complex simulation, enabling practical use in interactive graphics applications such as games, animation, and VR.

▶ **Key words:** Frozen hair, Stiffness-based hair modeling, Real-time appearance deformation, Vertex-based deformation

[요 약]

본 논문은 물리 시뮬레이션 없이 동결된 머리카락을 실시간으로 변형하는 강성 기반 방법을 제안한다. 동결된 머리카락은 강성 증가, 제한된 변형, 간격이 있는 뭉침(clumping) 등의 특징을 보이며, 이는 기존의 물리 기반 또는 수작업 방식으로는 실시간 재현이 어렵다. 본 연구에서는 이러한 동결 효과를 신장 및 굽힘 강성으로 모델링하고, 이를 경량의 정점 변위와 회전 변형으로 근사한다. 또한 사용자 인터랙션과 모발 가닥별 강도 변화를 지원하며, 젖은 머리카락의 adhesion 모델을 확장하여 공간적 분리를 갖는 뭉침 효과를 재현한다. 제안 기법은 일반적인 정적 헤어 메시에 적용 가능하며, 복잡한 시뮬레이션 없이 일관된 실시간 결과를 제공한다. 이를 통해 게임, 애니메이션, VR과 같은 인터랙티브 그래픽스 응용에 실용적으로 활용될 수 있다.

▶ **주제어:** 빙결된 머리카락, 강성 기반 머리카락 모델링, 실시간 외형 변형, 정점 기반 변형

-
- First Author: Jong-Hyun Kim, Corresponding Author: Jong-Hyun Kim
 - *Jong-Hyun Kim (jonghyunkim@inha.ac.kr), College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology), Graduate School of Electrical and Computer Engineering, Inha University
 - Received: 2026. 02. 12, Revised: 2026. 03. 12, Accepted: 2026. 03. 24.

I. Introduction

머리카락은 인간 캐릭터의 외형을 구성하는 핵심 요소 중 하나로, 그 상태와 거동에 따라 캐릭터의 인상과 현실감이 크게 달라진다. 특히 젖은 머리카락, 건조한 머리카락, 그리고 빙결된 머리카락은 서로 다른 물리적·외형적 특성을 가지며, 이러한 차이는 시각적으로도 명확하게 인지된다. 이 중 빙결된 머리카락은 수분을 머금은 상태에서 얼음 결정이 형성되면서 강성이 급격히 증가하고, 쉽게 늘어나거나 구부러지지 않으며, 머리카락 덩어리 사이에 공간이 형성되는 독특한 외형적 특징을 보인다.

기존의 머리카락 모델링 및 시뮬레이션 연구는 주로 건조하거나 젖은 머리카락을 대상으로 발전해 왔다. 물리 기반 시뮬레이션은 머리카락의 동적 거동을 사실적으로 재현할 수 있으나, 계산 비용이 크고 파라미터 설정이 복잡하여 실시간 응용이나 사용자 상호작용 환경에 적용하기에는 한계가 있다. 반면, 수작업 중심의 모델링이나 알파맵 기반 표현 방식은 구현은 비교적 간단하지만, 결과가 그래픽 디자이너의 미적 판단에 크게 의존하며 일관성을 유지하기 어렵고, 시뮬레이션 파이프라인과의 호환성도 제한적이다. 특히 빙결된 머리카락의 경우, 이러한 기존 접근 방식으로는 강성 증가와 특유의 뭉침 구조를 효과적으로 표현하기 어렵다.

최근 실시간 그래픽스 응용 분야에서는 물리적 정확성보다는 시각적으로 설득력 있는 외형을 효율적으로 표현하는 경량화된 모델링 기법에 대한 요구가 증가하고 있다. 게임, 애니메이션, 가상현실과 같은 인터랙티브 콘텐츠에서는 복잡한 물리 시뮬레이션 없이도 안정적인 프레임 속도와 직관적인 사용자 제어가 가능한 표현 방식이 중요하다. 이러한 맥락에서 빙결된 머리카락의 외형을 물리 시뮬레이션에 의존하지 않고 직접 제어할 수 있는 방법은 실용적 가치가 크다.

본 논문에서는 물리 시뮬레이션 없이 빙결된 머리카락의 외형적 특징을 실시간으로 표현하기 위한 강성 기반 정점 변형 기법을 제안한다. 빙결로 인해 증가하는 물리적 강성을 늘어짐 강성과 굽힘 강성으로 분리하여 모델링하고, 이를 정점 단위의 위치 이동과 회전 변형으로 근사함으로써 계산 비용을 최소화하였다. 또한 사용자 입력을 기반으로 머리카락 가닥의 정렬 방향을 제어하고, 정점 인덱스에 따른 강도 보간을 적용하여 뿌리와 끝 부분에서 서로 다른 변형 거동을 구현한다. 더 나아가 젖은 머리카락의 접착 개념을 확장하여, 빙결된 머리카락에서 관찰되는 공간을 포함한 뭉침 외형을 정적인 정점 변형 과정으로 재현한다.

본 연구의 기여는 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫째, 빙결된 머리카락의 강성 증가를 정점 기반 변형으로 모델링하여 물리 시뮬레이션 없이도 실시간 표현이 가능한 경량화된 방법을 제시한다. 둘째, 사용자 상호작용을 통해 머리카락 외형을 직관적으로 제어할 수 있는 메커니즘을 제공함으로써 인터랙티브 콘텐츠 제작에 적합한 표현 방식을 제안한다. 셋째, 기존 젖은 머리카락 모델을 확장하여 빙결 특유의 뭉침 구조와 공간감을 효과적으로 재현한다. 제안한 기법은 임의의 정적 헤어 메시에 적용 가능하며, 실시간 그래픽스 응용 전반에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

물리 기반 시뮬레이션 방법이 머리카락의 물리적으로 정확한 동적 거동을 재현하는 것을 목표로 하는 것과 달리, 본 논문에서 제안하는 방법은 시간 적분 과정 없이, 경량화된 정점 단위 변형을 사용하여 빙결된 머리카락의 시각적 특성을 직접 모델링하는 데 초점을 둔다. 이러한 접근은 실시간 성능을 가능하게 하며, 기존 시뮬레이션 파이프라인으로는 적용이 어려운 2차원 또는 벡터 그래픽 기반 환경에서도 활용될 수 있도록 한다.

II. Related Work

머리카락은 다수의 가늘고 긴 섬유(스트랜드)로 구성되어 있어, 늘어남(stretching), 굽힘(bending), 비틀림(twisting) 등 복합적인 탄성 거동과 빈번한 자기 충돌을 동반한다. 이를 안정적으로 처리하기 위해 Position-Based Dynamics(PBD)는 속도/힘 기반 적분 대신 위치 보정을 통해 수치적 안정성과 제어 용이성을 제공하는 대표적 프레임워크로 활용되어 왔다[1]. 특히 실시간 환경에서는 “비신장(inextensible)” 특성을 유지하는 것이 중요한데, Bender 등은 Follow-the-Leader 계열의 기하학적 업데이트를 기반으로 단일/소수 반복으로도 스트랜드 신장을 억제하는 실시간 시뮬레이션 기법을 제시하였다[2]. 또한 굽힘/비틀림을 포함한 보다 엄밀한 탄성 모델로는 Bergou 등의 Discrete Elastic Rods가 널리 참조되며, 스트랜드의 중심선과 물질 프레임을 통해 stretching/bending/twisting을 일관된 기하학으로 정식화한다[3].

머리카락 전체를 개별 스트랜드로 모두 계산하는 대신, 위스프(wisp) 혹은 클럼프(clump) 단위로 묶어 효율을 확보하는 접근이 오래전부터 연구되어 왔다. Bertails 등은 장발에서 관찰되는 동적 클러스터링을 표현하기 위해

Adaptive Wisp Tree를 제안하여, 클러스터의 거시적(coherent) 운동과 미시적 변이를 다중 해상도로 제어한다[4]. Choe 등은 위스프 기반 표현을 이용해 복잡한 헤어스타일의 동역학을 구성하고, wisp-body 및 wisp-wisp 상호작용/충돌을 포함한 강건한 처리 프레임워크를 제시하였다[5]. 이러한 집합적 표현은 실시간성을 높이지만, 사용자가 의도하는 곡소 형태(예: 특정 가닥의 방향 정렬, 부분적 변형)를 직접 제어하거나, 특정 상태(젖음/빙결 등)에서 나타나는 외형적 특징을 모델 중심으로 반영하기에는 추가 설계가 필요하다.

Hadap과 Magnenat-Thalmann은 머리카락 덩어리를 연속체로 보고, hair-hair/hair-air 상호작용을 유체역학적 항으로 근사하는 continuum 기반 모델을 제안하였다[6]. 최근에는 라그랑지안 스트랜드 동역학과 오일러리안 그리드 기반 접촉 처리를 결합한 하이브리드 계열도 발전하고 있으며, Hsu 등은 하이브리드 스트랜드-기반 헤어에서 초기 자세가 중력 등으로 ‘처지는(sagging)’ 문제를 다루는 sag-free initialization 프레임워크를 제시하였다[7]. 이들은 높은 현실감을 제공할 수 있으나, 구현 복잡도와 파이프라인 비용이 증가하는 경향이 있어, 실시간 콘텐츠 제작에서는 외형 중심의 경량화 표현과 병행될 필요가 있다.

실시간 성능을 위해, 일부 가이드 스트랜드만 시뮬레이션하고 나머지를 보간하는 감소(reduced) 모델도 활발히 연구되었다. Chai 등은 사전 계산된 시뮬레이션 데이터로부터 가이드 스트랜드 및 보간 관계를 최적화하여, 대규모 헤어를 상호작용 속도로 구동하는 reduced model을 제안하였다[8]. 또한 Lyu 등은 가이드-기반 구조를 확장하여 신경망 보간을 결합하는 Real-Time Hair Simulation with Neural Interpolation을 제안함으로써, 디테일을 유지하면서도 실시간성을 강화하려는 방향을 보여준다[9]. 이러한 방법들은 학습/데이터 준비 비용 또는 특정 헤어스타일에 대한 종속성 문제가 논의될 수 있으며, “빙결”처럼 상태 변화가 외형 규칙(강성 증가, 클럼프 사이 간극 등)으로 나타나는 경우에는 상태 특화된 모델링 요소가 유용하다.

젖은 머리카락의 뭉침(clumping)과 접착(adhesion)은 표면장력 및 유체 상호작용과 밀접하며, 이를 직접 다루기 위한 연구가 존재한다. Lin은 SPH 유체와 스트랜드를 양방향 결합해 hair-fluid 상호작용 및 클럼핑의 동적 형성을 다룬 바 있으며, 이후 연구에서는 경계 처리와 다공성 흐름(porous flow)을 통해 흡수/확산 등을 포함한 fluid-hair coupling을 확장하였다[10]. 다만 이러한 접근은 시뮬레이션 설정과 계산 비용이 커질 수 있으므로, 빙결 머리카락처럼 “시뮬레이션 없이도” 특정 외형 단서를 강조

해야 하는 응용에서는, 접착/뭉침 개념을 정적 정점 변형 과정으로 재해석하는 경량화 설계가 실용적일 수 있다.

최근 연구에서는 실시간 성능을 확보하기 위해 데이터 기반 및 신경망 기반 머리카락 시뮬레이션 기법이 활발히 제안되고 있다. 예를 들어, Lyu et al.는 CNN 기반 보간 기법을 통해 guide hair로부터 고해상도 머리카락 동작을 생성하는 방법을 제안하였으며[11], Wu et al.는 implicit neural representation을 활용하여 효율적인 머리카락 모델링을 수행하였다[12].

또한 Hsu et al.는 물리 기반 시뮬레이션과 데이터 기반 접근을 결합한 hybrid 방법을 제안하였으며[13], Jiang et al.는 수치적 최적화를 통해 물리 기반 시뮬레이션의 실시간 성능을 개선하였다[14].

이와 같은 연구들은 효율성과 일반화를 개선하는 방향으로 발전하고 있으나, 여전히 시뮬레이션 또는 학습 기반 파이프라인에 의존한다는 특징을 가진다. 반면, 본 연구는 이러한 접근과 달리 학습이나 물리 시뮬레이션 없이 외형을 직접 모델링하는 방식이라는 점에서 차별성을 가진다.

앞선 연구들이 주로 (1) 물리 기반 동역학의 충실한 재현, (2) 효율을 위한 집합적 표현/감소 모델, (3) 유체-머리카락 결합을 통한 젖은 머리카락 현상 재현에 집중해 온 반면, 빙결 머리카락은 강성 증가로 인한 “변형 억제”와 클럼프 사이 “간극”이 동시에 드러나는 상태로서, 실시간 콘텐츠 제작에서 별도의 목표 함수(물리량 일치)보다 형태적 규칙의 직접 제어가 더 중요할 수 있다. 본 논문은 이러한 관점에서 늘어짐/굽힘 강성을 분해한 강성 기반 정점 변형과 사용자 입력 기반 정렬을 결합하고, 젖은 머리카락의 접착 개념을 빙결 특성에 맞게 보정하여 “공간을 포함한 뭉침”을 구현하는 방향으로 기존 연구 흐름을 보완한다.

기존의 머리카락 시뮬레이션 방법이 물리적으로 정확한 동적 거동과 유체 기반의 뭉침(clumping) 현상 재현에 초점을 두는 것과 달리, 본 연구에서 제안하는 방법은 정적 정점 변형을 이용하여 빙결된 머리카락의 시각적 특성을 직접 모델링하는 데 초점을 둔다. 이러한 접근은 실시간 성능과 직관적인 사용자 제어를 가능하게 하며, 특히 2차원 또는 벡터 기반 환경에서 효과적으로 적용될 수 있다. 그러나 본 방법은 물리적으로 정확한 동적 거동이나 복잡한 3차원 상호작용을 재현하는 것을 목표로 하지 않으며, 따라서 기존의 물리 기반 시뮬레이션을 대체하기보다는 이를 보완하는 접근으로 이해하는 것이 적절하다.

III. The Proposed Scheme

1. Overview and Notation

본 연구의 목표는 임의의 정적 머리카락 메시(또는 스트랜드 집합) H 가 주어졌을 때, 물리 시뮬레이션(유체/탄성/충돌 적분) 없이도 빙결된 머리카락의 형태적 단서(강성 증가, 제한된 굽힘/늘어남, 공간을 포함한 뭉침)를 실시간으로 재현하는 것이다. 머리카락은 S 개의 스트랜드로 구성되며, s 번째 스트랜드는 N_s 개의 정점으로 이루어진다:

$$H = \{S_s\}_{s=1}^S, S_s = \{p_{s,i}\}_{i=0}^{N_s-1} \quad (1)$$

인접 정점의 방향 벡터와 단위 접선은 다음과 같이 정의한다:

$$d_{s,i} = p_{s,i} - p_{s,i-1}, l_{s,i} = \|d_{s,i}\|, \hat{t}_{s,i} = \frac{d_{s,i}}{\|d_{s,i}\| + \epsilon} \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 0으로 나눴을 방지하는 작은 상수이다.

제안 프레임워크는 크게 (1) 강성 기반 빙결 변형, (2) 사용자 입력 기반 정렬, (3) 공간을 포함한 뭉침(clumping)으로 구성되며, 사용자 명령이 입력되는 프레임에서 다음 순서로 수행된다: FreezeDeform → UserAlign → ClumpWithGaps.

2. Stiffness-Based Freezing Deformation

빙결된 머리카락의 가장 두드러진 특성은 늘어남(stretching)과 굽힘(bending)에 대한 강한 저항이다. 본 연구에서는 이를 각각의 강성 계수로 분리하여, 정점 업데이트를 “짧은 시간의 변형(정적 재배치)”으로 근사한다.

늘어짐 강성 계수 $k_s > 0$ 가 클수록 정점 간 길이는 더 일정하게 유지되어야 한다. 이를 위해 목표 길이를 “원래 길이” $l_{s,i}^0$ 주변에서 작은 범위로만 변형되도록 설정한다.

우선 늘어짐 인수(stretching factor)를 $\alpha_s = \frac{1}{k_s + \epsilon}$ 로 정의하고, 매 업데이트마다 무작위 스칼라 $\eta_{s,i} \approx U(-1,1)$ 를 샘플링하여 목표 길이를 다음과 같이 결정한다:

$$l_{s,i}^* = l_{s,i}^0(1 + \alpha_s \eta_{s,i}) \quad (3)$$

그 다음 정점 위치는 이전 접선 방향을 따라 $p'_{s,i} = p'_{s,i-1} + l_{s,i}^* \hat{t}_{s,i}$ ($i \geq 1$)로 업데이트한다. 여기서

$p'_{s,0} = p_{s,0}$ 가 $l_{s,i}^0$ 에 가까워져 빙결 특유의 “길이 안정성”이 강화된다.

굽힘 강성 계수 $k_b > 0$ 는 스트랜드의 국소 방향 변화(곡률)를 억제한다. 본 연구는 굽힘 인수(bending factor)를 $\alpha_b = \frac{1}{k_b + \epsilon}$ 로 정의하고, 각 세그먼트의 방향 벡터를 작은 회전으로만 교란시키는 방식으로 “굽힘 제한”을 구현한다. 무작위 회전각 $\theta_{s,i}$ 와 회전축 $\hat{a}_{s,i}$ 를 아래와 같이 둔다.

$$\theta_{s,i} = \theta_{\max} \alpha_b \xi_{s,i}, \xi_{s,i} \sim U(-1,1), \quad (4)$$

$$\hat{a}_{s,i} = \frac{\hat{t}_{s,i-1} \times \hat{t}_{s,i}}{\|\hat{t}_{s,i-1} \times \hat{t}_{s,i}\| + \epsilon}$$

Rodrigues 회전 공식을 이용해 회전 행렬 $R(\hat{a}, \theta)$ 를 구성한다:

$$R(\hat{a}, \theta) = \cos\theta I + (1 - \cos\theta)\hat{a}\hat{a}^\top + \sin\theta[\hat{a}]_\times \quad (5)$$

최종적으로 세그먼트 방향을 아래와 같이 갱신한다.

$$\tilde{d}_{s,i} = R(\hat{a}_{s,i}, \theta_{s,i})d_{s,i} \quad (6)$$

그리고, 아래와 같이 길이 갱신과 결합하여 적용한다.

$$P'_{s,i} = P'_{s,i-1} + l_{s,i}^* \frac{\tilde{d}_{s,i}}{\|\tilde{d}_{s,i}\| + \epsilon} \quad (7)$$

k_b 가 커질수록 $\theta_{s,i}$ 의 범위가 축소되어, 빙결된 머리카락의 “구불거림 감소”가 자연스럽게 반영된다.

3. User-Driven Hair Alignment

빙결 머리카락은 강성이 크기 때문에 “한 번의 외력/조작 이후 형태가 유지되는” 인상이 강하다. 본 연구는 사용자가 마우스로 특정 방향을 지정하면 일정 거리 내의 스트랜드를 그 방향으로 정렬시키는 상호작용을 제공한다.

사용자 커서 위치(3D 투영점)를 c 라 하자. 스트랜드 s 에 대해 대표 방향 벡터를 평균 위치 기반으로 정의한다:

$$\bar{p}_s = \frac{1}{N_s} \sum_{i=0}^{N_s-1} p'_{s,i}, v_s = p'_{s,N_s-1} - \bar{p}_s \quad (8)$$

또한, 루트에서 커서를 향하는 목표 방향은 아래와 같다.

$$u_s = c - p'_{s,0} \quad (9)$$

스트랜드가 상호작용 반경 r 안에 있을 때만 정렬 영향을 받도록 정의한다.

$$I_s = \begin{cases} 1, & \|p'_{s,N_s-1} - c\| \leq r, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (10)$$

정렬은 v_s 를 u_s 로 회전시키는 회전 행렬로 구현한다. 회전축과 각도를 다음과 같이 계산한다.

$$\hat{a}_s = \frac{v_s \times u_s}{\|v_s \times u_s\| + \epsilon}, \phi_s = \arccos\left(\frac{v_s \cdot u_s}{\|v_s\| \|u_s\| + \epsilon}\right) \quad (11)$$

그리고 $R_s = R(\hat{a}_s, \phi_s)$ 로 설정한다.

정점 인덱스 i 에 따른 회전 강도는 다음과 같이 계산한다.

$$t_{s,i} = \frac{i}{N_s - 1}, w(t_{s,i}) = t_{s,i}(1-x) + x \quad (12)$$

여기서 $x \in [0,1]$ 는 사용자가 조절하는 intensity 파라미터이다. $x = 1$ 이면 모든 정점이 동일하게 회전하여 '막대처럼' 움직이고, $x = 0$ 이면 끝 정점에서만 회전이 강하게 적용되어 '완만한 곡선 정렬'이 나타난다.

최종 정렬 결과는 루트 기준 회전으로 아래와 같이 계산하고, 실제 적용은 $l_s = 1$ 인 스트랜드에 대해서만 수행한다.

$$p''_{s,i} = p'_{s,0} + w(t_{s,i})R_s(p'_{s,i} - p'_{s,0}) + (1-w(t_{s,i}))(p'_{s,i} - p'_{s,0}) \quad (13)$$

4. Clumping With Spatial Gaps

빙결된 머리카락의 뭉침은 젖은 머리카락의 자기 접착 (self-adhesion)과 유사한 원인(표면장력 기반 응집)을 가지지만, 완전히 밀착되기보다 클럼프 사이에 틈(gap)이 남는 외형적 차이가 있다. 본 연구는 기존 젖은 머리카락 접착 모델에서 사용되는 거리 기반 힘 개념을 차용하되, 시뮬레이션 환경 없이 정적 정점 변형으로 구현 가능한 형태로 단순화한다.

정점 $p''_{s,i}$ 에 대해 인접 스트랜드의 후보 정점 집합 $N(p''_{s,i})$ 를 반경 h 내의 정점들로 정의하고, 각 이웃 정점 $q \in N$ 에 대해 거리 $r = |q - p''_{s,i}|$ 를 계산한다. 접착력 크기는 1차원 스플라인 함수 $g(r)$ 로 모델링한다.

$$g(r) = \begin{cases} \left(1 - \frac{r}{h}\right)^2, & 0 \leq r < h, \\ 0, & r \geq h. \end{cases} \quad (14)$$

정점에 작용하는 접착력 벡터는 다음과 같다.

$$f_{s,i} = \sum_{q \in N(p''_{s,i})} g(\|q - p''_{s,i}\|) \frac{q - p''_{s,i}}{\|q - p''_{s,i}\| + \epsilon} \quad (15)$$

물리 시뮬레이션의 시간 적분을 수행하는 대신, 접착력을 "정점 변위"로 변환하여 k 회 반복 적용한다.

$$p_{s,i}^{(k+1)} = p_{s,i}^{(k)} + \Delta p_{s,i}^{(k)}, \Delta p_{s,i}^{(k)} = \frac{\Delta t^2}{m} f_{s,i}^{(k)} \quad (16)$$

여기서 m 은 정점 질량, Δt 는 스케일 파라미터이며, $p_{s,i}^{(0)} = p''_{s,i}$ 이다. 이 반복은 "한 프레임 내 정적 수렴 과정"으로 해석되며, k 가 증가할수록 뭉침이 강화되지만 실시간성을 고려해 작은 값으로 제한한다.

젖은 머리카락의 경우 뭉침이 과도하게 밀착되는 경향이 있으므로, 빙결 특유의 간극을 표현하기 위해 접착 적용 전후의 거리 변화량을 이용한 보정 항을 추가한다. 정점 쌍 (p, q) 에 대해 적용 전 거리 r_0 와 적용 후 거리 r_1 를 측정하고, 아래와 같이 δ 를 계산한다.

$$\delta = \text{clamp}\left(\frac{r_1 - r_0}{h}, 0, 1\right) \quad (17)$$

이후 난수 $\zeta \approx U(0,1)$ 를 이용해 보간 계수를 다음과 같이 만들고,

$$\lambda = (1 - \delta)\zeta + \delta \quad (18)$$

최종 변위를 아래와 같이 조절한다.

$$\Delta p_{s,i}^{(k)} \leftarrow \lambda \Delta p_{s,i}^{(k)} \quad (19)$$

직관적으로, 뭉침으로 인해 거리 변화가 크게 발생하는 구간에서는 λ 가 작아져 과도한 밀착을 억제하고, 결과적으로 클럼프 사이에 공간이 남도록 유도한다. 이 보정은 빙결 상태에서 관찰되는 "덩어리 간 틈"을 물리 시뮬레이션 없이도 안정적으로 재현하는 역할을 한다.

5. Discussion of Complexity and Real-Time Feasibility

제안 기법은 각 스트랜드에 대해 국소 벡터/회전 연산을 수행하는 선형 복잡도를 가지며, clumping 단계는 반경 h 내 이웃 집합 크기 $|N|$ 에 비례한다. 따라서 전체

복잡도는 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$O\left(\sum_s N_s\right) + O\left(k \sum_s \sum_i |N(p_{s,i})|\right) \quad (20)$$

실시간성을 위해 k 와 h 를 제한하고, 이웃 탐색을 공간 해싱(grid hashing)으로 구현하면 상호작용 환경에서도 안정적 프레임 속도를 확보할 수 있다.

제안된 방법은 시간 적분, 충돌 처리, 또는 유체 결합 연산을 포함하지 않기 때문에, 물리 기반 시뮬레이션 방법에 비해 계산 오버헤드가 훨씬 낮다. 따라서 실시간 인터랙티브 응용에 적합하다.

전체 파이프라인은 세 단계로 순차적으로 구성되며, 각 단계는 FreezeDeform, UserAlign, ClumpWithGaps로 이루어진다. 각 단계는 각각 강성 적용(stiffness enforcement), 방향 정렬(directional alignment), 그리고 공간을 포함한 뭉침(clumping with spatial gaps)을 담당한다 (Algorithm 1 참조).

Input: Hair strands H , user input c , parameters $(k_s, k_b, x, \text{etc.})$

Output: Deformed hair strands H'

```

for each strand  $s$  in  $H$  do
  // Step 1: FreezeDeform
  apply stretching constraint using  $k_s$ 
  apply bending constraint using  $k_b$ 
end for
for each strand  $s$  in  $H$  do
  // Step 2: UserAlign
  if strand  $s$  is within interaction radius then
    compute rotation toward user direction
    apply index-based interpolation
  end if
end for
for each vertex  $p$  in  $H$  do
  // Step 3: ClumpWithGaps
  find neighboring vertices within radius  $h$ 
  compute adhesion force
  update position with gap-preserving correction
end for
return  $H'$ 

```

Algorithm. 1. Frozen hair deformation pipeline.

IV. Experiment and Results

Fig. 1은 마우스 입력을 기반으로 머리카락의 회전 변형을 제어한 결과를 보여준다. 두 실험은 동일한 입력 경로에서 서로 다른 회전 강도(intensity)를 적용한 경우로, Fig. 1(a)는 회전 강도 0.8, Fig. 1(b)는 회전 강도 0.2에 해당한다. 회전 강도가 클수록 머리카락 전체 길이에 걸쳐 회전 효과가 강하게 전달되며, 특히 뿌리로부터 먼 영역에

서도 급격한 방향 변화가 나타난다. 반면, 회전 강도가 낮은 경우에는 뿌리 인근의 회전 영향이 점진적으로 감쇠되어 말단부로 갈수록 변형이 완만해지며, 결과적으로 보다 부드럽고 자연스러운 곡선 형태의 머리카락이 형성됨을 확인할 수 있다.

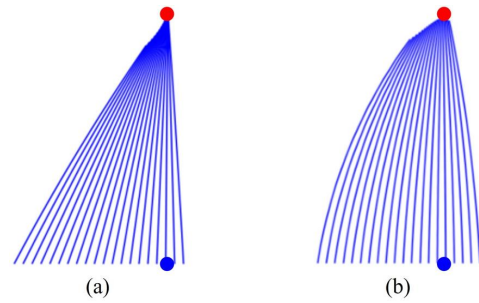


Fig. 1. Hair rotation results driven by mouse input with different rotation intensities. (a) Intensity = 0.8 produces a strong rotational effect along the entire hair length, while (b) Intensity = 0.2 attenuates the rotation toward distal regions, resulting in smoother and more gradual hair curvature (red: root, blue: tip).

Fig. 2는 강성(stiffness) 파라미터에 따른 빙결된 머리카락의 외형 변화를 비교한 결과를 보여준다. Fig. 2(a)는 빙결 효과가 적용되기 전의 원본 머리카락 형태이며, Fig. 2(b)와 Fig. 2(c)는 각각 강성 값이 7.0과 3.0으로 설정된 경우의 빙결 결과를 나타낸다. 강성이 높은 경우 머리카락의 국소적 변형이 억제되어 전체 길이가 비교적 균일하게 유지되며, 구불거림이 감소한 직선적인 외형이 형성된다. 반면, 강성이 낮아질수록 머리카락 세그먼트 간의 유연성이 증가하여 불규칙한 굴곡이 두드러지게 나타나며, 보다 자연스럽게 비균질적인 빙결 외형이 생성됨을 확인할 수 있다. 이러한 결과는 제안한 강성 기반 제어 모델이 빙결 상태의 머리카락 외형을 직관적으로 조절할 수 있음을 보여준다.

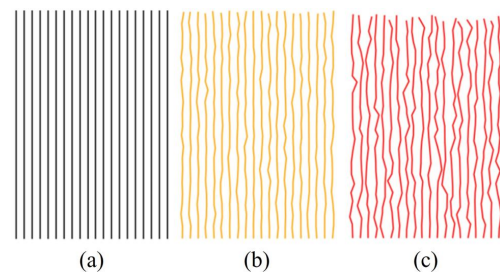


Fig. 2. Effects of stiffness on the appearance of frozen hair. (a) Original hair before freezing, (b) frozen hair with stiffness = 7.0 showing reduced waviness and more uniform strand lengths, and (c) frozen hair with stiffness = 3.0 exhibiting increased flexibility and irregular curvature.

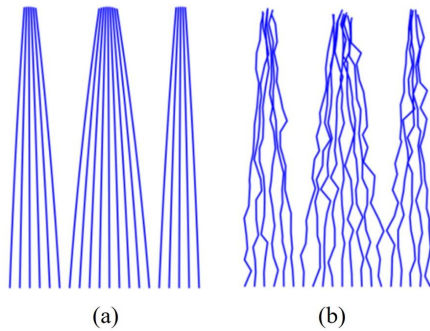


Fig. 3. Frozen hair with clumping effects. (a) Original hair before freezing and clumping, (b) and (c) frozen hair with the clumping algorithm applied, where nearby strands are grouped within a spatial threshold after alignment using mouse input.

Fig. 3은 빙결된 머리카락에 뭉침(clumping) 효과를 적용한 결과를 보여준다. Fig. 3(a)는 빙결 및 뭉침 효과가 적용되기 전의 원본 머리카락 형태를 나타내며, Fig. 3(b)와 Fig. 3(c)는 빙결 상태에서 뭉침 알고리즘이 적용된 결과를 보여준다. 본 연구에서 사용한 뭉침 알고리즘은 머리카락 가닥들이 일정 거리 범위내 내에 위치한 경우에만 국소적으로 작동하도록 설계되었다. 이에 따라 뭉침 효과가 안정적으로 관찰될 수 있도록, 마우스 입력을 이용해 머리카락을 사전에 정렬한 상태에서 실험을 수행하였다. 그 결과, 인접한 머리카락 가닥들이 군집을 형성하며 결합되는 현상이 자연스럽게 나타나고, 빙결로 인해 고정된 형태를 유지하면서도 불규칙한 굴곡이 함께 표현되는 것을 확인할 수 있다.

Table 1. Performance evaluation of the proposed method.

#Strand	#Vertices	Time per frame (ms)	FPS
100	2,000	6.8	147
300	6,000	16.5	60
500	10,000	28.7	35

실험 결과, 제안된 방법은 입력 크기에 따라 약 30-60 FPS의 인터랙티브한 프레임레이트를 유지하는 것으로 나타났으며, 정점 수에 대해 대략 선형적으로 증가하는 계산 특성을 보였다 (Table 1 참조). 또한 모든 실험은 GPU 가속 없이 CPU 기반 구현에서 수행되었다.

본 실험에서 사용된 파라미터 값들(예: 회전 강도 및 강성)은 고정된 최적값을 의미하는 것이 아니라, 각 파라미터의 효과를 명확하게 보여주기 위해 선택된 대표적인 예시 값들이다. 실제로 제안한 방법은 넓은 범위의 값에서도 일관된 동작 특성을 보이며, 사용자가 원하는 외형에 따라 직관적으로 조절할 수 있도록 한다.

V. Discussion

본 연구에서 제안한 강성 기반 빙결 머리카락 외형 변형 기법은 물리 시뮬레이션에 의존하지 않고, 정점 단위의 위치 이동과 회전 변형만을 이용하여 빙결 상태에서 관찰되는 주요 외형적 단서를 효과적으로 재현한다는 점에서 실용적인 의미를 갖는다. 특히 본 방법은 3차원 스트랜드 동역학을 직접 계산하지 않고도, 늘어짐 및 굽힘 억제, 뭉침과 공간 형성이라는 빙결 특성을 시각적으로 설득력 있게 표현할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

주목할 점은, 제안한 접근법이 2차원 스트랜드 기반 모델링을 전제로 한다는 점이다. 최근 머리카락 표현 연구의 다수는 3차원 스트랜드 시뮬레이션을 중심으로 발전해 왔으나, 실제 콘텐츠 제작 환경에서는 반드시 3차원 물리적 정확성이 요구되지 않는 경우도 많다. 예를 들어, 2D 또는 2.5D 기반 캐릭터 표현, 카툰 렌더링 스타일, 과장된 비율을 갖는 빅헤드(Big-head) 캐릭터 애니메이션, 혹은 모바일 웹 환경의 경량 캐릭터 표현과 같은 응용 분야에서는, 머리카락의 물리적 정합성보다 외형적 일관성과 실시간 제어 가능성이 더 중요한 요소로 작용한다.

이러한 맥락에서, 본 연구의 2D 스트랜드 기반 강성 모델은 오히려 장점으로 작용할 수 있다. 복잡한 3차원 충돌 처리나 시간 적분 없이도, 사용자가 직관적으로 강성 및 정렬 방향을 제어할 수 있으며, 프레임 단위의 안정적인 결과를 제공한다. 이는 실시간 캐릭터 저작 도구, 스타일화 애니메이션 파이프라인, 인터랙티브 콘텐츠 제작 환경에서 특히 유용할 수 있다. 또한 빙결 효과는 현실적인 재현뿐 아니라, 캐릭터의 감정 상태나 환경 효과를 강조하는 연출적 장치로 활용되는 경우도 많기 때문에, 2D 기반 표현에서도 충분한 활용 가치를 지닌다.

더 나아가, 제안한 뭉침 모델은 젖은 머리카락과 달리 클럼프 사이에 간극이 유지되는 빙결 특유의 외형을 정적 변형으로 구현한다는 점에서, 시뮬레이션 기반 접근과 명확히 구분된다. 이는 물리적 정확성보다는 형태적 규칙을 직접 제어하고자 하는 디자인 중심의 워크플로우에 적합하며, 다양한 스타일의 헤어 표현으로 확장될 가능성을 보여준다.

물론 본 연구는 몇 가지 한계도 가진다. 제안한 모델은 2차원 스트랜드 표현을 기반으로 하므로, 카메라 시점 변화에 따른 깊이 정보나 복잡한 3차원 상호작용을 직접적으로 반영하기는 어렵다. 또한 현재의 강성 및 뭉침 파라미터는 경험적으로 설정되며, 재질 특성이나 환경 조건을 자동으로 추정하는 기능은 포함하지 않는다. 그러나 이러한

제한은 본 연구의 목표가 물리적 완전성을 추구하기보다는, 실시간성과 제어 용이성을 중시한 외형 중심 모델링에 있음을 고려할 때 수용 가능한 범위로 판단된다.

물리 기반 시뮬레이션 방법이 3차원 환경에서의 물리적으로 정확한 동적 거동에 초점을 두는 것과 달리, 본 논문에서 제안하는 방법은 2차원 또는 벡터 그래픽 기반 환경에서 실시간으로 제어 가능한 외형 모델링을 목표로 한다. 이러한 환경에서는 물리적 정확성보다 경량 계산과 사용자 상호작용이 더 중요한 요소로 작용한다.

제안된 방법은 2차원 스트랜드 표현을 기반으로 하기 때문에, 시점 변화에 따른 깊이 변화나 복잡한 3차원 상호작용을 표현하는 데에는 한계가 있다. 그러나 정점 단위 변형 프레임워크는 2.5D 표현이나 레이어드 billboard 구조로 확장될 수 있으며, 이를 통해 실시간 성능을 유지하면서도 부분적인 깊이 표현을 가능하게 한다. 또한 본 방법은 3차원 시뮬레이션 파이프라인과 결합되어 외형 제어 레이어로 활용될 수 있으며, 이는 물리적 정확성과 직관적인 사용자 제어를 동시에 갖춘 하이브리드 접근으로 확장될 수 있음을 의미한다. 본 접근은 물리적 정확성보다는 외형을 직접 모델링하는 데 초점을 두고 있기 때문에, 카툰 렌더링, 과장된 캐릭터 디자인, 벡터 그래픽 기반 콘텐츠 등 다양한 스타일화된 영역에도 유연하게 적용될 수 있다.

종합하면, 본 연구는 2차원 스트랜드 기반 환경에서도 빙결 머리카락의 핵심 외형을 효과적으로 표현할 수 있음을 보였으며, 이는 3차원 시뮬레이션 중심의 기존 접근을 보완하는 대안적 방향을 제시한다. 제안한 기법은 사실적인 재현뿐 아니라 스타일화된 표현까지 포괄할 수 있는 유연한 설계를 갖추고 있어, 다양한 실시간 그래픽스 응용과 콘텐츠 제작 환경에서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

VI. Conclusion

본 논문에서는 물리 시뮬레이션에 의존하지 않고, 빙결된 머리카락의 외형적 특징을 실시간으로 표현할 수 있는 강성 기반 정점 변형 기법을 제안하였다. 빙결로 인해 나타나는 늘어짐 및 굽힘의 억제, 그리고 공간을 포함한 뭉침 구조를 핵심 외형 단서로 정의하고, 이를 정점 단위의 위치 이동과 회전 변형으로 근사함으로써 복잡한 시뮬레이션 파이프라인 없이도 일관된 결과를 생성할 수 있음을 보였다.

제안한 방법은 늘어짐 강성과 굽힘 강성을 분리하여 모델링하고, 정점 인덱스 기반 강도 보간을 통해 머리카락의

뿌리와 말단에서 서로 다른 변형 거동을 구현한다. 또한 사용자 입력을 활용한 스트랜드 정렬 메커니즘을 제공하여, 빙결 상태에서 한 번 형성된 형태가 유지되는 인상을 직관적으로 제어할 수 있도록 하였다. 더 나아가, 젖은 머리카락의 접착 개념을 확장한 뭉침 모델을 정적 변형 과정으로 재해석함으로써, 빙결된 머리카락에서 관찰되는 클럼프 간의 간극을 안정적으로 재현하였다.

본 연구의 또 다른 특징은 2차원 스트랜드 기반 모델링을 전제로 한다는 점이다. 이는 물리적으로 정확한 3차원 시뮬레이션을 목표로 하기보다는, 외형적 설득력과 실시간 상호작용을 중시하는 응용 환경에 적합한 선택으로 볼 수 있다. 실제로 2D 또는 2.5D 캐릭터 표현, 카툰 스타일 애니메이션, 과장된 비율을 갖는 캐릭터 디자인, 모바일 및 웹 기반 콘텐츠 제작과 같은 분야에서는, 본 연구와 같은 경량화된 외형 중심 접근이 실용적인 대안이 될 수 있다.

실험 결과를 통해 제안한 기법은 빙결 머리카락의 주요 시각적 특성을 효과적으로 표현하면서도, 안정적인 실시간 성능과 직관적인 사용자 제어를 동시에 제공함을 확인하였다. 이는 노동 집약적인 수작업 모델링이나 고비용 물리 시뮬레이션을 대체할 수 있는 실용적 방법으로서의 가능성을 보여준다.

향후 연구에서는 현재의 2차원 스트랜드 모델을 2.5D 또는 제한적인 깊이 정보를 포함하는 형태로 확장하고, 강성 및 뭉침 파라미터를 환경 조건이나 캐릭터 상태에 따라 자동으로 조절하는 방안을 고려할 수 있다. 또한 다양한 스타일화 렌더링 기법과의 결합을 통해, 보다 폭넓은 실시간 캐릭터 표현으로 확장하는 것을 목표로 한다.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2026-25474535).

REFERENCES

- [1] Müller, M., Heidelberger, B., Hennix, M., & Ratcliff, J. (2007). Position based dynamics. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 18(2), 109-118. DOI: 10.1016/j.jvcir.2007.01.005
- [2] Müller, M., Kim, T. Y., & Chentanez, N. (2012). Fast Simulation

of Inextensible Hair and Fur. *Vriphys*, 12, 39-44.

- [3] Bergou, M., Wardetzky, M., Robinson, S., Audoly, B., & Grinspun, E. (2008). Discrete elastic rods. In *ACM SIGGRAPH 2008 papers* (pp. 1-12). DOI: 10.1145/1399504.1360662
- [4] Bertails, F., Kim, T. Y., Cani, M. P., & Neumann, U. (2003). Adaptive wisp tree-a multiresolution control structure for simulating dynamic clustering in hair motion. In *Symposium on Computer Animation*. DOI: 10.1145/846276.846286
- [5] Choe, B., Choi, M. G., & Ko, H. S. (2005, July). Simulating complex hair with robust collision handling. In *Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (pp. 153-160). DOI: 10.1145/1073368.1073392
- [6] Hadap, S., & Magnenat-Thalmann, N. (2001, September). Modeling dynamic hair as a continuum. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 20, No. 3, pp. 329-338). Oxford, UK and Boston, USA: Blackwell Publishers Ltd. DOI: 10.1111/1467-8659.00552
- [7] Hsu, J., Wang, T., Pan, Z., Gao, X., Yuksel, C., & Wu, K. (2023). Sag-free initialization for strand-based hybrid hair simulation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 42(4), 1-14. DOI: 10.1145/3592137
- [8] Chai, M., Zheng, C., & Zhou, K. (2014). A reduced model for interactive hairs. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 33(4), 1-11. DOI: 10.1145/2601097.2601172
- [9] Lyu, Q., Chai, M., Chen, X., & Zhou, K. (2020). Real-time hair simulation with neural interpolation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28(4), 1894-1905. DOI:10.1109/TVCG.2021.3050877
- [10] Lin, W. C. (2014). Coupling hair with smoothed particle hydrodynamics fluids. DOI: 10.1145/2601097.2601210
- [11] Lyu, Q., Chai, M., Chen, X., & Zhou, K. (2022). Real-time hair simulation with neural interpolation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 28(4), 1894-1905. DOI: 10.1109/TVCG.2020.3029823
- [12] Wu, K., Ye, Y., Yang, L., Fu, H., Zhou, K., & Zheng, Y. (2022). NeuralHdHair: Automatic high-fidelity hair modeling from a single image using implicit neural representations. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. DOI: 10.1145/3528223.3530189
- [13] Hsu, J., Wang, T., Pan, Z., Gao, X., Yuksel, C., & Wu, K. (2024). Real-time physically guided hair interpolation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. DOI: 10.1145/3658176
- [14] Jiang, J., et al. (2020). Real-time hair simulation with heptadiagonal solver. *Computer Animation and Virtual Worlds*. DOI: 10.1016/j.cag.2020.02.006

Authors



Jong-Hyun Kim received the B.A. degree in the Department of Digital Contents at Sejong University in 2008. He received M.S. and Ph.D. degrees in the Department of Computer Science and Engineering at Korea University,

in 2010 and 2016. Prof. Kim is an Associate Professor in the College of Software and Convergence (Dept. of Artificial Intelligence, Design Technology), Graduate School of Electrical and Computer Engineering at Inha University. His current research interests include fluid animation and virtual reality.