

안정적 좌굴 모델을 통한 저감쇠 직물 시뮬레이션

최광진, 고희석

서울대학교
그래픽스 및 미디어 연구실

요약

본 논문은 매우 안정적이며 동시에 사실적인 직물 시뮬레이션 기법을 제안한다. 제안된 방법을 통해 안정성을 향상시킴으로써 고정된 큰 시간 간격을 사용할 수 있게 되었고, 따라서 복잡한 옷감의 변형 및 움직임을 효율적으로 시뮬레이션 할 수 있었다. 또한 제안된 방법은 직물의 가장 중요한 특성중의 하나인 주름 현상을 자연스럽게 표현한다. 안정성과 사실성에서 동시에 큰 향상을 가져올 수 있었던 것은, 수치적 안정성 외에 옷감의 좌굴 후 거동시의 불안정성을 극복함으로써 가능했다. 좌굴에 의한 불안정성은 직물의 구조적 불안정성으로부터 기인하며 단순히 암시적 시적분 방법을 사용함으로써 해결되지 않는다. 그러한 불안정성은 감쇠력을 더하여 안정성을 회복할 수 있으나 직물의 움직임을 둔화시켜 사실적인 움직임을 얻을 수 없게 한다. 본 논문에서는 즉좌굴(immediate buckling) 가정에 기반 한 새로운 직물의 좌굴 모형을 제시한다. 즉좌굴 가정은 직물이 좌굴되는 순간 안정한 상태로 곧바로 변형되는 것을 의미하며, 이러한 가정을 통해 가상적인 감쇠력을 더하지 않고도 안정적으로 직물을 시뮬레이션 할 수 있다. 결과적으로 즉좌굴 모델은 직물의 고유한 좌굴 현상을 적절히 모델링하여 안정성을 향상시킬 뿐 아니라 외부 힘에 민감하게 반응하는 직물의 움직임을 사실적으로 생성할 수 있도록 한다.

We present a cloth simulation technique that is very stable yet also responsive. The stability of the technique allows the use of a large fixed time step when simulating various types of fabrics and character motions. The animations generated using this technique are strikingly realistic. Wrinkles form and disappear in a quite natural way, which is the feature that most distinguishes textile fabrics from other sheet materials. Significant improvements in both the stability and realism were made possible by overcoming the *post-buckling instability* as well as the numerical instability. The instability caused by buckling arises from a structural instability and therefore cannot be avoided by simply employing an implicit method. Addition of a damping force may help to avoid instabilities; however, it can significantly degrade the realism of the cloth motion. In this paper, a new buckling model based on immediate buckling assumption is proposed. A cloth element is assumed to reach a stable configuration immediately once it begins to buckle. This assumption makes it possible to simulate the fabric buckling stably without introducing any fictitious damping force. Consequently, it produces highly responsive cloth motion as well as improves the stability by modeling the fabric-specific buckling property adequately.

제 1 절 서론

대개 사람의 외형은 90 퍼센트 이상이 옷으로 덮여 있다. 따라서 사실적인 캐릭터 애니메이션을 만들기 위해서는 사실적 의

복애니메이션이 필수적이다. 초기의 옷감 애니메이션에 대한 연구는 옷감의 물리적 모델에 주로 초점이 맞추어져 있었고, 이후 옷감 시뮬레이션을 실용화하기 위해 성능과 안정성 향상에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다 [13, 5, 3, 16, 11, 8, 9, 2, 6, 14]. 현재까지 제안된 직물 시뮬레이션 방법들은 접근 방법이나 특성 등에서 차이를 보이지만, 대부분의 경우 결국 상미분방정식의 수치적 해를 구하는 것으로 귀결된다.

직물은 인장에 강한 반발을 가지지만, 굽힘에 대해서는 매우 약한 반발력을 보이는 재질적 특성을 가지고 있다. 그러한 특성을 물리적으로 모델링하게 되면 수치적 불안정성을 갖는 강(stiff) 상미분방정식이 얻어지게 되며, 수치적인 해를 구할 때 큰 시간 간격을 사용할 수 없게 된다. 기존 연구들에서, 이러한 문제를 해결하는 데에 있어서는 암시적 시적분법을 사용하는 것이 매우 성공적인 결과를 가져온다는 것이 보고된 바 있다 [2, 14].

또 다른 직물의 중요한 재질적 특성은 직물 고유의 좌굴(buckling) 거동이다. 직물의 좌굴은 주름이 생성되는 과정의 하나로 이해될 수 있으며, 그러한 과정은 직물이 그림 1 에서 보는 바와 같은 형태가 되도록 한다. 직물의 좌굴 거동은 다른 고체물질과 매우 다른 성질을 가지며 [1], 따라서 직물을 시뮬레이션 할 때에 그러한 성질을 고려하지 않으면 자연스러운 직물의 움직임을 시뮬레이션하기 어렵다. 직물 시뮬레이션 시에 좌굴 거동이 가지는 여러 가지 문제점(불안정성, 비선형성)이 잘 알려져 있음에도 불구하고 [9, 17], 좌굴 문제는 최근의 직물 시뮬레이션의 연구에 있어서 무시되어진 경향이 있다. 본 논문은 직물 시뮬레이션 시 발생하는 좌굴 문제에 대해서 안정적이며 실용적인 해결책을 제시한다.



그림 1: 실제 직물의 좌굴 후 형태의 예

제 2 절 직물의 좌굴 현상

이 절에서는 직물의 좌굴 현상을 시뮬레이션 하는 데에 있어서 기존 모델이 가지는 문제점을 알아보고 직물의 좌굴 특성을 고려하여 불안정성 문제를 해결하는 방법을 제시한다.

2.1 기존 모델에서의 문제점

직물의 재질은 동질적인 연속체가 아니다. 따라서 직물을 연속체로 모델링하고 그것을 유한요소법등을 통해 수치적 해를 구하는 방법에는 몇 가지 잠재적인 문제점을 가지고 있다 [1]. 그 중 하나는 그러한 방법이 대변형 문제를 풀기 위해서는 매우 미세한 메시를 필요로 한다는 것이다. 그러나 컴퓨터 그래픽스 응용분야에 적용하기 위해서는 성긴 메시를 사용하여 적은 계산만으로 만족스러운 결과를 얻을 수 있어야 한다.

연속체 모델을 사용하는 데에 있어서 또 다른 문제점은 좌굴 시에 발생하는 발산문제를 처리하는 데에 있다. [9]에서는 비선형 쉘(shell) 모델을 사용했고 표준적인 유한요소해석 과정을 거쳐 직물을 시뮬레이션 했다. 좌굴 순간에 근접했을 때에 그러한 모델은 하중-변형 곡선의 비선형성에 의해 강성행렬(stiffness matrix)이 특이점(singularity)에 도달하게 되고 해는 발산하게 된다. 그들은 발산을 막기 위해 원호길이제어(arc-length control)와 같은 방법을 사용해야 했으며, 항상 안정적인 해를 구하지는 못하였다. [17]에서는 직물의 처짐을 시뮬레이션 할 때 발생하는 좌굴에 의한 발산 문제를 해결하기 위해 오히려 명시적 방법을 사용한 바 있다.

[2]과 [16]는 유사한 직물 모델을 가지고 있으며 그것은 연속체로 다루어지는 삼각형들의 집합으로 이해할 수 있다. 각각의 삼각형 평면 변형에너지(혹은 응력-변형 관계)는 연속체의 선형 탄성 모델로부터 구하며, 반면에 굽힘 변형의 척도는 인접한 두 삼각형의 사이 각에 기반하고 있다. 따라서 위의 모델에서 직물은 단일한 동질의 연속체로 다루어지는 것이 아니며 굽힘과 평면 변형의 성질은 독립적으로 모델링된다. 그러한 방식은 인장/압축 강성에 상관없이 대변형의 문제를 다루는 것을 가능케 했다. 그러나 삼각형이 거의 비압축성을 가지고 있고 굽힘 강성이 약하기 때문에, 위의 모델에서도 좌굴의 불안정성은 존재한다. 위의 모델의 또 다른 문제는 굽힘 성질이 직물의 삼각화 과정에 크게 의존하게 된다는 것이다. 삼각형들이 매우 높은 강성을 가지고 있기 때문에, 전체 직물의 변형은 삼각형의 변을 따라서 주로 굽힘 변형이 일어나게 된다. 이러한 현상은 삼각형들이 정렬되어 있는 경우, 특정 방향으로만 굽힘이 일어나게 되는 문제를 야기한다. 불규칙한 삼각화를 사용함으로써 굽힘이 고른 방향으로 발생하도록 할 수 있으나, 이렇게 할 경우 굽힘 강성이 인공적으로 증가되는 현상이 발생한다 [16]. 삼각화가 성기게 이루어질수록 인공적인 굽힘 강성은 더욱 더 증가하게 된다.

2.2 좌굴 현상의 특성

얇은 구조를 가지는 구조체는 그것이 강체(예 : 알루미늄 판)이던지 유연체(예 : 직물)이던지 상관없이, 그것의 좌굴 거동은 불안정적인 상태를 가지게 된다. 얇은 구조체의 양단에 압축력이 인가되면, 초기에는 그 형태가 변형되지 않다가, 압축력이 증가하여 특정 값에 도달하게 되면 결국 그 구조체는 중립 평형상태에 이르게 된다. 중립 평형상태에서는 압축력이 아주 작은 크기라도 증가하거나 감소함에 따라 구조체가 전혀 다른 식으로 반응하게 된다. 즉, 압축력이 증가하게 되면 불안정한 좌굴 후 거동을 보이게 되며, 반면에 감소하게 되면 안정적 평형상태로 되돌아가게 된다. 좌굴은 모든 직물이 가지는 현상이기 때문에 그것을 안정적으로 다루는 방법을 사용하지 않는다면, 자연스러운 직물의 움직임은 시뮬레이션하는 것은 매우 어려울 것이다.

좌굴 후 거동의 불안정성은 강-상미분방정식의 수치적 불안정성에 기인한 것이 아니라, 구조체의 물리적 불안정성에 의한 것이다. 따라서 좌굴의 불안정성은 단지 암시적 시적분법을 사용하는 것으로 해결되지 않는다. 몇몇 직물 시뮬레이션 기법들은 [2, 14] 좌굴의 불안정성을 극복하기 위해 감쇠

력(damping force)을¹ 사용한 바 있다. 감쇠력은 물리적 모델의 안정성을 향상시키는 효과가 있고, 특히 준-암시적 시적분법을 사용할 때 얻어지는 강성행렬(stiffness matrix)의 양한정성(positive definiteness)에 영향을 미치며, 시스템 행렬이 안정적인 조건수(condition number)를 갖게 한다. 그러나 감쇠력을 더하는 것은 직물의 움직임의 사실성을 해치는 요소로 작용할 수 있다. 그 예로서, [14]와 [15]에서는 감쇠력을 사용함으로써 직물에 주름이 잘 생성되지 않거나 생성된 주름이 잘 사라지지 않고, 심지어 증력에 의한 낙하조차 비사실적으로 크게 저항 받는 현상을 보고한 바 있다.

직물의 인장 강도가 굽힘 강도에 비해 매우 크므로, 암시적 시적분에 의한 인공 감쇠(artificial damping) 효과는 직물의 평면 변형(in-plane deformation)에 주로 영향을 미치게 된다. 인공 감쇠가 굽힘 변형의 움직임에 부분적으로 영향을 미칠 수 있지만, [14]와 [15]에서 보고된 부자연스러운 현상은 가상 감쇠(fictitious damping)의 사용에 기인한 것으로 추측된다. 본 논문에서 제안하는 방법은 재질적 감쇠 및 인공 감쇠(암시적 시적분을 사용하므로)를 가지고 있다. 그러나 가상 감쇠는 모델링하지 않았으며, 가상 감쇠에 대한 필요는 안정적 좌굴 모델을 사용함으로써 피할 수 있었다. 가상 감쇠가 사용되지 않았기 때문에, 본 논문에서 제안한 방법으로 만들어진 의복 애니메이션은 매우 사실적인 움직임을 시뮬레이션할 수 있었다.

고체의 경우, 좌굴 현상은 파괴를 의미하며 따라서 좌굴 임계 하중의 분석 등 주로 좌굴 전의 역학적 분석이 이루어진다. 직물 연구의 경우조차도 동역학적 시뮬레이션에 적용할 수 있는 좌굴에 대한 의미 있는 연구 결과를 찾을 수 없었다. 본 논문에서는 불안정한 좌굴 후 거동이 그대로 시뮬레이션 되도록 하지 않고, 안정한 상태의 좌굴 후 변형을 예측하여 그 변형에너지를 구하여 내부 힘을 계산하는 안정적 좌굴 모델을 사용함으로써 좌굴의 불안정성 문제를 해결하였다. 강-상미분방정식에 기인한 수치적 불안정성은 암시적 시적분법으로 해결하였으며, 위의 안정적 좌굴 모델과 함께 사용함으로써 가상 감쇠를 도입하지 않고도, 고정된 큰 시간 간격을 사용하여 직물의 운동방정식의 수치적 해를 안정적이고 효율적으로 구할 수 있었다.

2.3 좌굴의 불안정성 해결

앞에서 언급되었듯이 좌굴은 직물의 시뮬레이션에서 심각한 불안정성 문제를 야기한다. 여기에서 흥미로운 사실은 좌굴 현상은 고체 물질과 직물에서 매우 다른 의미를 가진다는 것이다. 고체 물질에서의 좌굴이란 구조체의 파손을 의미하는 반면, 직물에서는 매우 자연스러운 현상이다 [1]. 고체 물질의 좌굴 후 거동은 매우 파괴적이다. 반면에 직물의 경우 좌굴 후 모습은 직물 고유의 자연스러운 주름 형태를 가지게 된다. 이러한 직물 고유의 성질에 대해서는 [1]에서 보다 자세히 설명되어 있다. 이러한 좌굴 현상에 대한 명백한 차이가 있음에도 불구하고 현존하는 대부분의 직물 시뮬레이션 기술들에는 그러한 차이가 잘 반영되어 있지 않다. 우리가 제안하는 방법은 그러한 직물 고유의 좌굴 현상의 특성에 기반을 두어 좌굴의 불안정성을 해소하므로 여기에서 고체와 직물의 좌굴을 보다 명확히 비교하고자 한다.

¹ 감쇠력은 본 논문에서 매우 중요한 의미를 가진다. 암시적 방법은 방법 자체에 내재적인 감쇠력을 가지고 있으며 우리는 그것을 인공 감쇠(artificial damping)라 칭한다. 인공 감쇠는 직물 자체의 특성과 관계가 없다. 반면에, 직물의 재질적 특성상 존재하는 감쇠력을 모델링하기 위해 사용되는 감쇠력을 재질적 감쇠(material intrinsic damping)라 칭한다. 세 번째 종류의 감쇠력은 시뮬레이션의 수치적 안정성을 향상시키기 위해 사용되는 감쇠력이며 우리는 이를 가상 감쇠(fictitious damping)라 칭한다.

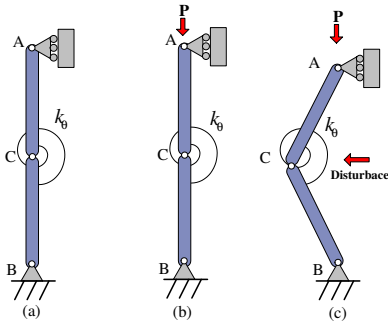


그림 2: 고정 형태 구조체의 좌굴 현상

우선, 고체 역학에서 다루는 좌굴의 개념을 먼저 설명하고, 그 현상을 직물의 좌굴과 비교하여 설명한다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 이상화된 고정 구조체가 있다고 가정한다. 그 기둥은 두개의 보로 구성되어 있으며 C 의 점에서 k_θ 의 강성률을 가지는 회전 스프링으로 연결되어 있다. 이러한 구성에서, 굽힘에 대한 저항력은 점 C 에서만 발생한다. 이 때, 세로축 방향으로 압축력 P 가 점 A 에 인가된다고 가정한다. 회전 스프링이 굽힘에 대해 저항하기 때문에 두개의 보는 일직선을 이루며 평형상태를 유지한다. 이 상태에서, 점 C 에 외부 힘이 가로 방향으로 작용하여 점 C 가 가로 방향으로 조금 움직였다고 가정하면, 세로축 방향의 P 는 점 C 의 가로 방향의 변위를 증가시키려 하고, C 에서의 회전 스프링은 구조체가 원래의 수직모양을 유지하도록 작용할 것이다. 이 때 가로 방향의 외부 힘이 제거되면, 압축력 P 가 상대적으로 작았을 경우, 구조체는 원래의 수직 모양으로 복원될 것이다 (즉, 구조체는 안정하다). 그러나 P 가 상대적으로 크다면, C 의 가로 방향으로의 변위는 점점 커지고 결국 기둥은 측좌굴(lateral buckling)에 의해 파손된다. 세로축 방향으로의 압축력이 조금 더 증가하거나 감소함에 따라 구조체가 안정하거나 불안정한 두 가지 상태로 분기되는 지점의 압축력의 세기를 임계하중이라고 하며 P_{cr} 로 나타낸다. 임계하중에서 구조체의 변형의 크기는 수학적으로 임의의 값을 가질 수 있다. 세로축 방향의 하중이 임계하중보다 커지게 되면 구조체는 붕괴하게 되고 이 때 하중을 줄인다고 하더라도 다시 원래의 형태로 되돌아갈 수 없게 된다.

직물의 경우에도 고체와 마찬가지로 임계 값을 넘어서는 축방향 하중에 대해 좌굴 현상이 일어난다. 직물의 좌굴도 고체의 경우와 비슷하게 불안정한 좌굴 후 거동을 보인다. 그러나 고체와 대조적으로, 좌굴 시에 직물은 파괴되거나 붕괴되는 것이 아니라 불안정한 상태를 즉시 벗어나서 안정한 평형상태에 도달하게 된다. 또한, 좌굴에 의한 직물의 변형은 하중이 제거되었을 때 원래의 모습으로 되돌아가는 성질을 가진다.

위에서 설명했듯이 직물은 좌굴 시에 불안정한 상태를 지나게 된다. 이러한 불안정한 좌굴 후 거동을 시뮬레이션하게 되면 발산을 피하기 위해 특별한 주의가 필요하다. 구조체가 일단 불안정한 좌굴 후 상태가 되면, 하중이 줄어들더라도 변형의 크기는 오히려 증가하게 된다. 즉, 구조체의 좌굴 방향으로의 강성률이 순간적으로 음의 값을 갖게 된다. 특히 직물 내부 힘이 기울기에 의해 명시적으로 예측되는 준 암시적 방법 [2, 14]을 사용하는 경우 이러한 구조적 불안정성은 강성 행렬을 부정행렬(indefinite matrix)이 되게 하고 시스템 행렬의 조건수를 매우 큰 값이 되게 하거나 특이(singular) 행렬이 되게 하며, 큰 시간 간격을 사용하게 될 경우 발산에 이르는 경우가 많다. 직물을 시뮬레이션 할 때 발생하는 이러한 좌굴의 불안정성 문제를 피하기 위해 여러 가지 시도가 있었다. [9]에서는 하중-변형 곡선에 대해 적응 원호 길이 제어(adaptive arc-length control)법을

사용했고, [17]에서는 발산을 피하기 위해 가상 감쇠를 더한 명시적 방법을 사용했다.

본 논문에서는 구조적 불안정성 문제를 측좌굴 모델을 사용함으로써 해결하였다. 여기서 제시하는 측좌굴 모델은 직물 고유 특성이라고 할 수 있는, 직물이 불안정한 좌굴 후 상태를 빠르게 지나서 바로 안정한 평형상태에 도달하거나 불안정한 좌굴 후 상태가 존재하지 않는 것처럼 보인다는 관찰결과에 기반하였다. 측좌굴 모델을 통해 직물의 내부 힘을 구하는 것은, 직물의 좌굴이 발생한 부분에서 좌굴 후 안정한 상태의 변형된 형태를 예측하고, 그 변형 에너지로부터 내부 힘을 계산하는 과정이다. 이 과정에 대해 보다 자세한 것은 3.3 절에서 다루어진다. 위와 같은 측좌굴 가정을 사용하면 불안정한 좌굴 후 거동을 시뮬레이션 할 필요가 없게 되며, 이는 실제 직물의 거동의 특성이 불안정한 좌굴을 보이지 않는다는 관찰결과와 잘 일치한다. 실험 결과에 의하면 제안된 측좌굴 모델을 사용한 결과 안정성이 대폭 향상되었으며 직물의 움직임이 보다 자연스러웠고, 시뮬레이션을 위해 큰 시간간격을 사용할 수 있었다.

제 3 절 직물 모델

3.1 입자 시스템

우리는 기존 모델이 가지는 좌굴에 대한 문제점을 극복하고 측좌굴 가정을 구현하기 위해서는 입자(particles) 시스템을 사용하는 것이 가장 적절하다고 판단하였다. 여기에 제시되는 입자 모델은 직물을 시뮬레이션 하기 위해 최초로 입자 모델을 사용했던 [3]의 접근 방법과 유사하다. 그러나 우리의 모델은 [3]에서 제시된 모델보다 더 단순하며 특히 굽힘과 압축에 대한 모델은 그들과 매우 다르다. 이 절에서는 직물 표면을 질점들의 집합으로 나타내었을 때 질점들의 연결 방식을 설명한다.

우리는 직물을 근사하기 위해 입자들을 사각 메시 형태로 배열한다. 따라서 각 입자는 $P(i, j)$ 와 같이 표현 할 수 있다. (i, j 는 정수 지표) 그림 3(a)는 중앙의 입자에 관해 연결된 모든 입자들을 나타낸다. 몇 개의 연결이 이루어지지 않는 직물 경계 부분을 제외하고 모든 입자들은 그림 3(a)와 같은 연결을 갖는다. 그러한 연결들은 두 가지의 상호작용 모델로 이루어졌으며 각각 인장 모델과 굽힘 모델이라 칭한다.

인장 모델 (그림 3에서 붉은 선)은 인장(tension)과 전단(shear)을 모델 한다. 인장 모델은 입자 $P(i, j)$ 와 연결된 $P(i \pm 1, j), P(i, j \pm 1), P(i \pm 1, j \pm 1)$ 들과의 상호작용을 통해 구성되며, 이와 같이 바로 인접한 입자들과 연결하는 방식을 이하 순차 연결이라 칭한다. 굽힘 모델(그림 3에서 파란 선)은 굽힘(bending)과 압축(compression)을 모델하며 입자 $P(i, j)$ 와 연결된 $P(i \pm 2, j), P(i, j \pm 2), P(i \pm 2, j \pm 2)$ 를 통해 구성된다. 굽힘 모델은 바로 인접한 입자들을 연결하지 않고 하나 건너서 연결되어 있으며 우리는 이를 교차 연결이라 칭한다. 그림 3(b)에서는 평면위의 4개의 연결 방향 중 하나의 방향으로 순차 연결과 교차 연결을 비교하여 도시하였다. 그림에서 $S_1 \sim S_4$ 는 순차연결을 나타내고 $I_1 \sim I_3$ 은 교차 연결을 나타낸다.

3.2 인장 모델

인장 모델은 선형 탄성 모델로 나타내며, 입자 i 와 입자 j 사이의 인장 변형 에너지는 다음과 같이 나타낸다.

$$E = \begin{cases} \frac{1}{2}k_s(|\mathbf{x}_{ij}| - L)^2 & : |\mathbf{x}_{ij}| \geq L \\ 0 & : |\mathbf{x}_{ij}| < L \end{cases} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{x}_{ij} = \mathbf{x}_j - \mathbf{x}_i$ 이며, L 과 k_s 는 각각 자연 상태 길이와 강성률을 나타낸다. 위의 변형 에너지는 압축이 아닌 인장에 대

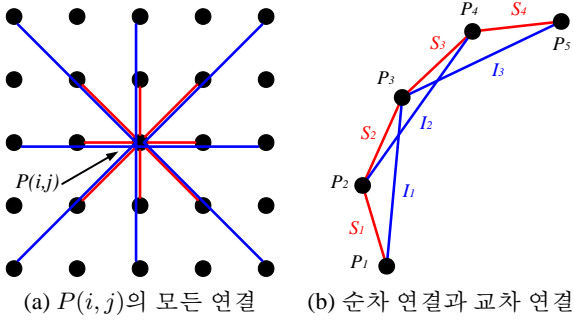


그림 3: 입자들의 상호작용 연결

해서만 적용된다. 두 입자사이의 인장 변형 에너지에 의한 힘은 다음과 같이 계산된다.

$$\mathbf{f}_i = -\frac{\partial E}{\partial \mathbf{x}_i} = \begin{cases} k_s(|\mathbf{x}_{ij}| - L)\frac{\mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}|} & : |\mathbf{x}_{ij}| \geq L \\ 0 & : |\mathbf{x}_{ij}| < L \end{cases} \quad (2)$$

위 힘 벡터의 자코비안 행렬은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_j} = \begin{cases} k_s \frac{\mathbf{x}_{ij} \mathbf{x}_{ij}^T}{|\mathbf{x}_{ij}|} + k_s \left(1 - \frac{L}{|\mathbf{x}_{ij}|}\right) (\mathbf{I} - \frac{\mathbf{x}_{ij} \mathbf{x}_{ij}^T}{|\mathbf{x}_{ij}|^2}) & : |\mathbf{x}_{ij}| \geq L \\ 0 & : |\mathbf{x}_{ij}| < L \end{cases} \quad (3)$$

위 식의 첫째 항으로부터 두 입자의 상호작용 방향으로 강성률이 상수인 것을 알 수 있으며 이는 선형 탄성 모델을 사용했으므로 자명한 결과이다. 두 번째 항으로부터 상호작용 방향의 수직방향으로는 강성률이 $(1 - \frac{L}{|\mathbf{x}_{ij}|})$ 에 비례하는 것을 알 수 있다. 직물의 2차원적 구조를 고려했을 때, 상호작용 방향의 수직 방향은 굽힘이 일어나는 방향이라는 것을 알 수 있다. 두 입자 사이의 거리가 자연 상태보다 늘어났을 때, 암시적 방법을 사용할 경우, 두 번째 항은 시스템 행렬에서 굽힘이 일어나는 방향으로의 양의 고유치(eigenvalue)를 발생시켜 두 입자를 안정화하는 데에 중요한 역할을 한다. 만약 위의 인장 에너지 식이 압축 에너지를 구할 때에도 사용된다면, $k_s(1 - \frac{L}{|\mathbf{x}_{ij}|})$ 가 음의 값이 되고, 그 값이 시간 간격의 크기에 관계없이 $|\mathbf{x}_{ij}|$ 가 0에 근접함에 따라 매우 큰 음의 값을 가질 수 있기 때문에, 두 번째 항은 힘의 자코비안 행렬을 부정 행렬이 되게 하며, 이는 전체 시스템 행렬이 특이 행렬에 가까워지도록 한다. 이러한 이유에 의해 압축에 대해서는 위의 식을 사용하지 않고 다음 절의 굽힘 모델에서 내포되도록 하였다.

[14]에서는 위와 동일한 모델을 인장과 압축에 대해 구분 없이 사용하였으며 준 암시적 방법을 사용하였다. 그러나 그들의 공식에서는 식 3의 두 번째 항이 인장과 압축의 모든 경우에 생략되었다. 그들은 두 입자사이의 수직방향으로 고유치가 0이 되지 않도록 하기 위해 그 방향으로 감쇠력을 더하였다. 두 입자 사이의 거리가 압축되었을 때 감쇠력을 수직방향으로 더하는 것은 시스템 행렬이 보다 나은 조건수를 가지도록(1에 보다 더 근접하도록) 할 수 있으나, 감쇠력이 필요이상으로 직물의 움직임에 저항하는 결과를 낳을 수 있다.

[2]에서도 압축과 인장에 대해 선형탄성모델을 사용하였다. 그들이 정의하는 거동 함수(behavior function)를 $\mathbf{c} = |\mathbf{x}_{ij}| - L$ 와 같이 정의하면 위에서의 식과 동일한 결과를 가져오는 것을 알 수 있다. 따라서 압축의 경우에, 위와 마찬가지로 압축 방향의 수직방향으로 음의 고유치가 발생한다. [2]에서는 강성 행렬이 부정 행렬이 됨으로 인해 시스템 행렬이 특이행렬이 되는 것을 막기 위해 그들이 고안한 감쇠력을 포함시켰다. 그들이 고안한

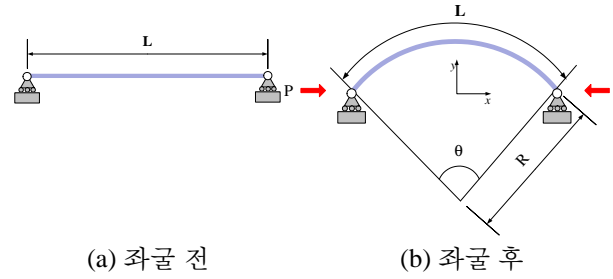


그림 4: 굽힘 모델에 사용되는 보 구조체

감쇠력은 거동 함수의 시간적 변화율에 대한 함수이며 굽힘에 대한 거동함수의 감쇠력은 좌굴에 의한 음의 고유치를 다시 양의 값으로 갖도록 할 수 있으므로 시스템 행렬은 수치적으로 안정적인 조건수를 가질 수 있게 된다. 그러나 그러한 감쇠력을 더하는 것은 강성행렬이 항상 양한정행렬이 될 수 있도록 보장할 수 없다.

본 논문에서 제안하는 모델에서는 인장에 대해서만 강한 강성률을 가지는 선형 탄성모델이 사용된다. 따라서 강성 행렬은 항상 양한정행렬이고 시스템 행렬은 특이행렬이 될 수 없으며, 그러한 성질은 감쇠력을 따로 모델링하지 않더라도 보장된다. 다음 절에서 설명하듯이, 압축과 굽힘에 대한 저항력은 동시에 처리되며 따라서 좌굴 문제는 하나의 단일한 상호작용 모델에서 처리된다.

3.3 굽힘 모델

굽힘 모델은 압축력과 굽힘에 의해 일어나는 좌굴 반응을 모델링한다. 첫 번째 과정은 압축력의 발생시에 안정한 좌굴 후 변형을 미리 예측하고 그 변형 에너지를 구하는 것이다.

그림 4(a)의 보(beam) 구조체는 두 입자사이의 영역을 근사한 것이다. 좌굴 전의 구조체는 L 길이의 직선 형태이다.

압축력에 의해 구조체에 좌굴이 발생한 후 구조체는 결국 안정한 평형 상태에 이르게 된다. 그 평형 상태에서의 변형 정도를 예측하기 위해 모멘트 평형 상태 방정식 등을 이용할 수 있으나, 경계조건을 미리 알 수 없으므로 모멘트 평형 상태를 정확히 예측할 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 좌굴 후 변형을 그림 4(b)와 같이 상수 길이를 갖는 원호로 근사하였다.²

굽힘 변형 에너지는 다음과 같은 관계식으로부터 구한다.

$$E = \frac{1}{2} \int_0^L \mathbf{M} \kappa dx \quad (4)$$

위의 식에서 M 은 굽힘 모멘트이며 κ 는 곡률을 나타낸다. 곡률과 굽힘 모멘트 사이에 선형 관계를 가정하고, 구조체 전체에 걸쳐 일정한 곡률을 가진다고 하면(원호로 근사하였으므로), 위의 식은 다음과 같이 단순화 된다.

$$E = \frac{1}{2} k_b L \kappa^2, \quad (5)$$

위의 식에서 k_b 는 굽힘 강성률을 나타낸다. 구조체는 완전 비압축성을 가진다고 가정했으며 따라서 원호의 길이는 초기의 직

²핀 경계조건(pinned end condition) 등을 사용한 모멘트 평형 상태 방정식의 해를 사용하여 근사하였을 때와 단순한 원호로 근사하였을 때의 결과는 크게 다르지 않았다. 따라서 경계조건을 예측 할 수 없는 상황에서 모멘트 평형 상태 방정식의 해를 사용하는 것이 원호로 근사하는 것 보다 더 타당하다고 할 수 없다.

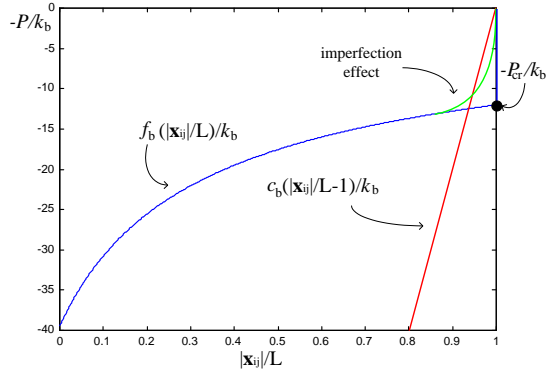


그림 5: 압축력 P 와 입자사이 거리 $|\mathbf{x}_{ij}|$ 의 관계 곡선

선 길이와 같다. 그러므로 곡률 κ 는 두 양단사이의 거리 $|\mathbf{x}_{ij}|$ 만의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\kappa = \frac{2}{L} \text{sinc}^{-1}\left(\frac{|\mathbf{x}_{ij}|}{L}\right), \quad (6)$$

위의 식에서 $\text{sinc}(x) = \frac{\sin x}{x}$ 이다.

힘 벡터는 다음과 같이 유도된다.

$$\mathbf{f}_i = k_b \kappa L \frac{d\kappa}{d|\mathbf{x}_{ij}|} \frac{\mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}|} = k_b \kappa L \left(\frac{d|\mathbf{x}_{ij}|}{d\kappa}\right)^{-1} \frac{\mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}|} \quad (7)$$

$$= k_b \kappa^2 \left(\cos \frac{\kappa L}{2} - \text{sinc}\left(\frac{\kappa L}{2}\right)\right)^{-1} \frac{\mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}|} \quad (8)$$

$$\equiv f_b(|\mathbf{x}_{ij}|) \frac{\mathbf{x}_{ij}}{|\mathbf{x}_{ij}|} \quad (9)$$

그림 5에서 파란색 곡선은 f_b 와 두 입자사이의 거리의 관계식을 나타낸다. 압축력 P 가 증가되기 시작할 때(그림 5의 오른쪽 위) 구조체는 하중이 좌굴 하중인 P_{cr} 에 이르기까지 직선 형태를 안정적으로 유지한다. 그러나 실제 구조체는 기하학적 불안정성을 가지고 있기 때문에 하중이 증가되기 시작할 때부터 좌굴이 시작되며 실제 반응 곡선은 그림의 녹색 곡선과 같이 된다. 즉, 압축력이 매우 작더라도 구조체에 유한한 크기의 변형이 발생하고 힘이 증가할수록 이론적으로 구한 f_b 에 근접하게 된다 [10]. 이러한 특성을 모델링하기 위해 아래와 같이 f_b 대신에 f_b^* 를 실제 구현에 사용하였다.

$$f_b^* = \begin{cases} c_b(|\mathbf{x}_{ij}| - L) & : f_b < c_b(|\mathbf{x}_{ij}| - L) \\ f_b & : \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

위의 식에서 c_b 는 선택가능한 상수이며 대개 인장 강성률인 k_s 와 비슷한 값을 취하게 된다. 압축력이 작은 경우의 반응 곡선을 근사하기 위해 높은 계수를 가지는 함수를 사용할 수도 있으나 실험 결과 선형 함수(그림 5의 적색 곡선)로 근사하였을 때와 큰 차이를 보이지 않았다.

힘 벡터의 자코비안 행렬은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{x}_j} = \frac{df_b^*}{d|\mathbf{x}_{ij}|} \frac{\mathbf{x}_{ij} \mathbf{x}_{ij}^T}{|\mathbf{x}_{ij}|} + \frac{f_b^*}{|\mathbf{x}_{ij}|} \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{x}_{ij} \mathbf{x}_{ij}^T}{|\mathbf{x}_{ij}|^2}\right). \quad (11)$$

위의 식에서 $\frac{df_b^*}{d|\mathbf{x}_{ij}|}$ 은 항상 양수이나 $\frac{f_b^*}{|\mathbf{x}_{ij}|}$ 은 항상 음수이다. 따라서 두 번째 항은 강성행렬은 부정행렬이 되게 할 수 있다. 강성행렬이 양한정행렬이 되게 하기 위해 두 번째 항은 소거하였으며 따라서 두 입자의 상호작용 방향에 수직인 방향으로의 압

시적 필터링 효과에 영향을 받지 않는다. 즉, 준 암시적 방법에서는 비선형 함수(여기서는 힘 함수)의 미래 시간 간격에서의 값을 선형 근사를 통해 예측하게 되는데, 수직 방향으로의 값은 현재 시간 간격에서의 값으로 근사하는 것과 같다. 이러한 방법은 두 개의 입자들을 국소적으로 볼 때에, 수직 방향으로의 명시적 방법을, 평행 방향으로의 준 암시적 방법을 사용하는 것과 같다. 수직 방향으로의 힘이 암시적 필터링 효과에 영향을 받지 않더라도 수치적 불안정성이 발생할 가능성은 매우 작다. 그 이유는 이 방향으로의 힘 성분의 크기가 인장 저항력에 비해 매우 작고 항상 유한하며, 실용적으로 사용되는 시간 간격 크기가 그 힘을 명시적 방법으로도 안정적으로 적분할 수 있는 시간 간격의 크기보다 대개 매우 작기 때문이다.

위의 모델을 통해 그림 3(b)에서 도시한 굽힘 모델을 위한 교차 연결의 필요성이 설명될 수 있다. 만약 굽힘 모델을 순차 연결만을 통해 구현한다면, 굽힘 변형의 입자간 연속성을 모델링할 수 없다. 즉, 모든 입자들 사이의 거리가 초기의 자연 거리로 유지된다면, 직물 전체의 모습은 변형 에너지의 증가 없이 굽힘 변형이 일어날 수 있게 되는 모순을 가지게 된다. 교차 연결은 각각의 굽힘 모델 구조체 사이에서의 곡률의 연속성을 근사적으로 구현하도록 한다.

3.4 감쇠력과 공기저항력

앞에서 설명한 직물 모델(인장, 굽힘 모델)은 감쇠력을 더하지 않더라도 매우 안정하며 수치적 해를 구하는데 있어서 발산문제를 발생시키지 않는다. 그러나 실제 직물에 존재하는 재질적 감쇠력을 고려해야 할 필요가 있다. 재질적 감쇠력을 적절히 모델링하지 않는다면 직물의 평면 운동은 비사실적인 진동을 보일 수 있다. 이러한 현상을 막기 위해 인장 방향으로 속도에 비례하는 감쇠력을 더하였다.

입자 i 와 입자 j 사이의 감쇠력은 다음과 같다.

$$\mathbf{f}_i = -k_d(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) \quad (12)$$

감쇠력의 자코비안 행렬은

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{v}_j} = k_d \mathbf{I} \quad (13)$$

과 같다. 식 12에서의 감쇠력은 입자간 수직방향으로는 감쇠력을 더하지 않는다. 이 사실은 대부분의 직물 변형이 입자간 수직방향으로의 변형, 즉 굽힘 변형이기 때문에 매우 중요하다. 또한 직물이 강체운동을 할 경우, 준 암시적 방법에서는 위의 감쇠력은 암시적 필터링 효과를 발생시키지 않는다. 특히 직물이 지면과 평행하게 자유낙하할 경우에도 위의 감쇠력에 의해 속도의 감쇠효과는 나타나지 않는다. 보다 일반적인 상황에서 수직방향으로의 감쇠력은 매우 작으며 이것은 직물의 움직임이 보다 사실적으로 묘사되도록 한다.

공기 저항력은 다음과 같이 모델링하였다.

$$\mathbf{f}_i = -K_a A_N |\mathbf{v}_i|^2 \frac{\mathbf{v}_i}{|\mathbf{v}_i|} \quad (14)$$

위의 식에서 A_N 은 입자 i 가 포함된 모든 삼각형의 넓이를 입자 i 의 속도 방향으로 정사영 시킨 후 합한 값이다. 이 벡터의 자코비안 행렬은

$$\frac{\partial \mathbf{f}_i}{\partial \mathbf{v}_i} = K_a A_N |\mathbf{v}_i| \left(\mathbf{I} - \frac{\mathbf{v}_i \mathbf{v}_i^T}{|\mathbf{v}_i|^2}\right) \quad (15)$$

과 같다. 공기 저항력은 인장 방향의 감쇠력과 마찬가지로 직물의 재질적 성질을 반영하기 위한 것이며 안정성 문제를 해결하기 위한 것이 아니다. 공기 저항력은 특히 가벼운 직물을 시뮬레이션 할 때 사실성을 증가시킬 수 있다.

제 4 절 상미분방정식의 수치적 해

상미분방정식의 수치적 해를 구하기 위해 본 논문에서는 2계 역차분 공식을 사용한 준 암시적 방법을 사용하였다. k -계의 역차분 공식은 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{d}{dt} = \frac{1}{\Delta t} \sum_{q=1}^k \frac{1}{q} (\Delta^{-1})^q \quad (16)$$

위의 식에서,

$$\Delta^{-1} \mathbf{x} = \mathbf{x}^{n+1} - \mathbf{x}^n.$$

$k = 2$ 인 경우, $\dot{\mathbf{x}}$ 의 이산식은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{3}{2} \mathbf{x}^{n+1} - 2\mathbf{x}^n + \frac{1}{2} \mathbf{x}^{n-1} \right). \quad (17)$$

위의 2계 역차분 공식은 1계 역차분 공식과 동등하게 안정적이면서 인공 감쇠효과는 더 적기 때문에, 안정성과 정확도를 고려하여 선택되었다.

직물의 운동상태방정식은,

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}} \\ \dot{\mathbf{v}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f} \end{pmatrix} \quad (18)$$

과 같이 표현되며, 이를 2계 역차분 공식을 이용해 이산화하면,

$$\frac{1}{\Delta t} \begin{pmatrix} \frac{3}{2} \mathbf{x}^{n+1} - 2\mathbf{x}^n + \frac{1}{2} \mathbf{x}^{n-1} \\ \frac{3}{2} \mathbf{v}^{n+1} - 2\mathbf{v}^n + \frac{1}{2} \mathbf{v}^{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}^{n+1} \\ \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}^{n+1} \end{pmatrix}. \quad (19)$$

과 같이 표현된다. 위의 식에서 비선형 항인 \mathbf{f}^{n+1} 는 다음과 같이 치환된다.

$$\mathbf{f}^{n+1} = \mathbf{f}^n + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{x}^{n+1} - \mathbf{x}^n) + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}} (\mathbf{v}^{n+1} - \mathbf{v}^n). \quad (20)$$

식 20를 식 19에 대입하면, 선형시스템이 얻어지며 $\Delta^{-1} \mathbf{x}$ 혹은 $\Delta^{-1} \mathbf{v}$ 에 대해 정리될 수 있다. $\Delta^{-1} \mathbf{x}$ 에 대해 정리하면, 선형시스템은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} & (\mathbf{I} - \Delta t \frac{2}{3} \mathbf{M}^{-1} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}} - \Delta t^2 \frac{4}{9} \mathbf{M}^{-1} \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}^2}) (\mathbf{x}^{n+1} - \mathbf{x}^n) \\ & = \frac{1}{3} (\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1}) + \frac{\Delta t}{9} (8\mathbf{v}^n - 2\mathbf{v}^{n-1}) \\ & + \frac{4\Delta t^2}{9} \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{f}^n - \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}} \mathbf{v}^n) - \frac{2\Delta t}{9} \mathbf{M}^{-1} \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}} (\mathbf{x}^n - \mathbf{x}^{n-1}). \end{aligned} \quad (21)$$

식 21의 시스템 행렬은 희소(sparse) 행렬이며 일반적으로 대역(band)을 형성하지 않는다. 위의 선형방정식은 선처리 켈레경사도법(preconditioned conjugate gradient)을 이용하여 해를 구했으며, 선처리기(preconditioner)로서 3×3 의 블록 대각(block diagonal)행렬을 사용하였다. 블록 대각행렬의 사용은 단순 대각행렬에 비해 대략 20 퍼센트의 성능향상을 보였으며, IC(incomplete Cholesky)와 ILU등의 선처리 방법을 사용했을 경우에는 반복횟수를 줄일 수 있었으나 전체적인 성능 향상을 나타내지는 않았다.

제 5 절 충돌 처리

충돌 처리는 크게 옷과 인체 사이의 충돌과 옷 자체의 충돌 처리로 나눌 수 있다. 옷과 인체사이의 충돌 여부는 매 시간 간격마다 옷의 입자가 인체 표면의 안쪽에 위치하는지의 여부로 판단할 수 있다. 이러한 충돌 검사 방법은 옷이나 인체가 매우 빠

르게 움직이는 경우에는 충돌을 검출하지 못하는 경우가 있기 때문에, 그러한 문제를 해결하기위해서 동적인 충돌 검사 방법을 추가하였다. 이는 시간 간격동안의 옷의 입자와 인체 표면을 이루는 점의 움직임을 선형으로 가정하고 시간에 따라 움직이는 점과 삼각형(vertex-triangle), 변과 변(edge-edge) 사이의 충돌을 검사하는 것으로 가능하다. 본 논문에서는, 매 시간 간격사이에 각각의 옷의 입자와 인체 표면의 삼각형의 충돌만을 검사하는 방법만을 사용하였으며 변과 변, 옷의 삼각형과 인체 표면의 점과의 충돌 검사는 생략하였다. 시간에 따라 각 점의 위치가 직선으로 움직이는 삼각형 $x_1x_2x_3$ 와 점 x_4 사이의 충돌 여부를 가리기 위해 먼저 네 점이 한 평면을 이루는 순간이 있는지의 여부를 검사한다. 그러한 조건은 다음과 같이 3차 다항식의 해를 찾는 것으로 귀결된다 [12, 7, 4].

$$(x_{21} + tv_{21}) \times (x_{31} + tv_{31}) \cdot (x_{41} + tv_{41}) = 0, \quad (22)$$

위의 식에서 v 는 속도를 의미하고 t 는 시간을 나타낸다. 만약 위의 방정식의 가장 작은 해 $t_{smallest}$ 가 해당 시간 간격 사이의 값이라면, 충돌 순간 x_4 가 삼각형 $x_1x_2x_3$ 내부에 위치하는지를 검사하여 실제 충돌 여부를 가릴 수 있으며 다음과 같이 x_4 를 삼각형위로 정사영하여 중심좌표계(barycentric coordinate)를 구하는 것으로 귀결된다.

$$\begin{bmatrix} x_{13}^T x_{13} & x_{13}^T x_{23} \\ x_{13}^T x_{23} & x_{23}^T x_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{13}^T x_{43} \\ x_{23}^T x_{43} \end{bmatrix} \quad (23)$$

위에서 구한 해로부터 삼각형 내부라는 것이 판명되면 최종적으로 충돌이 보고된다.

앞서 설명한 정적인 충돌 검사 방법(인체 표면 내부 존재 여부 검사)과 위에 설명한 동적인 충돌 검사 방법은 동시에 사용되며 서로 보완적인 관계를 가진다. 즉, 전자는 빠른 속도로 움직이는 충돌을 검사할 수 없고, 후자는 간혹 수치적 오차를 가지는 결과를 보이기 때문에 동시에 사용하여 각 방법의 단점을 보완한다. 충돌을 보고할 때 있어서는 후자의 방법으로 검출된 충돌이 보다 높은 우선순위를 갖도록 구현하였다.

옷과 인체사이의 충돌이 검출되면, 옷의 입자의 다음 시간 간격에서의 속도는 충돌한 인체 표면의 법선 방향의 속도와 부합되도록 제약하였다. 그러한 제약조건은 [2]에서 제안된 변형된 켈레경사도법을 사용하여 충족시켰다. 충돌한 인체 표면의 접선방향으로는 마찰력이 추가되었으며 그 크기는 법선방향으로의 제약힘(constraint force)의 크기와 접선방향으로의 옷과 인체의 속도 차이에 비례하도록 하였다. 제약힘은 [2]에서와 마찬가지로 선형시스템방정식의 잉여 값으로부터 구하였다.

옷 자체에서 일어나는 충돌을 검사하기 위해서는 단순히 입자와 입자 사이의 거리를 검사함으로써 수행하였다. 두 입자의 거리가 주어진 한계치보다 가까울 경우 척력을 더하여 두 입자가 멀어지도록 했다. 이 척력의 자코비안 행렬은 밀어내는 방향의 수직인 방향으로 0의 고유치를 갖도록 하여 시스템 행렬이 안정하도록 했다. 이와 같은 척력에 기반을 둔 옷 자체 충돌 처리 방법은 복잡한 애니메이션을 생성할 때 오차가 발생하는 경우가 종종 있으며 이러한 문제를 해결하는 것이 앞으로의 과제로 남아 있다.

충돌 검사 비교 횟수를 줄이기 위해 [18]에서 제안한 방법과 같이 일정간격 공간 분할법(uniform spatial subdivision)을 사용하였다. 시간 간격사이에 각각의 옷과 인체 표면의 삼각형이 쓸고 지나간 공간(swept volume)의 바운딩볼륨을 구하고, 그 위치가 가리키는 단위 공간의 정수 지표를 구하여 3차원 행렬에 저장하였다. 일반적으로 옷의 충돌검사를 위해서는 공간은 세밀하게 분할해야 하기 때문에 (예를 들면, $30 \times 30 \times 30 = 27000$ 개의 단위 공간으로 분할), 해시 테이블(hash table)을 사용하여 메모리의 요구량을 줄이도록 했다. 해시 테이블에서 충돌이 일어날 경우에만 충돌 검사의 대상으로 한정하는 방법으로 비교 횟수를 줄일 수 있었다.

제 6 절 실험 결과

우리는 본 논문에서 제안된 방법을 사용하여 여러 가지의 의복 애니메이션을 생성해 보았다. 이 절에서 다루어지는 의복 애니메이션 결과는 <http://graphics.snu.ac.kr/~kjchoi/cloth.htm> 에서 동영상으로 볼 수 있다.

표 1은 우리의 알고리즘을 펜티엄3-550 탑재 PC에서 실행하였을 때의 성능을 나타낸다. 표에서 CPU 초/프레임 항목은 충돌 처리, 선형시스템 계산, 컬레경사도법 등 옷을 시물레이션 하기 위해 CPU가 사용된 시간을 나타낸다. 모든 시물레이션에서 충돌 검사에 사용된 시간은 전체 CPU 시간의 20% 이하를 차지했다. 옷을 근사하기 위해 사용된 메시는 대략 입자간 거리가 $L = 1 \sim 2cm$ 였다. 인체 동작과 관련된 시물레이션에서는 (애니메이션 1~4) 시간 간격은 $\Delta t = 1/90$ 초로 고정되었으며 따라서 시물레이터는 세 번의 계산을 통해 30Hz 애니메이션의 한 프레임의 얻게 된다. 1/90초 이상의 시간 간격을 사용했을 경우, 불안정성 문제가 발생하기 전에 충돌 처리의 오류가 발생하였다. (옷 자체의 충돌 검사의 오류)

애니메이션 1(a)에서 캐릭터는 가벼운 재질의 원피스를 착용하고 있다. 직물의 재질은 작은 굽힘 강성율과 작은 재질적 감쇠력을 사용함으로써 실크와 같은 재질을 모델링하도록 조절되었다. 캐릭터는 급격한 동작의 변화 없이 보통의 속도 걷는 동작을 취하고 있으나, 옷의 움직임은 이에 매우 민감하게 반응하여 주름이 섬세하게 생성되고 사라지는 것이 뚜렷이 관찰된다. 그러나 우리는 애니메이션 1(a)에서의 옷이 실제 직물의 재질보다 과도하게 민감한 반응을 보인다고 판단하였다. 보다 사실적인 직물의 표현을 위해 굽힘 강성율과 재질적 감쇠력을 증가시키고 마찰력을 줄여 애니메이션 1(b)를 얻었다. 애니메이션 2와 3은 보다 활동적인 캐릭터 동작을 사용했으며 이를 통해 역동적인 옷의 움직임을 얻을 수 있었다. 애니메이션 4에서는 캐릭터가 청바지를 입고 있으며 직물의 재질은 강한 굽힘 강성률을 사용하여 모델링하였다. 캐릭터의 무릎과 발목 부분에서 바지의 좌굴된 모습은 실제 바지에서 관찰되는 좌굴 형태와 유사한 모습을 보였다. 각 애니메이션(1~4)에서 5개씩의 이미지를 취해 그림 7에 도시하였다.

애니메이션 5는 우리가 제안한 방법이 허용하는 최대 시간 간격을 실험하기 위해 생성하였다. 그러한 실험을 위해 정사각형의 직물을 그 크기보다 작은 상자위에 덮는 시물레이션을 수행하였다. 큰 시간 간격에서 충돌 처리 오류 문제를 피하기 위해 상자와의 충돌을 직접 검사하지 않고, 상자에 접촉하게 되는 입자들의 움직임을 직접 제약하고, 옷 자체의 충돌 처리를 생략한 채 시물레이션을 수행하였다. 위와 같은 조건에서 시물레이션은 시간 간격이 100초에 이를 때 까지 안정성을 유지하는 것으로 확인 되었다. 그러나 100초의 시간 간격을 사용한 결과는 직물이 최종 평형 상태에 도달할 때까지 매우 심한 변동을 보였으며 사실적이라고 생각되는 한계는 0.2초의 시간 간격을 사용한 결과였다. (그림 6)

직물의 움직임을 역학적으로 정당화하는 기존의 어떠한 확립된 방법도 없지만, 실험 결과 얻어진 애니메이션은 시각적으로 충분히 사실적이었다. 또한 그러한 애니메이션을 얻기 위해 매우 적은 계산 시간이 요구되었다.

제 7 절 결론

[2]에서 제시한 암시적 방법은 직물을 시물레이션함에 있어 많은 안정성 향상을 가져오게 하였으며 따라서 의복 애니메이션이 사실적 캐릭터 애니메이션에 있어서 실용적인 수단이 되도록 하는 데에 크게 기여하였다. 그러나 또 다른 불안정성의 원인이며 직물의 중요한 성질인 좌굴 현상은 현재까지 대부분 무

표 1: 시물레이션 성능 (펜티엄3-550에서 수행 결과)

번호	직물의 입자개수	인체의 삼각형개수	CPU 초/프레임	시간간격 (초)
1(a)	5608	13802	6.13	0.011
1(b)	5579	13802	5.86	0.011
2	5579	15308	5.68	0.011
3 상의 치마	3396	15308	2.98	0.011
	3456	15308	3.01	0.011
4 상의 바지	3294	14324	3.25	0.011
	6624	14324	7.01	0.011
5	2601	0	0.18	0.2

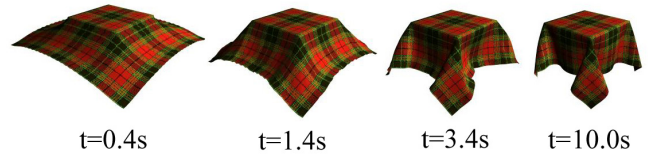


그림 6: 애니메이션 5 : 안정성 실험 ($\Delta t = 0.2$ 초)

시되어왔다. 좌굴현상을 적절히 처리하지 않는다면 자연스러운 의복 애니메이션을 얻는 것은 매우 많은 계산 비용을 요구하게 될 것이다.

본 논문은 감쇠력을 사용하지 않고도 좌굴 문제를 안정적이며 실용적으로 해결하는 방법을 처음으로 제시하였으며, 제안된 방법을 통해 고정된 큰 시간 간격을 사용하여 다양한 종류의 의복의 재질을 사실적으로 시물레이션 할 수 있었다. 특히, 새로운 방법의 장점은 민감한 움직임을 보이는 가볍고 얇은 직물을 시물레이션 할 때 잘 나타나며, 기존의 방법으로는 그러한 애니메이션을 시물레이션 하는 것이 매우 어려웠다.

제안된 방법은 안정성을 대폭 향상시켰으며, 실험 결과 기존의 방법으로는 불가능했던 0.2초의 시간 간격을 사용하는 것도 가능했다.

참고 문헌

- [1] J. Amirbayat and J.W.S. Hearle. The anatomy of buckling of textile fabrics : Drape and conformability. *Journal of Textile Institute*, 80(1):51-70, 1989.
- [2] David Baraff and Andrew Witkin. Large steps in cloth simulation. In *Proceedings of SIGGRAPH 98*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 43-54. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, 1998.
- [3] David E. Breen, Donald H. House, and Michael J. Wozny. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. In *Proceedings of SIGGRAPH 94*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 365-372. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, July 1994.
- [4] Robert Bridson, Ronald P. Fedkiw, and John Anderson. Robust treatment of collisions, contact, and friction for cloth animation. In *SIGGRAPH 2002 Conference Proceedings*, Annual Conference Series, pages 594-603. ACM Press/ACM SIGGRAPH, 2002.

- [5] Michel Carignan, Ying Yang, Nadia Magnenat-Thalmann, and Daniel Thalmann. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. In *Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 92)*, pages 99–104. ACM, July 1992.
- [6] Mathieu Desbrun, Peter Schröder, and Alan Barr. Interactive animation of structured deformable objects. In *Graphics Interface*, pages 1–8, 1999.
- [7] I. Doghri, A. Muller, and R. L. Taylor. A general three-dimensional contact procedure for finite element codes. *Engineering Computations*, 15(2):233–259, 1998.
- [8] Bernhard Eberhardt, Andreas Weber, and Wolfgang Strasser. A fast, flexible, particle-system model for cloth draping. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(5):52–59, September 1996.
- [9] Jeffrey W. Eischen, Shigan Deng, and Timothy G. Clapp. Finite-element modeling and control of flexible fabric parts. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(5):71–80, September 1996.
- [10] James M. Gere. *Mechanics of Materials*. Brooks/Cole, 2001.
- [11] Xavier Provot. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. In *Graphics Interface '95*, pages 147–154, May 1995.
- [12] Xavier Provot. Collision and self-collision handling in cloth model dedicated to design garments. In *Graphics Interface '97*, pages 147–154, 1997.
- [13] Demetri Terzopoulos and Kurt Fleischer. Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture. In *Computer Graphics (Proceedings of ACM SIGGRAPH 88)*, pages 269–278. ACM, August 1988.
- [14] P. Volino and N. Magnenat-Thalmann. Implementing fast cloth simulation with collision response. In *Proceedings of the Conference on Computer Graphics International (CGI-00)*, pages 257–268, June 19–24 2000.
- [15] P. Volino and N. Magnenat-Thalmann. Comparing efficiency of integration methods for cloth animation. In *Proceedings of the Conference on Computer Graphics International (CGI-01)*, July 2001.
- [16] Pascal Volino, Martin Courshesnes, and Nadia Magnenat Thalmann. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. In *Proceedings of SIGGRAPH 95*, Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, pages 137–144. ACM, ACM Press / ACM SIGGRAPH, August 1995.
- [17] W.R. Yu, T.J. Kang, and K. Chung. Drape simulation of woven fabrics by using explicit dynamic analysis. *Journal of Textile Institute*, 91 Part 1(2):285–301, 2000.
- [18] D. Zhang and M. Yuen. Collision detection for clothed human animation. In *Proceedings of the 8th Pacific Graphics Conference on Computer Graphics and Application (PACIFIC GRAPHICS-00)*, pages 328–337, October 3–5 2000.



그림 7: 애니메이션 1~4. 각 행이 하나의 애니메이션에 해당하며 사용된 직물들은 각각 다른 성질을 가진다.