

# 실시간 환경에서의 사실적 종이 시물레이션

강영민(동명대학교), 조환규(부산대학교)

## 차 례

1. 서론
2. 문제와 이전 연구
3. 안정적 시물레이션
4. 적응적 메쉬와 손상보존
5. 실험결과
6. 결론

## 1. 서론

옷감과 같이 변형되는 객체를 시물레이션하는 문제는 컴퓨터 그래픽스에서 활발히 다루어졌던 분야이다. 이와 유사한 객체로 종이와 같은 객체가 있다. 종이는 일상생활에서 매우 자주 만나게 되는 객체이지만 실시간 혹은 상호작용적 VR 환경에서 시물레이션하기 위한 노력이 많지 않았다.

컴퓨터 그래픽스 분야에서 종이 시물레이션이 이렇게 많이 연구되지 않은 이유는 종이가 옷감과 같은 종류의 문제로 파악되었기 때문일 수 있다. 또한 종이를 옷감과 같이 다루었을 때에는 매우 경직도(stiffness)가 높은 모델이 되기 때문에 시물레이션이 용이하지 않다는 이유로 많이 다루어지지 않았을 수도 있다.

본 논문은 종이를 잘 알려진 질량-스프링 모델로 다루었을 때에 나타날 수 있는 문제점을 살펴보고 이를 해결할 수 있는 방법들을 제안한다. 본 논문에서는 경직도가 매우 높은 종이 모델을 안정적으로 시물레이션 하는 방법과 함께, 손상이 보존되는 종이의 특성을 표현할 수 있는 새로운 스프링 모델을 제안한다.

보통의 종이 모델을 질량-스프링 모델로 표현할 경우 극단적으로 높은 경직도를 가져야만 한다. 이러한 경직도는 수치적 불안정성을 일으키게 된다. 이러한 수치 불안정성 문제는 실시간 옷감 애니메이션을 어렵게 하는 이유였으며 컴퓨터 그래픽스 분야에서 충분히 다루어졌던 문제이다[1,4,7,8,9]. 그런데 종이는 그 특성상 옷감에 비해 훨씬 더 높은 경직도를 가진 객체이다. 더구나 옷감과 달리 종이는 구겨져서 원래의 상태로 돌아오지 않는 주름과 같은 것에 의해 손상이 보존되는 성질을 가지고 있다. 다시 말하자면 종이는 일정한 크기

이상의 강한 힘에 의해 접히거나 뒤틀리면 원래의 형상을 회복하지 못하고 구겨진 주름을 지속적으로 가지게 된다. 이 논문에서는 간단하면서도 직관적인 방법을 통해 손상을 보존하는 경직도 높은 질량-스프링 모델을 제안한다. 이러한 모델을 이용하여 가상현실이나 게임과 같은 상호작용적 환경에서 사실적인 종이 시물레이션이 가능하게 하는 것이 이 논문에서 소개되는 기술의 목적이다.

제안되는 기법은 근사 암시적 기법을 통해 경직도가 높은 질량-스프링 모델을 안정적으로 시물레이션 할 수 있게 하며, 부러지는 스프링 모델(breakable spring model)을 통해 종이 표면에 생성되는 구김을 표현할 수 있도록 한다.

## 2. 문제와 이전 연구

종이 객체의 움직임을 표현하기 위해서는 다양한 방법을 사용할 수 있지만 가장 단순한 방법은 질량-스프링 모델을 적용하는 것이다. 질량-스프링 모델은 가장 직관적이면서도 단순한 방법으로 변형 가능한 객체를 표현할 수 있다. 컴퓨터 그래픽스 분야에서는 부드러운 객체의 움직임을 생성하는 문제를 지난 20 여년 동안 집중적으로 다루어 왔다. 옷감의 움직임을 표현하기 위해서는 질점(mass-point)들을 높은 경직도의 스프링을 이용하여 연결하여야 하는데, 이때 이 높은 경직도에 의해 발생하는 수치적 불안정성을 해소하고 안정적인 시물레이션을 수행하는 방법이 여러 연구자들에 의해 활발히 연구되었다. 이러한 노력에 의해 현재 옷감 애니메이션은 사실상 해결된 문제로 간주된다.

옷감 애니메이션이 사실상 해결된 문제로 간주되지만 질량-스프링 모델을 이용하여 종이를 시물레이션하는 것은 몇 가

지 문제를 일으키게 된다. 앞에서 언급한 바와 같이 질량-스프링 모델을 이용하여 종이를 표현할 경우 극단적으로 높은 경직도를 가지게 된다. 높은 경직도는 시뮬레이션 시스템이 안정적으로 동작하는 것을 방해하게 된다. 변형 가능한 물체의 애니메이션을 생성하기 위한 초기의 노력들은 물리적 기법보다는 기하적 기법을 사용하였는데, 이는 당시의 계산 환경이 물리적 기법을 사용하기에는 너무 제한적이었기 때문이다. 물리적 기법은 터조풀로스(Terzopoulous)의 변형가능한 표면 모델을 시작으로 다양한 연구자들에게 의해 최근까지 연구되었다[11]. 천과 같이 부드럽지만 잘 늘어나지 않는 객체를 물리적 기법으로 시뮬레이션 하는 것은 수치적 불안정성 때문에 쉽지 않다. 이러한 수치적 불안정성 문제를 해결하기 위해 사용되는 것이 암시적 적분법이다[1]. 암시적 적분법은 경직도에 의해 야기되는 수치적 불안정성 문제를 해결할 수 있다. 따라서 합리적인 수준의 시간 간격을 이용하여 안정적인 시뮬레이션을 수행하는 것이 필수적으로 요구되는 실시간 혹은 상호작용적 환경에서 비정형 물체를 다룰 때에는 암시적 적분법을 사용하는 것이 일반적이다.

옷감 애니메이션과 마찬가지로 안정성 문제가 실시간 종이 시뮬레이션에서 가장 중요한 부분 가운데 하나이지만, 종이 객체는 옷감에서는 나타나지 않는 다른 문제를 가지고 있다. 이 두 번째 문제는 종이의 구겨짐은 옷감과 달리 원상회복되지 않고 지속적인 주름을 남기게 된다는 것이다. 수치적 안정성이 옷감 애니메이션과 마찬가지로 종이 애니메이션에서도 핵심적인 이슈이기는 하지만, 안정적 애니메이션이 종이 시뮬레이션의 사실성을 보장하지는 못하는 것이다.

종이 객체가 안정적인 질량-스프링 모델에 의해 시뮬레이션 될 경우, 결과 애니메이션은 종이보다는 고무처럼 보이게 될 것이다. 종이 시뮬레이션의 사실성을 높이기 위해서는 손상 보존 특성을 고려해야만 한다.

터조풀로스(Terzopoulous)가 변형 객체에 대한 물리적 시뮬레이션 기법을 제안한 이후 다양한 종류의 접근법이 제안되었다. 탈만(Thalmann) 그룹이 이 분야에서 많은 연구 결과를 내어 놓았다 [5,12]. 그러나 이 그룹의 연구 결과는 계산 효율보다는 결과의 사실성에 더 많은 비중을 두었다.

효율적인 연체(soft object) 시뮬레이션을 위해 다양한 기법이 제안되었는데, 이 가운데 가장 중요한 진전은 암시적 적분 기법을 통해 옷감 애니메이션 시스템의 안정성을 보장하는 것이다. 그러나 이 암시적 적분법은 대형 선형시스템을 풀어야 한다는 문제가 있다. 따라서 이러한 선형시스템의 해를 효과적으로 구하거나 근사하여 실시간 환경에 적용하려는 노력들이 있었다[6,7,10].

### 3. 안정적 시뮬레이션

종이 시뮬레이션을 위해서는 우선 경직도가 높은 스프링으

로 이루어진 질량-스프링 모델을 안정적으로 시뮬레이션 할 수 있는 기술이 필요하다. 실시간에 종이의 움직임을 계산하기 위하여 안정적인 암시적 적분법을 사용하는 것이 바람직하다. 그런데 많은 수의 정점을 가진 질량-스프링의 움직임을 암시적 적분법으로 구하려면 대규모 선형 시스템 문제를 풀어야 한다. 이 논문에서 제안하는 기법은 실시간 환경에서 종이의 시뮬레이션을 수행하는 것이다. 따라서 암시적 적분법의 안정성은 유지하면서 계산 효율을 극대화할 수 있는 근사 암시적 적분법을 사용하여 각 정점의 상태를 명시적 적분법과 같이 수준의 계산 복잡도로 계산한다.

가장 간단한 형태의 암시적 적분법은 역 오일러(inverse Euler) 기법으로 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}^{t+h} \\ \mathbf{x}^{t+h} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}^t + h \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}^{t+h} \\ \mathbf{x}^t + h \mathbf{v}^{t+h} \end{pmatrix} \quad (1)$$

이때  $h$ 는 시간 간격이며,  $\mathbf{v}$ 는 질점들의 속도로 이루어진 벡터이며,  $\mathbf{f}$ 는 힘의 벡터,  $\mathbf{x}$ 는 질점의 위치로 이루어진 벡터가 된다.  $\mathbf{M}$ 는 질량 행렬이며 대각행렬이다. 이 행렬에서  $3 \times 3$  부행렬을 하나의 원소로 볼 때  $i$  번째 대각 원소는  $i$  번 질점  $\mathbf{x}_i$ 의 질량인  $m_i$ 를 대각성분으로 하고 나머지 성분은 모두 0인 로 다음과 같이 표현된다.

역 오일러 기법으로 표현된 식 1의 계산 방법이 간단해 보이지만 아직 알지 못하는 힘  $\mathbf{f}^{t+h}$ 를 이용하여 속도를 갱신해야 하기 때문에 식 1의 수식을 그대로 적용하여 시뮬레이션을 수행할 수는 없다. 다음 프레임에서 작용하게 될 미지의 힘  $\mathbf{f}^{t+h}$ 를 알기 위하여 테일러(Taylor) 급수를 이용하여 다음과 같이 근사를 한다.

$$\mathbf{f}^{t+h} = \mathbf{f}^t + \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \Delta \mathbf{x}^{t+h} = \mathbf{f}^t + \mathbf{J} \Delta \mathbf{x}^{t+h} \quad (2)$$

이때  $\mathbf{J}$ 는 힘 벡터를 위치에 대해 미분한 자코비안 행렬이다.

식 2를 이용하면 전체적인 시뮬레이션은 다음과 같이 선형적인  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  형태의 선형 시스템으로 바뀌게 된다.

$$(\mathbf{M} - h^2 \mathbf{J}) \Delta \mathbf{v}^{t+h} = h \mathbf{f}^t + h^2 \mathbf{J} \mathbf{v}^t \quad (3)$$

식 3의  $(\mathbf{M} - h^2 \mathbf{J})$ 를 간단히  $\mathbf{W}$ 라고 하자. 식 3의 오른쪽 항은 스프링 힘과 점성력(viscosity force)을 합한

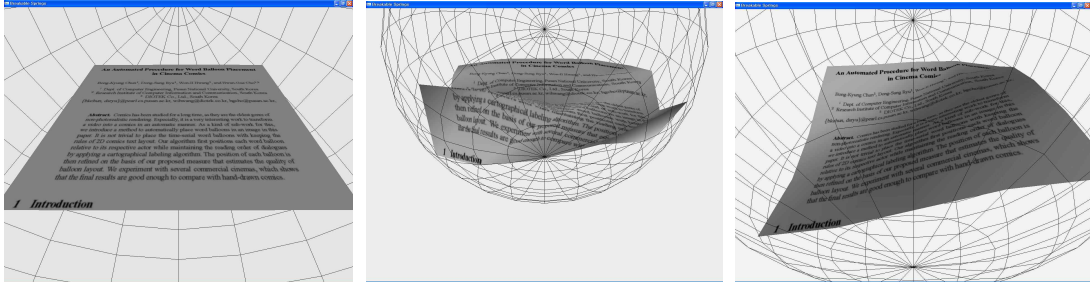


그림 1. 높은 경직도의 질량-스프링 모델에 대한 시뮬레이션 결과

것으로 간단히 구할 수 있고 이를  $\mathbf{F}_i$ 로 표현하면 문제는 다음과 같이 간단히 표현될 수 있다.

$$\mathbf{W} \Delta \mathbf{v}^{t+h} = \mathbf{h} \mathbf{F}^t \quad (4)$$

행렬  $\mathbf{W}$ 의 특성을 고려하면 특정 질점  $i$ 의 속도 변화는 다음과 같은 직접 갱신식 형태로 표현할 수 있다.

$$\Delta \mathbf{v}_i^{t+h} = \mathbf{W}_{ii}^{-1} (\mathbf{h} \mathbf{F}_i^t + \mathbf{h}^2 \sum_{(i,j) \in E} \mathbf{J}_{ij} \Delta \mathbf{v}_j^{t+h}) \quad (5)$$

이때  $E$ 는 현재 모델의 스프링으로 구성된 집합이다. 식 5에 나타나 있는 합산 기호는 결국 특정 질점  $i$ 의 속도 변화  $\Delta \mathbf{v}_i$ 를 계산할 때, 이 질점에 연결된 모든 질점의 속도 변화를 고려하여 계산한다는 것이다. 이러한 상호 연관성 때문에 이식은 직접 갱신식이 될 수가 없다. 실제 계산을 위하여 우리는 다음과 같이 자코비 반복법과 유사한 근사적 풀이를 수행한다.

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{v}_i^{t+h^{(0)}} &= \mathbf{W}_{ii}^{-1} \mathbf{h} \mathbf{F}_i^t \\ \Delta \mathbf{v}_i^{t+h^{(k+1)}} &= \mathbf{W}_{ii}^{-1} (\mathbf{h} \mathbf{F}_i^t + \mathbf{h}^2 \sum_{(i,j) \in E} \mathbf{J}_{ij} \Delta \mathbf{v}_j^{t+h^{(k)}}) \end{aligned} \quad (6)$$

이때  $\Delta \mathbf{v}_i^{t,h}$ 는 질점  $i$ 의 속도 변화를 계산할 때  $k$ 번의 반복을 통해 얻어낸 값을 의미한다.

#### 4. 적응적 메쉬와 손상 보존

안정적인 근사 암시적 적분법을 이용하면 그림 1과 같이 높은 경직도를 적용하여 크기의 변형이 거의 없는 질량-스프링 모델의 움직임을 생성할 수 있다. 그러나 이러한 방법으로 생성된 결과는 그림 1과 같이 종이보다는 고무와 같은 모

습을 보인다. 종이와는 확연히 다른 결과를 생성하는 이유는 식 6의 안정적인 시뮬레이션 기법으로 애니메이션을 생성할 경우 높은 경직도를 처리할 수는 있지만 이 객체가 구겨지거나 주름을 유지하는 특성은 표현할 수 없기 때문이다.

실세계에 존재하는 종이 객체는 외력에 의해 변형되며, 이 변형이 특정한 임계치를 넘으면 외력에 손상을 일으킨다. 이 손상은 구겨진 주름 형태로 표면에 남게 되고 원래의 상태로 완벽히 복원되지 않는다.

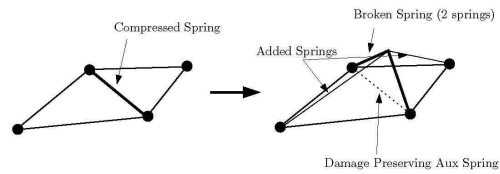


그림 2. 부러지는 스프링 모델의 개념

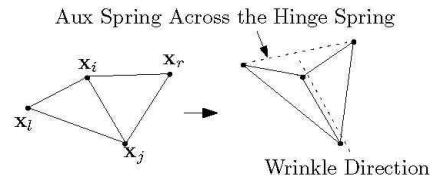


그림 3. 경첩 스프링의 접힘

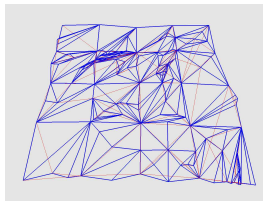
본 논문에서는 손상을 보존하는 종이의 특성을 표현하기 위하여 부러지는 스프링 모델을 제안한다. 이 모델에서 각각의 스프링은 특정한 임계치 이상으로 수축되었을 때 부러지게 된다. 스프링이 부러지며 종이 모델을 구성하는 전체 메쉬 구조의 변경이 이루어진다. 이렇게 부러진 스프링과 이에 따라 구조가 변경되는 적응적 메쉬를 이용하여 손상이 보존되는 종이 객체의 시뮬레이션이 가능하게 된다.

그림 2는 부러지는 스프링 모델의 개념을 설명하고 있다. 그림 왼쪽에 두 삼각형의 경계가 되는 스프링 에지(edge)가 수축되었다. 이 수축이 특정 임계치를 초과하게 되면 그림 오른쪽과 같이 부러지게 된다. 부러진 에지를 포함하는 정상

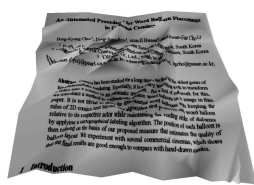
적인 삼각형 메쉬를 구성하기 위하여 그림 오른쪽에는 추가적인 스프링이 삽입된다.

부러지는 스프링과 여기에 연결되어 삼각형 메쉬를 유지하는 추가 스프링 모델을 이용하여 종이의 구겨짐을 시뮬레이션할 수 있다. 그러나 이러한 구겨짐은 보존되지 않고 금세 펼쳐지게 된다. 실제 종이가 구겨지면 구겨진 선을 따라 접히는 변형은 사라지지 않고 보존되는 특성이 있다. 이러한 손상 보존 특성을 표현하기 위하여 보조적인 스프링 에지가 추가된다. 그림 2의 오른쪽에는 부러진 에지의 원래 역할을 수행하는 손상 보존용 보조 스프링이 그려져 있다. 이 스프링 에지는 더 이상 부러지지 않는 에지로 부러진 원래 스프링의 손상을 보존하는 역할만 수행한다.

부러지는 스프링 모델이 종이의 외형과 유사한 결과를 생성하기는 하지만, 이 방법에는 심각한 단점이 있다. 이 단점은 생성되는 주름이 언제나 기존의 스프링 에지를 가로질러 지나갈 수 밖에 없다는 것이다. 따라서 메쉬(mesh)를 구성하는 스프링 에지의 방향을 따라서 생성되는 구겨짐은 생성할 수 없다는 것이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 우리는 스프링 에지가 경첩(hinge)처럼 동작할 수 있도록 하고, 이러한 동작을 통해 생성된 손상이 보존될 수 있도록 하였다.

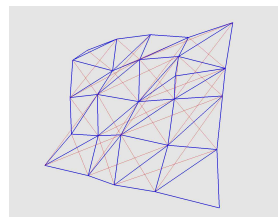


(a)



(b)

그림 4. 임의로 선택된 에지를 부러뜨린 결과: (a) 메쉬 구조 (b) 렌더링 결과



(a)



(b)

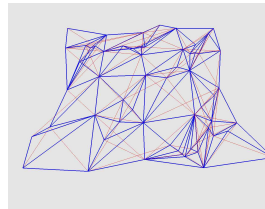
그림 5. 임의의 에지를 경첩 에지로 선택하여 접은 결과: (a) 메쉬 구조 (b) 렌더링 결과

스프링 에지가 경첩처럼 접히는 현상은 그림 3과 같이 스프링을 가로지르는 보조 스프링을 추가함으로써 구현할 수 있다. 그림 3의 왼쪽에는 두개의 삼각형이 있다. 이 삼각형의 경계가 되는 스프링 에지가 경첩처럼 동작하여 접히는 현상

은 스프링의 좌우에 있는  $\mathbf{x}_l$ 과  $\mathbf{x}_r$ 의 위치가 임계치 이하로 가까워질 경우 그림의 오른쪽과 같이  $\mathbf{x}_l$ 과  $\mathbf{x}_r$ 를 연결하는 부러지지 않는 보조 스프링 에지를 추가함으로써 구현할 수 있다.

스프링 에지를 부러뜨리는 작업을 통해 얻을 수 있는 결과는 그림 4와 같다. 그림 4의 결과는 종이 객체의 메쉬를 구성하는 임의의 스프링 에지를 선택하여 부러뜨린 결과이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 임의의 에지를 선택하여 부러뜨려도 자연스럽게 구겨진 종이의 외형을 생성할 수가 있었다. 그림 5는 임의의 스프링 에지에 대해 경첩과 같은 역할을 수행하도록 한 결과이다.

임의의 에지를 선택하여 부러뜨리거나 접는 동작을 같이 수행할 경우 그림 6와 같은 결과를 생성한다.



(a)



(b)

그림 6. 임의의 스프링을 부러뜨리거나 접어서 얻은 결과

임의의 에지를 선택하여 부러뜨리거나 접는 경우에도 그럴 듯한 종이 외형을 생성할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 애니메이션 생성에는 이용될 수 있다. 애니메이션을 생성할 때에는 외부에서 주어지는 힘에 적절히 반응하면서 이에 따라 종이 표면이 손상되어야 한다. 이러한 현상을 표현하기 위하여 부러지고 접히는 에지를 자동적으로 선택하는 기술이 필요하다.  $\mathbf{x}_l$ 과  $\mathbf{x}_r$ 가 부러질 수 있는 스프링에 의해 연결된 두 개의 질점이라고 하자. 휴지상태(rest state)에서의 두 질점 위치를 각각  $\mathbf{x}_{l^0}$ 와  $\mathbf{x}_{r^0}$ 라고 하고, 특정 시간  $t$ 에서의 위치는  $\mathbf{x}_{l^t}$ 와  $\mathbf{x}_{r^t}$ 로 표현하자. 휴지상태에서의 두 질점 사이 거리  $l_{i,j}^0$ 는  $|\mathbf{x}_{l^0} - \mathbf{x}_{r^0}|$ 이며, 현재의 거리  $l_{i,j}^t$ 는  $|\mathbf{x}_{l^t} - \mathbf{x}_{r^t}|$ 이다. 스프링이 부러지는 경우는 이 스프링이 충분히 수축했을 경우이다. 따라서 비율  $l_{i,j}^t/l_{i,j}^0$ 가 스프링이 부러질 것인지 그렇지 않을 것인지를 결정하는 가장 중요한 요소가 된다.

스프링 에지를 부러뜨릴 것인지 그렇지 않을 것인지를 결정하는 가장 간단한 방법은 비율  $l_{i,j}^t/l_{i,j}^0$ 가 특정 임계치보다 작은 값을 검사하는 것이다. 그러나 자연스러운 시뮬레이션을 위해서는 수축의 정도에 따라 확률적으로 스프링

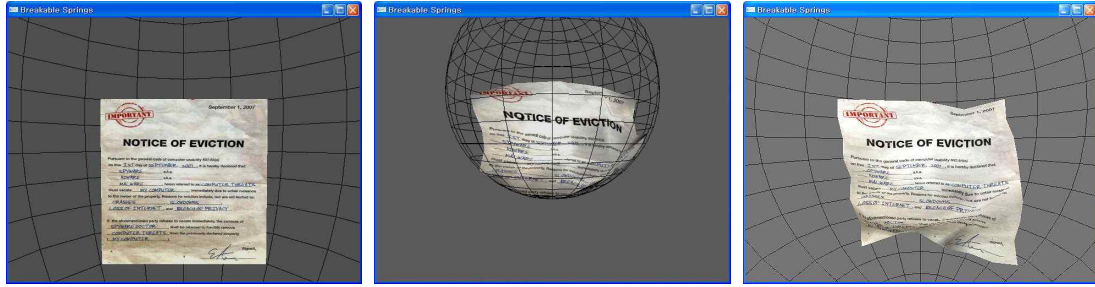


그림 7. 제안된 기법을 이용하여 생성한 애니메이션 결과

이 부러지는 것이 좋다. 따라서 우리는 이 비율을 메시 구조의 변경 현상이 일어나는 확률 계산의 파라미터(parameter)로 사용하였다. 다시 말해 수축된 스프링의 경우 이 값은 [1,0]의 구간에 존재하며, 이 스프링이 부러질 확률은 다음과 같다.

$$P_{i,j} = (1 - l_{i,j}^r / l_{i,j}^p)^\phi \quad (7)$$

이때 파라미터  $\phi$ 는 스프링의 얼마나 잘 부러지는지를 결정하는 파라미터이다.

스프링이 부러질 때, 새로운 질점이 추가된다. 이 추가되는 질점의 위치를 결정하는 가장 간단한 방법은 부러진 스프링의 중점으로 설정하는 것이다. 그러나 이 간단한 방법은 원래의 스프링이 부러져서 새로 생성된 두 에지를 다시 반복적으로 부러뜨리게 될 가능성이 매우 높다. 따라서 우리는 새로 추가되는 점의 위치를 스프링 중점에서 법선 벡터 방향으로  $h$ 만큼 이동하였다. 이때  $h$ 는 다음과 같이 구한다.

(8)

이때  $\psi$ 는 영역 보존 정도를 결정하는 파라미터가 된다.

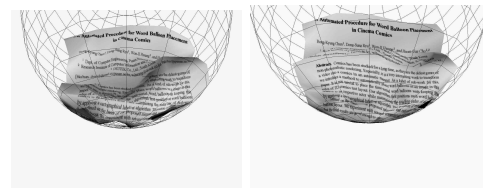
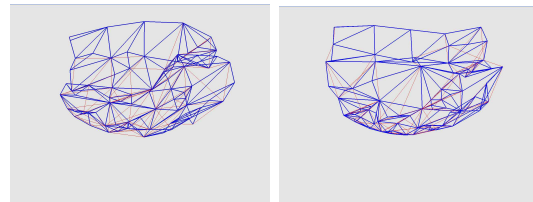
## 5. 실험 결과

본 논문에서 제안된 기법을 이용하여 생성한 애니메이션 결과가 그림 7에 나타나 있다. 이 결과는 종이 모델의 외부에 구형 객체를 두고 이 구형 객체의 크기를 조절하여 종이와 상호작용하게 하였다. 구의 크기는 사용자의 키보드 입력에 따라 변화하였으며 이 변화에 따라 종이는 구와 충돌하고 변형된 뒤에 구의 크기를 다시 늘릴 경우 원래의 상태를 돌아오게 된다. 이때 종이의 특성상 일부 손상들은 복구되지 않고 그림과 같이 남아 있게 된다.

본 논문에서 제안된 종이 시뮬레이션 기법은 제어 파라미터인  $\phi$ 와  $\psi$ 를 이용하여 종이 모델의 특성을 제어한다. 그림 8은 제어 파라미터  $\psi$ 를 조정하여 얻은 애니메이션 결과이다. 그림에서 종이를 감싸고 있는 구와의 상호작용을 통해 종이 객체가 변형된다. 그림 8의 (a)는  $\psi$  값을 1.0으로 설정

했을 때의 결과이며, (b)는 0.1로 설정한 결과이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이  $\psi$  값이 클수록 표면 영역의 보존 정도가 높아 울퉁불퉁한 모습으로 변형되는 종이의 특성을 보이게 되고, 이 값이 작아지면 변형에 의해 영역의 변화가 어느 정도 일어나도록 허용하게 되어 그림과 같이 다소 부드러운 표면의 종이를 생성할 수 있게 된다.

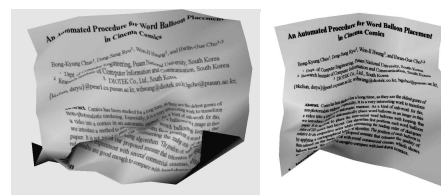
그림 9는 제어 파라미터  $\phi$ 를 조정하여 얻은 애니메이션 결과이다. 그림 9의 (a)는  $\phi$ 를 1로 설정하여 애니메이션을 수행했을 때 얻어진 결과이고, (b)는 5로 설정하여 얻은 결과이다. 그림에서 확인할 수 있는 바와 같이 파라미터  $\phi$ 는 종이가 외부힘에 의해 얼마나 잘 손상되는지를 결정하는 파라미터이다.



(a)

(b)

그림 8. 제어 파라미터  $\psi$ 의 효과: (a)  $\psi$ 를 1.0으로 설정한 경우 (b)  $\psi$ 를 0.1로 설정한 경우





(a) (b)

그림 9. 제어 파라미터  $\phi$ 를 조정한 결과: (a)  $\phi$  값을 1로 설정한 결과 (b)  $\phi$  값을 5로 설정한 결과

## 6. 결론

이 논문에서 우리는 실시간 환경에서 동작하는 종이 시뮬레이션 기술을 제안하였다. 이 기법은 경직도가 매우 높은 질량-스프링 모델을 안정적으로 시뮬레이션 할 수 있는 근사 암시적 기법을 수치적분 방법으로 사용하면서 구겨짐과 같은 손상이 보존될 수 있도록 부러지는 경첩 스프링 모델을 제안하고 있다. 부러지는 경첩 스프링 모델은 매우 간단하면서도 직관적인 접근법으로 계산 효율이 높고 구현이 매우 용이한 모델이다. 제안된 기법은 가상환경이나 게임과 같은 실시간 상호작용적 응용에서 종이 객체를 생성하고 다룰 수 있는 방법을 제공하고 있다. 제안된 기법의 직관성과 단순성은 사용된 모델이 질량-스프링 모델이며 각 질점의 상태 갱신이 선형 시스템 풀이과정을 요구하지 않고 단순한 직접 갱신식의 형태로 계산될 수 있기 때문에 얻어진다. 제안된 기법은 안정적이면서도 사실적인 종이 애니메이션을 가능하게 한다. 이 기법을 활용하여 상호작용적 환경에서 성공적으로 종이 객체를 다룰 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- [1] David Baraff and Andrew Witkin. Large steps in cloth simulation. Proceedings of SIGGRAPH 98, pages 43 - 54, July 1998.
- [2] David E. Breen, Donald H. House, and Michael J. Wozny. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles. Proceedings of SIGGRAPH '94, pages 365 - 372, July 1994.
- [3] Michel Carignan, Ying Yang, Nadia Magnenat Thalmann, and Daniel Thalmann. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 92), 26(2):99 - 104, July 1992.
- [4] Kwang-Jin Choi and Hyeong-Seok Ko. Stable but responsive cloth. ACM Transactions on Graphics: Proceedings of SIGGRAPH 2002, pages 604 - 611, July 2002.
- [5] Frederic Cordier and Nadia Magnenat-Thalmann. Real-time animation of dressed virtual humans. Proceedings of Eurographics 2002, 2002.
- [6] Mathieu Desbrun, Peter Schröder, and Alan Barr. Interactive animation of structured deformable objects. Graphics Interface '99, pages 1 - 8, June 1999.
- [7] Young-Min Kang and Hwan-Gue Cho. Bilayered approach for efficient animation of cloth with realistic wrinkles. Proceedings of Computer Animation 2002, pages 203 - 211, 2002.
- [8] Young-Min Kang and Hwan-Gue Cho. Real-time animation of complex virtual cloth with physical plausibility and numerical stability. Presence - Teleoperators and Virtual Environments, 13(6):668-680, 2004.
- [9] Mark Meyer, Gilles Debunne, Mathieu Desbrun, and Alan H. Barr. Interactive animation of clothlike objects in virtual reality. The Journal of Visualization and Computer Animation, 12:1 - 12, 2001.
- [10] Masaki Oshita and Akifumi Makinouchi. Real-time cloth simulation with sparse particles and curved faces. Proc. of Computer Animation 2001, pages 220 - 227, November 2001.
- [11] Demetri Terzopoulos and Kurt Fleischer. Modeling inelastic deformation: Viscoelasticity, plasticity, fracture. Computer Graphics (Proceedings of SIGGRAPH 88), 22(4):269 - 278, August 1988.
- [12] Pascal Volino, Martin Courchesne, and Nadia Magnenat-Thalmann. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. Proceedings of SIGGRAPH 95, pages 137 - 144, August 1995.

## 저자소개

강 영 민(Young-Min Kang)



1996년 2월: 부산대학교 전산과 이학사  
 1999년 2월: 부산대학교 전산과 이학석사  
 2003년 2월: 부산대학교 전산과 이학박사  
 2002년 1월 ~ 2002년 7월: 스위스 제네바대학 미라랩 임시연구원  
 2003년 3월 ~ 2003년 10월: 부산대학교  
 부설 컴퓨터및정보통신연구소 전임연구원  
 2003년 10월 ~ 2005년 3월: 한국전자통신연구원 연구원  
 2005년 3월 ~ 현재: 동명대학교 게임공학과 교수  
 <관심분야> : 컴퓨터 그래픽스, 게임, 물리기반시뮬레이션

조 환 규(Hwan-Gue Cho)



1984년 2월 : 서울대학교 (이학사)

1986년 2월 : KAIST 전자계산학과 석사

1990년 2월 : KAIST 전자계산학과 박사

1990년 ~ 현재: 부산대학교 정보통신공학부 교수

<관심분야> : 컴퓨터 그래픽스, 생물정보학