감상자의 견해가 반영된 물감 특징을 표현하는 물감 시뮬레이션 시스템

유 미^{*}

Paint Simulation System Representing the Paint Characteristics Reflecting Opinions of Audiences

Mi You[†]

ABSTRACT

There are many studies to create realistic paint effects and the research area still has attracted attention in these days. However, the consideration for the characteristics of the real paint effects from the point of viewers is not enough. In this paper, we extract the important paint features and survey the importance values. Based on the survey results, we suggest a new paint system. The paint system utilizes the paint simulation that reflects viscoelasticity and mixing suggested by You et al. (2013) and proposes the paint rendering method that represents the details of a paint, a solvent, and pigments. We survey the quality of our results and prove that our paint system is superior to the previous studies.

Key words: Paint, Solvent, Pigment, Paint Simulation, Paint Rendering

1. 서 론

물감의 특징을 표현하기 위한 다양한 연구들이 비 사실적인 렌더링 분야에서 존재해 왔다. 비사실적인 렌더링 분야에서는 이미지를 생성 방법에 따라 3가지 범주로 나눌 수 있는데, 셰이더 방법, 필터링 방법, 시뮬레이션 방법으로 분리될 수 있다. 셰이더 방법은 3D 오브젝트에 비사실적 효과들을 표현한 셰이더를 적용함으로써 이미지를 생성하는 방법이며, 필터링 방법은 2D 이미지 도메인에서 픽셀 단위의 변형을 적용함으로써 비사실적인 특징을 표현하는 방법이다. 마지막으로 시뮬레이션 방식은 사전에 제공된 데이터를 바탕으로 시뮬레이션을 계산하여 비사실적인 효과를 얻어내는 방식이다.

그동안 시뮬레이션 방식을 이용한 물감 표현 연구

는 많은 관심을 받고 있었으며, 다양한 연구들이 진행되어 왔다. (Xu et al., 2006; You et al., 2013; Baxter et al., 2004; Chu & Tai., 2005; Curtis et al., 1997; Laerhoven & Reeth, 2005; Seo & Yoon, 2009) 그러나 이 논문들은 물감 효과들을 생성하는 방식에 대한 연구들로서 감상자의 입장에서 물감을 물감답게 만드는 특징들에 대한 고려가 부족한 실정이었다. 따라서 본 연구에서는 사실적인 물감 효과들을 표현하기 위해서 필요한 특징들이 어떤 것들이 있는지 추출해보고, 그 특징들이 얼마나 물감의 효과에 기여하고 있는지 설문지법을 통해 살펴본 후, 그에 걸맞은 물감 효과 생성 모델을 제안하고자 한다.

본 논문에서 제시하는 물감 효과 생성 시스템은 물감의 움직임을 생성하는 물감 시뮬레이션 부분과 이동한 물감을 표현하는 렌더링 부분으로 이루어져

* Corresponding Author : Mi You, Address: 152, Jukjeon-ro, Suji-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 448-701, Korea Room 607 at the Western Building, TEL : +82-31-8005-3139, E-mail : anubodhih@gmail.com

Receipt date : Mar. 13, 2014, Revision date : Jun. 18, 2014
Approval date : Jul. 7, 2014

[†] Graduate School of Cinematic Content, Dankook University

있다. 본 논문에서는 물감과 희석제의 움직임을 파티클로 샘플링하여 움직임을 계산하는 SPH (smoothed-particle hydrodynamics) 방법을 이용해서 생성하였다. SPH 방식으로 유체를 시뮬레이션 하는 연구들은 많이 나와 있었으나 최근에 발표되었던 You et al. (2013)가 제시한 3차원 공간에서 이루어지는 물감 시뮬레이션 연구가 본 논문의 목적과 가장 적합하기 때문에 이를 사용하였다. 하지만 물감 렌더링 부분에서는 You et al. (2013)가 제시한 방법으로는 물감의 특징을 모두 표현할 수 없는 한계점에 부딪히게 되었다. 감상자들의 설문 조사에서는 디테일한 물감의 특징이 요구되었음에도 불구하고 위의 방법으로는 충분히 표현할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 물감 효과의 품질을 높일 수 있는 방법을 새롭게 고안하여 적용하였으며, You et al. (2013)에서 제안하였던 결과물과 설문을 통해 비교한 후, 설문 결과 더 높은 품질의 렌더링 결과물을 생성하였음을 입증하였다.

2. 관련 연구

유체 시뮬레이션을 이용하여 물감의 특징을 표현한 연구는 비사실적인 렌더링 분야에서 종종 찾아볼 수 있었다. Chu & Tai (2005)는 중국의 수목담채화에서 관찰되는 화선지에서의 잉크 확산 시뮬레이션 연구를 제안하였다. 이 연구에서는 물감 이펙트를 5가지 (깃털 패턴, 밝은 가장자리, 나뭇가지 패턴, 경계면 불규칙성, 바운더리 다크닝)으로 나누고 각 이펙트에 적절한 방법론을 제시하였다. 특히 시뮬레이션 단계 중에 이미지 기반의 접근방식을 도입함으로써 높은 품질의 결과물을 생성하였다. 이와 비슷한 주제의 중국의 수목담채화 연구로 Sun et al. (2010)의 논문도 살펴볼 수 있다. 이 논문에서는 브라운 운동과 삼투 효과를 따라 움직이는 물과 잉크간의 확산효과를 파티클을 통해 계산하였다. 또한 물이 증발하고 잉크가 남는 현상 역시 표현하였다. Curtis et al. (1997)의 수채화 연구는 비사실적 렌더링 분야에서 최초로 유체 시뮬레이션 방법을 도입하였다. 이 연구에서도 수채화의 효과들을 (가장자리 다크닝, 흐름 효과, 광택 효과) 추출해 내고 이 현상을 표현하기 위한 시뮬레이션을 생성하였다. 이 연구의 시스템은 3개의 층으로 이루어져 있으며 각각 물의 흐름, 염료의 착색, 종이로의 흡수에 대한 역할을 수행하도록

설계되어 있다. 염료를 렌더링 할 때에는 Kubelka-Munk 모델을 사용하여 염료의 혼합을 사실적으로 표현할 수 있도록 하였다. Laerhoven & Reeth (2005)는 좀 더 진보된 그래픽 하드웨어를 이용한 실시간 수채화 연구를 제안하였다. 이 연구 역시 Curtis et al.의 연구와 마찬가지로 3개의 층으로 나누어 시스템을 설계하였지만, 2차원의 Navier-Stokes 식을 이용하여 좀 더 안정적인 시뮬레이션을 계산하였다. 그동안의 연구는 특정 타입의 물감 효과를 추출해 내고 그에 맞는 시뮬레이션을 제시하였지만, 물감의 물성을 표현하면 위에서 언급된 특징들이 자연스럽게 생성될 수 있다는 점에 착안하여 You et al. (2013)는 물감 시뮬레이션에 대한 일반화된 모델을 제시하였다. 이 연구는 물감 시뮬레이션에 대한 최신의 연구로써 이전 연구들이 2차원 혹은 2.5차원에서 이루어진 것에 반하여 3차원에서 물감 시뮬레이션을 수행할 수 있다는 장점이 있다. 따라서 본 연구는 이 연구의 물감 시뮬레이션을 기본 프레임을 삼아 진행하였다.

물감의 효과를 표현하고자 하는 연구는 비단 물감 시뮬레이션 분야뿐만 아니라 2D의 이미지 필터링을 이용하는 분야에서도 활발히 연구되어 왔다. Luft & Deussen (2006)은 그동안 복잡도가 높아져 잘 다루어지지 않았던 식물 일러스트를 수채화로 표현하기 위한 테크닉을 발표하였다. 3D로 생성된 식물 모델의 기하학적 복잡도를 단순화 시키고 수채화 느낌을 표현할 수 있는 렌더링을 수행하였다. Zeng et al. (2009)는 인풋 이미지를 분석하고 이미지 내부의 색상을 계층적으로 분리한 후 전문가들의 물감 패턴을 적용하여 물감의 효과를 표현하였다. Bousseau et al. (2006)은 이미지나 3D 모델을 단순화, 추상화시킴으로써 수채화 특성을 표현하였다. 특히 수채화 효과들인 가장자리 다크닝, 건조한 붓터치, 종이의 우글거림등의 효과를 추가적으로 표현해 줌으로써 사실감을 높였다.

물감의 가장 큰 특징은 서로 섞인다는 것이다. 유체간의 혼합 혹은 혼합되지 않는 성질을 다룬 연구들은 유체 시뮬레이션 분야에서 많이 관찰된다. Kang et al. (2009)은 그리드 방식에서의 혼합 시스템을 제안하였다. 시스템에서 사용되는 유체들 간의 혼합 가능성을 규정한 후 각 그리드 셀의 부피 내에 각 유체가 얼마나 분포하고 있는지를 계산하여 그 비율만큼

Fig. 1. Real paint images for advice.

유체 표면을 생성하는 방법을 제안하였다. Park et al. (2008)은 유체가 섞일 때와 서로 섞이지 않을 때의 두 상황을 하나의 시스템에서 해결할 수 있는 방법을 제안하였다. Lattices Boltzmann의 방식을 바탕으로 농도가 확산되는 것을 Cahn-Hilliard 식을 이용하여 추적하였다. Liu et al. (2011)는 LLSPH라고 하는 액체 간 혼합 시뮬레이션을 제안하였다. 이 연구는 SPH를 기반으로 열역학 이론을 접목하여 확산 현상을 표현하였다. 최근에는 발광하는 유체를 투명한 유체와 혼합시킨 후 그 움직임을 카메라로 저장한 후 얻어진 3D 데이터를 통계학적 분석을 기반으로 새로운 유체 움직임을 생성할 수 있는 방식을 Gregson et al. (2012)가 제안하였다. 액체 표면에서의 확산을 물질 전달 방식을 이용해 다루는 방식이 Shin et al. (2012)에 의해 개발되었다. 이 연구에서는 점성이 다른 두 유체 사이에 발생하는 Viscous fingering 효과를 Darcy의 법칙을 이용하여 표현하였다. 이 Viscous fingering 효과는 DLA (diffusion-limited aggregation) 모델을 이용하여 생성한 Cha et al. (2009) 연구에서도 찾아볼 수 있다.

3. 물감 효과 특징 추출

3.1 실험 개요

물감 표현을 생성하기 위한 시스템을 설계하기에 앞서 물감 효과를 표현할 때 중요한 특징이 무엇인지 추출하기 위해 먼저 컴퓨터 그래픽스 분야의 전문가 5인에게 자문을 구하였다. 전문가들은 교수 (3인), 컴퓨터 그래픽 작업자 (1인), 아티스트 (1인) 으로 이루어져 있었으며, 자유롭게 의견을 제시하도록 하였다. 먼저 시각적으로 물감의 특징을 확인할 수 있도록 인터넷에서 쉽게 구할 수 있는 물감의 이미지를 여러 장 보여주었다. Fig. 1은 그 이미지 중 일부를 보여준다.

위의 실제 물감 이미지 뿐 아니라 기존 연구의 결과물인 컴퓨터 그래픽으로 만들어진 물감 이미지를

참고자료로 보여줌으로써 기존의 물감 연구에서 어떤 점이 더 개선되어야 할지도 비교할 수도 있도록 유도하였다. 그러나 실제 물감 이미지에서 관찰되는 특징이 기존 연구에서 보여 진다면 반복되더라도 자유롭게 언급할 수 있도록 하였다.

전문가들은 이 이미지들을 보고 물감끼리의 혼합, 물감의 두께, 물감과는 구별되는 염료의 표현, 물감과 희석제(물이나 오일) 간의 혼합, 가장자리가 어두워지는 효과, 가장자리의 울퉁불퉁한 경계면, 종이 질감 표현, 물감의 흡수-건조 표현 등 다양한 의견을 제시하였다. 본 논문은 이 의견들을 반영하여 필요한 특징들을 추출했으며, 이 특징들이 감상자들에게 얼마나 중요하게 느껴지는지를 자기-보고 질문지법을 통해 조사하였다.

실험에 사용된 항목은 물감의 입체 표현, 물감끼리의 혼합, 물감과 희석제 간의 혼합, 흡수-건조 시 생기는 바운더리 다크닝, 종이 질감으로 5 항목에 대해 조사하였다. 물감의 입체 표현은 물감의 형태를 유지하게 하는 점탄성의 중요성을 알아보기 위하여 항목으로 지정하였으며, 물감끼리의 혼합과 물감과 희석제 간의 혼합은 섞이는 효과에 대해 조사하기 위해서 지정하였다. 단, 물감과 희석제 간의 혼합에

Fig. 2. Paint research images for advice.

서는 물감 내부에 있던 염료가 농도의 차이 때문에 희석제로 흐르는 모습이 더욱 명백하게 보여 지기 때문에 각 부분에 대해 구체적으로 조사하기 위하여 물감끼리와 물감과 희석제 사이로 나누어 항목을 설정하였다. 바운더리 다크닝 효과는 물감이 물로 확산되고 흡수 및 건조가 이루어 질 때 염료가 물의 경계면을 따라 어둡게 착색되는 효과를 말한다. 이 효과는 기존의 물감 연구에서 자주 언급되며 중요하다고 여겨지는 특징인데, 이 역시 감상자가 얼마나 중요하게 여기는지 확인하기 위해 항목으로 설정하였다. 마지막으로 물감이 흡수, 건조될 때 종이 질감의 영향을 크게 받는데, 이를 감상자들이 얼마나 중요하게 생각하는지 조사하였다.

각 문항의 중요성 정도는 5단계 (1. 전혀 중요하지 않다. 2. 그다지 중요하지 않다. 3. 보통이다. 4. 약간 중요하다. 5. 매우 중요하다.)로 이루어 졌으며, 각 단계 중에서 하나를 골라 체크하는 것이다. 실험에 참여한 감상자는 총 27명이며, 20~30대의 연령층으로 이루어 져 있다. 그 중 15명은 컴퓨터 그래픽 분야에 익숙한 사람들이며, 나머지는 컴퓨터 그래픽 분야와 전혀 관련이 없는 사람들로 실험이 진행됐다.

3.2 실험 결과

실험 결과 각 항목들이 대체적으로 높은 점수를 가지고 중요하다고 평가 되었으며, 그중에서도 가장 높은 평균 점수가 나타난 항목은 물감끼리의 혼합이었다. 물감의 색상이 혼합되는 표현이 감상자로 하여금 물감 특징 표현에 매우 중요한 요소로 고려된 것을 알 수 있다. 두 번째로 중요하게 평가된 항목은 종이의 질감이었다. 실험자들은 종이 텍스처에 의해 생기는 염료의 패턴 표현 역시 매우 중요하게 생각하였다. Table 1은 실험 결과를 정리해서 보여주고 있다.

Table 1. The result values for individual paint effect

Items	Average	Standard Deviation
Three-dimensional effect of paint	4.11	0.91
Diffusion between paints	4.52	0.73
Diffusion between paint and solvent	4.15	0.93
Boundary darkening	4.14	0.89
Paper texture	4.26	0.96

이 실험 결과는 뒤에 나올 물감 시뮬레이션과 물감 렌더링으로 이루어진 물감 효과 생성 시스템 설계에 중요한 요소로 반영이 되었으며, 이 효과들을 최대한 표현할 수 있는 방향으로 시스템이 설계되었다.

4. 물감 효과 생성 시뮬레이션

앞서 제시한 효과들이 표현되어있는 사실적인 물감의 움직임을 생성하기 위해서 본 연구에서는 You et al.(2013)이 제시한 물감 시뮬레이션 방법을 사용하였다. 이 방법에서는 페인팅 환경에서 빈번히 사용되는 도구인 물감, 희석제, 종이 이 세 가지 요소를 반영하여 시스템을 설계하였으며, 특히 물감은 바인더와 염료로 나누어 표현함으로써 실제 확산 효과를 표현하고자 하였다. 또한 물감의 물리적인 특성으로는 유체성, 확산성, 흡수성을 추출하여 각 특성에 맞는 방정식을 제시하였다. 이 물리적인 특징을 계산하기 위해서 물감과 희석제를 각각 특성이 다른 입자로 설정하였으며, 그 내부에 염료의 농도를 지정하는 방식을 제안하였다.

먼저 유체성을 표현하기 위해서 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 운동량을 계산하였다. 그러나 물감은 점탄성 물질이기 때문에 물에 비해 좀 더 된 성질을 가지고 있으며, 변형 이전의 상태로 돌아오려는 특징이 있다. 따라서 물감 시뮬레이션의 유체성을 표현하기 위해서 기존의 Navier-Stokes 방정식에 점탄성을 추가하여 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -(u \cdot \nabla)u - \frac{1}{\rho} \nabla P + \mu_v \nabla^2 u + \mu_e \nabla \cdot \epsilon + f \quad (1)$$

u 는 속도, ρ 는 밀도, P 는 압력, μ_v 는 점성, μ_e 는 탄성, ϵ 은 변형 텐서, 그리고 f 는 외부 힘을 의미한다.

여기서는 이 방정식을 Solenthaler과 Pajarola(2009)가 제안한 Predictive-corrective incompressible SPH (PCISPH) 알고리즘을 이용하여 시뮬레이션을 구현하였다. 이 방식은 기존의 SPH 알고리즘에 비해 계산속도가 빠른 장점을 가지고 있다.

물감이 희석제와 섞이게 되면 물감 내부에 있었던 염료가 희석제로 점차 확산하게 된다. 이는 물감과 희석제 각각의 내부에 존재하는 염료 농도가 다르기 때문에 발생하는 물질 전달의 현상으로써, 이 확산 현상은 Fick의 두 번째 법칙을 통해 계산할 수 있다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \nabla^2 c \quad (2)$$

여기서 c 는 염료 농도이며, D 는 확산도이다.

물감과 희석제가 종이에 닿으면, 두 유체들은 종이로 흡수된다. 이때, 물감은 많은 부분들이 종이 위에 남고 천천히 흡수되는 반면, 희석제는 매우 빠른 속도로 종이에 흡수되고 희석제로 확산된 염료만이 독특한 분포 모양을 남기고 종이 표면에 남기게 된다. 이 종이로 침투되는 액체들의 속도는 Lucas-Washburn 식을 이용해서 계산하였다.

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{P_h + P_c}{8\mu l} (r_c^2 + 4r_c) \quad (3)$$

l 은 종이 모세관 길이, P_h 는 정수압, P_c 모세관 압력, r_c 는 모세관 반지름이다.

5. 물감 효과 생성 렌더링

5.1 물감 표면 생성

물감과 희석제는 액체이기 때문에 공기와 구별 짓는 표면이 반드시 필요하다. 단, 여기서는 물감과 희석제가 서로 섞이는 타입만을 다루기 때문에 물감과 희석제를 동시에 감싸는 표면을 생성하도록 하였다. 본 논문에서 사용되는 물감 시스템은 SPH방식의 파티클을 기반으로 하기 때문에 이 파티클의 정보를

Fig. 3. The creation of paint surface wrapping solvent and paint particles.

Fig. 4. Paint surface rendered by Phong shading model.

이용해서 표면을 생성하는 Zhu & Bridson (2005)의 표면 생성 알고리즘을 사용하여 물감과 희석제 표면을 생성하였다.

물감과 희석제로 이루어진 액체 표면은 Phong 셰이딩 모델을 사용하여 렌더링 하였다. 바인더와 희석제는 투명에 가까운 반투명한 재질이며, 색상이 없거나 연한 노란색상을 띤다. 또한 유체가 가지는 고유한 굴절 효과 역시 관찰된다. 우리는 Phong 셰이딩 모델의 파라미터를 조절함으로써 이 특징들을 표현할 수 있었다

5.2 물감과 희석제 내부의 염료 렌더링

물감의 색상을 결정하는 것은 물감 내부에 존재하는 염료이기 때문에 본 논문에서는 이를 반영하여 물감과 희석제 내부의 염료를 따로 추출하여 렌더링을 하였다. 또한 염료는 0.001~0.002mm정도의 아주 미세한 가루이기 때문에 염료 농도를 밀도장을 이용하여 표현하였다. 이러한 렌더링 방법은 You et al. (2013)의 논문에서도 제시된 적이 있었으며, 상업 영상 제작 프로덕션에서 연기와 같은 표면이 설정되지 않은 유체를 표현할 때 사용되었었다.

감상자들에게 가장 중요하다고 평가 받은 물감과 물감 사이의 혼합 항목은 다른 색으로 지정된 각 물감 파티클의 염료 색상을 동시에 렌더링 함으로써 표현될 수 있었다. 각 물감의 다른 염료로 지정된 파티클이 물감 시뮬레이션을 수행하면서 자연스럽게 혼합될 수 있었으며, 각 물감에 대한 밀도장이 따로 생성되기 때문에 생성된 염료 밀도장이 광선 추적 렌더링 법을 통해서 렌더링 됨으로써 혼합된 색상의 표현이 생성될 수 있었다. 희석제와의 혼합은 물감에 있던 염료 농도가 희석제로 확산할 때 감소되는 농도의 값을 렌더링 함으로써 혼합 효과를 표현할 수 있었다.

5.3 종이 내부의 염료 렌더링

감상자가 두 번째로 중요하다고 판단한 종이 텍스처의 반영과 마지막으로 중요하다고 판단한 명확한 경계면을 따라 흐르는 바운더리 다크닝 현상은 종이와 매우 밀접한 관계를 가진다. 따라서 종이 위에 남겨지는 염료의 렌더링은 앞서 설명한 물감과 희석제 내부의 염료 렌더링 방법과는 다른 접근 방식이 필요하다.

Fig. 7. Paper texture used in this paper.

먼저 종이 염료의 밀도장은 물감과 희석제 염료 밀도장보다 높은 해상도의 밀도장을 사용하였다. 종이 텍스처를 표현하기 위해서는 종이의 해상도를 사용해야 하는데, 기존의 해상도로는 종이의 텍스처를 표현하는데 한계가 있었으며, 부족한 종이 픽셀 데이터는 앨리어싱 같은 문제가 쉽게 생기기 때문이다. 본 논문에서는 물감과 희석제의 밀도장보다 대략 2~3배정도 높은 해상도를 사용하였다. 먼저 종이 층에 흡수되는 염료의 농도를 샘플링하여 밀도장에 값을 지정한 후 이중선형보간법을 이용하여 해상도를 높이도록 하였다. 즉, 낮은 해상도의 염료 밀도장을 ψ_l 이중 선형 보간법을 f_b 이라 한다면 높은 해상도의 염료 밀도장, ψ'_l 은 (식 4)로 구할 수 있다.

$$\psi'_l = f_b(\psi_l) \quad (4)$$

경계면을 따라 흐르는 바운더리 다크닝 현상을 표

현하기 위해서는 종이와 액체 간의 경계면이 명확하게 계산되어야 경계면 주변으로 염료 농도가 표현될 수 있다. 본 논문에서는 경계면 마스크를 사용하여 경계면 외부의 밀도장을 제거하는 방법으로 명확한 경계면을 생성하였다. 경계면 마스크는 다음 식으로 계산된다.

$$\psi_m = f_m(\phi, y_p) \quad (5)$$

ψ_m 은 경계면 마스크, f_m 은 마스크 생성 함수, ϕ 는 4.1장에서 생성된 물감 표면, y_p 은 종이의 위치값이다.

경계면 마스크 생성 알고리즘은 종이의 위치를 기준으로 교차하는 액체의 표면의 각 교차점을 찾는 것으로부터 시작한다. 이렇게 종이 위에 찾아진 교차점들을 연결하기 위해서 Bresenham의 직선 알고리즘을 수행한다. 이 때 종이 위에 그려진 선으로는 어

Fig. 6. The method to produce boundary mask.

Fig. 8. Pigment rendering in the solvent and paint palette.

Fig. 9. Comparison between You et al.(2013) (a) and images generated by our method (b, c).

는 부분이 유체의 내부인지 알 수 없기 때문에, 유체의 내, 외부를 나누기 위한 Flood Fill 알고리즘을 수행한다. 이때 항상 유체의 외부로 지정되는 (0,0)위치의 픽셀을 외부로 지정하여 채귀적으로 주변 픽셀을 계산하도록 하였다. Fig. 7는 경계면 마스크 생성 알고리즘의 과정을 도식화해서 보여주고 있다.

시간이 흐를수록 건조-흡수 과정이 진행되면서 경계면으로 염료가 모이는 효과가 관찰된다. 이 바운

더리 다크닝 효과는 명확하게 생성된 경계면 주변의 일정 픽셀 범위 안의 염료 밀도를 어둡게 변형시킴으로써 얻을 수 있었다.

$$\Psi_d = f_d(f_m(\Phi, y_p), k) \quad (6)$$

Ψ_d 는 바운더리 다크닝 밀도장, f_d 는 바운더리 다크닝 함수, k 는 어느 범위까지 어두워질지에 대한 유저 파라미터 이다.

Fig. 8. Rendering system plugged in Maya program.

종이 텍스처(ψ_t)는 실제 촬영된 고해상도의 종이 이미지를 사용하였다. 본 논문에서는 이미지의 밝은 부분은 종이 텍스처의 불룩한 부분이라고 가정하고 어두운 부분은 오목한 부분이라고 가정한 후 이미지의 색상 값을 종이 염료 밀도장에 곱해주었다.

이 전 과정을 거치게 되면 디테일한 물감 효과가 적용된 높은 해상도의 염료 밀도장 ψ_h 는 다음과 같이 계산된다.

$$\psi_h = (\psi_m + \psi_d) \cdot \psi_t' \cdot \psi_t \quad (7)$$

본 논문에서 사용되는 물감 렌더링 시스템은 Autodesk 사의 Maya 프로그램의 Plug-in 형식으로 제작되었으며, 내제되어 있는 Mental ray 프로그램을 이용해서 결과물을 렌더링 하였다.

6. 결 과

본 논문에서 제시된 물감 효과 생성 시스템은 C++ 언어로 만들어 졌으며, 계산 속도를 향상시키기 위해 병렬 계산 라이브러리인 OpenMP를 이용하였다. 본 시스템은 Intel(R) Core(TM) i-7-3770 CPU @ 3.40 GHz와 8GB의 메모리를 보유하고 있는 컴퓨터에서 계산하였다.

Fig. 9의 b는 제안된 물감 시스템을 이용하여 만든 결과 이미지이다. 이 장면은 총 12,995개의 유체 파티클이 사용되었으며, 페인트 밀도장의 사이즈는 $400 \times 60 \times 400$ 이며, 종이 밀도장의 사이즈는 800×800 가 사용되었다. 시뮬레이션 시간은 1프레임 당 427초가 걸렸으며, 렌더링 시간은 226초가 걸렸다.

이 이미지는 비교 설문 조사를 위하여 You et al. (2013)의 논문에 결과이미지로 나온 Flower와 비슷하게 만들었다. Fig. 9의 a는 이전 논문에 나온 결과 이미지이며, b와 c는 본 논문에서 새롭게 제안한 방법에 의해 생성된 이미지이다. b와 c의 차이점은 b는 물감과 희석제 내부의 염료와 종이 내부의 염료가 모두 표현된 이미지이고, c는 종이 염료만 표현되었다는 점이다. c는 종이의 염료를 표현하는 것이 디테일 추가에 많은 도움이 되었음을 참고하기 위해 따로 렌더링 하였다. 설문은 간단히 진행되었다. 3장에서 언급되었던 5항목들(물감의 입체 표현, 물감끼리의 혼합, 물감과 희석제 간의 혼합, 흡수-건조 시 생기는 바운더리 다크닝, 종이 질감)이 더욱 잘 나타났다고 생각하는 이미지를 a와 b 둘 중 하나를 선택하는 것이었다. 27명

의 감상자 중 21명은 새로 제시된 방법의 결과물인 b를 선택하였으며, 나머지 6명은 a를 선택하였다. 아주 높은 비율로 b가 선택된 것은 아니지만 많은 감상자들이 b가 더 잘 표현된 이미지라고 선택하였다.

7. 결 론

물감을 사실적으로 표현하고자 하는 연구는 꾸준히 관심 받고 있었으며, 현재에도 지속적으로 연구되고 있는 분야이다. 하지만, 이 연구들은 감상자의 입장에서 물감을 물감답게 만드는 특징들에 대한 고려가 부족한 실정이었다. 본 연구에서는 사실적인 물감 효과들을 표현하기 위해서 필요한 특징들을 추출하고 그 특징들이 얼마나 물감의 효과에 기여하고 있는지 살펴본 후 그에 걸맞은 물감 효과 생성 모델을 제안하였다. 물감의 물리적인 특징인 점탄성과 혼합성을 고려한 SPH 방식의 물감 시뮬레이션을 사용하였으며, 물감 효과의 디테일을 표현하는 새로운 방식의 물감 렌더링을 제안하였다. 물감 렌더링에서는 물감 표면, 물감과 희석제 내부의 염료, 종이 내부의 염료로 나누어 각 방법에 적합한 방식을 제안하였으며, 결과물을 렌더링 할 때에는 동시에 렌더링 함으로써 3가지 방식의 장점이 동시에 나타날 수 있도록 하였다. 또한 이 연구의 결과물은 이전 연구보다 뛰어난 설문지법을 통하여 입증하였다.

REFERENCE

- [1] W. Baxter, Y. Liu, and M.C. Lin, "A Viscous Paint Model for Interactive Applications," *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 15, Issue 3-4, pp. 433-441, 2004.
- [2] A. Bousseau, M. Kaplan, J. Thollot, and F. Sillion, "Interactive Watercolor Rendering with Temporal Coherence and Abstraction," *Proceeding of the 4th International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering*, pp. 141-149, 2006.
- [3] S.H. Cha, J.H. Park, J.H. Hwang, and J.Y. Noh, "An Efficient Diffusion Model for Viscous Fingering," *The Visual Computer*, Vol. 28, Issue 6-8, pp. 563-571, 2012.

- [4] N. Chu and C.L. Tai, "MoXi: Real-time Ink Dispersion in Absorbent Paper," *Proceeding of ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques Conference*, pp. 504-511, 2005.
- [5] C.J. Curtis, S.E. Anderson, J.E. Seims, K.W. Fleischer, and D.H. Salesin, "Computer-generated Watercolor," *Proceeding of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pp. 421-430, 1997.
- [6] J. Gregson, M. Krimerman, M.B. Hullin, and W. Heidrich, "Stochastic Tomography and Its Application in 3D Imaging of Mixing Fluids," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 52, Issue 4, pp. 1-10, 2012.
- [7] N.H. Kang, J.H. Park, J.Y. Noh, and S.Y. Shin, "Hybrid Approach to Multiple Fluid Simulation using Vol. Fractions," *Computer Graphics Forum*, pp. 685-694, 2009.
- [8] T. Laerhoven and F. Reeth, "Real-time Simulation of Watery Paint," *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 16, Issue 3-4, pp. 429-439, 2005.
- [9] S. Liu, Q. Liu, and Q. Peng, "Realistic Simulation of Mixing Fluids," *The Visual Computer*, Vol. 27, Issue 3, pp. 241-248, 2011.
- [10] T. Luft and O. Deussen, "Real-time Watercolor Illustrations of Plants using a Blurred Depth Test," *Proceeding of the 4th International Symposium on Non-photorealistic Animation and Rendering*, pp. 11-20, 2006.
- [11] J.H. Park, Y.H. Kim, D.H. Wi, N.H. Kang, S. Y. Shin, and J.Y. Noh, "Unified Handling of Immiscible and Miscible Fluids," *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 19, Issue 3-4, pp. 455-467, 2008.
- [12] S.H. Shin, H.R. Kam, and C.H. Kim, "Hybrid Simulation of Miscible Mixing with Viscous Fingering," *Computer Graphics Forum*, pp. 675-683, 2010.
- [13] B. Solenthaler and R. Pajarola, "Predictive-corrective Incompressible SPH," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 28, Issue 3, pp. 40:1-40:6, 2009.
- [14] M. Sun, Z. Wang, and J. Sun, "Physical Modeling Based Graphical Simulator of Water-ink Diffusion and Multi-stroke Superposition," *Multimedia Technology (ICMT), 2010 International Conference on*, pp. 1-7, 2010.
- [15] S. Xu, Y. Xu, S.B. Kang, D.H. Salesin, Y. Pan, and H.Y. Shum, "Animating Chinese Paintings through Stroke-based Decomposition," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 25 Issue 2, pp. 239-267, 2006.
- [16] M. You, T. Jang, S. Cha, J. Kim, and J.Y. Noh, "Realistic Paint Simulation based on Fluidity, Diffusion, and Absorption," *Computer Animation and Virtual Worlds*, Vol. 24, Issue 3-4, pp. 297-306, 2013.
- [17] K. Zeng, M. Zhao, C. Xiong, and S.C. Zhu, "From Image Parsing to Painterly Rendering," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 29 Issue 1, pp. 1-11, 2009.
- [18] Y. Zhu and R. Bridson, "Animating Sand as a Fluid," *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, Issue 3, pp. 965-972, 2005.
- [19] S.H. Seo and K.H. Yoon, "A Study on Stroke Based Rendering using Painting Media Profile," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 12, No. 11, pp. 1640-1651, 2009.
- [20] M.H. Han, "Research on the Expression of Ink-and-Wash Painting by using 3D Animation," *Journal of Korea Multimedia Society*, Vol. 13, No. 7, pp. 1105-1114, 2010.

유 미

2014년 한국과학기술원 문화기술
대학원 박사과정 졸업
2009년 한국과학기술원 문화기술
대학원 석사과정 졸업
현재 단국대학교 영화콘텐츠전문
대학원 연구교수

관심분야: 컴퓨터 그래픽스, 영화 특수효과, 비사실적인
렌더링