

융합연구를 위한 프랙털 생성의 Evo-Devo 생물학적 고찰

이유리, 김옥희, 김철희*
충남대학교 생물학과

Consideration of Evo-Devo in the Morphogenesis of Fractal Structures in Ammonites

Yu-Ri Lee, Oc-Hee Kim, Cheol-Hee Kim*
Department of Biology, Chungnam National University

요약 자연현상에서 발견되는 프랙털 (fractal) 구조는 자기 유사성 (self-similarity)의 반복된 형태로, 생명체의 발생과 기관 형성에서도 자주 관찰된다. 특히, 수많은 종류의 암모나이트에서 관찰되는 봉합선 (suture)의 복잡, 다양한 형태는 프랙털 생성에 대한 생물학적인 이해를 위한 좋은 연구소재이다. 본 연구에서는 희귀하게 초기 발생단계의 봉합선 구조가 매우 잘 보존된 *Eogaudryceras sp.*를 대상으로 봉합선 형성의 과정을 분석하고자 하였으며, 일반적으로 구하기 힘든 부위인 나선 (spiral) 중심부 1mm 이내의 현미경적인 관찰을 실시하였다. 아직 봉합선의 프랙털 구조 생성에 대한 생물학적인 기전은 아직 불분명한 상태이나, 본 연구를 통하여 암모나이트 발생초기에 프랙털 구조의 복잡성이 단계별로 분명한 차이가 있음을 발견하였다. 이러한 결과는 하나의 생명체 내에서 “Evo-Devo”의 여러 발생단계의 변화를 동시에 보여줄 수 있는 좋은 예시로서, 향후 프랙털 구조의 생물학적인 기전 연구 및 관련되는 다양한 융합학문에서의 접목과 활용이 기대된다.

• 주제어 : 프랙털, 융합, 암모나이트, 봉합선, 진화/발생

Abstract Fractal patterns are visible regularities of form found in the natural world. The mathematics of fractals can explain spiral growth patterns of self-similarity in organisms. For example, ammonites have complex but regular patterns of suture lines, resulting in a fractal-like display. In this study, a small region (less than 1mm diameter) of the spiral center of a rarely well preserved ammonite (*Eogaudryceras sp.*) was examined under microscope. Interestingly, we found a differential change of suture shapes at early stages of animal development providing a model for the study of Evo-devo (evolutionary developmental biology). Evo-devo is a convergence science born out of the recognition of complexity from interactions between generative and adaptive forces.

• Key Words : Fractal, Convergence, Ammonites, Suture, Evo-devo

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 필요성

프랙털 (fractal)은 일부 작은 조각이 전체와 비슷한 기하학적 형태를 말한다. 이런 특징을 자기 유사성 (self-similarity)이라고 하며, 자기 유사성을 갖는 기하학

*Corresponding Author : 김철희 (zebrakim@cnu.ac.kr)

Received June 21, 2017

Accepted August 20, 2017

Revised July 25, 2017

Published August 28, 2017

적 구조를 프랙털 구조라고 한다. 조각났다는 뜻의 라틴어 형용사 'fractus'이다. 프랙털 구조는 자연물에서 뿐만 아니라 수학적 분석, 생태학적 계산, 위상 공간에 나타나는 운동모형 등 곳곳에서도 발견되어 자연이 가지는 기본적인 구조이다. 복잡성의 과학은 이제까지의 과학이 이해하지 못했던 불규칙적인 자연의 복잡성을 연구하여 그 안의 숨은 질서를 찾아내는 학문으로, 복잡성의 과학을 대표하는 혼돈 이론에도 프랙털로 표현될 수 있는 질서가 나타난다. 프랙털은 수학적 도형으로도 연구되고 있다. 프랙털 기하학은 프랙털의 성질을 연구하는 수학 분야의 하나이다. 프랙털을 응용한 기술들은 인공지능, 시뮬레이션, 실험적 예술, 우주 분야 등 다양한 분야에 응용될 수 있으므로 융합학문에 적합한 연구 분야이다 [1].

암모나이트는 두족류의 연체동물로, 고생대 테본기에 나타나 중생대에서 가장 풍부하게 발견되는 화석으로, 나선의 껍질 (coiled shell), 복잡한 봉합선 (suture), 그리고 격벽 (septum)에 의해 구분된 기방 (air chamber)의 구조를 가지고 있다 [2,3,4]. 현존하는 앵무조개와 같은 조상에서 진화한 것으로 추정되며, 나선 (spiral) 형태의 각각의 기방은 상수인자 (constant factor)에 의해서 크기가 결정되고, 로그나선 (logarithmic spiral)에 의해 정렬되어 있다. Logarithmic spiral은 자연에서 발견되는 자기 유사성 (self-similarity)을 갖는 나선형 곡선으로 대표적인 프랙털 구조이다 [5]. 하지만, 복잡한 프랙털 구조의 생성에 대한 생물학적인 분자기전에 대한 연구는 세계적으로도 아직 불분명한 상태이다. 따라서, 다양한 종류의 암모나이트를 이용한 자기 유사성, 프랙털 구조 생성에 대한 생물학적인 이해는 중요한 학문적 가치를 가진다.

1.2 연구의 목적

대표적인 프랙털 구조를 가지는 암모나이트 봉합선의 생성에 관련한 생물학적인 기전연구를 위하여, 진화의 각 단계별로 다양한 종류의 암모나이트 (Nautiloids, Goniatites, Ceratites, Ammonites)를 비교분석 하고자 하였다. 희귀하게 잘 보존된 암모나이트 (*Eogaudryceras sp.*)를 대상으로 현미경적인 미세관찰을 통하여, 발생 초기단계부터의 봉합선의 생성 및 복잡한 형태의 프랙털 구조의 생성과정을 관찰하고자 하였다. 특히, 복잡한 봉합선의 형태는 암모나이트의 분류에서 중요한 지표로 이용되고 있다 [6]. 따라서, 본 연구를 통해 얻어지는 발생 초기에서의 봉합선 형태형성에 대한 새로운 정보는 프랙

털 구조생성에 대한 생물학적인 분자기전 연구의 좋은 실마리가 될 것이다.

2. 연구방법

2.1. 실험에 사용한 다양한 암모나이트 종류들

본 연구자는 지난 10여년 이상 수 백종의 다양한 암모나이트를 확보하였으며, 본 연구에서는 진화적 단계에서 가장 대표적인 분류군인 Nautiloids, Goniatites, Ceratites, Ammonites 중에서도 가장 일반적인 샘플의 봉합선 형태를 비교하였다. 특히, 현미경적인 미세분석에 사용한 암모나이트는 아주 보존이 잘된 희귀한 경우로, 형태적 기준 및 발굴지역 (Madagascar)을 기초로 *Eogaudryceras sp.* (Albian Early Cretaceous, 110 million years old)로 구분되었다.

2.2 발생 초기단계 봉합선의 현미경 미세관찰

현미경은 Leica, DFC450C 기종을 사용하였으며, 형태가 매우 잘 보존된 *Eogaudryceras sp.*의 나선 (spiral) 중심부 직경 1mm 내의 미세부분을 중점적으로 관찰하였다. 본 연구의 현미경 미세분석에 사용한 암모나이트는 예외적으로 매우 잘 보존되어 있었으며, 특히, 중심 부분이 작은 유리창 모양으로 투명하여 광학현미경 하에서 내부의 미세한 구조의 관찰이 가능하였다.

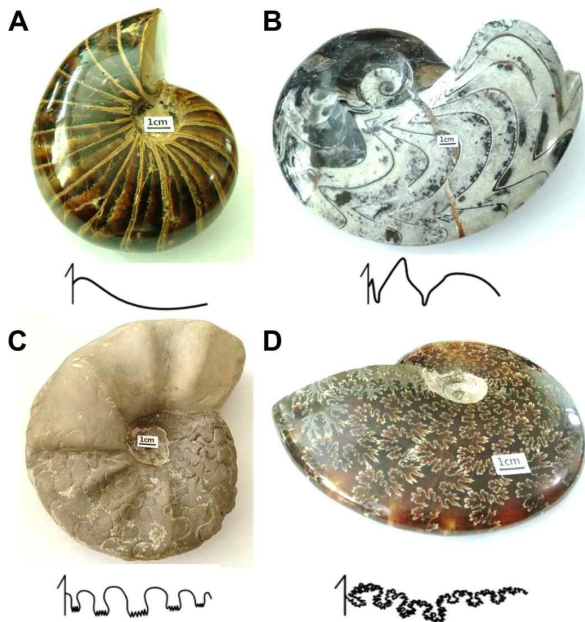
2.3 프랙털 구조의 봉합선의 비교 분석

복잡한 구조의 봉합선의 세밀한 관찰을 위하여, 확대된 사진을 바탕으로 구분이 선명한 하나의 봉합선을 따라가면서 선을 이어서, 각 암모나이트의 가장 대표적인 봉합선 이미지를 분리하였다. 발생초기의 미세구조의 경우에는, 암모나이트 나선의 제일 중심부를 기준으로 첫 번째, 두 번째 회전에 위치하는 발생초기의 봉합선의 형태는 직선상으로 아직 복잡한 수직상 구조가 없었다. 따라서, 처음으로 봉합선의 형태 변화가 일어나는 영역 (region 1)을 시작으로, 순차적으로 형태 변화의 구분이 분명해지는 대표적인 영역 (region 2, region 3)들로 나누어 비교분석하였다. 프랙털 구조의 봉합선이 분명한 신체에 해당하는 부분을 "region 4"로 설정하였다.

3. 연구결과

3.1 진화적 단계에 따른 봉합선의 형태 변화

진화적 단계 및 형태학적 변화에서 가장 초기단계인 Nautiloids를 시작으로, Goniatites, Ceratites, Ammonites 중에서 가장 대표적인 하나씩의 샘플을 대상으로 봉합선의 형태를 비교하였다 [Fig. 1]. Nautiloid의 봉합선은 거의 직선형으로 가장 단순한 형태였으며, Goniatite, Ceratite 등의 진화과정을 거치면서 점진적으로 복잡하게 변화하면서, Ammonite에서 가장 복잡한 형태의 전형적인 프랙털 구조의 봉합선이 관찰되었다.

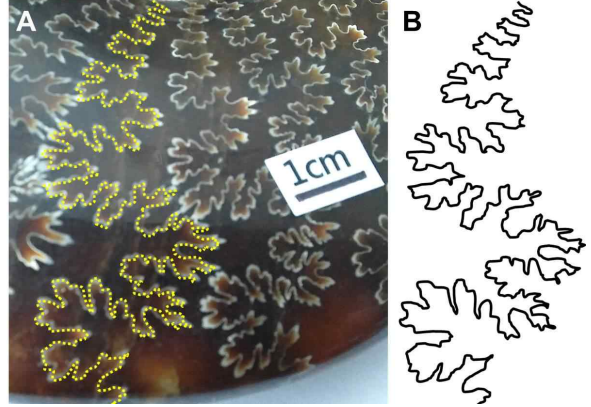


[Fig. 1] Pictures of unshelled ammonite species, showing the evolutionary complexity of fractal-like structures in their suture lines. A, a nautiloid species. B, a goniatite species. C, a ceratite species. D, an ammonite species. Schematic diagram of suture lines is also shown in the bottom of each picture. Scale bar, 1cm.

3.2 Ammonite 봉합선의 복잡한 프랙털 구조

진화적으로 가장 최근에 해당하는 Ammonite류에서 가장 복잡한 형태의 봉합선이 관찰되었으며, 하나의 봉합선을 대상으로 이미지를 추출해 보았다. Fig. 2A의 경우처럼, 하나의 봉합선을 선으로 이어서 Fig. 2B처럼 분석이 용이한 그림으로 나타내었다. 외형적으로는 매우 복잡해 보이지만, 자세히 보면 수지상 (dendritic pattern)

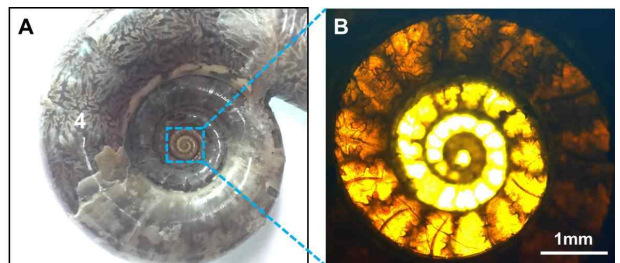
의 일정한 형태, 즉 자기 유사성 (self-similarity)의 반복된 형태를 관찰할 수 있다. 이는 전형적인 프랙털 구조라고 할 수 있다.



[Fig. 2] Magnification of an ammonite shown in Fig. 1D, showing fractal-like structure of suture lines. A suture is the line of intersection between the ammonite's shell and its septa. A, one suture line is traced by a dotted line. B, drawing of a dendritic pattern of suture line in A. Scale bar, 1cm.

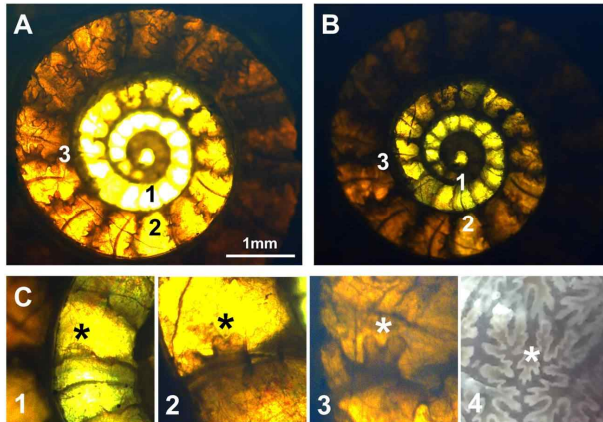
3.3 발생 초기단계의 봉합선의 형태형성 관찰

보존상태가 매우 양호한 희귀한 암모나이트 (*Eogaudryceras sp.*)를 대상으로 현미경적인 미세관찰을 시도하였다. 일반적인 암모나이트의 경우는 대부분 중심 부분이 파손된 경우가 많으며, 파손되지 않았더라도 암석화 상태에서 미세부분을 손상 없이 노출시키는 일이 쉽지 않다. 이 특이한 암모나이트의 경우는 특히 나선 중심의 미세한 부분 (수 mm)이 투명 창처럼 되어 있어서 내부구조를 용이하게 관찰할 수 있었다 [Fig. 3].



[Fig. 3] A, picture of an *Eogaudryceras sp.* used in this study. This rare ammonite sample was very well preserved to the very center on both sides. B, magnification of a transparent center region (4mm diameter) in A. Scale bar, 1mm.

손상이 없는 암모나이트의 경우는 나선의 중심부가 발생초기 형태의 흔적으로 그대로 남아 있게 된다. 현미경의 광도를 조절함으로써, 중심부 나선들에서의 봉합선의 형태를 세밀하게 관찰하였다. 나선의 제일 중심부를 기준으로 첫 번째, 두 번째 회전에 위치하는 봉합선의 형태는 직선상으로 아직 복잡한 수지상 구조를 관찰할 수가 없었다 [Fig. 4]. 처음으로 봉합선의 형태 변화가 일어나는 영역을 “region 1”으로 표시하였으며, 순차적으로 봉합선의 형태 변화의 구분이 분명해지는 영역을 “region 2”, “region 3”로 표시하여 성체에 해당하는 부분 “region 4”와 비교분석 하였다. 이에 따른 결과는 성체 부분에서 일반적으로 보여지는 복잡한 형태의 프랙털 구조가 발생초기에서는 아직 그 형태가 이루어지지 않았음을 암시하는 것으로 중요한 발견이라고 말할 수 있다.

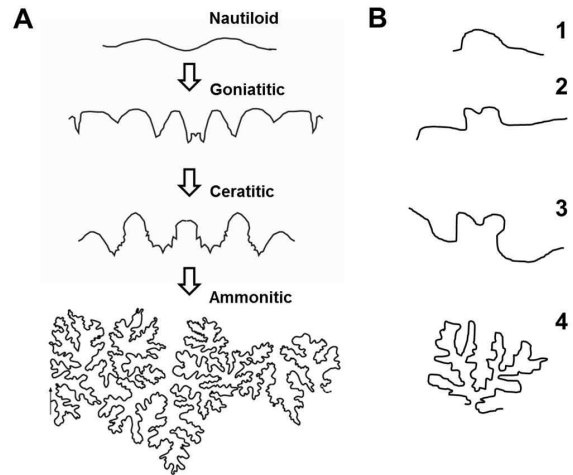


[Fig. 4] Morphogenesis of septal sutures in early chambers. A, examination of early chambers under light microscope. B, same microscopic field shown in A. To acquire a better image of region “1”, lower intensity of light was used, compared to A. C, high magnification of each chamber in regions “1”, “2”, and “3”. Region “4” in Fig. 3A was also shown for structural comparison. Growing complexity of the suture shape (asterisks) is visible in different developmental stages of each chamber (spiral order from the center).

3.4 발생과 진화에 따른 봉합선의 형태변화 비교분석

그동안 복잡한 봉합선의 프랙털 구조가 언제부터 시작하는지 분명하지 않았으나, 본 연구를 통하여 봉합선의 형태변화는 발생초기의 일정시기부터 시작되며, 점진적으로 구조의 복잡성이 진행됨을 관찰하였다. 이는 매

우 중요한 발견으로서, 하나의 동물 개체 내에서 일어나는 발생과정상의 봉합선의 형태변화가, 진화과정의 각 단계에 위치해있는 각기 다른 여러 종류의 암모나이트에서 관찰되는 봉합선의 형태변화와 매우 유사하다는 점이다 [Fig. 5B는 Fig. 4C의 모식도].



[Fig. 5] An Evo-Devo model for the evolution and development of complexity in fractal-like suture formation. A, evolutionary aspect of complexity in suture formation from Nautiloids to Goniatic, Ceratic, and Ammonites. B, developmental aspects of complexity in suture morphogenesis from early chambers (regions, “1”, “2”, and “3” in Fig. 4C.) to late chambers (region “4”) in a single animal.

4. 고찰

화석으로만 남아있는 암모나이트의 발생에 대한 연구는 매우 제한적이지만, 그나마 형태가 잘 보존된 화석 샘플에 대한 현미경적 연구와 함께 현재 살아있는 앵무조개 (Nautilus)와의 비교연구를 통해 일부 기초적인 연구들이 부분적으로 진행되어 왔다 [7].

암모나이트 봉합선의 프랙털 구조는 진화적으로 단순한 직선형 구조에서 매우 복잡한 수지상 구조 (dendritic patterns)로 변하고 있다 (Nautiloids > Goniatic > Ceratic > Ammonites). 하지만, 복잡한 프랙털 구조의 생성에 대한 생물학적인 기전은 아직 불분명하며, 여러 가지 가설이 제시되고 있다. 그 중 하나는, 기존의 봉합선 구조가 주형 (template)이 되어 다음의 봉합선의 형태형성에 영향을 미친다는 것이고 [8], 그 외에 “tie-point

model [9]”, “viscous fingering model [10]” 등이 있다. 가장 최근에는 Scientific Reports (2016)에 보고된 것으로, Shinya Inoue 연구팀은 새로운 X-ray micro-computed tomography (CT) 촬영기법으로 암모나이트 화석 내부의 3차원적 미세구조를 분석함으로써, 먼저 형성된 봉합선의 구조와 관계없이 새로운 봉합선이 자발적으로 (autonomous) 생성될 수도 있다는 것이다 [11]. 이러한 결과들은 물리적인 성질의 작용보다는, 동물의 형태형성에서 기본적으로 작용하고 있는 유전자의 작용과 같은 생물학적인 요소들 (morphogens)가 관여하고 있을 가능성을 제시하는 것이다 [12].

본 연구를 통해서 얻은 결과에 따르면, 암모나이트의 발생초기의 일정한 단계들에서 봉합선의 형태변화가 급격하게 일어나며, 이러한 봉합선의 모양 및 프랙털 구조의 복잡성의 변화는 발생 시기별로 순차적으로 서로 연관성이 있어 보인다. 따라서, 이러한 결과들로부터 “Evo-Devo”의 관점에서 간단하면서도 흥미로운 예시로 제시할 수 있다. 헤켈 (Ernst Haeckel, 1834-1919)의 “생물 개체의 발생은 계통 진화의 과정을 되풀이 한다 (ontogeny recapitulates phylogeny)”는 “Evo-Devo”의 가장 핵심적인 이론이다. 인간을 포함한 동물의 초기 발생과정을 관찰해보면, 단세포에서 시작하여 포배기, 낭배기의 발달과정을 거치면서 형태학적으로 어류, 양서류, 파충류, 조류, 포유류 등과의 진화적인 연관성을 잘 보여주고 있다. 특히, 암모나이트의 경우에는 발생초기의 구조물이 단단한 껍질의 기방 (air chamber)으로 성체에서도 본래의 형태가 그대로 남아있다. 봉합선의 프랙털 구조의 변화가 발생초기부터 성체까지 모든 발달 단계별 과정의 흔적이 그대로 잘 보존되어 있다. 즉, 하나의 동물 개체 샘플 내에서 초기발생부터 성체까지 발달의 전 과정을 동시에 관찰할 수 있는 유용한 생물학적 연구소재라고 할 수 있다. 최근 대규모 유전체 분석기술의 발달로 인하여, 다양한 생물종을 대상으로 비교유전체학적 연구가 진행되고 있으며, 두족류의 진화를 포함한 생명현상에 대한 새로운 정보들이 속속 밝혀지고 있다 [13]. 앞으로 이러한 노력들과 함께 프랙털 생성과정에 대한 생물학적인, 그리고 유전자 수준에서의 이해가 가능할 것이며, 향후 프랙털 현상과 관련되는 다양한 융합학문의 접목과 활용이 기대된다 [14,15,16,17,18,19,20].

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by the research fund of Chungnam National University, Republic of Korea. I thank Drs. Didier Bert and Shinya Inoue for sharing ammonite information (Dr. Didier Bert, Conservateur de la Réserve naturelle nationale géologique de Haute-Provence, France; Dr. Shinya Inoue, Graduate School of Frontier Bioscience, Osaka University, Japan).

REFERENCES

- [1] Wikipedia, <https://ko.wikipedia.org/>
- [2] M. A. Hassan, G. E. G. Westermann, R. A. Hewitt & M. A. Dokainish, “Finite-element analysis of simulated ammonoid septa: septal and sutural complexities do not reduce strength”, *Paleobiology*, Vol. 28, pp. 113 - 126, 2002.
- [3] F. V. De Blasio, “The role of suture complexity in diminishing strain and stress in ammonoid phragmocones”, *Lethaia*, Vol. 41, pp. 15 - 24, 2008.
- [4] T. L. Daniel, B. S. Helmuth, W. B. Saunders & P. D. Ward, “Septal complexity in ammonoid cephalopods increased mechanical risk and limited depth”, *Paleobiology*, Vol. 23, pp. 470 - 481, 1997.
- [5] G. Boeing, “Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction”, *Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 37, 2016.
- [6] J. Kullmann & J. Wiedmann, “Significance of sutures in phylogeny of ammonoidea”, *Paleontological Contributions*, Vol. 47, pp. 1 - 32, 1970.
- [7] K. Baets, N. Landman & K. Tanabe, “Ammonoid Embryonic Development” in “Ammonoid Paleobiology: From anatomy to ecology”, Springer, Vol 43, pp. 113 - 205, 2015.
- [8] P. D. Ward, L. Greenwald & Y. Magnier, “The chamber formation cycle in *Nautilus macromphalus*”, *Paleobiology*, Vol. 7, pp. 481 - 493, 1981.
- [9] A. Seilacher, “Why are nautiloid and ammonite sutures so different?”, *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, Vol. 177, pp. 41 -

69, 1988.

[10] J. M. García-Ruiz & A. Checa, "A model for the morphogenesis of ammonoid septal sutures", *Geobios*, Vol. 26, pp. 157 - 162, 1993.

[11] S. Inoue and S. Kondo, "Suture pattern formation in ammonites and the unknown rear mantle structure", *Scientific Reports*, Vol. 6, pp. 33689, 2016.

[12] Ø. Hammer, "The development of ammonite septa: an epithelial invagination process controlled by morphogens?", *Historical Biology*, Vol. 13, pp. 153 - 171, 1999.

[13] N. Liscovitch-Brauer, S. Alon, H. T. Porath, B. Elstein, R. Unger, T. Ziv, A. Admon, E. Y. Levanon, J. J. Rosenthal, E. Eisenberg, "Trade-off between Transcriptome Plasticity and Genome Evolution in Cephalopods", *Cell*, Vol. 169, No. 2, pp. 191-202, 2017.

[14] M. S. Lee & H. J. Kim, "The remineralization effect of topical fluoride agents using confocal laser scanning microscope on artificial enamel caries aspects of convergence observation", *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 8. No. 6, pp. 139-145, 2017.

[15] Y. H. Seung, "Evaluation of Surface Radiation Dose Reduction and Radiograph Artifact Images in Computed Tomography on the Radiation Convergence Shield by Using Sea-Shells", *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 8. No. 2, pp. 113-120, 2017.

[16] J. H. Choi, "Preliminary Development of Pinwheel Model Created by Convergent Truss Structure with Biological DNA Structure", *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 7. No. 4, pp. 181-190, 2016.

[17] G. C. Yang, "Integration Scheme of Gene Information based on Anatomical Structure", *Journal of digital Convergence*, Vol. 13, No. 2, pp. 153-158, 2015.

[18] S. H. Kim, "Convergence of Fluid Dynamics and Computer Simulation for the Internal Investigation of Fuel Cell", *Journal of digital Convergence*, Vol. 14, No. 6, pp. 245-251, 2016.

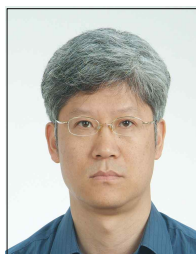
[19] K. N. Kim & M. J. Lee, "Artistic Emotional

expression of Image distortion based on the magnetic force and user Immersion Through the Convergence of Art and Science Technology", *Journal of digital Convergence*, Vol. 13, No. 8, pp. 457-463, 2015.

[20] J. S. Kim, "A study of Histological changes by a -tocopherol in the hepatic fibrous tissue", *Journal of the Korea Convergence Society*, Vol. 8. No. 4, pp. 123-129, 2017.

저자소개

김 철 희(Cheol-Hee Kim) [정회원]



- 1992년 2월 : 경북대학교 유전공학과 (이학석사)
- 1997년 3월 : 일본 오사카대학 의학부 (의학박사)
- 1998년 1월 ~ 2001년 2월 : 미국 국립보건원 (NIH)

• 2001년 2월 ~ 현재 : 충남대학교 생물과학과 교수
 <관심분야> : 발생유전학, 뇌신경질환, 유전체 기능연구

김 옥 희(Oc-Hee Kim) [정회원]



- 2012년 2월 : 충남대학교 생물과학과 (학사)
- 2014년 2월 : 충남대학교 대학원 생물과학과 (석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 생물과학과 박사과정

<관심분야> : 뇌신경질환, 유전체 기능연구

이 유 리(Yu-Ri Lee) [정회원]



- 2010년 8월 : 충남대학교 생물과학과 (학사)
- 2014년 2월 : 충남대학교 대학원 생물과학과 (석사)
- 2015년 9월 ~ 현재 : 충남대학교 대학원 생물과학과 박사과정

<관심분야> : 뇌신경질환, 유전체 기능연구