

무령왕릉에 사용된 전돌과 재현 전돌의 재료학적 특성

권양희 | 홍성길¹
서울대학교 건축학과

Material Characteristics of Traditional Bricks used in the Royal Tomb of King Muryeong, Gongju, Korea and Its Reproduction Bricks

Yang Hee Kwon | Sung Gul Hong¹

Department of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

¹Corresponding Author: sglhong@snu.ac.kr, +82-2-880-8360

초록 이 연구에서는 무령왕릉에 사용된 전돌의 재료 특성에 관하여 고찰하였다. 압축 강도, 열전도도, 흡수율 등의 재료 특성은 비파괴 실험으로 측정하였다. 그 중에서 무령왕릉 전돌의 압축강도는 초음파 측정법과 흡수율을 이용하여 추정하였다. 실험 결과, 초음파 속도를 이용한 압축강도는 표면이 고르지 못하고 두께 편차가 큰 문화재 시편 특성상 표준편차가 크게 나타났다. 그러나 흡수율을 적용한 압축강도 값 (28.69 MPa ~ 33.19 MPa)은 일반 콘크리트의 압축강도 수준으로 편차가 낮게 나타났다. 따라서 초음파 속도를 이용하는 방법보다 흡수율을 이용하는 방법이 무령왕릉 전돌의 압축강도 예측법으로 보다 적합한 것으로 판단된다. 무령왕릉 전돌의 열전도도는 시료의 표면상태와 두께에 영향을 받지 않는 Mathis TCi를 이용하여 측정하였으며, 평균 1.58 W/mK로 흙에 근접한 값을 지닌다. 무령왕릉 전돌의 흡수율과 수분 잔류율은 각각 1.6 % ~ 15 %, 0 % ~ 0.7 %의 범위를 나타냈다.

중심어: 무령왕릉, 전돌, 압축강도, 열전도도, 흡수율

ABSTRACT This study investigates the material properties of the traditional bricks used in the royal tomb of King Muryeong. Compressive strengths, thermal conductivities, absorptance and the rate of residual moisture are measured by non-destructive experiments. Compressive strength of the traditional bricks is estimated by using the ultrasonic wave velocity and the absorptance. Based on the experimental results, the predicted compressive strengths using the ultrasonic wave velocity are unsuitable for the traditional bricks due to the rough surface and thickness variation of the specimens. The strengths using the absorptance are more suitable than those using the velocity because the predicted average strengths (28.69 MPa ~ 33.19 MPa) are close to building materials like normal strength concrete. In addition, the methods using the absorptance are not influenced by surface and thickness conditions of the specimens. The average thermal conductivities of the bricks measured by using Mathis TCi are close to those of soils (1.58 W/mK). The absorptance and the rate of residual moisture of the bricks are 1.6 % ~ 15 %, 0 % ~ 0.7 %, respectively.

Key Words: The Royal Tomb of King Muryeong, Traditional Brick, Compressive Strength, Thermal Conductivity, Absorptance

1. 서론

백제 전축분(전돌로 축조된 무덤)은 웅진 천도 후 새로이 도입된 것으로 중국 남조의 묘제를 받아들여 당시 현실에 적용시킨 것이다. 공주의 송산리 고분군 내에 있는 무령왕릉과 송산리 6호 벽화고분이 대표적인 것으로 알려져 있으며, 이들 고분의 배치와 내부 구조는 Figure 1과 같다.

송산리 고분군은 조선총독부에 의해 1927년에 처음 조사되었으며 이후 1971년 무령왕릉의 발굴로 인해 웅진시 공주 지역에서 재위하던 왕들을 위해 만든 유일한 백제 왕릉지역인 것으로 확인되었다.

무령왕릉의 발견 후 송산리 고분군에 관한 관심이 증대되었으며, 이는 곧 백제 고분의 관심으로 이어졌다. 이를 계기로 무령왕릉과 송산리 6호분에 관한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 연구 주제로는 무령왕릉과 송산리 6호분의 선후관계(Yoon, 1991), 백제 고분벽화와 고구려 고분벽화의 비교(Lee, 1997), 낙랑 및 고구려 석실분과의 연계성(Lee, 2005; Jung, 2011) 그리고 중국 남조묘와의 비교

(Okauchi, 1980) 등이 있다. 그러나 백제 전축분에 대한 건축학적 고찰은 문헌과 고분의 형태를 기반으로 한 고분의 구조(Suh *et al.*, 2000) 및 송산리 고분군의 안정성(Suh *et al.*, 1997) 등의 주제로 일부 연구자들에 의해 수행되었지만, 고분의 현황과 기초 지반 조사 등과 더불어 전축분에 직접적으로 영향을 주는 백제 전돌의 물성에 관한 연구는 극히 드물다. 그 외에 지구 물리탐사를 이용하여 백제 고분 축조방법을 고찰한 연구(Suh *et al.*, 1997)도 있지만, 이 또한 지반 특성을 이용하여 고분과 지반의 축조 관계를 고찰한 것에 그치고 있어 공학적 측면에서의 고찰은 여전히 미미한 상태이다.

백제 전돌과 구성 재료 및 제작 방식이 유사한 근대 점토벽돌로 지어진 근대 건축물의 사례를 살펴보면, 문화재에 사용된 건축 재료에 대한 과학적인 분석 및 체계적인 연구 과정 없이 수행된 무분별한 보수 작업으로 인한 문화재의 역학적 안정성과 장기적인 내구성에서 많은 문제점이 보고되고 있다(Lee and Kim, 2001). 그 예로 명동성당 보수공사시 벽돌표면 일부를 절삭한 후 적색 페인트를 도포하여 더 큰 피해를 입힌 사례가 있으며 그 외에도 조적조 건물의 잘못된 보수공사로 인해 오히려 문화재에 심각한 피해를 입힌 사례가 적지 않다(Ahn and Kim, 2013). 문화재는 한 번 잘못된 보수작업이 시행되면 원상복구가 불가능하므로 안정적인 보존 및 유지관리를 위해 우선 기존의 재료에 대한 연구가 충실히 이루어진 후 이를 토대로 보수·보강이 이루어져야 한다. 특히, 현재까지 발견된 것들 중 무령왕릉은 도굴되지 않은 상태로 발견된 유일한 백제 고분이고, 송산리 6호분은 유일한 백제의 벽화고분인 점을 고려할 때, 이들 고분의 주 재료인 전돌의 특성이 사전에 밝혀져야 혹시 모를 미래의 재난과 환경 변화로 인한 보수·보강 시 보다 즉각적이고 합리적으로 대처할 수 있다.

건축구조기준(2009)에서도 조적조 문화재의 구조기준을 명시하고 있다. 특히, 보수·보강 공사 시 기존 벽돌의 성능이 저하되지 않는 방법을 선택하여야 하며, 손상이 심한 벽돌은 원래 벽돌과 색상, 강도, 흡수율이 동일한 벽돌로 교체해야 한다고 규정하고 있다. 이러한 기준을 적용하기 위해서는 전돌의 기초물성에 대한 사전정보는 필수 사항이다. 따라서 이 연구에서는 무령왕릉에 사용된 전돌의



(a) The Songsanri tombs site



(b) Royal tomb of King Muryeong

(c) Tomb No.6 at Songsanri

Figure 1. Masonry Tomb of Baekje Dynasty.

Table 1. Outline of traditional bricks of the royal tomb of King Muryeong.

		Color			Size(mm)			Weight(g)	Bulk density	
		Number	R	G	B	Width	Length			Thickness
The bricks of the royal tomb of King Muryeong	M1	#5E594E	94	89	78	64.3	79.6	35.7	309.22	2.02
	M2	#3F3F3C	63	63	60	62.0	61.2	38	161.66	2.30
	M3	#4B4B48	75	75	72	56.9	66.6	36	252.77	2.18
	M4	#423E38	66	62	56	44.4	73.4	44.6	130.45	2.07
	M5	#34312E	52	49	46	77.6	80.4	33	461.97	2.51
	M6	#4F4335	79	67	53	51.3	62.7	39.3	207.29	2.34
	M7	#4F4835	79	72	53	44.4	65.8	75.9	100.72	2.32

Table 2. XRF analysis results.

	Original soil of the reproduction bricks	The bricks of tomb No.6 at Songsanri (Gongju National Museum, 2007; Jang, 2013)	The bricks of royal tomb of King Muryeong (Gongju National Museum, 2007; Jang, 2013)
SiO ₂	62.22	66.37	63.56
Al ₂ O ₃	21.75	20.97	20.57
Fe ₂ O ₃	3.41	6.39	6.16
TiO ₂	0.61	0.92	0.91
CaO	1.99	0.49	0.47
MgO	0.65	1.29	1.19
Na ₂ O	0.75	0.69	1.67
K ₂ O	1.55	2.74	2.26
MnO	-	0.04	0.03
P ₂ O ₆	-	0.14	0.12
LOI	-	0.20	3.47
Total	92.93	100.20	99.40

재료적 특성을 분석하기 위해 다양한 실험을 수행하고, 기존 연구에서 수행한 실험 결과와 비교하여 문화재 재료 특성에 관한 신뢰성을 확보하고, 문화재 보수·보강 재료 제작시 필요한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 연구 대상 및 방법

2.1. 연구 대상

전돌의 재료 특성을 알아보기 위해 Figure 2와 같이 무령왕릉에서 출토되어 국립공주박물관에 보관중인 전돌 7개를 연구 용도로 손상 없이 일정기간 대여하는 조건으로 반출 허가를 받았다.

실험에 사용된 전돌의 색, 크기, 무게, 겉보기 비중을 Table 1에 나타냈다. 전돌의 색은 웹 색도체계 값을 이용하여 나타내었고, 크기는 비정형으로 정확한 크기는 알 수 없으나 시료의 가장 넓은 면의 가로와 세로를 측정하여 대략



Figure 2. Samples (Traditional bricks of the royal tomb of King Muryeong).

적인 크기를 나타냈다. 가비중은 전돌의 무게를 그 겉보기 부피와 같은 부피를 가진 증류수의 무게로 나눈 값을 사용하여 나타냈다. 건축 재료의 대표적 물성 값인 압축강도를 알기 위해서는 재료에 하중을 가하여 응력과 변형률을 측정하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 시료는 파손이 불가능하므로 기존 연구에서 수행한 송산리 6호분 전돌과 무

Table 3. Production process of the reproduction bricks.

Oder of production	Explanation
Aging original soil	Spraying water on original soil and leaving the soil unused. (3 day-4 day)
Knead original soil	Mixing water and the clay to make pugging.
Forming	Forming using a wooden frame.
Drying	Drying alternately in shade and sunny place. (7 day-14 day)
Brick loading of the kiln	The dry bricks loading in the kiln.
Firing of the kiln	Baking the bricks in the kiln(1000℃-1050℃) during 1 day-2 day.
Taking out the bricks in the kiln	Cooling down the kiln(2 day)and taking out the bricks in the kiln.
Completion	Completion.

령왕릉 전돌의 물성 분석 결과(Jang, 2013)를 토대로 원토를 선정하였으며, 재현 전돌 제작에 사용된 원토와 기존 백제 전돌의 XRF 분석 결과는 Table 2와 같다. 원토의 XRF 분석에 사용된 기기는 Shimadzu사의 XRF-1700이다. 선정된 원토는 전통방식에 따라 압축강도 실험용 시편을 만들어 하중을 가하는 간접적인 방법을 사용하였다. 이를 위해 수경성 시멘트 모르타르 압축강도 측정용 시편(KATS, 2007)과 동일한 크기(50×50×50 mm)의 전통수제 전돌 5개가 제작되었다.

재현 전돌의 제작은 한국전통문화학교의 중요무형문화재 제91호 제와장 전수자를 통해 진행되었다. 국내에서는 고대 전돌의 제작기법을 추정할 수 있는 문헌이 거의 없는 반면 중국에는 전돌의 제작 방법을 상세히 기록한 문헌인 송대의 이체에 의해 쓰여져 1103년에 간행된 「영조법식」(Li, 1035-1110)과 명대의 송응성에 의해 1637년에 기술된 「천공개물」(Song, 2009)이 있다. 위의 두 문헌에 기술된 방식을 참고하여 나무재질의 성형틀을 사용하였다. 또한 전통방식에 따라 인력으로 제작되었으며, 소성은 고층에 의해 복원된 전통가마에서 진행되었다. 자세한 제작 과정은 Table 3에 나타났다.

2.2. 연구 방법

무령왕릉 전돌의 재료 특성을 알기 위해 초음파 속도, 압축강도, 열전도도, 흡수율 및 수분 잔류율 시험을 진행

Table 4. Design of experiments.

Classify	Experiments	Sample
Compressive strength	Ultrasonic wave velocity	The bricks of royal tomb of King Muryeong (7)
	Compressive strength	The reproduction bricks (5)
Physical properties	Thermal conductivity	The bricks of royal tomb of King Muryeong(7)
	Absorptance	The bricks of royal tomb of King Muryeong(7)
	Residual rate of moisture	The bricks of royal tomb of King Muryeong (7)

하였다. 문화재의 보호를 위해 실험은 기본적으로 비파괴로 진행되었으며, 재현 전돌에 한해서만 파괴 실험을 진행하였다. 이상의 실험 계획은 Table 4에 정리하였다.

2.2.1. 초음파 속도(KS F 2731)

건축 문화재의 훼손을 막고 체계적인 보존 방안을 정립하기 위해서 재료의 강도 평가는 반드시 수행 되어야한다. 그러나 시료에 손상을 주어서는 안되므로 주로 초음파 속도법이 비파괴 강도 평가 시험법으로 사용된다. 선진국들은 자국의 문화재를 보다 과학적이고 체계적으로 보존하기 위해 비파괴법을 이용한 진단 및 이에 관한 연구를 활발히 진행하고 있으며(Fitzner, 2004; Christaras, 2009), 국내에서도 비파괴 시험법이 문화재 연구에서 많이 수행되고 있다.

초음파 속도법은 측정하고자 하는 시료에 탐촉자를 접촉시켜 초음파의 통과 소요시간을 측정하여 모체의 강도를 예측하는 비파괴 실험법이다.

초음파 속도 측정시 시료의 측정면이 거칠거나 이물질이 부착된 경우 초음파의 감쇠현상이 일어나 측정 불능, 펄스의 오독 등이 발생한다. 따라서 일반적으로 그리스나 파라핀 등의 접촉제로 공극을 충전하여 감쇠를 억제시킨 후 측정한다.

그러나 이 연구에서는 재현 전돌에만 접촉제로 젤 타입의 수용성 글리세린(Couplant)를 사용하였으며, 무령왕릉 전돌에는 접촉제를 사용하지 않고 초음파 속도를 측정하였다. 접촉제 미사용으로 인한 오차를 줄이기 위하여 출토된 무령왕릉 전돌을 재현한 전통수제 전돌의 접촉제 사용 유무에 따른 초음파 속도 측정결과를 이용하여 보정계수

를 산정하였으며, 이를 무령왕릉 전돌에 적용하였다. 보정 계수 산정을 위한 재현 전돌의 초음파 속도 측정은 압축강도 시험 후에 진행하였다. 따라서 압축강도 측정 시 사용된 시편과는 별도로 재현 전돌 그룹에서 임의로 선택된 3편의 전돌을 시편으로 사용하였다. 이 실험에서 영국 CNS Farnell사의 PUNDIT-plus를 초음파 측정기로 사용하였으며, 일부 무령왕릉 전돌의 단면이 50 mm 이하이기 때문에 표준 탐촉자(접촉면적: 50 mm)의 사용이 불가능하여 원뿔형 탐촉자를 사용하였다.

초음파 속도(v_p)는 식 1과 같이 시편의 길이(l)를 초음파 펄스의 전파 시간(t)으로 나눈 값이며, Figure 3과 같이 총 5회 측정 후 평균값을 초음파 속도로 결정하였다.

$$v_p(\text{km/sec}) = \frac{l}{t} \dots (1)$$

v_p : 초음파 속도(km/sec) l : 투과 거리(km) t : 측정 시간(sec)

재현 전돌에 접촉제를 사용하여 측정한 초음파 속도는



(a) Measuring equipment (b) Measuring method
Figure 3. Equipment and method for ultrasonic wave velocity measuring.

Table 5. Measured results of ultrasonic wave velocity.

Sample	Classify	Ultrasonic wave velocity (km/sec)		A/B
		Used a contact agent (A)	Unused a contact agent(B)	
The reproduction bricks	H6	1.09	1.06	1.03
	H7	1.09	1.01	1.08
	H8	1.16	1.12	1.04
	Mean	1.11	1.06	1.047
	Standard deviation	0.09	0.10	0.026
	Coefficient of variation	0.08	0.09	0.025

Table 5와 같이 평균 1.11 km/sec이다. 반면 접촉제를 사용하지 않고 측정한 초음파 속도는 평균 1.06 km/sec로 접촉제를 사용한 값보다 4.7 % 낮게 나타났다. 따라서 무령왕릉 전돌의 초음파 속도는 접촉제 미사용으로 인한 오차를 보정하기 위한 보정계수는 1.047을 곱하여 최종 결정하였다.

2.2.2. 압축강도(KS L 4201)

압축강도 측정을 위한 파괴 실험은 재현 전돌만을 대상으로 진행하였다. 실험결과 값과 초음파 속도의 상관관계를 무령왕릉 전돌에 적용하는 방식으로 압축강도를 추정하였으며, 추정된 무령왕릉 전돌의 압축강도 값과 기존의 근대 점토벽돌의 압축강도 제안식에 전돌의 흡수율과 초음파 속도를 대입하여 비교하였다. 기존 연구에서 근대 점토벽돌의 압축강도를 예측한 식을 살펴보면, Son(2010)은 근대건축물(1909, 1937) 2종에 사용된 점토벽돌 4종과 현대벽돌 1종을 사용하여 점토벽돌의 흡수율(X)과 압축강도(F)의 상관관계, 그리고 초음파 속도(V)를 통해 점토벽돌의 압축강도(F) 예측식을 식 2, 3과 같이 제안하였다.

$$F = -3.380X + 57.43 (R^2 = 0.809) \dots (2)$$

$$F = 1.087e^{1.233V} (R^2 = 0.663) \dots (3)$$

Kwon *et al.*(2011)은 근대 건축물(1905 ~ 1937) 6종에 사용된 점토벽돌 8종과 현대 벽돌 1종을 사용하여 흡수율(X)과 압축강도(F)와의 상관관계, 그리고 초음파 속도(V)에 따른 압축강도 예측식을 식 4, 5와 같이 제안하였다.

$$F = 64.157e^{-0.131X} (R^2 = 0.707) \dots (4)$$

$$F = 12.392V - 10.748 (R^2 = 0.437) \dots (5)$$

Ahn and Kim(2013)은 근대 건축물(1905 ~ 1943) 8종에 사용된 붉은 벽돌 12종을 대상으로 소성기술에 기인한 발색특성과 제반 물성 등을 과학적으로 고찰하였으며 흡수율(X)과 압축강도(F)의 상관관계를 식 6과 같이 나타냈다.

$$F = 71.56e^{-0.13X} (R^2 = 0.675) \dots (6)$$

점토벽돌의 압축강도는 소성온도, 공극률, 흡수율, 초음파 속도 등 다양한 요인들과 관련이 있으며, 특히, 식 3과

식 5와 같은 문화재 압축강도 추정법으로 많이 사용되는 초음파 속도법의 경우 결정계수(R^2)가 두 연구에서 각각 66.3 %, 43.7 %로 나타나 상관성이 다른 요인들을 이용한 경우 보다 높지 않은 것을 확인 할 수 있다.

재현 전돌의 압축강도(σ)는 최대하중(P)을 시료의 단면적(A)으로 나눈 값으로 Figure 4와 같이 측정된 후 식 7을 통해 계산되었다.

$$\sigma(\text{MPa}) = \frac{P}{A} \dots \dots (7)$$

σ : 압축 강도(MPa) P : 최대하중(N) A : 시료의 단면적(mm²)

2.2.3. 열전도도

무령왕릉 전돌의 열전도도 측정은 Figure 5와 같은 열전도도 측정 장비(Mathis TCi)를 사용하여 센서 표면에 2℃ 이하의 열을 샘플의 한쪽 면에만 전달하는 방법으로 진행하였다. 각 시료 당 3개면에 대하여 한 면에 총 5회씩 열전도도를 측정한 후, 최대 및 최소값을 제외한 나머지의 평균값을 열전도도로 결정하였다.



Figure 4. Measuring method for compressive strength.



(a) Measuring equipment (b) Measuring method

Figure 5. Equipment and method for thermal conductivities measuring.

2.2.4. 흡수율 및 수분 잔류율(KS L 4201)

전축분은 흙으로 덮혀 있기 때문에 흙이 다습한 경우 수분이 모세관 작용으로 전돌을 통해 내부로 전해지는 경우가 많으며, 전돌에 존재하는 수분과 고분 내 공기와의 온도 차이로 인해 전돌 표면에 미생물이 번식하기 쉬운 환경이 조성된다. 이들의 뿌리로부터 분비되는 유기산으로 인하여 전돌이 풍화되어 문화재를 훼손시킨다는 점을 고려할 때(Kim, 2010) 전돌의 흡수율은 전축분에서 중요하게 다루어져야 할 재료 특성 중 하나이다.

흡수율 및 수분 잔류율 측정 방법을 Figure 6에 나타냈다. 우선, 흡수율은 KS 기준에 따라 시편을 110℃에서 24시간 건조시킨 건조무게 m_1 (g)와 물 속에 24시간 정치시킨 후 꺼내어 시료의 표면을 젖은 헝겊으로 닦은 표면 건조 무게 m_2 (g)를 백분율로 나타낸 것으로 식 8과 같이 결정된다.

$$a(\%) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \dots \dots (8)$$

a : 흡수율(%) m_1 (g) : 건조무게(g) m_2 (g) : 수분을 포함한 무게(g)

수분 잔류율은 흡수율 실험 후 전돌을 일정한 온도와 습도 상태에 두었을 때 남아있는 수분 함량을 의미한다. 전돌이 위치하는 무령왕릉 내부는 밀폐된 구조 특성상 상대습도 평균이 98 %로 다습한 환경이므로, 고분 내에서는 전돌이 자연 건조되는 상황이 연출되기 어렵다. 따라서 전돌을 건조가 용이하게 진행되는 실내 조건(온도 26±1℃, 습도 40±5 %)을 가정하여 항온·항습기에 넣어두고 시간 경과에 따른 중량을 측정하였다. 전돌의 수분 함량은 전돌의 질량 손실로부터 계산되며, 수분 잔류율은 흡수율과 동일하게 식 8을 이용하여 산정하였다.



(a) Measure of weight after dry (m_1) (b) Measure of weight after submerge (m_2)

Figure 6. Equipment and method for absorptance measuring.

Table 6. Ultrasonic wave velocity and compressive strength of the reproduction bricks.

Classify Sample	Thickness (mm)	Ultrasonic wave velocity (km/sec)		Compressive strength (MPa)
		Used a contact agent		
The reproduction bricks	H1	50.00	1.01	13.47
	H2	50.00	1.10	14.54
	H3	50.00	1.12	17.03
	H4	50.00	1.16	20.64
	H5	50.00	1.31	21.34
	Mean	50.00	1.14	17.40
	Standard deviation	0	0.09	2.88
	Coefficient of variation	0	0.08	0.17

Table 7. Material characteristics of the bricks of royal tomb of King Muryeong.

Classify Sample	Thickne ss (mm)	Ultrasonic wave velocity (km/sec)		Thermal conductivi ty (W/mK)	Absorpt ance (%)	Residual rate of moisture (%)	Estimated compressive strength (MPa)						
		Used a contact agent	Applicat ion of scaling factor (1.047)				Application of absorptance			Application of ultrasonic wave velocity (scaling factor 1.047)			
							Eq(2)	Eq(4)	Eq(6)	Eq(3)	Eq(5)	Eq(9)	
The bricks of royal tomb of King Muryeo ng	M1	35.70	3.42	3.58	1.63	6.20	0.07	36.47	28.66	31.96	33.62	89.80	86.63
	M2	38.00	3.92	4.10	1.54	1.60	0.02	52.02	52.11	58.12	40.06	170.50	101.42
	M3	36.00	2.71	2.84	1.55	4.40	0.70	42.56	36.21	40.39	24.45	36.06	65.58
	M4	44.60	6.97	7.30	1.56	4.30	0.00	42.90	36.68	40.92	79.71	8815.98	192.14
	M5	33.00	3.74	3.92	1.61	15.00	0.30	6.73	9.13	10.18	37.83	136.56	96.16
	M6	39.30	2.90	3.04	1.61	9.20	0.00	26.33	19.40	21.64	26.92	46.14	71.27
	M7	75.90	3.82	4.00	1.53	9.50	0.00	25.32	18.66	20.81	38.82	150.72	98.57
	Mean	43.21	3.93	4.11	1.58	7.17	0.16	33.19	28.69	32.00	40.20	1349.39	101.68
	Standard deviation	13.76	1.31	1.38	0.04	4.12	0.24	13.91	13.30	14.84	17.06	3048.59	39.06
	Coefficient of variation	0.32	0.33	0.33	0.02	0.57	1.56	0.42	0.46	0.46	0.42	2.26	0.38

3. 실험 결과 및 고찰

이 연구에서 수행한 실험 결과를 모두 Table 6과 Table 7에 정리하였다.

3.1. 초음파 속도

Table 7에서 확인 할 수 있듯이, 보정계수를 적용한 무

령왕릉 전돌의 초음파 속도는 2.84 km/s ~ 7.30 km/s의 범위를 보였으며, 최대값을 가지는 하나의 시편을 제외하면 모두 2.84 km/s ~ 4.10 km/s 구간에 속했다. 반면, Table 6에서 나타나듯이 재현 전돌의 초음파 속도 평균값은 1.14 km/s로 무령왕릉 전돌의 초음파 속도 평균값의 36 % 수준이었다. 변동계수 비교결과, 무령왕릉 전돌 초음파 속도는 33 %의 다소 높은 변동률을 나타냈지만, 재현 전돌은 8 %의 보다 안정적인 결과를 보였다. 무령왕릉 전돌의 초음파

속도 측정값이 높은 변동률을 나타내는 원인은 전돌이 가지고 있는 물성, 즉 흡수율과 공극률에 의한 것으로 판단된다. 이는 Table 7에서 전돌의 흡수율이 1.6% ~ 15% 범위로 나타난 것에서도 입증된다. 그리고 초음파 측정에서 가장 중요한 요인 중 하나는 시편의 두께인데 실험에 사용된 시편의 두께 편차가 크고 대부분 50 mm 이하의 두께를 가지고 있기 때문에 초음파 측정에 영향을 준 것으로 판단된다.

이러한 무령왕릉 전돌의 초음파 속도 측정값의 신뢰성을 검증하기 위해 기존 연구 결과와 비교해 보았다. 그 결과, 기존 연구(Jang, 2013)에서 수행한 무령왕릉 전돌 13편의 초음파 속도 값은 3.5 km/s ~ 4.5 km/s 범위이 이 연구 결과 값과 크게 다르지 않았다. 비록, 서로 다른 무령왕릉 전돌을 시편으로 사용 했지만, 기존 연구에서 측정한 초음파 속도 평균 값(3.92 km/s)과 이 연구에서 측정한 평균값(4.11 km/s)의 차이는 4.7% 정도로 두 연구의 실험 결과가 서로 비슷한 것으로 나타났다.

3.2. 압축강도

실험을 통해 측정된 재현 전돌의 압축강도와 초음파 속도의 상관관계를 Figure 7에 나타낸 결과, 압축강도(F)와 초음파속도(X)간에 식 9와 같은 상관관계가 성립하였다.

$$F(\text{MPa}) = 28.367(X) - 14.935(R^2 = 0.78) \dots (9)$$

이러한 관계식과 선행 연구(Son, 2010; Kwon, 2011; Ahn and Kim, 2013)에서 제안한 압축강도 예측식(식 2 ~ 식 6)을 무령왕릉 전돌 시편에 적용시켜 압축강도를 추정하였다. 무령왕릉 전돌의 추정 압축강도는 재현 전돌의 압

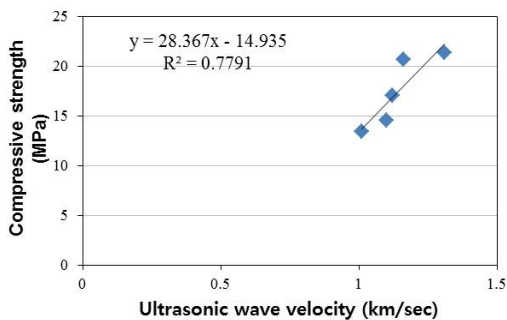


Figure 7. Relationship between ultrasonic wave velocity and compressive strength of the reproduction bricks.

축강도 측정결과와 Table 8에 제시된 전돌의 품질 기준과 함께 Figure 8에 나타났다.

재현 전돌의 압축강도는 평균 17.40 MPa로, 무령왕릉 전돌의 추정 강도보다 낮지만 기준강도 보다는 높은 것으로 나타났다.

초음파 속도로 압축강도를 예측할 수 있는 식 중에서, 식 9에 의해 추정된 무령왕릉 전돌의 압축강도는 평균 101.68 MPa이며, 이는 일반 콘크리트 압축강도의 약 4배 정도로 매우 높은 수치다. 기존 연구(Hoyeon, 2012; Kim, 2010)에서 제시된 통일신라시대 전돌의 평균 압축강도가 19.02 MPa인 것을 고려하면, 식 9는 무령왕릉 전돌의 압축강도를 매우 높게 추정하는 것으로 볼 수 있다. 이렇게 높은 값이 추정된 원인은 초음파 속도의 오차 요인이었던 전돌의 물성과 시편 두께로 인한 편차가 기여하는 것으로 판단된다. 또한 재현 전돌 제작시 적용한 무령왕릉 전돌의 소성온도는 점토광물의 소성에 의해 생성 및 파괴된 물질을 근거로 추정된 것으로(Jang, 2013) 온도 범위가 넓어 정확한 소성온도를 밝히기에는 한계가 있다. 이 때문에 무령왕릉 전돌과 재현 전돌의 소성 온도차이가 발생하여 내부 구조가 달라졌을 가능성도 있다.

기존 연구 결과(Son, 2010; Kwon, 2011)에서도 압축강도에 영향을 주는 다양한 요인들 중에서 특히 초음파 속도와와의 상관성이 다른 요인들에 비해 낮게 나타났다. 근대 점토벽돌의 압축강도를 초음파 속도로 예측할 수 있는 식 3과 식 5 및 재현 전돌의 압축강도를 예측할 수 있는 식 9에 무령왕릉 전돌의 초음파 속도 측정값들을 적용하여 Figure 9와 Table 7에 나타났다. Figure 9와 Table 7에서 확인할 수 있듯이 식 3과 식 5에 무령왕릉 전돌의 평균 초음파 속도인 4.11 km/s를 적용하면 1349.39 MPa, 40.20 MPa이 각각 결정된다. 비슷한 시기의 근대 점토벽돌 실험결과를 통해 만들어진 압축 강도식 임에도 불구하고 최대 33배의 결과 값 차이를 나타냈다.

Table 8. Quality standard of traditional bricks (Cultural Heritage Repair Standard Specification, 2013).

	Absorptance (%)	Compressive strength (MPa)	Specific gravity
Traditional bricks made in factory	10 or under	20.59 or over	-
Traditional bricks made by hand	16 or under	14.71 or over	1.8-2.1

초음파 속도는 재료의 밀실한 정도에 따라 결정되므로 점토가 소성되면서 만들어지는 입자간 화학적 결합과 미세 구조의 차이점은 반영되기 힘들다. 일반적으로 점토, 콘

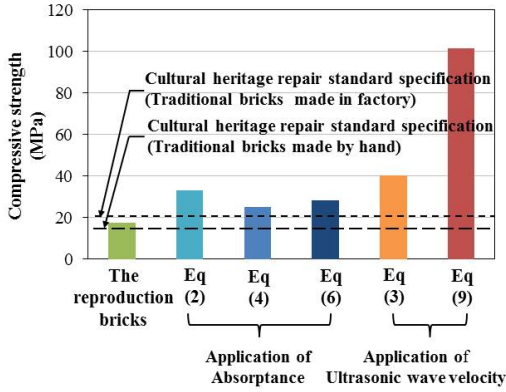
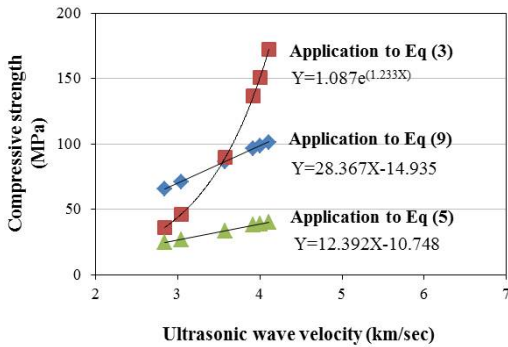
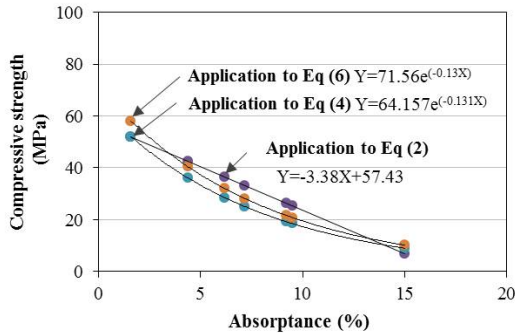


Figure 8. Comparison between estimated compressive strength.



(a) Relationship between Ultrasonic wave velocity and Compressive strength



(b) Relationship between absorbance and compressive strength

Figure 9. Relationship between ultrasonic wave velocity, absorbance and compressive strength.

크리트와 같은 세라믹 계열의 재료에서 내부가 밀실 할수록 압축강도는 증가하지만, 각 입자간 결합 구성 및 형태 역시 압축강도를 비롯한 다른 재료 물성에 적지 않은 영향을 미친다. 따라서 초음파 속도와 압축강도의 상관관계만으로는 재료의 압축강도 값을 추정하는 것은 한계가 있다.

근대 점토벽돌의 압축강도를 흡수율로 예측 할 수 있는 식(식 2, 4, 6)에 무령왕릉 전돌의 흡수율 값을 적용하여 Figure 9와 Table 7에 나타냈다. Figure 9와 Table 7에서 확인 할 수 있듯이 식 2, 4, 6에 무령왕릉 전돌의 평균 흡수율인 7.17 %를 적용하면 압축강도가 각각 33.19 MPa, 28.69 MPa, 32.00 MPa로 결정된다. 이는 일반 콘크리트의 압축강도 수준으로, 초음파 속도로 예측한 압축강도와 비교해 볼 때 재료 및 제작 시기에 따른 편차가 작게 나타났다. 이상의 결과로 부터 표면이 고르지 못하고 두께 편차가 큰 문화재 시편 특성상 초음파 속도를 이용하는 방법보다 흡수율을 이용하는 방법이 무령왕릉 전돌의 압축강도 예측법으로 보다 적합한 것으로 판단된다. 더불어 흡수율을 이용한 압축강도 예측법이 향후 보다 많은 연구를 통해 상관성이 입증될 수 있을 것으로 기대된다.

3.3. 열전도도

실험 결과 무령왕릉 전돌의 열전도도는 평균 1.58 W/mK의 값을 나타냈다. Figure 10과 같이 일반적으로 사용되는 재료들의 열전도도와 비교해 볼 때, 무령왕릉 전돌은 흙에 더 근접한 값으로 흙과 콘크리트, 석재 사이에 위치한다. 이 결과를 근거로 흙과 접해 있는 고분의 경우, 전돌을 통해 흙의 온도가 고분 안으로 그대로 전달되는 것을 예측 할 수 있다. 특히, 송산리 6호분과 같은 벽화 고분에서는 수분과 온도 전달이 벽화의 보존에 있어 매우 중요한 요

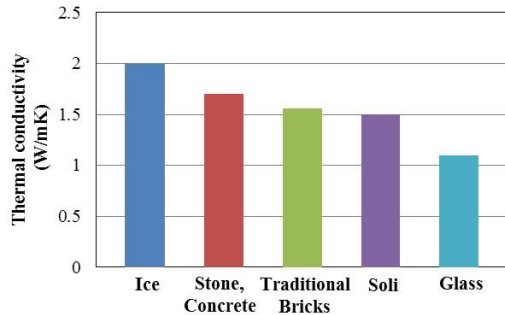


Figure 10. Comparison between thermal conductivities.

소로 작용한다. 따라서 무령왕릉 전돌의 열전도도와 흡수율 및 수분 잔류율 등의 재료특성은 송산리 6호분의 보존 방안 수립에도 유용하게 활용 될 수 있다.

3.4. 흡수율과 수분 잔류율

Figure 11은 시간에 따른 흡수율을 시편별로 나타낸 것이다. 무령왕릉 전돌의 흡수율은 1.6% ~ 15.0%(평균 7.2%)로 시편 간 편차가 크게 나타났으며, 수분과 접촉 3 ~ 5시간 내에 포화 상태에 이르는 것으로 나타났다.

흡수율은 재료가 다공질 일수록 높기 때문에 전돌 내부의 공극구조와 직접적인 관계가 있으며, 전돌 내부구조는 유리질화와 같은 소성공정의 영향을 받는다. 여기서, 소성공정은 원토에 물리·화학적 변화가 단계적으로 이루어지는 과정이다. 기존의 다른 연구(Jang, 2013)에서 측정된 동시대에 제작된 백제 전돌 23편의 공극률과 흡수율을 Figure 12에 나타냈다. 그림과 같이 흡수율 10%를 기준으

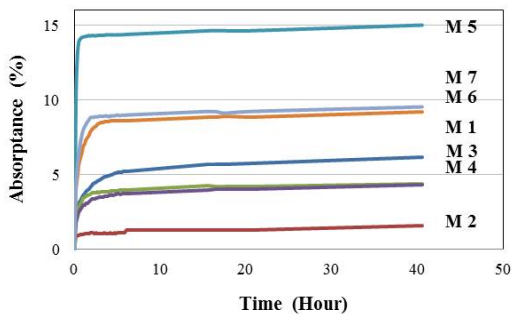


Figure 11. Absorbance according to time.

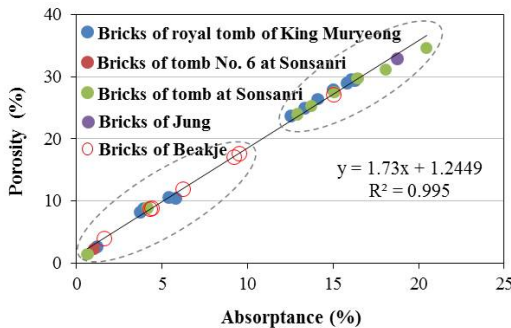


Figure 12. Relationship between absorbance and Porosity.

로 크게 두 그룹으로 구분되었으며, 공극률과 흡수율은 일치율이 100%에 가까운 선형비례 관계를 나타냈다.

무령왕릉 전돌 시험편 간의 흡수율 차이를 알아보기 위해 기존 연구결과를 통해 도출된 상관관계 식을 이 연구에서 사용한 시편에 적용하여 공극률을 예측하였으며, 기존 연구에서 사용한 시편 23편과 함께 Figure 12에 나타냈다. 그 결과, 기존 연구 결과와 동일하게 1.6% ~ 9.5%의 낮은 흡수율을 가지는 그룹과 15%의 높은 흡수율을 가지는 그룹으로 구분되어졌다. 흡수율은 식 8과 같이 표면건조 내부포화 시편 무게에서 건조된 시편 무게를 제외한 값의 비율에 따라 결정되므로, 밀도 1의 물이 시편내부의 모든 공극으로 침투되었다고 가정하면 이론적으로 흡수율과 공극율은 100% 일치하는 결과가 나온다. 다만, 물이 침투할 수 없는 공극의 존재 또는 실험오차로 인해 100% 일치하는 결과가 나타나지는 않지만, 공극률과 같은 내부구조에 따라 흡수율이 달라지는 것은 사실이다. 이상의 결과는 무령왕릉 전돌과 같이 동시대의 재료와 방법을 사용하여 제작된 시편에서 나타난 현상이며, 원토가 다른 시편의 경우 재질 차이로 인해 공극률과 흡수율 간의 상관성이 약화 될 수 있다.

한편, 수분 잔류율 측정결과 Figure 13에서 확인할 수 있듯이 무령왕릉 전돌은 평균 0.16%의 수분 잔류율을 가지며, 대기와 접촉 20 ~ 30시간 내에 수렴 상태에 이른다.

흡수율과 수분 잔류율 실험 결과 전돌 내부에 물이 흡수되는 시간이 건조되는 속도보다 약 4 ~ 6배 정도 빠른 것으로 확인되었다. 만약, 다량의 수분이 장시간 유지되면 조류와 같은 생물이 발생할 수 있으며 이로 인해 전돌의 손상이 가중될 수 있기에 이러한 점을 염두 해 두고 문화재를 관리 및 보존해야 한다.

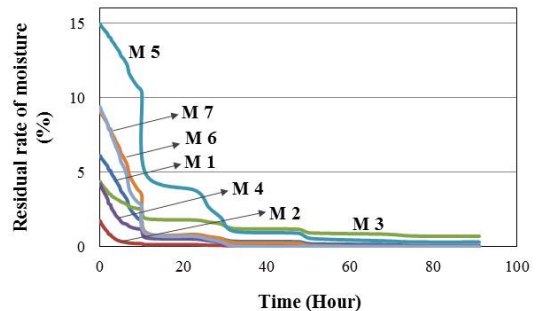


Figure 13. Residual rate of moisture according to time.

4. 결 론

무령왕릉 전돌의 초음파 속도는 2.84 km/s ~ 7.30 km/s의 범위를 가지며, 신뢰성을 확보하기 위해 기존연구와 비교하였다. 기존의 다른 연구결과와의 평균값 차이가 4.7% 정도로 두 연구의 실험 결과가 서로 비슷한 것으로 나타났다.

전통적인 방법으로 소성된 무령왕릉 재현 전돌의 초음파 속도와 압축강도의 상관관계를 이용하여 무령왕릉 전돌의 압축강도를 추정하였다. 추정된 압축강도 값과 기존의 근대 점토벽돌의 압축강도 제안식에 무령왕릉 전돌의 흡수율과 초음파 속도를 대입하여 비교하였다. 그 결과 초음파 속도를 이용한 압축강도 추정식들은 최대 33배의 평균값 차이를 나타내는 등 평균과 표준편차 값의 차이가 큰 것으로 나타났다. 반면, 흡수율을 이용한 압축강도 추정식들은 이러한 편차가 보다 낮게 나타났으며, 무령왕릉 전돌의 평균 압축강도를 28.69 MPa ~ 33.19 MPa의 범위로 추정하였다.

무령왕릉 전돌의 열전도도는 1.48 W/mK~1.63 W/mK의 범위로 평균 1.58 W/mK의 값을 가지며, 흙과 콘크리트, 석재의 사이 값이지만 흙과 더 근접한 값을 지닌다. 이 값은 흙과 인접해 있는 전돌 문화재의 경우 흙의 온도를 그대로 전달하는 것을 의미한다.

무령왕릉 전돌의 흡수율과 수분 잔류율은 각각 1.6% ~ 15%, 0% ~ 0.7%의 범위로 시험편 간 편차가 크게 나타났으며, 평균 7.2%, 0.16%의 값을 나타낸다. 흡수율은 수분과 접촉 3 ~ 5시간 내에 포화 상태에 이르며, 수분 잔류율은 대기와 접촉 20 ~ 30시간 내에 수렴 상태에 이른다. 따라서 전돌 내부에 물이 흡수되는 시간이 건조되는 속도보다 약 4 ~ 6배 정도 빠르다는 것을 확인할 수 있었다.

위와 같은 연구는 무령왕릉과 송산리 6호분의 구조 안정성평가를 위한 물성정보 및 벽화의 보존 대책 수립을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 뿐만 아니라, 백제시대 전돌 문화재의 보수·보강을 위한 재료 제작시 기초적인 자료로 활용될 수 있다.

REFERENCE

Ahn, J.C. and Kim, K.S., 2013, The Historical Analysis by Estimation of Heating Temperature and Properties of Clay Brick in Modern Korea, Journal of Architectural Institute of Korea, 29(9), 89-96. (in Korean with

English abstract)

Chong, C.Y., 2009, A Basic Study on the Tiles of Hanseong Period of Baekje, Journal of Paekche Culture, 49, 1-39. (in Korean with English abstract)

Christaras, B., 2009, P-wave Velocity and Quality of Building Materials, Proceedings of the 3rd IASME / WSEAS International Conference on Geology and Seismology (GES'09), Cambridge, United Kingdom, 41-46.

Cultural Heritage Repair Standard Specification, 2013, Cultural Heritage Repair standard specification, Sinkwangsa, Daejeon, 351.

Fitzner, B., 2004, Documentation and Evaluation of Stone Damage on Monuments, 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Stockholm, Sweden, 677-690.

Gongju National Museum, 2007, The royal tomb of King Muryeong : Analysis Report of Excavated Remains, 3, 231. (in Korean)

Ho-Yeon Architecture Cultural Heritage Institute, 2012, Renewal plan of Conservation treatment of JoTapdong Five-storied Brick Pagoda at Andong, Andong-City, 319.

Jang, S.Y., 2013, Archaeometric characteristics and provenance interpretation of bricks from the royal tomb of King Muryeong of Baekje kingdom, Doctor's Thesis in Kongju National University, 270. (in Korean with English abstract)

Jung, H.S., 2011, A study on the mural painting tomb of Baekje, The Journal of Korean Ancient History, 61, 301-336. (in Korean with English abstract)

Kim, J.H., 2010, A Study on the Estimation of Compressive Strength by the Nondestructive Test of Stone Structures, Doctor's Thesis in Chosun University, 29-31. (in Korean with English abstract)

Korean Agency for Technology and Standards(KATS), 2007, Testing Methods of Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar(KS L 5105), Korean Standards Association(KSA), 5.

Korean Agency for Technology and Standards(KATS), 2008, Testing Methods of Ultrasonic Pulse Velocity

- for Estimating Compressive Strength of Concrete(KS F 2731), Korean Standards Association(KSA), 16.
- Korean Agency for Technology and Standards(KATS), 2012, Clay Brick(KS L 4201), Korean Standards Association (KSA), 4.
- Kwon, E.H., Ahn, J.C., Kang, B.H. and Kim K.S., 2011, The Historical Analysis of Characteristics on the Clay Brick of Modern Architecture, Proceeding of the Korea Institute of Building construction, 11(2), 23-24. (in Korean with English abstract)
- Lee, E.C., 1997, A Comparative Study of Wall Paintings in Koguryo Tomb and Wall Paintings of Silla · Baekje · Gaya, Association of Koguryo Balhae, 4, 201-267. (in Japanese)
- Lee, K.U. and Kim, C.D., 2001, A Study on Repairing and Preservation of Brick Structure of Modern : Focused on the Catholic Church in the Chungcheongnam-do in Korea, Journal of architectural and urban environmental research, 9, 1-16.(in Korean with English abstract)
- Lee, N.S., 2005, Tomb culture of Koguryo and Baekje, Association of Koguryo Balhae, 20, 241-267. (in Korean with English abstract)
- Li G., 1035-1110, Song Dynasty, Yingzaofashi(營造法式): 題簽李明仲營造法式. 三六卷 八册.
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MOLTM), 2009, Korea Building Code-Structural, Architectural Institute of Korea, Seoul, 772. (in Korean)
- Okauchi, S., 1980, A Comparative Study of the Tomb of King Munyoung of Baegje and the Tombs of the Southern Chinese Dynasties, Baekje research Institute, 11, 223-277. (in Japanese)
- Song, E.S. and Choi, B.G(translation), 2009, Cheon Gong Gaemul , Bumwoo, Paju-City, 566.(in Korean)
- Son, Y.S., 2010, The Study on the Properties of Clay Brick used Modern Architecture, Master's Thesis in Donga University, 31-37. (in Korean)
- Suh, M.C., Lee, C.W., Jeong, K.O. and Kim, D.H., 1997, A Study on the Construction Method of the Songsanri Tombs Using Geophysical Exploration Method, Journal of the Korean Society of Conservation Science for cultural Properties, 6(1), 61-70. (in Korean with English abstract)
- Suh, M.C., Lee, L.S., Suh, O.S., Kang, J.M., Bae, Y.s., Choi, S.W., Jeong, K.O., Jeong, S.M., Lee, W.J., Han, S.H., Kim, K.H., Lee, H.K., Lee, K.B. and Ohm. T.I, P, 1997, In-situ Status and Conservation Strategy of the Songsanri Tomb Site, Basic Science Institute of Kongju National University, 232. (in Korean with English abstract)
- Suh, M.C., Choi, S.W., Lee, N.S, Kim, K.H., Ku, M.H., Kang, J.M. and Lee, W.J., 2000, Present State of the Songsanri Tomb Site, Basic Science Institute of Kongju National University, 467. (in Korean)
- Yoon, M.B., 1991, The Structure of the Tomb of king Muryong, The Research Institute of Baekje Culture, 5, 155-185. (in Korean with English abstract)