석조문화재의 구조적 보강을 위한 금속보강재 정착길이 연구

김사덕 | 이동식*¹ | 김현용*

국립문화재연구소 보존과학센터, *국립문화재연구소 미륵사지석탑보수정비사업단

A Study on the Anchorage Length of Metal Stiffeners for the Structural Reinforcement of Stone Cultural Heritages

Sa Dug Kim | Dong Sik Lee*¹ | Hyun Yong Kim*

Conservation Science Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 305-380, Korea

*Mireuksaji Stone Pagoda Conservation Team, National Research Institute of Cultural Heritage, Iksan, 570-911, Korea

¹Corresponding Author: tion@hanmail.net, +82-63-836-7932

초록 석조문화재의 훼손된 부재를 재사용하기 위한 보존관리는 1900년대부터 시작되었다고 볼 수 있는데 일제강점기 시대에 무기물인 시멘트를 원료로 사용하면서 부터이다. 1990년대에 접어들면서 건축 재료인 유기질의 에폭시수지가 도입되었고 현재에 이르기까지 석조문화재 전반에 활용되고 있다. 특히 절단된 부재의 구조적 보강에도 충전제를 혼합하여 사용하는 등의 적극적인 보존처리 작업이 진행되었다. 그러나 구조적 보강을 위해 넣은 금속봉의 길이는 보존과학자의 인지적 경험을 바탕으로 설계하였기 때문에 다양한 매입길이와 함께 원부재의 2차적 훼손을 유발할 수 있다. 따라서 본 실험을 통해 원부재의 훼손율을 최소화하면서 최대의 구조적 보강을 하기 위해 유효정착길이를 표준화한 결과 $\phi 8\text{mm}$ 는 60.88mm, $\phi 12\text{mm}$ 는 91.32mm, $\phi 16\text{mm}$ 는 121.76mm가 적정하였다. 이 외의 구경은 $\ell_d = a_1 f_y / u \sum \phi$ 를 이용하여 정착길이를 구한다. 이 때 사용된 금속보강재는 전산형 환봉을 사용하여야 휨, 전단, 압축 등의 재하하중에 대항할 수 있었다.

중심어: 석조문화재, 에폭시 수지, 휨, 전단, 압축

ABSTRACT It was the 1900s that the damaged materials of stone heritages began to be preserved and managed for the purpose of reuse, especially since cement, an inorganic material, began to be used during the Japanese colonial period. Epoxy resin, an organic material, was introduced to architecture around the turn of the 1990s, and has been being used across the board. In particular, filler mixtures began to be aggressively used for the structural reinforcement of severed materials. The problem was metal stiffeners used for structural reinforcement. The anchorage length varied depending in different conservation scientists, and as a result the secondary damage was apt to occur in the materials. In this study, hereat, a calculation was made of the most effective anchorage length with the minimization of material damage. The results were as in the following: the anchorage length of an 8-milimeter-across ($\phi 8$) metal stiffener was found to be most effective at 60.88mm. Those of $\phi 12$ and $\phi 16$ were 60.88mm and 91.32mm respectively. In the case of other calibers, the anchorage length was calculated by a formula $\ell_d = a_1 f_y / u \sum \phi$. In the experiment, helically-threaded round bars were used as metal stiffeners in order that they could bear surcharge loads such as bending, shear and constriction.

Key Words: Stone cultural heritage, Epoxy resins, Bending, Shear, Constriction

1. 서 론

금속은 고대로부터 구조물을 유지하는 재료로써 건축 구조물의 뼈대를 이루기도 하지만 구조물을 보강하는데 사용되기도 하였다. 그 중심에 철이 있다. 구조재의 붕괴나 이음의 뒤틀림을 방지하기 위해 벽돌조, 콘크리트, 석재 등의 재료에 일정형태의 홈을 파서 철을 넣었고 또한 산화방지나 유동을 막기 위해 납을 사용한 사례도 많다¹. 우리나라에서는 삼국시대까지 거슬러 올라갈 수 있으며 주로 석재 간 이격을 방지하기 위해 "I"자형 홈을 판 다음 같은 형태로 제작된 철로 고정시키는 방법을 사용하였다.

이처럼 금속은 훼손된 구조물을 유지하기 위해 오래 전부터 문화재에 사용되어 왔다. 현재는 강도와 부식성을 향상시킨 새로운 금속으로 대체되면서 구조보강과 같이 사용범위가 더욱 확대되고 있다. 과거에는 동과 철이 주재료였으나 현재는 스테인리스와 티타늄이 주로 사용되고 있다. 이런 흐름은 선진문화강국인 유럽을 중심으로 이루어지고 있다. 세계문화유산 1호인 그리스의 Acropolis 유적이나 이탈리아의 Colosseo 유적 등의 복원프로젝트에 빔, 막대, 환봉 형태의 금속보강재 사용을 허용하고 있다^{2,3}. 이러한 금속보강재의 적극적인 개입은 구조물의 최소한의 안전을 고려하면서 시작된 것이다.

반면 무리하게 금속을 많이 사용하는 것은 구조물의 안전을 위협하는 훼손을 일으킬 여지가 많다는 것을 1894~1932년까지 Balanos의 Parthenon 신전 복원프로젝트를 진행하면서 깨달을 수 있었다⁴. 따라서 이러한 과오를 범하지 않기 위해 최소한의 정착길이 산정과 더불어 복원재료의 검토와 물성실험 그리고 과거로부터 검증된 보강재를 검토하게 되었다. 유효정착길이를 산정하는 것은 파손된 부재를 최소한도로 훼손하면서 최대의 구조적 보강 효과를 얻을 수 있도록 특별히 고안된 프로그램 즉, 과학적인 보존작업이 고려되어야 하는 일이다. 그러나 현재 우리의 보존처리 실정은 보존과학자의 주관적인 판단에 따라 금속보강재를 삽입하고 있고 정착길이를 산정하고 있다. 따라서 어떤 경우에는 과학적 설계되기도 하고 반대로 부족하게 설계되기도 하였다. 결국 걱정하지 못한 보존처리는 원부재의 1차 훼손과 더불어 그에 따른 2차 훼손으로 이어질 수 있기 때문에 이제는 반드시 석조문화재의 구조적 보강을 위한 금속보강재의 유효정착길이의 표준화 연구가 필요하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 파손된 부재를 재사용하기 위한

구조적 보강과, 보강하기 위한 원부재의 훼손을 최소화하는 범위에서 최대의 효과를 발휘할 수 있도록 최소한의 정착길이를 산정하는 보존과학적 접근을 시도하였다. 또한 본 연구는 석조문화재 보존기술의 질적인 향상과 함께 기념물의 가치 개선을 높이는 데 주안점을 두고 진행하였다.

본 연구 결과는 현재 국보 제 11호 미륵사지 석탑 보수 정비사업의 보존처리 분야에 활용하고 있음을 밝힌다.

2. 연구방법

금속보강재와 석재의 부착정도인 에폭시 수지의 부착거동 특성 실험은 한양대학교 초대형 구조실험동에 있는 2,000kN UTM기를 사용하였다. 이때 UTM기와 작업성을 좋게 하기 위하여 별도로 지그를 제작하여 측정하였고 변위 제어는 모든 실험체에 1mm/min로 설정하여 실험하였으며 최종적으로 절단될 때까지 자동제어시스템으로 측정하였다.

이 실험에 사용된 실험체는 총 9개이며 규격은 150×150×300mm로 제작하였고 이에 대한 상세한 일람표는 공시체 제작 파트에서 후술(Table 1)하였다.

실험체에 매입될 $\phi 8\text{mm}$, $\phi 12\text{mm}$, $\phi 16\text{mm}$ 세 가지 유형의 금속보강재 중앙에는 모멘트 힘의 거동 특성을 알아보기 위해 Strain gauges를 고정시켰다. 고정작업은 접착이 용이하도록 보강재 중앙부를 핸드드릴로 갈라내어 수평을 잡고 Alcohol로 표면에 붙은 이 물질을 제거하고 전용 순간접착제로 접합한 다음 보호필름으로 마감하였다. 전반적인 인발력 실험에 대한 개요는 다음 Figure 1, 2와 같다.

3. 실험 및 결과

3.1. 공시체 제작

이 연구에서는 인발력 실험을 하기 위해 비교적 물성이 양호하게 밝혀진 익산 황동채석장 화강암을 사용하였다. 이 채석장은 미륵사지 석탑의 복원용 신석재를 공급하는 대체지역이기도 하다⁵. 특히 석재의 물성에 따라 달라지는 오차를 줄이기 위해 유효범위 내의 석재를 사용하였고 또한 같은 물성을 갖도록 국부적인 곳에서 채석한 원석을 확보하였으며 더 나아가 절리가 발달되지 않았거나 암질이 양호하게 분포된 석재를 선정하여 실험체로 제작하였다.

실험체는 총 9개를 준비하였으며 각각의 규격은 동일하

Table 1. A list of specimens (L: length, W: width, H: height).

Specimen	Test method	Dimension(mm) L×W×H	Test condition
P1	Pull-out	150×150×300	Diameter : $\phi 8$, Insert length : 150mm
P2			Diameter : $\phi 12$, Insert length : 150mm
P3			Diameter : $\phi 16$, Insert length : 150mm
P4			Diameter : $\phi 8$, Insert length : 100mm
P5			Diameter : $\phi 12$, Insert length : 100mm
P6			Diameter : $\phi 16$, Insert length : 100mm
P7			Diameter : $\phi 8$, Insert length : 50mm
P8			Diameter : $\phi 12$, Insert length : 50mm
P9			Diameter : $\phi 16$, Insert length : 50mm

Figure 1. A specimen for the drawing test.

게 150×150×300mm이다. 공시체에 삽입할 재료는 티타늄으로 전산 형태의 환봉을 사용하였다. 민봉 사용시에는 전혀 구조적인 보강을 하지 못하고 그냥 빠지는 형태로 진행되어 오히려 훼손을 가중시킬 수 있기 때문에 반드시 전산형 환봉 사용을 원칙으로 하였다^{6,7}.

전산 형태의 환봉 굵기는 공시체에 대응하는 직경별 변화에 따라 $\phi 8$, $\phi 12$, $\phi 16$ mm를 선정하였고, 매입길이의 변화는 각 직경별로 50, 100, 150mm를 한 개조로 적용하였다. 이에 대한 실험체 일람표는 Table 1과 같다.

화강암 공시체에 티타늄 환봉의 적절한 정착을 유도하기

Figure 2. 2000kN UTM for the drawing test, and the jig.

위해 현재 석조문화재에 사용되는 에폭시 수지인 L₃₀(주제:경화제=2:1)을 사용하였으며, 여기에 점성과 물성의 강화를 위해 충전제(Zirconiumsilicate:Wollastonite:Talc=1:1:2)를 혼합하여 티타늄 환봉을 공시체에 고정시켰다. 이때 공시체의 홀 가공은 티타늄 환봉보다 2mm 더 넓게 뚫었다.

공시체에 티타늄 환봉이 완전히 점착될 수 있도록 화학적인 변성을 고려하여 10일 이상 25℃에서 경화시켰고, 이후 인발력에 대한 정확한 수치 데이터를 분석하기 위해 실험체에 Strain Gauge를 부착하여 변형률을 알아보았다.

3.2. 실험이론

금속보강물의 거동이 철근콘크리트와 유사한 거동특성을 보인다고 가정하면 티타늄의 환봉은 인장력을 받는 역할을 한다. 따라서 충분한 인장력을 발휘하기 위해서

는 화강암과 금속보강물과의 일체된 강한 접착을 필요로 한다. 결국 화강암 공시체 내부로 금속보강재를 충분히 묻혀 부착강도를 높여야 하는데 공시체가 화강암 내부로 너무 깊게 금속보강재를 삽입하면 오히려 홀 가공에 따른 2차 훼손을 유발하기도 한다. 반대로 금속보강재가 너무 얇게 묻히게 되면 충분한 구조보강도 이루어지지 않은 채 뽑히게 된다. 그러므로 적절한 유효길이를 산정하기 위해 실험을 통한 이론의 검증이 필요하다. 따라서 정착길이를 알아보기 위한 부착강도는 다음과 같은 식으로

정리할 수 있다⁸.

$$T = a_t f_y = u \sum_0 l \quad (1)$$

여기서, a_t : 티타늄의 단면적(mm^2)
 f_y : 티타늄의 인장강도(MPa)
 u : 에폭시 수지 부착응력도(MPa)
 $\sum_0$: 티타늄의 둘레(mm)

Table 2. Epoxy resin and titanium properties of matter.

Epoxy resin				
Division		L ₃₀		
Test item		Resin	Hardener	
Appearance		Clear	Clear	
Viscosity(cps) 25℃		300～400	230～300	
Specific gracity		1.20	0.97	
Mixing ratio		100	500	
Pot life(100g) 25℃		30～40 min		
Curing schedule 25℃		Physical cure 24hrs, Chemical cure 7days		
Shear adhesive strength		60% filled type 175.2kg/cm ² , Nonfilled type 107kg/cm ²		
Titanium				
Ultimate load(kN)	Yield Strength(MPa)	Tensile Strength(MPa)	Elastic modulus(MPa)	Yield strain(μm)
91.95～93.88	358.83～367.97	446.93～457.34	69,947.37～71,312.02	5,130～5.160

Figure 3. Changes in a test piece specimen.

여기에서 티타늄이 화강암과 일체가 되도록 화강암 속에 묻힌 것을 정착 부착이라 하며, 부착강도(Bonding strength)를 확보할 수 있는 티타늄의 최소길이를 정착길이(Development length)라 한다.

다시 식(1)을 이용하여 유효 정착길이를 구하면 식(2)로 유도된다.

$$\ell_d = \frac{a_u f_y}{u \sum_0} \quad (2)$$

전자의 식에 의거하여 금속보강재의 구경과 정착길이를 산정하여 공시체에 삽입하였다.

이 때 실험에 사용될 재료의 성질 및 특성은 Table 2와 같으며 에폭시수지는 풍림산업의 L₃₀을 사용하였고 티타늄(ø16mm)은 KS B 0801과 0802의 규준 및 실험에 의거한 데이터 값을 확보하였다.

3.3. 인발력 실험

각각 다른 공시체를 대상으로 실험한 결과를 토대로 정착길이와 구경과의 상관관계를 비교 분석해보았다(Figure 3). 먼저 매입길이가 150mm인 P1, P2, P3 실험체는 각각 직경 ø8mm, ø12mm, ø16mm의 금속보강재를 매입한 실험체이다.

이를 대상으로 금속보강재의 굽기에 대한 유효 정착길이를 분석한 결과 P1, P2, P3 실험체 모두에서 충분한 항복강도와 인장강도를 보였고 굽은 티타늄을 사용할수록 항복강도와 인장강도가 상대적으로 높게 나타나는 경향을 보였다(Figure 4A). 또한 인발력에 대한 접착성이 좋아 오히려 보강재가 끊어지는 등 인장력의 재료적 실험과 같은 결과를 초래하였다(Figure 4B, 4C, 4D). 일부 P2 공시체에서 약간 국부적인 파괴가 발생되었지만 정착길이에 영향을 줄 정도는 아니었다.

티타늄 환봉에 대한 최대하중을 비교해 보면 ø8mm: 29.7kN (3.03tonf), ø12mm: 51.8kN(5.3tonf), ø16mm: 83.4kN

(A) P1 ~ P3 Test specimen

(B) P1, ø8; Refractory state

(C) P2, ø12; Local failure

(D) P3, ø16; Refractory state

Figure 4. P1~P3 A load-displacement curve of test piece specimens (P1~P3) and failure force.

(A) P4 ~ P6 Test specimen

(B) P4, ϕ8; Local failure

(C) P5, ϕ12; Local failure

(D) P6, ϕ16; Ductile fracture, Brittle fracture

Figure 5. P4~P6 A load-displacement curve of test piece specimens and failure force.

(8.5tonf)로 분석되었으며, 이 실험의 결과 값과 공시체의 실험후의 현황 등을 전반적으로 검토해 볼 때 구경에 대한 매입깊이는 안정적인 거동특성을 보이는 것으로 나타났다.

또한 매입깊이가 100mm인 P4, P5, P6 실험체에 직경 ϕ8mm, ϕ12mm, ϕ16mm의 금속보강재를 각각 매입된 실험체 중 ϕ8, ϕ12mm로 구성된 P4와 P5는 매입부 부근에서 국부 파괴가 발생되었지만 압축력에 대응되는 뽕힘 현상은 발생되지 않은 것으로 보아 최소한의 정착길이에 부합한 것으로 판단된다. 예를 들어 Figure 5A의 하중-변위 곡선을 보면 힘에 대한 항복강도가 충분하게 이루어진 점과 금속 환봉이 뽕히기 전에 인장강도를 발휘하면서 끊어졌다는 점에서 그 이유를 찾을 수 있다(Figure 5B, 5C).

그러나 ϕ16mm의 P6은 정착길이가 충분하지 않아 응력이 작용하지 못하고 공시체에서 뽕혔다(Figure 5D). 좀 더 안정적인 거동을 얻기 위해서는 100mm보다 약간 더 긴 금속 환봉이 필요할 것으로 판단된다. Figure 5A 하중-변위

곡선을 보면 티타늄에 대한 항복강도는 충분하다고 볼 수 있으나 인장의 강성도중에 뽕힌 것으로 보아 위에서 제시한 정착길이에 가까운 길이가 필요하다는 것을 알 수 있다.

따라서 100mm에 대한 ϕ8, ϕ12mm의 금속 환봉은 응력에 대항하는 정착길이를 충족한 반면에 ϕ16mm는 충분한 거동특성을 보여주지 못하였다. 이에 대한 최대하중은 값은 ϕ8mm: 29.2kN(3.0tonf), ϕ12mm: 52.7kN(5.4tonf), ϕ16mm: 80.5kN(8.2tonf)이다.

마지막으로 매입깊이가 50mm인 P7, P8, P9인 실험체에 대한 하중-변위를 측정할 결과 매입부를 중심으로 파괴 양상이 나타나거나 문힘 끝 부분부터 석재 깨짐현상이 발생하였다(Figure 6). 즉 ϕ8, ϕ12, ϕ16mm로 사용된 티타늄 환봉의 정착길이가 부족하기 때문에 나타난 현상이다. 이 중에서 ϕ8mm의 P7은 P8과 P9의 실험체보다 어느 정도 정착길이에 근접해 있다는 것을 Figure 6A와 B를 통해 알 수 있다. 특히 항복강도는 충분하나 티타늄의 인장력에 해당되

는 연속적인 힘의 부착강도가 다소 부족한 것으로 보인다. 따라서 P6 실험체와 같이 정착길이를 약간 늘려주면 최소한의 유효정착길이를 충족할 수 있을 것으로 판단된다.

50mm 매입길이에 대한 P7, P8, P9 실험체의 최대하중을 보면 $\phi 8$ mm: 29.9kN(3.1tonf), $\phi 12$ mm: 51.3kN(5.2tonf), $\phi 16$ mm: 52.2kN(5.3tonf) 값을 나타내었다.

(A) P7~P9 Test specimen

(B) P7, $\phi 8$; Local failure

(C) P8, $\phi 12$; Ductile fracture, Brittle fracture

(D) P9, $\phi 16$; Ductile fracture, Brittle fracture

Figure 6. P7~P9 A load-displacement curve of test piece specimens and failure force.

Figure 7. A load-displacement curve for the calculation of the shortest anchorage length.

Figure 8. P1 and P7 Stress-strain curve.

Table 3. Pull-out test analysis.

Specimen	Maximum load (tonf)	Ultimate load (kN)	Ultimate stress (MPa)	Yield stress (MPa)
P1	3.03	29.70	591.15	523.25
P2	5.286	51.80	458.335	
P3	8.508	83.38	414.97	
P4	2.982	29.22	581.79	
P5	5.37	52.63	465.63	
P6	8.208	80.44	400.34	
P7	3.054	29.93	595.83	
P8	5.238	51.33	454.19	
P9	5.328	52.21	259.87

Figure 9. The failure mode of specimens (P1, P2 and P3) after the drawing test.

전자에서 제시한 공시체에 대한 산출 결과 값을 토대로 최적의 정착길이를 알아내기 위해서는 $\phi 8\text{mm}$ 는 P4와 P7, $\phi 12\text{mm}$ 는 P5와 P8, $\phi 16\text{mm}$ 는 P3과 P6의 사이의 값을 도출해야 한다(Figure 7). 이 값은 티타늄의 항복강도와 관련이 있다. 앞서 이론적 검토에서 제시한 것처럼 티타늄의 재료적인 물성은 정착길이를 결정하는데 아주 중요한 요소이기 때문이다.

따라서 항복하중에 도달하기 직전에 뽑힘 파괴가 발생된 P8과 P9 실험체를 대상으로 각 구경에 대한 정착길이를 구할 수 있다. P1과 P7 실험체의 항복강도가 일치하는 사실이 이를 증명한다(Figure 8).

이를 통하여 이론적인 최소 정착길이를 공시체 실험에서 얻어진 값과의 상관성 분석을 실시한 결과 Table 3과 같이 P1 실험체를 제외하고 모두 유효정착 길이에서 구한 직격별 정착길이가 아주 높은 일치성을 확인할 수 있다. 물론 충분한 항복강도에도 도달하지 못하고 뽑히는 경우도 있었다. 그러나 실험을 통해 최소한의 정착길이는 금속보강

Figure 10. The failure mode of specimens (P4, P5 and P7) after the drawing test.

제의 구경과 물성의 요소에 비례하여 선정할 수 있다는 것을 입증하였다. 따라서 실험체에 사용된 각 구경에 대한 최소한의 정착길이를 산출하면 $\phi 8\text{mm}$ 는 60.88mm, $\phi 12\text{mm}$ 는 91.32mm, 그리고 $\phi 16\text{mm}$ 는 121.76mm가 된다. 이 외의 정착길이는 식 (2)에 의거하여 보존처리하면 구조적보강에 따른 부착강도를 확보하는데 무리가 없을 것으로 판단된다.

3.4. 파손유형 분석

금속보강재의 유효 정착길이를 산정하기 위해서는 실험데이터 분석 외에 매입된 금속보강재가 수평적 힘을 받을 때 어떠한 형태로 변형되었는지를 육안으로 판단하는 파손유형 분석이 필요하다. 따라서 실험에 사용된 직육면체의 실험체를 대상으로 전개도를 작성하였으며 여기에 힘에 대응되는 파손형태를 도시하였다. 그리고 밀면은 파손과 무관하기 때문에 제외하여 도시하였다. 또한 파손형태가 같은 유형일 경우 서로 합동인 4면(300mm)의 직사각

형을 기준으로 설정하고 여기에 합동인 한 면(150mm)을 대상으로 파손된 각 실험체의 상면을 도시하였다.

인발력 실험에 대한 파손유형을 보면 금속보강재인 티타늄 환봉이 끊어지는 경우와 뽑히는 경우로 대별할 수 있으며, 여기에서 티타늄 환봉이 끊어지는 경우는 다시 매입 부근에 파괴가 일어난 경우와 아무런 파괴현상이 나타나지 않는 경우로 분류된다.

먼저 P1과 P2 그리고 P3 실험체는 금속보강재인 티타늄 환봉이 끊어지면서 매입부근에 아무런 파괴현상이 나타나지 않은 것으로 보인다(Figure 9). 그러므로 이들 실험체는 구경에 따른 정착길이의 요건을 갖추었다고 볼 수 있다. 그러나 매입된 150mm의 길이가 구조적으로 작용한 인발력의 최소한의 길이인지에 대해서는 의문이다. 따라서 각 보강재로 사용된 금속환봉의 정착길이를 더 짧게 하여 실험에 볼 필요성이 있다. 여기에 해당되는 실험체가 P4, P5, P6이다.

P1, P2, P3 실험체의 인발력 실험은 결과적으로 금속보강재로 사용된 티타늄의 재료적 차원의 물성실험을 한 것과 같은 결과를 초래하였다. 앞서 실험이론에서 정착길이를

를 산정하기 위해서는 반드시 티타늄의 항복강도를 알아야 한다. 매입길이에 대해 안정적인 거동을 보인 P1, P2, P3 실험체의 구경별 인장의 최대 하중($\phi 8\text{mm}$: 29.2kN, $\phi 12\text{mm}$: 52.7kN, $\phi 16\text{mm}$: 80.5kN)을 보면 두께가 두꺼울수록 기하적으로 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 $\phi 16\text{mm}$ 보다는 $\phi 8\text{mm}$ 에 사용된 금속보강재의 매입길이가 과하게 산정되었다는 것을 간접적으로 시사하고 있다.

다음으로 티타늄 환봉이 뽑히지는 않았으나 매입부근에 파괴현상이 발생한 경우로 P4, P5, P7 실험체가 여기에 속한다(Figure 10). 파괴양상으로만 보면 티타늄 환봉이 Proportional limit에 도달한 이후 Yield point와 Breaking point 사이에서 매입부를 중심으로 미세한 거동이 발생한 것이다. 이는 석재와 금속 환봉을 일체화시킨 에폭시 수지(충진제 포함)의 연결고리가 끊어지면서 발생하는 현상으로 인장의 힘이 접착성보다 약간 우위의 에너지를 가지고 있음을 의미한다. 약간의 미동이 있었으나 금속봉의 구조적 보강재 역할을 하기위한 부착강도에는 별 문제가 되지 않았다. 오히려 최소한의 정착길이를 산정하기 위한 원부재의 홀 가공을 최소화하여 2차적인 훼손요인을 줄임으로

Figure 11. The failure mode of specimens (P6, P8 and P9) after the drawing test.

Figure 12. Load-displacement curves in respective anchorages.

써 오히려 보존처리의 원칙에 가깝게 접근할 수 있었다.

한편 같은 구경에 정착길이 만을 달리한 P4와 P7 실험체의 파괴모드가 유사한 형태로 나타나지만 50mm를 매입한 P7이 100mm를 매입한 P4 보다 더 많은 거동을 보였다. 이는 P7에 적용된 정착길이의 부착강도가 충분하게 확보되지 않은 결과다. 따라서 P4의 경우 정착길이가 너무 작게 매입되었다는 것을 알 수 있다.

마지막으로 환봉의 매입길이가 너무 짧아 티타늄 환봉의 인장력이 정착 부착된 힘보다 커서 석재에서 뽑히는 경우로 P6, P8, P9의 시험체가 여기에 속한다(Figure 11). 파괴모드를 보면 금속환봉을 중심으로 방사형의 파손이 있으며 뽑히는 힘은 부착강도에 해당하는 매입된 길이만큼의 에너지가 작용하고 있음을 알 수 있다. 즉 매입된 길이가 50mm이면 매입된 끝부분을 중심으로 50mm 두께 정도 파괴가 일어나고, 100mm를 매입하면 100mm 두께만큼 파괴가 발생한다. 이로써 최소한의 정착길이가 확보되지 않으면 오히려 2차적인 훼손 유발이 크게 발생한다는 것을 알 수 있었다. 그러나 정착길이를 더욱 길게 하는 것은 다른 원부재의 훼손을 가져올 수 있기 때문에 이를 허용할 수는 없다. 근본적으로 지향할 명목이 되지 못한다.

3.5. 금속보강재 형태 분석

금속보강재가 구조적으로 바르게 작용하려면 구경에 따른 정착길이와 함께 매입할 금속보강봉의 외형적 형태가 중요한 작용을 한다. 보강근에는 환봉에 무늬가 없는 원형봉과 마디가 있는 이형봉으로 나눌 수 있다. 이 두 형태의 환봉을 대상으로 수직적인 힘(Monotonic loading

program)에 대항하는 인장강도(하중강도)의 변위를 분석해 보기 위해 실험체를 800×400×300mm 규격으로 제작하여 $\phi 16$ mm 보강재를 Figure 12A와 같이 중심에 1개(C: 2/h, 2/b)와 하단부에 2개(L: 1/h, 1/b; R: 1/h, 3/b)를 적절하게 분산 매입하였다(h: 공시체 높이, b: 공시체 너비).

휨 실험 결과 두 공시체는 2mm 이내의 휨 변위가 발생하면서 취성파괴가 일어났다. 이때 인장영역은 400~500 μ m, 압축영역은 -100~-200 μ m 값을 나타냈다. 이런 일련된 사항은 원형봉이나 이형봉 모두에서 공동적으로 나타나는 현상이다. 그러나 석재의 취성파괴 이후 휨 하중에 대한 회복력의 차이는 현격하였다. 먼저 마디가 없는 원형봉의 경우는 구조적으로 힘을 받지 못하고 접착면과 분리되면서 빠져버리는 형태로 실험이 진행되었고(Figure 12B, B2). 이때 석재 파단 이후 금속보강재가 받은 강도는 75.36kN으로 아주 미미한 수준이었다.

이에 반해 이형봉은 석재의 취성파괴 이후 급격하게 저하된 하중강도가 곧바로 회복되면서 외부의 힘에 대응되는 하중강도의 증가 변위곡선을 보였다(Figure 12B, B1). 오히려 석재의 취성파괴(425.78kN) 시점보다 더 높은 (541.16kN) 하중강도를 나타내었다. 이것은 콘크리트에 철근을 사용할 때 마디나 리브를 넣어 부착력을 좋게 하는 것과 마찬가지로 접착제와 금속보강재 사이의 부착력과 정착력을 향상시켜 궁극적으로 하중강도를 향상시키는 역할을 한 것으로 볼 수 있다. 따라서 파손부재를 구조적으로 보강하기 위해서는 반드시 전상형 환봉을 사용하여야 하며, 만약 원형봉을 사용할 경우에는 구조적으로 보강한 만큼 오히려 원부재를 훼손시킬 수 있기 때문에 반드시 피해야 할 보존처리 방법이다.

4. 결 론

1. 유효 정착길이는 금속보강재의 직경이 클수록 최대 하중이 크게 나타나 이에 상응하는 정착길이가 필요하였다. 본 실험에 사용된 금속보강재의 직경에 따른 최소한의 정착길이를 산정한 결과 $\phi 8$ mm는 60.88mm, $\phi 12$ mm는 91.32mm, 그리고 $\phi 16$ mm는 121.76mm로 산출되었다. 이의 금속보강재의 정착길이는 다음과 같은 식에 따라 정한다.

$$\ell_d = \frac{a_y f_y}{u \sum_0}$$

2. 아래의 그림과 같이 파손된 원부재를 에폭시수지로만 접합하면 구조적으로 접합면을 따라 균열이 발생된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 금속보강재를 매입하게 되면 석재에 가해지는 휨 하중을 금속보강재가 적절하게 받으면서 하중 증가 현상을 연성 거동이 될 수 있도록 유도한다. 여기에서 반드시 금속보강재는 마디가 있는 전산형 환봉을 선택하여야 구조적 보강이 이루어진다.

3. 정착길이가 부족하면 금속보강재가 뽑히면서 매입깊이에 상응하는 석재의 파손을 유도하였으며, 정착길이를 과하게 구조보강을 한 경우에는 이 역시 과하게 보강처리한 만큼 원부재를 훼손하기 때문에 최소한의 정착길이는

석조문화재의 보존상태를 개선하는데 중요한 처리조건이 된다는 것을 확인하였다. 따라서 보존기술의 질적인 향상을 도모하기 위해서는 정확한 유효 정착길이의 산정이 필요하다.

참고문헌

1. Δ. Ζιρώ, K. Μαμαλούγκας, "5th International Meeting for the Restoration of the Acropolis Monuments", p325-334, (2002).
2. "익산미륵사지 석탑 해체조사보고서IV", p453-493, (2011).
3. "The works on the acropolis of athens", p10-32, (2002).
4. "익산미륵사지 석탑 해체조사보고서IV", p486, (2011).
5. 김사덕, 이정은, 이동식, 이찬희, "익산 미륵사지석탑 복원을 위한 대체석의 동질성 검토". *보존과학회지*, 27, p211-222, (2011).
6. 이동식, "미륵사지서탑의 보존과학조사연구". 백제 불교 문화의 보고 미륵사, p260-275, (2010).
7. 김사덕, "미륵사지 석탑의 보존처리 현황과 과제". 미륵사지 석탑 보수정비, p154-174, (2011).
8. 정일영, "강도 설계법에 의한 철근콘크리트 설계". 엔지니어즈, p320-321, (2005).