고무댐에 적용하기 위한 유리섬유보강 복합재료 클래핑 플레이트의 내구 특성

Durability Characteristics of Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Clapping Plates for Application of Rubber Dam

이정우* · 박찬기**† · 김종옥*** · 이승기**** · 김필식*****

Lee, Jeong Woo · Park, Chan Gi · Kim, Jong Ok · Lee, Seung Kee · Kim, Pil Sik

ABSTRACT

Steel clapping plate is used to connecting rubber body in rubber dam. However, once the steel clapping plate corrodes, it may cause faults, such as the same problems experienced by typical reinforcing steel. This study evaluated the applicability of glass fiber reinforced polymer composite(GFRP) clapping plate as a substitute for steel clapping plate. Absorption and load test were conducted to evaluate the decrease in durability of GFRP clapping plate exposed to deterioration environments.

In the durability test results, the absorption rate of GFRP clapping plate was appeared as 0.6~1.0% in 50 day of immersion time. Also, the fracture load decreased with accelerated degradation environment exposure. Moreover, the absorption rate in GFRP clapping plate increased as degradation progressed, reducing the fracture load.

Keywords: Absorption; Durability; Degradation environment; GFRP clapping plate; Rubber dam

1. 서 론

고무댐은 평평한 지반 위에 설치되어지는 길고 유연한 실린더 구조로써 1950년대에 LADWP (Los Angeles Department of Water and Power)에 의해서 개발되었다 (Hwang et al., 2008; Mysore, 1998). 고무댐은 긴 튜브형태로, 공기, 물 또는 두 가지의 조합에 의해서 부풀려진다. 고무댐의 두께는 약 5 mm에서 32 mm 내외이며, 댐의 수명은 약 40년 이상이다 (Kim et al., 2008; Dakshinamoorthy, 1995). 고무댐은 공기를 넣거나 뺌으로써 고무댐의 기립과 도복을 조정할 수 있다. 이와 같은 과정을 통하여 고무댐은 홍수조절, 강가의 침식방지, 치수, 조정용 및 소수력 발전 등 여러 용도로 적용하고 있다 (Kim et al., 2008; Hwang et al., 2008). 본 연구에서는 고무댐에 있어서 고무쉬트와 콘크리트를 연결시켜주는 클래핑 플레이트의 부식에 대한

저항성을 향상시키기 위한 것이다. 클래핑 플레이트는 Fig. 1과 같이 고무쉬트를 콘크리트에 고정시켜주는 역할을 하는 것으로 현재는 금속제품을 적용하고 있다. 그러나 고무댐이 하천에 설치되는 경우 항상 수분과 접촉해 있어 클래핑 플레이트는 부식에 대한 위험성을 내포하고 있고 클래핑 플레이트의 부식은 고무댐 전체의 사용수명을 감소시킬 수 있다. 또한, 고무댐의 설치 시 금속 클래핑 플레이트는 중량이 커 시공성이 감소하고 안전사고의 위험성을 내포하고 있다. 따라서 본 연구에서는 부식에 우려가 없으면서도 인장강도/중량비가 큰 유리섬유복합재료 클래핑 플레이트 (GFRP clapping plate)를 고무댐에 적용하여 내구성 및 시공성 등을 향상시키고자 한다. GFRP 복합재료는 금속재료에 비해서 중량대비 강도가 우수하며 내부식성이 뛰어나기 때문에 수리 및 해양 구조물과 같이 열악한 환경에서 있는 구조물의 보강재로써 우수성이 입증되었다 (Park et al., 2003, 2005; Won et al., 2008). 최근 미국은 물론이고 유럽과 일본 등에서도 GFRP 복합재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, GFRP 복합재료를 건설 재료로 적용하기 위한 활발한 기술개발이 진행되고 있다 (ACI 440H, 2000; Chin et al., 1997). 그러나 GFRP 복합재료는 부식에 대한 저항성은 매우 우수하나 알칼리, 수분 등을 포함한 건설 구조물이 노출될 수 있는 환경에 대한 내구성에 관한 검증은 충분히 이루어지지 않고 있다 (Park et al., 2004b; Dutta et al., 1996; Jones et al., 1983).

따라서 본 연구에서는 고무댐 공법에서 고무쉬트와 콘크리트를

* 공주대학교 지역건설공학과 석사과정

** 공주대학교 지역건설공학과 조교수

*** 공주대학교 지역건설공학과 교수

**** 공주대학교 생물산업기계공학과 교수

***** (주)유일기연 기술연구소 소장

† Corresponding author Tel.: +82-41-330-1266

Fax: +82-41-330-1269

E-mail: cgpark@kongju.ac.kr

2011년 6월 29일 투고

2011년 9월 19일 심사완료

2011년 9월 26일 게재확정

Fig. 1 Clapping of rubber dam

접착시켜 주는 역할을 하는 클래핑 플레이트의 장기 내구성을 향상시키기 위한 방법으로 금속 클래핑 플레이트 대신에 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트를 적용하고자 한다. 특히 고무댐의 경우 수분과 직접적으로 접촉해 있는 구조물로서 GFRP 클래핑 플레이트를 적용하기 위해서는 충분한 내구성 검증이 필요하다. 이를 위하여 본 연구에서는 고무댐이 노출될 수 있는 환경조건을 고려한 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 흡수율 및 내구성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트는 고무댐의 내구수명을 향상시킬 수 있는 재료이다. 그러나 노출환경에 대한 충분한 내구성을 평가할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트를 다양한 촉진환경에 노출 후 흡수율 시험과 시험공시체의 형상을 고려한 하중재하시험을 실시하여 그 성능을 평가하였다. 시험결과는 ACI 440 위원회에서 제시한 환경감소계수 (Environmental reduction factor)와 Nanni 및 Park 등 기존 연구자들이 제안한 GFRP 복합재료의 환경감소 계수를 이용하여 평가하였다 (ACI 440, 2000; Micelli et al., 2004; Park et al., 2004a). Table 1은 본 기존 연구자들의 환경감소 계수에 대한 제한 규정을 나타내며 본 연구에서는 이를 이용하

Table 1 Environmental reduction factor of GFRP composites materials (ACI 440, 2000; Micelli et al., 2004; Park et al., 2004a)

Weight increase	Residual tensile strength	Residual Interlaminar shear stress	Environmental reduction factor
Not more than 2.0 %	Not be less than 75 %	Not be less than 65 %	0.70

여 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 내구성을 평가하였다. 즉 GFRP 복합재료의 경우 중량증가율 (흡수율)이 2.0 % 이하, 잔류인장강도 75 % 이상, 잔류 ISS 65 % 이상일 때 환경감소 계수는 0.70을 적용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 기준으로 촉진시험 후 흡수율 (중량변화), GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 형태적 특성상 인장시험이 불가능하므로 하중재하시험을 통하여 잔류 강도를 측정하는 방법을 적용하여 잔류하중이 65 % 이상을 만족하는가를 평가하였다.

1. GFRP 클래핑 플레이트

본 연구에서 적용한 클래핑 플레이트는 E-glass 섬유와 비닐에스터 수지로 구성되어 있으며 유리섬유의 혼입률은 체적비로 70 % 비닐에스터 수지는 30 %를 적용한 제품이다. GFRP 클래핑 플레이트의 형상은 Fig. 2와 같다.

Fig. 2 Photo of GFRP rebar used in this study

2. 촉진열화 환경

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 내구성능을 평가하기 위하여 7가지의 환경조건을 고려하였으며 촉진환경에 노출하였다.

가. 황산염 환경

해양, 지하토양, 하수처리장 및 산업현장 등에서 배출되는 오·폐수 등의 유해 환경에 노출될 경우, 유해 이온의 침투로 황산염 침식이 발생하며 구조물은 심각한 성능저하를 발생시킬 뿐만 아니라, 나아가 구조체로서의 역할을 상실하게 되는 문제점이 있다. 농촌지역에 설치될 수 있는 고무댐 역시 해수, 오염된 지하수 등 다양한 환경에 노출될 수 있어 이에 대한 검토가 필요하다. 또한, GFRP 복합재료 클래핑 플레이트를 고무댐에 적용하는 주요 이유는 금속제품을 사용하였을 때 발생하는 부식에 대한 문제를 해결하기 위해서이다. 따라서 황산염 환경에서 우수한 저항성을 가지고 있어야 한다. 본 연구에서는 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 황산염에 대한 영향을 평가하기 위하여 10 %의 Na_2SO_4 용액에 기존 FRP 복합재료에서 많은 연구자들 (Won et al., 2008; Park et al., 2004a)이 적용하였던 50일간의 촉진노출시간을 적용하였다.

나. 응빙제 환경

겨울철 하천 인접부근고속도로 등에 근접한 하천에 설치된 고무댐의 경우 응빙제를 적용할 때 염화칼슘이 녹아 흘러드는 등 다양한 환경에 노출될 가능성을 고려하여 60 °C의 4 % CaCl_2 용액에 50일간 노출시켰다.

다. 중성 환경

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 일반 물환경에 대한 영향을 평가하기 위하여 수돗물을 사용하였다. 수돗물의 온도는 60 °C로 하여 노출기간은 50일로 결정하였다.

라. 건조-습윤 반복

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트는 수분조건에 따라 매우 민감하게 반응을 한다. 특히 지속적으로 수분에 접촉해 있는 환경

조건과 더불어 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 표면이 습윤 상태와 건조상태를 반복하여 받는 환경에 노출되었을 때 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 표면에 대한 파괴의 가능성은 매우 높다. 고무댐의 경우 갈수기에는 거의 바닥을 들어내는 경우가 있다. 따라서 이와 같은 상황을 고려하여 건조-습윤이 반복되는 환경에 노출된 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 영향을 평가하였다. GFRP 복합재료 클래핑 플레이트를 약 60 °C의 오븐에 24시간 건조시킨 후 20 °C 물에 24시간 침지하는 조건을 1회 반복으로 하여 50일간 25회 반복하여 실시하였다.

마. 장기 오븐 건조

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트를 구성하는 재료의 열팽창계수가 다르기 때문에 고온이 지속적으로 작용하면 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트는 섬유와 폴리머수지의 열적 부적합성에 의해서 파괴가 발생할 수 있다. 특히 여름철에 장기간 온도가 상승되는 경우가 많기 때문에 중요하게 고려될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 60 °C의 오븐에 50일간 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트를 노출시킨 후 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

바. 동결-융해 반복

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 동결융해 반복에 의한 파괴의 가능성을 평가하였다. 고무댐의 경우 겨울철 동결융해를 받게 되므로 동결융해에 대한 영향을 평가할 필요가 있다. GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 동결융해반복에 대한 저항성을 평가하기 위하여 KS F 2456에 따라 시험을 실시하였다. 시험은 300회 반복 후 역학적 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

사. 장기 동결시험

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트는 겨울철 물이 동결상태에 있을 경우 동결상태에서 파괴하중을 받을시 급격한 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 동결피해 가능성을 평가하였다. 시험은 50일간 -5 °C에서 동결시킨 후 역학적 특성을 평가하였다.

3. 실험방법

가. 흡수율 시험방법

흡수특성은 6개의 공시체를 사용하여 매일 중량변화를 측정하는 방법으로 50일간 실험을 실시하였다. 실험환경은 10 % Na_2SO_4 용액, 4 % CaCl_2 용액과 일반 수돗물에 침지시켜 측정하였다. 용액의 온도는 60 °C를 유지하게 하였다. 흡수율은 중

량변화로 측정하여 식 (1)로 계산하였다.

$$M = \frac{\text{습윤중량}(w) - \text{건조중량}(w_d)}{\text{건조중량}(w_d)} \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

나. 하중 재하 시험방법

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 역학적 특성 및 내구특성을 평가하기 위하여 촉진연화 환경에 노출시킨 후 하중재하시험을 실시하였다. GFRP 복합재료의 휨방향 전단 특성은 ASTM D 4475 시험방법이 적용되고 있다. ASTM D 4475는 FRP 복합재료 공시체에 휨하중을 재하하는 방법으로 콘크리트 및 모르타르에 적용하고 있는 휨시험과 비슷하며, 다만 공시체 지간 거리가 상대적으로 짧은 특성을 가지고 있는 시험 방법이다. 본 연구에서도 ASTM D 4475의 시험방법을 적용하여 ISS (Interlaminar shear stress)를 측정하고자 하였으나 GFRP 클래핑 플레이트의 형상적 특성상 규정을 바로 적용할 수 없어 상부의 하중을 재하하기 위한 강판을 올려놓고 하중을 재하하여 하중 재하에 의한 파괴하중을 측정하였다. 시험은 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트가 파괴될 때까지 지속하여 파괴하중을 측정하였다. Fig. 3은 하중재하시험 모습을 나타낸다.

Fig. 3 Fracture load test of GFRP clapping plate

III. 결과 및 고찰

1. 흡수율

Fig. 4는 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 수분 흡수 거동을 나타낸다. 수분의 흡수량은 수돗물에서 가장 적게 나타났고, CaCl₂ 용액과 Na₂SO₄ 용액에서는 거의 동일하나 CaCl₂ 용액에서 약간 큰 값을 나타냈다. GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 50일간의 노출 후 최종 흡수율을 살펴보면 CaCl₂와 Na₂SO₄ 용액에 노출된 경우 거의 비슷한 값을 나타냈으나, 0.51 %를 나

Fig. 4 Absorption behavior of GFRP clapping plate

타낸 CaCl₂ 용액이 0.49 %를 나타낸 Na₂SO₄ 용액보다는 약간 큰 흡수율을 나타낸다. 일반 수돗물에 노출된 경우가 가장 작은 흡수율인 0.34 %를 나타냈다. 수분흡수율 거동을 살펴보면 초기에는 급속하게 흡수율이 증가하지만 장기적으로는 증가율이 감소하는 결과를 나타냈다. 기존 환경감소계수를 제안한 연구에서 촉진환경에 노출 후 흡수특성에 대한 연구에서는 CFRP 복합재료에서는 2.5 % 이하이어야 하며, GFRP 복합재료에서는 2.0 % 이하를 제시하고 있다 (ACI 440H, 2000; Micelli et al., 2001; Park et al., 2004a). 본 연구에서는 최고 높은 흡수율이 CaCl₂ 용액에서 0.51 %로 이와 같은 기준을 만족시켜 고무댐에 클래핑 플레이트로 적용하는 데는 큰 문제가 없는 것으로 나타났다.

2. 파괴 및 잔류 하중

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 하중재하시험 결과는 Fig. 5와 같다. 내구성 시험을 실시하지 않은 공시체의 파괴하중은 약 123.00 kN으로 나타났으며, Na₂SO₄ 용액에 노출시킨 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 파괴하중은 96.04 kN, CaCl₂ 용액에 노출시킨 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 파괴하중은 86.62 kN을 나타내었다. 또한, 수돗물에 노출시킨 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 파괴하중은 96.17 kN을 보여주었다. 파괴하중의 감소율은 CaCl₂ 용액에 노출된 경우가 가장 크게 나타났으며, 물과 Na₂SO₄ 용액에 노출된 경우에는 거의 유사한 결과를 보여주었다 (Fig. 5 (a)). GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 촉진기후환경 노출 후 파괴하중 시험 결과는 Fig. 5 (b)와 같다. 여름철 건조-습윤을 반복하는 환경을 고려한 건조습윤 반복 후 파괴하중은 108.29 kN, 겨울철 동결융해 반복 환경에 의한 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 저항성을 평가하기 위한 동결융해 반복시험 결과는 81.96 kN을 나타내었다. 그리고 여름철 갈수기에 햇빛에 노출되어 온도가 높을 때를 고려하여 장기 고온 노

Fig. 5 Relationship fracture load and residual load of GFRP clapping plate

Fig. 6 Fracture mode of GFRP clapping plate

출시험결과는 101.85 kN을 나타내었으며, 겨울철 장기동결 온도에 노출된 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 저항성을 평가하기 위한 장기 동결온도 시험 결과는 105.27 kN을 나타내었다. 시험결과 촉진환경용액에 노출시킨 경우가 기후환경을 고려하여 노출시킨 경우보다 파괴하중의 감소가 더 크게 나타났다. 이와 같은 이유는 60 °C의 온도에 지속적으로 노출시킬 뿐만 아니라 용액에 노출시켜 흡수율이 증가함으로써 폴리머 수지에 미치는 영향이 기후환경보다는 용액에 노출된 경우가 더 크기 때문이다.

기준공시체와 비교한 잔류하중 분석결과 CaCl₂ 용액에 노출시킬 때 가장 작은 잔류하중을 나타내었고, 수돗물과 Na₂SO₄ 용액에 노출시킨 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트는 거의 동등한 잔류하중을 나타내어 CaCl₂ 용액에 노출시킨 환경이 가장 큰 영향을 미쳤다 (Fig. 5 (a)). 동결융해, 건조습윤, 장기동결, 장기고온 노출 등 우리나라의 기후특성을 고려하여 실시한 촉진시험결과와 기본 공시체의 시험결과를 비교한 결과는 Fig. 5 (b)와

같다. 시험결과 동결융해 반복을 받을 때 가장 큰 파괴하중의 감소를 보였으며 다른 환경에서는 80 % 이상의 높은 잔류하중을 보여 주고 있다. 동결융해 반복의 경우 잔류하중이 66 % 정도로 나타났는데 동결 시 폴리머 수지가 경화되고 융해 시 폴리머 수지의 연화되는 현상이 지속적으로 발생하여 이와 같은 결과를 나타낸 것으로 보인다. 특히 다른 촉진환경 실험과 다르게 노출기간이 길고 반복횟수도 크기 때문에 파괴하중의 감소가 커 잔류하중이 가장 작게 나타난 것으로 보이며, 설계 시 이를 고려하여 고무댐 제체를 설치할 필요가 있을 것으로 판단된다. ACI 440H 기준과 Micelli와 Nanni 등의 연구결과를 보면 GFRP 복합재료를 적용한 환경 감소계수 C_e (environmental reduction factor)는 GFRP 복합재료에서는 0.70을 쓰며 잔류인장강도는 75 %, 잔류 ISS는 65 % 이상을 규정하고 있다 (ACI 440H, 2000; Micelli et al., 2001; Park et al., 2004). 본 연구에서 적용한 하중재하시험은 인장특성을 평가하는 방법보다는 ISS를 측정하는 방법과 보다 유사하다고 판단되어 GFRP 클래핑 플레

이트의 잔류특성의 규정은 잔류 ISS 규정을 적용하여 비교하였으며, 모두 65 % 이상을 나타냈다. 또한, 시험결과 역시 인장시험에서 발생하는 섬유의 파괴보다는 매트릭스의 파괴형태는 섬유와 섬유 사이의 계면분리에 의한 파괴형태가 발생하였다. 고무댐의 최종파괴는 층간 분리가 하중재하 방향의 직각방향으로 반복적으로 발생하다가 하중재하와 동일한 방향으로 균열이 발생하여 파괴되는 경향을 나타냈다. Fig. 6은 파괴하중 재하시험 후 GFRP 클래핑 플레이트의 대표적인 파괴형상을 나타낸다.

3. 흡수율과 잔류하중과의 비교

GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 흡수율과 잔류하중과의 관계는 Fig. 7과 같다. 일반적으로 흡수율이 증가하면 파괴하중 및 잔류하중이 감소하는 결과를 나타낸다 (Micelli et al., 2001; Park et al., 2004). 그러나 본 연구에서는 수분흡수율의 증가율이 CaCl_2 에서 0.51 %로 크지 않았다. 또한, 잔류하중도 Na_2SO_4 용액 및 수돗물에 노출된 경우 약 77 %에서 CaCl_2 용액에 노출된 경우가 약 70 %로 큰 차이가 발생하지는 않았다. 따라서 수분 흡수율에 대한 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 수돗물에 비하여 흡수율이 큰 Na_2SO_4 용액에서는 잔류하중은 수돗물에 노출된 공시체와 비교하여 감소가 크다. 그러나 상대적으로 Na_2SO_4 용액은 CaCl_2 용액과 흡수율은 비슷하지만, 잔류하중의 감소는 CaCl_2 용액이 크게 나타났다. 따라서 본 연구에서 적용한 용액에서는 흡수율의 차이가 크지 않고, 또한 모두 ACI 440H 위원회가 제시한 기준보다 매우 작은 흡수율을 나타냈기 때문에 흡수율은 잔류하중에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다. 따라서 수분의 흡수보다는 CaCl_2 와 Na_2SO_4 용액의 차이 즉, 황산염 환경보다는 CaCl_2 용액에서 폴리머 수지가 더 큰 열화를 발생시키는 것으로 판단된다.

Fig. 7 Relationship between absorption rate and fracture load of GFRP clapping plate

IV. 결 론

본 연구는 고무댐 설치에 사용되는 강재 클래핑 플레이트의 부식에 대한 문제를 해결하기 위하여 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 역학적 특성 및 내구성을 평가하였다. GFRP 복합재료 클래핑 플레이트는 부식에 대한 문제가 없지만, 각종 화학적 용액환경 및 기후환경에 대하여 충분히 검증되지 않아 이를 적용하는 데 한계점으로 작용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 고무댐 설치를 위한 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 역학적 특성 및 장기 내구성을 평가함으로써 고무댐의 사용수명을 증가시키고자 하며 시험을 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 역학적 특성 시험 결과 약 120 kN의 파괴하중에서 파괴되었으며 파괴형태는 층간 계면 분리에 의한 파괴가 발생하였다. 특히 고무댐의 최종파괴는 층간 분리가 하중재하 방향의 수평방향으로 여러 번 지속적으로 발생하다가 하중재하방향으로 균열이 발생하여 파괴되는 경향을 나타냈다.

2. 수분흡수율은 초기에는 급속하게 증가하지만 장기적으로는 증가율이 감소하는 결과를 나타냈다. 또한 최종 50일간의 최종 흡수율은 ACI 440H와 Nanni 등이 제안하고 있는 GFRP 복합재료 수분흡수율 2.0 % 이하를 만족하는 결과를 나타냈다.

3. GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 파괴하중 실험결과 용액에 노출 시에는 CaCl_2 용액에 노출 시 가장 큰 파괴하중의 감소를 보여 약 70 %의 잔류하중을 나타내었으며, 물 및 Na_2SO_4 용액에서는 77 % 정도를 나타내었다. 그러나 잔류하중의 크기가 약 70 % 이상이기 때문에 ACI 440H GFRP 복합재료 기준인 횡방향 잔류특성 65 % 이상을 만족시켰다. 따라서 설계 시 고무댐의 파괴하중에 대한 안전성을 확보하기 위하여 파괴하중 감소를 65 %를 설계에 고려하여야 할 것이다.

4. 기후환경을 고려한 촉진시험 결과 동결융해 반복환경에서 약 66 %의 잔류하중을 나타내어 ACI 440H GFRP 복합재료 기준인 횡방향 잔류특성 65 % 이상을 만족시켰다. 나머지 환경에서는 모두 80 % 이상을 나타내어 큰 영향은 없을 것으로 판단된다. 그러나 GFRP 복합재료 클래핑 플레이트의 설계 시 동결융해에 대한 영향을 고려한 설계를 하는 것이 바람직하다.

5. 흡수율과 잔류하중과의 관계를 살펴보면 수분흡수율이 각 노출환경에서 차이가 크지 않고, 잔류하중의 차이도 크지 않아 본 연구에서 적용한 노출기간에는 흡수율은 잔류하중에 큰 영향을 미치지 않았다.

상기와 같은 GFRP 클래핑 플레이트의 역학적 특성 및 내구성 시험결과 고무댐에 적용하여 금속제품의 부식에 의한 사용수명 감소의 문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. ACI 440H, 2000, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars, American concrete institute committee 440.
2. Chin, J. W., K. Aouadi., and T. Nguyen, 1997, Effects of Environmental Exposure on Fiber-Reinforced Plastic (FRP) Materials Used in Construction, *Journal of Composites and Technology Research* 19(4); 205-213.
3. Dutta, P. K., and D. Hui, 1996, Low-Temperature and Freeze-Thaw Durability of Thick Composites, *Composites Part B: Engineering* 27(3); 371-379.
4. Dakshinamoorthy, C, 1995, Three-dimensional vibrations of inflatable dams, *Thin-Walled Structures* 21(4); 291-306.
5. Hwang, T. G., and J. G. Kim, 2008, Analysis of Fluid-Structure Interaction for Development of Korean Inflatable Rubber Dams for Small Hydropower, *Journal of the Korean Society of Marine Engineering* 32(8); 1221-1230 (In korean).
6. Jones, F.R., J. W. Rock, and A. R. Wheatley, 1983, Stress Corrosion Cracking and its Implications for the Long-Term Durability of E-Glass Fiber Composites, *Composites* 14(3); 262-269.
7. Kim, H. H., and T. G. Hwang, 2008, Analysis of Fluid-Structure Interaction for Development of Inflatable Rubber Dams for Small Hydropower, *Journal of Fluid Machinery* 11(4); 86-92 (In korean).
8. Mysore, G, 1998, Dynamic Analysis of Single-anchor Inflatable Dams, *Journal of Sound and Vibration* 215(2); 251-272
9. Micelli, F and A. Nanni, 2001, Mechanical properties and durability of FRP rod, Report of CIES 00-22, Department of civil engineering, University of Missouri-Rolla, Missouri, U.S.A.
10. Park, C. G., J. P. Won., and J. K. Yoo, 2003, Long-Term Effect of Chemical Environments on FRP Reinforcing Bar for Concrete Reinforcement, *Journal of the Korea Concrete Institute* 15(6); 811-819 (In korean).
11. Park, C. G., J. P. Won., and J. W. Kang, 2004a, Recommendations of Environmental Reduction Factor of FRP Rebar for Durability Design of Concrete Structure, *Journal of the Korea Concrete Institute* 16(4); 529-539 (In korean).
12. Park, C. G., and J. P. Won., 2004b, Bond Performance of FRP Reinforcing Bar for Concrete Structures after Chemical Environmental Exposure, *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 46(3); 73-81 (In korean).
13. Park, C. G., and J. P. Won., 2005, Effect of Acceterated Aging on the Tensile and Bond Properties of FRP Rebar for Concrete, *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 47(2); 73-84 (In korean).
14. Won, J. P., S. J. Lee, Y. J. Kim, C. I. Jang, and S. W. Lee, 2008, The effect of exposure to alkaline solution and water on the strength-porosity relationship of GFRP rebar, *Composites Part B: Engineering* 39(5); 764-772.