

도장처리한 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 특성에 관한 연구

A Study on the Slip Behavior of Coated High Tension Bolted Joints

경갑수* · 이승용** · 김기현***

Kyung, Kab Soo · Lee, Seung Yong · Kim, Ki Hyun

Abstract

Coating the high tension bolted frictional joint has been generally allowed for anti-corrosion purpose. However in case of painting on paying surface of the high tension bolt, the influence on a slip strength of the joint depending on precision of painting has remained controversial. The study thus was intended to identify the slip behavior on high tension bolted frictional joint when applying ceramic painting, which has been currently developed. A slip test was conducted on a high tension bolted frictional joint specimen on which ceramic painting has been applied and a slip load and slip coefficient were measured. Based on result, the safety and usability of ceramic painting-applied high tension bolted frictional joint was evaluated. As a result, a difference to some extent by specimen in terms of load-displacement when a slip occurred was observed but an average slip coefficient appeared to have exceeded 0.4, which is the design frictional coefficient set forth in the specification. To secure the safety and usability of ceramic painting-applied high tension bolted frictional joint, it's necessary to establish the standard for painting as well as to revise the relevant specification.

Keywords : high tension bolt, frictional joint, ceramic paint, slip coefficient

요 지

강구조물의 현장연결 방식으로 널리 사용되고 있는 고장력볼트 마찰이음은 연결부의 부식 방지를 위해 도장을 실시하는 것이 일반적으로 허용되고 있다. 고장력볼트 이음부의 마찰면에 도장을 실시하는 경우에는 도장의 정도가 이음부의 미끄러짐 내력에 미치는 영향이 문제로 된다. 본 연구는 마찰면에 새로운 도장형식인 세라믹계 도장시양을 적용한 경우의 고장력볼트 마찰이음부의 미끄러짐 거동을 파악하기 위한 목적으로 실시하였다. 실험은 소정의 세라믹 도장시양을 적용한 고장력볼트 마찰이음 시험편을 대상으로 미끄러짐 시험을 실시하여 미끄러짐 하중 및 미끄러짐 계수를 측정하였으며, 이로부터 세라믹계 도장시양을 실시한 고장력볼트 연결부의 안전성 및 사용성을 검토하였다. 그 결과 미끄러짐 발생시의 하중-변위 특성은 각 도료사별로 다소의 차이가 발생하였으나, 평균 미끄러짐 계수는 도로교표준시방서의 설계기준인 마찰계수 0.4를 초과하는 결과를 나타내고 있다. 그러나 세라믹계 도장을 실시한 고장력볼트 연결부의 안전성과 사용성을 확보하기 위해서는 상세 도장 조건에 대한 기준의 제정 및 시방서의 개정이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 고장력볼트, 마찰이음, 세라믹계 도장, 미끄러짐 계수

1. 서 론

강구조물의 현장연결 방식으로 널리 사용되고 있는 고장력볼트 마찰이음의 경우, 종래에는 고장력볼트 연결부가 다른 부분과 도장방법이 다르기 때문에 그 경계부분이 방청상의 약점으로 지적되어 왔다. 이에 따라 일본에서는 1970년대 중반부터 고장력볼트 연결부에 무기징크리치 페인트를 도포한 후 현장에서는 이것을 제거하고 고장력볼트 연결을 실시하는 방법이 시도되었으며, 그 후 1980년경부터 일정 조건을 만족하는 후막형 무기징크리치 페인트를 사용하는 것이 인정되었다(日本道路協會, 1980). 따라서 최근에는 고장력볼

트 마찰이음에서 연결부의 부식 방지를 위해 일반적으로 도장을 실시하는 것이 허용되고 있다. 그러나 고장력볼트 이음부의 마찰면에 도장을 실시하는 경우에는 도장의 정도가 이음부의 미끄러짐 내력에 영향을 미치는 점이 문제로 될 수 있다.

고장력볼트 연결부의 마찰면에 무기징크리치 페인트를 도포한 경우의 연구결과를 살펴보면, 脇山 등(1985)은 무기징크리치 페인트를 표면처리에 사용한 경우에는 사용하지 않은 경우에 비하여 볼트축력의 저하는 커지지만, 6개월 경과 후의 미끄러짐 계수는 마찰면의 도막두께 50 μm 이상에서는 미끄러짐 계수 0.5 이상의 결과를 얻었다. 成宮 등(1988)은

*정회원 · 한국해양대학교 건설환경공학부 부교수 (E-mail : kyungks@hhu.ac.kr)

**정회원 · 교신저자 · 충주대학교 토목공학부 부교수 (E-mail : sylee@cju.ac.kr)

***롯데건설(주) 명지대교 건설공사현장 강교팀장 (E-mail : khyun4427@lottenc.com)

지금까지 실시된 다수의 미끄러짐 시험 결과에 대해서 고찰하여 무기징크리치 페인트를 도막두께 50 μm 이상 도포하면 미끄러짐 계수는 0.4 이상(평균값으로는 0.55 이상) 확보되는 것으로 보고하였다. 池内(1990)는 최대 7개월간 옥외 폭로시킨 시험체(모재와 연결판의 합계도막두께 150 μm)에 대해 0.56을 초과하는 미끄러짐 계수를 얻었고, 시간경과에 따라 미끄러짐 계수가 저하하는 것으로 보고하였다. 한편 水野 등(1998)은 처리면의 도막두께 75 μm 의 경우 미끄러짐 계수는 무도장(붉은 녹 상태)의 경우를 약간 하회하는 정도이고, 평균적으로 미끄러짐 계수 0.626으로 비교적 높은 값이 얻어지는 것으로 발표하였다. 平井 등(1993)은 안정된 미끄러짐 계수를 얻기 위해서는 어느 정도의 도막두께가 필요하고, 도막두께가 15 μm 정도로 얇은 경우에는 전혀 도포하지 않은 경우보다도 미끄러짐 계수가 대체로 저하하는 것으로 보고하고 있다.

이상에서와 같이 고장력볼트 연결부에 대한 기존의 연구결과를 살펴보면 마찰면의 도장조건으로 대부분이 무기징크리치 페인트를 도포한 경우에 한해서 실시되어 오고 있는 실정이다. 또한 국내의 관련 연구(이승용 외, 1999; 이승용 외, 1998)에서도 대부분이 마찰면의 도장조건으로 무기징크리치 페인트를 적용하고 있는 실정이다. 그러나 최근의 도로교표준시방서(2005)에 의하면 마찰면의 표면처리 조건으로 기존의 무기징크리치 페인트 이외에 세라믹계 도장이 새롭게 규정되어 있으나, 마찰면에 세라믹계 도장을 실시한 경우에 대한 연구는 국내외에 사례가 전무한 실정이다.

따라서 본 연구는 마찰면에 새로운 도장형식인 세라믹계 도장시양을 적용한 경우의 고장력볼트 마찰이음부의 미끄러짐 거동을 파악하기 위한 목적으로 실시하였다. 시험은 소정의 세라믹계 도장시양을 적용한 고장력볼트 마찰이음 시험편을 제작하여 미끄러짐 시험을 실시하고, 미끄러짐 하중 및 미끄러짐 계수를 측정하였다. 이로부터 세라믹계 도장시양을 적용한 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 내력 및 사용 도장계의 타당성을 평가하였으며, 연결부의 안전성 및 사용성과 함께 시방서상에 규정된 기준의 타당성을 검증하였다.

2. 실험

2.1 재료

시험편은 모재와 이음판 모두 SM490B 강재를 사용하였으며, 화학성분 및 기계적 성질은 표 1과 같다.

표 1. 모재 및 이음판의 화학성분 및 기계적 성질

| 강재 종류 | 화 학 성 분 (%) | | | | | 기 계 적 성 질 | | | |
|--------|-------------|------|------|-------|-------|------------|------------|------------|---------|
| | C | Si | Mn | P | S | 항복강도 (MPa) | 인장강도 (MPa) | 탄성계수 (MPa) | 신장률 (%) |
| SM490B | 0.16 | 0.38 | 1.23 | 0.012 | 0.009 | 368.3 | 529.2 | 205274.5 | 23.0 |

표 4. 시험편 제원

| 볼트 종류 | 단면적 | | 제 원 (mm) | | | | | | |
|--------|------------------------|------------------------|----------|------------|--------------|-----|--------|------|----|
| | 총단면적 (mm^2) | 순단면적 (mm^2) | 구멍직경 d | 모재두께 t_1 | 이음판 두께 t_2 | 폭 W | 연단거리 e | 피치 p | 공극 |
| M22×90 | 2,000 | 1,510 | 24.5 | 20 | 15 | 100 | 40 | 75 | 5 |

표 2. 고장력볼트의 기계적 성질

| 볼트 종류 | 기 계 적 성 질 | | | |
|-----------|------------|------------|------------|---------|
| | 항복강도 (MPa) | 인장강도 (MPa) | 단면적감소율 (%) | 신장률 (%) |
| M22(F10T) | 1027 | 1077 | 65.7 | 20.5 |

표 3. 고장력볼트, 너트 및 와셔의 화학성분 및 경도

| 종류 | 화 학 성 분 (%) | | | | | | 경도 (HRc) |
|----|-------------|------|------|-------|-------|-----|----------|
| | C | Si | Mn | P | S | Cr | |
| 볼트 | 0.20 | 0.22 | 0.79 | 0.014 | 0.008 | 0.8 | 33.5 |
| 너트 | 0.43 | 0.26 | 0.70 | 0.015 | 0.014 | - | 25.5 |
| 와셔 | 0.44 | 0.19 | 0.72 | 0.016 | 0.004 | - | 42.0 |

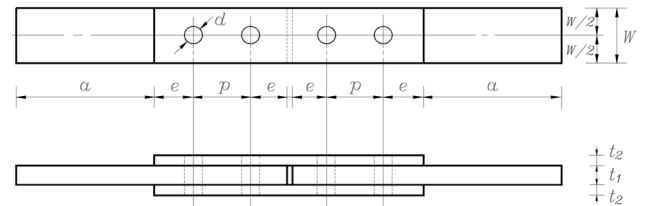


그림 1. 시험편의 형상

고장력볼트는 M22×90(F10T) 고장력 육각볼트를 사용하였으며, 고장력볼트, 너트 및 와셔의 성질은 각각 표 2 및 표 3과 같다.

2.2 시험편 형상 및 치수

본 연구에서 적용한 시험편은 그림 1에 나타난 바와 같이 기존의 고장력볼트 마찰이음의 표준시험편의 형상(日本土木學會, 2006)을 적용하였으며, 각 시험편의 제원을 표 4에 나타내었다.

그림 1 및 표 4에서와 같이 시험편은 모재 두께 20 mm, 이음판 두께 15 mm, 폭 100 mm, 최소연단거리 40 mm, 볼트 중심간 거리(피치) 75 mm로 하여 도로교설계기준(2005)을 만족하도록 제작하였다. 그리고 볼트 구멍의 직경은 볼트 직경 22 mm에 2.5 mm의 여유를 두어 24.5 mm로 하였다.

한편 시험편이 미끄러짐 하중에 도달하기 이전에 모재의 항복이 먼저 발생하는 것을 방지하기 위하여 표 5에 나타난 바와 같이 모재의 순단면 항복강도 N_{SL} 에 대한 미끄러짐 강도 N_{FYM} 의 비인 β 값이 0.66인 미끄러짐 선형형이 되도록 시험편을 제작하였다.

표 5. 모재의 항복강도와 미끄러짐 강도의 관계

| | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------|
| 모 재 | 강종 | SM490B |
| | 항복강도 f_y (MPa) | 320 |
| | 판두께 t_b (mm) | 20 |
| | 폭 W (mm) | 100 |
| | 볼트구멍 직경 d (mm) | 24.5 |
| | 순단면적 A_n (cm ²) | 15.1 |
| 설계 도입축력(M22) N (kN) | | 200 |
| 미끄러짐 강도($\mu=0.4$) N_{SL} (kN)* | | 320 |
| 모재 순단면 항복강도 N_{FYn} (kN)** | | 483.2 |
| $\beta=N_{SL}/N_{FYn}$ | | 0.66 |

주) * $N_{SL}=\mu \times m \times N$ ($m=4$)

** $N_{FYn}=f_y \times A_n$

한편 고장력볼트의 체결은 토크제어법을 적용하였으며, 예비체결과 본체결로 나누어 예비체결에서는 도입축력의 60%를 체결하고, 본체결에서 표준도입축력까지 체결하였다. 고장력볼트의 도입축력은 도로교표준시방서(2005)상의 설계볼트축력인 200 kN에 10% 할증한 220 kN으로 하였다.

2.3 도장상세

고장력볼트 시험편의 도장은 도로교표준시방서에 기술된 세라믹 도장에서의 연결판 도장사양인 세라믹계 방식도료를 모재 및 이음판에 적용하였다. 도료는 현재 세라믹계 도장사양의 도장계열이 개발된 4개의 국내 도료사(A~D사로 표기)의 제품을 대상으로 하였다. 각 도료사별 도장상세 사양은 표 6과 같다.

표 6으로부터 고장력볼트 연결판에서의 도장사양은 도료제품명은 다르나 모두 아연말을 기본으로 하는 도장을 채택하고 있으며, 이음부 도막 두께는 모두 도로교표준시방서에 기술된 세라믹계 방식도료의 도막두께 50 μm 를 초과하고 있는 것으로 나타났다. 또한 각 도료사에서 적용한 목표도막두께는 최소 70 μm 이상, 건조도막중 아연함유량 및 아연분말입경은 각 도료사마다 다소 차이가 있으나, 각각 80~97% 이상 및 4~10 μm 이하로 적용되고 있다.

2.4 시험방법

미끄러짐 하중 측정을 위한 정적 인장시험은 그림 2와 같이 2,000 kN 용량의 유압식 만능시험기(한국 M&T Korea 사)를 사용하였다. 인장시험시에는 그림 3과 같이 시험편에 2개의 변위변화기를 부착하여 모재와 이음판의 상대변위를 측정하였으며, 이로부터 미끄러짐 발생시의 하중을 구하고 미끄러짐 계수를 평가하였다.



그림 2. 정적 인장시험 전경

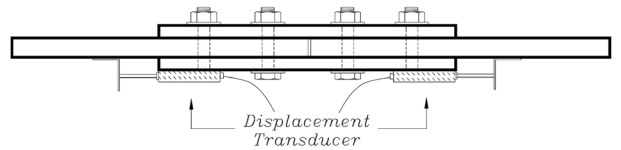


그림 3. 변위변환기 부착 위치

3. 마찰면의 표면처리 및 도장조건의 비교

고장력볼트 마찰이음에서 미끄러짐 강도의 기본적인 파라메타는 미끄러짐 계수이며, 미끄러짐 계수는 마찰면의 표면처리나 도장조건에 따라 차이가 발생한다. 마찰면의 표면처리나 도장조건에 따른 미끄러짐 계수의 설계기준을 국내의 시방에 대해 비교하여 표 7에 나타내었다.

표 7에서 비교 대상으로 한 설계기준은 우리나라의 도로교표준시방서(2005), 일본도로교시방서(2002) 및 일본강구조설계기준(2002), Eurocode(2003), ISO(1997), 미국의 AASHTO(2002) 등이다. 국내외의 설계기준에 있어서 미끄러짐 계수 값은 표 7에서와 같이 마찰면의 처리상태에 따라 큰 차이가 있는 것을 알 수 있는데, 마찰면의 처리상태의 세분화에 따라서 0.18~0.55 사이의 값으로 규정되고 있다.

우리나라의 도로교표준시방서에서는 블라스트 등에 의해 녹, 흑피 등을 제거한 상태 및 접촉면 편면당 30 μm 이상의 무기질 아연말 프라이머(징크리치 페인트)를 실시한 경우에 대해서 0.4로 규정되어 있다. 일본도로교시방서에서는 흑피를 제거한 거친 면의 경우 및 접촉면에 후막형 무기징크리치 페인트를 도장한 경우에 대해서 0.4의 값이 규정되어 있다. 또한 일본강구조설계기준에서는 흑피를 제거한 후 옥외에서 자연 방치하여 붉은 녹이 발생한 상태에 대해서는 0.45로 규정하고 있다. 이와 같이 일본도로교표준시방서와 일

표 6. 시험편의 도장상세 사양

| 구분 | A사 | B사 | C사 | D사 |
|-------------|---------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|
| 도장시스템명 | 내후성 중방식 하도 | 내후성 중방식 하도 | 내후성 중방식 하도 | 내후성 중방식 하도 |
| 목표도막두께 | 70 μm 이상 | 70 μm 이상 | 70 μm 이상 | 75 μm 이상 |
| 건조도막중 아연함유량 | 87% 이상 | 97% 이상 | 85% 이상 | 80% 이상 |
| 아연분말입경 | 8 μm 이하 | 4±0.5 μm 이하 | 7~10 μm 이하 | 5~10 μm 이하 |

표 7. 마찰면의 처리에 따른 미끄러짐 계수의 비교

| 설계기준 | 미끄러짐 계수 | 마찰면의 처리상태 |
|------------------|---------|---|
| 도로교표준시방서 (2005) | 0.40 | <ul style="list-style-type: none"> • 블라스트 등에 의해 녹, 흑피 등을 제거한 상태 • 무기질 아연말 프라이머(징크리치 페인트) 접촉면 편면당 30 μm 이상 |
| 일본도로교시방서 (2002) | 0.40 | <ul style="list-style-type: none"> • 흑피를 제거한 거친 상태 |
| | 0.40 | <ul style="list-style-type: none"> • 후막형 무기징크 도장 |
| 일본강구조설계규준 (2002) | 0.45 | <ul style="list-style-type: none"> • 흑피를 제거한 후, 옥외에서 자연 방치하여 발생한 붉은 녹 상태 |
| | 0.45 | <ul style="list-style-type: none"> • 슛블라스트 또는 그리트블라스트 처리(50 μm Ry 이상) |
| Eurocode (2003) | 0.50 | <ul style="list-style-type: none"> • 슛블라스트 또는 그리트블라스트 처리로 들뜬 녹을 제거한 면 |
| | 0.50 | <ul style="list-style-type: none"> • 슛블라스트 또는 그리트블라스트 처리 후, 알루미늄 용사 |
| | 0.50 | <ul style="list-style-type: none"> • 슛블라스트 또는 그리트블라스트 처리 후, 최소 0.5의 미끄러짐 계수를 보증하는 아연계 금속 용사 |
| | 0.40 | <ul style="list-style-type: none"> • 슛블라스트 또는 그리트블라스트 처리 후, 알칼리 아연 실리케이트 도막 50-80 μm |
| | 0.30 | <ul style="list-style-type: none"> • 와이어브러싱 또는 플레임클리닝에 의해 깨끗히 처리하고, 들뜬 녹을 제거한 면 |
| | 0.20 | <ul style="list-style-type: none"> • 무처리 |
| ISO (1997) | 0.18 | <ul style="list-style-type: none"> • 용융아연도금 |
| | 0.33 | <ul style="list-style-type: none"> • 깨끗한 흑피상태 |
| | 0.35 | <ul style="list-style-type: none"> • 유기징크 도장(도막두께 60 μm 이하) |
| | 0.40 | <ul style="list-style-type: none"> • 흑피 및 들뜬 녹을 제거하고, 옥외 폭로한 상태 |
| | 0.40 | <ul style="list-style-type: none"> • 용융아연도금 후 경미한 블라스트 처리(도막두께 50 μm 이상) |
| | 0.40 | <ul style="list-style-type: none"> • 두께가 50 μm 보다 두꺼운 아연도금에 가벼운 블라스트 처리 |
| | 0.50 | <ul style="list-style-type: none"> • 슛블라스트 또는 그리트블라스트하여 들뜬 녹을 제거한 표면 |
| | 0.50 | <ul style="list-style-type: none"> • 무기징크 도장(도막두께 60 μm 이하) |
| | 0.55 | <ul style="list-style-type: none"> • 알루미늄 용사(도막두께 50 μm 이상) |
| AASHTO (2002) | 0.33 | <ul style="list-style-type: none"> • 깨끗한 흑피표면 또는 블라스트 처리 후 A등급의 코팅 |
| | 0.50 | <ul style="list-style-type: none"> • 도장하지 않은 블라스트 처리표면 또는 블라스트 처리 후 B등급의 코팅 |
| | 0.33 | <ul style="list-style-type: none"> • 용융아연도금 후 와이어브러싱에 의한 거친 면 |

본강구조설계규준에서는 마찰면의 처리상태를 각각 2종류로 구분하고, 미끄러짐 계수는 각각 0.40 및 0.45로 규정하고 있는 것을 알 수 있다.

한편 Eurocode에서는 마찰면의 처리를 6종류로 구분하고 미끄러짐 계수를 0.20~0.50으로 규정하고 있으며, ISO에서는 마찰면의 처리를 9종류, 미끄러짐 계수는 0.18~0.55로 규정하고 있다. 또한 AASHTO는 마찰면의 처리를 3종류, 미끄러짐 계수를 0.33~0.50으로 규정하고 있다. 이와 같이 외국의 설계기준에서는 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 계수에 대해서 마찰면의 처리상태 및 도장조건에 따라 세분화하여 규정하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 국내의 설계기준에서는 미끄러짐 계수는 마찰면의 처리상태 및 도장조건에 관계 없이 일률적인 값으로 규정되어 있으므로 마찰면의 효율성을 높이기 위해서는 외국과 같이 마찰면 및 도장조건에 따라 상세한 규정을 마련하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결과분석 및 고찰

4.1 도막두께 측정결과

마찰면에 세라믹 도장을 실시한 고장력볼트 시험편에 대해 도막두께를 측정된 결과를 정리하면 그림 4와 같다. 도막두께의 측정은 각 도료사별로 두 개의 시험편을 대상으로 하였으며, 모재와 이음판의 9~12개소에서 도막두께를 측정하였다.

그림 4로부터 측정된 평균 도막두께는 A사 74.4 μm (표준

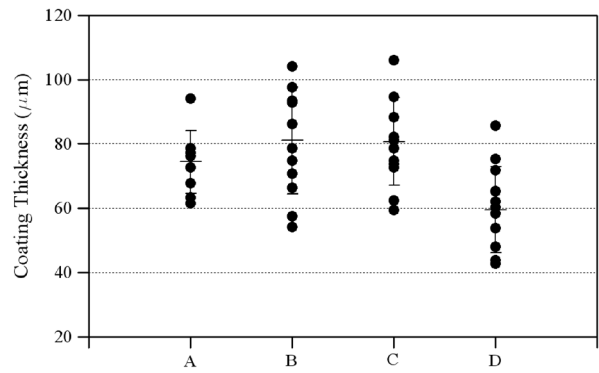


그림 4. 도막두께 측정결과

편차 9.78), B사 81.1 μm (표준편차 16.60), C사 80.7 μm (표준편차 13.56), D사 59.5 μm (표준편차 13.31)로 나타남을 알 수 있다. 이로부터 도막두께는 측정위치에 따라 다소 편차가 발생하는 것을 알 수 있으나, 이는 도막두께의 측정이 각 도료사별로 2개씩의 시험편에 대해 9~12개소의 제한적인 위치에서 이루어진 것에 기인하는 것으로 판단된다.

한편 도로교표준시방서(2005)에서 규정하고 있는 고장력볼트 연결부에 대한 일반환경 및 특수환경용 도장사양을 정리하면 표 8과 같다.

표 8에 나타난 도로교표준시방서의 세라믹계 도장사양 조건과 그림 3에 나타난 도막두께 측정결과를 비교하면 모든 시험편은 도로교표준시방서의 추천 도막두께 40 μm 이상을

표 8. 고장력볼트 연결부의 도장사양

| 구분 | | 도장계열 | 도료명칭 및 방법 | 추천도막두께 (μm) | 도장횟수 |
|------|--------------|------|------------|--------------------------|------|
| 일반환경 | 중방식도장 | SJ | SSPC-SP10 | 50 | 1 |
| | | | 무기질 아연말 도료 | | |
| | 세라믹도장 | SK | SSPC-SP10 | 40 | |
| | | | 세라믹계 방식 도료 | | |
| 특수환경 | 중방식도장 (우레탄계) | SJ | SSPC-SP10 | 50 | 1 |
| | | | 무기질 아연말 도료 | | |
| | 중방식도장 (불소수지) | SJ | SSPC-SP10 | 50 | |
| | | | 무기질 아연말 도료 | | |
| | 세라믹도장 | SK | SSPC-SP10 | 40 | |
| | | | 세라믹계 방식 도료 | | |

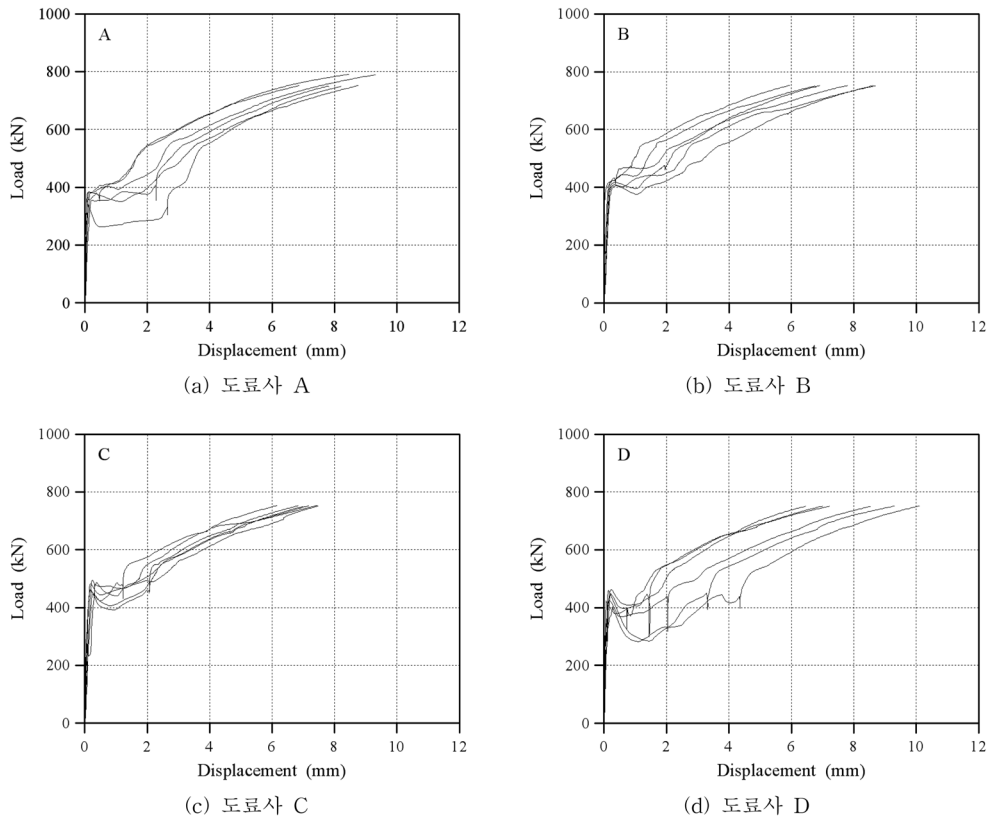


그림 5. 각 도료사별 하중-변위 곡선

확보하고 있는 것을 확인할 수 있다. 또한 도막두께 70 μm 이상에서는 4.2절에서 서술하는 것과 같이 마찰계수 0.4 이상을 확보하는 것으로 판단되나, 도막두께 40 μm 이상에 대해서 국내외의 관련 자료가 제시되어 있지 않아 도로교표준시방서의 도막두께 40 μm 에 대한 마찰계수 확보에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다. 한편 도로교표준시방서에서 세라믹계 도장의 볼트이음부 연결판 도장은 본 연구에서 실시한 도장 사양 및 실제로 현재 시공되고 있는 무기질 아연말계 도장사양과는 다른 세라믹계 방식도료로 되어 있으므로 도막 두께 및 도장사양을 고려한 표준시방서의 개정 검토가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 미끄러짐 계수

마찰면에 세라믹 도장을 실시한 고장력볼트 이음부에 대해 미끄러짐 시험을 실시하여 얻어진 하중-변위 곡선을 각 도료

사별로 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5는 각 시험편별로 두 개의 변위변환기에서 측정된 값 중에서 먼저 미끄러짐이 발생한 쪽의 결과를 나타낸 것이다.

그림 5의 하중-변위 곡선에서 대부분의 시험편이 일정하중까지는 하중이 증가함에 따라 변위가 선형으로 증가하고, 일정하중을 넘어서면서 미끄러짐이 발생함을 알 수 있다. 미끄러짐이 발생하면 모재와 볼트축이 지압상태에 이르고, 지압 상태로 하중에 저항하면서 모재의 항복이 발생하는 것을 알 수 있다.

한편 그림 5로부터 각 시험편의 하중-변위 관계는 동일한 도료사의 경우 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있으며, 미끄러짐 하중도 동일한 도료사의 경우 큰 편차 없이 유사한 양상을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 미끄러짐이 발생하는 하중 부근에서의 하중-변위 곡선을 살펴보면 A, C, D 도료사의 경우 어느 일정하중에서 갑작스런 미끄러짐이 발

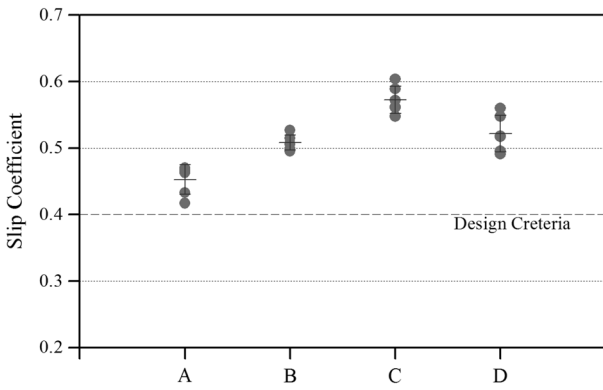


그림 6. 미끄러짐 계수

생하나, B 도료사의 경우 미끄러짐 하중 부근에서 미소 미끄러짐이 수차례 발생하면서 점진적으로 미끄러짐이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 각 도료사별로 연결판의 도장에 사용한 도료제품의 차이에 의한 것으로 판단된다.

한편 하중-변위 곡선으로부터 미끄러짐 하중을 결정하고, 식 (1)로부터 미끄러짐 계수를 구한 결과를 정리하여 그림 6에 나타내었다.

$$\mu = \frac{F}{m \times N} \quad (1)$$

여기서, μ 는 미끄러짐 계수, F 는 미끄러짐 하중, m 은 마찰면의 수, N 은 고정력볼트의 도입축력을 나타낸다.

그림 6으로부터 각 도료사별 미끄러짐 계수는 A사 0.42~0.47(평균 0.45, 표준편차 0.022), B사 0.50~0.53(평균 0.51, 표준편차 0.012), C사 0.55~0.60(평균 0.57, 표준편차 0.021), D사 0.49~0.56(평균 0.52, 표준편차 0.028)로 평가되었다. 이로부터 동일한 도료사의 시험편의 경우 미끄러짐 계수는 표준편차도 크지 않고 유사한 값을 나타내고 있어 측정결과의 신뢰성을 입증하고 있다. 한편 각 도료사별로 평균 미끄러짐 계수가 다소 차이가 발생하는 것을 알 수 있으나, 이는 각 도료사별로 마찰면의 도장조건의 차이에 의한 것으로 판단된다. 그러나 모든 도료사의 시험편의 미끄러짐 계수는 도로교표준시방서(2005)의 설계기준인 0.4를 초과하는 것을 알 수 있다.

한편 마찰면의 도막두께와 미끄러짐 계수의 관계를 나타낸

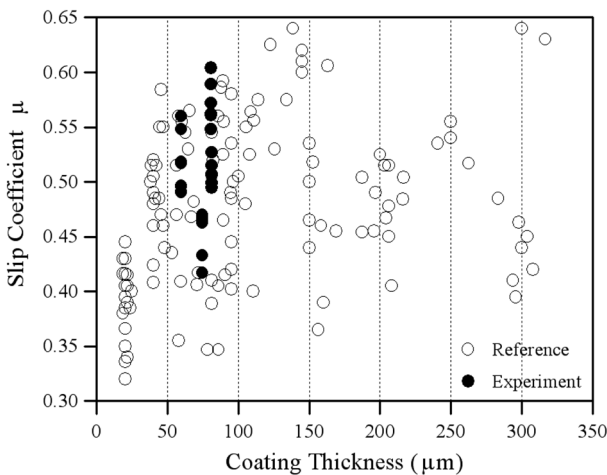


그림 7. 도막두께와 미끄러짐 계수의 관계

그림 7은 기존의 연구결과(杉谷, 2005; 成宮 외, 1988)(그림에서 ○ 표시)로부터 얻어진 도막두께와 미끄러짐 계수의 관계에 본 연구결과(그림에서 ● 표시)를 함께 비교한 것이다.

그림 7로부터 기존의 연구결과에서는 도막두께가 증가함에 따라 미끄러짐 계수가 다소 증가하는 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 그러나 본 연구결과에서는 도막두께와 미끄러짐 계수의 상관관계가 뚜렷한 경향이 나타나지 않는 것을 알 수 있는데, 이는 본 연구에서는 도막두께의 범위가 제한적이어서 도막두께와 미끄러짐 계수의 상관성을 파악하기는 어렵다. 그리고 본 연구결과는 기존의 연구결과와 비교하여 동일한 도막두께에서 미끄러짐 계수가 상대적으로 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

한편 건조도막중 아연함유량 및 아연분말 입경과 미끄러짐 계수의 관계를 정리하여 이를 기존의 연구결과(南 등, 2004)와 비교하면 그림 8 및 그림 9와 같다.

그림 8로부터 기존의 연구결과에서는 아연함유량이 증가할수록 미끄러짐 계수가 뚜렷하게 증가하는 경향이 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 아연함유량 80% 이상에서 미끄러짐 계수의 평균값이 0.4를 초과하는 결과를 나타내고 있다. 본 연구에서는 아연함유량이 80~97% 사이에 분포하여 모두 80%를 초과하며, 미끄러짐 계수도 설계기준인 0.4를 만족하는 결과를 나타내고 있다. 한편 그림 9로부터 아연분말 입경과 미끄러짐 계수의 관계는 뚜렷한 상관관계가 나타나지는 않

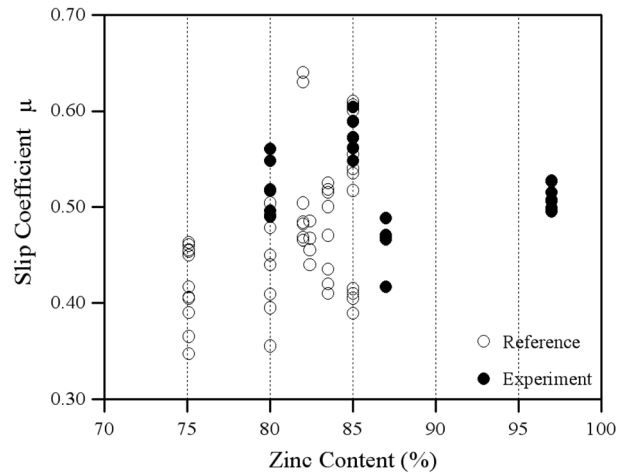


그림 8. 아연함유량과 미끄러짐 계수의 관계

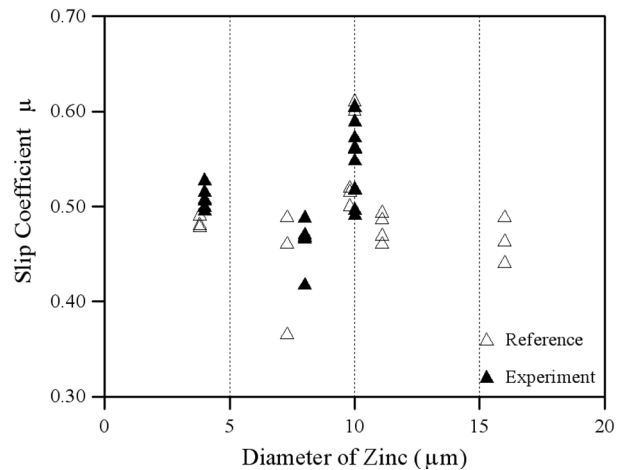


그림 9. 아연분말 입경과 미끄러짐 계수의 관계

표 9. 무기질 아연말 프라이머를 도장할 경우의 조건

| 항 목 | 조 건 |
|--------------------|------------------------|
| 접촉면 편면 당 최소 건조도막두께 | 30 μm 이상 |
| 접촉면의 합계 건조도막두께 | 90~200 μm |
| 건조도막 중 아연함유량 | 80% 이상 |
| 아연분말입경(50% 평균입경) | 10 μm 정도 이상 |

으나, 본 연구에서 적용한 입경 4~10 μm 사이에서는 미끄러짐 계수가 0.4 이상을 확보하는 것을 알 수 있다.

한편 표 7에 나타낸 바와 같이 본 연구에서 적용한 세라믹계 도장사양은 기본적으로 도로교표준시방서의 무기질 아연말 프라이머를 도장할 경우의 조건을 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 도로교표준시방서(2005)에서 볼트 연결부의 이음면 처리에 무기질 아연말 프라이머를 도장할 경우의 조건을 표 9에 나타내었다.

본 연구에서 적용한 세라믹계 도장상세 사양을 표 9와 비교할 경우, 목표도막두께 및 건조도막 중 아연함유량은 도로교표준시방서의 조건을 만족하는 것을 알 수 있으나, 아연분말입경의 경우 모든 도료사에서 무기질 아연말 프라이머를 도장할 경우의 시방조건에 미달하는 것을 알 수 있다. 특히 B사의 경우 아연분말입경이 $4\pm 0.5 \mu\text{m}$ 이하로 다른 3사에 비해 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 또한 기존의 연구결과(일본토목학회, 2006)에서는 무기징크리치 페인트 도장면의 미끄러짐 계수는 건조도막중의 아연함유량과 아연분말입경에 따라 영향을 받으며, 아연분말입경은 5~17.5 μm 사이에서 미끄러짐 계수에 나쁜 영향을 미치지 않는다고 보고하고 있다. 따라서 향후 본 연구에서 적용한 세라믹계 도장에 대해서도 이러한 도장조건에 차이가 고장력볼트 연결부에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구와 상세 도장조건에 대한 기준의 제정이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 마찰면에 새로운 도장형식인 세라믹계 도장사양을 실시한 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 특성을 평가하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 세라믹계 도장사양을 실시한 고장력볼트 연결부의 미끄러짐 발생시의 하중-변위 특성은 각 도료사별로 다소의 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 미끄러짐 시험으로부터 얻어진 각 도료사별 평균 미끄러짐 계수는 0.45~0.57로 분석되어 도로교표준시방서의 설계기준인 마찰계수 0.4를 초과하는 결과를 나타내고 있다.
2. 세라믹 도장의 도막두께는 각 도료사별로 다소 차이가 발생하는 것으로 나타났으나, 도막두께와 미끄러짐 계수의 상관관계는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다.
3. 아연함유량 및 아연분말 입경과 미끄러짐 계수의 관계는 뚜렷한 상관관계가 나타나지는 않으나, 본 연구에서 적용한 아연함유량 80~97%, 아연분말 입경 4~10 μm 사이에서는 미끄러짐 계수가 0.4 이상을 확보하는 것을 알 수 있었다.
4. 본 연구에서 적용한 도막두께 70 μm 이상의 세라믹계

도장에서는 마찰계수 0.4 μm 이상을 확보하는 것으로 판단되나, 도로교표준시방서의 추천도막두께 40 μm 이상에 대해서는 관련 자료가 제시되어 있지 않아 도막두께 40 μm 이상에 대한 마찰계수의 규정이 추가되어야 할 것으로 판단된다.

5. 향후 본 연구에서 적용한 세라믹계 도장사양에 대해서는 도장조건에 차이가 고장력볼트 연결부에 미치는 영향에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이며, 또한 세라믹계 도장을 실시한 고장력볼트 연결부의 안전성과 사용성을 확보하기 위해서는 상세 도장조건에 대한 기준의 제정 및 시방서의 개정이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 한국도로교통협회(2005) 도로교표준시방서.
 한국도로교통협회(2005) 도로교설계기준.
 이승용, 경갑수, 장동일(1999) 방청처리한 고장력볼트 이음부의 릴렉세이션 및 미끄러짐 거동에 관한 실험적 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제19권, 제-5호, pp. 697-705.
 이승용, 장동일(1998) 고장력볼트 이음부의 정적 및 피로거동에 관한 연구(I)-마찰면의 표면처리 조건의 영향. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제18권, 제-4호, pp. 507-515.
 AASHTO (2002) *Standard Specification for Highway Bridges*.
 AISC (1978) *Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings*.
 Eurocode (2003) Part 1-8, *Joints*.
 ISO (1997) ISO 10721-1, *Steel Structures - Part 1, Materials and Design*.
 日本道路協會 (2002) 道路橋示方書・同解説, II鋼橋編.
 日本道路協會 (1980) 道路橋示方書・同解説, II鋼橋編.
 日本建築學會 (2002) 鋼構造設計規準.
 日本土木學會 (2006) 高力ボルト摩摺接合継手の設計・施工・維持管理指針(案). pp. 46.
 地内武文 (1990) ジンクリッチペイントを塗布した現場手部の長期載荷試験. 首都高技報 第24號, pp. 395-396.
 南邦明, 森猛, 杉谷陸夫 (2004) 摩摺面の性状が高力ボルト摩摺接合手のすべり耐力に及ぼす影響. **土木學會第59回年次學術講演集**, I-587.
 脇山廣三, 菊川春三, 勘坂幸弘 (1985) 摩摺面にジンクリッチペイントを塗装した高力ボルト摩摺接合部のすべり實驗およびリラクゼーション實驗(塗膜厚の影響について). **日本建築學會大會學術講演梗概集(東海)**, pp. 751-752.
 成宮隆雄, 百瀬敏彦 (1988) 高力ボルト摩摺接合手の設計と耐力. 宮之技報, 4號, pp. 14-27.
 水野浩, 谷啓司 (1998) 高力ボルト手部の合理化設計に挑戦. 川田技報, Vol. 17, pp. 106-107.
 平井敬二, 田章, 堀園義昭 (1993) ジンクリッチペイントを施した高力ボルト摩摺接合部に關する實驗的研究. 西日本工業大學紀要, Vol. 23, pp. 45-54.
 杉谷 (2005) 鋼板表面處理狀況を考慮した高力ボルト摩摺接合手のすべり係數の檢討. 法政大學大學院修士論文.

(접수일: 2008.4.16/심사일: 2008.6.21/심사완료일: 2008.7.28)