

기호지방 건축용 내후성강 외장재의 다변량 해석을 통한 부식량 예측식 제안

Proposed Prediction of Corrosion Loss for Weathering Steel Cladding in KIHO region using Multi-variable Analysis

정 경 수¹⁾ · 이 재 승²⁾ · 정 진 안³⁾ · 이 승 은⁴⁾
Chung, Kyung Soo Lee, Jae Sung Chung, Jin An Lee, Sung Eun

요 약 : 내후성강은 자연대기환경에 대하여 무도장 상태로 사용되고, 강재표면에 도막의 역할을 하는 밀실한 녹층은 자연환경에 의해 수년간에 걸쳐 형성되며, 그 녹 층으로 강재의 부식 진행을 억제한다. 내후성강의 녹상태는 부식환경에 의존한다. 내후성강의 유지관리측면에서 녹상태가 어느정도 인가를 판단하는 것은 중요하다. 따라서, 국내에 있는 건축용 내후성 외장재의 외관조사결과를 바탕으로, 다변량해석에 의한 부식량(녹의 상태)과 외장재 주변환경과의 상관을 분석하고자 한다. 본 논문에서, 외장재의 지리적 데이터, 기상데이터를 이용한 다변량 분석이 수행되었고, 부식량과 환경요인에 대한 예측식이 제안되었다. 부가적으로, 제안된 부식량 예측식을 이용하여 기호지역(서울, 경기 및 충청)에 적용한 건축용 내후성강 외장재의 부식량 추이를 평가하였다.

ABSTRACT : Weathering steel has been widely used in bridges and cladding materials due to its superior atmospheric corrosion resistance. Actually, weathering steel has often been used in Korea as cladding material. However, the performance of the weathering steel in claddings has not been fully monitored. We conducted a field study on the performance of weathering steels and measured the quantity of corrosion loss on the weathering steel claddings in Korea. Based on the measured corrosion loss and weather (environmental) data, the equation to predict corrosion loss of weathering steels was proposed by using environmental factors in KIHO region in Korea. The proposed equation predicted very well the real corrosion losses of KIHO region.

핵 심 용 어 : 내후성강, 부식량, 다변량 해석, 기상데이터

KEYWORD : weathering steel, corrosion, multi-variable analysis, weather data

1. 서 론

자연환경에 사용되고 있는 강구조물은 대부분 방식을 위해 도장을 행하고 있다. 그러나, 일반도장의 경우 약 10년이면 열화하기 때문에 재도장이 필요하다. 최근, 생애주기비용(Life Cycle Cost)의 저감이 요구되고 있으며, 이러한 요구를 넘어 강재로 자체에 의해 내부식 도막이 형성되는 내후성강의 사용이 증대되고 있다. 내후성강은 자연대기환경에 대하여 무도장 상태로 사용되고, 강재표면에 도막 역할을 하는 밀실한 녹층은 자연환경에 의해 수년간에 걸쳐 형성되며, 그 녹층이 강재의 부식 진행을 억제한다.

내후성강의 녹상태는 부식환경에 의존한다. 부식환경이 형성되지 않으면, 녹 발생도 느리고 보호성 녹형성에 의한 소정의 방식기능이 발휘하기 까지 시간이 길게 걸린다. 이러한 조건하에 강재의 감모(減耗)가 극히 적어 방식상 문제는 없다. 한편, 심한 부식환경조건인 경우에는, 보호성이 있는 녹이 생기지 않고, 부식속도가 높아져 강재의 부식 감모가 확대된다. 따라서 알맞은 부식환경 조건아래, 내후성강은 자체의 합금원소의 작용으로 커다란 강재의 부식감모 없이 보호기능이 높은 녹이 강재표면에 형성되어 부식속도가 경년적으로 저감되고, 장기의 부식감모가 일정 한도내에서 억제되는 상태가 된다. 내후성강의 유지관리측면에서 보호성 녹상태가 어느정도 인가

1) 정희원, 포항산업과학연구원, 강구조연구소, 공학박사(kschung@rist.re.kr)
2) 정희원, 포항산업과학연구원, 강구조연구소, 공학박사(jaesung@rist.re.kr)
3) 정희원, 포항산업과학연구원, 강구조연구소, 공학박사(jchung@rist.re.kr)
4) 교신저자. 정희원, 포항산업과학연구원, 강구조연구소, 책임연구원
(Tel. 031-370-9570, Fax. 031-370-9909, E-mail: leese@rist.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

를 판단하는 것은 중요하다.

기존의 연구를 보면, 일본의 경우 내후성강에 대한 연구가 체계적으로 추진되었으며 日本鋼構造協會(2006)은 내후성강의 교량방식설계지침을 구축하였다. Goto(2007), Kamimura(2006), Kihira(2007a,b), Kucera(1999) 와 堀川(1967) 등은 내후성강의 부식에 대한 메커니즘 분석과 부식량 예측에 대한 연구를 진행하여 왔다. 그러나, 국내에서 건축용 내후성강 외장재에 대해서 환경조건에 따른 내후성강의 녹상태에 관한 실태조사 및 예측방법에 대한 연구자료는 미비한 실정이다.

본 논문은 국내 건축용 내후성 외장재의 외관조사결과를 바탕으로, 다변량해석을 통하여 부식량(녹 두께)과 외장재 주변 환경과의 상관을 분석하였다. 즉, 외장재의 지리적 데이터, 기상데이터를 이용한 상관관계 및 중회귀 분석을 수행하고, 환경요인에 의한 부식량 예측식을 제안하였다. 다음으로, 부식량 예측식으로 건축용 내후성강 외장재의 내부식 성능평가를 수행하였다.

2. 내후성강 개요

2.1 적용현황

국내에 적용한 내후성강의 적용연혁을 표 1에 나타내었다. 1970년대 수입용 내후성강으로 시작하여 2000년 이후 건축용 외장재에 지속적용하여 현재까지 100여건 현장설치되고 있다. 그리고 2004년 이후 구조재, 트랜치커버, 철골계단 및 거푸집 등 하중을 지지하는 구조용 강건재 분야에 적용시장 확대중에 있다.

표 1. 적용연혁

| 년도 | 적용현황 |
|------|-----------------------------------------------------------------|
| 1970 | 삼일빌딩 (수입용 내후성강) |
| 1984 | 대한재해보험 (수입용 내후성강) |
| 1998 | 김해박물관 (국산 내후성강 + 수입산 녹안정화처리재) |
| 2000 | 웰컴사옥외 (4건) |
| 2001 | 삼선재외 (3건) |
| 2002 | 사비나 갤러리의 (6건) |
| 2003 | 아크로스빌딩외 (11건) |
| 2005 | 대조초등학교 모듈러 구조재 적용외 (3건) |
| 2006 | 파주포병연대외 (9건) |
| 2007 | 내후성강 외장재 연간 20여개 현장적용 모듈러 성동여식고외 8건 설계적용중 트랜치 커버 수원시공원 적용 |

2.2 화학성분 및 기계적 성질

건축용 외장재로 사용되는 내후성강은 고내후성 압연강재 (KS D 3542)로 KS 규격명으로는 SPA-H 또는 SPA-C이다. 이 중 두께 1.6mm~16mm로 생산되는 SPA-H가 건축용 외장재로 주로 사용된다. POSCO에서 생산하는 고내후성 압연강의 화학성분 및 기계적 성질을 표 2와 표 3에 나타내었다.

표 2. 고내후성 압연강재의 화학적 성분

| 규격 | 내용 | | | | | | | | |
|-------|---------|-------------|-------------|---------------|----------|-------------|-------------|---------|---|
| | C | Si | Mn | p | S | Cu | Cr | Ni | V |
| SPA-H | 0.12 이하 | 0.25 ~ 0.75 | 0.20 ~ 0.50 | 0.070 ~ 0.150 | 0.040 이하 | 0.25 ~ 1.25 | 0.30 ~ 1.25 | 0.65 이하 | - |

표 3. 고내후성 압연강재의 기계적 성질

| 규격 | 두께 | 항복점 (MPa) | 인장강도 (MPa) | 연신율 (%) |
|-------|--------|-----------|------------|---------|
| SPA-H | 6mm 이하 | 345 | 480 | 22 |
| | 6mm 이상 | 355 | 490 | 15 |

2.3 내후성강 방식메커니즘

내후성강이 대기에 노출되었을 때 초기기간 동안은 일반강과 유사하게 녹이 발생하지만 시간이 경과함에 따라 녹층의 상부는 일반강과 같은 FeOOH층이 존재하며 하부층에 Cu가 다량 함유된 치밀한 비정질의 안정화 녹층이 존재하여 이것이 투과저항성으로 인하여 더 이상의 부식을 방지하게 된다 (그림 1참조).

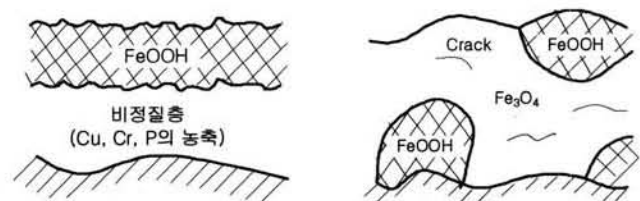


그림 1. 내후성강 녹층단면 개념도

3. 조사방법

3.1 부식량 측정방법

조사 대상으로 2006년까지 국내 건축용 내후성강 외장재 적용사례한 64건중 26곳에 대해서 조사를 행하였다. 수도권 20개 현장, 기타지역 6개 현장으로 하였다. 또한, 2000년~2002년 건립 건축물은 전수조사, 서울 건축물은 존치년도별 조사, 기

타지역 건축물은 전수조사를 행하였다. (표 4와 표 5 참조)

표 4. 조사대상

| 존치년도 ('07년기준) | 서울 | | | | 경기 | | | | 기타 | | | |
|------------------|----|---|---|---|----|---|---|---|----|----|----|----|
| | 동 | 서 | 남 | 북 | 동 | 서 | 남 | 북 | 대전 | 충청 | 경북 | 전북 |
| 7 | 1 | | | 1 | | | | | | | | |
| 6 | | | | 1 | | 1 | | | | | | |
| 5 | | | | 1 | | | | | | 1 | 1 | 1 |
| 4 | | | 2 | 2 | | 3 | | | 1 | | | |
| 3 | | | | | | 2 | | | 1 | | | |
| 2 | | | 2 | | | | | | | 1 | | |
| 1 | | | | 3 | | | | 1 | | | | |
| 0 | | | | | | | | | | | | |
| 평가대상 | 1 | | 4 | 8 | | 6 | 1 | | 2 | 2 | 1 | 1 |

국내 건축용 내후성강 외장재 실태조사를 위해 녹 두께(부식량), 이온투과저항, 표준촬영, 초음파 탐상 및 녹성분 분석을 행하였다. 본 논문에서는 측정범위 및 정량적 데이터처리면을 고려하여 녹 두께(부식량)에 대해서 다루고자 한다.

부식량(녹 두께)을 측정하는 방법으로는 전자식 장비를 활용하여 비자성체인 녹층과 자성체인 모재의 경계면을 인식하여 녹 두께(부식층 두께)를 산정한다. 그림 2에서 보는 바와 같이 전압변화를 이용하여 막두께를 측정하는 전자기식 막두께 측정

기에 의하여 계측하였다. 강판표면에 부착된 이물질이 있을 경우, 이를 제거하고 대상부위의 녹 두께를 측정하였다. 또한, 녹 층에 공동부가 있는 것이 예상되는 경우는 그 상태로 측정하던지, 아니면 제거한 후에 계측하고 메모하였다. 측정대상부위에 약 10cm x 10cm의 정방형을 상정하고, 각 모듈의 중앙점을 목표로 해서 함께 10점으로 계측하였다. 그리고 평균 부식량은 극단적인 2점을 제외하고 나머지를 평균한 값으로 하였으며, 그 값을 표 5에 나타내었다.

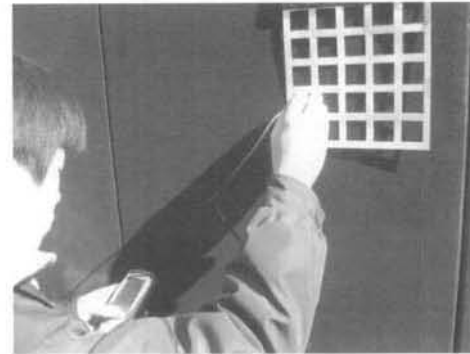


그림 2. 전자기식 막두께 측정기

3.2 외부환경 데이터 처리방법

표 5. 측정데이터

| 건물명 | 위치 | 해변거리 (km) | 환경 | 준공년도 (year) | 부식량 (mm) | | 평균온도 (°C) | 고온기도일 (°C) | 연강수량 (mm) | 1mm 강수일 (day) |
|-------------|-------|-----------|-----|-------------|----------|------|-----------|------------|-----------|---------------|
| | | | | | 평균값 | 표준편차 | | | | |
| 안양대학교 | 강화 | 8.4 | 산림 | 2001 | 101.5 | 16.2 | 11.1 | 404.8 | 1272.9 | 70.7 |
| 민음사 | 문산 | 0.47 | 전원 | 2003 | 96.0 | 3.2 | | | | |
| 바른손 유서기 | 문산 | 0.47 | 전원 | 2003 | 102.5 | 7.2 | | | | |
| 아세아 출판정보 | 문산 | 0.47 | 전원 | 2003 | 113.5 | 40.8 | 11.0 | 689.9 | 1269.5 | 71.3 |
| 세한 문화사 | 문산 | 0.47 | 전원 | 2004 | 80.8 | 4.2 | | | | |
| 기문당 | 문산 | 0.47 | 전원 | 2004 | 80.3 | 4.6 | | | | |
| 웰컴시티 | 서울 | 36.4 | 도심 | 2000 | 98.5 | 31.8 | 12.8 | 1163.9 | 1462.8 | 79.5 |
| 한솔병원 | 서울 | 44.1 | 도심 | 2000 | 72.7 | 19.7 | | | | |
| 카이스 갤러리 | 서울 | 39.5 | 주택가 | 2001 | 96.0 | 22.2 | | | | |
| 사비나 갤러리 | 서울 | 37.7 | 도심 | 2002 | 83.3 | 9.3 | 12.9 | 1095.6 | 1502.2 | 80.9 |
| 첫대 박물관 | 서울 | 36.4 | 주택가 | 2003 | 84.7 | 13.3 | | | | |
| 현대고등학교 | 서울 | 37.4 | 도심 | 2003 | 57.0 | 7.0 | | | | |
| 박승철 헤어스튜디오 | 서울 | 40.2 | 도심 | 2003 | 100.7 | 5.0 | 12.9 | 1005.8 | 1548.2 | 83.6 |
| 엘포트사육 | 서울 | 40.3 | 도심 | 2003 | 92.5 | 13.2 | | | | |
| 양재동 근생빌딩 | 서울 | 40.7 | 도심 | 2005 | 91.5 | 13.4 | | | | |
| 서초외교 사료관 | 서울 | 38.9 | 도심 | 2005 | 89.7 | 4.0 | 12.8 | 1115.0 | 1417.5 | 83.0 |
| 광화문 가든플레이스 | 서울 | 35.8 | 도심 | 2006 | 47.0 | 5.0 | | | | |
| 이로계 사육 | 서울 | 37.8 | 주택가 | 2006 | 76.0 | 19.3 | | | | |
| 매트로 호텔 | 서울 | 35.4 | 도심 | 2006 | 85.7 | 31.2 | 13.1 | 1111.2 | 1447.1 | 83.0 |
| 닥터막 갤러리 | 양평 | 78.1 | 전원 | 2006 | 70.6 | 11.9 | | | | |
| 아라리오 갤러리 | 천안 | 92.9 | 도심 | 2002 | 72.0 | 12.3 | | | | |
| 대전대학교 해화문화관 | 대전 | 86.5 | 산림 | 2003 | 85.9 | 33.6 | 13.2 | 999.0 | 1569.7 | 87.8 |
| 아주미술관 | 대전 | 80.3 | 산림 | 2004 | 77.0 | 19.5 | | | | |
| 속리산 소나무박물관 | 충북 보은 | 142.9 | 산림 | 2005 | 53.3 | 13.8 | | | | |
| 대구보건대 | 대구 | 88.1 | 도심 | 2002 | 84.8 | 9.5 | 14.4 | 1314.1 | 1200.5 | 74.2 |
| 동광교회 | 전주 | 33.6 | 주택가 | 2002 | 73.2 | 20.8 | | | | |
| | | | | | | | 13.8 | 1278.7 | 1416.4 | 95.0 |

외장재의 주변환경은, 지역환경, 지형환경 및 국부환경이 있다. 본 연구에서는 외장재 지점의 평균적인 환경인 지역환경에 대해서 검토하였다.

기상청에서 얻을 수 있는 기상데이터로는 연간강수량, 평균기온, 최고기온, 최저기온, 일조시간, 일강수량이 1mm이상인 일수, 상대습도 등이 있으나, 본 연구에서는 부식에 영향을 주는 기상데이터로 온도와 강우를 선정하였다. 그리고, 연간 평균과 집중으로 표현할 수 있는 데이터를 선정하였다. 따라서, 평균기온, 고온기도일(25℃를 넘는 날의 온도누적), 연강수량 및 1mm 강수일(일 강수량이 1mm이상인 일수)에 대해서 조사하였다. 상대습도는 부식량에 대해서 영향을 주지만, 연강수량과 1mm 강수일과 관련성이 깊다고 판단된다. 또한, 본 연구에서 평균과 집중에 대한 면을 고려하는데 상대습도로는 데이터 취급이 어려워 생략하였다.

각 조사항목에 대한 값은 외장재 위치에 가까운 지역의 기상청데이터를 이용하였으며, 표 5에 나타내었던 값은 준공년도부터 현재까지의 기상데이터의 평균값이다.

한편, 강화도와 문산지역의 경우 해변거리가 20km이하로 염분의 영향이 내후성강의 부식에 영향을 준다고 판단되어, 본 논문에서는 기상데이터로 내후성강의 부식량을 예측하고자 두 지역에 대해서는 생략하였다.

4. 다변량 해석

4.1 기상데이터간의 상관분석

기상데이터의 항목이 다수이기에 상호관련성이 큰 인자들을 묶어서 인자를 줄이고자 내후성강의 부식량에 영향을 미치는 기상데이터 항목간의 상호관련성을 통계적으로 상관분석하였다. 기상데이터간의 상관관계를 그림 3에 나타내었다.

상관관계는 그림 3과 표 6에서 보는 바와 같이 Pearson 상관계수(correlation coefficient)가 큰 값부터 다음과 같은 순으로 나타낼 수 있다.

- ① 고온기도일과 평균기온 (양의 상관관계)
- ② 연강수량과 1mm강수일 (양의 상관관계)
- ③ 고온기도일과 연강수량
- ④ 평균기온과 1mm강수일 (양의 상관관계)
- ⑤ 고온기도일과 1mm강수일
- ⑥ 평균기온과 연강수량

상관관계에 대한 통계적 유의성을 보면 표 6에서 보는 바와 같이 고온기도일과 평균기온, 연강수량과 1mm 강수일, 고온기도일과 연강수량 P값이 0.05이하로 통계적 유의성이 있다.

따라서, 부식량에 영향을 미치는 기상데이터 인자는 평균기온강도와 평균강수강도로 줄였으며 아래와 같이 정의하였다.

$$\text{평균기온강도} = \frac{\text{평균기온} \times 365 \text{일}}{\text{고온기도일}} \quad (1)$$

$$\text{평균강수강도} = \frac{\text{연강수량}}{1 \text{mm 강수일}} \quad (2)$$

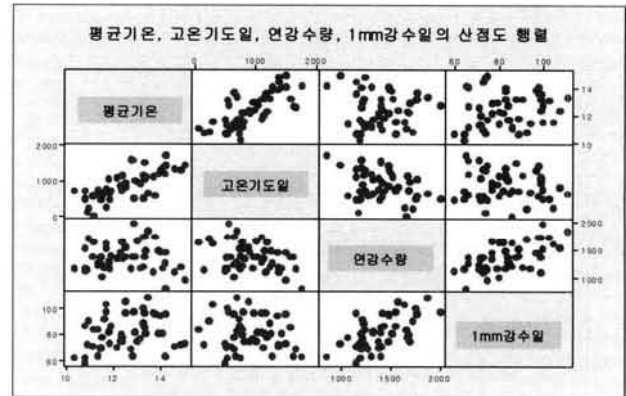


그림 3. 기상데이터간의 상관관계

표 6. 기상데이터간의 상관관계 matrix

| | | 평균기온(°C) | 고온기도일(°C) | 연강수량(mm) |
|--------------|--------------|----------|-----------|----------|
| 고온기도일(°C) | Pearson 상관계수 | 0.738 | - | - |
| | P값 | 0.000 | - | - |
| 연강수량(mm) | Pearson 상관계수 | -0.027 | -0.319 | - |
| | P값 | 0.854 | 0.024 | - |
| 1mm 강수일(day) | Pearson 상관계수 | 0.179 | -0.149 | 0.618 |
| | P값 | 0.214 | 0.301 | 0.000 |

4.2 부식량과 기상데이터의 상관관계

부식량과 평균기온강도, 평균강수강도 및 사용연수에 대한 상관관계를 그림 4에서 나타내었다.

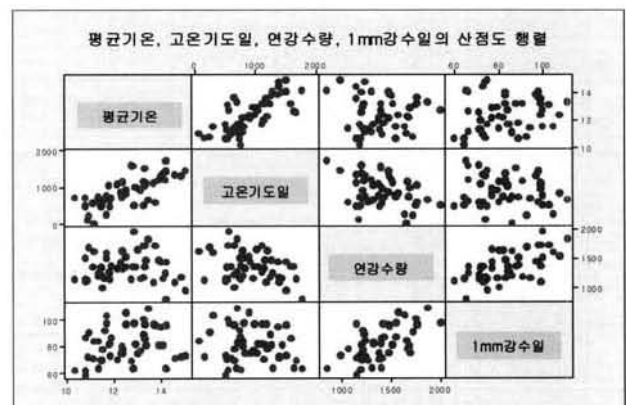


그림 4. 부식량과 기상데이터, 사용연수간의 상관관계

표 7은 상관관계 Matrix를 나타낸다. 평균기온강도와 평균강수강도의 상관관계로 Pearson 상관계수가 0.013로 거의 상관성

이 없음을 알 수 있다. 또한, 사용연수와 평균기온강도, 평균 강수량과의 관계도 거의 독립적임을 알 수 있다. 한편, 부식량에 대해서는 사용연수, 평균강수량, 평균기온강도 순으로 상관성이 높았다. 통계적인 유의성을 통하여 보면 Pearson상관계수로 얻은 경향과 같았다.

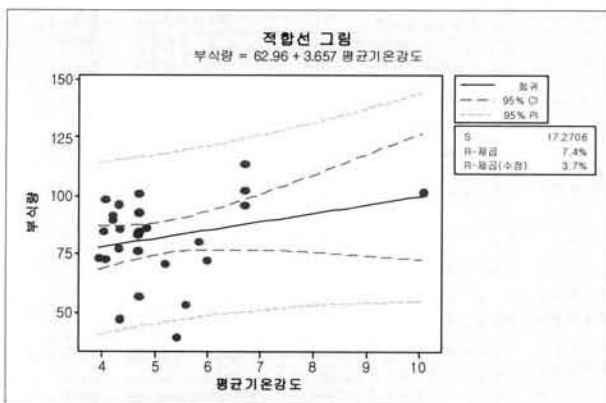
표 7. 부식량과 기상데이터, 사용연수간의 상관관계 matrix

| | | 부식량 (mm) | 평균강수량 (mm/day) | 평균기온강도 (mm) |
|----------------|-------------|----------|----------------|-------------|
| 평균강수량 (mm/day) | Pearson상관계수 | 0.391 | - | - |
| | P값 | 0.044 | - | - |
| 평균기온강도 (°C/°C) | Pearson상관계수 | 0.271 | 0.013 | - |
| | P값 | 0.171 | 0.947 | - |
| 사용연수 (day) | Pearson상관계수 | 0.439 | 0.163 | 0.092 |
| | P값 | 0.022 | 0.417 | 0.648 |

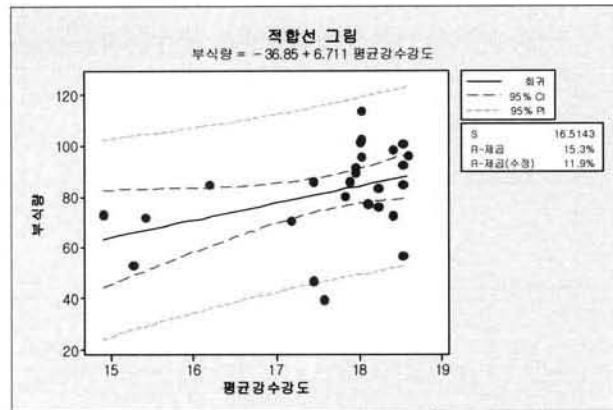
상관분석을 바탕으로 부식량과 평균기온강도, 부식량과 평균 강수량 및 부식량과 사용연수에 대한 적합성에 대해 검증한 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림 5(c)에서 보는 바와 같이, 부식량과 사용연수에 대해서는 지수함수관계에 있음을 알 수 있다. 그리고, 최소자승법에 의해서 기울기에 대한 값 (c=0.3)을 구하였다. 평균기온강도 및 평균강수량에 대해서는 부식량과 선형 및 지수함수관계가 뚜렷하게 나타나지 않았다. 따라서, 각각에 대한 회귀분석에 의한 부식량에 대한 예측식을 다음과 같이 제안할 수 있다. 이 식은 堀川(1967)가 제안한 부식량예측식에서 발전시킨 것이다.

$$Y = f(A, B) \cdot X^c \quad (3)$$

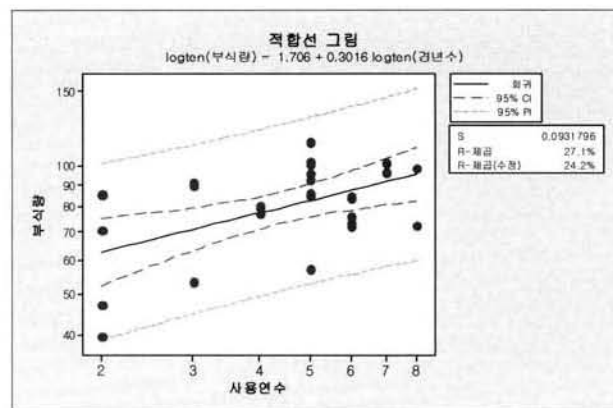
- 여기서, A : 평균기온강도(°C day/°C)
- B : 평균강수량(mm/day)
- X : 사용연수(year)
- c : 상수(=0.30)



(a) 부식량과 평균기온강도 관계



(b) 부식량과 평균강수량



(c) 부식량과 사용연수

그림 5. 부식량과 기상데이터, 사용연수간의 적합선도

5. 부식량 예측식 제안

5.1 1차 회귀진단

부식량에 대한 예측을 위해 평균기온강도, 평균강수량 및 사용연수에 대한 적합성을 검증하여 식(3)과 같은 예측식을 얻었다. 부식량과 사용연수에 대한 관계식을 얻었으므로 부식량과 평균기온강도, 부식량과 평균강수량에 대한 관계를 찾고자 한다. 이를 위하여 부식량과 사용연수를 하나의 변수(부식량/f(사용연수))로 치환하였다. 그리고 그것을 이용하여 평균강수량 및 평균기온강도에 대한 상관관계를 살펴보았다. 그 결과를 그림 6과 표 8에 나타내었다. 부식량/f(사용연수)은 평균기온강도 및 평균기온강도에 대해서 양의 상관관계를 나타내고 있음을 알 수 있다. 그 외에 대해서는 음의 상관관계를 나타내고 있다. 따라서, 부식량 예측에는 평균기온강도, 평균강수량 및 사용연수를 변수로 하여 부식량 예측식을 제안하고자 한다.

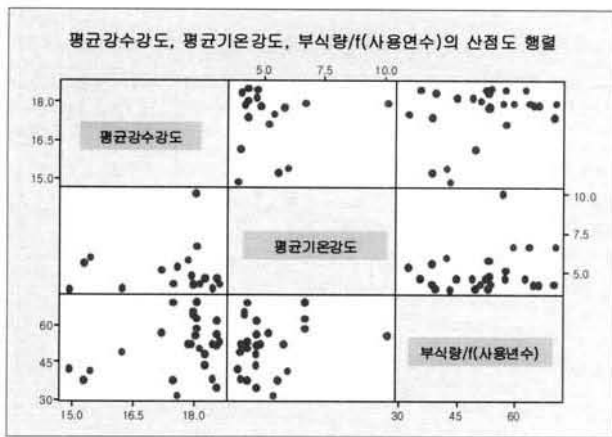


그림 6. 부식량/f(사용연수)와 기상데이터간의 상관관계

표 8. 부식량/f(사용연수)와 기상데이터간의 상관관계 matrix

| | 부식량/f(사용연수) | |
|-------------------|--------------|-------|
| | Pearson 상관계수 | P 값 |
| 평균강수량도 (mm/day) | 0.324 | 0.100 |
| 평균기온강도 (°Cday/°C) | 0.185 | 0.357 |
| 평균기온 (°C) | -0.194 | 0.331 |
| 고온기도일 (°C) | -0.169 | 0.400 |
| 연강수량 (mm) | -0.129 | 0.523 |
| 1mm 강수일 (day) | -0.385 | 0.047 |

부식량/f(사용연수)과 평균강수량도, 부식량/f(사용연수)과 평균기온강도를 보면, 식의 간편화를 위해 선형관계로 간주해도 무방함을 알 수 있다.

따라서, 다음과 같이 부식량(Y)의 예측식을 중회귀분석을 통하여 다음과 같이 제안하였다.

$$Y = (-13.1 + 1.44A + 3.27B) \cdot X^c \quad (4)$$

여기서, A : 평균기온강도(°Cday/°C)

B : 평균강수량(mm/day)

X : 사용연수(year)

c : 상수(=0.30)

식(4)에 의해서 예측값과 계측값과의 비교를 그림 7에 나타내었다. 오차범위 20%를 넘는 데이터가 나왔다. 또한, 통계적 분석에서 R-제곱값은 6.5%로 낮았으며, P값은 0.170으로 통계적 유의성에 문제가 있었다.

한편, 정규분포성, 등분산성 및 독립성을 알아보기 위해 예측치와 계측치간의 잔차분석을 행하였다. 잔차분석 결과를 그림 8에 나타내었다. 정규성, 등분산성 및 독립성에 대해서 위배 경향을 띠지 않았다. 그러나, 통계에 의한 회귀진단에서 이상치로 보이는 데이터가 표 9에서 보는 바와 같이 나타났다. 이러한 결과는 회귀식에 영향을 주기 때문에 이상데이터를 제거

한 후 재분석을 행하였다.

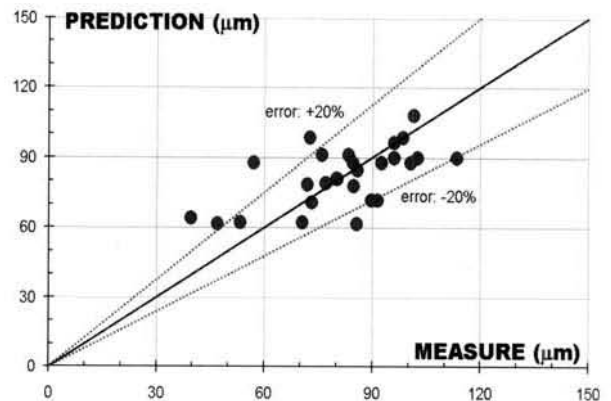


그림 7. 예측값과 계측값의 비교

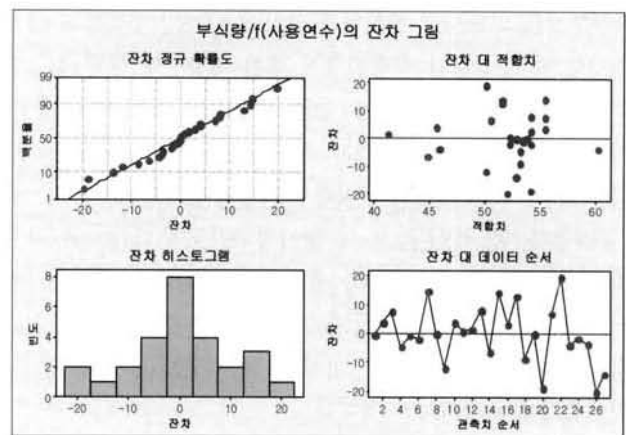


그림 8. 잔차분석결과

표 9. 이상데이터

| 건물명 | 위치 | 준공년도 (year) | 평균부식량 (mm) |
|----------|----|-------------|------------|
| 현대고등학교 | 서울 | 2003 | 57.0 |
| 양재동 근생빌딩 | 서울 | 2005 | 91.5 |
| 서초외교 사료관 | 서울 | 2005 | 89.7 |
| 메트로 호텔 | 서울 | 2006 | 85.7 |
| 대구보건대 | 대구 | 2002 | 84.8 |
| 동광교회 | 전주 | 2002 | 73.2 |

5.2 2차 회귀진단

이상치로 보이는 데이터를 제외하고 다변량해석을 통한 부식량 예측식을 수정하였다. 그림 9는 부식량/f(사용연수)와 평균강수량도, 평균기온강도간의 상관관계를 나타낸다. 이상치로 보이는 데이터를 제외하지 않은 경우에 비해 상관성이 높게 나왔다 (그림 6 참조). 다음으로, 부식량/f(사용연수)와 평균강수량도, 평균기온강도, 평균기온, 고온기도일, 연강수량 및

1mm 강수일간의 상관관계 Matrix를 표 10에 나타내었다. 부식량/f(사용연수)와 평균강수강도, 평균기온강도의 Pearson 상관관계수가 다른 변수에 비하여 높은 값을 보였다. 또한 부식량/f(사용연수)와 평균강수강도, 평균기온강도의 P 값도 0.05이하로 통계적 유의성이 있었다. 따라서, 부식량 예측에는 평균기온강도, 평균강수강도 및 사용연수를 변수로 중회귀분석을 통하여 부식량 예측식을 제안하고자 한다.

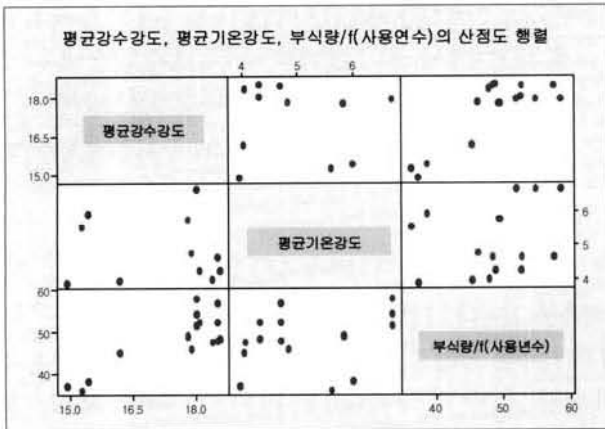


그림 9. 부식량/f(사용연수)와 기상데이터간의 상관관계

표 10. 부식량/f(사용연수)와 기상데이터간의 상관관계 matrix

| | 부식량/f(사용연수) | |
|-------------------|--------------|-------|
| | Pearson 상관계수 | P 값 |
| 평균강수강도 (mm/day) | 0.458 | 0.049 |
| 평균기온강도 (°Cday/°C) | 0.462 | 0.046 |
| 평균기온 (°C) | -0.294 | 0.222 |
| 고온기도일 (°C) | -0.364 | 0.126 |
| 연강수량 (mm) | -0.098 | 0.690 |
| 1mm 강수일 (day) | -0.447 | 0.055 |

변량 해석 결과로부터 획득된 부식량(Y)에 대한 예측식은 식(4)와 같다.

$$Y = (-100.0 + 6.91A + 6.56B) \cdot X^c \quad (4)$$

- 여기서, A : 평균기온강도(°Cday/°C)
- B : 평균강수강도(mm/day)
- X : 사용연수(year)
- c : 상수(=0.30)

그림 10은 식(4)에 의한 부식량 예측값과 계측값과의 비교를 보여준다. 평균강수강도, 평균기온강도 및 사용연수로 제안한 예측식은 내후성강의 부식량을 오차범위 20% 이내에서 예측하였다. 또한, 통계적 분석에서 R-제곱값은 60.9%로 비

교적 높은 값을 보였으며, P값은 0.000으로 통계적 유의성이 확보되었다.

정규분포성, 등분산성 및 독립성을 알아보고자 예측치와 계측치간의 잔차분석을 행하였다. 잔차분석결과를 그림 11에 나타내었다. 정규성, 등분산성 및 독립성에 대해서 위배 경향을 띠지 않았다. 따라서, 제안한 부식량 예측식을 통하여 통계적으로 타당성을 검증할 수 있었다.

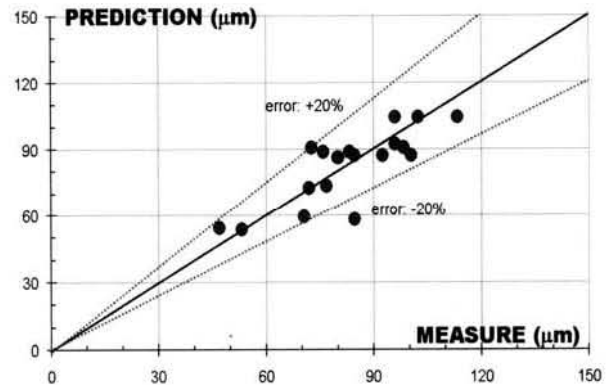


그림 10. 예측값과 계측값의 비교

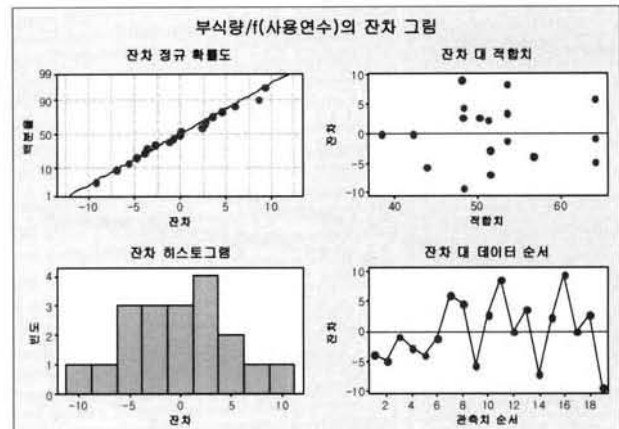


그림 11. 잔차분석결과

6. 지역에 따른 부식량 예측

제안한 부식량 예측식을 바탕으로 국내 서울 및 대전지역에 대해서 내후성강의 사용연수에 따른 부식량 정도를 알아보았다. 지역에 대한 1999년부터 2007년까지 2년간격 기상데이터(평균강수강도, 평균기온강도)의 평균값을 표 11에 나타내었다. 단, 2003년의 경우는 다른 해에 비하여 평균강수강도 및 평균기온강도에서 큰 차이를 보였으므로 평균값 산정에서 제외 시켰다. 그림 12는 지역별 기상데이터를 이용한 사용연수에 대한 내후성강의 부식량을 나타낸다. 부식량에 대해서 서울지역이 대전지역보다 크게 나타났다. 일본은 내후성강의 설

계사용기간 100년에 대한 부식감모량으로 0.5mm 이내 또는 녹두께 200 μ m미만이 내부식성능레벨 I로 정하고 있다 (日本鋼構造協會, 2006). 이를 바탕으로 국내 서울/대전지역에 건축 외장재로 내후성장을 적용할 경우 내부식성능레벨I을 가지고 있음을 알 수 있다.

표 11. 지역별 기상데이터

| 년도 | 기상데이터 | 지역 | |
|------|----------------------------------------|-------|-------|
| | | 서울 | 대전 |
| 1999 | 평균강수강도(mm/day) | 22.51 | 17.75 |
| | 평균기온강도($^{\circ}$ Cday/ $^{\circ}$ C) | 3.20 | 4.26 |
| 2001 | 평균강수강도(mm/day) | 21.32 | 11.84 |
| | 평균기온강도($^{\circ}$ Cday/ $^{\circ}$ C) | 2.88 | 3.59 |
| 2003 | 평균강수강도(mm/day) | 19.90 | 17.14 |
| | 평균기온강도($^{\circ}$ Cday/ $^{\circ}$ C) | 8.65 | 9.20 |
| 2005 | 평균강수강도(mm/day) | 19.13 | 20.96 |
| | 평균기온강도($^{\circ}$ Cday/ $^{\circ}$ C) | 3.93 | 3.82 |
| 2007 | 평균강수강도(mm/day) | 13.47 | 17.88 |
| | 평균기온강도($^{\circ}$ Cday/ $^{\circ}$ C) | 3.96 | 4.44 |
| 평균 | 평균강수강도(mm/day) | 19.11 | 17.11 |
| | 평균기온강도($^{\circ}$ Cday/ $^{\circ}$ C) | 3.49 | 4.03 |

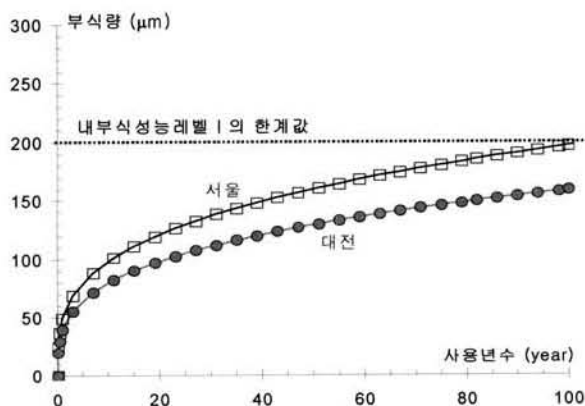


그림 12.. 지역별 부식량변화 예측

7. 결론

이 연구는 국내에 있는 26개소에 대해서 내후성 외장재의 외관조사결과를 바탕으로, 다변량해석에 의한 부식량(녹 두께)과 외장재 주변환경과의 상관을 분석하여 부식량을 환경요인에 대한 중회귀식으로 부식량 예측식을 제안하였다. 그리고 제안한 부식량 예측식으로 국내 서울/대전지역에 따른 부식량 정도를 비교하였다. 이 연구에서 얻은 주요 결과를 요약해 보면 다음과 같다.

- (1) 부식량과 사용연수의 상호 관계는 지수함수관계에 있음

을 검증하였다.

- (2) 사용연수, 평균기온강도 및 평균강수강도를 이용하여 중회귀분석이 수행되었으며, 기호지방(경기도 및 충청도 포함)에 대한 부식량 예측식을 식(4)와 같이 제시하였다.
- (3) 지역에 따른 기상데이터를 바탕으로 건축용 내후성장 외장재의 부식량을 예측한 결과, 서울지역이 대전지역에 비하여 부식속도가 컸다.
- (4) 내부식성능에 대한 평가에서 녹두께만으로 평가하는데는 무리가 따르지만, 부식량 예측결과를 바탕으로 국내 서울/대전지역에 건축외장재의 내후성장에 대한 내부식성능은 일본 내후성장 교량방식설계지침에서 제시한 내부식성능레벨 I에 해당됨을 알 수 있었다(日本鋼構造協會, 2006).

본 연구에서는, 기상데이터를 이용하여 내후성장의 부식량을 예측한 것이다. 기호지방이외의 지역, 해변에서 가까운 즉 염분의 영향을 받는 지역, 공장지역에서 가까운 즉 화학적 성분의 영향을 받는 지역에 대해서 보다 많은 데이터 축적이 미비하므로 본 예측식의 적용에 대해서는 검토의 여지가 있다.

참고 문헌

박정렬, 김규영(2004) 무도장 내후성장의 장기 내식성 및 그 현장측정법, 한국강구조학회논문집, 제16권, 4호, pp. 415-423.

성택룡, 박용명, 경갑수, 길홍배(2002) 무도장 내후성장 교량 해외실태조사 1/2, 한국강구조학회논문집, 제14권, 3호, pp.89-98.

성택룡, 박용명, 경갑수, 길홍배(2002) 무도장 내후성장 교량 해외실태조사 2/2, 한국강구조학회논문집, 제14권, 4호, pp.76-82.

Goto, S., Aso, T. and Miyamoto, A.(2007), "A rust evaluation method for weathering steels based on image processing and pattern recognition", *Proceedings of JSCE*, No.4, pp.674~683.

Kamimura, T., Hara, S., Miyuki, H., Yamashita, M. and Uchida, H.(2006), "Composition and protective ability of rust layer formed on weathering steel exposed to various environments", *Corrosion Science*, No.48, pp.2799~2812.

Kihira, H.(2007), "Systematic approaches toward minimum maintenance risk management methods for weathering steel infrastructures", *Corrosion Science*, No.49, pp.112~119.

Kihira, H.(2007), "Weathering alloy index(V) and

corrosion prediction method for unpainted steel bridges", *Journal of the Japan Welding Society*, No.3, pp.192~195.

Kucera, V., Tidblad, J., Mikhailov, A.(1999), ISO/TC 156/WG 4N 314, Annex A.

日本鋼構造協會(2006), 耐候性鋼橋梁の可能性と新しい技術,

JSSCテクニカルレポート NO.73.

日本道路協會(2008), 鋼道路橋塗裝/防蝕便覽..

堀川一男, 瀧口周一郎, 石津善雄, 金指元計(1967), 防食技術, Vol. 16 no.4, p.153.

(접수일자 : 2008. 7. 9 / 심사일 2008. 7. 25 /

게재확정일 2008. 10. 10)