

Global Report

아연도금 공정으로 인한 강재 고속도로 구조물의 용접 균열 완화

1. - 요약문 -
2. 제 1 장 소개 및 연구범위
3. 제 2 장 배경 및 문헌검토
4. 제 3 장 아연 도금 공정으로 인한 용접균열
에 기여하는 요인
5. 제 4 장 실험 시험 프로그램
6. 제 5 장 전산 시뮬레이션 - 높은 마스트 조
명기둥
7. 제 6 장 연구 요약 및 권장 사항

- 요약문 -

표지판, 등기구, 교통신호등 및 기타 강재 고속도로 구조물을 위한 구조적 지지대는 일반적으로 부식을 방지하고 긴 공용수명을 제공하기 위해 아연 도금됩니다. 그러나 최근 조사에 따르면 아연도금공정 중에 유도된 것으로 보이는 아연도금 구조물의 용접부에 균열이 발생하는 것으로 나타났습니다. 사용 중에 이러한 결함이 있는 구조물은 사용수명이 짧고 안전문제가 발생합니다. 강재 고속도로 구조물의 아연도금과정에서 용접균열 발생에 기여하는 요인을 식별하고 이러한 균열을 완화하는데 도움이 되는 현재 설계, 재료 및 시공사양의 변경을 제안할 필요가 있었습니다. 이 정보는 아연 도금된 고속도로 구조물이 의도한 공용수명을 제공하고 관련 안전문제를 제거하도록 합니다.

NCHRP 프로젝트 10-94에 따라 수행된 이 연구의 목적은 아연도금 공정으로 인한 용접균열을 완화하기 위해 아연도금 강재 고속도로 구조물의 개선된 설계, 재료 및 시공사양을 제안하는 것입니다. 이 연구는 표지판, 등기구, 교통신호 및 교량상부구조(데크 제외)에 대한 지지 구조물에 관한 것이었습니다.

프로젝트는 2단계로 진행되었습니다. 1단계에서는 아연도금 강재 구조물의 용접균열에 기여하는 것으로 나타난 요인을 식별하기 위해 포괄적인 문헌검토가 수행되었습니다. 강재 고속도로 구조물의 용접균열에 대한 이러한 요인의 관련성은 기존 미국사양 및 지침문서의 맥락에서 평가 및 고려되었습니다. 확인된 요인에는 열 효과, 아연도금 욕(bath) 화학작용, 강재, 기하학적 효과, 냉간가공수준, 경도크기(용접 또는 절단공정 후 냉각속도에 영향을 받을 수 있음) 및 잔류응력 크기가 포함되었습니다. 각 변수의 영향과 잠재적인 상호작용을 조사하기 위해 2단계에서 실험적 조사와 계산연구를 수행하여 각 변수의 상대적 영향수준을 식별하고 아연도금 공정으로 인한 용접균열을 완화하기 위해 제안된 사양의 기초를 형성했습니다.

실험 프로그램에서 수백 개의 인장시편이 공기(실온[RT] 및 고온) 및 다양한 아연도금 욕(bath)에서 시험되었습니다. 또한 강재 뼈대 개방 재하 시편을 아연도금 욕(bath)에서 시험했습니다. 인장시편의 파손 시 변형률을 측정하여 아연도금으로 인한 강재균열에 대한 민감도에 대해 각 요인의 영향을 정량화했습니다. 실험의 주요결과 프로그램은 다음과 같습니다.

1. 시험 프로그램에 포함된 모든 강(A36, A572-50, A572-65, HPS100W)은 파단 시 변형률로 측정한 **LMAC(액체금속 보조균열)** 현상에 지속적으로 취약한 것으로 나타났습니다. A36, A572-50 및 A572-65는 아연도금 중 파손 시 유사한 변형률을 나타내었지만 HPS100W는 파손 시 보다 작은 변형률을 나타냈습니다.

2. 시험프로그램에서 4가지 다른 담금 화학물질이 고려되었습니다. 이들은 특수고급아연(SHG), SHG + 0.1% Bi, SHG + 1.0% Pb 및 SHG + 0.1% Bi + 1.0% Pb 이었습니다. 다른 요인이 없을 때 강재변형을 파손에 대한 욕(bath) 화학작용의 명백한 영향은 없었습니다. 그러나 다른 요인(응력집중, 열영향부[HAZ], 냉간가공)이 존재할 때 아연도금 중 변형감소에서 알 수 있듯이 납과 비스무트(창연)를 함께 사용하면 강재연성을 감소시키는 경향이 있습니다.

3. 응력 집중계수(SCF) = 1.5 또는 SCF = 2.5인 인장시편을 노칭하여 얻은 두 가지 다른 수준의 응력 집중을 조사했습니다. 응력집중이 LMAC에 미치는 상당한 영향이 관찰되었으며, 이는 응력집중이 더 심

할수록 아연도금 중 강재 구조물의 LMAC에 대한 민감도를 증가시킬 것임을 시사합니다.

4. 세 가지 다른 HAZ 미세구조가 서로 다른 냉각속도에 의해 표시되는 것으로 고려되었습니다. 느린 냉각속도 = $12^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ (초당 섭씨온도, 이는 60킬로 주울/인치[kJ/in]의 열 입력에 해당), 중간 냉각속도 = $30^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ (30kJ/in의 열 입력에 해당) 및 빠른 냉각속도(FCR) = $60^{\circ}\text{C}/\text{sec}$ (2인치 플레이트에서 산소 연료절단에 해당). 다른 변수와 상호작용하는 수소취성현상이 있는지 여부를 조사하기 위해 산성세척 후 HAZ 시뮬레이션 시편을 실온의 공기 중에서 시험했습니다. 모든 HAZ 시뮬레이션 표본은 아연에서 매우 낮은 수준의 연신율을 경험했습니다. 산소연료 화염절단공정(FCR)에 해당하는 미세구조는 특히 LMAC에 취약했습니다. FCR은 응력집중과 결합될 때 균열에 대한 취약성을 증가시키는 거친 표면과 결함을 생성했습니다.

5. 3가지 다른 수준의 냉간가공이 고려되었으며, 그 중 2개는 6% 및 8%로 사전 변형된 직접 인장을 통해 얻어졌습니다. 세 번째 수준은 A572-50 판을 90° 로 냉간 굽힘과 굽힘 선을 따라 인장시편을 추출하여 얻었습니다. 대부분의 냉간 가공된 시편은 인장에서 6% 또는 8%로 사전 변형되었으며, 아연에서 이러한 시편의 파단신율은 아연에서 시험한 냉간 가공되지 않은 시편 및 공기 중에서 시험한 냉간 가공된 시편과 비교되었습니다. 시험결과, 냉간가공은 실제 냉간가공공정을 통해 발생할 수 있는 결함보다 LMAC에 더 적은 영향을 미치는 것으로 나타났습니다.

아연도금 중 형상과 열 부하가 상호작용하는 방식에 대한 통찰력을 제공하기 위해 전체 아연도금과정을 진행하는 HMIP(High Mast Illumination pole) 구조에 대한 계산연구가 수행되었습니다. 용융아연도금 공정 중 비선형 변형요구에 대한 구조구성의 영향을 평가하기 위해 HMIP의 열-기계적 해석을 수행했습니다. 본 연구에서 평가된 HMIP 모델은 얇은 기둥에 두꺼운 강판을 양쪽 끝단에 용접하여 구성하였습니다. 원형 및 다면(8면, 10면, 12면) 단면을 가진 총 19개의 기둥모델을 분석했습니다. 이 연구의 주요결과는 다음과 같습니다.

1. 기둥은 도금 공정사이클의 침지부분에서 액체아연과 접촉할 때 가장 큰 변형을 나타내는 경향이 있습니다. 기둥은 아연에서 추출되어 공기와 접촉할 때 높은 변형 값을 나타냈습니다. 기둥단면은 아연도금 동안 균일하게 변형되지 않았습니다. 기둥둘레주변의 변형된 위치는 서로 다른 기둥형상에 대한 아연도금공정 동안 LMAC에 가장 민감한 것으로 밝혀졌습니다.
2. 기초 판 두께 대 기둥두께의 비율이 증가함에 따라 기초 판 접합부의 응력 및 비탄성 변형률도 증가하여 LMAC에 대한 민감도가 증가함을 나타냅니다.
3. 비탄성응력 및 변형률은 다면 기둥의 굽힘 선에 크게 집중되었습니다. 기초 판 두께 대 기둥두께의 비율이 클수록 집중수준이 더 커졌습니다.
4. 다 면형 기둥은 원형기둥보다 아연도금 과정에서 지속적으로 더 큰 비탄성 응력과 변형을 나타냈습니다.

이 연구의 결과를 바탕으로 고속도로 표지판, 조명기구 및 교통신호에 대한 지지 구조물을 위한 AASHTO LRFD 사양, 초판(2015) 및 AASHTO LRFD 교량설계사양, 제8판(2017)에 대한 변경사항이 제안되었습니다. 이것들은 첨부파일에 나와 있습니다.

제 1 장 소개 및 연구범위

문제설명

표지판, 등기구, 교통신호기 및 기타 강재 고속도로 구조물을 위한 지지 구조물은 일반적으로 부식을 방지하고 긴 공용수명을 제공하기 위해 아연 도금됩니다. 최근 조사에 따르면 아연도금공정 중에 유도된 것으로 보이는 아연도금 구조물의 용접부에 균열이 발생한 것으로 나타났습니다. 사용 시 이러한 결함이 있는 구조물은 사용수명이 짧고 안전문제가 발생합니다. 강재 고속도로 구조물의 아연도금 과정에서 용접균열발생에 기여하는 요인을 식별하고 이러한 균열을 완화하는데 도움이 되는 현재 설계, 재료 및 시공사양의 변경을 제안할 필요가 있었습니다. 이 정보는 아연 도금된 고속도로 구조물이 의도한 공용수명을 제공하고 관련 안전문제를 제거하도록 합니다.

연구목적 및 범위

이 연구의 목적은 아연도금 공정으로 인한 용접균열을 완화하기 위해 아연도금 강재 고속도로 구조물의 개선된 설계, 재료 및 시공사양을 제안하는 것입니다. 이 연구는 표지판, 조명기구, 교통신호 및 교량상부 구조(데크 제외)에 대한 지지 구조물에 관한 것이었습니다. 이 작업에는 전 세계의 관련 문헌검토, 50개 주 전체의 설계사양, 국내 및 국제기술사양 및 지침문서, 아연도금 중 균열발생에 대한 이전에 공개되지 않은 자료가 포함되었습니다. 이 검토를 통해 얻은 정보는 신중하게 구성되고 평가되었으며, 그 결과 아연도금 강재구조물의 용접균열에 기여하는 것으로 나타난 요인을 식별했습니다. 강재 고속도로 구조물의 용접균열에 대한 이러한 요인의 관련성은 프로젝트에서 수행된 실험적 조사 및 계산연구의 기초를 제공하기 위해 평가되었습니다.

보고서 구성

이 보고서는 연구결과를 제시합니다. 2장에서는 아연도금 과정에서 발생하는 균열에 대한 배경정보를 요약하고 액체금속 보조균열(LMAC) 현상을 소개합니다. 3장에서는 아연도금과 관련된 균열의 분류를 돕기 위해 조직적 틀에 포함된 아연도금 중 강재구조물의 균열에 기여하는 것으로 나타난 다양한 요인에 대한 설명을 포함합니다. 4장에서는 실험적 연구를 제시하고 5장에서는 전체 아연도금공정을 진행하는 HMIP(high mast illumination pole) 구조물에 대해 수행된 계산연구를 제시합니다. 6장에서는 연구결과를 요약하고 연구를 위한 권장사항을 제시합니다. 첨부 파일에는 고속도로 표지판, 조명기구 및 교통신호에 대한 지지 구조물을 위한 AASHTO LRFD 사양, 초판(2015) 및 AASHTO LRFD 교량설계 사양, 제8판(2017)에 대한 제안된 변경사항이 포함되어 있습니다. 보고서에는 프로젝트에서 수행된 작업에 대한 세부정보를 제공하는 4개의 부록이 포함되어 있습니다. 부록은 여기에 제공되지 않지만 TRB 웹사이트(www.trb.org)에서 NCHRP Research Report 965를 검색하여 찾을 수 있습니다.

제 2 장 배경 및 문헌검토

아연도금 강재구조물은 강재부품과 부식으로부터 강재를 보호하는 두꺼운 아연 및 아연-철 금속간 경계 사이에 금속결합을 형성하기 위해 강재부품을 용융아연(~840°F)에 담그는 대규모 산업공정입니다. 아연도금은 1800년대 후반부터 미국에서 산업적 규모로 사용되어 왔으며 부식방지계획으로서 공정의 단순성과 연속성으로 인해 북미에서 연간 아연도금에 600,000톤 이상의 아연이 사용되었습니다. (미국 아연 도금 협회[AGA], 2019).

하나의 공정으로, 용융아연도금(HDG)은 용융아연에 담그기 전에 아연 도금할 강재부품의 표면처리를 필요로 합니다. 이 공정에는 강재부품을 탈지욕(bath)에 담그고 산성세척 욕(bath), 마지막으로 플럭싱 욕(bath)에 담그고 이 공정사이에 행구는 과정이 포함됩니다. 강재부품을 세척, 산성세척 및 용제 처리한 후 830-850°F의 온도로 유지되는 용융아연 캐틀(kettle)에 담급니다. 액체에 잠기는 동안 강재구성요소는 나중에 캐틀에서 추출할 때 아연이 유출될 수 있도록 비스듬히 낮아집니다. 강재부분은 강재부분의 표면에 야금학 적으로 결합된 아연 층을 발달시키기에 충분한 시간 동안 용융아연에 머무를 수 있습니다. 이 체류시간은 아연 도금되는 강재부품의 두께/질량에 따라 다르지만 일반적으로 5분에서 20분 사이입니다. 아연도금시설은 체류시간이 길어지면 코팅이 불필요하게 두꺼워질 수 있으므로 캐틀에서 시간을 최소화하기 위해 노력합니다. 코팅이 충분한 두께에 도달하면 강재부품을 수조에서 추출한 다음 냉각 액으로 옮겨 주변 온도에서 냉각합니다(경우에 따라 아연도금부품은 크롬산 염 용액에서 급랭됩니다).

LMAC 메커니즘

LMAC는 연성금속이 액체금속의 존재 하에서 인장연성의 상당한 손실을 경험하는 현상입니다. LMAC의 예는 수은에 의한 황동의 취성화입니다(Huntington, 1912). LMAC의 메커니즘은 기존균열의 기압증가, 균열선단에 액체금속의 존재에 의한 원자간 결합의 약화, 균열 끝 선단의 약한 영역 결합합금의 형성과 같은 많은 제안된 이론에도 불구하고 잘 이해되지 않습니다(Nicholas & Old, 1979).

LMAC는 다음 세 가지 요소가 결합된 결과입니다. (1) 순 인장응력의 존재(국소화 될 수 있음), (2) 특정 액체금속, (3) 재료상태 또는 공정유도 민감도(Kinstler, 2005). 마지막 두 가지 요인은 LMAC가 특정 금속조합에서만 발생함을 시사합니다. 이러한 조합의 전형적인 예는 강재-구리, 스테인리스강-아연, 알루미늄-수은 및 구리-수은입니다(Kinstler, 2005; The Welding Institute, 2019).

강재 아연도금 과정에서 발생하는 균열의 많은 발생은 LMAC에 기인합니다. 이러한 균열의 현미경 검사는 균열경로와 균열 끝에서 아연 및 기타 아연도금고로 첨가제의 농도를 나타냅니다(Kinstler, 2005; Sedlacek et al., 2004). 이것은 부록 A에 제시된 사례연구에 설명되어 있습니다. Katzung과 Schulz(2005)는 경험과 포괄적인 금속 조직학적 실험을 바탕으로 HDG와 관련된 대부분의 균열손상이 LMAC로 거슬러 올라갈 수 있다고 결론지었습니다. Kinstler(2005)는 금속간 화합물의 형성이 HDG의 기초이고 금속간 화합물을 형성하는 금속조합이 LMAC를 유발하지 않는 것으로 믿어졌음에도 불구하고 강재와 액체아연 사이에서 발생하는 LMAC의 사례가 관찰되었다고 보고했습니다.

연구원들은 강재연성의 감소에 대한 용융아연의 영향을 연구했습니다. Kikuchi and Iezawa(1981)는 그림 2-1과 같이 용융아연에 담그면 강재인장시험의 연성이 갑자기 감소하지만 동일한 상승온도(ET)에서 공기 중에서 시험할 때 연성에 영향을 미치지 않는다고 보고했습니다. 이 거동은 그림 2-2와 같이 나중에 Kinstler(1991)에 의해 재현되었습니다. 보다 최근에는 Beal et al. (2012)는 열영향부(HAZ) 시뮬레이터로 처리한 후 아연도금(전기아연도금), 고 망간강의 취성을 조사했습니다. 액체아연의 ET로 인해 특정 변형률에서 제한된 온도범위 내에서 연성(즉, 취성)의 감소가 관찰되었습니다. 매우 낮은 변형률에서 강재에 대한 취성은 관찰되지 않았습니다. 높은 변형률에서 열간 인장시험은 몇 초 밖에 지속되지 않았기 때문에 금속간 화합물은 취성을 억제할 시간이 없었지만 낮은 변형률에서 이러한 화합물이 형성되었습니다. 따라서 LMAC가 발생하려면 액체아연이 금속간 화합물의 형성에 의해 소모되기 위해 임계응력수

준에 도달해야 합니다.

본 연구에서는 시편의 파단변형률로 측정한 LMAC를 아연도금 시 균열에 대한 강재시편의 취약성 지표로 사용하였으며, 파단 시 변형률을 LMAC 취약성수준을 평가하는 기준으로 사용하였습니다. 또한, 본 연구에서는 선행연구(Elboujdaini et al., 2004)에서 제시한 270 HV(Vickers 경도)의 경도 값을 LMAC에 대한 감수성의 지표로 고려하여 경도측정에서 얻은 자료평가에 활용하였습니다.

제 3 장 아연 도금 공정으로 인한 용접균열에 기여하는 요인

액체금속 보조균열에 기여하는 요소의 구성

문헌검토를 통해 아연도금 공정과 관련된 균열에 기여하는 여러 요인을 확인했습니다. 아연도금과 관련된 두 가지 균열현상이 확인되었습니다. 이를 유형 1 및 유형 2 균열이라고 합니다.

- 유형 1 균열은 아연도금 중(즉, 침지, 도금 중, 추출 또는 냉각 중) 발생합니다. 유형 1 균열의 대부분은 LMAC와 관련된 것으로 보입니다. 기여요인의 효과를 설명하는 문헌은 부록 A와 B에서 논의됩니다.
- 유형 2 균열은 사용 중인 아연도금 강재 고속도로 구조물의 조기피로균열입니다(검은색 강재구조물과 비교). 제한된 문헌이 이러한 유형의 균열을 다루고 있습니다(Goyal et al., 2012; Magenes, 2011; Ocel, 2014; Pool, 2010; Stam et al., 2011).

그림 3-1은 용접된 강재 고속도로 구조물의 아연도금과 관련된 요소를 보여줍니다. 아연도금설비에서 아연도금 직후 균열을 식별할 수 있는지 여부(유형 1 균열)와 사용 후 구조물에서 발생하는 조기피로균열(유형 2 균열)에 따라 기여 인자를 구분하였습니다.

아연도금 중 또는 직후 균열 민감도에 영향을 미치는 것으로 확인된 요인(유형 1 균열)은 균열의 원인에 따라 열 영향, LMAC 및 취성의 세 가지 범주로 그룹화 되었습니다. 문헌(부록 B에 요약됨)은 이러한 요인을 개별적으로 조사했으며 기여요인 간의 상호작용 정도 또는 상대적 영향에 대한 정보를 제공하지 않았습니다.

유형 1 균열

유형 1 균열의 원인이 되는 요인을 3가지로 분류하여 그림 3-1에 나타내었습니다.

유형 2 균열

구조에서 발생하는 조기피로균열(유형 2 균열)은 잘 문서화되어 있지 않지만 연구에서는 아연 도금되지 않은 시편에 비해 아연 도금된 시편의 피로저항이 더 낮음을 입증했습니다(Ocel, 2014; Pool, 2010).

시험계획 개발

아연도금 중 균열에 지속적으로 해로운 영향을 미치는 것으로 문헌검토에서 여러 요인이 나타났습니다. 이것은 열 효과, 아연도금 욕(bath) 화학; 강재; 기하학적 효과; 냉간가공 수준; 경도의 크기(용접 또는 절단공정 후 냉각속도에 영향을 받을 수 있음); 및 잔류응력의 크기 등 이었습니다. 이러한 요인과 관련된 몇 가지 문제가 확인되었습니다.

연구 접근법

실험적 조사와 전산연구를 포함하는 연구계획은 지식체계에서 확인된 격차를 해결하기 위해 개발되었습니다. 실험적 조사는 아연도금 중 LMAC의 발생에 대한 다양한 요인의 영향을 다루었습니다. 여기에는 아연도금고로에 잠긴 강재시편의 인장시험과 아연도금욕(bath)에 잠긴 **빼기형 개구부 포함(WOL)** 시편(아연 도금되는 부품의 심각한 결함을 시뮬레이션하기 위한)이 포함되었습니다. 인장시험은 실험연구의 핵심을 형성했으며 강재를 포함하여 아연도금 욕(bath) 화학; 응력집중(기하학적 상세와 결함 모두에 대한 대체); 냉간가공; 및 HAZ 속성 등 LMAC에 기여하는 요인의 상대적 영향을 조사할 수 있었습니다.

Kikuchi and Iezawa(1982)는 액체아연에 담근 동안 강재의 기계적 거동을 조사했으며 액체 아연이 있을 때 전체 시편연신율이 크게 감소하는 것을 발견했습니다. 이 발견은 Kinstler(1991)에 의해 재현되었으며 일본회사인 Tomoe Corporation(2001)이 수행한 대규모 시험프로그램에서 고려되었습니다. 이 프로그램은 강재의 화학성분과 LMAC 민감도 사이의 CEZ 관계를 발전시키는 결과를 가져왔습니다. 이 접근방식은 505형 및 252형 강재시편에 인장력을 가하는 시험설정을 고안하고 시편을 아연욕(bath)에 담그는 동안 파손 시 변형률을 측정하는 방식으로 연구계획에 채택되었습니다. 파손 시 변형률은 성능에 대한 다양한 요인의 영향을 측정하는데 사용되었습니다. 또한 경도에 대한 일부 요인의 영향을 측정했습니다. 이 자료는 Elboujdaini et al.에서 제안한 대로 LMAC 감수성에 대한 대응으로 사용되었습니다. (2004).

제 4 장 실험 시험 프로그램

실험 시험프로그램에는 공기(RT 및 ET 및 다른 아연도금 고로)에서 강재인장시편의 시험과 아연도금 고로의 재하조건에서 시험된 강재 WOL 시편의 시험이 포함되었습니다.

인장시편 준비

인장시편은 표준 ASTM의 사양에 따라 A36, A572-50, A572-65, HPS100W 강판으로 제작된 E8(ASTM, 2013b)표준 505형(그림 4-1) 및 252형 강판(그림 4-2)이었다. 워터 젯 테이블을 사용하여 강판재료에서 각 시편 빈틈을 추출했습니다. A36, A572-50 및 A572-65 강판의 두께는 1인치이고 HPS100W 재료의 두께는 2인치입니다. 플레이트 재료의 각 등급은 단일 열(즉, 철강화학의 단일배열)에서 비롯되었습니다. 그림 영역에서 505형 시편의 직경이 0.75인치였기 때문에 시편은 판 중간 두께에서 추출되었습니다. 그림 4-3은 완성된 505형과 252형 시편의 사진입니다.

표 4-1은 시험환경(예: 아연, 공기 중) 및 시편조건(예: 나강, 냉간가공, 응력집중)과 함께 사용되는 인장시편의 유형을 나열합니다. Table 4-2, Table 4-3, Table 4-4는 각각 A36, A572-50, A572-65 재료에 대한 공장인증 화학조성 및 기계적 특성과 실험실 분석을 통해 결정된 화학조성을 보여줍니다. 표 4-5는 실험실 분석에서 결정된 HPS100W의 화학조성을 보여줍니다(공장인증 값은 사용할 수 없음).

ASTM(2015)에 따르면 강재는 규소함량이 0.04~0.15% 또는 0.22% 이상일 때 아연도 "반응성"인 것으로 간주됩니다. HPS100W 강재의 실리콘함량은 0.29%로 아연도금에 반응성이 있는 것으로 간주되었습니다. A36 강재의 실리콘함량도 이 범위를 벗어났지만 HPS100W 재료보다 편차가 적었습니다.

공장인증서에 제공된 화학성분은 일본 산업표준 JIS G 3129(JIS, 2005)에 포함된 공식에 따라 CEZ를 추정하는데 사용되었으며, 이는 CEZ 값을 0.44%로 제한하면 LMAC를 제어할 수 있음을 시사합니다. 이 분석의 결과는 표 4-6에 나열되어 있습니다. A36, A572-50 및 A572-65 등급에 대해 계산된 CEZ 값은 제안된 한계보다 높았으며 A572-50 및 A572-65가 가장 큰 편차를 보여 LMAC에 대한 가장 큰 감수성을 나타냅니다.

표 4-7은 실험실분석을 기반으로 한 4가지 강종에 대한 CEZ 계산을 나타냅니다. 실험실분석은 바나듐, 니오븀, 티타늄 또는 붕소에 대한 자료를 보고하지 않았습니 다. 이 값은 0으로 가정되어 공장인증서를 기반으로 계산된 값보다 낮은 CEZ 값을 초래합니다. 그러나 자료는 A572-50 및 A572-65가 A36보다 LMAC에 더 취약한 유사한 경향을 보여줍니다. HPS100W에 대해 계산된 CEZ 값은 A36, A572-50 및 A572-65 등급에 대해 계산된 값보다 상당히 커서 LMAC에 대한 더 높은 민감성을 나타냅니다.

모재경도를 측정한 결과 A36, A572-50 및 HPS100W 강에 대해 각각 145 HV, 200 HV 및 300 HV인 것으로 나타났습니 다. 이러한 값은 LMAC에 대한 감수성의 지표로서 Elboujdaini et al.(2004)에 의해 제안된 270 HV의 임계값을 고려할 때 HPS100W 강이 다른 강종보다 LMAC에 더 취약함을 시사합니다.

인장시험 설정 및 시험계획안

인장시험은 4가지 다른 환경에서 파손될 때까지 하중을 가했습니다. 아연도금고로에 잠긴 동안, 아연도금고로에 잠긴 후 냉각하는 동안, ET의 공기 및 RT의 공기. 다양한 시험환경에 대해 시험계획안에 대한 세부내용은 원문을 참조하시기 바랍니다.

WOL 표본

일련의 WOL 시험을 사용하여 아연도금 중 균열에 대한 취약성에 대해 심각한 결함의 영향을 조사했습니다. 그림 4-43에 나와 있는 이 유형의 시험은 다른 연구자들이 다양한 환경조건에 노출된 강재의 균열전파거동을 분석하고 염수에서 응력 부식 뿐만 아니라 화학처리 산업에서 압력용기에 사용되는 강재의 균열에 대한 민감성(Barsom, 1971; Novak & Rolfe, 1969).을 연구하는데 사용되었습니다. 아연도금 중 구조물의 날카로운 균열의 영향을 포착하기 위해 시험을 수행했습니다. KISCC - 환경에 대한 재료의 민감도, 응력부식균열 또는 수소취성을 측정하기 위해 개발된 아 임계균열에 대한 민감도측정(Barsom, 1971; Novak & Rolfe, 1969)이 평가에 사용되었습니다.

제 5 장 전산 시뮬레이션 - 높은 마스트 조명기둥

매개변수 연구에 대한 설명

HDG 과정에서 발생하는 비선형 응력 및 변형률에 대한 구조적 구성의 영향을 평가하기 위해 HMIP의 열-기계적 해석을 수행했습니다. FE 모델은 상용 FE 소프트웨어 Abaqus를 사용하여 이러한 HMIP에 대해 생성되었습니다(Simulia, 2018).

모델교정

기초 판과 아연도금 중 기둥 어셈블리 샤프트의 온도에 대한 열전대(두 종류의 금속을 고리 모양으로

연결하여 두 접점 사이의 온도 차이로 전류를 발생시켜 흐르게 하는 장치) 측정은 기준선 FE 모델을 보정하는데 사용되었습니다. 계측된 기동에 대해 Kleineck(2011)가 보고한 자료를 사용하여 보정을 수행했습니다. 보정의 목적은 본 연구의 모델에 사용된 아연에 침지된 강재의 메쉬 구성과 열 대류계수 값의 조합을 검증하는 것입니다. 계산된 온도, 응력 및 변형률이 메쉬 구성에 민감하기 때문에 이 보정이 필요했습니다. 보정과정에서는 Kleineck(2011)에서 제시한 용융아연 내 강재의 열대류계수를 기준값으로 채택하였습니다. 정제된 메쉬에 대한 최적의 매개변수를 결정하기 위해 용융아연에서 강재의 열 대류계수 및 다양한 요소크기에 대해 여러 분석을 수행했습니다(자세한 내용은 부록 D에 제공됨).

결과

기동은 균일한 온도에도 불구하고 아연도금 중에 대칭 패턴으로 변형되지 않습니다. 온도유도변형은 기동의 길이와 기동의 세로축에 수직인 단면 모두에서 기동 어셈블리의 심각한 왜곡을 일으킵니다. 이러한 왜곡은 기동의 침전이 순간적이지 않기 때문에 발생하며, 침전되는 동안 조립품의 방향과 무관하게 발생합니다. 일반적인 조립품에는 기초 판보다 훨씬 얇은 기동이 있습니다. 얇은 기동은 아연도금욕(bath)의 열을 매우 빠르게 흡수하고 매우 유연하며 두꺼운 기초 판의 경우 반대입니다. 기동과 기초 판 사이의 불일치는 다면기동의 굽힘에서 가장 큰 기동 대 기초 판 연결에서 침전 동안 상당한 응력을 유발합니다. 둥근모양은 원주를 따라 형상의 불연속성을 제거하고 집중요인으로 인한 응력을 줄입니다.

응력 및 변형률은 추출 중 발생하는 것보다 침지 중 더 큰 것으로 밝혀졌습니다. 기동-기초 판 접합부에서 가장 큰 변형률은 아연 담금 표면높이에서 발생하는 것으로 나타났으며, 여기서 기동 침지영역과 아연 욕(bath) 외부영역 사이의 온도차이가 가장 컸습니다. 시편이 침지될 때보다 욕(bath)에서 시편이 제거될 때 강의 온도변화 속도가 훨씬 더 느리기 때문에 추출 중 응력이 상당히 낮습니다. 냉각단계에서 기동 샤프트는 기초 판 보다 더 빨리 냉각되어 용접 연결부, 특히 다면기동의 굴곡에서 더 많은 응력과 변형을 생성합니다. 최대응력은 침지 동안 발생한 것보다 낮지만 추출 동안 다면기동의 굽힘에서 발생하는 응력은 침지 동안 발생하는 응력보다 훨씬 더 오래갑니다.

제 6 장 연구 요약 및 권장 사항

연구결과 요약

이 장에서는 이 연구의 주요결과를 요약합니다. 이러한 결과는 연구에 사용된 재료등급 및 욕(bath)조성에 대해 유도되었습니다. 다른 재료, 욕(bath) 화학 또는 환경에 따라 다른 결과가 나올 수 있습니다. 이 연구에서 LMAC(파단 시 시편의 변형률로 측정)는 아연도금 중 균열에 대한 강재시편의 취약성을 나타내는 지표로 사용되었습니다. 따라서 연구결과와 결론은 주로 파손시 변형률 자료를 기반으로 했습니다.

실험적 조사

강재

연구에 포함된 모든 등급의 강재 시편(A36, A572-50, A572-65 및 HPS100W)은 RT 또는 ET의 공기 중에서 시험할 때보다 아연도금욕(bath)에서 시험할 때 총 연신율의 더 큰 감소를 경험했습니다.

다음은 구체적인 결과입니다.

1. 시험프로그램에 포함된 모든 강재는 아연이 있는 상태에서 파손 시 변형률이 감소했습니다. RT 시편

의 공기 중과 비교하여 아연 내 시편의 변형감소는 A36의 경우 평균 65%, A572-50의 경우 57%, A572-65의 경우 58%, HPS100W의 경우 70%였습니다(다른 요인이 없을 때 포함).

2. A36, A572-50 및 A572-65 강재시편은 파손 시 유사한 크기의 변형률을 나타내었으며 아연에서 시험했을 때 평균 약 8%였습니다. HPS100W 시편은 아연에서 시험했을 때 평균 약 4%로 파손 시 훨씬 더 낮은 변형률을 나타냈습니다.

3. 연구결과에 따르면 도금고로의 강재구성요소에 대한 변형은 다양한 소스에서 축적되기 때문에 아연 도금공정은 다양한 강재등급의 파손 시 변형 값 감소에 다양한 정도로 기여합니다. LMAC를 경험할 가능성은 고로 내에서 손상 시 변형률이 증가함에 따라 감소합니다. A36, A572-50 및 A572-65 강재는 HPS100W 강재보다 더 높은 손상 시 유사한 평균변형률을 나타냈습니다.

A36, A572-50 및 A572-65를 구별하기 위해 이러한 결과에 상당히 미묘한 차이가 있음을 인식해야 합니다. 또한 A500 및 A595와 같은 고속도로 구조물에는 다른 등급의 강재가 사용되며 이는 HPS70W 및 HPS50W뿐만 아니라 관형 구조요소에 일반적으로 사용됩니다. 이들은 이 연구에서 고려되지 않았습

아연도금 욕(bath) 화학

미국 아연도금산업에서 일반적으로 사용되는 4가지 다른 고로 화학물질이 시험프로그램에서 고려되었습니다. (SHG, SHG + 0.1% Bi, SHG + 1.0% Pb 및 SHG + 0.1% Bi + 1.0% Pb.) 인장시험은 4가지 재료등급에 대해 각각의 욕(bath)구성에서 수행되었습니다. 노치 시편, HAZ 모의시편 및 냉간가공 시편에 대해 SHG 및 SHG + 0.1% Bi + 1.0% Pb에서 시험을 수행하였습니다. 시험결과 다음과 같은 결과가 나타났습니다.

1. 아연도금욕(bath)조성은 다른 요인이 없을 때 모든 재료등급에 대한 파손 시 평균변형률에 영향을 미치지 않았습니다.

2. 응력집중(노치)이 도입되었을 때 아연도금 욕(bath)에 비스무트와 납이 존재하면 SHG에서 수행된 시험보다 A36 및 A572-50에 대한 변형감소가 더 적었습니다. Notch HPS100W 시편은 아연의 작은 연신율을 나타내므로 Notch 심각도에 대한 구체적인 결론은 도출되지 않았습니다. A572-65 표본에서는 유사한 시험이 수행되지 않았습니다.

3. HAZ 특성 및 노치와 함께 욕(bath)화학 및 강종을 고려할 때(HAZ 시뮬레이션된 모든 시편은 노치가 있음) 비스무트 및 납이 고로에 포함될 때 A36, A572-50 및 HPS100W에서 더 낮은 변형률이 관찰되었습니다. ; 이러한 연신율은 단지 노치로 인한 것보다 낮았습니다.

4. 냉간가공과 함께 욕(bath)화학 및 강종을 고려했을 때, 비스무트와 납이 고로에 첨가되었을 때 CW6 시편에 대해 관찰 가능한 변형률 차이가 관찰되지 않았습니다. 그러나 순수한 아연에서 시험한 것과 비교하여 비스무트와 납을 고로에 첨가했을 때 모든 강재등급의 CW8 시편에서 변형률이 약간 감소하는 것이 일관되게 관찰되었습니다.

5. 시험결과는 응력집중, HAZ 및/또는 냉간가공이 있는 상태에서 아연 도금하는 동안 강재구조물에서 Bi + Pb가 LMAC를 악화시키는 경향을 나타냅니다.

SHG에서 시험한 시편과 SHG + 0.1% Bi + 1.0% Pb에서 시험한 시편사이의 변형률차이는 크지 않았지만, 다음과 같이 관찰된 바와 같이 이러한 요인의 효과가 결합됨에 따라 욕(bath)화학의 효과가 증가할 가능성이 있습니다. 노치가 있는 HAZ 모의표본에 대한 결과를 노치가 있는 비 HAZ 표본에 대한 결과와 비교합니다.

응력 집중

SCF = 1.5 또는 SCF = 2.5로 인장시편을 노칭하여 두 가지 다른 수준의 응력집중이 연구에서 고려되었습니다. 다음 결론은 아연에서 시험한 Notch 시편의 파손 시 변형률과 공기 중에서 시험한 Notch 시편의 변형률을 비교한 결과입니다.

1. 노치가 심한 시험편은 노치가 덜 심한 시험편보다 공기 중 및 아연 내 경우 사이의 변형률감소가 더 크게 나타났으며, 이는 응력집중의 심각도가 LMAC에 미치는 영향을 나타냅니다. 이 효과의 수준은 A36 및 A572-50 시편에서 유사했습니다(A572-65 강재는 이 시험에 포함되지 않음). 그러나 HPS100W에서는 이러한 효과가 관찰되지 않았으며, 아연으로 시험한 Notch 시편의 변형률이 너무 작아 차이를 구분할 수 없었습니다.
2. 시험결과는 응력집중의 심각도가 LMAC에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 이는 심각한 응력집중이 아연도금 중 강재구조물에서 LMAC 발생가능성을 증가시킬 것임을 시사합니다. 사용된 SCF는 자료가 실제 상황을 나타낼 수 있도록 특별히 심각하지 않았습니다(예: 판의 구멍은 약 3.0의 SCF를 나타냄). 따라서 이러한 효과는 SCF가 심한 용접부 및 연결 세부사항 및 거칠거나 균열과 같은 결함이 있는 구조에서 더욱 두드러집니다.

열 영향요소 속성

여기에 냉각율로 표시되는 세 가지 다른 HAZ 미세구조가 고려되었습니다. SCR = 12°C/s(60kJ/in.에 해당하는 열 입력), MCR = 30°C/sec(30kJ/in에 해당), 열 입력) 및 FCR = 60°C/sec(2인치 플레이트의 산소화염절단에 해당). 또한 이러한 요인으로 인한 수소취성 효과를 조사하기 위해 산성세척 후 HAZ 모의시험시편을 실온의 공기 중에서 시험했습니다. HAZ 모의실험체는 조사에 사용된 505형이 아닌 252형으로 중간 길이에서 파괴를 보장하기 위해 노치를 하였습니다. 따라서 결과는 노칭 및 HAZ 미세구조의 영향을 모두 반영합니다. 다음은 이러한 시험의 결과입니다.

1. 모든 시편은 아연에서 극도로 낮은 수준의 변형을 경험했습니다.
2. FCR을 시행한 시편은 MCR이나 SCR을 시행한 시편보다 LMAC에 더 취약하였습니다.
3. 납과 비스무트를 욕(bath)에 첨가했을 때 파단 시 훨씬 낮은 변형률을 나타내는 아연도금 욕(bath) 화학의 분명한 효과가 있었습니다.
4. HAZ는 A572-50보다 HPS100W가 파손시 변형률 감소에 더 큰 영향을 미치고 A36보다 A572-50에서 더 높은 효과를 나타냈습니다. 이러한 효과는 비스무트와 납이 아연도금 욕(bath)에 포함되었을 때만 눈에 띄었고 SHG + 0.1% Bi + 1.0% Pb에서 시험한 모든 HAZ 시뮬레이션 HPS100W 시편이 0.2% 미만의 변형률에서 파손할 정도로 심각했습니다.
5. 산성세척 후 공기 중에서 시험한 HAZ 모의시험 체는 공기 중에서 시험한 산성세척하지 않은 HAZ 모의시험 체와 유사하게 수행되었으며, 이는 산성세척에 의한 수소취성이 영향을 미치는 인자가 아님을 나타냅니다.
6. FCR을 실시한 시편은 모두 경도가 가장 높았고 파단시 변형률 감소가 가장 컸습니다. 또한 강도가 증가함에 따라 재료경도가 증가하는 일반적인 경향이 있었습니다.
7. FCR과 응력집중의 조합은 높은 감소를 생성하는 것으로 나타났습니다. 파손 시 변형; 이러한 요소는 실제로 산소연료 화염절단 표면의 상태를 나타냅니다. 또한 FCR은 A36 강재시편보다 A572 50 강재시편에서 파단 시 변형률이 더 낮았습니다.

냉간가공

세 가지 다른 수준의 냉간가공이 고려되었습니다. 6% 및 8%로 직접 인장 사전 변형을 가하는 반면, 세 번째 수준은 A572-50 플레이트를 90°로 냉간 굽힘 및 굽힘 선을 따라 인장시편을 추출하여 얻었습니다. 39개의 시편을 6% 또는 8%의 인장으로 미리 변형시켰고, 아연파단 시 변형을 아연에서 시험한 냉간 가공되지 않은 시편 및 공기 중에서 시험한 냉간 가공된 시편에 대해 얻은 것과 비교했습니다. 다음과 같은 관찰이 이루어졌습니다.

1. 아연으로 시험한 CW6 및 CW8 시편의 파손 시 변형률은 아연으로 시험한 냉간 가공되지 않은 시편의 변형률과 비슷했으며, 이는 냉간가공이 LMAC에 주요 기여요인이 아님을 나타냅니다.
2. CW8 표본에 대한 약간의 욕(bath) 화학효과가 나타났습니다. 시편은 SHG에서 수행된 시험의 변형률과 비교하여 아연에 납과 비스무트를 첨가했을 때 파손 시 평균변형률이 약간 감소했습니다. 6% 냉간 가공 수준에서는 유사한 효과가 관찰되지 않았으며, 이는 냉간가공 수준이 증가하면 LMAC에 대한 민감도가 약간 증가할 수 있음을 나타냅니다.
3. 냉간가공은 시편의 재료경도에 큰 영향을 미치지 않았습니다. 일반적으로 냉간가공은 냉간 굽힘 공정 중에 도입된 결함보다 LMAC에 대한 취약성에 기여하는 요소가 적은 것으로 보입니다.

전산 시뮬레이션

19개의 HMIP에 대한 열-기계적 해석을 수행하여 HDG 공정 중 비선형 응력 및 변형에 대한 구조적 구성의 영향을 평가했습니다.

모델은 아연도금 중 HMIP 구조에서 얻은 열 측정으로 보정되었으며, 기동두께, 기초 판 두께 및 기동모양(원형 대 다각형, 측면 수)이 변형률 및 응력응답에 미치는 영향을 조사하기 위해 매개변수 연구가 수행되었습니다. 계산 시뮬레이션은 다음을 나타냅니다.

1. 기동은 도금 사이클의 침지부에서 액체아연과 접촉할 때 가장 큰 응력/변형을 경험했으며 아연에서 추출하고 공기와 접촉할 때 또 다른 첨두치를 경험했습니다.
2. 기동단면이 침지 중에 균일하게 변형되지 않았습니다. 변형거동의 복잡한 모드가 관찰되었습니다. 기동둘레 주변의 다른 위치는 아연도금과정에서 LMAC에 가장 취약했습니다.
3. 기초 판 두께와 기동두께의 비율이 증가할수록 기초 판 접합부의 응력과 비탄성 변형률이 증가하였습니다. 이 거동은 아연과 접촉 시 두꺼운 기초 판보다 기동이 더 빠르게 팽창하고 기초 판이 연결 시 기동의 팽창을 억제하기 때문에 발생합니다. 즉, 기초 판과 기동사이의 열적 불일치가 증가할수록 접합부의 변형 및 응력이 더욱 심해집니다. 이 발견은 기초 판 두께 대 기동두께의 비율이 증가함에 따라 LMAC에 대한 민감도가 증가함을 나타냅니다.
4. 비탄성 변형률과 응력은 다면 기동의 굽힘 선에 크게 집중됩니다. 기초 판 두께 대 기동두께의 비율이 클수록 농도수준이 더 커졌습니다.
5. 다 면형 기동은 원형기동보다 아연도금 과정에서 지속적으로 더 큰 비탄성 응력과 변형을 경험했습니다. 모델은 재료냉간가공 또는 잔류응력의 영향을 포착하지 못했는데, 이는 원형기동보다 다 면형 기동에서 응력과 변형을 더 증가시킵니다.

현재 사양에 대한 제안된 수정사항

연구결과를 기반으로 고속도로 표지판, 조명기구 및 교통신호에 대한 지지 구조물을 위한 AASHTO LRFD 사양, 초판(2015) 및 AASHTO LRFD 교량설계사양, 제8판(2017)에 대한 변경사항이 제안되었습니다. 이들은 첨부파일에 제공됩니다. 이러한 변경은 아연도금 강재 고속도로 구조물의 설계, 재료 및

시공사양을 개선하고 아연도금 공정으로 인한 용접균열을 완화하는데 도움이 될 것으로 기대됩니다.

향후 연구를 위한 권장 사항

이 연구는 LMAC에 대한 강재 고속도로 구조물의 민감성에 대한 여러 요인의 영향을 개별적으로 또는 조합하여 다루었습니다. 이러한 요인은 강종, 아연도금, 욕(bath) 화학, 응력집중, 냉간가공 및 HAZ 특성이었습니다. 다른 요소는 동일한 시험 접근방식을 사용하여 평가할 수 있습니다. 또한 HMIP 구조의 기하학적 측면의 영향에 대한 통찰력을 제공하기 위해 비선형 계산 시뮬레이션이 실행되었습니다. 이 작업은 아연도금 중 강재 구조물의 LMAC에 기여하는 요인에 대한 이해를 제공했습니다. 강재 고속도로 구조물의 아연도금과 관련된 균열을 제어하는데 도움이 되는 연구를 위해 다음 주제가 제안됩니다.

1. 본 연구는 응력집중과 아연도금 사이의 상호작용을 강조하여 아연도금 중 LMAC를 제어하는 연결 세부형상의 역할을 제안합니다. LMAC에 대한 특정연결 세부정보의 민감성을 해결하려면 전체 규모의 실험시험과 계산 시뮬레이션을 모두 포함하는 향후 연구가 필요합니다.
2. 연구 프로그램은 아연도금 욕(bath) 화학(SHG + Bi + Pb)과 HAZ 특성, 응력집중 및 냉간가공과 같은 기타 요인 사이에 관찰가능하고 일관된 상호작용을 보여주었습니다. 연구를 통해 주석과 같은 다른 아연도금 욕(bath)의 상호작용 효과를 확립하는 것이 도움이 될 것입니다.
3. 프로젝트에서 연구된 4가지 강종 중 3가지(A36, A572-50 및 A572-65)는 아연에서 유사하게 수행되었습니다. 다른 등급(HPS100W)은 다르게 수행되어 아연도금 욕(bath) 화학 및 기타 요인과 더 많은 상호작용 효과를 보여줍니다. HPS70W와 같은 다른 등급의 강재에 대한 추가연구는 고속도로 구조물에 사용되는 다른 강재등급의 성능에 대한 아연도금 공정의 영향을 확립하는데 도움이 될 것입니다.

<원문제목> Mitigation of Weldment Cracking in Steel Highway Structures Due to the Galvanizing Process

<원문출처> Transportation Research Board, 500 Fifth St. NW, Washington, D.C. 20001