

대형 건설 강구조물의 용접부 안전 보증

정 경 섭

Safety of Welding Details at Large Steel Structures

Kyoung-Sup Jung

1. 서 언

건설되는 강구조물에 용접이 이용된 지도 이제는 꽤 되었지만, 1994년 10월에 발생한 성수대교의 붕괴로 인하여 부실공사로 치부되는 사항들 중 하나였던 용접에 대한 무조건적인 우려는 이미 건설되어 사용 중인 많은 강구조물들에 대한 재검토와 함께, 이후 건설되는 국내 강구조물들에 대하여 어쩌면 과잉 대응을 가져왔지만, 이후 큰 사고 없이 이후 90년대 후반의 호황기를 거치면서 국내 건설 강구조물의 용접기술의 발전에 많은 기여를 가져왔다.

실제 강구조물을 구성하는 강재는 함께 건설에 이용되는 재료들 중 콘크리트에 비하여 값이 비싼 것은 상식이다. 그러나 많은 사람들이 간과하고 있는 것으로 구조물이 건설, 준공되어 공용되면 아무리 설계가 제대로 되었고 건설에 사용된 재료가 좋다고 해도 언젠가는 구조물을 구성하는 부재가 노후화되어 그 기능을 잃게 되는 것은 당연하며, 신이 만들었다는 인간도 결함을 가지고 있어서 가끔 병원 신세를 지게 되듯이, 건설 구조물 또한 전문기술자의 도움이 필요로 되는 경우가 있다는 것이다.

이때, 강구조물의 경우는 손쉽게 기능 회복이 가능하지만, 콘크리트 구조물의 경우는 거의 불가능하거나 그 회복 비용이 매우 크다는 것이 구조물 건설 당시 큰 비용이 필요로 하지만 강구조물을 건설하는 이유들 중 하나이며, 게다가 최악의 경우 구조물을 폐기하는 경우에 있어서도 강재는 그냥 그대로 혹은 고철의 용광로 투입 재생산으로 쉽게 재활용이 가능하지만 콘크리트는 재활용에 많은 비용이 요구된다는 점과 더불어, 구조물을 건설하는 경우 공사기간이 예상보다 현저히 짧아질 경우 강재를 활용하면 가능하다는 것 또한 건설 구조물에 강재를 활용하는 이유가 된다.

한편 이들 강구조물들의 경우 가장 문제가 되는 것은 이들이 완성 준공되어 공용되었을 때에 전문기술자들이

요구하는 형태와 기능을 갖추기 위하여 강재를 자르고 붙이거나 접합(이음, 연결)하는 기술의 확보이다. 이미 앞에서 언급했지만 성수대교 붕괴에 이어 당산철교 등 1990년 이전에 건설된 국내 중요 강구조물들에 대한 조사 분석에서 가장 두드러지게 나타난 결함은 볼트연결보다는 용접이음이었다¹⁾.

그러나 이들에 대한 검토 분석을 통하여 교량을 통과하는 차량들의 중량과 통행량 등을 고려할 때 설계나 시공 상의 잘못보다는 피할 수 없이 발생하는 결함들로부터 발생하여 진행되는 피로균열들에 대한 전문적인 대응 등 붕괴 원인에 대한 제어가 설계 당시에는 곤란하였지만 붕괴 이후 국내의 기술로 가능하다는 것이 확인되고, 여타 강구조물들에 대해 조사되어 문제가 되었던 결함들이 추가적인 계획 설계에 의거 용접 수정됨에 따라 설계 당시 계획되었던 성능을 손쉽게 회복되는 것을 관리 당사자들이 지켜보고 확인함으로써, 오히려 붕괴사고 이후 10년간 건설 구조물들 중 강구조물이 차지하는 비율이 어느 때보다 커지게 되었고 따라서 건설 시장에서 용접 등 관련 기술 또한 급성장하였다.

물론 여기에는 1995년 6월의 구조부재가 주로 철근 콘크리트로 구성된 삼풍백화점의 붕괴사고로 인하여 철골 등 강구조물에 대한 당시 기술의 비교 우위의 입장도 어느 정도 영향을 주었다고 생각하지만, 최근 콘크리트 재료에 대한 기술의 비약적인 발전은 그 동안의 호황에 안주해 온 건설 강구조물 관련 기술자들에게 경종을 울리게 하였으며, 늦었지만 이에 대응하고자 노력하여 얻어진 결과물이 얻어지는 동안 검토하였던 건설 강구조물의 안전우선 검토들 중 용접부에 대한 내용을 여기 대한용접·접합학회지를 통하여 소개하되, 건설 기술자로서 접하기 곤란하였던 문제들에 대하여도 상호간 학문적 기술적 협력을 위하여 이 자리를 빌어서 언급하고 추후 상호간 도움을 얻고 정보교환을 하고자 하는 데에 기여하고자 하였다.

2. 용접 구조상세

2.1 용접부 설계

2.1.1 설계기준, 지침, 요령 및 편람 등

강구조물에 필요로 되는 용접부의 설계는 해당 접합부에 발생하는 변형이나 발생응력의 크기와 방향 등에 따라 구해지지만, 국가 또는 국가가 의뢰하여 전문가 집단에 의해 국가 심의를 거쳐 결정된 규정에 의거하여 진행된다.

우리나라의 경우 건축 및 토목의 교량구조물을 제외한 강구조물들에 대하여는 한국강구조학회에서 관리하고 있는 강구조설계기준을 따라 설계되고 있으며, 이는 허용응력설계(Allowable Stress Design)를 기초로 하고 있으며, 보다 다양한 용접재료 및 용접방법을 이용할 수 있으나, 역시 건축/토목의 건설용 강재를 사용하는 것으로 하고 있다. 한편 건축 빌딩 및 토목 구조물에 대하여는 아직도 허용응력설계법이 적용되고 있지만 최근 각각 한계상태설계(Limited State Design)와 하중저항계수설계(Load and Resistance Factor Design, 이하 간단히 LRFD라 함) 적용을 위한 연구가 계속되고 있으며, 교량 설계에 있어서도 민자유치사업 등에서 경제적 효과를 얻기 위하여 몇몇 적용된 사례가 있다²⁻³⁾.

건축과 토목분야 각각 설계상의 차이로는 크게 정적인 구조물과 동적인 구조물로 나눌 수 있다. 이에 따르면 건축 구조물들은 지진/태풍 등을 고려한 저사이클피로(Low Cycle Fatigue)가 문제가 되므로 일반적으로 교량용 강재에 비하여 높은 항복비, 적당히 낮은 파괴인성을 갖는 강재가 이용되지만, 교량 구조물에 대하여는 통과차량 등에 의한 고사이클피로(High Cycle Fatigue)에 대한 동적 거동을 고려하여야 할 것이므로 일반적으로 항복비에 관련된 내용 보다는 높은 파괴인성 및 충격인성을 요구하고 있다.

최근 극후판 및 고강도, 고성능 강판에 대한 욕구에 따라 강교량 강재에 대한 설계기준도 0℃:47J에서 -20℃:40J로 보다 엄격해 지는 등 변화하고 있다. 한편, 구조물에 발생하는 주응력 방향에 대하여 필릿용접을 설계하는 경우에는 다리길이의 크기는 6mm 이상의 크기로 하도록 하고 있지만 2차부재 등에 대하여는 설계 기술자의 경험과 충분한 검토를 기본으로 4mm까지도 가능하도록 하는 등 최근 용접관련 장비와 재료 개발에 힘입어 보다 경제적인 구조물 건설을 목표로 적극적으로 변화하려는 움직임이 거세지고 있다^{6-8,13-17)}.

이하 이미 위에서 언급한 바와 같이 대상을 토목구조물에 국한하여 기술하고자 한다. 건축 구조물에 대하여

도 근본적으로는 동일한 과정을 거쳐 용접 안전이 검토된다고 보기 때문에 건설 구조물 안전의 입장에서는 크게 차이가 나지 않는다고 생각하기 때문이다.

2.1.2 강도로교/철도교 설계기준의 용접재료

일반적으로 용접재료는 접합부에 이음 연결되는 모재들 중 가장 약한 모재측 조건보다 동등 이상의 재료를 적용한다. 게다가 현장 용접이 시행되는 경우에는 공장 용접 성능의 90%까지만 그 성능을 보장함으로써 혹시라도 발생될 수 있는 현장용접의 오류를 설계에 반영시켜 안전을 도모한다⁴⁾.

현재 아직은 일반적으로 사용되고 있는 ASD에서는 규정된 일정한 하중에 대하여 활하중에 대한 총계계수를 고려하는 정도로 동적 거동에 따른 위험을 감소시키고, 사용된 재료의 실험에서 얻어지는 항복응력이 설계기준에 규정된 값보다 크다는 것을 확인한 후 규정된 항복강도를 안전율(강재에 대하여는 1.7)로 나누어 구한 허용응력(설계기준에 강종에 따라서 이미 규정되어 있음)과 계산된 발생응력들을 비교하여 설계상의 안전을 확인하는 것이 일반적이다^{2,6,10)}.

그러나 이미 앞에서 언급했듯이 최근 비파괴 검사기술의 발달과 각종 장비의 개선 그리고 사용하는 건설재료들에 대한 정확한 정보 등에 힘입어 LRFD 적용에 대한 욕구가 커지고 있다. LRFD에서는 구조물을 구성하는 재료 자체의 중량 즉, 고정하중과 통과 차량의 중량에 의하여 발생하는 활하중들을 분리 구분하여 각각 다른 계수를 적용하여 하중증가를 고려함으로써 허용응력설계에서 단순히 충격만을 고려한 것과는 달리 세분화하여 설계하중 산정에 반영하고, 구조물에 사용되는 재료에 있어서도 재료특성과 아직도 충분하지는 않지만 현재까지 얻어진 데이터를 고려하여 각각의 재료가 나타내는 낮은 강도를 기준으로 설계강도를 선택하도록 함으로써 보다 합리적이고 균형 있는 구조물로 구성되도록 하여 최종적으로 보다 경제적 효과를 얻고자 하는 것으로 우리나라도 현재 진행되고 있는 연구들을 고려할 때 향후 2년 이내에 국내 특성에 맞는 LRFD가 설계기준에 반영되어 시행될 것이 예상된다^{11,13)}.

2.1.3 강도로교/철도교 설계기준의 용접접합

용접접합에는 이음과 연결이 있으며, 이를 총칭하여 접합이라고 하더라도 결국은 건설구조물의 경우 적용되고 있는 용접·접합에는 아직까지는 맞대기 또는 홈용접(Butt or Groove Welding)과 필릿용접(Fillet Welding)으로 크게 구분된다고 볼 수 있다. 교량에 적용되는 홈용접에는 '한쪽면/양쪽면 홈이음'이 있고, '맞대기 이음'과 '모서리 이음' 및 'T이음' 등은 완전/부분용

입 흡용점으로 이루어진다. 이들 중 '모서리 이음' 및 'T 이음' 등은 필릿용접이 적용되기도 하며, '겹치기 이음', '십자형 이음', '전면/측면', '연속/단속/엇갈림 단속' 그리고 '오목/볼록' 용접 등에는 필릿용접이 적용된다¹⁻⁵⁾.

2.1.4 강도로교/철도교 설계기준의 용접치수

용접의 치수에 대하여는 설계기준 및 시방서에 목의 두께, 용접의 유효길이 및 최소 용접치수 조건들이 각각 규정되어 있다. 2006년 이전에는 강구조물 제작 단가를 결정함에 있어서 용접이 아닌 구조물을 구성하는 강재의 중량에 따라서 단순히 톤당 단가로 결정되었으므로 아무리 용접을 줄여도 설계 가격에는 변동이 없었다. 그러나 이제는 용접량이 다리길이 6mm인 표준 필릿용접으로 환산된 길이로 표현되어 제작단가에 반영되기 때문에 설계에 따라 강구조물의 건설 예정가격이 저렴하게 할 수 있어 여타 다른 재료로 계획되는 구조물에 대한 경쟁력 있는 구조물로의 설계에 어느 정도 다가서게 되었다는 것이다⁵⁾. 이와 같은 경쟁력은 예전에는 제작 단가를 줄일 수 있는 조건으로 단순한 부재로 강재절단과 용접·접합에 따른 비용을 감소시킬 수 있는 구조시스템일지라도 강재 중량이 커지게 되면 오히려 설계 예가가 높아져서 새로운 구조시스템은 생각도 못했으나, 최근에는 절단과 용접 등 각 제작 가설 단계별 품셈이 별도 적용되도록 되어 향후 새로운 구조시스템이나 신기술이 계속 나타날 것이 예상된다. 이러한 이유에서 이미 앞 2.2.1에서 언급하였듯이 최근 구조물 각 부재특성에 저항할 수 있는 용접·접합에 대하여 확실한 근거 데이터를 얻을 수 있다면 보다 경제적인 강구조물을 계획할 수 있다는 점에서 많은 설계자들이 용접·접합 구조상세들에 대한 물리적인 실험 데이터를 확보하고자 하고 있으며, 건설기술자로서 접근하기 어려운 화학·야금학적인 분야의 전문기술자들로부터 제공되는 연구결과에 지대한 관심을 갖고 있는 실정이다.

다시 한 번 더 언급하자면 일반적으로 설계자들이 구조물을 설계할 때, 해당 구조단면에 필요로 되는 실제 소요 용접치수를 선택하지 못하고 설계기준에서 제시하고 있는 최소 용접치수를 선택해야만 하는 과잉 대응의 문제점 해결은 해당 부재 용접·접합 비용의 경제성은 차치하고라도 피치 못하게 적용되는 용접의 과대/과소 등 부적절한 조치로 인해 오히려 피로균열이 발생되어 성장하게 되는 요인을 원천적으로 배제시킴으로써 결과적으로 강구조물 설계 당시 계획한 수명이 예상하지 못한 결함으로 단축되는 것을 방지할 수 있다는 것이며, 다시 말하자면 대부분의 설계에 종사하는 건설기술자는 강재 및 이들에 관련된 여러 작업에서 발생하는 야금학적인 요인의 유무에 대한 자료부족 등으로 요구 수명

을 적절히 만족하는 한계를 결정하지 못하고 과잉대응하게 되어 경제적 설계를 이루지 못하고 있다는 것이다.

예를 들면 다음 Fig. 1과 같은 상황이 국내에서 자연스럽게 적용되고 있다는 것이다. Fig. 1에 따르면 미국이나 유럽 등지에서 적용되고 있는 필릿용접의 크기가 우리나라의 경우보다 훨씬 합리적임을 확인할 수 있고, Fig. 1에 표시한 체크표시들에 대한 실험결과를 나타내는 다음의 Fig. 2와 Fig. 3의 데이터를 얻었음에도 아직까지 충분하지 못한 실험데이터의 확보에 의해 설계 기준 변경에 애로가 많다는 것이다. 이들에 대하여는 계속 데이터를 확보하여 빠른 시일 내에 국내 실정에 맞도록 변경할 예정이다^{2,6,10,14,17)}.

즉 Fig. 2에 나타난 실험결과들은 Fig. 1에 체크된 필릿용접의 치수 6mm에 대한 것으로써 모재의 두께 20, 60mm 및 82mm들에 대한 것이며, 어느 것이나 모두 시험강도가 공칭강도를 넘고 있어 이 데이터들은 모두 유럽의 Eurocode No. 3을 충분히 만족하고 있음을 나타내고 있다.

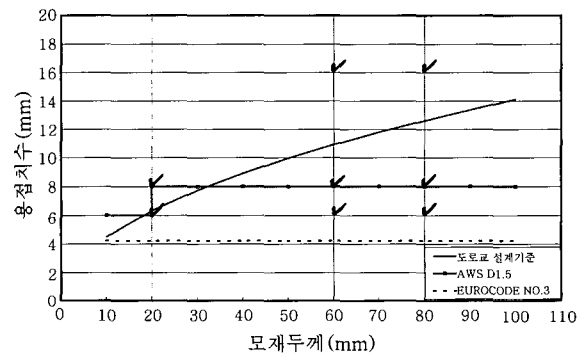


Fig. 1 Minimum welding sizes according to the base metal thickness on standard specifications

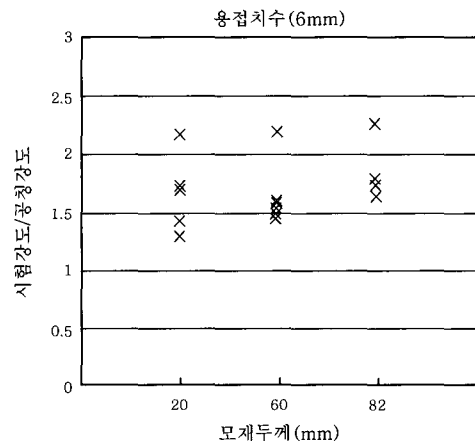


Fig. 2 The ratio of test to nominal strength for the base metal thicknesses with 6mm size of fillet welding

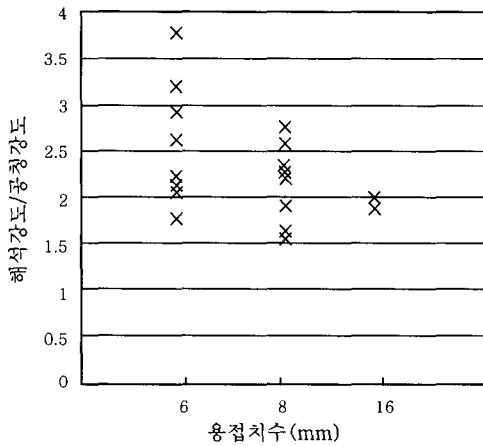


Fig. 3 The ratio of design to nominal strength of the several base metal thicknesses with the 6, 8 and 16mm size of fillet welding

한편 다음에 보인 Fig. 3에는 필릿용접의 치수를 크게 함에 따라 변화하는 설계강도/공칭강도의 비를 함께 총괄하여 나타낸 것이다. 역시 물리적으로는 국내 강재 및 용접재료를 이용한 필릿용접에 유로코드를 그대로 적용하여도 아무런 문제가 없음을 알 수 있다.

문제는 이들 데이터는 단순히 물리적인 현상이며, 이후 동적 반복하중들에 대한 저항능력 및 시간 경과에 따라 공용 중 발생하는 야금학적인 문제점의 유무가 설계기준 조기 확립의 중요 판단조건이 된다는 것이다. 일반적으로 현재까지는 실제 시험편 또는 시험체를 제작하여 자연 상태로 장기간 방치한 후 이들에 대해 물리적 실험을 실시함으로써 문제점 유무를 확인하는 것이 야금학적인 접근방법의 전부였으므로 향후 용접·접합에 대한 야금학적인 성능확인에 대한 접근방법의 개선에 금속 및 용접·접합의 전문기술자들의 적극적인 도움이 필요하다고 할 것이다.

2.2 제작상의 용접

2.2.1 제작 및 가설 일반

최근의 강구조물은 당연히 용접에 노출되었다고 보아도 좋을 것이며, 일반적으로 강구조물 특히 공공적인 성격이 큰 교량 구조물은 품질관리를 위한 감독 및 감리가 보다 철저히 이루어지고 있다. 이러한 업무는 제작에 앞서 제출되는 시공계획서/공장제작요령서/현장시공요령서 등 서류에 의거 제작에 관련된 공법이 먼저 결정되어 제시되고 나서 계약이 체결되면 제작에 필요로 되는 각종 재료가 반입되며 제작에 들어가서도 품질보증/제작업자/가설업자/현장시공 각 단계별 품질관리에 만전을 기하도록 되고 있다. 이러한 제반 절차에 익숙한 국내 강교량 제작공장에서는 부가적으로 주변 기

술 즉, 용접재료/장비/기술개발 성능이 향상되고, 비파괴검사 기술 성능이 향상되고 그리고 신개념 신형식 구조시스템이 개발되는 등의 혜택을 받고 있지만, 최근 강재 가격과 고임금, 여타 국내 사업에 대한 적극적 지원 부족 또는 무관심 등의 영향으로 강교량 제작이 해외에서 제작 국내로 반입되는 상황까지 발생되고 있어 관련 건설 기술자는 물론 강재에 관련되는 금속, 용접·접합에 관련된 전문기술자의 상호 협력으로 보다 경제적인 강구조물 건설을 위한 노력을 필요로 하고 있다.

2.2.2 강재

건설강재는 주로 구조용 강재라는 이름으로 그 형상 및 치수가 KS규격과 설계기준에 규정되어 있다. 구조용 강재는 건축/토목 등의 건설분야 구조물에 그리고 충격이나 동적거동에 대응하기 위한 강재들이 압력용기/교량 등의 구조물에 적용된다. 이와 같이 제작되어 사용되는 강구조물이 어떠한 환경 하에서 이용되는 가는 향후 제작 경제성 확보에 중요한 인자이며, 교량만을 고려하여도 교량을 이루는 구조상세의 위치에 따른 거동에 따라서 다양한 강재들이 이용되어야 한다는 요구가 거세지고 있는 것이 최근 강재 이용의 현주소라고 생각된다.

그러나 앞의 2.1에서 언급한 바와 같이 용접부에 대해서도 해외 선진 외국에서 적용되는 기준에 비해 비교하위에 머물고 있는 상황을 개선하고자 하더라도 현재로서는 물리적 성질에 대한 데이터가 부족한 것이 현실이며, 장기적인 수명을 요구하는 강교량 구조물에 대해서는 야금학적인 데이터 또한 부족한 상태이다.

그럼에도 불구하고 최근 건설교통부를 중심으로 향후 건설기술의 세계화 선진화를 위한 연구에서 차세대 시설물에 이용될 새로운 강재를 요구하고 있고, 요구되는 고강도, 고성능 강재를 개발함에 있어서 함께 이용될 용접재료와 성능 유지를 위한 용접방법 등이 동시에 동반 개발되고 있는 현실은 향후 국내 강교량 기술 향상을 위하여 매우 고무적이라고 생각된다.

2.2.3 품질 및 장기거동에 대한 불확실성

강구조물 제작에 이용되는 용접의 안전 확보를 위해서는 적절한 용접절차시방서(WPS)와 절차인정기록서(PQR) 작성 및 이들에 따른 제작이 필수이지만, 역시 인간이 행하는 일에는 오류, 오작이 따르므로 적절한 품질확인이 필요하다. 최근에는 그 동안의 강구조물 제작의 호황으로 육안검사 경험을 갖춘 전문 기술자가 충분히 확보되어 있고 PT/MT/RT 관련하여도 장비가 계속 개발되었고 이들의 적용 기술도 향상된 상황이다.

그러나 제작 가설된 강교량 등 구조물에 발생하는 High/Low Cycle Fatigue에 대하여는 어느 정도 건설기술자들에 의하여 연구가 진행되어 제어가 가능해졌지만 장기거동에 대한 야금학적인 변화/변동 데이터 확보는 국내에서 거의 연구가 없는 상황이며 따라서 국내에 이들에 관련된 데이터 확보가 전혀 이루어지지 못하고 해외 데이터에 의존하고 있는 실정이다.

이들 야금학적인 변화/변동 데이터에는 부재에 발생하는 응력으로 인한 응력부식피로 및 부식 자체의 영향 등 여러 가지가 있지만 이들 실험 데이터를 얻기 위해서는 실험 비용은 물론이지만 실험이 장기화 되는 것이 필연으로 국내 실정에 피로실험기기를 장기적으로 이용할 수 있는 여건이 되지 못하고 있는 것이 현실이므로 건설기술자로서는 이에 대한 관심보다는 실제 나타나고 있는 현실적인 문제 해결에 전념하고 있는 상황이므로 결국 이와 같은 야금학적인 데이터 확보는 관련 전문기술자들의 도움이 절실하다고 생각된다.

2.3 용접부에 대한 실험 및 시험체 시험

2.3.1 실험 및 시험체 시험에 사용되는 강재특성

강구조물을 구성하는 용접상세들의 안전 확인을 위해서는 이론적인 접근 보다는 실험 또는 시험체 시험을 통한 검증이 보다 일반적이다. 국내 구조용 강재를 나타내는 SM520A에서와 같이 맨 끝자리에 위치하는 A, B 및 C는 각각 충격인성에 대한 재료의 파괴인성의 정도를 나타내는 것으로 동적 하중에 노출되는 구조물에 대하여는 C재를 선택하게 된다. 최근 개발되고 있는 교량용 고성능강재(High performance Steel for Bridge or Building, 약칭하여 HSB라고 하며 현재 HSB600이 개발되어 그 성능을 시험 중에 있음)에서는 앞에서 언급한 -20°C:40J 이상의 파괴 인성을 갖는 것이 되고 있다.

그리고 최근 신개념 강교량 구조시스템에 많이 적용되고 있는 극후판의 경우 구조체가 대형 용접구조로 되는 바, 이들에 대한 안전성 확보 또한 검증 시험이 필요하다. 극후판이란 두께가 40mm 이상이 되는 구조용 판재를 말하며, 이미 여러 실험 및 시험체 시험을 통하여 최근에 개선된 생산기술(TMCP 그리고 SIDT: Strain-Induced Dynamic Transformation, 최근 개발된 입자배열을 더욱 조밀하게 안정화시킨 통적변태 압연기술)로 생산 보급되는 POSCO의 신개발 극후판 강재들에 대하여는 정적 실험결과 두께 증가에 따른 허용응력의 감소가 없는 것으로 확인되어 이미 설계기준에서도 이를 반영하여 허용응력의 감소가 없는 것으로 규정되었지만, 동적 반복하중에 대하여는 아래와 같은

시험식이 제안되기도 하였는바, 이들에 따르면 새로 개발되어 생산되는 국내 SM520-TMC 강재는 1981년 영국의 Gurney가 제안한 판두께 지수 0.25로 감소되는 것보다는 훨씬 더 그 감소폭이 작음이 확인되고 있다^{15,18-19)}.

$$ipt = 0.0015 \times t + 0.02, \quad S_r = S_{r,20} \left(\frac{20}{t} \right)^{ipt}$$

$$ipt = 0.005 |40 - t|, \quad S_r = S_{r,40} \left(\frac{40}{t} \right)^{ipt}$$

여기서, ipt : 판두께 지수

t : 강판의 두께

$S_{r,20}$: 20mm 판의 시험 피로강도(MPa)

$S_{r,40}$: 40mm 판의 시험 피로강도(MPa)

이와 같이 두께 효과는 강재 생산 기술 및 용접 기술의 발달로 인하여 기존 강재들에 대한 연구결과들보다 신개발 강재의 경우는 두께 증대로 인한 강도감소의 영향이 감소하고 있음을 나타내고 있다.

그러나 역시 사용 강재의 두께가 두꺼워지면 취성과 파괴의 우려는 피할 수 없다. 이러한 우려의 종식을 위하여 강재의 충격인성과 연신율을 높이는 정도가 최선인지 아니면 여타 요인들에 대하여 차체에 극후판을 적용한 구조시스템의 거동을 잘 살피고 검토 분석하여 그 파괴 양상에 따라 압력용기에 적용되는 내취성적 강재 등도 건설구조물 특히 강교량에 적용할 수 있다는 데이터를 확보하는 등, 구조용 강재 이외의 활용에도 노력하여야 하여야 할 것이다. 물론 이러한 강재의 적용 상 문제가 되는 물리적/화학, 야금학적 요인은 과연 무엇인가를 명확히 하여야 명실 공히 신개발 강재를 이용한 진정한 경제적 이익을 창출하여 타 건설재료를 이용하는 데 대응한 경쟁에 나설 수 있다고 생각한다.

2.3.2 용접·접합으로 나타나는 구조상세의 성능

위 2.3.1에 언급된 내용에 더하여 강교량 구조물에 대하여는 각종 부재들에 대한 용접·접합에 의하여 구성된 여러 구조상세들에 대한 피로시험이 수행되어 그 안전성을 검증받게 되는 바, 피로파괴는 피로균열의 발생을 야기 시키는 결함들에 의하여 발생된다.

피로균열을 유발시키는 영향인자들에는 제작으로 인하여 강교량을 구성하는 구조상세에 내재되는 초기결함/발생응력범위/하중반복회수/구조상세종류/용접결함/여타제작결함/운반가설로 발생하는 결함을 비롯하여 공용 중 발생하는 결함 등이 있으며, 이들이 자연스럽게 내재되는 구조상세들의 종류에 따라서 각 구조상세마다 그 성능이 다르게 된다. 국내에서는 강교량을 구성하는 구조상세들에 대하여 유럽, 일본과는 달리 미연방도로

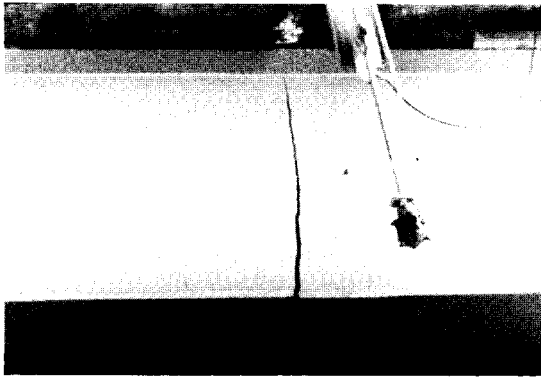


Fig. 4 The fractured girder caused by propagation of the fatigue crack that was created from weld flaw



Fig. 5 One of fatigue cracks that were created from weld flaws

국에서 제시하고 있는 피로범주들 즉, 범주 A, B, B', C, C', D, E 및 F로 구분 적용하고 있다.

이들 구조상세들 중 용접이 적용되는 구조상세들에 대한 피로와 파괴에 대하여 검토한다. Fig. 4는 용접결함으로부터 발생한 피로균열(Fig. 5 참조)이 진행되어 강교량 거더가 파단되어 있는 모습을 보여주고 있다.

한편, 국내에서 개발된 강재 특성은 미국과 다르므로 많은 피로실험으로 축적된 국내 피로실험 데이터는 미국보다는 일본의 피로실험 결과와 유사한 거동을 나타내고 있지만 역시 물리적인 데이터의 검토 분석에 그치고 있고, 용접부의 미세조직 변화 및 경도분포 측정 등에 따른 강재 성능 평가에 대하여는 축적된 데이터도 적을 뿐만 아니라 획득된 데이터의 검토 분석을 위한 화학/야금 분야의 전문 기술자들의 관심도 적어서 아직까지 이들을 이용한 새로운 안전도 평가방법의 도출은 생각하지도 못하고 있는 실정이다.

2.4 구조물의 피로와 파괴

용접·접합에 의해 구성된 구조상세를 갖는 강교량 등 반복적인 동적하중에 노출된 강구조물은 강재가 갖는 허용응력보다 매우 낮은 응력범위에서도 제작상 피할 수 없이 구조상세에 내재되는 용접결함 및 구조상세가 갖는 고유의 피로범주를 갖고 최종적으로 피로파괴에 이르게 되는 것이 보통이다.

일반적으로 구조물의 피로와 파괴에 영향을 미치는 구조상세에 내재된 용접결함에는 용융부족/슬래그 혼입/용접부 다공성/용접기공/용접의 시종점/스패터/가용접으로 인하여 발생한 결함/불연속 용접부/용락(Burn through) 그리고 용접균열 등이 있다.

이와 같은 결함들이 내재된 구조상세에 반복하중이 가해지면, 이들 결함으로부터 피로균열이 발생되고 성장하여 구조물이 파괴에 이르게 된다. 이러한 피로파괴는 「발생된 균열의 크기/작용응력의 크기/강재가 갖는 파괴인성/외부하중 작용 시 피로균열 주위의 낮은 온도/구조상세에 갑작스럽게 발생하는 충격하중 그리고 두꺼운 부재 용접으로 인한 치수효과」 등에 영향을 받아 내재된 결함으로부터 피로균열이 발생 성장하여 종국적으로 구조물이 파괴에 이르게 되는 것이다.

특히 구조물을 구성하고 있는 부재들 중에서 해당 부재가 파단할 경우 구조물 전체가 파괴되는 붕괴유발부재(Fracture Critical Members)를 잘 파악하여 놓아야 하지만, 이에 더하여 이들 부재들로 구성되는 구조물의 구조형식이 외부로부터의 하중을 전달받는 상황에 따라서도 해당 구조상세의 피로저항 능력에 차이가 난다. 이들을 구분하고 그 저항능력을 평가하는 것은 건설 분야의 전문기술자가 본인의 경험과 그동안 축적된 피로 실험데이터와 설계기준에 규정된 구조상세별 저항능력을 고려하여 충분히 감당할 수 있지만 이미 앞에서 언급한 바와 같이 새로 개발되는 신개발 고강도, 고성능 강재로 구성되는 부재들이 용접·접합된 상태로 이루어진 구조상세들이 물리적인 성능 향상과는 달리, 주변 환경의 변화에 따른 부식으로 인한 단면감소나 장기간의 응력을 받으면서 발생하는 응력부식피로를 비롯한 강재 자체의 화학/야금학적 영향들로 인한 문제들에 대하여는 해당 전문분야의 연구 협조를 통한 상호 협력 연구가 무엇보다 필요한 시기라고 생각된다.

3. 안전성 영향 인자

3.1 구조안전에 영향을 미치는 결함

3.1.1 일반

용접결함들이 구조안전에 영향을 미친다는 것은 이미

과거의 여러 사례로부터 확인되었으며, 이들에 대한 물리적인 영향은 이러한 결함을 모델화한 실험편 또는 시험체를 제작하여 정적/동적/반복하중으로 실험하여 데이터를 얻는 것으로 그 영향을 검토 분석할 수 있다.

그러나 구조물이 공용되고 나서 용접부에 작용되고 있는 응력으로 인하여 발생하는 응력부식균열(SCC)로 인한 피로파단, 수소취화(Hydrogen Embrittlement)에 의한 지연파괴, 녹 발생에 따른 단면감소 그리고 기타 야금학적인 문제발생 요인들에 대하여는 이미 앞에서 언급한 바와 같이 실험비용은 차치하고서라도 실험장비 및 실험 소요기간은 물론 최종 획득 데이터의 검토 분석에도 관련 전문가의 협조가 없이는 국내 현실을 고려할 때 많은 불필요한 노력과 시간을 필요로 하게 될 것이므로 이 분야 전문가와의 상호 협력 연구를 통하여 소기의 목적을 빠른 시일 내에 달성하는 것이 필요하다.

3.1.2 일반 생산 구조용강재의 결함

현재까지 강구조물에 통상적으로 사용되어 온 일반 생산 구조용 강재와 같은 경우, 무엇인가 결함이 내재된 상태라고 해도 정적/동적 하중에 대한 저항 능력의 파악에는 문제가 없으며, 현재까지도 축적된 관련 실험 데이터가 부족하기는 하지만 여러 구조상세들에 대하여 보편타당한 피로강도 파악은 가능하다고 생각된다.

그러나 국내 생산 강재들에 대하여는 기 수행된 야금학적인 결함에 대한 문제점 도출 및 해결을 위한 전문적인 연구가 국내에서 조차 거의 수행된 바 없어서 구조물이나 구조상세에 예상하지 못한 문제들이 발생되면 우리 강재와 그 구성이 유사한 일본의 전문가를 초청하거나 별도로 건설구조물과는 거의 관련이 없었던 야금 분야에 한정되는 전문기술자의 해결 방안이 의존하게 되는 상태이며, 따라서 건설기술자가 이를 일반 설계에 반영하여 경제적인 이익을 얻기에는 현실적으로 곤란한 상황이다.

3.1.3 최근 개발 구조용 강재(TMCP/SIDT)

이들 강재들은 이전 강재들과는 달리 강재 생산자 측에서 해외 사례를 통해 무조건적으로 생산 제공되는 강재라기보다는 건설 현장에서 요구되는 성질을 갖추면서 개발 생산 제공되는 것이 특징이며, 무엇보다 강재 제작 활용에 크게 공을 들인 강교량 제작 현장의 요구 조건에 부응하기 위하여 새로 개발되는 강재는 그 절단, 접합에 관련된 여러 가지 용접재료, 절단방법 및 접합방법 등에 관한 연구결과 및 이용 활용 정보가 함께 제공되도록 되었으므로, 이제까지 사용되어 온 구조

용 강재만큼 적용에 따른 사례 및 실험, 연구결과가 부족하기는 하지만 정적/동적 하중에 대한 저항 능력은 크게 향상되었으며, 피로강도에 있어서도 신개발 강재 특성이 단순한 고강도강에서 여러 특성을 함께하는 고성능강으로 개선됨에 따라 예전의 상식을 벗어나서 동일한 구조상세에 있어 연강보다 높은 피로 강도를 갖는 등 건설기술자로서는 매혹을 감출 수 없을 정도이다.

그러나 역시 앞에서 언급한 응력부식균열에 대한 피로실험 결과의 전무하며, 녹발생 문제에 있어서도 단순히 용접부의 산화피복화 문제, 습도 60%이하로 녹발생 방지 가능 여부, 전위차를 이용할 경우 선택되는 희생양극/외부전원/배류법 등등의 선택 방법 그리고 박스거더와 같은 밀폐된 공간에서의 결로현상과 녹발생 제어 등은 물론 기타 야금학적인 문제 발생 유무의 확인방법과 발생된 야금학적 문제 해결 방안 제시 등에 대한 데이터가 건설기술자에게 제공되고 있지 못한 상황이다.

3.2 야금학적 안전성 보증 용접기술

3.2.1 재료, 금속분야 전문가의 도움

현재는 건설되는 강구조물에 이용되는 강재가 거의 대부분 구조용강재로 일원화되고 있지만 압력용기와 같이 다른 구조재로서 이용되고 있는 강재 등을 강교량 적정부위에 적용할 수도 있을 것이다. 이를 위해서는 재료, 금속분야 전문가와 건설 기술자와의 상호 협력에 의하여 전체적으로 인성, 연신율 부족 강재를 소요되는 성능만큼만 확인 확보하여 과감히 강교량에 적용할 수 있게 되어야 하며, 이러한 활동은 강교량 건설비용을 절감하는 경제적 건설에 도움이 될 것으로 생각한다.

이러한 움직임은 이미 국내 건설 현장에서 두께가 40~100mm에 이르는 극후판도 사용된 사례를 보아 얼마든지 가능성이 있다고 생각한다.

3.2.2 Hybrid용 용접 방법/기술 개발

강교량을 비롯한 강구조물 제작 건설에 서로 다른 이용 강재들을 이음 연결하는 용접방법과 관련 용접기술이 개발되면 이미 앞 3.2.1에서 언급한 타 분야에서 사용 중인 강재들은 물론 구조용 여러 강종들도 서로 적절히 활용하여 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 이에 더하여 콘크리트와 강재 등 이종 재료 사이의 연결에 대한 확실한 연구 결과와 그 근거가 마련되면 획기적인 복합/합성 구조물도 등장할 수 있다고 판단된다.

여기에 공용 후 구조물의 수명을 고려한 야금학적인 성능까지 확보할 수 있다면 국민의 생활을 윤택하게 하는 많은 신기술이 개발되는 기초가 마련될 것이다.

3.2.3 물리적 성능 확인으로 경제적 구조물 건설

현재의 상황으로는 건설기술자의 입장에서 사용될 강재의 물리적인 성능을 확인하는 것은 거의 문제가 없다고 생각하고 있으므로, 현재 국내에서 갖추고 있는 건설 기술 수준을 고려할 때, 향후 야금학적인 안전성이 보증된 용접 등 관련기술이 개발되는 것만으로도 전문 건설기술자들에 의하여 건설 경비를 절감할 수 있는 경제적 강구조물, 합성구조물 그리고 복합구조물 건설이 가능해 질 수 있다는 것이다.

4. 결 론

이상 대형 건설 강구조물의 용접부 안전성 보증에 건설기술자들이 많은 노력을 기울이고 있음을 직, 간접적으로 기술하였다.

현재까지 적용되고 있는 안전여유는 야금학적인 문제점을 포함하여 여타 불확실한 정도에 따라서 때로는 건설 경비 증가에도 불구하고 큰 안전율을 적용하고 있음도 살펴보았다.

적절하고 확실한 1에 가까운 안전율을 적용함으로써 얻을 수 있는 강구조물의 경제적 건설을 위해서는 무엇보다 용접·접합 등으로 인한 강재의 화학/야금학적인 영향에 대하여 확실한 해결 방안 등 문제발생 요인에 대응할 수 있는 기술력 확보가 필요하다.

최근 국내 건설 분야에도 예전의 획일적인 안전율 적용에서 벗어나 외부로부터 가해지는 힘과 이에 저항하는 재료를 그 특성에 맞게 구분하여 적용하면서 각각의 한계상태를 고려한 설계에 대하여 많은 관심을 갖게 되었다.

특히 강교량 분야에서는 향후 2년 이내에 LRFDb법을 이용한 설계가 이루어질 수 있도록 국내 실정에 맞는 데이터를 수집 분석하고 있는 상황이므로 차체에 용접에 관련한 화학/야금학 관련 전문가와의 긴밀한 협력 연구 및 연구결과에 입각한 관련 시방서 규정 개정이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 허용응력설계법에 의한 강구조물설계기준, 한국강구조학회, (2003), I-39 - I-40, I-48 - I-53, II-78 - II-83 (in Korean)

2. 도로교설계기준, 한국도로교통협회, (2005), 5-12, 27-41, 50-208, (in Korean)

3. 철도설계기준(철도교편), 대한토목학회, (2004), 11-18, 39-64, 84-93, 108-222, (in Korean)

4. 도로교표준시방서, 건설교통부, (2005), 2-4, 6-88, (in Korean)

5. 강도로교 상세부설계지침, 건설교통부, (2006), 5, 13-27, 35-216, (in Korean)

6. 日本道路橋示方書・同解説, 日本道路協會, (2002), (in Japanese)

7. 鋼橋構造詳細の手引き, 日本橋梁建設協會, (2002), 1-109, (in Japanese)

8. 鐵道構造物等設計標準・同解説, 鋼・合成構造物, SI單位版, 丸善株式會社, (2000), 3-64, 67-83, 91-172, 189-199, 212, 213-260, 331-360, (in Japanese)

9. Manual of Steel Construction, AISC, 9th ed., (1985), Part 1, 8 and 9

10. Steel Construction Manual, AISC, 13th ed., vol. II, (2005), Part 8 and Part 9

11. Manual of Steel Construction LRFD, 3rd. ed., (2001), Part 8, 9 and 16

12. Standard Specifications for Highway Bridges, AASHTO

13. LRFD Bridge Design Specifications, SI unit, 4th ed., (2002 Interim), (2004), (2007), Weld part of section 6 - Steel Structures

14. 1996 Bridge Welding Code, ANSI/AASHTO/AWS, D1.5, American Welding Society, (1996)

15. British Standard 5400, Steel, Concrete, Composite Bridges, British Standards Institution, (1999), Part 1-3, 5, 6 and 10

16. Eurocode 3: Design of steel structures, CEN (European Committee for Standardization), prEN 1993-1-1:2003, (2003), Part 1-1: General rules and rules for buildings

17. Eurocode 3: Design of steel structures, CEN (European Committee for Standardization), prEN 1993-2:2003, (2003), Part 2: Design of steel bridges

18. Eurocode 3: Design of steel structures, BSI, (2005), Part 1-10: Material toughness and through-thickness properties

19. Execution of steel structures and aluminium structures, European Committee for Standardization, Draft prEN 1090-2, (2005), Part 2



• 정경섭(鄭慶燮)
 • 1953년생
 • 충북대학교 토목공학부 토목시스템전공
 • 강구조공학, 구조물의 피로와 파괴
 • e-mail : ksjung@cbnu.ac.kr