

크레인 거더의 피로균열에 관한 실험적 연구 (2) - 피로균열의 보수법 -

Experimental Study on Fatigue Crack in Welded Crane Runway Girders (2) - Repair methods of Fatigue Crack -

김 진 호¹⁾ · 임 성 우¹⁾ · 장 인 화¹⁾ · 志 賀 厚²⁾
Kim, Jin Ho Im, Sung Woo Chang, In Hwa Shiga Atsumi

요약 : 크레인 주행거더에 발생된 피로균열에 대한 보수방법으로 stop-hole(5mm 또는 9mm), stop-hole에 고력볼트 체결, 용접, 첨판과 고력볼트에 의한 4가지 보수방법을 적용하였다. 이중에서 stop-hole로 보수를 한 경우와 용접보수를 한 경우에는 재균열이 발생하였다. 그러나 stop-hole에 고력볼트를 체결한 경우 및 첨판과 고력볼트로 보수한 경우에는 재균열이 발생하지 않았다. 보수전과 보수후 피로강도를 비교해보면 stop-hole 또는 stop-hole과 고력볼트로 보수를 한 경우에는 모두 보수전과 동등한 피로강도를 얻었다. 용접보수를 할 경우에는 정확한 시공이 시행되면 보수전과 동등한 피로강도를 기대할 수 있지만, 시공이 잘못되면 피로강도가 현저하게 저하될 수 있음을 알 수 있었다. 피로균열이 발생된 위치에 첨판과 소요볼트를 시공할 수 있는 조건이라면 첨판과 고력볼트로 보수하는 것이 가장 확실한 보수법임을 알 수 있었다.

ABSTRACT : Four types of repair procedures are applied to the fatigue cracked crane runway girders, which are stop-holes as crack arrester, stop-holes reinforced with high strength bolts, welding repair and reinforcement with high strength bolted splices. The fatigue cracks are reinitiated at the region where stop-holes and weld reparments are applied, while none of the cracks are observed in the cases of stop-holes reinforcement and reinforcement with high strength bolted splices. When using stop-holes and hole-reinforcement all repaired regions show a same fatigue strength to the one before the reparments. The experiments also reveal that the proper weldment is an essential factor when applying the welding repairement as a properly welding

1) 정회원, RIST 강구조연구팀 공학박사
2) KTEC, 技術支援センター- 主席研究員

본 논문에 대한 토의를 1998년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

produces the same level of fatigue strength after the repairment. When the situation permits to use reinforcement with high strength bolted splices, the experiments shows the repairment is the best possible method among the procedures available.

핵심 용어 : 크레인 주행거더, 피로균열, 스톱홀, 피로강도, 접합부 등급

KEYWORDS : Crane Runway Girder, Fatigue Crack, Stop-hole, Fatigue Strength, Joint Classifications

1. 서 론

제철소 크레인에 발생되는 균열의 대부분이 피로에 의해서 야기된다는 점은 1970년대 초반에 널리 알려진 사실이다. 그러나 1990년대 초반까지도 피로를 고려하지 않고 단지 작업계수와 충격 계수 등의 안전율만을 높이는 방법으로 설계를 했기 때문에 크레인에서 피로균열이 아직까지도 심각한 문제로 대두되고 있는 실정이다. 크레인에 발생되는 피로균열의 대책으로는 크게 피로균열의 발생이 예상되는 경우와 피로균열이 이미 발생된 경우의 두가지로 대별해서 생각할 수 있다. 전자의 경우는 가세트 단부의 형상 변경이나 용접지단부의 마무리처리 등¹⁾을 들 수 있고, 후자의 경우에는 보수처리를 행한다.

피로균열에 대한 보수법²⁾⁻⁴⁾으로는 크게 두가지 접근방법을 생각할 수 있다. 첫번째 방법은 균열 선단의 노치반경을 크게해서 응력집중정도를 낮추는 것이고, 또 다른 하나는 균열이 발생된 부위에 작용하는 응력의 크기를 낮추는 방법이다. 첫번째 방법의 대표적인 예로 균열선단에 stop-hole을 뚫는 것을 들 수 있다. 국부적인 변형으로 인해서 생긴 균열이 성장함에 따라서 균열선단에서의 응력이 경감되는 경우에는 stop-hole 보수가 영구적인 보수법으로 이용되기도 하지만, 일반적으로는 영구적인 보수를 하기전 또는 용접이나 부재교환 등을 하기전에 취하는 임시적인 보수법으로 보다 널리 사용된다. 두번째 방법으로는 균열선단에 hole을 뚫은 다음 고력볼트로 체결하거나 균열이

생긴 부위에 첨판을 댄 다음 용접 또는 고력볼트로 마찰접합하는 방법 등이 있다. 이 방법들은 stop-hole 보수에 비해서 시공이 다소 어려운 반면 영구적인 보수법으로 이용된다.

전보⁵⁾에 이어서 여기서는 이미 피로균열이 발생된 크레인 거더에 stop-hole, stop-hole에 고력볼트 체결, 용접, 고력볼트와 첨판에 의한 보수를 실시하여 현장적용의 가능성을 검토하였다. 또한 보수효과를 확인하기 위해서 보수전 피로강도와 보수후 피로강도를 비교하였다.

2. 시험체 제작

크레인 주행거더에 발생되는 피로균열에 대한 보수방법을 검토하기 위해서 사용된 시험편은 피로시험기와 크레인의 용량을 감안해서 거더길이 6400 mm, 높이 600 mm, 폭 300 mm로 제작하였다. 이때 시험체중 플랜지의 재료는 SM490으로 하였다. 또한 웨브, 수직 및 수평보강재 그리고 가세트 플레이트는 SS400을 사용하였다. 시험체의 형상과 가세트 플레이트의 위치선정 및 제작기술에 대한 보다 자세한 내용은 전보⁵⁾에 기술되어 있다.

3. 실험방법

상부플랜지와 웨브 모살용접부에서 웨브측 지단을 따라서 발생하는 피로균열(이하 type A라고 칭한다) 및 면내 가세트단부에서 발생되는 피로균

열(이하 type B라고 칭한다) 그리고 하부플랜지와 웨브 모살용접부의 결합부위를 기점으로 발생하는 피로균열(이하 type C라고 칭한다)을 재현할 목적으로 상기의 시험체를 2기 제작한 다음 피로시험기와 시험체 사이에 가려 beam을 설치하여 2점재하 피로실험을 수행하였다. 이때 실험조건은 최저하중을 2 ton, 최대하중을 102 ton으로 하였다. 반복가력은 피로균열 발생을 위해서 200만회까지 하였으며, 그 다음에 피로균열에 대한 보수방법의 효과를 확인하기 위해서 발생균열에 대해서 보수보강을 한 다음 재차 200만회까지 실시하여 총 400 만회를 실시하였다. 피로실험 중에 균열이 발견된 경우에는 그 크기에 따라서 실험을 계속하거나 보수방법을 결정하여 보수를 한 후에 계속 실험을 진행하였다.

보수방법으로는 현장에서 사용이 가능한 총 4 가지 방법을 선택하여 그 효과를 비교 검토하였다. Stop-hole 방법은 type B와 type C 균열에 대해서 적용하였으며(사진 1), 균열선단에 stop-hole을 뚫은 다음 고력볼트를 체결하는 방법은 type A, B, C 균열 모두에 적용하였다(사진 2). Stop-hole 방법에서는 구멍의 직경을 5 mm 또는 9 mm로 하여 stop-hole 크기의 영향도 검토하였다. Stop-hole에 고력볼트를 체결하는 방법에서는 stop-hole의 직경을 18 mm로 하였으며 고력볼트로는 F10T M16을 사용하였다. Type B와 C 균열에 대해서는 용접(사진 3) 또는 고력

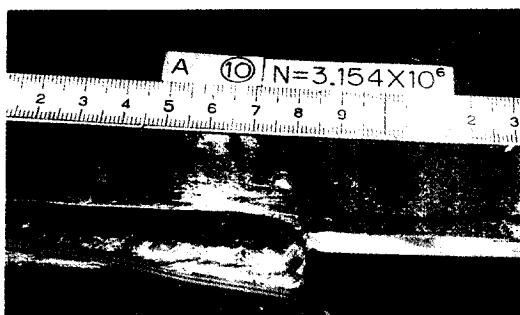


사진 1. Stop-hole에 의한 보수법



사진 2. Stop-hole 및 고력볼트에 의한 보수법



사진 3. 용접에 의한 보수법



사진 4. 고력볼트와 첨판에 의한 보수법

볼트와 첨판에 의한 방법(사진 4)을 이용하였다. 용접보수를 할 경우에는 균열이 발생된 부위를 가우징한 다음에 용접을 실시하였다. 고력볼트와 첨판에 의한 보수법에서는 사진 4에서 볼 수 있듯이 체결효과를 보기 위해서 2 종류의 볼트를 이

용하였다. 윗측 2개의 경우는 일반 고력볼트를 이용해서 보수보강했으며, 아래에 있는 8개는 TS(Torque-Shear)형 고력볼트로 체결된 예를 보여주고 있다. 여기서 사용된 고력볼트는 F10T M20였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 피로균열의 발생 및 보수 (보수후 재균열 발생여부 고찰)

그림 1은 재하점 바로 밑에서 발생한 균열의 예를 나타내고 있다. 여기서 □ 표시는 발생균열

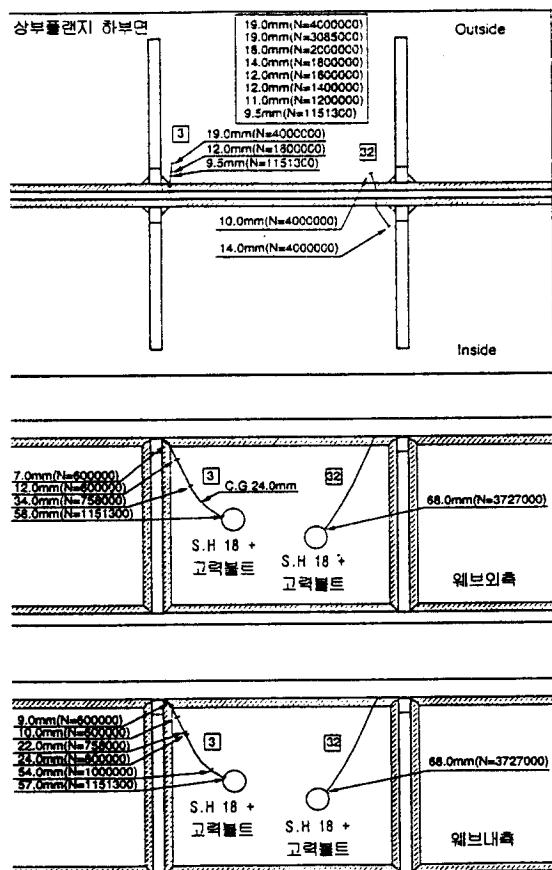


그림 1. 재하점 직하에서 피로균열의 진전상황

의 ID(identification)를 의미하고, xx mm ($N=xxx$)는 반복가력횟수가 xxx일 때 균열길이가 xx mm임을 의미한다. 또한 C.G24.0mm는 균열이 반복가력횟수 75.8만회에서 웨브 외측에서 34.0mm, 내측에서 22.0mm로 성장했을 때 균열의 진전속도를 계측하기 위해서 crack gage를 부착하였으며, crack gage가 부착된 위치에서 균열이 24mm 더 진전하였음을 의미한다.

재하점 균방에서는 60 만회 반복가력이 가해졌을 때 수직보강재에 위치한 상부플랜지와 웨브의 모살용접부에서 A-3 균열이 발견되었다. 이때 용접지단으로부터 균열길이는 웨브 외측에서 12 mm, 웨브 내측에서 10 mm였다. 균열이 상당히 진전된 115 만회 시점에서 균열진전을 저지하기 위해서 균열선단에 직경 18 mm의 stop-hole을 뚫고 50 x 50 x 9 mm 크기의 첨판을 삽입하고 M16 고력볼트로 체결하는 보수를 실시하였다. 그후 실험종료시기인 총반복가력횟수 400 만회까지 동 보수부위에서는 균열이 더 이상 성장하지 않았다. 한편 상부플랜지 하부면에서 발생된 균열은 9.5 mm에서 실험종료시에는 19 mm로 성장하였지만 플랜지 판두께를 관통하지는 않았다. 373 만회에서 68 mm로 성장한 또 다른 균열인 A-32에 대해서도 균열 A-3와 동일한 방법으로 보수를 실시하였다. 보수후 웨브측 균열은 stop-hole에서 완전히 성장을 멈추었고, 상부플랜지 하부면으로 진전한 균열도 플랜지를 관통하지는 않았다.

그림 2부터 그림 4에는 가세트 단부에서의 균열발생 및 진전상황과 각 균열들에 대한 보수방법을 나타낸다. 여기서 사용된 보수법은 3장 실험방법에서 언급된 4가지 방법을 모두 사용하였다.

그림 2는 A 시험체 수평보강재 상·하부면에서의 균열진전상황과 이들 균열들에 대한 보수방법을 나타낸다. A-5 균열에 대해서는 상부면에서의 균열길이 42.0 mm 시점(반복가력횟수: 260 만회)에서 균열선단에 직경 18 mm의 stop-hole을 뚫고 50 x 50 x 9 mm의 첨판과 M16 고력

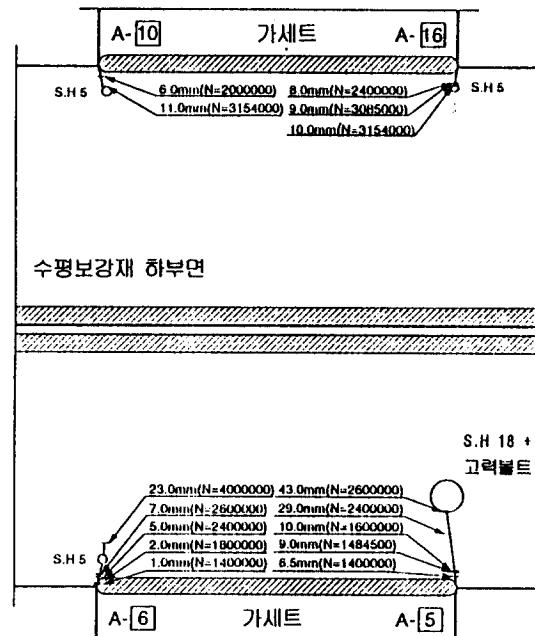
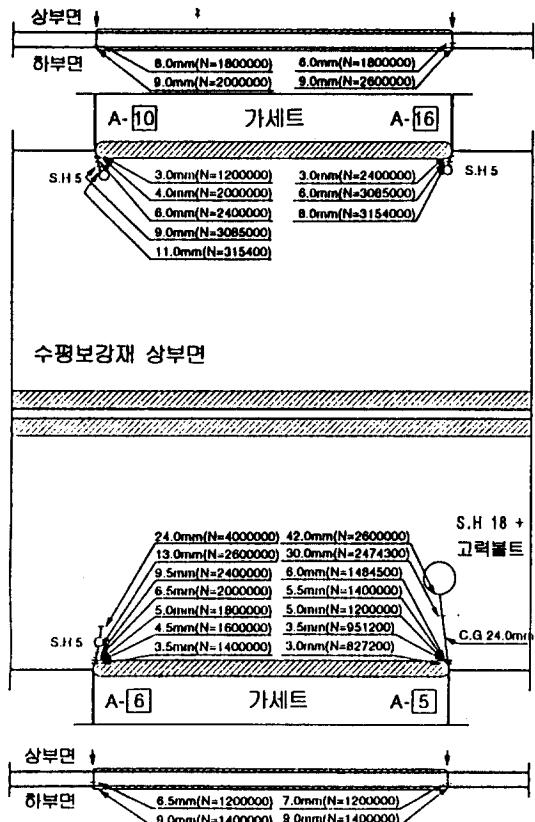


그림 2. 가세트 단부에서 피로균열의 진전상황 (A 시험체 중앙)

볼트로 체결하는 보수를 실시하였다. 이때 고력볼트의 체결은 강구조설계규준이 정하고 있는 표준 볼트장력 11.7톤이 도입되도록 체결하였다. A-6, A-10, A-16의 균열에 대해서는 상부면에서의 균열길이가 각각 13.0 mm(260만회), 11.0 mm (315만회), 8.0 mm(315만회)되는 시점에서 균열선단부에 직경 5 mm의 stop-hole 만을 뚫는 보수방법을 적용하였다. 이상의 보수방법을 적용해서 실험종료시인 총반복가력횟수 400만회까지의 보수부위에 대한 재균열 발생여부를 관찰하였다. 균열 A-5의 경우 실험종료후 고력볼트를 풀어서 균열상황을 관측한 결과 재균열이 발생되지 않았다. A-6 균열지점에서는 실험종료후 침투탐상을 실시한 결과 stop-hole이 기점이 되서 11 mm 정도의 재균열이 진전되고 있음을 확인할 수

있었다. A-10과 A-16의 균열부위에서는 stop-hole 보수후 실험종료시까지 재균열이 발생되지 않았다.

그림 3은 B 시험체 수평보강재 상·하부면에서의 균열진전상황과 각 균열들에 대한 보수방법을 나타낸다. 균열 B-3은 상부면 균열길이가 34.0 mm가 되는 145 만회 시점에서 균열선단에 직경 9 mm의 stop-hole을 뚫어서 균열진전을 방지하였으며, 180 만회 시점에서 stop-hole의 좌우측에 직경 22 mm의 볼트구멍을 가공하여 이 부분에 고력볼트 마찰접합방식의 첨판에 의한 보수보강을 실시하였다. 100 만회에서 6.5 mm의 크기로 발견된 균열 B-5는 180 만회에서 균열을 일부 남긴 상태에서 보수용접을 실시하고 덧살을 완전히 제거하였다. 균열 B-10의 경우는

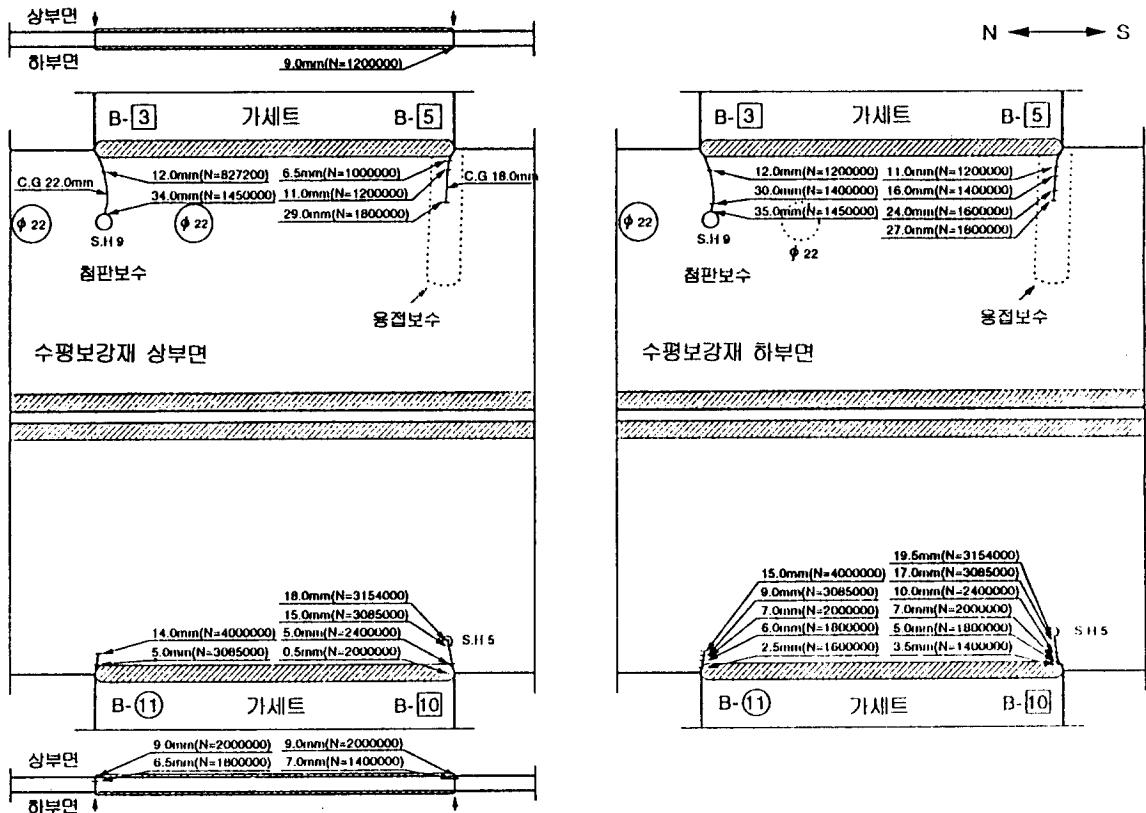


그림 3. 가세트 단부에서 피로균열의 진전상황 (B 시험체 중앙)

315 만회 시점(상부면 균열길이: 18.0 mm)에서 균열선단에 직경 5 mm의 stop-hole을 뚫었으며, B-11의 균열에 대해서는 실험종료시까지 아무런 보수를 실시하지 않고 그대로 두었다. 실험종료후 각 균열부위에서의 재균열 발생여부를 관찰한 결과 아무런 변화없이 균열성장이 멈춰 있음을 확인할 수 있었다.

그림 4는 B 시험체의 남측 수평보강재에 연결된 가세트 플레이트 용접부위에서의 균열진전상황과 보수방법을 나타낸다. 균열 B-4의 경우 160 만회에서 균열선단에 직경 9 mm의 stop-hole로 보수했음에도 불구하고 균열이 재발생하였다. 이것을 180 만회에서 균열부위를 가우징을 한후 보수용접을 실시하였다. 이때 덧살부분에 대한 그리인딩 처리는 완전히 하지 않았다. 균열 B-6의 경

우에는 상부면 균열길이가 33.0 mm되는 205.5 만회 시점에서 직경 9 mm의 stop-hole로 보수를 했으나, 균열이 계속 진전되어서 240 만회에서 재차 직경 9 mm의 stop-hole을 가공하고, 최초 stop-hole 좌우측에 직경 22 mm의 볼트구멍을 만들어 M20 고력볼트와 첨판에 의한 고력볼트 마찰접합방식의 보수보강을 실시하였다. 보수용접을 실시한 균열 B-4 부위에서는 389.6 만회에서 상부면에서는 7.0 mm, 하부면에서는 3.0 mm 정도의 균열이 용접단부에서 발견되었다. 실험종료후 파면관찰을 한 결과 균열은 표면으로부터 1 mm 정도의 단부 절삭면에 존재했던 반경 0.5 mm의 노치를 기점으로 발생된 것으로 추정된다(사진 5). 고력볼트와 첨판에 의한 보수보강을 실시한 균열 B-6에서는 재균열이 발생되지 않았다.

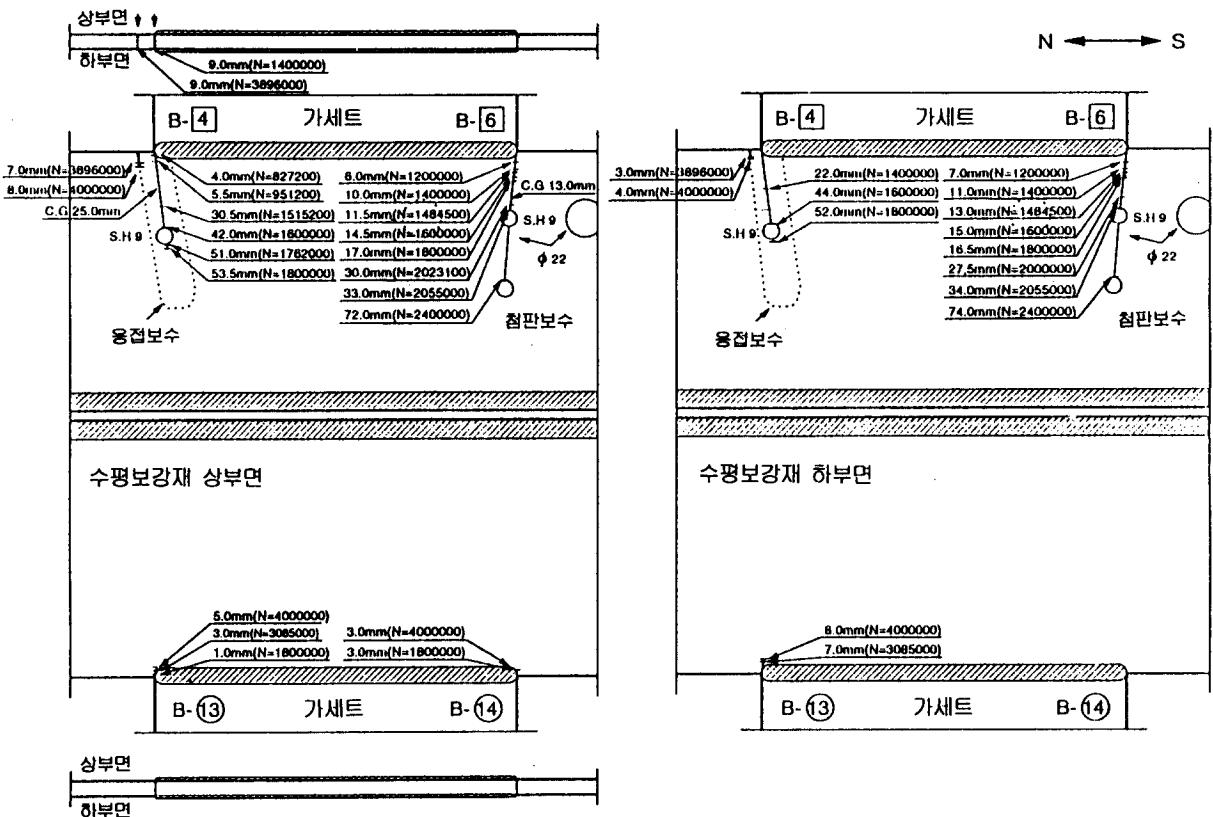


그림 4. 가세트 단부에서 피로균열의 진전상황 (B 시험체 남측)

균열길이와 균열진전속도가 크지 않은 균열 B-13과 B-14는 보수를 하지 않았다.

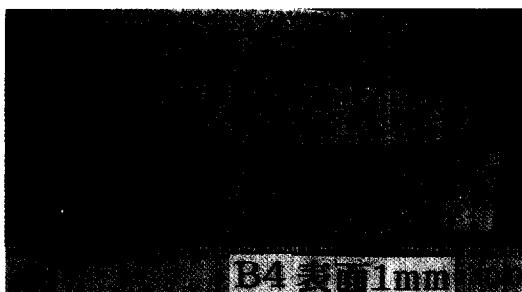


사진 5. B-4 균열의 표면으로부터 1 mm 깊이의 미세조직

그림 5는 하부플랜지와 웨브간 모살용접부에

발생된 A-2 균열의 진전상황과 보수방법을 나타내며, 그림 6은 용접보수후 균열진전상황을 나타낸다. 40 만회에서 하부플랜지 상부면의 용접부 표면에 6 mm의 크기로 발견된 표면균열은 플랜지와 웨브로 성장하다가 176.2 만회에서 플랜지 판두께를 관통해서 플랜지 하부면에서의 균열길이가 41 mm에 이르고 있다. 특히 이 균열은 168 만회에서 웨브측에 균열선단에 직경 5 mm의 stop-hole을 뚫었음에도 불구하고 균열성장을 멈추지 않았다. 180 만회에서 가우징을 실시하여 균열을 완전히 제거한 다음 용접보수를 하고나서 덧살을 완전 제거했지만 200 만회에서 플랜지와 웨브에 그림 6에서 보는 바와같이 재균열이 발생되었다. 균열발생부위를 재보수하기 위하여 균열부위의 좌우측에 직경 22 mm의 볼트구멍을 한

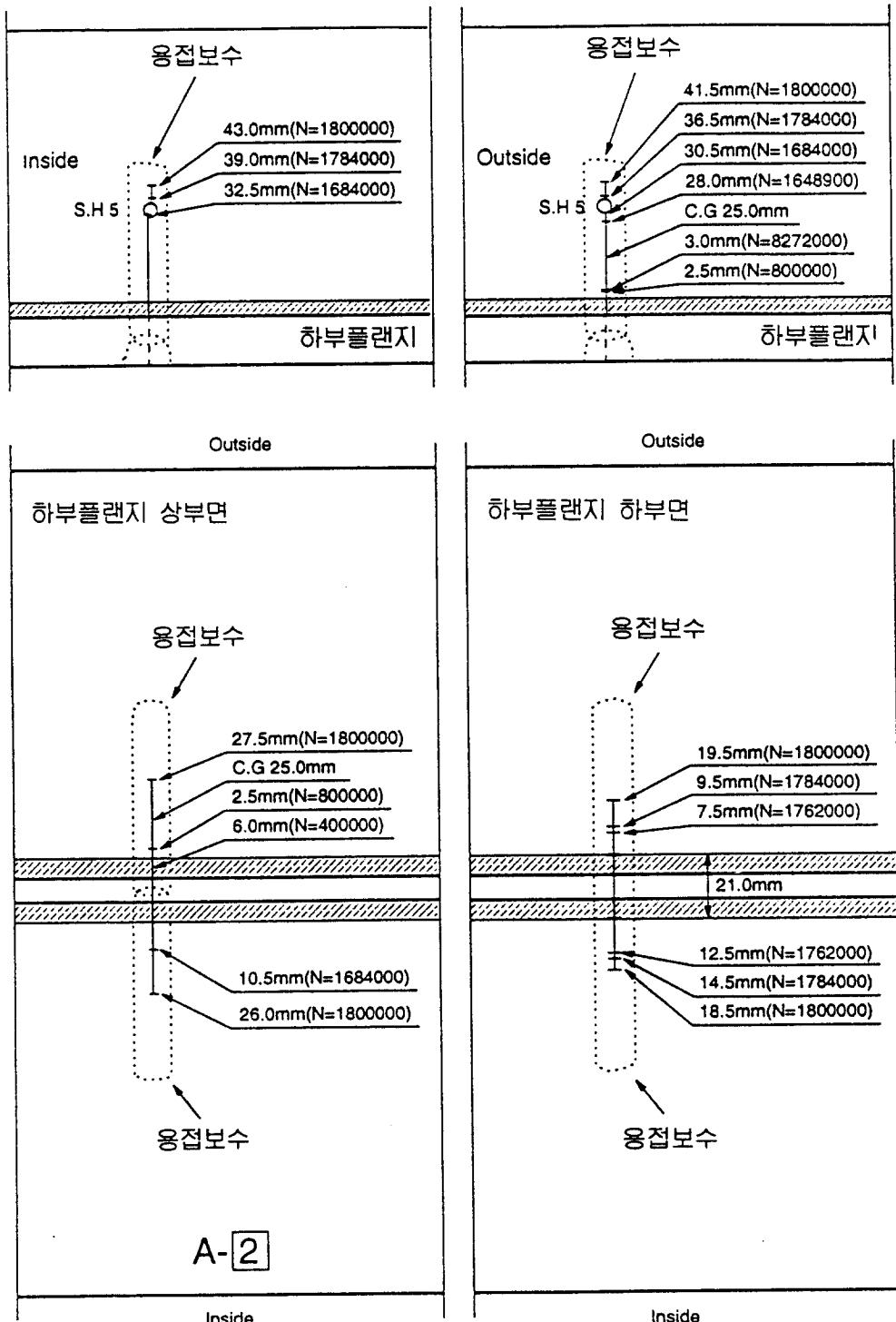


그림 5. 하부플랜지와 웨브간 모살용접부에서 A-2 피로균열의 진전상황

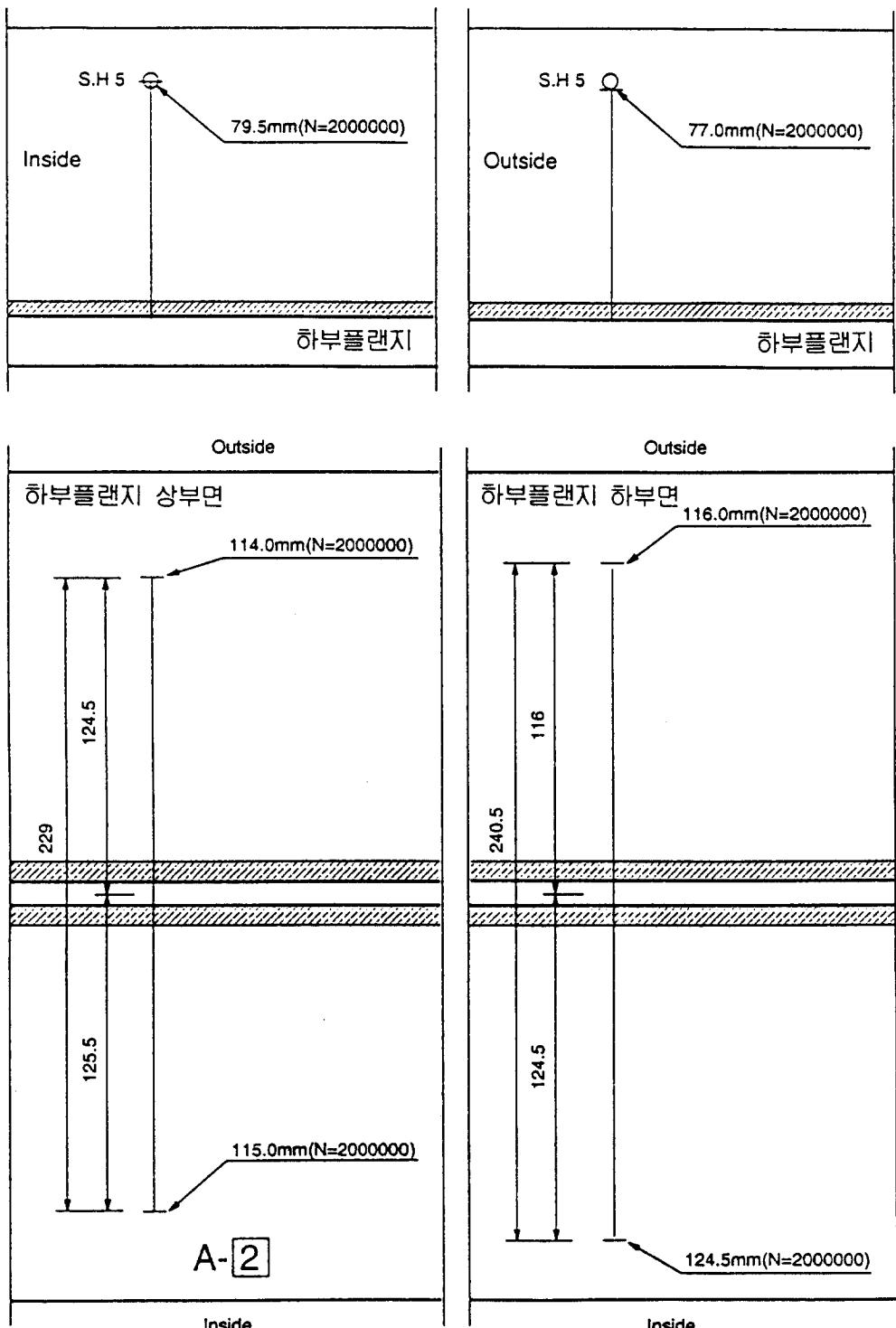


그림 6. 하부플랜지와 웨브간 모살웅점부에서 A-2 피로균열의 진전상황 (웅접보수후)

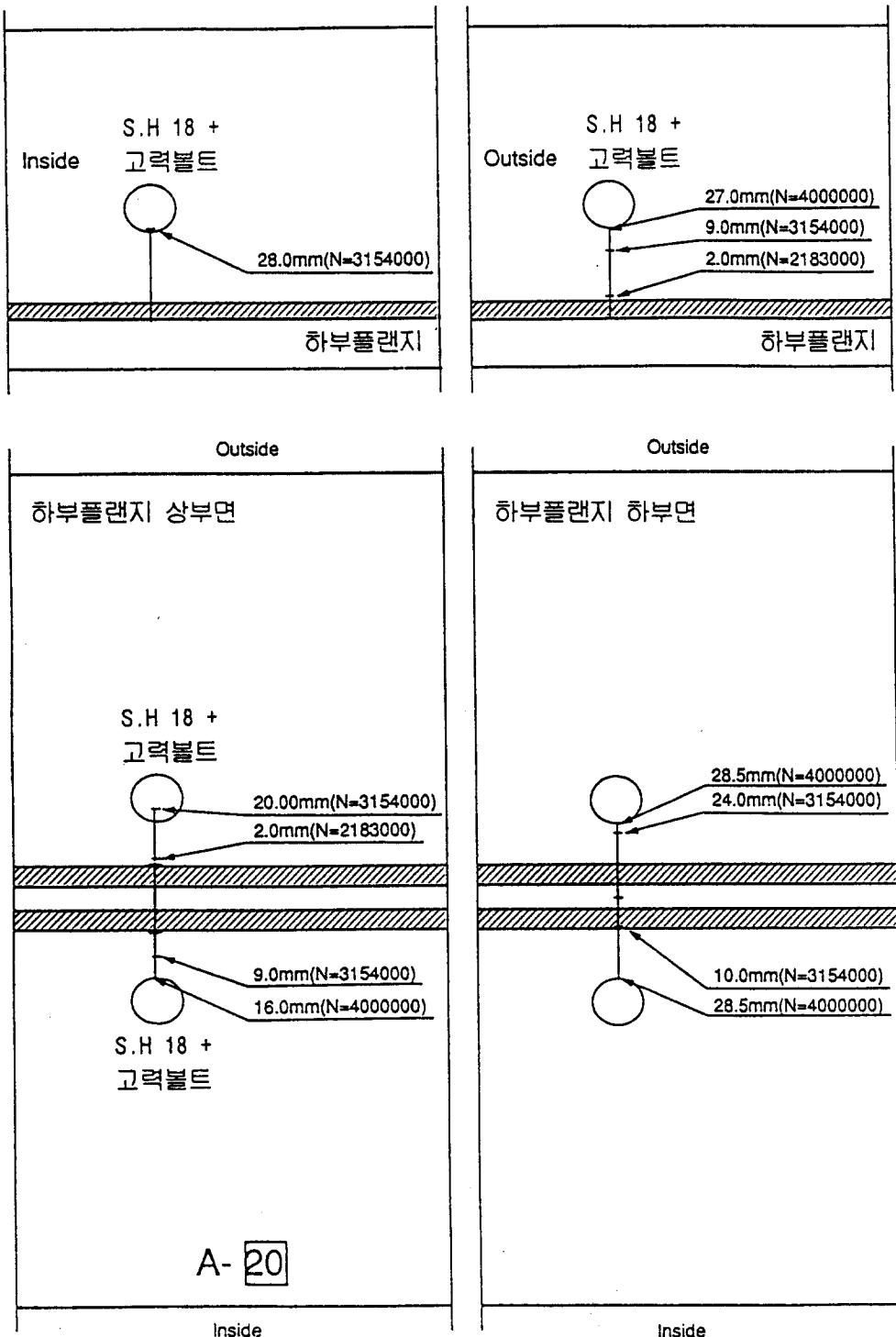


그림 7. 하부플랜지와 웨브간 모살용접부에서 A-20 피로균열의 진전상황

개씩 가공하여 첨판과 M20 고력볼트에 의한 체결을 실시하였다. 그 결과 실험종료시까지 균열의 재발생은 일어나지 않았다. 실험종료후 용접보수한 부위의 파면관찰을 한 결과 균열이 재발생한 위치에서 플랜지 상부면과 하부면에서 실시한 용접이 서로 일치하지 않고, 사진 6에서 볼 수 있듯이 플랜지와 웨브의 교차점에 커다란 용입불량과 슬래그 삽입과 같은 용접결함이 발견되었다. 따라서 이러한 용접결함이 급속한 재균열의 성장을 유발시킨 것으로 추정된다.



사진 6. A-2 균열의 파단면

그림 7은 하부플랜지와 웨브의 모살용접부에서 발생된 또 다른 균열 A-20의 예를 나타낸다. 용접 지단부에서 발생된 균열은 계속 성장해서 플랜지와 웨브의 판두께를 관통하였으며, 그후 315만회에서 균열길이가 플랜지 하부면에서 24 mm, 웨브 내측에서 28 mm가 되었을 때 보수를 실시하였다. 보수는 직경 18 mm의 stop-hole을 뚫고 50 x 50 x 9 mm 크기의 첨판을 삽입한 다음 M16 고력볼트로 체결하는 방법을 채택해서 플랜지부위의 균열에 대해서는 플랜지하부면 균열선단에서 약간 떨어진 부위에 실시하였고, 웨브부위의 균열에 대해서는 웨브내측 균열선단에 실시하였다. 실험종료후 체결볼트를 해체하고 균열진

전상황을 관측한 결과 플랜지 하부면과 웨브 외측의 균열은 보수후에도 계속 성장해서 stop-hole에 도달한 다음 그 성장을 멈춰있음을 확인할 수 있었다.

4.2 피로강도

크레인 주행거더의 피로수명은 접합부등급과 작용용력범위 및 하중의 반복횟수에 의해서 결정된다. 전보⁵⁾에서 시험체의 각부위별 접합부등급은 JSSC 강구조물의 피로설계지침을 기준으로 했을때 재하점 직하는 E 등급, 가세트 단부는 G 등급 또는 H등급 그리고 종비드 부위는 D등급임을 확인하였다. 여기서는 보수했을때와 보수전 상태의 피로등급을 비교한다.

그림 8과 9는 stop-hole을 이용해서 가세트 단부에 발생한 균열을 보수한 경우의 S-N 선도를 나타낸다. 여기서 실선은 JSSC 피로설계 지침서의 피로등급곡선이고, ◆ 표시와 ◇ 표시는 실험치를 의미한다. 특히 ◇ 표시는 보수후 재균열이 발생되지 않은 경우를 의미낸다. 피로등급이 보수전 상태와 마찬가지로 G등급 정도임을 알 수 있다. 또한 피로등급은 stop-hole 직경의 크기와는 무관하였다. 한편 stop-hole과 고력볼트로 보수한 종비드 부위도 보수전 상태와 동등한 D등급을 나타내었다(그림 10). 그림 11과 12는 용접보수한 경우의 S-N 선도를 나타낸다. 보수전의 S-N 선도와 비교하면 가세트 단부는 보수전과 동등의 피로강도를 나타내고 있는데 반하여 종비드 부위의 경우는 보수전 보다 2등급 낮게 나타내고 있다. 피로실험 종료후 파면을 관찰한 결과 종비드 부위의 경우 사진 6에서 보았듯이 용접결함이 존재해서 보수전 보다 피로강도가 더 나빠졌음을 알 수 있었다. 이것은 용접보수의 경우 정확히 시공되면 보수전과 동등의 피로강도를 기대할 수 있지만 시공관리가 잘못되면 오히려 피로강도를 저하시킬 수도 있음을 의미한다. 또한 피로강도를 높이는 방법중의 하나인 라운딩 처리도 사진 5에서

알 수 있었듯이 시공상태에 따라서 기대한 효과를 얻지 못할 수도 있음을 알 수 있다. 한편 고력볼트와 첨판에 의한 보수는 피로균열이 발생된 부위에서 첨판과 소요볼트의 체결이 가능하다면 시공 편차가 작아서 가장 확실한 보수법임을 확인할 수 있었다.

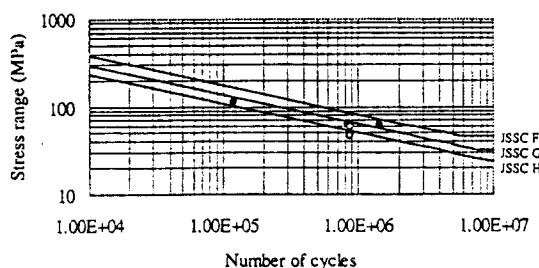


그림 8. 직경 5 mm의 stop-hole로 보수한 가세트 단부의 S-N 선도

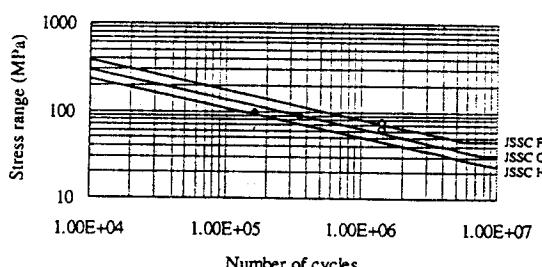


그림 9. 직경 9 mm의 stop-hole로 보수한 가세트 단부의 S-N 선도

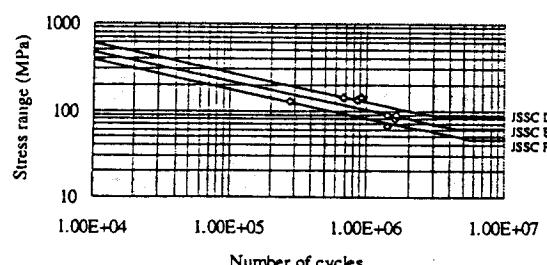


그림 10. Stop-hole과 고력볼트로 보수한 종비드 부위의 S-N 선도

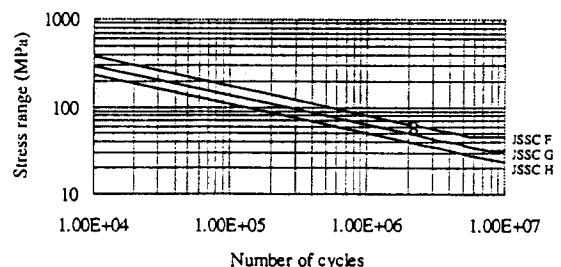


그림 11. 용접보수한 가세트 간부의 S-N 선도

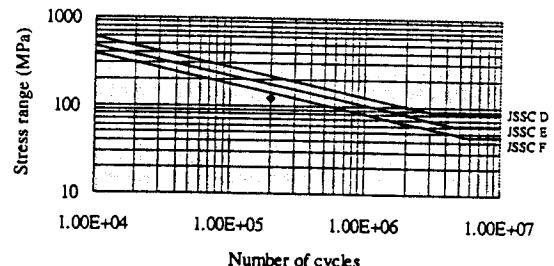


그림 12. 용접보수한 종비드의 S-N 선도

5. 결 론

본 실험을 통해 시험체에 발생된 피로균열에 대한 각종의 보수방법을 적용하였다. 그 효과는 다음과 같다.

(1) 피로균열이 발생된 부위에 stop-hole (5mm 또는 9mm), stop-hole에 고력볼트 체결, 용접, 첨판과 고력볼트에 의한 보수방법을 적용하였다. 이중에서 stop-hole로만 보수를 한 경우에는 5개소에서, 용접보수의 경우에는 2개소에서 재균열이 발생하였다. 그러나 stop-hole에 고력볼트를 체결하거나 첨판과 고력볼트로 보수한 경우에는 재균열이 발생하지 않았다.

(2) 보수한 균열에 대해서 보수한 시점에서 균열의 재발생까지의 반복횟수를 근거로 S-N 선도를 작성한 결과 JSSC 피로설계지침의 피로등급

과 비교해 보면, 가세트 단부를 stop-hole로 보수를 한 경우는 G등급 정도이며, 종비드 부위를 stop-hole과 고력볼트로 보수한 경우에는 D등급 정도였다.

(3) 용접보수를 할 경우 정확한 시공이 시행되면 보수전과 동등한 피로강도를 기대할 수 있지만, 시공이 잘못되면 용접결합에 의해서 균열발생이 촉진되어서 피로강도가 현저하게 저하될 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) 山田建太郎, 酒井吉永, 菊池洋一, ガセットを鉛接した引張部材の疲れ強さとストップホールの効果, 土木學會論文集, 1984, 第341號, pp.129-136

- (2) 森猛, ストップホールボルトを締めすることによる疲労亀裂の補修, 構造工學論文集, 1989, Vol. 35A, pp.969-976
- (3) 山田建太郎, 近藤明雅, 鋼部材の亀裂補修・補強後の疲れ挙動, 土木學會論文集, 1986, 第368號, pp.411-415
- (4) 山田建太郎, クレーン走行發生疲労評價対策, 構造工學論文集, 1989, Vol.35A, pp.1-8
- (5) 林成祐, 金振鎬, 張仁和, 志賀厚, 크레인거더의 피로균열에 관한 실험적 연구 (1), 피로균열의 발생과 진전, 한국강구조논문집, 제9권, 제2호, 1997, pp.237-248

(접수일자 : 1997. 6. 3)