

선박 용접구조의 잔류응력과 피로강도

김 화 수

Residual Stress & Fatigue strength in Welded Ship Structure

W. S. Kim



김화수/현대중공업
(주)/1959년생/선박구
조의 비선형거동 및 피
로응답

1. 서 론

구조의 용접접합부에는 재료의 항복응력 크기의 용접잔류응력이 발생되고, 이 잔류응력 상태에서는 응력비(최소응력/최대응력)의 영향이 거의 없다는 것이 일정진폭 하중조건에 의한 피로실험결과로부터 알려져 있다.¹⁾

이와 관련하여, 용접구조의 설계단계에서는 초기 용접잔류응력이 그대로 잔류한 소형실험편의 일정진폭하중 상태의 피로실험 결과로부터 도출된 피로설계선도(S-N 선도)를 이용, 변동하중에 의한 응력진폭의 밀도분포만으로 일생동안의 누적피해도를 구해 피로강도를 평가하는 것이 일반적이다. 지금까지는 선박용접구조의 경우도 이러한 개념으로 피로강도 평가를 수행하였으나^{2,3,4)}, 일반적인 육상 또는 해상 용접구조물과는 달리, 화물의 적재 등의 정하중 이력에 의한 응력변동폭은 피로를 유발하는 파랑 응력변동폭보다 상당히 크다. 그리고, 정하중에 의해 용접접합부에 인장응력을 발생시키는 하중이력을 받을 경우, 초기용접잔류응력은 상당히 저하될 것으로 생각된다.

본 연구에서는 인장응력을 유발하는 정하중 이력에 의해 저하된 용접잔류응력분포와 이러한 잔류응력분포를 가진 선측 중늑골 용접접합부의 피로강도를 검토한다.

2. 용접잔류응력 분포 및 피로강도에의 영향

선측 중늑골과 횡늑골 교차부의 용접접합 끝단부에서는 거의 항복응력에 도달하는 초기용접잔류응력이 존재한다. 이 초기용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향에 관해서는 지금까지 많은 보고가 되어 있으나, 이러한 연구는 주로 초기용접잔류응력이 그대로 남아있는 상태에서 피로하중을 받는 경우를 가정한 결과이다. 그러나, 선측 중늑골 구조에서 선박의 건조 후 수압시험 등의 정하중에 의한 인장응력을 유발하는 하중이력을 받으면 재료의 탄소성 거동에 의해 초기용접잔류응력은 크기 및 분포가 모두 크게 변화된다. 즉, 잔류응력 분포가 변한 상태에서 선박은 운항하고 파랑에 의한 변동하중을 받게 된다. 따라서, 선측 중늑골구

조의 피로강도에 관한 용접잔류응력의 영향은 초기용접잔류응력 분포가 아니라 수압시험 등의 하중이력에 의해 변화된 후의 잔류응력분포를 고려하는 것이 타당하다고 생각된다.

본 연구에서는 선측 종늑골과 횡늑골 교차부의 연결구조를 대표할 수 있는 그림1과 같은 하중 비전달 필렛 용접부 실험편을 대상으로, 초기 용접 잔류응력분포 및 1회의 인장 정하중이력에 의한 잔류응력분포의 변화를 유한요소법을 이용하여 Simulation하고, 응력이완법으로 측정된 실험결과와 비교한다. 또한, 초기용접잔류응력이 남아있는 실험편과 정하중이력에 의해 잔류응력이 변한 실험편에 대한 피로강도를 상호 비교하고, 실제 선박 종늑골구조에 있어 용접잔류응력이 피로강도에 미치는 영향을 어떻게 고려해야 하는가에 관해 검토한다.

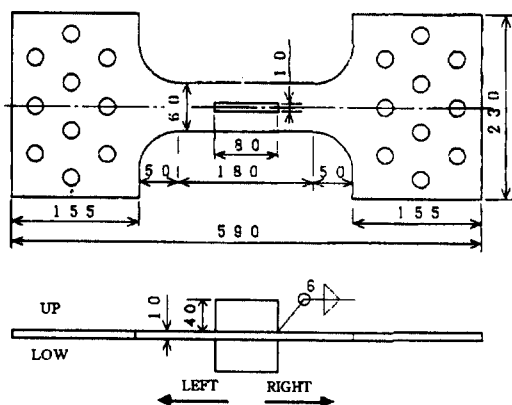


그림 1. 하중비전달 필렛용접 끝단 실험편

실험편 재료의 Mill Sheet에 의한 화학성분, 기계적 성질 및 실험편의 용접조건은 각각 표1~표3에 나타내었다. 그리고, 실험편의 용접에 의한 열영향을 거의 받지 않는 부분에서 길이방향으로 잘라낸 시편의 인장 실험결과를 표2에 동시에 나타내었다.

2.1 용접잔류응력 분포의 Simulation 및 계측

표 1. 시험편의 화학성분 (%)

재료	C	Si	Mn	P	S
KA36	0.16	0.20	1.11	0.016	0.005
Cu	Ni	Cr	Mo	V	T. Al
0.01	0.02	0.02	-	-	0.031

표 2. 시험편의 기계적 성질

	재료	항복점 (MPa)	인장강도 (MPa)	신률 (%)
Mill Sheet	KA36	491	551	20
인장시험	-	356.2	540.6	-

표 3. 시험편의 용접조건

전류	250A	
전압	26V	
속도	30cm/min	
방법	CO ₂ 반자동	

①~④는 용접순서
()는 아래면

2.1.1 용접잔류응력 분포의 Simulation

구조부재의 용접으로 인한 각 부분에서의 온도 상승 및 온도하강 과정은 각각 다르며, 부재 내부에서는 열팽창 및 수축으로 인한 열변형으로 서로 구속을 하게 된다. 이 때문에 부재 내부에서 열응력, 변형률, 변형이 발생하고, 변형과정에서 소성역이 생기면서 냉각 후에 응력 등이 잔류하게 된다. 용접잔류응력에 관해서는 과거부터 연구가 진행되어 왔고, 지금도 연구가 활발히 행해지고 있다. 그러나, 실제 용접구조의 기하학적 형상은 복잡하고, 용접은 재료특성의 온도의존이나 소성변형 등을 포함한 비선형 문제이기 때문에 이론적으로 정확한 해를 얻는 것은 거의 불가능하다. 그러나, 최근의 전산기 성능의 발전과 함께 유한요소법은 열탄소성해석에서부터 용접잔류응력과 잔류응력형성에 도달할 때까지의 과도적 응력을 해석할 수 있게 되었으며, 용접잔류응력의 연구를 수행하는 데에는 없어서는 안될 도구가 되었다.

용접에 의한 잔류응력을 Simulation으로 정도 좋게 구하기 위해서는 구조부재의 용접에 따라 열원의 이동과 온도분포의 변화에 동반한 응력, 변형률을 순차 추적하는 열탄소성해석이 필요하다. 하지만, 이 방법은 굉장히 비용과 시간을 요구하기 때문에 실용상으로는 문제가 있다. 따라서, 본 연구의 용접잔류응력 Simulation에서는 열원의 이동은 무시하고, 필렛용접부 실험편의 용접비드 전체에 표3으로부터 구한 입열량을 동시에 주입하였다. 단, 입열 시간은 표3에 나타난 용접속도에서 1개의 유한요소 길이를 통과하는 시간인 0.5초로 하였다. 이후 비정상 열전도해석을 실행하여 온도분포를 구하고, 온도분포의 변화를 순차 추적하면서 잔류응력을 열탄소성해석으로 구하였다.

열전도해석 및 열탄소성해석은 상용 유한요소프로그램인 ABAQUS를 이용하였다.⁵⁾

그림2에 Simulation에 이용한 유한요소모델을 보였다. 실험편의 대칭성을 고려하여 전체의 1/8만을 8절점 솔리드요소로 모델링하고, 실험편의 주판과 리브판은 용접비드요소 부분으로만 연결되도록 하였다. 필렛용접 끝단부에서의 솔리드요소의 크기는 $2.0 \times 2.5 \times 1.6\text{mm}$ 이다.

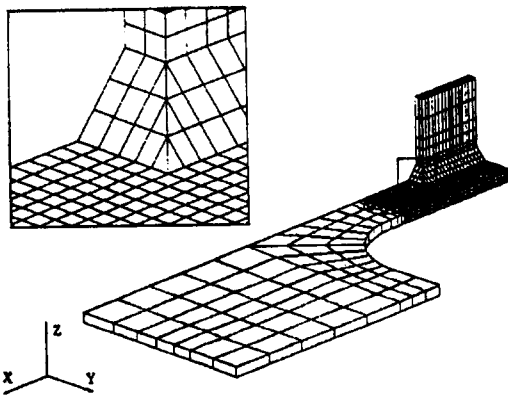


그림 2. 필렛용접 끝단부 시험편의 유한요소모델

그림3 및 그림4에 열전도해석 및 열탄소성해석에서의 재료의 온도 의존 물리정수와 역학적 성질을 나타내었다.⁶⁾ 열전도해석에서 공기로의 열전달은 무시하였고, 재료의 항복은 등방성 Mises조건으로 항복후의 거동은 그림5에 나타난 것과 같이

인장실험 결과로부터 구한 진응력-진변형률 관계를 5개의 직선으로 근사하였다.

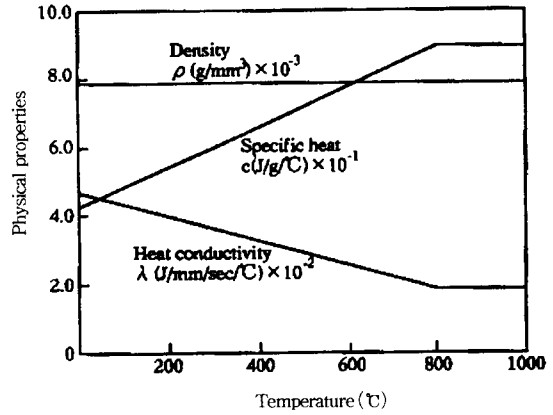


그림 3. 필렛용접 끝단부 시험편의 온도의존 물리정수

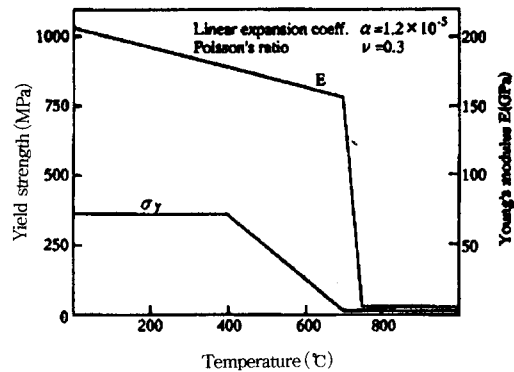


그림 4. 필렛용접 끝단부 시험편 재료의 온도 의존 역학적 성질

2.1.2 잔류응력분포의 계측

그림1에서 보였던 필렛용접부 실험편의 용접비드 끝단 근처의 주판에서의 용접잔류응력 분포를 측정하기 위해 그림6에 보인 위치에 2축게이지(게이지길이 : 1mm)를 부착하여 그 주위(9mm × 9mm)의 절단에 의한 변형률 이완량을 측정하였다.

변형률 이완량을 측정하기 위한 절단 때문에 변형률게이지의 윗면과 아래면 위치를 일치 시켜야

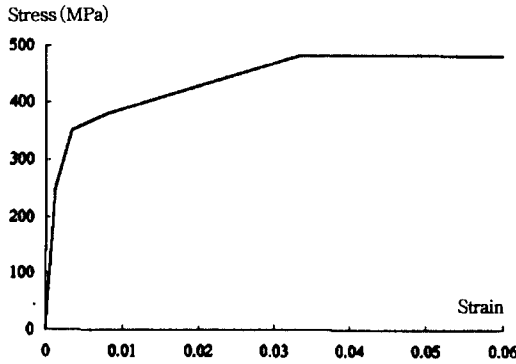


그림 5. 필렛용접 끝단부 시험편의 Simulation에 이용한 응력-변형률 관계

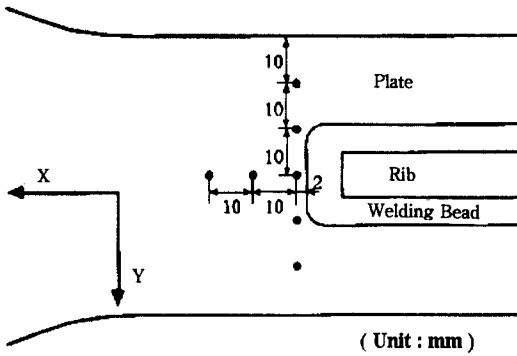


그림 6. 필렛용접 끝단 시험편의 변형률게이지 부착 위치

하는데, 시험편의 필렛용접비드의 크기 차이가 있기 때문에, 윗면과 아래면의 필렛 용접비드의 끝단으로부터 변형률 게이지까지의 거리 차이가 다소 있었다. 그림6에 나타낸 변형률게이지의 부착 위치는 상하 양면 중에서 용접비드가 큰 면을 기준으로 한 것이다.

용접잔류응력은 측정된 변형률의 이완량으로부터 다음식을 이용하여 계산하였다.

$$\sigma_{x, res} = E \cdot (\epsilon_x + \nu \cdot \epsilon_y) / (1 - \nu^2) \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_{y, res} = E \cdot (\epsilon_y + \nu \cdot \epsilon_x) / (1 - \nu^2) \dots\dots\dots (2)$$

단,

$\sigma_{x, res}$: 시험편의 길이방향 잔류응력 (MPa)

$\sigma_{y, res}$: 시험편의 폭방향 잔류응력 (MPa)

ϵ_x : 시험편의 길이방향 변형률 이완량

ϵ_y : 시험편의 폭방향 변형률 이완량

E : 탄성계수 ($= 2.06 \times 10^5 \text{MPa}$)

ν : 포와송비 ($= 0.3$)

2.1.3 용접잔류응력 분포의 Simulation 과 계측 결과의 비교

초기용접잔류응력이 선박 중늑골구조에서의 수압실험 등의 인장 정하중 이력에 의해 어떻게 변화하는가를 조사하기 위해 다음과 같은 경우에 대하여 Simulation 및 계측을 수행하였다.

- CASE 1 : 초기용접잔류응력이 그대로 남아 있는 경우
- CASE 2 : 항복응력의 68.9%의 공칭응력 (이하 0.689 σ_y 로 칭한다.)을 가하는 하중을 길이방향으로 1회 당겼다가 되돌린 경우 (이하 인장이력을 받았다고 칭한다.)
- CASE 3 : 항복응력의 117.2%의 공칭응력 (이하 1.172 σ_y 로 칭한다.)을 가하는 하중의 인장이력을 받은 경우

그림7에 용접비드 끝단으로부터 시험편의 길이방향으로 길이방향 용접잔류응력($\sigma_{x, res}$) 분포 변화의 Simulation 결과와 계측 결과와의 비교를 나타내었다. 그림8에는 그림6에서 보인 변형률게이지를 부착한 위치인 필렛용접비드 끝단으로부터 2mm 떨어진 위치의 시험편의 폭방향으로 길이방향 용접잔류응력($\sigma_{y, res}$) 분포의 변화를 나타내었다.

0.689 σ_y 를 가하는 인장이력을 받은 CASE 2의 경우는 필렛용접비드 끝단 근처의 길이방향의 응력($\sigma_{x, res}$)의 계측결과가 Simulation 결과보다 다소 큰 값을 보이고 있지만, 그 이외의 잔류응력 분포는 계측결과와 Simulation 결과가 잘 일치하고 있다.

필렛용접비드 끝단으로부터 2mm 떨어진 위치에서 길이방향의 잔류응력($\sigma_{x, res}$)의 측정결과에 의하면, 초기용접잔류응력의 경우는 300~500MPa

정도였으나, $0.689 \sigma_{y,res}$ 을 가하는 인장이력에 의하면 $200 \sim 300 \text{MPa}$ 로 변하고, $1.172 \sigma_{y,res}$ 을 가하는 인장이력에 의하면 $-80 \sim -90 \text{MPa}$ 로 변하였다.

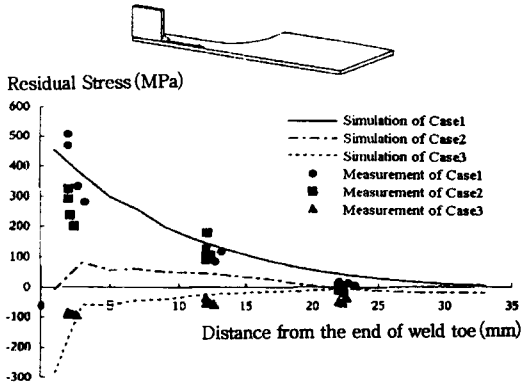


그림 7. 인장이력에 의한 용접비드 끝단으로부터 길이방향의 길이방향 잔류응력 ($\sigma_{x,res}$) 분포 변화의 Simulation과 계측 결과

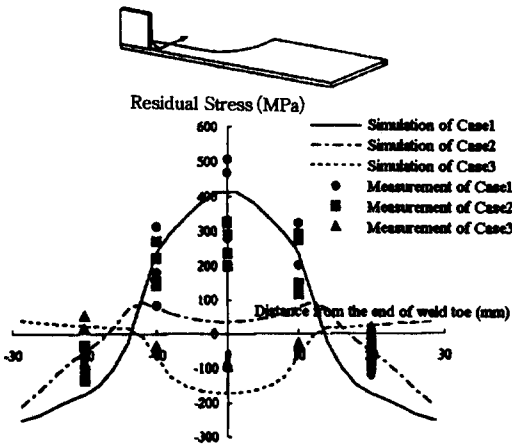


그림 8. 인장이력에 의한 용접비드 끝단으로부터 폭방향의 길이방향 잔류응력 ($\sigma_{x,res}$) 분포 변화의 Simulation과 계측 결과

그림9에 Simulation으로부터 구한 인장이력의 크기에 따른 필렛용접 끝단부(유한요소의 중앙인 필렛용접비드 끝단으로부터 1mm 떨어진 위치)에서의 길이방향 잔류응력 변화를 보였다. 이 결과로

부터 선축 종응력과 횡응력과 용접접합 끝단부에서는 거의 항복응력에 달하는 초기용접잔류응력이 발생하지만 선박의 건조 후 항복응력의 50%~85% 정도의 인장하중을 가하는 수압실험 등을 수행하면 재료의 탄소성거동에 의해 초기잔류응력은 거의 소멸 또는 압축잔류응력으로 변하는 것이 명백하게 되었다.

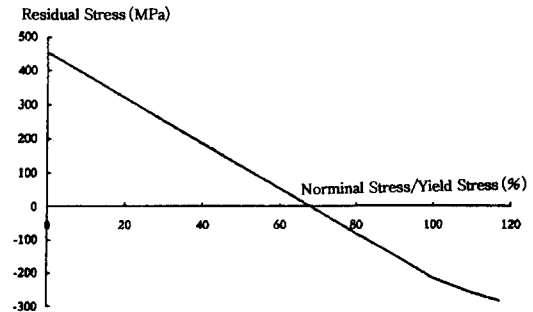


그림 9. 인장이력 크기에 따른 필렛용접 끝단부에서의 길이방향 잔류응력 변화의 Simulation

그리고, 변화된 잔류응력은 그 이후의 하중이력에 대해서는 별로 변화가 없을 것으로 생각된다.

2.2 용접잔류응력 분포 변화와 피로강도

실제의 선박중능골구조에서 용접잔류응력의 피로강도에의 영향을 어떻게 고려할 것인가에 관한 검토를 위해 초기용접잔류응력이 그대로 남아있는 실험편과 잔류응력이 인장정하중이력에 의해 변한 상태의 실험편의 정하중진폭 실험을 수행하고, 이로부터 구한 피로강도를 비교한다.

정하중진폭 피로실험은 초기용접잔류응력이 그대로 남아 있는 실험편 (CASE 1), 길이방향으로 $0.689 \sigma_y$ 을 가하는 인장이력을 받은 실험편 (CASE 2), 그리고, $1.172 \sigma_y$ 을 가하는 인장이력을 받은 실험편 (CASE 3) 3개의 잔류응력 분포상태에서 완전양진 하중진폭으로 실시하였다.

피로실험에 사용한 시험기는 25톤 전기-유압서버식이고, 실험주파수는 실험하중에 따라 6~12Hz, 하중파형은 사인파이다.

본 연구에서 정하중 진폭하의 피로수명은 실험편이 완전히 파단한 하중반복수로 정의한다.

실험편의 파단수명이 길 경우에는 5×10^6 회 이하의 하중 반복수에서 피로실험을 중지하였다.

그림10에 피로실험결과를 나타내었다. 여기서, ΔS 는 완전양진 하중진폭실험에서의 공칭응력범위이다

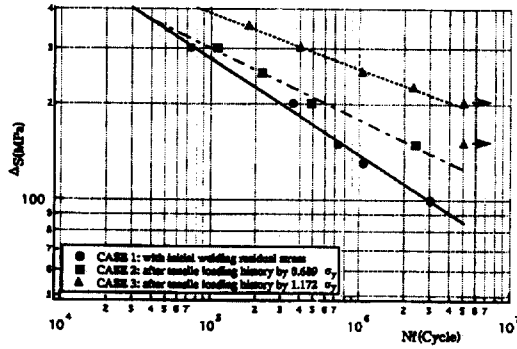


그림 10. 필렛용접 끝단 시험편의 인장이력에 따른 완전양진 하중진폭 피로실험 결과

또한, 피로실험결과를 최소자승법으로 직선회귀하여 다음과 같은 S-N 선도식을 얻었다.

$$\text{CASE 1 : } \Delta S = 9134.8 N_f^{0.3036} \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{CASE 2 : } \Delta S = 3937.3 N_f^{0.2242} \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{CASE 3 : } \Delta S = 2895.3 N_f^{0.1753} \dots\dots\dots (5)$$

S-N 선도식에서 5×10^6 회의 시간강도를 피로한으로 정의할 경우, CASE 1은 84.5MPa, CASE 2는 124.0MPa, CASE 3은 193.8MPa이 각각의 경우의 피로한이 된다.

식 (3) ~ (5)의 결과에 의하면 인장이력에 의한 피로한 ΔS_{limit} 는 그림11과 같은 분포를 보인다. 이 분포를 2차식으로 가정하면 ΔS_{limit} 는 식 (6)과 같이 된다.

$$\log \Delta S_{limit} = (1 + 0.0765\alpha + 0.0709\alpha^2) \log \Delta S_{1,limit} \dots (6)$$

단,
 $\Delta S_{1,limit}$: CASE 1의 피로한(여기서는 84.5MPa)
 α : 인장이력의 크기 (공칭응력/항복응력)

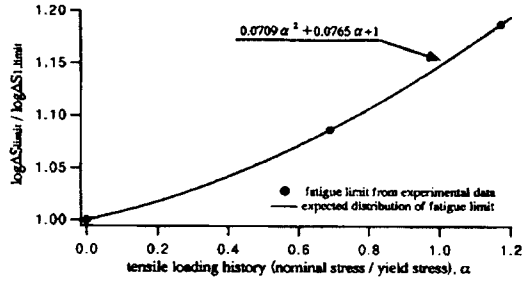


그림 11. 피로실험 결과로부터 구한 인장이력 후의 파단수명의 피로한 (ΔS_{limit}) 분포 및 분포식

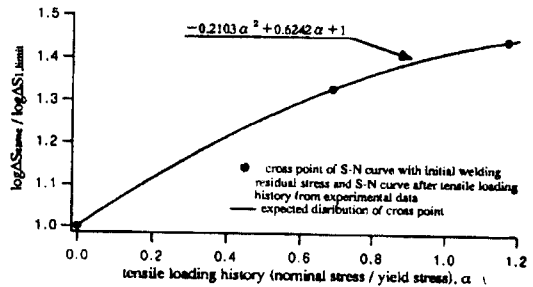


그림 12. 인장이력을 받아도 초기용접잔류응력의 경우와 동일한 피로강도를 나타내는 응력진폭 (ΔS_{same})의 분포 및 분포식

그리고, 인장이력을 받아도 CASE 1에서의 피로강도와 동일한 강도를 나타낼 것으로 예측되는 응력진폭 ΔS_{same} (즉, CASE 1의 S-N선도와 인장이력을 받은 S-N선도와 교점에서의 ΔS)은 그림12와 같은 분포를 보이며, 이를 2차식으로 가정하면, 식 (7)과 같이 된다.

$$\log \Delta S_{same} = (1 + 0.6242\alpha - 0.2103\alpha^2) \log \Delta S_{1,limit} \dots\dots (7)$$

따라서, 인장이력후의 S-N 선도는 식 (6)과 식 (7)에서 구한 2점을 이용하여 식 (8)과 같은 형식으로 구해진다.

$$\Delta S = C \cdot N f^m \dots\dots\dots (8)$$

단,
 $\log C = (1 + 0.0765\alpha + 0.0709\alpha^2) \log S_{1,limit} - 6.699m$

$$m = \frac{(0.5477\alpha - 0.2812\alpha^2) \log S_{1,limit}}{6.3468 - (3.2938 + 2.056\alpha - 0.6927\alpha^2) \log S_{1,limit}}$$

$\alpha = 0$ 인 경우는 식(3)을 적용

$\log \Delta S \geq (1 + 0.6242\alpha - 0.2103\alpha^2) \log \Delta S_{1,limit}$ 에 대해서는 식(3)을 적용

참고로 위의 제안식으로부터 구한 인장이력에 따른 S-N 선도를 그림13에 나타내었다.

또한, 제안식의 타당성을 검토하기 위해 길이방향으로 항복응력 96.5%의 공칭응력 ($0.965\sigma_y$)을 가하는 인장이력을 받은 시험편에 대해 하중진폭 $\Delta S = 300\text{MPa}$ 의 완전양진 하중진폭 피로실험을 수행하여, 피로수명 230,690 Cycle의 피로실험결과를 얻었다. 그림14에 본 연구에서 제안한 $\alpha = 0.965$ 인 경우의 S-N 선도와 피로실험결과와의 비교를 나타내었고, 피로실험결과는 본 연구에서 제안한 식과 잘 일치한다는 것을 확인하였다.

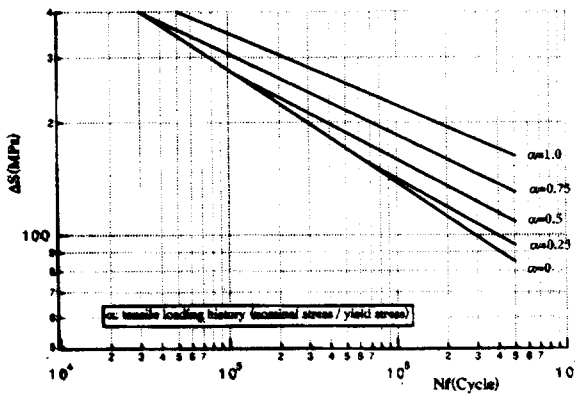


그림 13. 필렛용접 끝단부 시험편의 인장이력에 의한 파단수명의 제안 S-N 선도

3. 결 론

본 연구의 내용과 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 하중 비전달 필렛용접부 시험편에 대한 초기 용접잔류응력 분포 및 1회의 인장하중이력에 의한 잔류응력 변화에 대하여 유한요소법을 이용하여 Simulation하고, 응력 이완법을 이용하여 계측하였다. 그 결과에 의하면, 필렛용접비드 끝단부에서

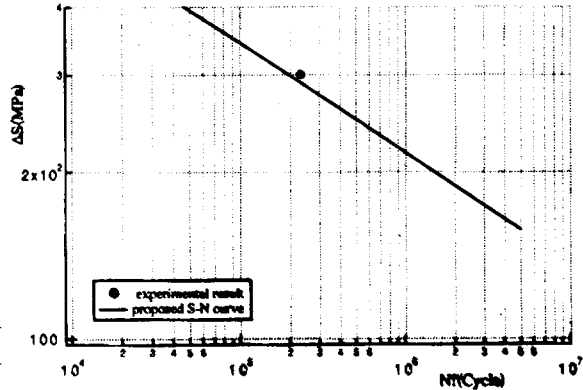


그림 14. 필렛용접 끝단부 시험편의 $0.965 \sigma_y$ 의 인장이력 후의 제안 S-N선도와 피로실험 결과

는 거의 인장항복에 도달하는 초기 용접잔류응력이 발생하지만 1회의 인장하중이력을 받으면 재료는 탄소성거동에 의해 잔류응력이 상당히 저하된다. 그리고, 선박의 중늑골구조에서 설계허용응력인 재료 항복응력의 50 - 80% 정도의 인장하중이력을 받으면 필렛용접비드 끝단부에서의 초기 용접잔류응력은 거의 소멸 또는 압축잔류응력으로 변한다.

2) 하중 비전달 필렛용접부 시험편에 대해서, 초기 용접잔류응력이 그대로 남아 있는 경우와 인장이력에 의한 잔류응력분포가 변한 경우의 정하중진폭 피로실험을 수행하였다. 그 결과에 의하면, 필렛용접부의 피로강도는 정하중 인장이력에 의해 상당히 상승하고, 그 영향은 응력범위가 작은 장수명 영역에서 더욱 커진다. 그리고, 피로실험결과를 기초로 필렛용접부 실험에서의 정하중 인장이력에 대한 S-N 선도식을 제안하였다.

선박용접구조의 설계단계에 있어서 피로강도는 변동하중에 의한 응력진폭의 빈도분포와 초기용접잔류응력이 그대로 남아 있는 소형실험편의 일정하중진폭하의 피로실험결과로부터 도출한 S-N 선도로부터 일생동안의 누적피해도를 구하여 평가하는 것이 현재의 방법이다. 이 경우, 화물 또는 발라스트의 적재에 의하여 구조 부재에 걸리는 응력이 용접부의 잔류응력을 재 분포시키게 되는데, 현재의 방법에서는 이를 고려하지 않고 있다.

그러나, 본 연구의 결과에 의하면, 발라스트 탱크로 사용되는 구획의 선측 중늑골에 대한 피로강도를 평가할 경우, 현재의 방법은 선측 중늑골구조

의 용접접합부의 피로강도를 실제보다 과소 평가할 염려가 있음을 알 수 있다.

앞으로도 적재화물 및 발라스트의 적재에 의한 용접잔류응력의 재분포 및 이에 따른 피로강도의 변화에 대하여 선박의 부위별로 연구가 지속되어 보다 합리적인 피로강도 평가법으로의 발전을 기대한다.

참 고 문 헌

1. T. R. Gurney ; Fatigue of welded structures, 2nd edition, Cambridge University Press, 1979
2. Lloyd Register of Shipping ; Calculation Procedure for Fatigue Damage Assessment of Ship Structure Details, TPDD 88/3, 1989
3. Det Norske Veritas Classification AS ; Fatigue Assessment of Ship, Report No. 93-0432, 1993
4. American Bureau of Shipping ; Guide for the Fatigue Strength Assessment of Tankers, 1992
5. ABAQUS/Standard User's Manual Version 5.4, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc., 1994
6. 佐藤邦彦, 上田幸雄, 藤本二男 ; 溶接變形 · 殘留應力, 産報出版, 1979