

선체의 태양복사 열변형 해석을 위한 전처리시스템

하윤석[†] · 이동훈
삼성중공업 중앙연구소 생산기술센터 용접연구

A System for Thermal Distortion Analysis of Hull Structures by Solar Radiation

Yunsok Ha[†] · Donghoon Lee
Welding Research, SAMSUNG Heavy Industries, Co., Ltd.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

One of the most important things for quality to meet ship-production schedule is an accuracy control. A ship is assembled by welding through whole production process, so it is important that loss by correction will not happen as much as possible by using some engineering skills like reverse design, reverse setting and margin for thermal shrinkage. These efforts are a quite effective in fabrication stages, but not in erection stages. If a ship block which consists of common steel is exposed to directional solar radiation, its dimensional accuracy will change high as time by its thermal expansion coefficient. Therefore, the measuring work would be often done at dawn or evening even with having a very accurate device. In this study, an FE analysis method is developed to solve this problem. It can change measured data affected by solar thermal distortion to ones not, even though ship-block is measured at an arbitrary time. It will use the time when measuring, the direction of block and the weather record by satellites. It is confirmed by a comparison between measured data of a ship-block and the result by suggested analysis method. Furthermore, a pre-processing system is also developed for fast application of the suggested analysis method.

Keywords : Solar radiation(태양복사), Ship block(선체블록), Dimensional accuracy(정도), FE analysis(유한요소해석), Pre-processing(전처리)

1. 서론

선박건조시 각 중간단계별 블록의 치수 정도를 확보하는 것은 다음단계의 수정을 최소화하고 공기준수를 위하여 매우 중요하다. 이러한 정도확보 과정은, 내업의 경우 정반에서 도그피스나 블록체인 및 임시보강재를 사용하는 선(先)제어나, 삼각각열이나 용접부 이면에 라인히팅으로 수정하는 후(後)제어 과정이 일반적이다. 강성을 부여했다가 제거하는 선제어 과정은 탄성복원으로 인하여 그 효과가 크지 않고, 후제어 과정은 변형 발생 사후 대처라는 점에서 수동적이라고 할 수 있다. 최근에는 열변형에 대한 유한요소해석기술 (Ha, 2008)의 발달로 용접변형을 고려한 역설계 (Park, et al., 2011) 및 역세팅을 활용한 제어가 가능해진 바 있다.

외업에서의 정도확보 과정은 양상이 조금 달라진다. 일단 블록과 블록이 맞대기 용접으로 이루어지므로, 선박 전체의 총 길이와 폭을 맞추기 위하여, 선체블록은 단부에서 재절단되거나 모

자란 곳을 육성용접으로 채우게 된다. 이러한 과정을 도크 밖에서 선행하면 효율을 높일 수 있으므로, 야드에서는 정도 계측을 통하여 최대한 사전에 수행하려고 한다. 다만 이 작업이 옥외에서 일어나는 관계로 계측과정에 제약이 따르는데, 주(晝)간에 태양복사열에 노출된 블록의 국부적 팽창 때문에, 탑재시와 선행수정시의 블록 정도가 달라진다. 내업에서도 계절 및 하루에 따라 온도가 변하지만, 이는 전체적인 온도가 변하는 것으로서 블록내 온도차는 거의 없고, 실장의 보정도 어렵지 않다. 그러나 태양복사열의 경우, 노출된 편차에 의하여 온도차가 40도 이상에 달할 수 있고, 이 온도차는 블록의 일시적 뒤틀림을 유발한다.

본 연구에서는 하루 중 외업의 블록계측 시간대가 구속받지 않도록 하는 것을 목표로 하고, 태양복사열에 의한 열변형 해석 과정을 구현하였다. 계측작업자가 블록 계측 날짜와 시각을 기록해두면, 기상위성 자료로부터 해당일의 일출때부터 작업시간까지 태양의 궤적에 의한 시간대별 FE 모델의 각 요소가 받는 열량을 산출하고, 풍향/풍속 조건에 의한 대류 (안벽기간에는 해수 유속 포함) 조건을 부여하여 해당일의 블록 변형을 매 시간대별로 도

출할 수 있도록 하였다. 해석의 구속 자유도와 계측의 3점 세팅을 일치시키면 해석결과는 계측결과의 보정에 바로 사용될 수 있고, 태양복사열이 제외된 실 형상의 치수 정도자료를 얻을 수 있다. 더 적극적인 활용의 예로, 48시간내의 기상예측자료를 활용하여 탑재일시와 선행수정 시점간의 태양복사열 분석을 수행한다면, 도크내 탑재세팅시의 효율을 극대화할 수 있다.

본 개발 해석법의 검증을 위하여, 하계에 특정 블록을 다른 시간대에 계측하여, 계측 편차를 해석이 예측할 수 있는 지를 확인하였고, 비교 결과는 매우 우수한 일치를 보여주었다. 상기의 해석과정은 많은 수요가 예상되었기에, 본 연구에서는 기상청 사이트의 과거 및 예측 자료를 입력으로 하는 태양복사열 해석의 전처리 시스템의 개발도 같이 진행되었다. 이 과정에서 선체를 이루는 수많은 요소의 태양복사 입열과정을 합리적으로 처리하고, 하루 중 리프팅이나 이동을 겪은 블록의 해석을 가능하게 하며, 태양이 바라보는 요소나 바람의 영향을 받는 요소를 쉽게 구별하는 알고리즘도 같이 개발되었다.

2. 태양복사에너지

2.1 직달복사 에너지

태양으로부터 지구에 도달하는 에너지는 태양-지구간 평균거리에서 단위면적당 1,353 W/m² (태양상수) 로 일정하다 (Ku, et al., 1999). 지구궤도는 약간의 이심률에 의하여 타원의 형태로 돌고 있으며 (Jo, et al., 2000), 이를 통산일(n)로부터 정확한 태양에너지(G)를 도출하기 위하여 식 (1)을 사용하였다. 이 값은 식 (2)(직달복사) 및 식 (7)(산란복사)과 같이 사물이 받는 총 복사에너지의 각 구성요소를 정의하는 구간이 된다.

$$G = 1353 \left\{ 1 + 0.033 \cos \left(360 \cdot \frac{n}{365} \right) \right\} \quad (1)$$

$$G_b = G \cdot \cos \theta \cdot \tau_b \quad (2)$$

직달복사 에너지는 선체 FE요소의 법선과 태양이 이루는 각 (θ)과 직달청명도(τ_b)에 대하여 식 (2)로 계산된다. 직달청명도는 선박이 해발고도가 '0'인 곳에서 건조된다는 가정 하에 식 (3)과 같이 간략히 표현된다. 식 (3)은 태양과 지면으로부터의 수선간 각도인 천정각(θ_z)(식 (4))의 함수인데, 여기에는 태양의 대기통과가 길어질수록 출력이 줄어드는 것 (Honsberg, 2012)이 고려되어 있다. 천정각은 다시 위도(L), 일적위(δ) 및 태양시(ω)로 도출된다. 일적위(식 (5))는 북극과 태양이 이루는 각의 여각으로 각각 동지와 하지에 최대/최소값을 갖는다. 태양시(식 (6))는 정오를 기준으로 현재시각(t)을 각도로 표현한 것이다.

$$\tau_b \approx 0.7^{(\cos \theta_z)^{-0.678}} \quad (3)$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(\cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin L \cdot \sin \delta) \quad (4)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right) \quad (5)$$

$$\omega = -15(12 - t) \quad (6)$$

2.2 산란복사 에너지

직달에 의한 태양에너지가 대기층이나 구름에 의하여 가려진 경우, 그 일부는 산란되어 태양각(SR; 단위반경을 기준으로 공간을 둘러싼 면적, 반구상에서 2π)이 확보된 만큼 전 방위에서 동일하게 선체로 들어오게 된다. 산란 복사에너지는 식 (7)과 같이 정의된다. 선체 FE Shell 요소는 양면에서 산란 복사를 받으므로, 놓여진 각도에 상관없이 태양각은 모두 2π를 적용할 수 있다. 산란복사에너지의 효율(식 (8))은 직달의 투과율과 상보관계에 있어야 하므로, 식 (3)과 음의 비례관계에 있다 (Ku & Kang, 2008).

$$G_d = G \cdot \cos \theta_z \cdot \tau_d \cdot \frac{1 + \cos SR}{2} \quad (7)$$

$$\tau_d = 0.271 - 0.294 \tau_b \quad (8)$$

2.3 요소입열 에너지

매시각 선체 FE 모델의 i-번째 요소가 받는 단위면적당 열량(G_i)(식 (9))(Fig. 1)은 직달(G_b), 산란(G_d) 및 반사(G_r)에 의한 일사의 합에 선체표면 도장의 방사율/흡수율(ε; 선체 도료에서 약 0.9)를 곱한 것으로 구성 (Badescu, 2008)된다. 직달에 의한 복사는 실제 FE 요소에 투입될 때 운도(cloudiness)(N, 구름이 하늘을 가린 정도, 0~1)에 의한 영향을 고려하여 적용한다. 이 영향은 지역별로 약간씩 달라지고, 국내 주요 도시들은 계측을 통해 계수 C, D (식 (2))값이 회귀분석 (Yoo, et al., 2008)되어 있다. 또한 본 연구에서는 야드의 콘크리트 바닥을 고려하여 반사에 의한 에너지는 무시하였다.

$$G_i = \epsilon (G_b (1 - C \cdot N^D) + G_d + G_r) \quad (9)$$

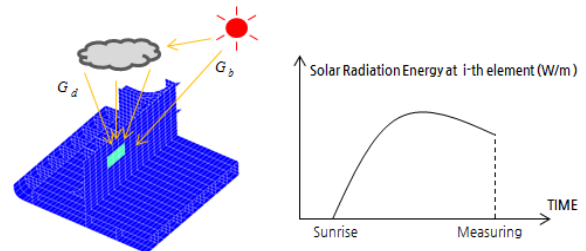


Fig. 1 Solar radiation energy at i-th element

직달에너지 도출시 선체 요소와 태양이 이루는 각(식 (13))은 각 요소의 법선벡터(V_n ; $[X_n Y_n Z_n]$)를 이용하여 구할 수 있다. 태양의 위치벡터(V_s)는 구면좌표계 요소인 고도(α)와 방위각(ϕ) (식 (11))을 이용하여 식 (10)과 같이 직각좌표계로 표현할 수 있다. 방위각은 정남에서 '0'도를 기준으로 한다. 또한 FE 요소의 법선벡터는 정남쪽에서 부터 선체좌표계의 x축과 이루는 각(ψ)만큼 회전변환(식 (12))하여 얻을 수 있다.

$$V_s = [\cos\alpha \cdot \cos\phi, -\cos\alpha \cdot \sin\phi, \sin\alpha] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \sin^{-1}(\cos L \cdot \cos\alpha \cdot \cos\omega + \sin L \cdot \sin\delta) \quad (11) \\ \phi &= 180 + \frac{\omega}{|w|} \cos^{-1} \frac{\sin\delta \cos L - \cos\delta \cos\omega \sin L}{\cos\alpha} \end{aligned}$$

$$V_n = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{V_s \cdot V_n}{\|V_s\| \|V_n\|} \quad (13)$$

3. 대류조건 도출

3.1 자연대류 조건도출

육외노출된 선체블록이 태양복사에너지를 계속 받고 있는 중에도, 블록은 또한 자연대류와 강제대류로 계속 냉각 중에 있다. FE 해석상에서 이를 구현하기 위하여 대류현상의 특성을 적절히 가정할 필요가 있다. 일단 자연대류에 대하여는 종보강재 간격(LS)의 4배를 특성길이로 간주하여, 정육면체 격자공간의 외부에 대한 평균식(식 (14)) (Holman, 2010)을 활용하였다. 이는 프레임 간격, 거더 간격 및 블록 높이가 가정한 특성길이와 유사하다고 하고, 선체의 내부를 이 크기의 격자구조로 가정한 것이다. 특정 FE Shell 요소의 상/하 각 face는 서로 다른 격자구조의 외부가 되므로, 도출된 자연대류계수는 요소에 2배씩 적용하였다. FE 열전달 해석에서는 모델내 열에너지가 대류계수와 온도차의 곱으로서 방출되므로, 시간대별 주변온도($T_{surround}$)의 정보가 있어야 한다. 해당 정보는 각국의 기상청 사이트에서 확인할 수 있다. 대한민국 기상청(kma.go.kr)의 경우 천리안 기상 위성으로 획득된 정보가 제공(Fig. 2)된다. 과거기록은 분단위까지 제공되고, 미래 예측은 48시간 후까지 시간단위(과도해석시 최대 step 단위로 제공된다. 여기서는 직달에너지 도출에 필요한 온도 및 강제대류 도출을 위한 습도, 풍향, 풍속을 모두 얻을 수 있다.

$$h = 1.052 \frac{(T_{element} - T_{surround})^{0.25}}{4LS} \quad (14)$$

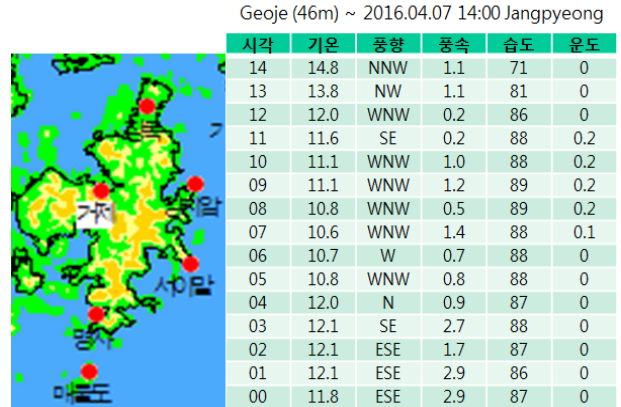


Fig. 2 An example of measured climate date

3.2 강제대류 조건도출

강제대류를 구하는 과정에서는 선체블록에서 보강재가 붙지 않은 면이 주로 외부라는 가정을 도입하였다. 이 경우 블록의 크기에 따라 특성길이(면적을 둘레로 나누어서 구함)가 달라지게 되므로, 자연대류에서 선체를 거더 간격기준으로 분할한 기준으로 단위면적을 삼으면, 특성길이는 보강재 간격으로 도출된다. 또한 풍향과 선체블록의 면이 놓인 방향은 임의적이므로, 전 영역에서 난류로 대류가 일어나는 것을 가정하였다. 난류영역의 평균 대류계수 (Holman, 2010)는 공기의 열전도계수(k), 프란틀 넘버(Pr), 풍속(u_{∞}) 및 특성길이로부터 식 (15)와 같이 도출한다.

$$h = 0.037k \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(\frac{u_{\infty}}{\nu}\right)^{0.8} \frac{1}{LS^{0.2}} \quad (15)$$

안벽에서 전선규모로 태양복사열변형을 분석할 시에는 홀수 아래영역에 대하여 해수에 의한 대류계수를 도출할 필요가 있다. 수면하 선체를 길이 LWL의 판으로 보았을 때, 이 영역에 대한 대류계수는 Bergman, et al. (2011)의 연구를 참고로 하여, 대류계수를 식 (16)과 같이 도출하였다. 다만, 주변온도(해수온도)는 공기의 온도와는 다르게 적용해야 한다. 수온과 유속은 각국의 해양조사기록을 참고해야 하는데, 대한민국의 경우 국립 해양조사원(www.khoa.go.kr)에서 이 정보를 제공한다.

$$h = 0.228 \frac{k}{LWL} Pr^{1/3} \left(\frac{u_{\infty} \cdot LWL}{\nu}\right)^{0.731} \quad (16)$$

3.3 기타 보정 및 한계

과도해석시 선체 구조모델로부터 복사열전달 해석 모델을 사

용할 경우, 보강재의 surface 모델링이 누락 혹은 line으로 모델링되었을 수 있다. 이러한 경우, 우선 모델링은 실제 블록대비 작은 중량을 갖게 되고, 온도해석결과는 실제보다 높게 도출된다. 이에 블록의 실제 중량 정보로부터 밀도를 보정하는 작업이 반드시 필요하다. 다음으로는 대류경계조건이 적용되어야 할 element face가 실제 대비 부족해진다. 이러한 부분은 온도해석 결과가 실제보다 올라갈 수 있는 여지를 제공하므로, 생략된 면 적비만큼 대류계수를 보정할 수 있다.

4. 해석방법론의 검증

제안한 해석방법에 의한 블록 뒤틀림의 정도를 실제와 비교하기 위하여, 하계(夏季)의 하루를 택하고, 특정 블록을 오전 8시와 오후 3시에 각기 계측하였다 (Fig 3). 이 자료를 비교용으로 정리할 때, 인접한 주요 지점상의 거리가 오전 8시에 대비하여 오후 3시에 얼마나 변했는지를 기록하였다. Fig. 4를 통하여 수치를 기록하는 과정을 보였는데, 여기서는 선택된 두 점의 설계 대비 편차가 각 2, 10이므로, 그 차이 값인 '8'이 비교를 위한 값이 된다. 또한 Fig. 3에 포함된 방위각 정보로부터, 블록의 서쪽은 복사열이 중앙부 수직부재에 가리는 오전에는 복사열을 받지 못하기 때문에, 수치변화의 방향에 대하여 직관적인 이해가 가능하다.

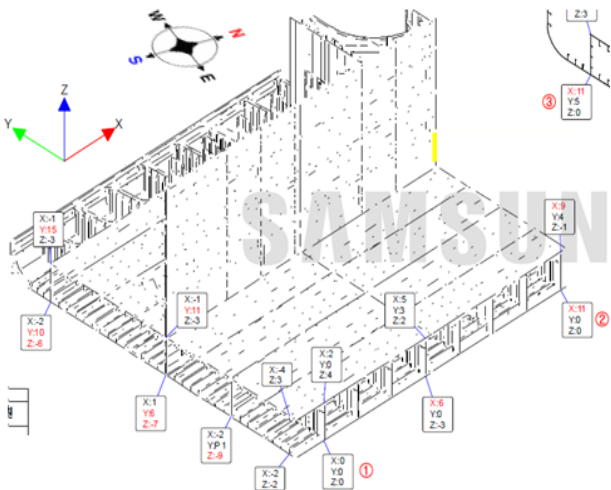


Fig. 3 An example of measuring block-accuracy

상기 과정의 해석을 위하여, 블록의 방향과 정남과의 방향을 확인하고, Fig. 3에서 계측기준으로서 ①~③으로 표기된 3점 세팅 정보를 해석시 6자유도 구속과 일치시키면 절점의 변형결과는 변환 없이 계측결과와 비교가 가능하다. Fig. 5를 통하여, 블록의 배치각도 및 과도해석의 오전 8시 step결과와 오후 3시 step 결과를 Fig. 4와 동일하게 처리한 결과를 확인할 수 있다. 두 결과는 최대 편차 및 그 밖의 영역에서 대부분 좋은 일치를 보이고 있다.

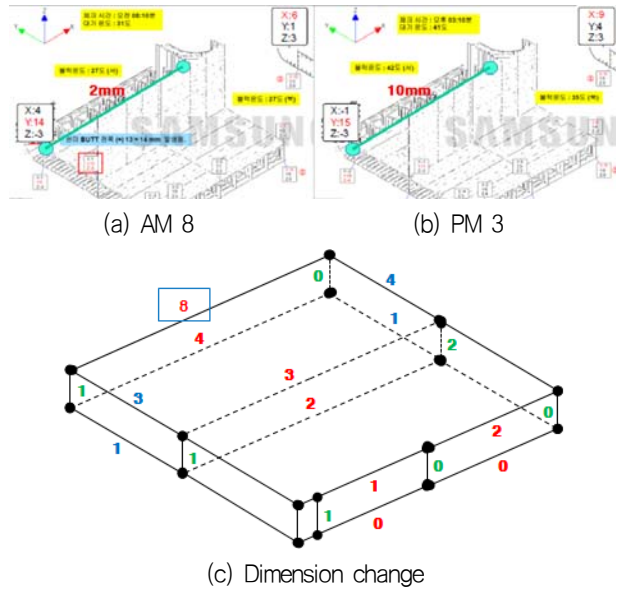


Fig. 4 Distance change between two selected positions according to time

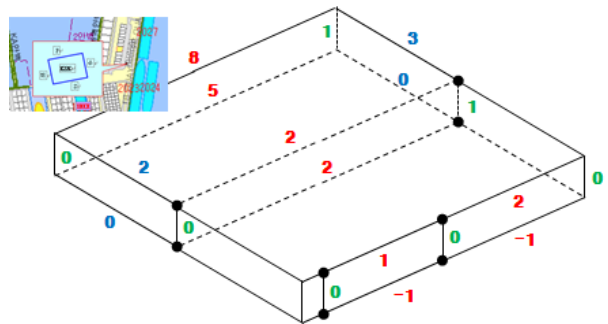


Fig. 5 Distortion result by suggested methodology

5. 전처리 시스템 설계

5.1 요소선택과정

과도해석은 step별로 입력자료를 설계해야하는 데다가, 선체 FE 요소는 법선벡터별로 모두 다른 입염량 정보가 필요하다. 야드에서의 정도관리 중요블록에 대한 많은 경우를 모두 제시간에 분석하기 위하여는 해석에 대한 자동화된 전처리 시스템 확보가 필수적이다. 특히 선박이라는 대형 쉘 구조물의 FE 모델링은 많은 요소로 이루어져있는데, 곡면이 포함된 블록은 요소 모두를 법선벡터별로 따로 계산하는 것이 거의 불가능하다. 본 연구에서는 열량이 스칼라라는 것에 착안하여, 각 벡터와 태양이 이루는 각(θ)이 유사한 것들끼리 묶어서 처리하는 아이디어로 이를 해결하였다. 그룹으로 처리된 이러한 벡터군들은 태양의 위치벡터(식 (10))를 중심으로 동심원을 그리게 된다.

다음으로는 태양에 노출된 요소만 선택하는 과정이 필요하다. 이를 위하여 모니터에 가시화된 FE 모델을 매 시각 고도와 방위각 (식 (11))만큼 회전시킨 후 가시(可視)요소만을 선택하는 알고

리즘으로 자동 전처리를 구현하였다. 강제대류의 적용을 받는 경우도 기본 알고리즘은 유사하지만, 가시요소를 선택할 때 요소의 중심이 보이는 것을 기준으로 하므로, 풍향과 평행한 면은 대류의 영향을 강하게 받지만 선택되지 못할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위하여, 풍향에 대하여 가시요소 선택기술을 적용할 때에는 상하/좌우로 5도씩 틸팅을 했다가 복원하는 과정을 반복하여, 이 과정에서 선택되는 요소도 모두 포함되도록 하였다. 인벽에 위치한 전선모델의 해수대류조건을 받는 영역에 대해서는 시스템이 흡수를 요구하도록 하였다. 이후 흡수 이하의 모델만 선택한 뒤, 법선벡터가 음수인 여러 방향에서 가시요소를 선택하여 외판을 구성하는 요소를 찾는다. 이 요소그룹에 부력을 부여하고, 복사열 지정에서 제외하며, 마지막으로 해수대류계수(식 (16))를 부여하였다. 시스템의 운용 모습 중 Solver로 전달되는 특정 요소군의 시간대별 직달열량 자료를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6 내의 그래프는 X축 변수를 시간으로 하여(오전 5시를 '0 sec'), 시간의 흐름에 따라 특정 방향의 요소(여기서는 Y축에 평행)가 시간당 단위면적당 받는 열량을 나타내고 있고, 한시간 단위로 수치화되어 Table로도 표현되고 있다.

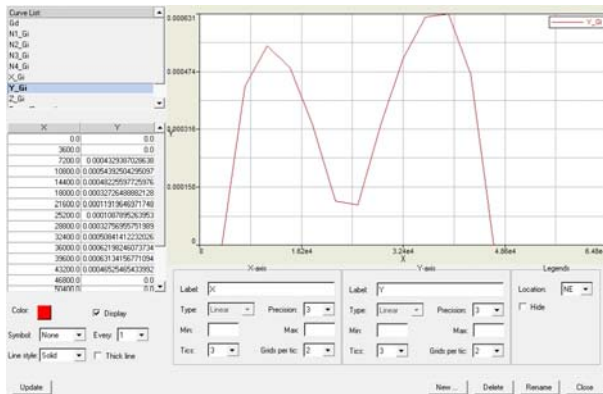


Fig. 6 Pre-Processing system for thermal distortion analysis by solar radiation

5.2 전처리시스템 입력변수

복사열변형해석용 전처리시스템을 사용하기 위한 입력자료의 구성은 특정일의 시간대별 기상자료를 표의 형태(Fig. 7)로 정리하였다. 첫 번째 열부터 시각, sec 환산, 온도, 기온, 풍속, 습도, 건조공기 대류계수, 포화수 대류계수, 건조공기 증량비, 포화수 증량비, 최종 대류계수, 풍향, 방향이 기록되어 있다. 입력자료 중 본문에서 해석의 주인공으로 설명되지 않은 것들이 포함되어 있다. 일단 습도(humidity)는 건조공기와 포화수증기의 증량비로강제대류계수를 도출하는데 활용하였다. 풍향(wind)은 기상청자료에서 과거자료의 경우 소수점 한자리의 degree 정보로 주어지지만, 미래예측의 경우 16방향의 text (Fig. 2)로 제공되므로, 후자에 맞추어 개발하였다. 마지막 열의 Direction (ψ , 식 (12))은 분석대상의 선체블록이 특정시각에 위치가 옮겨졌을 경우 분석할 수 있도록 해준다.

OUTPUT COLUMN												
Natural Convection												
		Coeff.		0.787		Exp.		1.25				
Radiation												
		Emissivity		0.9		Absorbity		0.9				
LS. (m)	NC Exp.	Emic.	Absorb.									
0.8	1.25	0.9	0.9									
2013.08.14	Seconds	C/A	T(C)	V(m/s)	Humidity	h_{air}	h_{humid}	W_{air}	W_{humid}	$h(W/m^2)$	Wind	Direction
500	0	0	24.8	1	81	6.26	0.41	1187	21.0	6.2	WSW	192
600	3600	0	24.5	0.2	83	1.73	0.11	1188	21.3	1.7	WNW	192
700	7200	0	26.7	0.5	73	3.59	0.24	1179	20.1	3.5	N	192
800	10800	0	29.3	0.5	64	3.59	0.24	1168	19.1	3.5	SE	192
900	14400	1	30.3	1.3	62	7.72	0.51	1164	19.0	7.6	NNW	192
1000	18000	2	31.7	1.6	56	9.11	0.60	1158	17.8	9.0	NNE	192
1100	21600	2	31.4	2.5	53	13.03	0.66	1159	16.7	12.9	N	192
1200	25200	1.5	32.4	1.7	50	9.57	0.63	1155	16.2	9.4	SW	192
1300	28800	0.5	33.1	2	49	10.90	0.72	1152	16.2	10.8	WSW	192
1400	32400	0	31.8	3.6	52	17.44	1.15	1157	16.6	17.2	SSW	192
1500	36000	0	32.3	3.6	49	17.44	1.15	1155	15.9	17.2	SSW	192
1600	39600	0	31.4	3.8	50	18.21	1.20	1159	15.8	18.0	SSW	192

Fig. 7 Input-deck of pre-processing system

과거의 주간 계측자료로 근미래 탑재시의 정도 파악을 해야 할 경우, 이 기간이 길면 해석에 필요한 step수가 매우 많아지게 된다. 이 때 Fig. 7과 같은 입력자료 제작시, 계측일 기상 테이블의 자정과 탑재일 기상 테이블의 새벽을 이어붙여서, 최대 1박 2 일간의 일정만 해석할 수 있다. 복사열의 추가적인 투입이 없는 일몰 후에는 선체는 매우 빠르게 주변 온도와 동화되므로, 두 기간사이의 자정간 공기온도가 상당히 차이가 나는 경우라도 변형해의 정도에는 문제가 되지 않는다.

5.3 전처리시스템의 활용

해석법 및 해석법에 대한 전처리 시스템은 과거 계측 자료에서 복사열에 의한 일시적 변형만 제거한 자료를 확보하거나 미래 탑재시점의 변형량을 예측하는 개발 초기의 목적보다 더 적극적으로 활용할 수 있다.

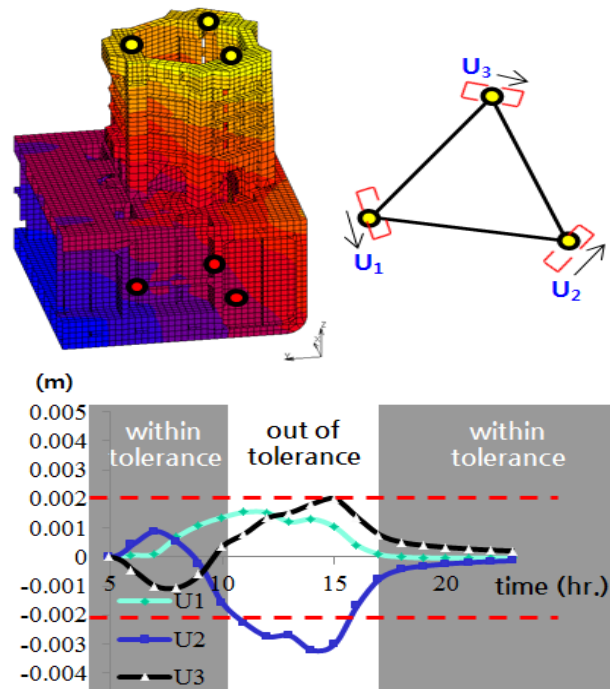


Fig. 8 Time that erection cannot be done by distortion by solar radiation

우선 선체블록에 수정을 가하지 않으면서, 탑재일에 세팅을 최소로 할 수 있는 작업시점을 판단할 수 있다. Fig. 8은 풍력 설치선의 레그가 탑재될 블록에 대하여, 탑재 예정일에서의 작업 가능시간대를 표현한 것이다.

또한 야드내 특정 위치에서 반복적으로 조립이 이루어지는 특정 블록 및 부품(레일류)의 일일 최대 일시적 정도 오차는 각기 하지/동지 및 운도 0/1의 조합에 해당하는 네 가지 상황을 해석한 후 해당 구간을 적절히 보간하는 형태의 전용 table을 작성하여 상시 참고용으로 배포할 수 있다. Fig. 9는 특정 위치에서 건조되는 드릴쉽 내 특정 레일의 복사열에 의한 주간 일시적 변형에 대한 연간 자료를 만드는 과정이다. 계절보다는 운도의 차이를 크게 받고 있음을 확인할 수 있고, 이를 통하여 실제 교정해야 하는 용접변형과 분리하여 수정작업을 진행할 수 있게 된다.

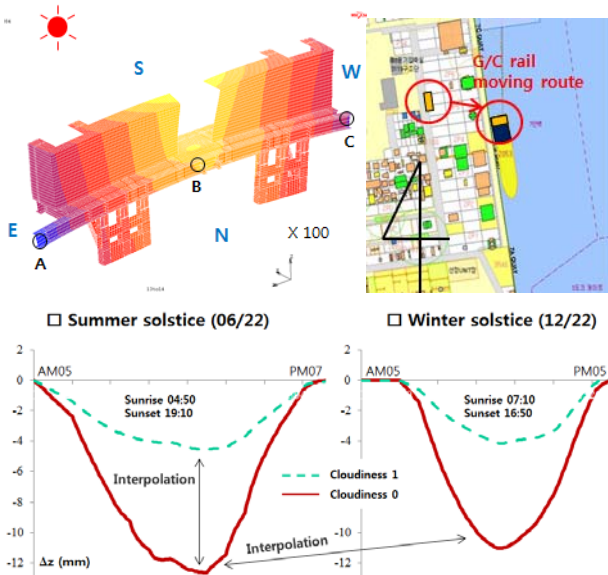


Fig. 9 Tabled rail distortion by solar radiation

Semi-rig 류 등 폰툰이 쌍(雙)으로 존재하는 경우의 분석과 대처에도 활용되었다. 일반적인 선체는 선저의 프레임과 거더간 교차점에 반목이 놓여진다. 주간 복사열에 의하여 선체가 뒤틀리고 회복되는 일이 반복되어도 구조물의 교차점이 반목 상단의 면적내에만 존재하면 큰 문제가 되지 않는다. 그러나 폰툰 2개가 연결되는 구조물은 뒤틀림에 대한 형상 복원이 정확히 이루어지지 않으면 두 구조물 사이의 브레이스 설치 및 상부 deck 구조물의 설치가 제대로 이루어질 수 없다. 폰툰의 형상이 동일하여도 한 쪽이 다른 쪽에 그림자를 만들게 되면 뒤틀리는 양도 달라지게 되므로, 제안된 해석 방법은 이를 분석하고 특수 목적의 반목형태를 설계하는 데에 매우 효과적이다 (Fig. 10).

마지막으로 장(長)형 블록이나 구조물을 조립할 때의 배치와 관련하여 외주 발주처를 결정할 때 활용가능하다. 세장비가 긴 블록은 주간 복사에 의한 뒤틀림에 관하여 남북 방향의 배치가 좋다는 현업의 상식이 있다. 이는 수치화되지 않은 것으로서, 동서 배치나 남북 배치의 차이가 정확히 밝혀져야 발주처 선택의

폭을 넓힐 수 있다. 본 연구에서는 풍력설치선의 레그에 대하여 Fig. 11과 같이 그 차이를 평가해 보았다. 일단 기존의 알려진 바대로 변형량이나 응력적인 부분 모두 남북배치에서 유리한 것으로 확인되었고. 무엇보다 중요한 것은 그 차이가 수치로 얼마인지를 확인할 수 있게 되었다는 것이다. 즉, 본 연구결과에 따라 남북배치가 아니라고 하더라도 조립과정에서 받아들일 수 있는 변형/응력이라면, 알려진 상식에 구애받을 필요없이 작업을 결정할 수 있도록 하여줄 것이다.

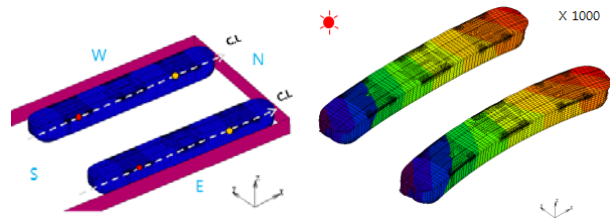


Fig. 10 Distorted pontoons by solar radiation

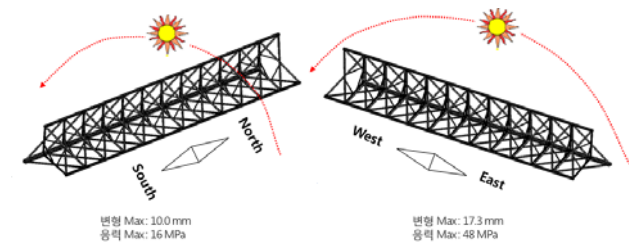


Fig. 11 Distortion/stress result according to direction

6. 결론

외업에서 선체블록의 정도에 가장 문제가 되는 태양복사열을 해석적으로 분석하는 방법을 개발하였다. 이 과정에서

- 1) 태양복사광이 해석 요소로 투입되는 열량을 직달과 산란으로 구분하여 분석하고 이 과정에서 야드의 특성이 고려되었다.
- 2) 선체블록의 형상 특성을 고려하여 대류계수를 도출하였다.
- 3) 시간대별 블록계측 실험을 통하여 해석결과를 검증하고, 해석의 전처리를 돕는 자동화 시스템을 구축하였다.
- 4) 해석법 및 시스템을 활용할 수 있는 사례를 소개하였다.

References

Badescu, V., 2008. *Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg.
 Bergman, T.L. Lavine, A.S. Incropera, F.P. & Dewitt, D.P., 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons: Jefferson U.S.A..
 Ha, Y.S., 2008. *Development of Thermal Distortion*

- Analysis Method on Large Shell Structure Using Inherent Strain as Boundary Condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(1), pp.93-100.
- Holman, J.P., 2010. *Heat Transfer*. McGraw-Hill Korea: Korea.
- Honsberg, C., 2012. *Photovoltaics*. ASU Solar Powers Lab: www.pveducation.org/pvcdrom.
- Jo, D.K. Chun, I.S. & Lee, T.K., 2000. A Study on Accuracy Evaluation of Horizontal Global Radiation Data in Korea. *Solar Energy*, 20(1), pp.31-43.
- Ku, D.K. & Kang, Y.H., 2008. A Study on the Atmospheric Clearness Estimation of Major Cities in Korea Peninsula using Empirical Forecasting Models. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 28(4), pp.25-34.
- Ku, H.D. Kim, K.S. Cho, Y.S. & Song, I.C., 1999. A Study on the Computer Graphic Protraction on the Solar Shadow Mask. *Solar Energy*, 19(2), pp.9-19.
- Park, J.G. Yi, M.S. Ha, Y.S. & Jang, T.W., 2011. Development of full automation re-design system for sub-assembly part fabrication of ship blocks. *15th International Conference of Computer Application in Shipbuilding*, Trieste, Italy, 20-22 September 2011.
- Yoo, H.C. Lee, K.H. & Park, S.H., 2008. Analysis of Data and Calculation of Global Solar Radiation based on Cloud Data for Major Cities in Korea. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 28(4), pp.17-24.



하윤석

이동훈