

선박용 판형 열교환기의 볼트풀림방지 및 수량최소화기법 개발

김호윤*, 배원병**, 장영준**, 한승무***, 김 철#

Development of a Technique to Prevent Bolt Looseness and to Decrease in Quantity for the Plate Type Heat Exchanger Used in Large Craft

Ho Yoon Kim*, Won Byong Bae**, Young Jun Jang**, Seung Moo Han*** and Chul Kim#

ABSTRACT

There are many methods to assemble various parts of a product, and one of them is the bolting system widely used in an industrial field due to the merits; easiness to obtain strong tightening force, simplicity of assemble or disassemble in order to repair, substitution or cleaning, and so on. But this bolting system needs attachments not to let a bolt loose and they are an important factor to cost a great deal.

In this study, some equations are suggested and FE analyses are carried out to verify the cause of the bolt looseness occurring in the tightening process. And because the number of bolts in the bolting system has been decided by empirical know-how of designers in the field, safety rate in the plate type heat exchanger is often too high. Therefore the equations to decrease in quantity are suggested in consideration of the relationship between a critical shearing force acting on the screw and a normal force acting on the cooling plate by the working fluid.

Key Words : Bolt (볼트), Looseness (풀림), Heat Exchanger (열교환기), Plate Type (판형), Finite Element Analysis (유한요소해석)

기호설명

A_T : Total area of the cooler plate
 A_F : Projected area of fluid passage
 F_{cr} : Critical shearing force of 'N' bolts
 F_F : Vertical force occurred by working fluid

L: Length of cooling plate
N: The number of bolts
n: The number of screw threads
 P_0 : Initial fastening force
 P_1 : Tension load of blot
 P_2 : Restoring force of gasket

접수일: 2007년 6월 5일; 게재승인일: 2007년 7월 6일

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계공학부

*** 경희대학교 동서의료공학과

교신처: 부산대학교 기계공학부/기계기술연구소

E-mail: chulki@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2489

- P_3 : Force applied in gasket
- P_{cr} : Critical shearing force applied in bolt
- p_T : Total pressure induced by working fluid
- p_F : Vertical pressure induced by working fluid
- Q : Force applied in bolt
- r : Radius of cooling plate
- r_p : Distance between applied force and center of nut
- w : Thickness at the r_p
- δ_b : The compressed amount of gasket
- δ_g : The extended amount of bolt
- τ : Shearing yield strength of bolt

1. 서론

각종 산업기계, 차량, 항공기 등이나 건축물과 교량의 철골, 가구류 등은 하나의 시스템으로 볼 수 있으며 이들은 여러 개의 요소와 부재 또는 블록들의 결합으로 구성된다. 이러한 결합에는 볼트에 의한 결합 이외에도 용접, 접착, 리벳 등의 체결방식이 있으나 결합체가 일체로 거동할 수 있는 강한 결합력이 용이하게 얻어지고 또 수리, 대체, 청소 등을 위하여 분해와 재조립도 쉽게 이루어질 수 있는 결합방식은 볼트에 의한 체결 이외에는 없다.^{1,2} 이리하여 볼트에 의한 체결은 오래 전부터 산업전반에 걸쳐 널리 이용되어 오고 있다. 볼트체결은 2 개 이상의 물체를 소요 초기체결력이 얻어지도록 조립하고 또 분해 할 수 있어야 하며 볼트체결 후 작용하는 외력과 환경조건에 기인하여 파손 또는 이완을 발생시키는 일이 없이 최초의 체결상태를 유지하는 기능이 요구된다.

판형 열교환기³는 Fig. 1의 사진과 같이 상하부 커버(head/follow cover)와 300 장 이상의 냉각판(Ti plate) 및 개스킷(gasket)으로 구성되어 있으며, 상하부 커버는 볼트(bolt)로 체결되어 있다.

볼트로 조립된 판형 열교환기는 선박의 운전 중 발생하는 진동 등 외적 조건에 의한 볼트풀림으로 인해 냉각판에서의 누수발생 이외에 제품의 조립 시에도 볼트풀림현상^{4,5}이 발생하여 작업자의 피로도를 증가시키고, 생산성 저하 및 원가 인상의 요인이 되고 있다.

또한 선박용 열교환기의 체결용 볼트는 설계자의 경험에 따라 그 수량이 결정되고 있어, 현재의 제품은 매우 안전하게 설계되고 있을 것으로 판단된다. 그러나 이는 곧 볼트를 필요이상으로 과다하

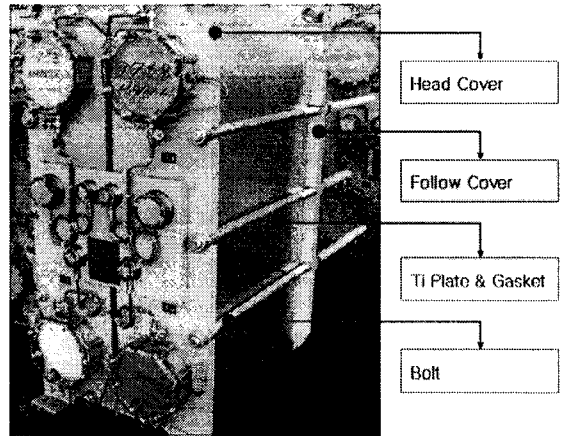


Fig. 1 The plate type heat exchanger and its components

게 사용하고 있음을 의미하며, 따라서 작업자의 생산능률 저하 및 제조원가 상승의 원인이 된다.

이에 본 연구에서는 진동 등 외적 요인에 대한 볼트체결체의 동특성 파악이나 풀림방지방법의 개발에 목적을 둔 기존의 연구^{6,7}와는 달리, 선박용 판형 열교환기의 볼트체결공정을 분석하고, 볼트 체결 시 발생할 수 있는 볼트의 풀림현상을 방지하기 위한 이론식 유도과 이를 검증하기 위한 유한요소해석을 수행하였다. 또한 제조원가 절감을 위해 열교환기 내부 작동유체의 압력을 고려하여 볼트의 수량최소화기법을 확립하고자 한다.

2. 이론해석

2.1 볼트의 풀림

2.1.1 피체결체가 탄성거동 할 경우

볼트체결체는 체결에 의하여 볼트의 축부에 발생한 인장력과 피체결체에 발생한 압축력에 의하여 일체화되어 있다.⁸ 이들 힘은 볼트체결에 의해 외력이 작용하지 않을 때는 서로 평형을 이루며, 이 평형상태에서의 인장력(또는 압축력)을 예장력(preload)이라 정의한다.

볼트의 체결 시 볼트체결체에 발생하여 유지되어야 할 예장력이 기계의 사용 중 진동 등의 외적 요인에 의해 저하되는 일이 종종 발생한다. 이러한 예장력 저하는 볼트 축부의 인장력과 피체결체의 압축력 사이의 평형을 깨트려 볼트가 풀리는 현상이 발생한다. 풀림이 있으면 체결체의 강성저하는 물론 기밀성의 저하에 따른 작동유체의 누출,

경우에 따라서는 피로 등에 의한 볼트의 파괴가 발생하기도 한다.

볼트 체결 시 발생하는 하중과 변형량의 관계는 Fig. 2 와 같이 도식화⁹ 할 수 있으며, Fig. 2로부터 정적 인장력을 아래와 같이 유도할 수 있다. 이때 볼트의 작용력은 식 (1)에 의해 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$Q = P_0 + P_1 = P + P_3 \quad (1)$$

$$P_3 = P_0 - P_2 \quad (2)$$

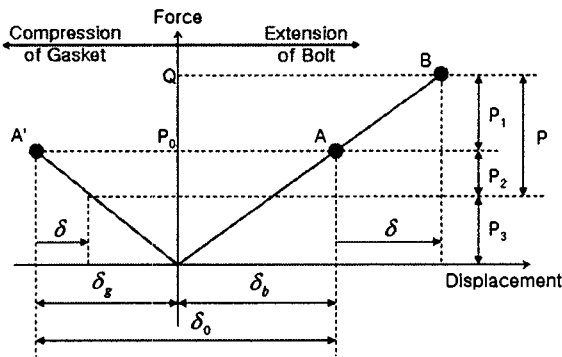


Fig. 2 Relationship between an applied force and the displacements of gasket and bolt during an elastic deformation

개스킷의 작용력은 식 (2)에 의하여 계산할 수 있으므로, 볼트의 작용력과 변형량을 식 (3), 개스킷의 작용력과 변형량의 관계를 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{Q}{P_0} = \frac{\delta_b + \delta}{P_0}, \quad \delta = \frac{\delta_b}{P_0}(Q - P_0) \quad (3)$$

$$\frac{P_3}{P_0} = \frac{\delta_g - \delta}{\delta_g}, \quad P_3 = P_0 \left(\frac{\delta_g - \delta}{\delta_g} \right) \quad (4)$$

그리고, 식 (3)과 식 (4)로부터 볼트의 체결력을 구할 수 있으며, 그 결과는 식 (5)와 같다.

$$Q = P_0 + P \left(\frac{\delta_g}{\delta_b + \delta_g} \right) \quad (5)$$

2.1.2 피체결체가 소성거동 할 경우

일반적인 볼트의 체결은 식 (5)를 이용하여 계

산할 수 있으나, 볼트 체결을 위한 토크가 일정한 값을 초과하면 피체결체가 소성변형 할 수 있다. 특히 판형 열교환기와 같이 피체결체 중에 개스킷과 같이 소성변형을 일으키기 쉬운 부품이 있을 경우에 이러한 문제는 더욱 중요하다. 이때 개스킷의 압축에 의한 복원력은 압축력으로 바뀌고, 이를 도식적으로 표현하여 Fig. 3 에 나타내었다.

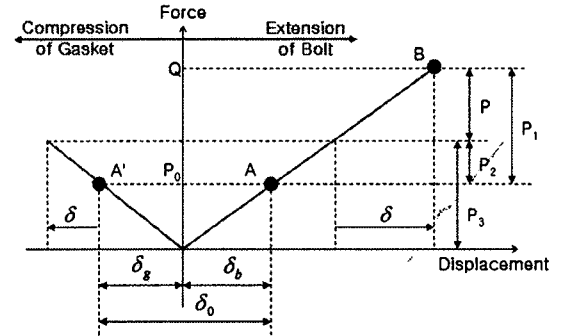


Fig. 3 Relationship between an applied force and the displacements of gasket and bolt during a plastic deformation

식 (2)는 Fig. 3 의 관계에 의해 식 (6)과 같이 바뀌고, 이를 대입하여 전개하면 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$P_3 = P_0 + P_2 \quad (6)$$

$$Q = P_0 - P \left(\frac{\delta_g}{\delta_b + \delta_g} \right) \quad (7)$$

볼트 조임력이 과대할 경우, 피체결체는 탄성 복원력을 잃고 소성변형을 하게되며 볼트의 작용력은 초기체결력보다 작아진다. 따라서 조임력의 크기에 따라 볼트 조립 시 풀림 현상이 발생함을 식 (7)로부터 알 수 있다.

2.2 볼트수량의 최소화

티타늄으로 제작된 냉각판에는 작동유체의 냉각효율을 극대화하기 위하여 Fig. 4와 같은 적당한 반경을 가지는 반원형 유로가 성형되어 있다. 유로 내부로 작동유체가 흐를 경우, 식 (8)이 성립하므로, 작동유체에 의한 수직압력은 식 (9)과 같이 표현할 수 있으며, 이를 하중으로 표현하면 식 (10)을 얻을 수 있다.

$$A_r : A_f = p_r : p_f \quad (8)$$

$$p_f = \frac{\left(\frac{1}{4}\pi r^2\right)}{(r \times r)} \times (p \times r) = \frac{\pi}{4} pr \quad (9)$$

$$F_f = 2p_f \times L = \frac{\pi}{2} prL \quad (10)$$

또한 볼트와 너트의 나사산을 Fig. 5 와 같이 표현할 수 있으므로, 볼트와 너트 하나의 임계하중을 식 (11)과 같이 얻을 수 있으며, n 개의 나사산에 대한 임계전단하중을 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$P_{cr} = n \times (2\pi r_p \times w) \times \tau \quad (11)$$

$$F_{cr} = N \times P_{cr} = 2\pi r_p wnN\tau \quad (12)$$

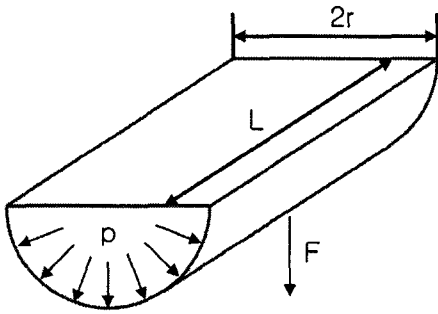


Fig. 4 The shape of the cooling plate

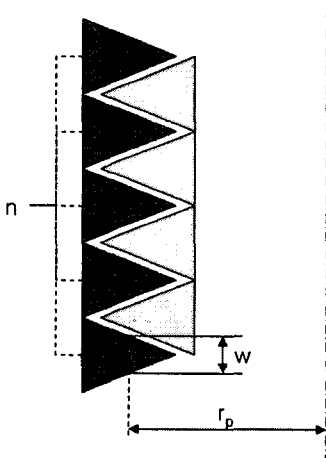


Fig. 5 A schematic diagram of bolt/nut thread

볼트가 안전하기 위해서는 n 개의 나사산의 임계전단하중이 작동유체에 의해 발생하는 유로의

수직하중에 비해 커야 하므로 식 (13)을 만족해야 하고, 이를 정리하면 식 (14)를 유도할 수 있다. 따라서 선박용 판형 열교환기의 체결을 위한 볼트의 수량은 식 (14) 우변의 값을 초과하는 최소의 짝수 정수로 결정하는 것이 타당하다.

$$F_{cr} > F_f \quad (13)$$

$$N > \frac{prL}{4r_p wn\tau} \quad (14)$$

3. 열교환기용 볼트의 유한요소해석

볼트 체결 시 발생하는 풀림현상에 대한 원인을 2.1 절과 2.2 절을 통해 알 수 있었으며, 이를 검증하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다.

냉각판의 볼트 체결작업에 대한 유한요소해석의 수행을 통해 판형 열교환기에 발생하는 응력 및 변위분포를 예측하고, 볼트풀림 현상에 대한 불량방지대책을 수립하고자 하였다. 해석에 사용된 프로그램은 DEFORM 3D ver. 5.0¹⁰이다.

3.1 유한요소해석을 위한 3D 모델링

냉각판을 구성하는 요소는 상하부 커버, 냉각판, 개스킷 및 볼트로 구성되어 있으며, 각각의 형상을 단순화하여 아래 그림과 같이 유한요소해석을 위한 3D 모델을 정립하였고, 이를 Fig. 6 에 나타내었다.

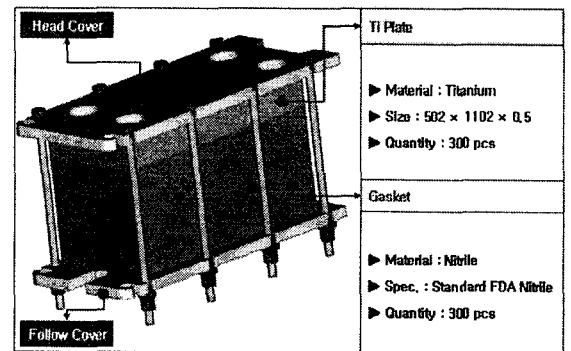


Fig. 6 3D model of the heat exchanger for FE analysis

냉각판의 역할을 수행하는 티타늄 플레이트는 개스킷과 번갈아 적층하여 상하부 커버 사이에 삽입되지만, 각 300 여장 이상의 플레이트와 개스킷

을 실제와 같이 모델링하면 요소망을 구성하고 접촉문제를 풀기 위한 시간이 과도하게 소요된다. 따라서 본 연구에서는 플레이트와 개스킷을 구분하여 적층함으로써 요소망 생성을 용이하게 하고, 두 부품 사이의 접촉면을 1 개로 가정함으로써 해석에 필요한 시간을 획기적으로 단축시켰다.

3.2 공정분할 및 경계조건

선박용 판형 열교환기는 8 ~ 18 개의 볼트를 이용하여 조립된다. 널리 알려진 바와 같이 다수의 볼트는 체결 순서가 매우 중요하며, 본 연구의 대상인 열교환기(Model S41)의 볼트 체결순서는 Fig. 7 과 같다.

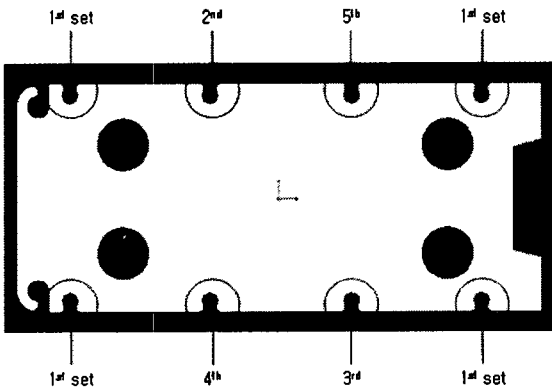


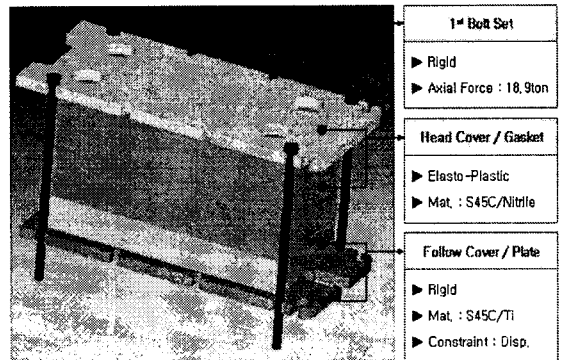
Fig. 7 Tightening order in the model S41

유압을 이용한 체결장비로 모서리의 볼트 네 개를 동시에 체결하고, 이후 순차적으로 토크렌치를 이용한 수작업을 통해 나머지 볼트를 하나씩 체결한다.

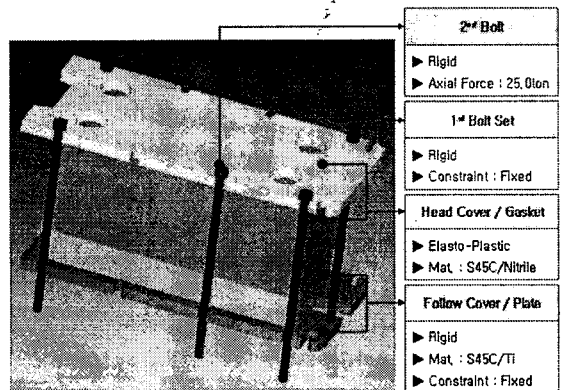
이러한 일련의 과정을 원활한 유한요소해석을 위해 위하여 크게 두 공정으로 분할하였다. 첫 번째 공정은 Fig. 7 의 1st set 을 체결하는 과정이고, 두 번째 공정은 2nd 를 체결하는 과정이다. 3~5th 는 해석상 2nd 와 동일한 결과를 보일 것으로 예상되므로 유한요소해석은 2nd 를 체결하는 과정까지로 한정하였으며, 분할된 두 공정을 Fig. 8 에 나타내었다.

볼트는 강체로 가정하였으며 설계규격을 참조하여 하중구속을 각각 18.9 ton 과 25.0 ton 으로 설정하였다. 상부 커버와 개스킷은 탄소성체로 가정하였고, 실소재인 S45C 와 Nitrile 의 물성치를 적용하였다. 하부 커버와 냉각판 역시 강체로 가정하였

으며 하부 커버에 변위구속을 주어 볼트에 의한 상부커버, 개스킷, 냉각판의 변형 및 응력상태를 파악하고자 하였다.



(a) Process 1(1st bolt set)



(b) Process 2(2nd bolt)

Fig. 8 Process division and boundary conditions for FE analysis

3.3 유한요소해석 결과

공정 I 에 대한 유한요소해석결과를 Fig. 9 와 10 에 나타내었다. 상부 커버와 볼트 체결부위에만 응력이 집중적으로 발생하였으며, 주어진 하중조건에서 헤드커버의 탄성변형량은 거의 없는 반면에 개스킷의 총 압축량은 약 4 mm 로 나타났다.

공정 II 에 대한 해석결과를 Fig. 11 과 12 에 나타내었다. 2 차 볼트 체결 시, 체결부위 및 1 차 볼트 체결부위에 응력이 집중적으로 분포하는 것을 알 수 있으며, 체결력은 더 커지나 응력은 더 낮고 넓은 영역에서 발생함을 알 수 있다.

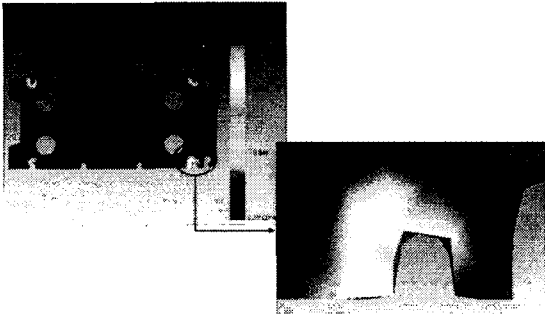


Fig. 9 Stress distributions on the head cover in the process 1 (Unit : N)

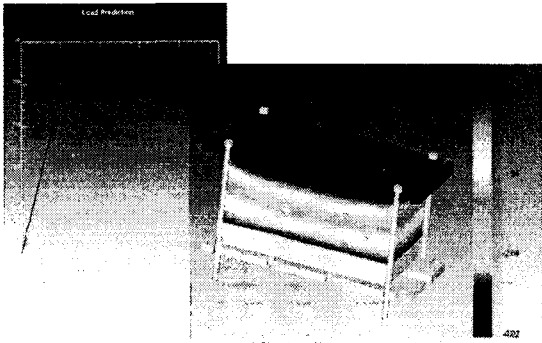


Fig. 10 Displacement of the head cover and the gasket in the process 1 (Unit : mm)

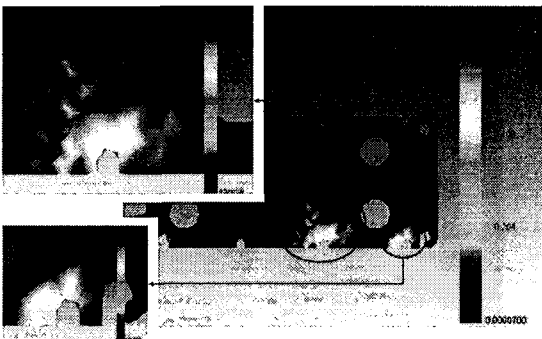


Fig. 11 Stress distributions on the head cover in the process 2 (Unit : N)

이러한 결과는 식 (4)와 (7)에서 제시한 초기 체결력의 크기와 관련이 있으며, 2차 볼트 체결에 의해 개스킷이 소성변형하여 압축되고, 2차 볼트에서 가장 가까운 1차 볼트에 그 영향이 전달되어 볼트

가 풀린다는 것을 알 수 있다. 이는 최초로 체결된 볼트에 기존 외력 또는 진동에 의한 볼트풀림과 더불어 중요한 설계인자임을 알 수 있다.

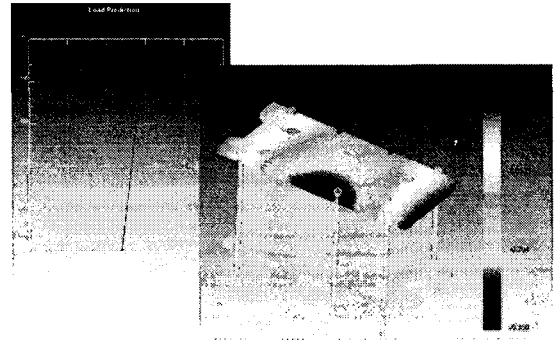


Fig. 12 Displacement of the head cover in the process 2 (Unit : mm)

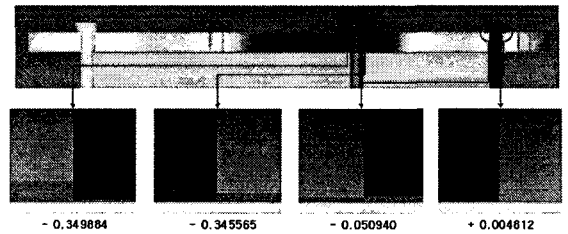


Fig. 13 Comparison of the amount of elastic deformation according to the fastening locations (Unit : mm)

Table 1 Comparison of elastic displacements on some principal bolting locations (Unit : mm)

	2 nd bolt		1 st bolt	
	left	right	left	right
Displacement	-0.350	-0.346	-0.051	0.005

2차 볼트 체결부위에서 체결방향으로 0.356 mm의 변형량이 발생하며, 2차 볼트 체결 후 주요 지점의 변형양상을 Fig. 13에, 그 변형량을 Table 1에 나타내었다. 또한 냉각판의 탄성변형량을 벡터 표현으로 표시한 Fig. 14로부터 변형양상을 잘 알 수 있으며, 이러한 결과들은 유도된 이론식과 잘 일치함을 알 수 있다.

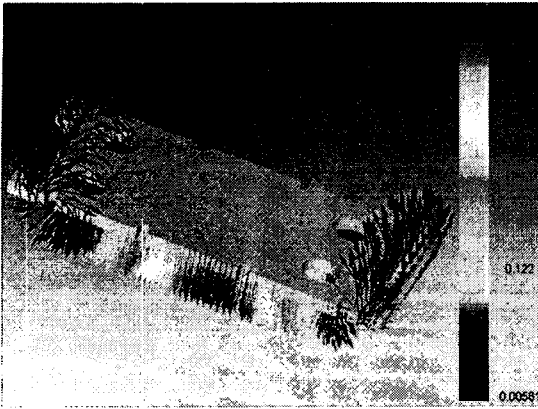


Fig. 14 Vector expression of the elastic deformation in the process 2 (Unit : mm)

위의 결과로부터 2 차 볼트 체결로 인해 상부 커버의 끝부분은 역변위가 발생하고, 이로 인하여 2 차 볼트의 체결 시 1 차 볼트의 풀림현상이 일어남을 알 수 있다. 따라서 2 차 볼트의 체결 시 1 차 볼트 체결력을 기준으로 2 차 볼트의 체결력을 결정하여야 하며, 2 차 볼트의 체결력을 과대하게 설정할 경우 볼트의 풀림현상이 발생할 것으로 사료된다.

4. Bolt 수량 최소화 기법

볼트수량의 최소화를 위하여 열교환기의 설계 사양을 식 (12)에 적용한 결과를 Fig. 14 에 나타내었으며, 이에 적용된 모델은 현재 8 개의 M32 볼트를 적용하고 있는 S41 로, 실제 계산결과 6 개의 M32를 적용하는 것이 타당하다는 결론을 얻었다.

또한 Fig. 15 의 시트를 현재 제작중인 8 종의 모델에 적용하여 그 결과를 정리한 것을 Table 2 에 나타내었으며, 대부분의 모델이 매우 안전하게 설

	Values	Units	Remark
p	8	kgf/cm ²	Test pressure
A	1,079.125	mm ²	Area applied the test pressure(half of the area of head cover)
r _p	18	mm	Distance between applied force and ventia of nut
w	2	mm	Thickness at the r _p
n	12	EA	The number of screw threads
σ	400	kgf/cm ²	Shearing yield strength of bolt
N	12.49	The minimum number of bolts needed	

Fig. 15 The excel sheet to calculate the minimum number of bolts used in the model S41

Table 2 Comparison of numbers of bolts used in the heat exchanger

Model	Applied Quantity (EA)	Calculated Quantity (EA)	Suggested Quantity (EA)
S41	8	5.20	6
S42	8	5.80	6
S62	10	6.65	8
S65	10	7.58	8
S81	14	10.19	12
S100	12	9.35	10
S121	16	12.49	14
S188	18	16.03	18

계되어 있음을 알 수 있다. 따라서 필요할 경우 표의 결과에 따라 볼트 수량을 줄여 원가절감을 이룰 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 선박용 판형 열교환기의 볼트 체결 시 발생하는 볼트의 풀림현상을 방지하기 위하여 볼트체결공정에 대한 분석을 수행하였으며, 작업자의 생산능률 향상 및 제조원가 절감을 위하여 볼트의 수량을 최소화하기 위한 기법을 개발하였다.

볼트의 체결공정분석을 위하여 이론식을 유도하고 이를 유한요소해석을 통해 검증하였다. 냉각판을 1 차 볼트 체결한 후 1 차 체결시보다 더 높은 체결력으로 2 차 볼트를 체결할 경우 발생하는 풀림현상에 대한 이론적 계산결과는 유한요소해석을 통하여 검증되었으며, 이는 앞으로 현장에서 순차적인 볼트체결작업을 수행할 때 유용한 자료가 될 것이다. 이로 인하여 냉각판과 같이 일체 거동을 할 수 있도록 순차적인 볼트체결을 수행할 때 발생하는 잦은 풀림발생을 방지할 수 있다. 또한 본 연구를 통해 안전성을 확보하면서 원가를 절감할 수 있는 볼트 수량 결정 기법을 통해 설계자의 시행착오를 최소화하여 제품의 생산능률을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 2007년도 부산대학교 자유과제 학술연구비 지원에 의한 결과이며, 동 대학의 지원에 감사 드립니다.

Automotive Engineers Autumn Conference, pp. 1485-1490, 2005.

참고문헌

1. Song, J. B., Bae, W. B., Cho, Y. J., Hwang, S. M. and Cho, Y. H., "Mechanical Design," Inter Vision, pp. 395-437, 2007.
2. Mok, H. S., Moon, K. S. and Kim, H. J., "Evaluation system for the correlation coefficient of the assemblability and assembly cost of products in bolting," J. of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 15, No. 5, pp. 72-84, 1998.
3. Yoo, S. Y., Chung, M. H., Kim, K. H. and Lee, J. M., "An experimental study on the performance of plastic plate heat exchanger," J. of the Society Air-conditioner and Refrigerating Engineers of Korea, Vol. 17, No. 2, pp. 117-124, 2005.
4. Hong, J. P., "Mechanical Design - Theory and Practice," Book's Hill, pp. 205-277, 2005.
5. Yoon, J. C., Kang, B. S. and Kim, J., "A study on finite element modeling of the structure with bolted joints," J. of the Korea Society for Precision Engineering, Vol. 20, No. 8, pp. 205-212, 2003.
6. Ding, K. and Dhanasekar, M., "Flexural behaviour of bonded-bolted butt joints due to bolt looseness," Advances in Engineering Software, Vol. 38, Issues 8-9, pp. 598-606, 2007.
7. Jung, Y. D., Bahk, S. M. and Park, M. K., "A dynamic analysis of bolted joints under various conditions," Proceeding of the Korea Society for Precision Engineering Spring Conference, pp. 774-777, 2002.
8. Jeong, S. M., Kim, H. K., Yang, S. M., Sim, J. K., Han, K. Y., Lee, C. N. and Ji, C. H., "Mechanical Design - a New Edition," Auto Tech, pp. 18-68, 2003.
9. Sin, S. Y., Sin, K. H. and Kim, Y. C., "Screw Technologies," Munundang, pp. 209-244, 1995.
10. Scientific Forming Technologies Corp., "DEFORM™ -3D User Manual," Scientific Forming Technologies Corp., 1999.
11. Cho, J. H., Kang, O. S. and Kim, D. S., "Structural analysis of clearance effects on system with bolted joint," Proceeding of the Korea Society of