

## T형 편면용접이음재의 응력해석과 굽힘피로강도에 관한 연구

강성원\* · 이태훈\*\* · 전재목\*\*\* · 김충희\*\*\*\*  
(99년 2월 22일 접수)

### A Study on Stress Analysis and Bending Fatigue Strength of One Side Fillet Welded T-joint

S. W. Kang\* · T. H. Lee\*\* · J. M. Choun\*\*\* · C. H. Kim\*\*\*\*

**Key Words** : One Side Fillet Welded T-joint(T형 편면용접이음재), Stress Analysis(응력 해석), Bending Fatigue Strength(굽힘피로강도), Optimum Weld Joint Design(최적용접이음 설계)

#### Abstract

In this study, one side fillet welded T-joint, used in box type girder and other welding structure, was investigated by stress analysis and bending fatigue test without edge preparation, with variation of joint shape.

The purpose of this study is to give the welding condition and design standard on manufacturing one side fillet welded T-joint.

As a result, the following conclusions were obtained.

1) In one side fillet welded T-joint, the larger the leg length and the penetration depth, the greater the bending fatigue strength because reduction of stress and strain on toe and root. The increase of the longitudinal leg length rather than vertical leg length contributed to the increase in bending fatigue strength.

2) In one side fillet welded T-joint without edge preparation, both general manual welding and general automatic welding were carried out with same condition. In this case, automatic welding showed deeper penetration and more increased longitudinal leg length than manual welding, so that automatic welding offers greater bending fatigue strength.

3) For one side fillet welded T-joint without edge preparation with automatic welding, the ratio( $h/t$ ) of the leg length( $h$ ) and the main plate thickness( $t$ ) in which toe crack can occur was 1.0 over.

\* 종신회원, 부산대학교 공과대학 조선해양공학과, 기계기술연구소 연구원

\*\* 부산대학교 공과대학 조선해양공학과 대학원

\*\*\* 부산기능대학 산학협력과

\*\*\*\* 한국선급 울산지부

## 1. 서 론

대부분의 강구조물들은 리벳접합, 나사결합 및 용접으로 이루어 지고 있으며, 이들 구조물 접합 방법중 작업공정 및 강도면에서 우수한 용접이 그 활용도가 점점 높아지고 있다<sup>1)</sup>. 그러나 용접부에는 용접 또는 용접후 열처리시 발생하는 고온균열, 재열균열 및 시효경화균열, 액상금속 취화, 슬래그 혼입, 용융부족, 용입부족, 언더컷, 기공등 여러 형태의 결함이 존재하고<sup>2)</sup>, 이들 결함들로부터 균열이 발생 전파되어 최종파단에 이르게 되는 경우가 많다<sup>3)</sup>.

선박, 해양구조물등은 여러 가지 용접이음형식과 하중조건을 갖는 용접이음부재로서 구성되어 있고, 그 중 T형 편면용접이음은 구조물에서 양면용접이 어려운 부위나 박스형 거더 그리고 기타용접구조물에 채용되고 있는 용접이음의 한 형태이다<sup>4, 5)</sup>.

근래에 용접자동화가 이루어지면서 T형 편면용접이음재 제작시 기존의 흠가공을 적용하면 흠가공의 정확도 문제로 용락현상이 발생되며, 이로 인해 자동용접 중간에 작업이 중지되는 문제가 생긴다. 또 용락과 같은 결함은 보수가 완벽하지 못해 실제작업환경에서 많은 문제를 일으킬 수 있다.

따라서 흠가공 공정을 생략할 경우 이러한 문제의 해결이 가능하나 이음부의 강도에 대한 새로운 평가가 있어야 한다.

최근 용접이음부의 피로강도에 대한 많은 연구가 행해지고 있지만, T형 편면용접이음재의 응력분포와 피로강도, 그 중에서도 굽힘피로강도에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 용입부족부를 갖는 T형 편면용접이음재는 피로하중을 받게되면 toe부 또는 root부에서 파단한다.

그러나 root부에서 발생, 전파하는 피로균열은 발견 및 보수가 곤란하므로 T형 편면용접이음재를 제작할 경우에는 시공면이나 경제적으로 유리한 용입부족부를 갖는 필릿용접이음형식으로 시공하여 파괴가 root부에서 발생하지 않고 toe부에서 발생하도록 하는 leg length 및 필릿형상을 결정하는 것이 경제적으로 유리할 것이다<sup>6, 7)</sup>.

이에 본 연구에서는 흠가공 공정을 생략한 T형 편면용접이음재의 용접이음형상에 따른 응력해석과, 굽힘피로시험을 실시하여 T형 편면용접이음재 제작시 용접시공조건과 설계기준을 제공하고자 한다.

## 2. T형 용접이음부의 FEM 해석

### 2.1 F.E.M. 모델 및 해석조건

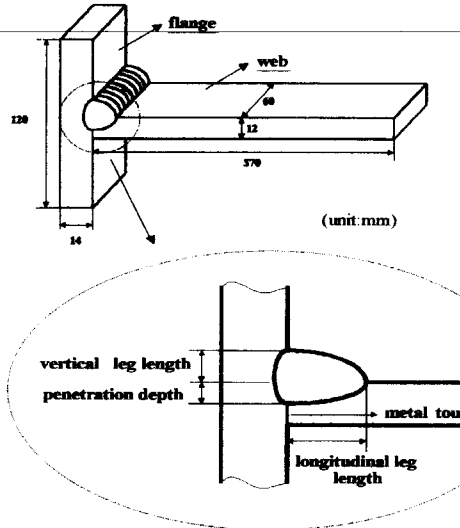


Fig. 1 Shape and dimension of F. E. M. model

T형 편면용접이음재의 toe부 및 root부의 응력상태를 조사하기 위해 범용해석프로그램인 ANSYS를 이용하여 응력해석을 수행하였다.

해석모델의 전체적 형상과 치수는 Fig. 1과 같다. T형 편면용접이음재 제작시 용접조건에 따라 vertical-longitudinal leg length와 용입깊이가 달라지게 된다.

본 해석에서는 vertical-longitudinal leg length와 용입깊이를 변수로 하여 vertical-longitudinal leg length는 8, 12, 16mm, 용입깊이는 0, 4, 8, 12mm일 경우에 대하여 응력해석을 수행하였다.

용접부의 mechanical property는 모재보다 강하거나 동등하다고 알려져 있다. 본 연구에서는 용접부와 모재의 mechanical property는 동일하다고 가정 후 해석하였다.

해석모델의 전체적 요소분할은 Fig. 2, 필릿부는 Fig. 3과 같이 하였다. toe부와 root부는 (1/16)t로 mesh를 작게 하여 응력집중의 효과가 나타나도록 하였고 나머지 부분은 (1/5)t로 auto-mesh하였다.

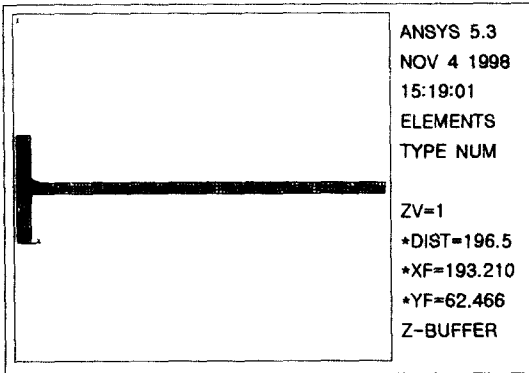


Fig. 2 F. E. M model

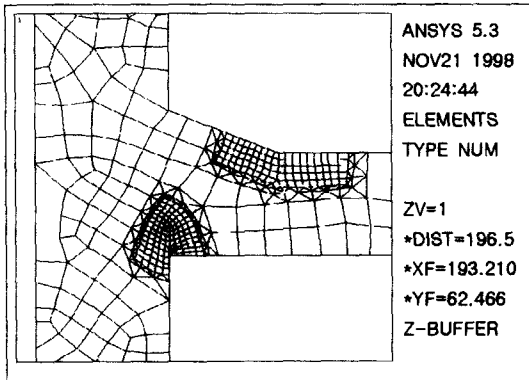


Fig. 3 F. E. M model on fillet vicinity

자유단의 변위는 3, 6, 9, 12, 15mm를 가하여 각각의 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 본 해석모델의 경우 (-)변위, 즉 root부에 압축응력이 작용할 때에 경계면 교차문제<sup>8)</sup>가 발생하지 않았기 때문에 (-)변위일 때와 (+)변위일 때의 해석치가 근사하여 (+)변위의 경우만 해석하였다. 그리고 변위가 큰 경우 toe부 및 root부에 작용하는 응력이 항복응력 이상이므로 Newton Raphson법을 이용하여 비선형 탄소성해석을 수행하였다<sup>9)</sup>.

## 2.2 응력해석결과

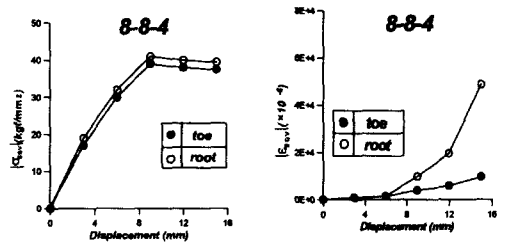
응력해석결과는 vertical-longitudinal leg length가 정해졌을 때 용입깊이의 증가에 대해 toe부와 root부 중 어디에 더 큰  $\sigma_{eqv}$ 와  $\epsilon_{eqv}$ 가 작용하는지를 Table 1에 나타내었고<sup>10, 11)</sup> 그 중에서도 대표적인 두가지 경우, 첫 번째는 용입깊이가 0, 4 mm일 때 root부에 더 큰  $\sigma_{eqv}$ 와  $\epsilon_{eqv}$ 가 작용하는 경우,

두 번째는 용입깊이가 0 mm일때만 root부에 더 큰  $\sigma_{eqv}$ 와  $\epsilon_{eqv}$ 가 작용하는 경우중에서  $\sigma_{eqv}$ 와  $\epsilon_{eqv}$ 가 더 크게 작용하는 부위가 바뀌게 되는 용입깊이만 Fig. 4, 5에 나타내었다.

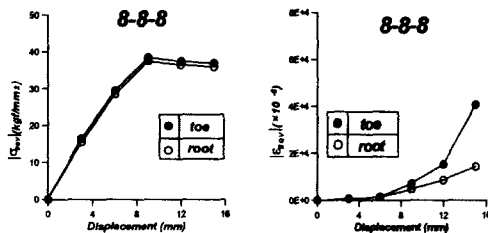
유한요소법에 의한 응력해석결과, 용입깊이가 0mm일 때는 모든 leg length에서 root부에 더 큰 응력과 변형률이 작용하여 root파괴가 예상되었다.

Table 1 Result of FEM analysis

| vertical-longitudinal leg length (mm) | penetration depth (mm) | position of higher $\sigma_{eqv}$ , $\epsilon_{eqv}$ |
|---------------------------------------|------------------------|--|
| 8-8                                   | 0                      | root   |
| 8-12                                  | 4                      |  |
| 8-16                                  | 8                      |  |
| 12-8                                  | 12                     | toe  |
| 16-8                                  | 12                     |  |
| 12-12                                 | 0                      | root   |
| 12-16                                 | 4                      |  |
| 16-12                                 | 8                      |  |
| 16-16                                 | 12                     | toe  |
|                                       |                        |  |



(a) penetration depth = 4 mm



(b) penetration depth = 8 mm

Fig. 4 | $\sigma_{EQV}$ | & | $\epsilon_{EQV}$ | distribution on toe & root (vertical-longitudinal leg length = 8-8 mm)

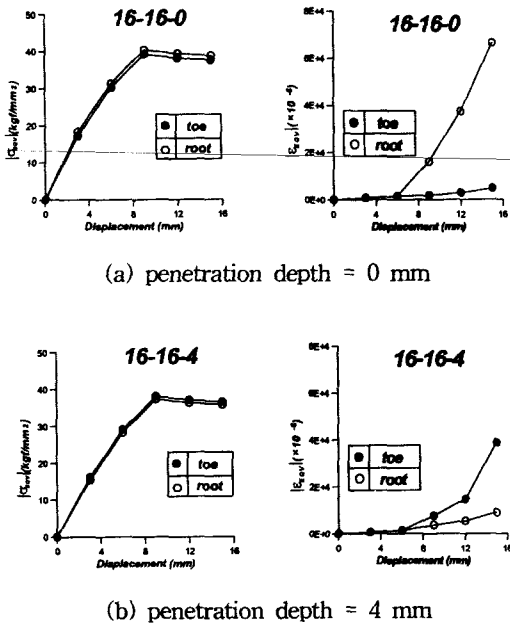


Fig. 5  $|\sigma_{EQV}|$  &  $|\epsilon_{EQV}|$  distribution on toe & root  
(vertical-longitudinal leg length = 16-16 mm)

그러나 용입깊이가 4mm인 경우는 vertical - longitudinal leg length(h)와 주판두께(t)의 비 h/t가 1.0이상인 경우는 toe부에 더 큰 응력과 변형률이 작용하였다. 용입깊이가 8, 12mm인 경우는 해석한 모든 leg length에서 toe부에 더 큰 응력과 스트레인이 작용하였다.

즉 vertical-longitudinal leg length중 어느 하나라도 h/t가 1.0이하인 경우는 용입깊이가 0, 4mm일 때는 root부에 더 큰 응력과 스트레인이 작용하였고, 용입깊이가 8, 12mm일 때는 toe부에 더 크게 작용하였다. 그러나 h/t가 1.0이상인 경우는 용입깊이가 0mm일 때만 root부에 더 큰 응력과 스트레인이 작용하였다.

### 3. 굽힘피로시험

#### 3.1 시험편 형상 및 시험방법

본 연구에서는 응력해석의 정확도를 검증하기 위해 응력해석모델과 동일한 시험편을 제작하여

굽힘피로시험을 수행하였다.

시험편은 SM 490A강을 사용해 Fig. 1처럼 두께가 14mm인 판에 12mm판을 T형으로 배치하여 용가공 공정을 생략한 후, leg length가 달라지도록 용접패스나 용접법을 달리하여 5가지 타입의 시험편을 제작하였다.

A타입은 1pass 자동용접, B 타입은 1pass 수동 용접, C, D, E 타입은 각 2, 3, 4pass로 자동 용접해 leg length가 증가되도록 하였다.

1pass일 경우, 각변형은 거의 없었으나 1pass이상일 경우 각변형이 예상되어 가용점을 다수 실시하고 web재를 구속하여 용접함으로서 각변형을 억제시켰다. 제작한 이음재를 정반 위에 올려놓고 끝단을 다이알게이지로 확인하여 보았으나 각변형량은 0.5mm이하였다.

이와 같이 제작한 시험편의 필릿부분을 마크로 부식한 후 광학현미경으로 관찰하여 각 시험편 타입에 따른 용접부의 vertical-longitudinal leg length와 용입깊이를 조사해 그 평균치를 계산하여 Table 2에 나타내었다. 사용강재의 기계적 성질과 화학조성은 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

Table 2 Dimension of weld zone depend on specimen type

| dimension type | vertical leg length (mm) | longitudinal leg length (mm) | penetration depth (mm) |
|----------------|--------------------------|------------------------------|------------------------|
| A              | 9                        | 10                           | 6                      |
| B              | 13                       | 8                            | 2                      |
| C              | 10                       | 11                           | 4                      |
| D              | 13                       | 14                           | 4                      |
| E              | 14                       | 17                           | 4                      |

Table 3 Mechanical properties of plate (SM 490A)

| rolling direction | tensile Test                 |                              |         |
|-------------------|------------------------------|------------------------------|---------|
|                   | Y. P. (kgf/mm <sup>2</sup> ) | T. S. (kgf/mm <sup>2</sup> ) | EL. (%) |
| L                 | 39.8                         | 54.6                         | 25      |
| C                 | 39.5                         | 54.1                         | 23      |

Table 4 Chemical composition of plate (SM 490A)

| chemical composition (wt.%) |      |      |       |       |      |
|-----------------------------|------|------|-------|-------|------|
| C                           | Si   | Mn   | P     | S     | Nb   |
| 0.13                        | 0.41 | 1.12 | 0.016 | 0.012 | 0.03 |

본 연구에 사용한 피로시험기는 용량 70kgf 일정한 굽힘피로시험기이며 시험편 자유단의 변위제어에 의하여 시험부의 응력을 제어하도록 한 시험기이다. 피로시험방법은 자유단의 변위제어 피로시험법을 채용하였으며 피로시험시 피로하중의 파형은 정현파를 채용하였다. 그리고 하중반복속도는 6-10 Hz에서 시험하중의 크기에 따라 변화시켰으며 응력비 R=-1로 완전양진상태가 되도록 하였다.

본 연구에서 피로수명은 시험편이 완전히 파단한 하중반복수로 정의하였고, 시험편의 파단수명이 길 경우는  $3 \times 10^6$ 회의 반복수에서 피로시험을 중지하였다. 스트레인 게이지를 flange와 web의 접촉면에서 123mm 떨어진 지점, 즉 web의 1/3되는 지점의 상하면에 부착하여, 시험편이 완전양진상태로 체결되었는지를 확인하였다. Fig. 6은 본 연구에 채용한 굽힘피로시험 시스템이다.

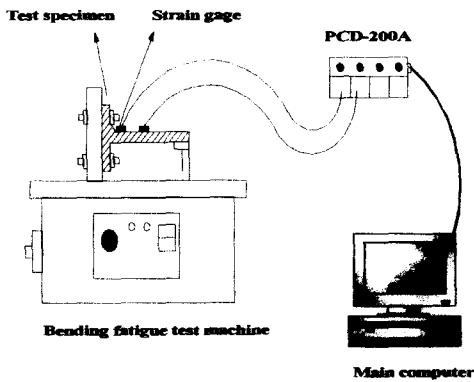


Fig. 6 Bending fatigue test system

### 3.2 굽힘피로시험 결과

굽힘피로시험 결과, A, C 타입은 toe부에 더 큰 응력과 변형률이 작용하기 위한 leg length 이하로

제작되어 root파괴가 일어났으며, B 타입은 vertical leg length는 만족하나, 용입깊이가 적어 root파괴가 발생하였다. D, E 타입은 toe파괴를 일으키기 위한 vertical-longitudinal leg length를 만족하도록 제작되어 toe파괴가 발생하였다.

이와 같은 굽힘피로시험 결과를 web의 1/3 지점에 작용하는 응력과 파단수명과의 관계로 Fig. 7에 나타내었다. 그리고 피로시험결과를 최소자승법으로 직선회귀하여  $\Delta S$ 와  $N_f$ 와의 관계식을 얻었다.

| specimen type | symbol | fracture type | regression equation                 |
|---------------|--------|---------------|-------------------------------------|
| A type        | □      | root          | $\Delta S = 665.61 N_f^{-0.274198}$ |
| B type        | △      | root          | $\Delta S = 630.49 N_f^{-0.276457}$ |
| C type        | +      | root          | $\Delta S = 708.19 N_f^{-0.272651}$ |
| D type        | ☆      | toe           | $\Delta S = 883.03 N_f^{-0.285456}$ |
| E type        | ⊞      | toe           | $\Delta S = 877.32 N_f^{-0.278778}$ |

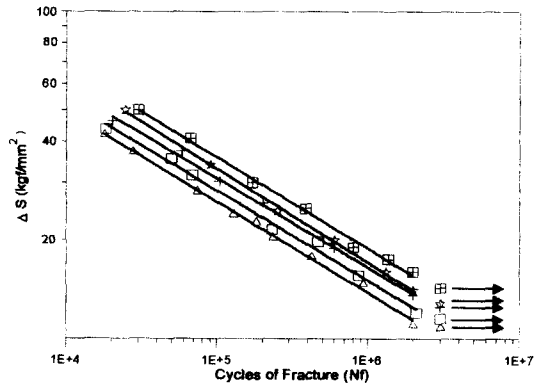


Fig. 7 Fatigue test result ( $\Delta S$ : stress from 1/3 web)

## 4. 고찰

홍가공 하지 않은 T형 편면용접이음에 대하여 응력해석과 굽힘피로시험을 실시하였는데 응력해석결과 동일한 leg length에서는 용입깊이가 증가함에 따라 작용응력과 변형률도 감소하고 root부보다는 toe부에 더 큰 응력과 변형률이 작용하였다. 동일한 용입깊이에서는 leg length가 증가함에 따라 작용응력과 변형률이 감소하였고, 그리고 vertical leg length의 증가보다는 longitudinal leg length의 증

가가 작용응력과 변형률의 감소에 더 큰 기여를 하였다.

그리고 굽힘피로시험을 실시한 결과 A, B, C type의 모든 시험편은 root부에서 파단하였다. 이는 응력해석결과에서 나타나듯이 A, B, C type의 시험편이 필릿치수가 작아 toe부에 응력과 스트레인 집중이 적은 대신 root부에 응력과 스트레인 집중이 크게 되어 root부에서 균열이 발생, 전파하여 파단하였다.

T형 편면용접이음에서 홈가공하지 않고, 동일한 조건으로 일반적인 자동용접(A type)과 수동용접(B type)을 실시하면 자동용접이 수동용접에 비해 용입도 깊게 되고 longitudinal leg length도 증가하여 굽힘피로강도가 우수한 것으로 나타났다. D, E type의 모든 시험편은 toe부에서 파단하였다. D, E type의 경우는 응력해석결과에서 나타난 홈가공하지 않은 T형 편면용접이음이 toe파괴가 일어나기 위한 임계 leg length 이상으로 제작되어 root부보다 toe부에 더 큰 응력과 스트레인이 작용하게 되어 toe부에서 균열이 발생, 전파하여 모재에서 파단하였다.

피로시험을 수행한 결과 다리길이가 14×17mm인 E type가 모두 toe파괴가 발생하여 굽힘피로강도가 가장 높은 것으로 나타났고, 다리길이가 13×8mm인 B type에서는 모두 root파괴가 발생하여 가장 낮은 굽힘피로강도를 나타내었다.

이상을 정리하면, 홈가공하지 않은 T형 편면용접이음재에서는 용접 pass수를 증가시켜 leg length를 증가시키기에 따라 굽힘피로강도는 향상되었고, vertical leg length의 증가보다 longitudinal leg length를 증가시키는 것이 굽힘피로강도의 향상에 더 크게 기여하였다.

$\Delta S$ 와  $N_f$ 와의 관계식에서  $3 \times 10^6$ 회의 시간강도를 피로한도로 정의할 경우, A type은 11.15 kgf/mm<sup>2</sup>, B type은 10.21kgf/mm<sup>2</sup>, C type은 12.25 kgf/mm<sup>2</sup>, D type은 12.50 kgf/mm<sup>2</sup>, E type은 13.91 kgf/mm<sup>2</sup>이 각각의 경우의 피로한도가 된다.

## 5. 결 론

홈가공 공정을 생략한 T형 편면용접이음재의

leg length와 용입깊이를 변화시켜 응력해석과 굽힘피로시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) T형 편면용접이음에서는 leg length와 용입깊이가 증가함에 따라 toe부 및 root부의 작용응력이 감소하여 굽힘피로강도도 향상되었고, vertical leg length 보다는 longitudinal leg length의 증가가 굽힘피로강도의 향상에 더 크게 기여하였다.
- 2) 홈가공하지 않은 T형 편면용접이음에서 동일한 조건으로 일반적인 수동용접과 자동용접을 실시하면 자동용접이 수동에 비해 용입도 깊게 되고 longitudinal leg length도 증가하여 굽힘피로강도가 우수한 것으로 나타났다.
- 3) 홈가공하지 않고 자동용접을 실시한 T형 편면용접이음의 경우 toe파괴가 일어나기 위한 vertical- longitudinal leg length(h)와 주판두께(t)의 비 h/t는 응력해석결과 1.0이상 이었다.

## 후 기

본 연구는 부산대학교 기성희재원 학술연구조성비의 지원에 의한 연구이며 부산대학교 기성희에 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- 1) Cary, H. B., "Modern Welding Technology", Prentice Hall, Inc., p.11, 1979
- 2) 대한용접학회, "용접·접합 편람, 대한용접학회, p.27, 1998
- 3) 이용복 외, "교량 신축이음장치 용접부의 피로강도 해석", 대한용접학회지 제16권 제4호, pp.74, 1998
- 4) 강성원, 하우일, 신종석, 제정신, "필릿용접이음부의 응력집중계수에 관한 연구", 대한조선학회 논문집 제33권 제3호, pp.1-7, 1996
- 5) Connor, Leonard P., "Welding Handbook". Eight Edition, American Welding Society, Vol 1, pp.152-153, 1987

- 6) 강성원, 하우일, 신종석, 장태원, 제정신, "필릿 용접이음부의 피로파괴특성에 관한 연구", 대한조선학회 논문집, 제33권 제4호, pp. 133-141, 1996
- 7) 康聖原, 河佑逸, "용입不足部를 갖는 필릿熔接 이음부의 引張疲勞強度에 關한 研究", 釜山大學校 工科大學 研究報告 第29輯, pp.107-108, 1985
- 8) Kehnke, Peter, "ANSYS Elements References. Swanson Analysis System", pp.(4-77)-(4-365), 1993
- 9) Kehnke, Peter, "ANSYS Manual. Swanson Analysis System", pp.(2-11)-(2-13), 1993
- 10) Slater, R. A. C., "Engineering Plasticity", 清文閣, pp.82-83, 1997
- 11) Chen, W. F., D. J. Han, "Plasticity for Structural Engineers", Springer-Verlag New York Inc., pp.77-83, 1988