

등가하중법을 이용한 강구조물 용접변형 해석

박정웅* · 이재원** · 이해우**

* 조선대학교 토목공학과

** 삼성중공업(주) 조선플랜트연구소 용접도장연구파트

Analysis of Welding Deformation by Equivalent Load Method on Steel Structures

Park, Jeong Ung*, Lee, Jae Won** and Lee, Hae Woo**

* Department of Civil Engineering, Chosun University, Seosuk-Dong, 501-759, Gwangju

** Joining & Painting Technology, Samsung Heavy Industries Jangpyung-Ri, 656-710, Koje-City

Abstract

This study presents a new method to derive the constraint coefficient from the degree of angular deformation caused by welding, as measured experimentally by varying the shape of welded joints and the magnitude of constraints and from analysis results given by the elastic FEM method. The equivalent load was then calculated with this constraint coefficient. The validity of the numerical analysis involved in this new method was confirmed by its agreement with the experimental results. As for the effects of the constraints based on the shape of the welded joints in the case of Butt welding when the constraint coefficients are not considered, the deformed quantity produced by analysis is larger than that produced by experiment and consequently is largely affected by the constraints. However, in the case of Fillet welding, the deformed quantity is seldom affected regardless of constraint coefficient considerations.

(Received March 28, 2002)

Key Words: Angular deformation, Equivalent load, Constraint coefficients, Elastic FEM analysis

1. 서 론

강구조물 제작시 용접부 근방에서는 용접열원에 의해 급속가열·급속냉각의 열사이클을 받으며, 열원의 이동과 함께 온도장이 변화함으로써 용접부에 불균일한 온도분포가 생성된다¹⁾. 이러한 불균일한 온도분포에 의한 용접부 근방의 열팽창·수축을 용접부로 부터 떨어져 있는 저온상태의 부재가 이를 구속하여 결과적으로 용접변형과 잔류응력이 발생한다. 또한 그 크기는 용접조건과 내적·외적구속의 정도에 따라 다르게 나타난다. 용접변형, 잔류응력은 구조물의 제작시의 조립정도, 미관, 좌굴강도, 피로강도²⁾ 등에 악 영향을 미치는 요인이 되고 있다. 특히 교량과 같은 대형 강구조물 제작시 각 조립단계에서 발생한 용접변형³⁾이 구조물의 치수를 변화시켜 이를 수정하는데 많은 시간과 경비가 소요되어 생산성 저하의 원인이 되고 있다. 따라서 이러한 문

제점을 방지하기 위해 설계단계에서 경험 및 실측 data를 이용하여 용접에 의한 수축마진을 적용하고 있으나 용접방법, 용접재료 그리고 구조물 형상의 변화에 대해서는 대처하지 못하는 것이 현실이다.

최근 대형 강구조물의 용접변형에 관한 연구는 Nomoto 등⁴⁾, Murakawa 등⁵⁻⁷⁾ 그리고 Seo와 Jang 등⁸⁾에 의해 발표되고 있으며 이들은 기존 변형data 및 고유변형도법으로 부터 등가하중을 예측하여 FEM탄성 해석법을 이용하고 있다. Nomoto 등은 기존 Bead On Plate용접에 의한 변형 data로부터 등가하중을 계산하여 조립순서에 의한 용접변형을 예측하고자 하였으나 용접변형량에 미치는 구속도에 대한 영향을 고려하지 않아 정확한 변형량을 예측하기 어렵다. 한편 Murakawa 등은 고유변형도에 상응하는 잔류소성변형의 생성기구 및 분포를 밝힘과 함께 고유변형도의 주요 지배인자인 최고 도달온도와 구속도로부터 용접변형 및 잔류응력을 예측하고자 하였다. 그러나 구속도 계산에 있어서 단순

부재의 열탄소성 해석결과와 실험결과에 의존함으로써 복잡한 부재의 용접변형을 예측하는데 한계가 있다. 반면 Seo와 Jang은 Murakawa가 제시한 고유변형도법을 기초로 하며 외적구속에 대한 영향을 단위하중법을 이용한 탄성해석을 통해 용접변형을 예측하였다. 그러나 고유변형도 계산시 두께방향으로 분할된 단면에서 각 층을 하나의 봉으로 가정함으로써 고유변형도를 예측하는데 한계를 보였다. 이상과 같이 여러 연구결과로부터 기존의 방법을 이용하여 대형구조물의 용접변형을 예측하는 것은 현실적으로 어려움이 따르므로 새로운 용접변형 예측방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 실험을 통해 용접이음부의 형상 및 구속도의 크기 등을 변화시켜 측정된 용접 변형량과 FEM해석을 이용한 해석결과로부터 구속계수를 유도하고, 이를 고려한 등가하중(등가수축력과 등가모멘트)를 결정하는 새로운 방법을 제시했다. 이 방법을 이용하여 소형시험편의 변형량으로 부터 구조물의 크기 및 형상에 관계없이 대형구조물의 변형량을 예측할 수 있으며 이 방법의 유효성을 실험에 의해 검증하였다.

2. 용접부 역학적 모델링

자유 구속상태의 용접변형의 크기는 역학적 문제에 있어서 외력에 상당하는 온도분포의 크기에 의해 결정된다. 이러한 온도분포는 구조물이 임계크기 이상으로 되면 용접에 의해 발생하는 온도분포가 준정상상태를 이루어 발생하는 용접변형의 크기도 일정한 값을 갖는다. 따라서 실험에 의해 구한 용접변형량을 등가하중으로 치환하여 탄성 FEM해석으로 용접변형을 재현할 수 있다.

Fig. 1은 맞대기용접시 각변형을 유발시키는 등가하중을 적용한 Mechanical Model을 보여주고 있다. Fig.1(a)과 같이 모재, 용접금속 그리고 열영향부(HAZ)로 구성되어 있는 실제 용접부를 Fig.1(b)와 같이 열영향부의 양끝단에 등가하중을 적용하여 변형을 재현할 수 있다.

용접에 의한 횡수축에 관한 등가수축력과 횡수축량과

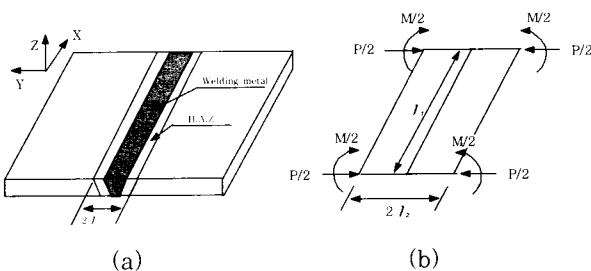


Fig. 1 Mechanical model of welding

의 관계를 식(1)에, 각변형에 대한 등가굽힘모멘트와 각변형량과의 관계⁴⁾는 식(2)에 보여주고 있다.

$$P = K_{\delta} \cdot \delta = E \cdot t \cdot \left(\frac{l_2}{l_1}\right) \cdot \delta \quad (1)$$

$$M = K_{\theta} \cdot \theta = \frac{E t^3}{12(1 - \nu^2)} \left(\frac{l_1}{l_2}\right) \cdot \theta \quad (2)$$

여기서 P: 등가수축력(N), K_{δ} : 용접부 수축강성(N.mm), δ : 수축량(mm), M: 등가굽힘모멘트(N·mm), K_{θ} : 용접부 굽힘강성(N·mm), θ : 각변형량 (radian), E: 영계수(N/mm²), t: 두께(mm)

이와 같이 자유상태의 구조물인 경우 실험에서 구한 변형량으로 부터 등가하중을 구해 용접에 의한 변형을 재현할 수 있다. 그러나 실제 구조물은 Table 1와 같이 다양한 인자가 용접 변형에 영향을 미친다. 자유상태의 경우 용접열과 야금학적 인자에 대해서는 충분히 고려되어 있으나 대형 용접구조물에 있어서 크기, 형상 및 용접순서에 따라 외적구속이 다양하게 변화하므로 이에 대한 고려가 필요하다. 따라서 실제 구조물의 용접변형을 예측시 외적구속에 따른 등가하중의 크기를 예측하는 방법이 요구되고 있다. 본 연구에서는 임의의 구속상태의 구속정도를 고려한 등가하중의 크기를 결정하는 방법을 실험과 탄성해석을 통해 유도하였다.

3. 구속계수 산출방법

여기서는 대형 구조물과 같이 다양한 구속상태가 용접변형에 미치는 영향을 구속계수로 유도하기 위해 실험과 탄성FEM해석을 수행하였다. 실험에서는 자유상태의 시험편에서 발생하는 변형량과 구속된 시험편에서 발생하는 변형량으로 부터 구속이 각변형에 미치는 영향을 고찰하였다. 한편 탄성FEM 해석에서는 시험에 사용한 동일한 시험편을 모델링하여 용접부에 단위하중을 부가하여 발생한 변형량과 자유상태의 시험편에서 변형량을 비교하였다. 위의 실험과 탄성FEM 해석을 통해 구한 변형량을 비교분석하여 용접 변형에 미치는 구속의 영향을 구속계수로 유도하였다.

Table 1 Welding deformation parameters

Parameter	Contents
Heat input	Welding condition, groove type, welding position, inner restraint etc.
Outer constraint	Shape, dimension, welding, self-weight etc.
Metallurgy	Phase transformation
Manufacture condition	Initial deformation, moving and turn over etc.

3.1 실험방법

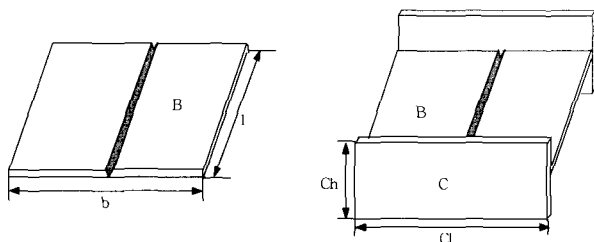
실험에서는 맞대기용접과 필렛용접에 있어서 자유상태의 변형량과 임의의 구속상태의 변형량을 측정하였다. 사용강재는 KSD3515, 용접재료는 YFWC50DX이며 이들의 기계적 성질을 Table 2에 보여 주고 있다. 한편 시험편의 좌표는 Fig. 1와 동일하게 사용하였다.

3.1.1 시험편 크기 및 형상

Fig. 2은 맞대기용접 시험편의 자유상태(a)와 구속

Table 2 Mechanical properties of base metal and welding material

	Yield stress (N/mm ²)	Ultimate strength (N/mm ²)	Elongation (%)
KSD3515	215-245	400-510	11-23
YFWC50DX	510	570	30



(a)Free condition (b)Constraint condition

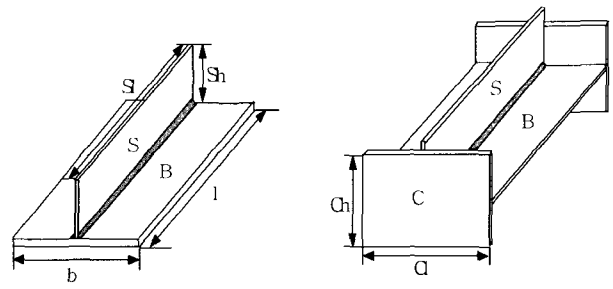
Fig. 2 Type of butt welded joint

재가 있는 시험편(b)를 보여 주고 있다. 구속재가 있는 시험편은 용접부의 다양한 구속도를 재현하기 위해 모재와 구속재의 두께 및 치수를 다양하게 변화시켜 실험하였다. Table 3에 시험편의 치수를 보여 주고 있다.

Fig. 3은 필렛시험편의 자유상태(a)와 구속 시험편(b)을 보여 주고 있다. 맞대기시험편과 같이 다양한 구속도를 재현하기 위해 구속재의 두께 및 치수를 변화시켜 준비하였다. Table 4에 필렛시험편의 치수를 보여 주고 있다.

3.1.2 용접조건

맞대기용접은 반자동 FCA용접을 사용하였으며, 용접 조건은 Table 5에 보여 주고 있다. Fig. 4는 두께에 따른 용접Pass간 적층형상을 보여 주고 있으며 용접순서를 동일방향으로 연속용접을 하였다. 가집시 간격은 500mm, 가집길이는 50mm로 하였다. 필렛용접은 반



(a)Free condition (b)Constraint condition

Fig. 3 Type of Fillet welded joint

Table 3 Specimens of butt welding

Specimen name	Dimension(mm)						Groove angle	Quantity
	Base plate			Constraint plate				
	Thickness(t)	Length(l)	Width(b)	Thickness(Ct)	length(Cl)	height(Ch)		
B10 - f	10	1000	600	-	-	-	40°	1EA
B10 - c1	"	"	"	10	600	200	"	2EA
B15 - f	15	"	"	-	-	-	42°	1EA
B15 - c1	"	"	"	15	600	200	"	2EA
B16 - f	16	500	"	-	-	-	40°	1EA
B16 - f	"	"	"	22	600	200	"	1EA
B16 - c2	"	"	"	10	300	100	"	1EA
B16 - c3	"	"	"	"	"	"	"	1EA
B28 - f	28	500	"	-	-	-	"	1EA
B28 - c1	"	"	"	22	600	200	"	1EA
B28 - c2	"	"	"	22	600	80	"	1EA
B28 - c3	"	"	"	10	300	100	"	1EA
B28 - c4	"	"	"	"	300	5 " 0	"	1EA

Table 4 Specimens of fillet welding

Specimen No.	Dimension(mm)									Quantity
	Base plate			Stiffener			Constraint plate			
	Thickness (t)	Length (l)	Width (b)	Thickness (Ct)	length (Cl)	height (Ch)	Thickness (Ct)	length (Cl)	height (Ch)	
B10 - f	10	1000	300	10	1000	100	-	-	-	2EA
B10 - c1	"	"	"	"	"	"	10	300	120	2EA
B10 - c2	"	"	"	"	"	"	"	"	50	2EA
B15 - f	15	1000	"	15	1000	-	-	-	-	2EA
B15 - c1	"	"	"	"	"	"	15	300	120	2EA
B15 - c2	"	"	"	"	"	"	10	"	50	2EA

(Ex: F10-f: F: fillet welding, 10: thickness(mm), f: free, c: constraint, Number: a degree of constraint)

Table 5 Butt welding condition

Pass	Current(A)	Voltage(V)	Velocity(mm/s)
1Pass	220	28	3
2Pass~End	290	32	4~6

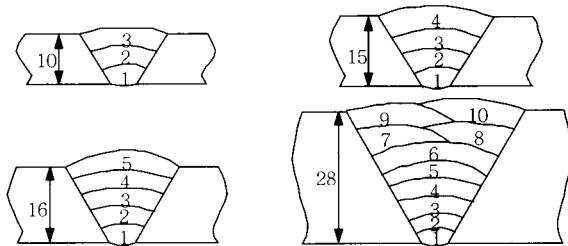


Fig. 4 Deposit sequence by butt welding.

자동 FCA용접, 각장은 4.5mm(1Pass)를 기준으로 하였으며, 용접조건은 240A, 26V, 속도(v)는 7.8(mm/s)을 사용하였다. Fig. 5는 필렛용접의 시험편 제작시 가접위치와 용접순서를 보여 주고 있다. 한편, 맞대기 및 필렛용접시 층간온도는 100℃ 이하로 관리하였으며 예열은 수행하지 않았다.

3.1.3 용접변형 측정

변형측정은 횡수축량과 각변형량으로 나누어지는데 횡수축량은 용접선 표점거리 100mm를 기준으로 용접 후 변화량으로 측정하였다. 한편 본 실험편에서는 Fillet용접시 횡수축량의 변화가 미소하여 측정할 수 없었다.

각변형은 용접용접부 뒷면에서 용접선 직각방향으로 용접선 위치별 측정선을 표시하고 단부(y=150mm(필렛용접) 또는 250mm(맞대기용접))에서 Gap자를 이용하여 측정하였다. 한편 필렛용접시 초기 변형량은 측

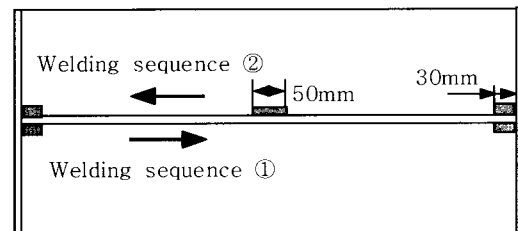


Fig. 5 Location of tack welding and welding sequence

정할 수 없을 정도로 작아 무시하였다

3.1.4 실험 결과

(1) 맞대기용접

구속정도와 두께에 따른 횡수축량을 Fig. 6에 보여 주고 있다. 결과에 의하면 자유상태의 시험편의 경우 용접 시단부에서의 횡수축량이 종단부 보다 더 크게 발생한다. 이것은 용접 시단부의 수축시 용접시단부로부터 용접열원에 걸쳐 용접열에 의해 강성이 저하되어 수축이 용이하기 때문이고, 종단부가 수축할 때에는 용접 시단부가 수축할 때 보다 용접부 전체의 온도가 상대적으로 냉각되어 강성을 회복하여 종단부의 횡수축을 방해하기 때문이다. 구속정도에 따른 횡수축량은 두께 15mm인 경우 시단부에서 50%정도 감소하였다.

구속정도와 두께에 따른 각변형을 Fig. 7에 보여 주고 있다(t=10, 15mm). 결과에 의하면 자유상태의 경우 용접선에 걸쳐 거의 일정한 각변형이 발생하였으나, 구속상태의 각변형은 용접선 길이에 따른 구속정도에 의해 용접시·종단부에서는 매우 작게 발생하였고 단부에서 중앙부로 갈수록 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

(2) 필렛용접

구속정도에 따른 각변형을 두께별로 Fig. 8에 보여

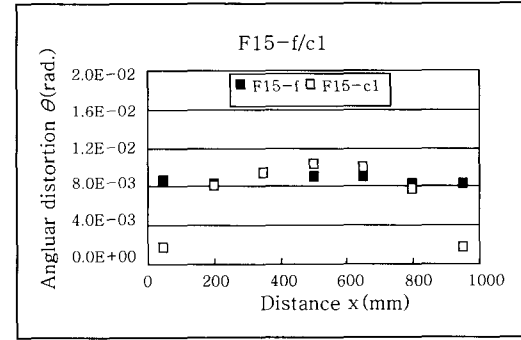
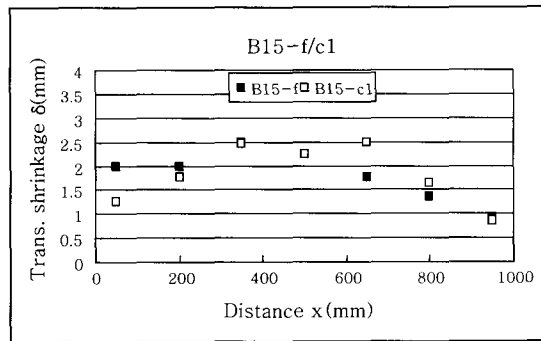
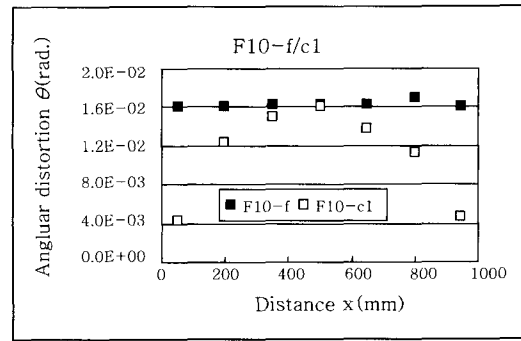
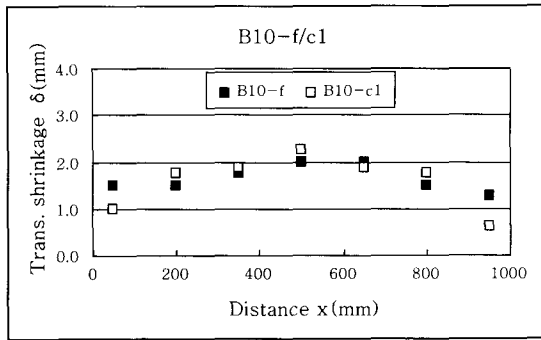
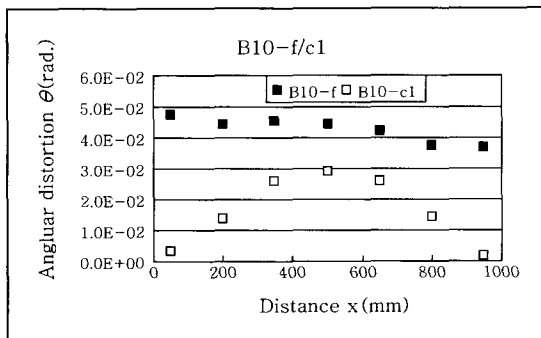


Fig. 6 Transverse shrinkage by butt welding

Fig. 8 Angular distortion by fillet welding



속정도에 따라 용접시·종단부에서는 자유상태의 각변형량보다 작게 발생하나, 중앙부에서는 자유상태의 각변형량과 거의 같은 크기로 발생하였다.

3.2 탄성FEM해석

구속계수를 유도하기 위해 자유상태와 구속상태 하의 단위하중에 의한 변형량을 구했다. 구속재의 경우 실험편을 모델링하여 용접부에 단위하중을 부가하여 탄성 FEM해석을 통해 변형량을 구했고, 자유상태의 시험편은 식(1)과 식(2)을 이용하여 각변형량을 구하였다. Fig. 9는 B15-c1과 F15-c1의 용접부에 단위하중을 적용하여 탄성FEM 해석결과를 보여 주고 있다.

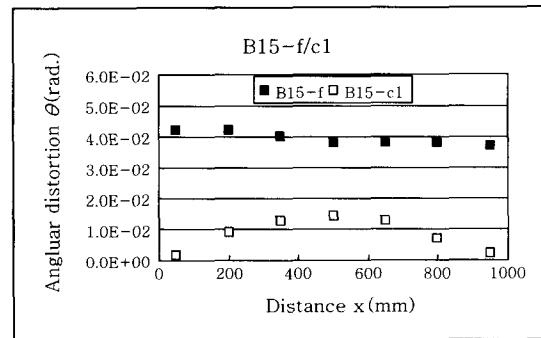


Fig. 7 Angular distortion by butt welding

3.3 구속계수

3.1절에서 실험에 의한 용접변형량과 3.2절에서 동일 시험편을 Modeling하여 용접부에 단위하중을 가하여 구한 변형량의 상관관계로부터 구속계수를 구했다. 여기서 구속계수란 자유상태의 변형량을 기준으로 구속재가 있는 경우 변형에 미치는 구속정도를 의미한다.

주고 있다. 결과에 의하면 자유상태의 각변형은 부재의 두께가 10mm 인 경우가 15mm 보다 약 2배 정도 크게 발생하여 두께가 두꺼울수록 각변형이 작게 생기는 것을 알 수 있다. 이것은 부재의 두께와 용입깊이와의 관계로부터 설명될 수 있다⁹⁾. 구속상태의 각변형은 구

Fig. 10는 맞대기용접시 횡수축에 대한 구속계수를 보여 주고 있다. 동일 시험편에 대해 종축은 구속상태의 시험편에서 측정한 횡수축량(δ_c)을 자유상태의 시험편에서 측정한 횡수축량(δ_f)으로 나눈 값이고, 횡축은 동일 구속시험편을 Modeling 하여 용접부에 단위하

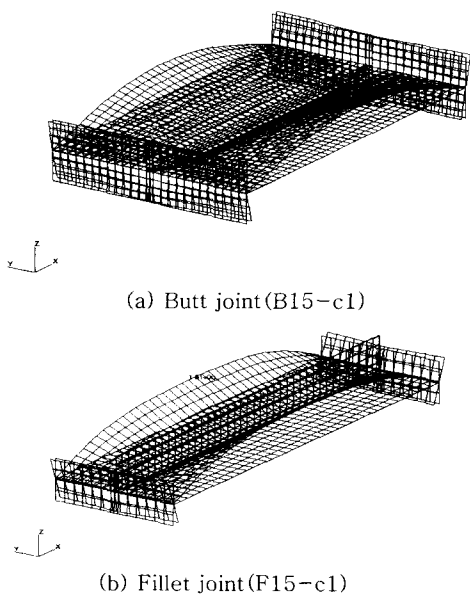


Fig. 9 Deformation shape during unit moment (thickness=15mm).

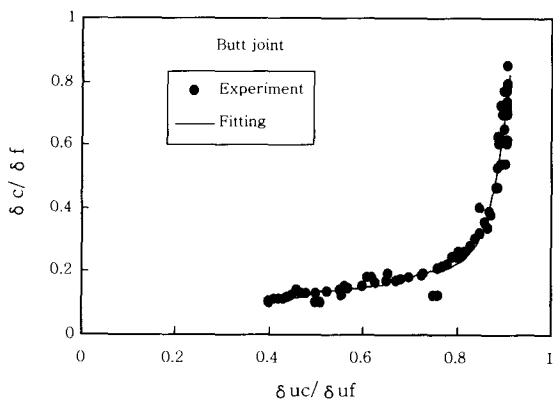


Fig. 10 Constraint coefficient of the transverse shrinkage on the butt welding

중을 가해 수치해석에서 구한 각변형량(δ_{uc})을 식(1)에 의해 구한 자유상태의 단위하중에 의한 횡수축량(δ_{uf})으로 나눈 값이다. 모든 시험편에 대해 동일한 방법으로 종축과 횡축을 구한 후 서로 만나는 점들을 최소자승법에 의해 구속계수를 구했다. 한편 중·횡축이 (0,0)인 경우 완전구속으로 용접변형이 발생하지 않으며, 중·횡축이 (1,1)인 경우 구속이 없는 자유상태를 의미한다.

Fig. 11은 맞대기용접시의 각변형에 대한 구속계수이고, Fig. 12는 필렛용접시의 각변형에 대한 구속계수를 보여 주고 있다. 구속계수를 구하는 방법은 맞대기용접의 횡수축구속계수와 동일하나, 실험에서 각변형 측정위치는 실험을 용이하게 하기 위해 맞대기용접은 250mm이고, 필렛용접은 용접선 직각방향으로 150mm 떨어진 곳에서 구했다.

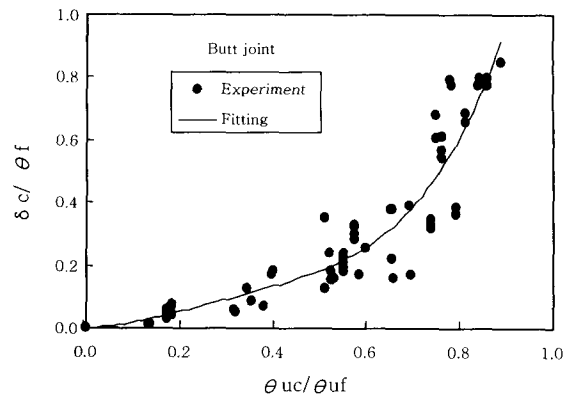


Fig. 11 Constraint coefficient of angular distortion on the butt welding

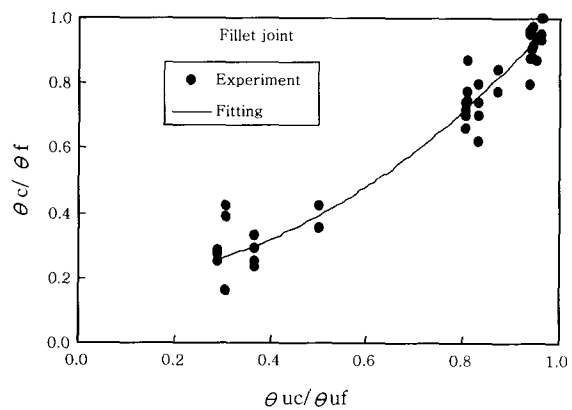


Fig. 12 Constraint coefficient of angular distortion on the fillet welding

여기서, θ_c : 구속 시험편에서 용접선 직각방향으로 250mm에서 각변형량(rad.), θ_f : 자유상태시험편에서 용접선 직각방향으로 250mm에서 각변형량 (rad.), θ_{uc} : 구속 시험편을 Modeling하여 H.A.Z부 끝단 (Fig. 1)에 단위굽힘모멘트를 가했을 때 용접선 직각방향으로 250mm에서 각변형량(rad.), θ_{uf} : 식(1)과 같이 자유상태 시험편에서의 단위굽힘모멘트를 가했을 때 각변형량(rad.)

4. 등가하중 계산방법

여기서는 3.3절에서 구한 구속계수를 이용하여 등가하중을 계산하는 방법과 구속계수가 가지는 물리적 의미를 고찰하였다.

Fig. 13은 등가하중 적용방법과 구속계수의 물리적 의미를 고찰하기 위해 도식적으로 나타낸 각변형의 구속계수이다.

실험에 의한 각변형량과 용접부에 단위굽힘모멘트를 가하여 구한 각변형량으로부터 구속계수가 그래프①을 따르는 경우, 자유상태의 시험편을 용접하여 측정된 각

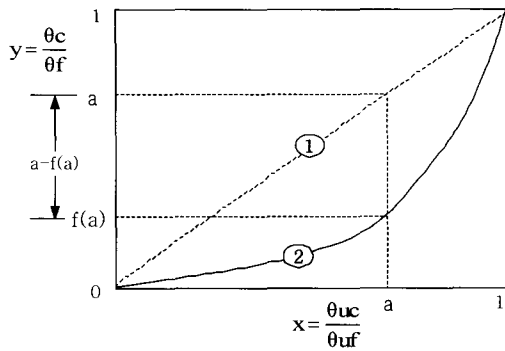


Fig. 13 Constraint coefficient of welding

변형량으로 부터 구한 등가굽힘모멘트를 구속상태의 구조물에 적용하여도 각변형량을 예측할 수 있다는 것을 의미한다. 이것은 Table 6에서 보여 주고 있는 내적구속②에 포함되어 있는 외적구속이 용접부의 열탄소성거동에 영향을 주지 않고 순수한 외적구속의 영향만이 존재하여 탄성해석과 같기 때문이다.

실제 용접구조물의 구속계수는 다소 크기의 차이는 있으나 그래프②와 같은 형태를 따른다. 이것은 용접시 발생하는 내적구속②(용접부 근방의 온도이력과 외적구속에 의해 열탄소성거동의 영향)와 외적구속의 영향을 받기 때문이다.

따라서 그래프②의 경우 실제 등가굽힘모멘트(Mc)는 $x=a$ 인 경우 "a-f(a)"가 구속에 의한 영향이므로 다음과 같이 얻어진다.

$$Mc = \beta \times Mf \tag{3}$$

여기서 β 는 구속에 의한 등가하중 수정계수

구속에 의한 등가하중 수정계수(β)는 그래프①이 등가하중의 변화가 없는 경계선이기 때문에 임의의 x 값 $x=a$ 에 대해 $y=a$ 일 때를 기준으로 하여 다음과 같은 비례식에 의해 얻어진다.

$$\begin{aligned} a : f(a) &= Mf : \beta \times Mf \\ \therefore \beta &= f(a) / a \end{aligned} \tag{4}$$

Table 6 Relation of equivalent force and constraint

	Free condition	Constraint condition
Restraint	Internal restraint① (Temperature cycle)	Internal restraint② (Temperature cycle + External restraint) External restraint
Equivalent force	Mf	Mc (< Mf)
Deformation	θ_f	θ_c (< θ_f)

5. 변형예측 및 고찰

여기서는 3.3절에서 구한 구속계수를 이용하여 임의의 구속상태의 구조물에 대해 용접변형 예측 순서를 설명하고 이를 적용하여 얻은 변형예측 결과와 실험결과를 비교함으로써 새로운 등가하중 결정방법의 타당성을 검증하였다.

Fig. 14는 용접변형을 예측하기 위한 해석흐름을 보여 주고 있다. 먼저 Fig. 10~12에서 구한 구속계수와 구조물 제작시 사용하는 용접형상에 따른 자유상태의 변형량(δf 와 θf)을 D/B화한다. 다음 변형을 예측하고자 하는 구조물을 모델링하여 용접부에 단위하중을 가하여 δuc 와 θuc 를 구한다. 자유상태의 단위하중에 의한 변형(δuf 와 θuf)은 식(1)과 식(2)에 의해 구한다. 이상으로부터 구한 각변형으로부터 등가하중 수정계수(β), Mf, Pf 를 계산할 수 있다. 최종적으로 등가하중으로 적용되는 Mc와 Pc를 식(3)에 의해 구해 이를 하중으로 하는 탄성FEM해석을 수행하여 용접변형을 예측한다.

Fig. 15는 맞대기용접시 발생하는 횡수축 변형에 대해 실험결과, 횡수축 구속계수를 고려하지 않은 해석결과 그리고 구속계수를 고려한 해석결과를 두께별로 비교하여 보여 주고 있다. 결과에 의하면 구속계수를 고려하지 않은 해석 결과의 경우 용접선 방향으로 거의 일정한 수축량이 발생하여 용접시/중단부에서 구속에 의한 횡수축량을 정확히 예측하기 못하고 있다. 반면, 구속계수를 고려한 해석결과에서는 용접선에 따른 구속

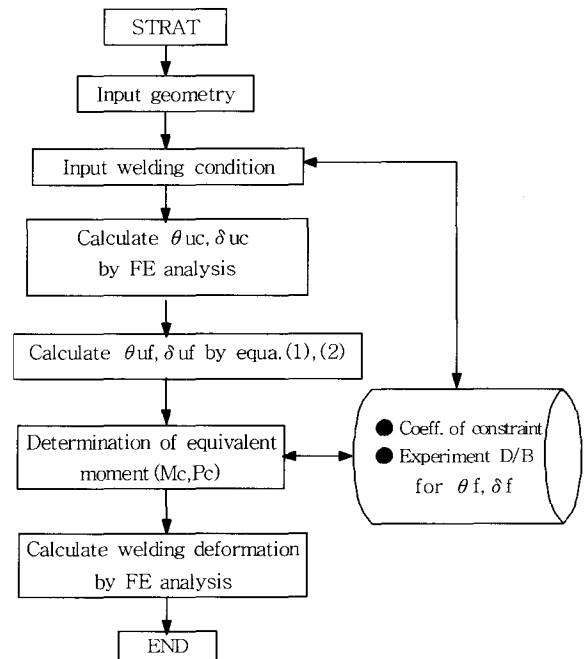


Fig. 14 Flow chart of welding deformation analysis

정도에 따라 횡수축량이 실험결과와 잘 일치하고 있다.

Fig. 16은 맞대기용접시 발생하는 각변형에 대해 실험결과, 각변형 구속계수를 고려하지 않은 해석결과 그

리고 구속계수를 고려한 해석결과를 두께별로 비교하여 보여주고 있다. 결과에 의하면 구속계수를 고려하지 않은 해석결과는 실험결과보다 크게 발생하여 등가굽힘모

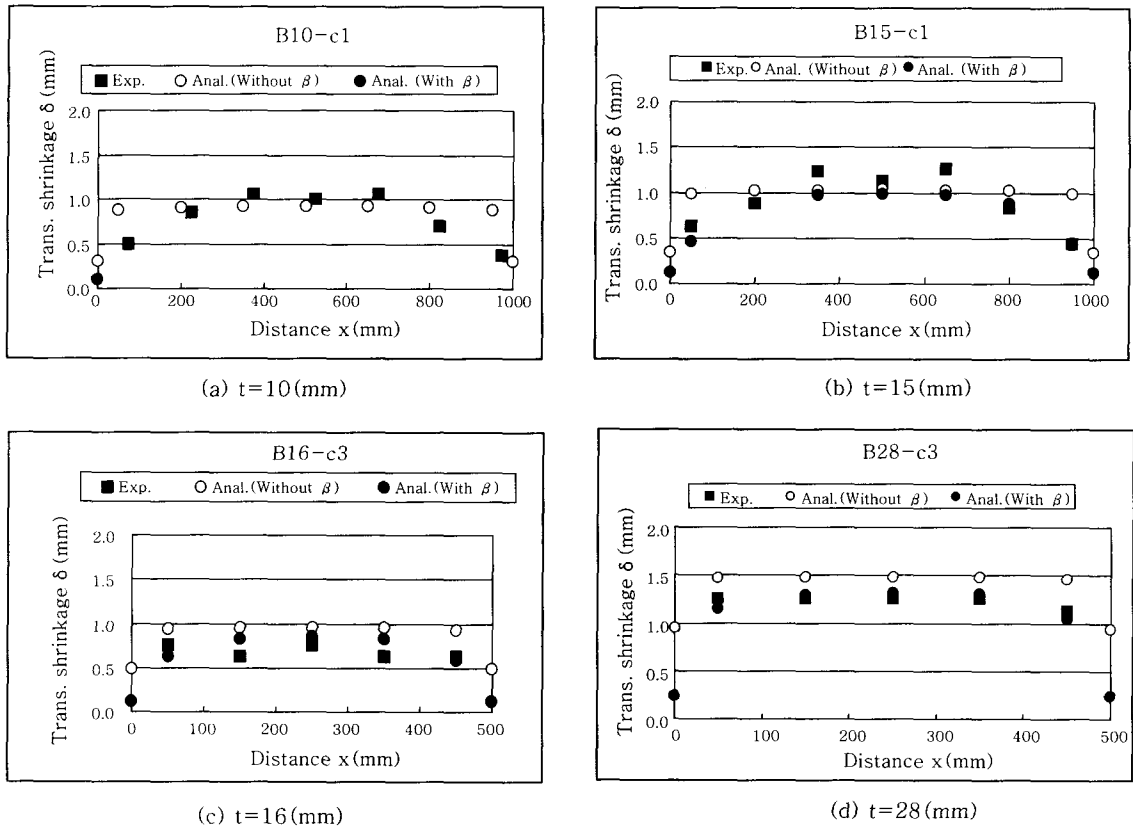


Fig. 15 Transverse shrinkage by butt welding

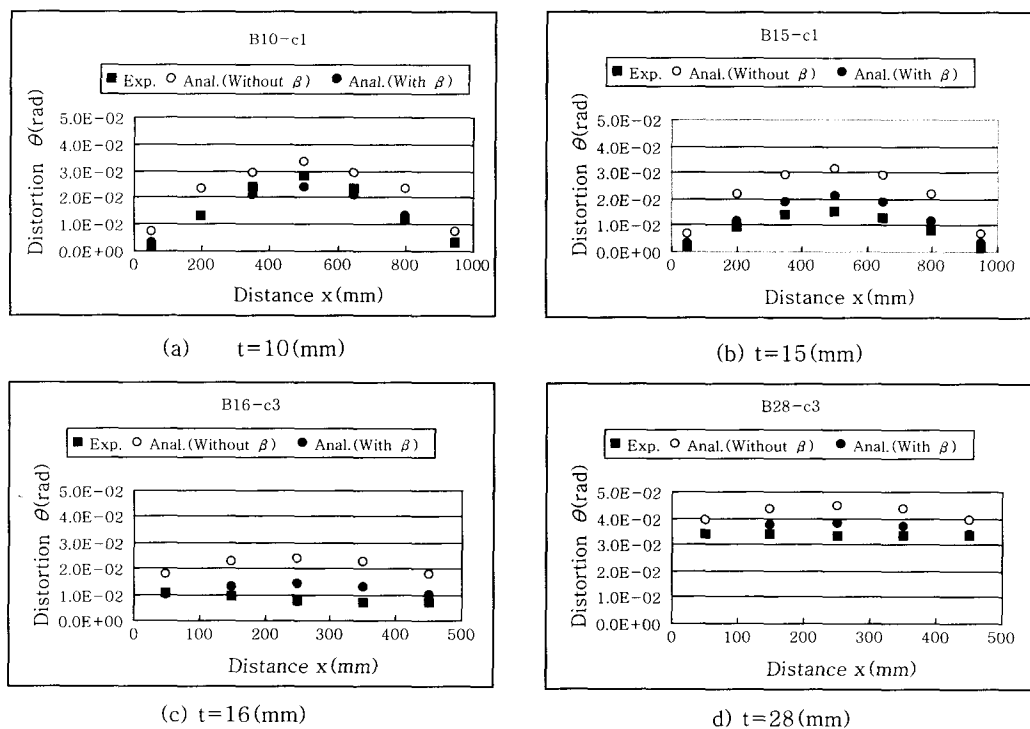


Fig. 16 Angular distortion by butt welding

멘트가 과대평가 되었음을 보여 주고 있다. 한편 구속 계수를 고려하여 등가굽힘모멘트를 결정하여 각변형을 예측하는 경우 모재의 두께, 적층방법 그리고 용접길이에 관계없이 실험값과 잘 일치하여 본 연구에서 제안한 구속계수를 고려한 등가굽힘모멘트의 결정방법이 타당함을 보여 주고 있다.

Fig. 17는 필렛용접시 발생하는 각변형에 대해 실험 결과, 구속계수를 고려하지 않은 해석결과 그리고 구속 계수를 고려한 해석결과를 두께별로 비교하여 보여주고 있다. 결과에 의하면 실험결과와 해석결과는 거의 일치하고 있어 등가하중 결정시 구속계수의 영향을 거의 받지 않은 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 10에서 알 수 있는 것과 같이 구속계수가 거의 $y=x$ 곡선을 따르고 있어 구속에 대한 영향이 작기 때문이다.

6. 결 론

임의의 구속상태에서 용접에 의해 발생하는 변형을 예측하기 위한 구속계수를 고려한 등가하중 결정방법에 관한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 구속상태의 시험편을 용접했을 때 발생하는 변형량과 동일 시험편을 Modeling하여 H.A.Z부 끝단에 단위하중을 가하여 구한 각변형량과의 상관관계로부터 구속계수를 유도하고 이를 고려한 등가하중 결정방법을 제안하였다.

2) 본 연구에서 제안한 등가하중 결정방법에 의한 해

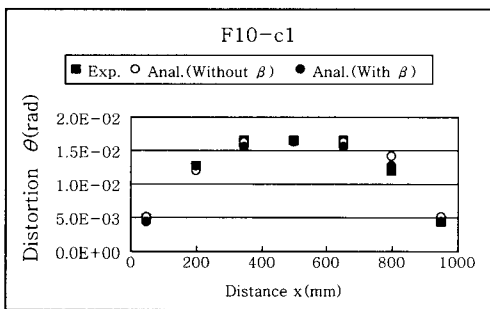
석결과와 실험결과가 잘 일치하여 제안한 등가하중 결정방법이 타당함을 보여 주었다.

3) 맞대기용접의 횡수축변형에서는 구속계수를 고려하지 않은 경우 용접시/종단부에서 실험값과 구속계수를 고려한 해석결과와 차이를 보여 구속계수의 타당성이 입증되었다. 각변형의 경우 구속계수의 영향을 크게 받아 기존의 자유상태의 각변형량으로부터 등가 굽힘모멘트를 결정하여 해석하는 경우 실험결과와 많은 차이를 보였다.

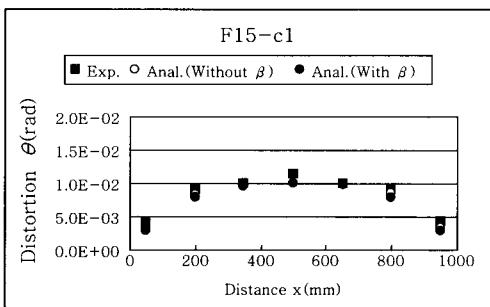
4) 필렛용접의 경우 구속계수의 영향이 작으므로 자유상태의 각변형량으로부터 등가굽힘모멘트를 결정하여 적용하여도 임의의 구속상태에서의 각변형을 예측할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 佐藤邦彦, 向井喜彦, 豊田政男 : 溶接工學, 理工學社, 1991, 29-42 (in Japanese)
2. 佐藤邦彦 : 溶接構造要覽, 黒木出版社, 1988, 157-169 (in Japanese)
3. Masubuchi K. : Analysis of Welded Structures, Pergamon Press, 1980, 235-327.
4. Nomoto, T., Takechi, S. and Aoyama, K. : Basic Studies on Accuracy Management System Based on Estimating of Weld Deformations, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, **Vol. 181**(1997(4)), 249-260.
5. Murakawa, H., Luo, Y. and Ueda, Y. : Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain (First Report) Mechanism of Inherent Strain Production, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, **Vol. 180**(1996), 739-751.
6. Murakawa, H. and Luo, Y. and Ueda, Y. : Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain (Second Report) Deformation and Residual Stress under Multiple Thermal Cycles, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, **Vol. 182**(1997), 873-793.
7. Murakawa, H., Luo, Y. and Ueda, Y. : Prediction of Welding Deformation and Residual Stress by Elastic FEM Based on Inherent Strain (Third Report) Deformation and Residual Stress in Narrow Gap Welding, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, **Vol. 183**(1998), 323-333.
8. Seo, S.I. and Jang, C.D. : A Study on the Prediction of Deformations of Welded Ship Structures, Journal of Ship Production, **Vol. 15, No.2**(1999), 73-81.
9. Masubuchi, K. : Analysis of welded Structures, Pergamon Press, 1980, 277-281.



(a) t=10(mm)



(c) t=16(mm)

Fig. 17 Angular distortion by fillet welding