



열 및 가압력을 이용하여 접합하는 방법이다.

이와 같은 원리에 의하여 냉간 압연 강판을 Fig. 1과 같이 상·하 전극으로 가압 후 통전하게 되면, 가압된 모재는 전기저항열 (electric resistance heat)에 의해서 상변태 온도 이상으로 가열되었다가, 자연 방열과 열 전달에 의해서 다시 냉각된다. 이러한 전기 저항 용접과정 중에 야기되는, 가열과 냉각의 용접 열싸이클로부터 팽창과 수축이 발생하게 되어, 용접 후 용접부에는 전극가압력에 의한 압상흔과 용접잔류응력이 남게 된다. Table 1은 사용재료의 화학적 성분을 나타내고, Table 2는 기계적 성질을 나타낸다.

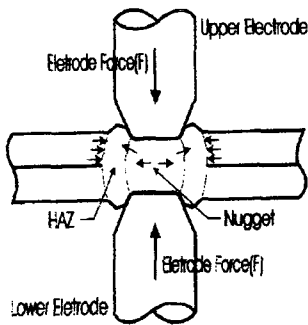


Fig. 1 Illustration of spot welding principal.

Table 1 Chemical composition of specimen. (Wt, %)

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Fe
SPCC	0.12	0.01	0.012	0.015	0.007	0.025	0.045	Rem.

Table 2 Mechanical properties of specimen.

	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
SPCC	307.0	168.4	47

Fig. 2는 점용접부의 용접잔류응력을 해석하기 위해 작성된 비선형 유한요소 해석모델이다. 모델의 요소(element)는 8 질점 평면변형 요소(plane strain element)이며, 너깃부는 정확하고 상세한 해석결과를 얻기 위하여 세분화하였다.

Table 3 Welding condition of specimen.

	Electrode Force (N)	Welding Current (kA)	Welding Time (Cycle)
Welding Condition	1962	8.3	15

그리고, 두께 1mm의 모재는 너깃의 생성과정 및 변형상태를 면밀히 관찰하기 위하여 4개 층으로 분할하였고 특히, 너깃부 상·하 평판의 내표면 요소들은 절점을 동일하게 함으로써 두께 2mm의 너깃요소를 생성하였다.

전극(electrode)에 의한 가압력을 재현하기 위하여 너깃 상·하에 각각 강제요소(rigid element)로서 용접전극을 모델링하여 가압하고, Table 3의 용접조건으로 용접하였다.

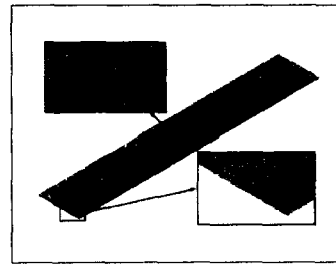
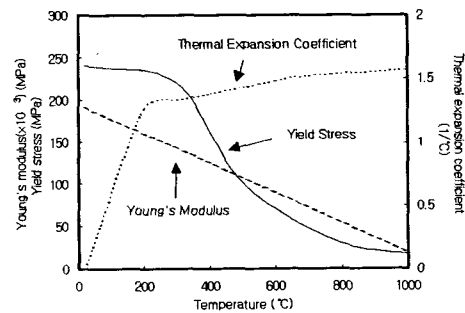
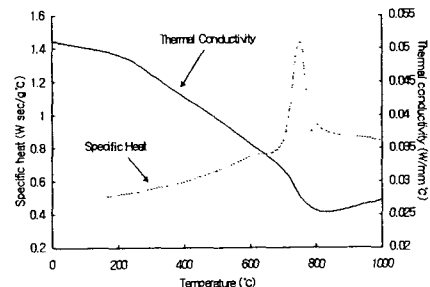


Fig. 2 Non-linear analysis model for spot welding residual stress.

온도의존성을 고려해야하는 재료의 물성(material property)은 Fig. 3으로부터 온도변화에 대응할 수 있도록 각 온도구간마다 적정 값을 적용하였다.



(a) Mechanical properties



(b) Thermal properties

Fig. 3 Temperature dependent material properties of SPCC.[10]

Fig. 3은 자동차용 냉간압연강판인 SPCC의 온도변화에 따른 재료물성치 변화를 나타내고 있다. 그리고, 점용접시 전기저항열에

의한 용접부 온도분포는 RWMA에서 제안한 온도분포곡선[11]을 이용하여 재현하였다.

비선형해석 프로그램은 ABAQUS를 사용하였으며, 용접시간 동안 가열과 가압을 동시에 재현하고, 용접 후 냉각과정을 통하여 용접부 온도가 상온까지 냉각되었을 때의 용접잔류응력을 계산하였다. 그리고, 해석 중 용접입열에 의한 재료의 상변태와 이로 인한 체적변화 및 Fig. 3 이외의 열역학적, 금속학적 미소성질들은 무시되었다. 사용된 해석모델의 요소수는 4300개이고, 절점수는 6151개이다.

## 2.2 실험해석

본 연구에서는 이상의 수치해석 결과를 검증하기 위해 실험적 해석을 병행하였다. 점용접이음재의 용접부에 대한 용접잔류응력을 해석하기 위한 실험장치는 RIGAKU 사의 X선 응력 측정장치(model : MSF-2M)를 사용하였으며, 실험조건은 시편표면에 X선 입사각( $\psi_0$ )을 각각  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  및  $45^\circ$ 로 설정하고, 전압은 30 kV, 전류는 6 mA로 하였다.[12]

점용접부 외표면의 용접잔류응력은 용접부 중심에서 너깃단방향으로 시편 중심을 따라서 측정하였고, 내표면의 용접잔류응력은 상·하 평판의 한 쪽을 습식마모법으로 제거한 후 외표면과 동일한 방법으로 측정하였다. 이상의 용접부 내·외표면에 대한 잔류응력 측정은 각각 3회씩 반복 수행하여 그 평균값을 구 하였다.

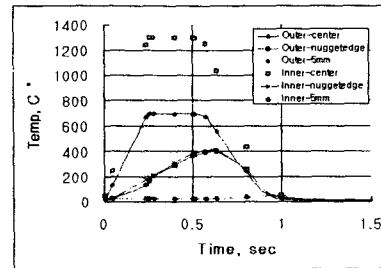
## 2.3 잔류응력 해석결과

Fig. 4(a)는 점용접 영사이클에 의하여 야기되는 용접부 온도분포에 대한 유한요소 해석결과를 내·외표면의 너깃중심과 그 주위에 대해서 비교 도시한 것이며, Fig. 4(b)는 용접이 시작되고 0.5초(15 cycle) 경과된 후의 너깃생성 상황을 나타낸 것이다.

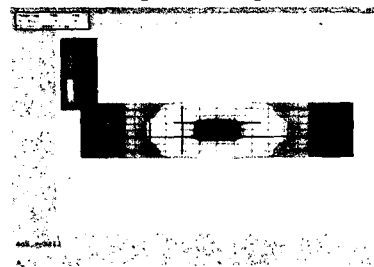
용접부 너깃중심의 최대온도는 외표면이  $700^\circ\text{C}$ , 내표면이  $1300^\circ\text{C}$ 로 내표면이 높다. 이것은 너깃 외표면에서 접촉하는 전극이 냉각수에 의해 냉각되므로 전극의 온도를  $700^\circ\text{C}$ 로 낮게 설정하였기 때문에 열전달에 의한 냉각효과에 의하여 내표면보다 온도가 낮은 것으로 판단된다.

그러나, 내·외표면의 너깃단의 온도는 최대  $400^\circ\text{C}$ 로 너깃중심부 보다 낮고 전체적으로 동일한 분포를 나타내고 있으며, 너깃중심으로부터 5mm 떨어진 모재부의 온도는 내·외표면 공히 방열과 열전달에 의해 매우 낮은 분포형태를 보였다.

이상의 온도분포로부터 너깃은 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같이 너깃 내부로부터 외부로 열 확산에 의해 타원형의 너깃이 생성되고 있음을 알 수 있으며, 이것은 실제 용접된 너깃단면의 형상이 타원형인 것과 일치된 결과이다.



a) Temperature profiles



b) Nugget generation

Fig. 4 Temperature distribution analysis and nugget generation of spot welded lap joint.

Fig. 5는 점용접부 내·외표면의 용접잔류응력 분포를 수치해석 결과와 실험해석 결과를 비교 도시한 것이다.

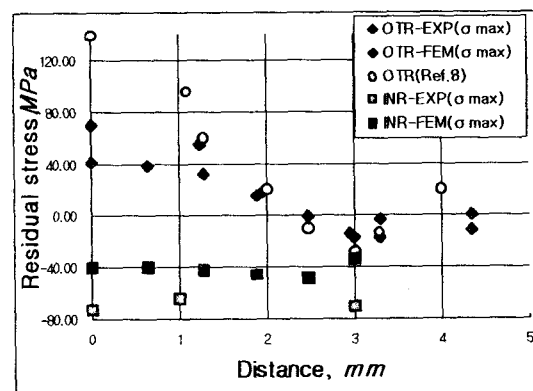


Fig. 5 Residual stress distribution at spot welding point.

M. Anastassiou[8] 등은 용접부 외표면에서 측정된 잔류응력의 분포형태는 용접부 너깃의 중심부에서 높은 인장 잔류응력이 존재하고, 너깃단으로 이동하면서 압축 잔류응력으로 변화되다가 너깃단으로부터 열영향부(heat affected zone)에 이르러 최대 압축응

력이 존재한다고 밝혔다.

본 연구의 외표면에 대한 실험해석과 수치 해석 결과 공히 이들의 연구결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 외표면 너깃 중심에서 최대 인장 잔류응력이 발생하고 있으며, 두 결과 공히 너깃단으로 이동하면서 감소하다가 너깃단 주변에서는 압축잔류응력을 나타내고 있다. 최대 압축잔류응력은 거의 동일한 값을 나타내었다.

너깃용접부에서 실험과 수치해석 결과가 차이를 보이는 것은 실제 용접과정에서 야기되는 상변태와 조직변화 등의 영향이 수치해석에서는 재현되지 못했기 때문으로 생각된다. 그러나, 피로균열 발생과 성장에 민감한 영향을 미치는 너깃단에서의 잔류응력 이론해석 및 실험해석 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

또한, 용접부 너깃 내표면에서의 잔류응력 분포는 실험해석과 이론해석 모두 거의 일정한 값을 가지는 경향을 나타내고 있다. 실험치의 경우 너깃단에서는 너깃중심에 비해 약간 낮은 값을 나타내었다. 특히, 실험치가 큰 압축응력으로 분포하는 이유는 습식마모법으로 너깃상부를 제거할 때, 용접잔류응력의 이완과 기계가공에 의한 가공경화의 영향 때문으로 보여진다.

### 3. 결 론

점용접 구조물의 장수명 설계기준을 확립하기 위한 기초연구로서, IB형 일점 점용접 이음재의 피로수명에 영향을 미치는 용접부의 용접잔류응력을 비선형해석을 이용한 수치해석 방법과 X선 회절법을 이용한 실험적 방법으로 구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 점용접이음재의 용접잔류응력에 대한 수치해석기법을 제안하였으며, 제안된 3차원 비선형 유한요소해석 결과는 실험치와 잘 일치함을 보였다.
2. 점용접부 내표면 너깃단에서의 용접잔류응력은 압축이고, 그 크기는 최대 38 MPa 이다. 그리고, 너깃중심부에서는 인장응력이며 그 크기는 40MPa 이다.
3. 점용접 구조물의 합리적인 장수명 설계 기준을 설정하기 위해서는 용접부의 용접잔류응력을 고려함이 타당하다.

### 후 기

본 논문은 한국과학재단 산하 성균관대학

교 산업설비 안전성평가 연구센터의 연구비 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

### 4. 참고문헌

- (1) Fujimoto, "The stress and displacement of IB type spot welded lap joint under tension shear load", JSAE Review, No. 17, 1979.
- (2) ASTM, "Residual stress effect in fatigue", ASTM STP 776, 1981.
- (3) D. H. Bae, "The fracture mechanical fatigue strength evaluation of IB type spot welded lap joint under tension shear load", KSAE Review, Vol. 13, No. 5, pp. 42-50, 1981.
- (4) D. Radaj, et al, "Geometrically nonlinear behavior of spot welded joint in tensile and compressive shear loading", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 51, No. 2, pp. 281-294, 1995.
- (5) Dieter Radaj, et al, "Local stress parameter at the weld spot of various specimen", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 37, No. 5, pp. 993-951, 1990.
- (6) H. Huda, et al, "Electro thermal analysis of electric resistance spot welding process by 3-D FEM", Journal of Materials Processing Technology, No. 63, pp. 672-677, 1997.
- (7) C. L. Tsai, et al, "Study of nugget formation in resistance spot welding using finite element method", 1989 Material Park conference, ASM International Materials, pp. 43-53, 1989.
- (8) M. Anastassiou, et al, "Residual stress and micro structure distribution in spot welded steel sheet; relation with fatigue behavior", Material Science and Engineering, A125, pp.141-156, 1990.
- (9) H. A. Nied, "The finite element modeling of the resistance spot welding process", Welding Research Supplement, pp. 123-132, 1984.
- (10) Alexander Goldsmith, "Handbook of Thermo physical properties of solid materials", Reversed Edition, Vol. II, The Macmillan Co, pp. 28-56, 1961.
- (11) RWMA, "Residual welding manual", Vol. 1, pp. 119-143, 1981.
- (12) Rigaku, "X-선 응력측정장치 manual", pp. 1~16, 1987.