

자동차용 컨트롤 링크 업셋 용접부의 용접성 및 피로강도 향상에 관한 유한요소 해석

조해용*, 권혁홍**, 이봉규***

Finite Element Analysis on Welded Part of Control Link for Automobile

Hae-Yong Cho*, Hyuk-Hong, Kwon**, Bong-Kyu, Lee***

Abstract

This study is concerned with Finite Element Analysis on welded part of control link for automobile. For analysis, control link was modeled into two parts, ring and rod. Heating condition, temperature distributions and fatigue fracture strength were analyzed using "HEAT III" and "ENDURE" module of NISA II. Metal flow in the process of welding was simulated by DEFORMTM2D. The analyzed results were compared with experimental inspection. Quality of welded part was able to be improved by controlling metal flow in the process of welding by increase the friction constant of ring part. Heat transfer analysis and flow simulations were in good agreement with welding experiments.

Key Words : Finite element method(유한요소법), Control link (컨트롤 링크), Welded part (용접부), Upset welding (업셋용접)

1. 서론

최근에는 컴퓨터의 발달로 인하여 실험적 방법이 아닌 수치적 해석에 의한 해석적 방법으로 용접에 관한 연구가 행해지고 있다.

Kamtekar⁽¹⁾는 평판용접에서의 강소성 열응력을 2차원적으로 유한차분법을 이용하여 해석하였고, Rybicki 등⁽²⁾은 용접하는 동안의 온도분포 및 시간의 경과에 따른 상

변화의 영향을 고려한 열변형과 잔류응력 등을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 국내에서는 Park⁽³⁾이 유한요소법을 이용 온도분포 및 열응력 해석을 행하여 용접작업시에 발생하는 열변형 및 열응력을 해석하였고, Yoon⁽⁴⁾은 용접전류 및 용접시간이 용접효율에 미치는 영향을 연구하였으며, Kim⁽⁵⁾은 프로그램을 이용하여 용접부의 피로강도를 검사할 수 있는 방안을 제시하였다.

따라서, 본 논문에서는 현재 자동차의 컨트롤 링크에 적

* 충북대학교 기계공학부
** 대전대학교 기계설계공학과(hhkwon@daejin.ac.kr)
*** 충북대학교 기계공학부 대학원

용되고 있는 업셋용접의 공정을 개선하고, 더 나아가 새로운 제품에 적용할 때, 보다 신속하고 합리적으로 최적의 용접조건을 설정하기 위한 연구를 수행하였다.

연구방법으로서는 상용 유한요소 해석프로그램인 NISA II⁽⁶⁾의 열전도해석 모듈인 HEAT III를 이용하여 각각의 입열량과 통전 시간에 따른 용접부의 온도분포를 예측하고자 한다. 그리고, 열전도해석에서 얻은 온도분포를 경계조건으로 하여 용접부 표면의 마찰상수에 따른 소재의 유동을 강소성 유한요소 해석 프로그램인 DEFORMTM 2D⁽⁷⁾를 이용하여 용접조건과 용접부의 표면상태가 용접부에 미치는 영향을 조사하고자 한다. 또한, 실제 업셋용접을 행하여 열전도 해석과 유동 해석의 결과를 검증하고, NISA II의 피로해석 모듈인 ENDURE를 이용하여 용접부의 노치에 따른 응력집중이 용접부의 피로 강도에 미치는 영향을 조사하고자 한다.

2. 컨트롤 링크의 유한요소해석 및 용접실험

2.1 컨트롤 링크의 해석

본 논문에서는 자동차용 컨트롤 링크의 업셋용접 공정을 개선하고 최적의 용접조건을 설정하기 위하여 유한요소법을 이용하였다. 컨트롤 링크는 Fig. 1과 같이 두 개의 링과 봉이 업셋용접에 의하여 결합되어 있다. 실제 업셋용접에서는 가열과 동시에 가압 하여 접합이 이루어지지만, 해석에 있어 열전도와 유동을 동시에 해석하기 곤란하므로, 본 논문에서는 NISA II의 열전도해석 모듈을 통하여 용접부의 온도분포를 해석한 후 해석 결과를 DEFORMTM 2D의 경계조건으로 입력하여 용접부의 유동을 해석하였다. 또, 용접된 컨트롤 링크 용접부의 노치에 의한 응력집중이 피로강도에 미치는 영향을 해석하였다.

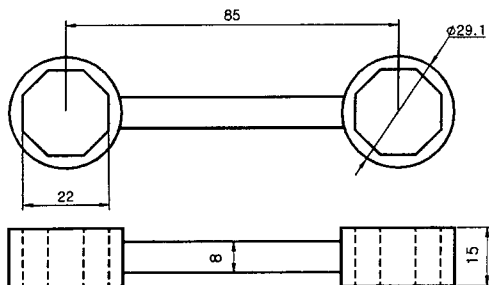


Fig. 1 Schematic drawings of control link

2.1.1 열전도해석

컨트롤 링크의 용접을 위한 가열조건을 찾기 위하여 NISA II의 열전도해석 모듈인 HEAT III를 이용하여 용접부의 온도분포를 해석하였다. 컨트롤 링크의 용접부를 봉과 링으로 나누어 모델링하였다. 최적의 용접조건을 찾기 위해 용접시간과 입열량을 공정변수로 하였다. 입열은 봉과 링의 접촉부에 고르게 분포하는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 봉의 재료(SM25C)와 링의 재료(SM10C)를 물성치를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Material input data used in the analysis

Material	SM25C	SM10C
Modulus of elasticity (GPa)	205	200
Poisson ratio	0.3	0.3
Thermal conductivity (W/m-K)	51.9	51.9
Heat capacity (J/g°C)	0.486	0.448
CTE, linear 20°C, μm/m°C	12.1	12.2
CTE, linear 250°C, μm/m°C	13.3	13.5
CTE, linear 500°C, μm/m°C	14.4	14.2

2.1.2 유동해석

용접시 입열량과 표면상태에 따른 소재의 유동을 해석하기 위해 상용유한요소 프로그램인 DEFORMTM 2D를 사용하였다. 해석의 단순화를 위해 링은 강체로 하여 부분만이 변형하는 것으로 가정하였다. NISA II에서 얻은 온도분포를 경계조건으로 입력하여, 링의 변위를 1mm 씩 4 mm 까지 증가시켜 용접부의 마찰상수를 변화시키면서 입열량에 따른 유동을 해석하였다.

2.1.3 피로해석

용접부의 노치에 의한 응력집중이 컨트롤 링크의 피로 강도에 미치는 영향을 예측하기 위해 누적손상이론을 적용한 NISA II의 피로해석 모듈인 "ENDURE"를 이용하였다. 용접 후의 형상을 링과 봉 사이에 필렛이 없는 경우와 실제 용접부의 형상과 비슷한 필렛이 있는 두 가지로 선정하여 응력 집중계수를 증가시키며 해석을 수행하였다. 피로해석을 위한 재료의 물성치는 NISA II의 data base값을 이용하였다.

2.2 컨트롤 링크의 용접실험

용접실험을 위한 컨트롤 링크는 결합 역할을 하는 두

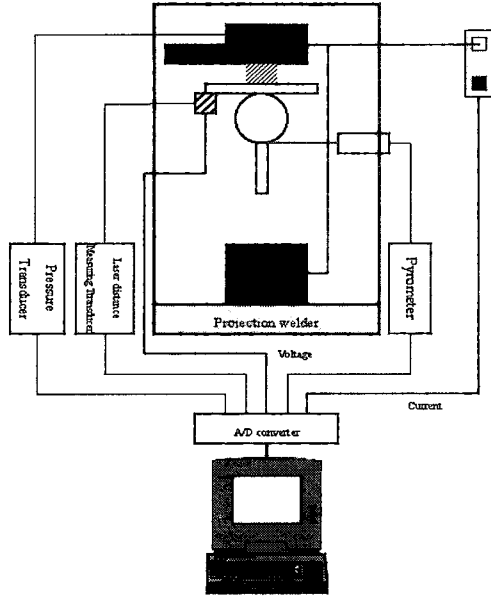


Fig. 2 Experimental set-up for welding operation and monitoring

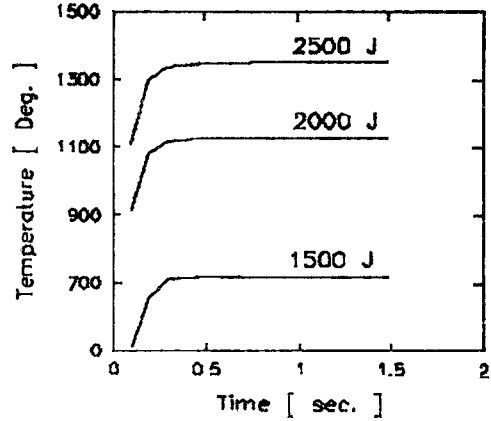


Fig. 3 Variations of temperature with respect to the welding time

용접시간 0.3초에 대하여 입열량 1500 J, 2000 J, 2500 J, 3000 J인 경우의 링의 온도 분포 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 링 부분 용접부의 최고온도가 각각 648℃, 795

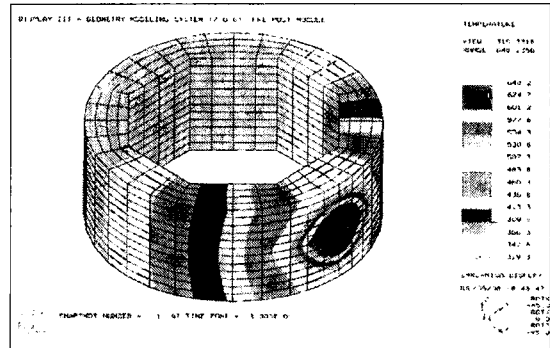
개의 링을 하나의 봉으로써 업셋용접하여 제작하였다. Fig. 2에 용접기 및 용접변수를 측정하기 위한 장치를 나타내었다. 업셋용접 및 저항용접에서 가압력이 적으면 접합강도가 낮아지며, 가압력이 부족한 상태에서 전류를 증가시키면 날림(expulsion)이 발생하기 쉽다.

실험에서는 낮은 가압력 상태에서 전류를 높여가며 날림이 일어나기 전까지 실험을 행한 후 가압력을 증가시킨 다음 동일한 과정을 반복적으로 수행하였다. 제작된 용접시편의 용접강도를 측정하고 용접부의 외관 및 접합상태를 관찰하여 최적의 가압력 및 전류 설정치를 산출하였다.

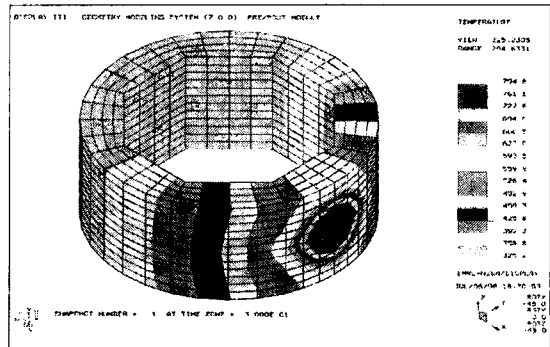
3. 결과 및 고찰

3.1 열전도해석

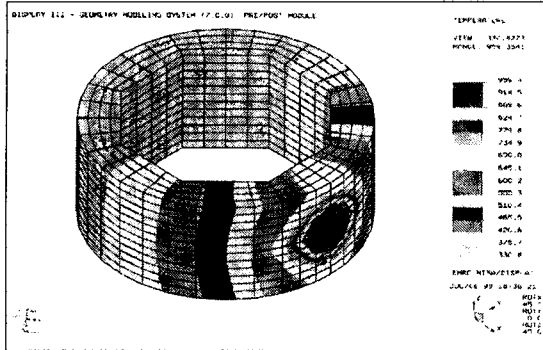
Fig. 3은 입열량을 1500 J, 2000 J, 2500 J로 변화시켰을 경우 용접시간에 따른 봉부분 용접부의 온도분포를 해석한 결과이다. 입열량에 대하여 용접시간 0.3 초까지는 용접부의 온도가 크게 증가하지만 용접시간이 0.3초 이상이 되면 용접부의 빠른 열전달과 대기와의 열평형으로 더 이상 온도가 증가하지 않는다. 이것은 업셋용접 거동에 부합하는 것으로 용접시간은 0.3초가 적절함을 알 수 있다.



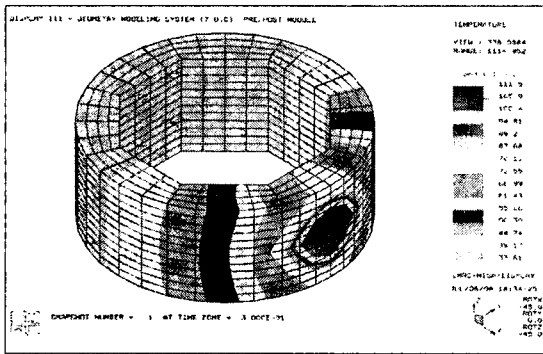
(a) 1500 J



(b) 2000 J



(a) 2500 J

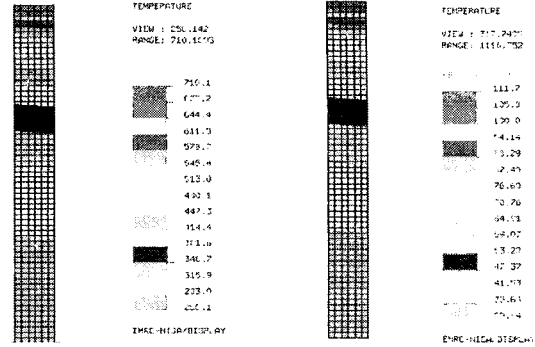


(b) 3000 J

Fig. 4 Temperature distributions of ring for each condition at 0.3 second

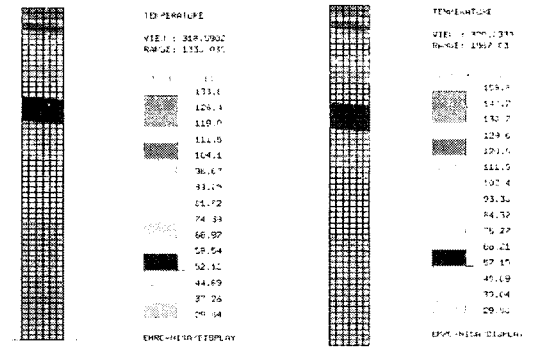
℃, 959℃, 1115℃이다. 입열량이 2500 J보다 큰 경우 링부분의 온도가 링의 재결정 온도인 960℃ 이상으로 상승하므로 입열량 2500 J로 용접하는 경우 재결정에 의한 강도저하로 가압시 변형이 생겨 제품의 치수 정밀도에 영향을 줄 수 있다.

Fig. 5에는 역시 0.3초의 용접시간에 대하여 입열량을 변화시켰을 경우 봉부분 용접부의 온도 분포를 해석한 결과를 나타내었다. 최고온도는 각각 710℃, 1125℃, 1338℃, 1568℃로써 링과 같이 봉부분의 경우에도 2500 J의 입열량을 준 경우 온도가 1340℃ 부근까지 상승하여 소재의 유동성은 좋으나 링 부분과의 탈리가 예상되어 용접부에 노치가 생길 수 있다. 따라서, 용접시 링부분의 강도 및 소재의 유동성을 고려하면 입열량이 2000 J인 경우 가장 이상적인 용접부의 상태를 얻을 수 있음을 알 수 있었다.



(a) 1500 J

(b) 2000 J



(c) 2500 J

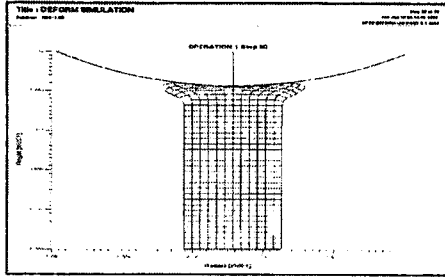
(d) 3000 J

Fig. 5 Temperature distributions of rod for each condition at 0.3 second

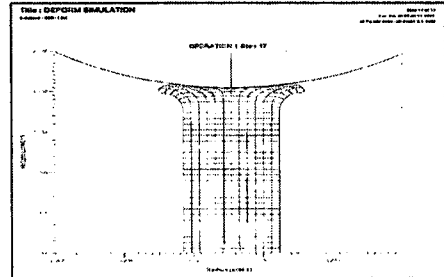
3.2 유동해석

Figs. 6, 7은 입열량이 각각 2000 J과 2500 J인 경우 용접부의 마찰상수를 0.1에서 0.4까지 변화시킨 경우의 유동해석결과이다. 링 부분의 표면의 요철이 용접성에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 표면이 거칠수록 소재의 유동을 억제하여 용접부의 노치를 방지시킬 수 있음을 알 수 있었다. 링 부분의 마찰상수가 Fig. 6의 경우 0.2이상일 경우에는 유동이 링표면을 따라 발생하여 노치가 생기지 않으므로 링의 표면이 거칠수록 소재의 유동이 억제되어 용접부의 노치를 방지시킬 수 있음을 볼 수 있다.

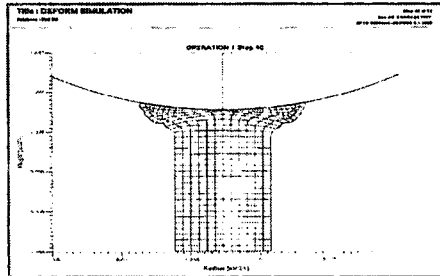
입열량 2500J의 경우 온도분포 해석에서도 예측했듯이 Fig. 7과 같이 소재의 유동이 너무 좋아서 봉과 링부분의 탈리로 인하여 노치가 발생하여 응력집중으로 피로수명에 영향을 줄 수 있다. 해석결과 입열량을 2000 J로 하고



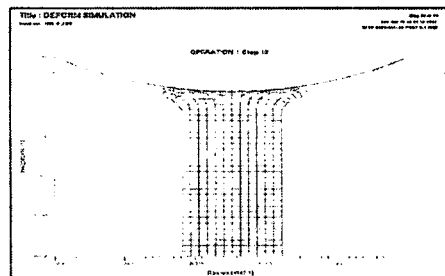
(a) friction constant $m = 0.1$



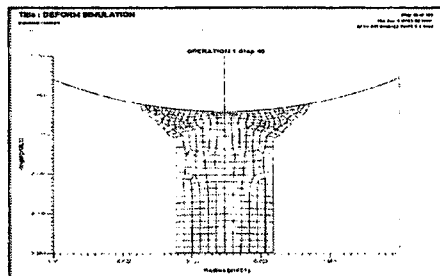
(a) friction constant $m = 0.1$



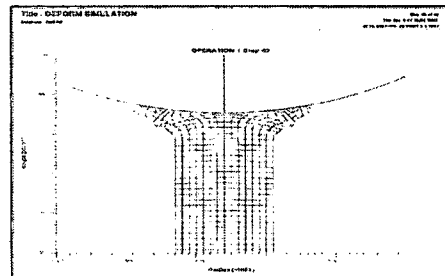
(b) friction constant $m = 0.2$



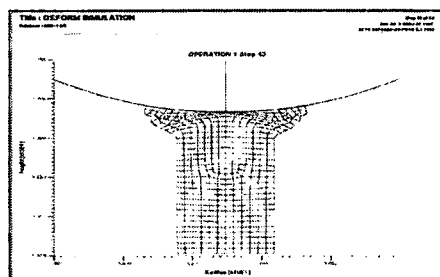
(b) friction constant $m = 0.2$



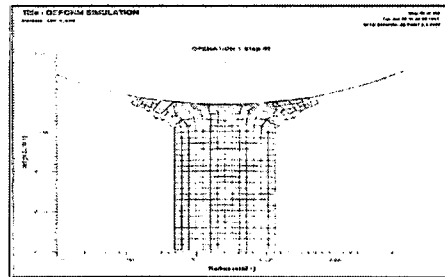
(c) friction constant $m = 0.3$



(c) friction constant $m = 0.3$



(d) friction constant $m = 0.4$



(d) friction constant $m = 0.4$

Fig. 6 Flow simulations of welded joints for each friction constant at 2000 J

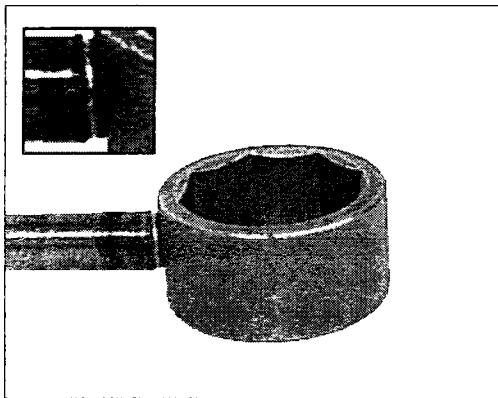
Fig. 7 Flow simulations of welded joints for each friction constant at 2500 J

마찰상수를 0.4로 한 경우 가장 좋은 용접부의 형상을 얻었다. 따라서, 입열량을 2000 J로 하고 쇼트 피닝(shot peening)이나 샌드 블라스트(sand blast) 등의 표면처리를 통하여 용접부의 마찰상수를 크게 하면 용접성 및 피로특성, 인장 등의 기계적 성질을 향상시킬 수 있을 것이다.

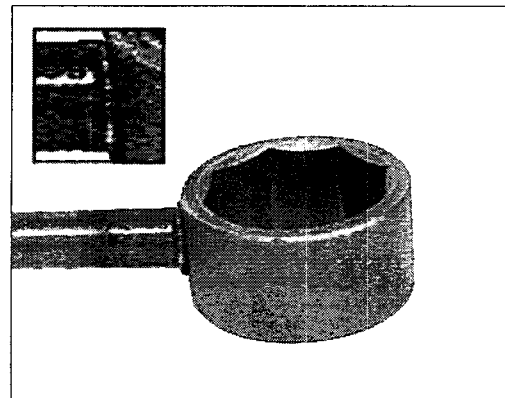
3.3 용접실험

Photos. 1, 2는 각 용접조건에 따른 용접부의 형상을 나타내는 사진으로 Photo. 1를 보면 (a)와 (b)의 경우 모두 입열량이 부족해서 용접부의 접합상태가 좋지 못하였고, Photo. 2(a)의 경우 용접부의 접합상태가 양호하지만 용접부에서 노치가 생성됨을 제시된 사진에서 관찰할 수 있다. (b)의 경우 입열량의 과다로 봉 부분의 강도가 약해져

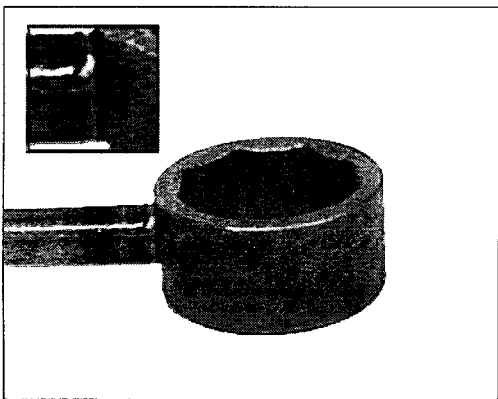
서 변형이 심하고 용접부 부근이 심하게 변색되었다. 실험 결과 가압력이 낮게 설정될수록 낮은 전류에서 날림이 발생하였다. 제 1 용접전류 및 제 2 용접전류를 각각 4.5 kA 및 9 kA로 설정한 경우 가압력이 증가할수록 날림이 사라지고 전극의 이동량 즉 봉부분의 업셋길이가 증가하며, 양호한 용접부를 얻을 수 있었다. 가압력을 2.5 bar 및 3.5 bar로 설정한 경우 양호한 용접결과를 나타내었다. 이는 적당한 통전량에서 충분한 가압력에 의해 날림량이 제어되어 적절한 용접강도를 얻을 수 있음을 의미한다. 따라서 가압력은 2.5/3.5 bar, 용접전류는 4.5/9 kA(약 2000~2500J)로 설정해야 가장 좋은 접합상태를 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 이 열량의 환산은 열의 일당량과 기계효율(50%)을 고려하여 계산하였다.



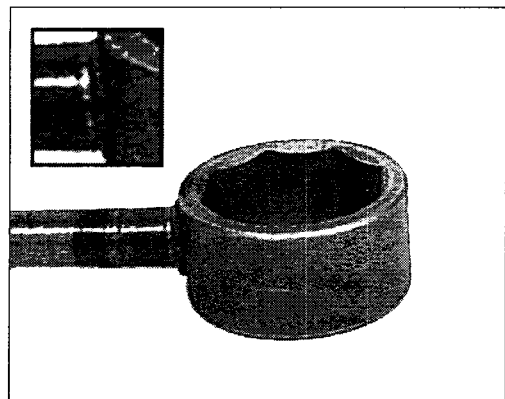
(a) pressure 1.5/2.5 bar



(a) current = 4.5/9 kA



(b) pressure 2.5/3.5 bar



(b) current = 5/9 kA

Photo. 1 Appearance of welded control links for each condition at 5/7 kA

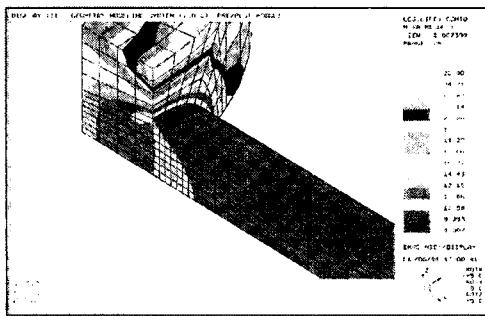
Photo. 2 Appearance of welded control link for each condition at 2.5/3.5 bar

열전도해석에서 용접시간을 0.3초, 입열량을 2000 J로 했을 때 가장 좋은 접합상태를 얻을 수 있었으며, 최고온도가 1117℃이므로 해석결과가 실제 용접결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한, 유동해석에서 예측된 용접부 노치의 생성을 실험에서도 확인할 수 있었다.

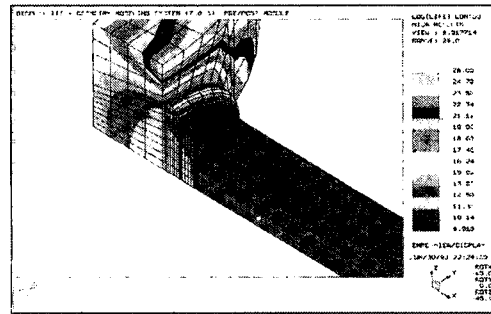
3.4 피로 해석

Figs. 8, 9는 필렛의 유무에 따라 시편의 피로해석을 피

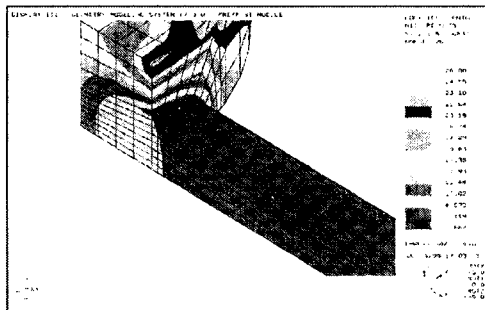
로응력 집중계수를 달리하며 해석한 결과이다. 실제 컨트롤 링크에 대한 피로파괴 기준은 $\pm 4165\text{ N}$ 의 힘으로 20만회를 수행했을 때 제품에 크랙 등의 이상이 발생하지 않아야 한다. Figs. 8, 9를 보면 필렛이 없는 경우 보다 필렛이 있는 경우 피로강도가 증가함을 알 수 있었다. 이것은 용접으로 인하여 생긴 필렛이 제품의 피로강도를 증가시킴을 의미하는 것으로 실제 용접현상과 잘 일치함을 알 수 있었다. 필렛이 없는 경우 피로에 의해 파괴되는 부분



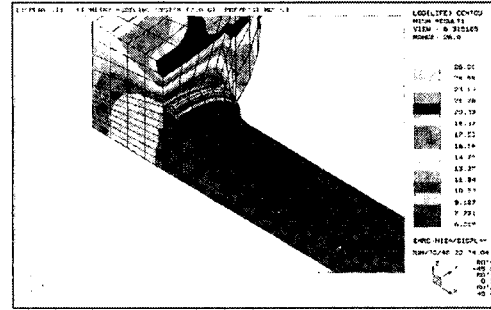
(a) fatigue stress concentration factor : 1



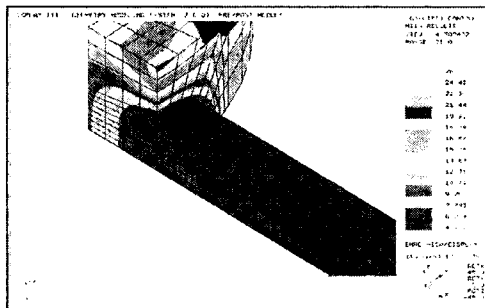
(a) fatigue stress concentration factor : 1



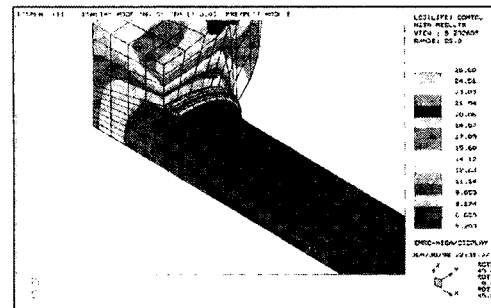
(b) fatigue stress concentration factor : 2



(b) fatigue stress concentration factor : 2



(c) fatigue stress concentration factor : 3



(c) fatigue stress concentration factor : 3

Fig. 8 Fatigue analyses of welded joints without fillet for each fatigue stress concentration factor

Fig. 9 Fatigue analyses of welded joints with fillet for each fatigue stress concentration factor

이 링 부분과 봉부분의 접합부분이지만, 필렛이 있는 경우는 목부분에서 파괴됨을 알 수 있으며, 피로응력 집중계수가 증가할수록 파괴되는 부분이 노치부위로 접근함을 볼 수 있다.

결과적으로 용접부의 노치에 의한 응력집중이 용접부의 피로강도를 저하시킴을 알 수 있으며, Fig. 9 (b)에서와 같이 응력 집중계수가 2인 경우 200만회에서 파괴가 일어나므로 제품의 피로 파괴 합격기준에 적합하다고 생각된다. 따라서, 용접부 노치의 응력 집중계수는 2이하로 하는 것이 제품의 피로파괴에 대하여 안전함을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 컨트롤 링크의 최적의 용접 조건을 얻기 위해서 NISA II 와 DEFORM을 이용하여 열전달해석, 유동해석과 피로수명해석을 하고 실제 용접실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 용접시의 링 부분과 봉 부분의 온도분포를 열전도 해석한 결과 가열조건을 설정할 때 링 부분의 강도 및 봉의 유동성을 고려하여 용접시간이 0.3초이고 입열량이 2000 J인 경우를 컨트롤 링크의 업셋용접을 위한 최적조건으로 설정할 수 있었다.
- (2) 표면의 요철이 용접성에 영향을 미치지 않는 범위 내에서 링 부분의 표면이 거칠수록 소재의 유동을 억제하여 노치 생성을 방지시킬 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 용접부 응력집중계수를 2이하로 하는 것이 피로강도 합격 기준에 적합함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- (1) A. G. Kamtekar, "The Calculation of Welding Residual Stresses in Thin Steel Plates" Int. J. Mech. Sci. Vol. 20, pp. 207~227
- (2) E. F. Rybicki, R. B. Stonesifer, "Computation of Residual Stresses Due to Multipass Welds in Piping System", ASME Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.101, pp. 149~154, 1979
- (3) 박우철, "용접부의 최적설계를 위한 강소성 열응력 해석에 관한 연구", 인하대학교 석사학위 논문, 1989
- (4) 윤병수, "아연강 강판의 저항점 용접에서 용접전류와 용접시간이 용접효율에 미치는 영향", 충남대학교 석사학위 논문, 1982
- (5) 김경진, "판형교의 용접연결부에서의 피로 강도", 강원대학교, 석사학위 논문, 1985
- (6) EMRC Korea Co., NISA II, 1996
- (7) Scientific Forming Technologies Company, DEFORMTM 2D, 1995