

---

# 강성변화를 고려한 점용접부의 준정적피로해석

이동철<sup>1</sup>, 강기원<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>군산대학교 기계공학과

## Quasi Static Fatigue Analysis of Spot Welding Component considering Change of Stiffness

Dong-Cheol Lee<sup>1</sup>, Heon Sul Jeong<sup>1</sup>, Ki-weon Kang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Kunsan Nat<sup>l</sup> Univ.

---

**요약** 점용접은 자동차 산업에서 많이 사용되어지는데 조립공정의 자동화로 인하여 경제성과 차체 중량을 높이지 않아 자동차 연비 개선효과가 있다. 그러나 차량 주행시 노면으로부터 불규칙적인 하중전달 및 진동으로 인하여 점 용접부에 응력집중이 발생하고 피로파괴가 종종 발생한다. 이에 대하여 강성변화를 고려한 점용접부의 피로수명 평가는 필수적이다. 본 논문에서는 선형정적해석을 수행하여 취약부위를 파악하였다. 점용접부의 피로특성을 획득하였고, 시간영역에서 3단계의 하중이력을 도출하여, 준정적 피로해석에 조건으로 설정하여 수행하였다. 또한 점용접부에 대한 피로수명예측 방법은 기존 방법과 피로누적으로 인한 손상방법을 적용하여 나타난 결과를 가지고 비교분석하였다.

• **주제어** : 점용접부, 선형정적분석, 하중이력, 준정적피로해석, 기계

**Abstract** Spot welding is automation of assembly process, without increasing the vehicle weight and economy, there is a fuel economy improvement of motor vehicles and to widely used in the automotive industry. But By irregular load from the road surface while at the vehicle is running, stress concentration occurs in the weld point, fatigue failure occurs frequently. Considering change of stiffness is the essential fatigue life of the evaluation spot weld. In this paper, by performing a linear static analysis was to understand the vulnerable part. Acquire to the fatigue properties of the spot weld, take the load history of the three levels in the time domain, was performed by setting as a condition of quasi-static fatigue analysis. and Fatigue life prediction method of the spot weld was by applying the method according to the fatigue damage accumulation and the conventional method was compared analyzed with the results shown.

• **Key Words** : Spot welding, Linaer static analysis, Load history, Quasi static fatigue analysis, Machine

---

### 1. 서론

점 용접(spot welding)은 대량의 박판을 효율적으로 접합하여 자동차, 가전제품 등의 생산공장에서 많이 쓰

이고 있다. 또한, 다량생산뿐만 아니라 다양한 종류 및 모양의 금속부품을 용접기로 간편하게 용접하는 것이 가능하기 때문에 여러 공장에서 널리 활용하고 있다[1]. 특히,

본 논문은 지식경제부, 한국산업기술진흥원, 호남광역경제권 선도산업지원단의 광역경제권 선도산업 육성사업으로 수행된 연구(R0001595)결과 및 산업통상자원부의 재원으로 그린 건설기계 종합 기술지원사업(No.10037378)의 수행된 연구결과물임을 밝힙니다.

\*교신저자 : 강기원(kwkang68@kunsan.ac.kr)

접수일 2013년 05월 22일 수정일 2013년 05월 31일 게재확정일 2013년 06월 03일

점용접은 자동차 산업에서 많이 사용되어지는데 차종에 따라 개수 차이는 있으나 일반적인 자동차의 제작을 기준으로 점 용접이 약 3,000~5,000여개가 사용되고, 조립공정의 자동화로 인하여 경제성과 차체 중량을 높이지 않아 자동차 연비 개선효과가 있다[2]. 그러나 차량의 차체에 접합된 점 용접부는 생산 공정의 오류로 인하여 용접 조건 등이 잘 맞지 않으면 점 용접부의 불량으로 균열이 시작되고 부식이 발생하여 차량의 점 용접부 파손 및 파괴의 문제가 될 수 있다[3]. 또한 차량 주행시 노면으로부터 불규칙적인 하중전달 및 진동으로 인하여 점 용접부에 응력집중이 발생하고 피로파괴가 종종 발생한다. 점 용접부의 피로강도는 차량의 차체에 접합된 부품의 수명을 결정하는 가장 중요한 부분 중 하나이다[4]. 실제 차량의 차체에 접합된 점 용접부의 피로파괴는 약 70% 이상이 발생하며, 이 때문에 소음과 진동이 발생하여 차량의 승차감 및 탑승인원의 안전성에 위협이 존재한다[5,6].

이러한 점 용접부의 피로파괴의 문제점을 개선하고 현실적인 수명을 예측하는 연구가 활발히 수행되고 이에 대한 피로수명 예측기술도 많은 발전을 하였다. 그 중 시뮬레이션을 이용한 피로해석 기법의 연구가 각광받고 있다. 이는 차량의 초기 개발시 요구되는 시간, 실험 횟수 및 비용을 줄일 수 있다. 이러한 기반으로 수행된 기존 점용접부 연구로는 남태현[7] 등은 최대응력을 이용한 STS30L 다중접합 점용접 이음재의 피로해석에 대해 연구를 수행하였다. 또한 유효선 등[8]은 FEM에 의한 일반 냉연강판 및 고장력강판의 점 용접 피로수명해석을 수행하였다. 이는 단일 점 용접 모델을 기반으로 수행하였으며, 자동차와 같은 다수의 점 용접이 구성된 부품에 대해 한계가 있다.

따라서 본 논문의 목적은 다수의 점 용접부를 포함한 엔진룸에 장착되는 차량 부품을 대상으로 정적방향을 고려한 준정적피로해석(Quasi static fatigue analysis)을 수행하여 피로수명을 예측하였다. 또한, 다수의 점 용접부에 대한 기존피로수명평가 방법과 피로손상 누적에 따른 피로수명평가방법을 채택하여 피로수명을 예측하였다.

## 2. 실험 및 해석방법

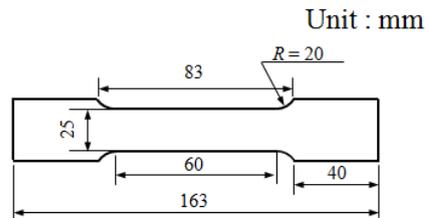
### 2.1 재료 및 시험편

본 논문의 재료는 POSCO제 아연도금강판(galvanized steel sheet)으로서 모재부는 1.3mm, 1.4mm의 두께는 갖

는다.

본 재료인 아연도금강판의 인장특성을 얻기 위한 인장실험은 KS B 0801 [10] 규격을 참조하여 설계된 Fig. 1과 같은 인장시험편을 제작하였다. 시험편의 수량은 각 7개씩 준비하였고 이에 대한 시험편을 가지고 인장실험을 수행하였다.

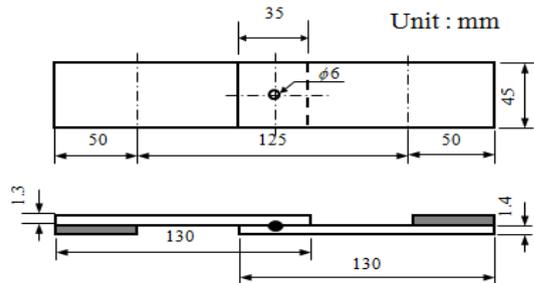
점용접부는 같은 재료로 두께 1.3mm와 1.4mm인 강판을 단일 점용접 하였으며, 인장 및 피로시험편 모두 양쪽 끝에 보강판을 덧대어 두께를 조정함으로써 경계조건에 대해 편심이 발생하지 않도록 하였다. Table 2는 용접 조건을 나타낸 것이다. 시험편의 수량은 각 12개를 준비하였다. 점용접부 인장 및 피로시험편은 KS B 0528 [11]의 규격을 참조하여 Fig. 2와 같은 시험편을 제작 하여 인장 및 피로 시험을 수행하였다.



[Fig. 1] Base specimen of tensile test

[Table 2] Spot welding condition

	current (kA)	pressure (kgf)	tip dressing	nugget diameter (mm)
passed product	9.8	350	150 holding/1	6~7



[Fig. 2] Spot welding of specimen

### 2.2 모재부 및 점용접부의 인장 및 피로실험

#### 2.2.1 모재부 인장실험

아연도금강판에 대한 모재부의 인장특성을 획득하기

위해 인장실험을 수행하였다.

인장시험기는 Fig. 3과 같은 Instron사의 8801이며 인장시험 조건은 실온대기조건하에서 크로스 헤드속도 2mm/min으로 설정하였다.

이 때 변형률은 50mm의 표점 거리(gauge length)를 갖는 변위 계측기를 사용하여 측정하였다. 각각의 시험편에 대해 KS B 0802[12]를 참조하여 7개씩 인장시험을 수행하였다.



[Fig. 3] Hydraulic testing machine

### 2.2.2 점용접부 피로시험

아연도금강판의 점용접부에 대해 피로특성을 획득하기 위해 피로시험을 수행하였다. 사용한 장비는 Instron사의 8801(Fig. 3)이며 점용접부의 피로시험은 실온 대기 조건하에서 응력비 R=0.1, 하중속도 15Hz로 피로시험조건을 설정하였다. 총 12개의 시험편을 가지고, 모재부의 인장시험결과에서 획득한 인장강도에 따른 하중비를 설정하였다. 총 6수준의 피로하중(fatigue load)을 선정하고 한 수준의 피로하중당 시험편 2개씩을 사용하여 피로특성을 평가하였다. 피로한도(fatigue limit)  $3 \times 10^6$  cycles로 정의하였고, KS B 0528[12]의 규격 따른 피로시험을 수행하였다.

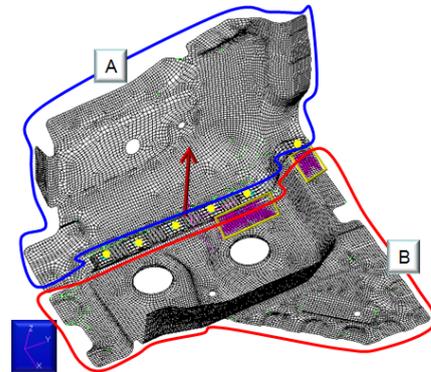
## 2.3 유한요소법을 이용한 준정적피로해석 방법

### 2.3.1 선형정적해석

구조해석의 범용 상용코드인 MSC Patran[13]/Nastran ver.2012[14]버전을 이용하여 선형정적해석을 수행하였다. 요소는 해석의 간편함과 효율성을 위해

shell 요소를 설정하였고 메쉬 격자 요소로는 Quad 4 및 Tri 3 요소를 사용하였다. 특히, 점용접부의 형상을 정확히 구현하기위해 Quad 4 요소만 사용하여 메쉬격자를 형성하였고, 이러한 이유는 점용접부의 강성을 평가에 대해서 신뢰성 없는 결과를 나타낼 수 있다. 또한 점용접의 평가에 대해서 최적의 결과를 획득하기위해 점용접 너트의 지름보다 2배이상의 박판 길이를 설정하였다[15]. Fig. 4는 이에 대한 자동차 부품의 전체모델링을 나타내었으며 A-sheet는 1.3mm의 두께를 가지고 있으며 B-sheet는 1.4mm의 두께를 가지고 있고 질량은 1.4kg이다. 재료의 물성은 모재부 인장시험에서 획득한 1.3mm와 1.4mm의 탄성계수 및 푸아송비는 각각 185.7GPa, 195.3GPa이고 0.3으로 설정하였다.

전체 모델의 요소 및 절점은 20097개 요소 및 20544개 절점으로 구성 되었으며, 경계 및 하중 조건은 모델전체에 관성하중 1g를 부여하였고, MPC 요소 2개를 사용하여 점용접부에 대한 최대응력유도를 위해 설정하였다. 또한 Nastran[14]의 점용접부의 특화 요소인 cweld 요소를 사용하여 너트지름 6mm인 총 6개의 점용접부를 구현하였다.



[Fig. 4] FE-model

### 2.3.2 준정적 피로해석

준정적 피로해석을 수행하기 위해 상용코드인 MSC Fatigue ver.2012[16]를 사용하였으며, 시간영역에서의 정적방향의 특성을 고려한 선형정적해석결과, 시간영역에서의 하중이력, 모재부 인장특성과 점용접부의 피로특성을 입력하였고, 이때 준정적 피로해석에서 하중선정 방법을 살펴보면 피로해석 방법은 시간영역에서 전체 피로 수명을 산출하는 S-N법을 설정하였다.

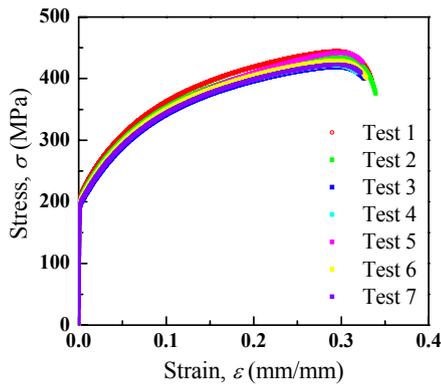
이는 차량부품의 피로해석에 있어서 피로수명이 길며 소성변형영역이 상대적으로 작기 때문이다[17]. 또한 von-Mises 응력 및 평균응력영향을 고려하기 위해 Goodman을 설정하여 준정적피로해석을 수행하였다.

### 3. 실험 및 해석결과

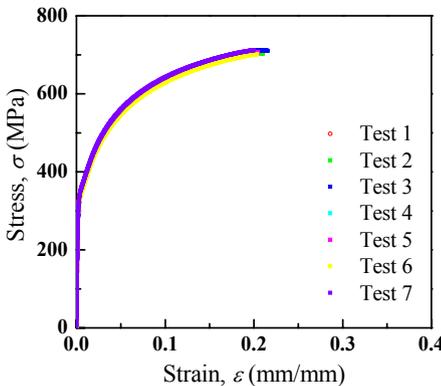
#### 3.1 모재부 및 점용접부의 인장 및 피로실험

##### 3.1.1 모재부 인장특성

모재부 인장시험은 1.3mm 및 1.4 mm의 두께를 가지는 시험편을 대상으로 각각 7개씩 수행하였다. 이 때 변형률은 50mm 의 표점 거리(gauge length)를 갖는 변위계측기를 사용하였고, 측정된 결과는 Fig. 5과 같은 응력-변형률 선도로 결과를 도출하였다. Table 3은 평균 값을 나타내며 결과는 다음과 같다.



(a)  $\sigma - \epsilon$  curves for 1.3mm



(b)  $\sigma - \epsilon$  curves for 1.4mm

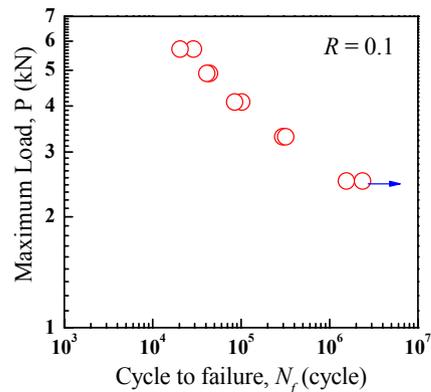
[Fig. 5] Base specimen of  $\sigma - \epsilon$  curves

[Table 3] Base specimen of tensile test mean results

specimen	Elastic modulus (GPa)	Stress at Yield (Offset 0.2 %) (MPa)	Tensile stress (MPa)	Break Stain (%)
1.3mm	185.7	203.1	337.1	42.6
1.4mm	195.3	332.7	592.1	27.5

##### 3.1.2 점용접부 피로특성

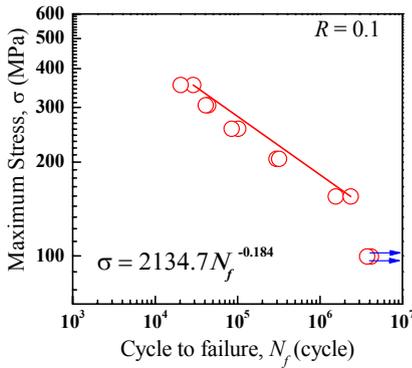
점용접부의 피로시험은 Fig. 6과 같이 하중-수명( $P - N$ ) 선도를 획득하였다. 하중-수명( $S - N$ ) 선도 데이터는 점용접부에 가해지는 하중이 인장-전단 하중이므로 응력-수명데이터를 획득하기 어렵다. 이를 가지고 유한요소법을 이용한 응력-수명 데이터를 획득하기 위한 기초 데이터를 정립하였다.



[Fig. 6]  $P - N$  curves for spot weld specimen

##### 3.1.3 유한요소법을 이용한 응력-수명 결과 도출

일반적으로 임의 피로하중을 가하여 피로파괴까지 도달하게 될 때 재료에 대한 피로하중은 탄성영역 구간에서 발생된다. 또한 점용접부는 인장-전단의 하중을 받기 때문에 직접적으로 응력-수명 결과를 도출하기가 어렵다. 이러한 한계점을 극복하고자 점용접부의 인장시험을 수행한 결과와 유한요소법을 이용하여 같은 시험편과 하중 및 경계조건을 부여하고 이에 대한 결과를 비교하고 그 다음으로는 앞서 점용접부에 대한 피로시험 통해 획득한 하중-수명 데이터를 가지고 유한요소해석을 이용하여 응력-수명 선도를 획득한다[5].



[Fig. 7] Spot weld specimen for S-N curve

이러한 과정을 통해 획득한 본 재료의 점용접부 응력-수명 대한 관계식은 식 (2)와 같고, Fig. 7은 이에 대한 응력-수명 선도 이다.

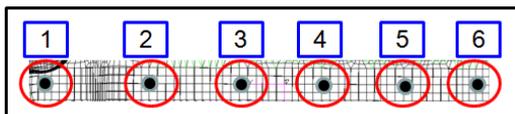
$$\sigma = 2134.7 N_f^{-0.184} \quad (2)$$

여기서  $\sigma$ 는 임의 응력이고,  $N_f$ 는 임의 응력에 대한 수명을 나타낸다.

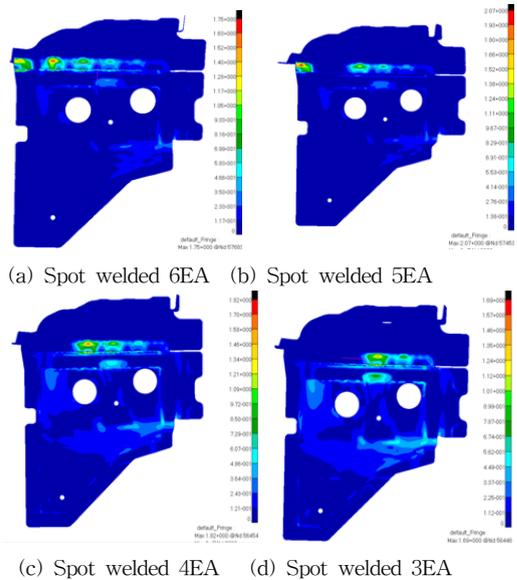
### 3.2 유한요소법을 이용한 준정적피로해석 결과

#### 3.2.1 선형정적해석

준정적 피로해석에서 필수적으로 요구되는 선형정적 해석을 수행하였다. Fig. 8은 본 논문 연구모델의 점용접부를 면밀히 나타내었고, 총 6개의 점용접부에 대해 정적 해석을 수행하였다. 최대응력은 Fig. 9(a)에서 확인할 수 있듯이 2번째 점용접부에서 최대응력 1.75MPa이 발생하였으며 이 두 번째 점용접부를 제거하고 총 5개 점용접부에 대해 정적해석을 재수행한 결과 Fig. 9(b)와 같이 첫 번째 점용접부에서 최대응력 2.07MPa이 발생하였다. 같은 방법으로 점용접부 4개, 3개를 포함하였을때 정적 해석을 수행한 결과 각각 3번째, 4번째 점용접부에서 최대 응력 1.82MPa 및 1.69MPa이 발생하였고, 그 위치는 Fig. 9(c) 및 (d)와 같다.



[Fig. 8] Position of component spot weld



[Fig. 9] Static analysis results

#### 4.2.2 준정적피로해석

준정적 피로해석을 수행하기 앞서 요구되는 데이터는 선형정적해석결과와 시간영역의 하중이력데이터, 점용접부의 시편에 대한 피로특성데이터가 필요하다.

피로하중이력은 ASTM 4728-06[18]의 규격을 참조하여 3단계 레벨의 PSD에서 획득한 G-T데이터를 가지고 하중이력을 획득하였다.

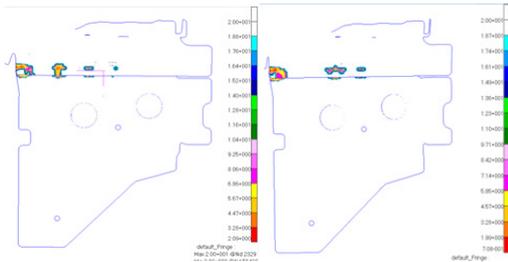
이를 준정적피로해석에 설정하여 수행한 결과 Fig. 10(a)와 같이 총 6개 점용접부를 포함한 연구모델은 2번째 점용접부에서 최소수명이 발생하였으며

최소 수명이 발생한 점용접부를 제거하고 Fig. 10(b)에서 확인할 수 있듯이 총 5개 점용접부일 때 연구모델의 준정적피로해석을 재수행한 결과 첫 번째 용접부에서 최소수명이 발생하였다.

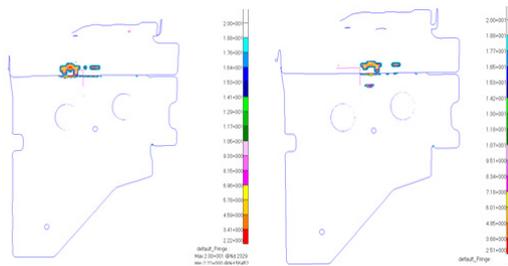
같은 방법으로 총 4개 및 3개 점용접부를 포함한 연구 모델에 대해 준정적 피로해석을 수행한 결과 4개의 경우 Fig. 10(c)와 같이 3번째 점용접부에 최소수명이 발생하였으며, 3개의 경우 Fig. 10(d)와 같이 4번째 점용접부에서 최소수명이 발생하였다.

여기서 6개 점용접부에 대한 결과는 기존 점용접부 피로수명을 예측하는 결과에 기준이 되고 본 논문에서 제시한 점용접부 피로수명 평가방법은 6개부터 3개까지 최소수명 발생한 점용접부에 대해서 결과를 도출하여 3단계 PSD 하중레벨에 대하여 피로수명을 정리하여 Table

5에 나타내었다.



(a) Spot welded 6EA (b) Spot welded 5EA



(c) Spot welded 4EA (d) Spot welded 3EA

[Fig. 10] Contour of qua-si static fatigue results

[Table 5] Qua-si static fatigue analysis results

	Failure position	Traditional method of Quasi static fatigue analysis	Proposed method of Quasi static fatigue analysis
		Life	
0.05 PSD of load history	2	$2.50 \times 10^7$	$2.50 \times 10^7$
	1	$2.17 \times 10^8$	$2.68 \times 10^7$
	3	$5.47 \times 10^{10}$	$7.67 \times 10^7$
0.08 PSD of load history	2	$1.89 \times 10^5$	$1.89 \times 10^5$
	1	$1.77 \times 10^6$	$2.05 \times 10^5$
	3	$3.87 \times 10^8$	$5.74 \times 10^5$
0.11 PSD of load history	2	$3.61 \times 10^4$	$3.61 \times 10^4$
	1	$3.37 \times 10^7$	$3.83 \times 10^4$
	3	$9.73 \times 10^7$	$1.37 \times 10^5$

제거하여 피로수명을 평가하는 이유는 차량의 점용접부가 파손시 점용접부의 피로누적에 따른 점용접 수명을 정확히 예측하기 위함이다. 이를 살펴 보면 기존의 점용접부 수명 평가는 점용접부의 파손 및 파괴에 대한 고려를 하지않아 수명이 높게 예측되었으며 본 연구에서 제시된 해석 절차에 따라 수행한 결과는 기존 평가방법에 비해 수명이 낮게 예측되었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강성변화를 고려하여 점용접부의 피로수명을 예측하였다. 또한 기존 점용접부의 피로수명 예측방법과 제시한 방법을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) POSCO제 아연도금강판의 모재부 인장특성 및 점용접부의 인장 및 피로특성을 획득하였다. 특히, 유한요소법을 이용하여 응력-수명 선도를 도출하였고 이에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\sigma = 2134.7N_f^{-0.184}$$

(2) 기존 점용접부의 피로수명 평가방법과 본 연구에서 제시한 방법과 비교분석 하였다. 이에 대하여 기존 점용접부의 피로수명 평가방법은 피로수명이 높게 예측되었고 제시한 방법은 피로수명이 낮게 예측되어 현실적으로 적합한 결과를 제시하였다.

#### REFERENCES

- [1] Kim, M. J., 1993, Resistance welding, Kimoonsa, pp. 129-130.
- [2] Eom, et al., "Study on optimization of spot welds arrangement for structural rigidity", Transactions of the KSME, pp. 106-109, 2006.
- [3] Na, et, al., "Study on Characteristics of Weldability for the Spot Weld Region of the Car Body", Transactions of the KSAE, pp. 57-61, 2013.
- [4] Barkey, et al., "Failure modes of single resistance spot welded joints subjected to combined fatigue loading", Int. J. Mater. Prod. Tec., Vol. 16, No. 6-7, pp. 510-527, 2001.
- [5] Jang., "Fatigue life Evaluation on Change of Dynamic Response for Spot welded Structures" , master of degree Thesis, Department of Mechanical Design and Production Engineering Graduate School, Hanyang University, 2010.
- [6] Lee., "Frequency domain fatigue analysis of spot welding considering vibration effect of vehicle structure", master of degree Thesis, Department of

Automotive Engineering Graduate School, Kookmin University, 2003.

- [7] Nam, et al., "Fatigue Analysis of Spot-welded Multi-Lap Joint of STS301L Using the Maximum Stress", Transactions of the KSAE, Vol. 11, No. 6, pp. 101-107, 2003.
- [8] Yu, et al., "Fatigue Life Analysis of Spot Weldment of Cold Rolled and High Strength Steel Using FEM", Transactions of the KSME, Vol. 17, No. 5, pp. 58-63, 2008.
- [9] KS B 0801, "Method of Tensile Test for Metallic Materials", Korean Standard, 2003.
- [10] KS B 0528, "Method of Fatigue Testing for Spot Welded Joint", Korean Standard, 2001.
- [11] KS B 0802, "Method of Tensile Test for Metallic Materials", Korean Standard, 2003.
- [12] MSC. Software, MSC.Patran Users guide, Ver2012, 2006.
- [13] MSC. Software, MSC. Nastran Users guide, Ver 2012, 2004.
- [14] Joo, et, al., "Performance Evaluation for the Methods of Spot Weld Modeling Considering Durability", Transactions of the KSME, Vol. 29, No. 8, pp. 1153-1160, 2005.
- [15] MSC. Software, MSC. Fatigue. Quick Start Guide, Ver 2012, 2004.
- [16] Lee., "Frequency domain fatigue analysis of spot welding considering vibration effect of vehicle structure", master of degree Thesis, Department of Automotive Engineering Graduate School, Kookmin University, 2003.
- [17] ASTM D 4728-06, Random vibration testing of shipping container 2006.

저자소개

강 기 원(Ki-Weon Kang)

[비회원]



- 1991년 ~ 1996년 : 대우자동차 안전시험 주임연구원
- 1993년 2월 : 한양대학교 한양대학원 기계설계학과(기계설계학석사)
- 2001년 2월 : 한양대학교 한양대학원 기계설계학과(기계설계학박사)
- 2001년 ~ 2008년 : 스포츠과학 연구원 책임연구원
- 2004년 ~ 2008년 : 두원공과대학 겸임교수
- 2008년 ~ 현재 : 국립 군산대학교 부교수

<관심분야> : 복합재료, 피로

이 동 철(Dong-Cheol Lee)

[비회원]



- 2012년 2월 : 국립 군산대학교 기계자동차공학부(기계디자인전공)
- 2012년 3월 ~ 현재 : 국립 군산대학교 기계공학과 석사과정

<관심분야> : 금속재료, 피로해석