

압연롤강의 취성과파괴 방지를 위한 열처리 온도에 따른 충격치 변화에 관한 연구 (II) -수명향상을 위한 국산과 외산소재의 물성과 파괴특성비교 -

서창민* · 서민수** · 오상엽***

*경북대학교 공과대학 기계공학부

**국민대학교 공과대학 신소재공학부

***경북대학교 과학기술대학 자동차공학부

Variation of Impact Values by Heat Treatment Temperature to Prevent Brittle Fracture of Roll Shell Steel (II) -Comparison of properties between domestic and French-made products-

Chang-Min Suh*, Min-Soo Suh** and Sang-Yeob Oh***

*School of Mechanical Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

** School of Advanced Materials Engineering, Kookmin University, Seoul, Korea

*School of Automotive Engineering, Kyungpook National University, Sangju, Korea

KEY WORDS: Impact test 충격시험, Heat treatment 열처리, Roll Shell steel 압연롤강, Brittle fracture 취성과파괴, Tempering 템퍼링

ABSTRACT: This study carried out a series of experiments involving impact tests (Drop weight type & Charpy type with a standard specimen and newly designed I-type specimen), hardness tests, and fracture surface observations of French-made roll shell steel (F), abnormal roll shell steel (M), reheated roll shell steel (R), and S25C steel under heat treatment conditions (570 °C) to analyze the cause and prevent the roll shell steel's brittle fracture and its damage.

1. 서 론

연속주조 과정 중 롤셸강 (Roll shell steel)의 취성과파괴(Brittle fracture)에 의한 조기파손으로 인하여 용탕의 폭발 등 안전사고의 위험뿐만 아니라 생산 차질 및 롤셸 구입 비용의 증가에 따른 원가상승이 발생한다. 선행연구(서창민 등 2011)는 국산 롤셸에 한정되었기 때문에 품질을 더욱 향상시키기 위해서는 품질이 매우 우수하였던 외산(프랑스) 롤셸과 국산의 저질 롤셸과 이를 재열처리한 재료의 충격치, 경도치 등을 파괴역학(Fracture mechanics)적으로 체계적인 비교, 분석을 통하여 품질과 수명을 외산 수준으로 향상시킬 방안을 강구할 필요가 있다.

기초물성조사를 위하여 본 연구에서는 외산 롤셸강(F재), 국산 Abnormal 롤셸강(M재), M강을 재열처리한 R재와 S25C강재에 관하여 경도시험, 충격시험, 전자현미경에 의한 표면관찰, 거시적인 표면관찰 등 일련의 실험을 통한 연구를 실시, 그 결과를 비교, 분석하였다.

본 연구에서는 충격치를 측정하면서 4가지 재료특성을 각각 파악하여 선행연구의 실험결과와 비교, 검토하였다. 즉

- 1) 롤셸강재(외산과 국산, 재열처리한 것)와 S25C강재의 충격치와 경도변화와의 관계
- 2) 전자현미경에 의한 미시적인 표면관찰과 거시적인 표면관찰
- 3) 노치부의 형상(표준 V형과 새로고 고안된 I형)에 따른 충격저항의 변화
- 4) Drop weight (DW) impact testing machine과 Charpy충격 시험기를 사용하여 얻은 충격값과 분석자료의 특징을 비교, 분석

2. 실험 방법과 시험편

본 연구에서는 선행연구와 같이 Fig. 1과 같은 표준 V형 시험편과 본 연구에서 고안된 I형 시험편으로 낙하(DW)식 시험기를 주로 사용하여 충격시험을 실시하고, 또 샤르피 충격시험기를 사용하여 두 시험기 사이의 특징을 비교하였다. 시험편 규격은 다음과 같다(한국 공업규격).

표준시험편의 dimension : 깊이=2mm, R=0.25mm, 55x10x10mm

I형 시험편의 dimension : 깊이=2mm, R=0.125mm, 55x10x10mm

Fig. 1의 왼쪽은 노치깊이 2mm인 표준 V형 충격시험편 ($R=0.25\text{mm}$)을, 오른쪽의 I형 시험편($R=0.125\text{mm}$)은 노치부를 두 배 예민하게 제작하여 그 충격치를 비교하기 위해 선행연구에서 고안된 새로운 충격시험편이다. 또 사용된 시험편의 화학적인 성분도 선행연구(서창민 등, 2011)와 거의 같다. 이 목적은 롤셀강에 발생, 성장하는 피로균열($R=0.00\text{mm}$)이 표준 충격시험편($R=0.25\text{mm}$)보다 노치부가 매우 예민하기 때문이다(신동진, 1996; 우창기 등 1999). 노치의 형상가공은 수치제어를 하는 Wire cutter기를 사용하는 전문업체에 의뢰하여 정밀하게 가공하였다.

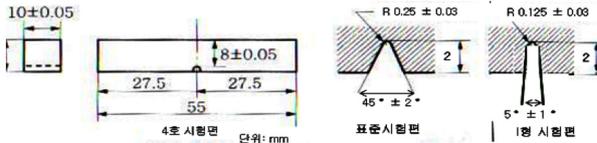


Fig. 1 Configuration of V-type and I-type impact specimen

따라서 본 연구에 사용되는 충격시험편은 롤셀강재에 따라 다음과 같이 3가지로 나누었고 참고재료로 S25C강을 사용하여 그 종류를 나열하였다.

- 1) 외산 롤셀강재(F재; F1, F2, F3, F4)
- 2) Abnormal 롤셀강재(M재; M1, M2, M3, M4)
- 3) Abnormal 롤셀강재를 재열처리한 R재(R1, R2, R3, R4)
- 4) 참고재료; S25C강재(10개)

3. 연구결과

3.1 충격시험 자료분석

3.1.1 3가지 롤셀강재의 Drop Weight식 충격치 비교

Fig. 2(a)는 외산 롤셀강재(F1, F3)의 KS 표준시험편인 V형 노치와 본 연구에서 제안한 I형 노치재 충격시험편의 충격에너지(J)를 충격시간에 따라 비교한 것이다. I형은 44.27J, V형은 46.51J로 V형의 경우 충격에너지가 I형 노치보다 5.1% 더 크므로 충격 에너지가 많이 소요되었다. 즉 노치가 둔할수록 많은 충격 에너지가 소요된다. 만일 피로균열인 경우에는 I형 노치보다 균열선단이 매우 예민하므로 더욱 작은 에너지로 파단 가능함을 알 수 있다.

Fig.2(b)는 Abnormal 롤셀강재(M1, M3)의 충격치를 V형과 I형재의 충격에너지, J(이하 J로 표현)를 충격시간에 따라 비교한 것이다. 이 M재의 평균치(29.65J)는 외산 롤셀강재(평균치; 45.39J)보다 34.7% 낮은 충격에너지에 파괴되었다. 또 I형은 25.31J, V형은 33.99J로 V형의 경우 J가 I형보다 34.3% 더 크며 Fig. 2(a)의 경우와 같다.

Fig. 2(c)는 Abnormal 롤셀강 M재를 재열처리한 R재(R1, R3)의 충격치를 V형과 I형 J를 충격시간에 따라 비교한 것이다. 이 R재의 평균치(32.76J)는 외산 롤셀강재(평균치; 45.39J)보다 27.8% 낮은 충격에너지에 파괴됨을 알 수 있었다. 재열처리한 R재의 평균치(32.76J)는 M재의 평균치(29.65J)보다 10.5% 정도 증가하였지만 양질의 외산보다 충격치가 낮았다.

3.1.2 S25C의 V형 및 I형 시험편의 DW식 충격치의 변화

Fig. 3(a,b)는 S25C강의 V형과 I형의 J를 시간에 따라 각각 비교한 것이다. 이 재료는 연성이 크므로 V형은 21.08J, I형은 21.04J로 노치형상의 영향이 매우 낮다. 또 충격치와 충격곡선도 충격에너지가 낮은 Fig. 2(b)의 Abnormal 롤셀강재(M1, M3)의 그림과 달리 충격에너지가 높은 Fig. 2(a)의 외산 롤셀강재(F1, F3)와 유사한 형태이다.

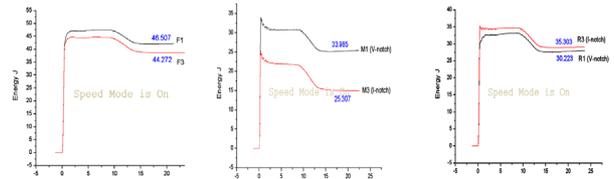


Fig. 2 Comparison of drop weight (DW) impact values between three kinds of roll shell specimen (France, abnormal RS specimen, reheated specimen from the abnormal RSS)

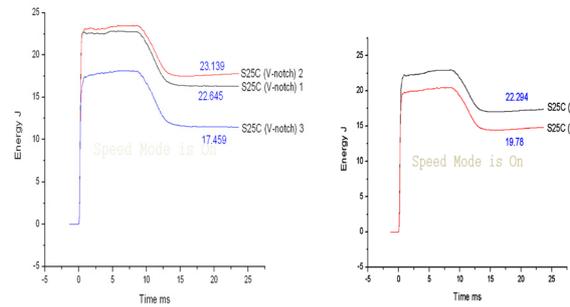


Fig. 3 Comparison of DW impact values untreated S25C of V with I-type specimen

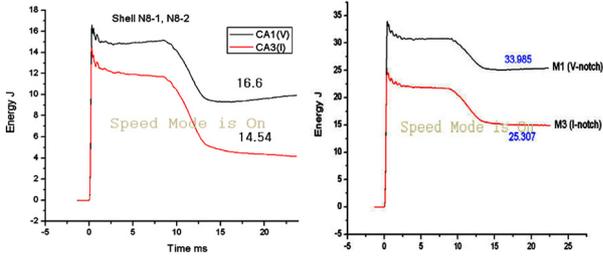
3.1.3 본 과제에서 실시된 4가지 시험편의 DW식 충격치의 비교

이상의 실험결과와 같이 외산 롤셀강재(F1, F3)가 가장 큰 충격치를 나타내었고, 그 다음으로 Abnormal 롤셀강재를 재열처리한 R재(R1, R3)가 높은 충격치를, Abnormal 롤셀강재(M1, M3)가 3가지 롤셀강의 시험편중에서 가장 낮은 충격에너지를 나타내었다. 그리고 5개의 S25C강의 충격시험편은 매우 근사한 충격에너지 곡선을 얻었다.

또한 충격저항이 낮은 시료 M재에서는 V형 노치보다 I형 노치에 보다 매우 예민함을 알 수 있고 충격저항이 큰 F재, 재열처리한 R재 및 S25C강은 그 차가 적은 편이다. 또 Abnormal 롤셀강재(M1, M3)의 그림은 충격에너지가 낮기 때문에 다른 시험편과 달리 충격에너지 곡선의 면적이 급하게 감소하는 형태를 나타내고 있다. 그러나 Charpy식은 Fig. 2와 같은 DW식 충격

치는 이러한 J 의 변화를 충격시간에 따라 비교할 수 없어 취약한 재질임을 판단하기가 불가능하므로 분석용으로 불편한 편이다.

3.1.4 Abnormal 롤셀강(M재)와 선행연구 Abnormal 강재의 DW 식 충격치의 비교



(a) DW impact values of abnormal RS specimen (M; V & I). (b) DW impact values of the RS specimen.

Fig. 4 Comparison of DW impact values between the France-made with abnormal RS specimen

Fig. 4(a)와 같은 선행연구 Abnormal 롤셀강(C재)의 V형 및 I형 시험편의 DW식 충격치와 Fig. 2(b)의 Abnormal 롤셀강재(M재)와 비교하면, 두 그림에서 M재와 C재는 매우 유사한 곡선을 나타내었다. 특히 두 경우 모두 V형 노치와 I형 노치의 영향이 매우 크며 충격에너지 곡선이 급하게 감소하는 형태를 나타내고 있다.

3.1.5 외산과 국산 Normal 롤셀강의 DW식 충격치의 비교

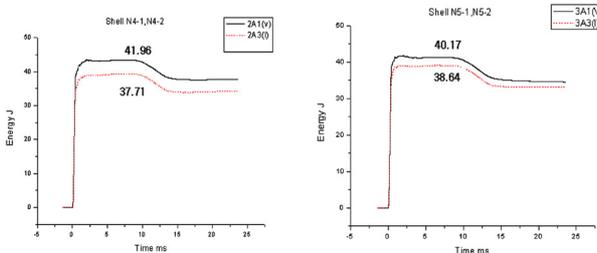


Fig. 5 Comparison of DW impact values of the normal RS specimen (2A, 3A) between V & I-type of the proceeding study

Fig. 5는 선행연구 국산 Normal 롤셀강재(2A, 3A)의 충격에너지(J)를 충격시간에 따라 비교한 것이다. 선행연구 2A, 3A를 Fig. 2(a)의 외산 Normal 롤셀강재(F1, F3)와 비교하면, 평균 충격치는 외산이 크고, 두 재료의 충격에너지와 충격시간의 관계는 매우 유사하였지만, M재와 같이 충격에너지 곡선이 급하게 감소하는 형태를 나타내지 않았고, 또한 노치형상의 영향도 적은 편이다.

3.2 재질(F재, M재, R재 및 선행연구)과 충격에너지와의 관계

3.2.1 F재, M재 및 R재의 DW식과 Charpy식 충격치의 비교

Fig. 6은 외산 롤셀강재(F재), 국산 Abnormal 롤셀강재(M재), Abnormal 롤셀강재를 570°C에서 재열처리한 R재 및 공업용으로

널리 사용하는 S25C재의 충격에너지의 scatter band를 각각 나타내었다.

이 그림에서 F재의 Charpy충격치(49.68J, 48.92J)의 평균치 49.3J는 Drop weight식 충격자료(46.51J, 44.27J)의 평균치 45.39J보다 약간 높은 값을 나타내었지만 두 평균치의 재평균치는 47.35J이며 그 Scatter band는 다른 재료보다 적다.

M재의 Charpy충격치(30.79J, 24.33J)의 평균치 27.56J는 DW식 충격자료(33.99J, 25.31J)의 평균치 29.65J보다 약간 낮은 값을 나타내었지만 두 평균치의 재평균치는 28.61J이다. 따라서 F재에 비하면 M재의 평균충격치는 39.6%로 매우 낮은 값인 것이다.

이 M재를 570°C에서 재열처리한 R재의 Charpy충격치(43.12J, 38.84J)의 평균치 40.98J는 DW식 충격자료(30.22J, 35.3J)의 평균치 32.76J보다 약간 높은 값을 나타내었지만 두 평균치의 재평균치는 36.87J이다.

따라서 M재에 비하면 R재의 평균충격치는 28.9%로 크게 상승하게 되었다. 또 R재의 평균충격치를 외산 F재의 평균치 47.35J에 비교하면 28.4% 낮은 값이므로 좀 더 재열처리조건을 잘 선택, 실시하면 외산 롤셀강에 손색이 없는 인성이 양호한 롤셀강을 개발 가능할 것으로 사료된다.

3.2.2 M재와 선행연구 Abnormal 롤셀강의 충격치의 비교

Fig. 6에는 Abnormal 롤셀강재(M재)와 선행연구의 Abnormal 롤셀강재들의 충격에너지의 Scatter band를 각각 도시하였다. 이 그림에서 M재의 충격에너지의 평균치는 28.61J이지만 선행연구에 사용된 Abnormal 롤셀강재들의 충격에너지(29.71J, 21.73J, 15.9J, 9.36J, 16.6J, 14.54J)는 Scatter band가 매우 심하였고, 큰 값과 제일 적은 값에는 3.2배의 차도 있었지만 그 평균충격치는 18.0J 정도이며 M재에 비하여 37.1%의 차가 있다.

따라서 본 과제에서 사용된 Abnormal 롤셀강재(M재)는 선행연구에 사용된 Abnormal 롤셀강재들에 비하면 품질이 나쁘지는 않은 것으로 사료된다.

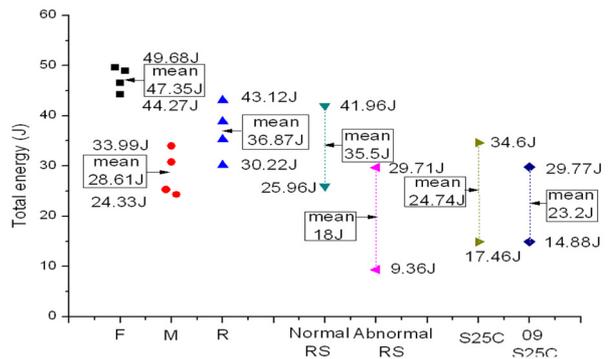


Fig. 6 Relation of impact energy to 7 kinds of specimens; the France-made (F), Abnormal RSS (M), reheated specimen from abnormal RSS (R), the abnormal RSS of the proceeding study, the normal RSS of the proceeding study, S25C and S25C of the proceeding study

3.2.3 R재와 선행연구 Normal 롤셀강재의 충격치의 비교

Fig. 6에는 M재를 재열처리한 R재와 선행연구의 Normal 롤

셀강재들의 충격에너지의 Scatter band도 각각 도시하여 나타내었다. 이 그림에서 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재들의 충격에너지(36.28J, 32.73J, 41.98J, 37.71J, 40.17J, 38.64J, 25.96J, 29.95J, 39.96J, 35.74J, 38.11J, 29.4J)는 Scatter band가 다소 심하였고, 큰 값과 제일 적은 값에는 1.6배의 차도 있었지만 그 평균 충격치는 35.5J 정도이며 R재의 충격에너지의 평균치는 36.87J에 비하여 3.9%로 거의 차가 없다(Strnadell and Hausild., 2008).

따라서 본 과제에서 사용된 Abnormal 롤셀강재(M재)를 재열처리한 R재는 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재들에 비하여 유사한 충격특성을 나타내었다. 즉 M재를 선행연구의 결과에서 나타난 재열처리조건을 잘 선택, 실시하면 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재에 손색이 없는 인성이 양호한 롤셀강을 얻을 수 있을 것이다.

3.2.4 S25C재와 선행연구 S25C재의 충격치의 비교

Fig. 6에는 본 과제에서 사용된 S25C재와 09년도에 실시된 선행연구에 사용된 S25C강재들의 충격에너지의 scatter band를 각각 나타내었다. 이 그림에서 본 과제의 S25C재의 J의 평균치는 24.74J이며 선행연구의 23.2J로 9.2%로 약간의 차가 있다. 따라서 본 과제의 충격시험은 선행연구와 같은 재질로 잘 진행되었음을 확인 가능하다.

3.3 재질(F재, M재, R재 및 선행연구)과 경도치와의 관계

3.3.1 F재, M재 및 R재의 비커스 경도치의 비교

Fig. 7은 외산 롤셀강재(F재), 국산 Abnormal 롤셀강재(M재) 및 M재를 재열처리한 R재의 비커스 경도치의 Scatter band를 각각 나타내었다.

이 그림에서 F재의 비커스 경도치는 15회 측정(최고치 439.4, 최저치 377.7)하여 평균치 411.01이다. M재의 비커스 경도치는 15회 측정(최고치 511.9, 최저치 471.2)하여 평균치 496.92이다. 따라서 F재에 비하면 M재의 비커스 평균경도치는 20.9%로 높은 값으로 M재가 경(Hard)함을 나타낸다.

이 M재를 재열처리한 R재의 비커스 경도치는 15회 측정(최고치 435.1, 최저치 388.3)하여 평균치 410.7이므로 R재에 비하면 M재의 평균비커스 경도치는 21%로 높았다. 또 R재의 평균비커스 경도치는 F재의 평균 경도치와 거의 같았다.

이상 3가지의 재료에 관한 비커스 경도치의 특성은 충격치가 가장 큰 양질의 외산 롤셀강재(F재)는 Abnormal 롤셀강재를 재열처리한 R재와 매우 유사한 값을 나타내었고, Abnormal 롤셀강재(M재)는 충격치가 가장 낮게 나타나서 경도치로 인성을 평가할 수 없다. 또한 경하면 충격인성이 낮아짐을 알 수 있다. 즉 충격에너지가 큰 재료는 경도치가 낮았고, 충격에너지가 적은 재료는 경도치가 높은 경향을 나타내었다.

3.3.2 M재와 선행연구 Abnormal 롤셀강재의 경도치의 비교

Fig. 7에는 본 과제에서 사용된 M재와 선행연구에 사용된 Abnormal 롤셀강재들의 경도치의 Scatter band를 각각 도시하여 나타내었다. 이 그림에서 M재의 평균 경도치는 496.92이지만 선행연구에 사용된 Abnormal 롤셀강재들의 경도치(최고치 520.9, 최저치 467.5)는 Scatter band가 심하였지만 그 평균 비커스 경

도치(6개 시험편으로 평균)는 493.3으로 평균비커스 경도치는 서로 거의 같았다.

따라서 본 과제에서 사용된 Abnormal 롤셀강재(M재)는 선행연구에 사용된 Abnormal 롤셀강재와 유사한 재료를 사용하였음을 알 수 있다.

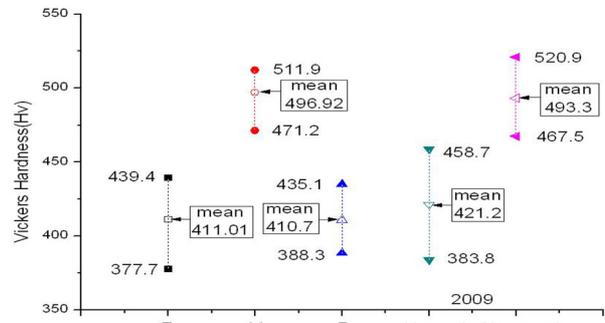


Fig. 7 Relation of Vickers hardness to 5 kinds of specimens; the France-made (F), Abnormal RSS (M), reheated specimen from abnormal RSS (R), the abnormal RSS of the proceeding study and the normal RSS of the proceeding study

3.3.3 R재와 선행연구 Normal 롤셀강재의 경도치의 비교

Fig. 7에는 M재를 재열처리한 R재와 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재들의 경도치의 Scatter band를 각각 도시하여 나타내었다.

이 그림에서 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재들의 경도치(최고치 458.7, 최저치 383.8)는 Scatter band가 다소 심하였고, 그 경도치(12개의 시험편으로 평균)는 421.2 정도이며 R재의 비커스 경도치 410.7에 비하여 2.6%로 거의 차가 없다.

따라서 본 과제에서 사용된 M재를 재열처리한 R재는 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재들에 비하여 유사한 비커스 경도 특성을 가졌다. 즉 비커스 경도특성에서도 M재를 선행연구의 결과에서 나타난 재열처리조건으로 잘 선택, 실시하면 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재에 손색이 없는 경도가 양호한 롤셀강을 얻을 수 있다고 사료된다.

3.3.4 S25C재와 선행연구 S25C재의 비커스 경도치의 비교

본 과제에서 사용된 S25C재의 비커스 경도치의 평균치는 230.3이며 선행연구에 사용된 S25C강재들의 비커스 경도치의 평균치는 232.1로 서로 거의 같은 값으로 같은 재질을 사용하고 있음을 알 수 있었다.

3.4 Drop Weight식과 Charpy 충격식과의 충격치 결과 비교

Fig. 8의 횡축은 전통적인 충격시험기 Charpy impact tester로 얻은 충격에너지(Jch)와 종축에는 새로이 개발되어 본 연구에 많이 사용한 Drop weight impact testing M/C (Instron Dynaup 9250HV)으로 얻은 충격에너지(Jdw)와의 연관성을 비교한 것이다. 여기에는 F로 표시한 외산 롤셀강재, Abnormal 롤셀강재(M재), M재를 재열처리한 R재 그리고 선행연구에 얻어진 실험결과들을

모두 정리한 것이다. 이 그림에서 두 시험기에서 얻어지는 충격치(J)은 매우 좋은 상관관계를 나타내고 있다.

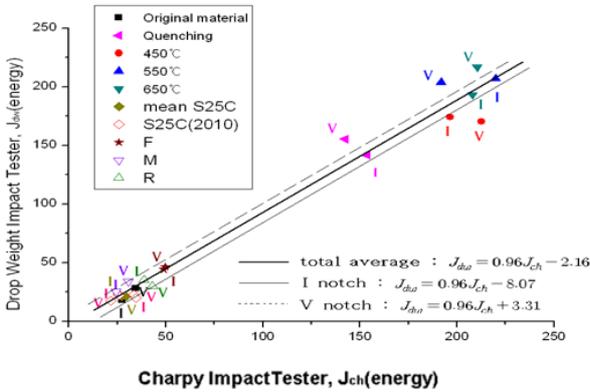


Fig. 8 Relation between drop weight (DW) and charpy type impact energy among all kinds of specimens

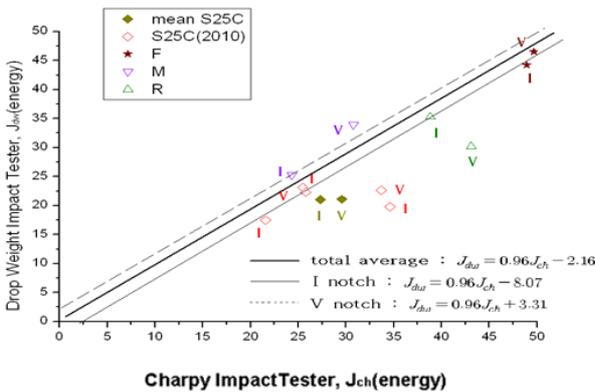


Fig. 9 Relation between DW and charpy type impact energy under 50J of Fig. 8

Fig. 9는 Fig. 8에서 충격치가 50J 이하인 영역을 확대하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 별표는 외산 F재의 충격치, 삼각형으로 표시한 것이 국산 Abnormal 롤셀강재를 재열처리한 R재의 충격치로 F재보다 많이 떨어짐을 나타낸다. 또 국산 Abnormal 롤셀강 M재는 역삼각형으로 표시하였지만 충격치의 scatter가 크고 그 값이 저하함을 알 수 있다. 나머지 마름모형으로 표시된 S25C강재는 선행연구 것과 이번 실험에 사용된 것이 서로 비슷한 충격치를 나타내어 본 연구의 실험이 잘 진행되었음을 확인 할 수 있다.

Fig. 8에서 전통적인 충격 표준시험편인 V형 노치(R=0.25mm) 보다 2배로 예민한 I형 노치(R=0.125mm)인 경우는 대체로 낮은 충격치에서 파절되는 경향이 우세하였다. 특히 충격저항이 낮은 시료 M재와 선행연구 국산 Abnormal 롤셀강재에서는 V형 노치보다 I형 노치에 보다 예민함을 알 수 있었다.

각 노치의 종류에 따라 두 시험기 사이의 충격치에 대한 연관 관계를 세 가지 식으로 나타낼 수 있었다. 특히 V형 노치보다는 I형 노치의 자료가 선형성이 매우 좋았으며, 이는 노치가 예민하므로 시험결과의 산포도가 적게 되기 때문이다. 이 결과는 선행연구결과와 잘 일치하였다(서창민 등 2011).

평균 충격치 : $J_{dw} = 0.96 J_{ch} - 2.16$

I 형 노치 : $J_{dw} = 0.96 J_{ch} - 8.07$

V 형 노치 : $J_{dw} = 0.96 J_{ch} + 3.31$

3.5. SEM 파면 관찰

3.5.1 외산 롤셀강재 F3의 Drop weight impact 파면

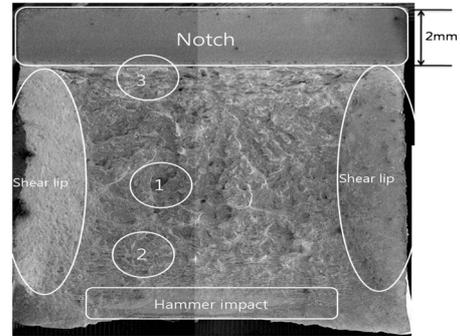


Fig. 10 DW impact fracture surface of the France-made (F3)

Fig. 10은 외산 롤셀강재 F3재의 DW 충격파면의 예이다. 이 그림은 20배의 저배율 SEM사진 6장을 합성시킨 것이다. 충격 에너지가 작용하므로 V형 노치의 끝단에서 균열이 형성 전파되면서 칼날(Knife edge)이 닿는 해머 타격부(Hammer impact region)는 큰 소성변형을 일으키며 충격시편의 양끝에서 shear lip이 크게 형성된 것이 관찰되었고 가운데 부분은 굴곡이 심한 파면을 나타냈다.

Fig. 11은 Fig. 10의 ①부분과 ②부분을 각각 확대한 사진이다. Fig. 11(a)는 ①부분의 500배 확대 사진으로 인성이 많은 파면을 나타내었고, Fig. 11(b)는 그림(a)의 중앙 부분을 3000배 확대한 사진으로 약 1.1, 1.8μm의 미세한 덩플(Dimple)이 부분적으로 많이 형성되어 있다.

Fig. 11(c)는 Fig. 10의 ②부분을 500배 확대 사진으로, Fig. 11(a)보다 큰 11, 12μm 크기인 덩플이 많이 관찰되어 큰 소성변형이 형성됨을 알 수 있다. Fig. 11(d)는 Fig. 10의 ③부분을 3000배로 확대한 경우이다. 즉 I형 노치 끝단에 균열이 충격하중에 의하여 파괴 개시부인 초기형상을 나타내는데 3μm 이하의 작은 덩플이 많이 형성된 연성파면을 잘 나타내었다.

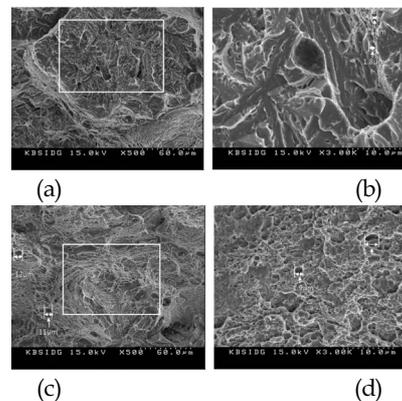


Fig. 11 Enlarged pictures of the marked area of Fig. 10

3.5.2 M1과 재열처리한 R1의 파면 특징

Abnormal 롤셀강재 M1의 DW 충격파단면을 500배 확대한 SEM관찰에서 M1재의 가운데 부분은 취성파괴의 특징인 벽개 파면이 주로 나타났고 뒀플이 관찰되는 영역이 매우 드물게 나타났다. 그러나 Abnormal 롤셀강재를 재열처리한 R1 (Fig. 12(b))의 DW 파단면을 500배 확대한 사진관찰에서 파면양상은 전체적으로 M1보다 뒀플 파면이 많이 형성되어 파괴인성이 증가된 단면이 형성되었다.

3.5.3 외산 F3와 Abnormal 강재를 재열처리한 R1의 파면비교

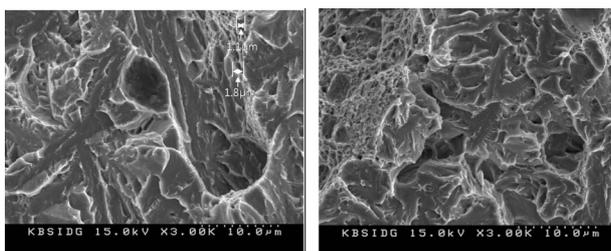
Fig. 12는 외산 F3재와 R1의 DW 충격파면의 예를 비교한 것이다. Fig. 12(a)는 F3재의 3000배 사진으로 미세한 뒀플(Dimple)이 부분적으로 형성되어 있어 연성파면을 잘 나타내고 있다.

Fig. 12(b)는 Abnormal강재를 재열처리한 R1의 DW 파단면을 3000배 확대한 사진으로 파면양상은 전체적으로 뒀플 파면을 나타내었다. 즉 R1재와 F3재는 뒀플이 많이 형성된 연성파면을 각각 나타내어 충격치가 높게 형성된 것으로 판단된다.

3.5.4 M1재/C1재와 R1재/ 선행연구 N 롤셀강재의 파면비교

Abnormal M1재와 선행연구 Abnormal C1재의 충격파단면은 미시적인 SEM관찰에서 서로 비슷한 파면양상을 나타내었다. 특히 중앙 부분을 3000배 확대한 사진에서 모두 균열진전이 쉽게 전파된 매끈한 파면을 형성하고 있으며 벽개파면을 나타내었고 충격치가 낮은 파괴특성이 유사함을 알 수 있었다.

R1재와 선행연구 Normal강재의 DW 파단면은 SEM관찰에서 전체적으로 뒀플 파면을 나타내었지만 3000배의 큰 배율의 파면에서는 파괴인성이 작은 취성을 나타내는 벽개파면과 연성파면을 부분적으로 나타내었다. 이러한 미시적인 SEM관찰에서 R재와 선행연구 Normal강재는 충격파면이 매우 유사함을 나타내기 때문에 Abnormal 롤셀강재를 선행연구에서 제안한 적절한 재열처리 조건으로 처리하면 충격치가 증가함을 확인 할 수 있었다.



(a) France-made (F3) (b) Reheated specimen (R1)

Fig. 12 DW impact fracture surface between France-made (F3) and reheated specimen from the abnormal RSS (R1)

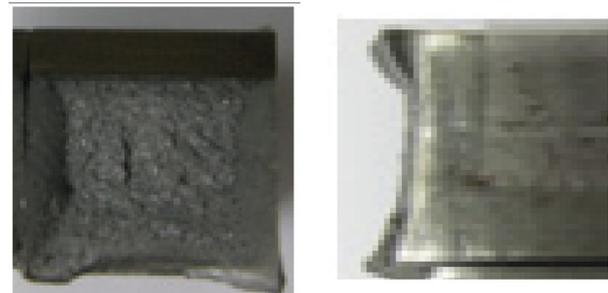
3.6 거시적인 파면 관찰

3.6.1 충격식 롤셀강의 거시적인 파단면

Charpy식 충격파단된 충격시험편은 V형과 I형의 경우에 관계없이 충격헤머가 타격을 가하는 곳에는 약간의 소성변형을 수반하고 있었다. 이 소성변형은 양질의 Normal 국산 롤셀강의 충격단면과 유사하였고 Abnormal 국산 롤셀강의 충격단면보다

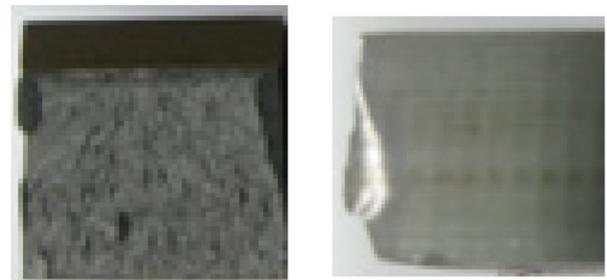
큰 경향을 나타내었다.

Fig. 13은 DW식 충격파단된 F1시험편의 (a)는 파면을 (b)는 측면을 촬영한 것이다. 이 시험편은 46.51J의 충격저항치가 큰 경우이므로 (b)의 측면사진처럼 1.75mm의 Shear lip이 좌우로 형성되었음을 알 수 있다. 또 충격헤머가 타격을 가하는 곳은 4.5%의 소성변형이 생겼다. 이것은 Abnormal 롤셀강을 650°C에서 템퍼링한 경우 거시적인 파면에서 충격 칼날이 접촉하는 곳은 노치부에 비하여 22% 소성변형하였고, 폭도 12.7% 변형한 것에 비하면 매우 적은 값이다(서창민 등 2011).



(a) front view (b) side view

Fig. 13 Macroscopic observation of DW impact fracture surface of France-made (F1)



(a) front view (b) side view

Fig. 14 Macroscopic observation of DW impact fracture surface of the abnormal Roll Shell (M1)

Fig. 14는 DW식 파단된 Abnormal 롤셀강재 M1시험편의 파면을 (a), (b)는 측면을 나타낸 것이다. 이 시험편은 33.99J의 충격저항치의 경우로 Fig. 13(b)의 측면사진과 달리 shear lip이 적게 형성되었음을 알 수 있다. 또 충격헤머가 타격을 가한 곳의 소성변형도 적게 생겼다. 따라서 Fig. 13의 F1(V형)의 46.51J의 충격저항치에 비하면 26.92% 감소하였다.

3.6.2 충격시험편의 거시적인 관찰(DW와 Charpy식 S25C강의 파단면)

이러한 거시적인 파면관찰에서 V형시험편의 경우가 I형보다 롤셀강은 shear lip가 크게 형성된 것이 높은 충격치를 나타내었고 충격헤머가 타격을 가하는 곳에는 소성변형을 수반하였다. 이 소성변형은 양질의 Normal 국산 롤셀강 충격단면과 유사하였고 Abnormal 국산 롤셀강의 충격단면보다 큰 경향이 있었다. 또 충격시험방식에 관계없이 shear lip이 잘 형성되어야 높은 충격

저항치를 갖게 됨을 파면관찰에서 알 수 있었다.

4. 결 론

(1) 외산 롤셀강(F재)의 충격에너지(J)는 선행연구인 국산 Normal 롤셀강재(2A, 3A)보다 크지만, 두 종류의 충격에너지와 충격시간의 곡선은 매우 유사하였다. 또한 노치형상효과(V형, I형)의 영향도 적은 편이었다. 재열처리한 R재의 평균치는 Abnormal M재의 평균치보다 10.5% 정도 증가하였지만 양질의 외산재보다 충격치가 낮았다. 즉 외산 F재의 평균충격치는 47.35J로 제일 높았고, 재열처리한 R재의 평균충격치는 36.87J, Abnormal M재의 평균충격치는 28.61J로 제일 낮았다.

(2) 충격저항이 낮은 Abnormal시료 M재에서는 V형 노치보다 I형 노치에 매우 예민함을 알 수 있었고, 충격저항이 높은 시료(F재, 재열처리한 R재 및 S25C강)에서는 노치형상의 영향이 매우 적었다. 또 M재와 선행연구에 사용된 Abnormal 롤셀강재들의 그림은 충격에너지가 낮기 때문에 다른 시험편(F재, R재 S25C재)과 달리 충격에너지 곡선의 면적이 급하게 감소하는 형태를 나타내었다. Charpy식은 이러한 충격시간에 따른 충격치와의 변화를 비교할 수 없어 취약한 재질을 판단하기가 불가능하였다.

(3) 본 과제에서 사용된 M재를 재열처리한 R재는 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재들에 비하여 유사한 충격특성을 나타내었다. 즉 M재를 선행연구의 결과에서 나타난 재열처리조건을 잘 선택, 실시하면 선행연구에 사용된 Normal 강재와 같은 인성이 양호한 롤셀강을 얻을 수 있다고 사료된다.

(4) 3가지의 재료에 관한 비커스 경도치의 특성은 충격치가 가장 큰 양질의 F재는 재열처리한 R재와 유사한 값을 나타내었고, M재는 가장 큰 비커스 경도이지만 충격치가 가장 적어 경도치로 인성을 평가함은 불가능함을 알 수 있었다. M재는 평균 비커스 경도치 496.92로 제일 높았고, F재는 평균 비커스 경도치 411.01, R재는 평균 경도치 410.7로 서로 같았다.

(5) 본 과제에서 사용된 M재를 재열처리한 R재는 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재들에 비하여 유사한 비커스 경도특성을 가졌다. 즉 비커스 경도특성에서도 M재를 선행연구의 결과에서 나타난 재열처리조건을 잘 선택, 실시하면 선행연구에 사용된 Normal 롤셀강재와 같은 수준의 롤셀강을 얻을 수 있다고 사료된다.

(6) SEM사진에 의한 미시적인 파면관찰에서 외산 F3재는 미세한 덩플이 매우 많이 형성되어 연성파면을 잘 나타내었고,

M1재는 균열진전이 쉽게 전파될 때까진 파면인 벽개파면을 나타내어 충격치가 낮은 파괴특성을 관찰할 수 있었다. 또 재열처리한 R1의 파면양상은 전체적으로 덩플파면을 나타내었지만 큰 배율의 파면에서는 파괴인성이 작은 취성을 나타내는 벽개파면을 부분적으로 나타내었다.

(7) 충격시험방식(Drop weight식과 Charpy식)에 관계없이 Shear lip이 좌우로 크게 잘 형성되어야 높은 충격저항치를 갖게 됨을 파면관찰에서 잘 알 수 있었다. 그러나 M3는 Shear lip이 부분적으로 적게 형성되었고, 재열처리한 R1시험편과 선행연구인 국산 Normal 롤셀강재(2A & 3A)는 F1재처럼 Shear lip이 좌우로 크게 잘 형성되었다.

후 기

본 연구에서 두 번째 저자는 과기부의 한국연구재단(NRF, 2010-0028287)의 지원을 받아 감사드리며, 전자현미경 관찰은 기초과학연구소의 장비(SEM, Hitachi S-4200, KBSI, Daegu)를 사용하였다.

참 고 문 헌

- 서창민, 서민수, 조해용 (2011) "압연롤강의 취성파괴 방지를 위한 열처리 온도에 따른 충격치 변화에 관한 연구(I)", 한국해양공학회 제 25권 제 5호, pp 33~39.
- 신동진 (1996) "조선용 A grade 강재의 Charpy 충격특성에 관한 연구", 대한용접학회 특별강연 및 학술발표대회 개요집, Vol 2, pp 85-88.
- 우창기, 강동명, 이하성 (1999) "유효 산정을 위한 샤피 충격시험편의 노치형상에 관한 연구", 한국자동차공학회 논문집, Vol 7-6, pp 135~143.
- 한국 공업규격 KS B(0809, 0801, 5522, 5544)
- Strnadel, B. and Hausild, P. (2008). "Statistical Scatter in the Fracture Toughness and Charpy Impact Energy of Pearlitic Steel", Materials Science and Engineering, Vol A-486, pp 208-214.

2011년 8월 4일 원고 접수

2011년 9월 16일 심사 완료

2011년 10월 17일 게재 확정