

쇼트피닝 가공을 통한 스프링강의 부식거동에 관한 연구

안재필[†] · 박경동^{*}

A Study on Corrosive Behavior of Spring Steel by Shot-Peening Process

Jaepil An, Keyungdong Park

Key Words: Shot Peening(쇼트피닝), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Corrosion(부식), Immersion Test(침지시험), Polarization Curve(분극곡선), Weight Loss(무게감소), Corrosion Potential(부식전위)

Abstract

Recently, the request for the high strength of material is more and more increased in the area of industrial environment and machinery. To accomplish the high strength of materials, carbonizing treatment, nitrifying treatment, shot-peening method are representatively applied. however, shot-peening method is generally used among the surface processes. Shot peening is a cold working process used to impact Compressive residual stresses in the exposed surface layers. Benefits due to shot peening are increase in resistance to fatigue, stress corrosion cracking, fretting, galling, erosion and closing of pores. In this study, the influence of shot peening on the corrosion was investigated on spring steel immersed in 3.5% NaCl. The immersion test was performed on the two kinds of specimens. Corrosion potential, polarization curve, residual stress and etc. were investigated from experimental results. From test results, the effect of shot peening on the corrosion was evaluated. The important results of the experimental study on the effects of shot peened on the environment corrosion of spring steels are as follows;

In case of corrosion potential, shot peened specimen shows more activated negative direction as compared with parent metal. Surface of specimen, which is treated with the shot peened, is placed as more activated state against inner base metal. It can cause the anti-corrosion effect on the base metal.

1. 서론

최근 자동차, 선박, 철도차량, 항공기 등과 같은 교통수단에 쓰이는 각 부품은 경량화를 요구하고 있고, 가혹한 부식환경조건 등에서의 사용빈도가 점차 증가되어가고 있는 추세이다. 이에 기계재

료도 내식성, 내열성, 고인성 및 고강도 등이 요구되고 있는 것이 현 실정이다. 그러나 부식이나 안전성 때문에 고가의 내식성 재료를 사용하거나 필요이상의 고강도 재료를 사용함으로써 경제적인 측면에서 많은 문제점을 갖고 있다. 따라서 경제적인 절약과 고강도화를 실현하기 위한 방법으로 쇼트피닝 가공에 의한 방법이 널리 쓰이고 있다. 왜냐하면 쇼트피닝 기술은 특수가공기술로서 경량화, 고강도화를 통하여 에너지 절약을 꾀할 수 있어 청정기술로 적용될 수 있고 매우 고부가적인 산업이기 때문이다. 쇼트피닝에 의해 생성된 압축잔류응력은 피로강도에 큰 영향을 미치며, 이와 관련된 연구가 많이 행하여져 오고

[†] 부경대학교 기계공학부

E-mail : ajp238@lycso.co.kr

TEL : (051)620-1592 FAX : (051)620-1592

^{*} 부경대학교 기계공학부

있다. 쇼트피닝 가공에 의한 효과는 응력부식저항에도 탁월한 효과가 있음이 연구되어지고 있고,^(1,2) 부식환경하에서도 피로수명이 증가가 된다는 보고가 있다.⁽³⁻⁶⁾ 하지만 아직 쇼트피닝에 따른 부식생성기구와 관련된 연구는 아직 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 자동차 현가장치의 부품 중 하나인 현가용 스프링에 사용되는 스프링강에 쇼트피닝을 실시하여 부식환경하에서 어떠한 부식특성을 나타내는지 조사함으로써 부식생성기구와 압축잔류응력과 관계를 규명하고자 하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 이용된 재료는 자동차 및 철도차량의 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 그 화학성분을 Table 1에 표시하였고, 시험편의 기계적 성질을 Table 2에 표시하였다.

이 기계적 성질은 열처리 한 후의 결과이며, Fig. 1과 같은 조건으로 연속식 가스로에서 970℃, 유지시간은 20분간 가열한 후 퀴징오일 40℃~80℃에서 5분간 담금질을 실시한 다음 다시 연속식 뜨임로에서 490℃로 80분간 유지하는 템퍼링을 하였다. 경도는 표면으로부터 100 μm 깊이의 로크웰 경도값(Ball diameter. : 10 mm, 하중: 3000 kg)이다.

Table 1 Chemical compositions of SUP-9 spring steels [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
JISG SUP-9	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88	-

Table 2 Mechanical properties of SUP-9 spring steels after heat treatment

Materials	Tensile strength (MPa)	Hardness (HRc)		Elongation (%)
		After quenching	After tempering	
SUP-9	1350	57	44	9.4

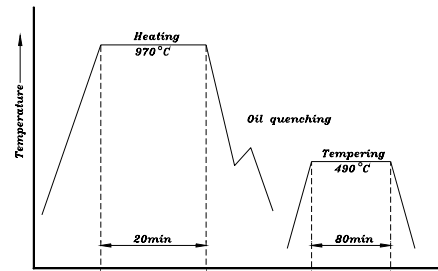


Fig. 1 Condition of heat-treatment

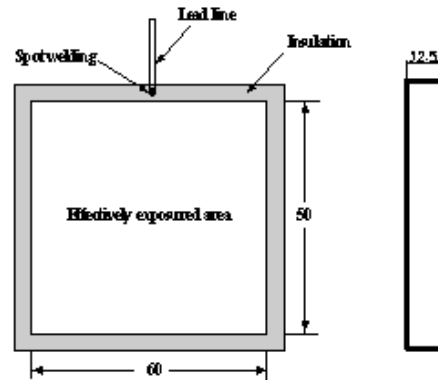


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

침지시험에 사용된 시험편은 50 x 60 x 12.5mm의 평판으로 하였고, 연피닝(unpeened), 쇼트피닝(shot peened) 것으로 두 가지 종류로 하였다. 또한 부식전위를 측정하기 위해 Spot용접을 실시하였다. 이상과 같은 조건으로 제작된 시험편의 형상과 치수를 나타낸 그림이 Fig. 2이다.

2.2 압축잔류응력

시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 판스프링 제조용 쇼트피닝기를 이용하여 스프링강에 1단 쇼트피닝(1 stage shot peening)을 실시하였다. 또한 시험편 표면 전체에 균일한 쇼트피닝 가공면을 얻기 위해 양면을 쇼트피닝 하였다. 쇼트피닝 가공은 Table 3과 같은 조건하에서 실시하였다.⁽⁷⁾

2.3 실험장치 및 방법

침지시험에 있어서 시험편은 모두 표면을 #100~2000까지의 에머리페이퍼로 경면연마를 실시한 후 아세톤으로 탈지시켰다. 또한 유효노출면적 50x60mm를 제외한 나머지 부분은 부식의 영

향을 받지 않도록 하기 위해 실리콘 수지로써 피복절연 시켰다.

부식용액으로는 용존산소를 제거하지 않은 3.5% NaCl수용액(pH 8)을 사용하여 매 24시간마다 1회씩 부식전위와 부식전류를 측정하였고, 교체는 7일 간격으로 교체하였으며, 시험기간은 7, 14, 30, 60일의 4가지로 하였다. 무게감소량은 시험완료 후 측정하였다.

분극시험에 있어서는 비과과적이고, 실험시간이 짧아 많이 이용되는 양극분극(Potentiodynamic Polarization) 시험을 실시하였다. 분극실험장치는 분극측정기(EG&G273A potentiostat/Galvanostat)와 PC를 이용하여 부식소프트웨어(corrosion software)에 의해 분극측정을 하였다. 분극측정기의 기준전극(reference electrode)으로는 포화칼로멜 전극(saturated calomel electrode, SCE)을, 상대전극(counter electrode)으로는 2개의 고밀도 탄소봉을 사용하였으며, 주사속도(scan rate)는 0.167 mV/sec로 하였다. 분극시험은 시험편의 유효노출면적을 10 x 10 mm로 하여 표면을 정면연마 시킨 후 아세톤으로 탈지하여 Fig. 3의 분극시험장치에 배선하였다. 또한, 쇼트피닝에 의한 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위하여 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKN-MASF2M)를 이용하였다. 깊이방향의 잔류응력을 측정하기 위하여 전해연마기로

Table 3 Conditions of shot peened

Impeller Diameter (mm)	Shot Velocity (rpm)	Shot Ball Diameter (mm)	Arc Height (mm)	Cover-age (%)
490	2200	0.8	0.375	85

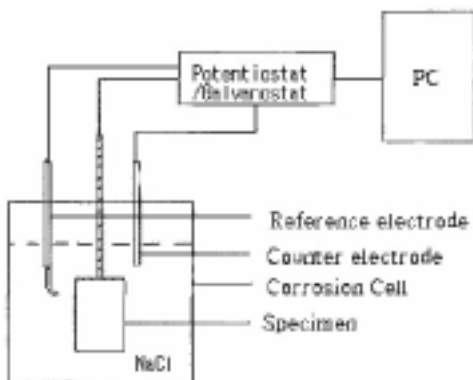


Fig. 3 Schematic diagram of polarization test equipment

Table 4 Measuring Condition of Residual Stress

X-Ray Diffraction	Condition	
X-Ray Source	Target	Cr-V
	Voltage	30kV
Ø	Current	10mA
	2θ	0°, 15°, 30°, 45°
2θ	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

시험편의 측정부위를 10~20µm 단위로 연마해 가면서 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력 측정계산 방법은 2θ-sin2ψ법을 이용하였으며, 잔류응력의 측정조건은 Table 4와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축잔류응력의 양상

Fig. 4는 스프링강에 쇼트피닝 가공한 시험편(shot peened)의 침지시험 전과 60일 침지시험 후의 압축잔류응력의 값의 변화를 나타내었다. 침지시험 전의 경우 시험편의 표면으로부터 내측 0.13mm에 657.05MPa의 최대 압축잔류응력값을 나타내었으며, 점차 감소하여 표면으로부터 내측 0.3mm까지 압축잔류응력이 분포되어 있었음을 알 수 있다. 침지시험 후의 결과는 최대 압축잔류응력값이 시험편 표면 내측으로 0.115mm에 630.00MPa값이 분포되었다. 그 이후의 값은 부식전과 동일하게 감소하다 0.3mm까지 압축잔류응력이 분포되었다. 즉 시험편의 부식전후를 정리하면 부식전 최

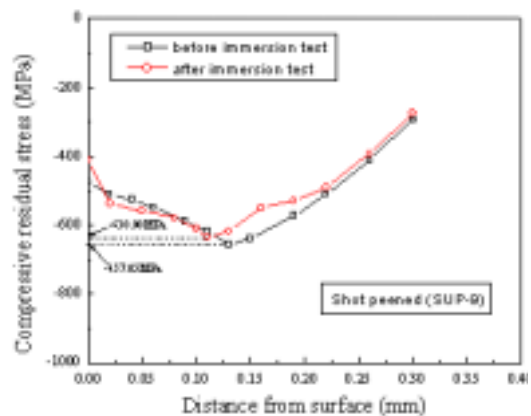


Fig. 4 Compressive residual stress distributions of shot peened SUP-9 steel before and after immersion test during 60 days

대깊이 0.13mm에서 657.05MPa이고, 부식 후 최대깊이 0.119 mm에서 630.00MPa 이다. 60일 동안 압축 잔류응력의 크기는 27.05MPa만큼 감소하고, 박리량은 0.011 mm 정도인 것을 알 수 있었다.

3.2 분극거동의 양상

Fig. 5는 두 시험편에서 얻은 분극곡선을 나타내며 Tafel외삽법¹⁸⁾을 이용하여 부식전위(E_{corr}) 및 부식전류밀도(I_{corr})를 구하였다. 연피닝 시험편(unpeened)은 부식전위와 부식전류가 -410 (mV)SCE 및 2.7×10^{-5} A/cm²을 나타내었고, 쇼트피닝 시험편(shot peened)은 부식전위가 -400 (mV)SCE이고 부식전류는 1.3×10^{-5} A/cm²을 나타내었다. 초기에는 3.5% NaCl의 용액에서 두 시험편 모두 비슷하나 Potential이 높아지면 연피닝 시험편이 더 많은 전류가 흐름을 알 수 있고, 또한 전체적으로 다소 불안정한 양상을 보이며 부동태의 양상이 나타나고 있다. 이는 3.5%의 NaCl을 함유한 용액에서는 Cl⁻ 이온의 영향에 의하여 부동태가 파괴되어지거나 철원소와의 직접적인 반응식 (1)과 같은 반응에 의해 전류가 증가된 것으로 보인다.



따라서 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 압축잔류응력이 모체의 보호층이나 부식피로 균열에 대한 저항력을 높여서 부식특성이 향상된 것으로 생각된다.

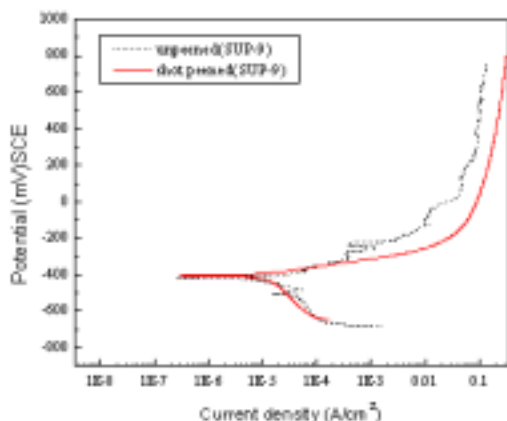


Fig. 5 Polarization curves of unpeened and shot peened specimens

3.3 부식전위의 변화

Fig. 6은 달기치리하지 않은 3.5% NaCl수용액에 60일 동안 침지시켜 매 24시간마다 한번씩 측정한 부식전위의 변화를 나타내고 있다.

연피닝 시험편의 경우 5일째부터 귀환방향(+측 방향)으로의 급속한 변화를 보이다가 다시 비환방향(-측 방향)으로의 이행하는 모습을 보여주고 있다. 이후 40일까지 비교적 전폭의 변화가 안정된 모습을 보여주고 있다. 반면에 쇼트피닝 시험편은 26일을 전후로 귀환방향에서 비환방향으로의 급속하게 이행하는 모습을 보여주고 있다. 여기서 귀환방향으로의 이행은 부식진행에 따른 산화피막의 형성으로 양분극이 증대로 인한 것이고, 비환방향으로의 이행은 이 피막이 떨어져 나감으로써 다시 부식이 활성화되어 나타난 것으로 생각된다.¹⁹⁾

3.4 무게감소량 및 부식속도

Fig. 7은 7, 14, 30, 60일 동안 침지시험을 실시하여 얻어진 무게감소량을 측정한 결과이다. 무게감소량은 시험전에 중량을 측정하고 시험 후 부식생성물을 완전히 제거한 후에 측정하였다.

전반적으로 무게감소량은 쇼트피닝 시험편이 덜 부식되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 쇼트피닝 시험편의 경우 시간이 경과할수록 무게감소량이 증가하는 현상이 나타났다. 이것은 시간의 경과와 더불어 쇼트피닝층이 용해되어져 내부로 갈수록 부식에 민감하게 반응하였기 때문으로 생각된다.

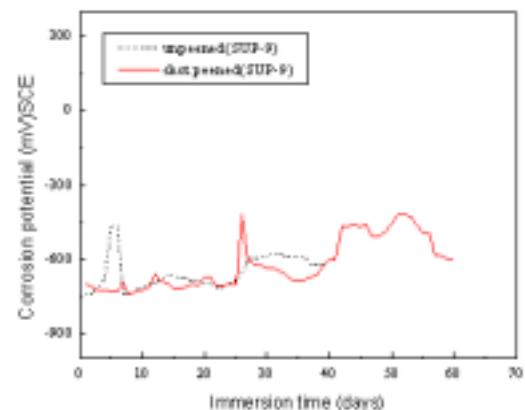


Fig. 6 Corrosion potential versus immersion time of unpeened and shot peened specimens as immersed in 3.5% NaCl

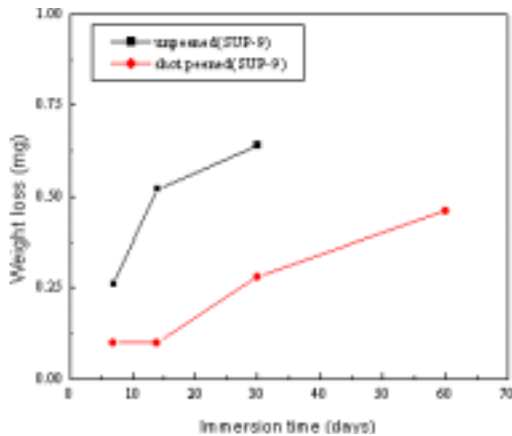


Fig. 7 Weight loss versus immersion time of unpeened and shot peened specimens as immersed in 3.5% NaCl

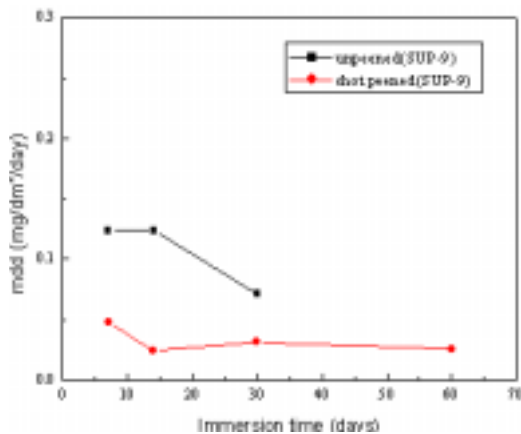


Fig. 8 Corrosion rate, mdd versus immersion time of unpeened and shot peened specimens as immersed in 3.5% NaCl

Fig. 8은 Fig. 7에 나타난 무게감소량을 부식속도로 나타낸 것이다. 종축에는 부식속도의 척도로서 mdd(mg/dm²/day)를 나타낸다. 전반적으로 쇼트피닝 시험편이 낮은 부식속도를 나타냈다. 연피닝 시험편의 경우는 무게감소량이 급격하게 증가했던 구간에서 부식속도가 높게 나타났고, 시간이 경과할수록 감소해가는 추세를 나타내었다. 반면에 쇼트피닝 시험편은 시간이 경과할수록 거의 일정한 값을 보이고 있다. 이상의 결과로부터, 쇼트피닝 시험편은 그렇지 않은 시험편에 비해 방식효과가 있다고 생각되며, 그것은 압축잔류응력의 영향 때문이라고 생각한다.

3.5 부식표면

Fig. 9-11은 7, 14, 30일 동안 침지시험 후 부식 표면을 SEM 촬영한 사진을 나타내고 있다. 쇼트피닝 시험편과 연피닝 시험편의 비교에서 초기에는 쇼트피닝의 경우가 표면의 요철로 인해 표면 부식정도가 약간 증가하나 시간이 경과할수록 연피닝 시험편의 표면부식정도가 쇼트피닝에 비해 크게 증가하고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 중량감소량의 증가경향과 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 쇼트피닝시 표면에 요철이 형성되지만 유효한 압축 응력장의 효과로 인해 거침의 부정적인 면이 상쇄되어 부식에 덜 민감한 것으로 생각된다.

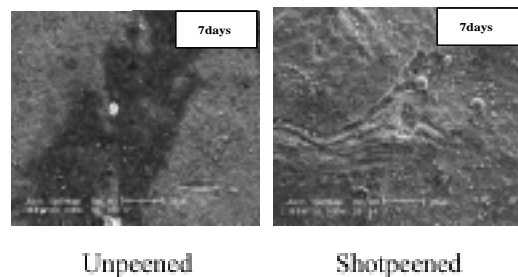


Fig. 9 SEM photographs of corroded surface for 7days

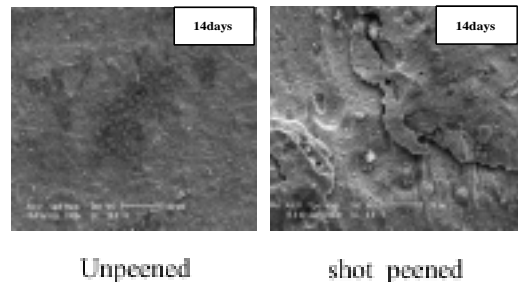


Fig. 10 SEM photographs of corroded surface for 14days

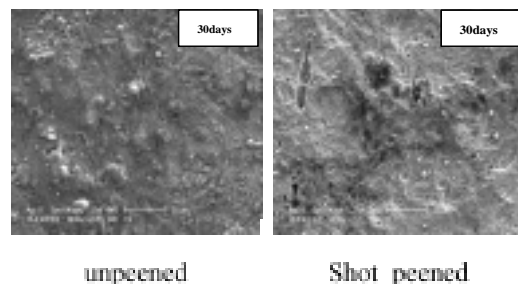


Fig. 11 SEM photographs of corroded surface for 30days

4. 결 론

연피닝 시험편과 쇼트피닝 시험편의 부식환경에 관한 실험을 하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 분극시험에 있어서 부식전위는 연피닝 시험편이 쇼트피닝 시험편보다 더 활성화된 (-)측 방향을 나타내었고, 부식전류는 쇼트피닝재가 연피닝재에 비해 더 낮은 전류값을 나타내었다. 이는 쇼트피닝에 의해 모재의 보호층이나 부식피로 균열에 대한 저항력을 높여 부식특성이 향상된 것으로 보인다.

2) 부식전위 변화에 있어서는 쇼트피닝재가 연피닝재보다 비환방향에서 귀환방향으로의 이행이 늦게 나타나서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 부식의 활성화를 억제하는 것으로 보인다.

3) 부식속도 및 무게감소량에 있어서는 쇼트피닝재가 연피닝재보다 낮은 수치를 나타내었다. 이는 압축잔류응력의 증가로 인해 부식에 대한 민감성이 감소하였기 때문으로 생각된다.

4) 침지시험후 부식표면을 SEM으로 촬영한 결과 시간이 경과할수록 연피닝재가 쇼트피닝재보다 부식피트가 많이 생성되어 표면부식정도가 증가하는 양상을 나타내었다. 여기에 결론을 입력하시오

참고문헌

- (1) Speidel, M. O., 1981 "Effect of Shot Peening on Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue", Proc. of the 1st International Conf. on Shot Peening, Vol 1, pp 625-635.
- (2) Koehler, W., 1984 "Influence of Shot Peening with Different Peening Materials on the Stress Corrosion and Corrosion Fatigue Behavior of a Welded AlZnMg-Alloy", Proc. of the 2nd International Conf. on Shot Peening, Vol 1, pp 126-132.

- (3) Park, C. J. and Kwon, H. S., 2002 "Effects of Aging at 475 °C on Corrosion Properties of Tungsten Containing Duplex Stainless Steels", Corrosion Science, 44, pp. 2817-2830.
- (4) Lim, Y. S. Kim, J. S. Ahn, S. J. Kwon, H. S. and Katata, Y., 2001 "The Influence of Microstructure and Nitrogen Alloying on Pitting Corrosion of Type 316L and 20 wt.% Mn-Substituted Type 316L Stainless Steels", Corrosion Science, 43, No. 1, pp. 53-68.
- (5) Kwon, H. S. Hehemann, R.F. and Troiano, A.R., 1992 "Critical Cracking Potentials of 26Cr-1Mo Ferritic Stainless Steels", Corrosion 48, pp. 838-845.
- (6) Li, Y. S. Niu, Y. and Wu, W. T., 2003 "Accelerated Corrosion of Pure Fe, Ni, Cr and several Fe-Based Alloys Induced by ZnCl₂KCl at 450 °C in Oxidizing Environment", Materials Science and Engineering A Volume 345, pp. 64-71.
- (7) Park, K. D. Jung, C. G. 2003 "The Effect of Compressive Residual Stresses of Two-stage Shot-peening for Fatigue life of Vehicle Spring Steel", Transactions of the KSAE, Vol.11, No.1, pp. 185-192.
- (8) Fontana, M. G. 1986 "Corrosion Engineering", 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- (9) Gibson, F. W. 1987 "Corrosion, Concrete, and Chlorides", ACISP 102, pp 13, 107, 155, 161.