

용사 코팅된 그레이트바의 고온 내마모 특성 평가

조희근^{*,#}, 안진효^{**}

^{*}안동대학교 기계교육과, ^{**}(주) 엑토엔지니어링

Evaluation of High Temperature Abrasion Resistance of Spray-Coated Grate Bar

Hee-Keun Cho^{*,#}, Jin-Hyo Ahn^{**}

^{*}Mechanical Engineering Education Department, Andong National Univ.,

^{**}Research Department, Extotechnology Co. Ltd.

(Received 3 September 2017; received in revised form 7 September 2017; accepted 15 September 2017)

ABSTRACT

The grate bar, a component used in steel mills, is used in harsh environments where external disturbances such as high temperature, abrasion, corrosion, and impacts are present. Therefore, in this study, spray-coating was performed on the most severely affected surface to extend the lifetime of the grate bar. The thermal and mechanical properties of the sprayed coated bars were investigated based on the performances under abrasion, thermal shock, tension, and sand blasting, and the microstructures by microscope. By analyzing the thermal and mechanical properties of the uncoated original grate bar and coated grate bar and comparing them with one another, the physical performance improvement of the coated grate bar can be verified.

Key Words : Grate Bar(그레이트바), Coating(코팅), Abrasion(마모), Thermal Shock(열충격)

1. 서 론

철강, 조선, 발전소, 자동차 및 일반 산업분야에서 사용되는 각종 부품들은 대부분 매우 가혹한 환경에서 사용된다. 다양한 조건의 외부환경이 부품의 수명에 영향을 미친다. 고온, 부식, 충격, 마모, 저온, 진동, 마찰 등 다양하고 복잡한 외부 간섭들이 부품에 직간접적으로 작용하여 부품의 수명을 단축시킨다. 이러한 가혹한 외부 환경에 대하여 부품의 내구성을 향상시키기 위한 많은 연구들이 진행되었다^[1-5].

가장 일반적으로 많이 적용되는 것이 표면 코팅을 통하여 내구성을 향상시키는 기술이다. 표면 코팅의 방법에는 다양한 기술, 재료, 방법이 있으나 산업분야에 적용되는 가장 일반적인 방법은 고온 플라즈마, 혹은 화염을 사용하여 코팅재료를 표면에 용착시키는 것이다. 이러한 방법을 통하여 부품 표면의 강도, 강성, 내열성 등 특정한 성능을 향상시켜 부품을 보호하고 수명을 연장시킨다^[6].

일관 제철소의 경우 원광인 철광석을 용광로에 주입하기 전까지 많은 전처리 과정이 필요하다. 이때 반드시 필요한 과정이 소결과정(sintering process)이다. 국내 일관제철소인 포스코, 현대제철의 경우 전부 드와이트-로이드(Dwight-Lloyd method) 소결방법을 사용하고 있다. 드와이트-로이드법의 소결과정에 사용되는 핵심 부품이 그레이트바(grate bar) 이

Corresponding Author : hkcho@anu.ac.kr

Tel: +82-54-820-5677, Fax: +82-54-820-6379

다. 그레이트바는 소결과정에 사용되는 부품이기 때문에 고온, 내마모, 충격, 부식 등의 환경에서 사용된다. 특히 최고 약 700°C 정도의 고온에 장시간 노출되어 사용되기 때문에 그레이트바의 표면은 크랙, 부식, 마모 등이 심하게 발생하며, 이것으로 인해 수명이 약 6개월에서 1년 정도로 비교적 짧은 편이다.

본 연구에서는 이러한 그레이트바의 수명연장을 위해 표면에 용사 코팅하였다. 용사 코팅된 그레이트바의 기계적, 열적 성능을 측정하였고 이 결과를 코팅되지 않은 그레이트바의 성능과 비교 하였다.

2. 소결 환경조건의 그레이트바

2.1 고온, 내마모 환경조건

그레이트바는 제철공장의 소결과정에 사용되는 부품으로써 Fig. 1에 나타낸 것과 같은 형태로 사용된다. 그레이트바의 상부에서 코크스와 철광석이 혼합되어 연소되기 때문에 최대 약 700°C의 고열에 접촉하게 된다. 뿐만 아니라 그레이트바의 아래에서는 10~15m/s의 풍속으로 바람을 흡입하고 있다. 이것은 철광석의 소결에 필요한 열원인 코크스의 연소를 촉진하기 위한 것이다.

그레이트바의 아래에서 바람을 흡입할 때 작은 사이즈의 모래알갱이들이 그레이트바의 표면에 충돌한다. 고온상태의 그레이트바에 충분한 산소가 공급되며, 동시에 작은 모래 입자들이 충돌하기 때문에 그레이트바의 상층 표면은 고온산화, 부식, 크랙 등이 발생하기 쉬운 조건이 된다.

실제 현장에서 그레이트바는 Fig. 2와 같이 대차의 형태로 사용된다. 3열로 구성된 수백 개의 그레이트바가 하나의 대차에 장착 되어 사용된다. 대차 위에서 코크스와 철광석이 혼합되어 연소 되면서 철광석이 소결된다. 노후화된 그레이트바는 일정한 주기로 검사되고 교체 된다.

Fig. 3은 사용되지 않은 그레이트바를 나타낸다. 그레이트바의 주 성분은 크롬(Cr)이며 약 28% 정도를 함유하고 있다. 크롬은 고강성, 내열강의 주원료로 사용되고 있는 금속 성분이다. 따라서 그레이트바는 고강성 및 내열강의 특성을 가지고 있다.

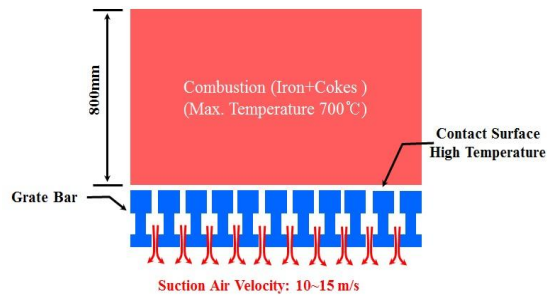


Fig. 1 Grate bar in iron sintering process^[7]



Fig. 2 Grate bar bogie in sintering process



Fig. 3 Grate bar

2.2 코팅 및 시편제작

그레이트바의 기계적, 열적 특성을 분석하기 위하여 실제 현장에서 사용되는 그레이트바를 가공하여 육면체의 시편을 제작하였다. 제작된 시편과 그레이트바의 표면에 코팅을 수행하여 그 물리적 특성을 분석하였다. 총 4 가지의 재료로 그레이트바의 상층 표면에 코팅을 하였다. 적용된 코팅은 Mo alloy, Ni-Cr alloy, Cr-Si alloy, Ni-WC alloy 이다.



Fig. 4 Coated grate bar with four materials

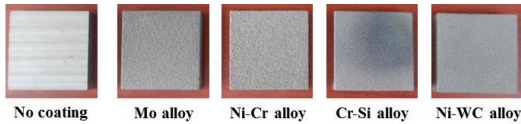


Fig. 5 Five test samples of grate bar

이렇게 코팅된 시편과 코팅되지 않은 순수한 그레이트바 시편의 기계적, 열적 특성을 상호 비교 분석 하였다. 내마모, 열충격, 조직현미경, 샌드블라스트, 열화 강도 시험 등을 수행하여 성능을 비교하였다.

내마모 시험, 열충격 시험 등을 수행하기 위해서 시험샘플을 Fig. 5에서 보는 바와 같이 40mm×40mm 로 가공을 하였다. 시편의 표면에 위에서 언급한 4 가지 재료를 사용하여 코팅을 하였고 이것을 코팅되지 않은 그레이트바의 시편과 동시에 동일한 조건에서 성능을 검증하였다.

3. 기계적 열적 성능시험

3.1 ASTM D3702 내마모 시험^[8-11]

그레이트바의 가장 취약한 특성 중의 하나가 마모와 부식이다. 이러한 취약한 특성을 보완하기 위하여 표면에 내마모 특성을 가지는 코팅을 수행하였다. 내마모 시험은 ASTM D3702의 시험 기준에 따라 수행 하였다. 마모시험은 크게 핀-디스크 형식과, 핀-볼 형식의 두 가지가 주로 사용된다. 본 연구에서는 핀-볼 형태의 마모시험기를 사용하여 마모시험을 하였다. Fig. 6는 마모시험을 위한 시험시편을 나타낸다. 시험 시편의 종류는 ① no coated grate bar, ② Mo alloy, ③ Ni-Cr alloy, ④ Cr-Si



Fig. 6 Test coupons for wear resistance test^[7]

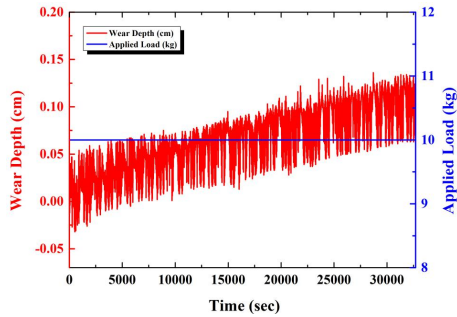


Fig. 7 Friction and wear test

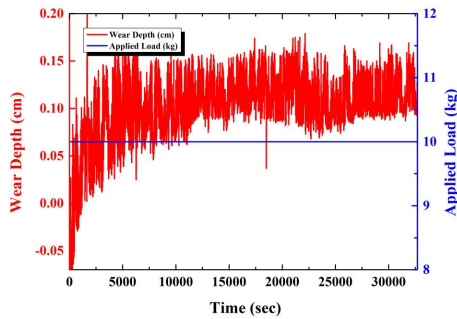
alloy, ⑤ Ni-WC alloy 이다.

내마모 시험은 외부의 마찰 및 충돌에 의해 표면의 마모 및 접촉량 등을 측정하는 시험이다. 내마모 특성은 표면의 경도와 매우 밀접한 관계가 있다. 마모는 두 물체가 접촉하면서 탈락, 접촉 등의 기제에 의해서 표면이 삭감되는 것이기 때문에 일반적으로 표면경도가 높을수록 내마모 성능이 우수하다.

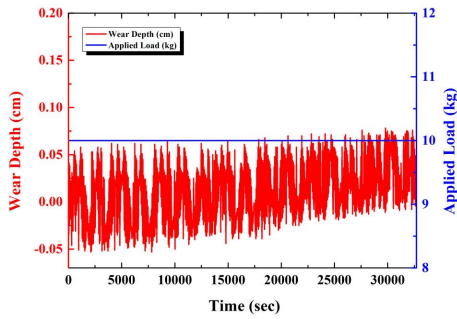
Fig. 7은 마모시험기를 나타낸다. 마모시험기로는 (주) 알앤비의 friction & wear tester 기를 사용하였다. 지르코늄 볼로 원판의 표면을 마모시키는 작용으로 마모 저항성을 측정하였다. 마모량은 마모된 깊이로 나타낸다. 깊이를 측정하여 마모에 대한 저항 특성을 수치화 하였다. 마모시험에서는 10kg의 하중으로 32,700 초 동안 시험을 수행하였다. 마모시험은 상온과 고온 시험이 있는데, 본 연구에서는 상온에서 시험을 하였다. 마모의 깊이는 실시간으로 마이크로미터로 측정을 하여 정량적인 디지털 숫자로 기록하였다. 외부 충격 혹은 마찰에 대한 마모의 정량적인 수치는 재료의 경도와 매우 밀접한 관계가 있다.



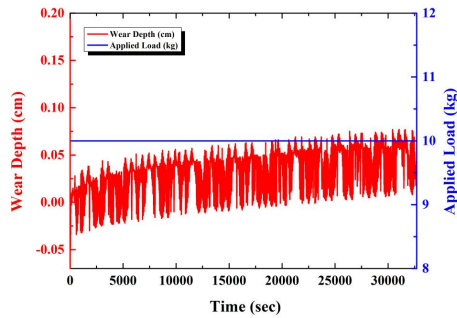
(a) Normal



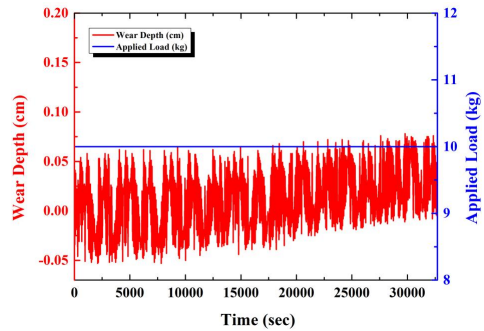
(b) Mo alloy



(c) Ni-Cr alloy



(d) Cr-Si alloy



(e) Ni-WC alloy

Fig. 8 Friction test results w.r.t. normal & four coated samples

Fig. 8은 마모시험 결과를 나타낸다. 마모시험의 결과를 시간에 대한 마모깊이로 나타내었다. 마모량인 마모깊이는 지르코늄 볼의 누르는 압력(하중)과 시험 시간에 의존한다. 총 5 종류의 시편에 대해서 시험을 수행한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 코팅되지 않은 그레이트바 시편의 경우에는 마모깊이가 최대 1.3mm 정도이며, Mo 합금이 코팅된 시편의 경우는 1.1mm, Ni-Cr 합금이 코팅된 경우는 0.7mm, Cr-Si 합금이 코팅된 경우는 0.6mm, Ni-WC 합금이 코팅된 경우는 0.4mm 정도로 나타났다. Fig. 8에 나타난 정량적인 수치로 마모의 성능을 판단할 때 가장 마모에 강한 코팅재는 Ni-WC 합금이다. 이것은 정량적인 수치로 볼 때 코팅되지 않은 시편에 비해서 약 3배 정도 마모에 더 강한 것으로 판단된다. Mo 합금의 경우 초기 마모량이 비교적 많이 발생하였고 시간이 지남에 따라 비교적 안정적으로 증가량이 완만한 것을 알 수 있다.

3.2 열충격

열충격 시험은 시편에 급격한 온도의 변화(열충격)를 가하였을 때 코팅재의 크랙이나 탈락현상을 관찰하기 위한 것으로서, 코팅층의 열에 대한 저항력을 확인하는 기본 방법 중의 하나이다. 열충격 시험은 $-40 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 의 heat-cycle을 일정한 시간 간격으로 반복 하면서 시험하였다. 시험조건은 Table 1에 나타난 바와 같이 $-40 \sim 125^{\circ}\text{C}$ 의 사이클을 1시간 간격으로 총 84회 반복 열충격을 가하였다.

Table 1 Thermal cycle profile (total 84 cycle)

Method	Segment	Temperature (°C)	Time (hr)
Heat-cycle	1	-40	1.0
	2	125	1.0



Fig. 9 Thermal shock test setup

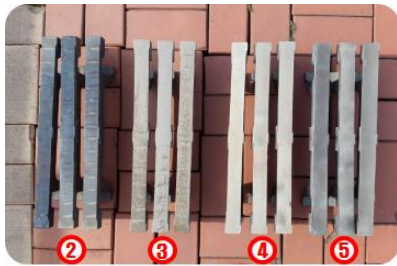


Fig. 10 The grate-bar status after thermal shock test

Fig. 9는 열충격시험을 위한 챔버이다. 열충격시험은 온도를 정확하게 제어할 수 있는 챔버에서 수행되었으며 온도의 편차는 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 정도 되는 기기에서 수행되었다. 열충격 시험은 앞에서 언급된 4 종류의 (② Mo alloy, ③ Ni-Cr alloy, ④ Cr-Si alloy, ⑤ Ni-WC alloy) 코팅된 그레이트바 시편에 대해서 수행되었다.

Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 몰리브덴 (Mo) 합금재로 코팅된 샘플의 경우에는 열 영향으로 인한 코팅재의 색갈이 변색되는 현상이 나타났다. 그렇지만 표면 코팅재의 탈락 및 강도에는 이상 현상이 발견되지 않았다. 따라서 시험된 4 종류

의 코팅재료는 열 충격시험에서 모두 우수한 특성을 나타냈다.

3.3 코팅 조직 현미경

코팅된 표면의 금속조직을 현미경으로 관찰하였다. 고배율의 현미경으로 표면을 관찰한 사진을 Fig. 11에 나타내었다. 코팅조직의 두께는 약 0.2mm 정도의 두께로 측정되었다. Mo alloy 코팅의 경우는 입자의 사이즈가 비교적 미세하고 균일한 표면을 나타내었다. 그러나 Cr-Si alloy, Ni-WC alloy의 경우는 용사 코팅된 조직이 상대적으로 거칠고 입자가 크게 형성되었다. 코팅 조직 현미경 검사를 위해서 시편을 절단하였고, 단면을 현미경으로 촬영하였다. 모재와 코팅재의 접촉부분은 대부분 접촉 기밀성이 높았다. 코팅의 조직 검사를 통한 코팅의 내구성 및 신뢰성을 확인할 수 있었다.

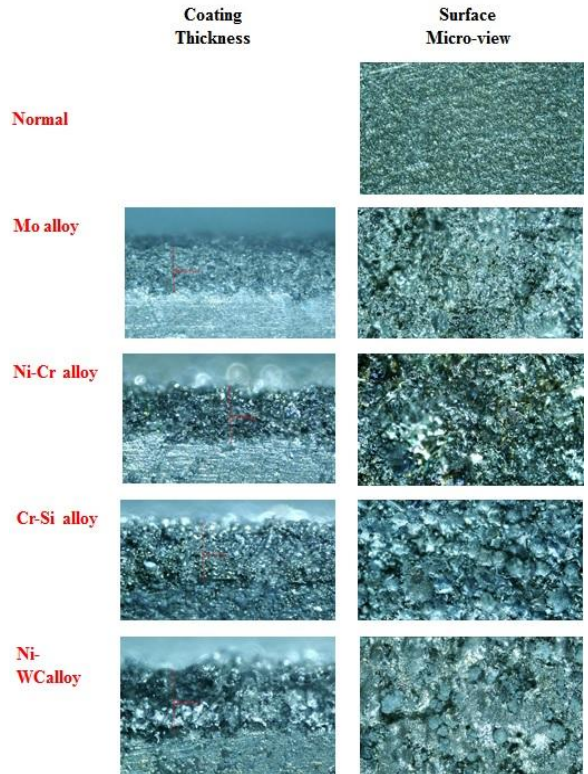


Fig. 11 Microscope picture of coated surface

3.4 샌드블라스트

그레이트바는 사용 중 표면이 작은 모래입자 알갱이가 충돌하여 손상을 받는다. 따라서 이와 유사한 방법으로 샌드블라스트 시험을 수행하였다. 샌드 블라스트 시험은 실제 그레이트바가 사용되는 현장의 조건에 비해 훨씬 가혹한 조건이다. 샌드 블라스트 시험에서 사용되는 샌드의 사이즈는 약 150 메쉬 정도로써 실제 현장의 메쉬 사이즈와 비슷한 사이즈이다. 대부분의 조건을 현장 사용조건과 비슷하게 적용하여 수행하였다. 샌드 블라스트 시험을 통하여 그레이트바의 표면에 코팅된 코팅층이 표면으로부터 탈락되는 정도를 관찰하고자 하였다. 또한 표면의 코팅층이 탈락되었으면 탈락된 면적의 사이즈를 정량적으로 측정하여 검토한다.

총 5 종류 시편에 대해서 샌드블라스트 시험을 수행하였다. ① normal (no coating), ② Mo alloy, ③ Ni-Cr alloy, ④ Cr-Si alloy, ⑤ Ni-WC alloy 코팅된 그레이트바에 대하여 샌드블라스트 시험한 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 샌드블라스트 시험에서는 동일한 속도, 동일한 시간, 동일한 메쉬 사이즈의 모래를 사용하여 시험을 수행하였다. 코팅되지 않은 그레이트바의 경우는 표면이 100% 완전히 삭마되었으며, Ni-WC alloy 코팅된 그레이트바는 코팅층이 거의 완벽하게 유지 되었다. 기타 코팅층의 경우에도 부분적으로 삭마된 부분은 있으나 대부분 코팅층이 없어지지지는 않았다.



Fig. 12 Figures before & after sandblast

3.5 열화에 따른 강도

그레이트바를 현장에서 오래 사용하면 열영향을 받아서 강도가 저하된다. 그레이트바에서 특히 열이 많이 받는 부분은 Fig. 13에 나타난 그림에서 up (상층부) 부분이다. 소결열을 직접적으로 많이 받는 up 부분과, 전도열을 받은 down 부분에 대한 강성을 비교 검토하기 위하여 각각의 부분에서 인장시험편을 가공하여 획득하였다.

1년 사용된 그레이트바의 상층부와 하층부 그리고 사용되지 않은 그레이트바의 온도에 따른 인장강도를 Fig. 14에 비교하여 나타내었다. 온도는 상온 20°C, 100°C, 200°C 세 부분에서 인장강도를 각각 측정하였다. 사용되지 않은 그레이트바의 시편은 상온에서 인장강도가 약 700MPa 정도, 200°C에서는 약 680MPa 정도로 나타났다. 그러나 사용된 그레이트바의 경우는 상온인 20°C에서, 상부가 약 540MPa, 하부가 약 590MPa 정도 이며, 고온인 200°C에서는 상부가 약 560MPa, 하부가 약 630MPa

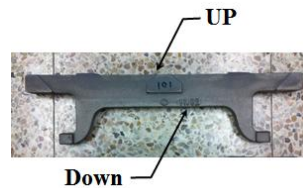


Fig. 13 Up & down part of grate bar

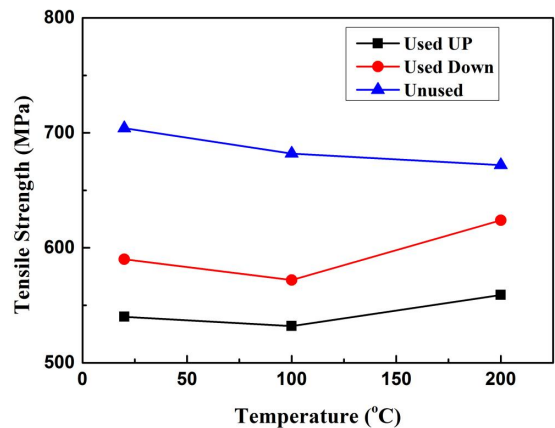


Fig. 14 Tensile strength of grate bar according to temperature

정도로 나타났다. 본 인장시험에서 특이한 현상은 사용된 그레이트바의 경우는 오히려 고온인 200℃에서 인장강도가 높게 나타났다. 이것은 장시간 고온에 노출됨으로써, 강의 조직이 변해서 생긴 현상이라고 추측된다. 또한 사용된 그레이트바 시편은 사용되지 않은 시편에 비해서 상당한 강도의 차이가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

제철공장의 소결과정에 사용되는 그레이트바에 대하여 수명연장을 위한 코팅을 수행하였다. 코팅된 그레이트바의 기계적, 열적 특성을 코팅되지 않은 그레이트바와 비교하여 제시하였다. 또한 사용된 그레이트바의 인장강도를 사용되지 않은 그레이트바의 인장강도와 비교 검토하였다.

1. 코팅된 그레이트바 시편의 내마모 시험에서는 Ni-WC alloy가 코팅된 시편이 최고 우수한 특성을 나타내었으며, 이것은 코팅되지 않은 시편에 비해 약 3배 정도 우수한 결과를 나타냈다.
2. 열충격 시험에서는 모든 코팅 층이 탈락 없이 비교적 우수한 특성을 나타냈다.
3. 샌드 블라스트 시험을 통한 코팅층의 성능은 코팅이 되지 않은 일반 시편에 비해서 매우 우수하였다.
4. 장시간 열에 노출된 그레이트바의 경우는 사용되지 않은 그레이트바에 비해서 인장강도가 상온에서 약 16% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

후 기

“본 연구는 미래창조과학부 2016년도 연구개발특구 육성사업(과제번호: ACC-2015-DGI-00546) 의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.”

REFERENCES

1. Wolf, W., Schulz, R., Savoie, S., Bolfarini, C., Kiminami, C. S. and Botta, W. J., “Structural Mechanical and Thermal Characterization of an

- Al-Co-Fe-Cr Alloy for Wear and Thermal Barrier Coating Applications,” *Surface & Coatings Technology*, Vol. 319, No. 15, pp. 241-248, 2017.
2. Kyaw, S., Jones, A., Jepson M. A. E., Hyde, T. and Thomson, R. C., “Effects of Three-Dimensional Coating Interfaces on Thermo-Mechanical Stresses Within Plasma Spray Thermal Barrier Coatings,” *Materials & Design*, Vol. 125, No. 5, pp. 189-204, 2017.
3. Bumgardner, C., Croom, B. and Li, X., “High-temperature Delamination Mechanisms of Thermal Barrier Coatings: in-situ Digital Image Correlation and Finite Element Analysis,” *Acta Materialia*, Vol. 128, No. 15, pp. 54-63, 2017.
4. Kim, D. J., Shin, I. H., Koo, J. M., Seok, C. S. and Kim, M. Y., “Evaluation on the Delamination Life of Isothermally Aged Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating,” *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 33, No. 2, pp. 162-168, 2009.
5. Gell, M., Xie, L. H., Jordan, E. P. and Padture, N., “Mechanisms of Spallation of Solution Precursor Plasma Spray Thermal Barrier Coatings,” *Journal of Surface and Coating Technology*, Vol. 188, pp. 101-106, 2004.
6. Jang, J. H., Xu, Z., Kim, H. J., Kim, N. K. and Lyu, S. K., “A Study on the Coating Characteristics of SCM415 Steel,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 10, No. 2, pp. 117-123, 2011.
7. Cho, H. K. and Ahn, J. H., “Evaluation of High-Temperature Oxidation, Corrosion and Wear Resistance of Top-Coated Grate Bar,” *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, in Press.
8. Lee, D. Y. and Kim, W. B., “A Study on Surface Roughness and Wear Characteristics in SCM420,” *Proc. of the KSMPE 2012 Fall Conference*, pp. 87, 2012.
9. Bolellili, G., Cannillo, V., Lusvardi, L. and

- Manfredini, T., "Wear Behavior of Thermally Sprayed Ceramic Oxide Coatings," *Journal of Wear*, Vol. 261, No. 11, pp. 1298-1315, 2006.
10. Jang, J. H., Kim, H. J., Kim, N. K., Zang, Q., and Lyu, S. K., "A Study on the Friction and Wear Characteristics of Cr-interrelatedness & WC/C Coating SCM415 Steel", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* , Vol. 8, No. 4, pp. 122-128, 2009.
11. Jang, J. H. etc., "A Study on the Friction and Wear Characteristics of TiAlN+WC/C Multilayer Coating of SCM415 Steel", *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers* , Vol. 9, No. 2, pp. 40-46, 2010.